

# عمرو محمد الفرم

## هيدروجيولوجيا الينابيع



عمرو محمد الفرخ

هيدروجيولوجيا الينابيع

هيدروجيولوجيا الينابيع

إشعار بحقوق الطبع والنشر:

يُمنح محتوى هذا الكتاب حق الاستخدام العادل للاستخدامات التعليمية غير الربحية وغير التجارية شريطة الإقرار الكامل بالمصدر (هذا الكتاب) والإشارات المحددة للأشكال والصور الفوتوغرافية وأي أجزاء من الكتاب لا يمكن نسخ أو نقل أو مشاركة الأشكال والصور الفوتوغرافية المحمية بحقوق الطبع والنشر، كما هو مذكور في التسميات التوضيحية، بأي شكل من الأشكال، سواء كانت رقمية أو مطبوعة أو بصرية أو غير ذلك، أو استخدامها في أي نظام لتخزين المعلومات واسترجاعها دون إذن كتابي من مالكي حقوق الطبع والنشر للأشكال والصور الفوتوغرافية الفردية كما هو مذكور. يمكن تنزيل ملف pdf للكتاب مجاناً من مواقع الويب المدرجة في الكتاب ويمكن إعادة نشره ومشاركته من قبل جميع المؤسسات التعليمية والأكاديمية وغير التجارية وغير الربحية.

©2025 دار الفاروق للطباعة والنشر

لا يجوز نسخ أي جزء من هذا الكتاب أو نقله أو مشاركته بأي شكل من الأشكال، رقمياً أو مطبوعاً أو بصرياً أو غير ذلك، أو استخدامه في أي نظام لتخزين المعلومات واسترجاعها من أجل الربح أو أي استخدامات تجارية دون إذن كتابي من الناشر والمؤلفين وأصحاب حقوق الطبع والنشر للأشكال والصور الفردية كما هو مذكور .

نُشر بواسطة دار الفاروق للطباعة والنشر ، جولة الجامعة، صنعاء، اليمن،

رقم الكتاب في مكتبة الهيئة العامة للموارد المائية : A3568

صورة الغلاف الأمامي: Dinko Stopić, Speleological Club Karlovac, Croatia

صورة الغلاف الخلفي: Late Dr. Gerald Seaburn, David Rhea, Global Underwater Explorers

## مقدمة

بسم الله الرحمن الرحيم والحمد لله رب العالمين، الذي جعل الماء أساس الحياة، وجعل منه كل شيء حي. والصلاة والسلام على سيدنا محمد، الذي أرسله الله رحمة للعالمين، وعلى آله وصحبه أجمعين.

فإن المياه هي عصب الحياة، وأساس استمراريته، ولا تُقاس أهميتها فقط بحاجتنا اليومية إليها، بل تتعدى ذلك إلى كونها موردًا طبيعيًا استراتيجيًا يحدد مستقبل المجتمعات والأمم. ومن بين مصادر المياه الطبيعية، تُعتبر الينابيع واحدة من أقدم وأهم المصادر التي اعتمد عليها الإنسان منذ فجر التاريخ. فهي ليست فقط مصدرًا للمياه العذبة، بل هي أيضًا أنظمة بيئية فريدة تساهم في الحفاظ على التوازن البيئي والتنوع الحيوي. يأتي هذا الكتاب ليسلط الضوء على إدارة واستدامة ينابيع المياه، ويقدم رؤية شاملة ومتكاملة حول كيفية الحفاظ على هذه الموارد الطبيعية الثمينة. ففي ظل التحديات البيئية المتزايدة، مثل التغير المناخي، الاستغلال المفرط، والتلوث، أصبحت حماية الينابيع وإدارتها بشكل مستدام أمرًا ملحًا لا يمكن تأجيله.

يتناول الكتاب في فصوله التسعة موضوعات متنوعة تبدأ في الفصل الأول، نناقش مفهوم الاستدامة ونتعرف على أهمية حماية مصادر المياه والفرق بين الحماية والاستعادة. في الفصل الثاني، نستعرض أنواع الينابيع وتصنيفاتها، بدءًا من الينابيع المغمورة والحرارية، وصولًا إلى الينابيع الكارستية وتلك الموجودة في الصخور البركانية. الفصل الثالث يقدم تحليلًا للتصريف، مع التركيز على مجاري الكسب والفقدان، وطرق التتبع الاصطناعي والبيئي. في الفصل الرابع، نتعمق في هيدروغراف التصريف، ونستعرض معادلات التصريف وفصل مكونات التدفق، بالإضافة إلى تحليل السلاسل الزمنية للتدفقات.

الفصل الخامس يتناول نمذجة الينابيع، بدءًا من نماذج الارتباط والانحدار، وصولًا إلى النماذج الحتمية والعديدية التي تساعد في فهم سلوك الينابيع. في الفصل السادس، ندرس الجيوكيمياء مع التركيز على كيمياء المياه في الصخور السيليكاتية والكربوناتية، بالإضافة إلى الينابيع الحرارية والمعدنية. الفصل السابع يقدم نظرة شاملة على تقنيات معالجة المياه، مع التركيز على معايير مياه الشرب وتقنيات المعالجة المبتكرة. في الفصل الثامن، نناقش كيفية تحديد مناطق الحماية، مع التركيز على تقييم قابلية تأثر المياه الجوفية ورسم خرائطها. أخيرًا، في الفصل التاسع، نستعرض كيفية الاستفادة من في مجالات مختلفة مثل إمدادات مياه الشرب، توليد الطاقة، الزراعة، والاستجمام، بالإضافة إلى تنظيم الينابيع وهياكل التقاطها. نأمل أن يكون هذا الكتاب مرجعًا قيمًا للباحثين، المهندسين، والعاملين في مجال إدارة الموارد المائية، وأن يساهم في تعزيز الوعي بأهمية الحفاظ على ينابيع المياه كجزء أساسي من استدامة مواردنا الطبيعية.

المؤلف

عمرو محمد الفرح

amroalfareh@gmail.com | (00967) 770969944

## جدول المحتويات

١	الفصل الأول إدارة واستدامة ينابيع المياه
١-١	١-١ مقدمة
٣	١-٢ مفهوم الاستدامة
١٠	١-٣ إدارة الينابيع
١٣	١-٣-١ حماية المورد والمصدر
١٨	١-٣-٢ الحماية مقابل الاستعادة
٢٦	الفصل الثاني انواع وتصنيف ينابيع المياه
٢٦	٢-١ أنواع الينابيع
٣٧	٢-١-١ الينابيع المغمورة
٣٩	٢-١-٢ الينابيع الحرارية والمعدنية
٥١	٢-٢ تصنيفات الينابيع
٥٩	٢-٣ الينابيع الكارستية وطبقات المياه الجوفية الكارستية
٨١	٢-٤ الينابيع في الصخور البركانية السطحية
٨٩	الفصل الثالث تصريف ينابيع المياه
٩٠	٣-١ مجاري الكسب والفقدان والغرق
٩٥	٣-٢ طرق تتبع الاصطناعي والبيئي
٩٥	٣-٢-١ المتتبعات الاصطناعية
١٠٨	٣-٢-٢ النظائر البيئية
١٤٣	الفصل الرابع هيدروغراف تصريف الينابيع
١٤٣	٤-١ مقدمة
١٥٠	٤-٢ معادلات تصريف الانحدار
١٥١	٤-٣ فصل مكونات التصريف
١٥٨	٤-٤ احتمالات تدفق الينابيع

١٦٥	٤-٤-١ احتمالية الحد الأدنى والحد الأقصى للتدفقات
١٦٧	٤-٤-٢ تحليل السلاسل الزمنية
١٦٩	٤-٤-٣ التحليل التكراري للتدفقات القصوى
١٧٦	الفصل الخامس نمذجة ينابيع المياه
١٧٦	٥-١ مقدمة
١٧٨	٥-٢ الارتباط والانحدار
١٨٣	٥-٣ الارتباط التلقائي والارتباط التبادلي
١٩٠	٥-٤ نماذج الانحدار الذاتي والانحدار المتقاطع
١٩٩	٥-٥ تحليل النظام ووظائف التحويل
٢٠٣	٥-٥-١ دوال التحويل المركبة
٢٠٧	٥-٥-٢ التطبيق على إدارة المياه
٢٠٨	٥-٦ نماذج السلاسل الزمنية
٢١٨	٥-٧ النماذج الحتمية
٢٢١	٥-٧-١ النماذج التحليلية (معادلات تدفق المياه الجوفية)
٢٣٧	٥-٧-٢ الرؤوس الهيدروليكية التمثيلية
٢٤٢	٥-٧-٣ النماذج العددية
٢٥٧	الفصل السادس جيوكيمياء ينابيع المياه
٢٥٧	٦-١ الكيمياء الفيزيائية للمياه الطبيعية
٢٥٧	٦-١-١ مقدمة
٢٥٨	٦-١-٢ التوازن الكيميائي والتشبع المعدني
٢٥٩	٦-٢ مياه الينابيع من صخور السيليكات
٢٥٩	٦-٢-١ انحلال السيليكات والسيليكات
٢٥٩	٦-٢-٢ الينابيع في الصخور الطفلية والرملية والجرانيت
٢٦١	٦-٢-٣ ينابيع المياه الباردة في الصخور البركانية

٢٦١	٦-٣ مياه الينابيع من صخور الكربونات
٢٦٤	٦-٣-١ انحلال الحجر الجيري والدولوميت
٢٦٦	٦-٣-٢ الحركة الكيميائية وعدم التوازن
٢٦٦	٦-٣-٣ التوصيف الكيميائي لمياه الينابيع الكربونية
٢٦٨	٦-٣-٤ كيمياء الينابيع الكارستية
٢٧٠	٦-٣-٥ كيمياء الينابيع المعتمدة على الوقت: مرتسم الكيمياء والعكورة والتدفق العاصف
٢٧٤	٦-٣-٦ ينابيع الترافرتين
٢٧٦	٦-٣-٧ انتقال الملوثات في ينابيع الكربونات
٢٨٢	٦-٤ ينابيع الجبس
٢٨٢	٦-٥ الينابيع المعدنية والينابيع الحرارية
٢٨٤	٦-٥-١ الينابيع الكبريتية
٢٨٤	٦-٥-٢ الينابيع المالحة والمختلطة
٢٨٦	٦-٥-٣ الينابيع الغازية من المصادر العميقة
٢٨٩	٦-٥-٤ كيمياء المياه عند درجات الحرارة العالية
٢٩٠	٦-٥-٥ الينابيع البركانية الحارة
٢٩٤	٦-٦ الاستنتاجات
٣٠١	الفصل السابع معالجة مياه الينابيع
٣٠١	٧-١ مقدمة
٣٠٤	٧-٢ معايير مياه الشرب
٣٠٤	٧-٢-١ معايير مياه الشرب الأولية
٣٠٥	٧-٢-٢ معايير مياه الشرب الثانوية
٣٠٥	٧-٣ تقنيات المعالجة
٣٠٦	٧-٣-١ العكارة
٣٢٣	٧-٣-٢ الأكسدة

٣٢٦	٧-٣-٣ التطهير .....
٣٢٧	٧-٣-٤ التطهير بالترشيح .....
٣٣٣	٧-٣-٥ تقنيات المعالجة المبتكرة .....
٣٣٣	٧-٣-٦ تقنيات التناضح العكسي .....
٣٣٦	٧-٤ دراسات حالة .....
٣٣٦	٧-٤-١ نظام معالجة مياه الينابيع على نطاق صغير، العراق .....
٣٤١	٧-٤-٢ تقنية الأوزون ، ميشغن .....
٣٤٤	٧-٥ الخلاصة .....
٣٤٧	الفصل الثامن تحديد مناطق حماية الينابيع .....
٣٤٧	٨-١ مقدمة .....
٣٥٠	٨-٢ ملخص لمشاكل التلوث في الينابيع .....
٣٥٠	٨-٢-١ مقدمة .....
٣٥٢	٨-٢-٢ مصادر التلوث .....
٣٥٤	٨-٢-٣ الملوثات الغير عضوية .....
٣٥٥	٨-٢-٤ الملوثات العضوية .....
٣٥٦	٨-٢-٥ مسببات الامراض الميكروبية .....
٣٥٧	٨-٣ طرق تحديد نطاقات مستجمعات المياه .....
٣٥٧	٨-٣-١ مقدمة .....
٣٦٠	٨-٣-٢ التضاريس والجيولوجيا وتدفق المياه الجوفية .....
٣٦٠	٨-٣-٣ التوازن المائي .....
٣٦١	٨-٣-٤ المتتبعات الطبيعية والاصطناعية .....
٣٦٣	٨-٤ مناطق حماية مصادر المياه الجوفية وقيود استخدام الاراضي .....
٣٦٧	٨-٥ تقييم قابلية تأثر المياه الجوفية ورسم خرائطها .....
٣٦٧	٨-٥-١ العموميات والمصطلحات .....

٣٧١	٨-٥-٢ النهج الكمي لتقييم قابلية التأثير.....
٣٧٢	٨-٥-٣ أهمية التباين الهيدرولوجي لتقسيم مناطق حماية المصدر.....
٣٧٤	٨-٥-٤ عوامل تقييم قابلية التأثير.....
٣٧٤	٨-٥-٥ الطرق المتسقة مع النهج الاوربي.....
٣٧٩	٨-٥-٦ استعراض طرق أخرى لرسم خرائط قابلية التأثير.....
٣٨٢	٨-٥-٧ التحقق من صحة خرائط قابلية التأثير ومناطق حماية المصدر.....
٣٨٥	٨-٦ تخريط قابلية التأثير والمخاطر والخطر.....
٣٩٥	الفصل التاسع الاستفادة من الينابيع وتنظيمها.....
٣٩٥	٩-١ مقدمة.....
٣٩٦	٩-٢ الاستفادة من الينابيع.....
٣٩٦	٩-٢-١ مياه الينابيع في امدادات مياه الشرب.....
٤٠٠	٩-٢-٢ مياه الينابيع في توليد الطاقة.....
٤٠٢	٩-٢-٣ مياه الينابيع في الزراعة.....
٤٠٥	٩-٢-٤ الينابيع الحرارية في الاستجمام والعلاج بالمياه المعدنية.....
٤٠٨	٩-٢-٥ الينابيع كمصادر للطاقة الحرارية الارضية.....
٤١٣	٩-٢-٦ صناعة مياه الينابيع المعبأة.....
٤١٤	٩-٣ التقاط الينابيع.....
٤١٤	٩-٣-١ الخصائص الطبيعية للينابيع وتأثيرها على تصميم الالتقاط.....
٤١٥	٩-٣-٢ مبادئ التقاط الينابيع.....
٤١٧	٩-٣-٣ هياكل التقاط الينابيع.....
٤٢٧	٩-٣-٤ اعمال البناء.....
٤٣٠	٩-٣-٥ دراسات حالة.....
٤٣٣	٩-٤ تنظيم الينابيع.....
٤٣٩	٩-٤-١ أنواع هياكل التنظيم.....



## ١-١ مقدمة

كانت الينابيع حيوية لبقاء الحضارات القديمة على قيد الحياة منذ أكثر من ٣٠,٠٠٠ عام. وكان الأوائل يقيمون مجتمعاتهم دائماً بالقرب من الماء، سواء كان نبعاً أو مجرى مائياً أو بحيرة. ومن الجدير بالذكر أيضاً أنهم كانوا يستخدمون مياه الينابيع لري المحاصيل، ونظراً لأن الينابيع كانت حيوية جداً لحياة كل من اليمنيين، فليس من المستغرب وجود العديد من التشريعات المائية القديمة، وقد تم إنشاء شبكة من الحصون عبر اليمن، كانت، جميعها، تقع بالقرب من الينابيع من أجل الحصول على إمدادات موثوقة من المياه النقية. وفي وقت لاحق، أصبحت الطرق تعتمد بشكل كبير على الينابيع. على سبيل المثال، طريق صنعاء الحديدية يمر بالكثير من الينابيع الكبيرة والعديد من الينابيع الصغيرة. وفي أواخر القرن التاسع عشر، ظهرت العديد من المنتجات الطبية أو الصحية حول الينابيع الأكثر تمعدناً. معظمها في الضالع والحديدة، وكان يُعتقد أنها مفيدة في علاج الأمراض المختلفة ومعظم مياه هذه الينابيع تحتوي على تركيزات عالية من الكبريتات والكلوريد والحديد والمنجنيز.

اعتمدت العديد من الحضارات المبكرة اعتماداً كلياً على مياه الينابيع. تم تسمية ما لا يقل عن ٢٠ قرية باسم الينابيع التي كانت تقع فيها، لكن العديد من الينابيع جفت. وطوال الفترة الطويلة لحياه اليمنيين، ظلت الينابيع تتدفق دون تغيير باستثناء تأثيرها بالدورات المناخية الرطبة والجافة. في الماضي زخرت اليمن بالينابيع التي كانت بمثابة ممرات طبيعية لإطلاق المخزون الزائد من المخزون الجوفي. ولم تعد اغلبية هذه الينابيع الطبيعية موجودة منذ سنوات عديدة. ربما كان أول تأثير على تيارات المياه الجوفية وتدفق الينابيع هو تغير استخدام الأراضي والتوسع الحضري الذي يأتري على التربة التي سرعان ما تصبح مضغوطة لدرجة أنها لن تعود قادرة على استيعاب جزء صغير فقط من التغذية التي كانت تنقلها في السابق إلى طبقة المياه الجوفية. وقد أثر هذا الانخفاض في التغذية على مساحات أكبر. ومع ذلك، فإن تأثيرها على مناسيب المياه وتدفق الينابيع صغيراً نسبياً مقارنة بالتطورات اللاحقة. وفي منتصف القرن العشرين بدأ حفر الآبار العميقة التي انتشرت في كل مكان تقريباً.

ولا شيء يمكن أن يكون له تأثير أكثر كارثية على تدفقات الينابيع من إطلاق الضغوط الارتوازية الهائلة لطبقات المياه الجوفية من خلال الآبار المتدفقة. ومعظم هذه الآبار استمرت في الانتاج، مما أدى إلى إهدار كميات كبيرة من المياه، حتى استنفدت الرؤوس البيزومترية وتوقفت الينابيع عن التدفق.

وعلى الرغم من شدة آثار الضخ من الآبار على تدفق الينابيع، إلا أنه كان هناك المزيد في المستقبل. وانخفضت مستويات المياه الجوفية بشكل منتظم، حتى وصلت لأعماق غير قليلة في البداية كان الضخ للإمدادات العامة. في السنوات الأخيرة تم سحب كميات هائلة من المياه الجوفية لأغراض الري.. ونتيجة لذلك، فإن بعض الوديان والمجاري المائية التي كانت في السابق "مكتسبة"، تتلقى مياهاً إضافية من التسربات الجوفية والينابيع، أصبحت الآن "فاقدة"، وتوقفت العديد من سيول الوديان عن التدفق. وقد جفت الكثير من الينابيع الصغيرة في مختلف بلدان العالم، وعانت الينابيع الكبيرة بشكل عام من انخفاض في التدفق.

تُعتبر مياه الينابيع الطبيعية مياهاً جوفية لا يلزم الحصول على تصريح لاستخدامها. ولكن بمجرد أن تصب وتندفق في المجرى المائي، فإنها تصبح مياه سطحية عامة. وعادة ما يكون النبع مجرى لطبقة مياه جوفية. قد يكون هذا الخزان مغطى بأرض مملوكة لعدد من المالكين. إذا اختار ملاك الأراضي بخلاف مالك النبع ضخ المياه الجوفية بكثافة، مما يخفض منسوب المياه الجوفية ويتسبب في توقف تدفق النبع، فإن مالكة لا يملك الا اللجوء إلى المحاكم لمنعهم.

هناك أمثلة مماثلة للتأثير الكارثي لضخ طبقة المياه الجوفية على الينابيع. ويمكن الملاحظة بأن اللوائح البيئية وإدارة الموارد المائية تختلف باختلاف البلدان وكذلك تختلف إجراءات منع أو تخفيف هذه التأثيرات السلبية لسحب المياه الجوفية. على سبيل المثال، معظم بلدان العالم لديها شكل من أشكال التصاريح المطلوبة لمستخدمي المياه، بما في ذلك حماية حقوق الأقدمية، وهناك الكثير من الأمثلة على النزاعات المائية بين ملاك الينابيع وملاك الآبار، فمضخات الآبار تجلب المياه إلى آلاف الأفدنة من الأراضي الزراعية، في المقابل التدفقات من الينابيع يعتمد عليها الكثير من السكان والمزارعين، وهناك جدل حول المبادئ القانونية التي تثار في النزاعات بين مستخدمي المياه، وحول كيفية تعامل القانون مع الذين يضخون مياههم من الآبار وأولئك الذين يحصلون على مياههم من الينابيع. ومن الأهمية ان يعمل المختصين على الموازنة بين قسمين متنافسين من تشريعات المياه، وهما حق الاسبقية من يأتي أولاً يحصل على المياه أولاً؛ وضرورة استخدام المياه لتحقيق التنمية الاقتصادية الكاملة.

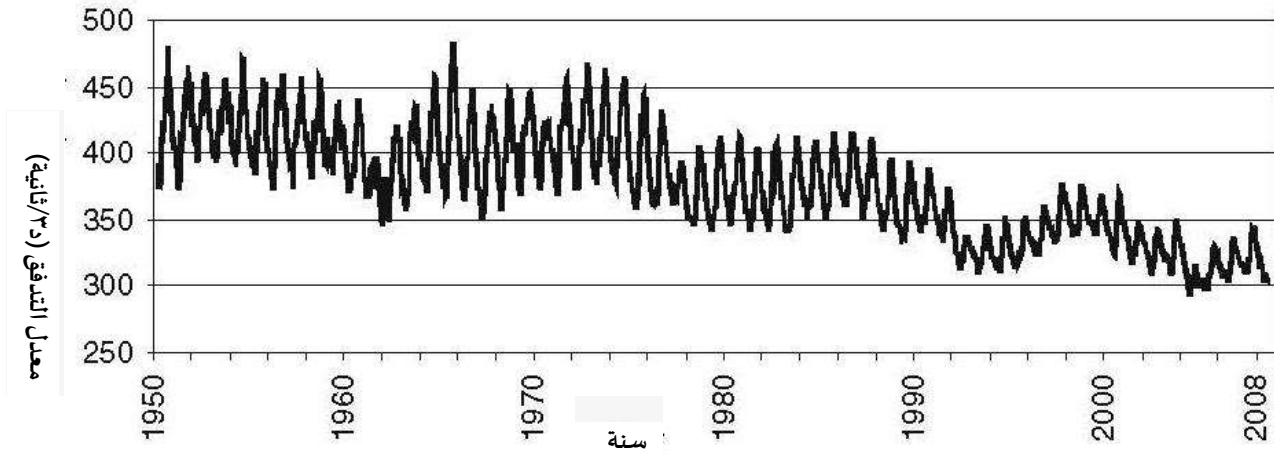
سؤال رئيسي آخر هو ما إذا كانت جودة ودرجة حرارة المياه المستخدمة محمية تمامًا مثل الكمية. اعترض الكثير على فكرة أن نوعية المياه وكميتها مرتبطان معاً. لكن المستخدم لا يمكنه استخدام المياه في الاستخدام المفيد التي استعملها لفترة طويلة إذا لم تكن المياه غير قابلة للاستخدام. واحتمالية تأثير الآبار على الينابيع تقل مع زيادة المسافة عنها لان زيادة المسافة تقلل من احتمالية حدوث أي ضرر، وتشير معظم الدراسات ان المسافة الامنة تبدأ من ١,٦ كم. وعندما تكون الآبار على مسافة اقرب فمن المحتمل أن يحدث التالي:

■ التأثير السلي على وضع المياه الجوفية المتدفقة.

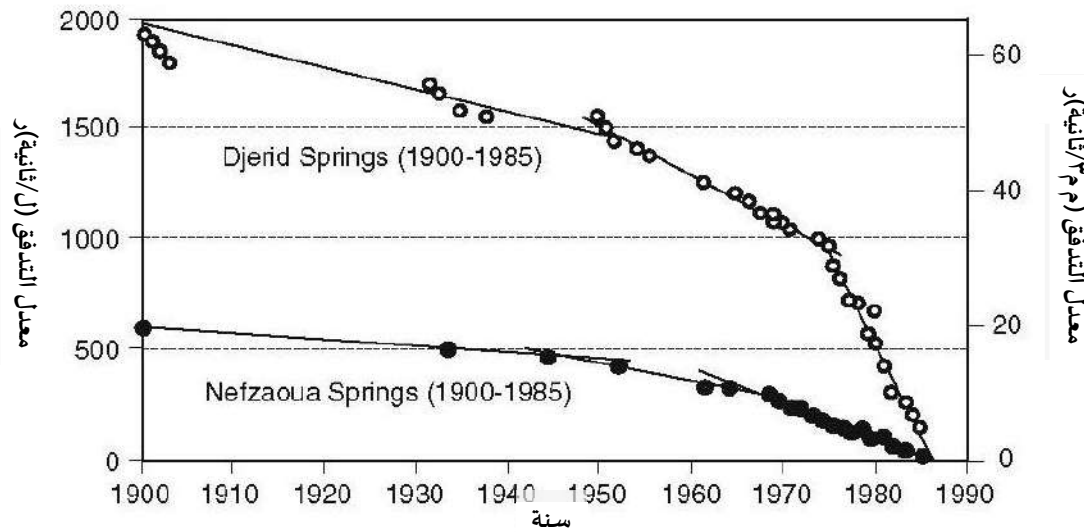
- تغيير أو عكس أنماط تدفق المياه الجوفية وإمكانية انتشار التأثيرات في نهاية المطاف باتجاهات أخرى تؤثر على التصريف في ينابيع أخرى.
  - انخفاض تصريف الينابيع المهمة زراعياً وبيئياً.
  - التأثير السلي على المياه الجوفية مع زيادة مسافة ضغط السحب في المنطقة.
- الشكل (١-١)** هيدروجراف لتصريف احد الينابيع على طول وادي نهر سنك في الولايات المتحدة، ويوضح الانخفاض الواضح بسبب ضخ المياه الجوفية من طبقة المياه الجوفية. توجد المئات من السيناريوهات المشابهة في العالم لانخفاض تصريف الينابيع نتيجة سحب المياه الجوفية وسوء تخطيط استخدام الأراضي.
- إن اختفاء الينابيع بسبب سحب المياه الجوفية على نطاق واسع من طبقات المياه الجوفية ليس مقصوراً على المناطق القاحلة أو شبه القاحلة ذات معدلات الهطول المطرية المنخفضة المرتبطة بانخفاض التغذية الطبيعية لطبقات المياه الجوفية. (الشكل ١-٢)
- فهناك الكثير من الأمثلة في العالم على الينابيع التي جفت في المناطق الرطبة وشبه الرطبة بسبب الاستنزاف الجائر للمياه الجوفية بواسطة الآبار، وبالإضافة إلى التأثير الكمي، يمكن أن تتدهور نوعية مياه النبع الذي كان نقياً في يوم من الأيام بسبب ممارسات استخدام الأراضي غير المستدامة في منطقة تصريفه، لدرجة فقدان المصدر بالكامل. يمكن القول أن كل نشاط بشري تقريباً لديه القدرة على التأثير بشكل مباشر أو غير مباشر على المياه (الشكل ١-٣).
- وفي المقابل، هناك عدد غير قليل من البلدان ، حيث الينابيع ذات الجودة العالية للمياه والتي تستخدم كمصادر مفضلة لإمدادات المياه العامة، وفي الوقت الحالي تحولت إمدادات المياه العامة القائمة على المياه الجوفية من الينابيع إلى الآبار. وقد أتاح التقدم في حفر الآبار وتكنولوجيا المضخات إلى إمكانية تطوير المياه الجوفية على نطاق واسع ابتداءً من أوائل القرن العشرين، وتلى هذا استعمالها للري باستخدام المياه الجوفية، مما أدى إلى توقف تدفقات الينابيع ونتيجة لذلك فإن إجمالي استخدام الينابيع للإمداد المركزي بالمياه ضئيل، (الشكل ١-٤) ، وقد أصبح الحفاظ على الينابيع للاستخدامات المفيدة صعباً بشكل متزايد ويتطلب جهداً مستمراً ومنسقاً من قبل منظمات المجتمع وقطاع المياه وعلى مستوى سياسة الدولة.

## ١-٢ مفهوم الاستدامة

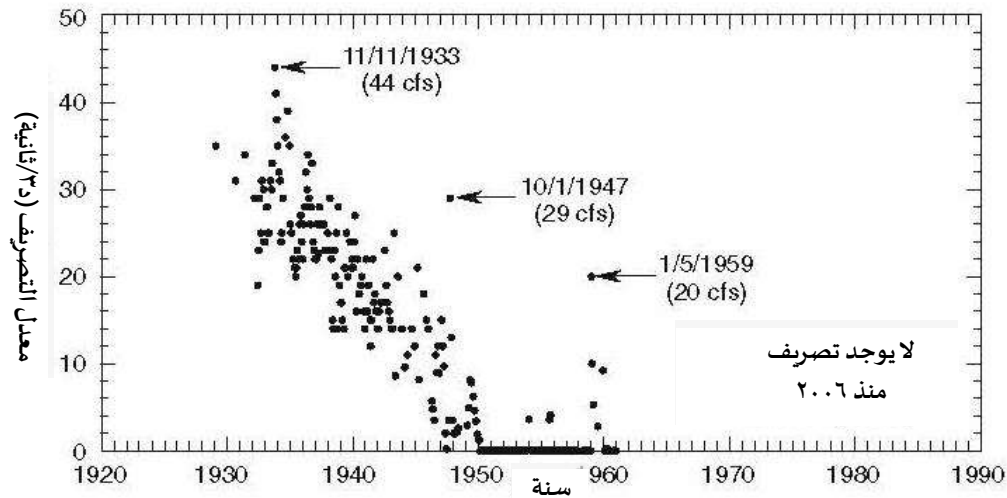
“التنمية المستدامة هي التنمية التي تلي احتياجات الحاضر دون المساس بقدرة الأجيال القادمة على تلبية احتياجاتها الخاصة.” هو التعريف الصادر من اللجنة العالمية المعنية بالبيئة والتنمية في تقريرها الصادر عام ١٩٨٧، مستقبلنا المشترك (UN Department of Economic and Social Affairs, 2009). وبما أن هذه التعريف يبدو وكأنه يركز على الأجيال البشرية فقط، فقد تم انتقاده من قبل البعض باعتباره ضيق للغاية ولا يتناول البيئة الطبيعية. ومع ذلك، فقد تناولت اللجنة والجمعية العامة كلا من البيئتين البشرية والطبيعية وبطريقة شمولية، وهو ما يمكن ملاحظته من البيانات الرئيسية ذات الصلة في قرار الأمم المتحدة الرسمي ١٨٧/٤٢.



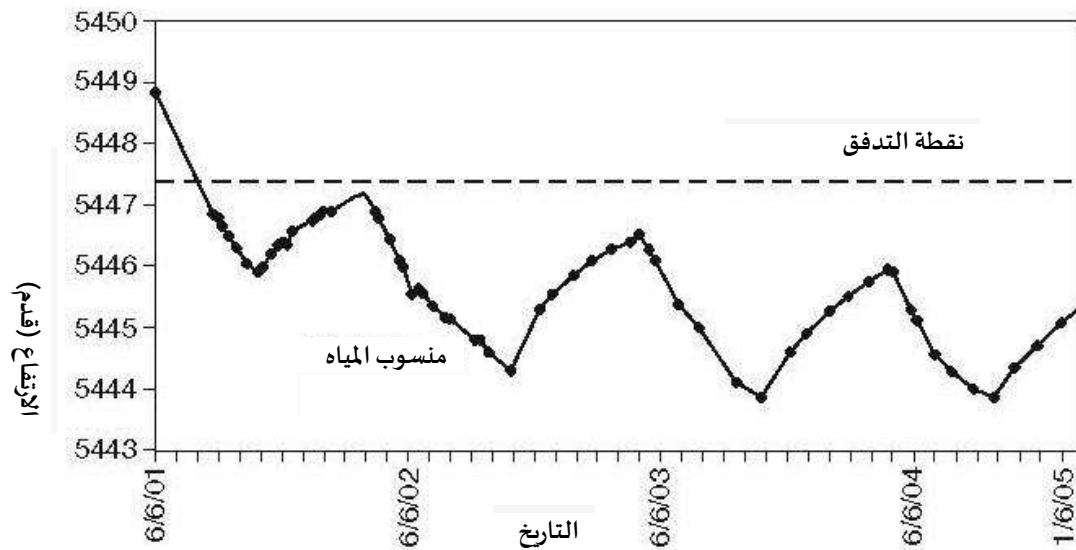
الشكل ١-١ هيدروجراف متوسط التصريف اليومي لأحد الينابيع على طول وادي نهر سنك. (البيانات من U.S. Geological Survey, 2008).



الشكل ١-٢ القضاء التدريجي على تدفقات الينابيع الرئيسية في جنوب تونس خلال القرن العشرين. (من Foster, and Droubi, 2006; copyright UNESCO).



الشكل ١-٣ قياسات التصريف الدوري لنبع يانغ، شمال شنغهاي. النبع جاف حتى الوقت الحاضر. Modified from Lewelling, (Tihansky, and Kindinger, 1998).

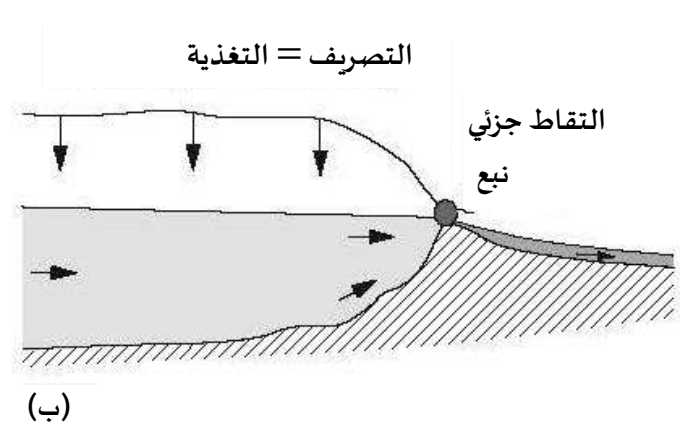
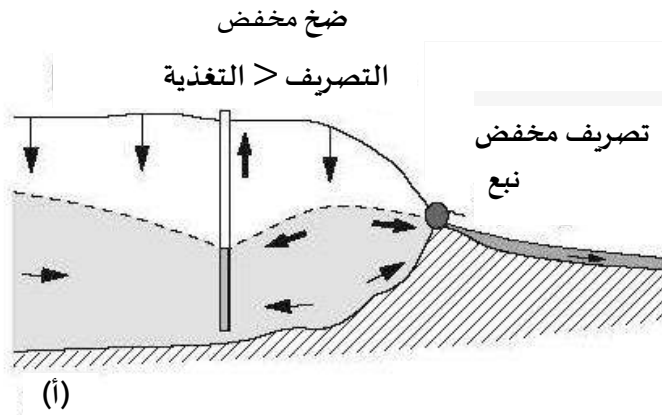
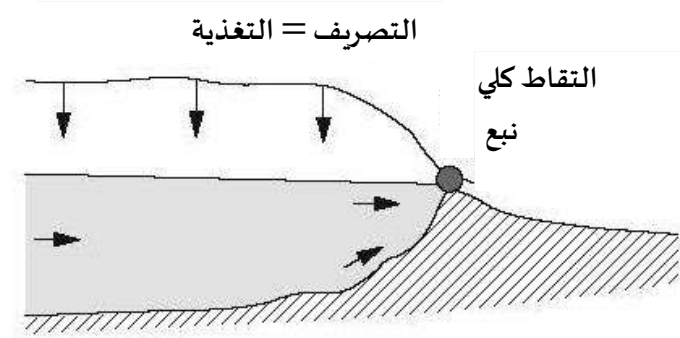
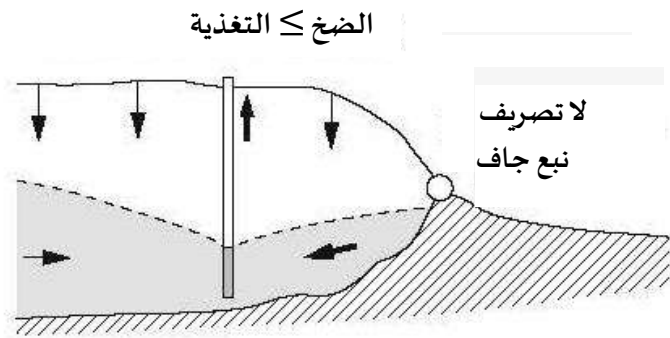
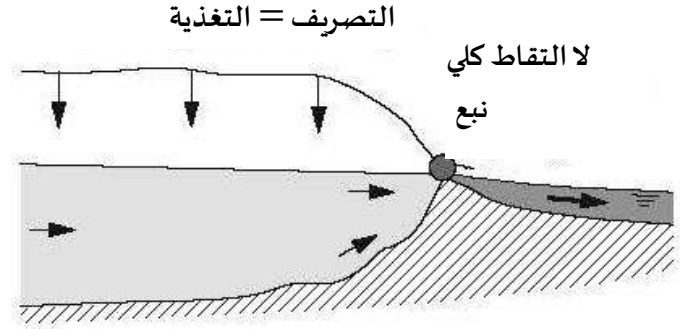
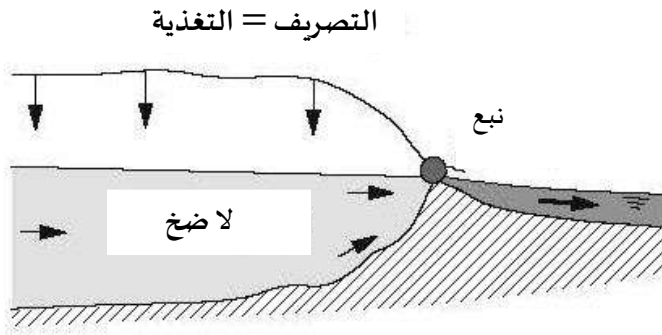


الشكل ١-٤ مستويات مياه نبع نيدل بوينت جف النبع عندما انخفض منسوب المياه الجوفية إلى ما دون نقطة التدفق. (معدلة من Summers, 2001–2005).

أحد المعتقدات الشائعة وغير الدقيقة، عند تقدير مدى توافر المياه وتطوير استراتيجيات مستدامة لإمدادات المياه، هو أن استخدام المياه الجوفية يمكن أن يستمر إذا كانت كمية المياه المستخرجة مساوية للتغذية - وغالباً ما يشار إليها بالعائد الآمن. ومع ذلك، لا يمكن لأي حجم مسحوب من المياه الجوفية أن يكون بدون عواقب سلبية، خاصة عندما يؤخذ الوقت بعين الاعتبار. وبالتالي فإن مفهوم "العائد الآمن" خرافة، لأن أي مياه جوفية مستخرجة بالطرق الاصطناعية من طبقة المياه الجوفية يجب أن تأتي من مكان ما وتستخدم للتدفق في مكان آخر. وتفترض الخرافة خطأً أنه لا توجد تأثيرات على العناصر الأخرى لميزانية المياه الكلية، بما في ذلك تدفق الينابيع التي تصب في طبقة المياه الجوفية. **Bredehoeft, Papadopoulos, and Cooper (1982) and (2002)** - "إن الفرضية الخاطئة لـ "أسطورة الانتاجية الآمنة" وتأثيرها على نبع ومجرى المياه السطحية التي يغذيها تتمثل بانه (الشكل ١-٥) إذا كان الضخ (السحب) من خزان المياه الجوفية يساوي أو يتجاوز جميع التدفقات الداخلة (التغذية) إلى طبقة المياه الجوفية، فإن تصريف طبقة المياه الجوفية عبر النبع يصل في النهاية إلى الصفر، مما يؤدي إلى نتيجة عكسية في وقت ما. وبالمثل، إذا كان معظم أو كل المياه التي يتم تصريفها من طبقة المياه الجوفية بواسطة النبع وتحويله إلى مستخدمين آخرين، فستكون هناك حتماً بعض العواقب السلبية على النظم البيئية والمستخدمين المعتمدين على المياه السطحية.

ستكون التأثيرات الهيدرولوجية المباشرة في كلتا الحالتين مساوية لحجم المياه التي تم سحبها ولكن قد تتطلب هذه التأثيرات بعض الوقت لتظهر. لأنه يمكن أن تختلف تغذية طبقة المياه الجوفية وسحب المياه الجوفية وكمية المياه المحتجزة في النبع بشكل كبير مع مرور الوقت، ويمكن أن تكون هذه المعدلات المتغيرة معلومات لتطوير كل من طبقة المياه الجوفية واستراتيجيات إدارة الينابيع. مع زيادة الطلب على المياه والضغط على موارد المياه الجوفية، فإن النقاش بين المتخصصين في المياه حول ما يشكل سحباً "آمناً" للمياه الجوفية قد تغير إلى نقاش حول "الاستخدام المستدام" للمياه الجوفية. والفرق ليس فقط دلاليًا، وقد أدى إلى الارتباك في بعض الأحيان. على سبيل المثال، بذلت محاولات للتمييز بين "الانتاج الآمن" و"الضخ المستدام" حيث يتم تعريف هذا الأخير على أنه معدل الضخ الذي يمكن أن يستمر إلى أجل غير مسمى دون نضوب أو نزح المياه من طبقة المياه الجوفية. يقدم **Devlin (2005)** و **Sophocleous** مناقشة مفصلة لهذه المفاهيم وغيرها من المفاهيم ذات الصلة.

ما يبدو أكثر صعوبة في فهمه هو أن نظام المياه الجوفية هو نظام ديناميكي - أي تغيير في جزء من النظام يؤثر في النهاية على أجزائه الأخرى. والأهم من ذلك أن معظم أنظمة المياه الجوفية ترتبط ديناميكياً بالمياه السطحية. عندما تتحرك المياه الجوفية من منطقة التغذية نحو منطقة التصريف (على سبيل المثال، نبع أو نهر)، فإنها تتدفق باستمرار عبر المنطقة المشبعة التي تمثل مخزن تخزين المياه الجوفية (طبقة المياه الجوفية). إذا تم إنشاء منطقة تصريف أخرى (مثل بئر لإمداد المياه)، فإن كمية أقل من المياه ستندفق نحو منطقة التصريف القديمة (نبع أو نهر). ويبدو أن هذه الحقيقة يتم تجاهلها بشكل متناقض من قبل أولئك الذين يجادلون بأن سحب المياه الجوفية قد يزيد في الواقع من تغذية طبقة المياه الجوفية عن طريق تحفيز التدفق من حدود التغذية (مثل المسطحات المائية السطحية) وبالتالي تؤدي إلى معدلات ضخ "مستدامة".



الشكل ١-٥ (أ) التأثير السلبي على النبع من ضخ المياه الجوفية (ب) التأثير السلبي على الجريان السطحي نتيجة الضخ أو التقاط مياه النبع (groundwater hydrology of springs 2007).

على الرغم من أن استراتيجية إدارة المياه الجوفية هذه قد تكون "آمنة" أو "مستدامة" للاستخدام المقصود، إلا أن هناك سؤال آخر، والسؤال الآخر هو ما إذا كان لها أي عواقب على الاستخدام المستدام لنظام المياه السطحية الذي يفقد الآن المياه بدلاً من اكتسابها من نظام المياه الجوفية، بما في ذلك عن طريق الينابيع (Kresic, 2009).

والجدال الآخر حول الضخ المستدام يستند إلى إدارة تخزين المياه الجوفية. استراتيجية الإدارة هذه تعدل معدلات السحب (الضخ) للاستفادة من دورات التغذية الطبيعية. على سبيل المثال، خلال فترات الطلب المرتفع، يمكن سحب بعض المياه من المخزون عن طريق زيادة معدلات الضخ بشكل كبير وخفض الرؤوس الهيدروليكية (منسوب المياه الجوفية) في طبقة المياه الجوفية. خلال فترات انخفاض الطلب (ضخ منخفض) وارتفاع التغذية الطبيعية، سيتم تجديد هذا المخزون المستنفد (وهذا أيضًا أحد مبادئ تنظيم النبع). ومع ذلك، فإن نفس السؤال حول استدامة هذا النهج لا تزال قائمة. إن أي جزء من التغذية الطبيعية التي لا تساهم في التغذية الطبيعية (غير البشرية المنشأ) له بعض العواقب على مستخدمي المياه واستخدامات المياه التي تعتمد عليها. اعتماداً على أحجام ومعدلات تصريف المياه الجوفية المرفوضة، قد يتمكن أو لا يتمكن المستخدمون المتأثرون من التكيف مع الواقع الجديد. للحفاظ على النظم الإيكولوجية القيمة والأنواع المهددة بالانقراض، تتوقع قطاعات من المجتمعات أن تكون المياه متاحة، بكميات لا يمكن قياسها بسهولة، لتلبية متطلبات الموائل الرئيسية. هذا الاتجاه الحديث نسبياً يترافق مع إجراءات الجماعات البيئية، والتي تشمل التحديات القانونية والدعاوى القضائية ضد مختلف الجهات الحكومية المسؤولة عن إدارة المياه. قبل عدة عقود فقط، كانت المشاركة المماثلة للمجموعات غير الحكومية أو الجمهور منعدمة تقريباً.

تم تناول الجوانب المتعددة لاستدامة المياه الجوفية في إعلان أليكانتي، الذي اكتسب اعترافاً واسعاً بين المتخصصين في مجال المياه الجوفية في جميع أنحاء العالم. الإعلان هو جدول الأعمال الذي نتج عن المناقشات التي جرت في أليكانتي، إسبانيا، في الفترة من ٢٣ إلى ٢٧ يناير ٢٠٠٦، خلال الندوة الدولية حول استدامة المياه الجوفية. هذه الدعوة للعمل من أجل الاستخدام المسؤول للمياه الجوفية وإدارتها وحوكمتها. وهذا الاعلان مستنسخ هنا بالكامل:

"الماء ضروري للحياة. تشكل المياه الجوفية - ذلك الجزء من جميع الموارد المائية التي تقع تحت سطح الأرض، تشكل أكثر من خمسة وتسعين في المائة من احتياطي المياه العذبة العالمية غير المتجمدة. ونظراً لاحتياطياتها الهائلة وتوزيعها الجغرافي الواسع، ونوعيتها الجيدة بشكل عام، ومرونتها في مواجهة التقلبات الموسمية والتلوث.

تبشر المياه الجوفية بضمان توفير إمدادات مياه آمنة وقادرة على تحمل التكاليف للمجتمعات الحالية والمستقبلية في العالم. المياه الجوفية هي في الغالب مورد متجدد، وعندما تدار بشكل صحيح، تضمن توفر إمدادات طويلة الأجل يمكن أن تساعد في تلبية الطلب المتزايد والتخفيف من آثار التغير المناخي المتوقع. بشكل عام، يتطلب تطوير المياه الجوفية استثماراً رأسمالي أقل من تنمية المياه السطحية ويمكن تنفيذها في إطار زمني أقصر.

لقد وفرت المياه الجوفية فوائد كبيرة للعديد من المجتمعات في العقود الأخيرة من خلال استخدامها المباشر كمصدر لمياه الشرب، وللزراعة المروية والتنمية الصناعية، وبشكل غير مباشر، من خلال النظام البيئي والحفاظ على تدفق المياه الجوفية. وغالباً ما يوفر

تطوير المياه الجوفية وسيلة سريعة ومعقولة للتخفيف من حدة الفقر وضمان الأمن الغذائي. علاوة على ذلك، من خلال فهم الطبيعة التكاملية للمياه الجوفية والسطحية، يمكن لاستراتيجيات الإدارة المتكاملة للموارد المائية أن تعمل على تعزيز كفاءة استخدامها وتعزيز طول عمر الإمدادات.

وقد أدت حالات تنمية المياه الجوفية سيئة الإدارة والتأثير غير المقصود لعدم كفاية ممارسات استخدام الأراضي إلى آثار ضارة مثل تدهور نوعية المياه، وإضعاف النظم البيئية المائية وانخفاض مستويات المياه الجوفية، وبالتالي هبوط الأراضي وجفاف الأراضي الرطبة. وبما أن حماية موارد المياه الجوفية من التدهور أقل تكلفة وأكثر فعالية من استعادتها، فمن شأن تحسين إدارة المياه أن يقلل من هذه المشاكل ويوفر المال. يتطلب جعل وعد المياه الجوفية حقيقة واقعة فيجب الاستخدام المسؤول للمياه الجوفية وإدارتها وحوكمتها. وعلى وجه الخصوص، يجب اتخاذ إجراءات من قبل مستخدمي المياه، الذين يحافظون على رفاهيتهم من خلال من خلال استخراج المياه الجوفية؛ وصناع القرار، المنتخبين وغير المنتخبين على حد سواء؛ ومجموعات المجتمع المدني والجمعيات والعلماء الذين يجب أن يدافعوا باستخدام العلوم السليمة لدعم إدارة أفضل.

ولتحقيق هذه الغاية، يوصي الموقعون أدناه بالإجراءات التالية:

- تطوير استراتيجيات أكثر شمولاً لإدارة المياه واستخدام الأراضي وتنمية الطاقة والاعتراف الكامل بالدور الهام للمياه الجوفية في الدورة الهيدرولوجية. وهذا يتطلب توصيفاً أفضل لمستجمعات المياه الجوفية، وتربطها مع المياه السطحية والنظم الإيكولوجية، وتحسين فهم استجابة النظام الهيدرولوجي بأكمله للضغوطات الطبيعية والبشرية التي يسببها الإنسان. وينبغي إيلاء المزيد من الاهتمام لموارد المياه الجوفية غير المتجددة والمالحة عندما تكون هذه المياه المورد الوحيد المتاح للاستخدام.
- تنمية الفهم الشامل لحقوق المياه الجوفية ولوائحها وسياساتها واستخداماتها. سوف تساعد هذه المعلومات، بما في ذلك القوى الاجتماعية والحوافز التي تدفع ممارسات إدارة المياه في الوقت الحاضر، في صياغة السياسات والحوافز لتحفيز ممارسات إدارة المياه الجوفية السليمة اجتماعياً وبيئياً. ويكتسب هذا الأمر أهمية خاصة في تلك الحالات التي تتقاطع فيها طبقات المياه الجوفية مع الحدود الثقافية أو السياسية أو الوطنية.
- جعل الحفاظ على التوازن الهيدرولوجي واستعادته هدفاً طويل الأجل لاستراتيجيات إدارة المياه الإقليمية. ويتطلب ذلك أن يحدد مديرو المياه خيارات من أجل: تقليل الفاقد الصافي من المياه من النظام الهيدرولوجي؛ تشجيع الاستخدام الفعال والكفء للمياه، وضمان التخصيص العادل للمياه للاستخدام البشري وكذلك الاحتياجات البيئية، مع مراعاة الاستدامة على المدى الطويل. ينبغي أن تكون التقييمات الهيدرولوجية والبيئية والاقتصادية والاجتماعية والاقتصادية جزءاً لا يتجزأ من أي استراتيجية لإدارة المياه.
- تحسين الخبرات العلمية والهندسية والتكنولوجية التطبيقية في البلدان النامية. وهذا يتطلب تشجيع عملية صنع القرار القائم على العلم وكذلك التعاون "بين الشمال والجنوب" و "الجنوب والجنوب". والتعاون بين الشمال والجنوب. علاوة على

ذلك، من المهم تخصيص الأموال للبرامج التي تشجع على تصميم ونشر الأجهزة ذات التكلفة المعقولة والاستهلاك المنخفض للطاقة في المنازل المنزلية وأجهزة الري.

- إنشاء برامج منسقة مستمرة لرصد المياه السطحية والجوفية. وهذا يتطلب أن يصبح جمع البيانات جزءاً لا يتجزأ من استراتيجيات إدارة المياه بحيث يمكن تكييف هذه الاستراتيجيات لمعالجة الظروف الاجتماعية والاقتصادية والبيئية والمناخية المتغيرة. ويجب أن تكون قواعد البيانات متاحة لجميع أصحاب المصلحة بطريقة شفافة وسهلة.
- تطوير المؤسسات المحلية لتحسين الإدارة المستدامة للمياه الجوفية. وهذا يتطلب أن تصبح السلطات على المستوى الأعلى متقبلة لاحتياجات المجموعات المحلية وتشجع على تطوير ودعم المؤسسات القوية مع مستخدمي المياه والمجتمع المدني.
- التأكد من أن المواطنين يدركون الدور الأساسي للمياه الجوفية في مجتمعهم وأهمية الاستخدام المسؤول لها، وهذا يتطلب تضافر العلم والتكنولوجيا التطبيقية لتعزيز التعليم وبرامج التوعية من أجل توسيع نطاق فهم المواطنين للنظام الهيدرولوجي بأكمله وأهميته العالمية للأجيال الحالية والمستقبلية. (متاح على <http://aguas.igme.es/igme> ISGWAS).

### ١-٣ إدارة الينابيع

كما أشار Brune (1975)، فإن دراسة الينابيع هي تخصص انتقالي، لأنها تمثل الانتقال من المياه الجوفية إلى المياه السطحية. ومن ثم، فقد تمت دراستها إلى حد ما من قبل مختصي المياه الجوفية (الهيدروجيولوجيين) وإلى حد ما من قبل مختصي المياه السطحية (الهيدروجيولوجيين). ولكن بشكل عام كانت الدراسات الشاملة للينابيع نادرة نسبياً حتى وقت قريب، عندما ظهر مفهوم استدامة الموارد المائية إلى دائرة الضوء في جميع أنحاء العالم. وكما يتضح من الأمثلة الواردة في القسم السابق،

تعتبر الينابيع انعكاساً مباشراً لحالة المياه الجوفية في طبقات المياه الجوفية التي تغذيها، وهي تؤثر بشكل مباشر على الجداول وغيرها من المسطحات المائية السطحية التي تصب فيها، بما في ذلك جميع النظم البيئية المعتمدة عليها. وبالتالي فإن إدارة الينابيع تتضمن العديد من المبادئ نفسها التي توجه إدارة كل من موارد المياه السطحية والجوفية.

في الحالة المثالية، عندما لا يتم استهلاك مياه الينابيع بأي شكل من الأشكال (استخدام غير استهلاكي)، فإن إدارة النبع تتركز على حماية جودة وكمية المياه الجوفية في منطقة تصريفها من أجل الاستخدام المحدد للنبع. تشمل بعض الاستخدامات الزراعة والاستجمام والاستخدامات الطبية ومصائد الأسماك (الشكل ١-٦) وتوليد الطاقة. وعندما تُستخدم مياه الينابيع في إمدادات المياه الاستهلاكية، من أي نوع، فإن متطلبات الإدارة الإضافية تشمل:

- ضمان وصول كميات مياه محددة بوضوح وموثوقة من المياه لجميع المستخدمين، بما في ذلك التدفقات البيئية، باستخدام وسائل هندسية مختلفة.
- ضمان توصيل نوعية مناسبة من المياه لجميع المستخدمين، بما في ذلك معالجة مياه الشرب عند الاقتضاء.
- إنشاء مناطق حماية الينابيع كما هو مطلوب بموجب اللوائح.

هناك شرطان أساسيان رئيسيان لوضع خطة إدارة واقعية وقابلة للتطبيق هما:

١. التوصيف الهيدروجيولوجي والهيدرولوجي لنوع النبع، ومنطقة الصرف، وبارامترات التغذية ومعايير التصريف، مثل نوعية المياه وكميتها.

٢. النمذجة التنبؤية الموثوقة لتصريف الينابيع ونوعية المياه في ظل الظروف الطبيعية والهندسية بما في ذلك أثناء التنظيم المحتمل للينابيع الاصطناعية.

بالإضافة إلى مكونات الإدارة هذه، والتي تعد أجزاء من إدارة جانب العرض، فإن جميع مصادر إمدادات المياه، بما في ذلك الينابيع، يجب أن تشمل دائماً إدارة جانب الطلب أيضاً. يشير مفهوم إدارة الطلب على المياه بشكل عام إلى المبادرات التي تهدف إلى تلبية الاحتياجات الحالية من المياه بكمية أقل من الموارد المتاحة، عادة من خلال زيادة كفاءة استخدام المياه. يمكن اعتبار إدارة الطلب على المياه جزءاً من سياسات الحفاظ على المياه، والتي تصف المبادرات التي تهدف إلى حماية البيئة المائية وضمان استخدام أكثر ترشيداً للموارد المائية. ول سوء الحظ، غالباً ما تُعطى إدارة الطلب على المياه أولوية منخفضة أو تُمارس على مضض، ويرجع ذلك جزئياً إلى الفرضية الخاطئة بأنها تنطوي فقط على زيادة الرسوم. قطاع المياه مدعوم بشكل كبير في كل من البلدان النامية والمتطورة على حد سواء، وعادة ما يتردد السياسيون في "مصارعة" مسألة تسعير المياه خاصة أثناء الانتخابات. ومع ذلك، بالإضافة إلى التسعير، الذي عادةً ما يكون وسيلة فعالة لإدارة الطلب على المياه، فإن العديد من التدابير الأخرى، عند الجمع بينها، يمكن أن تكون فعالة بنفس القدر. وقد وردت مناقشة مفصلة للغاية حول أدوات إدارة الطلب، واستخدام المياه، والحفاظ على المياه، مع أمثلة من العديد من البلدان في تقرير الاستخدام المستدام للمياه في أوروبا. الجزء ٢: إدارة الطلب، الذي نشرته الوكالة الأوروبية للبيئة (EEA) في عام ١٩٩٩.

وفيما يلي مقتطفات موجزة من هذا التقرير الشامل الذي يوضح أهمية تديرين من تدابير إدارة الطلب، بخلاف تسعير المياه الذي يمكن أن يكون فعال في تقليل الضغط على موارد المياه بما في ذلك الينابيع:

"يمكن أن تصل نسبة الفاقد في شبكات توزيع المياه إلى نسب عالية. وبالتالي، فإن تقليل التسرب من خلال الصيانة الوقائية وتجديد الشبكة هو أحد العناصر الرئيسية لأي سياسة فعالة لإدارة المياه. تشير أرقام التسرب من مختلف البلدان إلى الحالات المختلفة من الشبكات والمكونات المختلفة للتسرب المتضمنة في الحسابات (على سبيل المثال ألبانيا حتى ٧٥٪، وكرواتيا ٣٠-٦٠٪، والجمهورية التشيكية ٢٠-٣٠٪، وفرنسا ٣٠٪، وإسبانيا ٢٤-٣٤٪). في الزراعة، الهدف من برامج التوعية هو مساعدة المزارعين على تحسين الري. ويمكن تحقيق ذلك من خلال التدريب (على تقنيات الري)، ومن خلال المعلومات المنتظمة حول الظروف المناخية، وتقديم المشورة بشأن حجم الري لمختلف المحاصيل، وتقديم المشورة بشأن توقيت بدء/إيقاف تعديل كميات الري وفقاً لسقوط الأمطار ونوع التربة.

يأتي أحد الأمثلة على الإدارة الفعالة للغاية لجانب الطلب في العصور الوسطى من جمهورية دوبروفنيك (التي أصبحت الآن جزءاً من كرواتيا)، حيث كان لدى العاصمة دوبروفنيك إمدادات مياه مركزية تعتمد على الينابيع قبل فترة طويلة من معظم العواصم

الأوروبية الأخرى. الشكل (١-٧)، تم إصدار قانون جديد ينص على أن "سيتم قطع اليد اليمنى لكل من يُضبط وهو يحول المياه من أيسد قناة النقل" و"سيتم إرسال موظفين عموميين كل أسبوع لفحص نظام توصيل المياه بالكامل وتحديد ما إذا كان هناك أي شيء تالف أو فاسد" (Tusar, 2008). على الرغم من أنه من الصعب تخيل اليوم في العالم المتحضر، إلا أن هذه الممارسة تُظهر أن أولئك الذين يسرقون أو "يفسدون" المياه المخصصة لاستخدام الآخرين يجب أن يتحملوا بعض العواقب المحددة بوضوح. وبالمثل، ينبغي أن يكون لإدارة الينابيع (والموارد المائية) هدف محدد بوضوح. وهذا صحيح بالنسبة لأي مستوى من مستويات الإدارة، بدءًا من جهات المياه المحلية أو مزود المياه وانتهاءً بالمستوى الوطني (الدولة). يجب أن يتضمن هدف الإدارة تحديد قيم حدية للكميات التي يمكن قياسها بسهولة مثل تدفقات الينابيع (ومستويات المياه الجوفية المرتبطة بها في طبقة المياه الجوفية)، جودة المياه، أو التغيرات في تدفق المجاري المائية وجودة المياه السطحية حيثما تؤثر أو تتأثر بتصريف الينابيع. عندما يتم الوصول إلى هذا الحد، تتطلب القواعد واللوائح إيقاف أو تعديل كمية المياه المحولة من النبع أو تعديل استخراج المياه الجوفية من طبقة المياه الجوفية لمنع تجاوز الحد القانوني.



الشكل ١-٧ نافورة أونوفريا العظيمة في دوبروفنيك، كرواتيا، التي صممها وبنها المهندس المعماري الإيطالي أونوفريا في عام ١٤٤٠. تم نقل المياه للنافورة، التي تتضمن خزان تخزين المياه، من مجموعة من الينابيع بواسطة نظام قنوات بطول ١٢ كم. (الصورة من موقع

<https://www.holidify.com>).

قد تتراوح أهداف الإدارة من أهداف نوعية بالكامل إلى أهداف كمية بحتة. بحيث يكون لكل نبع ، حد محدد محليًا، والذي يمكن أن يختلف اختلافاً كبيراً. على سبيل المثال، عند تحديد هدف إداري لجودة مياه الينابيع، قد تختار منطقة ما ببساطة تحديد متوسط قيمة التعكر أو تركيز النترات كمؤشر على ما إذا كان هدف الإدارة قد تحقق أم لا في حين أن جهة أخرى قد تختار عدم وجود مكونات تتجاوز الحد الأقصى للملوثات في معايير مياه الشرب العامة. على الرغم من الحرية الكبيرة في تحديد أهداف الإدارة، يجب على المديرين المحليين للينابيع أن يتذكروا أن الأهداف يجب أن تدعم هدف استدامة الإمداد للاستخدام النافع للمياه في منطقتهم الخاصة.

كما ناقش (Kresic 2009)، أن إدارة الينابيع تبدأ باتفاق جميع أصحاب المصلحة على ما يشكل الاستخدام المستدام. ويجب أن يكون هذا الاتفاق ملزماً وضمن إطار تنظيمي محدد بوضوح. وحيثما أمكن، يجب أن تكون إدارة الينابيع متكاملة بسلسلة مع إدارة المياه الجوفية (طبقة المياه الجوفية)، والمياه السطحية، ومياه الأمطار، والمياه المستعملة (مياه الصرف الصحي)، مما يشكل الإدارة المتكاملة للموارد المائية (IWRM). ولكي يكون كلاهما فعالاً أو حتى ممكناً، فإن إدارة الينابيع والإدارة المتكاملة لموارد المياه يجب أن تعتمد على مراقبة كمية المياه ونوعيتها وتغيراتها المكانية والزمانية لجميع أجزاء دورة المياه. وينبغي أن تشمل هذه المراقبة المياه الجوفية المحيطة (قبل تصريفها في النبع)، ومياه تصريف الينابيع، ومياه الأمطار، والمياه السطحية التي تؤثر أو تتأثر بالنبع، ومياه الصرف الصحي المتولدة والمصرفة داخل منطقة تصريف النبع. جميع بيانات الرصد، وكذلك جميع البيانات التي تم إنشاؤها أثناء تقييم الموارد المائية وتطويرها واستغلالها (العمليات والصيانة)، وهذه البيانات ينبغي تخزينها وتنظيمها ضمن قاعدة بيانات تفاعلية قائمة على نظم المعلومات الجغرافية.

### ١-٣-١ حماية المورد والمصدر

تتحقق حماية طبقات المياه الجوفية والينابيع التي تصرف المياه منها (أي موارد المياه الجوفية بشكل عام) من خلال الوقاية من التلوث المحتمل، ومعالجة المياه الجوفية الملوثة بالفعل، والكشف عن ومنع الاستخراج غير المستدام. يشمل جانب الوقاية برامج منع التلوث وتدابير التحكم في المصادر المحتملة للتلوث، ومراقبة استخدام الأراضي، والتوعية العامة. بعض الأمثلة تشمل على تدابير الوقاية (Kresic 2009) :

- التركيب الإلزامي لأجهزة الكشف المبكر عن انبعاثات الملوثات، مثل التسريبات من صهاريج التخزين تحت الأرض في محطات الوقود. وانتقال السوائل الراشحة من مدافن النفايات.
- حظر استخدام مبيدات الآفات في مناطق تغذية طبقات المياه الجوفية الحساسة.
- وضع ضوابط استخدام الأراضي التي من شأنها منع الإدخال الواضح للملوثات في باطن الأرض، مثل بحيرات المياه الغير معالجة من الصرف الصحي والصناعة والزراعة والحضر.

- وضع ضوابط استخدام الأراضي التي تقلل من انقطاع التغذية الطبيعية لطبقة المياه الجوفية، مثل رصف المناطق الحضرية الكبيرة ("الامتداد الحضري").
- إدارة الجريان السطحي الحضري الذي يمكن أن يلوث موارد المياه السطحية والجوفية على حد سواء (انظر، على سبيل المثال، U.S. EPA, 2005).

ربما يكون الجانب الوحيد الأكثر أهمية في حماية المياه الجوفية هو التوعية العامة. ولسوء الحظ، فإن هذا الجانب غالباً ما يكون أكثر الجوانب التي تعاني من نقص التمويل أو يتم تجاهلها تماماً. وهناك العديد من الوسائل البسيطة لتوعية الجمهور ويمكن أن تؤدي ثمارها أضعاف الاستثمار الذي تم إنفاقه، وتشمل بعض الأمثلة على ذلك التوعية العامة بالبرامج، وصفوف صيانة خزانات الصرف الصحي والاستخدام السليم لها (على سبيل المثال، انظر Riordan, 2007)، والتخلص من النفايات السامة الناتجة من المنازل (مثل الدهانات والمذيبات ومبيدات الآفات في الحدائق)، والتخلص السليم من الأدوية غير المستخدمة. وفيما يتعلق بحماية توافر (كمية) المياه الجوفية في المناطق التي تستخدم فيها المياه الجوفية فلا يمكن الاستغناء عن برامج التوعية العامة بشأن الحفاظ على المياه. ولعل أكثر المستمعين تقبلاً لبرامج التوعية بالمياه الجوفية هم العديد من زوار المتنزهات العامة التي أنشئت بسبب الينابيع (الشكل ٨-١). ويجب استخدام مثل هذه المتنزهات "كنماذج يحتذى بها" والعمل قدر الإمكان على توضيح أهمية المياه الجوفية والينابيع وحمايتها وإبرازها في وسائل الإعلام والبرامج المدرسية.



الشكل ٨-١ ينباع بارتون، تكساس مع الينبوع الرئيسي على الضفة البعيدة، والذي يملأ "حوض السباحة" التي يعتبرها العديد من سكان أوستن مهمة لهم. في مثل هذا اليوم في أوائل التسعينيات، تم إغلاق البركة وتجفيفها بسبب مخاوف تتعلق بجودة المياه.

وهناك العديد من الأشياء التي يمكن فعلها على المستوى الإعلامي والتثقيفي والعلمي على سبيل المثال اجراء البحوث لاستقصائية لجودة المياه في الينابيع بواسطة الأفلام الوثائقية التي توضح العديد من التداخلات بين حقوق الملكية الخاصة وحماية الموارد التي تحدث في جميع أنحاء البلدان. ومن اللافت للنظر اختلاف مقاربات حماية موارد المياه الجوفية على باختلاف مستويات الحكومة والتي قد تعني أشياء مختلفة لأصحاب المصلحة المختلفين بدورهم، مما يؤكد على الحاجة إلى التعليم العام والحوار. على سبيل المثال عندما تكتشف أحد الأسر (أو تم إخبارها) بأن مياه الينابيع التي تشربها قد تلوثت بمادة مسرطنة خطيرة منذ سنوات، فمن غير المنطقي عدم تصريحهم بأن حكومتهم خذلهم. ولسوء الحظ، تحدث حالات مماثلة يوميًا وفي جميع أنحاء العالم. من ناحية أخرى، في العديد من البلدان المتقدمة، هناك عدد غير قليل من البرامج واللوائح الحكومية التي تهدف إلى حماية المياه الجوفية.

تشمل الأمثلة على البرامج تلك التي تعالج منع التلوث كليًا أو جزئيًا البرامج التالية: برنامج تقييم مصادر المياه، وبرنامج منع التلوث، وبرنامج حماية فوهات الآبار، وتقييمات تقييمات قابلية التأثر، وتقييمات قابلية التأثر مياه الشرب/حماية رؤوس الآبار، وخطة إدارة مبيدات الآفات، وبرنامج التحكم في الحقن الجوفي (Kresic, 2009).

على المستوى المحلي، غالبًا ما تُترجم هذه القائمة الطويلة إلى تطوير وتنفيذ برنامج تقييم مصادر المياه والذي يركز على تحديد مناطق حماية فوهات الآبار (أو "فوهات الينابيع") لحماية مصادر إمدادات المياه الحالية. وهذه الممارسة التنظيمية موجودة في معظم البلدان المتقدمة والعديد من البلدان النامية. وقد تضمن بعض الجهات التنظيمية شرطًا نشر المعلومات للجمهور عند حصر مصادر الملوثات المحتملة داخل مناطق حماية رؤوس الينابيع (أو فوهات الآبار).

في العديد من البلدان، لا تزال الحماية الشاملة لمورد المياه الجوفية مفهومًا غامضًا إلى حد ما وبالتأكيد لا تخضع لأي تنظيم شامل مطبق قانونيًا. لكون إدارة المياه الجوفية في معظم البلدان مجزأة للغاية، حيث تتوزع المسؤوليات بين عدد كبير من الجهات الوطنية والمحلية. في كل مستوى من مستويات الحكومة، هناك سلطات قانونية تسمح بالسيطرة على واحد أو أكثر من تحديات وتهديدات المياه الجوفية ولهذا يجب أن تكمل هذه السلطات بعضها البعض وتسمح بتطبيق الإدارة الشاملة لموارد المياه الجوفية. والسبب الرئيسي للافتقار إلى تنظيم شامل لحماية المياه الجوفية هو أن أي تنظيم من هذا القبيل سيتطلب الكثير من الإرادة السياسية، لأنه يجب أن يتضمن ضوابط صارمة لاستخدام الأراضي وموارد كبيرة لمراقبة وإنفاذ ممارسات استخدام الأراضي. وهذا، بحكم تعريفه، يشمل أي نشاط زراعي أو صناعي أو أي نشاط آخر يستخدم الأراضي. وبما أن هذا الأمر غير ممكن في المستقبل القريب، في معظم الحالات، فإن الحماية الحقيقية لكل من الموارد والمصادر الحالية، في النهاية، تُترك للمجتمعات المحلية وأنظمة المياه العامة.

وعليها أن تضع خططاً إدارية تشمل جميع أصحاب المصلحة والجمهور، من شأنها تقليل المخاطر على إمدادات المياه ومواردها. ببساطة، إذا كان المجتمع المحلي (بما في ذلك جميع أصحاب المصلحة) يعتقدون أن صناعة معينة أو نشاطًا معينًا لاستخدام الأراضي لن يهدد مصادره والمورد ككل (سواء من حيث الكمية أو النوعية)، فيجب أن يكون الجميع راضين. إذا لم يكن الأمر كذلك،

فهناك عادة ما تكون هناك أربعة خيارات: (١) التوعية العامة التي قد تحل المشكلة عن طريق التغيير الطوعي لاستخدامات الأراضي المشكوك فيها، (٢) سن اللوائح والتنظيمات المحلية التي قد تترك بعض أصحاب المصلحة (٣) حيازة الأراضي والحفاظ على الأراضي، (٤) رفع دعوى قضائية (Kresic, 2009).

كما أشار (Rogers and Hall, 2003)، فإن إدارة أي مورد أو مصدر مائي (مثل النبع) هي جزء من الحوكمة الشاملة للمياه، والتي تشمل القدرة على تصميم السياسات العامة والأطر المؤسسية المقبولة اجتماعياً والمنصفة والمستدامة بيئياً. بالنظر إلى تعقيدات استخدام المياه داخل المجتمع، تتطلب الحوكمة الفعالة للمياه مشاركة جميع أصحاب المصلحة ويجب ضمان سماع الأصوات المتباينة واحترامها في القرارات المتعلقة بتنمية وتخصيص وإدارة المياه المشتركة واستخدام الموارد المالية والبشرية. تتداخل جوانب الحوكمة مع الجوانب التقنية والاقتصادية للمياه ولكنها تشمل القدرة على استخدام العناصر السياسية والإدارية لحل مشكلة ما أو استغلال فرصة ما (Rogers and Hall, 2003).

وهناك العديد من الأمثلة الحديثة على حوكمة المياه الجوفية على نطاق سياسي كبير في توجيه المياه الجوفية والذي تشير في معظمها إلى المياه الجوفية على أنها "أكثر المياه الجوفية حساسية وأكبر كتلة من المياه العذبة وعلى وجه الخصوص، المصدر الرئيسي لإمدادات مياه الشرب العامة في العديد من المناطق" (European Parliament and the Council of the European Union, 2006). وعلى هذا السياق وضعت تدابير محددة لمنع تلوث المياه الجوفية ومكافحته، والذي يُعرف بأنه الإدخال المباشر أو غير المباشر للملوثات في المياه الجوفية نتيجة للنشاط البشري. وتشمل هذه التدابير (١) معايير لتقييم الحالة الكيميائية الجيدة للمياه الجوفية و(٢) معايير لتحديد وعكس الاتجاهات التصاعدية الكبيرة والمستمرة للتلوث وتعريف نقاط البداية لعكس الاتجاه. يتطلب هذه التوجه أيضاً إنشاء مناطق وقاية للمياه الجوفية بالحجم الذي تراها الهيئة الوطنية المختصة ضرورية لحماية إمدادات مياه الشرب. وقد تغطي مناطق الحماية هذه مساحات إقليمية. ونجد في الدول الأوروبية دلالة في التوجهات عند التعامل مع المياه الجوفية فهي بالنسبة لهم بمثابة مورد طبيعي قيّم، وبالتالي يجب حمايتها من التدهور والتلوث الكيميائي. وهذا أمر مهم بشكل خاص للنظم الإيكولوجية المعتمدة على المياه الجوفية وللاستخدام المياه الجوفية في إمدادات المياه للاستهلاك البشري. قد تتطلب حماية المياه الجوفية في بعض المناطق تغييراً في الممارسات الزراعية، الأمر الذي قد ينطوي على خسارة في الدخل. وتنص السياسة الزراعية المشتركة على آليات تمويل من أجل تنفيذ تدابير للامتثال لمعايير الجماعة.

أساس أي حماية وإدارته ناجحة للينابيع (المياه الجوفية بشكل عام) هو حماية مناطق التغذية سواء كانت طبيعية أو اصطناعية من خلال الممارسات المنظمة لاستخدام الأراضي والتي لا يمكن أن تؤثر سلباً على كمية أو نوعية المياه الجوفية. وبالنظر إلى العديد من الأنشطة البشرية المتنوعة التي يمكن أن تؤدي إلى تلوث المياه الجوفية، فإن عدم حماية مناطق التغذية يقلل في نهاية المطاف من توفرها الصالح للاستخدام مما يتطلب معالجة مكلفة أو يتم استبدالها بمياه جوفية أكثر تكلفة.

والتنمية الحضرية من الأمثلة على التغيير في استخدام الأراضي والذي يؤثر بشكل متزايد على العديد من أحواض المياه الجوفية. فبالإضافة إلى تأثيراتها على النوعية، فإن التنمية الحضرية (الرصف والمباني على الأراضي الزراعية السابقة وتبطين قنوات التحكم

في الفيضانات، وغيرها من التغيرات في استخدام الأراضي) قد تقلل من قدرة مناطق التغذية على تجديد المياه الجوفية، مما يقلل بشكل فعال من تدفقات الينابيع والقدرة المستدامة للآبار. وهذا بدوره قد يضع ضغطاً إضافياً على الينابيع، مع زيادة الطلب الإضافي على استخراج المياه الجوفية عبر الآبار، (الشكل ٩-١).

وفي الغالب يحدث تدهور نوعي وكمي لمياه الينابيع نتيجة التأثيرات المشتركة لتغيرات استخدام الأراضي وضخ المياه الجوفية. وقد نصحت الجهات المختصة في المياه في (California Department of Water Resources, 2003) أنه لضمان استمرار مناطق التغذية لتجديد المياه الجوفية، في مناطق الينابيع التي تعاني من التدهور الكمي نتيجة التأثيرات المشتركة لتغيرات استخدام الأراضي وضخ المياه الجوفية، (الشكل ١٠-١)، فإنه يجب على مديري المياه ومخططي استخدام الأراضي العمل معاً من أجل:

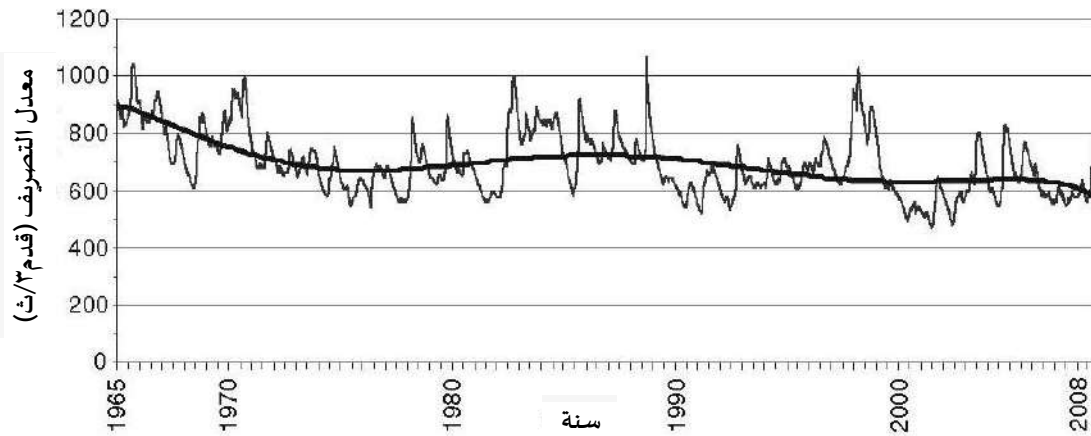
- تحديد مناطق التغذية بحيث يكون الجمهور وكالات تقسيم المناطق المحلية على دراية بالمناطق التي تحتاج إلى حماية من الرصف والتلوث.
- تضمين مناطق التغذية في فئات تقسيم المناطق التي تقضي على إمكانية دخول الملوثات إلى تحت السطح.
- توحيد المبادئ التوجيهية للمعالجة المسبقة لمياه التغذية بما في ذلك المياه المعاد تدويرها.
- تركيب آبار مراقبة لجمع البيانات حول التغيرات في جودة المياه الجوفية التي قد تكون ناجمة عن التغذية.
- مراعاة أهمية مناطق التغذية في قرارات استخدام الأراضي والتنمية.

تمثل حماية المياه الجوفية وإدارتها في المناطق الريفية، تحدياً خاصاً. واللامركزية هي طبيعة نشاط استخدام المياه الجوفية لوجود الكثير من الآبار الخاصة التابعة للمستخدمين. الذين يقومون بحفر آبارهم الخاصة، وتركيب معداتهم الخاصة، ويتبعون جداول الضخ الخاصة بهم، ويستخدمون الأسمدة والمبيدات الحشرية التي من اختيارهم، ويستخدمونها بكميات وبجداول زمنية من اختيارهم أيضاً. وفي حالة طبقات المياه الجوفية، ومع وجود آلاف أو مئات الآلاف من المستخدمين، فإن الإنفاذ من أي نوع، بما في ذلك على سبيل المثال، قياس سحب الآبار، يعتبر مستحيل إذا لم يكن لدى المستخدمين أي حافز للامتثال. وينطبق الشيء نفسه على استخدام المبيدات الحشرية أو الأسمدة أو ممارسات الري الأكثر كفاءة. لذلك من الضروري إيجاد حوافز للمستخدمين للمشاركة بفعالية في حماية المياه الجوفية وإدارتها. ويمكن تحقيق ذلك من خلال توفير بيانات حول حالة موارد المياه الجوفية (سواء من حيث الكمية، مثل التغيرات والاتجاهات في مناسيب المياه الجوفية، والنوعية، مثل تركيزات النترات ومبيدات الآفات)، وتعزيز دور جمعيات إدارة وحماية طبقات المياه الجوفية (التي من خلالها يمارس المستخدمون الضغط من أجل تحقيق أهداف الإدارة والحماية)، وزيادة استخدام التقنيات المبتكرة (Kemper et al., 2002–2005).

## ١-٣-٢ الحماية مقابل الاستعادة

إن اصلاح طبقات المياه الجوفية الملوثة بالفعل هو الجانب الرئيسي الثاني لحماية الموارد. ويجب ان تحظى أنشطة معالجة المياه الجوفية بأولوية قصوى للحد من مخاطر الأثار الضارة على صحة الإنسان، ثم استعادة المصادر المستخدمة حاليًا والمتوقعة بشكل معقول لمصادر مياه الشرب والمياه الجوفية كلما كانت عمليات الاستعادة هذه ممكنة عمليًا وقابلة للتحقيق (U.S EPA, 1991). ونظرًا للتكاليف والقيود التقنية المرتبطة بتنظيف المياه الجوفية ينبغي وضع إطار عمل يضمن تحقيق أقصى استفادة بيئية وصحية عامة من كل ما يتم إنفاقه إلى أقصى حد. وبالتالي، عند اتخاذ قرارات الاستصلاح، يجب اتباع نهج واقعي في الاستعادة على أساس الاستخدامات الفعلية والمتوقعة للمورد بشكل معقول ومع مراعاة الخصائص الاجتماعية والاقتصادية. ونظرًا للتكاليف والصعوبات التقنية المرتبطة بمعالجة المياه الجوفية، فمن الأهمية الكشف والمراقبة المبكرة بهدف وضع الخطوات المناسبة للتحكم والتخفيف من مخاطر الأثار الضارة لتلوث المياه الجوفية على صحة الإنسان والبيئة ومعالجتها.

لسوء الحظ، أصبحت النفقات والصعوبات التقنية المرتبطة بمعالجة المياه الجوفية أكثر وضوحًا في الآونة الأخيرة، حيث تواجه المجتمعات الازمات الاقتصادية ومختلف تهديدات تغير المناخ. ولذلك يجب التدقيق بعناية بكل جانب من جوانب الاستدامة، بما في ذلك مختلف جهود استعادة المياه الجوفية وتكاليفها واستدامتها. وفي بعض المواقع المعقدة من الناحية الهيدروجيولوجية، بما في ذلك الينابيع الملوثة، يستمر توصيف (تشخيص) تلوث المياه الجوفية لأكثر من عقد من الزمن، وتتجاوز التكلفة في بعض في المواقع الفردية ملايين او عشرات الملايين من الدولارات. وفي نفس الوقت ولأسباب مختلفة، قد لا تتم المعالجة الفعلية للمياه



الشكل ١-٩ الرسم الهيدروجرافي لتصريف هيدروجراف ينابيع راينبو، أحد الينابيع ذات الدرجة الأولى في فلوريدا، مع اتجاه متعدد الحدود من الدرجة السادسة. (U.S. Geological Survey, 2008).



الشكل ١-١٠ الري المحوري المركزي المكثف باستخدام المياه الجوفية من نفس طبقة المياه الجوفية التي تزود العديد من الينابيع (U.S. Geological Survey, 2008).

الجوفية على نطاق كامل (استعادة طبقة المياه الجوفية إلى الاستخدامات المفيدة). وغالبًا ما يكون سبب ذلك هو العديد من حالات عدم اليقين المتبقية فيما يتعلق بتوزيع الملوثات (مثل السوائل الكثيفة، غير المائية الطور (DNAPL) في باطن الأرض ومسارات انتقالها) (كما هو الحال في العديد من المواقع في البيئات الكارستية والصخرية المتصدعة (الشكل ١-١١)). وهذه الشكوك غالبًا ما تؤدي إلى فشل الاختبارات التجريبية للمعالجة؛ ولكن في الوقت نفسه، في كثير من الحالات، فإن الجهات التنظيمية والجمهور على حد سواء غير مستعدين لقبول أن الاستعادة في موقع معين قد لا تكون "عملية وقابلة للتحقيق". غالبًا ما تكون استعادة طبقات المياه الجوفية الملوثة بالفعل إلى حالتها الطبيعية صعبة للغاية بسبب طبيعة التلوث وتعقيد البيئات الهيدروجيولوجية. ولسوء الحظ، فإن طبيعة التلوث يمكن التحكم فيها أو التخفيف من حدتها على مستوى الاستخدام المحلي للأراضي (على سبيل المثال، تقسيم النطاقات) ومستوى التنمية فقط في حين لا يمكن التحكم في الظروف الهيدروجيولوجية على الإطلاق. في بعض الحالات، لاستعادة طبقات المياه الجوفية الملوثة إلى حالتها الطبيعية، يجب القيام بالتغيير الجذري للبنية الاجتماعية والاقتصادية المحلية والقانونية للمجتمع. وحتى في هذه الحالة، قد يستغرق الأمر عشرات أو مئات السنين حتى تعود

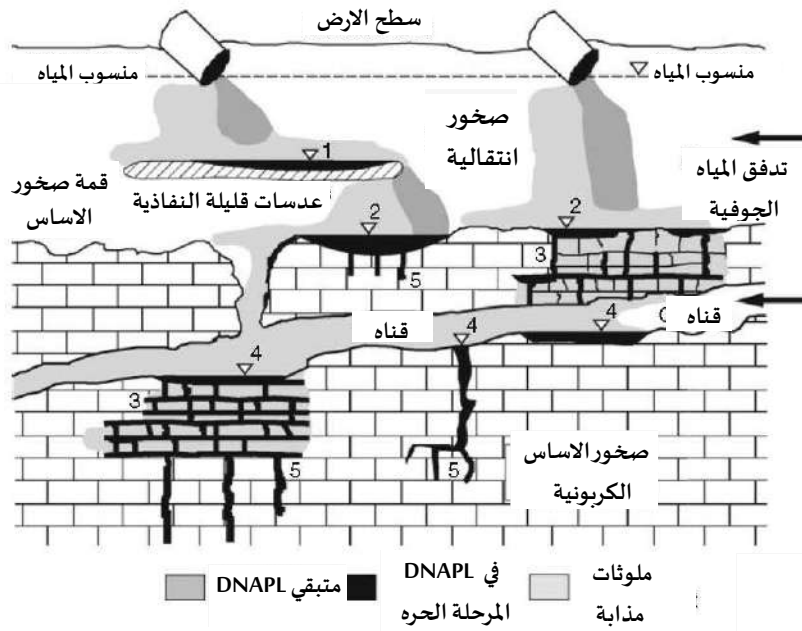
طبقات المياه الجوفية إلى حالتها الطبيعية، على افتراض أن تعريف الظروف الطبيعية يعني عدم وجود أي مواد بشرية المنشأ في المياه الجوفية (Kresic, 2009).

إن استخدام المبيدات الحشرية والأسمدة هو مجرد مثال واحد على العديد من العضلات التي تواجهها الجهات التنظيمية والمجتمعات عند محاولة حماية كل من المياه السطحية وموارد المياه الجوفية. أفادت وكالة البيئة في المملكة المتحدة أنه تم العثور على مبيدات الآفات في أكثر من ربع مواقع مراقبة المياه الجوفية في إنجلترا وويلز في عام ٢٠٠٤، وفي بعض الحالات، تجاوزت الحد المسموح به لمياه الشرب. الأتزازين هو مبيد حشائش يستخدم بشكل رئيس لحماية محاصيل الذرة، وكان يستخدم في الماضي لصيانة الطرق والسكك الحديدية.

لقد كان يمثل مشكلة كبيرة، ولكن منذ حظر استخداماته الغيرزراعية في عام ١٩٩٣، انخفضت التركيزات في المياه الجوفية تدريجيًا. وكما أشارت الوكالة، أنه يمكن أن تظل مبيدات الآفات المحظورة تمثل مشكلة لمدة سنوات عديدة بعد آخر استخدام لها (UK Environment Agency, 2007). وقد قامت بعض البلدان الأوروبية الأخرى بحظر استخدام الأتزازين: فرنسا، والسويد، والنرويج، والدنمارك، وفنلندا، وألمانيا، والنمسا، وسلوفينيا، وإيطاليا. وفي المقابل، خلصت وكالة حماية البيئة الأمريكية إلى انخفاض المخاطر الناجمة عن الأتزازين بالنسبة لما يقرب من ١٠٠٠٠ شبكة مياه شرب محلية تستخدم المياه السطحية ولم تحظر هذا المبيد، الذي لا يزال الأكثر استخدامًا في الولايات المتحدة. وبالمقارنة، كما ذكرت من قبل الوكالة، فإن الدراسة لم تتضمن ٤٠,٠٠٠ شبكة مياه شرب محلية تستخدم المياه الجوفية، ولم يتم ذكر الآبار الخاصة المستخدمة لإمدادات المياه في قرار الوكالة بالسماح باستمرار الاستخدام المستمر للأتزازين (U.S. EPA, 2003).

كما أفادت وكالة البيئة في المملكة المتحدة أنه في عام ٢٠٠٤، كان متوسط تركيز النترات يتجاوز ٥٠ ملليغرام/لتر في حوالي ١٥ في المائة من مواقع الرصد في إنجلترا، وهو الحد الأعلى للنترات في مياه الشرب (للمقارنة، تركيز النترات في المياه الجوفية بشكل طبيعي لا يتجاوز بضعة ملليغرامات فقط لكل لتر). وعندما تصل النترات إلى تركيزات عالية فيجب معالجة المياه أو تخفيفها بمياه أنظف لتقليل التركيزات.

يأتي أكثر من ثلثي النترات في المياه الجوفية من الزراعة في الماضي والحاضر، ومعظمها من الأسمدة الكيميائية والمواد العضوية. وتشير التقديرات إلى أن أكثر من ١٠ ملايين طن سنويًا من المواد العضوية تنتشر على الأرض في المملكة المتحدة. وأكثر من ٩٠ في المائة منها عبارة عن سماد حيواني؛ أما الباقي فهو عبارة عن مخلفات معالجة الصرف الصحي، وسماد النفايات الخضراء، ومخلفات معالجة الورق، والنفايات الصناعية العضوية. المصادر الرئيسية الأخرى للنترات هي تسرب المجاري، وخزانات الصرف الصحي، وأنابيب المياه، ونسبة كبيره من النترات الداخلة للمياه الجوفية سببها ترسيب الغلاف الجوي للنيتروجين. وقد خلصت دراسة أجريت في ميدلاندز أن حوالي ١٥ في المائة من النيتروجين المتسرب من التربة يأتي من الغلاف الجوي. تقدر الوكالة أن ٦٠ في المائة من المسطحات المائية الجوفية في إنجلترا و١١ في المائة في ويلز معرضة لخطر الفشل في تحقيق أهداف التوجيه الإطاري للمياه بسبب ارتفاع تركيزات النترات (UK Environment Agency, 2007).



الشكل ١-١١ (أ) توزيع المواقع المحتملة لتراكم السوائل DNAPL في بيئة كارستية افتراضية: (١) تجمع على طبقة منخفضة النفاذية في الصخور الانتقالية، (٢) تجمع على سطح صخور الأساس، (٣) تجمع في منطقة التدفق المنتشر في صخور الأساس، (٤) تجمع في مجرى في القناة، (٥) التجمع في الشقوق المعزولة عن التدفق. (من Wolfe and Haugh, 2001).

تم إجراء دراسة توضيحية للتلوث غير محدد المصدر من الأنشطة الزراعية من قبل كنتاكي للمسح الجيولوجي في التسعينيات (Currens, 1999). تم اختيار مستجمع The Pleasant Grove Spring في جنوب مقاطعة لوغان، للدراسة لكونه خالي إلى حد كبير من التلوث غير الزراعي وحوالي ٧٠ في المائة من مستجمع المياه يستخدم في إنتاج المحاصيل و٢٢ في المائة منه مراعي. وفي المناطق التحت سطحي للمنطقة توجد نطاقات ذات جيولوجيا كارستية، وينقسم تدفق المياه الجوفية في المستجمع إلى نظام تدفق منتشر (بطيء) ونظام تدفق قنوي (سريع). ويؤثر نظام التدفق المنتشر ونظام التدفق القنوي تأثيراً كبيراً على توقيت الحد الأقصى والحد الأدنى لوصول الملوثات للنبع أثناء وبعد أحداث هطول الأمطار الكبيرة.

النترات هي أكثر الملوثات انتشاراً وثباتاً في المستجمع، ولكن متوسط تركيزها يبلغ ٥,٢ ملغم/لتر على مستوى المستجمع، وبشكل عام لا تتجاوز الحد الأقصى لتركيز الملوثات في مياه الشرب (MCL) البالغ ١٠ ملغم/لتر الذي حددته وكالة حماية البيئة الأمريكية. وقد تم اكتشاف مبيدات آفات أخرى من حين لآخر. تركيزات التريازينات (بما في ذلك الأترازين) والأكلور قد تجاوزت الحدود القصوى لمستويات الحد الأدنى المسموح بها لمياه الشرب خلال ذروة تدفقات النبع. وكان الحد الأقصى لتراكيز كلا من التريازينات، والكاربوفوران، والميتولاكلور، والألاكلور في العينات المأخوذة من نبع The Pleasant Grove Spring على التوالي ٩,٦ و ٧,٤ و ٤٤,٠.

و٦,١ ملغم/لتر. وبلغ متوسط التركيزات المرجحة بالتدفق للفترة ١٩٩٢-١٩٩٣ ٤,٩١ ملغم/لتر المكافئ الأتزازين ثلاثي الميثان و٥,٠ ملغم/لتر لنتروجين النترات. وبالمقارنة، فإن الحد الأقصى المسموح به من أي مبيد آفات منفرد في مياه الشرب في الاتحاد الأوروبي هو ٠,١ ملغم/لتر، ومن جميع المبيدات مجتمعة هو ٠,٥ ملغم/لتر.

تُعد هيدروجيولوجيا المجتمع عاملاً مؤثراً مهماً في التحكم في التباين الزمني لتركيزات المواد الملوثة. تتميز نطاقات التدفق السريع بتراكيز متوسطة من النترات والمبيدات الحشرية أثناء التدفق المنخفض ولكن أثناء التدفق السريع تتميز بتراكيز أعلى بكثير من التريازات وتراكيز أقل من النترات. نظام التدفق المنتشر (البطيء)، والذي يقدر أنه يمثل أقل بقليل من نصف المجتمع، ويصب في المنطقة التي يهيمن عليها التدفق القنوي. تحتوي منطقة التدفق المنتشر على تركيزات أعلى باستمرار من النترات ولكن بتراكيز أقل تغيراً من الأتزازين. تعمل منطقة التدفق البطيء المنتشر كطبقة صخرية خازنة للمواد الكيميائية الزراعية، مما يحافظ على المستوى المرجعي من التريازينات والنترات خلال التدفق المنخفض في نظام التدفق البطيء. تكون تراكيز التريازين أعلى بكثير أثناء التدفق المرتفع، بينما تكون تراكيز النترات مخففة.

وكما استنتج (Currens, 1999) فإن كلاً من إمدادات المياه المحلية والمنزلية المستمدة من المياه الجوفية يمكن أن تتأثر سلباً. ويجب التركيز على تنفيذ أفضل الممارسات الإدارية في المجتمع للتحكم في المخلفات الحيوانية، والتحكم في الجريان السطحي للمحاصيل الحقلية مع ما يرتبط بها من رواسب وفقدان لمبيدات الآفات، بالإضافة إلى استعمال طرق أكثر كفاءة في استخدام الاسمدة. ويوصى بشدة وضع برنامج توعوي قوي حول حماية المياه الجوفية.

توضح هذه الأمثلة أنه حتى لو كان المجتمع المحلي والمنظمون المحليون أو حتى على المستوى المحلي موحدين في رغبتهم في إعادة طبقة المياه الجوفية إلى حالتها الطبيعية، فمن غير الممكن القيام بذلك دون تغيير الإرادة السياسية واللوائح على مستوى أعلى (على سبيل المثال، المستوى الوطني). ومع ذلك، فإن تغيير اللوائح سيكون الخطوة الأولى الضرورية فقط. وعلى سبيل المثال، لاستعادة طبقة مياه جوفية هامة ملوثة من مصادر غير نقطية إلى حالتها الطبيعية في فترة زمنية معقولة (على سبيل المثال، عدة أجيال)، فإن تدابير المعالجة ستكون مكلفة للغاية وتستغرق عقوداً طويلة ويجب أن يدفعها وينفذها المجتمع ككل. ومثل هذه الجهود نادرة الوجود، ولم يتم بذلها على الإطلاق، وتترك استعادة طبقات المياه الجوفية إلى حالتها "الطبيعية" لعمليات التخفيف الطبيعية، بينما يعتاد مستخدمو المياه الجوفية على شرب المياه المعالجة.

على النقيض من ذلك، عندما يكون تلوث المياه الجوفية من مصدر محدد ومعروف "أطراف مسؤولة محتملة" فإن نهج استعادة المياه الجوفية في كثير من الحالات يعتمد على التفسير السائد للوائح القائمة على المستوى المحلي ومستوى الدولة. على سبيل المثال، اعتمدت الكثير من البلدان المتقدمة عدم التسامح مطلقاً مع تدهور المياه الجوفية من قبل كبار الملوثين، مثل الصناعات المختلفة وبالتالي، يُطلب من هؤلاء الملوثين الذين يلوثون المياه الجوفية أن يعيدوا الأجزاء "الخاصة بهم" من المياه الجوفية الملوثة إلى حالتها الطبيعية. وغالباً ما يكون ذلك بغض النظر عن الخصائص الهيدروجيولوجية الأساسية والمخاطر والتكاليف المرتبطة

بها، والنتائج المحتملة. وفي الختام، فإن الوقاية من تلوث المياه الجوفية والينابيع، وكذلك الاستغلال المفرط للموارد ينبغي عدم الاستعاضة به عن أي تدابير ترميمية.

## المراجع

- Austrian Museum for Economic and Social Affairs, 2003. Water ways. Austrian Museum for Economic and Social Affairs, Vienna.
- Baker Ranches, Inc., 2008. Protect Snake Valley, Water. Available at: <http://protectsnakevalley.com/water.html> (Accessed December 2008).
- Barker, R., 2007. Water hearing will affect users statewide. Idaho Statesman (December 10). Available at: [www.idahostatesman.com/235/story/233986.html](http://www.idahostatesman.com/235/story/233986.html).
- Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, S.S., Cooper, H.H., 1982. Groundwater—The water budget myth. In: Studies in geophysics, scientific basis of water resource management. National Academy Press, Washington, DC.
- Bredehoeft, J.D., 2002. The water budget myth revisited: why hydrogeologists model. Ground Water 40 (4), 340–345.
- Brune, G., 1975. Major and Historical Springs of Texas. Report 189, Texas Water Development Board, Austin. California Department of Water Resources, 2003. California's groundwater. Bulletin 118, Update 2003. The Resources Agency, Department of Water Resources, Sacramento, State of California.
- Currens, J.C., 1999. Mass flux of agricultural nonpoint-source pollutants in a conduit-flow-dominated karst aquifer, Logan County, Kentucky. Report of Investigations 1, Series XII, Kentucky Geological Survey, University of Kentucky, Lexington.
- Devlin, J.F., Sophocleous, M., 2005. The persistence of the water budget myth and its relationship to sustainability. Hydrogeology Journal 13, 549–554.
- European Parliament and the Council of the European Union, 2006. Directive 2006/118/EC on the protection of groundwater against pollution and deterioration. Official Journal of the European Union (December 27), L 372/19–31.
- Foster, S., Garduno, H., Kemper, K., Tiunhof, A., Nanni, M., Dumars, C., 2002–2005

- Groundwater quality protection; defining strategy and setting priorities. Sustainable Groundwater Management; Concepts & Tools, Briefing Note Series Note 8, The Global Water Partnership. The World Bank, Washington, DC. Available at: [www.worldbank.org/gwmate](http://www.worldbank.org/gwmate).
- Hill, R.T., Vaughan, T.W., 1898. The Geology of the Edwards Plateau and Rio Grande Plain Adjacent to Austin and San Antonio, Texas, with References to the Occurrence of Underground Waters. U.S. Geological Survey 18th annual report, part 2-B, pp. 103–321.
- Hutson, W.F., 1898. Irrigation systems of Texas. U.S. Geological Survey Water Supply and Irrigation Paper 13, Washington, DC.
- Kemper, K., Foster, S., Garduno, H., Nanni, M., Tuinhof, A., 2002–2005. Economic instruments for groundwater management: Using incentives to improve sustainability, Sustainable Groundwater Management: Concepts and Tools, Briefing Note Series Note 7, GW MATE (Groundwater Management Advisory Team). The World Bank, Washington, DC.
- Kirby, S., Hurlow, H., 2005. Hydrogeologic setting of the Snake Valley hydrologic basin, Millard County, Utah, and White Pine and Lincoln Counties, Nevada—Implications for possible effects of proposed water wells. Report of Investigation 254, Utah Geological Survey, Utah Department of Natural Resources, Salt Lake City, UT.
- Kresic, N., 2009. Groundwater Resources: Sustainability, Management, and Restoration. McGraw-Hill, New York.
- Lewelling, B.R., Tihansky, A.B., Kindinger, J.L., 1998. Assessment of the Hydraulic Connection Between Ground Water and the Peace River, West-Central Florida. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 97–4211, Tallahassee, FL.
- Margat, J., Foster, S., Droubi, A., 2006. Concept and importance of non-renewable resources. In: Foster, S., Loucks, D.P. (Eds.), Non-renewable groundwater resources. A guidebook on socially-sustainable management for water-policy makers. IHP-VI, Series on Groundwater No. 10. UNESCO, Paris.
- Meinzer, O.E., 1927. Large springs in the United States. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 557, Washington, DC.
- Newcomb, W.W., 1961. The Indians of Texas. University of Texas Press, Austin.
- Peck, H.M., 1951. Cessation of flow of Kissengen Spring in Polk County, Florida. In: Water resource studies. Florida Geological Survey Report of Investigations No. 7, Tallahassee, FL, pp. 73–82.

- Rogers, P., Hall, A.W., 2003. Effective water governance. TEC Background Papers No. 7, Global Water Partnership Technical Committee (TEC), Global Water Partnership, Stockholm, Sweden.
- Stewart Jr., H.G., 1966. Ground-water resources of Polk County, Florida. Florida Geological Survey Report of Investigations No. 44, Tallahassee, FL.
- Summers, P., 2001–2005. Hydrogeologic Analysis of Needle Point Spring (Revised Final). Bureau of Land Management, Fillmore Field Office, Utah.
- Taylor, T.U., 1902. Irrigation systems of Texas. U.S. Geological Survey Water Supply and Irrigation Paper 71, Washington, DC.
- Tušar, B., 2008. Vodoopskrba u Dubrovniku [Water Supply in Dubrovnik, in Croatian]. Obrada vode (April), 54–59.
- UK Environment Agency, 2007. Underground, under threat. The state of groundwater in England and Wales. Environment Agency, Almondsbury, Bristol. Available at: [www.environment-agency.gov.uk](http://www.environment-agency.gov.uk).
- UN Department of Economic and Social Affairs, 2009. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future (Brundtland Report). DESA, Division for Sustainable Development, The United Nations. Available at: [www.un.org/esa/dsd/index.shtml](http://www.un.org/esa/dsd/index.shtml).
- U.S. EPA, 1991. Protecting the nation's ground water: EPA's strategy for the 1990's. The final report of the EPA Ground-Water Task Force. 21Z-1020, Office of the Administrator, Washington, DC.
- U.S. EPA, 1999. Safe Drinking Water Act, Section 1429, Ground Water Report to Congress. EPA-816-R-99-016, United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.
- U.S. EPA, 2003. Atrazine interim reregistration eligibility decision (IRED), Q&A's—January 2003. Available at: [www.epa.gov/pesticides/factsheets/atrazine.htm#q1](http://www.epa.gov/pesticides/factsheets/atrazine.htm#q1) (Last accessed January 23, 2008).
- U.S. EPA, 2005. National management measures to control nonpoint source pollution from urban areas. EPA-841-B-05-004, United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.
- U.S. Geological Survey, 2008. USGS Ground-Water Data for the Nation. Available at: <http://waterdata.usgs.gov/nwis/gw>.
- Wolfe, W.J., Haugh, C.J., 2001. Preliminary conceptual models of chlorinated-solvent accumulation in karst aquifers. In: Kuniansky, E.L., (Ed.), 2001 U.S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 01-4011, St. Petersburg, FL, pp. 157–162.

## أنواع وتصنيف ينابيع المياه

## ٢-١ أنواع الينابيع

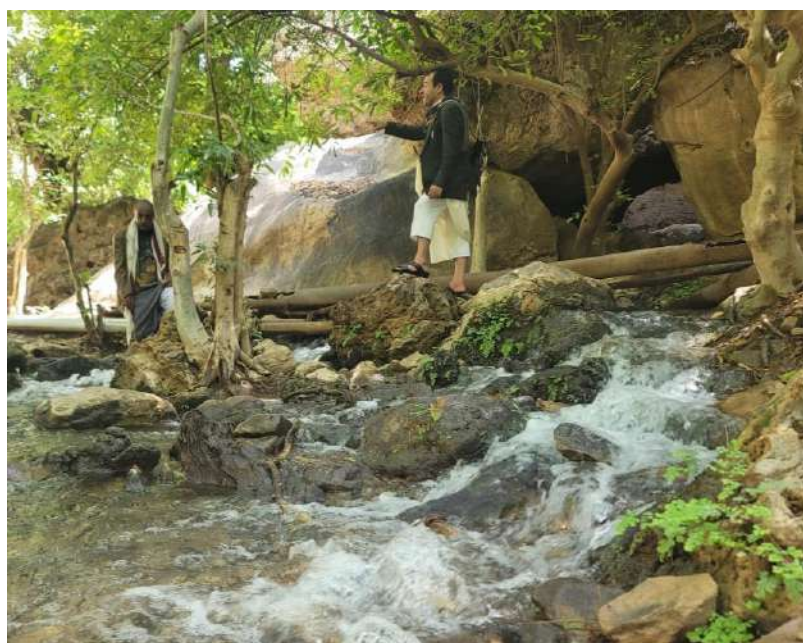
يمكن القول إن أول منشور علمي عن الينابيع هو كتاب الفيزيائي والفلكي الفرنسي [Arago](#) (عن الينابيع والآبار الارتوازية والنوافير النافثة، ١٨٣٥م)، والذي كان أول من أدخل كلمة (Aquifer) (طبقة المياه الجوفية باللغة الإنجليزية). تعرف طبقة المياه الجوفية بأنها تكوين جيولوجي أو مجموعة من التكاوين الجيولوجية المتصلة هيدروليكيًا التي تخزن وتنقل كميات كبيرة من المياه الجوفية الصالحة للشرب. على الرغم من أن معظم قواميس المصطلحات الجيولوجية والهيدروجيولوجية سيكون لها تعريف متشابه للغاية، إلا أنه من المدهش عدد التفسيرات للكلمة في الممارسة اليومية، اعتماداً على الظروف. تنشأ المشكلة عادةً من عدم وجود فهم مشترك للمصطلحين التاليين اللذين لا يمكن تحديدهما كميًا بسهولة: "مهم" و"قابل للشرب". على سبيل المثال، قد يكون النبع الذي ينتج جالونين في الدقيقة مهمًا جدًا بالنسبة لأسرة مع عدم وجود مصدر آخر متاح لإمدادات المياه. ومع ذلك، إذا كانت هذه الكمية في حدود ما يمكن أن يوفره التكوين الجيولوجي من خلال الينابيع أو الآبار، فإن "طبقة المياه الجوفية" هذه لن يتم اعتبارها بالتأكيد كمصدر محتمل لأي إمدادات مياه عامة كبيرة ([Kresic, 2007](#)).

النبع هو موقع على سطح الأرض حيث يتم تصريف المياه الجوفية من طبقة المياه الجوفية، مما يكون تدفق مرئي. يحدث هذا التصريف نتيجة الاختلاف في ارتفاع الرأس الهيدروليكي في طبقة المياه الجوفية وارتفاع سطح الأرض عند منطقة التصريف. الفتحة التي يتم من خلالها تصريف المياه الجوفية تسمى فتحة النبع. عادةً ما يكون للينابيع التي تنبع من الصخور المتماسكة فوهة واضحة المعالم على عكس الينابيع في الرواسب غير المتماسكة، على الرغم من أن الأخيرة قد يكون لها أيضًا فتحة فوهة واضحة (الشكل ٢-١). في بعض الأحيان، يمكن أن تكون الفوهة في قاع بركة نبع عميقة وغير مرئية بسهولة، أو قد تكون مغطاة بالرواسب والحطام الصخري.

عندما لا يمكن ملاحظة التدفق على الفور ولكن سطح الأرض رطب مقارنةً بالمنطقة المحيطة. يسمى هذا التصريف للمياه الجوفية بالتسرب. ومصطلح النبع المتسرب يستخدم للإشارة إلى تصريف الماء المختلف، وعادةً ما يكون من الرواسب غير المتماسكة، مثل الرمل والحصى، أو من التربة الرخوة.



الشكل ٢-١ نبع صغير ينبع من تربة متبقية على ضفة الجدول. يبلغ قطر أكبر الفتحتين حوالي ٢ بوصة (٥ سم) في القطر. (Neven, 2008)



الشكل ٢-٢ يتدفق النبع من كسر في مكشف صخري في الحديدية. (الصورة من عبد الكريم السفيناني).

يشير نبع الشق (أو الكسر) إلى تصريف الماء المركز من مستويات التطبيق والشقوق والكسور والصدوع وغيرها من الفواصل في الصخور الصلبة (الشكل ٢-٢). يُستخدم مصطلح الينابيع/الأنبوبية (أو ينابيع الكهوف) أحياناً لوصف التدفق من الفتحات الكبيرة نسبياً في الصخور؛ وهذه الينابيع هي من خصائص التضاريس الكارستية.

تنشأ الينابيع/الثانوية من مواقع تقع بعيداً عن تصريف الينابيع الأولية التي تكون مغطاة بواسطة الركام الصخري (كسرات الصخور المتساقطة) أو غيرها من الحطام الطبيعي وبالتالي غير مرئية. وعند ملاحظة مثل هذه الينابيع ينبغي محاولة إزالة كل الحطام الصخري وتحديد موقع فوهة (أو فتحات) الينابيع الأولية، حيث أن مواقع تصريف الينابيع الثانوية تميل إلى الانتقال مع مرور الوقت.

وكما ناقشه Meinzer, (1927) نادراً ما يتدفق الماء من فتحة واحدة وقد يتدفق من العديد من الفتحات التي قد تكون متقاربة أو متناثرة على مساحة كبيرة. وما يعتبر نبعا واحداً في منطقة ما في منطقة أخرى يمكن اعتباره مجموعة من الينابيع، ولكل منها له اسم منفرد. وتسمى بعض الينابيع بصيغة المفرد وبعضها بصيغة الجمع، مثل الينابيع الفضية والينابيع الألف. والفكرة التي تكمن وراء هذا الاستخدام هي أنه إذا كانت المياه تنبع من فتحة واحدة أو عدة فتحات متقاربة، فإنها تشكل "نبعاً"، بينما إذا كانت تنبع من عدد من الفتحات متباعدة، فإنها تشكل "ينابيع" (الشكل ٢-٣). ومع ذلك، فإن المصطلحات المحلية في الواقع متغيرة للغاية في هذا الجزئية لدرجة أنه لا يوجد تمييز ثابت بين "النبع" و"الينابيع"، وغالباً ما لا يوجد توحيد في استخدام المصطلحات حتى بالنسبة لنفس المجموعة من الفتحات.

وعلى الرغم من أن جميع الينابيع (باستثناء بعض الينابيع المرتبطة بالنشاط البركاني الصغير والنشاط الحراري المائي، حيث يكون التصريف مدفوعاً بالغازات وتدرجات الحرارة) تصب في النهاية على سطح الأرض بسبب قوة الجاذبية، وتنقسم عادةً إلى مجموعتين رئيسيتين بناءً على طبيعة الرأس الهيدروليكي في طبقة المياه الجوفية الأساسية عند نقطة التصريف:

- تنشأ ينابيع الجاذبية تحت ظروف غير محصورة حيث يتقاطع منسوب المياه الجوفية مع سطح الأرض. وهي وتسمى أيضاً الينابيع الهابطة.

- تتدفق الينابيع الارتوازية تحت ضغط الظروف المحصورة في طبقة المياه الجوفية الأساسية. وهي وتسمى أيضاً الينابيع الصاعدة.

تلعب الجيومورفولوجيا والنسيج الجيولوجي (نوع الصخور والسمات التكتونية، مثل الطيات والصدوع) الدور الرئيسي في ظهور الينابيع. عندما تكون الظروف الخاصة بالموقع معقدة نوعاً ما، فإن الينابيع المختلفة رسمياً، استناداً إلى بعض التصنيفات، قد تظهر بجانب بعضها البعض، مما يسبب الارتباك. على سبيل المثال، ينابيع الصخور المتشققة، نتيجة التصدع، والغير منفذ جانبياً، قد تجبر المياه الجوفية على الصعود من عمق أكبر وتصرفها على السطح من خلال الرواسب السهلية التي تعلو مجرى الوادي (الشكل ٢-٤). هذه المياه قد تكون درجة حرارتها مرتفعة بسبب التدرج الحراري الأرضي الطبيعي في القشرة الأرضية؛ وتسمى هذه بالينابيع الحرارية. وفي الوقت نفسه، قد تنبع مياه جوفية ذات درجة حرارة عادية في نبع جاذبية "بارد" يقع قريب جداً من النبع

الحراري، عند تلامسها مع الرواسب الغرينية ذات الحبيبات الدقيقة الأقل نفاذية مثل الطين. ومع ذلك، قد يكون هناك نبع ثالث مع اختلاف درجة حرارته تبعاً لنمط هطول الأمطار، والتأثيرات الموسمية، وآلية خلط المياه بدرجات حرارة مختلفة.

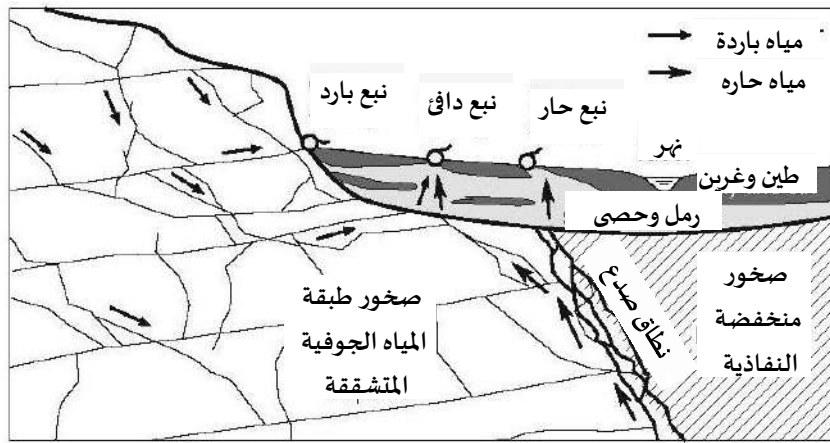


الشكل ٢-٣ تصنيف نبع الألف نبع في وادي هاجرمان على طول نهر الأفعى بالقرب من توين فولز، أيداهو، : (<https://www.thetravel.com>)

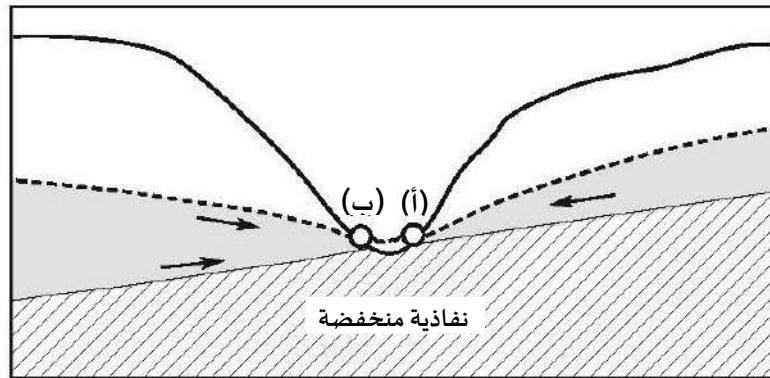
بشكل عام، عندما يكون التلامس بين الصخور الحاملة للمياه (الرواسب) والصخور الأساسية غير المنفذة للمياه ينحدر نحو النبع، في اتجاه تدفق المياه الجوفية، وتكون طبقة المياه الجوفية فوق طبقة صخرية غير منفذة يسمى النبع نبع تماسي هابط (الشكل ٢-٥). عندما تنحدر الطبقة الصخرية الغير منفذة بعيداً عن النبع، في اتجاه معاكس لتدفق المياه الجوفية، يسمى النبع نبعا تماسي صاعد (الشكل ب ٢-٥).

تتشكل الينابيع المنخفضة في طبقات المياه الجوفية غير المحصورة عندما تتقاطع التضاريس مع منسوب المياه الجوفية، عادةً بسبب حت مجرى النهر السطحي. (الشكل أ ٢-٦). إن التماس المحتمل بين طبقة المياه الجوفية والتكاوين المنخفضة النفاذية التي تسفلها

ليس السبب الرئيسي لظهور الينابيع (قد يكون هذا التماس معروفاً أو غير معروف). وعندما يشق المجرى السطحي طبقات متناوبة من الرواسب (أو الصخور) النفاذة وغير النفاذة (أو الصخور)، فإن الينابيع المنخفضة الأصلية قد تتحول إلى ينابيع تماسية على ارتفاعات مختلفة فوق قناة المجرى السطحي. (الشكل ب ٢-٦). وغالباً ما توجد مثل هذه الينابيع على طول مصاطب الأنهار الترسيبية والتآكلية.

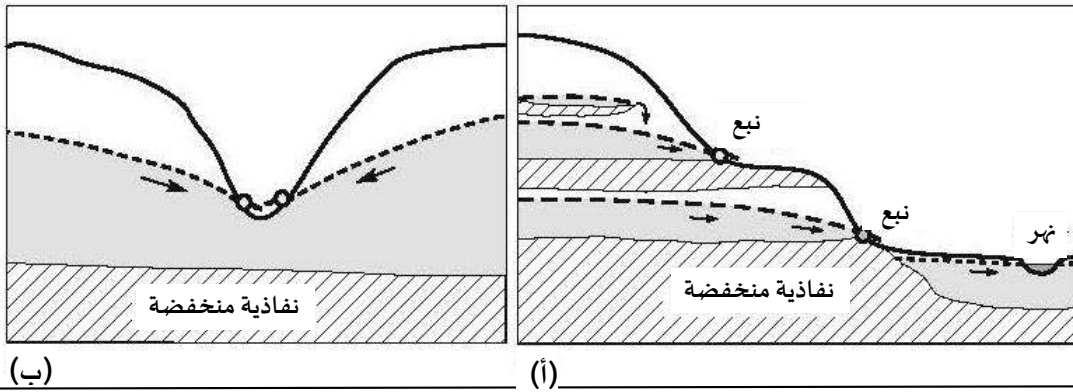


الشكل ٢-٤ ثلاثة ينابيع ذات درجات حرارة مختلفة في منطقة صدع حاجز مغطى بالرواسب المروحية السهلية: (Neven Kresic, 2008)



الشكل ٢-٥ ينابيع الجاذبية التلامسية: (أ) هابط و (ب) صاعد. (معدلة من Milojevic, 1966)

ومن الشائع تواجد الينابيع المنخفضة التي تصب في مجموعات موضعية من الكسور المترابطة في طبقات المياه الجوفية المكونة من الصخور المتشققة ولا ترتبط بالضرورة بالمجرى المائي السطحي فأي منخفض حث يتقاطع مع شقوق حاملة للمياه يمكن أن يسبب الى ظهور الينابيع. وهذا موضح في (الشكل ٢-٧)، ويمكن أن يؤدي تصريف المياه من الشقوق في منطقة الصدع المكشوفة من خلال شق طريق في نفق يقطع الصخور المتشققة، الى تجمد تصريف المياه من الشقوق في منطقة الصدع بسبب انخفاض درجة حرارة الهواء. ومن الجدير بالذكر ان الينابيع الصغيرة المنخفضة في طبقات المياه الجوفية الصخرية المتصدعة استخدمت دائما كمصادر لإمدادات المياه المحلية في جميع أنحاء العالم عبر التاريخ البشري (الشكل ٢-٨).



الشكل ٢-٦ (أ) الينابيع المنخفضة التي تشكلت عن طريق الحث النشط للمجرى السطحي وتقع بالقرب من قناة المجرى و(ب) الينابيع المنخفضة السابقة، التي أصبحت الآن ينابيع جاذبية متصلة على طول مصاطب النهر. (معدلة من Milojevic, 1966).

ويبين (الشكل ٢-٩) بعض الأمثلة على الينابيع/الحاجزة؛ ويشير المصطلح عموماً إلى الينابيع المتكونة عند أي تماس جانبي بين طبقة المياه الجوفية والصخور منخفضة النفاذية (الرواسب). يمكن أن يكون لهذا التماس العديد من الأشكال الناجمة عن عمليات الترسيب والحركات التكتونية، والتي تشكل مجموعة متنوعة من الصدوع والطيات. عندما تُجبر المياه الجوفية على الصعود من أعماق أكبر من طبقة المياه الجوفية على طول التماس بسبب الضغط الهيدروستاتيكي، يُطلق على النبع اسم النبع/الصاعد أو الارتوازي. وعادة ما يكون لهذه الينابيع درجة حرارة مياه مستقرة، وإذا كانت أعلى من متوسط درجة حرارة الهواء في الموقع، تسمى ينابيع حرارية.

أما الينابيع/المتقطعة فتخرج مياهها لفترة من الزمن فقط، بينما تكون جافة في أوقات أخرى، مما يعكس مباشرة نمط تغذية طبقة المياه الجوفية. ويمكن العثور عليها في الصخور الصلبة وغير الصلبة من جميع الأنواع، لكن أكثرها إثارة للإعجاب هي الينابيع التي تتدفق من طبقات المياه الجوفية الكارستية. حيث يمكن للصخور الكارستية أن تستقبل نسبة كبيرة من فترات هطول الأمطار وتنقل هذه المياه الراشحة حديثاً بسرعة نحو الينابيع الجافة.

وعادة ما توجد ينابيع المد والجزر، أو الينابيع الدورية، في التضاريس الجيرية (الكارستية). ويحدث تصريفها في فترات زمنية منتظمة نسبياً ويفسر ذلك بوجود شكل سيفوني في الكتلة الصخرية خلف النبع (الشكل ٢-١٠). بحيث يمتلئ الشكل السيفوني ويفرغ بانتظام، بغض النظر عن نمط التغذية (هطول الأمطار). ومن الأمثلة المعروفة في الولايات المتحدة الأمريكية النبع الدوري في غابة بريدجر- تيتون الوطنية بالقرب من جاكسون، وايومنغ. يقع هذا النبع عند قاعدة منحدرات الحجر الجيري، ويفيض حوالي ٢٨٥ جالوناً في الثانية. تتدفق مياه النبع من فتحة لعدة دقائق، ثم تتوقف بشكل مفاجئ، ثم تبدأ دورة جديدة بعد وقت قصير. تتراوح تدفقات المياه المتقطعة في أي مكان من ٤ إلى ٢٥ دقيقة وتتميز بمياهها الصافية والباردة (U.S. Forest Service Intermountain Region, 2008).

*الاستافل Estavelle* : نوع من الينابيع التي تعمل كنوع خلال ارتفاع الرؤوس الهيدروليكية في طبقة المياه الجوفية وكحفره مياه سطحه خلال الفترات التي يكون فيها الرأس الهيدروليكي في طبقة المياه الجوفية أقل من جسم المياه السطحية (الشكلان ٢-١١ و ٢-١٢). تقع الينابيع الحفرية داخل أو بمحاذاة معالم المياه السطحية.

*الينابيع القديمة* هي أماكن تصريف الينابيع السابقة التي أصبحت الآن غير نشطة. وتعتبر مداخل العديد من الكهوف الجافة دائماً في التضاريس الكارستية. وتعتبر رواسب الترافرتين الموجودة بعيداً عن الينابيع الدائمة أو الجداول السطحية مؤشرات جيدة لنشاط الينابيع القديمة وقد تشير أيضاً إلى وجود ينابيع نشطة قريبة (الشكل ٢-١٣). تلعب الصدوع دوراً رئيسياً في ظهور الينابيع، خاصة في الصخور المتصدعة وطبقات المياه الجوفية الكارستية. كما أنها ليست غير شائعة في الرواسب غير المتماسكة وشبه المتماسكة (الشكل ٢-١٤). على أية حال، فإن الصدوع نفسها قد تلعب واحداً من الأدوار الثلاثة التالية: (١) تكون قناة لتدفق المياه الجوفية، (٢) تخزن المياه الجوفية بسبب زيادة المسامية داخل الصدع (منطقة الصدع)، أو (٣) حجز تدفق المياه الجوفية بسبب انخفاض المسامية داخل الصدع.

كما ناقش ماينزر (١٩٢٣):

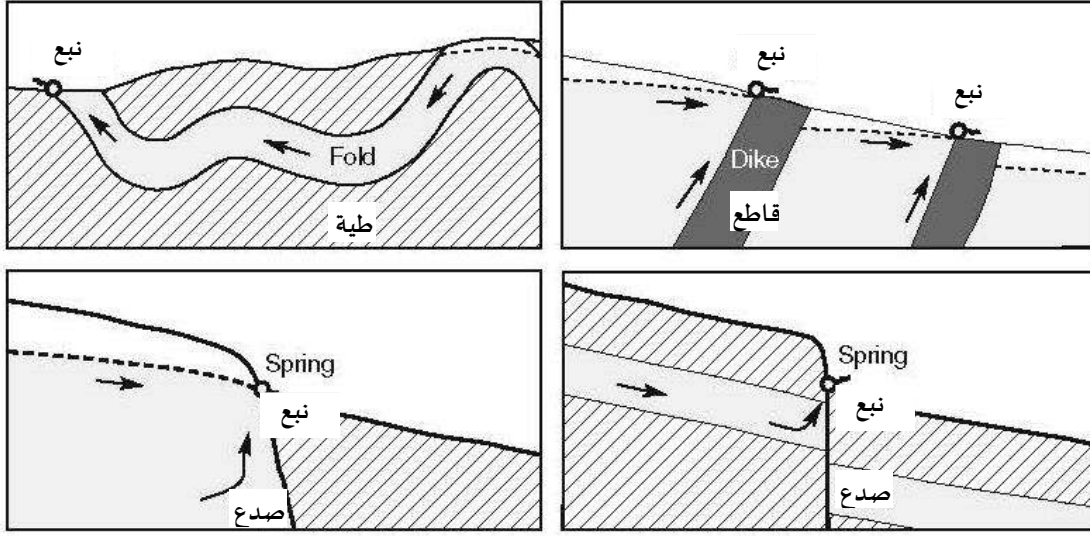
"تختلف الصدوع اختلافاً كبيراً في مداها الجانبي، وفي العمق الذي تصل إليه، وفي مقدار الإزاحة. ليس للصدوع الدقيقة أهمية كبيرة فيما يتعلق بالمياه الجوفية إلا أنها قد تكون، مثلها مثل الصدوع الأخرى كسور أخرى تعمل كحاويات للمياه. لكن الصدوع الكبيرة التي يمكن تتبعها على السطح لمسافة تصل إلى عدة أميال، والتي تمتد إلى أعماق كبيرة تحت السطح، ولها إزاحة لمئات أو آلاف الأقدام أو آلاف الأقدام مهمة جداً في تأثيرها على حدوث ودوران المياه الجوفية.



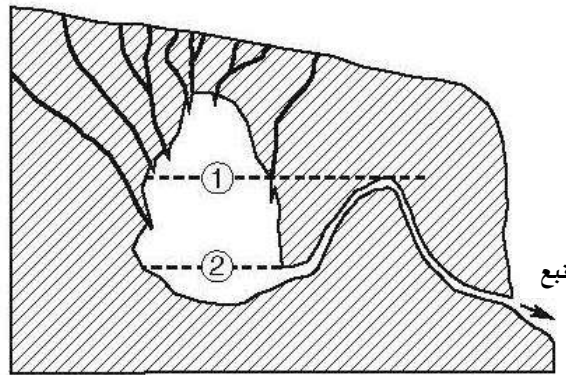
الشكل ٢-٧ نفق وطريق مقطوعان في صخور متحولة من الباليوزويك ، فيرجينيا. المياه المتدفقة من الشقوق في منطقة الصدع متجمدة (معدلة من Milojevic, 1966).



الشكل ٢-٨ التقاط بسيط لمياه نبع صغير يتدفق من الشقوق الصخرية، وقد تم بناء حوض التقاط مياه النبع منذ القدم. (Neven Kresic, 2008).



الشكل ٢-٩ عدة أنواع من الينابيع الحاجزة التي تتدفق من التماس الجانبي بين الصخور النفاذة المتشعبة (طبقة المياه الجوفية) والصخور منخفضة النفاذية (طبقة الحاجز) (من Neven Kresic, 2008).



الشكل ٢-١٠ مخطط لينابيع المد والجزر (الدورية) عندما يصل الماء إلى المستوى (١) يصبح السيكون نشطا وتبدأ المياه بالتدفق من النبع. وعندما ينخفض الماء إلى المستوى (٢) يتوقف التدفق من النبع. (من Radovanovic, 1897).

فهي لا تؤثر على توزيع وموقع طبقات المياه الجوفية فحسب، بل قد تعمل أيضاً كسدود جوفية، تحجز المياه الجوفية، أو كقنوات تصل إلى أعماق الأرض وتسمح بخروج المياه الجوفية إلى السطح، وغالباً بكميات كبيرة. وفي بعض الأماكن، بدلاً من وجود صدع واحد محدد بشكل حاد قد هناك نطاق صدعي، يوجد فيه العديد من الصدوع الصغيرة المتوازية أو كتل من الصخور المكسورة تسمى بريشيا الصدع. قد تمثل مناطق الصدع هذه إزاحة إجمالية كبيرة وقد توفر ممرات مائية جيدة.

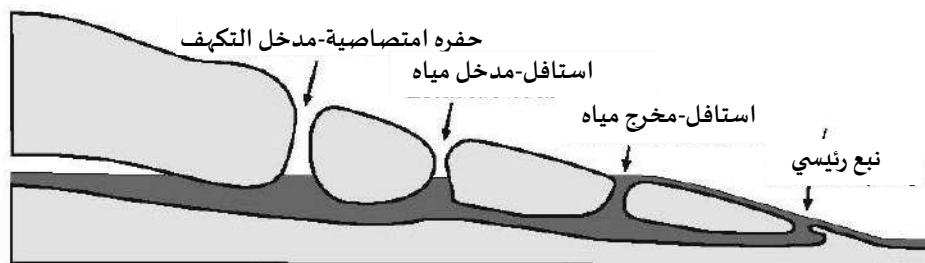
يمكن العثور على أمثلة ممتازة للينابيع الناتجة عن ارتفاع المياه العميقة من خلال فتحات الصدع على طول حواف السلاسل الجبلية في نيفادا وغرب يوتا. العديد من هذه الينابيع لها إنتاجية كبيرة، بعضها يصرف عدة أقدام مكعبة في الثانية. إن وفرة هذه الينابيع والتدفق الغزير لبعضها هو الأكثر إثارة للإعجاب بسبب جفاف المنطقة التي توجد فيها. تتألف سلاسل هذه المنطقة إلى حد كبير من كتلة صدع مائل، وفي العديد من الأماكن توجد صدوع حديثة في المنحدرات المروحية عند سفوح الجبال. أن تدفق الينابيع على طول خطوط الصدع هذه لا يرجع فقط إلى المياه السطحية التي تتسرب إلى رواسب المنحدرات المروحية المجاورة بل يرجع إلى صعود المياه من مصادر عميقة على طول الصدوع كما يبدو من الحقائق التالية: (١) أن الينابيع تقع على طول المسارات العامة للصدوع، وبعض المجموعات الصدعية توجد بانتظام خطي إلى حد ما؛ (٢) إن إنتاجية العديد من الينابيع أكبر مما هو متوقع إذا كانت من مصادر محلية، وبعضها ذات الانتاجية الأكبر تقع على طول النطاقات الجافة الضيقة التي تزودها بكميات قليلة من المياه؛ (٣) أن تدفقها منتظم نسبياً على مدار العام، في حين أن الينابيع العادية في المنطقة تتذبذب كثيراً مع الموسم؛ (٤) العديد من هذه الينابيع تنتج مياه درجة حرارتها أعلى من متوسط درجة الحرارة السنوية في المنطقة، ويوجد الكثير من الينابيع الحارة الغير مرتبطة بالصخور البركانية؛ (٥) العديد من الينابيع تنبع من برك عميقة يُعتقد أنها مرتبطة بالشقوق.

ينتج التأثير الاحتجازي للصدوع عن أربع آليات رئيسية:

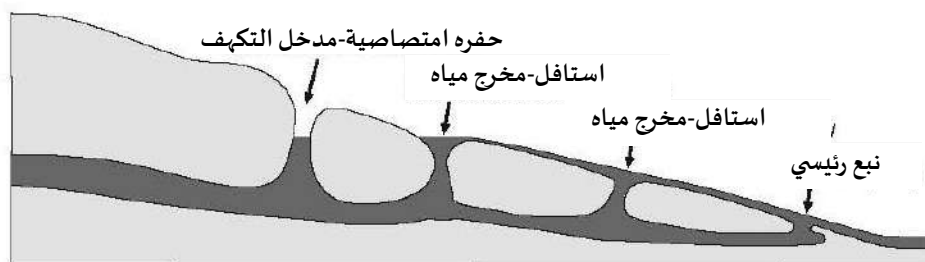
- إزاحة الطبقات القابلة للنفاذ وغير القابلة للنفاذ بالتناوب بطريقة تجعل الطبقات غير القابلة للنفاذ تتأخم الطبقات غير النفاذة، كما هو موضح في الشكل ٩-٢.
- بسبب النتوء الطيني على طول مستوى الصدع الناتج عن الاحتكاك والهرس أثناء إزاحة الصخور، حيث يلتصق هذا النتوء على حواف الطبقات القابلة للنفاذ. والتأثير الاحتباسي للصدوع هو الأكثر شيوعاً في التكوينات غير المتماسكة التي تحتوي على مادة طينية كبيرة (الشكل ١٤-٢).
- تسمت حيز المسام عن طريق ترسيب المواد، مثل كربونات الكالسيوم، من المياه الجوفية التي تدور عبر منطقة الصدع.
- دوران الكتل المسطحة الموازية لمستوى الصدع، بحيث يقلل ترتيبها الجديد من النفاذية العمودية على الصدع (Kresic, 2007).



(i)



(ب)



(ج)

الشكل ٢-١١ مخطط افتراضي يوضح التتابع العكسي للاستافل (أ) التدفق المنخفض، تغمر الأجزاء السفلية من نظام تصريف الكارست ، وتصبح الاستافل حفر امتصاصية. (ب) التدفق المتوسط، تغمر الأجزاء الامامية من نظام تصريف الكارست وتصبح الاستافل السفلية نبعا صاعدة. (ج) التدفق العالي، يمتلئ نظام التصريف الكارستي وتصبح الاستافل ينابيع وتملئ المياه الحفر. (Vineyard and Feder, 1982).



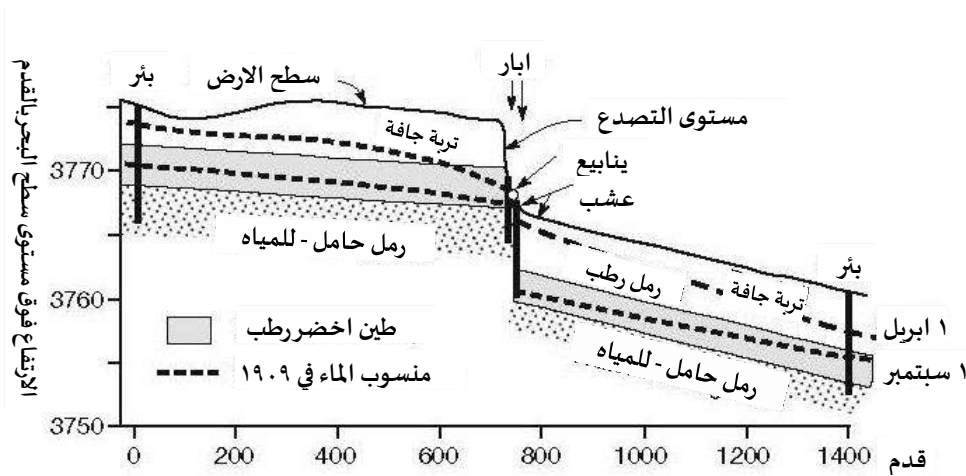
الشكل ٢-١٢ Oval Sink، حفرة امتصاصية عكسية (استافل) في حقل النبع، ميسوري. (From Vineyard and Feder, 1982) تصوير Jerry Vineyard.

### ٢-١-١ الينابيع المغمورة

في كثير من الحالات يكون تصريف المياه الجوفية في المسطحات المائية، تحت مستوى المياه السطحية ولا تكون غير مرئية على الفور. ويمكن أن يكون هذا التصريف إما منتشرًا (الشكلان ٢-١٥ و ٢-١٦) أو يتركز في على شكل ينابيع مغمورة (تحت مائية) (الشكل ٢-١٧). ينابيع المياه العذبة المغمورة التي يتم تصريفها في قاع البحر (الينابيع المغمورة) معروفة ومثيرة لاهتمام الناس منذ آلاف السنين. على سبيل المثال ذكر الجغرافي الروماني سترابو، الذي عاش من ٦٣ ق.م إلى ٢١ بعد الميلاد، عن نبع مياه جوفية عذبة مغمورة تحت سطح البحر على بعد ٤ كم من اللاذقية، سوريا، بالقرب من جزيرة أَرادوس في البحر الأبيض المتوسط. وكانت المياه من هذا النبع تجمع من قارب، باستخدام قمع رصاصي وأنبوب جلدي، يُنقل إلى المدينة كمصدر للمياه العذبة. وتروي روايات تاريخية أخرى عن بائعي المياه في البحرين الذين كانوا يجمعون مياه الشرب من الينابيع البحرية لاستخدامها على متن السفن والاستخدام البري، وكذلك استخدام المواطنين الأتروسكان للينابيع الساحلية "للحمامات الساخنة" (بوسانيوس، حوالي القرن الثاني الميلادي) و"الينابيع البحرية الغواصة التي تتدفق منها المياه العذبة كما لو كانت من الأنابيب" على طول البحر الأسود (بلييني الأكبر، حوالي القرن الأول الميلادي؛ UNESCO, 2004).



الشكل ١٣-٢ رواسب الترافرتين وفوهة عين قديمة، في سارتوغا سبرنجز، نيويورك.



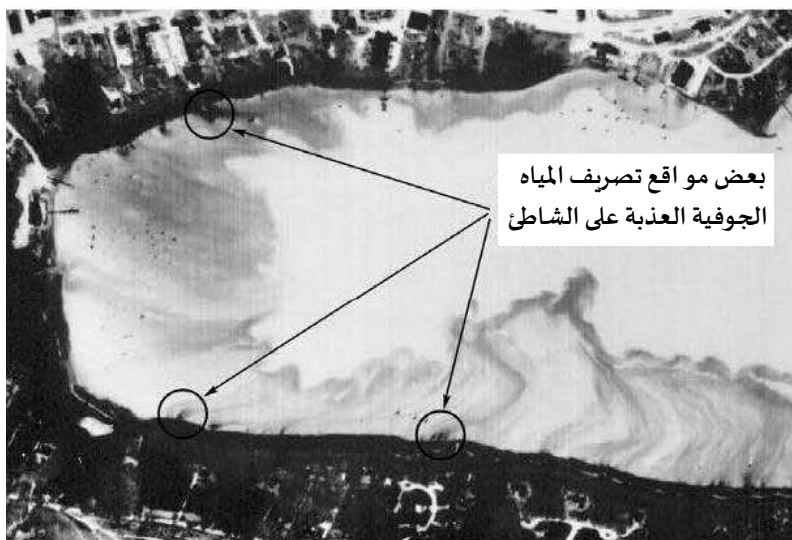
الشكل ١٤-٢ مقطع عرضي من وادي Owens Valley، كاليفورنيا، يُظهر نبعاً ناتجاً عن تأثيرات احتباس صدع. "الرمل الرطب" على الجانب الأسفل يضاوي بعض 'التربة الجافة' على الجانب الأعلى، ويبدو أن له تأثير احتباس. (بعد C. H. Lee، من Meinzer, 1923).

تشكل الصخور الكارستية (انظر القسم ٢-٣) ٦٠ في المائة من شاطئ البحر الأبيض المتوسط، وتساهم بنسبة ٧٥% من مدخلات المياه العذبة، ومعظمها عن طريق التصريف المباشر إلى البحر (UNESCO, 2004)؛ انظر الشكل ٢-١٨). معظم دراسات الينابيع المغمورة مدفوعة إلى حد كبير بأهداف إمدادات المياه الصالحة للشرب. وإحدى الحجج المؤيدة لاستمرار الجهود في هذا الصدد هو أنه حتى لو لم تكن المياه المستخرجة عذبة بالكامل، فقد تكون تحليلتها أقل تكلفة من مياه البحر غير المخففة. وهناك حجة أخرى هي أن تصريف المياه العذبة عبر قاع البحر قد يعتبر إهدارًا، خاصة في المناطق القاحلة. وفي مثل هذه الأماكن، فإن اكتشاف تصريف المياه الجوفية تحت سطح البحر قد يوفر مصادر جديدة لمياه الشرب والزراعة (UNESCO, 2004). تتدفق المياه الجوفية نحو الساحل وتصرفها تحت سطح البحر بسبب التدرج الهيدروليكي بين مناطق التغذية الداخلية ومستوى سطح البحر (الشكل ٢-١٩). إذا كانت طبقة المياه الجوفية محصورة ومحمية بشكل جيد بواسطة طبقة غير منفذة سميكة، فقد يستمر تدفق المياه الجوفية إلى ما وراء الخط الساحلي مع حدوث التصريف النهائي على طول مكشف طبقة المياه الجوفية تحت سطح البحر.

#### ٢-١-٢ الينابيع الحرارية والمعدنية

يمكن تقسيم الينابيع الحرارية إلى ينابيع دافئة وينابيع حارة، اعتمادًا على درجة حرارتها بالنسبة إلى درجة حرارة جسم الإنسان البالغة ٩٨ فهرنهايت أو ٣٧ مئوية: الينابيع الحارة ذات درجة حرارة أعلى والينابيع الدافئة ذات درجة حرارة أقل. درجة حرارة النبع الدافئ أعلى من متوسط درجة حرارة الهواء السنوية في موقع التصريف. يمكن أن تتقلب درجة حرارة مياه الينابيع الحرارية مع مرور الوقت، مما يعكس تأثيرًا سطحيًا أكثر أو أقل. ومن الأمثلة على ذلك ينابيع Granite Hot Springs بالقرب من جاكسون، وايومنغ، حيث تتفاوت درجات الحرارة من ٩٣ فهرنهايت في الصيف إلى ١١٢ في الشتاء. ويرجع هذا التغير على الأرجح إلى الوقت اللازم لشرح مياه ذوبان الثلوج الباردة إلى طبقة المياه الجوفية والتأثير على المياه الساخنة القادمة من أعماق أكبر. في منتصف ثلاثينيات القرن العشرين، قام فيلق الحفظ المدني ببناء حوض أسمنتي لالتقاط المياه الحرارية من مياه النبع الساخنة الحرارية. وتحيط بالحوض الساخن صخور جرانيتية كبيرة ومناظر طبيعية جميلة (الشكل ٢-٢٠). يتدفق النبع من التماس بين الحجر الجيري من العصر الكمبري والحجر الرملي. بالإضافة إلى تفاوت درجة حرارة المياه، يشير التدفق المتقلب للنبع أيضاً إلى تأثير هطول الأمطار وذوبان الثلوج.

توجد السخانات والفومارولات (وتسمى أيضاً السولفاتاراس solfataras) عموماً في مناطق النشاط البركاني الحديث. حيث تتسرب المياه السطحية إلى تحت سطح الأرض إلى المناطق ذات درجات الحرارة العالية المحيطة بالغرف الصهارية، سواء كانت نشطة أو متصلبة حديثاً ولكنها لا تزال ساخنة. وهناك يتم تسخين الماء ويصبح أقل كثافة ويرتفع مرة أخرى إلى السطح على طول الشقوق. في بعض الأحيان، تسمى هذه السمات بالبراكين/المحتضرة، لأنها تمثل المرحلة الأخيرة من النشاط البركاني حيث أن الصهارة في عمق الأرض تبرد وتتصلب.



الشكل ٢-١٥ المسح الجوي الحراري بالأشعة تحت الحمراء لخليج Town Cove، ماساتشوستس. يظهر تصريف المياه الجوفية العذبة على شكل تيارات داكنة (باردة نسبياً) تتدفق إلى الخارج من الشاطئ فوق مياه الأنهار ذات اللون الفاتح (الدافئة) (Barlow, 2003؛ الصورة من John Portnoy).



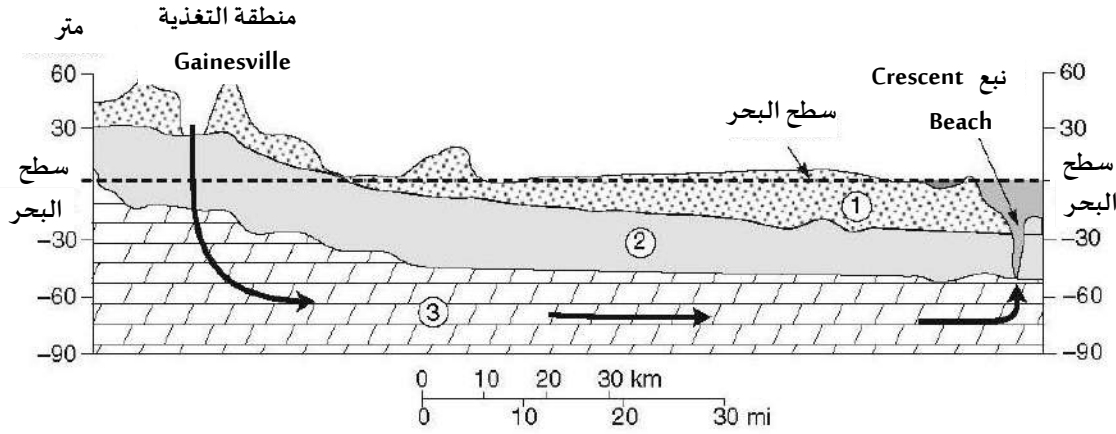
الشكل ٢-١٦ فقاعات الغاز المتحررة من المياه الجوفية المفرغة بسبب انخفاض الضغط؛ مجرى جدول Honey Creek في آن آرپور، ميشيغان. (من Kresic, 2007).



الشكل ١٧-٢ المخرج السفلي لنبع Greer Spring في بولاية ميسوري. يبلغ متوسط تدفق هذا النبع من الدرجة الأولى حوالي ٢١٤ مليون جالون يومياً. ([www.dnr.mo.gov/env/wrc/springsandcaves.htm](http://www.dnr.mo.gov/env/wrc/springsandcaves.htm)).



الشكل ١٨-٢ نبع Vrulja الغاطس في ، كرواتيا. تتناقض مياه النبع الصافية مع المياه الموحلة. (الصورة من Andrija Rubinic).



الشكل ٢-١٩ مقطع عرضي نموذجي لتدفق المياه الجوفية إلى نبع كريستنت بيتش، فلوريدا: (١) رواسب ما بعد الميوسين (الطين الأخضر والرمال والصدف)؛ (٢) وحدة محصورة (تكوين هاوثرن)؛ (٣) طبقة فلوريدان المائية العلوية (حجر أو كالا الجيري). (معدلة من Barlow, 2003).

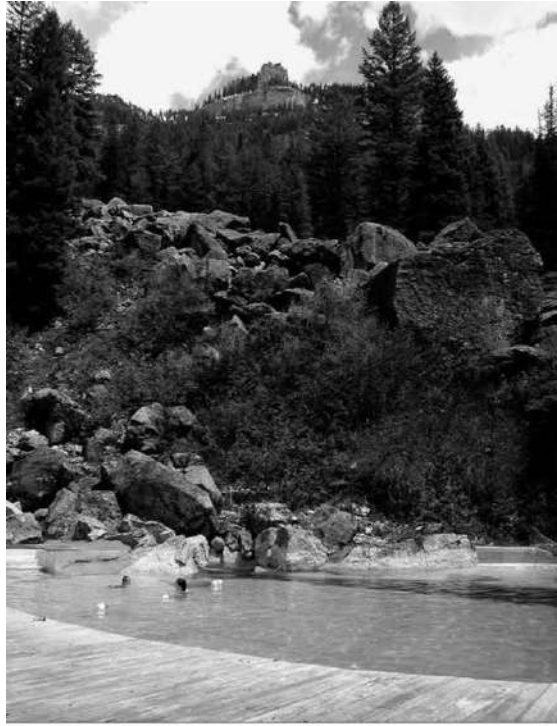
توفر السخانات المتفجرة تمثيلاً مذهلاً للطاقة الجوفية التي تنطلق فجأة، لكن آلياتها غير مفهومة تماماً. ويُفترض أن كميات كبيرة من المياه الساخنة تملأ التجاويف تحت الأرض. وعند المزيد من التسخين للمياه، تندفع بعنف وجزء منها يندفع على شكل بخار. يؤدي الانخفاض الطفيف في الضغط أو الزيادة في درجة الحرارة إلى غليان جزء من الماء. ويؤدي البخار الناتج إلى دفع المياه المتراكمة إلى الأعلى من خلال القنوات إلى سطح الأرض. هذا الفقدان للماء يقلل من الضغط داخل نظام القناة، ويتحول معظم الماء المتبقي فجأة إلى بخار وينفجر عند السطح. يمكن أن تتكرر هذه الدورة بانتظام ملحوظ، كما هو الحال على سبيل المثال في Old Faithful في Geyser في منتزه يلوستون الوطني، الذي يثور بمتوسط مرة كل ٦٥ دقيقة تقريباً (الشكل ٢-٢١؛ U.S. Geological Survey, 2009a, 2009b).

تتغذى الفومارولات، التي ينبعث منها مخاليط البخار والغازات الأخرى، عن طريق قنوات تمر عبر منسوب المياه قبل الوصول إلى سطح الأرض. ويعتبر كبريتيد الهيدروجين ( $H_2S$ )، أحد الغازات النموذجية المنبعثة من الفومارولات حيث يتأكسد بسهولة إلى حمض الكبريتيك والكبريت الأصلي. وهذا يفسر النشاط الكيميائي المكثف والصخور ذات الألوان الزاهية في العديد من المناطق الحرارية (U.S. Geological Survey, 2009a).

يقدم Meinzer (1940) المناقشة التوضيحية التالية فيما يتعلق بحدوث وطبيعة الينابيع الحرارية: إن البيان الدقيق لعدد الينابيع الحرارية في الولايات المتحدة هو، بالطبع، اعتباطي، اعتماداً على تصنيف الينابيع التي هي فقط أكثر دفئاً بقليل من المعتاد بالنسبة لمواقعها وعلى تلك الينابيع المعترف بها كينابيع حرارية.

ينبع ما يقرب من ثلثي الينابيع الحرارية المعترف بها من الصخور النارية - معظمها من الكتل الكبيرة الداخلية ، مثل صخور إيداهو العظيمة، والتي لا تزال تحتفظ ببعض من حرارتها الأصلية. قليل منها، إن وجدت، تستمد حرارتها من الحمم البركانية المنبثقة، والتي كانت منتشرة على نطاق واسع في صفائح رقيقة نسبياً تبرد بسرعة. وتوجد العديد من الينابيع الحرارية على طول الصدوع، وقد يكون بعضها ارتوازي الطابع، ولكن معظمها يستمد حرارته على الأرجح من الغازات أو السوائل الساخنة التي تتصاعد من أجسام تحتية من الصخور الداخلية. تشير البيانات المتوفرة إلى أن الينابيع الحرارية في منطقة الجبل الغربي تستمد مياهها بشكل رئيسي من مصادر سطحية، لكن معظم حرارتها تستمد من مصادر صخرية.

ظهر أحد هذه الينابيع في الشكل ٢-٢٢. يقع النبع في منطقة صدع نهريو غراندي عند التماس بين الصخور المروحية وصخور الاساس، في المنطقة العامة للنشاط الصهيري القديم. يتم تسخين الينابيع الحرارية بواسطة الطاقة الحرارية الموجودة بشكل طبيعي داخل الأرض (الطاقة الحرارية الأرضية). تشير القياسات في الآبار إلى أن درجة الحرارة تزداد إلى الأسفل داخل القشرة الأرضية بمعدل متوسط يبلغ حوالي ٣٠ درجة مئوية/كم ومن متوسط هذا التدرج الحراري الأرضي تم حساب حوالي  $1.6 \times 10^6$  جول من الطاقة الحرارية، بافتراض أن درجة حرارة السطح ١٥ درجة مئوية، يتم تخزينها داخل ١٠ كم من القشرة الخارجية (White, 1965). على الرغم من أن معظم الطاقة مخزنة في الصخور إلا أن الماء والبخار الموجودين في الشقوق والفراغات المسامية للصخور هي الوسائط الطبيعية الوحيدة المتاحة لنقل هذه الطاقة إلى سطح الأرض. في الولايات المتحدة الأمريكية، يبلغ متوسط درجات حرارة المياه الجوفية من عمق ٥ إلى ١٥ متراً ٧-٥ درجة مئوية فوق متوسط درجة حرارة الهواء السنوية (Reed, 1983b). تقوم بعض "البقع الساخنة hot spots" من الأرض، بشكل عام بالقرب من مناطق البراكين الحديثة ، بتفريغ الحرارة بمعدلات تدفق حراري تتراوح من ١٠ إلى أكثر من ١٠٠٠ ضعف من المناطق ذات التدفق الحراري "العادي" ذات الحجم المماثل. تتميز مناطق هذه الينابيع الحارة بانتقال معظم التدفق الحراري الكلي في الماء أو البخار. وبعض أكبر مناطق الينابيع الحارة وأكثرها سخونة تستخدم في الطاقة الحرارية الأرضية. تتميز هذه المناطق بنفاذية عالية، على الأقل محلياً على الصدوع والكسور والطبقات الرسوبية؛ هذه النفاذية العالية تسمح بدوران السوائل، حيث ينتقل معظم التدفق الحراري الكلي إلى أعلى في الماء أو البخار. وقد أنتج الدوران خزانات حرارية مخزنة بالقرب من سطح الأرض أكثر مما هو ممكن عن طريق التوصيل الصخري وحده. عادةً ما تكون التدرجات الحرارية المحلية القريبة من السطح عالية جداً، لكن التدرج الحراري ينخفض بشكل كبير، بل وينعكس عند أعماق أكبر في أي حفرة حرارية أرضية (White, 1965).



الشكل ٢-٢٠ ينابيع الجرانيت الساخنة في تقاطع هوباك، غابة بريدجر-تيتون الوطنية. (الصورة مقدمة من U.S. Forest Service (Intermountain Region, 2008).

يهيمن على أنظمة المياه الساخنة سائل دوار ينقل معظم الحرارة ويضبط إلى حد كبير الضغط تحت السطح (على عكس الأنظمة التي يهيمن عليها البخار). ومع ذلك، قد يتواجد بعض البخار، بشكل عام كفقاعات منتشرة في مياه الأجزاء الضحلة منخفضة الضغط من هذه الأنظمة. ومعظم أنظمة المياه الساخنة المعروفة تتميز بالينابيع الساخنة التي تتفجر على السطح. توفر هذه الينابيع، أدلة مفيدة جداً على درجات الحرارة والأحجام والمحتويات الحرارية المحتملة تحت السطح من خلال التركيب الكيميائي، والتوزيع المساحي، والتغير الحراري المائي المرتبط بها. (Renner, White, and Williams, 1975).

تتراوح درجات الحرارة في أنظمة المياه الساخنة في أمريكا الشمالية من أعلى قليلاً من درجة الحرارة المحيطة إلى حوالي ٣٦٣ درجة مئوية في نظام بحر سالتون Salton (كاليفورنيا) ونظام سيرو برييتو Cerro Prieto القريب في المكسيك. وتنقسم جميع أنظمة المياه الساخنة إلى ثلاثة نطاقات لدرجات الحرارة: (١) فوق ١٥٠ درجة مئوية، يمكن اعتبار هذه الأنظمة لتوليد الطاقة الكهربائية؛ (٢) من ٩٠ إلى ١٥٠ درجة مئوية. هذه الأنظمة جذابة لتسخين المساحات ويمكن الاستفادة منها لتوليد الكهرباء؛ و(٣) أقل من ٩٠ درجة مئوية. يمكن لهذه الأنظمة توفير احتياجات الطاقة للمضخات الحرارية الأرضية التي تزداد شعبيتها بشكل متزايد وفي العديد من العمليات التي تعتمد الآن على الوقود الأحفوري. المصدر الرئيسي للطاقة الحرارية في نطاق درجات الحرارة ٩٠-١٠٠ درجة مئوية داخل الولايات المتحدة الأمريكية هو حرق الغاز الطبيعي وزيت الديزل رقم ٢؛ كما أن التسخين بالمقاومة الكهربائية مصدر شائع للطاقة



الشكل ٢-٢١ صورة لثوران نبع Old Faithful Geyser في متنزه يلوستون الوطني، وايومنغ، الولايات المتحدة الأمريكية. (من [USGS](#), 2009b).



الشكل ٢-٢٢ الينبوع الحراري الصاعد في قناة نهر ريو غراندي، متنزه بيغ بيند الوطني، تكساس. يحافظ رأس هيدروليكي أعلى في البركة الصغيرة يحافظ على المياه الصافية على عكس مياه النهر الموحلة في كثير من الأحيان. (من [Kresic, 2007](#)).

الحرارية في هذا النطاق الحراري (Reed, 1983a). تُجرى قياسات درجة الحرارة المباشرة لأنظمة الطاقة الحرارية الأرضية إما في الينابيع السطحية أو الآبار. لا تتجاوز درجات حرارة الينابيع عمومًا درجة حرارة الغليان عند ضغط الهواء الحالي (١٠٠ درجة مئوية عند مستوى سطح البحر إلى ٩٣ درجة مئوية للمياه النقية على ارتفاع ٢٢٠٠ م)، على الرغم من أن بعض الينابيع في متزه يلوستون وغيره ترتفع درجة حرارتها بمقدار ١-٢ درجة مئوية (Renner et al., 1975). في الماضي، كان استخدام الينابيع الساخنة والمياه الجوفية الحرارية بشكل عام في الولايات المتحدة الأمريكية في المقام الأول من أجل حمامات المياه الساخنة والمساح (العلاج بالمياه المعدنية). ولكن بعد عام ١٩٢٠، تسببت وفرة الغاز الطبيعي الرخيص الثمن من أجل تدفئة الحمامات والمساح في انخفاض سريع في استخدام المياه الساخنة الطبيعية. يعود تاريخ عض استخدام المياه الحرارية الأرضية لتدفئة الأماكن إلى ما قبل عام ١٨٩٠ في مناطق مثل بوير، إيداهو، ولكن الاهتمام بهذا التطبيق كان طفيفًا إلى حد ما حتى السبعينيات وأزمة النفط العالمية الأولى. تتواجد موارد الطاقة الحرارية الأرضية منخفضة الحرارة في نوعين من أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية: الحمل الحراري المائي والتوصيل الحراري المائي. في أنظمة الحمل الحراري المائي، ينقل الدوران الصاعد للمياه الطاقة الحرارية إلى المكامن في الأعماق الضحلة أو إلى السطح عبر الينابيع الحرارية. توجد هذه الأنظمة عادة في المناطق ذات النشاط التكتوني النشط والتدفق الحراري فوق الطبيعي، مثل معظم مناطق غرب الولايات المتحدة. في الأنظمة التي يهيمن عليها التوصيل، يكون الدوران التصاعدي للسوائل أقل أهمية من وجود التدرجات الحرارية الرأسية العالية في الصخور التي تشمل طبقات المياه الجوفية ذات الامتداد الجانبي الكبير. تحدث هذه الظروف تحت العديد من الأحواض الرسوبية العميقة في جميع أنحاء الولايات المتحدة (Sorey, Natheson, and Smith, 1983a). معظم موارد الطاقة الحرارية الأرضية منخفضة الحرارة المحددة والمرتبطة بالحمل الحراري المائي تقع في مناطق الينابيع والآبار الحرارية المعزولة. في مثل هذه المناطق، الدليل الوحيد على وجود خزان حراري أرضي في العمق هو وجود نبع حراري واحد أو مجموعة من الينابيع المتقاربة أو بئر تنتج المياه الحرارية. في غرب الولايات المتحدة، توجد الينابيع الحرارية عادة على طول الصدوع العادية، بينما في شرق الولايات المتحدة يقع جزء كبير من غرب الولايات المتحدة داخل المقاطعة الجيولوجية للحوض والتي لديها تدفق حراري أعلى عمومًا من المعتاد وتتميز بالتكتونية الامتدادية. والاندماج بين أحواض الصدوع الأمامية والأحواض المملوءة بالرسوبيات موآتي لحدوث أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية. توفر المراكز البركانية السيليكاتية الحديثة على طول الحواف الشرقية والغربية للمقاطعة مصادر حرارية محلية لأنظمة الحمل الحراري المائي. تنتج معظم المياه الحرارية في المقاطعة من الدوران العميق. وتوفر الصدوع العادية قنوات قريبة من السطح للمياه الدائرة، وبالتالي تتحكم في مواقع معظم أنظمة الحمل الحراري المائي المحددة (الشكل ٢-٢٣). قد تعمل رواسب ردم الحوض كغطاء حراري التي تحبس الحرارة في طبقات المياه الجوفية الضحلة نسبيًا تحت مناطق واسعة من بعض الأحواض. ومن المحتمل أنه مصدر المياه الحرارية في طبقات المياه الجوفية هذه هو التسرب من قنوات الصدوع (Mariner et al., 1983).

في غرب أركنساس، توجد موارد حرارية أرضية منخفضة الحرارة تم تحديدها في مناطق الينابيع الحرارية في مقاطعة أوآتشيتا، بما في ذلك تلك الموجودة في متزه هوت سبرينغز الوطني وكادو غاب. ترتبط هذه الينابيع بصخور مطوية ومصدوعة بإحكام. وتشير

الدراسات التي أجراها [Bedinger et al. \(1979\) and Steele and Wagner, \(1981\)](#) إلى أن التركيبات الكيميائية متشابهة في جميع الينابيع في هذه المقاطعة وتشير إلى أن أنظمة الدوران التي تغذي الينابيع توجد إلى حد كبير في تكوينات الحجر الرملي الغني بالسيليكا والشيرت. ومع ذلك، لا يُعرف سوى القليل عن تكوين الخزانات الحرارية الأرضية المنخفضة الحرارة المرتبطة بها في هذه المناطق ([Sorey et al., 1983b](#)).

ترتبط الينابيع الحرارية في شرق الولايات المتحدة الأمريكية بمناطق الصدوع في عدة مقاطعات من جبال الأبلاش. وتناولت الأوصاف المبكرة لهذه الينابيع قيمها العلاجية والترفيهية ([Moorman, 1867; Crook, 1899; Fitch, 1927](#)). يتم التحكم في مواقع الينابيع الحرارية في الغالب من خلال البنية التركيبية، وبدرجة أقل، الصخرية. توجد الينابيع في مناطق من الصخور المطوية المنحدرة بشكل حاد والتي تتقاطع مع مناطق صدع عمودية تقريباً باتجاه الشرق والغرب. ويبدو أن ارتباط الينابيع بالمنخفضات الطبوغرافية أو التكهفات ناتج على ما يبدو من حقيقة أن المناطق سهلة التآكل تتوافق مع المناطق التي تحتوي على العديد من الشقوق، والتي بدورها توفر النفاذية العمودية المتزايدة اللازمة لإنشاء نظام الحمل الحراري المائي.

تنبع الينابيع الدافئة في جبال الأبلاش من صخور الحجر الرملي أو صخور الكربونات المكشوفة في الأطراف المنحدرة بشدة من الطيات المحدبة ([Hobba et al., 1979](#)). تُظهر التحليلات الكيميائية لمياه الينابيع الدافئة الصادرة من الصخور الكربونية وجود تركيزات منخفضة باستمرار من السيليكا الذائبة وتركيزات عالية من المغنيسيوم والكالسيوم، مما يشير إلى أن تدفق المياه الدافئة يقتصر على الصخور الكربونية. تحليلات المياه من الينابيع المتدفقة من الحجر الرملي المتصدع تُظهر تركيزات أعلى من السيليكا الذائبة وتركيزات أقل من المغنيسيوم والكالسيوم، مما يشير إلى أن التدفق يقتصر على طبقات الحجر الرملي ([Sorey et al., 1983b](#)).

وتشير الاعتبارات الجيوكيميائية إلى أن درجات حرارة الخزان ليست أعلى بكثير من درجات الحرارة السطحية المقاسة في معظم الينابيع الحرارية الشرقية؛ وتتراوح درجات الحرارة المرصودة من ١٨ إلى ٤١ درجة مئوية. إن وجود هذه الينابيع في مناطق التدفق الحراري المتوسط والتدرجات الحرارية المنخفضة نسبياً ([Costain, Keller, and Crewdson, 1976; Perry, Costain, and Geiser, 1979](#)) يشير إلى أن أعماق الدوران الحراري المائي التي تتراوح عموماً بين ١ و ٣ كم.

كما ناقشها [Duffield and Sass, \(2003\)](#) فإن الينابيع الساخنة التي تعتبر مؤشرات على وجود موارد حرارية أرضية تتراوح بين معتدلة ومرتفعة الحرارة. تتركز موارد الطاقة الحرارية الأرضية في الأماكن التي تتواجد فيها الصخور الساخنة أو حتى المنصهرة (الصهارة) في أعماق ضحلة نسبياً في الطبقة الخارجية للأرض (القشرة الأرضية). تقع هذه المناطق "الساخنة" بشكل عام بالقرب من حدود لعشرات الألواح أو نحو ذلك من الصخور الصلبة (تسمى الصفائح) التي تشكل الغلاف الصخري للأرض، والتي تتكون من القشرة الأرضية والجزء العلوي الصلب من الطبقة السفلية الأكثر كثافة وسخونة (الوشاح). يرتبط التدفق الحراري المرتفع أيضاً بـ "البقع الساخنة" في الأرض (وتسمى أيضاً شذوذات الدوبان أو الأعمدة الحرارية)، والتي ترتبط أصولها بطريقة أو بأخرى بالتدفق التصاعدي الضيق التركيز لمواد الوشاح شديدة السخونة من أعماق الأرض. يمكن أن تحدث البقع الساخنة عند حدود

الصفیحة (على سبیل المثال، تحت أيسلندا) أو فی الصفیحة الداخلية على بعد آلاف الكيلومترات من أقرب حدود (على سبیل المثال، البقعة الساخنة فی هاواي فی وسط صفیحة المحيط الهادئ). مناطق الصخور الممتدة والمتصدعة (الوديان المتصدعة) داخل الصفائح، مثل تلك الموجودة فی شرق إفريقيا وعلى طول نهر ريو غراندي فی كولورادو ونيو مكسيكو، هي أيضاً مناطق مستهدفة مواتية لارتفاع تركيزات عالية من حرارة الأرض على أعماق ضحلة نسبياً.

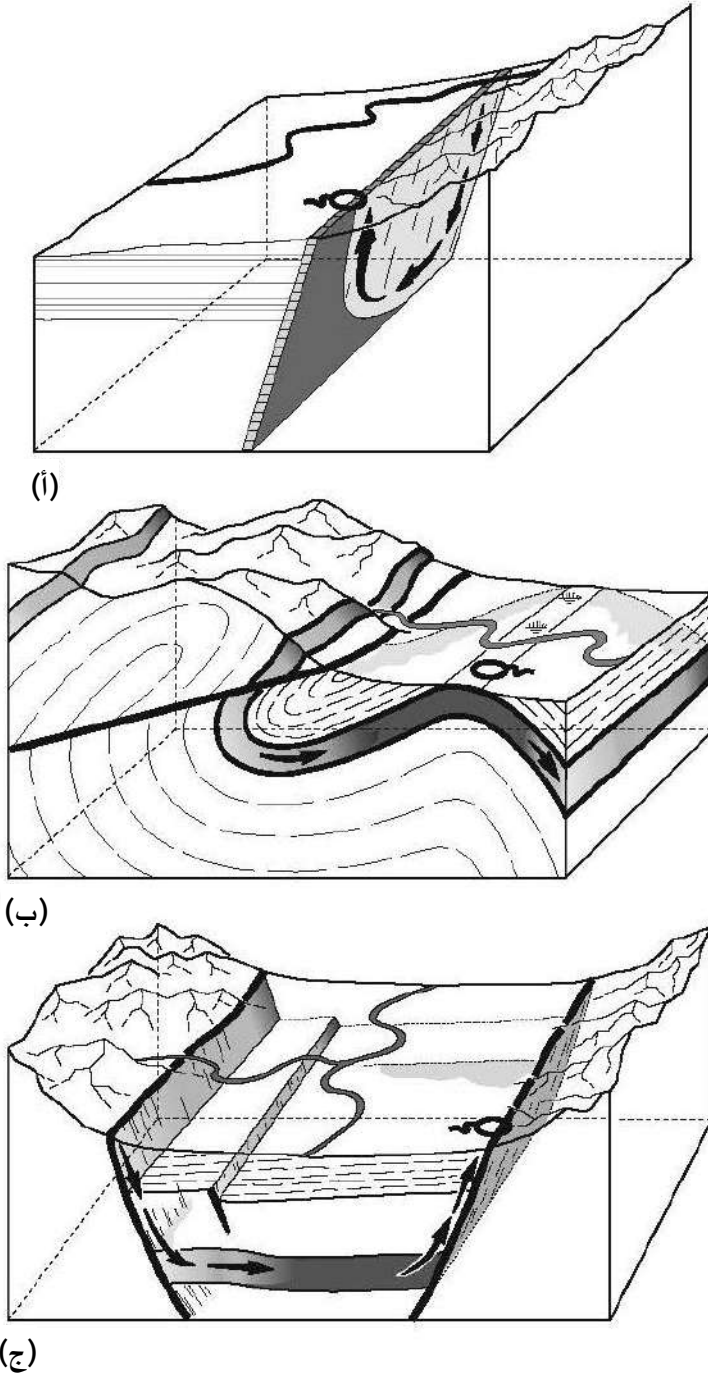
كما أن مناطق التدفق الحراري المرتفع بالقرب من حدود الصفیحة هي أيضاً المناطق التي تحدث فيها معظم الانفجارات البركانية والزلازل. تنشأ الصهارة التي تغذي البراكين فی الوشاح، وتصاحب الحرارة الكبيرة الصهارة المتصاعدة عندما تتغلغل فی البراكين. ويبقى جزء كبير من هذه الصهارة المتداخلة فی القشرة الأرضية، تحت البراكين، ليشكل مصدر حرارة جوفية شديدة وعالية الحرارة لفترات تتراوح بين آلاف وملايين السنين، اعتماداً على العمق والحجم وتواتر التسرب. وبالإضافة إلى ذلك، فإن الزلازل المتكررة - التي تنتج عندما تتصادم الصفائح التكتونية تطحن الصخور مع بعضها البعض، مما يسمح للماء بالدوران فی العمق ونقل الحرارة نحو سطح الأرض. ويؤدي صعود الصهارة من الأعماق ودوران الماء الساخن (الحمل الحراري المائي) إلى الحفاظ على التدفق الحراري العالي السائد على طول حدود الصفائح (Duffield and Sass, 2003).

يوضح الشكل ٢-٢٤ العلاقة بين الينابيع الساخنة والنشاط البركاني الصغير فی سلسلة جبال كاسكيد، غرب الولايات المتحدة، وهي جزء من "حلقة النار"، وهي حزام من الأقواس البركانية والخنادق المحيطية تطوق جزئياً حوض المحيط الهادئ وتشتهر بالزلازل المتكررة والثورات البركانية.

يُظهر الشكل ٢-٢٥ امتداداً للخور الساخن فی شرق وسط كاليفورنيا. يتدفق الخور عبر الوادي الطويل كالديرا فی منطقة بركانية. لطالما كان هذا الامتداد من الخور، منطقة استجمام شهيرة بسبب المياه الدافئة من ينابيعه الحرارية. ولطالما كانت الينابيع الحرارية فی لونغ فالی كالديرا معروفة منذ فترة طويلة لدى الأمريكيين الأصليين. العديد من الينابيع الحارة لها مكانة خاصة لدى القبائل الأمريكية الأصلية وكانت تستخدم لأغراض روحية وطبية.

منذ مايو ٢٠٠٦، كانت الينابيع فی المناطق الأكثر شعبية للسباحة وبالقرب منها "تتفجر" أو تتدفق منا المياه الساخنة جداً والمليئة بالرواسب بشكل متقطع على ارتفاع يصل إلى ٦ أقدام (٢ متر) فوق سطح المجرى. فی بعض الأحيان، يكون النشاط السخاني قوي بما يكفي لإصدار أصوات "فرقة

"مسموعة من على بعد مئات الأقدام. وعادة ما يستمر السخان عادةً لبضع ثوانٍ ويحدث على فترات غير منتظمة، مع وجود عدة دقائق بين الانفجارات. وقد أدت عدم القدرة على التنبؤ بنشاط هذا النبع الخطير إلى قيام دائرة الغابات الأمريكية بإغلاق أجزاء من موقع هوت كريك الجيولوجي فی يونيو ٢٠٠٦ (Farrar et al., 2007).



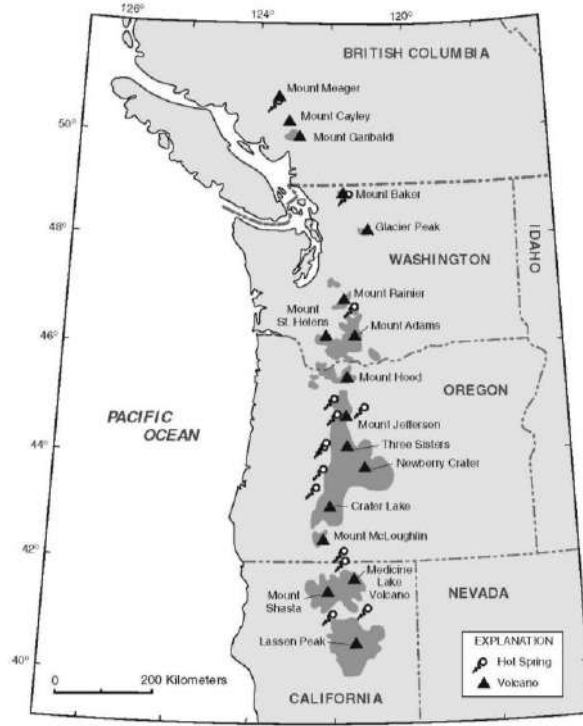
الشكل ٢٣-٢ نماذج المفاهيمية لأنواع أنظمة الحمل الحراري المائي التي توجد فيها مناطق الموارد في فئة الينابيع والآبار الحرارية المعزولة: (أ) مستوى الصدع؛ (ب) حافة الخط المضاد؛ و(ج) الخزان العميق. تشير الأسهم إلى اتجاه دوران السوائل؛ ويبين التظليل الداكن موقع المكانن التي تحتوي على موارد الطاقة الحرارية الأرضية منخفضة الحرارة. (Sorey et al., 1983a).

تنبثق جميع الينابيع في هوت كريك على طول مجرى مائي بين صدعين وتصرف ما مجموعه حوالي ٨,٥ قدم مكعب/ ثانية (حوالي ٢٤٠ لتر/ثانية) من الماء الساخن. **الشكل ٢٦-٢** عبارة عن مقطع عرضي تخطيطي يوضح أصل الماء الساخن في الخور. شرح تفصيلي للأسباب المحتملة لتطور نشاط السخانات الجديدة في الخور (الشكل ٢٨-٢) من قبل [Farrar et al., \(2007\)](#).

الماء الساخن الذي يدور في القشرة الأرضية يذيب بعض الصخور التي يتدفق من خلالها. وكميات ونسب المكونات الذائبة في الماء هي دالة مباشرة لدرجة الحرارة. ولذلك، إذا ارتفعت المياه الحرارية بسرعة إلى سطح الأرض، فإن تركيبها الكيميائي لا يتغير بشكل كبير ويحمل بصمة درجة الحرارة تحت السطح. تظهر الدراسات الميدانية والمخبرية أن هذه الحرارة الأعمق والأكثر حرارة عادة ما "تذكرها" المياه الحرارية للينابيع الحارة. درجات الحرارة تحت السطحية المحسوبة من كيمياء مياه الينابيع الساخنة تم تأكيدها من خلال القياسات المباشرة التي أجريت في قاع الثقوب المحفورة في الأنظمة الحرارية المائية في العديد من المواقع حول العالم. إن تقنية تحديد درجة الحرارة تحت السطحية من كيمياء مياه الينابيع الحارة تسمى القياس الكيميائي الحراري الأرضي (انظر، على سبيل المثال، .. [Duffield and Sass, 2003; Brook et al., 1979](#)).

إن مصطلح الينابيع المعدنية (أو المياه المعدنية) له معنى مختلف تمامًا في مختلف البلدان ويمكن تعريفه بشكل فضفاض للغاية على أنه نبع يحتوي على مياه ذات خاصية كيميائية واحدة أو أكثر مختلفة عن المياه العادية الصالحة للشرب المستخدمة في الإمدادات العامة (انظر **الفصل ٦**).

على سبيل المثال، يمكن أن تحتوي المياه على محتوى مرتفع من ثاني أكسيد الكربون الغازي الحر (مياه مكرنة بشكل طبيعي)، ومحتوى عالٍ من الرادون (مياه "مشعة" لا تزال موجودة في بعض أجزاء من العالم على أنها مياه "طبية" ذات تأثيرات "خارقة")، ومحتوى عالٍ من كبريتيد الهيدروجين ("جيد للأمراض الجلدية" و"الجلد الناعم")، أو ارتفاع نسبة المغنيسيوم المذاب، أو ببساطة أن يكون إجمالي المواد الصلبة الذائبة أعلى من ١٠٠٠ ملغم/لتر. تستغل بعض شركات تعبئة المياه، الازدهار العالمي في استخدام مياه الينابيع المعبأة في زجاجات، لتسمية المياه المستخرجة من الينابيع على أنها "معدنية" حتى عندما لا يكون لها خصائص كيميائية أو فيزيائية غير عادية. في الولايات المتحدة، يخضع الاستخدام العام لمياه الينابيع والمياه المعدنية وتعبئتها في زجاجات لرقابة إدارة الغذاء والدواء الأمريكية ويجب أن تتوافق هذه المياه مع معايير صارمة بما في ذلك حماية المصدر.



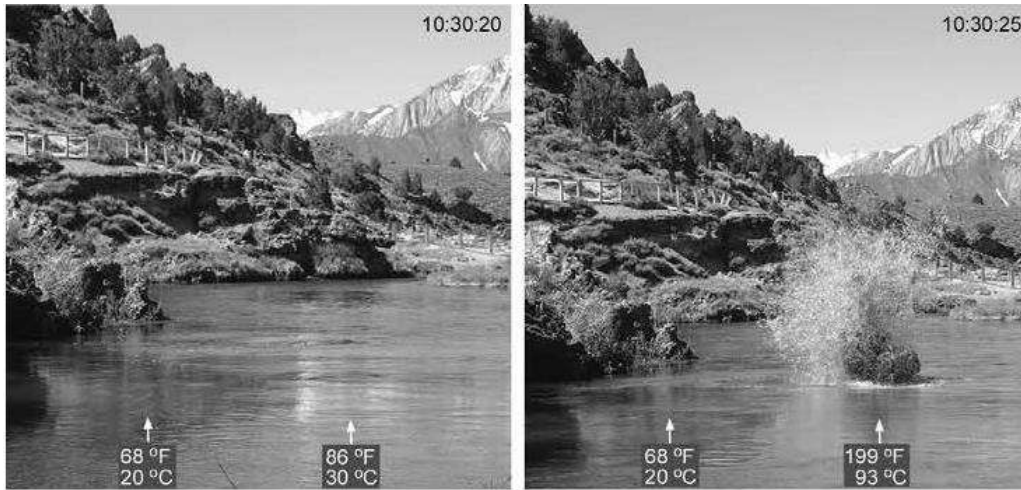
الشكل ٢-٢٤ البراكين الرئيسية، والصخور البركانية الحديثة جيولوجياً (المناطق الداكنة) والينابيع الساخنة في سلسلة جبال كاسكيد، شمال غرب المحيط الهادئ. (من Duffield and Sass, 2003).

## ٢-٢ تصنيفات الينابيع

- تم اقتراح تصنيفات مختلفة للينابيع، بناءً على الخصائص المختلفة التي تم شرحها في الأقسام السابقة، وأكثرها شيوعاً هي:
- معدل التصريف وانتظامه.
  - طابع الرأس الهيدروليكي الذي ينتج عنه التصريف (الينابيع الهابطة أو الينابيع الجاذبية والينابيع الصاعدة أو الينابيع الارتوازية).
  - التركيب الجيولوجي والجيومورفولوجي الذي يتحكم في التصريف (المنخفض، والتلامس، والحاجز، والينابيع المغمورة).
  - جودة المياه ودرجة الحرارة (انظر الفصل ٦).



الشكل ٢-٢٥ الينابيع الساخنة Hot springs في هوت كريك، التي تتدفق عبر كالديرا لونغ فالي في منطقة نشطة بركانيًا في شرق وسط كاليفورنيا. (صورة من USGS photo by Chris Farrar).



الشكل ٢-٢٦ يمكن أن تتغير درجة الحرارة في هوت كريك في ثوانٍ. التقطت هذه الصور قبل ٥ ثوانٍ ثم خلال حدث السخانات العنيفة، حيث الماء المغلي (١٩٩ ، فهرنهايت ٩٣ درجة مئوية، وهي درجة الغليان عند هذا الارتفاع) يثور فوق السطح. أي سباح علق في هذا الجزء من الخور كان سيصاب بحروق شديدة. (من Farrar et al., 2007: الصور من Alix Ginter).

تم إجراء محاولات مختلفة لتجميع الينابيع ذات الخصائص الهيدروليكية أو الجيولوجية المختلفة في أنواع جديدة بناءً على بعض منظورات مركزة. على سبيل المثال، تصنيف الينابيع على أساس الموائل الدقيقة والنظم الإيكولوجية التي تدعمها اقترحه [Springer and Stevens, \(2009\)](#).

يعتبر وصف ماينزر للينابيع على طول نهر الأفعى في ولاية أيداهو مثالاً على جميع العناصر الرئيسية لتصنيف الينابيع التي يمكن أن تكون بمثابة قواعد لتصنيف الينابيع ([Meinzer, 1927, "Large Springs in the United States," pages 42–50](#)). توضح المقتطفات القصيرة التالية من عمل Meinzer هذه العناصر:

### حجم النبع

تنبع العديد من الينابيع الكبيرة على الجانب الشمالي من نهر الأفعى بين ميلنروكينغ هيل في أيداهو، وجميعها تقريباً في الوادي أسفل شلالات شوشون أو في الأخاديد الرافدة القصيرة. وفقاً للقياسات كان إجمالي تصريف هذه الينابيع ٣,٨٨٥ قدمًا/ ثانية في عام ١٩٠٢، قبل أي ري تم تطويره على الجانب الشمالي، وبلغ متوسطه ٥,٠٨٥ قدمًا/ ثانية في عام ١٩١٨، بعد أن تم تطوير مشروع الري في الجانب الشمالي. ربما يمكن تقدير الحجم الكبير من المياه التي تصرفها هذه الينابيع بشكل أفضل إذا تذكرنا أنه في عام ١٩١٦ كان إجمالي استهلاك نيويورك وشيكاغو وفيلادلفيا وكليفلاند وبوسطن وسانت لويس، مع أكثر من ١٢ مليون نسمة، بلغ متوسط استهلاكهم ١,٧٦٩ مليون جالون فقط في اليوم (٢,٧٣٧ قدمًا / الثانية)، أو ما يزيد قليلاً عن نصف إنتاج ينابيع نهر الأفعى هذه في عام ١٩١٨. وفي الواقع، فإن هذه الينابيع تنتج من المياه ما يكفي لإمداد جميع المدن في الولايات المتحدة التي يزيد عدد سكانها عن ١٠٠,٠٠٠ ساكن بـ ١٢ جالوناً يومياً لكل ساكن. هناك ١١ ينبوع أو مجموعة من الينابيع التي تنتج أكثر من ١٠٠ قدم/ ثانية، منها نبع واحد ينتج أكثر من ١٠٠٠ قدم/ ثانية، و٣ ينابيع تنتج ما بين ٥٠٠ و ١٠٠٠ قدم/ ثانية، و٧ ينابيع تنتج ما بين ١٠٠ و ٥٠٠ قدم/ ثانية. علاوة على ذلك هناك ٥ ينابيع تنتج ما بين ٥٠ و ١٠٠ قدم/ ثانية والعديد مما يسمى بالينابيع "الصغيرة" التي تعتبر ضخمة في معظم المناطق.

### التذبذب في التصريف

يكون تدفق هذه الينابيع ثابتاً نسبياً، وفي هذا الصدد تختلف بشكل ملحوظ عن معظم الينابيع الجيرية الكبيرة.

### دور الجيولوجيا

تنبثق هذه الينابيع بشكل رئيسي من الصخور البركانية أو الرواسب القريبة منها. الصخور البركانية الحاملة للمياه هي صخور بازلتية إلى حد كبير، ولكنها تشمل أيضاً حجر الأوبسيديان والريوليت. جزء كبير من حوض نهر الأفعى فوق كينغ هيل، أيداهو، غمرته الحمم البازلتية خلال العصرين الثلاثي والرباعي، وصخور الحمم البركانية في أجزاء كثيرة متشققة أو فقاعية لدرجة أنها تمتص وتنقل الماء

بحرية كبيرة.. في الينابيع الألف يمكن رؤية المياه تتدفق من عدد لا يحصى من الفتحات في الحافة المكشوفة من المنطقة الصخرية أسفل صفيحة صخرية أكثر تماسكاً من الحمم البركانية "في" "ساند" و"بوكس كانيون وينابيع بليند كانيون . تأتي المياه من طبقة تتكون في معظمها من الرمال البيضاء التي تعلوها صفيحة سميكة من الحمم البركانية في معظم الينابيع هناك الكثير من التالوس لدرجة أن المصدر الحقيقي للمياه لا يمكن ملاحظته، ولكن من المحتمل أنها تنبع بشكل رئيسي من الفتحات الكبيرة في الصخور البازلتية أو المحطمة حيث يعلو البازلت صخوراً أكثر كثافة. وحقيقة أن معظم الينابيع تنحصر في أماكن محددة نوعاً ما وتتدفق من نقاط بعيدة عن النهر مما يشير إلى أن تدفق المياه الجوفية إلى الينابيع محكوم بتركيب صخري محدد. من الواضح أن الجسم العظيم من المياه الجوفية محجوز في الصخور الحاملة للمياه شديدة النفاذية بواسطة تكوينات صخرية غير منفذة. قد يكون السطح التحتي الذي يحجز المياه هو سطح أرضي سابق وأن الجداول الجوفية الرئيسية التي تزود الينابيع بالمياه تتبع أودية هذا السطح القديم... في معظم الينابيع تنبع المياه على ارتفاعات كبيرة فوق مستوى النهر.

#### منطقة الصرف والتغذية ومصدر المياه

يمتد سهل الحمم البركانية الواقع شمال وشرق هذه الينابيع الكبيرة على مساحة بضعة آلاف من الأميال المربعة ويستقبل تصريف بضعة آلاف من الأميال المربعة من الأراضي الجبلية المتاخمة. إن قدرة صخور الحمم البركانية المتشققة على استيعاب المياه السطحية راسخة، وعلاوة على ذلك حقيقة أنه على امتداد أكثر من ٢٥٠ ميلاً من رأس شوكة هنريزفورك لنهر الأفعى إلى مصب نهر مالادي لا يوجد أي مجرى سطحي ذو أهمية يدخل شوكة هنريزفورك أو النهر الرئيسي من الشمال. لا يصرف الجزء الأكبر من سهل الحمم البركانية الشاسع هذا أي مياه سطحية في نهر الأفعى، وهناك عدد من الجداول الكبيرة إلى حد ما التي تصب في المنطقة الجبلية إلى الشمال تفقد نفسها في سهل الحمم البركانية هذا. جزء من المياه التي تتساقط على السهل والجبال المجاورة تضيق بالتبخر والنتح، ولكن جزء كبير من المياه يتسرب إلى صخور الحمم البركانية ومن ثم إلى الينابيع الكبيرة.

#### جودة المياه

لا تحتوي مياه هذه الينابيع على الكثير من المواد المعدنية. وهي صافية بشكل عام، على الرغم من أن مياه بعض الينابيع، مثل البحيرات الزرقاء، لها لون أزرق جميل وبريق خفيف بسبب الجسيمات الدقيقة المعلقة. وبقدر ما هو معروف، فإن جميع الينابيع تتمتع بدرجات حرارة طبيعية تقريباً.

#### الاستخدام والمحافظة عليها

نظراً للارتفاع الملحوظ فوق النهر الذي تنبع منه معظم هذه الينابيع، بالإضافة إلى كمية المياه الكبيرة، فهي قادرة على تطوير كمية كبيرة من الطاقة المائية. وقد تم بالفعل إنشاء محطات كبيرة لتوليد الطاقة في ينابيع مالاد وينابيع الألف والرمل، ويمكن إنشاء

محطات كبيرة أخرى للينابيع الأخرى، ولا سيما في ينابيع كليزليكس، وبوكس كانيون، وبيكل سبرينغز.... في ينابيع الكريستال تستخدم المياه الصافية الباردة مفرخ للأسماك حيث يتم تربية كميات كبيرة من أسماك السلمون المرقط... الميزة الأكثر روعة في هذه الينابيع هي مياه المجاري التي تشكلها، أو التي تشكلت قبل أن يتم تسخيرها لتطوير الطاقة الكهربائية. كانت الينابيع الألف في السابق تصب في شلال جميل بشكل مذهل بطول ٢٠٠٠ قدم وبارتفاع ١٩٥ قدم. نبع كرة الثلج، الذي يفيض من ١٥٠ إلى ١٦٠ قدمًا / الثانية، ويقع في الطرف الشرقي من ينابيع الألف قدم. كانت مياهه في السابق تندفق من فوق منطقة الكاحل الوعر مشكلةً مجرى مائي في غاية الجمال يوحي بأنه منحدر ثلجي. ينابيع نياجرا التي تنبع من من جدار الوادي على ارتفاع ١٢٥ قدمًا فوق مستوى النهر، وتشكل أيضًا مجرى مائي مذهل (الشكل ٢٧-٢).

لا يزال تصنيف Meinzer للينابيع على أساس متوسط التصريف المعبر عنه بوحدات الولايات المتحدة الأمريكية مستخدمًا على نطاق واسع في الولايات المتحدة (الجدول ٢-١). ويتضمن الجدول أيضًا تصنيف Meinzer على أساس النظام المتري. ومع ذلك، فإن التصنيف المستند فقط إلى متوسط تصريف الينابيع، دون تحديد ضواهر التصريف، ليست مفيدة جدًا عند تقييم إمكانية استخدام النبع. على سبيل المثال، قد يكون متوسط تصريف النبع مرتفعًا جدًا، لكنه قد يكون جافًا أو متدفقًا فقط معظم العام. الممارسة في معظم البلدان هو أن الينابيع يتم تقييمها بناءً على الحد الأدنى للتصريف المسجل على مدى فترة طويلة، عادةً ما تكون أطول من عدة سنوات هيدرولوجية (تُعرف السنة الهيدرولوجية بأنها تشمل جميع المواسم الرطبة والجافة ضمن دورة سنوية كاملة). عند تقييم مدى توافر مياه الينابيع، من المهم تضمين ما يلي مقياس لتباين تصريف مياه الينابيع، والذي يجب أن يستند أيضًا إلى فترات تسجيل أطول من سنة هيدرولوجية واحدة. أبسط مقياس للتغير هو نسبة الحد الأقصى والحد الأدنى للتصريف: اقترح ماينزر مقياس التباين التالي معبراً عنه بالنسبة المئوية:

$$Iv = (Q_{max} - Q_{min}) / Q_{av} \times 100$$

حيث  $Q_{max}$ ,  $Q_{min}$ ,  $Q_{av}$  تمثل أعلى و أقل ومتوسط التصريف، بناءً على هذه المعادلة، الينابيع الثابتة تلك التي لها تباين بنسبة أقل من ٢٥ بالمائة. والنبع المتباين هو ذلك الذي لديه معدل تباين أعلى من ١٠٠ بالمائة.

توضح دراسة مستفيضة للينابيع في شرق ولاية تينيسي التباين الطبيعي لتدفقات الينابيع ودور الجيولوجيا تحت سطحية. تم رصد ووصف أكثر من ٩٦٠ ينبوع من قبل [De Buchananne and Richardson, \(1956\)](#). خلال استطلاعهما، تم إجراء قياسات للتدفقات من العديد من الينابيع، كما تم قياس التصريف من العديد من الينابيع وتقديرات التدفق من الينابيع المتبقية.

بلغ إجمالي هذه القياسات حوالي ٢٦٥ مليون جالون في اليوم. تم إجراء جميع القياسات باستثناء عدد قليل منها خلال الفترة الجافة نسبيًا، من يونيو حتى سبتمبر؛ وبالتالي، فإن هذا الحجم يمثل الحد الأدنى تقريبًا، أو أعلى الأقل أقل من المتوسط، لمجموع الينابيع ال ٩٦٠ التي تم النظر فيها. الينابيع ال ٩٦٠ التي وصفها دي بوكانان وريتشاردسون تم تصنيفها وفقًا لحجم تدفقها كما هو موضح في

**الجدول ٢-٢.** وتظهر نتائج دراسة المتابعة التي أجراها [Sun, Criner, and Poole, \(1963\)](#) في الشكل ٢-٢٧ ل ٨٤ ينبوعاً كبيراً من الينابيع الكبيرة غير المطورة في شرق تينيسي والتي تتوفر لها سجلات الحد الأدنى والمتوسط والحد الأقصى للتدفقات. يُظهر الخط الأفقي نطاق التصريف، ويشير الخط العمودي إلى متوسط التصريف خلال فترة قياس الينبوع. يوضح **الجدول ٢-٣** تصنيف هذه الينابيع بناءً على حجمها وبصفة عامة، فإن أقل الينابيع تغيراً في شرق تينيسي تنبع من الصخر الطفلي لمجموعة كوناسوغا، وجميعها صغيرة الحجم نسبياً. أما الينابيع الأكثر تغيراً فتتدفق من فتحات الازابة في تكاوين مجموعة نويس، أو الحجر الجيري شيكاموجا أو الحجر الجيري لمجموعة كوناسوغا. هذه التكهفات متفاوتة في الحجم ودرجة الترابط لدرجة أن تصريف الينابيع يتذبذب مع تذبذب منسوب المياه الجوفية من المواسم الرطبة إلى الجافة، وفقاً لقدرة التكهفات المشبعة على نقل المياه إلى فتحات الينابيع. كما ناقشها [Sun et al. \(1963\)](#). تعتبر الينابيع مصادر مهمة للمياه للاستخدامات المحلية والمنزلية والزراعية في شرق تينيسي.؛ في عام ١٩٥٩، كان ٣٩ من أصل ٩٥ نظاماً بلدياً لإمداد المياه يستخدم المياه المستمدة فقط من الينابيع، واستخدمت ١٥ شبكة أخرى مياه الينابيع كمصدر تكميلي. العديد من الينابيع لم يتم تطويرها. بسبب عدم إمكانية الوصول إليها أو نقص المعلومات المتعلقة بمدى

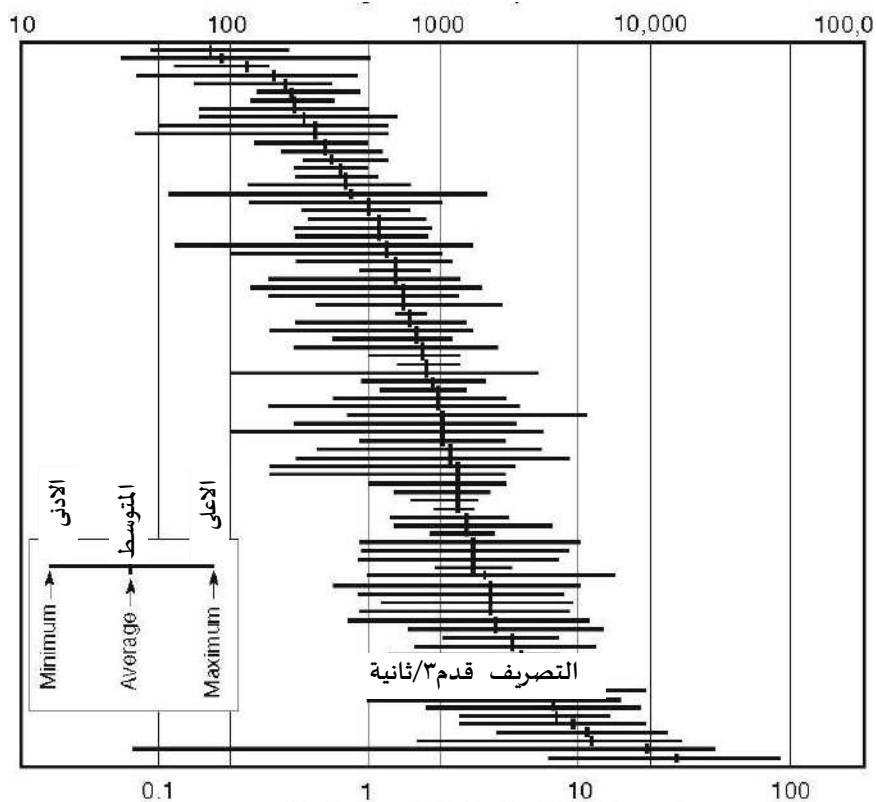


الشكل ٢-٢٦ ينابيع Niagara Falls Springs المنبعثة من البازلت في وادي نهر الأفعى بالقرب من توين فولز، أيداهو. (صورة من Clear Foods).

كفايتها وإمكانية الاعتماد عليها. والتدفقات المنخفضة متوفرة لإمدادات الصناعات الصغيرة والمجتمعات المحلية. النبع التي تصرف ٤٥٠ جالون في الدقيقة (غالون في الدقيقة)، أو حوالي ١ قدم مكعب في الثانية، قادرة على إمداد سكان بلدة يبلغ عددهم ٦٥٠٠ نسمة، إذا افترضنا أن استهلاك الفرد الواحد ١٠٠ جالون في اليوم.

وفقاً ل (Sun et al, 1963). تم تحديد عدد من الينابيع الكبيرة كمصادر ممتازة للمياه للتنمية المستقبلية في شرق ولاية تينيسي. ومع ذلك، فإن تقلب تدفقها قد يحول دون الاستفادة الكاملة منها. ما لم يتم توفير مرافق تخزين كافية. وإذا لم يكن هناك تخزين لتوفير المياه خلال فترات ذروة الاستخدام والحد الأدنى من الإنتاج، والتي عادةً ما تكون متزامنة، لا يمكن تطوير الينابيع إلا في حدود أدنى تدفق يمكن الاعتماد عليه. ومع ذلك، إذا تم توفير مرافق تخزين كافية، يمكن للتطوير أن يصل لمتوسط التدفق السنوي.

جدول ٢-١ تصنيف الينابيع بناء على متوسط معدل التصريف (من Meinzer, 1923)	
التصنيف بناء على النظام المتري	
الرتبة	التصريف بالوحدات المتريّة
الأولى	١٠ م <sup>٣</sup> /ث أو أكثر
الثانية	١٠ - ١ م <sup>٣</sup> /ث
الثالثة	١٠٠ - ١ م <sup>٣</sup> /ث
الرابعة	١٠٠ - ١ ل/ث
الخامسة	١٠ - ١ ل/ث
السادسة	١٠٠ - ١ ل/ث
السابعة	١٠٠ - ١ سم <sup>٣</sup> /ث
الثامنة	أقل من ١٠ سم <sup>٣</sup> /ث



الشكل ٢-٢٧ الحد الأدنى والاعلى ومتوسط تصريف ٨٤ نبع في شرق تينسي. (From Sun et al., 1963).

جدول ٢-٢ تصنيف ٩٦٠ نبعاً في تينسي وفقاً لمقدار (جالون في الدقيقة) (من سن واخرون، ١٩٦٣)

عدد الينابيع	التصريف بالوحدات جالون في الدقيقة
٦٥٣	اقل من ١٠٠
١٥٥	١٠٠-٤٥٠
١٤٧	٤٥٠-٤٥٠٠
٥	٤٥٠٠-٤٥٠٠٠
٠	اعلى من ٤٥٠٠٠

### ٢-٣ الينابيع الكارستية وطبقات المياه الجوفية الكارستية

الكارست هو مصطلح علمي يطلق على المنطقة الجغرافية في منطقة الديناريدس على ساحل البحر الأدرياتيكي، بين سلوفينيا وترستا في إيطاليا، والتي تتميز بمناظر طبيعية مميزة للغاية. وهي كلمة معربة بالألمانية لكارسو (بالإيطالية) وكراس (في السلوفينية)، والكلمات الثلاث مشتقة من الكلمة الهندية الأوروبية كارا أو كارا التي تعني صخرة. وقد أصبحت بعض الكلمات الشائعة من اللغات السلافية في المنطقة مصطلحات علمية دولية تصف المعالم الكارستية، ويرجع الفضل في ذلك بشكل رئيسي إلى عالم الجيومورفولوجيا الصربي جوفان سفيتش الذي كان أول من كتب دراسة علمية مكرسة حصرياً للكارست (داس كارستفا Nomen، ١٨٩٣)، على سبيل المثال، دولين (مجرى)، وبونور (حفرة ابتلاع)، وبولي (منخفض كبير مغلق من خصائص الكارست الديناريكي). على مدى العقود العديدة التالية، أرسى سفيجيتش الأساس النظري للعديد من التطورات السابقة والحالية في الجيومورفولوجيا الكارستية والجيومورفولوجيا المائية (على سبيل المثال، Cvijic '، 1893, 1918, 1926).

التعريفات الموجزة التالية للكارست والتضاريس الكارستية من طبعة عام ١٩٦٠ من قاموس الجيولوجيا الصادر عن المعهد الجيولوجي الأمريكي يوضح سبب الاهتمام العلمي بأبحاث الكارست من قبل الجيومورفولوجيون وعلماء الكهوف والجيولوجيون والهيدروولوجيون على حد سواء:

- إن الحجر الجيري، مهما كانت صلابته، يذوب بفعل الأمطار أو الأنهار، مما يعطي نوعاً أكثر تميزاً من القنوات أو كهوفاً أو حتى قنوات نهريّة تحت الأرض تتولد فيها المجاري السطحية التي تغرق فيها الصدوع والحفر الامتصاصية التي انحلت بالمثل، وتبقى الأرض جافة وجرداء نسبياً. هذه السمات مميزة جداً لمنطقة كارست على ساحل البحر الأدرياتيكي لدرجة أن اسم الظاهرة الكارستية اطلق من اسم المنطقة.
- هضبة الحجر الجيري تتميز بالحفر الكارستية تتخللها تلال حادة وصخور غير منتظمة؛ وعادة ما تكون تحتها كهوف وجداول جوفية.
- في كارست، على الجانب الشرقي من البحر الأدرياتيكي، تكون صخور الحجر الجيري مغطاة بأنفاق والفتحات التي تذيبها المياه الجوفية، بحيث يكون معظم التصريف تحت الأرض. تكثر الأحواض الكبيرة بعضها بعمق خمسمائة أو ستمائة قدم. الوديان الخالية من الجداول شائعة، والوديان التي تحتوي على الجداول غالباً ما تنتهي فجأة حيث تغوص هذه الأخيرة في أنفاق ومغارات تحت الأرض، وأحياناً لتظهر مرة أخرى على شكل ينابيع كبيرة في مكان آخر. الطوبوغرافيا غير المنتظمة من هذا النوع، والتي تطورت عن طريق اذابة المياه السطحية والجوفية، تُعرف باسم التضاريس الكارستية، نسبة إلى المنطقة الواقعة في النمسا-المجر.

تتطور الضواهر الكارستية، بأشكال مختلفة ولكن متشابهة، في جميع الصخور القابلة للذوبان في الماء، مثل الحجر الجيري، والدولوميت والرخام والجبس والهاليت وبعض التكتلات. توضح الأشكال من ٢-٢٨ إلى ٢-٣١ بعضاً من الضواهر العديدة الرائعة للكارست السلوفيني، بينما توضح الأشكال من ٢-٣٢ إلى ٢-٣٥ أمثلة كارستية من الولايات المتحدة.

كما تمت مناقشته في هذا الكتاب، أثارت المياه الجوفية في البيئات الكارستية اهتمام العلماء والباحثين والناس العاديين لآلاف السنين بسبب جوانبها العديدة الرائعة: فهي تغذي أكبر الينابيع في العالم، التي مكن الكثير منها من إنشاء المراكز الحضرية الأولى في تاريخ البشرية ولا تزال تعمل كمصادر موثوقة لإمدادات المياه حتى يومنا هذا. ؛ ويخلق عالماً غامضاً تحت الأرض من الكهوف والمغارات ويدعم كائنات حية غالباً ما تكون فريدة من نوعها في مواقع محددة؛ وتتخذ سلوكاً غير متوقع حيث يمكن أن ترتفع أحياناً مئات الأقدام بعد هطول أمطار غزيرة في غضون ساعات، مما يعطي الحياة للعديد من الينابيع المؤقتة ويزيد من تدفق الينابيع الدائمة آلاف الأضعاف؛ وهي معرض بشدة لكل من التلوث الطبيعي والبشري على حد سواء، مما يحد بشكل خطير من استخدامه غير المقيد في أجزاء كثيرة من العالم (Kresic, 2009).

تبحث العديد من المنشورات الممتازة في الجيومورفولوجيا الكارستية وعلم الكهوف والهيدروولوجيا والهيدروجيولوجيا، وجميعها تناقش طبقات المياه الجوفية الكارستية والينابيع بطريقة ما. فيما يلي عينة صغيرة فقط من الكتب العامة المفيدة: Herak and White (1988), and Derek and (1987)Stringfield (1972), Sweeting (1972), Bogli (1980), Milanovic (1981), Bonacci (2009). Worthington and Gunn Williams التي تقدم تاريخاً موجزاً عن هيدروجيولوجيا طبقات المياه الجوفية الكربونية. وهناك مصدر جيد للمعلومات العامة عن الهيدروجيولوجيا المائية الكارستية. الموقع الإلكتروني للجنة كارست التابعة للرابطة الدولية لعلماء الهيدروجيولوجيا ([www.iah.org/karst](http://www.iah.org/karst)). لا يمكن التأكيد بما فيه الكفاية على قابلية تأثر طبقات المياه الجوفية والينابيع الكارستية من التلوث. هذا الجانب من توصيف الينابيع وتطويرها وإدارتها، مهما كان الاستخدام المقصود من الينابيع، يجب أن يتم التعامل معه بدقة وبخطة شاملة وبالتحريات والرصد الميداني كلما أمكن ذلك. توضح الأشكال من ٢-٣٦ إلى ٢-٣٩ قابلية تأثر الينابيع الكارستية والأهمية القصوى للتثقيف العام في حماية موارد المياه الجوفية.

تاريخياً، كان نبع ريكس Ricks Spring (الشكل ٢-٣٦) يستخدم كمصدر لمياه الينابيع الجبلية حتى أصاب الزوار مرضاً بعد الشرب منه. أدت الاختناقات الجليدية على نهر لوغان في عام ١٩٧٢ وأثار الصبغة إلى اكتشاف العلماء أن مياه النبع كانت في الواقع يأتي مباشرة من نهر لوغان من خلال شق في الصخور. والصخور المطوية أفسحت المجال للشقوق، ومن الواضح أن أحد هذه الشقوق يسمح لمياه النهر بالتسرب من خلال الصخور وتخرج من نبع ريكس (U.S. Forest Service Intermountain Region, 2008).

تتواجد طبقات المياه الجوفية الكارستية في جميع القارات والعديد من الجزر المحيطية وتنتشر على أكثر من ٢٠ في المائة من سطح الأرض. وبما أن أهمية الموارد المائية واستدامتها أصبحت حرجة على مستوى العالم، تحظى طبقات المياه الجوفية الكارستية باهتمام متزايد وسريع من المجتمعات العلمية والهندسية والتنظيمية نظراً للتحديات العديدة المتعلقة بتوصيفها وإدارتها. التفسير الرئيس لهذه التحديات بشكل واضح ومباشر – أنه على عكس جميع أنواع طبقات المياه الجوفية الأخرى، فإن طبقات المياه الجوفية الكارستية لديها ثلاثة أنواع من المسامية: (١) مسامية الأرضية الصخرية أو المسامية الأولية، (٢) مسامية الصخور الشائعة مثل الكسور (الشقوق) ومستويات التطبق أو المسامية الثانوية، و(٣) الفراغات المتضخمة محلولياً مثل القنوات والممرات التي تطورت من الانقطاعات الأولية (الأشكال ٢-٤٠ إلى ٢-٤٣).



الشكل ٢-٢٨ انبثاق نهر نوترانسكا Notranjska في فيليكا ، سلوفينيا. يظهر النهر ويختفي في العديد من النوافذ الكارستية ويغرق قبل أن يستمر في التدفق تحت الأرض نحو ينابيع تيمافو بالقرب من تريستي على ساحل البحر الأدرياتيكي في إيطاليا. (Bostjan Burger).



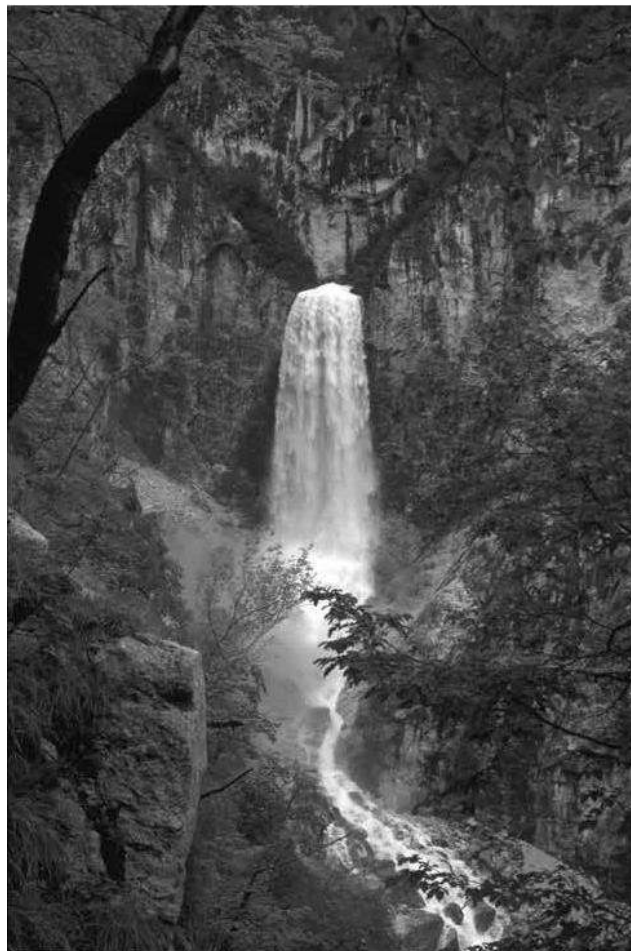
الشكل ٢-٢٩ اختفاء نهر نوترانسكا Notranjska في ليزيكا بونور، كهوف سكوتشيان. (Borut Petric).

ولذلك فإن التخزين والنقل للمياه الجوفية في الكارست يعتمد على نوع المسامية السائدة في طبقة المياه الجوفية المحددة، مما يجعل أي تعميم دون إجراء تحريات ميدانية أمراً خاطئاً. بالإضافة إلى نمط التغذية وتكشف طبقات المياه الجوفية الكارستية على سطح الأرض على سبيل المثال، المغطاة أو البارزة)، يرتبط حجم وخصائص تصريف الينابيع الكارستية ارتباطاً وثيقاً بعدد وحجم ودرجة الترابط بين المسام الخلالية (مسامية الأرضية) والمسامية الثانوية للشقوق وفتحات الذوبان، مثل الكهوف والقنوات والممرات. على سبيل المثال، تحتوي الصخور الجيرية والدولوميتية القديمة من الباليوزويك في شرق ولاية تينيسي على مسامية أولية قليلة أو معدومة، ولكن يتم تخزين كميات كبيرة من المياه في العديد من تجاويف المحاليل والفتحات على طول المناطق والمتشقة والمفصولة والمتصدعة. قدرة هذه التكوينات الصخرية على إنتاج تدفق مستدام من المياه إلى الينابيع تعتمد على نظام أو شبكة من الفتحات المترابطة التي يمكن أن ترشح المياه من خلالها من سطح الأرض وتنتقل إلى نقاط التصريف الطبيعي أو الاصطناعي. من ناحية أخرى، فإن الصخور الجيرية الأحدث، مثل تلك التي تشكل طبقات فلوريدان للمياه الجوفية في الولايات المتحدة الأمريكية، والتي تتمتع بمسامية أرضية عالية ويمكنها تخزين كميات هائلة من المياه الجوفية خارج القنوات الكارستية، والتي تصب باستمرار في القنوات، وبالتالي تحافظ على تدفقات كبيرة من الينابيع خلال فترات الجفاف. ينعكس هذا الاختلاف بشكل واضح في الخصائص الهيدروليكية لتصريف الينابيع (انظر الفصل ٤). فالأنظمة التي تهيمن عليها القنوات دون تخزين كبير في المسامية الأرضية تغذي الينابيع ذات التصريف الأعلى، في حين أن الأنظمة التي تهيمن عليها المسامية الأرضية يتم تصريفها بواسطة ينابيع ذات تصريف أكثر انتظاماً. في كلتا الحالتين، ومع ذلك، هناك ميل قوي جداً لتطوير ما يسمى بالنفاذية المنظمة ذاتياً الذي تنتج عنها طبقة مياه جوفية تصرف مياهها بواسطة عدد قليل من الينابيع الكبيرة أو نبع واحد كبير فقط، في كلتا الحالتين، ومع ذلك، هناك ميل قوي جداً لتطوير ما يسمى بالنفاذية المنظمة ذاتياً الذي تنتج عنها طبقة مياه جوفية تصرف مياهها بواسطة عدد قليل من الينابيع الكبيرة أو نبع واحد كبير فقط، على غرار النمط الهندسي لتصريف المياه السطحية. تم شرح هذه الآلية بالتفصيل من قبل (Worthington and Ford, 2009)، اللذان قدما نتائج التجارب المعملية والنمذجة الرقمية ذات الصلة. يستنتج المؤلفان أن النتيجة الثابتة من التدفق خلال طبقات المياه الجوفية الجيرية هي أن التغذية الراجعة الإيجابية بين زيادة التدفق وزيادة الاذابة تنتج شبكة قنوات ذاتية التنظيم عالية النفاذية. إذا كان تدفق المياه خلال طبقة المياه الجوفية ضئيلاً، كما هو الحال في بعض طبقات المياه الجوفية المحصورة، فبالتالي تكون شبكات القنوات ضعيفة التطور. وعلى العكس من ذلك، في طبقات المياه الجوفية المحصورة حيث يوجد تدفق كبير للمياه وكذلك في طبقات المياه الجوفية غير المحصورة من المحتمل أن تنقل شبكات القنوات معظم تدفق المياه عبر طبقة المياه الجوفية بعد فترات من ١٠٠٠ إلى ١٠٠٠٠٠٠ سنة بعد بداية التدفق الكبير عبر طبقة المياه الجوفية. هذا النطاق الزمني قصير بالمقارنة مع الوقت الذي كانت تعمل فيه معظم طبقات المياه الجوفية الجيرية غير المحصورة، ولذلك فمن المعقول استنتاج أن معظم طبقات المياه الجوفية هذه يجب أن يكون لها شبكات قنوات متطورة.



الشكل ٢-٣٠ جزء من كهوف سكوشيان Skocjan Cave المسعى سوميكا جاما ("كهف الغمغة"), وهو وادٍ تحت الأرض ذو جوانب عمودية يزيد ارتفاعه عن ١٢٠ متراً (٣٦٠ قدماً). (Bostjan Burger).

يعتبر الموقع ومعدل التصريف وخصائص الينابيع الأخرى مؤشرات مفيدة جداً لظروف طبقة المياه الجوفية الكارستية وسلوكها كنظام واحد. في النظام القنوي المتطور والمتكامل بشكل جيد، كلما زادت المياه المنقولة نحو موقع محدد بنبع رئيسي، يجب أن تزداد الخصائص الناقلة للمياه الجوفية لاستيعاب هذا التدفق المتزايد. على سبيل المثال، بينت دراسة طبقات المياه الجوفية الصخرية الكربونية في جنوب ولاية نيفادا من قبل [Dettinger, \(1989\)](#) أنه في حدود ١٠ ميل من الينابيع الإقليمية، تكون طبقات المياه الجوفية في المتوسط أكثر انتقالية بـ ٢٥ ضعف مما هي عليه في المناطق الأبعد. هذه هي المناطق التي يتلاقى فيها التدفق، وتكون معدلات التدفق مرتفعة محلياً، ومن المحتمل أن نوع التدفق القنوي يلعب دوراً مهماً، إن لم يكن مهماً. والنتيجة الرئيسية للنفذية المنظمة ذاتياً لطبقات المياه الجوفية الكارستية هي أن مناطق مستجمعات الينابيع الكارستية غالباً ما تمتد إلى ما وراء التقسيمات الطبوغرافية، شريطة أن تكون الجيولوجيا تحت سطحية متجانسة نسبياً (أي أن الصخور الرسوبية الكربونية تمتد على عدة مستجمعات لتصريف المياه السطحية). وهذا أيضاً هو السبب الرئيسي في أن طبقات المياه الجوفية الكارستية تؤدي إلى ظهور أكبر الينابيع في العالم.



الشكل ٢-٣١ نبع شلال بوكا Boka Waterfall الكارستي ، سلوفينيا. ينبثق النبع من واجهة صخرية شديدة الانحدار، مكوناً شلالاً ينحدر بحرية ١٠.٦ أمتار وبعده مباشرة ٣٠ متراً أخرى منحدره بشكل حاد. منطقة تغذية الينبوع هي كتلة جبل كاتين الكارستية في جبال الألب. (Nico Goldscheider).

باستثناء بعض طبقات المياه الجوفية الإقليمية التي تطورت في مناطق واسعة تحت الصخور البركانية المنبثقة (انظر القسم التالي)، لا توجد أنواع أخرى من طبقات المياه الجوفية لها هذه الخاصية المتمثلة في كون تصريف المياه الجوفية أكبر من التصريف الطبوغرافي. توضح الأشكال من ٢-٤٤ إلى ٢-٤٦ بعض الأمثلة على هذه الخاصية الفريدة لطبقات المياه الجوفية الكارستية. بالإضافة إلى النمو الجانبي لأحواض تصريف المياه الجوفية في الكارست، هناك جانب آخر مهم من عملية التكوّن الكارستي: انها أيضاً تستمر مع العمق، بغض النظر عن أساس التآكل المائي السطحي.



الشكل ٢-٣٢ الحفر الجوفية في مقاطعة مونرو، فيرجينيا الغربية. (الصورة من William Jones، معهد كارست ووترز).



الشكل ٢-٣٣ صورة فوتوغرافية جوية لقمة Muddy Creek في كهف بيرسيس ميل، مقاطعة غرينبرير، فيرجينيا الغربية. (الصورة من William Jones، معهد كارست ووترز).

وبعبارة أخرى، شريطة وجود سمك كافٍ من الرواسب الكربونية تحت ظواهر المياه السطحية أو التماس مع الصخور الأقل نفاذية، فإن عملية الاذابة تؤدي إلى تطور القنوات الكارستية على أعماق متزايدة باستمرار وتكوين ينابيع صاعدة. في الواقع، بعض أكبر الينابيع الكارستية في العالم هي من هذا النوع، كما هو موضح بالأمثلة في الشكلين ٢-٤٧ و ٢-٤٨ (انظر أيضاً الفصل ١٠). حقق التقدم في الغوص في الكهوف في العقدين الماضيين بعض الاكتشافات المهمة فيما يتعلق بالينابيع الصاعدة الرئيسية في التضاريس الكارستية. وتسمى هذه الينابيع أيضاً بالينابيع الفوكلوسية، نسبة إلى Fontaine de Vaucluse، منبع نهر سورغ في بروفانس، فرنسا (الأشكال ٢-٤٩ و ٢-٥٠):

فونتين دي فوكلوز Fontaine de Vaucluse هو منبع نهر سورغ وينبوع كارستي نموذجي. وهو جزء من نظام كهف. في هذه الحالة بالذات تمثل عمود كبير مملوء بالماء. في الوقت الحالي تم استكشاف العمود إلى عمق ٣١٥ م. وبما أنه لا أحد قادر على الغوص إلى هذا العمق، فقد تم هذا الاستكشاف باستخدام روبوت غواصة صغيرة تسمى MODEXA 350. أظهرت كاميرا الروبوت أرضية رملية



الشكل ٢-٣٤ نبع Big Spring في مقاطعة كارتر، وهو أكبر ينبوع من الدرجة الأولى في ميزوري، بمتوسط تدفق يبلغ حوالي ٢٨٩ مليون جالون يومياً. ([www.dnrmo.gov/env/wrc/springsandcaves.htm](http://www.dnrmo.gov/env/wrc/springsandcaves.htm)).



الشكل ٢-٣٥ منظر لنبع واكولا Wakulla Spring من منظور غواص الكهوف. هذا الينبوع من الدرجة الأولى في مقاطعة واكولا، فلوريدا، هو واحد من أكبر وأعمق ينابيع المياه العذبة في العالم، مع أميال من الكهوف المغمورة المستكشفة ممرات مغمورة. (David Rhea & Global Underwater Explorers 2006).

في هذا العمق، ولم يكن القاع مرئي. ومنسوب المياه الجوفية في معظم أوقات السنة تحت حافة العمود. لذلك تظهر الفونتين كبحيرة عميقة وزرقاء جداً. تؤدي الكهوف الصغيرة في الأسفل إلى عدة ينابيع في قاع النهر الجاف، وعلى بعد ١٠ أمتار فقط تحت البحيرة. يتغذى المصدر من هطول الأمطار في هضبة فوكلوز. في الربيع أو في بعض الأحيان، بعد هطول الأمطار الغزيرة، ويرتفع منسوب المياه الجوفية أعلى من الحافة. في هذه الفترات يكون فونتين دو فوكلوز بالفعل ينبعاً ينتج أكثر من ٢٠٠ متر مكعب/ثانية من المياه. (Showcaves, 2009).



الشكل ٢-٣٦ ينبع ريكس Ricks Spring في غابة واساتش-كاش الوطنية، يوتا. (U.S. Forest Service Intermountain Region, 2008).



الشكل ٢-٣٧ القمامة التي تم التخلص منها في مجرى مائي، مقاطعة لاكليد، ميسوري. يُظهر تتبع الصبغة أن هذا المجرى يوفر تغذية نبع ها ها تونكا. ([www.dnr.mo.gospringsandcaves.htm](http://www.dnr.mo.gospringsandcaves.htm))



الشكل ٢-٣٨ مجرى مستمر لمياه المجاري من مبنى الكلية تصب في بالوعة تجد طريقها منه إلى قنوات المياه الجوفية. (Fuller, 1910).

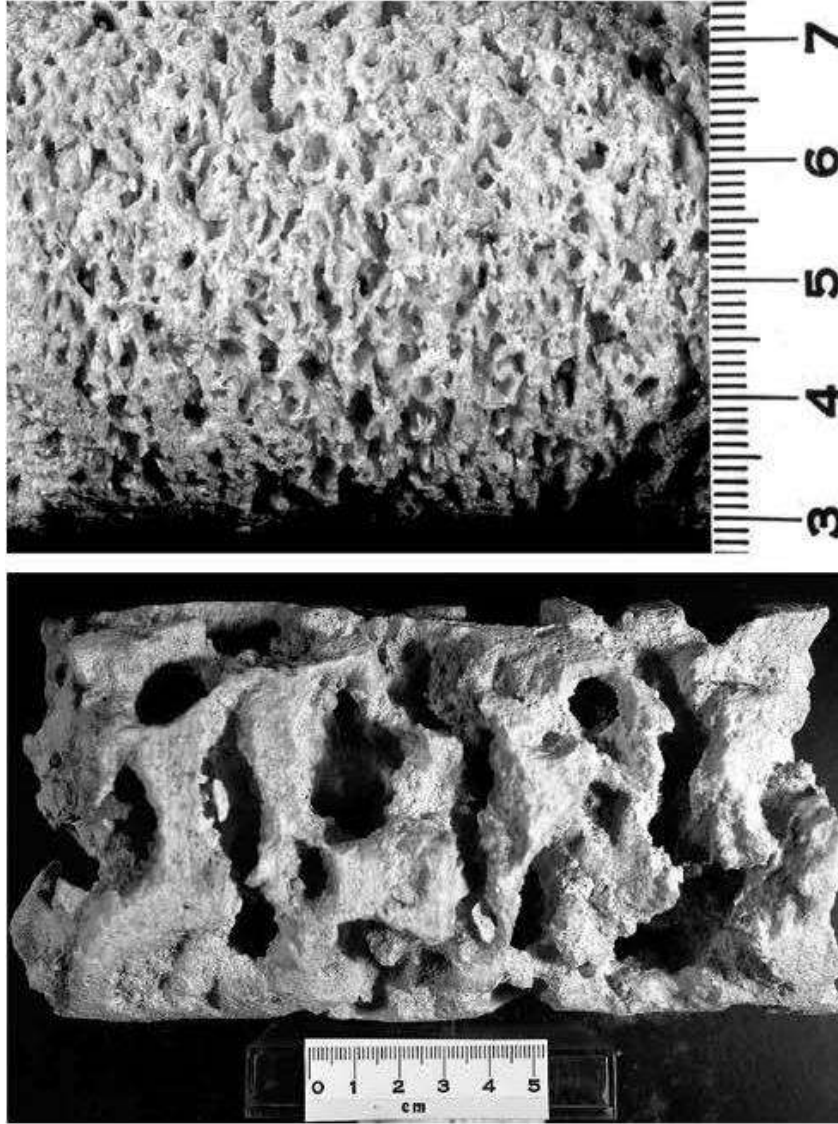


الشكل ٢-٣٩ سبيلانكر يفحص القمامة حول شلال من الأحجار المتدفقة في أسفل مدخل كهف منتصف الليل بالقرب من أوستن، تكساس، في ٢٠ نوفمبر ١٩٩٣. (من [Hauwert and Vickers, 1994](#)).

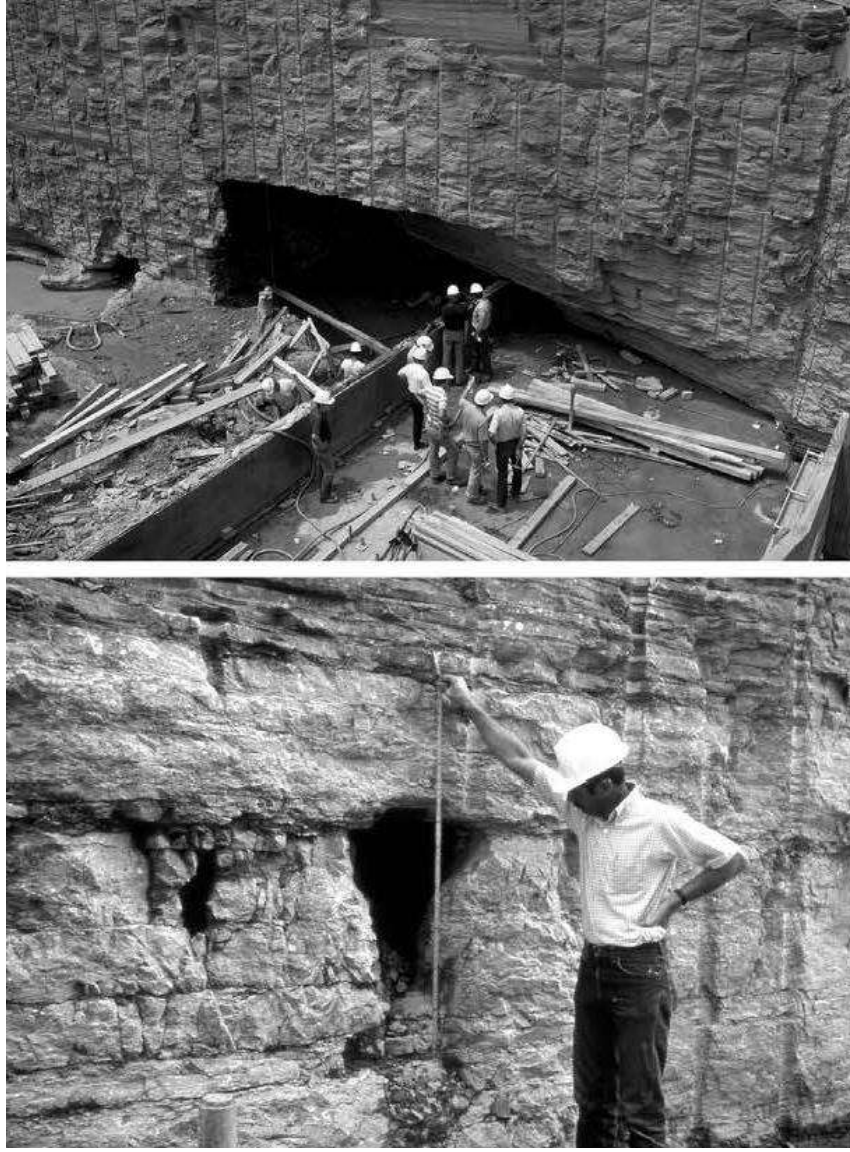
في كثير من الحالات، وبغض النظر عن الحجم، قد تنبع الينابيع الصاعدة في الحجر الجيري من برك مغطاة بالرمل أو الحصى أو الغريني الصخري (الحطام الصخري) وبدون قنوات رأسية مرئية. ومع ذلك، قد تكون القنوات أو الشقوق محجوبة ومغطاة بالرواسب الطينية، وهو احتمال لا يمكن استبعاده. على سبيل المثال، يعطي [Meinzer, \(1927\)](#) الوصف التالي لنبع بينيت في مقاطعة دالاس، ميسوري (انظر الشكل ٢-٥١):

”ينبع النبع من حوض دائري حصوي يبلغ قطره حوالي ٣٠ قدمًا ويصب في مجرى مائي يبلغ طوله حوالي ميل ونصف ميل ويصب في نهر نيانغوا عند مستوى حوالي ٢٢ قدمًا تحت النبع.. يوفر النبع الطاقة لطاحونة في قرية بريس. تبلغ درجة حرارة الماء حوالي ٥٨ فهرنهايت. وقد زار شيرد النبع في عام ١٩٠٣، وذكر أنه في ذلك الوقت كانت تغلي بقوة كبيرة من فتحة رأسية تشبه الكهف عبر الحجر الجيري إلى حوض بيضاوي كبير.”

تعتبر الينابيع الكارستية الصاعدة هدفًا أساسيًا لتنظيم الينابيع، والتي يمكن أن تزيد من استخدامها لإمدادات المياه، خاصة خلال مواسم الجفاف مع ارتفاع الطلب. يمكن زيادة الضخ من الينابيع عن طريق خفض المضخات في عمق القناة (القنوات) الصاعدة، أو عندما تسمح الظروف الجيولوجية والظروف الجيومورفولوجية، يمكن بناء سدود تحت الأرض للتحكم في تصريفها وزيادة الرأس الهيدروليكي في طبقة المياه الجوفية. يوضح الشكل ٢-٥٢ المنطقة العامة لنبع أومبلا بالقرب من دوبروفنيك، كرواتيا، والذي يستخدم حاليًا لإمداد المدينة بالمياه. وقد خضع النبع ومنطقة تصريفه لبرنامج استقصاء ميداني واسع النطاق منذ ما يقرب من



الشكل ٢-٤٠ قد تزيد مسامية المصفوفة الأولية لبعض الأحجار الجيرية الأوليتية الصغيرة عن ٤٠-٥٠ في المائة، وتزداد أكثر عن طريق التحجر الكارستي: (أعلى) الحجر الجيري فورت تومبسون في ميامي؛ (أسفل) أوليت ميامي من طبقة بسكاين المائية في فلوريدا الموصلية الهيدروليكية < ١٠٠٠ قدم/اليوم. (صور من George Sowers).



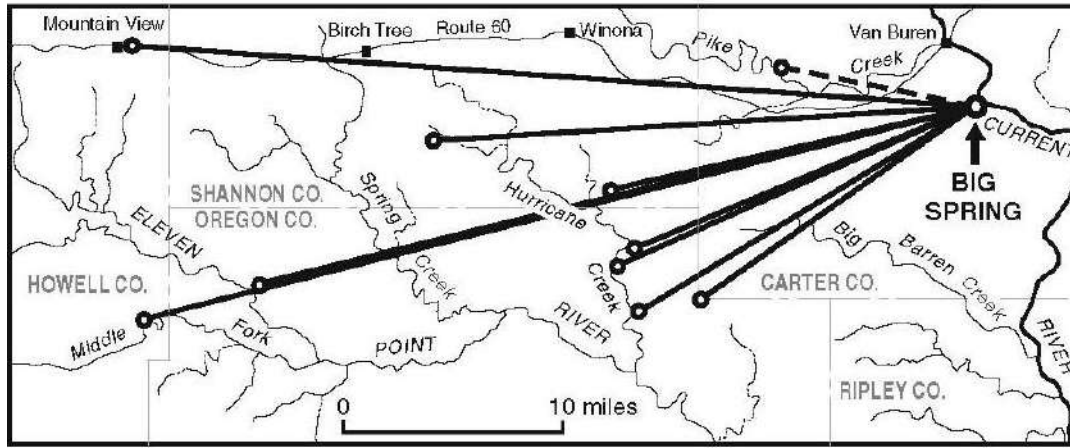
الشكل ٢-٤١ تجاويف بأحجام مختلفة في موقع بناء في الحجر الجيري الباليوزوي في هارتسفيل، تينيسي. المصفوفة تم قياس مسامية المصفوفة بنسبة ٢ في المائة. (صور من George Sowers).



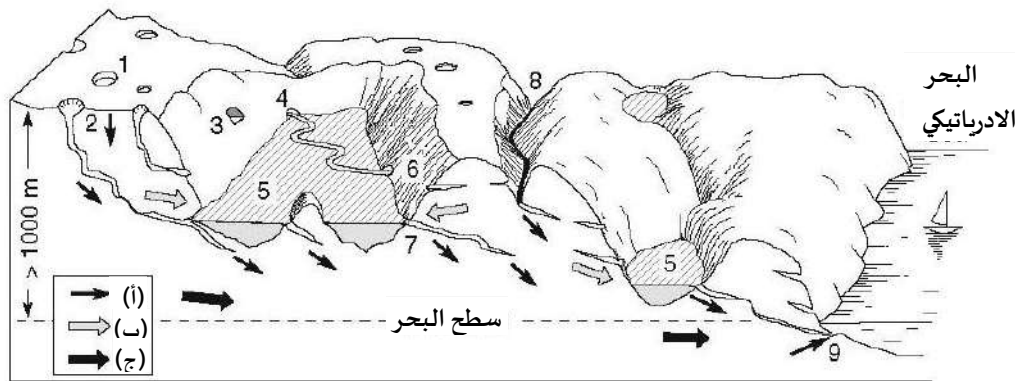
الشكل ٢-٤٢ ممر مجرى تحت الأرض في كهف في مقاطعة مونرو في فيرجينيا الغربية. يمكن أن تختلف ممرات الكهوف بشكل كبير في من حيث الشكل والحجم، مما يعطي أدلة حول عمليات التحجر السابقة الناجمة عن المياه الجوفية المتدفقة وما يمكن المتوقع في الأفاق السفلية المغمورة في طبقة المياه الجوفية. (الصورة من William Jones ، معهد كارست ووترز).



الشكل ٢-٤٣ ممر كهف تيرنر أفينيو Turner Avenue ، في قسم فلينت ريدج في نظام كهف الماموث. (من Palmer, 1985).



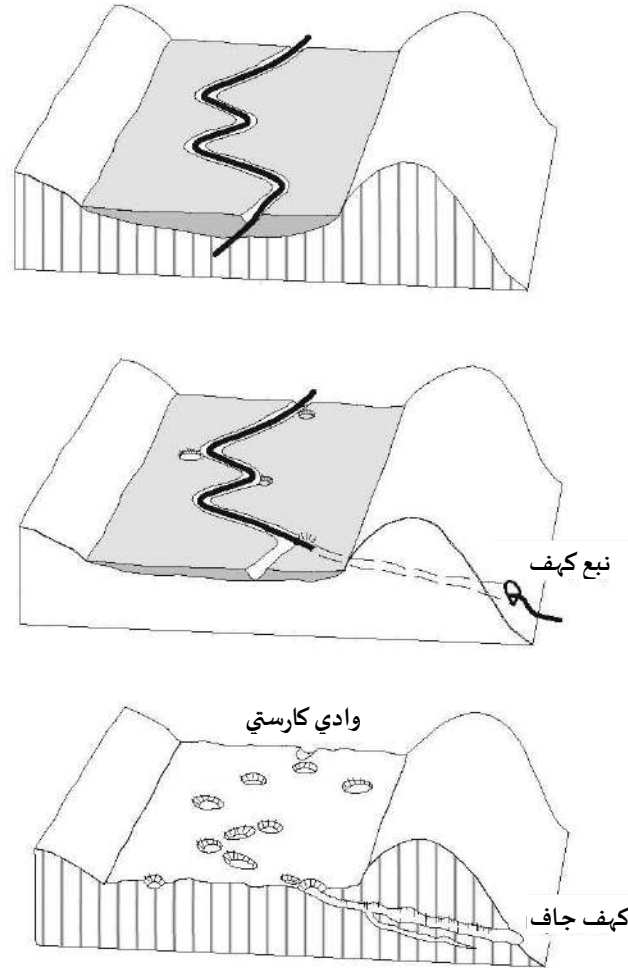
الشكل ٢-٤٤ تجارب تعقب المياه التي أجراها توماس ج. عاليه من غابة مارك توين الوطنية، باستخدام أصباغ الفلورسين وجراثيم الليكوبوديوم، أظهرت أن المياه تتدفق عبر القنوات الكارستية الجوفية إلى الينبوع الكبير في ميسوري من مسافة على بعد ٤٠ ميل. (من Vineyard and Feder, 1982).



الشكل ٢-٤٥ السمات الكارستية وخصائص تدفق المياه الجوفية في المنصة الكربونية السمكة من العصر الوسيط في الديناريس (معدلة من Kresic, 1987): (١) حفرة مجرى (دولين)؛ (٢) حفرة (جاما)؛ (٣) كهف جاف، نبع سابق؛ (٤) نبع نشط؛ (٥) حفرة كارستية بوليه مع رواسب ملء غير مجمعة؛ (٦) بالوعة نشطة؛ (٧) استافيل (نبع وحوض قابل للتبديل)؛ (٨) وادٍ عميق مع مجرى مفقود؛ و (٩) نبع مغمور في البحر الأدياتيكي. يشير (أ) إلى اتجاه تدفق المياه الجوفية المحلية السائدة وإعادة تغذية طبقة المياه الجوفية؛ يشير (ب) إلى اتجاه تدفق المياه الجوفية المحلية خلال موسم الأمطار الغزيرة؛ ويشير (ج) إلى تدفق المياه الجوفية الإقليمية.

عقدين من الزمن لأغراض تصميم وتشديد أكبر سد تحت الأرض لتنظيم الينابيع على الإطلاق في منطقة كارستية (لمزيد من التفاصيل، انظر الفصلين ٩ و ١٠).

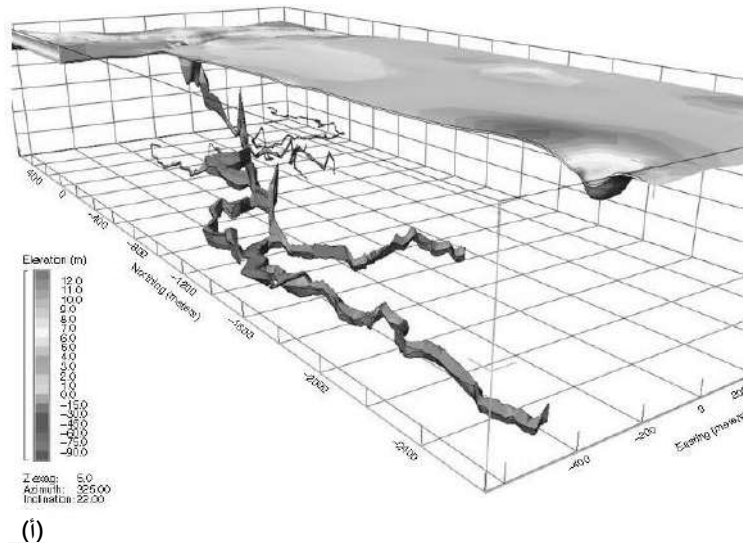
إحدى النصائح العملية التي اختبرها العديد من الباحثين هي أنه إذا كان النبع كبيراً، و"يصرف" مثل الينابيع الكارستية، ويبدو أن لديه عجزاً كبيراً جداً في مساحته الطبوغرافية (سطح الأرض) منطقة الصرف، فمن المرجح أن يكون نبعاً كارستياً. وبعبارة أخرى،



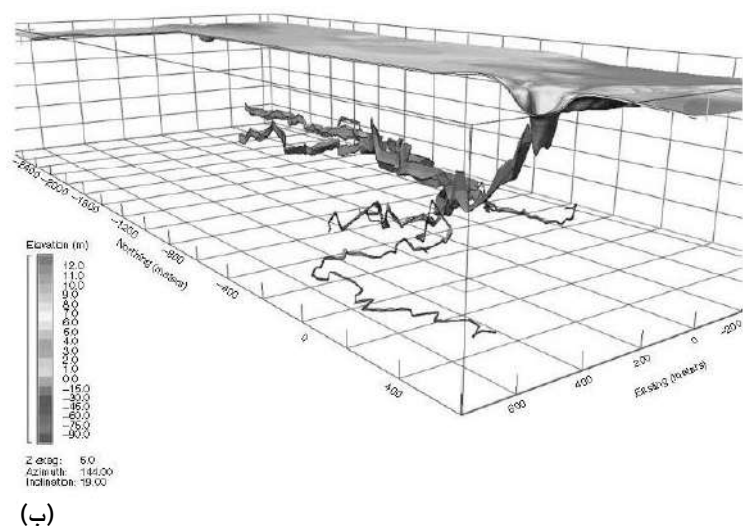
الشكل ٢-٤٦ رسم تخطيطي لتطور مجرى مائي غاطس يتدفق فوق طبقة رقيقة من الصخور غير الكارستية (الرواسب) التي تغطي طبقة المياه الجوفية الكارستية؛ ويفقد المجرى المياه إلى نبع يقع في مستجمع مائي سطحي مختلف؛ ومع التعمق الكارستي، قد يصبح النبع جافاً وينشأ نبع أو ينابيع جديدة على ارتفاعات منخفضة.



الشكل ٢-٤٧ النبع الكارستي الصاعد لنهر سيتينا، كرواتيا. (Andrija Rubinic).



الشكل ٢-٤٨ منظران تم إنشاؤهما بالحاسوب لممرات كهف واكولا المغمورة بالمياه بناءً على مسوحات الغوص في الكهف المسوحات. تتلاقى جميع الممرات باتجاه نبع واكولا الموضح في الشكل ٢-٣٥. (من Todd Kincaid).



الشكل ٢-٤٨ تابع.



الشكل ٢-٤٩ مدخل الكهف الرئيسي (فتحة النبع) في فونتين دي فوكلوز جاف معظم العام. (Bostjan Burger)

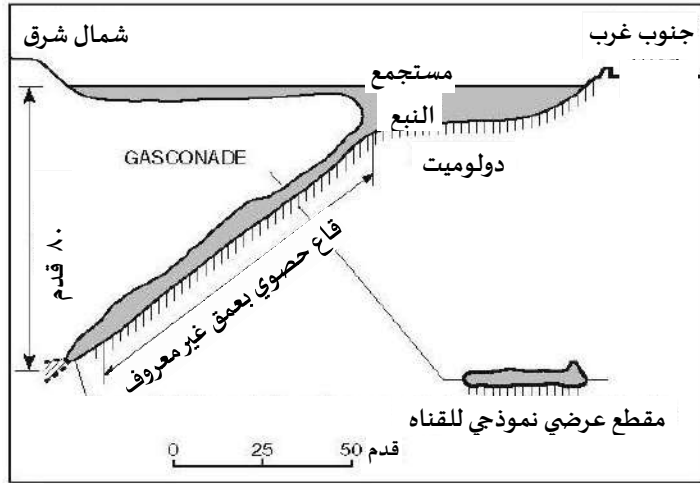


الشكل ٢-٥٠ نهر سورغ في بروفانس بفرنسا، بعد تلقي المياه من جميع الينابيع في منطقة فونتين دي فوكلوز. (الصورة من William Jones، معهد المياه الكارستية).



(i)

الشكل ٢-٥١ (أ) نبع بينيت Bennett Spring (ب) المظهر الجانبي الطولي الشمالي الغربي - الجنوبي الشرقي المظهر الجانبي الطولي الجنوبي الشرقي من خلال نبع بينيت (من Vineyard and Feder, 1982).



(ب)

الشكل ٢-٥١ تابع.



الشكل ٢-٥٢ منظر عام لموقع نبع أومبلا على الساحل الكرواتي للبحر الأدرياتيكي. هذا النبع الصاعد الفائض لإمداد مدينة دوبروفنيك بالمياه. التماس بين الأحجار الجيرية الكارستية والرواسب غير النفاذة تتميز الرواسب الدقيقة الحبيبات (الذبابة) بتغير في الغطاء النباتي. يصدر النبع في الجزء السفلي من هذا التلامس على شكل حرف V الذي سيستخدم لتثبيت السد الجوي. (الصورة من Nicola Bilicic).



الشكل ٢-٥٣ شقوق عمودية في حجر كوتيناى الرملي في متنزه جيانث سبرينغز الحكومي بالقرب من غريت فولز، مونتانا. الشقوق عبارة عن شقوق امتدادية ومفتوحة، مما يوفر قناة سهلة للمياه الجوفية في طبقة ماديسون المائية لترتفع إلى السطح وتصريفها في نهر ميسوري وبجواره. (الصورة من David Baker)

حتى عندما يتدفق مثل هذا النبع من صخور غير كارستية ولكن هناك كربونات رسوبية "في مكان ما" في محيطها النسي، لا ينبغي للمرء أن يستبعد احتمال أن تكون طبقة المياه الجوفية الأساسية الذي توفر المياه للنبع هو في الواقع طبقة مياه جوفية كارستية (حجر جيرى).

ومن الأمثلة التوضيحية جداً على ذلك الينابيع العملاقة في غريت فولز، مونتانا. يحتوي النبع على تصريف منتظم جداً يبلغ حوالي ٢٠٠ ألف جالون في اليوم ويشكل على الأرجح أقصر نهر في الولايات المتحدة، نهر رو، الذي يصب في نهر ميسوري. تنبع مياه الينابيع من الأمطار التي تتساقط على الحجر الجيري في ماديسون من جبال الحزام الصغير على ارتفاع ٤٠٠٠ قدم فوق نهر ميسوري. يتمتع الحجر الجيري بجميع خصائص الحجر الكارستي، بما في ذلك الجداول المفقودة والكهوف الجافة. في الينابيع العملاقة، يقع الحجر الجيري لماديسون على عمق أقل من ٤٠٠ قدم تحت السطح، وتتسرب المياه الجوفية من هذا الخزان الجوفي الكارستي إلى أعلى من خلال شقوق في حجر كوتيناى الرملي الذي يعلو السطح (الشكل ٢-٤٦).

وختاماً، تمثل الينابيع الكارستية وطبقات المياه الجوفية الكارستية كنزاً طبيعياً هائلاً ولكنها قابلة للتأثر بشكل كبير والتي تحافظ على تدفق العديد من الجداول السطحية والنظم البيئية، وتوفر موطناً لنباتات وحيوانات فريدة من نوعها، وقد تم استخدامها لتلبية احتياجات إمدادات المياه لمئات الملايين من الناس في جميع أنحاء العالم

#### ٢-٤ الينابيع في الصخور البركانية السطحية

كما تم التأكيد عليه سابقاً، فإن القليل من أنواع طبقات المياه الجوفية يمكن أن تضاهي الينابيع الكارستية من حيث الحجم والإنتاجية وباعتبارها الينابيع الكبيرة من الدرجة الأولى في جميع أنحاء العالم. ومع ذلك، هناك المئات أو نحو ذلك من هذه الينابيع، ذات الأهمية الاقتصادية والاستخدامية المتساوية، وتوجد على سبيل المثال في صخور البليوسين والصخور البازلتية الأحدث، الموجودة بشكل رئيسي في سهل نهر الأفقي في إيداهو والجزء الأكبر من سلسلة جبال كاسكيد في أوريغون. وتوفر الحمم البازلتية الأساسية الأحدث المياه إلى الينابيع الكبيرة في هاواي.

نظام طبقات المياه الجوفية الإقليمي في سهل نهر الأفقي في جنوب إيداهو وجنوب شرق ولاية أوريغون هو عبارة عن هيكل كبير يشبه البنية، مملوء بالبازلت من العصر الميوسيني وأحدث من ذلك. يتكون البازلت من عدد كبير من التدفقات، وأصغرها تدفق منذ حوالي ٢٠٠٠ سنة مضت. ويبلغ السُمْك الأقصى للبازلت، كما هو مقدر باستخدام مسوحات المقاومة الكهربائية بحوالي ٥٥٠٠ قدم (Miller, 1999). نفاذية الصخور البازلتية متغيرة للغاية وتعتمد إلى حد كبير على العوامل التالية: معدل تبريد الحمم البازلتية وعدد وطبيعة مناطق التدفق البيئي، وسمك التدفق. عندما تدخل الحمم البازلتية إلى الماء يكون معدل التبريد أكثر سرعة. وينتج عن ذلك بازلت وسائدي، حيث تتشكل كتل من البازلت على شكل كتل كروية، مع وجود العديد من المساحات المفتوحة المترابطة في قمم الكرات وأسفلها. وهناك ينابيع كبيرة تصرف آلاف الجالونات في الدقيقة الواحدة من البازلت الوسائدي على طول جدران وادي نهر الأفقي في المنطقة العامة لشلالات توين فولز، أيداهو (انظر الشكلين ٢-٤ و ٢-٢٦).

تعمل الحمم البازلتية عالية النفاذية المتنحفة نسبياً أو الحمم المتشققة كقنوات ممتازة ولكنها تملك تخزيناً محدوداً. قد يعمل الرشح من الرماد البركاني المسامي السميكة ضعيف النفاذية كوسيط تخزين لنظام المسامية المزدوجة. إن أنظمة طبقات المياه الجوفية الغزيرة في فالي سنترال في كوستاريكا ونيكاراغوا والسلفادور أمثلة على هذه الأنظمة (Morris et al., 2003).

كما ناقشنا (Whitehead, 1994)، فإن الصخور البازلتية البليوسينية والصخور البازلتية الأحدث هي في الأساس تدفقات، ولكن في العديد من الأماكن في سلسلة جبال كاسكيد، تحتوي الصخور على طبقات سميكة من الرماد البازلي بالإضافة إلى طبقات الرمل والحصى التي ترسبت بواسطة الجداول. معظم صخور البليوسين والصخور البازلتية الأحدث سنناً قُذفت على شكل تدفقات حمم بركانية من العديد من الفتحات والشقوق المتركة على طول الصدع أو مناطق الصدع الرئيسية في سهل نهر الأفقي. انتشرت الحمم البركانية على امتداد لحوالي ٥٠ ميل من بعض الفتحات والشقوق. البراكين المدرعة المتداخلة التي تشكلت حول الفتحات الرئيسية

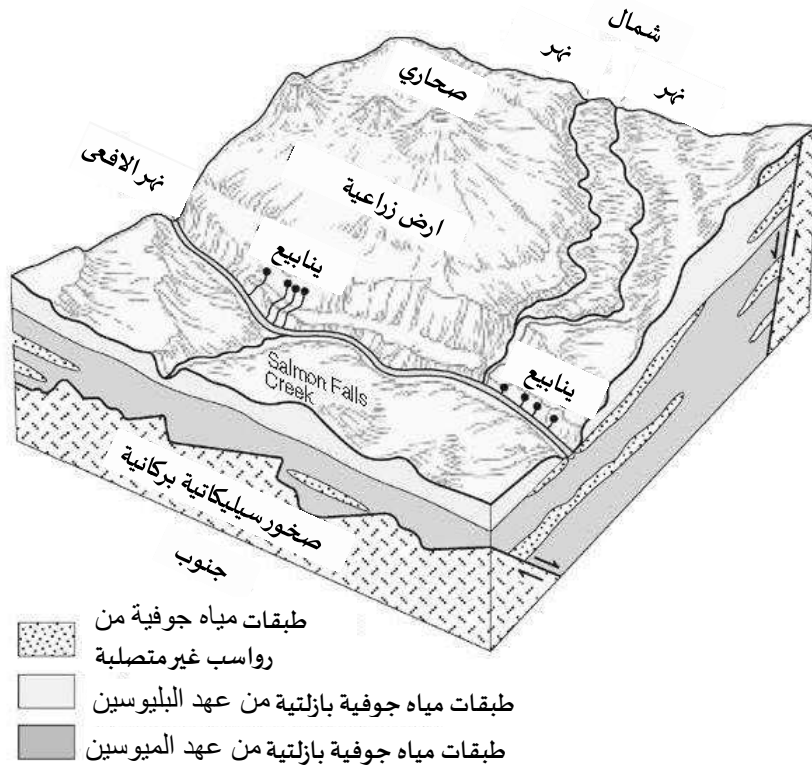
قذفت مجموعة من تدفقات الحمم البازلتية في بعض الأماكن. وتغطي التدفقات في العديد من الأماكن تربة سميكة معظمها من اللوس. وحيثما تكون مكشوفة على سطح الأرض، يكون الجزء العلوي من التدفق شبة مستوي وقاحلاً تقريباً من الغطاء النباتي. ويتناقض جفاف مثل هذه التدفقات بشكل ملحوظ مع تلك المغطاة بتربة سميكة حيث التنمية الزراعية مكثفة. سمك التدفقات من عصر الهولوسين والبليستوسين متغير؛ يبلغ في المتوسط ٢٥ قدماً، بينما يبلغ متوسط سمك التدفقات من عصر البليوسين في المتوسط حوالي ٤٠ قدماً.

في بعض ثورات البراكين المدرعة، تتدفق الحمم البازلتية بهدوء من شقوق طويلة بدلاً من الفتحات المركزية وتغمر المناطق المحيطة بها مكونة هضاباً واسعة من الحمم البركانية. ويمكن رؤية هضاب من هذا النوع في أيسلندا (انظر الشكل ٢-٦ في الفصل ٦)، وجنوب شرق واشنطن، وشرق أوريغون، وجنوب إيداهو. على طول نهر الأفعى في إيداهو ونهر كولومبيا في واشنطن وأوريغون، هذه التدفقات من الحمم البركانية مكشوفة بشكل جميل وبلغ سمكها الإجمالي أكثر من ميل.

وقد عملت هذه البيئة الجيولوجية، من نواحٍ عديدة، أثرت من الناحية الهيدروجيولوجية كما هو الكارست، بما في ذلك وجود مجاري سطحية غاطسة وتطوير شبكات متكاملة من تدفقات الحمم البركانية المتداخلة والمتقاطعة التي تصب في بعض الينابيع الكبيرة الأكثر إثارة، والموضحة بالصور الفوتوغرافية في الفصل ١ وهذا الفصل (على سبيل المثال ينابيع شلالات نياغارا وينابيع ألف نبع وينابيع بوكس كانيون).



الشكل ٢-٥٤ الينابيع الهادرة على نهر ساوث فورك ماكزري، أوريغون. (الصورة من Gordon Grant).



الشكل ٢-٥٥ البازلت من العصر الميوسيني وأصغر من ذلك يملأ الحوض الشبيه بالجاذبية الذي تشكل عليه سهل نهر الأفقي. صخور بركانية منخفضة النفاذية وغنية بالسيليكا تربط البازلت، الذي يتداخل محلياً مع رواسب غير مجمعة. (Miller, 1999).

يوضح الشكل ٢-٥٤ أحد أكثر الينابيع إثارة للدهشة وهي الينابيع في سلسلة جبال كاسكيدز في ولاية أوريغون، الينابيع الهادرة على نهر ماكنتزي الأعلى، والتي تنبثق من شق أفقي بطول ٥٠ متر داخل تدفق الحمم البركانية. الشكل ٢-٥٥ رسم تخطيطي للينابيع الكبيرة التي تنبثق من بازلت نهر الأفقي بالقرب من توين فولز، أيداهو. وغالباً ما توجد في تدفقات الحمم البركانية أنابيب الحمم البركانية المترابطة على أعماق مختلفة تحت منسوب المياه الجوفية وقد تعمل مثل القنوات الكارستية التي تغذي الينابيع ذات معدلات التصريف المتغيرة والتي تستجيب بسرعة لأحداث هطول الأمطار. ولهذا السبب، يصف بعض الممارسين هذه البيئة بالبيئة الكارستية السطحية.

تتواجد الصخور البركانية السيليكاتية في الولايات المتحدة بشكل رئيسي في جنوب غرب إيداهو وجنوب شرق أوريغون، حيث تتكون من تدفقات سمكية تتخللها رواسب غير متماسكة من الرماد البركاني والرمل. كما أن الصخور البركانية السيليكاتية هي الصخور المضيفة للكثير من المياه الجوفية الحرارية في أيداهو وأوريغون.

وتعتبر الينابيع الكبيرة في مقاطعة فريمونت بولاية أيداهو مصدر لنهر هنريز فورك. وصُمم كمعلم طبيعي وطني في عام ١٩٨٠، وهي الينابيع الوحيدة من حيث الحجم في الولايات المتحدة التي تنبثق من تدفقات الحمم البركانية الريولائية في هضبة ماديسون.

## المراجع

- Arago, D.F.J., 1835a. Sur les puits fore's, connus sous le nom de Puits Arte'siens, des fontaines arte'siennes, ou de fontaines jaillissantes. Bureau des Longitudes Annuaire, Paris.
- Arago, D.F.J., 1835b. On springs, artesian wells, and spouting fountains. New Philosophical Journal [Edinburgh] 18, 205–246.
- Barlow, P.M., 2003. Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast. U.S. Geological Survey Circular 1262, Reston, VA.
- Bedinger, M.S., Pearson, F.J., Reed, J.E., Sniegocki, R.T., Stone, C.G., 1979. The waters of Hot Springs National Park, Arkansas—Their nature and origin. U.S. Geological Survey Professional Paper 1044-C, pp. C1–C33.
- Bogli, A., 1980. Karst hydrology and physical speleology. Springer-Verlag, New York.
- Bonacci, O., 1987. Karst Hydrology with Special Reference to the Dinaric Karst. Springer-Verlag, Berlin.
- Breckenridge, R.M., Hinckley, B.S., 1978. Thermal springs of Wyoming. Geological Survey of Wyoming Bulletin 60.
- Brook, C.A., Mariner, R.H., Mabey, D.R., Swanson, J.R., Guffanti, M., Muffler, L.J.P., 1979. Hydrothermal Convection Systems with Reservoir Temperatures > 90.
- C. In: Muffler, L.J.P. (Ed.), Assessment of Geothermal Resources of the United States—1978. Geological Survey Circular 790, pp. 18–85.
- Costain, J.K., Keller, G.V., Crewdson, R.A., 1976. Geological and geophysical study of the origin of the warm springs in Bath County, Virginia. Virginia Polytechnic Institute and State University Report for U.S. Department of Energy under Contract E-(40-1)-4920, Blacksburg.
- Crook, J.K., 1899. The mineral waters of the United States and their therapeutic uses. Lea Brothers & Co., New York.
- Cvijic', J., 1893. Das Karstphänomen. Geographischen Abhandlung herausgegeben von A. Penck 5 (3), 218–329.

- Cvijic', J., 1918. Hydrographie souterraine et evolution morphologique du karst. Recueil des Travaux de l'Institute de Geographie Alpine 6 (4), 375—426.
- Cvijic', J., 1926. Geomorfologija [Morphologie Terrestre]. Knjiga druga [Volume 2]. Drzavna stamparija kraljevine Srba, Hrvatai Slovenaca, Beograd.
- De Buchananne, G.D., Richardson, R.M., 1956. Ground-water resources of East Tennessee. Tenn. Div. of Geol. Bull 58, pt. 1.
- Derek, F.C., Paul Williams, P., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology, revised ed., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England.
- Dettinger, M.D., 1989. Distribution of carbonate-rock aquifers in southern Nevada and the potential for their development, summary of findings, 1985—88. Program for the Study and Testing of Carbonate-Rock Aquifers in Eastern and Southern Nevada, Summary Report No. 1. Carson City, Nevada.
- Duffield, W.A., Sass, J.H., 2003. Geothermal Energy—Clean Power From the Earth's Hest. U.S. Geological Survey Circular1249, Reston, VA.
- Farrar, C.D., Evans, W.C., Venezky, D.Y., Hurwitz, S., Oliver, L.K., 2007. Boiling Water at Hot Creek—The Dangerous and Dynamic Thermal Springs in California's Long Valley Caldera. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2007—3045.
- Fitch, W.E., 1927. Mineral waters of the United States and American spas. Lea & Febiger, New York.
- Fuller, M.L., 1910. Underground waters for farm use. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 255, Washington, DC.
- Hauwert, N.M., Vickers, S., 1994. Barton Springs/Edwards Aquifer: Hydrogeology and groundwater quality. Barton Springs/Edwards Aquifer Conservation District, Austin, TX.
- Heark, M., Stringfield, V.T. (Eds.), 1972. Karst; Important Karst Regions of the Northern Hemisphere. Elsevier, Amsterdam.
- Hobba Jr., W.A., Fisher, D.W., Pearson Jr., F.J., Chemerys, J.C., 1979. In: Hydrology and geochemistry of thermal springs of the Appalachians. U.S. Geological Survey Professional Paper 1044-E, pp. E1—E36.
- Jones, G.W., Upchurch, S.B., Champion, K.M., 1996. Origin of Nitrate in Ground Water Discharging from Rainbow Springs, Marion County, Florida. Ambient Ground-Water Quality Monitoring Program. Southwest Florida Water Management District, Brooksville, FL.
- Kresic, N., 2007. Hydrogeology and Groundwater Modeling, second ed. CRC Press, Boca Raton, FL.

- Kresic, N., 2009. Ground Water in Karst. In: Kresic, N. (Ed.), Theme Issue Ground Water in Karst, Ground Water, vol. 47., no. 3, pp. 319–320.
- Lindal, B., 1973. Industrial and other applications of geothermal energy. In: Armstead, H.C.H. (Ed.), Geothermal energy, review of research and development. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, pp. 135–148.
- Mariner, R.H., Brook, C.A., Reed, M.J., Bliss, J.D., Rapport, A.L., Lieb, R.J., 1983. Low-Temperature Geothermal Resources in the Western United States. In: Reed, M.J. (Ed.), Assessment of Low-Temperature Geothermal Resources of the United States—1982. Geological Survey Circular 892, U.S. Department of the Interior, pp. 31–50.
- Meinzer, O.E., 1923a. The occurrence of ground water in the United States with a discussion of principles. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 489, Washington, DC.
- Meinzer, O.E., 1927. Large springs in the United States. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 557, Washington, DC.
- Meinzer, O.E., 1940. Ground water in the United States; a summary of ground-water conditions and resources, utilization of water from wells and springs, methods of scientific investigations, and literature relating to the subject. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 836-D, Washington, DC, pp. 157–232.
- Milanovic, P.T., 1981. Karst hydrogeology. Water Resources Publications, Littleton, CO.
- Miller, J.A., 1999. Introduction and national summary. Ground-Water Atlas of the United States, United States Geological Survey, A6.
- Milojevic, N., 1966. Hidrogeologija. Univerzitet u Beogradu, Zavod za izdavanje udz Źbenika Socijalistic Źke Republike Srbije, Beograd.
- Moorman, J.J., 1867. The mineral waters of the United States and Canada. Kelly & Piet, Baltimore.
- Morris, B.L., et al., 2003. Groundwater and its susceptibility to degradation: A global assessment of the problem and options management. Early Warning and Assessment Report Series, RS. 03-3. United Nations Environment Programme, Nairobi Kenya.
- Palmer, A.N., 1985. The Mammoth Cave region and Pennyroyal Plateau. In: Dougherty, P.H. (Ed.), Caves and karst of Kentuc Special Publication 12, Series XI. Kentucky Geological Survey, Lexington, pp. 97–118.

- Perry, W.C., Costain, J.K., Geiser, P.A., 1979. Heat flow in western Virginia and a model for the origin of thermal springs in folded Appalachians. *J. Geophys. Res.* 84 (B12), 6875–6883.
- Radovanovic, S., 1897. Podzemne vode; izdani, izvori, bunari, terme i mineralne vode [Ground waters; aquifers, springs, we thermal and mineral waters; in Serbian]. *Srpska knjiz ˇevna zadruga* 42.
- Reed, M.J., 1983a. Summary. In: Reed, M.J. (Ed.), *Assessment of Low-Temperature Geothermal Resources of the United States—1982*. Geological Survey Circular 892, U.S. Department of the Interior, pp. 67–73.
- Reed, M.J., 1983b. Introduction. In: Reed, M.J. (Ed.), *Assessment of Low Temperature Geothermal Resources of the United States—1982*. Geological Survey Circular 892, U.S. Department of the Interior, pp. 1–8.
- Renner, J.L., White, D.E., Williams, D.L., 1975. Hydrothermal Convection Systems. In: White, D.E., Williams, D.L. (Eds.) *Assessment of Geothermal Resources of the United States—1975*. Geological Survey Circular 726. U.S. Department of Interior, Washington, DC, pp. 5–57.
- Showcaves, 2009. Available at: [www.showcaves.com/english/fr /springs/Vaucluse.html](http://www.showcaves.com/english/fr /springs/Vaucluse.html) (accessed on February 27, 2009).
- Sorey, M.L., Natheson, M., Smith, C., 1983a. Methods for Assessing Low-Temperature Geothermal Resources. In: Reed, M (Ed.), *Assessment of Low-Temperature Geothermal Resources of the United States—1982*. Geological Survey Circular 8 U.S. Department of the Interior, pp. 17–30.
- Sorey, M.L., Reed, M.J., Foley, D., Renner, J.L., 1983b. Low-Temperature Geothermal Resources in the Central and Easter United States. In: Reed, M.J. (Ed.), *Assessment of Low-Temperature Geothermal Resources of the United States—1982*. Geological Survey Circular 892, United States Department of the Interior, pp. 51–65.
- Springer, A.E., Stevens, L.E., 2009. Spheres of discharge of springs. In: Hancock, P.J., Hunt, R.J., Boulton, A.J. (guest Eds) *Hydrogeoecology and Groundwater Ecosystems*, *Hydrogeology Journal*, 17(1), 83–93.
- Steele, K.F., Wagner, G.H., 1981. Warm springs of the Western Ouachita Mountains, Arkansas. *Geothermal Resources Coun Transactions* 5, 137–140.
- Sun, P.C.P., Criner, J.H., Poole, J.L., 1963. Large Springs of East Tennessee. *Geological Survey Water-Supply Paper* 1755.
- Sweeting, M.M., 1972. *Karst Landforms*. Macmillan, London.

- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), 2004. Submarine groundwater discharge. Management implications, measurements and effects. IHP-VI, Series on Groundwater No. 5, IOC Manuals and Guides No. 4 UNESCO, Paris.
- U.S. Forest Service Intermountain Region, 2008. Geologic Points of Interest by Activity; Springs/Falls. Available at: [www.fed.us/r4/resources/geology/geo\\_points\\_interest/activities/springs\\_falls.shtm](http://www.fed.us/r4/resources/geology/geo_points_interest/activities/springs_falls.shtm) (Accessed November 2008).
- U.S. Geological Survey, 2009a. Geysers, Fumaroles, and Hot Springs. Available at: <http://pubs.usgs.gov/gip/volc/geysers.ht> (Accessed January 2009).
- U.S. Geological Survey, 2009b. USGS Multimedia Library. Available at: <http://gallery.usgs.gov> (Accessed January 2009).
- Vineyard, J.D., Feder, G.L., 1982. Springs of Missouri. Water Resources Report No. 29, Missouri Department of Natural Resources, Division of Geology and Land Survey.
- White, D.E., 1965. Geothermal Energy. Geological Survey Circular 519, United States Department of the Interior, Washington, DC.
- White, B.W., 1988. Geomorphology and hydrology of karst terrains. Oxford University Press, New York.
- Whitehead, R.L., 1994. Ground Water Atlas of the United States—Segment 7: Idaho, Oregon. U.S. Geological Survey Hydrologic Investigations Atlas HA-730-H, Washington, DC.
- Worthington, S.R., Ford, D.C., 2009. Self-Organized Permeability in Carbonate Aquifers. In: Kresic, N. (Ed.), Theme Issue: Ground Water in Karst, Ground Water vol. 47, no. 3, 326–336.
- Worthington, S.R., Gunn, J., 2009. Hydrogeology of Carbonate Aquifers: A Short History. In: Kresic, N. (Ed.), Theme Issue Ground Water in Karst, Ground Water vol. 47, no. 3, 462–467.

## تصريف ينابيع المياه

إن معرفة أنظمة المياه الجوفية شرط أساسي لإدارة الينابيع بكفاءة. فالعلاقة بين تغذية المياه الجوفية وتصريفها هي واحدة من أهم الجوانب في حماية موارد المياه الجوفية. إن المياه الجوفية والسطحية مترابطة بشكل أساسي. لذلك غالباً يصعب الفصل بين الاثنين، لأنهما يغذي كل منهما الآخر، وبالتالي يمكن أن يلوث كل منهما الآخر. قد تحدث تغذية المياه الجوفية بشكل طبيعي من هطول الأمطار والجدول السطحية والبحيرات، وكمدخلات بشرية المنشأ من الري والتحضر. ويتم تمييز نوعين من التغذية بشكل عام:

التغذية المباشرة وغير المباشرة. التغذية المباشرة هي المياه المضافة إلى طبقة المياه الجوفية الزائدة عن رطوبة التربة التبخر والنتح، عن طريق الرش الرأسي المباشر للمياه الأمطار من خلال المنطقة غير المشبعة (Simmers, 1990). تنتج إعادة التغذية غير المباشرة من الرش إلى منسوب المياه الجوفية بعد الجريان السطحي واستقرار المياه في الانقطاعات الصخرية، مثل البرك في المناطق المنخفضة والبحيرات، أو من خلال قيعان المجاري المائية السطحية (Simmers, 1990). الفئتان المتميزتان للتغذية غير المباشرة هما (١) تلك المرتبطة بالمجاري المائية السطحية و(٢) الشكل الموضوعي الناتج عن التركيز السطحي الأفقي للمياه في غياب قنوات التدفق. علاوة على ذلك، تنقسم التغذية إلى تغذية منتشرة وتغذية منفصلة. تشير الأولى إلى المياه الراشحة إلى تحت السطح والأخرى إلى تغذية المياه الجوفية من خلال شبكة من الفتحات الموضعية القادرة على نقل المياه والملوثات بسرعة.

العوامل التي تؤثر على التغذية الطبيعية لطبقة المياه الجوفية هي (Rushton and Ward, 1979)

■ على سطح الأرض:

- التضاريس.
- حجم الهطول وشدته ومدته وتوزيعه المكاني.
- الجريان السطحي، وبرك المياه.
- حصاد المياه، التبخر الفعلي.

○ المياه السطحية (الجريان السطحي) (المكتسب، والفاقد، والغاطس).

■ في منطقة التربة:

○ طبيعة التربة وعمقها وخصائصها الهيدروليكية.

○ تنوع التربة.

○ تشقق التربة عند الجفاف أو انتفاخها بسبب الرطوبة.

■ في المنطقة غير المشبعة،

○ آلية التدفق عبر المنطقة غير المشبعة.

○ المناطق ذات الموصلية الهيدروليكية المختلفة.

○ في طبقة المياه الجوفية

○ قدرة طبقة المياه الجوفية على قبول المياه.

○ تغير ظروف طبقة المياه الجوفية مع مرور الوقت.

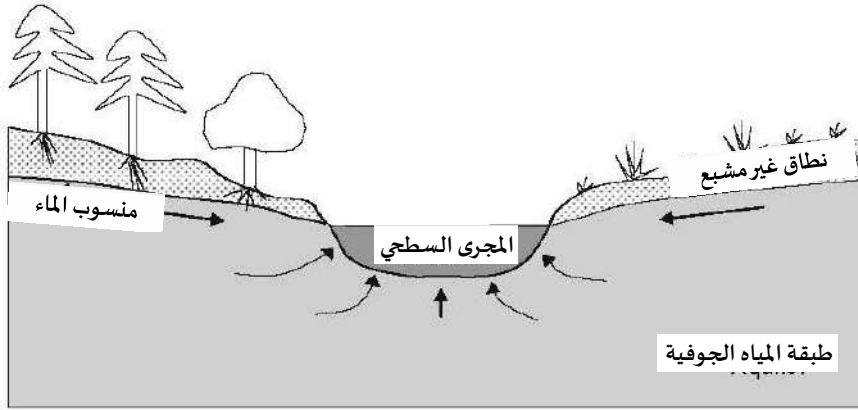
من السهل نسبياً تصور حركة المياه في الغلاف الجوي وعلى سطح الأرض، في حين أن هذا ليس هو الحال بالنسبة لحركة المياه الجوفية. تختلف مسارات تدفق المياه الجوفية بشكل كبير من حيث الطول والعمق وزمن الانتقال من مناطق التغذية إلى مناطق التصريف والينابيع. يشير ذلك إلى أن التقدير الناجح لتغذية المياه الجوفية يعتمد في المقام الأول على تحديد آليات التدفق المحتملة والخصائص المهمة التي تؤثر على التغذية في منطقة معينة. تمثل دراسة العلاقات بين تغذية وتصريف الينابيع موضوع رئيس لهذا الفصل. في البداية سيتم مناقشته دور الجريان المكتسب والفاقد والغارق في عمليات تغذية طبقة المياه الجوفية. بعد ذلك، سيتم التركيز بالطريقة العلمية على طرق التتبع الاصطناعية والبيئية.

### ٣-١ مجاري الكسب والفقدان والغرق

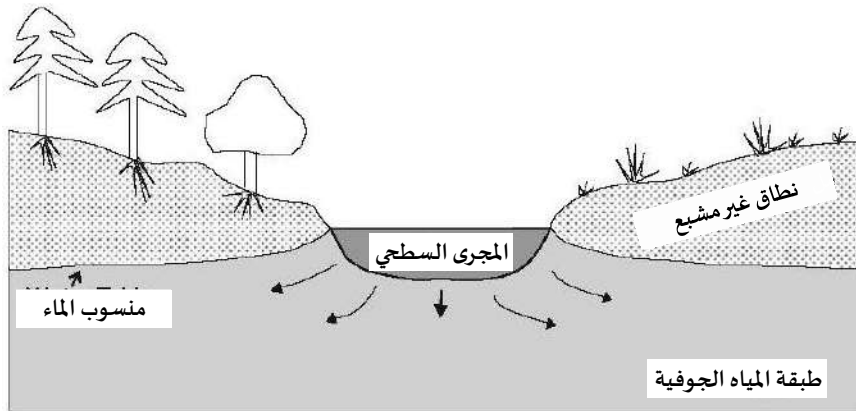
بعد دخول المياه الى طبقة المياه الجوفية في مناطق التغذية، تتدفق إلى أسفل الانحدار نحو مناطق تصريف طبقة المياه الجوفية. وفي حالة تركها دون عائق، تصل بشكل طبيعي إلى التوازن، ويعتمد تصريف تغذية طبقة المياه الجوفية على الظروف الهيدرولوجية والبيولوجية. وتتحكم الظروف الجيولوجية في اتجاه ومعدل حركة المياه الجوفية بشكل رئيس. ويتم تصريفها إلى السطح عن طريق الينابيع وتندفق أساساً إلى الجداول والأنهار والبحيرات. كما يمكن تغذيتها بالمياه السطحية، التي يمكن أن تكتسب المياه الجوفية في بعض المناطق وتفقد المياه في مناطق أخرى. ويترتب على ذلك أن المياه الجوفية مسؤولة عن الحفاظ على التوازن الهيدرولوجي للجداول السطحية والينابيع والبحيرات والأراضي الرطبة والمستنقعات، إن حجم المياه المتدفقة من المياه السطحية

إلى طبقات المياه الجوفية أو العكس يعتمد على موقع منسوب المياه الجوفية بالنسبة إلى الجسم المائي السطحي، أي التدرج الهيدروليكي بين الاثنين.

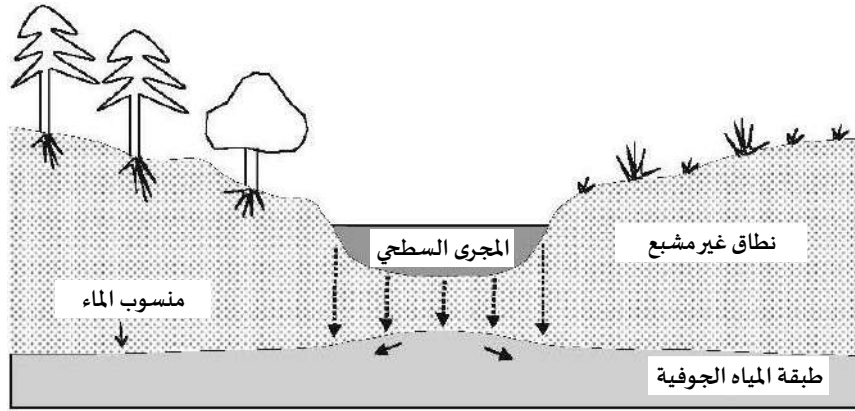
المجرى المكتسب هو مجرى سطحي تصب فيه المياه الجوفية (الشكل ٣-١). في هذه الحالة يكون ارتفاع منسوب المياه الجوفية في المنطقة المجاورة للمجرى أعلى من ارتفاع سطح مياه المجرى السطحي. الجداول الفاقدة هي الجداول السطحية التي تفقد المياه من خلال مجرى مائي أو سلسلة من الفتحات أو الكسور أو المستنقعات وبالتالي تغذي طبقة المياه الجوفية (الشكل ٣-٢). في هذه



الشكل ٣-١ المجرى المكتسب.



الشكل ٣-٢ المجرى الفاقد.



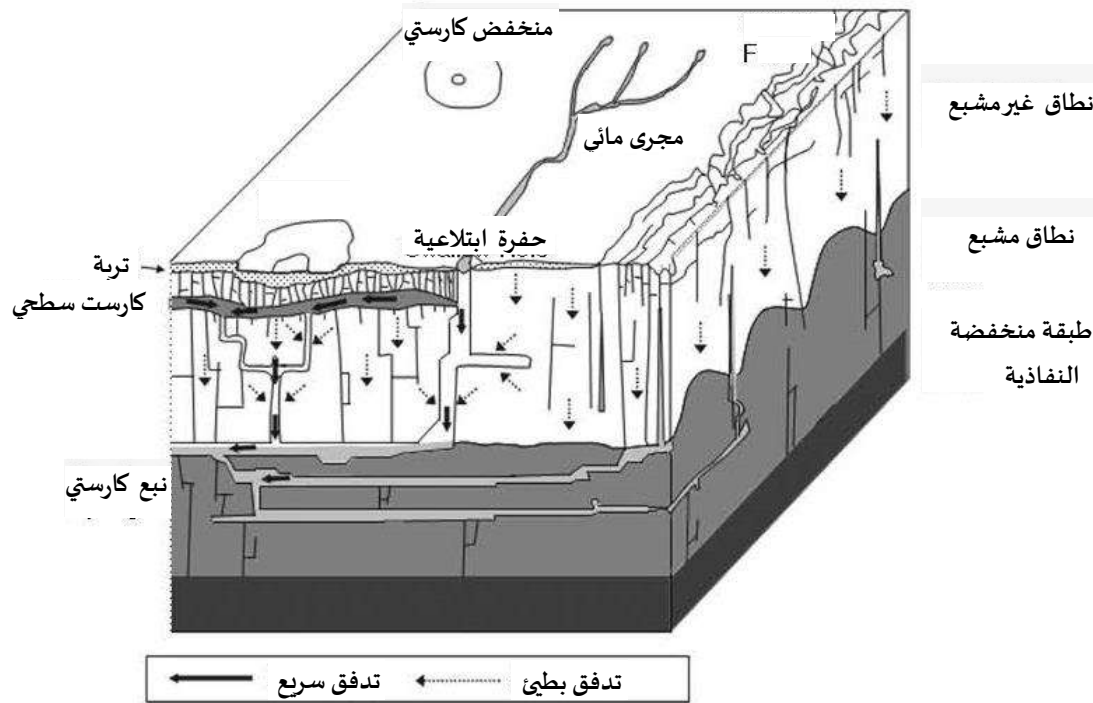
الشكل ٣-٣ المجرى المنقطع.

الحالة، يكون ارتفاع منسوب المياه الجوفية في المجرى المجاور أقل من ارتفاع سطح مياه المجرى المائي. تتصل الجداول الفاقدة بطبقات المياه الجوفية بواسطة منطقة مشبعة مستمرة، أو يمكنها تغذية طبقة المياه الجوفية من خلال المنطقة غير المشبعة. في الحالة الأخيرة، يسمى التيار الفاقد تياراً غير متصل (الشكل ٣-٣). ويمكن أن يؤدي إلى ارتفاع منسوب المياه الجوفية تحت المجرى إذا كان معدل التغذية من خلال مجرى النهر والمنطقة غير المشبعة أكبر من معدل التدفق الجاني للمياه الجوفية (الشكل ٣-٣). المجرى الغاطس هو نوع مكاني من المجاري المائية الفاقدة الشائعة في المناطق الكارستية ولكن يمكن أن يوجد أيضاً في ظروف جيولوجية أخرى، مثل هضاب طبقة الحمم البركانية. وهو مجرى يختفي تحت الأرض عند حفرة منخفضة مميزة (الشكل ٣-٤). تحتوي طبقة المياه الجوفية الكارستية على بنية جيولوجية معقدة، حيث تتطور الخصائص الفيزيائية والسمات الهيدرولوجية المميزة نتيجة لذوبان صخور الأساس القابلة للذوبان، مثل الحجر الجيري (الشكل ٣-٤). تشمل السمات الكارستية النموذجية حفر الامتصاص، والجداول الغاطسة أو المفقودة والكهوف والجداول الجوفية والينابيع. وتكون بعض الجداول الغاطسة أو المفقودة جافة معظم السنة. وتتدفق فقط عندما يفيض النظام الكارستي خلال العواصف الكبرى أو أحداث الجريان السطحي. في النظام الكارستي، تترابط المياه السطحية والمياه الجوفية بطرق عديدة وتكون نظام ديناميكي واحد ينقل المياه بين السطح وتحت السطح. وتشمل الخصائص الرئيسية لهذه الأنظمة ما يلي:

- أشكال مميزة لهيدرولوجيا الينابيع الكارستية التي تشير إلى ظروف النقل والتخزين في طبقة المياه الجوفية (انظر الفصل ٤).
- تذبذب سريع وكبير لمنسوب المياه الجوفية في بعض الآبار، وتذبذب بطيء وغير مهم في آبار أخرى.
- الاختراق السريع للمتبوعات الاصطناعية والطبيعية.
- التغيرات في التركيب الكيميائي والنظائري للمياه الجوفية كدالة للتدفق.

حفر الامتصاص sinkholes هي عبارة عن منخفضات في سطح الأرض ذات تصريف جوفي، وتنتشر بكثرة في المناطق الكارستية. وبغض النظر عن شكلها، توفر جميع الحفر الامتصاصية اتصالاً مباشراً بين الجريان السطحي والمياه الجوفية. ولذلك، فإنها تمثل جزءاً ضعيفاً بشكل خاص من طبقة المياه الجوفية الكارستية، لأنها يمكن أن تنقل التلوث بسرعة من السطح إلى تحت السطح باتجاه الينابيع الكارستية. باستثناء بعض الحالات النادرة، كما في هضاب الحمم البركانية الصغيرة، لا تتطور المجاري وحفر البلع في المناطق غير الكارستية؛ وبالتالي، فإن الجداول المفقودة بشكل عام أقل أهمية في هذه المناطق.

يعتمد تدفق الجداول السطحية في المقام الأول على ظروف الغلاف الجوي. تؤثر تغيراته على الرشح في قيعان الجداول، خاصة بالقرب من الضفاف. وفي بعض البيئات الجيولوجية قد يؤدي هطول الأمطار الغزيرة إلى تغذية المياه الجوفية بشكل سريع وتسبب في زيادة تدفق المياه الجوفية إلى الجداول السطحية، والتي من خلالها يصبح التيار الفاقد عادةً تياراً مكتسباً. تشير التغذية السلبية



الشكل ٣-٤ مخطط لطبقة المياه الجوفية الكارستية (COST Action 65, 1995).

إلى النتح بواسطة النباتات القريبة. ويمكن ان تخترق جذور النباتات المنطقة المشبعة وتنقل المياه مباشرة من طبقة المياه الجوفية، مما قد يؤدي إلى انخفاض منسوب المياه الجوفية. تختلف هذه العملية يومياً وموسمياً. عندما تكون تأثيرات النتح كبيرة فقد تقلل من تصريف المياه الجوفية إلى المجرى السطحي أو حتى تعكس التغذية بحيث تتسرب المياه السطحية إلى طبقة المياه الجوفية. تتفاعل البحيرات مع المياه الجوفية كما تتفاعل مع الجداول السطحية. فقد تتلقى تدفقاً من المياه الجوفية أو ترشح مياهها إلى المياه الجوفية عبر كامل قاع البحيرة. حتى أنها قد تتغذى بالمياه الجوفية في جزء من قاعها وتغذي طبقة المياه الجوفية من خلال أجزاء أخرى. ومع ذلك، فإن التفاعلات بين البحيرات والمياه الجوفية لها أيضاً بعض الخصوصيات. فتقلبات منسوب المياه في البحيرات الطبيعية تكون أكثر ضعفاً بكثير بالمقارنة مع الجداول السطحية، بينما التبخر له تأثيرات أكبر على مستويات البحيرات بشكل عام، وقد تكون تفاعلات البحيرة مع طبقة المياه الجوفية أكثر تعقيداً. وعلاوة على ذلك، يمكن للرواسب العضوية الضعيفة النفاذية في البحيرة أن تؤثر بشكل مميز على توزيع الرشح وكذلك على التبادلات البيوجيوكيميائية للمياه والمواد المذابة بالمقارنة مع الجداول السطحية. تتفاعل الأراضي الرطبة مع طبقات المياه الجوفية كما تتفاعل مع الجداول والبحيرات. ويمكنها استقبال تدفق المياه الجوفية أو تغذية المياه الجوفية أو القيام بالأمرين معاً.

يُطلق على نهر ليوبليانيتسا، في الكارست السلوفيني الكلاسيكي، اسم النهر ذو السبعة أسماء، بسبب وجود العديد من الينابيع والجداول الغارقة في مستجمعه الذي يشغل مساحة ١١٠٠-١٢٠٠ كم<sup>٢</sup> (Habib, 1976a). الفرق في الارتفاع بين أعلى جزء، وهو جبل سنزينيك (١٧٩٦ م)، ويناابيع ليوبليانكا بالقرب من فرنيكا، هو ١٥٠٥ م. تسود الصخور الترياسية والجوراسية والطباشيرية في هذه المنطقة، بينما تغطي الرواسب الرباعية الصخور الكارستية فقط. عدة صدوع تقطع مستجمع النبع من الشمال الغربي والجنوب الشرقي. ويؤثر تغير الصخور النفاذة وغير النفاذة والبنية التكتونية على كل من الجريان السطحي وتدفق المياه الجوفية، كما هو موضح في الشكل ٣-٥. يتم تصريف معظم المياه الجوفية الكارستية من الأحواض العليا إلى الأحواض السفلية، عبر سلسلة من الأحواض الكارستية. ويصرف جزء صغير فقط عبر الحاجز الدولومايتي الكارستي مباشرة إلى ينابيع ليوبليانكا.

شكلت السمات الفريدة لحوض نهر ليوبليانيتسا الكارستي تحديات كبيرة للعلماء والباحثين في الماضي. وقد أجريت أكثر التحريات الجيولوجية والهيدروجيولوجية والجيوكيميائية في إطار رابطة هيدرولوجيا المتنبّعات بين عامي ١٩٧٢ و ٩٧٥ (Gospodaric and Habib, 1976)، بهدف دراسة العلاقات بين التغذية والتصريف في ينابيع ليوبليانكا. النتائج ملخصة في الشكل ٣-٥. وتم اجراء تجربة تتبع المياه المدمجة، الموضحة في القسم ٣،٢،١، والتي كانت طريقة الفحص الرئيسية لتحديد الترابط بين المياه السطحية والمياه الجوفية في منطقة مستجمع ليوبليانكا. في العديد من الحالات، لا يمكن تحديد الخصائص الهيدروجيولوجية (تحت السطحية) لمنطقة تصريف النبع بشكل مباشر، وتتوفر بيانات قليلة عن هندسة طبقة المياه الجوفية والبارامترات الهيدروديناميكية. وبالتالي، غالباً ما يتم تطبيق طرق غير مباشرة لدراسة العلاقة بين تصريف النبع والتغذية.

## ٣-٢ طرق التتبع الاصطناعي والبيئي

تحتوي طبقة المياه الجوفية على مسارات تدفق من النقطة التي تدخل فيها المياه إلى طبقة المياه الجوفية إلى النقطة المنخفضة طبوغرافياً التي تغادر من خلالها. ويحدث الرشح من الأمطار والثلوج في منطقة التغذية ويتحرك الماء خلال منطقة التهوية لطبقة المياه الجوفية ثم إلى أسفل الانحدار نحو الينابيع في منطقة التصريف. ويمكن فهم مسارات التدفق هذه من خلال استخدام طرق التتبع البيئية والاصطناعية. متتبعات المياه الجوفية هي مواد أو إشارات موجودة في المياه أو مضافة إليها ومناسبة لمراقبة حركة جسم منفصل من المياه داخل نظام هيدروليكي (Behrens, Hotzl, and Kass, 2001). تعتبر اختبارات التتبع أدوات مفيدة جداً للحصول على معلومات حول مدى مناطق التغذية وخصائص تدفق المياه الجوفية، وانتقال الملوثات (على سبيل المثال، Kranjc, 1997; Zhou et al., 2002; Trcek, 2003). ومع ذلك، فإن إطلاق المواد الاصطناعية في البيئة يستلزم عموماً جهوداً مالية أو لوجستية إضافية. فبالإضافة إلى المتطلبات التنظيمية، بسبب السمية أو النشاط الإشعاعي لبعض المواد الثانوية المحتملة للتتبع. بالتالي، لا يزال البحث عن المواد التي تظهر بشكل طبيعي والمناسبة كمتتبعات مهمة في مجال علوم الأرض البيئية التطبيقية.

## ٣-٢-١ المتتبعات الاصطناعية

تُستخدم المتتبعات الاصطناعية على نطاق واسع للحصول على معلومات عن مسارات محددة للمياه الجوفية، والتي تقودنا من نقاط فقدان الجداول السطحية أو من المنشآت التي من صنع الإنسان، مثل الآبار، نحو الينابيع.

الأهداف الرئيسية لاختبارات التتبع هي:

- إثبات وجود أو عدم وجود مسارات تدفق بين نقاط حقن المتتبع ونقاط المراقبة مثل الينابيع.
- تحديد البارامترات الهيدروليكية، مثل زمن بقاء المياه الجوفية ومعدل التدفق والتشتت.
- تقييم مصير الملوثات وانتقالها.
- توفير المعلومات اللازمة لإدارة الينابيع، وحماية المياه الجوفية (طبقة المياه الجوفية)، والتحقيق من أحمال الملوثات وغيرها من مهام إدارة المياه.

في بعض الحالات البسيطة، قد يكون تطبيق متتبع واحد مناسب وكافٍ لتوفير الإجابة (الإجابات) المطلوبة. بينما الدراسات الأكثر تعقيداً تتطلب استخدام عدة متتبعات، أو مزيجاً من المتتبعات التي يمكنها توفير معلومات عن الظروف الهيدروديناميكية لمستجمع النبع بأكمله في ظروف هيدروليكية متساوية، وعن سلوك انتقال الملوثات، والبارامترات الهيدروليكية للأنظمة التي تم فحصها. في إطار الاختبار المدمج، يتم حقن متتبعات مختلفة في مواقع مختلفة في نفس الوقت.

يتميز الاختبار متعدد المتتبعات عن الاختبار السابق، كونه يتكرر في نفس الموقع ولكن في وقت مختلف وربما في ظروف هيدرولوجية مختلفة. هذا الاختبار مفيد جداً لدراسة العلاقات بين تصريف الينابيع والظروف الهيدرولوجية. يُستخدم اختبار التتبع المقارن لتحديد ما إذا كانت المتتبعات قابلة للمقارنة المباشرة تحت ظروف جريان المياه الجوفية والتحقق من تفاعلاتها (Behrens et al.,

(Kass, 1998; 1992). مثل هذه الاختبارات تشير إلى عمليات الحقن المتوازية لاثنتين أو أكثر من المتتبعات في موقع واحد تحت نفس الظروف الهيدرولوجية وظروف التخزين تحت سطح الأرض.

ويفضل اختياره المنافذ الطبيعية للمياه الجوفية، مثل فتحات البلع أو المعالم المفتوحة أو الفتحات الاصطناعية (على سبيل المثال، أجهزة قياس الضغط، والآبار) بهدف حقن المتتبع، (Kass, 1998).

ويعتمد اختيار المتتبع على أهداف التجربة واستراتيجيتها. ترتبط المتتبعات المرجعية ارتباطاً وثيقاً بتقييم سلوكها وبالتالي سرعة النقل والاسترداد.

ولكي تكون أدوات التتبع مفيدة، يجب أن يكون للمتتبع عدد من الخصائص (Kass, 1998):

- يجب أن يسمح التركيب الفيزيائي والكيميائي بانتقال المتتبع بطريقة تسمح بقياس المتغير الهيدروليكي بدقة؛ ومن ثم، يجب أن يكون مستقر كيميائياً وألا يكون ممتصاً في مواد طبقة المياه الجوفية أو أن يفقد عن طريق الرشح أو أي عملية تحلل.
- يجب أن يكون المتتبع أيضاً قابلاً للاكتشاف في حالة التخفيف العالي جداً، وبالتالي، يجب أن يكون وفيراً في البيئة المائية بمستوى مقبول.
- يجب أن يكون المتتبع غير سام ويجب أن يكون استخدامه اقتصادياً.

لا يوجد متتبع مثالي، حيث أن معظم المتتبعات لها بعض العيوب. ومع ذلك، يجب أن يمثل المتتبع دائماً المعامل المراد تحديده. وفقاً لخصائصها الفيزيائية والكيميائية وطرق الكشف عنها، تنقسم المتتبعات الاصطناعية إلى ثلاث مجموعات، وهي مفسرة في الجدول ٣-١: الأصباغ الفلورية (أكثر المتتبعات استخداماً)، والأملاح والجسيمات. تتطلب المجموعة الأخيرة أخذ عينات النبع بتكرار يتكيف مع هدف الدراسة والتحليل المجهرى. يتم الكشف عن اختراق متتبع الأملاح بسهولة بمجرد زيادة الموصلية الكهربائية الخاصة بالنبع ولكن بحساسية كشف منخفضة. ويمكن استخدام مقاييس الفلورة المحمولة للقياسات المستمرة لمتتبعات الأصباغ الفلورية في النبع. ومع ذلك، فإن التحليل المختبري لعينات الينابيع، في حالة وجود أجهزة متطورة جداً، يوفر دقة كشف أفضل، ولكن ذلك يعتمد على فترات أخذ العينات.

تتطلب مستجمعات المياه غير المتجانسة ذات مكونات التدفق السريع والبطيء اهتماماً خاصاً بسبب المسامية المزدوجة. يمكن أن يصل التأخير الناجم عن مكون التدفق البطيء إلى عدة سنوات وأكثر من ذلك، حيث يمكن أن تختلف حصص مكونات التدفق السريع والبطيء مع الظروف الهيدرولوجية (Behrens et al., 2001). ولذلك، عادةً ما تسجل منحنيات الاختراق المتتبع عادةً التدفق السريع فقط، حيث أن وقت مرآة التدفق البطيء يكون عادةً قصيراً جداً. ويمكن حساب حصة مكون التدفق السريع من معدل الاسترداد.

كما يجب تعديل منهجية أخذ العينات وفقاً لأهداف اختبار التتبع. أخذ العينات التكاملية كافية لإثبات الترابط الجوفي، في حين أن حساب معدل الاسترداد يتطلب قياسات مستمرة لتركيزات المتتبع إلى جانب قياسات تصريف الينابيع.

تتمثل إحدى القضايا الحرجة في التخطيط لاختبار المتبع في تحديد كتلة المتبع التي يجب حقنها. تسمح الكمية المثلى بالكشف الواضح عند نقطة أخذ العينات دون نفقات زائدة أو مياه غير مقبولة التلوين والتحميل البيئي، أو عمل إضافي في المختبر. بشكل عام، يتم تقدير كمية المتبع من علاقة تجريبية (Kass, 1998):

$$M = Q \times L \times K \quad (3.1)$$

حيث

M = كمية المتبع المطلوبة (أي الكتلة لكل كيلوغرام بالنسبة للمتبعات القابلة للذوبان وعدد الجسيمات بالنسبة للمتبعات الجسيمة).

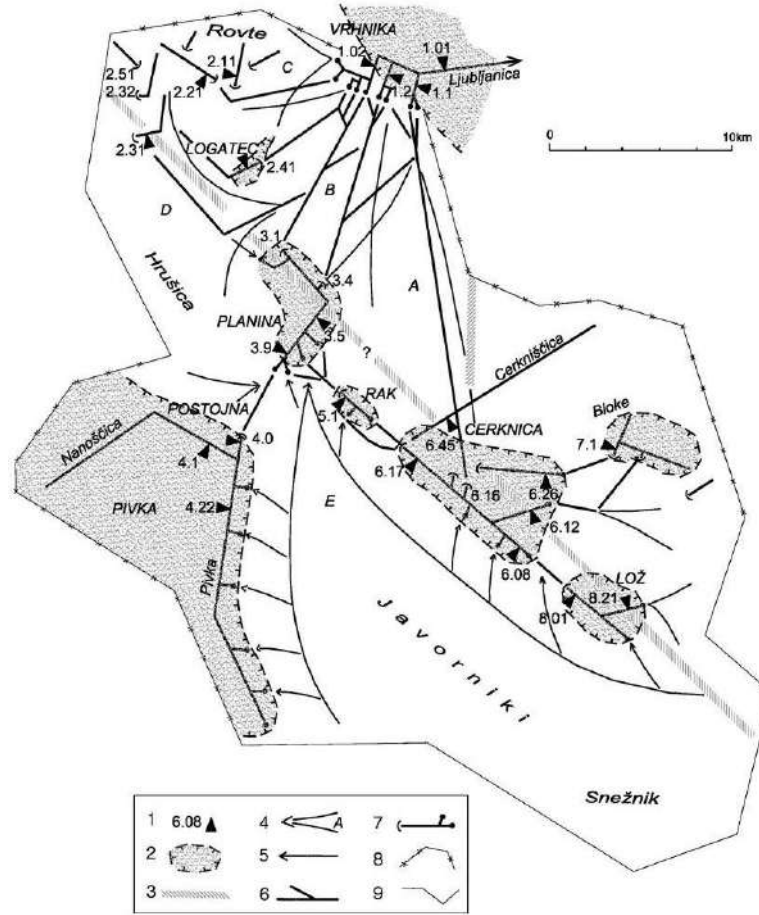
Q = تصريف النبع (م<sup>٣</sup>/ث).

L = المسافة إلى النبع (كم).

k = معامل المتبع (على سبيل المثال،  $k = 0.25$ ، لليورانين و  $250$  لكلوريد الصوديوم؛ يمكن العثور على قيم أخرى في Kass, 1998). إذا كانت البارامترات الهيدروليكية وبارامترات النقل معروفة، فمن الممكن حساب كتلة الحقن. ويعتمد الحساب على معادلة التشتت-التحول، مما ينتج عنه التركيز المستهدف عند نقطة أخذ العينة (Field, 2003). يُستمد التفسير الكمي لاختبارات المتبع من مبادئ انتقال المذاب. يعبر منحنى الاختراق الملحوظ في النبع عن العمليات الهيدروديناميكية والفيزيائية الكيميائية والبيولوجية التي تتعرض لها المتبعات على طول مسارها تحت الأرض (Schulz, 1998). ويتطلب الأمر وجود منحنى الاختراق المفصل لمقارنة خواص وسلوك المتبعات في المياه الجوفية. ولإعادة إنتاج تغيرات التركيز بكل التفاصيل المطلوبة فمن الضروري القياس المستمر لتركيز المتبعات على مدى زمن الاختراق أو القيام ببرنامج كثيف جداً لأخذ العينات.

ويشكل منحنى الاختراق لنوع ما الأساس لتحليلات السلوك والمقارنة بين المتبعات. ومن الضروري الرصد الأولي قبل حقن المتبعات. فهو يعمل على تحديد تركيزات المتبعات المستخدمة لتصحيح نتائج تجربة المتبع. يتم رسم نتائج التركيزات المقاسة في شكل منحنى تركيز المتبع المعتمد على الوقت. وحتى الآن، تتوفر معدلات التصريف على شكل استرداد المتبعات التراكمي المعتمد على الوقت (الشكل ٦-٣). للمقارنة بين المتبعات، من المهم تطبيع التركيز كعامل لكمية المتبعات المحقونة (Behrens et al., 1992). يهيمن على حجم الاختراق كلا من كتلة المتبع والتدفق الحجمي (أي التخفيف). والملاح الأساسية لمنحنى الاختراق هي ما قبل الرصد، والطرف الصاعد، والذروة، والركود. (Benischke, Goldscheider, and Smart, 2007). يحدث عدم التماثل بسبب التشتت والتخزين وعمليات النقل الأخرى. والتي لا يمكن تفسيرها إلا من خلال تقييم شامل للعمليات الهيدرولوجية والعوامل الهيدروليكية والهيدروكيميائية والكيميائية الحيوية المؤثرة.

وبالإضافة إلى منحنى الاختراق، يقدم منحنى استرداد النبع معلومات لمقارنة سلوك المتبع على طول الممرات تحت الأرض، لا سيما من خلال مقارنة العائد على مسافات تدفق مختلفة (Himmelsbach et al., 1992; Kass, 1998). يتم رسم الاسترداد التراكمي للمتبع (الكتلة أو النسبة المئوية) مع منحنى الاختراق لإظهار أن منحنى الاسترداد يقترب من قيمة نهائية متقاربة. يسمح هذا أيضاً



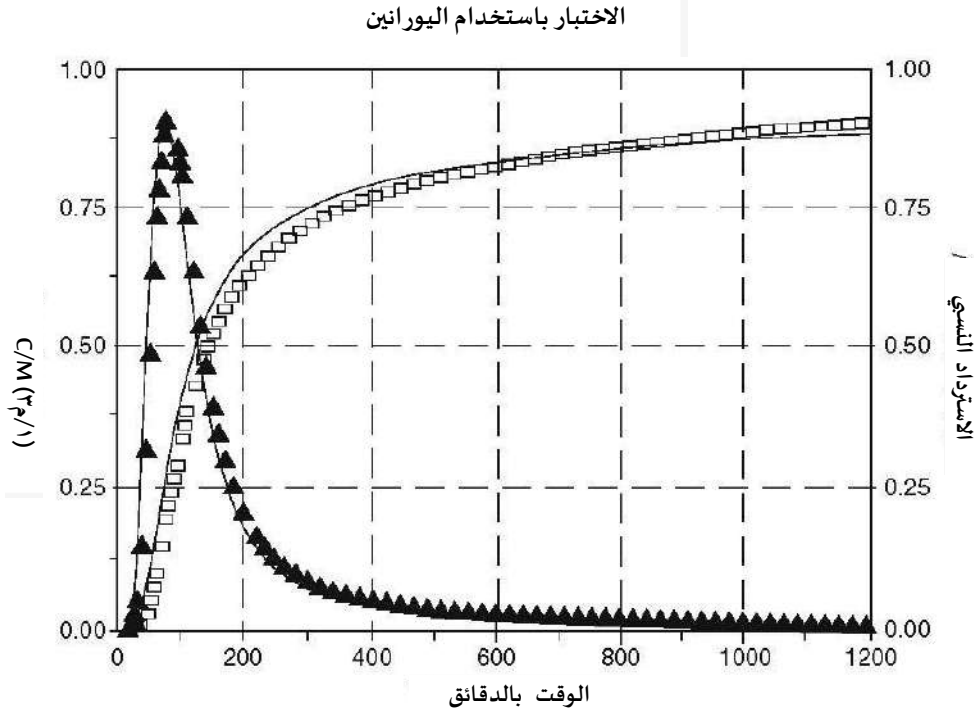
الشكل ٣-٥ استعراض تخطيطي للمياه السطحية والجوفية في حوض نهر ليوبليانيكا الكارستي: (١)، محطات القياس المهمة: (٢)، بولي الكارستية مع الرواسب؛ (٣)، الحاجز الهيدروجيولوجي المركزي النسبي؛ (٤)، منطقة مستجمعات المياه الينابيع الكارستية الدائمة؛ (٥)، التصريف الدوري للمياه الكارستية العالية؛ (٦)، وصلات المياه الجوفية؛ (٧)، مجرى سطحي مع ينابيع؛ (٨)، مستجمعات المياه السطحية؛ (٩)، مستجمعات المياه الكارستية المفترضة. (بعد [Habic, 1976a](#)).

بتحديد الوقت الذي يمر فيه نصف التتبع المسترد. وغالبًا ما يكون أقل بكثير من ١٠٠ في المائة، وذلك بسبب تخزين التتبع أو الامتزاز أو التحلل.

ويتطلب استرداد الكتلة بيانات التصريف والتركيز عالية الدقة في كل موقع. إذا كان التصريف ثابت، فإن كتلة المتتبع المستردة هي تكامل منحني الاختراق مضروبًا في التصريف. ولتحسين تقييم نتائج التتبع وتحديد شكل أفضل، يتم استخدام النماذج المناسبة (الشكل ٣-٦). قد تُظهر تركيزات التتبع المقاسة انحرافات قوية إلى حد ما عن المنحنيات النظرية ومن ثم، يمكن تحديد البارامترات التي تحدث في الحلول التحليلية من خلال أفضل الطرق الملائمة.

جدول ٣-١ خصائص المتتبعات الأكثر شيوعاً للمياه الجوفية ملخص من (Kass 1998, Behrens et al., 2001)

فئة المتتبع	اسم المتتبع	السمية	الميزات	السلبيات
الاصباغ	اليورانين رودامين ديلوتي سلفورهودامين ب أميدورهودامين ج يوسين البيرايين النفثيونات تينوبال	آمن سمية جينية سمية بيئية غير آمن آمن غير آمن غير آمن آمن آمن	حساسية فائقة للكشف ؛ خلفية بيئية منخفضة أو شبه معدومة ، سهلة وسريعة الكشف نسبياً ، جيده من الناحية الكمية ولها تحمل بيئي جيد.	الامتصاص بالتبعية بالمادة ودرجة حموضة الماء، والذي يختلف من منخفض بالنسبة إلى لليورانين، ومعتدل في لليوسين، إلى أقوى في تسلسل السلفورودامين والرودامين ب؛ لها طيف واسع الشكل نسبياً
الجسيمات	الابواغ بكتيريا معينة الفيروسات، والعائيات كريات مجهرية	آمن لم يقيم لم يقيم آمن	خلفية بيئية منخفضة ؛ ومناسبة لتحديد انتشار مسببات الأمراض؛ وتستخدم في الأنظمة الكارستية. التتبع في ظروف التدفق الطويل	تفقد عن طريق الرشح أو الترسيب؛ مناسبة فقط لتدفق المياه السريع المضطرب
الاملاح	الصوديوم البوتاسيوم الليثيوم السترونتيوم الكلوريد البروميد اليوديد	آمن آمن آمن بقيود آمن بقيود آمن بقيود آمن بقيود لم يقيم	يتم اكتشاف اختراقها بسهولة من خلال زيادة الموصلية الكهربائية للماء.	امتصاصها منخفض أو متوسط؛ تركيزها في الخلفية البيئية منخفضة إلى مرتفع (الكلور، الصوديوم).



الشكل ٣-٦ منحني الاختراق لليورانين ومنحنى الاسترداد من تجربة تتبع لمسافة قصيرة على طول نظام متصدع في موقع الاختبار، لينداو: تمثل المثلثات والمربعات القيم المقاسة، ويعطي الخط العابر أفضل مطابقة محسوبة باستخدام نموذج تشتت الشق الواحد (SFDM). (Himmelsbach et al., 1992).

قد يوفر اختبار التتبع معلومات ممتازة عن حركة المياه الجوفية و انتقال الملوثات، ولكنه قد يستغرق عدة أشهر لتنفيذه وقد يفشل إذا تم إعداده أو إجراؤه أو تحليله بشكل سيء. بالإضافة إلى ذلك، يجب التحكم في كل اختبار تتبع للأخطاء التي قد تنشأ من الحقن وأخذ العينات والمناولة والتحليل ومعالجة البيانات (Smart, 2005).

وتم استخدام دراسات المتتبعات المكثفة والاختبارات الميدانية لتقدير مناطق تغذية الينابيع، ومعدلات حركة المياه الجوفية، والتوازن المائي لطبقات المياه الجوفية، كما تمت مناقشته في قسم سابق (الشكل ٣-٥).

استناداً إلى البيانات المستقاة من التحريات السابقة والمتتبعات المتاحة، تم اختيار ١٢ حفرة ابتلاع من أجل تجربة تتبع المياه المدمجة (الشكل ٣-٧). في سيركنيس بوليه، تم حقن اليورانين في حفرة فودونوس الابتلاعية (٦,١٦)، والتي تصرف المياه إلى ينابيع بيسترا (١,١) ولوبيجا (١,٢) وليوبليانكا (١,٣ و ١,٤)، بسبب جريان شائع غير معروف في قاع البحيرة المتقطعة. في بلانيسكو بوليه تم اختيار سلسلة من الحفر الابتلاعية من مجرى يونيكا الغاطس للتأكد مما إذا كانت جميع مياه البولي تندفق معاً إلى نفس الينابيع أم لا. تم تمييز حفرة ميلافكوفي كلجوك بولي الامتصاصية (٣,٤٢) بواسطة الرودامين، والحفر الامتصاصية لريبتشي (٣,٤٣) بواسطة ابواغ الليكوبوديوم البنية والخضراء، والحفر الامتصاصية في دوليني لوكي (٣,٤١) بواسطة التينوبال، الحفر الامتصاصية

في لاس فيكا زد فيكاغا (٣,٢١) بواسطة المنظفات، والحفر الامتصاصية في سترتش فيكا إيفيكا بواسطة محلول الإنديوم وكلوريد الليثيوم. وفي لوجاس بولييه، تم حقن الأوزين في الحفرة الابتلاعية لجاك ريكا (٢,٤١)، حيث يغطس لوجاس ريكا؛ بينما على هضبة روفتي، تم تتبّع مجرى هوتنكا الغاطس (٢,٣١) بواسطة الأميدورهودامين. وبالإضافة إلى ذلك، تم تمييز تيارات روفتاريكا (٢,٢١) وبيكوفس (٢,٣٢) وبيكليز (٢,٥١) الغارقين بواسطة ابواغ الليكوبوديوم الحمراء والزرقاء، في حين تم تمييز تيارات روفتاريكا (٢,٢١) وبيكوفس (٢,١١) الغاطسة بواسطة الكروم وكلوريد البوتاسيوم على التوالي. تم اختيار نوع المتبّع وكميته بناءً على الموضع الهيدروليكي لنقطة الحقن ومسافتها من ينباع ليوبليانيكا.

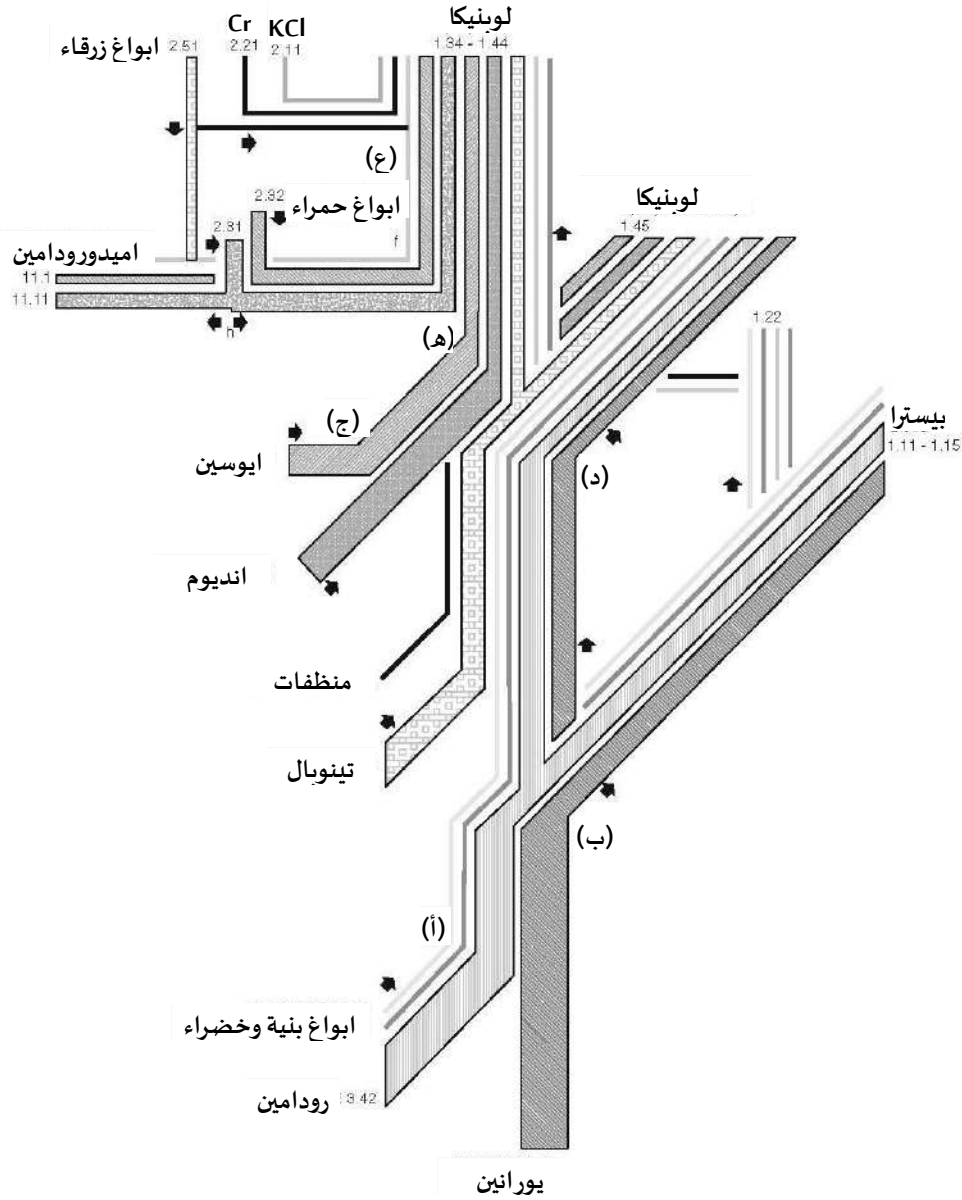
تم تلخيص نتائج تجربة التتبع المشترك في مستجمع نهر ليوبليانيتشا في **الشكل ٣-٧** وهي :

- تثبيت واستكمال المعرفة حول الروابط الجوفية بين فتحات البلع والينابيع.
- التأكد من نوعية المياه التي يتم إمدادها من فتحات البلع إلى الينابيع في الظروف الهيدرولوجية المختلفة.
- إكمال المعرفة حول الخصائص الهيدرولوجية والهيدروجيولوجية الكارستية لينابيع كنيش بولييه، وبلاينيسكو، ولوغاس بولييه، وهضبة روفتيه، ليوبليانيكا (**الشكل ٣-٥**).
- مقارنة قابلية تطبيق طرق ووسائل تتبع المياه المختبرة والجديدة.
- استكمال منهجية تتبع المياه الكارستية.

استُخدمت منطقة سيمرياتش-بيجاو، بما في ذلك كهف لور في كارست وسط ستيريا، لفترة طويلة كمنطقة اختبار لمختلف أجهزة التتبع الاصطناعية. تم إجراء ما يقرب من ٣٠ تجربة تتبع لإثبات الخصائص والشروط الحدية لتطبيقات المتبّعات. يتميز النظام الكارستي بمدخلات المياه من هطول الأمطار والجدول السطحي بالإضافة إلى تدفق المياه من النظام الكارستي بواسطة ينبوعين. وتم وصفه بواسطة، (Behrens et al, 1992).

يحسب معدل استرداد المتبّعات المحقونة في مجرى المدخلات الغاطسة، كناتج التصريف وأجزاء التتبع حسب الزمن، يزداد بشكل ملحوظ مع ارتفاع تصريف الينابيع المتدفقة، مما يؤدي إلى معدلات استرداد تتراوح بين ١٠ و ١٠٠ في المائة. وبالتالي، في ظروف انخفاض المياه، يتم تخزين جزء كبير من المخزونات لفترة أطول في أرضية طبقة المياه الجوفية، ممثلة في الشقوق الدقيقة والقنوات الكارستية غير النشطة. تم تأكيد هذا التفسير من خلال التباين الزمني الواسع لندرة الاختراق من ما بين ١٥ ساعة إلى ثلاثة أيام تقريباً، وكذلك من خلال تحليل فصل الجريان السطحي الينابيع.

واستُخدمت أجزاء المتبّعات، الموجودة عند التدفق الخارج، لحساب معدل التدفق ثم لتحديد الحجم الكامل للمياه المتعقبة في النظام الكارستي. يظهر أن حجم المياه مستقل تقريباً من تصريف التدفق الخارج. وبالتالي يمكن الاستنتاج بأن الحجم الكامل للمياه يجب اعتباره ثابتاً مع ارتفاع التصريف. يمكن تفسير زيادة التصريف كدالة لسرعة التدفق وليس كمساحة إضافية لتخزين المياه. أدت التحريات في سعة تخزين النظام الكارستي، استناداً إلى تجارب التتبع، إلى كمية  $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ . ويتراوح زمن بقاء المياه بين ٢٠ و ٨٠ ساعة، بسبب الظروف الهيدرولوجية خلال تجربة التتبع. من ناحية أخرى، تم حساب الحجم الإجمالي للكتلة الكارستية



الشكل ٣-٦ مخطط وصلات المياه الجوفية بعد نتائج تجربة تتبع المياه في عام ١٩٧٥: (أ) إلى (و) هي النقاط الحرجة الرئيسية في نظام الصرف الجوفي، حيث تتحد التدفقات الجوفية وتتفكك. (Habic, 1976b).

في كلا النظامين، الهوائي واللاهوائي باستخدام النظائر البيئية بمقياس  $10^8 \times 1.4 \text{ m}^3$  وهو على الأقل اعل بمقدار اربع مرات. ويتوافق مع متوسط زمن بقاء المياه الجوفية الذي يبلغ حوالي ٥٠ عامًا ومسامية كلية ٤,٩ في المائة. كما يشير أيضًا إلى أنه، من خلال تجارب المتبع، فإن جزءًا صغيرًا جدًا من المسطح المائي الكارستي مشارك، لذلك يمكن اعتبار كلا الرقمين واقعيين. وقد تم إجراء تحريات مماثلة في الجورا السويسرية (Bauer et al., 1980).

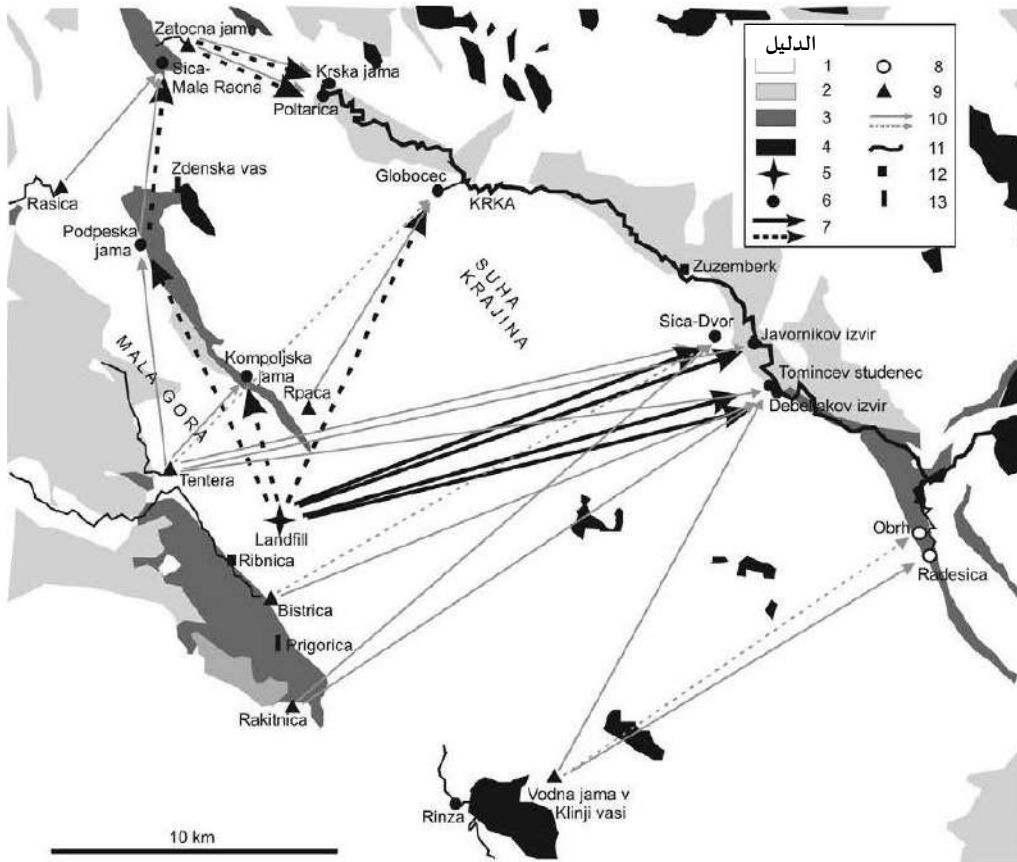
تم إجراء العديد من تجارب المتبع مؤخرًا في سلوفينيا على مدافن النفايات في الكارست، بهدف فهم اتجاهات وخصائص تدفق المياه الجوفية من مصادر التلوث بشكل أفضل. وكان هذا ضروريًا لإعداد خطة فعالة لرصد المياه الجوفية في منطقة تأثير مدافن النفايات (Kogovsek and Petric, 2006, 2007). استندت أبحاث تأثيرات مدافن النفايات على البيئة على تحديد تدفق المتبع من نقطة الحقن على سطح المكب باتجاه الينابيع الرئيسية في مناطق الدراسة.

يُعدّ مدفن مالا غورا، بالقرب من ريبنكا في جنوب شرق سلوفينيا، أحد مدافن النفايات التسعة التي لا تزال نشطة في الكارست السلوفيني. يقع المكب على صخور جيرية كارستية، متناوبة مع الدولوميت ومغطاه بطبقات رقيقة ومتقطعة في كثير من الأحيان من التربة البنية (الشكل ٣-٨). تم إجراء العديد من اختبارات المتبع في الماضي لتحديد اتجاهات وخصائص تدفق المياه الجوفية في المنطقة المدروسة الأوسع نطاقاً (الشكل ٣-٨). لمحاكاة التأثيرات الخطرة أو الضارة لمدفن النفايات، واجري تتبع إضافي في ظروف ارتفاع المياه في أكتوبر ٢٠٠٤ (Kogovsek and Petric, 2006). بعد اختبار سعة ابتلاع طبقة المياه الجوفية، تم عمل تم اختيار شق عمودي عالي النفاذية عند حافة المكب لحقن المتبع. وتم حقن ٧ كجم من محلول اليورانيوم وتم غسله بـ ٩ م<sup>٣</sup> من الماء (الشكل ٣-٩).

أشارت النتائج إلى الارتباطات الرئيسية للمياه الجوفية إلى الينابيع، كما هو موضح في الشكل ٣-٨. تم تتبع ظهور المتبع خلال الظروف الهيدرولوجية المواتية، وحتى بعد عام واحد من الحقن، وتم قياس تركيزات متزايدة من اليورانيوم في جميع الينابيع بعد أحداث هطول الأمطار الكثيفة (الشكل ٣-١٠). تم إيلاء اهتمام خاص لنبع غلوبوك فيك، باعتباره المصدر الرئيسي لإمدادات المياه في منطقة سها كراينا. وقد أشارت نتائج اختبارات المتبع إلى أن المياه الجوفية من منطقة المكب تتدفق أيضًا نحو غلوبوك فيتش خلال ظروف ارتفاع المياه، على الرغم من أن هذا النبع يتغذى بشكل رئيسي من مناطق أخرى ذات طبقات مياه جوفية كارستية. كانت سرعة التدفق الظاهرية السائدة في الاتجاه الرئيسي نحو الينابيع بالقرب من دفور حوالي ٤ سم/ثانية (الجدول ٣-٢). وهذا يشير إلى قابلية تأثر عالية وخطر كبير للتلوث بالمواد الضارة من المكب. وبالتالي، فإن النتائج التي تم الحصول عليها تمثل معلومات قيمة من أجل التخطيط السليم لمراقبة موارد المياه الجوفية.

تمت دراسة خصائص تدفق المياه الجوفية من مكب النفايات بالقرب من سيزفانا في منطقة الكارست الكلاسيكي عن طريق اختبار المتبع (Kogovsek and Petric, 2007). وتم حقن صبغة اليورانيوم الفلورية في شق جيد النفاذية على سطح كارين بالقرب من المكب لدراسة اتجاهات وسرعة تدفقها عبر طبقة المياه الجوفية الكارستية. وقد أتاحت مراقبة تركيزات المتبع على مدى عام

ونصف العام، التوصل إلى بعض الاستنتاجات حول ديناميكيات تدفق المياه الجوفية باتجاه ينابيع تيمافا وبروجنيتشا وساردوك. كما دُرست الملاحظات التفصيلية في محطة الضخ في كلاريك وهي المصدر الرئيسي لمياه الشرب في منطقة كراس.



الشكل ٣-٨ (١) طبقة المياه الجوفية الكارستية؛ (٢)، طبقة المياه الجوفية المتصدعة؛ (٣)، طبقة المياه الجوفية المسامية؛ (٤)، الصخور منخفضة النفاذية للغاية؛ (٥)، مكب النفايات مالا غورا، نقطة الحقن في اختبار التتبع في أكتوبر ٢٠٠٤؛ (٦)، نقطة أخذ العينات في اختبار التتبع في أكتوبر ٢٠٠٤؛ (٧)، نقطة اتصال المياه الجوفية الرئيسية والثانوية وصلة المياه الجوفية المثبتة عن طريق اختبار التتبع في أكتوبر ٢٠٠٤؛ (٨)، النبع؛ (٩)، نقطة الحقن في عمليات التتبع السابقة؛ (١٠)، توصيلات المياه الجوفية الرئيسية والثانوية المثبتة بواسطة عمليات التتبع السابقة؛ (١١)، التدفق السطحي؛ (١٢)، الترسيب؛ (١٣)، محطة قياس الهطول؛ (١٤)، محطة قياس. (Kogovs

ek and Petric ~, 2006).



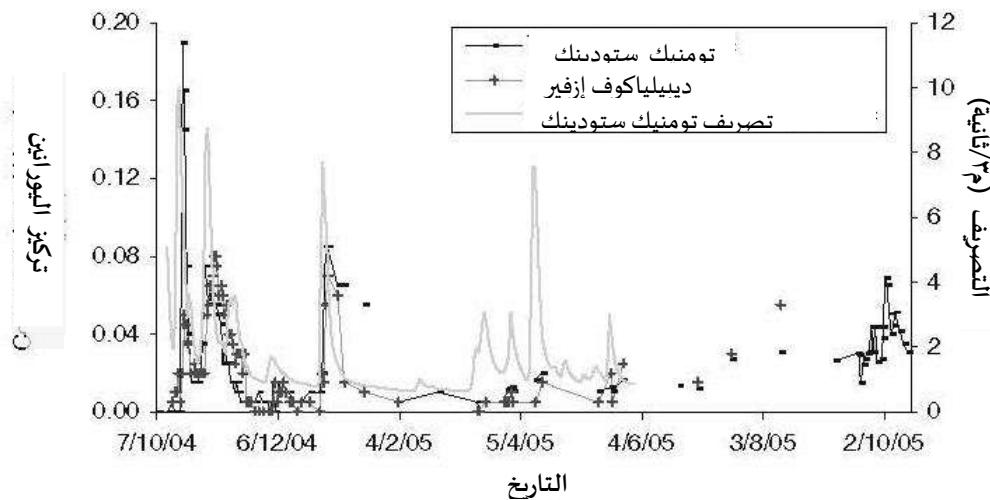
الشكل ٣-٩ حقن محلول اليورانين في شق على حافة المكب. (الصورة: Petric , 2005)

وتم إثبات الاتجاهات الرئيسية وسرعات التدفق العالية عبر القنوات الكارستية شديدة النفاذية. وأكدت حسابات كمية المتتبع المستعادة اتجاه التدفق الرئيسي نحو ينابيع تيمافا (معدل الاسترداد ٩٣%). استناداً إلى النتائج الموصوفة والخبرة السابقة، يمكن التأكيد على بعض الإرشادات الخاصة بالرصد تقع منطقة التدريب العسكرية السلوفينية الرئيسية في هضبة جافورنيكي الجبلية، وهي منطقة كارستية لا يوجد بها تصريف سطحي أو وديان أنهار. يحدث القليل من التخفيف في ظل هذه الظروف، ونتيجة لذلك، هناك خطر كبير للتلوث. وقد أظهرت اختبارات التتبع أن نسبة كبيرة من المياه التي تغذي ينابيع مالي وفيبافا تأتي من المنطقة المجاورة لمنطقة التدريب العسكري (Kogovsek et al., 1999). وبالتالي، فإن أي أنشطة ملوثة تجري داخل منطقة التدريب العسكري من المحتمل أن تؤثر على النبعين. وهذه مسألة

خطيرة للغاية، حيث تم تطوير الينابيع لتوفير إمدادات المياه لسكان جنوب غرب سلوفينيا. ولحماية هذه المياه بشكل مناسب، فمن الضروري الحصول على أكبر قدر ممكن من المعلومات عن مناطق التغذية وخصائص تدفق المياه الجوفية. ومن ثم، يثبت التحري المقدم من (Kogovsek et al., 1999) أن اختبارات التتبع هي أداة مفيدة جداً للحصول على مثل هذه المعلومات.

ومن الأمثلة الأخرى لتطبيقات التتبع تقدير خطر التلوث المائي الناتج عن من مستودع لتخزين البتروكيماويات وتقييم الآثار الناتجة عن إنشاء خط سكك حديدية على الموارد المائية المهمة إقليمياً (Kogovsek and Petric, 2004). إلى جانب المعلومات الأساسية حول اتجاه وسرعة تدفق المياه الجوفية، أشارت الدراسات التي تمت مناقشتها أيضاً إلى بعض المبادئ المنهجية. تم إجراء أخذ

العينات لفترة طويلة في كلتا التجريبتين، واستمر ذلك حتى بعد اكتشاف تركيزات الذروة. النتائج المقدمة، والتي يمكن الحصول عليها من خلال استخدام اختبارات المتبع المطولة هذه، مكّنت من تحديد مسارات التدفق التي يتم تنشيطها في ظل الظروف الهيدرولوجية القاسية. المتتبعات الفلورية التي تتطلب فترة قصيرة لأخذ العينات، غير قادرة على اكتشاف هذه الخصائص الخاصة؛ وبالتالي، فإن المعلومات المتاحة لتخطيط حماية المياه غير مكتملة. ومن ثم ينبغي تكييف تكرار ومدة أخذ العينات بانتظام مع نتائج تحليل تركيزات المتبع في النبع وحدوث الهطول المطري. استناداً إلى خصائص منحنيات الاختراق المتبع ومعدلات الاسترداد من الممكن تحديد ما إذا كان من الممكن الاستمرار في أخذ العينات وكيفية القيام بذلك. وقد كانت مدة أخذ العينات في الدراسات التي تمت مناقشتها، من ثلاثة أشهر إلى أكثر من عام، ولكن في ظل بعض الظروف المحددة، يجب أن تكون هذه الفترة أطول. وقد كانت الخصائص المختلفة للملوثات مهمة أيضاً. وشدد الباحثون على أن المواد الأكثر خطورة تشكل تهديداً خطيراً لمياه الشرب حتى لو وجدت بتركيزات منخفضة جداً؛ ولذلك، حتى الاتصال الضعيف مع النبع يمكن أن يكون قاتل. في حالة التلوث، فإن ينبغي الأخذ بالاعتبار كلاً من الجريان الأول المركّز والتصريف المتأخر، خاصة تجاه تلك الينابيع المستخدمة لإمدادات المياه.



الشكل ٣-١٠ تركيزات اليورانين في ينابيع تومينك إيف ستودينك وديبيلياكوف إزفير، والتصريفات في تومينك إيف ستودينك. (Kogovsek and Petric , 2006).

### تجارب التتبع في ظل ظروف مقياس التشبع

يمكن أن تؤثر المنطقة غير المشبعة لطبقة المياه الجوفية بشكل أساسي على تصريف النبع وكذلك على تركيبه الجيوكيميائي. ومن ثم، تم إجراء تجارب التتبع أيضاً في المنطقة التي تمت مناقشتها للحصول على نظرة ثاقبة على الخصائص الفيزيائية الكيميائية الأساسية ودراسة دورها في تصريف الينابيع وتلوثها (الشكل ٣-١١).

وبالتعاون مع المنظمات الزراعية، تم وضع برنامج علمي لحوض نهر مورالباي جنوب مدينة غراتس لإنشاء مقياس تجميعي لمقياس للتشبع. ظروف التربة، واستخدام الأراضي الزراعية بالآلات الثقيلة بشكل خاص، يرتبط إلى حد كبير بالمناطق الأخرى من الحوض. وقد تم اختيار تكوين المعدات التقنية، حتى الآن، للتحقق من أحادية محصول الذرة وكذلك تناوب المحاصيل.

تعتمد حركة المياه الراشحة على نفاذية غطاء التربة والرواسب الخشنة:

- تركيب أكواب سحب تخترق التربة أفقياً على عمق مختلف.
- تركيب مقاييس الشد.
- تركيب كتل متجانسة الصخرية.
- تركيب مقاييس التشبع الدقيقة.

يعتمد انتقال الملوثات في المنطقة غير المشبعة على استخدامات الأرض المختلفة وعمليات التبادل، والتحلل والامتزاز في منطقة التربة. ينبغي أن تساعد هذه التحريات في تطوير ممارسات محسنة لاستخدام الأراضي مع تقليل تأثير الأسمدة والمبيدات الحشرية في نظام المياه الجوفية.

تم إجراء تجارب التتبع المدمجة بهدف مقارنة انتقال المذاب مع انتقال المياه وحركة المتتبع مع سلوك الملوثات. جانب آخر هو التحقق من المفاهيم النموذجية المتعلقة بانتقال المذاب في المنطقة غير المشبعة (Fank, 1996). تم إجراء تجربة التتبع في ربيع عام ١٩٩٣ باستخدام ٦ كجم من بروميد الصوديوم المذاب في ٤٠٠ لتر من الماء وزعت على سطح الحقل التجريبي بأكمله. ورافقت التجربة ٤٠ ملم من المطر الاصطناعي.

ويُعرف البروميد بأنه متتبع متحفظ للغاية ولا يخضع لعمليات امتزاز قوية. ونظراً للجفاف الشديد في ربيع عام ١٩٩٣، لم يتم التعرف على أي حركة رأسية سريعة كبيرة للمتتبع، وتم قياس الحد الأقصى لتركيز المتتبع لأول مرة في أواخر الخريف على عمق ٤٠ سم، بعد موازنة العجز المائي في التربة. تسبب هطول الأمطار الغزيرة في ذلك الموسم في انتقال سريع للبروميد إلى العمق تبعه انخفاض طفيف في تركيز المتتبع. وبالنظر إلى الظروف الحدودية في عامي ١٩٩٣ و ١٩٩٤ فيما يتعلق بالظروف الهيدروديناميكية وطبقات التربة في الحقل التجريبي لتناوب المحاصيل، استغرق البروميد المتتبع ما يقرب من عام واحد للوصول إلى عمق ٣ أمتار. إن استخدام الأكسجين-١٨ كمتتبع طبيعي خلال فترة ذوبان الثلوج أو تسربها كمطر اصطناعي (المياه تنبع من مصادر جبال الألب المرتفعة) يمثل الحركة الرأسية للمياه الراشحة بطريقة مثالية. وقد تم الوصول إلى مثل هذا الوضع في ربيع عام ١٩٩٦، عندما نقلت ٨٧ ملم من المياه الراشحة بتركيزات منخفضة من الأكسجين-١٨ عمودياً في المنطقة غير المشبعة. وبالمقارنة مع تجربة عام

جدول ٣-٢ تقدير السرعات السائدة الظاهرة لتدفق المياه الجوفية (كجوفسيك وبيتريتش، ٢٠٠٦)				
نقطة أخذ العينات	فرق الارتفاع (م)	المسافة (م)	الزمن (ساعة)	السرعة (سم/ثانية)
تومينتشف ستودينيك	٣٩٥	١٧٨٠٠	١٢٢,٥	٤
ديبيلجاكوف ستودينيك	٣٩٧	١٨٠٤٥	١٤٢	٣,٥
جافورنيكوف إزفير	٣٩٠	١٧٧١٠	١٤٣,٥	٣,٤
سيكا دفور	٣٧٠	١٦٥١٥		٣,٤
غلوبوكيتش	٣٢٢	١٢٧٤٠	١٢٤,٥	٢,٩

١٩٩٣، فإن انتقال المتبوع كان سريعاً إلى حد ما، حيث وصل في غضون أسابيع قليلة فقط إلى عمق ٦٠ إلى ٧٠ سم (Fank Stichler, 1998):

- يمكن اعتبار عملية التدفق في المنطقة غير المشبعة مزيجاً من التدفق التفضيلي من خلال أنظمة المسام الكبيرة، وحركة المياه بواسطة تأثيرات التدفق المكسبي، والتدفق المشتت.
- تكون تأثيرات المسام الكبيره والتدفق المكسبي أكثر أهمية في التربة الكلسية الدقيقة منها في الرمال أو الحصى، حيث التدفق التشتتي هو السائد فيها.
- الأكثر أهمية بالنسبة للتدفق الرأسي في المنطقة غير المشبعة هو ذوبان الثلوج، مما يعكس الانتقال المشتت للمياه في العمق وعمليات الرش من الأمطار التي توثق الطابع المكسبي لحركة المياه.

### ٣-٢-٢ النظائر البيئية

النظائر البيئية هي النظائر الطبيعية والبشرية المنشأ للعناصر الموجودة بوفرة في الدورة الهيدرولوجية. على سبيل المثال H، C، و N، O، و S (الشكل ٣-١٢). تُستخدم نظائر هذه العناصر كمتبوعات لدورة المياه والكربون والمغذيات والمواد المذابة في النظم الهيدرولوجية والجيولوجية والبيولوجية، في كل من الدراسات المحلية والإقليمية. يمكن تتبع تدفق المياه الجوفية وانتقال المذاب في المياه الجوفية من منطقة التغذية من خلال المناطق غير المشبعة والمشبعة إلى التصريف. ويجب الإشارة إلى أن التركيب النظائري للمياه الجوفية يختلف في مكان أخذ عينات طبقة المياه الجوفية حسب هطول الأمطار والمياه السطحية وتدفق المياه الجوفية. ويمكن وصف انتقال المذاب من خلال طريقتين كميتين: طريقة التوازن وطريقة الإزاحة القصوى.

تساعد البيانات النظائرية للمياه من الينابيع إلى جانب المعلومات المتاحة عن الهيدروجيولوجيا المائية الفيزيائية وكيمياء المياه في فهم مصدر التغذية وآليتها، ودوران المياه الجوفية وتجديدها، والتوزيع الزمني لانتقال المياه الجوفية، والعلاقات الهيدروليكية المتبادلة، ومنشأ المياه الجوفية وتطورها بسبب تأثيرات التفاعل بين المياه والصخور، ودرجة الحرارة في عمق طبقة المياه الجوفية ومنطقة التغذية وكذلك مصدر ومصدر ملوثات المياه الجوفية. وعلاوة على ذلك، يمكن أن يساهم التركيب النظائري للغازات بمعلومات إضافية قيّمة عن مصدر المياه الجوفية.

فالعلاقات الجوفية، على سبيل المثال، تعدّل التركيب النظائري المستقر للمياه؛ وبالتالي، فإن مياه التغذية في بيئة معينة لها بصمة نظائرية مميزة. وتستخدم هذه البصمة كمدخل طبيعي في الدراسات الهيدروجيولوجية والهيدروولوجية. من ناحية أخرى، يوفر تحليل النظائر المشعة معلومات عن زمن الدوران، وبالتالي عن تجديد المياه الجوفية.

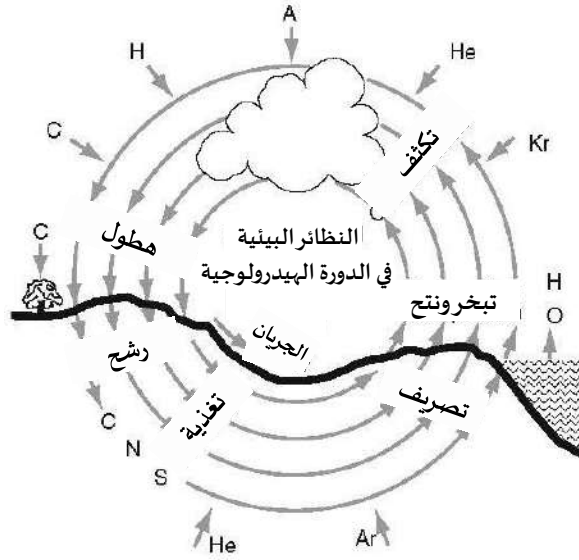
وخصائص النظائر البيئية المستقرة والمشعة موصوفة في العديد من المنشورات المهنية (على سبيل المثال، [Pearson et al., 1991](#); [Clark and Fritz, 1997](#); [Kendall and McDonnell, 1998](#); [Mook, 2000](#))، في حين يمكن العثور على معلومات إضافية قيّمة على الموقع الإلكتروني للوكالة الدولية للطاقة الذرية مثل منشورات الوكالة الدولية للطاقة الذرية وتقاريرها التقنية، ومعلومات عن النظائر المشعة والمواد المرجعية، وقواعد بيانات الوكالة الخاصة بالنظائر. ولذلك، يرد ملخص أساسي فقط من المراجع المذكورة في هذا القسم.

ويقاس التركيب النظائري المستقر للمواد من حيث القيمة النسبية d:

$$\sigma = \frac{R_x}{R_{st}} \times 100 \quad (3.2)$$

حيث  $R_x$  هي نسبة النظير (على سبيل المثال،  $H^2/H^1$ ,  $O^{18}/O^{16}$ ,  $C^{13}/C^{12}$ ) في المادة  $x$ ،  $R_{st}$  هي نسبة النظائر في المادة القياسية الدولية المقابلة، ويتم التعبير عن  $\sigma$  بالأجزاء في الألف. وتعني قيمة  $\sigma$  الموجبة أن العينة تحتوي على نظائر ثقيلة أكثر من المعيار. وتعني قيمة  $\sigma$  السالبة أن العينة تحتوي على نسبة نظائر ثقيلة أقل من المعيار. تعني قيمة  $\sigma^{15}N$  المساوية لـ ٣٠‰ أن هناك ٣٠ جزءاً في الألف أو ٣ في المائة من  $^{15}N$  في العينة أكثر من المعيار.

تُستخدم معايير النظائر المختلفة لقياس التركيبات النظائرية. عادةً ما يتم قياس نسب الأكسجين المستقر والهيدروجين بالنسبة إلى معيار (المتوسط القياسي لمياه المحيطات) أو معيار (فيينا-سمو) المكافئ تقريبًا. يتم قياس نسب نظائر الكربون المستقرة بالنسبة إلى معيار PDB (أو معيار V-PDB (فيينا PDB) المكافئ. عادةً ما يتم قياس نسب نظائر الأكسجين المستقرة للكربونات بالنسبة إلى معيار PDB أو V-PDB. ويتم قياس عن نظائر الكبريت والنيوتروجين بالنسبة إلى CDT (بالنسبة إلى Canon Diablo troilite) و (بالنسبة إلى الهواء الجوي)، وعلى التوالي. يتطابق كلا من V-PDB و V-SMOW مع معياري SMOW و PDB غير المتوفرين حاليًا؛ ولذلك، يُفضّل استخدام V-PDB و V-SMOW هو المفضل.



الشكل ٣-١٢ الدورة الهيدرولوجية والنظائر البيئية.

تنتج التجزئة من عمليتين رئيسيتين:

١. التفاعلات النظائرية. التبادل النظائري بين المواد الكيميائية المختلفة، أو المراحل المختلفة أو الجزيئات المختلفة، بينما تكون التغيرات الكيميائية ضئيلة.
٢. العمليات الحركية. تؤثر الاختلافات بين سرعات التفاعل لجزيئات النظائر المشعة بشكل أساسي.

ينطبق قانون فعل الكتلة على كل تفاعل نظيري. يوصف التفاعل النظائري بواسطة ثابت التوازن  $K$  أو عامل التجزئة  $a$  الذي يرتبط بالتعبير

$$\alpha = k^{\frac{1}{n}} \quad (3.4)$$

حيث  $n$  هو عدد الذرات المتبادلة.

عادةً ما يتم تبسيط هذا التعبير. ويعتبر أنه يتم تبادل ذرة واحدة فقط في التفاعل. وبالتالي، فإن عامل التجزئة  $\alpha$  يساوي

$$K(\alpha = k)$$

العلاقة بين عامل التجزئة  $\alpha$  وقيم  $\delta$  لمادتين،  $A$  و  $B$ ، معبراً عنهما بالنسبة إلى نفس المعيار بالمعادلة التالية:

$$\alpha_{(A-B)} = \frac{(1000 + \delta_A)}{(1000 + \delta_B)} \quad (3.5)$$

ويمكن أن تكون النظائر المشعة في البيئة إما من أصل طبيعي أو بشري المنشأ. ويمكن أن تكون مدخلات الدوال المصدرية، التي تصف التدفقات العالمية المتغيرة زمنياً للنظائر المستنبطة من الغلاف الجوي والنظائر المشعة والإنتاج البشري المنشأ في الغلاف الجوي، مثل  $H^3, C^{14}, Cl^{36}$ ، معروفة جيداً. وقد تم قياس هذه النظائر شهرياً أو سنوياً في الهطول منذ عام ١٩٥٠ وتشكل منحنيات على شكل ذروة. وظائف مدخلات النظائر المشعة الناتجة عن منشآت الطاقة النووية أو إعادة معالجة الوقود إما ازدادت باطراد (على سبيل المثال،  $Kr^{85}$ ) أو ضلت مرتفعة (مثل  $I^{129}$ ).

تتم مقارنة التركيزات المقاسة للنظائر المشعة في النبع مع دوال المدخلات للحصول على تحديدات عمرية مفيدة إلى حد ما على مدى العقود العديدة الماضية. إذا تم قياس أكثر من نظير واحد بشري المنشأ فإن تحديدات عمر المياه الجوفية قد تكون أكثر دقة بكثير، بسبب عدم اليقين فيما يتعلق تركيز المدخلات  $C_0$ ، والذي قد يكون غير معروف بشكل جيد أو يختلف مع مرور الوقت.

ينبغي أن تؤخذ ثلاثة أنظمة لدرجات الحرارة في الاعتبار في التحريات النظائرية للينابيع: درجات الحرارة المنخفضة (>٩٠ درجة مئوية)، ودرجة الحرارة المتوسطة (>٩٠ >٩٠ >٩٠ درجة مئوية)، وأنظمة درجات الحرارة العالية (>١٥٠ درجة مئوية). وينبغي التأكيد على أن التركيب النظائري للمياه الجوفية لا يتأثر بشكل أساسي في الأنظمة ذات درجات الحرارة المنخفضة بسبب التفاعلات والعمليات البطيئة للغاية. ولذلك، فإن التقنيات النظائرية لديها أوسع نطاق للتطبيق في الدراسات الهيدروجيولوجية والهيدروجيولوجية لهذه الأنظمة. ويوفر رصد التباين الطبيعي لمحتويات النظائرية في الهطول المطري والمياه الجوفية (الينابيع) والمياه السطحية (إذا كانت تغذي طبقة المياه الجوفية) معلومات أساسية عن منشأ المياه الجوفية ونشأتها والعمليات الهيدروكيميائية وعمليات الخلط (تسرب طبقات المياه الجوفية، واختلاط المياه الجوفية بالمياه السطحية) على أزمنة بقاء المياه الجوفية ومع ذلك على الخصائص الهيدروديناميكية لمنطقة الدراسة. بالنسبة لنظامي درجة الحرارة الآخرين، فإن المعرفة عن اعتماد المقدار ودرجة حرارة على عوامل التجزئة النظائرية بين المعادن والسوائل (الغازات والماء) ضرورية لتفسير التغيرات في التركيب النظائري المستقر للنبع.

وتعتبر النظائر البيئية في الأنظمة ذات درجات الحرارة المنخفضة أدوات بحثية شائعة في الينابيع: هيدروجيولوجيا النظائر (متتبعات الماء نفسه) والكيمياء الجيولوجية الحيوية للنظائر الذائبة (متتبعات المواد المذابة في الماء). ومع ذلك، يجب أن نعرف لماذا ومتى يتم التعامل مع النظائر البيئية كمتتبعات ملائمة. وفيما يلي الأمثلة الأكثر شيوعاً فيما يلي:

■ المياه التي يتم إعادة تغذيتها في أوقات مختلفة أو في مواقع مختلفة لها تركيب نظائري مختلف، وهو ما ينعكس أيضاً في التركيب النظائري للنبع.

■ المياه الجوفية التي اتبعت مسارات تدفق مختلفة تحتفظ ببصمات مميزة، وهو ما ينعكس أيضاً في التركيب النظائري للنبع.

- وجود مصدر مميز نظائرياً على طول مسارات تدفق المياه الجوفية له تأثير كبير على التركيب النظائري للنبيع، مما يشير إلى وجود اتصال هيدروديناميكي.
  - المياه الجوفية التي تحتفظ ببصماتها المميزة حتى تختلط بمياه ذات تركيبات مختلفة أو تتفاعل مع المعادن أو السوائل الأخرى.
  - المواد المذابة في المياه الجوفية التي تنشأ من الغلاف الجوي عادةً ما تختلف من الناحية النظائرية عن تلك التي تنشأ من المصادر الجيولوجية والبيولوجية داخل طبقة المياه الجوفية.
  - تغير نسب نظائر المذاب خلال مسارات تدفق المياه الجوفية بسبب التدوير البيولوجي للمواد المذابة والتفاعلات بين المياه والصخور؛ ومع ذلك، عادةً ما يمكن التنبؤ بهذه التغيرات ويمكن إعادة بنائها من التركيب النظائري للنبيع.
- ويترتب على ذلك استخدام خاصيتين متعاكستين للنظائر في الدراسات النظائرية للينابيع. وبصفة عامة، فإنهما تشيران إلى التغيرات في التركيب النظائري للمياه الجوفية بسبب العمليات الفيزيائية والكيميائية، مثل عمليات الخلط والتفاعل بين الماء والصخور، وثبات التركيب النظائري أثناء مسارات تدفق المياه الجوفية من منطقة المستجمع إلى تصريف الينابيع. وتشمل الدراسات النظائرية للينابيع في أغلب الأحيان الموضوعات التالية:

- تحديد العلاقة بين التغذية والتصريف في طبقة المياه الجوفية.
- تقييم الأصول المحتملة للمياه التي تساهم في تصريف الينابيع.
- تحديد مسارات التدفق من منطقة التغذية إلى منطقة تصريف النبع.
- زمن بقاء المياه الجوفية وخصائص التخزين المتصلة للمياه الجوفية.
- اختلاط مياه الحدث (مثل ذوبان الثلوج والعواصف) والمياه الجوفية قبل الحدث في تصريف النبع.
- تحديد مصادر الغلاف الجوي التي تساهم في التركيب النظائري للمذاب للمياه الجوفية.
- تحديد تفاعلات التجوية على طول مسارات التدفق التي تؤثر على التركيب النظائري للنبيع.
- تقييم تأثيرات التدوير البيولوجي على التركيب النظائري للمياه الجوفية (على سبيل المثال، المغذيات داخل النظام البيئي).
- تحديد التطور الجيوكيميائي للمياه الجوفية.
- تحديد مصادر وآليات تلوث المياه الجوفية.
- عمليات التحلل الحيوي وظواهر النقل.
- اختبار النماذج الهيدرولوجية باستخدام بيانات النظائر.

يحكم موضوع البحث اختيار النظائر المدروسة. يجب أن يؤخذ في الاعتبار أن النظائر المستقرة (مثل  $H^2$  و  $O^{18}$ ) والنظائر التفاعلية (مثل  $^{87}Sr$  و  $^{13}C$ ) توفر معلومات مختلفة، والتي ستتم مناقشتها في الأقسام الفرعية التالية. وترد مزايا وعيوب تطبيق النظائر البيئية في الجدول ٣-٣، ولكن يجب أن ندرك أيضاً أنه عند التعامل مع الأنظمة الهيدروجيولوجية المعقدة، فمن المطلوب لعمل

بنهج النظائر المتعددة، وينبغي الجمع بين النظائر المستقرة والمشعة المختارة مع المعاملات الجيولوجية والهيدروجيولوجية والكيميائية. والمعلومات المختلفة التي يتم الحصول عليها من كل معامل تكمل بعضها البعض وتوفر نظرة ثاقبة لتدفق المياه الجوفية وظواهر نقل المذاب. ولكل ذلك، فإن أهمية طريقة أخذ العينات على قدم المساواة مع النهج متعدد القياسات. النظائر المستقرة

النظائر المستقرة للأكسجين والهيدروجين هي نظائر مستقرة لعناصر جزيء الماء الأكسجين ( $O^{18}$ ) والهيدروجين ( $H^2$ ) وتعتبر الأكثر استخداماً في الدراسات الهيدروجيولوجية للينابيع. ومن ثم، فهي ذات قدر أكبر من الاهتمام في هذا الكتاب. على الرغم من أن دورة المياه العالمية معقدة للغاية، إلا أنه يمكن التنبؤ بتركيب  $O^{18}$  و  $H^2$  (الشكل ٣-١٣). وتعتمد تطبيقات نسب النظائر المستقرة للهيدروجين والأكسجين في المياه الجوفية بشكل أساسي على التغيرات النظائرية في الهطول المطري. بعد رشح الهطول المطري إلى طبقة المياه الجوفية، فإن العمليات الفيزيائية فقط، مثل الانتشار والتشتت والخلط والتبخر، هي التي تغير التركيب النظائري للمياه الجوفية. ومن ثم، فهي أدوات تتبع مستقرة مثالية في ظل ظروف درجات الحرارة المنخفضة (Clark and Fritz, 1997). المياه المأخوذة من العينات  $O^{18}$  و  $H^2$ ، جنباً إلى جنب مع البيانات الهيدرومترية توفر معلومات عن حركة الكتل المائية واختلاطها فقط إذا كان التركيب النظائري لكل كتلة مائية يختلف بشكل كبير. كقاعدة عامة، متوسط تركيب  $O^{18}$  و  $H^2$ ، في المياه الجوفية يساوي متوسطاً تركيبهما في الهطول المطري، في حين أن المياه السطحية تكون أكثر ثراءً بالنظائر الأثقل (الأكثر إيجابية) أكثر من الهطول المطري، بسبب عملية التبخر.

كان (Craig (1961 أول من وصف العلاقة بين النظائر التي تمت مناقشتها في الهطول المطري بواسطة الخط المائي الجوفي العالمي (GMWL) (Clark and Fritz, 1997; Rozanski, Araguads-Araguds, and Gonfiantini, 1993, 1992):

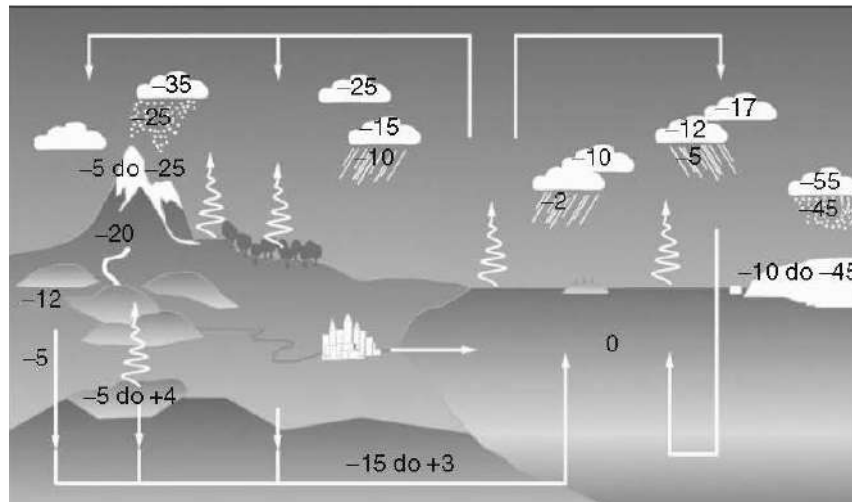
$$\sigma^2 = 8 \times \sigma O^{18} + 10 \quad (3.6)$$

وهذا موضح في الشكل ٣-١٤. حيث يعتمد الخط المائي الجوفي العالمي على عمليتين أساسيتين محلياً: ظروف التكثيف قبل هطول الأمطار وظروف التبخر البيئي أثناء هطول الأمطار. في منطقة معينة، يختلف الخط المائي الجوفي المحلي (LMWL) عن الخط المائي الجوفي العالمي في كل من الميل والتقاطع. ويرد وصف العوامل الرئيسية التي تؤثر على انحراف خط الماء المائي الجوفي المحلي في الشكل ٣-١٤.

لا يختلف الميل كثيراً ٨٠.٥، ومع ذلك، فإن التقاطع، والذي يسمى أيضاً فائض الديوتيريوم، قد يختلف اختلافاً كبيراً من مكان إلى آخر، وذلك بسبب اختلاف منشأ وظروف تشكيل البخار، ١٠.٥% ولذلك، فإن الخط المائي الجوفي المحلي هو دالة لدرجة الحرارة أثناء التبخر الثانوي عند سقوط الأمطار من السحب، مما يؤدي إلى تأثيرات التجزئة النظرية فيما يتعلق بخط العرض والارتفاع

والمناخ. يمكن حساب معادلات GMWL/LMWL من مجموعات بيانات كبيرة من محطات هطول الأمطار في جميع أنحاء العالم المدرجة في برنامج الشبكة العالمية للمعلومات المناخية العالمية والمتاحة على الصفحات الإلكترونية للوكالة الدولية للطاقة الذرية. وفي موقع معين، يتأثر التركيب النظائري لهطول الأمطار بالموسم وخط العرض والارتفاع، وكمية الهطول والمسافة من الساحل. ويكون الهطول المطري الذي يحدث في المناطق القطبية أكثر استنفاداً في التركيب النظائري منه في المناطق المدارية. ويرجع تأثير خط العرض هذا إلى هطول الأمطار المتتالية من السحب أثناء انتقال الرطوبة من المناطق المدارية إلى القطبين. لوحظ تأثير خط العرض بنسبة ٠,٦% ل  $\sigma O^{18}$  لكل درجة بشكل عام.

ويرتبط التأثير القاري بالاستنضاب المستمر لتركيب النظائر المشعة لهطول الأمطار أثناء تحرك الكتلة الهوائية إلى الداخل من الساحل. كما يتغير التركيب النظائري لهطول الأمطار من منطقة إلى أخرى وكذلك من موسم إلى آخر. وينضّب التركيب النظائري للأمطار الغزيرة مقارنةً بالأمطار الخفيفة. وينبغي دراسة مقدار هذا التأثير محلياً. ويمكن أن ينتج عن تبخر قطرات المطر المتساقطة، والتبادل مع بخار الماء في الغلاف الجوي أثناء هطول الأمطار الخفيفة، أو إزالة كميات مختلفة من الماء من الغلاف الجوي. تأثير الارتفاع يمثل تأثير الارتفاع على تركيب النظائر المشعة للهطول المطري. بالإضافة إلى درجة حرارة الهواء، تقل قيمة  $\sigma O^{18}$  و  $H^2$  مع زيادة الارتفاع. وعموماً يتراوح التأثير من ٠,١٥ إلى ٠,٥% بالنسبة ل  $\sigma O^{18}$  ومن ١ إلى ٤% ل  $\sigma H^2$  لكل ١٠٠ متر من الارتفاع.



الشكل ٣-١٣ الدورة الهيدرولوجية والنظائر البيئية.

الجدول ٣-٣ مزايا وعيوب تطبيق النظائر البيئية.

<p>توفر النظائر البيئية بشكل غير مباشر معلومات عن أوقات بقاء المياه الجوفية وعمليات الخلط في مستجمعات مياه الينابيع، وبالتالي على ديناميكية تدفق المياه الجوفية في طبقة المياه الجوفية وخصائص التغذية وكذلك عن التطور الجيوكيميائي للمياه الجوفية. ولا يمكن الحصول على هذه البيانات عن طريق القياس المباشر.</p> <p>تعكس البيانات النظائرية طويلة الأجل التغيرات في العلاقة بين التغذية والتصريف في الينابيع وتكمل البيانات الهيدروغرافية للنبع.</p> <p>تكمّل نتائج الدراسات النظائرية بشكل كبير نتائج الطرق الجيولوجية الكلاسيكية والطرق الهيدروجيولوجية والطرق الأخرى غير المباشرة، مثل المتبعات الاصطناعية والتحريات الجيوفيزيائية والنمذجة العددية.</p>	مزايا
<p>التحليلات في الموقع غير ممكنة. إلى جانب ذلك، يتطلب الرصد النظائري في كثير من الأحيان أخذ عينات طويلة الأجل أو متكررة للحصول على نظرة ثاقبة كافية للخصائص الهيدروديناميكية والجيوكيميائية للينابيع.</p> <p>تقدّم أجهزة أخذ العينات الآلية مساعدة قيّمة لهذا العمل.</p> <p>تعتبر الدراسات النظائرية مكلفة للغاية، بسبب تكلفة أخذ العينات وخاصة التكاليف المختبرية.</p> <p>ينبغي تصميم منهجية البحث بعناية للحصول على نتائج مهمة، وخاصة في اختيار أماكن أخذ العينات والمعايير الرئيسية وكذلك تقنيات وأساليب أخذ العينات. تراعي معالجة ونمذجة البيانات النظائرية الكثير من الافتراضات، والتي أحياناً صعب تنفيذها وينبغي أن يأخذ تفسير البيانات في الاعتبار أوجه عدم اليقين.</p>	عيوب

يعكس التأثير الموسمي اعتماد تركيب النظائر المشعة لهطول الأمطار على درجات حرارة الهواء المحلي، وهو ما تكشفه أدنى قيمة ل  $\sigma O^{18}$  و  $\sigma H^2$  في الشهور الباردة وأعلى قيم ل  $\sigma O^{18}$  و  $\sigma H^2$  في الشهور الأكثر دفئاً، على التوالي. تتمتع نظائر عناصر جزيئات الماء بأوسع مجال للتطبيق في الدراسات الهيدروجيولوجية للينابيع، مثل تتبع منشأ المياه، وطريقة تغذية المياه الجوفية، وتحديد مكونات المياه الجوفية، واستجابة تصريف الينابيع لهطول الأمطار. ومن حيث المبدأ، تعتمد الدراسات الإقليمية والمحلية على دراسات الخط المائي الجوي المحلي ومقارنة بيانات  $\sigma O^{18}$  و  $\sigma H^2$  للمياه السطحية والجوفية.

تم استخدام تأثيرات الارتفاع والتباين الموسمي في العديد من التحريات الهيدروجيولوجية لتحديد مناطق تغذية الينابيع وخصائص التغذية والتصريف. كما تم استخدام التغيرات الموسمية لتحديد الفترات ذات التغذية الربيعية السائدة.

في إطار التحريات الهيدروجيولوجية الكارستية في جنوب غرب سلوفينيا، تم إجراء دراسات متساوية واسعة النطاق في منطقة البحث. أُجريت دراسات موضوعية واسعة النطاق في منطقة احتلت حوالي ٧٠٠ كم<sup>٢</sup> (Stichler et al., 1997). خلال فترة ثلاث سنوات من اختبار الـ  $O^{18}$  و  $H^2$  لهطول الأمطار، وتم رصد ستة ينابيع كارستية رئيسية واثنين من حفر الامتصاص. ثم أخذت عينات هطول الأمطار من خمس محطات موزعة على منطقة البحث على ارتفاعات تتراوح بين ٥٠ إلى ١٠٧٠ م. يوضح الشكل ٣-١٥ العلاقة بين المتوسط السنوي المرجح لقيم هطول الأمطار  $O^{18}$  وارتفاعات محطات أخذ العينات المقابلة. تم حساب المتوسطات السنوية المرجحة لهطول الأمطار  $O^{18}$  بالمعادلة:

$$O^{18} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \sigma_i O^{18}}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (3.7)$$

$O^{18} \sigma$  = المتوسط المرجح لتركيب نظائر الأكسجين في الهطول المطري.

$P_i$  = كمية الهطول المطري التي سقطت بين العينتين (i - 1) و (i).

$O^{18} \sigma_i$  = تركيب نظائر الأكسجين لعينة الهطول (i).

بشكل عام، تم أخذ عينات من الينابيع والمجاري المائية في ظروف التدفق الأساسي، وبالتالي فإن متوسطها السنوي  $O^{18}$  تمت مقارنته بالشكل ٣-١٥ ومتوسط ارتفاعات منطقة مستجمعات المياه في الينابيع التي تم أخذ عينات منها موضح في الجدول ٣-٤.

التباين الموسمي في هطول الأمطار  $O^{18}$  و  $H^2$  يمثل علامة مهمة للمدخلات التي يمكن استخدامها في تأريخ المياه الجوفية. وهذا يعني أن هطول الأمطار يتسرب إلى التربة ويعيد تغذية طبقة المياه الجوفية، حيث يختلط مع المياه الجوفية المخزنة مسبقاً. تشير هذه النتائج إلى الانخفاض في سعة التباين النظائري. ونظراً لاختلاف مراحل الخلط والتجانس المختلفة، فأن للمياه الجوفية تركيب نظائري مختلف لكلا من  $O^{18}$  و  $H^2$  في جميع أنحاء طبقة المياه الجوفية، ومع ذلك، هناك سعة مختلفة من التباين الموسمي النظائري. يمكن تطبيق هذه الاختلافات لتحديد زمن بقاء المياه الجوفية، مع ملاحظة أنه كلما طال زمن المكوث، كلما انخفضت سعة التباين الموسمي النظائري للمياه الجوفية.

كما تم استخدام البيانات المتعلقة بالتحريات النظائرية في جنوب غرب سلوفينيا لتحديد متوسط أزمنا بقاء المياه الجوفية في الينابيع الكارستية. وقد استند ذلك على الاختلافات بين الارتفاعات لمقدارين، مقدار الـ  $O^{18}$  في الهطول المطري وفي المياه الجوفية (Stichler et al., 1997).

تم حساب متوسط أزمنا بقاء المياه الجوفية بواسطة معادلة نموذج التشتت (Maloszewski and)

(Zuber, 1982, 1996):

$$T = \frac{1}{2} \pi \frac{(-\ln f)^{\frac{1}{2}}}{p_D} \quad (3.8)$$

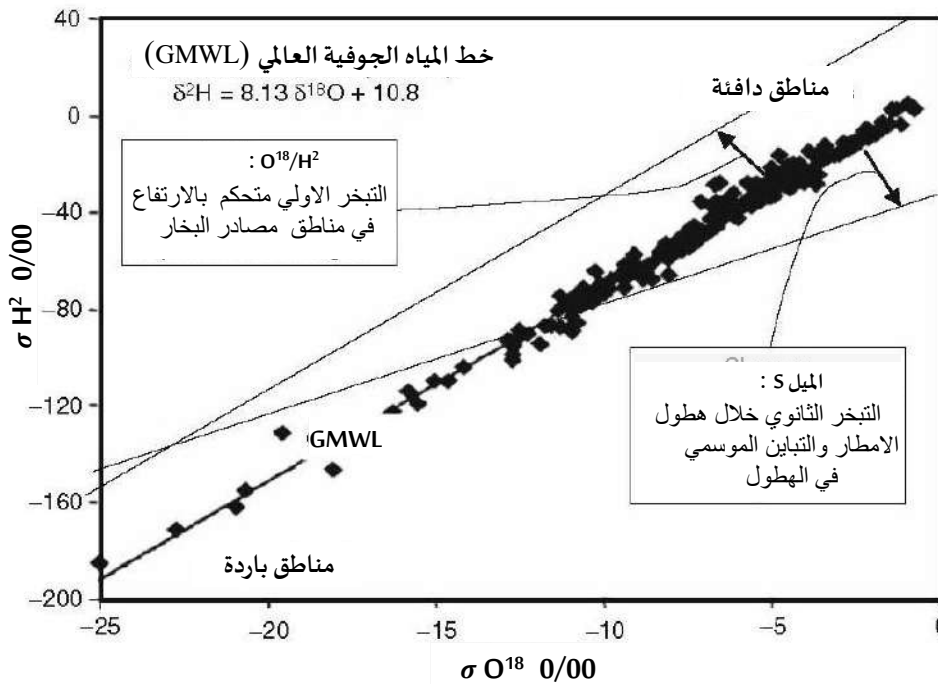
T = متوسط زمن المكوث.

f = نسبة السعة:  $f = B0/A0$ .

A0 = سعة تباين الهطول المطري ل O18.

B0 = سعة تباين المياه الجوفية ل O18.

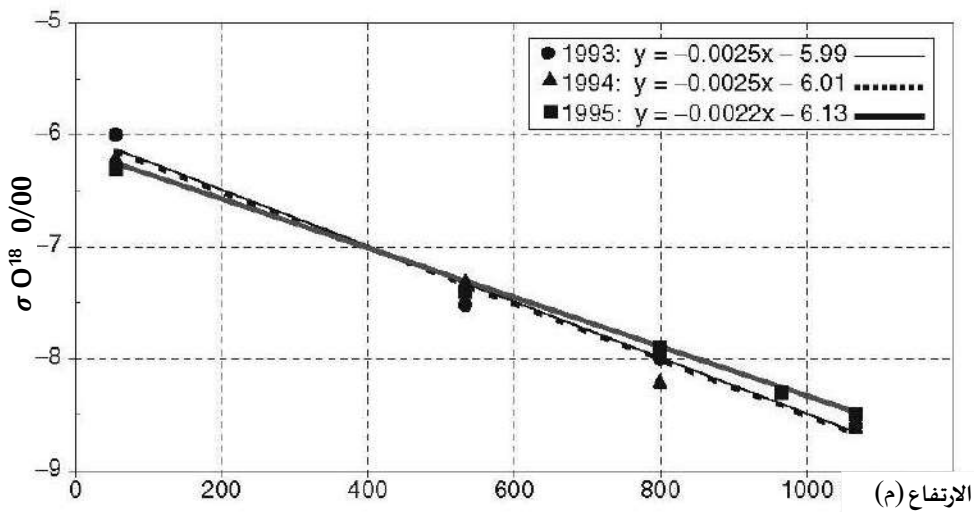
PD = معامل التشتت.



الشكل ٣-١٤ العلاقة العالمية بين  $O^{18}$  في نظائر  $H^2$  في الهطول المطري (البيانات هي متوسط القيم السنوية المرجحة لهطول الأمطار من محطة GNIP) والعوامل الرئيسية التي تؤثر على فائض D ومعامل التقاطع. (Rozanski et al., 1993, and Clark and Fritz, 1997).

جدول ٣-٣ متوسط الارتفاع المقدر لمنطقة مستجمعات المياه في ستة ينابيع كارستية وحفرتين ابتلاع في جنوب غرب سلوفينيا (Stichler et al., 1997)

الارتفاع (م) فوق سطح البحر	$\sigma O^{18}$ (‰)	اسم النبع
٨٠٠ ± ٦٢٠	٠,٢٠ ± ٧,٢٥-	كاجزا
١٠٠ ± ٩٠٠	٠,٢٤ ± ٨,١٨-	هوتسك
١٢٠ ± ٩٢٠	٠,٢٩ ± ٨,٢٤-	مرزليك
١٠٠ ± ١٠٠٠	٠,٢٣ ± ٨,٤٣-	هوبيلج
١٤٠ ± ١٠١٠	٠,٣٣ ± ٨,٤٦-	فيافا
١٠٠ ± ١٠٦٠	٠,٢٤ ± ٨,٥٧-	بودروتيجا
اسم الحفرة الامتصاصية		
٧٠٠ ± ٧٢٠	٠,١٧ ± ٧,٧٦-	بانيسيتش
٦٠٠ ± ٩٤٠	٠,١٤ ± ٨,٢٨-	سييوفانسكي بوتوك



الشكل ٣-١٥ الارتباط بين محتويات  $\sigma O$  في هطول الأمطار من محطات الأرصاد الجوية في جنوب غرب سلوفينيا والارتفاعات. (Stichler et al., 1997).

كانت هذه المعلومات ضرورية لتقديرات عمر المياه الجوفية المأخوذة من العينات في منطقة مستجمعات المياه في نبع هوبلي الكارستي. تمت مقارنة الاتجاهات المتعددة الحدود والاتجاهات الخطية لـ  $\sigma O^{18}$  لهطول الأمطار مع قيم واتجاهات المياه الجوفية (الشكل ٣-١٧). نظرًا للتغير الموسمي النموذجي لـ  $\sigma O^{18}$  واتجاهاته الخطية الإيجابية يجب أن تكون أمانة بقاء المياه الجوفية SVR-7 و SVR-4 و Hubelj و SVR-3A أقل من خمس سنوات. من ناحية أخرى، يجب أن يكون متوسط مدة بقاء المياه المتبقية أطول، وذلك بسبب التباين الموسمي المهمل لـ  $\sigma O^{18}$  واتجاهه الخطي السلبي. وقُدِّر متوسط زمن بقاء التدفق الأساسي لنبع Hubelj بسنتين إلى ثلاث سنوات. في مجالات بحثية أخرى، تم تطبيق نموذج المتوسط الساكن لوصف التغيرات الزمنية لـ  $\sigma O^{18}$  في الينابيع المنتشرة (Frederickson and Criss, 1999). وتم حساب زمن بقاء الينابيع،  $t$ ، من المعادلة التالية:

$$\sigma O^{18} = \frac{\sum P_i \delta_i e^{-t_i/t}}{\sum p_i e^{-t_i/t}} \quad (3.9)$$

حيث  $P_i$  و  $\delta_i$  هما الكمية والتركيب النظائري لكل زيادة في الهطول المطري و  $t_i$  هي الفترة الزمنية منذ إضافة تلك الزيادة المحددة. يعتبر  $O^{18}$  و  $H^2$  من الأدوات الشائعة الاستخدام لتحديد مصادر المياه في مستجمعات الينابيع. وتُستخدم تقنيات الفصل لتحديد مساهمات مياه الأمطار ومياه طبقات المياه الجوفية المختلفة في التدفق العاصف للينابيع. تفارق الهيدروغراف هوطريقة لتحليل بيانات هيدروغراف التدفق وفصل الجريان السطحي عن مكون التدفق الجريان الأساسي للجداول. يظهر الرسم البياني الهيدروغراف العام للنبع في الشكل ٣-١٨. تمثل القمم الحادة في هيدروغراف التدفق السطحي أحداث الجريان السطحي، بينما يمثل تدفق الأساس الجزء الأملس من هيدروغراف التدفق السطحي. على غرار تسميات (Chow, Maidment, and Mays, 1988)، يتكون الهيدروغراف من منحنين: هما منحنى التركيز ومنحنى الانحسار. الأول يمثل بشكل أساسي استجابة النبع لحدث هطول الأمطار، بينما يعكس المنحنى الثاني تصريف طبقات المياه الجوفية. يُطلق على الجزء الأخير من منحنى الانحسار اسم منحنى ظروف انخفاض المياه.

يتيح المتتبع الطبيعي المستقر مع البيانات الهيدرومترية إمكانية فصل هيدروغراف النبع إلى أجزاء نسبية لمكونات المياه في الحدث وما قبل الحدث (Martinec et al., 1974; Fritz et al., 1976; Sklash and Farvolden, 1979; Stichler et al., 1970; Dincer et al., 1970). يمثل مكون مياه الحدث مياه الأمطار التي هطلت داخل مستجمع المياه خلال الحدث المحدد (أي الأمطار وذوبان الثلوج)، بينما يمثل مكون المياه قبل الحدث المياه الجوفية التي تم تخزينها في طبقة المياه الجوفية قبل هذا الحدث (أي التدفق الأساسي). كما استُخدمت البصمات النظائرية لهطول الأمطار والمياه الجوفية عدة مرات لتحديد إعادة التغذية المستمدة من ذوبان الثلوج (Moser and Stichler, 1975) والأنهار الجليدية في العصر الجليدي (Siegel, 1991) ولتحديد مكونات التصريف الهامة الأخرى، مثل مساهمات المياه السطحية (Maloszewski et al, 1990).

يمكن قياس نسب الخلط اللحظي للعنصرين النهائيين كمياً عن طريق حل نظام مكون من المعادلات الخطية للتوازن الكتلي (Sklash and Farvolden, 1979):

$$Q_t = Q_p + Q_e \quad (3.10)$$

$$Q_t C_t = Q_p C_p + Q_e C_e \quad (3.11)$$

حيث

$Q$  = التصريف.

$C$  = التركيب النظائري أو الكيميائي للمتبع الطبيعي المحافظ.

$t$  = رمز للتدفق الكلي.

$p$  = رمز لمكون الماء قبل الحدث (مثل المياه الجوفية، التدفق الأساسي).

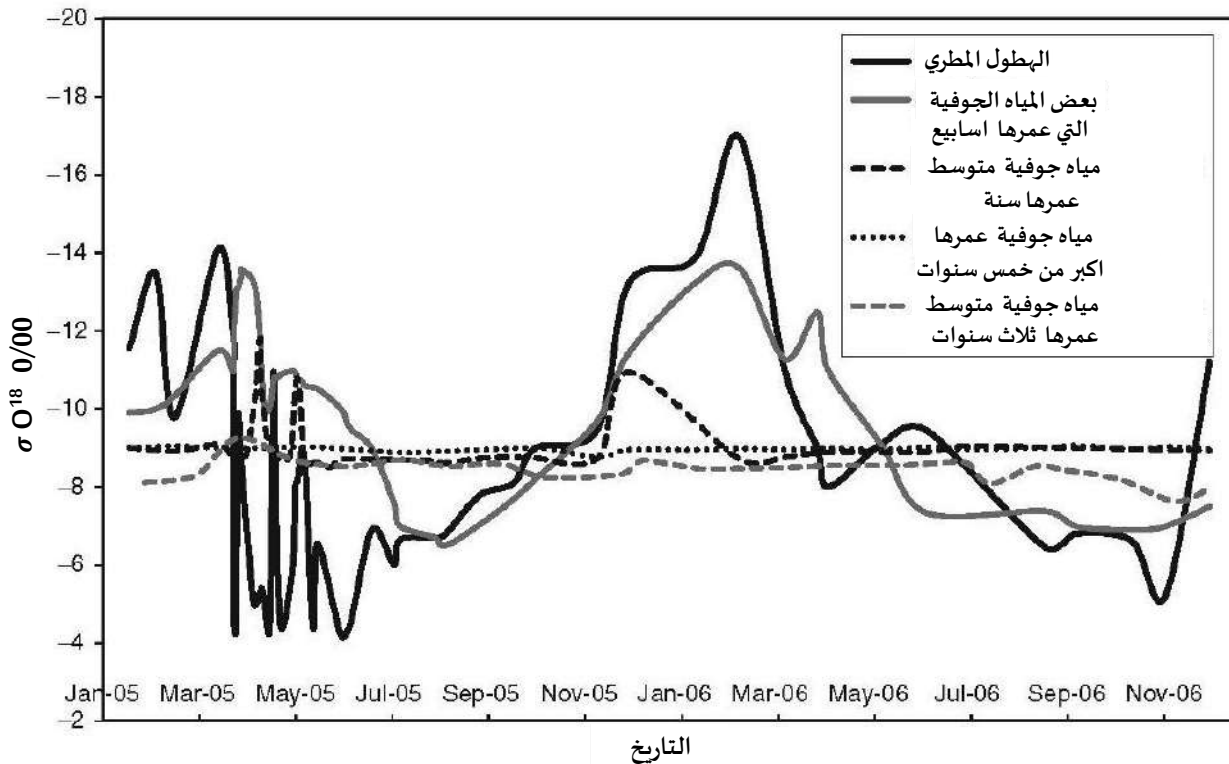
$e$  = رمز لمكون الماء قبل الحدث (مثل المطر).

يجب مراعاة الافتراضات التالية:

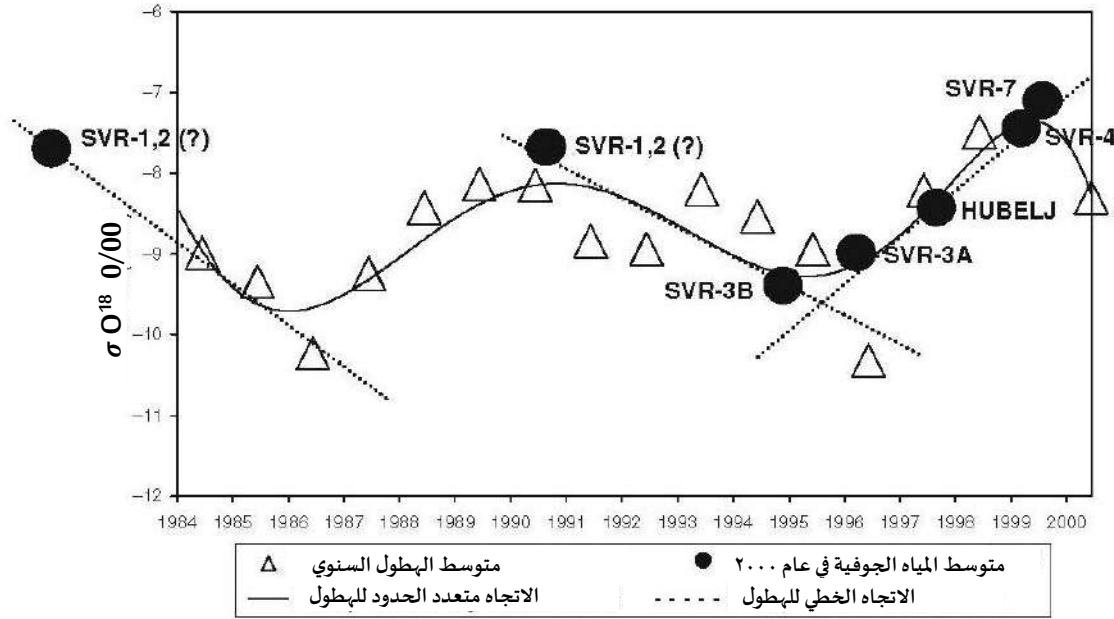
- يختلف التركيب النظائري أو الكيميائي للأعضاء النهائية اختلافاً كبيراً.
- لا تختلف المياه المخزونة في المناطق غير المشبعة والمشبعة في طبقة المياه الجوفية اختلافاً كبيراً في تركيبها النظائري وتركيبها الكيميائي وبالتالي تمثل مكون المياه قبل الحدث.
- التركيب النظائري والكيميائي لمياه ما قبل الحدث موحد في جميع أنحاء طبقة المياه الجوفية، بشكل عام بشكل عام نفس تركيبة التدفق الأساسي.
- يحافظ الهطول على التركيب النظائري والكيميائي الموحّد خلال الحدث.

إذا كانت المياه داخل نفس مسار التدفق مستمدة من عدة مصادر مختلفة، فإن تقنية الفصل البسيط المكونة من عنصرين لا تقدر بثمن، لأنها تشير فقط إلى مساهمات مياه الحدث، وهو هدف بعض الدراسات. أظهرت دراسات لاحقة أن تقنيات فصل الهيدروغراف المكونة من ثلاثة وأربعة مكونات أكثر ملاءمة لمستجمعات المياه المعقدة، بحيث يمكن أخذ مساهمات المياه السطحية أو مصادر المياه الجوفية المختلفة. ويمكن لأكثر من متبع واحد فصل هيدروغراف الينابيع إلى أكثر من مكونين، مع الأخذ في الاعتبار أن (ن) من المكونات تتطلب استخدام (ن - ١) متبوعات. والجمع بين النظائر الطبيعية المحافظة وغير المحافظة أو المواد الكيميائية إذا كانت المياه داخل نفس مسار التدفق مستمدة من عدة مصادر مختلفة، فإن تقنية الفصل البسيط المكونة من عنصرين لا تقدر بثمن، لأنها تشير فقط إلى مساهمات مياه الحدث، وهو هدف بعض الدراسات. أظهرت دراسات لاحقة أن تقنيات فصل الهيدروغراف المكونة من ثلاثة وأربعة مكونات أكثر ملاءمة لمستجمعات المياه المعقدة، بحيث يمكن أخذ مساهمات المياه السطحية أو مصادر المياه الجوفية المختلفة. ويمكن لأكثر من متبع واحد فصل هيدروغراف الينابيع إلى أكثر من مكونين، مع الأخذ في الاعتبار

أن (ن) من المكونات تتطلب استخدام (ن - ١) متتبعات. والجمع بين النظائر الطبيعية المحافضة وغير المحافضة أو المواد الكيميائية هو أمر ملائم لهذا الغرض (Ogunkoya and Jenkins, 1991, 1993; Bazemore, Eshleman, and Hollenbeck 1994, Kendall and McDonnell, 1998; Brown et al., 1999; Lee and Krothe, 2001; Trcek, 2003; Trcek et al, 2006). ويُعد الاختيار العقلاني والموضوعي لمكونات النبع التمثيلية مشكلة رئيسية في هذه التقنية، والتي ترتبط أيضاً ارتباطاً وثيقاً بتخطيط استراتيجية مناسبة لأخذ العينات. وقد أثبتت الدراسات المذكورة أنه ينبغي اختبار صلاحية الأعضاء النهائية المختارة لحل مشكلة عدم اليقين.



الشكل ٣-١٦ مقارنة بين تغيرات  $\delta^{18}\text{O}$  في المياه الجوفية مع اختلاف أزمنة المكوث وفي الهطول.



الشكل ٣-١٧ مقارنة اتجاهات المتوسط السنوي ل  $\sigma O18$  السنوي لهطول الأمطار في ليوبليانا مقارنة بالمتوسط السنوي ل  $\sigma O18$  لعينات المياه الجوفية. (ترشيح، ٢٠٠٣).

يمكن حساب المساهمات النسبية لثلاثة أعضاء طرفية في النبع لكل عينة عن طريق حل نظام مكون من ثلاث معادلات خطية مع ثلاثة مجاهيل (Ogunkoya and Jenkins, 1993):

$$Q_t = Q_e + Q_u + Q_b \quad (3.12)$$

$$Q_t C_t = Q_e C_e + Q_u C_u + Q_b C_b \quad (3.13)$$

$$Q_t D_t = Q_e D_e + Q_u D_u + Q_b D_b \quad (3.14)$$

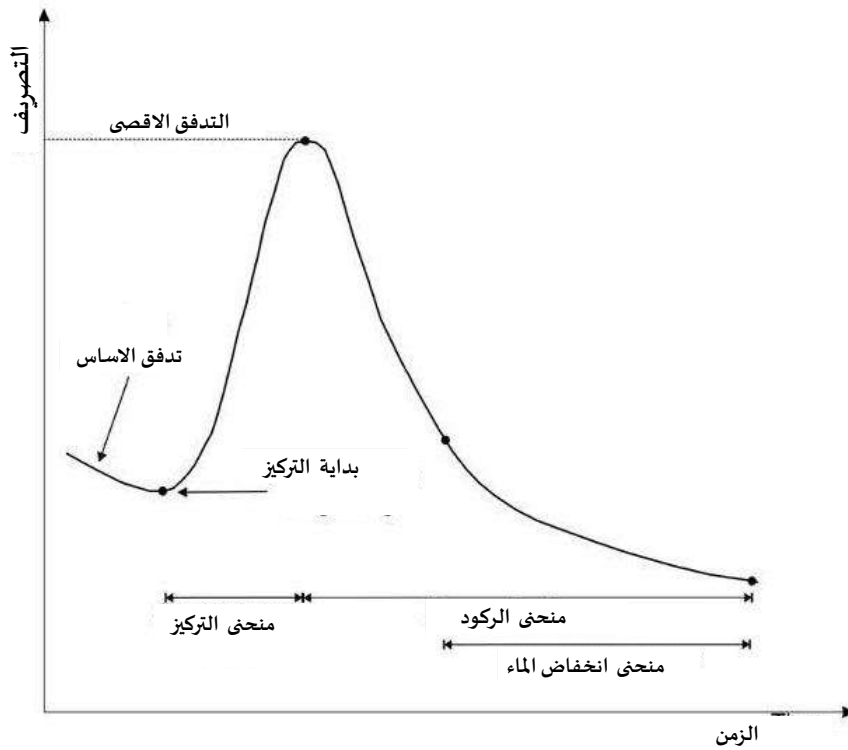
حيث Q هو التصريف، و C و D هما المتبعان، والحروف الفرعية هي على التوالي:

t = التدفق الكلي

e = المكون ١، مكون ماء الهطول المطري.

u = المكون ٢، مكون المياه الجوفية أو المياه السطحية.

b = المكون ٣، مكون المياه الجوفية (مثل تدفق الأساس)



الشكل ٣-١٨ توضيح المكونات العامة لهيدروجراف النبع.

يجب مراعاة الافتراضات التالية:

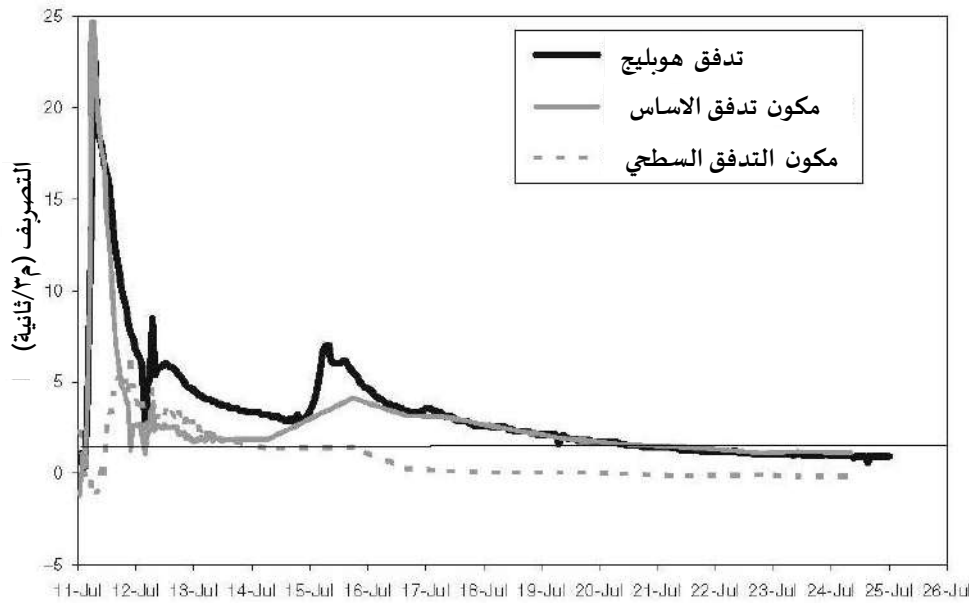
- ان التركيب النظائري والكيميائي لمكونات الينابيع المختارة تمثيلية.
- ان التركيب النظائري أو الكيميائي للأعضاء النهائية المختارة مختلف بشكل كبير.
- المياه التي تمثل مكون مياه التدفق القاعدي لا تختلف اختلافاً كبيراً في تركيبها النظائري أو الكيميائي.
- التدفق الأساسي له تركيب نظائري وكيميائي ثابت.
- يحافظ المكونان ١ و ٢ على التركيب النظائري والكيميائي الموحد طوال الفترة المدروسة.

ومع ذلك، يمكن ملاحظة بعض التباين الزمني للمكونين ١ و ٢، وهو ما يمكن حسابه بتطبيق طريقة المتوسطات المرجحة التزايدية، كما في المعادلة (٣-١١). يجب أن تأخذ في الاعتبار بيانات هطول الأمطار التي سقطت في مستجمع المياه حسب الوقت المحدد لكل نقطة هيدروجراف بشكل منفصل. الميزة الرئيسية للطريقة التي تمت مناقشتها هي أن تحليل جزء معين من الهيدروجراف لا يتأثر بالهطول المطري الذي سقط لاحقاً.

تمت دراسة التصريف العاصف في نبع هوبلي الذي سبق مناقشته باستخدام تقنية الفصل الهيدروغرافي ثلاثي المكونات لفحص دور مكوّن المياه في المنطقة العلوية غير المشبعة في توليد التدفق الصيفي العاصف. بيانات اثنين من المتتبعات وهي تركيب نظائر الأكسجين في الماء المأخوذة من العينة 018 O<sup>18</sup> وتركيز الكربون العضوي المذاب (DOC). وقد سمح تصميم أخذ العينات لفصل هيدروجراف الينبوع العاصف إلى ثلاثة أعضاء: التدفق الأساسي، والمنطقة العلوية غير المشبعة، ومكونات مياه الحدث (Trcek, 2003, 2008). ومع ذلك، أشارت النتائج إلى أنه، وفقاً لفرضية دمج مكوّنات المياه في الحدث والمنطقة العلوية غير المشبعة في مكوّن واحد، وهو ما يمثل التدفق السريع الذي يصل إلى منطقة الإبيكارست. يُطلق على هذا التدفق اسم التدفق السطحي epiflow (بعد Perrochet, and Rossier, 1995, Kiraly). يُعرّف التدفق السطحي بأنه التدفق السريع للمياه التي تم تخزينها مسبقاً في المنطقة فوق المنطقة الكارستية ومياه الحدث. وقد تركّز كلاهما في قاعدة المنطقة فوق الكارستية وتم تصريفهما لاحقاً في شبكة القنوات الكارستية، حيث يمكن أن تختلط مع مياه الحفر الامتصاصية. والشكل ١٩-٣ يمثل هيدروغراف انفصال نبع هوبيلج إلى مكونات التدفق السطحي والتدفق القاعدي. في بداية الهيدروغراف، كان هناك اختراق للتدفق فوق السطحي، والذي لم يحتوي على مياه الحدث (كان جزء هذا المكون سالباً). نتج عن هذا الاختراق انعكاس في التدرج الهيدروليكي: وأصبح ضغط شبكة القنوات الكارستية أعلى من ضغط الكتل الصخرية. ومن ثم، كانت عملية التغذية مرتبطة بشبكة القنوات الكارستية أثناء تركيز الهيدروغراف، وفقط المياه التي تم تخزينها مسبقاً في الأجزاء عالية النفاذية في المناطق المشبعة وغير المشبعة السفلية تم تصريفها في النبع. بعد الاختراق، وأصبح مكون التدفق الفوقي سالباً في جميع أنحاء تركيز الهيدروغراف، الذي يعكس تركيز المياه في المنطقة الإبيكارست. بدأ مكون التدفق فوق الصخري بالزيادة في فترة انحسار الهيدروغراف الأولي، عندما انخفض الضغط الهيدروليكي لشبكة القنوات الكارستية. وتم تسجيل القيمة القصوى، ٨٤ في المائة، في نهاية دورة العاصفة الأولى. وانخفضت مساهمة مكون التدفق الفوقي في الغالب في وقت لاحق (فقط دورة العاصفة الثانية قاطعت هذا الاتجاه بشكل طفيف) ووصلت إلى قيمة سالبة في ٢١ يوليو، عندما حدث انعكاس للتدرج الهيدروليكي مرة أخرى. وبالتالي، لم يكن هناك سوى عملية إعادة تغذية منتشرة في طبقة المياه الجوفية منذ ذلك الحين، ولم يتم سوى التدفق الأساسي بأعاد تغذية نبع هوبلي. تشير القيم السالبة إلى أنه كان يجب إعادة تغذية منطقة الإبيكارست داخلياً خلال هذه الفترة. العاصفة المرصودة، كان متوسط مساهمتهما ٤١ و ٥٩ في المائة على التوالي.

### نظائر الكربون

تركيب نظائر الكربون المستقرة للكربون غير العضوي المذاب (C<sup>13</sup>-DIC) ليس متتبع مستقر. ومع ذلك، فإن قيم دلتا C<sup>13</sup> δ يمكن أن تتبع مصادر الكربون وعمليات التفاعل للعديد من الأنواع العضوية وغير العضوية المتفاعلة. يعطي تكوين C<sup>13</sup> δ للنبع يعطي معلومات عن نوع التدفق وانتقال المذاب. ويوفر نظرة ثاقبة للتطور الجيوكيميائي للمياه وأنواع الصخور في محيط مسار التدفق، وظروف منطقة التغذية (Kendall McDonnell, 1998). ومن ثم، فإن نسبة النظائر C<sup>13</sup>/C<sup>12</sup> أداة مهمة لقياس التفاعلات بين المياه والصخور، ولتحديد نسبة مصادر ثاني أكسيد الكربون المختلفة في المياه، وتحديد الظروف الجيولوجية الأولية للمياه الجوفية.



الشكل ٣-١٩ فصل هيدروجراف نبع هوبليج إلى مكونات التدفق الأساسي والتدفق فوق. (Trcek, 2003).

يمكن أن يتباين التركيب النظائري لـ  $C^{13}$  في الينابيع على نطاق واسع. المصادر الرئيسية للكربون الذائب في المياه الجوفية هي ثاني أكسيد الكربون في التربة، وثاني أكسيد الكربون من أصل جيولوجي أو ثاني أكسيد الكربون الصخري (من مصادر القشرة الأرضية العميقة أو الوشاح)، والمعادن الكربونية، والمواد العضوية في التربة والصخور، والشوائب السائلة والميثان. كل مصدر من هذه المصادر له تركيب نظائري مختلف للكربون ويساهم في الكربون المذاب بالكامل بنسب مختلفة.

ومن المعروف أن نسبة  $\delta C^{13}$  تبلغ حوالي ٠% في صخور الكربونات البحرية، و-٢٥% في ثاني أكسيد الكربون في التربة (على غرار النباتات)، و-٧% في ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، على التوالي.

(Kendall and McDonnell, 1998). ومع ذلك، يمكن أن تصل كربونات المتبخرات إلى قيم لـ  $\delta C^{13}$  تصل إلى +٠,١%؛  $\delta C^{13}$  لثاني أكسيد الكربون في التربة الاستوائية قد تكون أكثر من -١,١%؛ وقد تكون قيمة  $\delta C^{13}$  في الميثان الحراري الجوفي حوالي -٣,٠%؛ في حين أن  $\delta C^{13}$  في ثاني أكسيد الكربون الناتج من النظم الحرارية الأرضية والبركانية تتراوح عادة بين ٨ و ٣ في المائة (Hoefs, 1997; Kendall and McDonnell, 1998). في المناطق ذات الظروف المناخية الموسمية، عادةً ما تحدث قيم  $\delta C^{13}$  الأعلى عادةً في النبع

خلال فصل الشتاء، وبالتالي فإن  $\delta C^{13}$  هو أيضاً متتبع مفيد للمساهمات الموسمية والمتعلقة بالتصريف لمختلف مسارات التدفق الهيدرولوجي المختلفة إلى النبع.

أجريت دراسة تركيب نظائر الكربون غير العضوي المذاب في الينابيع الكارستية في إطار التحريات الهيدروجيولوجية الكارستية في جنوب غرب سلوفينيا، والتي تمت مناقشتها من قبل (Trcek, 1997; Urbanc et al., 1997). وكان الهدف من ذلك هو تقييم إمكانية استخدام التركيب النظائري للكربون غير العضوي المذاب الكلي في مياه الينابيع لتحديد منطقة تغذية طبقات المياه الجوفية الكارستية. وتم توصيف الظروف الأولية في مناطق التغذية بالتركيب النظائري للكربون والضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون في التربة. واستخدمت المعلومات التي تم الحصول عليها لتقدير خصائص المناخ والغطاء النباتي في مناطق تغذية الينابيع.

تم إجراء رصد  $\delta C^{13}$  ل ١٢ نبعا على مدار ثلاث سنوات. وبالتوازي مع ذلك، تم أخذ عينات من ثاني أكسيد الكربون في مناطق تغذية طبقات المياه الجوفية للحصول على معلومات عن تركيبها النظائري وضغطها الجزئي  $\delta C^{13} CO_2$ . وقد تم حساب هذه المعاملات أيضاً من التركيب النظائرية والكيميائية للينابيع.

أشارت المقارنة بين القيم المحسوبة والمقاسة في ثاني أكسيد الكربون في التربة إلى ذوبان صخور الكربونات في نظام مفتوح. وأكدت تحليلات البيانات الإحصائية نموذج الخلط الذي يصف العلاقة بين  $\delta C^{13} CO_2$  وثنائي أكسيد الكربون في التربة بالمعادلات التالية:

$$\delta C^{13} CO_2 = -23 + 0.45 \frac{1}{P_{CO_2}} \quad (3.15)$$

$$\delta C^{13} CO_2 = -24 + 0.48 \frac{1}{P_{CO_2}} \quad (3.16)$$

ويترتب على ذلك من النموذج أن  $\delta C^{13}$  لثاني أكسيد الكربون في التربة بسبب الاختلاط مع كربون الغلاف الجوي، لأن  $\delta C^{13}$  للجزء الحيوي المنشأ ظل ثابتاً (بين ٢٣ و ٢٤%). المعادلات (٣,١٩) و (٣,٢٠) تصف مناطق التغذية مع الغابات والأراضي العشبية السائدة، على التوالي. الاختلافات في التركيب النظائري للكربون الحيوي المنشأ، قدم إمكانية استخلاص استنتاجات حول خصائص الغطاء النباتي لمناطق تغذية الينابيع (Trcek, 1997).

واستناداً إلى (١) الارتباطات بين ثاني أكسيد الكربون المقاس ودرجة حرارة التربة وبين  $P_{CO_2}$  المقاس ودرجة حرارة التربة، و (٢) تأثيرات أنواع الغطاء النباتي المختلفة على  $\delta C^{13} CO_2$ ، تم إجراء محاولة لتقدير القيم المتوسطة لدرجة حرارة التربة تقريباً في مناطق التغذية من الينابيع. تم إجراء الحسابات بطريقتين:

١. تم حساب متوسط درجات حرارة التربة على أساس الضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون الذي تم الحصول عليه من قلوية الينابيع مع مراعاة العلاقة بين الضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون المقاس ودرجة حرارة التربة المقاسة للبنية النباتية لمناطق التغذية.

٢. تم حساب متوسط درجات الحرارة من التركيب النظائري DIC، مع الأخذ بعين الاعتبار العلاقة بين قياس  $\delta C^{13}$  ل  $CO_2$  ودرجة حرارة التربة للبناء النباتي في مناطق التغذية. وترد درجات الحرارة التقديرية في الشكل ٣-٢٠.

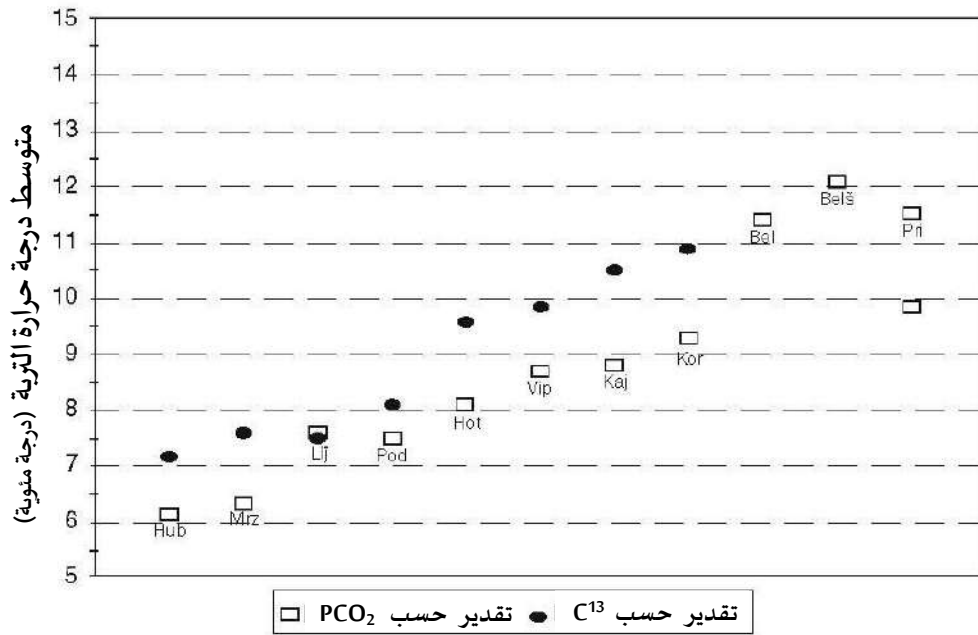
### نظائر الكبريت

مثل الكربون، الكبريت عنصر وفير في الطبيعة. وبسبب طبيعته التفاعلية فإن العديد من العمليات تؤثر على تدويره العالمي وتركيبه النظائري مثل تجوية الصخور الغنية بالكبريت، ترسب المتبخرات، والكبريتات من رذاذ البحر، والتدفقات البشرية المنشأ من حرق الوقود الأحفوري. التركيب النظائري للكبريت  $\delta S^{34}$  يتراوح بين ٥ و ٢٥ ‰ في كبريت الغلاف الجوي و ١٠ و ٣٥ ‰ في كبريت الغلاف الصخري، على التوالي (Krouse and Mayer, 2000). وينشأ كبريت الغلاف الصخري بشكل رئيسي من تجوية الصخور المتحولة والرسوبية (الصخور المتحولة والرسوبية (المتبخرات البحرية مثل الجبس والأنهيدريت). تبلغ نسبة  $\delta S^{34}$  حوالي ٢١ ‰ في الكبريت البحري، بينما يتراوح بين ١٠ و ٣٥ ‰ في المياه الجوفية (Krouse and Mayer, 2000).

تعتمد قيم  $\delta S^{34}$  في المياه الجوفية على طبيعة مدخلات الكبريت في المياه الجوفية. ويوجد بشكل رئيسي على شكل كبريتات وكبريتيدات في المياه الجوفية. المصدر الرئيسي للكبريتات هو انحلال الجبس والأنهيدريت، ولكن قد يوجد أيضاً بعض الكبريت العضوي المذاب والكبريت العنصري والكبريت المعدني. ومن ثم، فإن نسبة النظائر المستقرة لـ  $S^{32}$  و  $S^{34}$  تشير إلى المصادر البحرية والتبخيرية والبركانية للكبريتات الذائبة في مياه الينابيع الجوفية. تعكس قيم  $\delta S^{34}$  ل  $H_2S$  و  $SO_4$  أصلها من التصريف الحراري الأرضي وهو  $\delta S^{34}$  من كبريت الوشاح الذي ينشأ عادةً من البازلت هو ٠ ‰. ويتراوح بين ٢ إلى ٦ ‰ في كبريت القشرة الأرضية (Clark and Fritz, 1997).

وعادةً ما تستخدم نظائر الكبريت في الينابيع لتتبع المصادر الطبيعية والبشرية المنشأ للكبريت، خاصةً في مستجمعات المياه الزراعية. وتتمثل المشكلة العامة في نظائر الكبريت في أن القيم النظائرية قد تختلف كثيراً.

وقد أشارت دراسات كيميائية المياه وقيم  $\delta S^{34}$  ل  $SO_4$  إلى وجود نظامين للتدفق في التضاريس الكارستية في جنوب إنديانا: (١) نظام تدفق ضحل، تهيمن عليه المياه السطحية التي تتسرب عبر التربة إلى الكارست السطحي، والتي تتدفق بعد ذلك بشكل جانبي إلى الفواصل والشقوق العمودية إلى الينابيع، و (٢) نظام تدفق أعمق مدفوع بالطبوغرافيا التي تدفع المياه إلى الأسفل، حيث تتدفق عبرها وتحلل المعادن المتبخرة من الحجر الجيري في سانت لويس (Lee and Krothe, 2001). ثم تتدفق المياه إلى أعلى ويجري التصريف عند أدنى المستويات الطبوغرافية. القيم النظرية للكبريت  $\delta S^{34}$  ل  $SO_4$  للينابيع في منطقة الدراسة تراوحت بين +١١،٠ إلى +٢،٢ ‰، بينما تراوحت قيم  $H_2S$  من ٠،٢ إلى ٣٨،٤ ‰. وكان لدى ينابيع المياه العذبة قيم أخف، حوالي ١٠ ‰ من  $\delta S^{34}$  ل  $SO_4$ ، والينابيع المعدنية حوالي ١٤ ‰. القيم الأخيرة مشابهة لقيم جبس سانت لويس المحلي (١٤-١٦ ‰). أثناء ظروف التدفق المنخفض، وكان قيمة  $\delta S^{34}$  ل  $SO_4$  لينبوع أورانجفيل رايز Orangeville Rise، وهو منبع مياه عذبة رئيسي، بنسبة ١٦ ‰ تقريباً. ومن ثم انخفضت إلى ٩ ‰ عند التدفق العالي، مما يشير إلى اختلاط المياه الضحلة فوق السطحية والمياه المعدنية العميقة.



الشكل ٣-٢٠ درجات الحرارة المقدرة للتربة في مناطق تغذية الينابيع، محسوبة على أساس  $\delta^{13}C$  والضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون في التربة.

استُخدمت البيانات المقدمة مع  $\delta H^2$  و  $\delta^{13}C$ ، وبيانات DIC كمتبعات فصل المكونات الأربعة لعاصفة أورانجيل رايز الهيدروغرافية (Lee and Krothe, 2001). مساهمات مكونات مياه التربة الجديدة، الكارستية، ومكونات التدفق الأساس في تصريف مياه الينابيع على أنها ١٠، ١، ٣، ٣، ٥٢، ٣٤ في المائة على التوالي.

### نظائر النيتروجين

أدت مدخلات النيتروجين البشرية المنشأ إلى زيادة أحمال النترات في المياه الجوفية خلال العقود الماضية. ومن ثم، ازداد أيضاً استخدام نظائر النيتروجين المستقرة في الدراسات البيئية والإيكولوجية بشكل كبير. وتعتبر نظائر النيتروجين  $N^{15}$  و  $N^{14}$  مفيدة في تحديد مصادر النترات في المياه الجوفية والمياه السطحية.

قد ينشأ النيتروجين في المياه من التلوث الرطب والجاف ( $NO_2$  و  $NO_3$ ) والأسمدة المعدنية، والمواد العضوية (المخلفات الحيوانية ومياه الصرف الصحي المنزلية)، في حين أن التفاعلات بين المياه والصخور لا تدخل عادةً في الدورة الجيوكيميائية الحيوية للنيتروجين. أما الأسمدة التجارية، والمخلفات الحيوانية أو البشرية، وهطول الأمطار، والمواد العضوية والنيتروجين العضوي داخل التربة لها بصمة نظائرية مميزة. اختلاط المياه الجوفية بمصادر مختلفة من النترات يمكن اكتشافها من خلال مرتسم  $\delta N^{15}$  للـ  $NO_3$  مقابل

$\delta O^{18}$  للـ  $NO_3$ .

التحليلات النظائرية المجمعة للنيتروجين والأكسجين في  $\text{NO}_3$  تترك بصمات على المصادر الطبيعية والبشرية المنشأ للنترات، ونزع النتروجين الميكروبي والنترة وعمليات التثبيت البيولوجي وموازنة النيتروجين في المياه الجوفية (Aravena, Evans, and Cherry, 1993; Aravena and Robertson, 1998; Aravena et al., 2002). لذلك، يمكن تمييز قيم  $\delta \text{N}^{15}$  للنترات الذائبة والأمونيوم والنيتروجين العضوي في مياه التربة بشكل جيد من منطقة إلى أخرى (أي،  $\text{N}^{14} / \text{N}^{15}$ ) إن العمليات الرئيسية التي تؤثر على  $\delta \text{N}^{15}$  للينبوع النيتروجين هي نزع النيتروجين والتخزين المؤقت وآليات النقل (Bohlke and Denver, 1995; Bohlke et al., 2002). أثبتت العديد من الدراسات أنه يمكن التمييز بين تأثيرات نزع النتروجين والاستيعاب باستخدام تحليلات  $\delta \text{N}^{15}$  جنباً إلى جنب مع تحليل  $\delta \text{O}^{18}$  (على سبيل المثال، Boettcher et al., 1990a, 1990b; Panno et al., 2001, 2008; Leis, 2002). إذا كان امتصاص النبات وحده مسؤولاً عن تخفيف  $\text{NO}_3$  فإن التركيب النظائري لما تبقى من  $\text{NO}_3$  يبقى دون تغيير. أما إذا حدث كل من نزع النتروجين والاستيعاب معاً، فإن التركيب النظائري للنترات المتبقية يتم إثراءها والنباتات المتراكمة تعكس التركيب النظائري لمصدر  $\text{NO}_3$ . يظل التركيب النظائري للنباتات كما هو ويصبح الماء أكثر إثراءً إذا كانت عملية نزع النتروجين هي العملية الوحيدة التي تحدث.

أُجريت دراسات  $\delta \text{N}^{15}$  و  $\delta \text{O}^{18}$  لـ  $\text{NO}_3$  في حقل لايبنيترز في الجزء الجنوبي من ستيريا، حيث يعزى مصدر التلوث بالنترات في طبقة المياه الجوفية إلى ممارسات استخدام الأراضي الزراعية المحلية طويلة الأجل مثل نشر كميات كبيرة من السماد السائل (روث الخنازير بشكل رئيسي) على التربة (Leis, 2002). كان هدف البحث الرئيسي هو تحديد الإجراء الذي ينبغي اتخاذه للحد من تلوث النترات في المياه الجوفية. ومن ثم، تم التحقيق في مصادر النترات ومصدرها. أظهرت النتائج أن التركيب النظائري للنترات ليس فقط أداة قوية لتحديد مصادرها ولكن يمكن أن يوفر أيضاً تلميحات حول عمليات تحويل النيتروجين، مثل النتجة ونزع النتروجين. تم تحري مصادر النترات ( $\text{NO}_3$ ) في المياه الجوفية لطبقة المياه الجوفية الكارستية الضحلة في سهل المجري في جنوب غرب إلينوي باستخدام التقنيات الكيميائية والنظائرية (Panno et al., 2001). تم جمع عينات المياه من ١٠ ينابيع كارستية كبيرة نسبياً خلال أربعة مواسم مختلفة وتحليلها من أجل المكونات غير العضوية، والكربون العضوي المذاب، والأتوازن، و  $\delta \text{N}^{15}$  و  $\delta \text{O}^{18}$  لأيونات  $\text{NO}_3$ . كانت البيانات النظائرية أكثر تحديداً وأشارت إلى أن مصادر  $\text{NO}_3$  في مياه الينابيع تهيمن عليها الأسمدة النيتروجينية مع بعض التأثير المحتمل لـ  $\text{NO}_3$  من الغلاف الجوي وبدرجة أقل بكثير، النفايات البشرية أو الحيوانية.

وتم ملاحظة الاختلافات في التركيب النظائري لـ  $\text{NO}_3$  وبعض الخصائص الكيميائية خلال المواسم الأربعة المتتالية التي جمعت فيها عينات مياه الينابيع. والقيم النظائرية من  $\delta \text{N}^{15}$  و  $\delta \text{O}^{18}$  لأيونات  $\text{NO}_3$  من ٣,٢ إلى ١٩,١ ‰ ومن ٧,٢ إلى ١٨,٧ ‰ على التوالي (الشكل ٣-٢١). وأشار اتجاه  $\delta \text{O}^{18}$  و  $\delta \text{N}^{15}$  لأيونات  $\text{NO}_3$  إلى حدوث درجة كبيرة من نزع النتروجين تحدث في النظام الهيدرولوجي الكارستي الضحل (داخل منطقة التربة، والطبقة الصخرية فوق سطح البحر، وطبقة المياه الجوفية الكارستية الضحلة) قبل التصريف في الينابيع.

### نظائر الكلور والبورون والسترونتيوم والرصاص

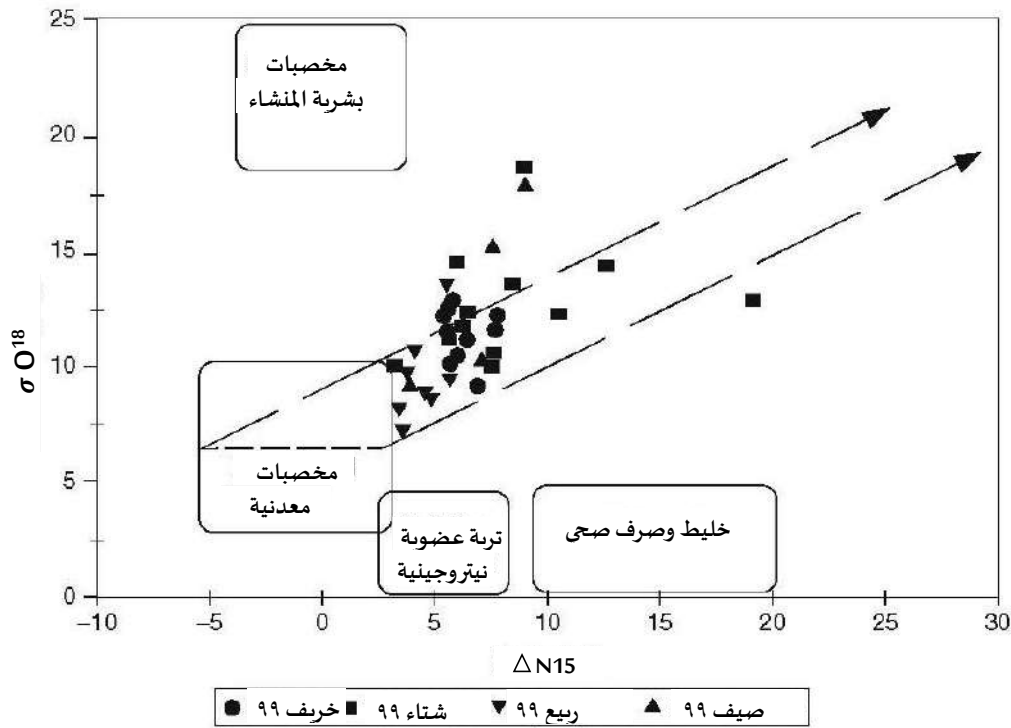
النظائر المستقرة للكلور والبورون والسترونتيوم والرصاص ليس لديها استخدام شائع في دراسات هيدروجيولوجيا الينابيع؛ ولذلك، لم يتم ذكرها إلا بإيجاز في هذا الكتاب. النسبة النظائرية  $Sr^{87}/Sr^{86}$  هي متتبع قيم لدراسات الخلط والمصادر للمياه الجوفية المعدنية. والتحليل التفصيلي للتركيب النظائري والسترونتيوم في مياه المجاري المائية ونطاقات التربة العضوية والمعدنية، والكتلة الحيوية، ومدخلات الغلاف الجوي في عدد قليل من المواقع، وقد وفرت نظرة ثاقبة في تدوير معدن الكبريت (Aberg, Graustein, 2005; Jacks, and Hamilton, 1989; Miller, Blum, and Friedland, 1993; Bailey et al., 1996; Rose and Fullagar, 2005). وفي الآونة الأخيرة، استخدمت النسب النظائرية ل  $Cl^{37}/Cl^{35}$ ,  $B^{10}/B^{11}$  في دراسات تلوث المياه الجوفية (Eggenkamp, 2004; Annable et al., 2007)، في حين أن نظائر الرصاص لم يتم التعرف عليها بشكل عام كمتتبعات مفيدة في مستجمعات مياه الينابيع (Erel, Morgan, and Patterson, 1991; Connelly and Thrane, 2005).

### النظائر المستقرة في النمذجة الجيوكيميائية

يمكن استخدام النظائر التفاعلية للمذابات، مثل  $C^{13}$ ,  $S^{34}$ ,  $N^{15}$ ,  $Sr^{87}$  مع البيانات الكيميائية في نماذج التوازن الكتلي الجيوكيميائي ومسار التفاعل، مثل BALANCE، و PHREEQE و NETPATH لدراسة العمليات الجيوكيميائية، واختبار الفرضيات حول الآليات الهيدروديناميكية والجيوكيميائية واستبعاد مسارات التفاعل المحتملة. في نمذجة التفاعل الكيميائي، عادةً ما يمكن العثور على عدة نماذج تفاعلة تفي بالبيانات. لكل مسار تفاعل نموذجي، تُستخدم الحسابات لإملاء التركيب الكيميائي والنظائري للمرحلة المائية وكذلك كميات المعادن الذائبة أو الساقطة على طول مسار التدفق.

### النظائر المشعة

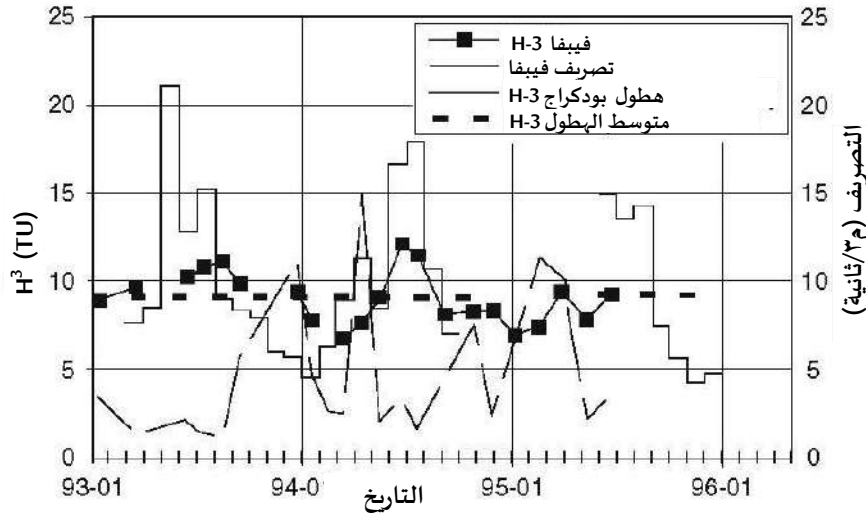
تمثل النظائر المشعة طريقة بحثية مهمة أخرى في الاستقصاء الهيدروجيولوجي. وكما ذكر في بداية القسم ٣-٢-٣، فإن مجال تطبيقها الرئيسي هو التأريخ للمياه الجوفية. فقط التريتيوم ( $H^3$ ) والكربون-١٤ ( $C^{14}$ ) استخدمت بشكل روتيني. استخدام الكلور-٣٦ ( $Cl^{36}$ ) بشكل متزايد، في حين أن أخذ عينات النظائر المشعة الأخرى وتحليلها وتفسيرها معقد للغاية بحيث لا تتم دراستها إلا في مختبرات الأبحاث المتخصصة. في هذه الدراسات، يتم تأريخ المياه الجوفية القديمة بواسطة  $Kr^{81}$  و  $I^{129}$ ، ويتم تحديد أعمار المياه الجوفية، حتى ١٠٠٠ سنة، على أساس  $Ar^{39}$ ، في حين أن نظائر اليورانيوم مفيدة في التحقيق من عمليات الخلط وكذلك تأريخ المياه الجوفية (Lehman et al., 2003; Collon, Lu, and Kutschera, 2004; Aggarwal, Gat, and Froehlich, 2006; Pearson et al.). التريتيوم ( $H^3$ ) له عمر نصفي يبلغ ١٢,٣ سنة. ويُعبر عنه بوحدات التريتيوم، TU، التي تمثل ١  $H^3$  ذره من  $10^{18}$  ذرة من  $H^1$  أو نشاط ٠,١١٨ بكريل/كجم في الماء. يعتبر  $H^3$  متتبعًا مستقرًا في معظم الدراسات الهيدروجيولوجية. وقد زادت وفرته الطبيعية بشكل كبير بسبب المصادر البشرية المنشأ التي أنتجتها خلال تجارب الأسلحة النووية في أواخر الخمسينيات وأوائل الستينيات. إن طبيعة  $H^3$  ينتج عنها دالة مدخلات معقدة للغاية مع وجود اختلافات محلية وجغرافية (Loosli, Lehman, and Dappen, 1991).



الشكل ٣-٢١ التراكيب النظائرية لـ  $\text{NO}_3$  من مصادر محتملة مختلفة والينابيع العشرة التي تم أخذ عينات منها خلال أربعة مواسم متتالية، وخطوط (أسهم) توضح اتجاهات عمليات نزع النتروجين. الخط المتقطع الأفقي بالقرب من يمثل مركز المربع الذي يحمل علامة "سماد معدني" تقديراً للتركيب النظائري الأصلي للأسمدة المستخدمة في سهل المجري. (Panno et al., 2001).

ومع ذلك، يوجد عددًا كبيرًا من القياسات لـ  $\text{H}^3$  في الهطول المطري (الوكالة الدولية للطاقة الذرية). مما يجعله متبعا قابلاً للتطبيق لتحديد أزمدة بقاء الينابيع عندما تحدث عمليات التغذية في غضون فترة زمنية تقل عن ٥٠ عامًا.  $\text{H}^3$  هو جزء من جزيء الماء، وهو الطريقة المباشرة الوحيدة المتاحة لتحديد عمر المياه الجوفية في الوقت الحاضر. التركيز الحالي لـ  $\text{H}^3$  أقل مما كان عليه خلال فترة اختبار الأسلحة ويستمر في الانخفاض. ونادراً ما تحتوي المياه الجوفية اليوم على أكثر من ٥٠ TU، وعادة ما تكون في ١٠-٥ TU (Criss et al., 2007; Rose, 2007). وكمبردأ توجيهي عام، يمكن القول بأن الينابيع التي تحتوي على أكثر من ١٠ TU نووية تحتوي على اثار اختبارات الاسلحة النووية بينما ٢٠ TU أو أكثر تشير إلى وجود تغذية للمياه منذ عام ١٩٦١ (International Atomic Energy Agency, 1983).

أجريت دراسة لتركيب  $\text{H}^3$  في الينابيع الكارستية في إطار التحريات الهيدروجيولوجية المائية الكارستية في جنوب غرب سلوفينيا (Stichler et al., 1997). تتطابق قيم  $\text{H}^3$  للعينات الشهرية من نبع فيبافا مع قيم  $\text{H}^3$  الفعلية للهطول المطري، مما يشير إلى القصر النسبي لزم بقاء مياه الينابيع الجوفية (الشكل ٣-٢٢). لم يكن هناك زيادة أو نقصان كبير في الـ  $\text{H}^3$ ، ولا حتى خلال فترات انخفاض المياه. وانعكست فقط الاختلافات الموسمية لمحتوى  $\text{H}^3$  عند الهطول المطري بفصل الربيع. وتم تقدير متوسط زمن الانتقال بحوالي



الشكل ٢٢-٣ التصريف ومحتوى H من العينات الشهرية من نبع فيبفا مع المتوسط المرجح ل H<sup>3</sup>-لقيم هطول الأمطار في محطة الأرصاد الجوية بودكراج. (Stichler et al., 1997).

٤٠، سنة من مقارنة تركيز H<sup>3</sup> لكلا من الهطول والأمطار والنبع.

كما ذكر في بداية القسم ٣-٢-٣، فإن استخدام H<sup>3</sup> لتحديد عمر المياه الجوفية يعتمد على معرفة تركيزه، والذي قد يكون في الواقع غير معروف بشكل جيد أو قد تختلف مع مرور الوقت. ولحل هذه المشكلة يمكن قياس H<sup>3</sup> وناتجة المستقر He<sup>3</sup> في عينات النبع. وتوفر دراسة العلاقة بين H<sup>3</sup> و He<sup>3</sup> إمكانية تحديد أعمار المياه الجوفية دون معرفة داله مدخلات H<sup>3</sup>. ويمكن إعادة بناء تركيز مدخلات H<sup>3</sup> الأصلية من كمية He<sup>3</sup> بسبب تحليل التريتيوم عندما لا يفقد الهيليوم من المحلول (Solomon and Sudicky, 1991; Solomon et al., 1993). ومع ذلك، فإن طريقة H<sup>3</sup> / He<sup>3</sup> تتضمن بعض الصعوبات، نظراً لأن مجموع He<sup>3</sup> في المياه الجوفية يأتي من مصادر متنوعة. بالإضافة إلى الأصل التريتيوجيني (القادم من تحليل H<sup>3</sup>) وقد يكون أيضاً He<sup>3</sup> من أصل تيريغيني (من الإنتاج الموضعي) وكذلك من الاتزان الأصلي للماء مع غازات الغلاف الجوي. يمكن تقدير المساهمة الأخيرة من تركيز النيتروجين (الذي لا يمكن أن يكون من أصل تيريغيني)، في حين أن المساهمة التيريغينية المحتملة يمكن تقديرها من تركيز He<sup>4</sup> وتصحيحها لمكون الغلاف الجوي (Schlosser et al., 1989).

### نظير الكربون

كربون-١٤ (C<sup>14</sup>) ينشأ من تفاعلات النيوترونات وتحلل بعض نظائر الراديوم، ومن تفاعلات جسيمات ألفا، ومن المصادر بشرية المنشأ. ويبلغ نصف عمره ٥٧٣٠ ± ٣٠ سنة. عندما تجمع القياسات الميدانية المناسبة وإجراء التصحيحات المناسبة يمكن أن توفر بيانات C<sup>14</sup> نظرة ثاقبة على مسارات تدفق المياه الجوفية ومناطق التغذية. إن دالة المصدر الجوي ل C<sup>14</sup> معروفة جيداً، على النقيض من تركيزه في ثاني أكسيد الكربون الذي يتزن مع المياه التي تغذي طبقات المياه الجوفية. وبالتالي، فقد تم تطوير العديد من

النماذج الهيدروكيميائية لتحديد التركيزات الأولية لـ  $C^{14}$ . وتعتمد هذه النماذج على قيمة  $C^{14}$  لتحديد التركيز الأولي في المياه الجوفية اللازمة لمعايرة المقياس الزمني لـ  $C^{14}$  في المياه الجوفية بسبب التفاعلات بين المياه والصخور (Mook, 1980). كما تم توضيحه سابقاً، يعكس تحديد التركيز الأولي لـ  $C^{14}$  التفاعل الكيميائي للمياه الجوفية مع صخور طبقة المياه الجوفية في أنظمة الدوبان المفتوحة أو المغلقة.

تشمل النماذج الجيوكيميائية المذكورة سابقاً كيمياء المياه الجوفية بأكملها (Plummer, Pre stemon, and Parkhurst, 1994)، لذلك تم تطبيقها بنجاح لاجاد أعمار موثوقة للمياه الجوفية (على سبيل المثال، Geyh, 1992, 2000). ومع ذلك، يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار أنه يمكن استخدام نتائج عينات المياه من نفس مسار التدفق فقط.

### نظائر الكلور

الكلور-٣٦ ( $Cl^{36}$ ) له عمر نصفي يبلغ  $3 \times 10^5$  سنة؛ ولذلك، فإنه ينطبق بشكل خاص على تأريخ المياه الجوفية التي يتراوح عمرها من ٥٠٠,٠٠٠ إلى مليون سنة. يُنتج  $Cl^{36}$  في المقام الأول في الغلاف الجوي، إما عن طريق الانفجارات النووية الحرارية أو، بكميات صغيرة، عن طريق تشظي النظائر بواسطة الأشعة الكونية التي تحول  $Ar^{40}$  إلى  $Cl^{36}$  (Schaeffer, Thompson, and Lark, 1960; Cress well and Bonotto, 2008). يمكن أيضاً تكون بعض من  $Cl^{36}$  في المنطقة غير المشبعة الضحلة من النيترونات الثانوية للأشعة الكونية التي تتفاعل مع  $Cl^{35}$  المستقر (هذا المصدر مهمل بشكل أساسي؛ Kaufmann et al., 1982 Bentley et al., 1984). بقية مصادر  $Cl^{36}$  مرتبطة بمحلول الكلوريد في البيئات التي يكون فيها في انتاجه الموضوعي كبير. تُطبّق نفس المنهجية على التنشيط النيوتروني لـ  $Cl^{35}$  المستقر في المحيطات نتيجة لتجارب الأسلحة النووية في الخمسينيات والستينيات من القرن الماضي والمدخلات البشرية المنشأ من الوقود النووي ومن إعادة معالجة الوقود النووي ومرافق توليد الطاقة النووية (Cecil et al., 1992).

ويتواجد أيون الكلوريد في معظم المياه الطبيعية بتركيزات متفاوتة بسبب تفكك كلوريد الصوديوم. ولا تمتص أيونات الكلوريد على أسطح السيليكات، وبالتالي، تتحرك بنفس معدل المياه الجوفية تقريباً (Bentley, Phillips, and Davis, 1986). المصادر البشرية المنشأ لـ  $Cl^{36}$  نتيجة تجارب الأسلحة النووية يمكن تطبيقها لتحديد التغذية الحديثة. حيث يفسر ارتفاع تركيزه في الينبوع على أنه دلالة على التغذية الحديثة. وقد أجريت دراسات مكثفة في إطار دراسة الحالة في شمال سويسرا (Lehmann and Loosli, 1991). وتشير النتائج إلى أن جميع عينات المياه نشأت أساساً من مصادر عميقة تحت سطح الأرض وتم إهمال المصادر الحرارية النووية المنتجة لـ  $Cl^{36}$  بالقرب من السطح. والمسار المهيمن لـ  $Cl^{36}$  هو الاسر النيوتروني بواسطة مع  $Cl^{35}$ . وقد حدثت هذه العملية من دوبان الكلوريد في المياه الجوفية وذرات الكلور داخل الأرضية الصخرية. بعد حوالي ١,٥ مليون سنة تقريباً، يمكن ان تصل نسبة  $Cl^{36}/Cl$  إلى الاتزان. وقد ثبت أن مقدارها كان متناسباً مع التدفق النيوتروني المحلي. وكانت النتيجة العامة لحسابات التدفق

النيوتروني أن النسبة المنخفضة ل  $Cl^{36}/Cl$  والتي تبلغ حوالي  $10 \times 10^{-15}$  متوقعة في صخور الكربونات، وفي صخور الحجر الرملي القيم المتوسطة في حدود  $20 \times 10^{-15} - 30$ ، وفي الصخور البلورية قيم عالية في حدود  $40 \times 10^{-15} - 50$ .

## المراجع

- Aberg, G., Jacks, G., Hamilton, P.J., 1989. Weathering rates and  $87Sr/86Sr$  ratios: An isotopic approach. J. Hydrol. 109, 65–78.
- Aggarwal, P.K., Gat, J., Froehlich, K.F.O., 2006. Isotopes in the water cycle: Past, present and future of a developing science. Springer, Dordrecht, the Netherlands.
- Aggarwal, P.K., Gat, J., Froehlich, K.F.O., 2006. Isotopes in the water cycle: Past, present and future of a developing science. Springer, Dordrecht, the Netherlands.
- Annable, W.K., Frape, S.K., Shouakar-Stash, O., Shanoff, T., Drimmie, R.J., Harvey, F.E., 2007.  $37Cl$ ,  $15N$ ,  $13C$  isotopic analysis of common agro-chemicals for identifying non-point source agricultural contaminants. Appl. Geochem. 22 (7), 1530–1536.
- Aravena, R., Evans, M.L., Cherry, J.A., 1993. Stable isotopes of oxygen and nitrogen in source identification of nitrate from septic tanks. Ground Water 31, 180–186.
- Aravena, R., Roberston, W., 1998. The use of multiple isotope tracers to evaluate denitrification in groundwater: A study in a large septic system plume. Ground Water 36, 975–982.
- Aravena, R., Brown, C., Schiff, S.L., Elgood, R., 2002. Use of geochemical and isotope tools to evaluate nitrate attenuation in riparian wetlands in agricultural landscape in southern Ontario. Geochim. Cosmochim. Acta 66, A25.
- Bailey, S.W., Hornbeck, J.W., Driscoll, C.T., Gaudette, H.E., 1996. Calcium inputs and transport in a base-poor forest ecosystem as interpreted by Sr isotopes. Water Resour. Res. 32, 707–719.
- Bauer, F., Benischke, R., Bub, F.P., Burger, A., Dombrowski, H., Gospodarczyk, R., et al., 1980. Karsthydrologische untersuchungen mit natürlichen und künstlichen tracern im Neuenburger Jura (Schweiz). Steir. Beiträge zur Hydrogeology 32, 5–100.

- Bazemore, D.E., Eshleman, K.N., Hollenbeck, K.J., 1994. The role of soil water in storm flow generation in a forested headwater catchment: Synthesis of natural tracer and hydrometric evidence. *J. Hydrol.* 162, 47–75.
- Behrens, H., Benischke, R., Bricelj, M., Harum, T., Kaßs, W., Kosi, G., et al., 1992. Investigation with natural and artificial tracers in the karst aquifer of the Lurbach system (Peggau-Tanneben-Semriach, Austria). In: Association of Tracer Hydrology Transport phenomena in different aquifers (Investigations 1987–1992), Steir, Beitrage zur Hydrogeologie vol. 43. pp. 9–158.
- Behrens, H., Hottel, H., Kaßs, W., 2001. Application of artificial tracers in comparative tracer experiments. In: Association of Tracer Hydrology Tracers studies in the unsaturated zone and groundwater (Investigations 1996–2001) Beitrage zur Hydrogeologie vol. 52. 105–117.
- Benischke, R., Goldscheider, N., Smart, C., 2007. Tracer techniques. In: Goldscheider, N., Drew, D. (Eds.), *Methods in karst hydrogeology. International contribution to hydrogeology 26*. Taylor and Francis, London, pp. 147–170.
- Bentley, H.W., Phillips, F.M., Davis, S.N., Gifford, S., Elmore, D., Tubbs, L.E., et al., 1982. Thermonuclear  $^{36}\text{Cl}$  pulse in natural water. *Nature* 300, 737–740. Bentley, H.W., Phillips, F.M., Davis, S.N., 1986.  $^{36}\text{Cl}$  in the terrestrial environment. In: Fritz, P., Fontes, J.C. (Eds.), *Handbook of environmental geochemistry*, 2b. Elsevier, New York, pp. 422–475.
- Bohlke, J.K., Denver, J.M., 1995. Combined use of ground-water dating, chemical, and isotopic analyses to resolve the history and fate of nitrate contamination in two agricultural watersheds, Atlantic coastal plain, Maryland. *Water Resources Researches* 31, 2319–2339.
- Bohlke, J.K., Wanty, R., Tuttle, M., Delin, G., Landon, M., 2002. Denitrification in the recharge area and discharge area of a transient agricultural nitrate plume in a glacial outwash sand aquifer, Minnesota. *Water Resour. Res.* 38 (7), 10.1–10.26.
- Bottcher, J., Strebel, O., Voerkelius, S., Schmidt, H.L., 1990. Using isotope fractionation of nitrate nitrogen and nitrate oxygen for evaluation of denitrification in a sandy aquifer. *J. Hydrol.* 114, 413–424.
- Bottcher, A., Imbeck, R., Morgante, A., Ertl, G., 1990. Nonadiabatic surface reaction: Mechanism of electron emission in the  $\text{Cs}^+\text{O}_2$  system. *Phys. Rev. Lett.* 65, 2035–2037.
- Brown, V.A., McDonnell, J.J., Burns, D.A., Kendall, C., 1999. The role of event water, a rapid shallow flow component, and catchment size in summer storm flow. *J. Hydrol.* 217, 171–190.

- Cecil, L.D., Beasley, T.M., Pittman, J.R., Michel, R.L., Kubik, P.W., Sharma, P., et al., 1992. Water infiltration rates in the unsaturated zone at the Idaho National Engineering Laboratory estimated from chlorine-36 and tritium profiles, and neutron logging. In: Kharaka, Y.K., Maest, A.S. (Eds.), *Water-rock interaction*. Balkema, Rotterdam, pp. 709–714.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. *Applied hydrology*. McGraw-Hill, New York. Clark, I.D., Fritz, P., 1997. *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers, New York.
- Collon, P., Lu, Z.T., Kutschera, W., 2004. Tracing noble gas radionuclides in the environment. *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 53, 39–67.
- Connelly, J.N., Thrane, K., 2005. Rapid determination of Pb isotopes to define Precambrian allochthonous domains: An example from West Greenland. *Geology* 33 (12), 953–956.
- COST Action 65, 1995. Final report on Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas. European Commission, Luxembourg.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science* 133, 1702–1703.
- Cresswell, R.G., Bonotto, D.M., 2008. Some possible evolutionary scenarios suggested by  $^{36}\text{Cl}$  measurements in Guarani aquifer groundwaters. *Appl. Radiat. Isot.* 66 (8), 1160–1174.
- Criss, R.E., Davisson, M.L., Surbeck, H., Winston, W.E., 2007. Isotopic Techniques. In: Goldscheider, N., Drew, D. (Eds.), *Methods in karst hydrogeology*. International contribution to hydrogeology 26. Taylor and Francis, London, pp. 123–145.
- Dincer, T., Payne, B.R., Florkowski, T., Martinec, J., Tongiorgi, E., 1970. Snow-melt runoff from measurements of tritium and oxygen-18. *Water Resour. Res.* 6, 110–124.
- Eggenkamp, H.G.M., 2004. Summary of methods for determining the stable isotope composition of chlorine and bromine in natural materials. In: De Groot, P.A. (Ed.), *Handbook of stable isotope analytical techniques*, vol. I. Elsevier, Amsterdam, pp. 604–622.
- Erel, Y., Morgan, J.J., Patterson, C.C., 1991. Natural levels of Pb and Cd in a remote mountain stream. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55 (3), 707–719.
- Fank, J., 1996. Hydrogeologische Rahmenbedingungen, messtechnische Voraussetzungen und Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen zur Frage Stoffdynamik. In: *Proceedings Sixth Lysimetertagung, Lysimeter im Dienste des Grundwasserschutzes*. BAL-Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, Gumpenstein, pp. 59–64.

- Fank, J., Stichler, W., Zojer, H., 1998. Die Schneeschmelze 1996 als  $^{18}\text{O}$ -Tracerversuch an der Lysimeteranlage in Wagna. In: Proceedings Workshop Bestimmung der Sickerwassergeschwindigkeit in Lysimetern. GSF-forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Munich, pp. 11–19.
- Field, M.S., 2003. A review of some tracer-test design equations for tracer-mass estimation and sample-collection frequency. *Env. Geol.* 43, 867–881.
- Frederickson, G.C., Criss, R.E., 1999. Isotope hydrology and time constants of the unpounded Meramec River basin, Missouri. *Chem. Geol.* 157, 303–317.
- Fritz, P., Cherry, J.A., Weyer, K.V., Sklash, M.G., 1976. Runoff analyses using environmental isotope and major ions. In: Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology. International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 111–130.
- Geyh, M.A., 1992.  $^{14}\text{C}$  time scale of groundwater correction and linearity. In: International Atomic Energy Agency (Ed.) Isotope techniques in water resources development. International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 167–177.
- Geyh, M.A., 2000. An overview of  $^{14}\text{C}$  analysis in the study of groundwater. *Radiocarbon* 42, 99–114.
- Gospodarič, R., Habič, P., 1976. Underground water tracing—Investigations in Slovenia, 1972–1975. Institute for Karst Research SAZU, Ljubljana, Slovenia. Graustein, W.C., 1989.
- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios measure the sources and flow of strontium in terrestrial ecosystems. In: Rundel, P.W., Ehleringer, J.R., Nagy, K.A. (Eds.), Stable isotopes in ecological research. Springer-Verlag, New York, pp. 491–511.
- Habič, P., 1976a. Geomorphologic and hydrographic characteristics. In: Gospodarič, R., Habič, P. (Eds.), Underground water tracing—Investigations in Slovenia, 1972–1975. Institute for Karst Research SAZU, Postojna, Slovenia, pp. 12–27.
- Habič, P., 1976b. Karst hydrographic evaluations. In: Gospodarič, R., Habič, P. (Eds.), Underground Water Tracing—Investigations in Slovenia, 1972–1975. Institute for Karst Research SAZU, Ljubljana, Slovenia, pp. 197–213.
- Himmelsbach, T., Hottel, H., Käss, W., Leibundgut, C., Maloszewski, P., Meyer, T., et al., 1992. Fractured rocks—Test site Lindau/Southern Black Forest (Germany). In: Association of Tracer Hydrology (Ed.), Transport phenomena in different aquifers (Investigations 1987–1992), Steir, Beiträge zur Hydrogeologie, vol. 43. pp. 159–228.
- Hoefs, J., 1997. Stable isotope geochemistry, fourth ed. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.

- International Atomic Energy Agency, 1983. Isotope techniques in the hydrogeological assessment of potential sites for the disposal of high-level radioactive wastes. Technical reports series 228, International Atomic Energy Agency, Vienna, p. 151.
- International Atomic Energy Agency/World Meteorological Organization, 2006. Global network of isotopes in precipitation. The GNIP database. Available at: [http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/GNIP/IHS\\_GNIP.html](http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/GNIP/IHS_GNIP.html).
- Kass, W., 1998. Tracing technique in geohydrology. Balkema, Rotterdam.
- Kaufmann, R., Long, A., Bentley, H.W., Davis, S.N., 1984. Natural chlorine isotope variations. *Nature* 309, 338–340.
- Kendall, C., McDonnell, J.J., 1998. Isotope tracers in catchment hydrology. Elsevier, Amsterdam.
- Kiraly, L., Perrochet, P., Rossier, Y., 1995. Effect of the epikarst on the hydrograph of karst springs: A numerical approach. *Bulletin d'Hydrogéologie* 14, 199–220.
- Kogovšek, J., Petric, M., 2004. Advantages of longer-term tracing: Three case studies from Slovenia. *Env. Geol.* 47, 76–83.
- Kogovsek, J., Petric, M., 2006. Tracer test on the Mala gora landfill near Ribnica in south-eastern Slovenia. *Acta Carsologica* 35 (2), 91–101.
- Kogovsek, J., Petric, M., 2007. Directions and dynamics of flow and transport of contaminants from the landfill near Sezana (SW Slovenia). *Acta Carsologica* 36 (3), 413–424.
- Kogovšek, J., Knez, M., Mihevc, A., Petric, M., Slabe, T., Štebel, S., 1999. Military training area in Kras (Slovenia). *Env. Geol.* 38 (1), 69–76.
- Kranjc, A., 1997. Karst hydrogeological investigations in south-western Slovenia. *Acta Carsologica* 26 (1), 260–353.
- Krouse, H.R., Mayer, B., 2000. Sulfur and oxygen isotopes in sulphate. In: Cook, P., Herczeg, A.L. (Eds.), *Environmental tracers in subsurface hydrology*. Kluwer Academic Publishers, Rotterdam, pp. 195–230.
- Lee, E.S., Krothe, N.C., 2001. A four-component mixing model for water in a karst terrain in south-central Indiana, USA, using solute concentration and stable isotopes as tracers. *Chem. Geol.* 179, 129–143.
- Lehman, B.E., Loosli, H.H., 1991. Isotopes formed by underground production. In: Pearson, F.J., Balderer, W., Loosli, H.H., Lehmann, B.E., Matter, A., Peters, T., et al. (Eds.), *Applied isotope hydrogeology—A case study in Northern Switzerland*. *Studies in environmental science* 43. Elsevier, Amsterdam, pp. 239–266.

- Lehman, B.E., Love, A., Purtschert, R., Collon, P., Loosli, H.H., Kutschera, W., et al., 2003. A comparison of groundwater dating with  $^{81}\text{Kr}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  and  $^4\text{He}$  in four wells of the Great Artesian Basin, Australia. *Earth and Planetary Science Letters* 211 (3–4), 237–250.
- Leis, A., 2002. Use of  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  isotope ratios to identify sources of nitrate in the unsaturated zone. In: *Berichte des Institutes für Erdwissenschaften der Karl-Franzens-Universität Graz* 6. Graz, Austria, pp. 19–21.
- Loosli, H.H., Lehman, B.E., Dapp, G., 1991. Dating by radionuclides. In: Pearson, F.J., Balderer, W., Loosli, H.H., Lehmann, B.E., Matter, A., Peters, T., et al. (Eds.), *Applied isotope hydrogeology—A case study in Northern Switzerland*. *Studies in environmental science* 43. Elsevier, Amsterdam, pp. 153–175.
- Maloszewski, P., Zuber, A., 1982. Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers, part 1, Models and their applicability. *J. Hydrol.* 57, 201–231.
- Maloszewski, P., Moser, H., Stichler, W., Bertleff, B., Hedin, K., 1990. Modelling of groundwater pollution by riverbank infiltration using oxygen-18 data. In: *Groundwater monitoring and management, Proceedings of Dresden Symposium, March 1987*. Publication 173, International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, Oxfordshire, pp. 153–161.
- Maloszewski, P., Zuber, A., 1996. Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data. In: *Manual on mathematical models in isotope hydrology*. International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 9–58.
- Martinec, J., Siegenthaler, H., Oeschger, H., Tongiorgi, E., 1974. New insight into the runoff mechanisms by environmental isotopes. In: *Proceedings of the Symposium on Isotope Techniques in Groundwater Hydrology*. International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 129–143.
- Miller, E.K., Blum, J.D., Friedland, A.J., 1993. Determination of soil exchangeable-cation loss and weathering rates using Sr isotopes. *Nature* 362, 438–441.
- Mook, W.G., 1980. Carbon-14 in hydrogeological studies. In: Fritz, P., Fontes, J.C. (Eds.), *Handbook of environmental isotope geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 49–74.
- Mook, W.G., 2000. *Environmental isotopes in the hydrological cycle principles and applications*. International Atomic Energy Agency, Vienna.

- Moser, H., Stichler, W., 1975. Deuterium and oxygen-18 contents as an index of the properties of snow blankets. In: Snow mechanics, Proceedings of Grindelwald Symposium, April 1974. Publication 114, International Association of Hydrological Sciences, Dorking, Surrey, pp. 122–135.
- Ogunkoya, O.O., Jenkins, A., 1991. Analysis of runoff pathways and flow distributions using deuterium and stream chemistry. *Hydrol. Process.* 5, 271–282.
- Ogunkoya, O.O., Jenkins, A., 1993. Analysis of storm hydrograph and flow pathways using a three-component hydrograph separation model. *J. Hydrol.* 142, 71–88.
- Panno, S.V., Hackley, K.C., Hwang, H.H., Kelly, W.R., 2001. Determination of the sources of nitrate contamination in karst springs using isotopic and chemical indicators. *Chem. Geol.* 179, 113–128.
- Panno, S.V., Kelly, W.R., Hackley, K.C., Hwang, H.H., Martinsek, A.T., 2008. Sources and fate of nitrate in the Illinois River Basin, Illinois. *J. Hydrol.* 359, 174–188.
- Pearson, F.J., Balderer, W., Loosli, H.H., Lehmann, B.E., Matter, A., Peters, T., et al., 1991. Applied isotope hydrogeology—A case study in northern Switzerland. *Studies in environmental science* 43. Elsevier, Amsterdam.
- Perrin, J., Jeannin, P.Y., Zwahlen, F., 2003. Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland. *J. Hydrol.* 279, 106–124.
- Plummer, L.N., Prestemon, E.C., Parkhurst, D.L., 1994. An interactive code (NETPATH) for modeling NET geochemical reactions along a flow PATH, version 2.0. Water-resources investigations report 94-4169. U.S. Geological Survey, Reston, VA.
- Rose, S., 2007. Utilization of decadal tritium variation for assessing the residence time of base flow. *Ground Water* 45 (3), 309–317.
- Rose, S., Fullagar, P.D., 2005. Strontium isotope systematics of base flow in Piedmont Province watersheds, Georgia (USA). *Appl. Geochem.* 20 (8), 1571–1586.
- Rozanski, K., Araguds-Araguds, L., Gonfiantini, R., 1992. Relation between long-term trends of  $^{18}\text{O}$  isotope composition of precipitation and climate. *Science* 258, 981–985.
- Rozanski, K., Araguds-Araguds, L., Gonfiantini, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Swart, P.K., Lohman, K.C., McKenzie, J., Savin, S. (Eds.), *Climate change in continental isotopic records—Geophysical monograph* 78. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 1–36.

- Rushton, K.R., Ward, C.J., 1979. The estimation of groundwater recharge. *J. Hydrol.* 41, 345–361.
- Schaeffer, O.A., Thompson, S.O., Lark, N.L., 1960. Chlorine-36 radioactivity in rain. *J. Geophys. Res.* 65, 4013–4016.
- Schlosser, P., Stute, M., Dorr, H., Sonntag, C., Munnich, K.O., 1989. Tritogenic  $^3\text{He}$  in shallow groundwater. *Earth Planet. Sci. Lett.* 94, 245–254.
- Schulz, H.D., 1998. Evaluation and interpretation of tracing tests. In: Kaß, W. (Ed.), *Tracing technique in geohydrology*. Balkema, Rotterdam, pp. 341–376.
- Siegel, D.I., 1991. Evidence for dilution of deep, confined ground water by vertical recharge of isotopically heavy Pleistocene water. *Geology* 19 (5), 433–436.
- Simmers, I., 1990. Aridity, groundwater recharge and water resources management. In: Lerner, D.N., Issar, A.S., Simmers, I. (Eds.), *Groundwater recharge—A guide to understanding and estimating natural recharge*. International contribution to hydrogeology 8. Verlag Heinz Heise, Hannover, Germany, pp. 3–20.
- Sklash, M.G., Farvolden, R.N., 1979. The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrol.* 43, 45–65.
- Smart, C.C., 2005. Errors and technique in fluorescent dye tracing. In: Beck, B.F. (Ed.), *Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst*. Geotechnical special publication 144, American Society of Civil Engineers, Reston, pp. 500–509.
- Solomon, D.K., Sudicky, E.A., 1991. Tritium and helium-3 isotope ratios for direct estimation of spatial variations in ground-water recharge. *Water Resour. Res.* 27 (9), 2309–2319.
- Solomon, D.K., Schiff, S.L., Poreda, R.J., Clarke, W.B., 1993. A validation of the  $^3\text{H}/^3\text{He}$  method for determining groundwater recharge. *Water Resour. Res.* 29 (9), 2951–2962.
- Stichler, W., Trimborn, P., Maloszewski, P., Rank, D., Papesch, W., Reichert, B., 1997. Environmental isotope investigations. In: Kranjc, A. (Ed.), *Karst hydrogeological investigations in south-western Slovenia*. *Acta Carsologica* vol. 26, no. 1, 213–236.
- Trček, B., 1997. Carbon isotopic composition of groundwater from Trnovsko-banjska plateau. Master's thesis University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia.
- Trček, B., 2003. Epikarst zone and the karst aquifer behaviour: A case study of the Hubelj catchment, Slovenia. *Geološki zavod Slovenije*, Ljubljana, Slovenia.
- Trček, B., 2007. How can the epikarst zone influence the karst aquifer hydraulic behaviour? *Env. Geol.* 51 (5), 761–765.

- Trcek, B., 2008. Flow and solute transport monitoring in the karst aquifer in SW Slovenia. *Env. Geol.* 55 (2), 269–276.
- Trcek, B., Veselic ˇ, M., Pezdic ˇ, J., 2006. The vulnerability of karst springs—A case study of the Hubelj spring (SW Slovenia). *Env. Geol.* 49 (6), 865–874.
- Urbanc, J., Trc ˇek, B., Pezdic ˇ, J., Lojen, S., 1997. Dissolved inorganic carbon isotope composition of waters. In: Kranjc, A. (Ed.), *Karst hydrogeological investigations in south-western Slovenia. Acta Carsologica* vol. 26, no. 1, 236–256.
- Zhou, W., Beck, B.F., Pettit, A.J., Stephenson, B.J., 2002. A groundwater tracing investigation as an aid of locating groundwater monitoring stations on the Mitchell Plain of southern Indiana. *Env. Geol.* 41 (7), 842–851.
- Zojer, H., Ramspacher, P., Fank, J., 1991. Die kombinierte Lysimeteranlage Wagna. In: *Proceedings Lysimetertagung, Art der Sickerwassergewinnung und Ergebnisinterpretation. BAL-Bundesanstalt fur alpenlandische Landwirtschaft, Gumpenstein*, pp. 55–62.

# هيدروغراف تصريف الينابيع

## ٤-١ مقدمة

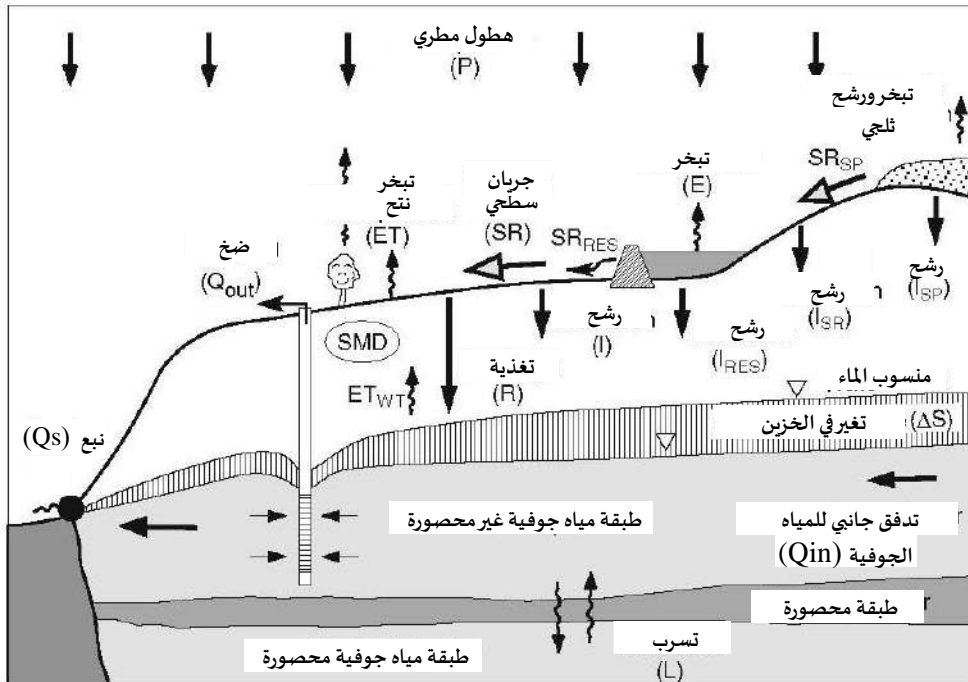
إن هيدروغراف تصريف النبع هو النتيجة النهائية للعمليات المختلفة التي تحكم تحويل هطول الأمطار ومدخلات المياه الأخرى في منطقة المستجمع إلى ناتج واحد في النبع. في كثير من الحالات، يشبه هيدروغراف تصريف النبع إلى حد كبير هيدروغراف الجداول السطحية، خاصة إذا كانت طبقة المياه الجوفية غير محصورة وتتفاعل بسرعة نسبياً مع مدخلات المياه. الينابيع التي تتدفق من طبقات المياه الكارستية والمتشقة بشدة هي أمثلة نموذجية - يمكن أن يزداد تصريفها عدة مرات أو عده اضعاف من حيث الحجم في غضون ساعات بعد هطول أمطار غزيرة. وفي المقابل توجد ينابيع عميقة صاعدة (غالباً ما تكون حرارية) معزولة عن التأثير المباشر للعمليات السطحية، مثل رشح الأمطار وتظهر فقط تغيرات موسمية طفيفة ومتأخرة في خصائص التصريف. يوضح الشكل ٤-١ عدداً من المكونات المحتملة لميزانية نبع مياه والتي قد تؤثر بدرجات متفاوتة على تكوين هيدروغراف تصريف مياه النبع وإنتاجيته (QS). تنص ميزانية المياه على أن معدل التغير في المياه المخزنة في منطقة ما، مثل منطقة تصريف النبع ("مستجمع النبع")، يتوازن مع معدل تدفق المياه من وإلى المنطقة:

$$(4.1) \quad \text{التغير في المخزون} = \text{مدخلات المياه} - \text{مخرجات المياه}$$

يمكن كتابة معادلات ميزانية المياه بدلالة الأحجام (لفترة زمنية محددة)، والتدفقات (الحجم لكل الزمن، مثل متر مكعب في اليوم)، وكثافة التدفق (الحجم لكل وحدة مساحة من سطح الأرض لكل زمن، مثل ملليمتر في اليوم). القاسم المشترك بين معظم مكونات ميزانية المياه هو أنه لا يمكن قياسها مباشرة ولكن يتم تقديرها من قياسات الكميات ذات الصلة (البارامترات) وتقديرات المكونات الأخرى. الاستثناءات هي القياسات المباشرة لإجمالي هطول الأمطار، وتدفقات الجداول، ومعدلات تصريف النبع، ومعدلات ضخ الآبار.

ومن الكميات المهمة الأخرى التي يمكن قياسها مباشرة واستخدامها في حسابات ميزانية المياه كجزء من معادلات متنوعة هي الرأس الهيدروليكي (مستوى المياه) لكل من المياه الجوفية والمياه السطحية ورطوبة التربة.

وغالباً ما يتم استخدام مصطلحات ميزانية المياه بالتبادل، مما يسبب الالتباس في بعض الأحيان. يصف مصطلح *الهطول/المطري* *الفعال* جزءاً من هطول الأمطار الذي يصل إلى الجداول السطحية عبر التدفق المباشر فوق الأرض أو التدفق القريب من السطح (التدفق الداخل). يصف *فائض هطول الأمطار* ذلك الجزء من هطول الأمطار الذي يولد جرياناً سطحياً ولا يتسرب إلى ما تحت السطح. في دراسات المياه الجوفية، يكون مصطلح *الهطول/المطري الفعال* أحياناً يستخدم لوصف الرش الفعلي، ولكن إذا تم استخدامه بهذه الطريقة، فيجب تعريفه بوضوح. بشكل عام، يشير *الرشح* إلى أي حركة مائية من سطح الأرض إلى ما تحت السطح. تسمى هذه المياه أحياناً *إعادة التغذية/المحتمة*، مما يشير إلى أن جزءاً منها فقط قد يصل في النهاية إلى منسوب المياه الجوفية (المنطقة المشبعة). يتم استخدام مصطلح *التغذية الفعلية* بشكل متزايد لتجنب أي لبس محتمل: إنه الجزء من المياه الراشحة التي تصل إلى طبقة المياه الجوفية، ويتم تأكيدها بناءً على دراسات المياه الجوفية. والتأكيد الأكثر وضوحاً على حدوث تغذية فعلية للمياه الجوفية هو ارتفاع منسوب المياه الجوفية (الرأس الهيدروليكي) وزيادة في معدل تصريف الينابيع.



الشكل ٤-١ عناصر ميزانية المياه في منطقة صرف الينابيع (مستجمعات الينابيع). الشرح في النص. (معدل من Kresic, 2009).

يشير *الرشح الفعال* (الصافي)، أو *الرشح العميق*، إلى حركة المياه تحت منطقة الجذر، وغالباً ما تكون مساوية للتغذية الفعلية. يشير مصطلح *الاعتراض* في الدراسات الهيدرولوجية إلى الجزء من هطول الأمطار الذي يعترضه الغطاء النباتي قبل أن يصل إلى سطح الأرض ولا يكون متاح للرشح أو الجريان السطحي. يستخدم مصطلح *صافي التغذية* للتمييز بين التدفقين التاليين للمياه: التغذية التي تصل إلى منسوب المياه الجوفية بسبب التدفق الرأسي الهابط من المنطقة الغير المشبعة والتبخر والنتج من منسوب المياه الجوفية، وهو تدفق تصاعدي ("التغذية السلبية"). تشير *التغذية المساحية* (أو المنتشرة) إلى التغذية المستمدة من هطول الأمطار والري التي تحدث بشكل منتظم إلى حد ما على مساحات واسعة، في حين تشير *التغذية المركزة* إلى فقدان المياه الراكدة (البرك) أو المياه السطحية المتدفقة (البرك) أو المياه السطحية المتدفقة (البلايا والبحيرات وأحواض التغذية والجداول الغارقة والفاقة) إلى تحت السطح (Kresic, 2009).

يعتمد التعقيد في تحديد ميزانية المياه على العديد من العوامل الطبيعية والبشرية المنشأ الموجودة في المنطقة محل الاهتمام، مثل الخصائص المناخية والهيدروغرافية والهيدرولوجية والجيولوجية والجيومورفولوجية، والخصائص الهيدرولوجية للتربة السطحية والوسط المسامي تحت سطحي، والغطاء الأرضي واستخدام الأراضي، ووجود وعمليات خزانات المياه السطحية الاصطناعية، وسحب المياه السطحية والجوفية للاستخدام الاستهلاكي والري، وإدارة مياه الصرف الصحي. فيما يلي بعض العلاقات بين المكونات الموضحة في الشكل ٤-١ والتي يمكن استخدامها في التحليل الكمي لتحليل ميزانية المياه الكمية لمثل هذا النظام:

$$I = P - SR - ET$$

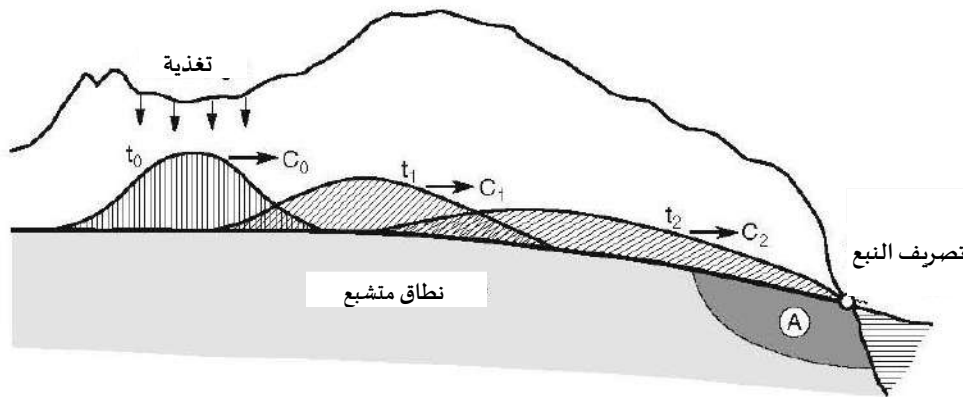
$$I = I_{SR} + I_{RES} + I_{SP}$$

$$R = 1 - SMD - ET_{WT} \quad (4.2)$$

$$Q_S = R + Q_{IN} + L - \Delta S - Q_{OUT}$$

حيث  $I$  هو الرشح بشكل عام، و  $SR$  هو الجريان السطحي للمياه السطحية، و  $ET$  هو التبخر والنتج، و  $ISR$  هو الرشح من الجريان السطحي (بما في ذلك الجريان السطحي) (بما في ذلك من الجريان السطحي والجريان المفقود)، و  $I_{RES}$  هو الرشح من خزانات المياه السطحية،  $I_{SP}$  هو الرشح من كتل الثلج والأنهار الجليدية،  $R$  هو تغذية المياه الجوفية،  $SMD$  هو عجز رطوبة التربة،  $ET_{WT}$  هو التبخر والنتج من منسوب المياه الجوفية،  $Q_S$  هو تصريف الينابيع  $Q_{IN}$  هو تدفق المياه الجوفية الجانبية إلى طبقة المياه الجوفية لتغذية النبع،  $L$  هو الرشح ذهاباً وإياباً بين طبقة المياه الجوفية الأساسية وطبقة المياه الجوفية،  $Q_{OUT}$  هو ضخ البئر من طبقة المياه الجوفية، و  $S$  هو التغير في تخزين طبقة المياه الجوفية. إذا كانت المنطقة مروية، فسيتم إضافة مكون آخر يضاف إلى القائمة: رشح مياه الري.

من الناحية المثالية، يجب تحديد معظم هذه العلاقات لتحديد العمليات التي تحكم ميزانية المياه في نظام المياه الجوفية الذي يغذي النبع، بما في ذلك كميات المياه المخزنة والمتدفقة بين ثلاثة خزانات عامة: المياه السطحية، ومنطقة التهوية، والمنطقة المشبعة. بشكل افتراضي، تؤدي التغيرات في أحد مكونات ميزانية المياه العديدة إلى "تفاعل متسلسل" وتؤثر على جميع المكونات الأخرى. تحدث هذه التغيرات بتأخير أكثر أو أقل، اعتماداً على كل من الحركة الفيزيائية الفعلية للمياه والخصائص الهيدروليكية للخزانات العامة الثلاثة. يوضح الشكل ٤-٢ كيف يمكن للتغذية الموضعية في جزء واحد من النظام أن تسبب استجابة سريعة في مكان بعيد، متبوعاً بتغير تدريجي أكثر بين مناطق التغذية والتصريف، حيث تبدأ المياه الراشحة حديثاً في التدفق عبر طبقة المياه الجوفية. ترجع الاستجابة السريعة إلى الانتشار الهيدروستاتيكي المسبق من خلال النظام، وفي هذا المثال بالتحديد، يوضح سلوك الشقوق والقنوات الكبيرة في طبقات المياه الجوفية الكارستية؛ تنطبق نفس الآلية، إلى حد ما، على أنواع طبقات المياه الجوفية الأخرى أيضاً. على أي حال، من المهم جداً النظر دائماً إلى أنظمة المياه الجوفية على أنها ديناميكية ومتغيرة باستمرار كما ناقشها [Healy et al., \(2007\)](#) وطبقوها على الينابيع، فإن فهم ميزانية المياه والعمليات الهيدرولوجية توفر أساساً لإدارة الينابيع بفعالية. يمكن استخدام التغيرات المرصودة في ميزانية مياه الينابيع مع مرور الوقت لتقييم آثار التقلبات المناخية والأنشطة البشرية على الموارد المائية المتاحة. تسمح المقارنة بين ميزانيات مياه الينابيع من مناطق مختلفة بتحديد تأثيرات العديد من العوامل مثل الجيولوجيا، والتربة، والغطاء النباتي، واستخدام الأراضي.

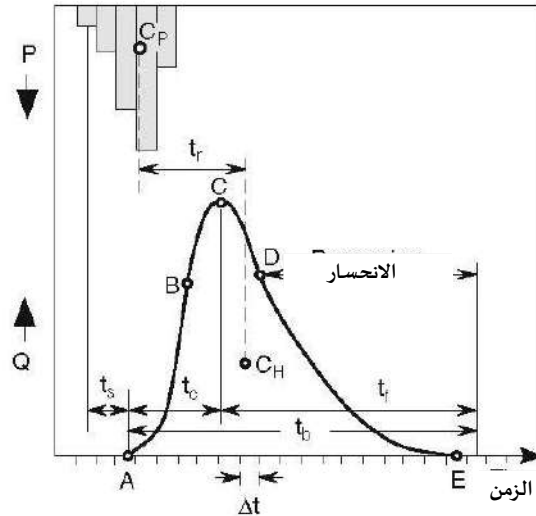


الشكل ٤-٢ تكوين وحركة "موجة" المياه الجوفية الناجمة عن حدث التغذية الموضعية. سرعة الموجة هي  $C_0$  عند الزمن  $t_0$ ، و  $C_1$  عند الزمن  $t_1$ ، و  $C_2$  عند الزمن  $t_2$ ، حيث  $C_0 > C_1 > C_2$  بسبب تناقص التدرجات الهيدروليكية.  $A$  هو حجم المياه "القديمة" التي تم تصريفها تحت الضغط في النبع بسبب حدث إعادة التغذية. (معدلة من [Yevjevich, 1981](#))

تؤثر الأنشطة البشرية على الهيدرولوجية الطبيعية بعدة طرق مثل التعديلات على الأرض لاستيعاب الزراعة، تركيب أنظمة الصرف والري، وتغيير معدلات التسرب والجريان السطحي والتبخروالنتح النباتي. وتؤدي المباني والطرق ومواقف السيارات في المناطق الحضرية إلى زيادة الجريان السطحي وتقليل الرشح. في الختام، يوفر تحليل ميزانية المياه وسيلة لتقييم توافر واستدامة إمدادات المياه.

كما ذكرنا سابقاً، فإن معدل تدفق النبع هو أحد عناصر ميزانية المياه القليلة التي يمكن قياسها بشكل مباشر. بالإضافة إلى ذلك، يوفر التحليل الشامل لهيدروغراف تصريف النبع معلومات مفيدة حول خصائص طبقة المياه الجوفية، مثل طبيعة تخزين ونفاذية المياه الجوفية وأنواع وكمية احتياطياتها.

على الرغم من اختلاف العمليات التي تولد هيدروغراف الينابيع والجداول السطحية، إلا أن هناك الكثير من التشابه بينهما، ومصطلحات الهيدروغراف متشابهة بينهما. يوضح الشكل ٣-٤ العناصر الرئيسية لهيدروجراف التصريف. يتم تحديد بداية التصريف بعد هطول الأمطار بالنقطة A، والزمن بين بداية هطول الأمطار وبداية التصريف، ويسمى زمن البدء، بالنقطة ts. والوقت الذي يرتفع فيه الخط الهيدروغرافي إلى أقصى حد له (النقطة C)، ويسمى زمن التركيز، tc. والوقت من الحد الأقصى للتصريف حتى نهاية الخط الهيدروغرافي، عندما يساوي التصريف نظرياً صفر (النقطة E)، هي زمن الهبوط، tf. يُطلق على زمن



الشكل ٣-٤ مكونات هيدروجراف التصريف (الشرح في النص).

التركيز وزمن الانخفاض معاً زمن الأساس للرسم البياني المائي،  $t_b$ . الزمن بين مركز حلقة الترسيب (CP) ومركز الرسم البياني المائي (CH) يسمى زمن التأخر،  $t_r$ . الفترة الزمنية لتسجيل كمية الهطول ومعدل التدفق عند النبع هي  $\Delta t$ . يُحدّد شكل الهيدروغراف من خلال قاعدته (AE)، والطرف الصاعد (AB)، والقمة (BCD)، والطرف الهابط (DE). الطرف الهابط (DE). يتوافق الطرف الهابط مع فترة الانحسار. B و C هما نقطتا انعطاف، حيث يغيّر منحني الهيدروغراف شكله من محدب إلى مقعر والعكس. بالنسبة للتيارات السطحية، النقطة D هي نهاية الجريان المباشر بعد هطول الأمطار. بشكل عام، يُطلق على الجزء من الخط الهيدروغرافي من النقطة D فصاعداً اسم منحني الانحسار.

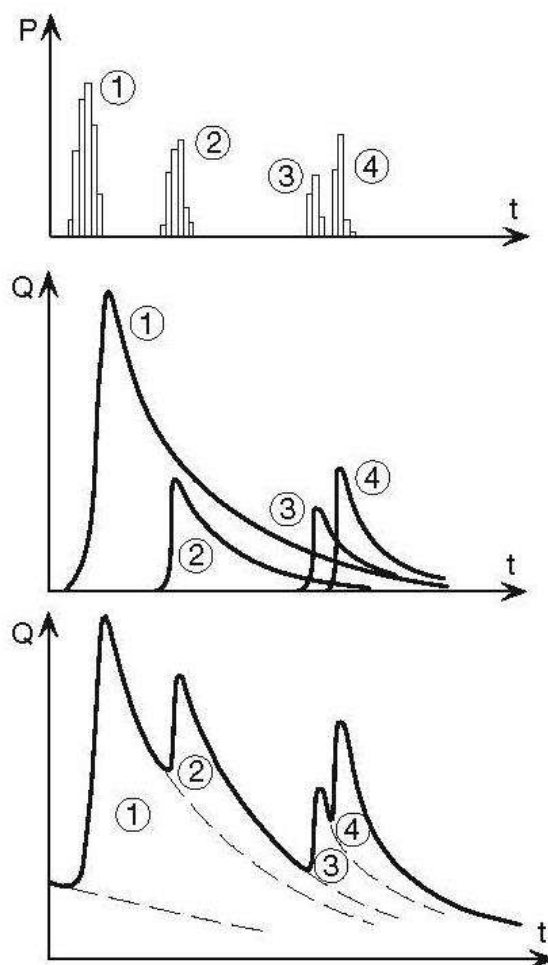
يعتمد شكل هيدروغراف التصريف على حجم وشكل منطقة التصريف، وكذلك على كثافة هطول الأمطار. عندما تستمر حلقة هطول الأمطار لفترة أطول وتكون كثافة الهطول أقل، يكون للهيدروغراف قاعدة زمنية أطول، والعكس صحيح: تتسبب العواصف القصيرة المكثفة في تكوين هيدروغرافي حاد ذي قواعد زمنية قصيرة. إن المساحة تحت الهيدروغراف هي حجم المياه المصروفة لفترة التسجيل. زمن التأخير أو تأخر استجابة النبع لمدخلات المياه وشكل الهيدروغراف هي مؤشرات أولية جيدة لسعة التغذية والخصائص الناقلة لطبقة المياه الجوفية التي تغذي النبع. في الواقع، ما لم يكن النبع أو المجرى السطحي متقطعاً، فإن الهيدروغراف المسجل يكون له شكل أكثر تعقيداً يعكس تأثير هطول الأمطار السابقة ومدخلات المياه المحتملة الأخرى. تتشكل هذه الرسوم البيانية المائية من خلال تراكب هيدروغراف واحد يتوافق مع أحداث هطول الأمطار المنفصلة (الشكل ٤-٤) ومدخلات مائية أخرى، مثل وصول المياه من مجرى مائي غارق.

يختلف تأثير المياه الراشحة حديثاً على تصريف الينابيع باختلاف النوع السائد من المسامية ومرحلة منسوب المياه الجوفية. على أي حال، فإن رد الفعل الأول للصخور الكارستية المتشققة المنفذة وبعض طبقات المياه الجوفية البازلتية الحديثة للتغذية، في معظم الحالات، هو نتيجة لانتشار الضغط من خلال القنوات الكارستية والشقوق الكبيرة وليس تدفق المياه الراشحة حديثاً (انظر الشكل ٤-٢).

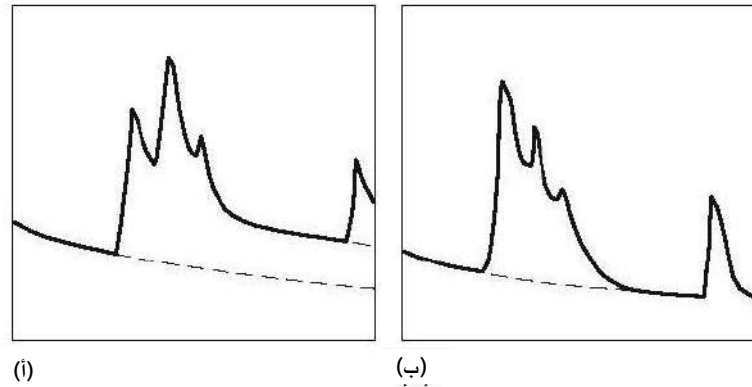
تصل المياه الحديثة إلى النبع بتأخير معين وتكون مساهمتها جزءاً بسيطاً من التدفق الكلي. بعد انتهاء حلقة إعادة التغذية والاستجابة الأولية للنظام، قد تحدث حالتان كما هو موضح في الشكل ٤-٥: (١) زيادة في حجم المياه الجوفية المتراكمة في الخزان، وهو ما ينعكس في تحول منحني الانحسار إلى مستوى هيدروغرافي أعلى، و (٢) انتقال المياه الجديدة في الغالب من خلال شبكة متطورة من الشقوق والممرات أو القنوات الكارستية، ويتم تصريفها دون تراكم ملحوظ للمياه الجوفية في مسامية الأرضية المحيطة. يستمر منحني الانحسار على نفس الخط الاستقرائي كما كان قبل هطول الأمطار.

تتميز الحالة الأولى بفترات التغذية الرئيسية لطبقة المياه الجوفية، على سبيل المثال، من مارس حتى يونيو في المناخات المعتدلة: يكون كل من مستوى المياه الجوفية ومحتوى الرطوبة في المنطقة غير المشبعة مرتفعاً، بينما يكون فقدان التبخر والنتج قليلاً مقارنة بالفترات الأخرى من السنة. المياه الراشحة حديثاً ترفع الرأس الهيدروليكي المرتفع بالفعل (الضغط)، ويتم حقن المياه الجوفية بسهولة أكبر في مسامية طبقة المياه الجوفية والشقوق الضيقة، بما في ذلك من القنوات. وخلال فترة الصيف - الخريف، تنخفض

الرؤوس والتدرجات الهيدروليكية ، وتنتقل المياه الراشحة حديثاً من العواصف الصيفية بسرعة من خلال شقوق وقنوات كبيرة متصلة بشكل جيد. قد تشير هذه الحالة الثانية أيضاً إلى عدم وجود مسامية بينية أو مسامية شقوق كبيرة في طبقة المياه الجوفية (Kresic, 1997, 2007).



الشكل ٤-٤ هيدروجراف التصريف المركب (في الأسفل) المكون من هيدروجراف واحد (في الوسط) نتيجة عدة أحداث هطول الأمطار (في الأعلى). (معدّل من Yevjevich, 1956).

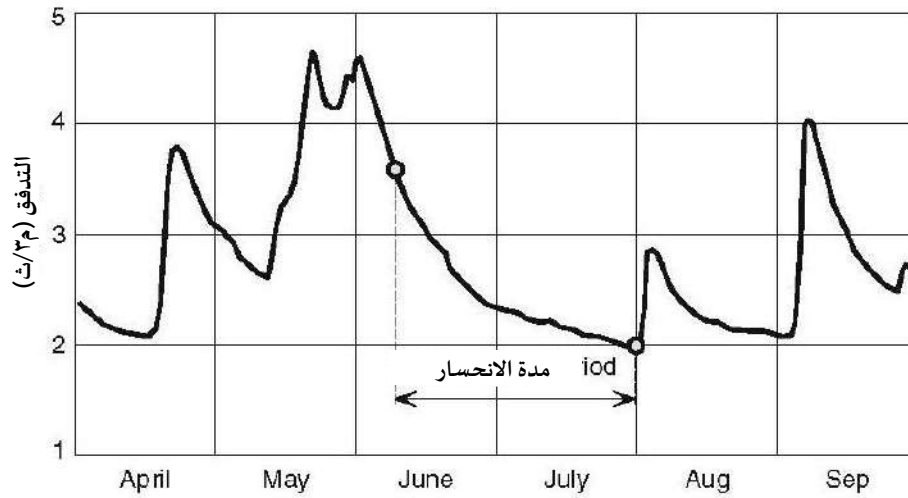


الشكل ٤-٥ رد الفعل المحتمل لطبقات المياه الجوفية على مدخلات المياه (مثل رشح الأمطار) كما يظهر من هيدروغراف تصريف النبع: (أ) رفع التدفق الأساسي إلى مستوى هيدروغراف أعلى بسبب زيادة التخزين، (ب) تصريف مع بدون زيادة في التخزين. (من Kresic, 2007).

## ٤-٢ معادلات تصريف الانحدار

تحليل طرف الهيدروغراف الهابط الموضح في الشكل ٤-٦، والذي يتوافق مع فترة لا يوجد فيها هطول الأمطار، يسمى تحليل الانحسار. مع العلم أن تصريف النبع يخلو من الاضطرابات الناجمة عن التدفق السريع للمياه الحديثة إلى طبقة المياه الجوفية، فإن تحليل الانحسار يوفر نظرة ثاقبة جيدة على بنية طبقة المياه الجوفية. من خلال إنشاء علاقة رياضية مناسبة بين تصريف النبع والوقت، فمن الممكن التنبؤ بمعدل التصريف بعد فترة معينة دون هطول الأمطار وحساب حجم المياه المصروفة. ولهذه الأسباب، كان تحليل الانحسار طريقة كمية شائعة في تحليل تصريف مياه الينابيع لفترة طويلة.

من النادر وجود ظروف الانحسار المثالية - فترة طويلة من عدة أشهر دون هطول الأمطار - في المناخات المعتدلة والرطبة. وبالتالي، يمكن أن يتسبب هطول الأمطار المتكرر في حدوث اضطرابات مختلفة في منحنى الركود التي قد لا يمكن إزالتها بشكل واضح أثناء التحليل. لذلك من المستحسن تحليل أكبر عدد ممكن من منحنيات الركود من سنوات مختلفة قدر الإمكان. تسمح العينات الأكبر حجمًا باشتقاق متوسط منحنى الانحسار بالإضافة إلى غلاف الحد الأدنى (الشكل ٤-٧)، مما يتيح تحديدًا أكثر دقة للتصريف الأدنى المتوقع على المدى الطويل.

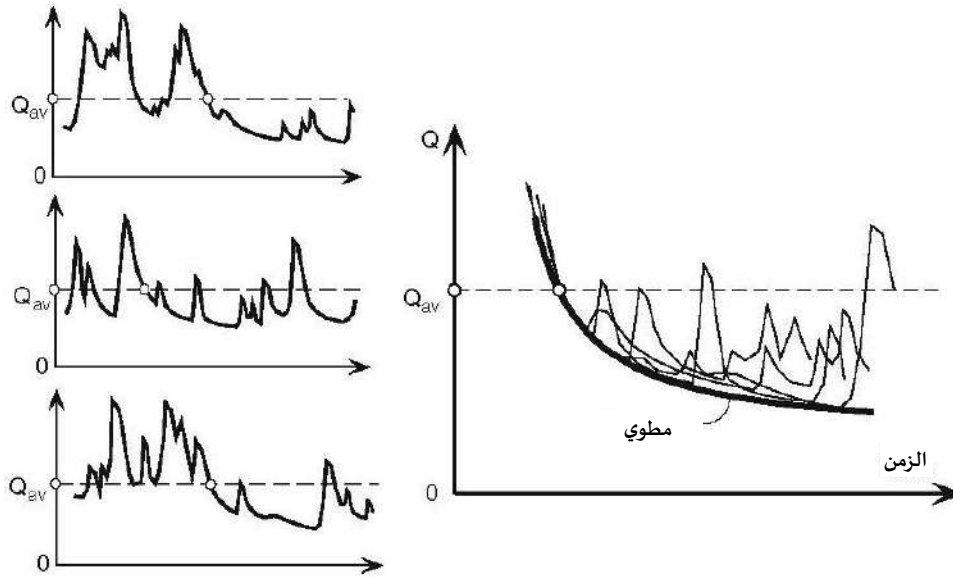


الشكل ٦-٤ هيدروجراف تصريف النبع مع فترة انحسار. (من Kresic, 2007).

### ٣-٤ فصل مكونات التصريف

إن خصائص هيدروجراف تصريف النبع، إلى جانب الرصد المتكرر للتركيب الكيميائي والفيزيائي للمياه كدالة للوقت، يمكن أن يوفر في كثير من الأحيان نظرة ثاقبة حول منشأ المياه وزمن بقائها، وآليات تغذية طبقة المياه الجوفية، وهيدروليكيات توليد التدفق المائي في كل من المناطق غير المشبعة والمشبعة. وكما هو موضح في الفصلين ٣ و ٦، فإن مختلف النظائر البيئية والاصطناعية بالإضافة إلى المكونات الكيميائية للمياه الجوفية مثل الأنيونات الرئيسية والكاتيونات والتوصيلية، يمكن استخدامها لرسم المخططات الكيميائية وتقييم العمليات التي تؤدي إلى تصريف الينابيع. وكما هو في الفصل ٦، إن الينابيع التي تصب في طبقات المياه الجوفية الكربونية الكارستية هي أفضل المرشحين لمثل هذا النهج، على عكس الينابيع التي تصب من الصخور غير الكربونية، والتي عادةً ما يكون لديها تباين ضئيل في تركيز المكونات الذاتية.

كما تمت مناقشته في هذا الكتاب، فإن طبقات المياه الجوفية الكارستية لها مسامية ثلاثية فريدة من نوعها، مما يؤدي إلى نوعين رئيسيين من تدفق المياه الجوفية: ما يسمى بالتدفق البطيء المنتشر أو القاعدي والتدفق السريع للمجرى (Atkinson, 1977). ومع ذلك، تختلف النسب المئوية لهذين المكونين في هيدروجرافيا الينابيع الكارستية اختلافاً كبيراً نتيجة العديد من المدخلات المائية



الشكل ٤-٧ ثلاثة خطوط هيدروغرافية للتصريف السنوي مع تراكب منحنيات الانحسار الرئيسية عند نقطة متوسط معدل التصريف. تتصل الحدود الدنيا على المنحنيات الثلاثة المتراكبة بالمغلف الذي يمثل انحسارًا طويل الأجل. (من Kresic, 2007).

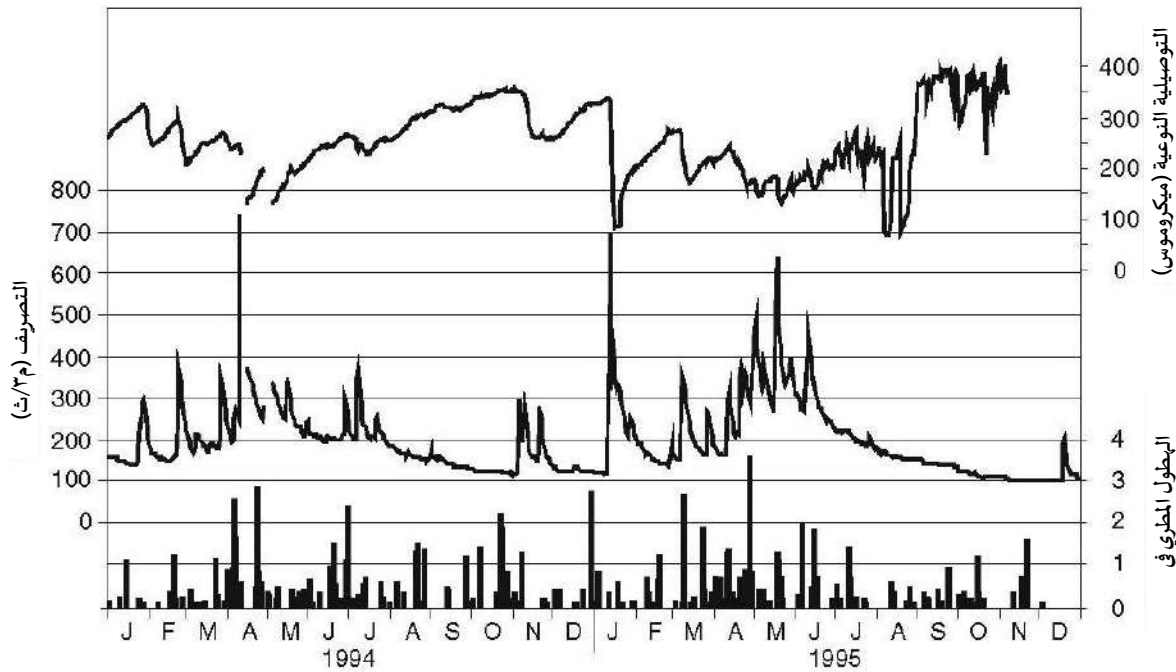
كما تمت مناقشته في هذا الكتاب، فإن طبقات المياه الجوفية الكارستية لها مسامية ثلاثية فريدة من نوعها، مما يؤدي إلى نوعين رئيسيين من تدفق المياه الجوفية: ما يسمى بالتدفق البطيء المنتشر أو القاعدي والتدفق السريع للمجرى (Atkinson, 1977). ومع ذلك، تختلف النسب المئوية لهذين المكونين في هيدروجرافيا الينابيع الكارستية اختلافًا كبيرًا نتيجة العديد من المدخلات المائية المحتملة والخصائص المختلفة لطبقة المياه الجوفية الكارستية. ووجود التيارات الغاطسة وتغذية طبقة المياه الجوفية (الشكل ٨-٤)، وأنظمة القنوات التشعبية الواسعة النطاق، والمسامية العالية للأرضية يمكن أن تنتج مخططات كيميائية وهيدروغرافية معقدة ذات قمم متعددة، بعضها يظهر استجابة سريعة لهطول الأمطار وبعضها يظهر تأخيرات طويلة. لذلك قد يكون الفصل بين هذه الهيدروغرافيا غامضًا تمامًا دون إجراء تحريات ميدانية شاملة للنظام. على سبيل المثال، يوضح الشكل ٩-٤ كيفية ان نفس النبع يتفاعل بشكل مختلف تمامًا في عامين متتاليين، مع وجود فترات متشابهة من التغذية الرئيسية خلال النصف الأول من العام، تلها فترات انحسار طويلة من يونيو-يوليو إلى أكتوبر. يقدم Vandike, (1996) مناقشة مفصلة للغاية حول هطول الأمطار ونوبات التغذية المسجلة في مختلف محطات القياس في منطقة تصريف النبع وما يقابلها من تغيرات في هيدروجرافيا النبع والمخططات الكيميائية. يعتبر منبع نبع ماراميك، خامس أكبر نبع في ميسوري، عبارة عن فتحة كهف تم تطويرها في أسفل جاسكوناد دولوميت السفلى. وقد أظهر الغوص في الكهوف أن القناة التي توجه المياه إلى النبع تصل إلى أعماق ١٩٠ قدم على الأقل تحت ارتفاع البركة. يتفاوت تصريف نبع ماراميك من مستوى منخفض يبلغ حوالي ٥٦ قدم<sup>٣</sup> / ثانية إلى أكثر من ١١٠٠ قدم<sup>٣</sup> / ثانية، ويبلغ متوسطه حوالي ١٥٥ قدم<sup>٣</sup> / ثانية (Vandike, 1996).



الشكل ٤-٩ نهر راک، وهو نهر دائم الغرق عند مدخل كهف تالكالکا في الکارست الکلاسیکی في سلوفینیا.

يُظهر تتبع الصبغة أن نبع ماراميك يتغذى من مسافة ٣١٠ ميل غرب وجنوب النبع في مستجمعات مياه "دراي فورك" و "نورمان كريك" و "أشرهولو". يتم تصريف جميع مستجمعات هذه عن طريق فقدان الجداول التي توجه جزءاً كبيراً من جريانها السطحي إلى ما تحت السطح. تظهر بيانات هطول الأمطار على مدار الساعة التي تم جمعها في أربعة مواقع في مستجمعات مياه دراي فورك، جنوباً إلى جنب مع بيانات التصريف والتوصيلية النوعية التي تم جمعها في كل ساعة في مواقع بنبع ماراميك أن التصريف في النبع يبدأ في الزيادة بعد أربع إلى ست ساعات من بدء الهطول المطري. ويبدو أن زمن الاستجابة يكون أكبر خلال الطقس الجاف نسبياً وأقل خلال الطقس الرطب، عندما تكون رطوبة التربة السابقة عالية. ترجع الزيادة السريعة في تصريف نبع ماراميك إلى زيادة في رأس الضغط في النظام الكارستي مع زيادة ارتفاع منسوب المياه الجوفية في منطقة التغذية. لا تبدأ المياه الفعلية التي توفرها التغذية في الوصول إلى النبع لعدة أيام، وعادةً ما تصل مركز كتلة التغذية إلى النبع بعد ١٢ إلى ١٥ يوماً من هطول الأمطار الغزيرة (Vandike, 1996).

يستند الفصل الهيدروكيميائي لهيدروغراف تصريف الينابيع على افتراض أن تركيب المياه الداخلة إلى الخزان الجوفي تختلف اختلافاً كبيراً عن تلك الموجودة فيه بالفعل. عندما تحدث التغذية بالمطر، فمن الواضح أن تركيز معظم الكاتيونات التي تميز المياه



الشكل ٩-٤ متوسط التصريف اليومي والتوصيلية النوعية في نبع ماراميك، والتهطل اليومي في منطقة رولا-، ١٩٩٤-١٩٩٥. (معدلة من Vandike, 1996).

الجوفية، مثل الكالسيوم والمغنيسيوم، أقل بكثير في مياه الأمطار. الافتراضات الإضافية لتطبيق هذه الطريقة هي (بعد Dreiss, 1989):

- أن يكون تركيز المكونات الكيميائية في مياه الأمطار المختارة للرصد موحداً في المنطقة والوقت.
- تكون التركيزات المناظرة في مياه ما قبل العاصفة منتظمة في منطقة طبقة المياه الجوفية النشطة والوقت.
- تكون تأثيرات العمليات الأخرى في الدورة الهيدرولوجية أثناء حدث هطول الأمطار، بما في ذلك التغذية بواسطة المياه السطحية، ضئيلة.
- لا تتغير تركيزات المكونات وانتقالها بسبب التفاعلات الكيميائية في طبقة المياه الجوفية.

يفترض الشرط الأخير حدوث انحلال طفيف لصخور الكربونات أثناء تدفق المياه الحديثة عبر الوسط المسامي. يوضح الشكل ١٠-٤ أن الافتراضين الأولين فيما يتعلق بأيون الكالسيوم مقبولان؛ حيث ينخفض تركيزه في مياه الينابيع بسرعة بعد هطول الأمطار الغزيرة التي تسبب زيادة في معدل التصريف. بافتراض وجود خلط بسيط لمياه طبقة المياه الجوفية القديمة ( $Q_{old}$ ) ومياه الأمطار الرشاحة حديثاً ( $Q_{new}$ )، فإن إجمالي التصريف المسجل للنبع هو مجموع الاثنين (بعد Dreiss, 1989):

$$Q_{total} = Q_{old} + Q_{new} \quad (4.3)$$

إذا كانت التفاعلات الكيميائية في طبقة المياه الجوفية لا تسبب تغيرات كبيرة وسريعة في تركيز أيونات الكالسيوم في مياه الأمطار الراشحة (وهو ما ينطبق غالباً على طبقة المياه الكارستية غير المحصورة والمياه الجوفية المتشققة بشدة). حيث تكون سرعة التدفق عالية، يكون توازن أيونات الكالسيوم في مياه الينابيع:

$$Q_{total} \times C_{total} = Q_{old} \times C_{old} + Q_{new} \times C_{new} \quad (4.4)$$

حيث

$Q_{total}$  هو التصريف المسجل للنبع.

$C_{total}$  هو التركيز المسجل لأيون الكالسيوم في مياه النبع.

$Q_{old}$  هو جزء من تدفق النبع المنسوب إلى المياه "القديمة" (أي المياه الموجودة بالفعل في طبقة المياه الجوفية قبل هطول الأمطار).

$C_{old}$  هو التركيز المسجل لأيون الكالسيوم في مياه النبع قبل هطول الأمطار.

$Q_{new}$  هو الجزء من تدفق النبع المنسوب إلى المياه الحديثة.

$C_{new}$  هو تركيز أيون الكالسيوم في المياه الحديثة.

إذا كان  $C_{new}$  أصغر بكثير من  $C_{old}$  (وهو الصحيح في هذه الحالة، لأن تركيز أيون الكالسيوم في مياه الأمطار عادة ما يكون أقل من ٥ ملغم/لتر)، فإن كتلة أيون الكالسيوم المدخلة صغيرة نسبياً مقارنة بكتلته في مياه الخزان الجوفي القديم:

$$Q_{old} \times C_{old} \gg Q_{new} \times C_{new} \quad (4.5)$$

من المعادلة (٤,٥)، يتربط على ذلك، بعد استبعاد كتلة المدخلات (الصغيرة)، أن

$$Q_{old} = \frac{Q_{total} \times C_{total}}{C_{old}} \quad (4.6)$$

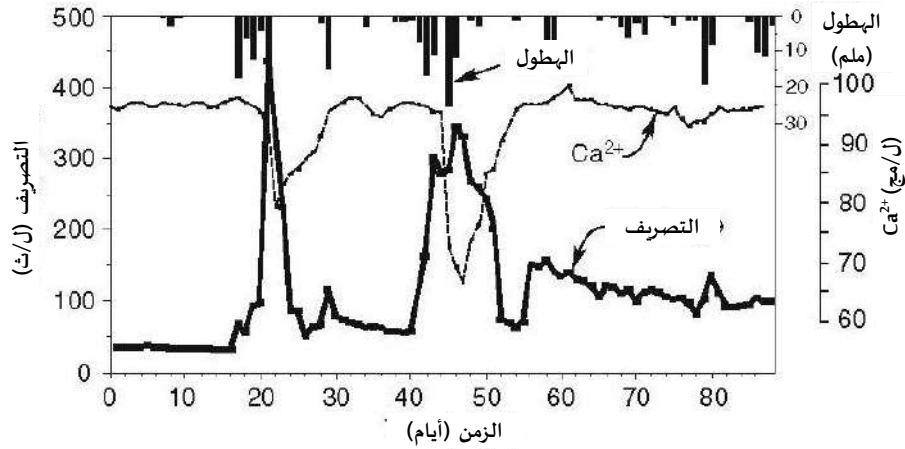
بدمج المعادلتين (٤,٤) و (٤,٦) نحصل على

$$Q_{new} = Q_{total} = \frac{Q_{total} \times C_{total}}{C_{old}} \quad (4.7)$$

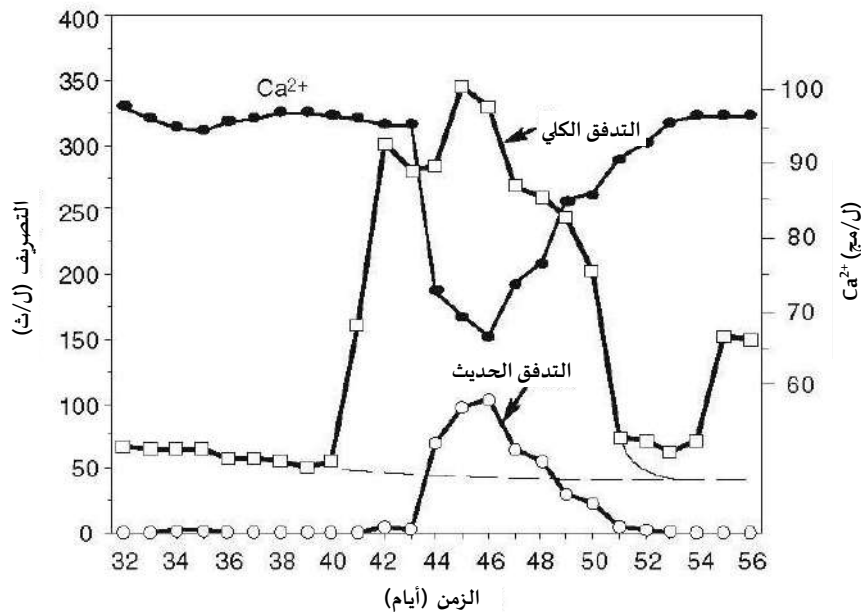
بتطبيق المعادلة (٤,٣)، يمكن تقدير مكوّن التصريف الناتج عن تدفق مياه الأمطار الحديثة إذا تم إجراء تسجيلات تصريف النبع والرصد الهيدروكيميائي المستمر قبل وأثناء وبعد حدث العاصفة.

بعد يوم واحد من الزيادة الكبيرة في معدل التدفق، بدأت كمية ضئيلة فقط من المياه الحديثة في التصريف في النبع. هذا التأخر هو ثلاثة أيام لأول زيادة كبيرة في تصريف المياه الحديثة. والفارق الزمني بين الحد الأقصى لتصريف مياه النبع والحد الأقصى لتصريف المياه الحديثة مرة أخرى يوم واحد. توقفت المياه الحديثة من التصريف في النبع بعد ١٤ يوماً من بدء هطول الأمطار مما

يؤثر على معدل التدفق الكلي. المياه الحديثة ساهمت بنسبة ١٨,٣% فقط في زيادة التدفق الكلي في النبع. النسبة المئوية للمياه الحديثة في إجمالي تصريف النبع لفترة ١٤ يومًا هي ١٤,٦ في المائة (Kresic, 2007).



الشكل ٤-١٠ هيدروجراف تصريف النبع، وكيموغراف الكالسيوم، وهطول الأمطار في منطقة تصريف النبع. (من Kresic, 2007)



الشكل ٤-١١ فصل هيدروجراف النبع إلى مكونات التدفق المجرى ومكونات التدفق المنتشر، أي هطول الأمطار الجديدة ومياه ما قبل هطول الأمطار، على التوالي. (معدل من Kresic, 2007).

إن فهم وقياس مكونات التدفق المختلفة في تصريف الينابيع أمر مهم جداً من أجل الإدارة الشاملة للينابيع واستخدامها وحمايتها، كما يتضح من الأمثلة العديدة التالية. تعتبر النتائج التي توصل إليها [Desmarais and Rojstaczer \(2002\)](#) نموذجية للينابيع السريعة التي يهيمن عليها تدفق القنوات السريع التصريف بدون تأخير وبدون تأثير كبير لغطاء التربة أو تخزين الأرضية. في البداية، تبلغ ذروة التصريف من نبع مايناردفيل لايمستون في وادي بيركريك، تينيسي، من ساعة إلى ساعتين تقريباً في منتصف العواصف الصيفية. ومن المحتمل أن تكون هذه الذروة الأولية ناتجة عن التحميل السطحي، مما يؤدي إلى ضغط طبقة المياه الجوفية ويؤدي إلى خروج المياه من المخزون. جميع العواصف التي تم رصدها أظهرت انحسار تابع لمنحنى الانحسار الرئيسي بشكل وثيق للغاية، مما يشير إلى أن استجابة العاصفة متسقة ومتكررة إلى حد ما وقابلة للتكرار، بغض النظر عن الوقت بين العواصف وتكوين الحدث المطري نفسه. تزداد الموصلية الكهربائية في البداية لمدة تتراوح بين ٠,٥ و ٢,٩ يوم (أطول للعواصف الأصغر)، نتيجة نقل المياه القديمة من المخزون. ويتبع ذلك انخفاض في الموصلية الكهربائية لمدة تتراوح بين ٢,٥ و ١,٥ يوم، نتيجة زيادة جزء من مياه التغذية منخفضة التوصيل التي تدخل النبع. بيانات نظائر الكربون المستقرة ومؤشر تشبع الكالسيت لمياه الينابيع يدعمان أيضاً هذا النموذج المفاهيمي. إن تدفق النبع بعد التغذية يتحكم إلى حد كبير بالمياه النازحة من طبقة المياه الجوفية بدلاً من التغذية المباشرة من خلال منطقة التربة.

تم شرح استجابة طبقة المياه الجوفية الكارستية لأحداث الحد في تصريف النبع من قبل [Herman, Toran, and White, \(2008\)](#) ، الذين قاموا بتحليل آثار ثلاثة أعاصير كبرى، فرانسييس وإيفان وجين، التي اجتاحت شرق الولايات المتحدة من ساحل الخليج وجلبت كميات كبيرة من الأمطار إلى وسط بنسلفانيا. رصدت معدات الرصد الموجودة في آرتش سبرينغ بمقاطعة بلير في بنسلفانيا آثار هذه العواصف على تدفق الينابيع الكارستية. كشفت هذه العواصف مجتمعة عن حد كمي للقدرة الاستيعابية لنظام القناة. وكانت عاصفة إيفان عاصفة أكثر تدميراً للمنطقة، لأن الأمطار هطلت على الأرض المشبعة بالفعل من قبل عاصفة فرانسييس، لكن زيادة التصريف الصافية في النبع كانت أكبر خلال عاصفة فرانسييس السابقة. تم تحويل مياه العواصف التي لم يتم نقلها عبر نظام نبع القوس إلى القنوات السطحية خلال هذه العواصف. كشفت الرواسب العالقة التي تم جمعها بواسطة جهاز أخذ العينات الأوتوماتيكي خلال فرانسييس أن عتبة أخرى تم تجاوزها. وبالتزامن مع زيادة التصريف والمياه عالية التوصيل، فإن الحد الأقصى للرواسب العالقة (٩٣٣ ملغم/لتر) تجاوزت التدفقات السابقة بمقدار من حيث الحجم. يشير توقيت نبضات الرواسب إلى أن تركيزات الرواسب العالية لا تحدث فقط عندما تصل مياه العاصفة إلى النبع ولكن أيضاً عند تدفق المياه المخزنة خارج نظام الينابيع الكارستية. كما أن الرواسب التي ترسبت سابقاً في نظام القناة لا تندفع إلا عند حدوث تدفقات كافية، مما يشير إلى أن انتقال الرواسب في الكارست يتميز بالعتبات وهو عملية غير خطية بقوة ([Herman et al., 2008](#)).

يقارن [Boyer and Kuczynska \(2003\)](#) التباين الزمني في تدفق بكتيريا القولون البرازية في العواصف وكثافتها وكثافة الكريبتوسبورديوم البارفيديوم في المياه الجوفية الكارستية المتأثرة بالزراعة. كما أكد المؤلفون أن انتقال الأمراض في المياه الجوفية هو موضوع يثير قلقاً كبيراً لدى الوكالات الحكومية والمتخصصين في المياه الجوفية وعامة الناس. وقد تراوحت معدلات

انتشار الكريبتوسبورديوم بارفيديوم من ٠ إلى ١٠٥٠ كيس/لتر، وتراوح كثافات العاصفة المتوسطة من ٣,٥ إلى ١٥٦,٨ كيس/لتر. وتراوح الكثافات القولونية البرازية من أقل من ١ وحدة من الكيسات القولونية/١٠٠ مل إلى أكثر من ٤٠,٠٠٠ وحدة من الكيسات القولونية/١٠٠ مل. وتراوح المتوسط الهندسي لكثافة العاصفة من ١,٧ وحدة مغذية لكل ١٠٠ مل إلى أكثر من ٧٠٠ وحدة مغذية لكل ١٠٠ مل. ارتبطت الكثافات القولونية البرازية بشكل جيد مع التدفق أثناء العواصف، لكن كثافة الكريبتوسبورديوم اظهرت قدرًا كبيرًا من التباين من عينة إلى أخرى ولم تكن مرتبطة بالتدفق. لم ترتبط كثافات القولونيات البرازية بشكل إيجابي مع كثافة الكريبتوسبورديوم. كانت كثافة القولونيات البرازية أكبر في ذروة العواصف، عندما كانت أحمال الرواسب أكبر أيضاً. كما خلص المؤلفون إلى أن آليات النقل المتعددة للبكتيريا القولونية البرازية والكيسات البيضوية البكتيرية البرازية تستلزم العديد من آليات إدارة الأراضي الزراعية وممارسات الحفاظ على الصحة للسيطرة على حركة مسببات الأمراض إلى المياه الجوفية الكارستية.

قام **Goeppert and Goldscheider (2008)** بدراسة انتقال المذاب والغرويات في طبقات المياه الجوفية الكارستية تحت ظروف التدفقات العالية والمنخفضة باستخدام اختبارات التتبع باستخدام الأصباغ الفلورية (اليورانين)، والكريات المجهرية بحجم البكتيريا (١ مم) وكيسات الكريبتوسبورديوم (٥ مم)، والتي تم حقنها في مجرى مائي كهفي وأخذ عينات منها من نبع على بعد ٢,٥ كم. كانت منحنيات اختراق اليورانيوم (BTCs) منتظمة الشكل و اقترنت نسبة الاسترداد من ١٠٠ في المائة. تم نمذجة كرات BTCs تحليليًا باستخدام نموذج تقليدي للحمل الحراري والتشتت ونموذج عدم التوازن ثنائي المنطقة. أظهرت النتائج أن (١) الغرويات تنتقل بسرعات أعلى من المواد المذابة أثناء التدفق المنخفض، (٢) الغرويات والمواد المذابة تنتقل بسرعات متشابهة أثناء التدفق العالي، و(٣) تحدث تركيزات قصوى أعلى أثناء التدفق العالي.

#### ٤-٤ احتمال تدفقات الينابيع

دائماً ما يتضمن تحليل هيدروغراف النبع تحديد البارامترات الإحصائية العامة للسلاسل الزمنية، مثل متوسط التدفقات وأدناها وأقصاها لفترة التسجيل؛ والانحراف المعياري (التباين) للتدفقات؛ ومعامل التباين؛ ومنحنيات مدة التدفق؛ وتكرار التدفقات المميزة عند الحد الأدنى. ولسوء الحظ، في معظم الحالات الواقعية، يكون للنبع قيد الدراسة فترات قصيرة نسبياً لمرآة التدفق على فترات غير منتظمة. هذه الحقيقة البسيطة قد تمنع أي تحليل كمي دقيق إحصائياً. في النهاية، ومع ذلك، فإن المهندسين والعلماء المشاركين في أي مشروع متعلق بالنبع لا يزالون يواجهون قرارات مختلفة يجب أن تتضمن نوعاً من التحليل الكمي. فيما يلي بعض الأمثلة فقط: ما هو الحد الأدنى المحتمل للتدفق في الصيف؟ هل سيجف النبع؟ كم يجب أن يكون حجم خزان التخزين؟ ما هي الكمية "المضمونة" من المياه التي يتم توصيلها إلى للمستخدمين النهائيين؟ ماذا يجب أن تكون أبعاد هيكل الفائض؟ في كل الأحوال، وبغض النظر عن الفترة الزمنية المتاحة وأي سؤال محدد، فإن معظم، إن لم يكن كل الإجابات يجب أن تُعطى من حيث

الاحتمالية. الخطوة الأولى والأكثر أهمية في تحليل الاحتمالات هو تقييم طبيعة وتكرار (السلاسل الزمنية) لمدخلات المياه الرئيسية، مثل هطول الأمطار في منطقة الصرف، وعرضها مع هيدروغراف النبع على نفس المقياس الزمني. وهذا يشمل أيضاً سجلات التدفق طويل الأجل لأقرب مجاري سطحية أو ينابيع أخرى بنفس الإعدادات الفيزيائية. من خلال المقارنة البصرية بين السلاسل الزمنية الهيدرولوجية المختلفة ولكن المترابطة فيما بينها، يكتسب المرء نظرة ثاقبة لا تقدر بثمن في العمليات المعتمدة على الوقت والتي تبدو أكثر أهمية بالنسبة لنبع معين. كما يجب أن تؤخذ في الحسبان أي تأثيرات بشرية طويلة الأمد، مثل السحب الموسمي للمياه الجوفية (الضخ) من أو التغيرات في استخدام الأراضي (مثل التحضر) التي قد تؤثر على تصريف النبع.

اعتماداً على هدف (أهداف) المشروع، قد تكون بعض التدفقات المميزة أكثر أهمية من غيرها. وتشمل تحليلات الاحتمالات الشائعة الحد الأدنى ومتوسط التدفقات الشهرية، والحد الأدنى للتدفقات الأسبوعية لفترة أعلى طلب (عادةً خلال شهري أغسطس وسبتمبر في المناخات الرطبة المعتدلة)، والحد الأدنى للتدفق اليومي المطلق. لا يوجد حد مقبول عالمياً لنقاط البيانات المطلوبة لتحليل الاحتمالات. على الرغم من أن عدداً غير قليل من الكتب عن الإحصاء تعطي رقماً قدره ٣٠ نقطة "كقاعدة عامة". كما ذكرنا سابقاً، غالباً ما تكون فترات المراقبة في الدراسات الهيدرولوجية ودراسات المياه الجوفية العملية قصيرة (عدة سنوات أو أقل) وهذه القاعدة الأساسية من شأنها أن تبطل العديد من الدراسات بشكل افتراضي. ومع ذلك، بالإضافة إلى الحكم الاحترافي، يتضمن التحليل الاحتمالي في مثل هذه الحالات توليد سلاسل زمنية اصطناعية باستخدام النماذج الاصطناعية (انظر الفصل ٥) وإعادة بناء السلاسل الزمنية التاريخية المحتملة باستخدام الانحدار مع سلسلة زمنية أخرى ذات صلة (مثل هطول الأمطار) ذات فترة رصد أطول (الفصل ٥).

يوضح الشكل ٤-١٢ الخصائص الهامة للهيدروغراف النبع التي يجب أخذها بعين الاعتبار عند إجراء تحليلات الاحتمالات. بعض الأسئلة التي يمكن الإجابة عنها بسهولة من السجل الطويل لتصريف نبع بحيرة كريت تشمل:

هل هناك نمط منتظم لتصريف الينابيع من سنة هيدرولوجية إلى أخرى؟ (نعم.)

هل يتأثر التصريف بشدة بهطول الأمطار؟ (نعم.)

هل هناك تأخير عام بين مواسم هطول الأمطار الرئيسية وتصريف النبع؟ (نعم، أعلى نسبة هطول الأمطار في نوفمبر-ديسمبر، تليها الذروة الثانوية في مارس-أبريل؛ أعلى معدلات التدفق وتكون أعلى معدلات التدفق بين منتصف مايو ومنتصف يوليو).

هل هناك دورية طويلة الأجل في تصريف النبع؟ (نعم، ما يقرب من ١٤ عامًا بين الفترات الرطبة والجافة).

هل هناك اتجاه طويل الأجل لا علاقة له بالدورية الطبيعية؟ (كلا، فالنبع يتصرف مثل ساعة موثوقة تمامًا على مدار ٣٠ عامًا تقريبًا).

من الواضح أنه إذا تضمنت فترة التسجيل سنة أو سنتين فقط تم اختيارهما عشوائيًا من الرسم البياني في الشكل ٤-١٢، فإن أي إجابة على هذه الأسئلة ستكون أقل يقيناً (أقل احتمالاً). هناك نص عام جيد جداً في المجال العام بعنوان "تحليل التردد الهيدرولوجي" (الدليل الهندسي ١١١٠-٢-١٤١٥)، متاح على الموقع الإلكتروني <http://140.194.76.129/publications/eng->

**manuals**. وهو يغطي جميع الجوانب الرئيسية للموضوع ويوفر إرشادات في تركيب التوزيعات الترددية وبناء حدود الثقة. يتم عرض التقنيات التي يمكن أن تقلل من الأخطاء الناجمة عن أحجام العينات الصغيرة. كما يلاحظ أيضاً بعض أنواع البيانات الهيدرولوجية التي لا تتناسب عادةً مع أي توزيعات نظرية.

يمكن أن يكون تحليل التردد بيانياً (تجريبيًا) وتحليلياً (نظريًا). كما أكد **Army Corps of Engineers (1993)**، يجب رسم كل مجموعة من بيانات التردد بيانياً، حتى لو تم الحصول على منحنيات التردد تحليلياً. ومن المهم مقارنة البيانات المرصودة بصرياً مع المنحنى المشتق. يمكن استخدام الطريقة البيانية لتحديد منحنى التردد لأي نوع من الترددات لكن الطرق التحليلية لها مزايا معينة عندما تكون قابلة للتطبيق. المزايا الرئيسية للطرق تتمثل في أنها قابلة للتطبيق بشكل عام، ويمكن تصور المنحنى المشتق بسهولة، ويمكن مقارنة البيانات المرصودة بسهولة مع النتائج المحسوبة. ومع ذلك، فإن الطرق البيانية لتحليل التردد أقل اتساقاً بشكل عام من الطرق التحليلية، حيث أن الأفراد المختلفين يرسمون منحنيات مختلفة. لا توفر الإجراءات البيانية أيضاً وسيلة لتقييم موثوقية التقديرات. المقارنة بين المنحنى المعتمد والنقاط المرسومة ليست مؤشراً للموثوقية، ولكن غالباً ما يُفترض خطأً أنها كذلك، مما يعني ضمناً موثوقية أكبر بكثير مما يتحقق في الواقع. لهذه الأسباب، يجب أن تكون الطرق البيانية محدودة على أنواع البيانات التي يُعرف أنها بالطرق التحليلية قابلة للتطبيق بشكل عام؛ أي عندما تكون المنحنيات الترددية غير منتظمة بحيث لا يمكن حسابها تحليلياً.

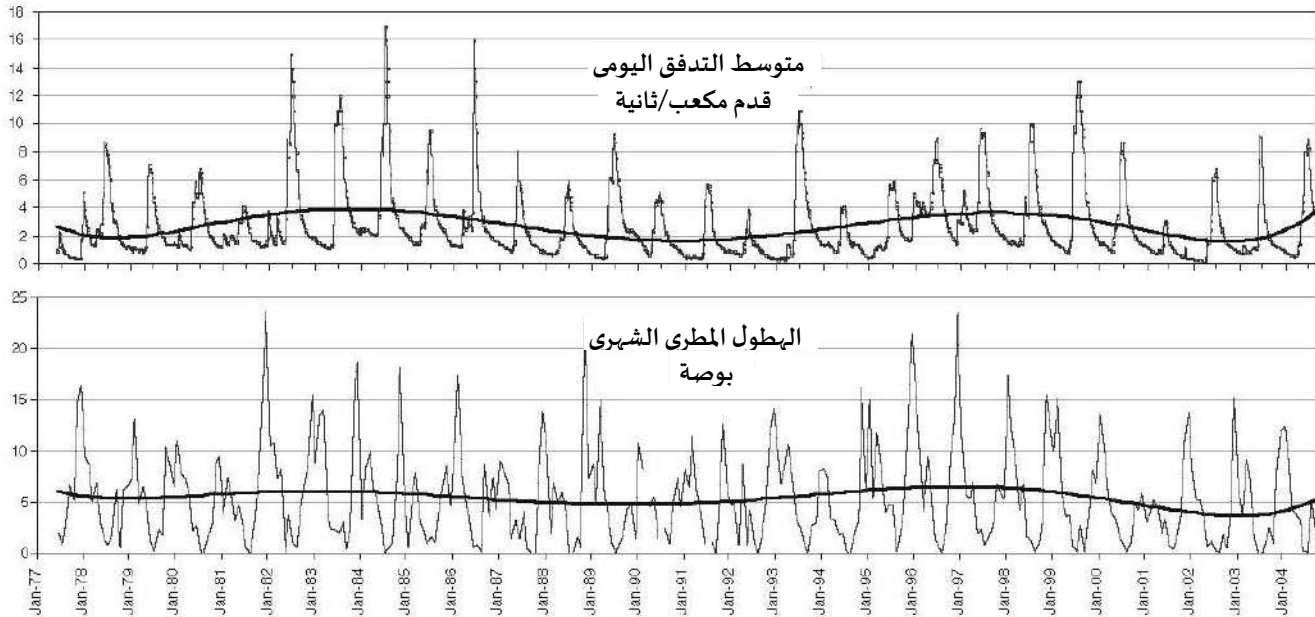
تتكون عملية تركيب البيانات من خلال إجراء تحليلي من اختيار التوزيع التكراري النظري، وتقدير بارامترات التوزيع من البيانات بواسطة بعض تقنيات التركيب، ومن ثم تقييم دالة التوزيع عند نقاط اهتمام مختلفة. بعض التوزيعات النظرية التي تم استخدامها في التحليل الهيدرولوجي الحرفي التحليل التكراري هي التوزيع الطبيعي (غاوسي)، والتوزيع الأسّي، وتوزيع جاما ثنائي المعالم، والتوزيع ثلاثي المعالم جاما، وتوزيع بيرسون من النوع الثالث، ولوغاريتم بيرسون من النوع الثالث، والقيمة القصوى (جامبل)، ولوغاريتم جامبل.

تحديد التوزيع التكراري للبيانات باستخدام التقنيات التحليلية له عدة مزايا. ينتج عن استخدام إجراء ثابت لملاءمة التوزيع المحدد ينتج عنه تقديرات متناسقة للتكرار من نفس مجموعة البيانات من قبل أشخاص مختلفين. وقد تم تطوير توزيعات الخطأ لبعض التوزيعات النظرية التي تمكّن من حساب درجة موثوقية التقديرات التكرارية. ميزة أخرى هي أنه من الممكن إضفاء الطابع الإقليمي على تقديرات البارامترات، مما يسمح بإجراء تقديرات التردد في مواقع غير مقاسة.

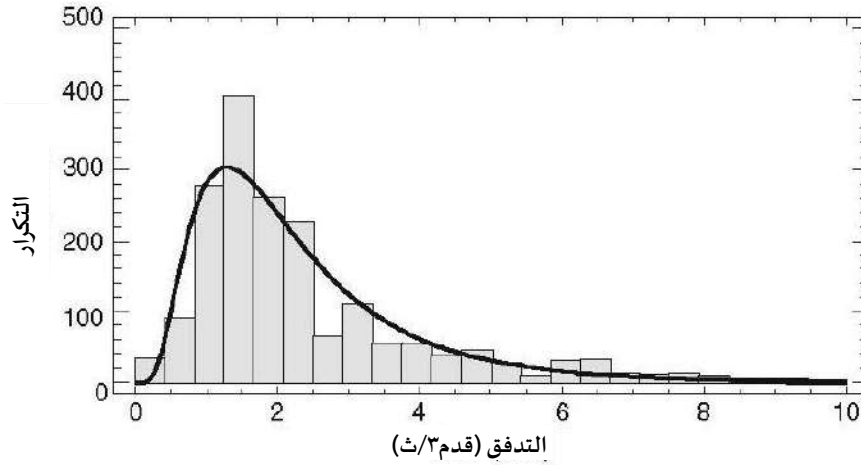
يشير مصطلح التكرار عادةً إلى إحصاء (عدد) الأحداث ذات حجم معين، مثل عدد تدفقات الينابيع اليومية التي تساوي أو أقل من ٢ قدم<sup>٣</sup>/ث/س (سنة). في الدراسات الهيدرولوجية، فإن احتمال تجاوز (أو عدم تجاوز) حجم ما (أو عدم تجاوزه) عادةً ما يكون ذا أهمية أساسية. عرض البيانات بهذا الشكل من خلال تجميع الاحتمال (المساحة) تحت دالة كثافة الاحتمال. يُطلق على هذا المنحنى دالة التوزيع التراكمي. في معظم النصوص الإحصائية، يتم تجميع المنطقة من أصغر حدث إلى أكبر حدث. ثم تمثل المساحة المتراكمة احتمال عدم التجاوز أو النسبة المئوية. ومن الشائع في أكثر الدراسات الهيدرولوجية هو تجميع المساحة من

الحدث الأكبر إلى الأصغر. تمثل المساحة المتراكمة بهذه الطريقة احتمال التجاوز أو النسبة المئوية. ويبين الشكلان ٤-١٣ و ٤-١٤ الرسمان البيانيان المدرج التكراري والتوزيع الاحتمالي التراكمي على التوالي لمتوسط التدفقات اليومية في نبع بحيرة كريتر المسجلة في الفترة الزمنية ١٩٧٧-١٩٨٥.

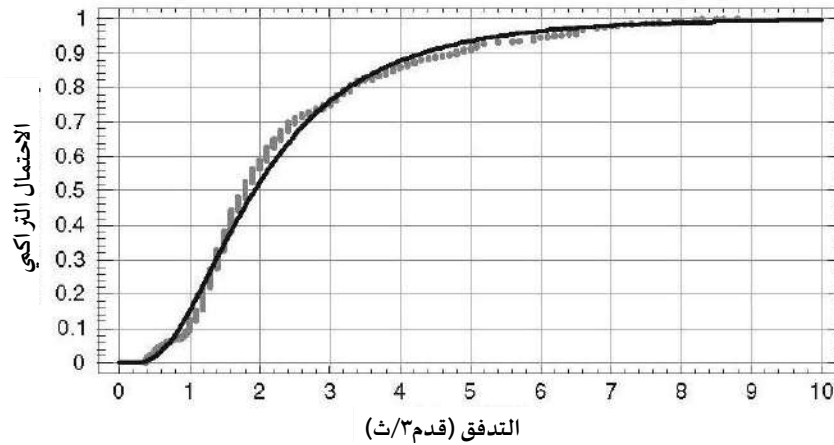
غالبًا ما يُستخدم مصطلحان آخران لوصف احتمالية تدفق النبع: فترة العودة (تسمى أحيانًا فاصل التكرار) والنسب المئوية (أو الكميات) لتوزيع الاحتمالات. فترة العودة النظرية هي معكوس احتمال تجاوز الحدث في أي سنة واحدة. على سبيل المثال، التدفق الأقصى لـ ١٠ سنوات له احتمال ١ من ١٠،  $0.1 = 1/10$  في المائة من احتمال تجاوزه في أي سنة واحدة وفي ٥٠ سنة  $0.02 = 1/50$  أو ٢ في المائة من احتمال تجاوزه في أي سنة واحدة. وعلى العكس من ذلك، فإن التدفق الأدنى لـ ١٠ سنوات له احتمال بنسبة ٩٠ في المائة للتجاوز في أي سنة واحدة. النسب المئوية هي القيم التي توجد تحتها نسب مئوية محددة من البيانات. على سبيل المثال، بالنسبة



الشكل ٤-١٢ (أعلى) متوسط معدل التصريف اليومي، بالقدم المكعب في الثانية، في نبع بحيرة كريتر، أوريغون (بيانات من U.S. Geological Survey, 2008). (في الأسفل) هطول الأمطار الشهري، بالبوصة، في بحيرة كريتر، أوريغون (بيانات من Oregon Climate Service, 2008). يتم عرض الدورة الدورية الطبيعية بخط متعدد الحدود من الدرجة السادسة.



الشكل ٤-١٣ الرسم البياني لمتوسط التدفقات اليومية في نبع بحيرة كريتر، أوريفون، المسجلة في الفترة ١٩٧٧-١٩٨٥. التدفق الأكثر تواتراً حوالي ١,٥ قدم مكعب، ويحدث ذلك في ٤٠٠ يوم من أصل ٢٩٢٠ (ثمانى سنوات).

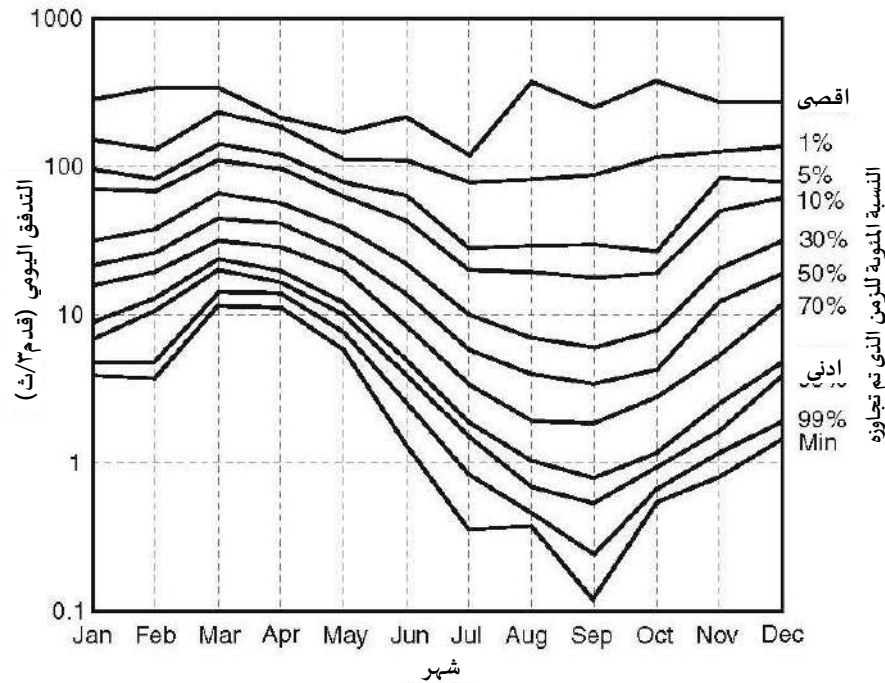


الشكل ٤-١٤ التوزيع الاحتمالي التجريبي التراكمي (نقاط) ودالة الاحتمال النظري المجهزة لمتوسط التدفقات اليومية في نبع بحيرة كريتر، أوريفون، المسجلة في الفترة ١٩٧٧-١٩٨٥.

لتسع سنوات من التسجل اليومي لبحيرة كريت، فإن النسبة المئوية الخامسة والعشرين للبيانات التجريبية (التدفقات المقاسة) هي ١,٣ قدم مكعب قدم في الثانية، مما يعني أن ٢٥ في المئة من الوقت يكون معدل التدفق أقل و ٧٥ في المئة من الوقت يكون أعلى. يوضح الجدول ٤-١ النسب المئوية المميزة الأخرى.

وغالبًا ما تستخدم النسب المئوية لرسم متوسط التدفقات اليومية الشهرية أو الأسبوعية لفترة التسجيل ومقارنتها مع التدفق المقاس حاليًا عند النبع (الشكل ٤-١٥). بالاقتران مع المخططات المماثلة لهطول الأمطار الشهرية التاريخية والحالية (الحديثة)، يمكن أن تكون هذه الممارسة مفيدة جدًا في إدارة الينابيع من خلال توقع التدفقات المحتملة في المستقبل القريب. على سبيل المثال، إذا كان التدفق المقاس حاليًا أقل من ١٠ بالمئة (أي إذا كان التدفق أعلى بنسبة ٩٠% من الوقت)، وينطبق الشيء نفسه على هطول الأمطار الأخيرة، وإذا كان يعتمد تصريف النبع بشكل كبير على هطول الأمطار، فقد يكون من الضروري فرض نوع من تقييد الاستخدام قبل أن تتحسن الظروف الهيدرولوجية والأرصاء الجوية.

جدول ٤-١ النسب المئوية لنبع بحيرة كريت معدلات التدفق اليومي للفترة ١٩٨٥-١٩٧٧.	
النسبة المئوية	معدل التدفق (ق/ث)
١%	٠,٣٩
٥%	٠,٦٢
١٠%	١
٢٥%	١,٣
٥٠%	١,٨
٧٥%	٣
٩٠%	٤,٨
٩٥%	٦,٢
٩٩%	٧,٩



الشكل ١٥-٤ منحنيات مدة التدفق اليومي لكل شهر. (معدلة من U.S. Army Corps of Engineers, 1993).

جدول ٢-٤ الخصائص الرئيسية لمحطتي قياس تصريف الينابيع الكارستية التي تم تحليلها.					
الرقم	اسم النبع	اسم المحطة	الارتفاع (م) م.س.ح	مساحة المستجمع (كم²)	الفترة الزمنية المتاحة للبيانات
١	كوبا Kupa	Kupari	٣٠٤,٤٣	٢٠٨	١٩٥١-٢٠٠٧
٢	اومبلا Ombla	Komolac	٢,٣	٨٠٠-٩٠٠	١٩٦٨-٢٠٠٧

جدول ٣-٤ التصريفات السنوية المميزة، بالمتر المكعب/ثانية، في الينابيع الكارستية التي تم تحليلها للفترة الواردة في العمود الأخير من الجدول ٢-٤.					
الرقم	اسم النبع	اسم المحطة	أقل تدفق	متوسط التدفق	أعلى تدفق
١	كوبا Kupa	Kupari	٠,٣١	١٣,٥	١٩٥
٢	اومبلا Ombla	Komolac	٣,٩٦	٢٥	١٠٤

## ٤-٤-١ احتمالية الحد الأدنى والحد الأقصى للتدفقات

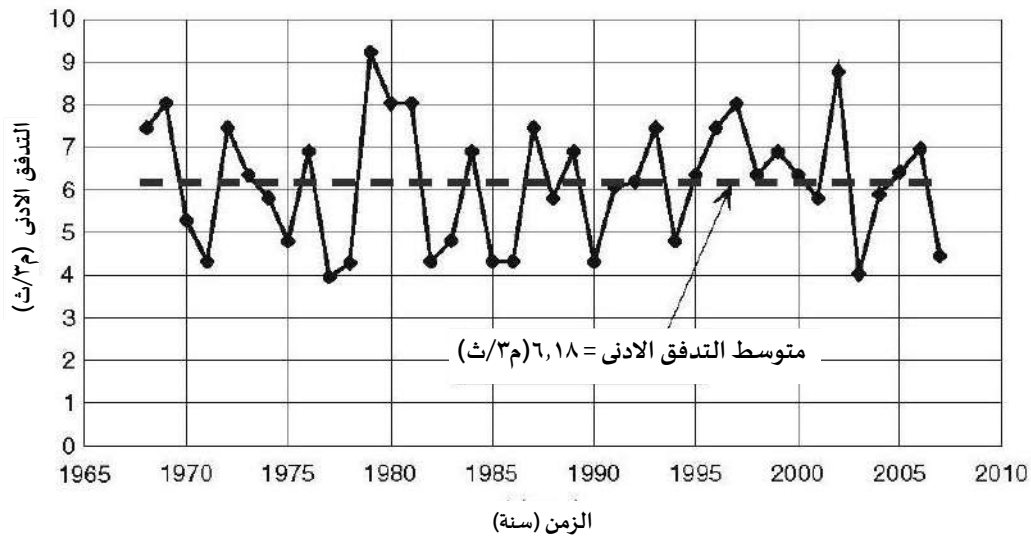
تم توضيح إجراء تحديد احتمالية التدفقات القصوى بأمثلة على نبعين كبيرين من الينابيع الكارستية الكبيرة في كرواتيا. يعرض **الجدول ٤-٢** الخصائص الرئيسية للنبعين (اسم النبع ومحطة القياس والارتفاع ومساحة المستجمع المقدرة وفترة البيانات المتاحة). تقع كلتا المحطتين في الجزء الأوسط من الكارست الديناريكي في كرواتيا. يعرض **الجدول ٤-٣** التصريفات المميزة التي تم قياسها في اثنين من الينابيع الكارستية التي تم تحليلها للفترة الواردة في العمود الأخير من **الجدول ٤-٢**.

وتجدر الإشارة إلى أن الوعي الأخير باحتمال حدوث احتباس حراري عالمي قد أكد الحاجة إلى تحليل تواتر التصريفات المتطرفة، حيث أن مسألة ما إذا كانت التغيرات المناخية العالمية قد تزيد في كثير من الأحيان. الأعداد الكبيرة من الينابيع الكارستية (Bonacci, 2006; Panagopoulos and Lambrakis, 2006; Fleury, Plagnes and Bakalowicz, 2007; Herman et al., 2008, 2001) تبين أنه في ظل ظروف هطول الأمطار الشديدة للغاية توجد قيمة حدية قصوى لتصريف الينابيع الرئيسية في مستجمعات المياه، بغض النظر عن حجمها، وظروف مستجمعات المياه (على سبيل المثال، محتوى رطوبة التربة السابق ومستويات المياه الجوفية)، وكمية هطول الأمطار. على سبيل المثال، الملاحظات الأخيرة لنظام الصرف الكارستي لنبع القوس (الولايات المتحدة) أثناء الجريان السطحي الاستثنائي من إعصاري فرانسيس وإيفان كشفت كمياً عن حجم التصريف اللازمة لتجاوز نظام الصرف الكارستي وتسرب التصريف الزائد إلى القناة السطحية (Herman et al., 2008).

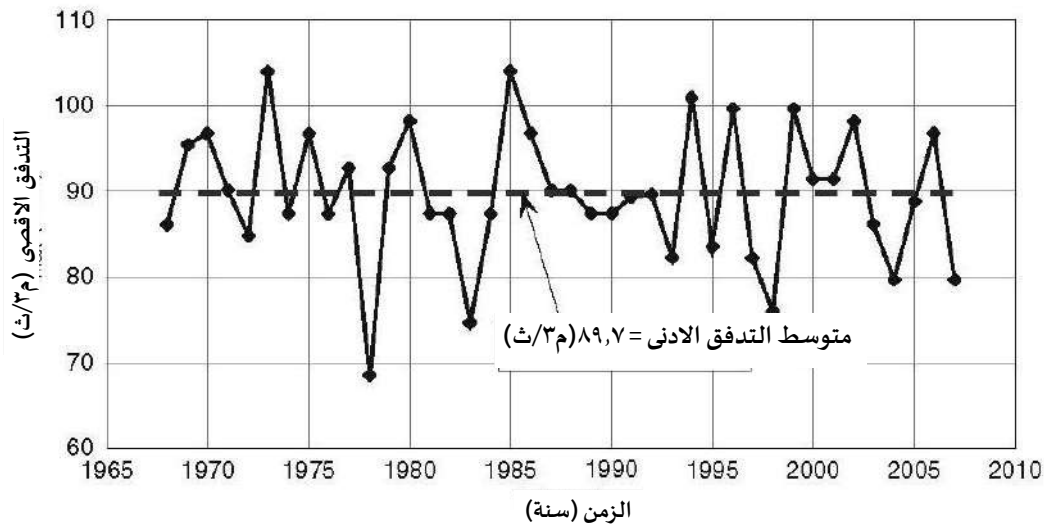
وغالباً ما لا يتم تضمين ظاهرة محدودية قدرة التصريف القصوى للينابيع الكارستية في نمذجة عملية الجريان السطحي للأمطار، وهذا على الأرجح أحد الأسباب الرئيسية لضعف الجودة الحالية للنماذج التنبؤية الحالية لتدفقات القصوى للينابيع. الأسباب المحتملة للقيود المفروضة على الحد الأقصى للتدفق (Bonacci, 2001) (١) الأبعاد المحدودة للقناة (القنوات) الكارستية؛ (٢) التدفق تحت الضغط؛ (٣) التدفق الزائد بين مستجمعات المياه؛ (٤) التدفق الزائد من نبع رئيسي إلى ينابيع متقطعة داخل نفس مستجمعات المياه أو في مستجمعات المياه؛ (٥) سعة تخزين المياه المتاحة في منطقة مستجمعات المياه (Williams, 1983)؛ و (٦) عوامل مثل المناخ، والتربة والغطاء النباتي، وارتفاع مستجمعات المياه، والظروف الجيولوجية.

وبالمثل، في بعض الحالات، يكون للحد الأدنى من التصريفات من الينابيع الكارستية حد لا يمكن تجاوزه بغض النظر عن مدة وشدة الجفاف (فترة عدم هطول الأمطار). على سبيل المثال، يبلغ الحد الأدنى لتصريف نبع جادروونبع أومبلا حوالي ٤ م<sup>٣</sup>/ثانية، وكامل منطقة ينابيع نهر جاكا لم يكن بها الحد الأدنى للتصريف أقل من ٢,٣ م<sup>٣</sup>/ثانية. جميع الينابيع الكارستية الثلاثة تقع في الجزء الكرواتي من المنطقة الكارستية الدينارية. ينبوع فونتين دي فوكلوز الكارستية (فرنسا) يبلغ الحد الأدنى للتصريف أكثر من ٤ م<sup>٣</sup>/ثانية (Fleury et al., 2007). يمكن تفسير هذه الظاهرة من خلال طبقات المياه الجوفية الكبيرة والغزيرة، والتي توفر إمدادات مياه ثابتة خلال فترات الجفاف الطويلة الأمد. ويمثل نبع أومبلا نبعاً كارستياً نموذجياً ذا سعة تدفق قصوى ودنيا محدودة (Bonacci, 1995, 2001). تم قياس السلسلة الزمنية للحد الأدنى والحد الأقصى للتصريف السنوي من ١٩٦٨ إلى ٢٠٠٧ في محطة

قياس كومولاتش في الشكلين ٤-١٦ و ٤-١٧ على التوالي. ويمكن ملاحظة ما يلي



الشكل ٤-١٦ السلاسل الزمنية للتصريفات السنوية المقاسة في محطة قياس التصريف في كومولاتش Komolac (نبع أومبلا Ombla Spring) للفترة ١٩٦٨-٢٠٠٧.



الشكل ٤-١٧ السلاسل الزمنية للتصريفات السنوية القصوى المقاسة في محطة قياس التصريف كومولاتش Komolac (نبع أومبلا Ombla Spring) للفترة ١٩٦٨-٢٠٠٧.

التصريفات الدنيا لا تنخفض أبداً عن حوالي ٤ م<sup>٣</sup>/ثانية، في حين أن التصريفات القصوى لم تتجاوز أبداً قيمة ١٠٤ م<sup>٣</sup>/ثانية، على الرغم من وجود مستجمعات مياه كبيرة وسقوط أمطار غزيرة جداً عليها. سلسلتان زمنيّتان فرعيتان لمتوسط التصريفات السنوية المقاسة من ١٩٦٨ إلى ١٩٨٠ ومن ١٩٨١ إلى ٢٠٠٧ في نبع أومبلا الكارستي في كومولاتش في الشكل ٤-١٨. الانخفاض الحاد في متوسط التصريف السنوي البالغ حوالي ٥ م<sup>٣</sup>/ثانية في عام ١٩٨١ كان سببه الأشغال الهندسية المدنية الكبيرة (شق قناة المجرى المائي لنهر تريبيس بطول ٦٠ كم بالرش بالخرسانة في الجزء العلوي من مستجمعات مياه الينابيع (Bonacci, 1987, 1995)). من المثير للاهتمام أن هذه الأعمال الهندسية المدنية الضخمة أثرت بشدة على متوسط التصريف السنوي ولكن ليس على التصريفات (القصوى والدنيا) لنبع أومبلا.

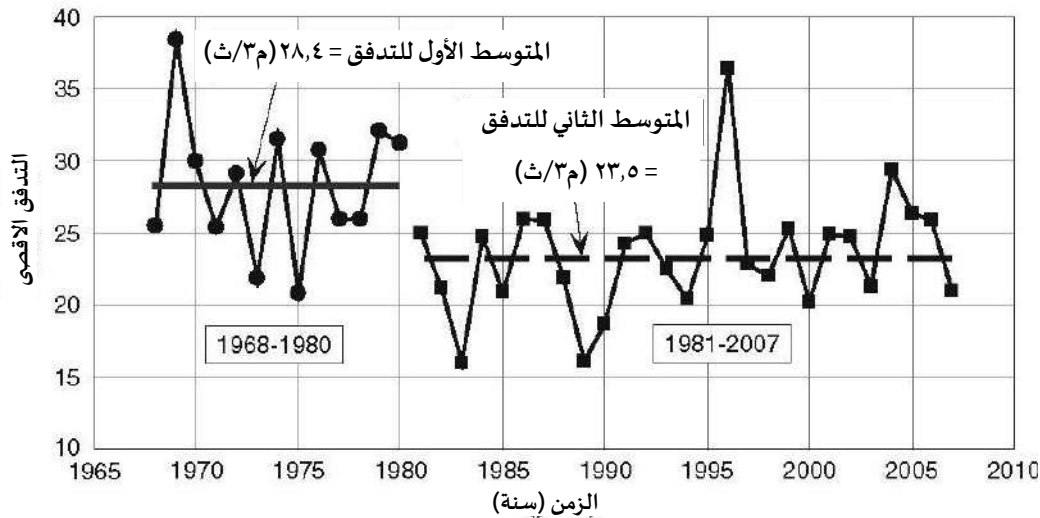
#### ٤-٤-٢ تحليل السلاسل الزمنية

يدرس علم الهيدرولوجيا العشوائية التسلسل الزمني للأحداث الهيدرولوجية بهدف تفسير عدم انتظام حدوثها، وعلى وجه الخصوص، التنبؤ بحدوث الظواهر المتطرفة المهمة (Shaw, 1994). يمكن اعتبار التصريفات القصوى أحداثاً عشوائية، لأن حدوثها في المستقبل لا يمكن التنبؤ به بسهولة. كما هو موضح بمزيد من التفصيل في الفصل ٥، يتضمن تحليل السلاسل الزمنية تحديد المكونات الاتجاهية والدورية والعشوائية (العشوائية) في البيانات المرصودة. تتسبب تأثيرات الأحداث النادرة في حدوث ما يسمى بالمكون الكارثي في السلسلة الزمنية.

غالباً ما تكون هناك حاجة إلى فترة أطول من القياسات التاريخية المتاحة عادةً لتحديد ما إذا كان السجل قد التقط تذبذباً عادياً أو شذوذاً. المتطلب الأمثل هو سجلات طويلة من القياسات المتجانسة المستمرة. إن الافتراضات الأساسية لمعظم التحليلات الإحصائية للسلاسل الزمنية للتصريف هي (١) الاتساق، (٢) التحرر من الاتجاهات، (٣) أن تشكل عملية عشوائية يتبع مكوناتها العشوائي دالة التوزيع الاحتمالي المناسبة (التوزيع الطبيعي في الغالب) (Adeloye and Montaseri, 2002).

يعني الاتساق أن جميع البيانات المجمعة تنتمي إلى نفس المجتمع الإحصائي. تكون السلسلة الزمنية ثابتة إذا كانت إحصائيات العينة (مثل المتوسط والانحراف المعياري والتباين) ليست دالة على التوقيت أو طول العينة. يوجد اتجاه في مجموعة بيانات إذا كان هناك ارتباط كبير (موجب أو سالب) بين الملاحظات والزمن أو سلبية) بين الملاحظات والزمن. وجود اتجاه ودورية في سلسلة زمنية يعني أنها ليست ثابتة. تكون نمذجة السلسلة الزمنية أسهل بكثير إذا كانت ثابتة. بشكل عام، العشوائية في السلسلة الزمنية للتصريف يعني أن البيانات تنشأ من أسباب طبيعية (Adeloye and Montaseri, 2002).

تُستخدم اختبارات إحصائية مختلفة لتقييم الخصائص المذكورة أعلاه للسلاسل الزمنية. الطريقة الأكثر استخداماً على نطاق واسع لتقييم اتساق السلسلة الزمنية هي منحني الكتلة المزدوجة (Bras, 1990). يمكن استخدام اختبار سبيرمان للارتباط غير القياسي لارتباط الرتبة سبيرمان للتحقق من الاتجاه (McGhee 1985, Adeloye and Montaseri, 2002). اختبار الجري غير البارامترى مناسب لتقييم السلسلة الزمنية العشوائية (McGhee, 1985; Adeloye and Montaseri, 2002). غالباً ما يكون



الشكل ١٨-٤ سلسلتان زمنيتان فرعيتان لمتوسط التصريفات السنوية المقاسة في محطة قياس التصريف في كومولاتش (Komolac) نبع أومبلا (Ombla Spring) للفترتين الفرعيتين ١٩٦٨-١٩٨٠ و ١٩٨١-٢٠٠٧.

الاتجاه أو عدم الثبات ناتجاً عن الأنشطة البشرية، ولكنه قد يكون أيضاً نتيجة التغيرات الطبيعية. ويشدد (Levi, 2008) على أن العلماء الذين يدرسون السلاسل الزمنية للعديد من المتغيرات المتعلقة بالمناخ لاحظوا تغيراً مفاجئاً إلى حد ما، أي نقطة انعطاف، في منتصف الثمانينيات تقريباً. وتساءلوا عما إذا كان التغير ناتجاً عن التقلبات الطبيعية أو عن تأثير غازات الاحتباس الحراري. وبين الشكل ١٩-٤ سلسلة زمنية للتصريفات السنوية القصوى ( $Q_{max}$ ) مع خط الاتجاه الخطي للفترة ١٩٥١-٢٠٠٧ مقاسة في محطة كوباري لقياس التصريف على نهر كوبا (كرواتيا). هذه المحطة تتحكم في تصريف نبع نهر كوبا الكارستي الذي تقدر مساحة مستجمعات المياه فيه بـ ٢٠٨ كم<sup>٢</sup>. من العرض البياني، يبدو أن هناك اتجاهًا خطيًا متناقصاً غير مهم إحصائياً. يمكن لتحليل السلاسل الزمنية أن يكشف ويحدد الاتجاهات والتقلبات في السجلات. يمكنه التحري والتقييم الكمي للاتجاهات والتذبذبات، طريقة المجاميع الجزئية المعاد قياسها (RAPS) (Garbrecht and Fernandez, 1994; Bonacci, Trninic, and Roje, 2008) يمكن استخدامها بنجاح لهذا الغرض. يتغلب نهج التصور المستند إلى RAPS على التغيرات المنهجية الصغيرة في السجلات وتباين قيم البيانات. حيث يسلط تصور RAPS الضوء على الاتجاهات، والتحول، وتجميع البيانات، والتقلبات غير المنتظمة، والتقلبات الدورية في السجل. ويعتبر التصور تحديد النمط المرئي مكماً للاختبارات الإحصائية القياسية (Garbrecht and Fernandez, 1994).

يتم تعريف قيم RAPS بالمعادلة التالية:

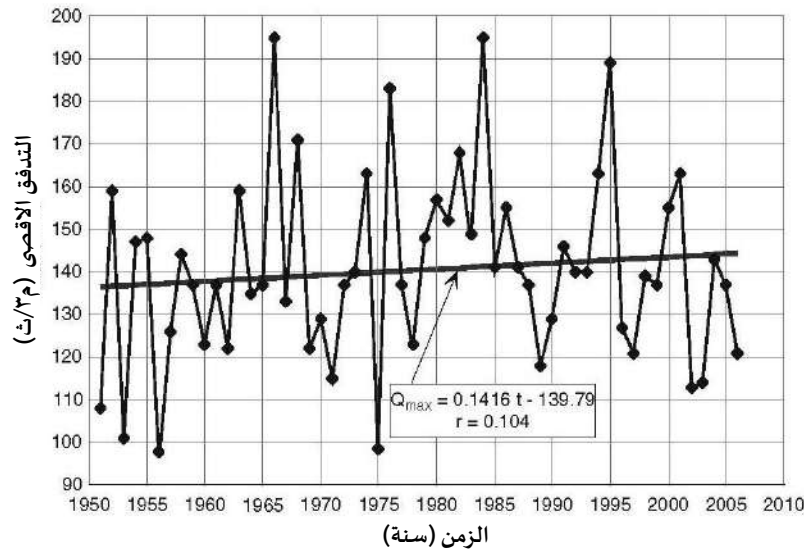
$$RAP_S = \sum_{t=1}^k \frac{Y_t - Y^-}{S_y} \quad (4.8)$$

حيث  $Y$  هو متوسط العينة،  $S_y$  هو الانحراف المعياري، و  $n$  هو عدد القيم في السلسلة الزمنية، و  $(1, k, 2, \dots, n)$  هو الحد المقابل للتجميع الحالي. إن مخطط RAPS في الزمن هو تصور اتجاهات وتقلبات المتغير الذي تم تحليله  $Y_t$ . إن إعادة تحجيم وتجميع نهج RAPS يسلط الضوء على التغيرات الصغيرة والمنتظمة بمرور الوقت والتي غالباً ما تكون مخفية في مخطط السلاسل الزمنية القياسية بسبب الحجم الكبير نسبياً وتباين البيانات نفسها (Garbrecht and Fernandez, 1994). لا يعتبر التصور بديلاً عن التقييم الإحصائي. فهو يسمح بإجراء فحص أولي أو استكشافي للسلسلة الزمنية. إن نظام RAPS مثل جميع الطرق الأخرى لا يخلو من أوجه القصور. ويمثل الشكل ٤-٢٠ السلاسل الزمنية لـ RAPS لتصريفات نهركوبا السنوية القصوى في الفترة ١٩٥١-٢٠٠٧ الموضحة في الشكل ٤-٢١. تم تقسيم السلاسل الزمنية الإجمالية من الشكل ٤-٢١ إلى ثلاث مجموعات فرعية: (١) ١٩٥١-١٩٧٨، (٢) ١٩٧٩-١٩٨٧، (٣) ١٩٨٨-٢٠٠٧. ويبين الشكل ٤-٢٢ ثلاث سلاسل زمنية فرعية لنهركوبا الكارستي الحد الأقصى لتصريفات السنوية القصوى ( $Q_{max}$ ) مع متوسط الخطوط للفترة الفرعية الثلاث. للتحقق من الفروق ذات الدلالة الإحصائية بين متوسطات السلاسل الزمنية الفرعية الثلاثة لتصريفات السنوية القصوى تم استخدام اختبار  $t-t$ . المتوسطات ١٣٧ م / ٣ / ثانية للفترة الفرعية ١٩٥١-١٩٧٨، ١٥٦ م / ٣ / ثانية للفترة الفرعية

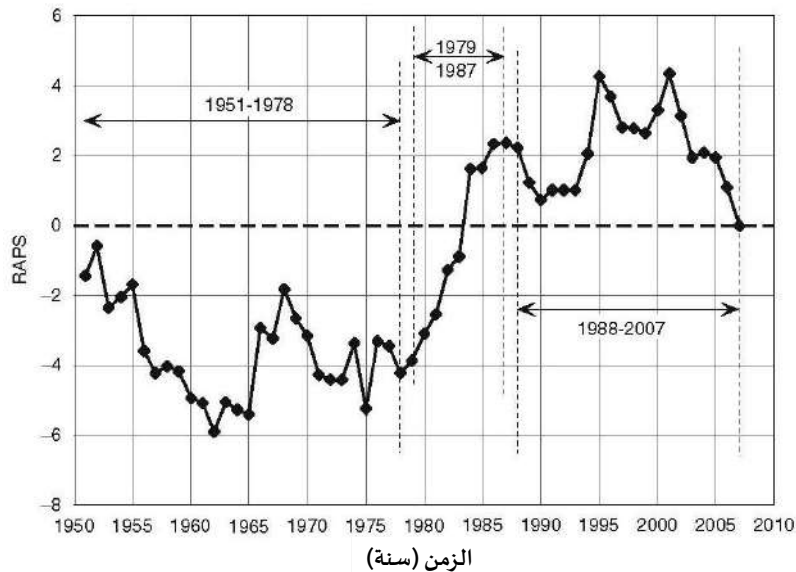
١٩٧٩-١٩٨٧، و ١٣٧ م / ٣ / ثانية للفترة الفرعية ١٩٨٨-٢٠٠٧. ذات دلالة إحصائية (تتجاوز ٥ في المائة). تطبيق طريقة RAPS على سلسلة طويلة الأجل (١٨٧٨-٢٠٠٤) لمتوسط التصريفات السنوية لنبع فونتين دي فوكلوز الكارستي لنبع فونتين دي فوكلوز (فرنسا) أشار إلى وجود خمسة فروع ذات دلالة إحصائية مهمة التالية الفروع: (١) ١٨٧٨-١٩١٠، (٢) ١٩١١-١٩٤١، (٣) ١٩٤٢-١٩٥٩، (٤) ١٩٦٠-١٩٦٤، (٥) ١٩٦٥-٢٠٠٤ (بوناتي، ٢٠٠٧). الاختلافات في النظام الهيدرولوجي لنبع فونتين دي فوكلوز الكارستية خلال فترة ١٢٧ سنة قوية جداً ولا يمكن تجاهلها. من المحتمل أن تكون التأثيرات البشرية المنشأ هي السبب الرئيسي لمثل هذا السلوك لمتوسط السلسلة الزمنية السنوية لتصريف الينابيع التي تم تحليلها، على الرغم من أن الدورات الطبيعية للسنوات الجافة والرطبة هي أيضاً تفسير محتمل. على أي حال، فإن التقسيم الصارم للتأثيرات الطبيعية والبشرية المنشأ على نظام تصريف النبع غير ممكن.

### ٤-٤-٣ التحليل التكراري للتدفقات القصوى

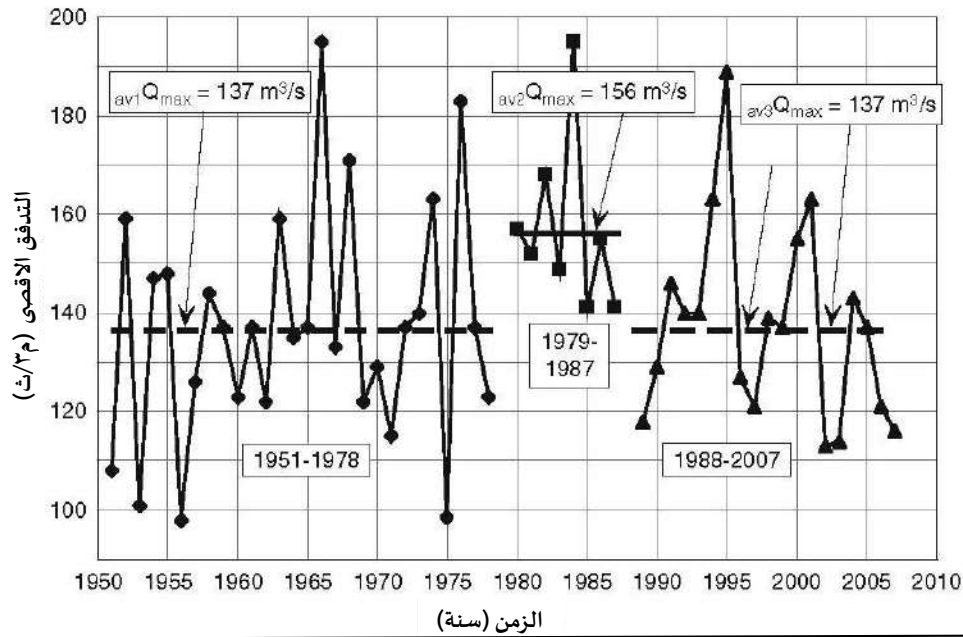
يعد التحليل التكراري للتدفقات القصوى أحد أكثر تطبيقات الإحصاء شيوعاً وأقدمها في علم الهيدرولوجيا. في التحليل التكراري، من المهم التمييز بين المجتمع الإحصائي والعينة. وفقاً (Tallaksen, Madsen, and Hisdal, 2004)، يتضمن التحليل (١) تعريف الحدث الهيدرولوجي والخصائص المتطرفة المراد دراستها، (٢) اختيار الأحداث المتطرفة والتوزيع الاحتمالي لوصف البيانات، (٣)



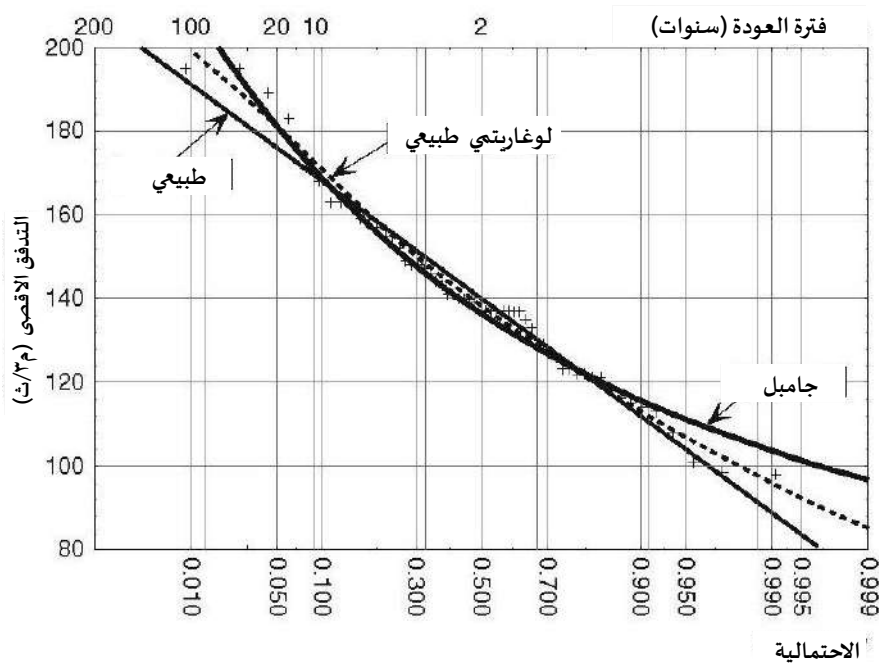
الشكل ١٩-٤ السلاسل الزمنية للتصريفات السنوية الدنيا المقيسة في محطة قياس التصريف في كومولاتش (نبع أومبلا) للفترة ١٩٦٨-٢٠٠٧.



الشكل ٢٠-٤ السلاسل الزمنية للتصريفات السنوية القصوى المقيسة في محطة قياس التصريف في كومولاتش (نبع أومبلا) للفترة ١٩٦٨-٢٠٠٧.



الشكل ٤-٢١ سلسلتان زمنيتان فرعيتان لمتوسط التصريفات السنوية المقاسة في محطة قياس التصريف في كومولاتش (نبع أومبلا) للفترتين الفرعيتين ١٩٦٨-١٩٨٠ و ١٩٨١-٢٠٠٧.



الشكل ٤-٢٢ تمثيل تخطيطي لثلاث منحنيات لتوزيع الاحتمالية (طبيعي-لوغاريتمي طبيعي- جامبل) معرفة لسلاسل زمنية لأقصى تصريف سنوي مقاس لمحطة كوبري Kupari خلال الفترة ١٩٥١-٢٠٠٧.

(٣) تقدير بارامترات التوزيع، (٤) تقدير الأحداث المتطرفة أو القيم التصميمية لمشكلة معينة.

من الممكن إجراء تحليل تواتري من خلال رسم البيانات دون وضع أي افتراض توزيعي. نظرًا لأن التصميم الهيدرولوجي للتدفقات القصوى يتطلب عمومًا استقراءً خارج نطاق الملاحظة وغالبًا ما يكون طول السجل المتاح غير كافٍ لتحديد التوزيع الاحتمالي بدقة للعينات من توزيع غير معروف، فإن المشكلة الرئيسية هي التقدير الدقيق للذيول التي تحتوي على الأحداث المتطرفة (Tallaksen et al., 2004).

ويعتمد عدم اليقين في القيم القصوى المقدرة بشدة على حجم العينة وثباتها. بشكل عام، ولا يوصى بإجراء تحليل التردد لسلسلة زمنية غير ثابتة. ويوصى باختيار قيمة الحد الأقصى والأدنى من التصريفات السنوية من السنوات الهيدرولوجية وليس من السنوات التقويمية.

وقد وُجد أن العديد من التوزيعات الاحتمالية مفيدة في تحليل التدفق الأقصى للنبع. ويمكن العثور على التفسيرات النظرية وكذلك المناقشة التفصيلية للعديد من التوزيعات في العديد من كتب الإحصاء القياسية. ونقدم هنا شرحًا موجزًا لثلاثة منها: (١) العادي، (٢) التوزيع الطبيعي، و(٣) توزيع غومبل أو توزيع القيمة القصوى. في الولايات المتحدة وعدد غير قليل من البلدان الأخرى، فإن إجراء التكرار التحليلي الموصى به للتدفقات السنوية القصوى والدنيا للمجاري المائية هو توزيع بيرسون اللوغاريتمي من النوع الثالث. هذا التوزيع مكون من ثلاثة بارامترات لتحديد المواصفات الرياضية الكاملة. المعاملات هي المتوسط، أو العزم الأول (مقدراً متوسط العينة)؛ والتباين أو العزم الثاني (مقدراً تباين العينة)؛ والانحراف، أو العزم الثالث (مقدراً انحراف العينة). بما أن التوزيع هو توزيع لوغاريتمي. يتم تقدير جميع البارامترات من لوغاريتمات الملاحظات بدلاً من تقديرها من الملاحظات نفسها. ويُعد توزيع بيرسون من النوع الثالث مفيداً بشكل خاص للتحريات الهيدرولوجية لأن المتغير الثالث، وهو الانحراف، يسمح بملاءمة العينات غير الطبيعية للتوزيع. عندما يكون الانحراف صفراً، يصبح توزيع لوغاريتم بيرسون من النوع الثالث توزيعاً ثنائي المعامل مطابقاً للتوزيع اللوغونومتري. (U.S. Army Corps of Engineering, 1993).

التوزيع الطبيعي هو توزيع متماثل على شكل جرس متواصل، ويمثل نظرياً التوزيع العرضي للأخطاء العرضية حول متوسطها، التوزيع الغاوسي المنخفض للأخطاء. التوزيع اللوغوسطي أو توزيع جالتون وهو توزيع طبيعي محوّل يتم فيه استبدال المتغير بقيمته اللوغاريتمية. إنّه توزيع غير متري، وهو مناسب جداً للتحليل التكراري للعديد من المتغيرات الهيدرولوجية. تأخذ نظرية القيم المتطرفة بعين الاعتبار توزيع أكبر أو أصغر الملاحظات التي تحدث في كل مجموعة من العينات المتكررة. كان (Gumbel 1941)

أول من استخدم نظرية القيم القصوى لتحليل تواتر الفيضانات. وبين (Chow 1954) أن توزيع غومبل هو في الأساس توزيع لوغوني طبيعي مع انحراف ثابت. وهناك عدد قليل من الطرق والأساليب الشائعة الاستخدام لاختبار مدى ملاءمة بيانات السلاسل الزمنية مع التوزيعات الاحتمالية النظرية المفترضة؛ على سبيل المثال، اختبار (١) ص ٢ (تشي-تربيع)، (٢) اختبار كولموغوروف-سميرنوف و(٣) اختبار معامل ارتباط مخطط الاحتمالات (Adeloye and Montaseri, 2002)، و(٤) اختبار جودة L-معدل الأصلح (Tallaksen et al., 2004).

يمثل الشكل ٢٣-٤ عرضًا بيانيًا لثلاثة منحنيات لتوزيع الاحتمالات (عادي، وطبيعي، جامبل) المحددة لسلسلة زمنية للتصريف السنوي الأقصى المقيس لمحطة قياس كوبري خلال الفترة ١٩٥١-٢٠٠٧. يعطي الجدول ٤-٤ قيم التصريفات السنوية القصوى لمختلف فترات تكرار مختلفة باستخدام التوزيعات الثلاثة المذكورة سابقاً. تشكل قيم التدفق الصفري (الينابيع الجافة) التي تحدث في بعض الينابيع المتقطعة مشكلة خاصة بالنسبة لتحليل التردد لسلسلة زمنية للحد الأدنى من التصريفات السنوية. يمكن حل هذه المشكلة باستخدام معادلة الاحتمال الكلي.

## المراجع

- Adeloye, A.J., Montaseri, M., 2002. Preliminary streamflow data analyses prior to water resources planning study. Hydrol. Sci. J.—691-.
- Amorocho, J., 1964. Nonlinear hydrologic analysis. Advances in Hydrosience, vol. 9. Academic Press, New York.
- Atkinson, T.C., 1977. Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in Mendip Hills, Somerset (Great Britain). J. Hydrol. 35:100-93.
- Avdagic, I., 1990. Osnove hidrologije krsa [Fundamentals of Karst Hydrology; in Serbo-Croatian]. Zavod za hidrotehniku Gradjevinskog fakulteta u Sarajevu, radovi br. 27, Sarajevo.
- Bonacci, O., 1987. Karst Hydrology with Special Reference to the Dinaric Karst. Springer-Verlag, Berlin.
- Bonacci, O., 1993. Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers. Hydrological Sciences 38 (1), 51–62.
- Bonacci, O., 1995. Ground water behaviour in karst: Example of the Ombla Spring (Croatia). J. Hydrol. 165 (1–4), 113–134.
- Bonacci, O., 2001. Analysis of the maximum discharge of karst springs. Hydrogeol. J. 9 (4), 328–338.
- Bonacci, O., 2004. Hazards caused by natural and anthropogenic changes of catchment area in karst. Nat. Haz. and Earth Sys. Sci. 4 (5–6), 655–661.
- Bonacci, O., Trninic ´, D., Roje-Bonacci, T., 2008. Analyses of the water temperature regime of the Danube and its tributaries in Croatia. Hydrol. Processes 22 (7), 1014–1020.
- Boussinesq, J., 1904. Recherches the ´oriques sur l’e ´coulement des nappes d’eau infiltre ´es dans le sol et sur les de ´bits des sources. Journal de Mathe ´matiques Pures et Applique ´es, Paris 10, 5–78.

- Boyer, D.G., Kuczynska, E., 2003. Storm and seasonal distributions of fecal coliforms and cryptosporidium in a spring. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 39 (6), 1149–1156.
- Bras, R.L., 1990. *Hydrology—An introduction to hydrological science*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Castany, G., 1967. *Traite ´ Pratique des Eaux Souterraines*. Dunod, Paris.
- Chow, V.T., 1954. The log-probability and its engineering application. *Proceedings of the ASCE* 80. Paper No. 536, 1–25.
- Desmarais, K., Rojstaczer, S., 2002. Inferring source waters from measurements of carbonate spring response to storms. *J. Hydrol.* 260, 118–134.
- Dreiss, S.J., 1989. Regional scale transport in a karst aquifer. 1. Component separation of spring flow hydrographs. *Water Resoures.* 25 (1), 117–125.
- Droque, C., 1972. Analyse statistique des hydrogrammes de decrues des sources karstiques. *J. Hydrol.* 15, 49–68.
- Fleury, P., Plagnes, V., Bakalowicz, M., 2007. Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: Application to Fontaine de Vaucluse (South of France). *J. Hydrol.* 345 (1–2), 38–49.
- Garbrecht, J., Fernandez, G.P., 1994. Visualization of trends and fluctuations in climatic records. *Wat. Res. Bulletin* 30 (2), 297–306.
- Goeppert, N., Goldscheider, N., 2008. Solute and Colloid Transport in Karst Conduits under Low- and High-Flow Conditions. *Ground Water* 46 (1), 61–68.
- Gumbel, E.J., 1941. The return period of flood flows. *Ann. Math. Statist.* 12 (2), 163–190.
- Healy, R.W., Winter, T.C., LaBaugh, J.W., Franke, O.L., 2007. *Water budgets: Foundations for effective water-resources and environmental management*. U.S. Geological Survey Circular 1308, Reston, VA.
- Herman, E.K., Toran, L., White, W., 2008. Threshold events in spring discharge: Evidence from sediment and continuous water level measurement. *J. Hydrol.* 351, 98–106.
- Jevdjovic, V., 1956. *Hidrologija*, part 1 [Hydrology, volume 1; in Serbian]. Hidrotehnicki institut Ing. Jaroslav Cerni, Posebna izdanja, knjiga 4, Belgrade, Serbia.
- Kresic, N., 1997. *Quantitative Solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling*. CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, New York.
- Kresic, N., 2007. *Hydrogeology and Groundwater Modeling*, Second ed. CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL.
- Kresic, N., 2009. *Groundwater Resources: Sustainability, Management, and Restoration*. McGraw Hill, New York.

- Levi, B.G., 2008. Trends in the hydrology of the western US bear the imprint of manmade climate change. *Physics Today* 61 (4), 16–18.
- Maillet, E., (Ed.) 1905. *Essais di ´hydraulique souterraine et fluviale*, Vol. 1. Herman et Cie, Paris.
- McGhee, J.W., 1985. *Introductory statistics*. West Publishing Company, St. Paul, MN.
- Oregon Climate Service, 2008. Climate Data. Available at: [www.ocs.orst.edu/pub\\_ftp/climate\\_data/daily/prec/prec1946.lf](http://www.ocs.orst.edu/pub_ftp/climate_data/daily/prec/prec1946.lf) (Accessed December 2008).
- Panagopoulos, G., Lambrakis, N., 2006. The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst systems: Application on two typical karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete). *J. Hydrol.* 329 (3–4), 368–376.
- Shaw, E.M., 1994. *Hydrology in practice*, third ed. Routledge, Abingdon, UK.
- Soulios, G., 1991. Contribution a ` l'e ´tude des courbes de re ´cession des sources karstiques: Exemples du pays Hellenique. *J. Hydrol.* 127, 29–42.
- Tallaksen, L.M., Madsen, H., Hisdal, H., 2004. Frequency analysis. In: Tallaksen, L.M., Van Lanen, H.A.J. (Eds.), *Hydrological drought—Processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Elsevier, Amsterdam, pp. 199–271.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1993. *Hydrologic Frequency Analysis*. Engineering manual 1110-2-1415, Washington, DC. Available at: <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals>.
- U.S. Geological Survey, 2008. USGS Ground-Water Data for the Nation. Available at: <http://waterdata.usgs.gov/nwis/gw>.
- Vandike, J.E., 1996. *The Hydrology of Maramec Spring*. Water Resources Report Number 55. Missouri Department of Natural Resources, Division of Geology and Land Survey, Rola, MO.
- Williams, P.W., 1983. The role of subcutaneous zone in karst hydrology. *J. Hydrol.* 61 (1–3), 45–67.
- Yevjevich, V.M., (Ed.) 1981. *Karst Water Research Needs*. Water Resources Publications, Littleton, CO.

## نمذجة ينابيع المياه

## ٥-١ مقدمة

إن ما يجعل الينابيع الكبيرة جذابة بشكل خاص كأهداف للنمذجة يجعل المهمة المطروحة أكثر تعقيداً بالمقارنة مع أي مشروع آخر للمياه الجوفية. وبالتحديد، فإن النبع الكبير الذي يتدفق من طبقة مياه جوفية واسعة النطاق هو النتيجة النهائية لجميع العمليات، الطبيعية والبشرية المنشأ، التي تولد تدفق الينابيع. وبما أن هذه العمليات تعمل على طبقة المياه الجوفية، تتجمع المياه الجوفية باستمرار نحو النبع من جميع الاتجاهات وأجزاء الخزان الجوفي. إن إنشاء نموذج كمي وفيزيائي وموثوق به ويمثل النبع يمثل تحدياً كبيراً ولكن، في الوقت نفسه، من المحتمل أن يكون مجزياً للغاية؛ فوجود مثل هذا النموذج سيكون بمثابة الأداة المثلى لإدارة الينابيع وحمايتها. ولسوء الحظ كما تمت مناقشته لاحقاً، فإن توصيف التعقيد المتعدد الأوجه لطبقات المياه الجوفية التي تغذي الينابيع الكبيرة ووصفها رياضياً يمثل تحديات مستمرة.

والتفسير الرئيسي لهذه التحديات واضح ومباشر: في طبقات المياه الجوفية ذات المسامية الحبيبية البينية، تعتمد معادلات تدفق المياه الجوفية في الغالب على قانون دارسي البسيط نسبياً. من ناحية أخرى، تتطلب طبيعة المسامية في طبقات المياه الجوفية الصخرية المتشققة والكارستية والطبقات الجوفية الكاذبة تطبيق مجموعات مختلفة من المعادلات للوسائط المسامية المختلفة: (١) الأرضية الصخرية، (٢) الانقطاعات الصخرية الشائعة مثل الشقوق (التصدعات) ومستويات التطبيق، و(٣) الفراغات المتضخمة محلولياً، مثل القنوات والممرات المطورة من الانقطاعات الأولية. إن أي تكامل كمي ذي معنى لمختلف المعادلات التي تصف أنظمة التدفق المتميزة هذه أكثر تعقيداً بسبب أوجه عدم اليقين المرتبطة بالتوزيع الحقلي وتحديد أنواع المسامية المختلفة. ولسوء الحظ، تخلفت نتائج الجهود ذات الصلة بشكل عام عن التقدم المحرز في هيدروجيولوجيا طبقات المياه الجوفية بين الحبيبات (غير المتصدعة وغير الكارستية). ونتيجة لذلك، فإن غالبية مناهج نمذجة الينابيع حتى الآن تعتمد على تطبيقات مختلفة لتحليلات السلاسل الزمنية بالإضافة إلى الأساليب الإحصائية العامة والأساليب الاحتمالية العامة التي تم تطويرها في هيدروجيولوجيا المياه السطحية. تشترك هذه الأساليب بعامل مشترك واحد، وهو ضرورة وجود سلسلة زمنية طويلة نسبياً من البيانات حول تغذية

طبقات المياه الجوفية وتصريف الينابيع، أي علاقات المدخلات والمخرجات المختلفة. ومع ذلك، فإن هذا أيضاً هو العامل المحدد الرئيسي للعديد من المشاريع الهندسية العملية ذات أوقات التنفيذ القصيرة. ولذلك ليس من المستغرب أن عدداً غير قليل من علماء الهيدرولوجيا والممارسين لا يزالون يختارون توصيف الصخور المتشققة أو طبقة المياه الجوفية الكارستية على أنه "وسط مسامي مكافئ" ثم وصف تدفق المياه الجوفية أو حتى مصير انتقال الملوثات باستخدام نماذج حتمية (قائمة على أساس فيزيائي) تستند إلى معادلات دارسي، وبالتالي الوصول إلى استنتاجات مشكوك فيها في كثير من الأحيان (Kresic, 2009a).

على أي حال، مع التحسن المستمر في الأساليب الميدانية والمعملية لتوصيف الصخور المتصدعة والكارستية وتوصيف طبقات المياه الجوفية، بما في ذلك تطوير حلول تحليلية ورقمية جديدة للمياه الجوفية. من المحتمل أن تتطلب الإدارة الناجحة للينابيع الكبيرة، في العديد من الحالات، تطبيقاً متزامناً لكل من السلاسل الزمنية والنماذج الحتمية، مما يتطلب تعاوناً وثيقاً بين علماء هيدرولوجيا المياه السطحية "التقليديين" وعلماء الهيدرولوجيا "التقليديين". ليكون مفيداً كأداة هندسية أو أداة لإدارة الينابيع، يجب أن يكون أي نموذج قادراً على الإجابة على الأقل عن بعض الأسئلة التالية أو أسئلة مشابهة:

- ماذا سيكون معدل تدفق الينابيع في نهاية هذا الشهر إذا لم يكن هناك أمطار؟ ماذا سيكون إذا كان هناك متوسط لهطول الأمطار هذا الشهر؟
- إذا كان هناك ضخ بئر مسموح به في المستقبل بمقدار ٢٠٠ لتر/ثانية على بعد ٣ كم من النبع، كيف سيؤثر ذلك على النبع؟
- ما هي المياه التي ستكون متاحة من ذلك النبع إذا كان هناك جفاف "كارثي" تاريخي؟
- هل يمكننا تنظيم النبع وسحب كميات من المياه في شهري أغسطس وسبتمبر أكثر مما يضخه بشكل طبيعي؟ هل يمكننا الاعتماد على قدرتنا على القيام بذلك كل عام؟ كيف سيؤثر ذلك على مجرى النهر؟
- هل يمكننا الاعتماد على جودة مياه جيدة من هذا النبع؟ طوال الوقت؟ كم مرة يجب علينا معالجة المياه؟
- هل يمكننا استخدام هذا النبع لزراعة سمك السلمون؟
- ما هي سعة محطة الطاقة الكهرومائية التي يجب أن نبنيها في النبع لتكون مربحة بأسعار الطاقة الحالية؟
- كم من الوقت سيستغرق وصول الملوث إلى النبع؟ ما هو تركيز الملوث بمجرد وصوله إلى النبع؟

من الواضح أن القدرة على الإجابة على هذه الأسئلة كميّاً (أي باستخدام نموذج) تعتمد في المقام الأول على البيانات المتاحة والأموال المطلوبة للحصول على هذه البيانات، بما في ذلك الوقت اللازم لذلك. ومع ذلك، وبغض النظر عن نهج النمذجة المختار والبيانات المتاحة، فإن أي إجابة ستكون أكثر أو أقل احتمالاً بشكل افتراضي. على سبيل المثال، على الرغم من أن نماذج الينابيع الحتمية تعتمد على بعض (قوانين) تدفق المياه الجوفية في باطن الأرض (طبقة المياه الجوفية)، فإن كل تنبؤ حول الحالة المستقبلية للنبع يعتمد إلى حد ما على هطول الأمطار في المستقبل، وهي عملية دورية عشوائية. تُسمى النماذج التي تستخدم معادلات رياضية لوصف عناصر تدفق المياه الجوفية رياضياً *mathematical*. واعتماداً على طبيعة المعادلات المستخدمة، يمكن

أن تكون هذه النماذج تجريبية أو احتمالية أو حتمية. يتم اشتقاق النماذج التجريبية من البيانات التجريبية التي يتم تركيبها على بعض الدوال الرياضية. ومن الأمثلة الجيدة على ذلك قانون دارسي. (لاحظ أن قانون دارسي وُجد لاحقاً أن كان نظرياً وأصبح في الواقع قانوناً فيزيائياً أو حتمياً). على الرغم من أن النماذج التجريبية محدودة النطاق، إلا أنها يمكن أن تكون جزءاً مهماً من جهود النمذجة الأكثر تعقيداً. على سبيل المثال، دراسات التتبع يمكن أن تؤدي الدراسات في مستجمعات مياه الينابيع (منطقة الصرف) إلى تطوير تعابير رياضية تصف انتقال المتتبع (المتتبعات) نحو النبع، بما في ذلك مكونات التدفق السريع (القنوي) والبطيء (المنتشر) حيثما يمكن بعد ذلك استخدام هذه الدوال في نمذجة السلاسل الزمنية العشوائية أو كأهداف معايرة في النماذج الحتمية الرقمية.

تعتمد النماذج الاحتمالية على قوانين الاحتمالات والإحصاء. يمكن أن يكون لها أشكال مختلفة وتعقيدات مختلفة، بدءاً من التوزيع الاحتمالي البسيط لتصريف الينابيع أو هطول الأمطار وانتهاءً بنماذج السلاسل الزمنية العشوائية المعقدة. لا تحاول مثل هذه النماذج وصف فيزياء كيفية تحويل المدخلات المائية المختلفة إلى تصريف الينابيع. هدفها الرئيسي هو إيجاد تعبير إحصائي رياضي مناسب يمكن أن يؤدي بدقة معقولة تحويل سلسلة زمنية واحدة (أو أكثر) إلى تصريف النبع أو بعض مكونات التصريف الأخرى (على سبيل المثال، تعكر المياه). القيود الرئيسية للاستخدام الأوسع لنماذج السلاسل الزمنية (العشوائية) في هيدروجيولوجيا وهيدرولوجيا الينابيع هي أنها (١) تتطلب مجموعات بيانات كبيرة لتحديد البارامترات و(٢) لا يمكن استخدامها عادةً للإجابة (التنبؤ) على بعض الأسئلة الشائعة من الممارسة الهيدروجيولوجية مثل تأثيرات الضخ الجديد المخطط له من طبقة المياه الجوفية.

تفترض النماذج الحتمية، التي يمكن أن تكون تحليلية أو رقمية، أن المرحلة أوردود الفعل المستقبلية لنظام (طبقة المياه الجوفية) محددة مسبقاً بالقوانين الفيزيائية التي تحكم تدفق المياه الجوفية. مثال على ذلك هو تدفق المياه الجوفية نحو بئر مخترق بالكامل في طبقة مياه جوفية محصورة، كما هو موصوف بمعادلة ثيس (Theis, 1935). يتم حل معظم المشاكل في الهيدروجيولوجيا التقليدية باستخدام نماذج حتمية، والتي سيتم وصفها بمزيد من التفصيل في القسم ٥-٧.

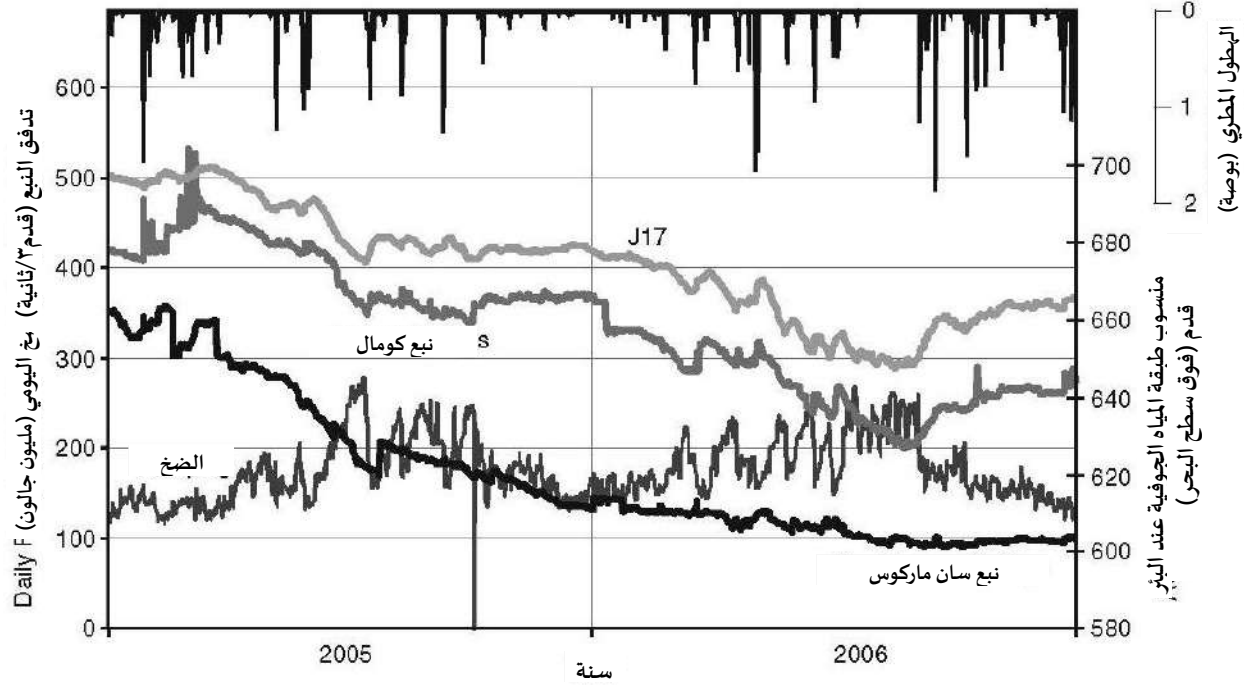
## ٥-٢ الارتباط والانحدار

الانحدارين المتغيرات المختلفة المترابطة بطريقة ما والمثلة بعدد كافٍ من نقاط البيانات ربما تكون الطريقة الكمية الأكثر شيوعاً في العديد من المجالات العلمية. في هيدرولوجيا الينابيع، يشير ذلك عادةً إلى إيجاد معادلة انحدار بسيطة أو متعددة تصف معدل تدفق النبع أو بعض خصائصه (ما يسمى بالمتغير التابع) باستخدام سلسلة زمنية مرصودة من المتغيرات المعروفة بتأثيرها. قد تتضمن هذه المتغيرات المستقلة مكونات مختلفة لميزانية المياه ومعاملات، مثل هطول الأمطار ومستويات المياه الجوفية ورطوبة التربة (انظر الشكل ٤-١).

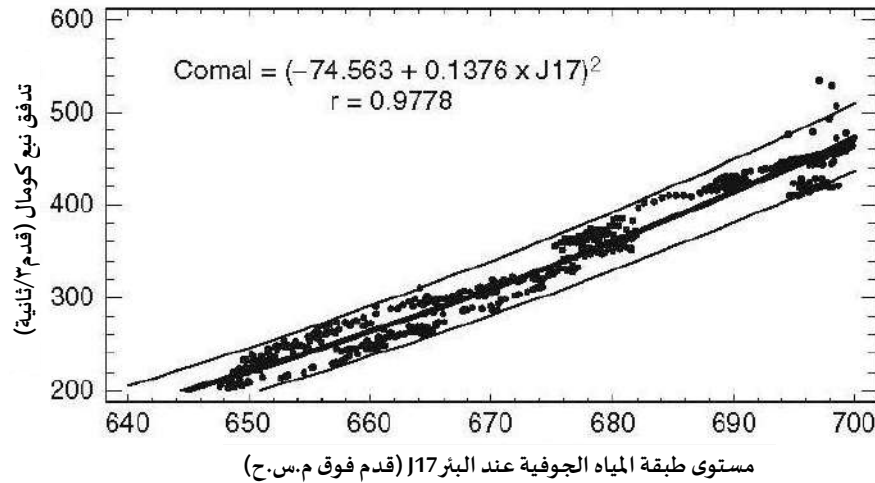
كما هو الحال مع جميع النماذج الأخرى المطورة من بيانات السلاسل الزمنية، يتم إجراء الانحدارين المتغيرات المرصودة في نفس الفترة الزمنية والمثلة بعدد كافٍ من الملاحظات ضمن عينات من نفس الطول: ترتبط التدفقات اليومية مع هطول الأمطار اليومي، وترتبط التدفقات الشهرية مع هطول الأمطار الشهري، وهكذا. يوصى دائماً بإجراء تحليلات انحدار مفردة ومتعددة بأكبر عدد ممكن من المتغيرات ذات الصلة قبل تطوير نماذج سلاسل زمنية أكثر تعقيداً. يتم تضمين الانحدار بشكل افتراضي في جميع برامج الحاسوب الإحصائية التجارية، ومعظم برامج جداول البيانات، والعديد من برامج المجال العام المتاحة على الإنترنت. مصحوبة بمخططات (رسوم بيانية) مختلفة، يمكن أن توفر نظرة ثاقبة لا تقدر بثمن في نظام طبقة المياه الجوفية-الينابيع.

توضح **الأشكال من ٥-١ إلى ٥-٥** أحد هذه التحاليل للتدفقات اليومية في ينابيع كومال وسان ماركوس التي تصب طبقة المياه الجوفية ادوارد في تكساس (انظر الفصل ١٠،٩ للاطلاع على مواقع هذه الينابيع). الضخ اليومي من المياه الجوفية في منطقة سان أنطونيو، ومستويات طبقة المياه الجوفية في بئر مؤشّر مقاطعة بيكسار J17، وهطول الأمطار في سان أنطونيو مقابل معدلات التدفق اليومي في النبعين. كما يمكن ملاحظة ذلك دون أي تحليل كمي تُظهر ينابيع كومال سبرينغز، الأقرب إلى البئر J17 وسان أنطونيو ارتباطاً أفضل مع معدل هطول الأمطار ومستويات طبقة المياه الجوفية. في الواقع، يظهر نموذج الانحدار البسيط لتصريف ينابيع كومال بناءً على مستويات المياه في البئر J17 (**الشكل ٥-٢**) مثالاً تقريبياً، استناداً إلى معامل الارتباط النموذجي ( $r = 0.978$ ). هذه القيمة قريبة جداً من ١، وهو ما يتوافق مع الدالة الرياضية. ومع ذلك، عند النظر إلى الرسم البياني لبقايا النموذج (**الشكل ٥-٣**)، من الواضح أنه لا يمكنه الوصف بدقة للمكونات الدورية المحتملة ولكن غير المعروفة. في هذه الحالة بالذات، فإن إضافة المزيد من المتغيرات إلى الانحدار، بما في ذلك الضخ من طبقة المياه الجوفية، لا يحسن النموذج ولا يزيل المكون الدوري الواضح لمخلفات النموذج.

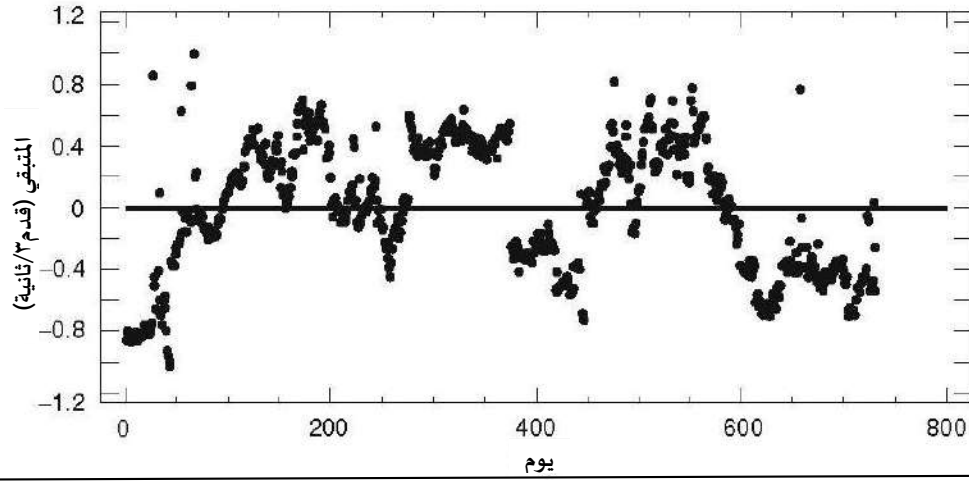
نظراً لأن كلا الينابيع عبارة عن ينابيع ارتوازية صاعدة، فلا يوجد تفاعل سريع مع هطول الأمطار اليومية في أي واحد منهما، باستثناء ينابيع كومال في أوائل عام ٢٠٠٥. وهذا ما يؤكد الغياب التام للارتباط، كما هو موضح في **الشكل ٥-٤**. حتى بالنسبة للينابيع التي تتفاعل بسهولة أكبر مع أحداث هطول الأمطار اليومية أو الأسبوعية، فإن الانحدار الخطي البسيط بين التدفقات وإجمالي هطول الأمطار في منطقة تصريف الينابيع ضعيف دائماً. بالإضافة إلى العديد من الأيام التي لا يوجد فيها هطول للأمطار خلال السنة الهيدرولوجية، وهناك أسباب أخرى لذلك: نفس كمية الأمطار تنتج استجابات موسمية مختلفة في النبع، اعتماداً على الأمطار السابقة ورطوبة التربة، ومعدلات التبخر والتنتج؛ وعادة ما يكون هناك بعض التأخير في الاستجابة للنبع حيث تنتقل المياه الراشحة حديثاً إلى منسوب المياه الجوفية ثم إلى النبع. يوضح التحليل أيضاً أن بعض الارتباطات قد تكون خطية أو قريبة من الخطية (**الشكل ٥-٢**)، في حين أن البعض الآخر قد يظهر لا خطية قوية (**الشكل ٥-٥**). أحد التفسيرات المحتملة للنمط المتعرج "الغريب" الذي يظهر في **الشكل ٥-٥** هو أن بعض مستويات حد طبقة المياه الجوفية (الرؤوس الهيدروليكية) في أجزاء معينة من طبقة المياه الجوفية مهمة لتأثير الضخ على تصريف النبع. ومع زيادة الضخ، يظل مستوى طبقة المياه الجوفية ومعدل تصريف



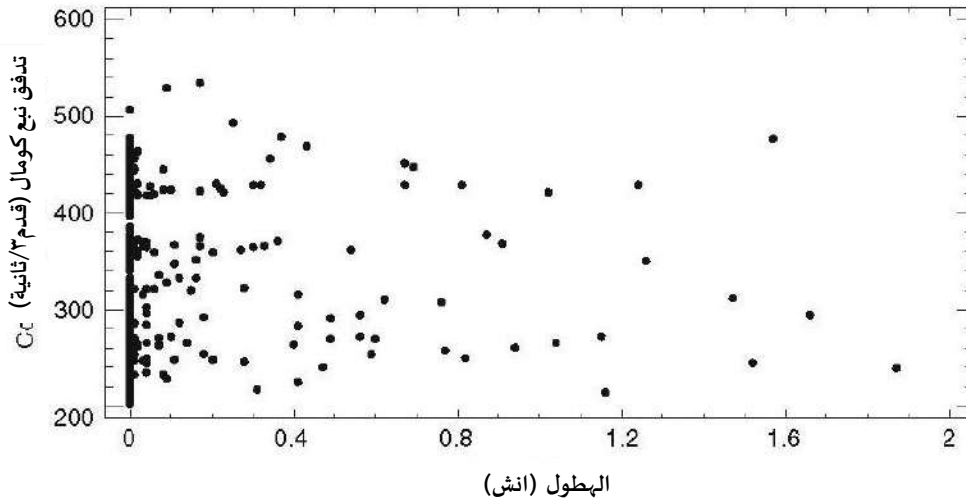
الشكل ٥-١ التدفقات اليومية عند ينابيع كومال وسان ماركوس مقابل الضخ من المياه الجوفية في منطقة سان أنطونيو ومستوى طبقة المياه الجوفية اليومية في بئر مقاطعة بيكسار J17، وهطول الأمطار اليومي في سان أنطونيو. (بيانات أولية من [San Antonio Water System, 2008](#)).



الشكل ٥-٢ نموذج الانحدار البسيط لتدفق ينابيع كومال على مستوى طبقة المياه الجوفية في بئر مقاطعة بيكسار J17، مع حدود التنبؤ بنسبة ٩٥%.



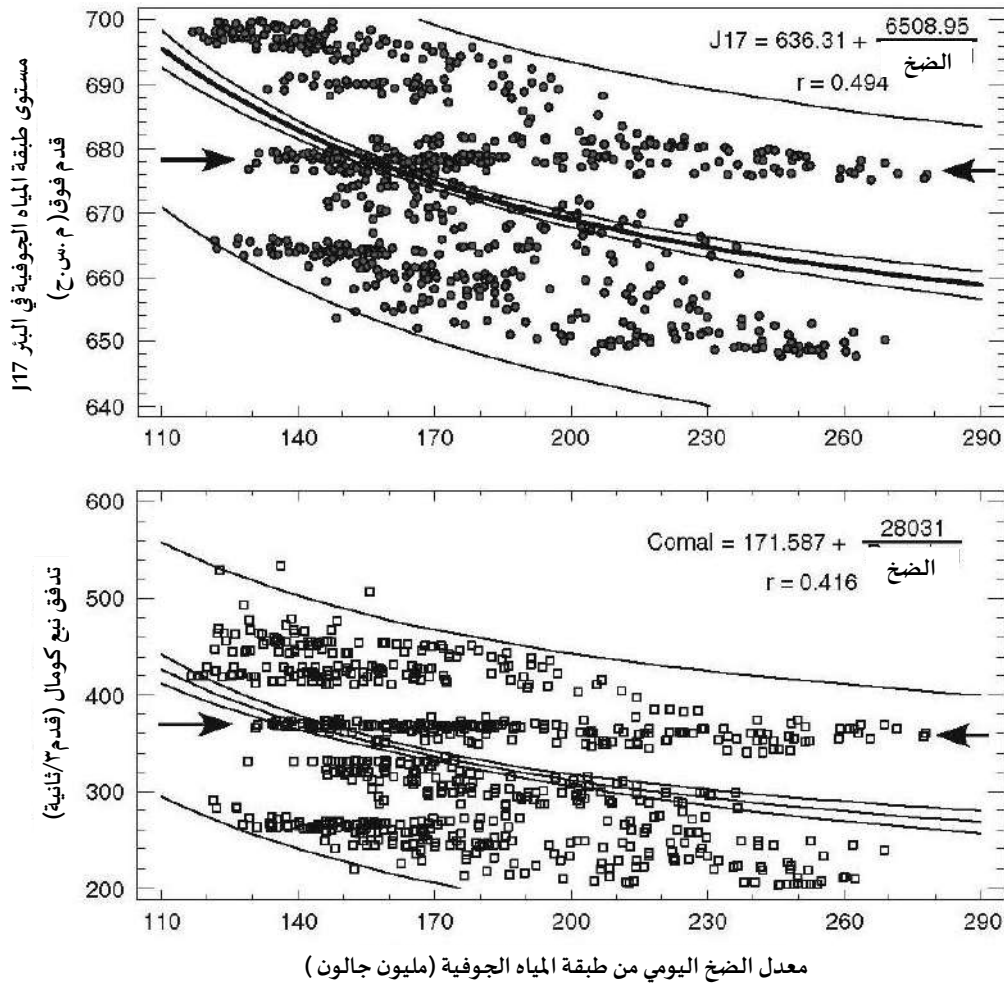
الشكل ٥-٣ متبقيات نموذج الانحدار الموضح في الشكل ٢-٥.



الشكل ٥-٤ تدفق نبع كومال مقابل هطول الأمطار.

النبع مستقرًا (المشار إليه بالأسهم)، ثم ينخفض ببطء، ثم ينخفض بشكل كبير إلى المستوى الأدنى التالي عند الوصول إلى الحد الأدنى. وهذا أمر شائع بالنسبة لطبقات المياه الجوفية الكارستية، كما هو موضح في الشكل ٤-١٠.

وينبغي دائماً مراعاة عدم الخطية المحتملة للعلاقة بين مستويات طبقات المياه الجوفية وتصريف الينابيع عند تطوير نماذج تنبؤية. ويبين الشكل ٥-٦ مثالاً نموذجياً واحداً وعدداً غير قليل من الأمثلة الأخرى شرحها بالتفصيل (Bonacci 1995, 1987). العلاقة بين إنتاجية النبع ومستوى مقياس الضغط خطية ما دامت الفتحة غير مغمورة ويكون التصريف عن طريق التدفق الزائد. بمجرد امتلاء الفتحة تكون الزيادة في سعة التصريف محدودة، في حين أن المستوى البيزومتري في طبقة المياه الجوفية يستمر في الارتفاع بمعدل أعلى بكثير.



الشكل ٥-٥ نموذج الانحدار لارتفاع مياه J17 (في الأعلى) ومعدل تدفق ينابيع كوماال (في الأسفل) على ضخ طبقة المياه الجوفية، مع ٩٥ في المائة من الثقة وحدود التنبؤ.

تتمثل إحدى الطرق الملائمة لتحسين انحدار تصريف الينابيع على هطول الأمطار في استخدام ما يسمى مؤشر هطول الأمطار السابقة (IAP)، والذي يأخذ في الحسبان بشكل غير مباشر تأثير رطوبة التربة والتغذية المائية بسبب هطول الأمطار التي هطلت قبل اليوم الحالي. الشكل العام لـ IAP للينابيع ذات الاستجابة السريعة لهطول الأمطار هي

$$IAP = \sum_{t=1}^i (C_t \times P_t) \quad (٥,١)$$

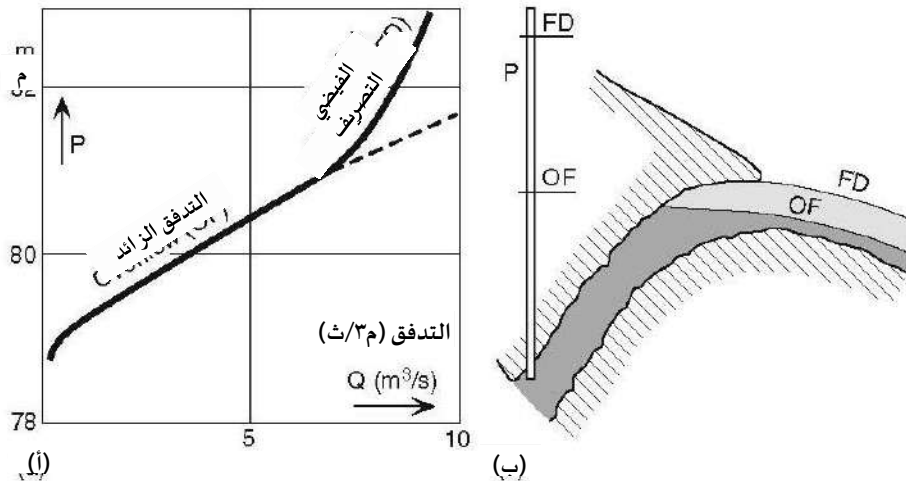
حيث  $t$  هو الفاصل الزمني (يوم واحد مثلاً)، و  $i$  هو إجمالي عدد الفترات الزمنية لحساب المعامل التجريبي IAP، و  $C_t$  هو المعامل التجريبي، و  $P_t$  هو هطول الأمطار في الوقت  $t$ . يوضح الشكل ٥-٧ بعض التعبيرات الشائعة لـ  $C_t$  وما يقابلها من انخفاض في الأوزان النسبية المعطاة لهطول الأمطار التي هطلت خلال الأيام العشرة السابقة. عندما يكون للنبع استجابة متأخرة لهطول الأمطار (التغذية)، فإن معدل هطول الأمطار في النبع يكون له ذروة ترجع (د) أيام إلى الماضي، بحيث يكون لهطول الأمطار الذي هطل في ذلك اليوم التأثير الأكبر على التصريف في اليوم الحالي (الشكل ٥-٨). يمكن تحديد زمن التأخير عن طريق التجربة بناءً على أعلى قيمة لمعامل نموذج الانحدار الذي يشتمل على معامل التأخير. كما يمكن تحديده أيضاً من الرسم البياني الارتباطي التبادلي لتصريف النبع والهطول المطري (انظر القسم التالي).

### ٥-٣ الارتباط التلقائي والارتباط التبادلي

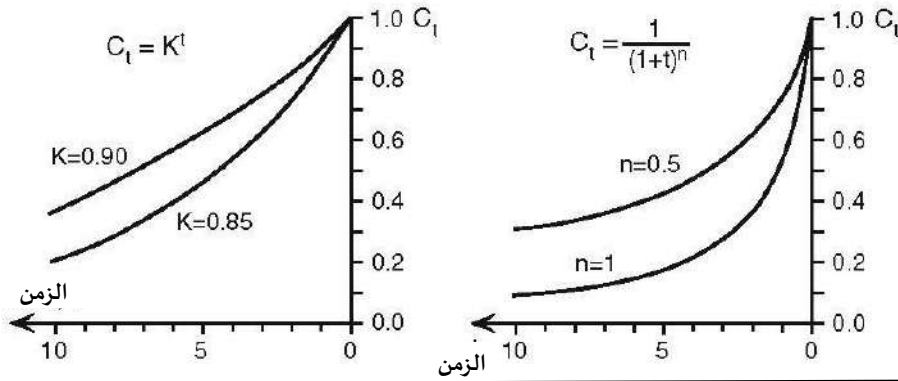
يمكن تحسين انحدار تصريف النبع بشكل كبير إذا كان أحد المتغيرات المستخدمة لوصف هو التصريف نفسه، وهو ما يسمى بالارتباط التلقائي. من الواضح أن التصريف في الوقت الحاضر يتأثر بـ (المرتبط) بتصريف اليوم السابق، والتصريف قبل يومين، وهكذا. وينطبق هذا على كل من الأطراف الهابطة (الانحسار) والأطراف الصاعدة من هيدروجراف النبع. تُظهر بعض الينابيع درجة أعلى من هذا الاعتماد المتبادل لمعدلات التدفق المتتالية، في حين أن البعض الآخر لديه "ذاكرة" أقصر. على سبيل المثال معدل التدفق، قبل ١٠ أيام أو أكثر قد يكون له تأثير ضئيل إحصائياً على التدفق في الوقت الحاضر. هذه الذاكرة للنبع من خلال معامل الارتباط التلقائي للسلسلة الزمنية (ويسمى أيضاً معامل الارتباط المتسلسل الذي يكون تقديره لأي فارق زمني  $k$  هو:

$$r_k = \frac{\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - x_{av})(x_{i+k} - x_{av})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{av})^2} \quad (٥,٢)$$

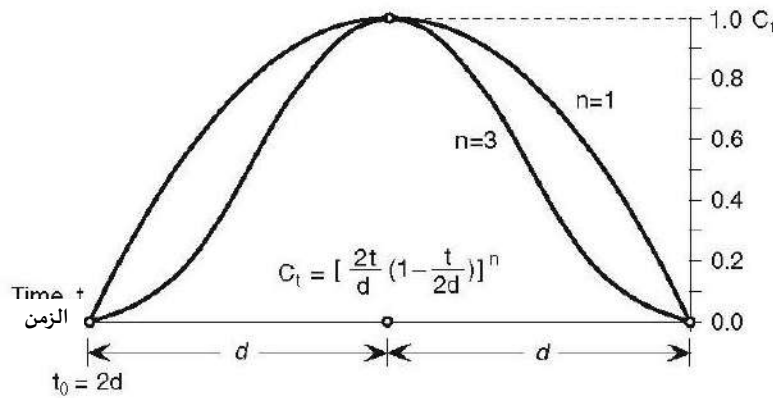
حيث  $n$  هو العدد الإجمالي للبيانات في العينة، و  $x_i$  هي قيمة المتغير (تصريف النبع) عند الزمن  $t = i$ ، و  $x_{i|k}$  هي قيمة المتغير عند الزمن  $t = i|k$ ، و  $\bar{x}$  هي متوسط قيمة البيانات في العينة. تعني **المعادلة (٥،٢)**، على سبيل المثال، أنه إذا تم قياس معدل تدفق الينابيع (متغير هيدرولوجي) على أساس يومي، فبالنسبة للارتباط التلقائي للمتأخر ١، نقرن القيم المسجلة في اليومين ١ و ٢، واليوم ٢ و ٣، واليوم ٣ و ٤ وهكذا. وبالتالي فإن عدد الأزواج في الارتباط التلقائي هو  $n - 1$ ، حيث  $n$  هو عدد نقاط البيانات. بالنسبة إلى التأخر ٢، نقرن اليومين ١ و ٣، واليوم ٢ و ٤ وهكذا. وبالتالي، يتناقص عدد الأزواج في الارتباط مرة أخرى وهو الآن  $n - 2$ . يُطلق على البسط في **المعادلة (٥،٢)** اسم **التباين التلقائي** (أو التباين التلقائي فقط، COV). ويُطلق على المقام بالتباين (VAR) للسلسلة الزمنية (لاحظ أن الجذر التربيعي للتباين يسمى الانحراف المعياري). يتم حساب معاملات الارتباط التلقائي لمختلف الفترات الزمنية ويتم رسمها على رسم بياني يسمى **مخطط الارتباط التلقائي**. يجب أن يكون عدد الفترات المتخلفة (معاملات الارتباط التلقائي) حوالي ١٠ بالمائة من إجمالي عدد البيانات للعينات الصغيرة. أما بالنسبة للعينات الكبيرة، مثل القيم اليومية على مدار سنة أو عدة سنوات، يمكن أن يصل عدد التأخر إلى ٣٠ في المائة.



الشكل ٥-٦ (أ) معدل التدفق مقابل الرأس الهيدروليكي عند مقياس الضغط  $P$ ، نبع ليوبوفيا المتقطع بالقرب من موستار، الهرسك. (ب) التدفق الزائد، تؤدي زيادة التصريف إلى زيادة في المقطع العرضي للتدفق عند المخرج وبالتالي زيادة طفيفة في الرأس الهيدروليكي عند  $P$ ؛ التصريف الفيضي، لا يمكن أن يزيد المقطع العرضي للمخرج أكثر من ذلك لأن الفتحة بأكملها ممتلئة. وتؤدي الزيادة الإضافية في التدفق إلى زيادة سريعة في الرأس الهيدروليكي عند  $P$ . (من Hajdin, 1981)



الشكل ٥-٧ التعبيرات الشائعة للمعامل  $C_t$  المستخدمة لتحديد مؤشر هطول الأمطار السابق (IAP)، عندما يظهر النبع استجابة سريعة لهطول الأمطار.



الشكل ٥-٨ المعامل  $C_t$  للينابيع ذات الاستجابة المتأخرة لهطول الأمطار.

إذا كان هناك بعض القدرة على التنبؤ بناءً على القيم السابقة للمتسلسلة بقيمتها الحالية، فإن المتسلسلة تكون ذاتية الترابط. المصطلحات التي غالباً ما تستخدم أيضاً لوصف سلسلة مترابطة ذاتياً هي *الثبات والذاكرة*. وإذا كانت السلسلة غير ذاتية الارتباط، فإنها تسمى *مستقلة* (أي أن الثبات غير موجود، أي أن السلسلة بدون ذاكرة). يتم اختبار الفرضية القائلة بأن السلسلة الزمنية مستقلة (ذاتية الترابط) من خلال اختبارات إحصائية مختلفة. أحد الاختبارات وأبسطها التي اقترحها بارتلليت (من

(Gottman, 1981). أن تكون مختلفة بشكل كبير عن الصفر عند مستوى الثقة ٠,٠٥ (أي باحتمال ٩٥ في المائة)، يجب أن يكون معامل الارتباط التلقائي:

$$r_k > \frac{2}{\sqrt{n}} \quad (٥,٣)$$

حيث  $n$  هو العدد الإجمالي للبيانات في العينة. في الممارسة الهيدرولوجية، غالباً ما يتم إجراء هذا الاختبار غالباً لأول أو أول تأخيرين، وهذا غير موصى به. من الأصح إجراء اختبار لكامل الارتباط المتبادل بأكمله، مع إدخال حدود الثقة. قد يكشف هذا عن مكونات متأخرة أو دورية محتملة في السلسلة الزمنية التي قد تُعتبر مستقلة في السلسلة الزمنية، إذا وُجد، على سبيل المثال، أن الفارق الزمني للمتأخر ٢ لا يختلف بشكل كبير من صفر. يعطي الاختبار الذي اقترحه أندرسون حدوداً للثقة لمخطط الارتباط بأكمله (Prohaska, 1981):

$$LC(r_k) = \frac{1 \pm Z_{\alpha} \times \sqrt{n - k - 2}}{n - k - 1} \quad (٥,٤)$$

حيث  $n$  هو حجم العينة، و  $k$  هو الفارق الزمني، و  $Z_{\alpha}$  هو قيمة المتغير المعياري الموزع توزيعاً طبيعياً عند مستوى الثقة؛ يمكن العثور على هذه القيم في جداول الكتب العامة عن الإحصاء. يقترح ماهن (١٩٨٤) أن يُطلق على الوقت اللازم لانخفاض المتغير المترابط إلى أقل من ٠,٢ اسم تأثير الذاكرة. وفقاً للمؤلف، في حالة طبقات المياه الجوفية الكارستية، تشير الذاكرة العالية للنوع إلى وجود شبكة كارستية ضعيفة التطور مع احتياطات تدفق مياه جوفية كبيرة (تخزين). في المقابل، فإن الذاكرة المنخفضة يُعتقد أنها تعكس انخفاض التخزين في طبقة المياه الجوفية الكارستية العالية. ومع ذلك، قام (Grasso and Jeannin, 1994) بتحليل مخططات الارتباط التلقائي لسلسلة زمنية اصطناعية ومنظمة للتصريف وأثبتا أن الزيادة في التكرار من أحداث الفيضانات تؤدي إلى انحدار أكثر في مخطط الارتباط. كما أشاروا إلى أنه كلما كانت ذروة حدث الفيضان أكثر حدة، كلما كان الطرف المتناقص في المخطط الارتباطي أكثر انحداراً. وبالمثل، يستلزم انخفاض معامل الانحسار انحداراً أكثر حدة في الطرف التنازلي للمخطط الارتباطي. كما تؤكد المحاكاة العددية الأمامية لهيدروغرافات النبع بواسطة (Eisenlohr et al, 1997). أن الشكل الناتج يعتمد بشدة على تواتر أحداث هطول الأمطار. ويبين هؤلاء المؤلفون أيضاً أن التوزيع المكاني والزمني لهطول الأمطار والنسبة بين الرشح المنتشر والمركّز لها تأثير قوي على شكل الهيدروغراف وبالتالي على المخطط الارتباطي. وبالتالي، لا يعتمد شكل المخطط الارتباطي وتأثير الذاكرة المشتقة على حالة نضج النظام الكارستي فحسب، بل يعتمد أيضاً على تواتر وتوزيع أحداث هطول الأمطار قيد الدراسة (Kresic, 1995; Kovacs and Sauter, 2007).

يُظهر الشكلان ٥-٩ و ٥-١٠ رسمين هيدروجرافيين لنفس النبع لسنتين مميزتين (رطوبة وجافة - لاحظ الفرق في مقياس محور هطول الأمطار) ومخططاتها التلقائية على التوالي. كما يتضح في الشكل ٥-١٠، فإن حدود الثقة تتباعد قليلاً، حيث أن عدد الأزواج في الارتباط (أي دقة الارتباط) يتناقص مع زيادة التأخر. بالنسبة إلى العينات الأصغر، يكون هذا التباعد أكثر وضوحاً. بالنسبة لسنة

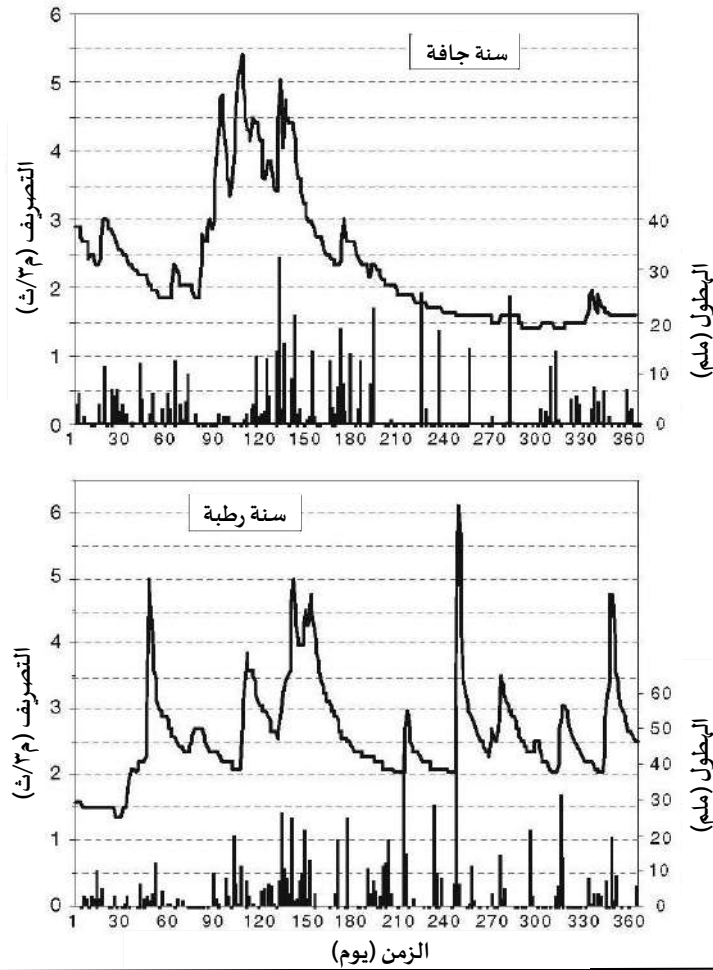
الجفاف، يتجاوز مخطط الارتباط التلقائي حدود الثقة لمدة ٦٠ يومًا تقريبًا، مما يشير إلى أن معاملات الارتباط التلقائي لهذه الفترة تختلف اختلافًا كبيرًا عن الصفر وأن عملية تصريف النبع ليست مستقلة. وبعبارة أخرى، يمتلك النظام ذاكرة طويلة، وبصفة عامة، فإن التدفقات لمدة تصل إلى ٦٠ يومًا سابقة مهمة للتدفق في اليوم الحالي. وهناك تفسير محتمل وهو أن تخزين طبقة المياه الجوفية، بما في ذلك مسامية الأرضية، كبير ويطلق المياه تدريجيًا. أما بالنسبة للسنة الرطبة، فالصورة مختلفة تمامًا. فذاكرة النظام التي تبلغ حوالي ٢٠ يومًا هي إلى حد كبير أقصر، وهو ما يمكن تفسيره من خلال حقيقة أن التدفق من هطول الأمطار متكرر بما يكفي لإحداث دور مهمين لتدفق المياه الجوفية من خلال الشقوق والكسور الكبيرة المفتوحة أو القنوات الكارستية في حالة طبقات المياه الجوفية الكارستية. هذه المسارات سريعة التصريف ذات سعة تدفق عالية، وهو ما يمكن رؤيته من خلال **الشكل ٩-٥**. إن تغيرات التدفق المتكررة في هذه المسارات تخفف من تأثير المصفوفة المحيطة التي تظهر خلال سنة الجفاف. كما نوقش مرارًا وتكرارًا في الفصول السابقة، يتأثر تدفق النبع بشكل أو بآخر بهطول الأمطار (أو أي مدخلات مائية أخرى)، وقد يتأخر هذا التأثير لأسباب متنوعة. في تحليل الارتباط التبادلي فإن العلاقة المعتمدة على الوقت بين الناتج أو المتغير التابع (مثل التدفق اليومي للينابيع) والمدخلات أو المتغير المستقل (مثل هطول الأمطار اليومي) يتم تحليلها من خلال حساب معاملات الارتباط التبادلي لمختلف الفترات الزمنية ورسم المخطط التبادلي المقابل. إن معامل الارتباط التبادلي لأي متخلف زماني  $k$  على النحو التالي

$$r_k = \text{معامل الارتباط التبادلي للمتأخر الزمني } k$$

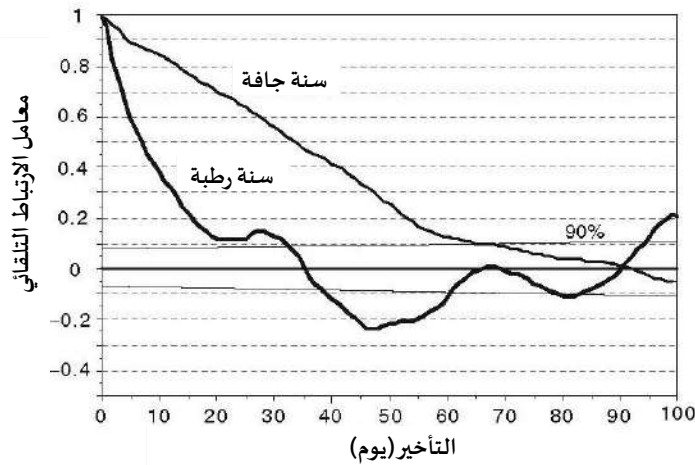
$$r_k = \frac{\text{COV}(x_i, y_{i+k})}{(\text{VAR}x_i \times \text{VAR}y_i)^{\frac{1}{2}}} \quad (٥,٥)$$

ويبين **الشكل ٥-١١** المخططات الارتباطية التبادلية لهيدروغراف النبع في **الشكل ٩-٥** (الجافة والرطوبة النموذجية). في كلتا الحالتين، تكون معاملات الارتباط التبادلي غير مهمة إحصائيًا بعد حوالي ١٢ يومًا، مما يشير إلى أن هطول الأمطار السابق بعد هذه الفترة ليس له تأثير مباشر على تصريف النبع. تُظهر الذروة الواضحة عند الفارق الزمني ١ للسنة الرطبة استجابة مهمة متأخرة ليوم واحد من أجهزة الإرسال الكبيرة في طبقة المياه الجوفية لأحداث هطول الأمطار الكبيرة. في سنة جفاف نموذجية، تكون هذه الاستجابة أقل وضوحًا بكثير، ولكن لها نفس الفارق الزمني (يوم واحد)، مما يشير إلى نفس آلية التصريف بعد هطول الأمطار الكبيرة. بشكل عام تُظهر القيم المنخفضة للمخطط التبادلي لكلا العاملين أن تأثير مكون التدفق السريع مخفف بشكل كبير بواسطة الوسط المسامي.

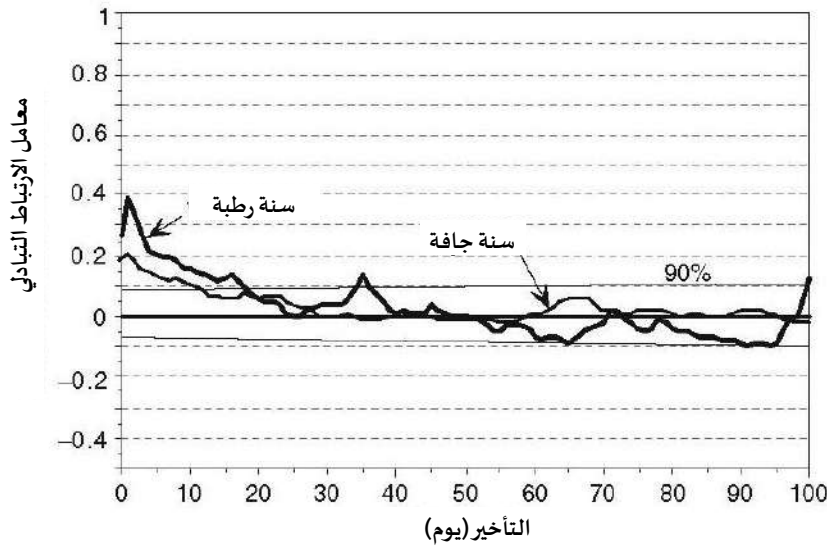
توضّح الأمثلة التالية التطبيقات الممكنة للارتباط التلقائي والارتباط التبادلي عند تطوير نماذج مفاهيمية لتصريف الينابيع. نبع أومبلا (**الشكل ٥-١٢**)، الذي يُستغل من أجل إمداد مدينة دوبروفنيك الساحلية الكرواتية بالمياه، ويصرف من أكثر من ٦٠٠ كم<sup>٢</sup> من التضاريس الكارستية الكلاسيكية النقية الناضجة في منطقة الديناريدس. نسبة الحد الأقصى للتدفق إلى الحد الأدنى للتدفق (معامل عدم انتظام الينابيع) أكثر من ١٠ في معظم السنوات، وتتضح الاستجابة السريعة جداً للأحداث المطرية الكبرى من خلال



الشكل ٥-٩ هيدروجراف تصريف مميز لنبع كارست كبير للسنوات الجافة والرطبة النموذجية. (من Kresic, 1997؛ حقوق الطبع والنشر Taylor & Francis).



الشكل ٥-١٠ مخططات الارتباط التلقائي لهيدروجرافات النبع الموضحة في الشكل ٥-٩ للسنوات الرطبة والجافة النموذجية. (من Kresic, 1997؛ حقوق الطبع والنشر Taylor & Francis).

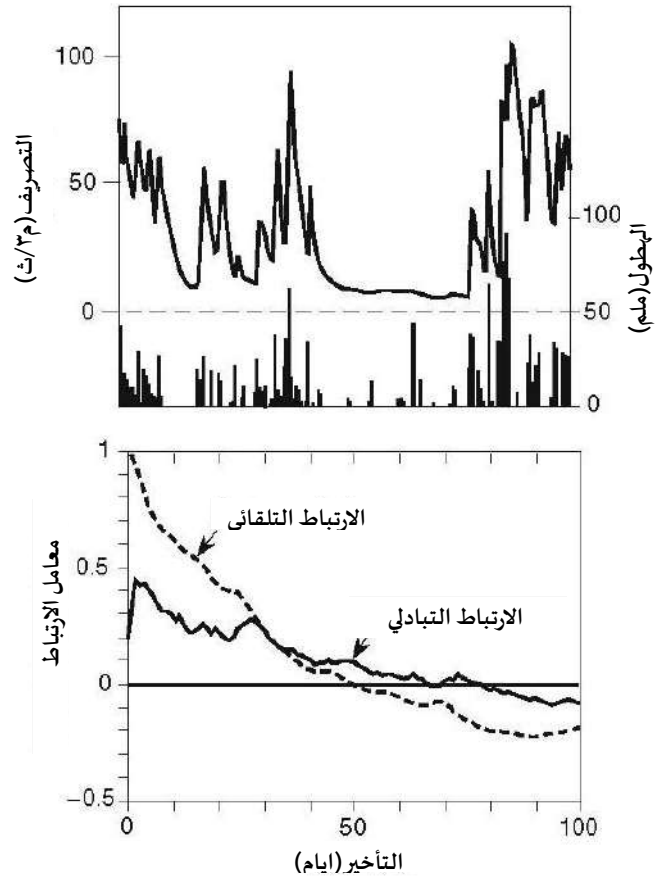


الشكل ٥-١١ المخططات الارتباطية التبادلية لتدفق النبع وهطول الأمطار في منطقة تصريفه للسنوات الرطبة والجافة النموذجية. (من Kresic, 1997: حقوق الطبع والنشر Taylor & Francis).

فارق زمني قصير من ٢-٣ أيام والمعامل المرتفع المقابل للارتباط التبادلي، قريب من ٠.٥ (القمة على الارتباط التبادلي في الشكل ٥-١٢).

الارتباط التلقائي الهام إحصائياً للتدفق وفقاً لمانجين ( $r_k > 0.2$ ) يستمر لأكثر من ٣٠ يوماً، وذلك بسبب الهطول المتكرر للأمطار والتدفق الأساسي المستقر (وإن كان منخفضاً) خلال أشهر الصيف. توفر هذه الحقائق تقييماً أولياً سريعاً يحدث التدفق بشكل رئيسي من خلال قنوات كبيرة قادرة على نقل الأمطار التي تتسرب بسرعة متساوية. شبكة القنوات، ومع ذلك، يتم تصريفها بسرعة وتفتقر إلى تخزين كبير. تساهم أنواع أخرى من المسامية في انتظام شديد في التدفق الأساسي الإقليمي (ما بين ٦ و ٧ م<sup>٣</sup>/ثانية) خلال فترات الصيف الطويلة. ومع ذلك، مع العلم أن منطقة المستجمع ربما أكثر من ٦٠٠ كم<sup>٢</sup> يبدو أن مسامية الأرضية الفعالة لطبقة المياه الجوفية منخفضة للغاية.

نبع جرزا Grza (الشكل ٥-١٣)، الواقع في الكارست شبه المغطى في شرق صربيا، لديه معامل عدم انتظام عالٍ جداً يبلغ ٢٢,٥ ولكن، في نفس الوقت، ارتباط ذاتي أعلى وأطول بكثير. الارتباط التبادلي غير مهم إحصائياً، على الرغم من أن هطول الأمطار في منطقة الصرف متكرر وموزعة بشكل منتظم على مدار العام. التقييم الأولي هو أن الرشح بطيء للغاية بالنسبة للتضاريس الكارستية. والتدفق القنوي غير سائد، وأنواع المسامية الفعالة الأخرى غير الموصلة والتخزين أكثر أهمية. ومن المفيد أيضاً معرفة أن منطقة المستجمع هي منطقة جبلية ذات تضاريس وثلوج تذوب بسرعة نسبياً خلال فصل الربيع. ويساهم ذوبان الثلوج هذا في ذروة التدفقات غير المرتبطة مباشرة بأحداث هطول الأمطار المستمرة.



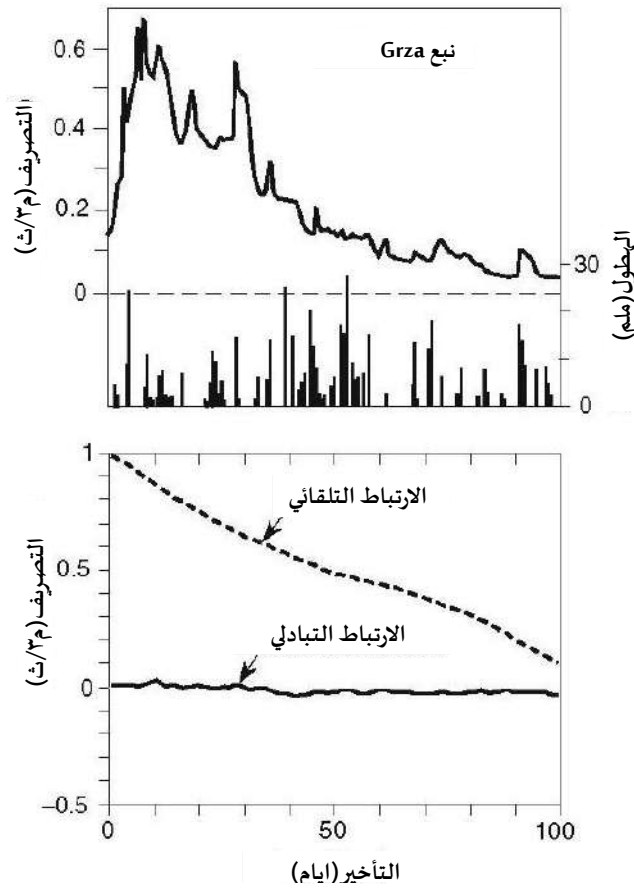
الشكل ٥-١٢ تحليل الارتباط التلقائي لتدفق النبع وتحليل الارتباط التبادلي لتدفق النبع وهطول الأمطار لنبع أومبلا في الكارست الكلاسيكي في منطقة الديناريس. (من Kresic, 1995؛ حقوق الطبع والنشر American Institute of Hydrology).

#### ٥-٤ نماذج الانحدار الذاتي والانحدار المتقاطع (ARCR)

يوفر تحليل منفصل للنماذج الانحدارية الذاتية البسيطة والنماذج الانحدارية المتقاطعة لتصريف الينابيع معلومات مفيدة عن بنية طبقة المياه الجوفية. يوضح الشكل ٥-١٤ مقارنة بين هذه النماذج للسنوات الرطبة والجافة النموذجية (يظهر هيدروجراف النبع في الشكل ٥-٩). النموذج الانحداري الذاتي الانحداري من الرتبة  $p$  هو (Kresic, 1997).

$$Q_t = a + b_1 Q_{t-1} + b_2 Q_{t-2} + \dots + b_p Q_{t-p} \quad (٥,٦)$$

حيث  $Q_t$  هو التصريف المتوقع في الوقت  $t$ ؛  $Q_{t-1}$ ، ...،  $Q_{t-p}$  هو التصريف في  $1$ ، ...، الأيام السابقة؛ أ، ب، ...،  $bp$  هي معلمات النموذج.



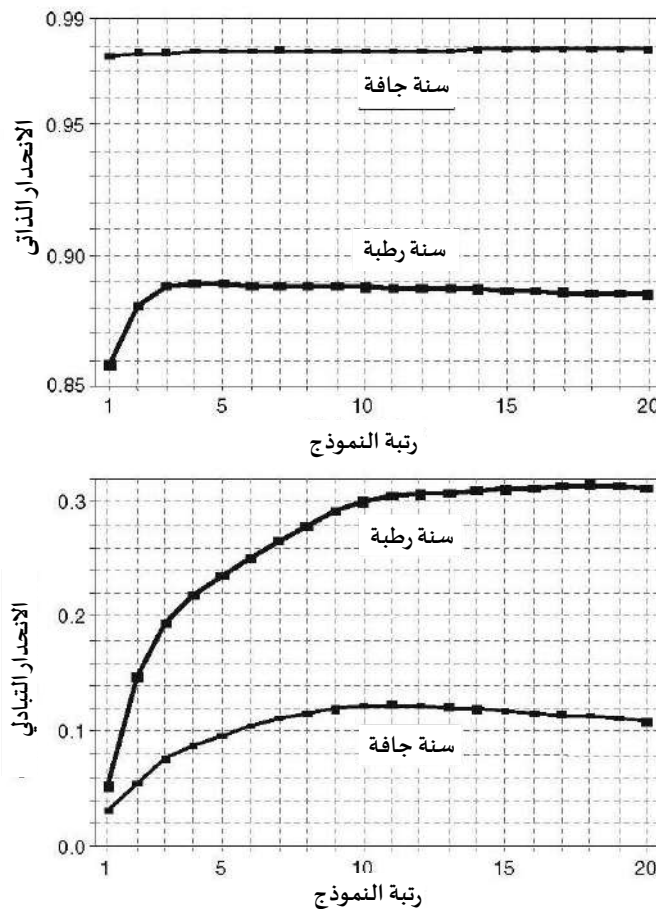
الشكل ٥-١٣ تحليل الارتباط التلقائي لتدفق النبع وتحليل الارتباط التبادلي لتدفق النبع وهطول الأمطار لنبع غرزا في الكارست شبه المغطى في شرق صربيا. (من Kresic, 1995؛ حقوق الطبع والنشر American Institute of Hydrology)

النموذج الانحداري المتقاطع من الرتبة  $q$  هو

$$Q_t = a + c_1 P_{t-1} + c_2 P_{t-2} + \dots + c_q P_{t-q} \quad (٥,٧)$$

حيث  $Q_t$  هو التصريف المتوقع في الوقت  $t$ ؛  $P_{t-1}$ ، ....،  $P_{t-q}$  هو هطول الأمطار في ١، ....،  $q$  الأيام السابقة؛ أ، ج ١، ....،  $c_q$  هي معلمات النموذج.

كما يتضح من الشكل ٥-١٤، فإن نماذج التدفق الانحداري التلقائي لها معاملات انحدار متعدد أعلى بكثير (والذي يعتبر مقياساً لجودة النموذج) أكثر من النماذج الانحدارية المتقاطعة، وهذا يرجع أساساً إلى أن النظام لديه ذاكرة داخلية طويلة ناتجة عن الإطلاق التدريجي للمياه الجوفية من المخزون.



الشكل ٥-١٤ مقارنة بين نمودي الانحدار الذاتي البسيط (في الأعلى) والانحدار التبادلي (في الأسفل) لتصريف النبع الموضح في الشكل ٥-٩. تقاس جودة النماذج بمعامل التريبع للانحدار المتعدد ( $R^2$ ). (من Kresic, 1997؛ حقوق الطبع والنشر Taylor & Francis).

يمكن استنتاج نفس الشيء من شكل المخططات التلقائية في الشكل ١٠-٥. وبالإضافة إلى ذلك، يستخدم النموذج الانحداري المتقاطع فقط إجمالي هطول الأمطار، ولا يزال حجم الرشح الفعال وتوزيعه الزمني غير معروفين. وهذا يُدخل الكثير من القيم الصفيرية في الانحدار التبادلي المتعدد ويقلل بشكل كبير من معاملاته. تظل معاملات نموذج الانحدار التلقائي مرتفعة باستمرار لكلتا السنتين. بالنسبة لسنة الجفاف، فهي أعلى من السنة الرطبة وتتغير بشكل ضئيل لجميع أوامر النموذج المختبرة. يمكن تفسير ذلك بحقيقة أن التدفق الناتج عن التصريف البطيء للشقوق الصغيرة والتجاويف المملوءة هو السائد دائماً من الناحية الإحصائية. أما في السنة الرطبة، فإن تدفق المياه الجوفية من خلال الشقوق الكبيرة (أو القنوات الكارستية خلال الأيام الثلاثة إلى الأربعة السابقة أكثر أهمية) (انظر الحد الأقصى على الرسم البياني للتقدم الذاتي في الشكل ١٤-٥). إن الرسم البياني للانحدار التبادلي للسنة الرطبة يتغير ميله بشكل كبير في الرتبة ٣، وبشكل أقل فجأة، مرة أخرى للرتبة ١٠، وبعد ذلك يبقى ثابتاً. يشير هذا أيضاً إلى أنه، في السنة الرطبة، يتأثر تصريف النبع إحصائياً بهطول الأمطار في الأيام العشرة السابقة، مع كون الأيام الثلاثة الأولى هي الأكثر أهمية.

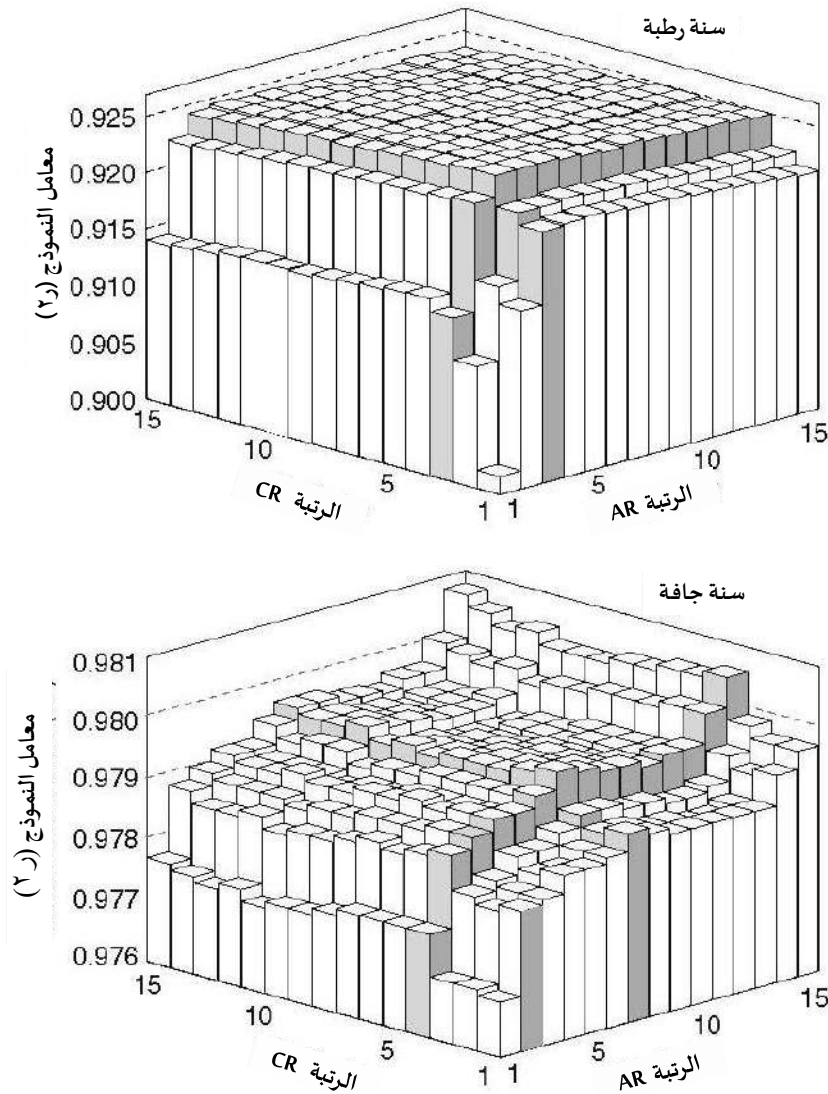
وبسبب عدم أهميتها الإحصائية، لا يمكن استخدام النماذج الانحدارية البسيطة للتنبؤ بتصريف النبع على سبيل المثال معامل الانحدار المتعدد للسنوات الرطبة والجافة لجميع الرتب أقل من ٠,٣٢ و ٠,١٣ على التوالي. ومن ناحية أخرى، فإن نماذج الانحدار التلقائي لكلتا السنتين لها معامل انحدار متعدد، والذي يقترب بالنسبة للسنة الجافة من الاعتماد الوظيفي تقريباً ( $R^2$  قريب من ٠,٩٨). وبالتالي فهي نماذج تنبؤية جيدة ويمكن استخدامها للتنبؤ عندما لا يكون تصريف النبع تحت التأثير المباشر لهطول الأمطار، أي في فترات الانحسار. نماذج الانحدار لا يمكن استخدامها للتنبؤ بناءً على بعض الهطول المتوقع، لعدم إمكاناتها إحداث تغيير في اتجاه الهيدروغراف (على سبيل المثال، من الهبوط إلى الارتفاع). كما لا يمكن استخدامها في توليد التدفق من الهطول التاريخي.

تنتمي نماذج ARCR إلى فئة نماذج السلاسل الزمنية متعددة المتغيرات وتشبه نماذج ARMAX أي نماذج ARMA مع متغيرات خارجية (Salas, 1993). ومع ذلك، فهي أقل تعقيداً، نظراً لأنه لا يتم تضمين مصطلح الخطأ في تقدير المتغيرات. وتكون رتبة النماذج بشكل عام منخفض - التصريف ويتم تضمين هطول الأمطار لمدة تصل إلى ثلاثة أو أربعة أيام سابقة. تزيد الرتب الأعلى من مضاعفات معاملات العلاقة المتعددة ( $R$ ) كمقياس لجودة النموذج، ولكن هذه الزيادات عادةً ما تكون غير مهمة. ومع ذلك، عندما تكون مساحة الصرف كبيرة (٥٠ كم<sup>٢</sup> أو أكثر) أو عندما يكون هناك تأخير كبير في تأثير هطول الأمطار على تصريف الينابيع، فإن الزيادة في الجزء الانحداري التبادلي قد تحسن صلاحية نموذج ARCR.

في هذه الحالة، فإن الجمع بين نموذجي الانحدار الذاتي والانحدار التبادلي يحسن بشكل كبير من صلاحية نموذج ARCR الحديث للسنة الرطبة. بالنسبة للسنة الجافة، يؤدي هذا الدمج إلى زيادة معامل الانحدار المتعدد بشكل ضئيل، لأن قيمته لنموذج الانحدار التلقائي البسيط لجميع الرتب المختبرة هي بالفعل قريبة من ٠,٩٨. ويُعطى نموذج الانحدار التلقائي البسيط على النحو التالي :

$$Q_t = a + c_1 P_{t-1} + c_2 P_{t-2} + \dots + c_q P_{t-q} \quad (٥,٨)$$

حيث الترميز هو نفسه كما في المعادلتين (٥,٦) و (٥,٧). ويمكن اختيار رتبة النموذج (q, p) من مجموعات مختلفة من أجزائه الانحدارية التلقائية (p) والتراجعية التبادلية (q). كما هو موضح في الشكل ٥-١٥.



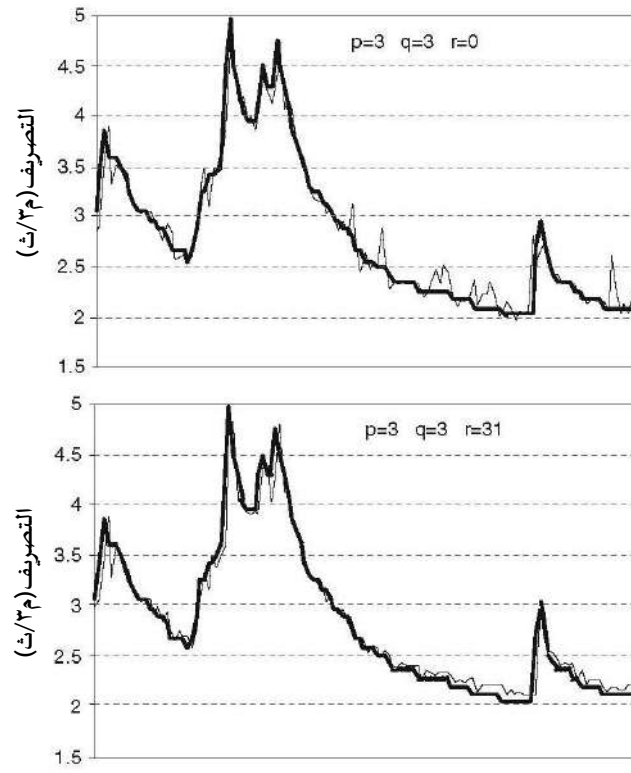
الشكل ٥-١٥ اعتماد معامل نموذج ARCR (R) على ترتيب الانحدار التبادلي والانحدار الذاتي الأجزاء. (من Kresic, 1997؛ حقوق الطبع والنشر Taylor & Francis).

بالنسبة للسنة الرطبة، يكون معامل النموذج (R2) له الحد الأقصى لـ  $p = 3$  و  $q = 3$ . وتؤدي الزيادة الإضافية في رتب الأجزاء الانحدارية الانحدارية (AR) والانحدارية التبادلية (CR) إلى تغيرات سلبية طفيفة لـ R2 الذي يبقى قريباً من ٠.٩٢٥. لا يحتوي نموذج السنة الجافة على حد أقصى واحد لمعامل الانحدار المتعدد. يكون لجزء الانحدار التلقائي أول تغيير إيجابي مفاجئ للترتبة ٢ ثم لـ ٧، عندما يصل أيضاً إلى الحد الأقصى الأول. R2 يزداد مرة أخرى لـ  $p = 14$  و  $q = ١٥$ . ومع ذلك، فإن هذه التغيرات لمعامل الانحدار المتعدد ذات حجم ضئيل، أي أقل من ٠.٠٠١. ومن ثم، فإن إدخال المزيد من المتغيرات في الانحدار التلقائي عن طريق زيادة ترتيب الانحدار التلقائي لا يزيد من صلاحية النموذج.

بصفة عامة، عندما تكون السلسلة الزمنية ذات ترابط ذاتي شديد (كما في هذه الحالة)، فإن نماذج AR من الرتبتين الأولى والثانية تعتبر كافية في الممارسة الهيدرولوجية.

يتسم الجزء الانحداري التبادلي للنموذج للسنة الجافة بالاتساق وترتيبه ٤ له أكبر زيادة في جميع أنحاء المجال الذي تم تحليله (انظر الشكل ٥-١٥). يمكن أن يكون ترتيب نموذج ARCR للسنة الجافة اختيار  $p = 2$  و  $q = 4$ ، أي (٢، ٤). تصريف النبع المتوقع للنموذج مقابل تصريف النبع المسجل لجزء من السنة الرطبة في الشكل ٥-١٦. عندما يستخدم النموذج هطول الأمطار الإجمالي الفعلي، تختلف القيم المتوقعة اختلافاً كبيراً عن تلك المقاسة خلال فترة الركود (الهيدرولوجراف العلوي في الشكل ٥-١٦).

ويرجع ذلك إلى أن النموذج يعطي نفس الوزن لجميع بيانات هطول الأمطار، بما في ذلك العواصف الصيفية المعزولة. ولا يأخذ في الحسبان زيادة التبخر والنتح ونقص الرطوبة في المنطقة غير المشبعة أو عوامل أخرى خلال أشهر الصيف التي تقلل بشكل كبير من الهطول المطري الفعال. ويُعد التقدير الصحيح للهطول المطري الفعال (الصافي) صعوبة كبيرة في النمذجة الهيدرولوجية للعلاقة بين هطول الأمطار والجريان السطحي. وينطبق هذا بشكل خاص على أنظمة المياه الجوفية حيث يمكن أن يكون رشح الأمطار قد تم تخفيفه بشكل كبير بواسطة الوسائط المسامية. وتختلف استجابة طبقات المياه الجوفية لنوبات التغذية على مدار العام اعتماداً على ظروف وسمك المنطقة غير المشبعة ومستويات منسوب المياه الجوفية، وموقع مناطق التصريف وعوامل أخرى.

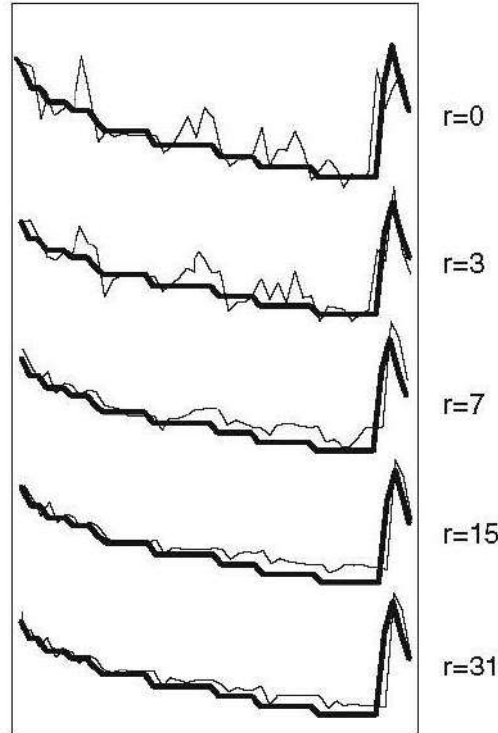


الشكل ٥-١٦ التصريف المسجل (الخط العريض) مقابل التصريف المتوقع للربيع لفترة الصيف في سنة رطبة نموذجية. (في الأعلى) نتيجة نموذج الانحدار التلقائي والانحدار المتقاطع بدون مرشح المتوسط المتحرك ( $r = 0$ ). كل من الانحدار التلقائي والجزء الانحداري المتبادل لدية رتبة ثالثة. (أسفل) نتيجة تطبيق مرشح خطي للمتوسط المتحرك لمدة ٣١ يومًا على السلسلة الزمنية لإجمالي هطول الأمطار في منطقة تصريف النبع. كما يظهر القسم الانحداري من الهيدرولوجراف أيضًا في الشكل ٥-١٧. (من Kresic, 1997: حقوق الطبع والنشر Taylor & Francis).

تتمثل إحدى الطرق البسيطة لوصف تخفيف الهطول المطري الإجمالي رياضيًا في تحويل البيانات باستخدام مرشح خطي متوسط متحرك. ويوضح الشكل ٥-١٧ نتائج هذا التحويل باستخدام متوسطات متحركة. بينما يوضح الشكل ٥-١٨ مبدأ التحويل باستخدام نافذة المتوسط المتحرك ٥. ويعطى نموذج ARCR الذي يتضمن بيانات مدخلات هطول الأمطار المعدلة على النحو التالي:

$$Q_t = a + b_1 Q_{t-1} + \dots + b_p Q_{t-p} + c_1 P_{r,t-1} + \dots + c_q P_{r,t-q} \quad (٥,٩)$$

حيث  $r$  هو طول نافذة المرشح الخطي المستخدم لتحويل سلسلة الترسيب. الترميز الآخر كما في المعادلتين (٥,٧) و (٥,٨).

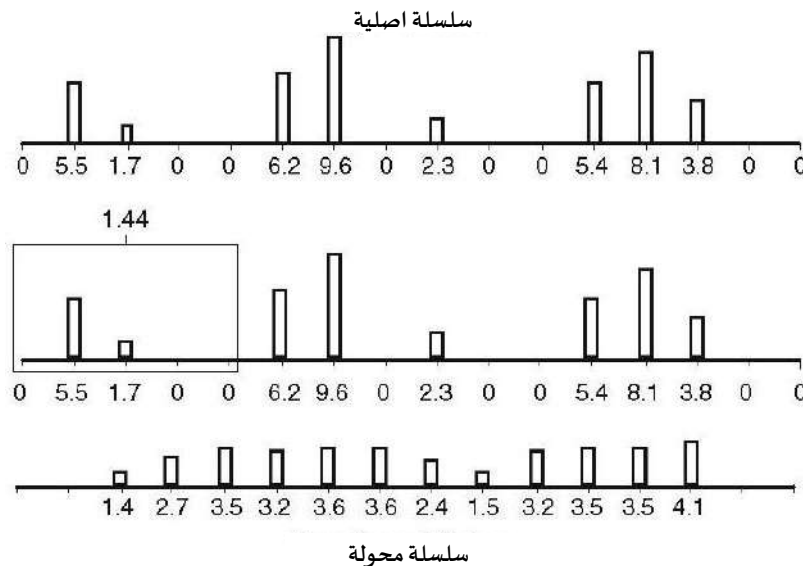


الشكل ٥-١٧ تأثير نافذة المتوسط المتحرك المتزايد (من الأعلى إلى الأسفل) على التصريف المتوقع للنبع (خط رفيع). الخط السميك هو تصريف النبع المسجل. (من Kresic, 1997؛ حقوق الطبع والنشر Taylor & Francis).

إن تطبيق مرشح المتوسط المتحرك يقلل في الواقع بشكل طفيف من معامل النموذج المتعدد للانحدار المضاعف: وهذا هو السبب في تفضيل التحديد البصري لطول المرشح. يمكن أن نرى في الشكل ٥-١٦ أنه بالنسبة لفترات التغذية فإن كلاً من الهطول الإجمالي والمتحول يعطي تنبؤات جيدة. والفرق بين الاثنين واضح في حالة الانحسار عندما يعطي الهطول المحول نتيجة أفضل بكثير. يمكن بناء نموذج بسيط للتعرف على التصريف والهطول المطري عن طريق إعداد البيانات باستخدام أي جدول بيانات وبرنامج انحدار متعددة؛ حيث يتم ترتيب السلاسل الزمنية للتصريف والهطول المطري في عدد من الأعمدة التي تتوافق مع العدد الإجمالي لأوامر ARCR، ثم يتم إزاحة تأخر واحد في كل مرة. بالنسبة لنموذج ARCR (٣، ٣)، يتم التنبؤ بتدفق النبع بناءً على هطول الأمطار المسجلة في ذلك اليوم، والتدفقات وهطول الأمطار للأيام الثلاثة السابقة:

$$Q_t = a + b_1 Q_{t-1} + b_2 Q_{t-2} + b_3 Q_{t-3} + c_0 P_t + c_1 P_{t-1} + c_2 P_{t-2} + c_3 P_{t-3} \quad (٥,١٠)$$

كما ذكرنا سابقاً، فإن النماذج الانحدارية التبادلية عادةً ما يكون لها معامل انحدار متعدد منخفض، وهو أحد مقاييس صلاحيتها. هذا لأن التدفق اليومي المستمر للينابيع ينعكس على الهطول اليومي، والذي غالباً ما يكون صفراً. وتتمثل إحدى طرق تحويل سلسلة هطول الأمطار في تطبيق متوسط متحرك بسيط، كما هو موضح في الشكل ٥-١٨. في هذا المثال، تكون نافذة المرشح ٥، مما



الشكل ٥-١٨ تطبيق مرشح المتوسط المتحرك الخطي لتحويل سلسلة هطول الأمطار. لاحظ أنه يتم تقليل العدد الإجمالي للبيانات في السلسلة المحولة بمقدار  $m-1$  حيث  $m$  هو طول نافذة المرشح ( $m = 5$  في هذه الحالة). (من Kresic, 1997؛ حقوق الطبع والنشر Taylor & Francis).

يعني أن خمس نقاط بيانات يتم جمعها في وقت واحد ويتم تعيين متوسطها للنقطة المركزية في النافذة. ثم تتحرك النافذة موضعاً واحداً ويتكرر حساب المتوسط. تكون السلسلة الناتجة أكثر سلاسة: تنخفض قيم هطول الأمطار المرتفعة وتزيد القيم المنخفضة (بما في ذلك الأصفار). السلسلة المحولة الجديدة بعد ذلك في نموذج ARCR بدلاً من إجمالي بيانات الهطول (الإجمالي). يمكن اختبار العديد من المرشحات الرياضية والإحصائية الأخرى واستخدامها لإنتاج ملاءمة أفضل (انظر مثلاً الشكلين ٥-٧ و٥-٨). تعطي

نماذج ARCR تنبؤات مستقبلية صالحة لخطوة واحدة فقط في كل مرة (على سبيل المثال، اليوم التالي)، لأنه بالنسبة للفترات الثانية والفترات التالية، فإن القيم الحقيقية لتصريف الينابيع غير معروفة وتدهور الثقة بالنموذج وحدود التنبؤ بسرعة.

## ٥-٥ تحليل النظام ووظائف التحويل

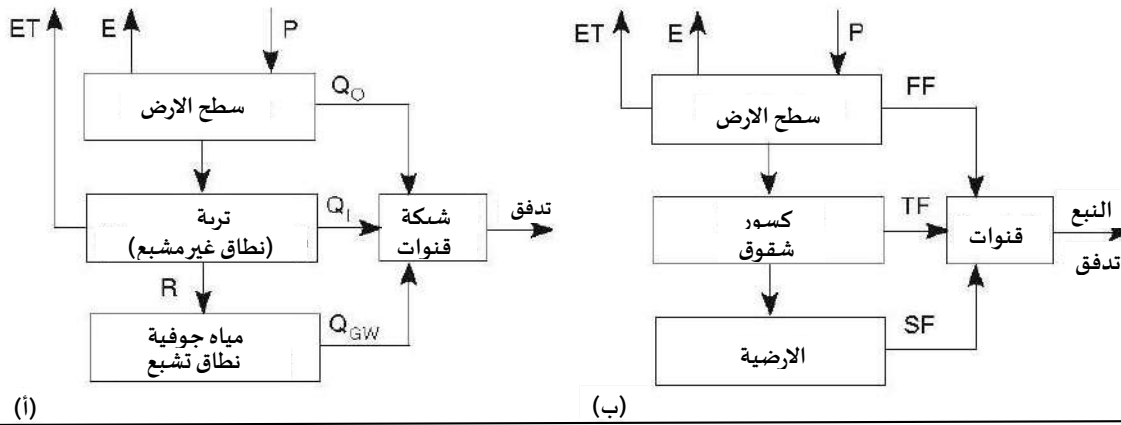
لقد كان تحويل الهطول المطري إلى تدفق في القنوات هو المحور الأساسي الهيدرولوجيين التطبيقيين للمياه السطحية لعقود. كما ذكرنا من قبل، لأن هيدروغرافيا العديد من الينابيع الكبيرة تشبه إلى حد كبير هيدروغرافيا الجداول السطحية، فإن معظم، إن لم يكن كل الطرق الكمية التي تم تطويرها في هيدرولوجيا المياه السطحية تنطبق على هيدرولوجيا الينابيع أيضاً. المناقشة التالية، التي ترسم أوجه التشابه بين هذين النظامين المرتبطين ارتباطاً وثيقاً (الجداول السطحية والينابيع الكبيرة)، تستند إلى المنشور الرائد لـ [Dooge 1973](#)، النظرية الخطية للنظم الهيدرولوجية، الذي نشرته وزارة الزراعة الأمريكية ([Dooge 1973](#)).

لا يتم التمييز الموضح في [الشكل ١٩-٥ أ](#) بين التدفق السطحي والتدفق البيئي وتدفق المياه الجوفية بشكل عام في هيدرولوجيا المياه السطحية التطبيقية، لأنه من المستحيل عملياً الفصل بين الأنواع الثلاثة. ويوضح [الشكل ١٩-٥ ب](#) قياس هذا المخطط في هيدرولوجيا الينابيع. التدفق السطحي وهو أسرع مكون لتوليد التدفق المائي بعد هطول الأمطار، يعادل التدفق من النوع القنوي (التدفق السريع) في طبقات المياه الجوفية الكارستية والطبقات الصخرية الكارستية السطحية والطبقات الصخرية المتشققة التي تظهر سلوكيات أقرب ما تكون إلى سلوكيات الجداول السطحية. ويعادل التدفق البيئي أنظمة الشقوق الكسرية، والمياه الجوفية (التدفق الأساسي للجداول السطحية) مكافئ لتخزين الأرضية (التدفق المنتشر أو مكون "التدفق الأساسي للينابيع" من تصريف الينابيع).

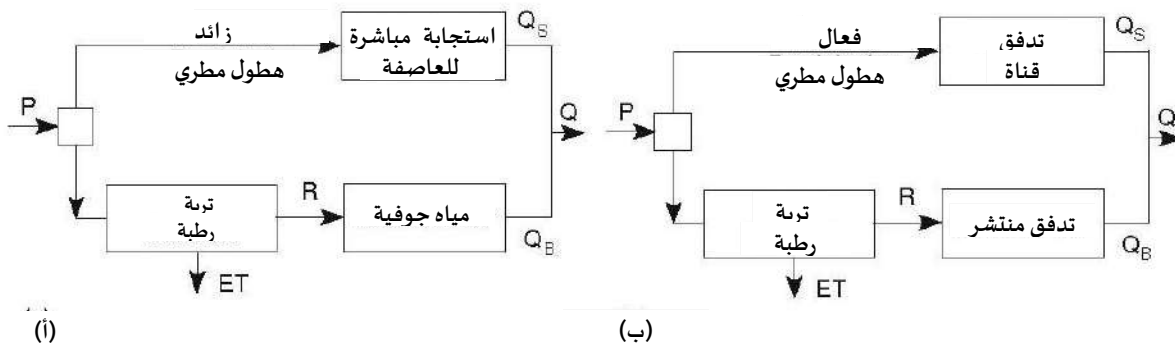
يميز الهيدرولوجيون التطبيقيون بين التدفق السطحي وتدفق الأساس ويستخدمون النموذج المبسط للدورة الهيدرولوجية الموضحة في [الشكل ٢٠-٥ أ](#). ويظهر القياس مع الينابيع في [الشكل ٢٠-٥ ب](#).

ينقسم الهطول المطري إلى (١) فائض هطول الأمطار و (٢) رشح وفوقه أخرى. فائض الهطول ينتج الجريان السطحي المباشر للعواصف. في هيدرولوجيا الينابيع، يعادل فائض هطول الأمطار الرشح السريع إلى المنطقة المشبعة، وهو ما ينتج الاستجابة الأولى في النبع. يقوم الرشح بتجديد التربة الذي يستنفد بدوره عن طريق النتج. وأي رشح زائد بعد استيفاء رطوبة التربة يشكل تغذية المياه الجوفية، والتي تظهر في النهاية كتدفق أساسي. وفي هيدرولوجيا الينابيع، فإن "المياه الجوفية" هي التخزين في أرضية طبقة المياه الجوفية، والتدفق الأساس هو تدفق الينابيع خلال فترات الانحسار.

إن وجود الحد في مرحلة تخزين التربة في النظام يجعل من المستحيل التعامل مع النظام بأكمله على أنه خطي، حتى عندما يكون التبخر والنتج معروفين تماماً. في هيدرولوجيا المياه السطحية يعتبر تطوير نظرية هيدروغراف الوحدة كعلاقة خطية بين فائض هطول الأمطار والجريان السطحي للعواصف متجنب وهذه الصعوبة من استبعاد التدفق الأساسي والرشح. إن وجود هذا الحد،



الشكل ٥-١٩ (أ) منطقة الصرف (مستجمع المياه) لمجرى سطحي كنظام هيدرولوجي:  $P$  = هطول الأمطار،  $E$  = التبخر،  $ET$  = التبخر النتح،  $R$  = إعادة التغذية،  $Q_O$  = التدفق البيئي،  $Q_I$  = التدفق البيئي،  $Q_{GW}$  = التدفق الأساسي من المياه الجوفية (معدلة من Dooge, 1973). (ب) طبقة المياه الجوفية التي يصرفها نبع كنظام هيدرولوجي:  $FF$  = التدفق السريع (قنوات)،  $TF$  = تدفق انتقالي (شقوق)،  $SF$  = تدفق بطيء (ارضية، شقوق صغيرة).



الشكل ٥-٢٠ (أ) نموذج مستجمعات المياه السطحية المبسطة:  $Q_S$  = الاستجابة للعاصفة،  $Q_B$  = التدفق الأساسي،  $Q$  = التدفق الكلي،  $P$  = هطول الأمطار،  $ET$  = التبخر والنتح،  $R$  = تغذية المياه الجوفية. (معدلة من Dooge, 1973). (ب) نموذج مكافئ لطبقة المياه الجوفية-النبع.

بدلاً من الفرق في زمن الاستجابة بين الاستجابة السطحية والاستجابة الأرضية هو ما يستلزم الفصل. في الهيدرولوجيا التطبيقية، نادراً ما يستخدم النموذج الكامل الموضح في الشكل ٥-٢٠. وبدلاً من ذلك، يتم فصل التدفق الأساسي عن الهيدروغراف الكلي بطريقة اعتباطية ما، و ثم يؤخذ فائض هطول الأمطار على أنه مساوٍ في القيمة (الحجم) للجريان السطحي للعاصفة. إذا كانت رطوبة التربة في التحليل، فيجب عندئذٍ تحديد تأثير الحد الكامن في تخزين رطوبة التربة.

كما أكد Dooge، إذا كانت هناك رغبة في النظر في النظام بأكمله الموضح في الشكل ٥-١٩ أو ٥-٢٠، فسيتمتع على المرء عندئذٍ التعامل مع نظام غير خطي، وهو ما يجلب جميع صعوبات الرياضيات غير الخطية. ولذلك، ليس من المستغرب أن التركيز في كل من المياه السطحية والجوفية على المكونات الفردية الموضحة في الشكل ٥-٢٠. تقنيات هيدروغراف الوحدة المختلفة (دوال الاستجابة الدافعة) للتعامل مع الاستجابة المباشرة في الجريان السطحي، وجميعها مبنية على افتراض السلوك الخطي. ومؤخراً فقط أخذت نمذجة النظام غير الخطي في النبع الاستجابة للجريان السطحي (انظر Jukic and Denic 'Jukic, 2006). تظل المرحلة غير المشبعة التي تتضمن تخزين رطوبة التربة أصعب جزء من الدورة الهيدرولوجية عند التعامل معها. ولا يقتصر الأمر على وجود حد فحسب، بل هناك آلية للتغذية الراجعة، لأن حالة رطوبة التربة تحدد كمية الرشح.

أساس الطرق الأكثر تطبيقاً لنمذجة الجريان السطحي وتصريف الينابيع باستخدام نهج النظام الخطي هي المبادئ الثلاثة التالية: (١) التراكب، (٢) الثبات الزمني، و (٣) تجميع مدخلات ومخرجات النظام معاً. في الواقع، لا ينطبق أيٌّ من المبادئ الثلاثة، ولكنها تبسط الإجراء إلى حد كبير وقد تؤدي إلى نتائج مرضية (Dooge, 1973). يعني التراكب أنه يمكن جمع أي عدد من المدخلات (س) معاً بحيث يكون الناتج (ص) هو مجموع المخرجات الفردية المتناظرة (انظر أيضاً الشكل ٤-٤). يجب تمييز خطية النظام التي يحددها مبدأ التراكب عن وجود علاقة وظيفية خطية عامة (أي خط مستقيم) بين المدخلات والمخرجات.

يُقال إن النظام ثابتاً زمنياً عندما لا تتغير معاملاته بمرور الزمن. بالنسبة لمثل هذا النظام، يعتمد شكل الخرج فقط على شكل المدخلات وليس على الوقت الذي يتم فيه تطبيق المدخلات. يتم أيضاً تبسيط مشاكل تحليل الأنظمة وتولييفها إلى حد كبير إذا تم افتراض أن مدخلات ومخرجات نظام ما مترابطة معاً. في النظام المقطوع ذي المدخل الواحد والمخرج الواحد، يمكن وصف سلوك النظام بمجموعة من المعادلات التفاضلية. إذا لم تكن المدخلات والمخرجات مجمعة معاً، عندها يجب وصف سلوك النظام بواسطة معادلات تفاضلية جزئية، والتي تكون أصعب بكثير من المعادلات التفاضلية العادية.

يمكن تقدير مدى شمول نهج النظام الخطي في الهيدرولوجيا عند النظر إلى الصور البيانية في الشكلين ٥-٢١ و ٥-٢٢. يحتاج المرء إلى مراقبة هطول الأمطار فقط (وربما بعض معاملات الأرصاد الجوية الأخرى التي تلعب دوراً مهماً في حسابات ميزانية المياه) وتصريف الينابيع من أجل وصف النظام رياضياً (طبقة المياه الجوفية). بطبيعة الحال، هناك العديد من الأسئلة المتعلقة بطبيعة النظام لا تزال دون إجابات، ولكن هناك أداة تنبؤية بالإضافة إلى بعض البارامترات الكمية المفيدة التي قد تساعد في توجيه جهود التوصيف الإضافية.

تعتمد الصيغة الرياضية للنظام الخطي المقطوع المتغير زمنياً على مفهوم الدالة الدافعة (المدخلات) والاستجابة الدافعة (المخرجات) على النحو التالي (Dooge, 1973):

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau)x(\tau)d\tau \quad (٥,١١)$$

حيث  $y(t)$  هو الخرج في الزمن  $t$ ؛  $x(t)$  هو الدخل في الزمن  $t$  ممثلاً بالمعاملات المتعامدة لدالة الدافع أو دالة دلتا؛  $h(t - t)$  هي دالة الاستجابة الدافعة. يمثل الطرف الأيمن من المعادلة (٥,١١) العملية الرياضية المعروفة للتدوير، والتي يُعبّر عنها عادةً بعلامة النجمة:

$$y(t) = h(t)^*x(t) \quad (٥,١١ب)$$

تُسمى دالة الاستجابة الدافعة في المعادلة (٥,١١) هيدروجراف الوحدة اللحظي (IUH) في علم الهيدرولوجيا؛ وفي الرياضيات تسمى دالة النواة. بالنسبة لمتسلسلتين محدودتين منفصلتين مترابطتين (على سبيل المثال، هطول الأمطار وتصريف الينابيع)، تصبح معادلة الالتفاف تصبح (Dooge, 1973; Dreiss, 1982, 1989a, 1989b)

$$y_i = \Delta t \sum_{j=0}^i x_j h_{i-j} + \epsilon_i \quad i = 0, 1, 2, \dots, N \quad (٥,١٢)$$

حيث  $N$  هو عدد النقاط للقيمة المتوسطة للمدخلات خلال الفترة  $j$ ؛  $h_{i-j}$  هي دالة النواة خلال الفترة  $i-j$ ؛  $\epsilon_i$  هو الخطأ الناجم عن عدم الخطية المتأصلة في النظام وأخطاء القياسات.

إذا كانت  $x_j$  و  $h_{i-j}$  معروفة، فيمكن تحديد  $y_i$  مباشرة عن طريق الالتفاف. إذا أمكن تحديد  $x_j$  و  $y_i$ ، عندئذٍ يمكن تحديد  $h_{i-j}$  (الدالة النواة) من خلال فك الالتفاف (Dooge, 1973; Dreiss, 1982, 1989b).

يتم الحصول على حل المعادلة (٥,١٢) عن طريق تصغير مجموع الأخطاء المربعة

$$\sum_{i=0}^N \epsilon_i^2 \Rightarrow \min \quad (٥,١٣)$$

بافتراض أن دالة النواة المتقطعة غير سالبة

$$h_k \geq 0 \quad k = 0, 1, 2, \dots, M \quad (٥,١٤)$$

حيث  $M$  هي ذاكرة النظام أو طول الفترة التي يؤثر فيها الدافع (الدخل) على الخرج. يتم الحصول على الحل عندما تتساوى الأحجام الكلية لسلسلة المدخلات والمخرجات أي عندما تكون المساحة تحت دالة النواة تساوي ١:

$$\Delta t \sum_{k=0}^M h_k = 1 \quad (٥,١٥)$$

### ٥-٥-١ دوال التحويل المركبة

تم تطوير شكل جديد من دوال التحويل لطبقات المياه الجوفية الكارستية، وهو ما يسمى بدالة التحويل المركبة (CTF) تم تطويرها مؤخراً من قبل [Denic-Jukic and Jukic, \(2003\)](#). يحاكي CTF التصريفات بواسطة دالتي نقل تم تكييفها لنمذجة مكوّنات التدفق السريع والتدفق البطيء للهيدروجراف. تُستخدم دالة نقل غير بارامترية (NTF) لمكون التدفق السريع. يتم نمذجة مكون التدفق البطيء بواسطة دالة نقل بارامترية وهي عبارة عن وحدة هيدروجراف لحظية مصاغة رياضياً ومحددة من نموذج متعارف عليه. وباستخدام دالة التحويل البارامترية، يمكن تجنب الشكل غير المنتظم لذيل دالة التحويل المحددة، ويمكن تجنب محاكاة فترات الانحسار الطويلة وكذلك محاكاة هيدروجراف كامل أكثر نجاحاً. يمكن اعتبار عامل التحويل العام ونموذج ناش ونموذج زوتش والنماذج المفاهيمية المماثلة يمكن اعتبارها بشكل منفصل كأشكال مبسطة من نموذج CTF. نموذج جريان الأمطار والجريان السطحي القائم على الالتفاف بين معدلات هطول الأمطار ونموذج CTF الذي تم اختياره بنجاح على نبع يادرو في كرواتيا. وتمت مقارنة نتائج التطبيق بالنتائج التي تم الحصول عليها من خلال تطبيق عوامل الجريان السطحي العامة بشكل مستقل. بالنظر إلى طبقة المياه الجوفية الكارستية كنظام خطي متغير زمنياً وعارض، فإن التصريف من طبقة المياه الجوفية الكارستية في الوقت  $t$  يمكن تمثيله من خلال تراكب ثلاثة مكونات (الشكل ٥-٢٣):

حيث  $y_Q(t)$  هو مكوّن التدفق السريع، و  $y_S(t)$  هو مكوّن التدفق البطيء، و  $y_D(t)$  هو مكوّن التدفق البطيء. يمثل التصريف  $y$   $D(t)$  هو نتيجة التخزين الابتدائي، بينما  $y_Q(t)$  و  $y_S(t)$  هي نتيجة هطول الأمطار  $x(t - \tau)$ ،  $t \geq 0$ ،  $t$ . يمكن تمثيل العلاقة بين هطول الأمطار وتصريف مستودع المياه الجوفية الكارستية الناتج عن طريق تكامل الالتفاف الخطي، وبالتالي تصبح **المعادلة** (٥,١٥)

$$y(t) = y^D(t) + \int_0^t h^S(\tau)x(t - \tau)d\tau + \int_0^t h^Q(\tau)x(t - \tau)d\tau \quad (٥,١٦)$$

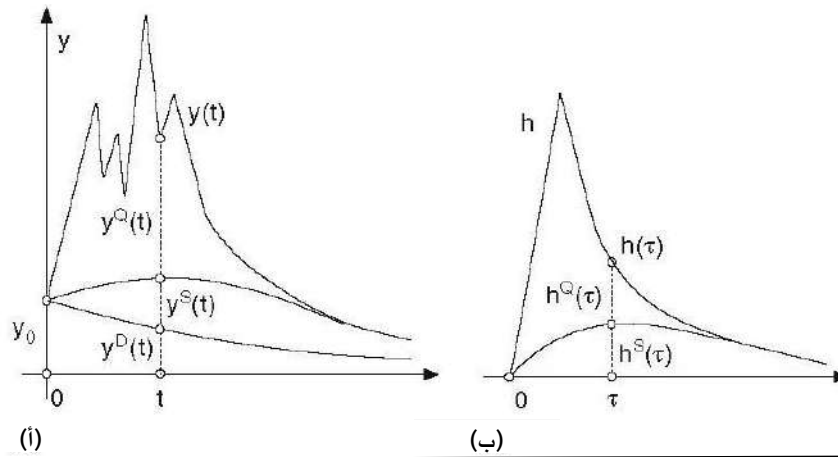
$$y(t) = y^D(t) + y^S(t) + y^Q(t)$$



الشكل ٥-٢١ محطة أرصاد جوية مائية مزودة بأجهزة لقياسات التبخر المباشر (مقياس التبخر المباشر) (مقياس التبخر في المقدمة)، وسرعة الرياح، وهطول الأمطار، ودرجة حرارة الهواء، والتشمس (ساعات سطوع الشمس).



الشكل ٥-٢٢ نبع كوسو المستخدم لإمداد مدينة إيفردون ليه بان في غرب سويسرا بالمياه. يرد وصف مفصل للنبع في Pronk et al., 2005. (الصورة من Nico Goldscheider).



الشكل ٥-٢٤ (أ) مكونات هيدروجراف الينابيع الكارستية:  $y^Q(t)$  = مكون التدفق السريع؛  $y^S(t)$  = المكون البطيء؛  $y^D(t)$  = الانحسار السابق. (ب) مكُونات دالة انتقال التدفق السريع:  $h^S(t)$  = دالة نقل التدفق البطيء؛  $h^Q(t)$  = دالة نقل التدفق السريع. (من - Denic Jukic and Jukic, 2003؛ حقوق الطبع والنشر Elsevier Science B.V 2003).

### الانحسار السابق

تمثّل الدالة  $y^D(t)$  مكُون التصريف الناتج عن هطول الأمطار السابقة. يمكن تعريفها باستخدام قانون التراكب وخاصة استقلالية أحداث التصريف (حدث تصريف واحد لا يؤثر على حدث آخر). عملياً، يعني ذلك أن مكُون التصريف الذي يصف هطول الأمطار السابقة تساوي التصريف الناتج عن فترة بدون هطول أمطار؛ أي أن منحنى الانحسار السابق له نفس شكل منحنى الانحسار الرئيسي. وبناءً على ذلك، فإن الدالة  $y^D(t)$  لـ IUH-2 و IUH-3 و IUH-4 لها الشكل الأسّي مع معامل الانحسار  $k_1$ :

$$y^D(t) = y_0 e^{-t/k_1} \quad (٥,١٧)$$

حيث  $y_0$  هو تصريف الينبوع الكارستي في بداية فترة التحليل (الشكل ٥-٢٣). المعادلة (٥,١٧) تمثل طريقة الفصل الهيدروجرافي المتكامل المعروفة لتقديرات إعادة تغذية المياه الجوفية (مثل كيتشوم ودونوفان و أفري، ٢٠٠٠؛ بوناتشي، ٢٠٠١). يكون منحنى الانحسار السابق لـ IUH-1 على شكل منحنى انحسار نموذج ناش. وبتطبيق  $n = 1$ ، يصبح منحنى الانحسار السابق لنموذج ناش المعادلة ٥,١٧ أيضاً.

### هطول الأمطار الفعال

في نموذج CTF الذي أعده [Denic-Jukic and Jukic, \(2003\)](#) ، يُعرف هطول الأمطار الفعال على أنه جزء من إجمالي الهطول الذي يصل في النهاية إلى النبع المرصود، وهو مطابق لتغذية المياه الجوفية. يتم حسابه محسوباً بطريقة [Palmer's \(1965\)](#) لتوازن كتلة السوائل. ووفقاً لهذا النهج، فإن هطول الأمطار الفعال متاح لتغذية المياه الجوفية هو الرطوبة المتبقية بعد التبخر والنتح وقدرة التربة على الاحتفاظ بالرطوبة قدرة التربة على الاحتفاظ بالرطوبة. يتم احتساب الرطوبة المفقودة في عملية التبخر والنتح باستخدام تعبير [Eagleman, \(1967\)](#) :

$$ET_p = C e_{\max} (100 - RH)^{1/2} \quad (٥,١٨)$$

$$e_{\max} = 6.1 e^{17.1T / (234.2 + T)}$$

حيث ETP هو التبخر النتح المحتمل بالملليمتر، و T هي درجة حرارة الهواء بالدرجة المئوية، والرطوبة النسبية بالنسبة المئوية. يعتمد المعامل C على درجة الحرارة  $C = 0.63$  لدرجات الحرارة  $T > 0$  درجة مئوية؛ المعامل  $C = 0.63 + 0.024T$  لـ  $T < 0$  درجة مئوية  $> 21$  درجة مئوية؛ و  $1.13 =$  لدرجات الحرارة  $> 21$  درجة مئوية.

يتم تضمين جميع خصائص مستجمعات المياه الأخرى في الحسابات من خلال قدرة التربة على الاحتفاظ بالرطوبة،  $S_{\max}$ ، والتي بالتالي ليس لها قيمة فريدة. وفقاً لـ [Soulis, \(1984\)](#) ، فإن قيم  $S_{\max}$  للمياه الجوفية الكارستية في نطاق ١٠-٦٠ مم. تحدد القيمة المفترضة لـ  $S_{\max}$  وظروف رطوبة التربة الأولية الكمية والتوزيع الزمني لهطول الأمطار الفعال المحسوب.

### تقدير المعامل

يمكن تعريف قيم معاملات IUH وقيمة معامل  $k_1$  لمنحنى الانحسار السابق باستخدام طرق المربعات الصغرى غير الخطية أو إجراء التجربة والخطأ على أساس تغيير قيم المعاملات حتى يتم الوصول إلى الحد الأدنى من الخطأ بين التصريفات المحاكاة والتصريفات المرصودة. يمكن تطبيق إجراء التجربة والخطأ لأن عدد معاملات IUH ليس كبيراً (ثلاثة كحد أقصى) وغالبية معاملات IUH المقترحة لها معنى فيزيائي وفواصل زمنية قصيرة نسبياً للقيم الممكنة. وإذا لم يتم تحديد منطقة مستجمعات مياه الينابيع الكارستية بدقة، فإن معامل النموذج الإضافية هي قدرة التربة على الاحتفاظ بالرطوبة،  $S_{\max}$ ، وتُعرف منطقة مستجمعات المياه على أنها المنطقة الواقعة تحت معامل التربة الكارستية المحسوبة. إذا تم تحديد منطقة مستجمعات مياه الينابيع الكارستية، فيجب تعريف  $S_{\max}$  على أنها القيمة التي تعطي حجم هطول الأمطار الفعال المساوي لحجم التصريف للفترة التي تم تحليلها. يجب أن يكون طول ذاكرة طريقة التدفق السريع طويلاً بما يكفي لتضمين مكون التدفق السريع بالكامل.

## ٥-٥-٢ التطبيق على إدارة المياه

يقدم [Fleury et al.\(2008\)](#) تطبيقاً لنموذج تصريف الأمطار لنبع ليز (الشكل ٥-٢٥) المستخدم لإمدادات المياه في موندلييه، فرنسا. يتم سحب المياه الجوفية بواسطة مضخات قوية (الشكل ٥-٢٦) من ثلاثة آبار موضوعة في المصرف الرئيسي لهذا النبع الصاعد، على بعد ٤٠٠ متر أعلى المنبع من البركة الرئيسية و٤٨ م تحت مستوى الفيضان. كان متوسط معدل الضخ للفترة ١٩٩٧-٢٠٠٥ هو ١,١ م<sup>٣</sup>/ثانية. عندما يبدأ الضخ بسحب الاحتياطي، ينخفض منسوب المياه في المصرف وفي حوض النبع إلى مستوى فيضان البركة ويجف النبع. ثم يتسبب الضخ بعد ذلك في انخفاض منسوب المياه داخل المصرف الذي يمكن أن يصل إلى عدة عشرات الأمتار في نهاية فترة انخفاض المياه. ويتم تغذية هذه الاحتياطيات خلال الخريف والشتاء. يرتفع مستوى الماء الهيدروليكي في المصرف فوق مستوى البركة، ويبدأ النبع بالتدفق مرة أخرى. أثناء الضخ النشط، عندما يكون تدفق نهر الليز أقل من التدفق الذي يتم ضخه، يتم توجيه جزء من التدفق الذي تم ضخه إلى النهر. هذا التدفق العائد، الذي حدده إعلان المنفعة العامة الصادر في ٥ يونيو ١٩٨١، يبلغ ١٦٠ لتر/ثانية.

يتألف نموذج نبع ليز من ثلاثة خزانات محاكاة، يتم تغذيتها جميعاً بواسطة الهطول الفعال: (١) خزان مشبع، (٢) خزان منطقة الرش البطيء التدفق، (٣) خزان منطقة الرش السريع. يتم حساب الرش الفعال بناءً على تحليل السلاسل الزمنية وتعريف دوال التحويل باستخدام برنامج TEMPO بواسطة BRGM. تُضاف وحدتان إلى خزان المنطقة المشبعة مثل حجم الضخ والتدفق المرتجع. يُستخدم النموذج لتقدير حجم المياه (الهطول الفعال) اللازمة لتغذية طبقة المياه الجوفية ويمكنه محاكاة التصريف بدقة عند النبع ومستوى المياه في المصرف.



الشكل ٥-٢٥ الفيضان الطبيعي لنبع ليز بالقرب من موندلييه، فرنسا. (الصورة من Arnaud Vestier).



الشكل ٥-٢٦ استبدال المضخات في نبع ليز. (الصورة من جان ميشيل فالي).

## ٥-٦ نماذج السلاسل الزمنية

كما ناقشنا [Gabric and Kresic \(2009\) and Kresic, \(1997\)](#) ، السلسلة الزمنية هي سلسلة من المتغيرات الهيدرولوجية المعتمدة على الوقت، مثل معدل التدفق في مجرى مائي سطحي أو في نبع. عند تحليل سلسلة زمنية، يتعامل المرء مع كمية محدودة من البيانات المسجلة، أي عينة. تتكون هذه العينة، بغض النظر عن حجمها، من عدد محدود من تحقيقات نفس العملية الهيدرولوجية. كل الإدراكات الممكنة لتلك العملية تشكل مجتمعاً العينات. إن الهدف من معظم الدراسات الهيدرولوجية والهيدروجيولوجية هو فهم مجتمع العينات ووصفه كمياً. بالإضافة إلى العملية التي تولدها، بناءً على عدد محدود من العينات (قياسات ميدانية فعلية محدودة المدة).

يمكن أن تكون السلاسل الزمنية مستمرة (مثل معدل تدفق النبع) أو منفصلة (مثل الهطول اليومي للأمطار). لأغراض عملية وحسابية، يتم تحويل معظم السلاسل الزمنية المستمرة إلى سلاسل زمنية منفصلة من خلال إدخال الفاصل الزمني للتسجيل (أو النمذجة)، مثل يوم واحد أو أسبوع واحد أو شهر واحد. يتم وصف السلسلة الزمنية بمعاملات إحصائية واحتمالية، فإنها تمثل احتمال حدوث (تحقيق حدوث) إحدى مراحلها المحتملة. وبناءً على ذلك، يمكن توقع، مع احتمال كبير أنه في المستقبل القريب

(لنقل العام المقبل)، ستستمر هاتان الفترتان مرة أخرى في نفس الوقت تقريباً. ويقول بدقة ١٠٠ في المئة أن هذا سيحدث بالفعل (على سبيل المثال، قد يكون شهر حزيران/يونيو شهراً جافاً بشكل غير عادي في العام المقبل)، لأنه من المستحيل التنبؤ بدقة بكمية هطول الأمطار السنوية أو الشهرية باستخدام بعض قوانين الطبيعة الفيزيائية. لا يمكن للمرء سوى تطبيق أدوات الإحصاء والتنبؤ بالمستقبل باستخدام نماذج احتمالية مبنية على البيانات السابقة. وتسمى السلسلة الزمنية المدروسة بهذه الطريقة سلسلة زمنية عشوائية. في المقابل، يتم تحديد مرحلة عملية حتمية عند الزمن  $t$  بشكل مؤكد، مع معرفة مرحلتها في وقت ما وقت سابق  $t_0$ . بعبارة أخرى، يتم وصف العملية الحتمية بقوانين فيزيائية بدلاً من قوانين الاحتمالات. مثال على ذلك هو تدفق المياه الجوفية من النقطة (أ) إلى النقطة (ب) عند وصفها بمعادلات مثل معادلة Dupuit أو معادلة Laplace أو معادلة Theis، على سبيل المثال لا الحصر. تعتمد الهيدرولوجيا الكمية على القوانين الفيزيائية لتدفق المياه الجوفية، وكذلك النماذج الرقمية التقليدية المعروضة في القسم التالي.

بالمعنى الدقيق للكلمة، فإن معظم السلاسل الزمنية في الدراسات الهيدرولوجية والهيدرولوجية هي سلاسل زمنية عشوائية، لأنها تعتمد على متغير عشوائي واحد على الأقل، وغالباً ما يكون هطول الأمطار أهم متغير. وهذا يعني أيضاً أن نتيجة الحساب الحتمي، مثل السحب في البر بعد عام واحد من الضخ المستقبلي، على الرغم من أنها معطاة بشكل صريح، إلا أنها في الواقع مجرد احتمال أكثر أو أقل.

بشكل عام، تحتوي السلسلة الزمنية على المكونات الخمسة التالية، والتي قد تكون جميعها موجودة أو غير موجودة (مقتبسة من [McCuen and Snyder, 1986](#)):

- الاتجاه، وهو الميل إلى الزيادة أو النقصان بشكل مستمر لفترة ممتدة من الزمن في نظام ما. يمكن وصف هذا المكون غالباً عن طريق تركيب شكل وظيفي، مثل الخط المستقيم أو متعدد الحدود. عادةً ما يتم تقييم معاملات المعادلة باستخدام تحليل الانحدار. يُشار إلى الاتجاه أيضاً بالمكون الحتمي، على الرغم من أن تفسيره الفيزيائي قد لا يكون واضحاً دائماً.
- الدورية، وهو أمر شائع جداً في السلاسل الزمنية الهيدرولوجية: الدورية السنوية والموسمية لما قبل الترسيب ودرجة الحرارة والتدفق. يمكن تحديد الفترة (الفترات) في السلسلة الزمنية باستخدام تحليل متوسطات المتحرك، أو تحليل الارتباط التلقائي، أو التحليل الطيفي، وبعد ذلك يتم وصفها بوحدة أو أكثر من أو أكثر من الدوال المثلثية.
- الدورة، والتي تحدث بفترة غير منتظمة ويصعب اكتشافها (على سبيل المثال، يُعتقد أن السلاسل الزمنية للأرصاء الجوية المائية تتأثر بنشاط البقع الشمسية، والتي لها فترة غير منتظمة).
- التباين المؤقت، والتي تنتج عن أحداث نادرة للغاية أو لمرة واحدة، مثل الأعاصير. يتطلب تحديد هذا المكون معلومات تكميلية.
- التذبذب النادر، والتي غالباً ما تكون مصدراً مهماً للتباين في السلسلة الزمنية وهي الهدف الرئيسي للتحديد الاحتمالي.

يوضح الشكل ٢٧-٥ هذه المكونات مع عينة صغيرة من هيدروجراف الينابيع الفعلية التي تم إنشاؤها من السجلات طويلة الأمد التي تحتفظ بها هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية. وتصف النماذج العشوائية السلاسل الزمنية شكلياً ولا تأخذ بعين الاعتبار طبيعتها الفيزيائية. ببساطة، فهي تحلل إحصائياً (رياضياً) ماضي السلاسل الزمنية كمدخلات للنظام، ثم تتنبأ بالحاضر أو المستقبل كمخرجات النظام. يمكنها أيضاً تحليل ماضي سلسلة زمنية واحدة واستخدامها للتنبؤ بحاضر ومستقبل بعض السلاسل الأخرى المعتمدة على الزمن والتي ثبت ارتباطها بالسلسلة الأولى. يمكن للنماذج العشوائية أيضاً أن تجمع بين عدة مدخلات وتعطي مخرجات واحدة أو عدة مخرجات. ومن الأمثلة على ذلك نموذج يتنبأ مسبقاً بارتفاع منسوب المياه الجوفية بناءً على موضعه في الماضي، ونموذج يتنبأ بتصريف الينابيع بناءً على ماضيه وسابق هطول الأمطار، أو نموذج يتضمن المراحل السابقة لنهر قريب أيضاً.

هناك تطبيقان رئيسيان لنماذج السلاسل الزمنية هما توليد عينات اصطناعية والتنبؤ بالأحداث الهيدرولوجية. السلاسل الزمنية المولدة التي لا يمكن تمييزها إحصائياً عن السلاسل الزمنية التاريخية، تُستخدم كمدخلات لتحليل أنظمة الموارد المائية المعقدة. كما يمكن استخدامها أيضاً لتوفير إطار عمل تجريبي ثنائي للتحليلات والتصميم. تظهر السلاسل المولدة العديد من الظروف الهيدرولوجية المحتملة التي لا تظهر صراحةً في السجل التاريخي. وبالتالي، وباستخدام السلاسل الزمنية الاصطناعية، يمكن اختبار التصميم ويمكن اختبار المخططات التشغيلية المختلفة في ظل العديد من الظروف المختلفة الواردة في هذه السلاسل الزمنية. ويمكن أن تساعد البيانات من الملاحظات التاريخية المعروفة في تقييم الخيارات المتاحة لتشغيل النظام في الوقت الحقيقي. نشأت نمذجة السلاسل الزمنية في مجالات علمية مختلفة، لكنها أصبحت فيما بعد مهمة جداً في الهيدرولوجيا العشوائية، وتتعدد تطبيقات السلاسل الزمنية المولدة. بدأ تطوير النمذجة العشوائية في الهيدرولوجيا في بداية الستينيات، عندما تم توسيع نطاق تحليل السلاسل الزمنية للظواهر الهيدرولوجية إلى التوليد الاصطناعي لتدفق المجاري المائية باستخدام جدول من الأعداد العشوائية العادية. كان (Thomas and Fiering, 1962) أول من اقترح نموذج ماركوف من الدرجة الأولى لتوليد بيانات تدفق الجريان. ويقدم الكتاب الكلاسيكي عن تحليل السلاسل الزمنية من قبل (Box and Jenkins, 1976) أساس النمذجة العشوائية الهيدرولوجية الحديثة. الشكل العام لنموذج عشوائي للمدخلات والمخرجات لسلسلة زمنية متقطعة (أو سلسلة زمنية مستمرة محولة إلى سلسلة زمنية متقطعة) مع نفس الفاصل الزمني للتسجيل هو:

$$y_t = f(x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots; y_{t-1}, y_{t-2}, \dots; \theta_1, \theta_2, \dots) + \epsilon_t \quad (٥,١٩)$$

حيث  $f$  هي الدالة الرياضية المختارة؛  $y_t$  هو الناتج المتوقع عند الزمن  $t$ ؛  $y_{t-1}, y_{t-2}, \dots$  هي الأعضاء المتتالية من السلسلة الزمنية للمخرجات المسجلة في الفترات الزمنية المناظرة  $t, t-1, t-2, \dots$ ؛  $x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots$  هي الأعضاء المتتالية من السلاسل الزمنية المدخلة المسجلة على الفترات الزمنية  $t, t-1, t-2, \dots$ ؛  $y_1, y_2, \dots$  هي معاملات النموذج التي تم العثور عليها عن طريق التقليل

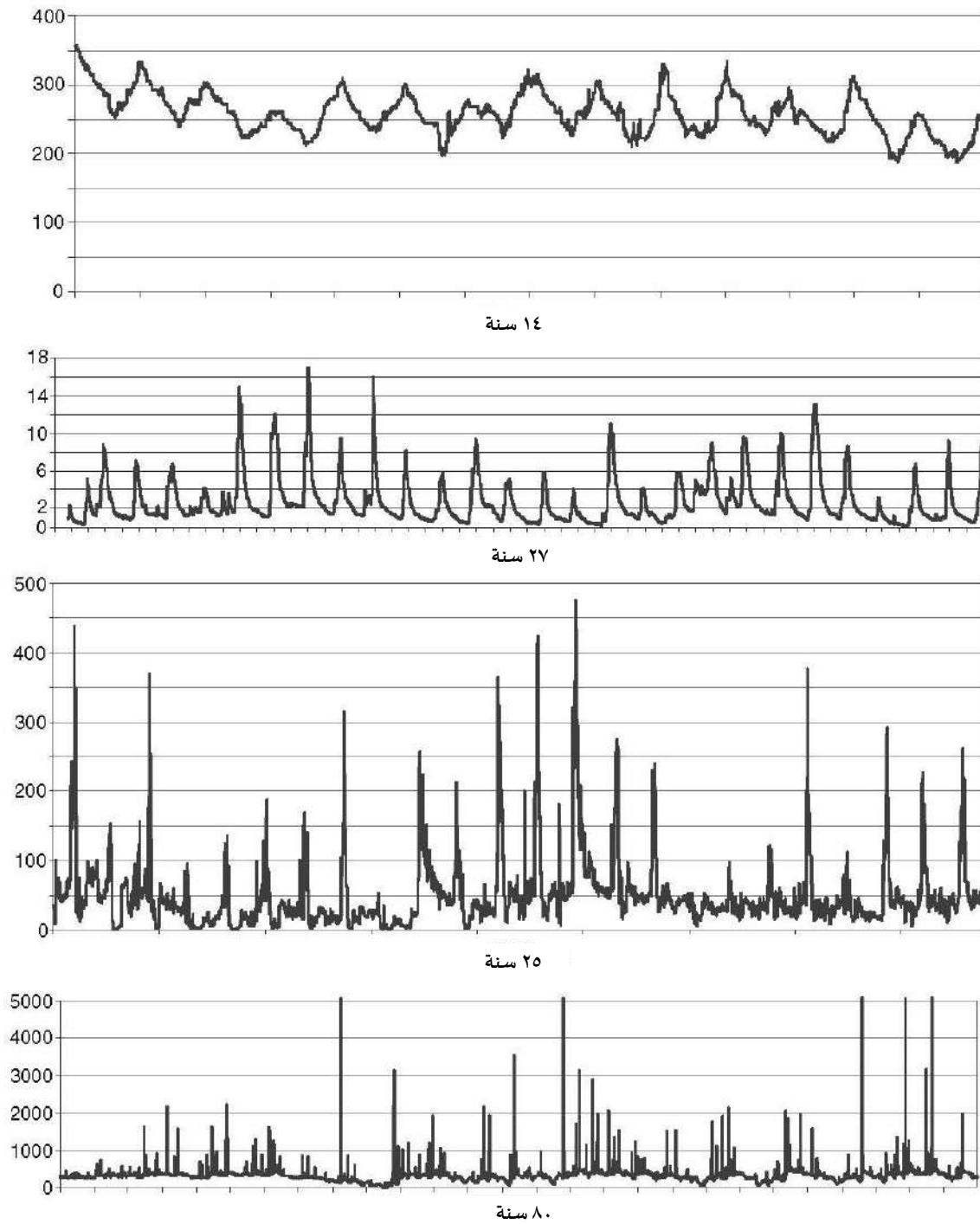
الرياضي للفروق بين قيم  $y_t$  المقدرة (المحسوبة وقيم  $y_t$  المرصودة؛  $E_t$  هو خطأ النموذج (المتبقي) الذي يُعطى على أنه الفرق بين القيمة المحسوبة والقيمة المسجلة لسلسلة المخرجات في الوقت  $t$ . تتبع النمذجة العشوائية عمومًا النهج الذي اقترحه **Box and Jenkins (1976)**، الذي قدم نماذج المتوسط المتحرك الانحداري الذاتي الانحداري (ARMA). الصيغة الرياضية لنماذج ARMA هي

$$z_t = \sum_{j=1}^p \phi_j z_{t-j} + \sum_{j=0}^q \theta_j \epsilon_{t-j} + \epsilon_t \quad (٥,٢٠)$$

حيث تمثل  $z_t$  المتسلسلة المعتمدة على الزمن بمتوسط صفري وتباين واحد؛  $y_1, \dots, y_p$  هي معاملات متغيرة زمنياً للانحدار التلقائي؛  $y_0, y_q$  هي معاملات متوسط متحرك متغير زمنياً؛  $E_t$  هو متغير طبيعي مستقل. يمكن تصنيف نماذج السلاسل الزمنية المستخدمة لتوليد السلاسل الزمنية الاصطناعية إلى نماذج ذاتية الانحدار (AR(p)، ونماذج المتوسط المتحرك (MA(q)، ونماذج المتوسط المتحرك الانحداري التلقائي الانحداري (ARMA (ع، ف مع الاختلافات، مثل نماذج المتوسط المتحرك المتكامل الانحداري التلقائي الانحداري (ARIMA (ع، د، ف) والآخرين، حيث  $p$  و  $q$  هما رتبتي حدّي الانحدار التلقائي والمتوسط المتحرك، على التوالي، و  $d$  هي رتبة التمايز. يقدّر نموذج الانحدار الذاتي قيم المتغير التابع،  $Z_t$ ، كدالة انحدار للقيم السابقة  $z_{t-1}, z_{t-2}, \dots, z_{t-n}$ . نموذج المتوسط المتحرك هو من الناحية النظرية انحدار خطي للقيمة الحالية للسلسلة مقابل الضوضاء البيضاء أو الصدمات العشوائية لواحدة أو أكثر من القيم السابقة للسلسلة. وقد تم تطبيق نموذج الانحدار التلقائي الانحداري الخالص (AR)، الذي يُطلق عليه عادةً نموذج توماس-فيرينغ، على نطاق واسع في الهيدرولوجيا لنمذجة السلاسل الزمنية الهيدرولوجية السنوية والدورية. لأن البساطة ("كلما كان أقل كلما كان ذلك أفضل") في عدد المعاملات أمر مرغوب فيه للغاية (حيث يتم تقدير المعاملات من البيانات)، وعادةً ما يكون الترتيب الثاني من هذه النماذج هو أعلى تأخر ضروري في تمثيل السلاسل الزمنية الهيدرولوجية.

يمكن وضع نموذج كافٍ باستخدام نموذج ARMA المختلط كمزيج من عملية المتوسط المتحرك وعملية الانحدار التلقائي بدلاً من نموذج متوسط متحرك أو نموذج متوسط متحرك. لذلك، فإن نماذج ARIMA منخفضة الرتبة أصبحت مستخدمة على نطاق واسع في الممارسة الهيدرولوجية (Salas, Boes, and Smith, 1982; Weeks and Boughton 1987 Padilla et al., 1996; Montanari Rosso, and Taqqu, 2000).

من الجوانب المهمة للنمذجة العشوائية مشكلة عدم الثبات في السلاسل الزمنية الهيدرولوجية. عادةً ما يُفترض الثبات عند نمذجة السلاسل الزمنية السنوية. عند التعامل مع سلسلة زمنية شهرية أو أسبوعية، فإن عدم الثبات الموسمي يكون موجوداً، وقد يكون من الضروري استخدام نموذج له خصائص متغيرة موسمياً. قدم كلا من **Hirsch, (1979)** and **Salas et al, (1985)**



الشكل ٥-٢٧ رسوم هيدروجرافية فعلية للينابيع تُظهر مختلف مكونات السلسلة الزمنية: الاتجاهات، والدورات، والتغير العرضي والتقلبات العشوائية. جميع معدلات التدفق بالقدم المكعب في الثانية. (مصدر البيانات U.S. Geological Survey, 2008).

مساهمات مهمة في تطوير النماذج الدورية. ولنمذجة السلاسل الزمنية الموسمية، يمكن استخدام نهجين. الأول هو نهج مباشر حيث يتم تركيب نموذج بمعايير دورية مباشرة على التدفقات الموسمية. تتطلب هذه الطريقة عدداً كبيراً من سنوات البيانات. ويمكن أن يكون عدد المعاملات المعنية كبيراً جداً. إذا كانت البيانات التاريخية المتاحة محدودة، فإن تقدير المعاملات يكون ضعيفاً. وبالتالي، فإن المشكلة الرئيسية في جميع النماذج الموسمية ذات المعاملات المتغيرة زمنياً هي الافتقار إلى البساطة. النهج الثاني هو التحليل ("التفكيك")، حيث يتم توليد التدفقات الموسمية على مستويين أو أكثر. على سبيل المثال، ينطوي المستوى الأول على نمذجة وتوليد التدفقات السنوية، والمستوى الثاني هو تفكيكها إلى تدفقات موسمية بناءً على نموذج خطي. ومع ذلك، إذا كان هيكل الارتباط التلقائي لسلسلة زمنية تاريخية، فيجب استخدام النماذج الموسمية التي تتضمن صراحةً هيكلًا دوريًا. يجب استخدام البنية الدورية. إذا كانت موسمية السلاسل الزمنية قيد الدراسة في المتوسط والتباين، فيمكن عندئذٍ إزالة هذه الموسمية عن طريق التوحيد الموسمي البسيط، ويمكن تطبيق نموذج ثابت. من الخصائص الأخرى للعمليات الهيدرولوجية هي دوال التوزيع المنحرفة التي لوحظت في معظم الحالات. لذلك، بُذلت محاولات لتكييف النماذج القياسية لتمكين معالجة الانحراف (Bras and Rodriguez-Iturbe, 1994).

يتألف الإطار العام لتطوير نموذج السلاسل الزمنية من ثلاث مراحل: (١) التحديد، (٢) تقدير المعاملات، و (٣) التحقق والفحص التشخيصي. تحديد النموذج ليس إجراءً موحد وآلي بل هو إجراء إرشادي. النهج المعتاد هو إجراء تكراري للتجربة والخطأ. وتتمثل الخطوة الأولى في التحقق مما إذا كانت بيانات السلاسل الزمنية ثابتة وما إذا كان هناك أي موسمية كبيرة تحتاج إلى نمذجة. يمكن أن يساعد الفحص المرئي للمخطط الزمني للسلاسل الزمنية التاريخية في تحديد بين النماذج الموسمية وغير الموسمية، وما إذا كان التمايز المحلي مطلوباً لإنتاج الثبات، والحصول على شعور عام حول ترتيب النماذج الممكنة. عملية تحديد أخرى هي فحص أشكال الارتباط التلقائي ودوال الارتباط التلقائي الجزئي للسلاسل الزمنية التاريخية. وللسماح بأخطاء التحديد المحتملة، يتم النظر في مجموعة من عدة نماذج ذات بنية متقاربة. ومن المستحسن دائماً اختيار أبسط نموذج مقبول.

عند اختيار ترتيب النموذج، يتبع ذلك تقدير البارامترات من البيانات المسجلة إما بطريقة اللحظات أو بطريقة الاحتمال الأقصى. المرحلة الأخيرة من النمذجة هي التحقق من مدى إعادة إنتاج الإحصاءات التاريخية المختارة بواسطة النموذج وإثبات كفاية النموذج. ويتضمن ذلك التحقق من إمكانية الإفراط في الملاءمة (حدود الثقة للمعاملات) والتحقق من عشوائية المتبقيات (دالة الارتباط التلقائي للنتائج المتبقية من نموذج ARIMA جيد، يجب أن يكون لديها معاملات ترابط ذاتي غير مهمة إحصائياً). في بعض الأحيان، يكون الهدف الكافي لأغراض المحاكاة والملائم للتنبؤ قصير الأجل، هو الحفاظ على اللحظات من الدرجة الأولى والثانية للسلسلة الزمنية. عند مقارنة عدة نماذج محتملة، يتم اختيار النموذج الذي يتمتع بأفضل ملاءمة بناءً على معيار الحد الأدنى من معيار أكايك للمعلومات (Akaike, 1974).

عندما تتجاهل الدالة الرياضية المختارة،  $f$  في المعادلة (٥،٢٠)، القوانين الفيزيائية التي تحكم تحويل المدخل (المدخلات) إلى مخرج (مخرجات)، يكون النموذج نموذجاً عشوائياً بحتاً. إذا، بأي شكل، إذا كانت الدالة الرياضية تتضمن قوانين فيزيائية، فإن

النموذج يُسمى نموذجاً عشوائياً مفاهيمياً. ومعرفة العمليات والعلاقات الفيزيائية المختلفة المتعلقة بالنظام محل الاهتمام لا تُقدَّر بثمن وتوفّر الخلفية الفيزيائية للنمذجة العشوائية (Klemes, 1978; Vecchia et al., 1983; Koch, 1985; Salas and Obeysekera, 1992; Knotters and Bierkens, 2000; Lee and Lee, 2000). يفضل دائماً إجراء تحليلات هيكلية وفيزيائية مفصلة للعمليات الهيدرولوجية المعنية قبل إجراء النمذجة العشوائية. كما ذكرنا سابقاً، هناك العديد من الاستخدامات الممكنة لنماذج السلاسل الزمنية. التطبيقات النمذجية للسلاسل الزمنية في هندسة المياه السطحية هي تصميم الخزانات، وتقييم المخاطر والموثوقية، وتخطيط إنتاج الطاقة الكهرومائية، وتحليل مخاطر الفيضانات والجفاف. في دراسات المياه الجوفية، يمكن استخدام النماذج العشوائية لتحليل وتوقع تقلبات الرأس الهيدروليكي، وملء فجوات البيانات، واكتشاف وتحديد الاتجاهات (and Hoogland, Houston, 1983; Padilla et al., 1996; Ahn, 2000; Knotters and Bierkens, 2000; Bierkens, Knotters, 2001; Kim, Hyun, and Lee, 2005). أصبحت نماذج السلاسل الزمنية لمعدلات تصريف النبع شائعة بشكل متزايد. فهي تستخدم التدفقات المرصودة وتدمج العوامل التي تؤثر عليها، مثل مستويات المياه الجوفية وهطول الأمطار والتبخر والنتح والاضطرابات الهيدرولوجية البشرية المنشأ، مثل الضخ من طبقة المياه الجوفية. ومن العوامل المهمة جداً التي تحد من الاستخدام الأوسع للنماذج العشوائية في الهيدرولوجيا المائية هو نقص البيانات المسجلة. وبما أن هذه النماذج تستند إلى حسابات إحصائية واحتمالية، فإن السلاسل الزمنية القصيرة جداً لا تسمح باشتقاق معاملات نموذجية ذات معنى. ومن الواضح أن معدلات تصريف الينابيع التي تقاس لبضع سنوات على أساس فصلي ليست مرشح جيد للنمذجة العشوائية. من ناحية أخرى، إذا توفرت كمية مناسبة من البيانات، يجب بذل كل محاولة لتطوير نموذج أو أكثر من النماذج العشوائية من نوع المدخلات والمخرجات. ويرجع ذلك أساساً إلى أن عملية بناء حتى أبسط النماذج العشوائية تكشف عن قدر كبير من المعلومات حول البنية (النماذج) المحتملة للنظام والروابط بين المتغيرات الهيدرولوجية المختلفة (Kresic, 1995, 1997).

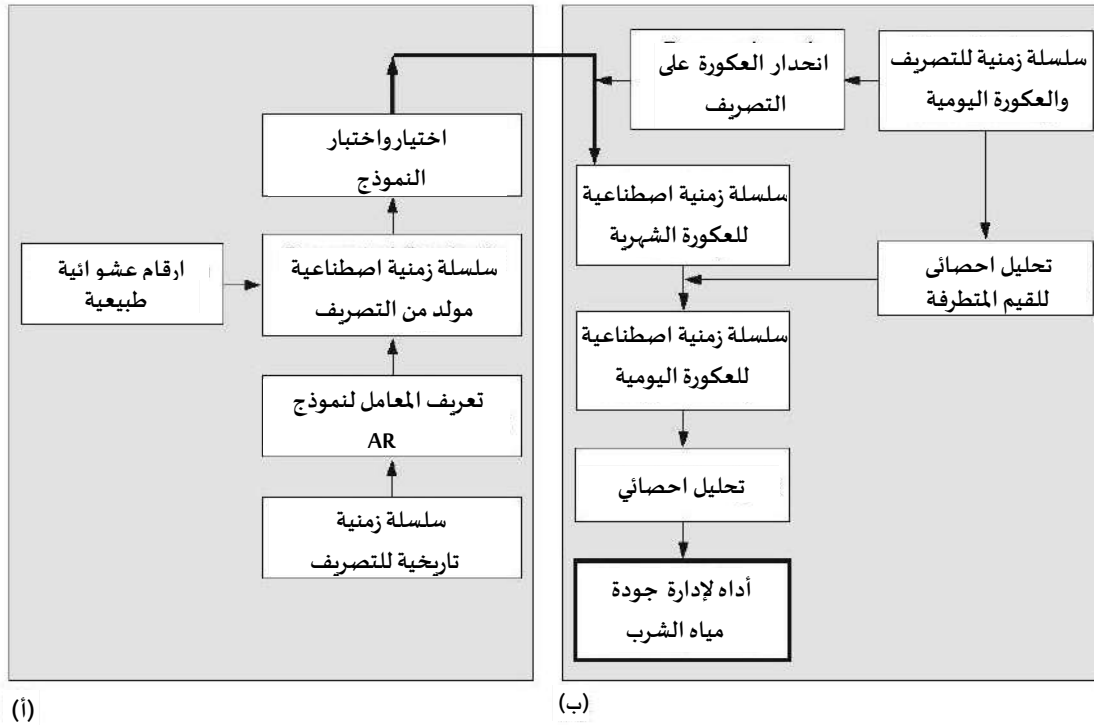
يمكن أن تتضمن النماذج العشوائية الأكثر تعقيداً العديد من التحويلات الخطية وغير الخطية لسلسلة المدخلات ومراعاة الدورية (الفصول)، وتصفية (تصغير) متبقيات النموذج. أحد المرشحات الخطية المستخدمة على نطاق واسع للمتبقيات هو مرشح Kalman، والذي عادةً ما يحسن نماذج ARMA بشكل كبير (Kalman, 1960; Birken et al., 2001). لاحظ، مع ذلك، أن كلا نموذجي ARMA، مثل نماذج IARCR الموضحة سابقاً، يعطيان تنبؤات صحيحة خطوة واحدة فقط في كل مرة (على سبيل المثال، اليوم التالي)، لأنه بالنسبة للفترة الثانية والفترات التالية، فإن القيم الحقيقية للمتغير التابع (على سبيل المثال، تدفق الينابيع) غير معروفة ويزداد الخطأ بسرعة.

يوضح المثال التالي، تطبيق السلاسل الزمنية الهيدرولوجية الاصطناعية في إدارة الموارد المائية الكارستية. نبع جادرو Jadro Spring (انظر الشكل ١٤-١)، بمعدل تصريف يبلغ ٩,٨٢ م<sup>٣</sup>/ثانية، ويوفر إمدادات المياه لمدينة سبليت وسكانها البالغ عددهم ٢٧٠,٠٠٠ نسمة. وتتمثل السمة الرئيسية لتصريف النبع في تقلباته الكبيرة استجابة لهطول الأمطار. أثناء معدلات التصريف المرتفعة، يكون هناك جرف أكثر كثافة للتربة والرواسب التي تراكمت تحت السطح، مما يؤدي إلى تغيرات مفاجئة وقصيرة الأجل في

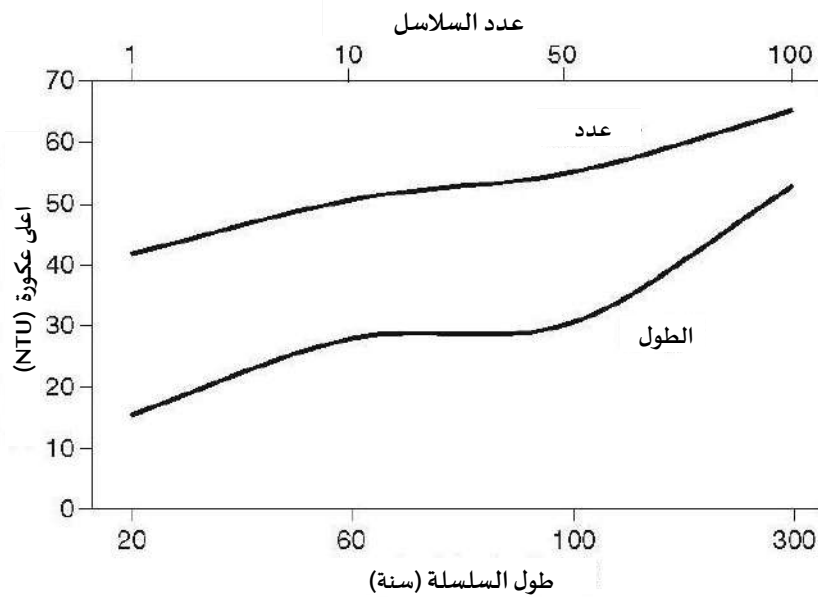
نوعية المياه. وبالتالي، فإن مياه الينابيع تتميز بالعكارة العالية أحياناً، والتي تتجاوز المعايير المسموح بها. التعكر هو المشكلة الرئيسية في إدارة جودة مياه هذا النبع، وكذلك العديد من الينابيع الكارستية الأخرى. لأغراض الإدارة من المهم معرفة طبيعة العكارة والتنبؤ بحدوثها في أقرب وقت ممكن، لأن التعكر المرتفع غالباً ما يرتبط بارتفاع عدد البكتيريا، مما يشير إلى تلوث محتمل. كما يمكن أن يساعد التنبؤ الدقيق بارتفاع نسبة التعكر في تحسين استراتيجيات أخذ العينات. في حالة نبع جادرو Jadro Spring، لم تكن مراقبة التعكر منتظمة، مما أدى إلى عدم كفاية المعلومات اللازمة لإدارة موثوقة لنظام إمدادات المياه. لذلك يمكن لنموذج السلاسل الزمنية العشوائية أن توفر فهماً أكثر شمولاً للعكارة باستخدام القياسات المتاحة على المدى القصير للعكارة وعلى التسجيل طويل الأجل لتصريف مياه النبع (Margeta and Fistanic, 2004; Rubinic and Fistanic, 2005).

أظهرت تحاليل السلاسل الزمنية لتصريف والتعكر أن التعكر يكون أعلى خلال أول هطول كبير بعد فترة الجفاف. وتنتج معدلات تصريف مماثلة بعد فترة الأمطار الأولى بشكل عام عكارة أقل. وبالتالي، يمكن إجراء تشخيص موثوق للعكارة باستخدام دوال انحدار مختلفة التصريف والعكارة لأجزاء مختلفة من السنة. تم بناء نموذج عشوائي، استناداً إلى ٣ سنوات من القياسات اليومية للعكارة والتصريف لمدة ٣ سنوات و ٢٨ سنة من قياسات التصريف اليومية، كما هو موضح في الشكل ٢٨-٥. يعرض الإطار (أ) مراحل التحديد والتقدير والتحقق من للنموذج العشوائي لنبع جادرو. تم إنشاء سلاسل زمنية اصطناعية لتصريف النبع الشهري باستخدام نموذج Thomas-Fiering AR (٢) مع معاملات ثابتة، والذي قدم أفضل حفظ للخصائص الإحصائية التاريخية لتصريف النبع: مثل المتوسطات الموسمية والتباينات والارتباطات الموسمية للعمليات. المربع يصف إجراء توليد السلاسل الزمنية للعكارة. استناداً إلى الاعتماد الوظيفي بين العكارة اليومية والتصريف، وتم استخدام السلسلة الزمنية المتولدة لمتوسط التصريف الشهري (المربع أ) لتوليد ما يصل إلى ١٠٠ سلسلة زمنية لمتوسط التعكر الشهري. وتم توليد السلسلة الزمنية لأقصى تعكر يومي ثم توليدها باستخدام السلسلة الزمنية لمتوسط التعكر الشهري.

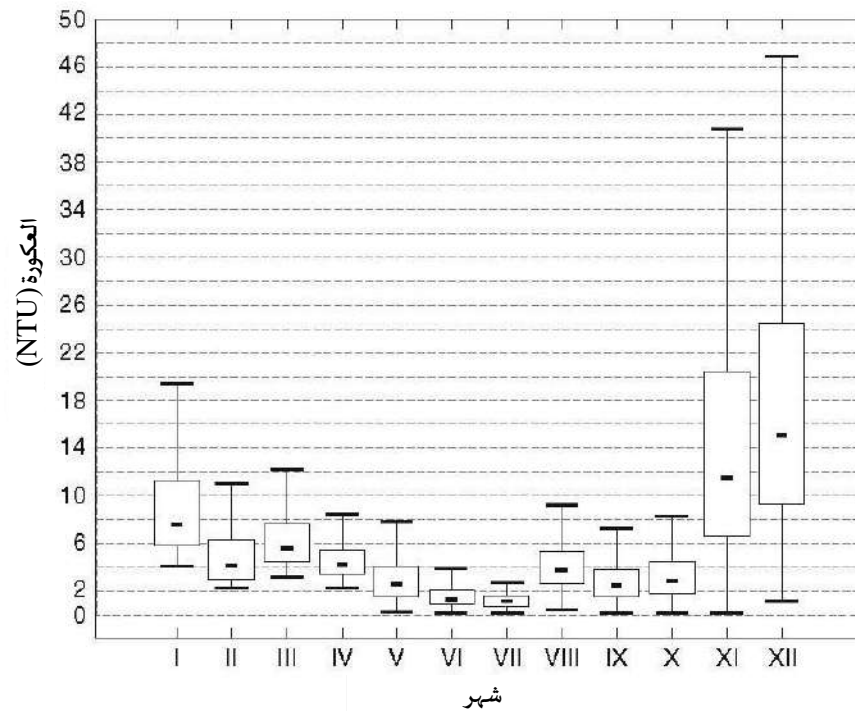
يوضح الشكل ٢٩-٥ القيم اليومية القصوى للعكارة المتولدة في نبع جادرو Jadro Spring كدالة لعدد وطول السلسلة الزمنية المتولدة. ويشير تحليل حالات التعكر المرتفعة إلى أن سلوكها الموسمي محفوظ في النموذج، كما هو موضح في الشكل ٣٠-٥. أعلى متوسط، وكذلك كقيم التعكر القصوى، تظهر عادةً خلال أواخر أشهر الخريف، عندما تتساقط الأمطار بعد جفاف صيفي طويل بعد فترات الجفاف الصيفية الطويلة التي تتسبب في تعبئة الرواسب المترسبة وجليها إلى باطن الأرض. إحدى مشاكل جودة مياه الينابيع التي غالباً ما ترتبط بارتفاع نسبة التعكر هي التلوث البكتريولوجي، كما هو موضح في الشكل ٣١-٥. إذا تم إنشاء مثل هذه العلاقة، فيمكن عندئذٍ أن يتم نمذجة كل من معاملات جودة المياه بنفس الطريقة أو استخدامها في نفس الوقت لتحسين تنبؤات النموذج. وبمجرد تطوير نموذج السلاسل الزمنية والتحقق منه، يمكن استخدام نموذج السلاسل الزمنية لإدارة الينابيع في الوقت الحقيقي، استناداً على رصد مدخلات ومخرجات النموذج المختلفة والتحديث المستمر للنموذج من أجل اليوم التالي. على سبيل المثال، قد يؤدي هطول الأمطار فوق حد معين إلى تحويل تدفق الينابيع إلى منشأة تنقية، أو تطهير إضافي، أو استخدام خزان احتياطي (طوارئ)، أو التدفق الحر من النبع.



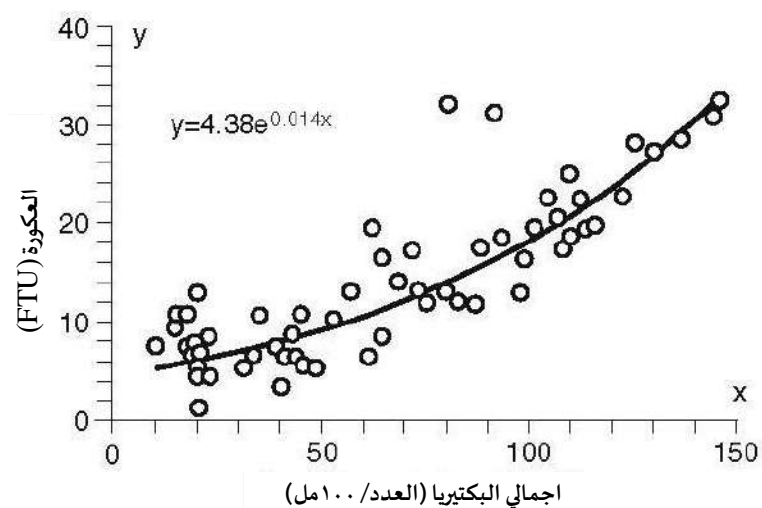
الشكل ٥-٢٨ خطوات بناء نموذج السلاسل الزمنية العشوائية للعكارة اليومية في نبع جادرو الكارستي. (Ivana Gabric, University of Split).



الشكل ٥-٢٩ القيم القصوى للعكارة المتولدة في نبع جادرو مقابل عدد وطول السلاسل الزمنية المتولدة المتسلسلة. (Ivana Gabric, University of Split).



الشكل ٥-٣٠ رسم تخطيطي صندوقي لقيم التعكر اليومية المتولدة من التعكر بدون القيم المتطرفة والقيم المتطرفة. (من Ivana Gabric, (University of Split).



الشكل ٥-٣١ إجمالي البكتيريا القولونية (عدد / ١٠٠ مل) مقابل التعكر في نبع بيتنيتشا الكارستي بالقرب من فالييفو، غرب صربيا. (من Kresic et al., 1992 ؛ حقوق الطبع والنشر لشركة Springer-Verlag New York).

## ٥-٧ النمذجة الحتمية

هناك مجموعتان كبيرتان من النمذجة الحتمية، اعتماداً على نوع حلول المعادلات الرياضية المتضمنة: مثل المعادلات التحليلية والرقمية. ببساطة، تحلّ النمذجة التحليلية معادلة واحدة أو عدة معادلات من معادلات تدفق المياه الجوفية في وقت واحد، ويمكن تطبيق النتيجة على موقع واحد أو عدة مواقع نقطية في مجال التدفق (طبقة المياه الجوفية). على سبيل المثال، إذا أراد المرء أن يجد (أي "نمذجة") ما هو السحب عند ٥٠ م من بئر ضخ بعد ٢٤ ساعة من الضخ، يمكنه تطبيق إحدى المعادلات الشائعة الاستخدام التي تصف التدفق نحو البئر. ولإيجاد السحب عند ١٠٠٠ متر من البئر، يتعين على المرء حل نفس المعادلة (لنقل معادلة Theis) لهذه المسافة الجديدة. إذا كانت طبقة المياه الجوفية غير متجانسة، فإن هذه الحلول ستكون قابلة للتطبيق على مسافة شعاعية محدودة تبلغ ٥٠ أو ١٠٠٠ متر ضمن نفس توزيع من طبقة المياه الجوفية. من الواضح، إذا كانت طبقة المياه الجوفية غير متجانسة تماماً ويريد المرء معرفة السحب عند "العديد" من النقاط، فقد يقضي المرء فترة طويلة من الوقت في حل نفس المعادلة (مع متغيرات متغيرة قليلاً) مراراً وتكراراً. إذا أصبح الوضع معقداً حقاً، كما هو الحال عندما يكون هناك عدة الحدود، والمزيد من آبار الضخ، والعديد من طبقات المياه الجوفية المتصلة هيدروليكيًا، فإن التطبيق المجدي للنماذج التحليلية ينتهي (Kresic, 2007a).

تصف النمذجة العددية مجال التدفق بأكمله في نفس الوقت، مما يوفر حلولاً أكبر عدد من نقاط البيانات التي يحددها المستخدم. تنقسم المنطقة محل الاهتمام إلى العديد من المناطق الصغيرة (يشار إليها باسم الخلايا أو عناصر)، ويتم حل معادلة أساسية لتدفق المياه الجوفية لكل خلية نموذجية، مع الأخذ بعين الاعتبار توازنها المائي (مدخلات ومخرجات المياه). إن حل النموذج الرقمي هو توزيع الرؤوس الهيدروليكية عند نقاط تمثل الخلايا الفردية. يمكن وضع هذه النقاط في مركز الخلية، أو عند التقاطعات بين الخلايا المتجاورة، أو في أي مكان آخر. يتم استبدال معادلة التدفق التفاضلي الأساسية لكل خلية (تقريباً) بمعادلة جبرية بحيث يتم تمثيل حقل التدفق بأكمله بمعادلات  $x$  مع  $x$  مجهول حيث  $x$  هو عدد الخلايا. يتم حل هذا النظام من المعادلات الجبرية عددياً، من خلال عملية تكرارية، ومن هنا جاءت تسمية النمذجة العددية. استناداً إلى طرق مختلفة لتقريب معادلات التدفق التفاضلي والطرق المستخدمة لحل النظام الناتج عددياً للمعادلات الجبرية الجديدة الناتجة، تنقسم النمذجة الرقمية إلى عدة مجموعات متعددة. والمجموعتان الأكثر تطبيقاً على نطاق واسع هما النمذجة الرقمية ذات التباين المحدود finite differences والعناصر المحدودة finite elements.

لكلا النوعين من النمذجة مزاياه وعيوبه، وقد يكون أحدهما أكثر ملاءمة لمشاكل معينة أكثر من الآخر. ومع ذلك، نظراً لأنها أسهل في التصميم والفهم وتتطلب قدرًا أقل من الرياضيات سادت نماذج التباين المحدود في الممارسة الهيدرولوجيولوجية. وقد طوّرت هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (USGS) العديد من برامج النمذجة الممتازة القائمة على التباين المحدود وهي متاحة للعموم، مما يضمن استخدامها على أوسع نطاق ممكن. أحد هذه البرامج هو Modflow، وهو على الأرجح برنامج النمذجة الأكثر استخداماً واختباراً وتحققاً على نطاق واسع اليوم؛ وقد أصبح معيار الصناعة بفضل تعدد استخداماته وبنيتها المفتوحة: يتم تجميع

الروتينات الفرعية المستقلة، المسماة بالوحدات النمطية، في "حزم" تحاكي خصائص هيدرولوجية محددة. يمكن إضافة وحدات وحزم جديدة بسهولة إلى البرنامج دون تعديل الحزم الموجودة أو الشيفرة الرئيسية. نشرت هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية مؤخراً نسخة مطوّرة بشكل كبير من نموذج العناصر المحدودة SUTRA3D، وهي الآن قادرة على محاكاة التدفق ثلاثي الأبعاد الثلاثة (Voss and Provost, 2002). يمكن لهذا البرنامج الحاسوبي محاكاة التدفق غير المشبع والتدفق المشبع والحرارة وانتقال الملوثات، بالإضافة إلى التدفق المتغير الكثافة، مما يجعله أداة قوية لنمذجة أي حالة واقعية تقريباً. لسوء الحظ، على عكس Modflow، فإن SUTRA3D ليس جزءاً بعد من أي من البرامج التجارية الأكثر شيوعاً سهلة الاستخدام لمعالجة بيانات مدخلات ومخرجات النموذج، مما يحد بشدة من تطبيقه بشكل أكبر. في عام ٢٠٠٨، أصدرت هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية إضافة منتظرة للغاية إلى Modflow-2005، عملية تدفق القناة (Schoemaker et al., 2008)، القادرة على محاكاة أنواع التدفق المختلفة في طبقات المياه الجوفية الكارستية بشكل صريح باستخدام نهج قائم على أساس فيزيائي. للحصول على شرح شامل للعناصر المحدودة ونماذج الفروق المحدودة وتطبيقاتها المختلفة، يجب على القارئ الرجوع إلى العمل الممتاز الذي قام به Anderson and Woessner (1992).

يمكن استخدام نماذج المياه الجوفية لثلاثة أغراض عامة (Kresic, 2007a):

- التنبؤ أو التوقع بالتغيرات الاصطناعية أو الطبيعية المتوقعة في النظام (طبقة المياه الجوفية) المدروس. مصطلح التوقع predict هو مصطلح أكثر ملاءمة للنماذج الحتمية (الرقمية)، حيث أنه يحمل درجة أعلى من اليقين، في حين أن التنبؤ forecasting هو المصطلح المستخدم مع النماذج الاحتمالية (العشوائية). النماذج التوقعية هي إلى حد بعيد أكبر مجموعة من النماذج المبنية في الممارسة الهيدرولوجية.
  - يهدف وصف النظام لتحليل الافتراضات المختلفة حول طبيعته وديناميكياته. النماذج الوصفية تساعد النماذج الوصفية على فهم النظام بشكل أفضل والتخطيط للتحقيقات المستقبلية. على الرغم من أنها ليست في الأصل أداة توقعية، إلا أنها غالباً ما تنمو لتصبح نماذج توقعية كاملة.
  - لتكوين نظام افتراضي يستخدم لدراسة مبادئ تدفق المياه الجوفية المرتبطة بمشاكل مختلفة عامة أو أكثر تحديداً. يتم استخدام النماذج العامة للتدريب وغالباً ما يتم إنشاؤها كجزء من تطوير كود حاسوبي جديد.
- تنقسم النماذج الرقمية التوقعية إلى مجموعتين رئيسيتين: نماذج تدفق المياه الجوفية ونماذج مصير الملوثات وانتقالها. هذه الأخيرة لا يمكن تطويرها دون حل مجال تدفق المياه الجوفية أولاً للنظام المدروس؛ أي أنها تستخدم حل نموذج تدفق المياه الجوفية كأساس لحسابات المصير والانتقال. بغض النظر عن الاستخدام المقصود أو النوع المقصود، من الضروري أن يتم تفسير أي نموذج للمياه الجوفية واستخدامه بشكل صحيح، يجب فهم حدوده بوضوح. بالإضافة إلى القيود "التقنية" البحتة، مثل دقة الحسابات (الأجهزة أو البرمجيات)، فإن ما يلي ينطبق على أي نموذج (Kresic, 2007a):
- يعتمد على افتراضات مختلفة فيما يتعلق بالنظام الطبيعي الحقيقي الذي يتم نمذجته.

- المعاملات الهيدرولوجية والهيدرولوجية التي يستخدمها النموذج هي دائماً مجرد تقدير تقريبي لتوزيعها التوزيع الميداني الفعلي، والذي لا يمكن تحديده بدقة ١٠٠٪.
- تُستبدل المعادلات التفاضلية النظرية التي تصف تدفق المياه الجوفية بأنظمة من المعادلات الجبرية الأكثر أو الأقل دقة.
- لذلك من الواضح أن النماذج تتمتع بدرجات متفاوتة من الموثوقية ولا يمكن "إساءة استخدامها" ما دامت جميع القيود المتضمنة مذكورة بوضوح، وتتبع عملية النمذجة الإجراءات والمعايير المعمول بها في الصناعة والمعايير، وأن تكون وثائق النمذجة وأية تقارير يتم إنشاؤها شفافة وتتبع أيضاً معايير الصناعة. معايير الصناعة التالية، التي وضعها مجتمع خبراء الصناعة الرائد في مجال نمذجة المياه الجوفية تحت رعاية الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد، حيث تغطي جميع الجوانب الرئيسية لنمذجة المياه الجوفية وينبغي اتباعها عند محاولة إنشاء نموذج للمياه الجوفية يمكن الدفاع عنه واستخدامه لأغراض التوقع (American Society for Testing Materials, 1999a, 1999b):

- دليل تطبيق نموذج تدفق المياه الجوفية على مشكلة خاصة بالموقع (D 5447-93).
  - دليل لمقارنة محاكاة نموذج تدفق المياه الجوفية بالمعلومات الخاصة بالموقع (D 5490-93).
  - دليل تحديد شروط الحدود في نمذجة جريان المياه الجوفية (D 5609-94).
  - دليل تحديد الشروط الأولية في نمذجة تدفق المياه الجوفية (D 5610-94).
  - دليل إجراء تحليل الحساسية لتطبيق نموذج تدفق المياه الجوفية (D 5611-94).
  - دليل توثيق تطبيق نموذج جريان المياه الجوفية (D 5718-95).
  - دليل لنمذجة التدفق والانتقال تحت السطحي (D 5880-95).
  - دليل معايرة تطبيق نموذج تدفق المياه الجوفية (D 5981-96).
  - ممارسة لتقييم النماذج الرياضية للمصير البيئي للمواد الكيميائية (E 978-92).
  - دليل تطوير نماذج المواقع المفاهيمية للمواقع الملوثة (E 1689-95).
- اللغة التالية مصاحبة لتوجيه وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة الأمريكية بشأن المياه الجوفية U.S. EPA OSWER Directive 9029.00 (U.S. EPA, 1994):

- الغرض من هذا التوجيه هو تعزيز الاستخدام المناسب لنماذج المياه الجوفية في برامج إدارة النفايات التابعة لوكالة حماية البيئة الأمريكية. وبشكل أكثر تحديداً، تتمثل أهداف "إطار التقييم لتطبيقات نماذج المياه الجوفية" هي:
- دعم استخدام نماذج المياه الجوفية كأدوات للمساعدة في اتخاذ القرارات في ظل ظروف عدم اليقين؛
  - توجيه النمذجة الحالية أو المستقبلية؛
  - تقييم أنشطة النمذجة وعمليات التفكير؛
  - تحديد احتياجات توثيق تطبيق النماذج.

"المبادئ التوجيهية لتقييم نماذج تدفق المياه الجوفية"، التي نشرتها هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (Reilly and Harbaugh, 2004)، ينص في مقدمته على "إن نمذجة تدفق المياه الجوفية هي أداة مهمة كثيراً ما تستخدم في دراسات أنظمة المياه الجوفية. ويحتاج مراجعو ومستخدمو هذه الدراسات إلى تقييم مدى دقة أو معقولية نموذج تدفق المياه الجوفية. يقدم هذا التقرير بعض الإرشادات والتوصيات حول كيفية تقييم نماذج تدفق المياه الجوفية المعقدة المستخدمة في دراسة أنظمة المياه الجوفية. العامل الثابت في هذه المبادئ التوجيهية هو أن أهداف الدراسة يجب أن تكون محددة للسماح بتقييم مدى كفاية النموذج."

### ٥-٧-١ النمادج التحليلية (معادلات تدفق المياه الجوفية)

معادلات جريان المياه الجوفية، لجميع الأوساط المسامية على حد سواء (الارضية، الشقوق أو الكسور، والقنوات أو الممرات) تستند على نفس مبدأ حفظ الكتلة، والذي يسمى أيضاً مبدأ استمرارية السريان كما هو موضح في الشكل ٥-٣٢. وينص هذا المبدأ، المستمد من الهيدروليكا العامة لسريان الموائع، على أن معدل السريان (Q) خلال في أنبوب التدفق الأولي يتناسب طردياً مع مساحة

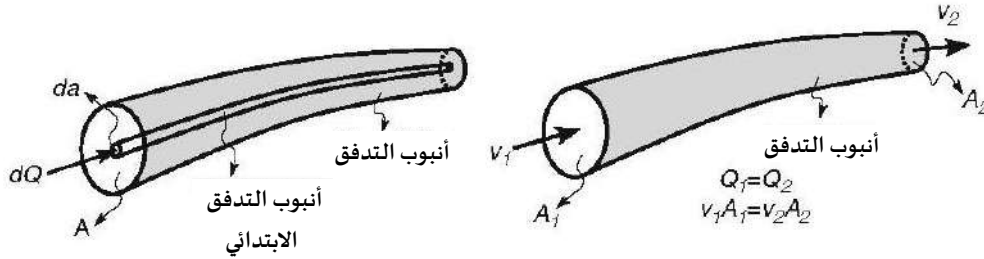
المقطع العرضي للأنبوب (a) وسرعة التدفق (v):

$$dQ = vda \quad (٥,٢٢)$$

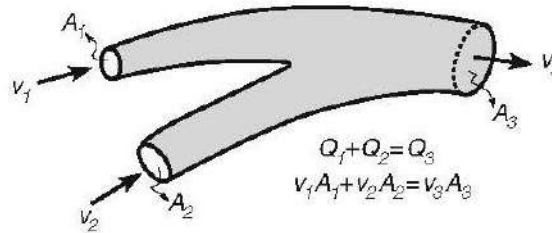
يمكن دمج "العديد" من أنابيب التدفق الأولية هذه في جزء واقعي ثلاثي الأبعاد من أنبوب التدفق المائي يحدث من خلاله تدفق المياه الجوفية؛ طالما أنه لا يوجد فقدان أو كسب للمياه داخل هذا أنبوب التدفق الواقعي (المدمج) هذا، فإن المبدأ هو نفسه:

$$Q = \int_A dQ = \int_A vda \quad (٥,٢٣)$$

حيث A هو مجموع جميع المقاطع العرضية لأنابيب السريان الأولية، و vda هو متوسط سرعة السريان داخل أنبوب السريان الواقعي. يمكن أن يندمج أنبوبان أو أكثر من أنابيب التدفق في أنبوب واحد، ويكون معدل التدفق الناتج مضافاً (الشكل ٥-٣٣). وبالعكس، يمكن أن ينقسم أنبوب التدفق الواحد إلى عدة أنابيب حيث يكون مجموع التدفقات الجديدة مساوياً للتدفق الابتدائي. وتجدر الإشارة إلى أن مصطلح أنبوب لا يعني أن الجزء من خزان المياه الجوفية قيد الدراسة يجب أن يبدو مثل (له شكل) الأنبوب؛ ما يعنيه هو أن خطوط التدفق (خطوط انسيابية) لجزيئات المياه الجوفية داخل الأنبوب تبقى في الداخل ولا تدخل جزيئات جديدة إلى الأنبوب. عند النظر في تدفق المياه الجوفية نحو نبع ما، بغض النظر عن نوع طبقة المياه الجوفية التي يصرفها وحجم النبع، يجب أن تؤخذ المبادئ الإضافية التالية بعين الاعتبار دائماً عند محاولة الوصف الكمي للتدفق عند النبع باستخدام معادلة (معادلات) تحليلية:



الشكل ٥-٣٢ (يسار) أنبوب السريان في الأوساط المسامية:  $da$  = المقطع العرضي لأنبوب السريان الأولي،  $dQ$  = معدل السريان الأولي. (يمين) مبدأ استمرارية السريان (حفظ الكتلة) للسوائل غير القابلة للانضغاط:  $A_1$  و  $A_2$  = مساحة المقطع العرضي للتدفق؛  $v_1$  و  $v_2$  = متوسط سرعة التدفق.



الشكل ٥-٣٣ مبدأ استمرارية السريان لثلاثة أنابيب سريان.

- يكون تدفق المياه الجوفية من أجزاء طبقة المياه الجوفية التي لها رؤوس هيدروليكية أعلى من ارتفاع من تصريف النبع؛
- يكون تدفق المياه الجوفية دائماً من الرأس الهيدروليكي الأعلى باتجاه الرأس الهيدروليكي الأدنى.
- يتجه تدفق المياه الجوفية نحو النبع.
- يقع النبع دائماً في نهاية مسار التدفق التفضيلي، في جميع أنواع طبقات المياه الجوفية، بما في ذلك طبقات المياه الجوفية المطوّرة في الأوساط المسامية بين الحبيبات (الرواسب غير متماسكة).
- قد تندمج المزيد من مسارات التدفق التفضيلي في مسار التدفق التفضيلي النهائي الذي يغذي النبع.
- مسار التدفق التفضيلي له نفاذية أعلى من الوسائط المسامية المحيطة.
- يظهر النبع بسبب وجود انقطاع في مجال تدفق المياه الجوفية ثلاثي الأبعاد (مجال التدفق هذا ثلاثي الأبعاد دائماً).
- يكون التدفق عند النبع معتمداً دائماً على الوقت (عابر)؛ أي أنه يختلف مع مرور الوقت.

يوضح الشكل ٥-٣٤ بعض مبادئ جريان المياه الجوفية التي تؤدي إلى ظهور الينابيع. ول سوء الحظ، لا يمكن حل معادلة واحدة أو مجموعة معادلات واحدة تحليلياً بطريقة فعالة وفي نفس الوقت وصف معظم هذه المبادئ تقريباً جميع معادلات تدفق المياه

الجوفية المطبقة بشكل شائع، لأي نوع من الاوساط المسامية، تستند على افتراضات تبسيطية مختلفة وجميعها تقريباً لظروف غير عابرة (الحالة المستقرة) التي تصف التدفق أحادي البعد أو، في أفضل الأحوال، التدفق المستوي (ثنائي الأبعاد). إحدى المشاكل الرئيسية لتطبيق المعادلات التحليلية على نطاق أوسع في هيدروجيولوجيا الينابيع، بالإضافة إلى الطبيعة العابرة بقوة لتصريف الينابيع، هي أن الخصائص الناقلة للاوساط المسامية يجب أن تزداد بالقرب من النبع لاستيعاب معدل التدفق المتزايد خلال مساحة المقطع العرضي المتناقصة لطبقة المياه الجوفية التي تؤدي في النهاية إلى تصريف نقطي (الشكل ٥-٣٥). وهذا يعني أن المعادلات يجب أن تكون تفاضلية جزئية ومتكاملة للظروف الابتدائية والحدودية المتغيرة، وهو أمر يتجاوز الحلول التحليلية الممكنة. كما أنه السبب الرئيسي الذي يجعل نماذج المياه الجوفية الرقمية اليوم لا يمكن الاستغناء عنها في الهيدروجيولوجيا الكمية.

ومع ذلك، فإن المعادلات التحليلية مفيدة كجزء من التقييم والتطوير الشامل لنموذج يمكن أن يساعد في اختبار الفرضيات المختلفة بسرعة وتوفير بعض التقديرات العامة ("التقريبية") لمختلف معاملات طبقة المياه الجوفية (الهيدروجيولوجية) بما في ذلك قابلية الانتقال والتوصيل الهيدروليكي، سرعة التدفق (السرعات)، أو المسامية الفعالة. كما أنها جزء من النماذج العددية، وعلى هذا النحو، يجب أن تكون مألوفة لعلماء الهيدروجيولوجيا الممارسين وعلماء الهيدروجيولوجيا.

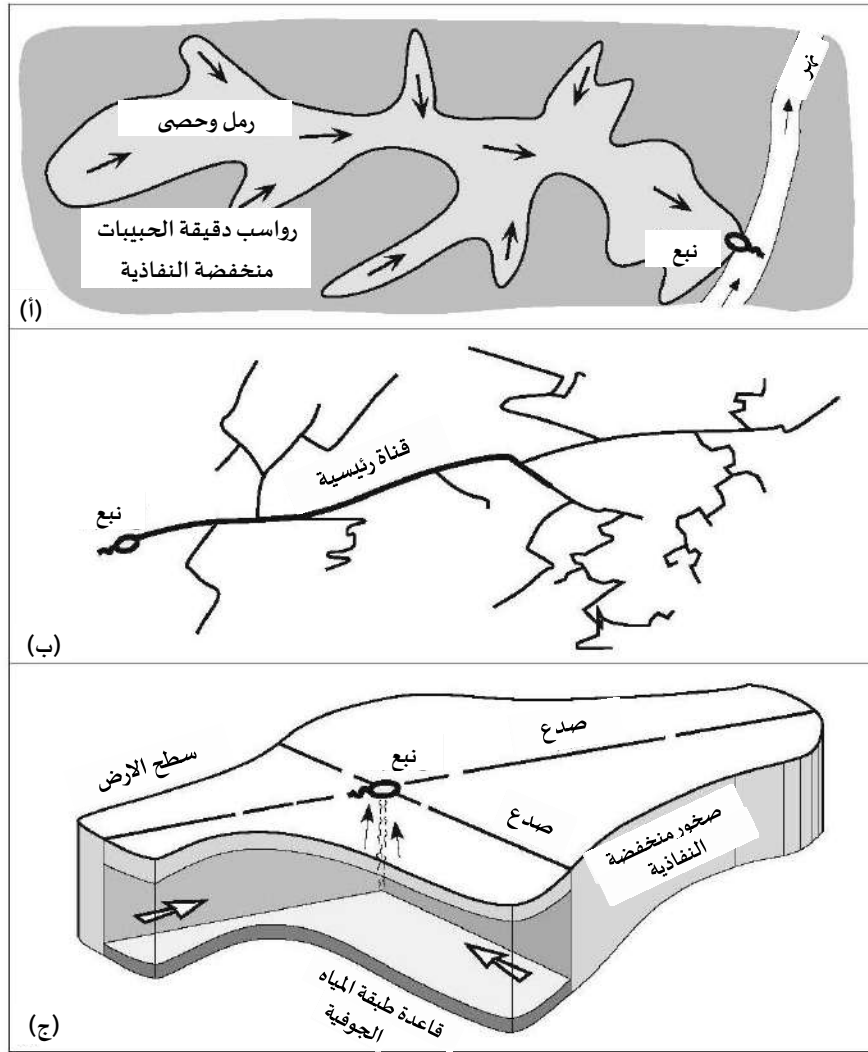
هناك ثلاثة أنواع عامة من معادلات جريان المياه الجوفية، اعتماداً على طبيعة تدفق طبقة المياه الجوفية الموضحة في الشكل ٥-٣٢- ٥، أي طبيعة الوسط المسامي. وهناك وصف موجز لها ويجب على القارئ المهتم بمزيد من التفاصيل الرجوع إلى الكتب العامة في الهيدروجيولوجيا (على سبيل المثال، [Freeze and Cherry, 1979; Kresic 2007a](#))، والكتب المتعلقة بتدفق المياه الجوفية في الصخور المتشققة (على سبيل المثال، [Bear, Tsang, and de Marsily, 1993; Faybishenko Witherspoon, and Benson, 2000](#))، وكتب عن الهيدروجيولوجيا الكارستية ([Ford and Williams, 2007; White, 1988](#)).

### طبقة المياه الجوفية في الرواسب غير المتماسكة

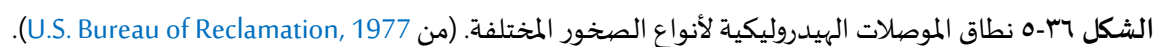
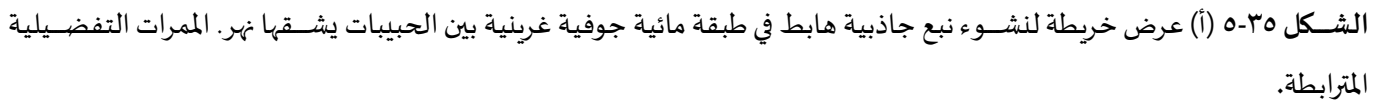
يمتلئ أنبوب التدفق برواسب غير موحدة، أي حبيبات من مواد مسامية. في هذه الحالة، يكون تدفق المياه الجوفية في الغالب صفحي (بطيء)، ويمكن وصفه بمعادلة دارسي، وهي المعادلة الأكثر استخداماً في الهيدروجيولوجيا، والتي لها الأشكال الشائعة التالية:

$$Q = K \frac{\Delta h}{l} A \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (\text{أ}, ٥, ٢٤)$$

$$v = K \frac{\Delta h}{l} = Ki \quad [\text{m/s}] \quad (\text{ب}, ٥, ٢٤)$$



الشكل ٥-٣٤ (أ) عرض خريطة لنشوء نبع جاذبية هابط في طبقة مائية جوفية غرينية في طبقة مياه جوفية بين حبيبية يشقها نهر. الممرات التفضيلية المترابطة من الرمل والحصي المحاطة برواسب دقيقة الحبيبات أقل نفاذية، تجمع وتنقل المياه الجوفية إلى النبع. (ب) عرض خريطة للقنوات الكارستية أو الممرات الكهفية التي تجمع المياه الجوفية وتنقلها إلى القناة الرئيسية أو القناة التي تغذي النبع. (ج) نبع صاعد ينبثق عند تقاطع الصدوع الإقليمية من خلال التدفق عبر منطقة النفاذية المعززة التي تنشأ في الصخور منخفضة النفاذية. يعمل النبع كبئر ضخ مع تدفق شبه شعاعي.



ينص هذا القانون الخطي على أن معدل سريان المائع (Q) عبور وسط مسامي يتناسب طردياً مع سرعة التدفق (v) ومساحة المقطع العرضي للتدفق (A)، حيث تُعطى سرعة التدفق كحاصل ضرب الثابت K والتدرج الهيدروليكي (i). يُعرّف التدرج الهيدروليكي بأنه فقدان الرأس الهيدروليكي (Dh) على طول مسار التدفق بطول  $L$ . K هو ثابت التناسب للقانون المسمى بالسرعة الهيدروليكية ولديه وحدة السرعة. هذا الثابت هو المعامل الكمي الأكثر أهمية الذي يميز تدفق المياه الجوفية عبر الأوساط المسامية. يعطي الشكل ٣٦-٥ نطاق التوصيل الهيدروليكي لأنواع الصخور المختلفة. بالنسبة للصخور المتشققة المتماصة، والكربونات التكيفية، والبازلت النفاذي، تمثل القيم المعطاة الموصلية الهيدروليكية المكافئة للمجموعة للكتلة الصخرية بأكملها، بما في ذلك الانقطاعات. إن السرعة في المعادلة (٥,٢٣)، والتي تسمى سرعة دارسي، ليست السرعة الحقيقية التي تتحرك بها جزيئات الماء خلال الوسط المسامي. يفترض قانون دارسي، الذي تم اشتقاقه لأول مرة تجريبياً، أن المياه الجوفية تتدفق خلال كامل مساحة المقطع العرضي للعينة (الوسط المسامي)، بما في ذلك الفراغات والحبيبات (بشكل مناسب، تسمى سرعة دارسي السرعة المملخة في الأدبيات الروسية). من أجل حقيقة أن المياه الجوفية تتحرك بين الحبيبات فإن سرعة المياه الجوفية البديلة، والتي غالباً ما تُستخدم السرعة الخطية ( $v_L$ ) في الحسابات عندما يكون من المهم تقدير سرعة المياه الجوفية بالإضافة إلى معدل التدفق:

$$v_L = \frac{v}{n_{ef}} \quad (٥,٢٥)$$

حيث  $n_{ef}$  هي المسامية الفعالة. بما أن مساحة المقطع العرضي الفعلية للسريان أصغر من المساحة الكلية (يحدث التدفق فقط من خلال الفراغات الموجودة بين الحبيبات)، يترتب على ذلك أن السرعة الخطية يجب أن تكون أكبر من سرعة دارسي:  $v_L > v$ . تكون سرعة المياه الجوفية الخطية دقيقة عند استخدامها لتقدير متوسط زمن انتقال المياه الجوفية، وسرعة دارسي دقيقة لحساب معدلات التدفق. ومع ذلك، فإن أيًا منهما لا يمثل سرعة المياه الجوفية الحقيقية، وهي زمن انتقال جسيم الماء على طول مساره الفعلي عبر الفراغات. من الواضح أنه لأغراض عملية، لا يمكن قياس السرعة الحقيقية أو حسابها. وهناك قوتان رئيسيتان تؤثران على جسيمات الماء المنفردة التي تتحرك عبر الوسط المسامي: الاحتكاك بين جزيئات الماء المتحركة والاحتكاك بين جزيئات الماء والمواد الصلبة المحيطة بالفراغات. وينتج عن ذلك سرعات غير متساوية لجزيئات الماء المنفردة: بعضها يتحرك بسرعة أكبر وبعضها الآخر أبطأ من متوسط السرعة الكلية لمجموعة من الجسيمات. هذه الظاهرة، التي تسمى التشتت الميكانيكي، وهي مهمة للغاية عند قياس انتقال الملوثات الذائبة في المياه الجوفية. وبسبب التشتت الميكانيكي تنتشر جزيئات الماء المنفردة (أو الملوثات الذائبة) في جميع الاتجاهات الرئيسية الثلاثة فيما يتعلق باتجاه التدفق الكلي للمياه الجوفية: الطولي والعرضي والرأسي. توجد أداة توضيحية للغاية لتوضيح التأثيرات المتفاوتة للتوصيل الهيدروليكي والمسامية الفعالة والتدرجات الهيدروليكية على سرعة واتجاه التدفق وتشتت جزيئات السوائل متاحة كبرنامج حاسوبي في المجال العام يسمى *Particleflow* بواسطة Hsieh, (2001) من هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية.

كما يتضح من **المعادلة (٥٢٥)**، من المهم جداً التمييز بوضوح بين المسامية الكلية والمسامية الفعالة لكل من الصخور غير المتماسكة والمتماسكة. ومع ذلك، من المؤسف أن بعض الكتب المستخدمة على نطاق واسع في علم الهيدروجيولوجيا لا تقوم بهذا التمييز، بل وتفترض أنه لا يوجد شيء يسمى المسامية الفعالة، حيث "يظهر أن جزيئات الماء قادرة على التحرك خلال أي حجم المسام." قد تساعد المناقشة التالية التي كتبها **Meinzer (1932)** في توضيح سبب استخدام "شكل المسامية" المناسب والرقم المقابل المناسب في التحليلات الهيدروجيولوجية الكمية:

"لتحديد تدفق المياه الجوفية، على أي حال، يجب تطبيق عامل ثالث، والذي يسمى المسامية الفعالة. جزء كبير من المقطع العرضي مشغول بالصخور والماء المرتبط بإحكام على أسطح الصخور عن طريق الجذب الجزيئي. وبالتالي فإن المساحة التي يتدفق من خلالها الماء أقل من مساحة المقطع العرضي للمادة الحاملة للماء وقد تكون جزءاً صغيراً فقط من تلك المساحة. في الحصى الخشنة والنظيفة، والتي تحتوي على فجوات كبيرة فقط، قد تكون المسامية الفعالة هي نفسها تقريباً مثل المسامية الفعلية، أو النسبة المئوية لمساحة المسام؛ ولكن في المواد ذات الحبيبات الدقيقة أو ذات الفرز الضعيف قد يصبح تأثير الماء الملصق كبيراً جداً، وقد تكون المسامية الفعالة أقل بكثير من المسامية الفعلية. قد يكون للطين مسامية عالية ولكن قد يكون غير نافذ بالكامل وبالتالي تكون المسامية الفعالة صفر. إن المسامية الفعالة للمواد ذات الحبيبات الدقيقة جداً ليست ذات أهمية كبيرة بشكل عام في تحديد التدفق الكلي، لأن السرعة في هذه المواد تكون بطيئة جداً لدرجة أن التدفق المحسوب، مع أي مسامية فعالة مفترضة، من المحتمل أن يكون طفيفاً نسبياً أو لا يُذكر تماماً. ومع ذلك، فإن تحديد المسامية الفعالة، كما هي مختلفة عن المسامية الفعلية، مهمة في دراسة الجريان العام للمواد الحاملة للماء، والتي ليست دقيقة للغاية ولا خشنة للغاية ولا نظيفة للغاية. حتى الآن لم يتم القيام بالكثير من العمل على هذه المرحلة من طرق السرعة لتحديد معدل التدفق. لم يتم التمييز بشكل عام بين المسامية الفعلية والفعالة، وكثيراً ما يتم استخدام عامل بنسبة  $33\frac{1}{3}$  في المائة، على ما يبدو دون إجراء اختبار للمسامية. من المؤكد أن المسامية الفعالة للمواد المختلفة الحاملة للماء تتراوح بين حدود واسعة وأنه يجب على الأقل تقريباً إذا ما أردنا الحصول على نتائج موثوقة فيما يتعلق بمعدل التدفق. يبدو أن كل اختبار ميداني للسرعة يجب أن يُستكمل باختبار معلمي للمسامية الفعالة، والذي من أجله تم استخدام الجهاز المختبري الذي ابتكره سليكتر (١٩٠٥).

وغالباً ما تكون المسامية الفعالة معادلة للمردود النوعي للمادة المسامية أو يفترض أن حجم من الماء في الفراغ المسامي يمكن تصريفه بحرية بواسطة الجاذبية بسبب التغير في الرأس الهيدروليكي. تُعرّف المسامية الفعالة أيضاً على أنها حجم الفراغ المسامي المترابط الذي يسمح بالتدفق الحر للمياه الجوفية المتأثرة بالجاذبية الأرضية. يُطلق على حجم المياه التي تحتفظ بها الوسائط المسامية والتي لا يمكن تصريفها بسهولة بواسطة جاذبية الاحتفاظ النوعي. أحد الفوارق المهمة بين مفهوم *المردود النوعي* و *المسامية الفعالة* هو أن المردود النوعي يتعلق بحجم المياه التي يمكن استخراجها بحرية من طبقة المياه الجوفية، في حين أن المسامية الفعالة تتعلق بسرعة المياه الجوفية وتدفقها خلال الحيز المسامي المترابط. تمثل **الأشكال ٣٧-٥ و ٣٨-٥** رسوم بيانية لمتوسط المسامية الكلية ونطاقات المسامية لأنواع مختلفة من الصخور.

لا توجد قائمة مماثلة للقيم المحددة فعلياً للمسامية الفعالة، بما في ذلك شرح واضح لما تم اختباره، غير موجود على حد علم هذا المؤلف. من ناحية أخرى، قيم المردود النوعي يمكن العثور عليها بسهولة في المؤلفات، وكما هو متوقع، تتفاوت على نطاق واسع بسبب عدم التجانس الحتمي لطبقات المياه الجوفية الطبيعية وطرق الاختبار الميدانية المختلفة (Kresic, 2007a). بشكل عام، فإن وجود رواسب دقيقة الحبيبات، مثل الطمي والطين، حتى بكميات صغيرة نسبياً، يمكن أن يقلل بشكل كبير من المردود النوعي (المسامية الفعالة) للرواسب ذات الحبيبات الخشنة. توجد مناقشة مفصلة للغاية لمفهوم المردود النوعي والطرق المختلفة للقياسات ودراسات الحالة من قبل (Johnson, 1967).

هناك حالتان بسيطتان لتقدير معدلات تدفق المياه الجوفية في الحالة المستقرة تحت ظروف غير محصورة وظروف محصورة. في الشكل ٣٩-٥. في كلتا الحالتين، يكون التدفق مستوياً، من خلال مقطع عرضي مستطيل ثابت بعرض أ وفوق قاعدة أفقية غير منفذة. تكون الموصلية الهيدروليكية ثابتة مكانياً (طبقات المياه الجوفية متجانسة)، ويكون التدرج الهيدروليكي ثابتاً أيضاً. وتصف المعادلتان (٢١،٥) و (٥،٢٢) هذه الشروط البسيطة. بالنسبة لحالة التدفق المحصور، تكون العلاقة خطية، حيث أن طبقة المياه الجوفية المشبعة المشبعة (ب) لا يتغير على طول مسار التدفق. المعادلة (٥،٢٣)، التي تصف الظروف غير المحصورة وتتضمن معدل تغذية محتمل ( $w$ )، غير خطية، لأن سُمك المشبع (موضع الجدول المائي) يتغير بين  $h_1$  و  $h_2$ . في الواقع، تكون ظروف التدفق أكثر تعقيداً دائماً تقريباً، بما في ذلك تغير سُمك طبقة المياه الجوفية، والتدفق المتغير، والانتقال المحتمل بين التدفق المحصور وغير المحصور، والقاعدة الغير أفقية، وعدم تجانس الاوساط المسامية، والتغذية المعتمدة على الوقت (المتغيرة بمرور الوقت) من اتجاهات مختلفة. على الرغم من تطوير معادلات مختلفة لوصف بعض هذه الشروط (انظر، على سبيل المثال، (Freeze and Cherry, 1979 Kresic, 2007a) إلا أن النماذج الرقمية تستخدم الآن بشكل روتيني بدلاً من ذلك.

أحد المتغيرات الرئيسية للحسابات المختلفة لمعدلات تدفق المياه الجوفية هو قابلية انتقالية الوسائط المسامية. لأغراض عملية، يتم تعريفها على أنها حاصل ضرب سُمك طبقة المياه الجوفية (b) والتوصيل الهيدروليكي (K):

$$T = b \times K \quad (٥،٢٦)$$

ويتربط على ذلك أن طبقة المياه الجوفية تكون أكثر قابلية للنفاذ (يمكن أن تتدفق المزيد من المياه خلالها) عندما يكون لديها توصيلية مائية أعلى وتكون أكثر سمكاً. على الرغم من وجود العديد من الطرق المختبرية والميدانية لتحديد الموصلية الهيدروليكية ونفاذية طبقات المياه الجوفية، إلا أن أكثرها موثوقية هي اختبارات الضخ الميداني طويلة الأجل التي تسجل الاستجابة الهيدروليكية لجميع الوسائط المسامية الموجودة في النظام. اختبار طبقات المياه الجوفية ليس محور تركيز هذا الكتاب، ويمكن للقارئ الرجوع إلى العديد من المنشورات العامة والخاصة حول تصميم وتحليل اختبارات طبقات المياه الجوفية، بما في ذلك اختبارات الضخ، مثل الوثائق الإرشادية الصادرة عن هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (Ferris et al., 1962 Stallman, 1971; Lohman, 1972)، ووكالة حماية البيئة الأمريكية (Osborne, 1993), the U.S. Bureau of Reclamation (1977), the American Society for

(Driscoll (1989); Walton (1987); Kruseman, de Ridder, and Verweij (1999a, 1999b) وكتب Testing and Materials (1999a, 1999b) وكتب Dawson and Istok (1992); and Kresic (2007a) (1991).

### طبقة المياه الجوفية الصخرية المتشققة

تتمثل الطبيعة المزدوجة لطبقة المياه الجوفية بنوعين من أنابيب التدفق (الشكل ٥-٣٢): النوع الأول مملوء بحبيبات ومعادن الأرضية الصخرية ويتصرف بنفس الطريقة التي تتصرف بها طبقات المياه الجوفية بين الحبيبات حيث يكون قانون دارسي ساري المفعول؛ النوع الثاني من أنابيب التدفق هو شق ذو مدى مستوٍ محدود. يوجد تبادل للسوائل بين هذين النوعين المستمرين المساميين. وفتحة الشق وسُمكه هما المعاملان الأكثر استخدامًا في مختلف معادلات تدفق الشق الواحد بينما تُستخدم المسافات بين الشقوق واتجاه الشق عند حساب التدفق خلال مجموعة من الشقوق. ومع ذلك، لا يمكن ترجمة هذه الخصائص الفيزيائية الفعلية بسهولة إلى معادلات تحاول وصف التدفق على مقياس ميداني واقعي للأسباب التالية:

١. كما هو موضح في الشكل ٥-٤٠، فإن فتحة الشق ليست ثابتة وهناك فراغات ومناطق تماس ضيقة جدًا أو مناطق تلامس ضيقة جدًا تسمى الشقوق. وقد أظهرت الدراسات التجريبية المختلفة أن التدفق الفعلي في الشق يتم توجيهه من خلال مسارات ضيقة متعرجة تشبه القناة ولا يمكن تمثيله ببساطة من خلال التدفق بين صفيحتين متوازيتين تفصل بينهما فتحة "متوسطة" (Cacas, 1989).

٢. بسبب إطلاق الإجهاد، فإن قياس الفتحة في النتوءات أو ممرات الكهوف التي يتعذر الوصول إليها ليس نفس الفتحة في الموقع. كما أن الفتحة التي يتم قياسها على نوى الحفروفي الآبار ليست حقيقية عملية الحفر - عادةً ما تسبب في كسر الصخور المجاورة للشقوق، وبالتالي زيادة العرض الظاهري لفتحات الكسور كما يظهر في صور جدار البئر (Williams et al., 2002).

٣. الشقوق لها طول وعرض محدودين، والتي يمكن أن تختلف أيضًا بين الشقوق الفردية في نفس مجموعة الشق. كما يمكن أن تختلف المسافات بين الشقوق الفردية في نفس المجموعة. بما أن كل هذه الاختلافات تحدث في الحيز ثلاثي الأبعاد، فلا يمكن ملاحظتها بشكل مباشر، إلا من خلال الحفر المستمر أو تسجيل العديد من الآبار المتقاربة في آبار متعددة، وهو العامل الرئيسي الذي يحد من التكلفة.

ويرد تطور المعادلات التحليلية والمقاربات المختلفة في قياس تدفق الكسر من خلال Witherspoon (2000) and Faybishenko et al. (2000). في أبسط شكل، فإن الموصلية الهيدروليكية للشق ذو الفتحة B (في ترميز ويندرسبون  $B = 2b$ ) والممثلة بلوحين متوازيين

هي:

$$K = B^2 \frac{\rho g}{12\mu} \quad (٥,٢٧)$$

حيث  $r$  كثافة المائع، و  $g$  تسارع الجاذبية، و  $m$  لزوجة المائع. معدل سريان المياه الجوفية خلال مساحة المقطع العرضي  $A = Ba$  (حيث  $B$  هي فتحة الشق و  $a$  هي عرض الشق العمودي على اتجاه التدفق) هو حيث  $dh/dx$  هو التغير في الرأس الهيدروليكي ( $h$ ) على طول اتجاه التدفق ( $x$ ). في الصورة المحددة، هذا التغير  $Dh$  وتختفي علامة الطرح بسبب التكامل. تقريب تدفق الشق، ويسمى القانون التكميبي، ويفترض أن حجم طبقة المياه الجوفية التمثيلية يعمل كوسيط مسامي مكافئ (استمرارية دارسيان). يعطي ويذرسيون صورة أخرى للقانون التكميبي:

$$\frac{Q}{\Delta h} = \frac{CB^3}{f} \quad (٥,٢٨)$$

حيث  $C$  هو ثابت يعتمد على هندسة مجال التدفق و  $f$  هو الخشونة التي تمثل الانحرافات عن الظروف المثالية، والتي تفترض جدران الشق ملساء وذات تدفق صفحي. الخشونة  $f$  ترتبط برقم رينولدز ( $Re$ )؛ وهو مؤشر ما إذا كان التدفق مضطرباً أو صفحياً)، وعامل الاحتكاك ( $C$ ) من خلال المعادلة التالية:

$$f = \frac{\Psi Re}{96} \quad (٥,٢٩)$$

يُعطى عدد رينولدز على النحو التالي

$$Re = \frac{Dvp}{\mu} \quad (٥,٣٠)$$

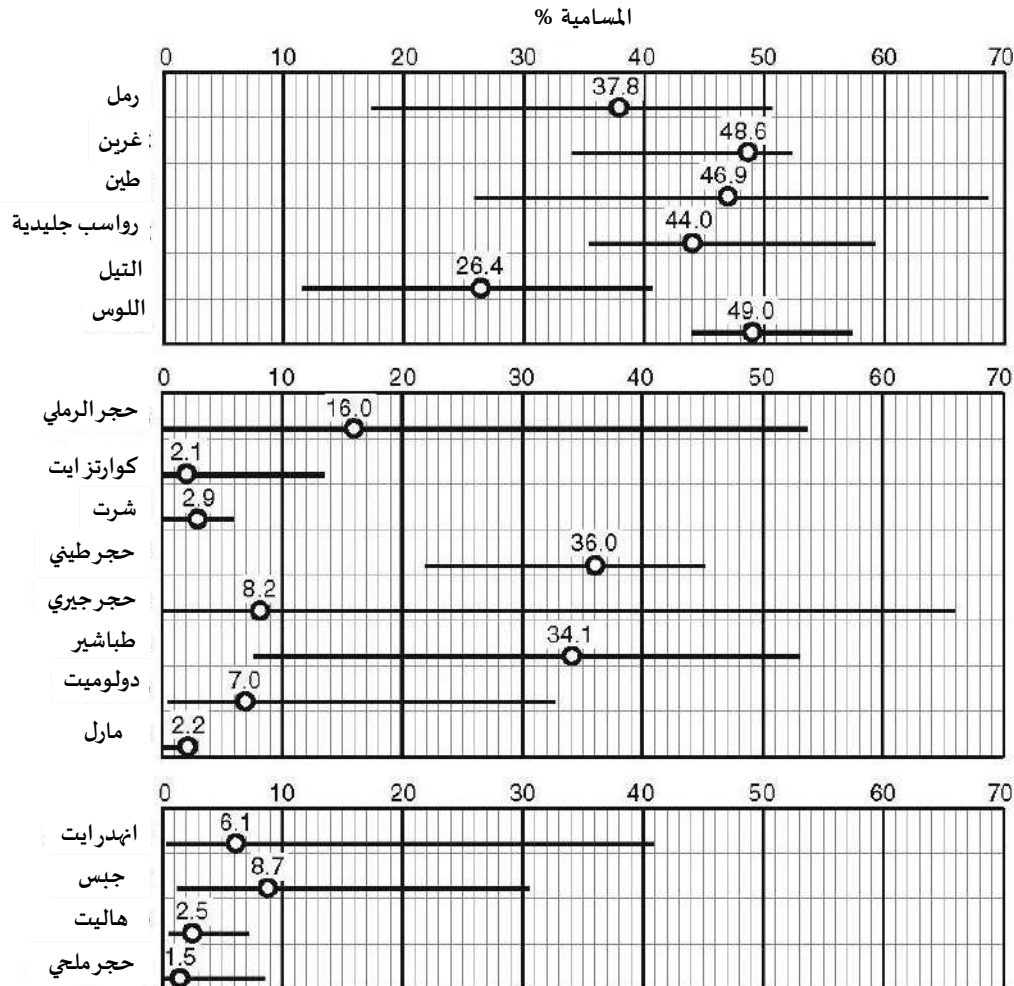
حيث  $D$  هو القطر الهيدروليكي للشق، وهو يساوي تقريباً أربعة أضعاف نصف القطر الهيدروليكي للشق. بالنسبة للشق الأملس نسبياً، حيث تكون النسبة بين فتحة الشق والفتحة أقل من ١،٠٠، يكون الانتقال إلى التدفق المضطرب عند رقم رينولدز حوالي ٢٤٠٠. وبما أن هذه النسبة، وهي مؤشر على خشونة الشق، يزداد رقم رينولدز، ورقم رينولدز للانتقال إلى التدفق المضطرب ينخفض بشكل ملحوظ. ويُعطى عامل الاحتكاك بالعلاقة

$$\Psi = \frac{D}{v^2/2g} \Delta h \quad (٥,٣١)$$

حيث  $v$  هي سرعة التدفق.

لمحاكاة التدفق عبر شبكة من الشقوق، يتعين على المرء أن يحدد الهندسة المكانية للشقوق الفردية وترابطها ضمن كامل حجم طبقة المياه الجوفية ذات الأهمية. ويتم ذلك بطرق متنوعة كما هو موضح في الشكل ٥-٤٢ وناقشها كل من [Chiles \(1989a\)](#), [Long \(1985\)](#), [Long, Gilmour, and Witherspoon \(1983\)](#), [Chiles and Marsily \(1993\)](#), [Long \(1989b\)](#), [Long \(1985\)](#) الموصلية الهيدروليكية لمجموعة من الشقوق المتوازية ( $K_f$ ). مع وجود عدد من الشقوق ( $N$ ) لكل وحدة مسافة، ومتوسط فتحة الكسر  $B$ ، ومسامية

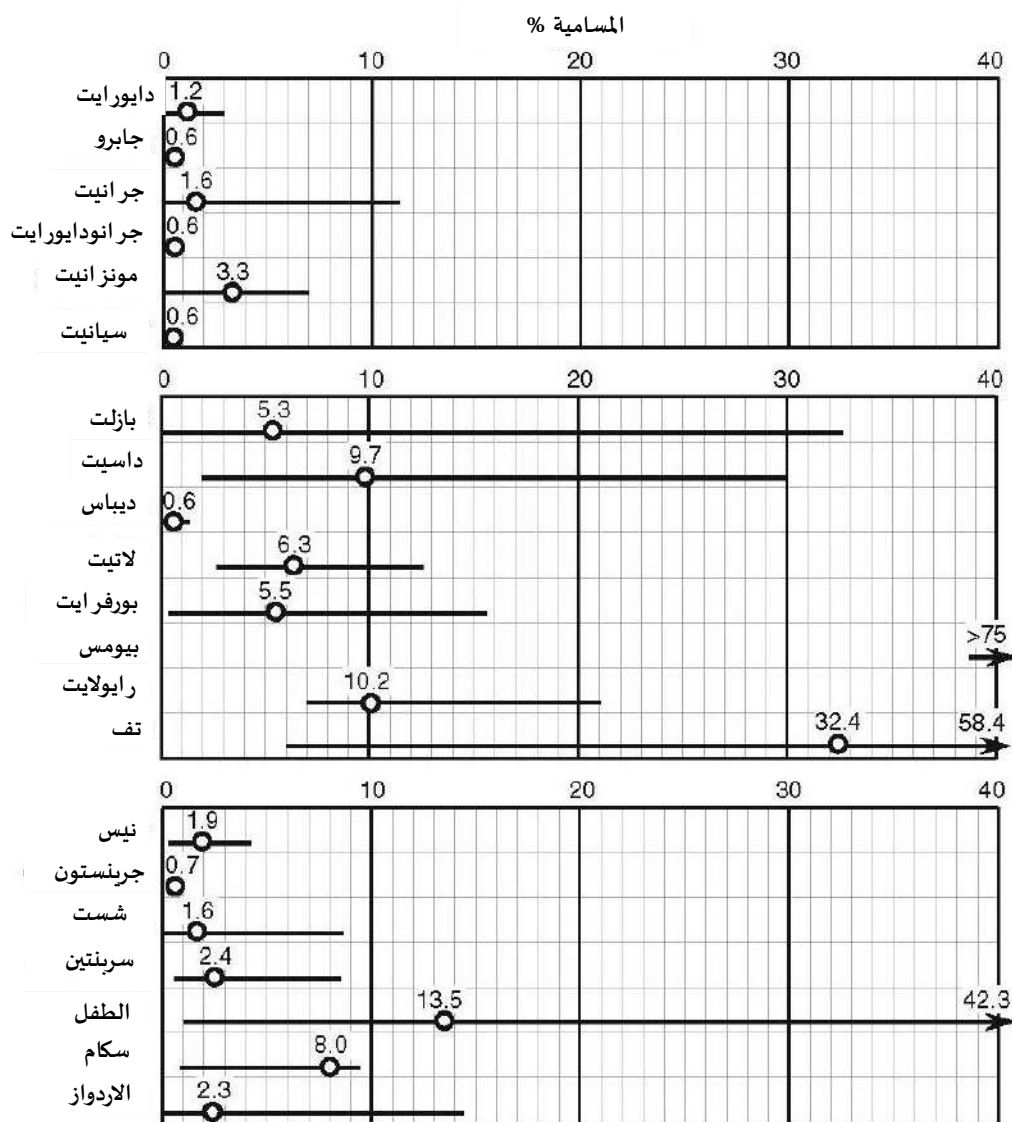
مجموعة الكسور  $nf$  (حيث  $nf = NB$ )، تُعطى بواسطة (Snow, 1968) يفترض هذا التقريب أن حجم طبقة المياه الجوفية التمثيلية يعمل كوسط مسامي مكافئ (استم رارية دارسيان). يستنتج Snow أن مسامية الشق لحجم طبقة المياه الجوفية التمثيلية مع نظام متساوي الخواص ثلاثي الأبعاد من الكسور المتشابهة هو  $nf = 3NB$ ، في حين أن المسامية الهيدروليكية ( $K3f$ ) لمثل هذا النظام الثلاثي الأبعاد هو ضعف المسامية الهيدروليكية لأي مجموعة من مجموعات الكسور المنفردة:



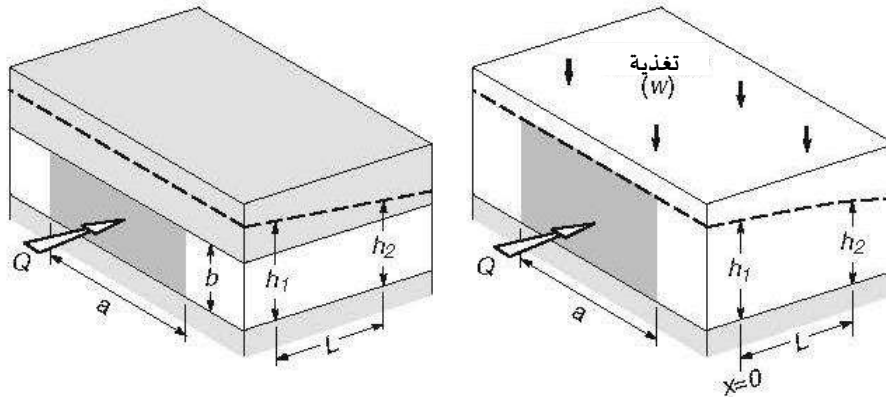
الشكل ٥-٣٧ نطاق المسامية (أعمدة أفقية) ومتوسط المساميات (دوائر) للصخور الرسوبية غير المتماسكة والغير متماسكة. (من Kresic, 2007a؛ حقوق الطبع Francis & Taylor).

$$K_f = \left( \frac{\rho g}{\mu} \right) \frac{NB^3}{12} \quad (٥,٣٢)$$

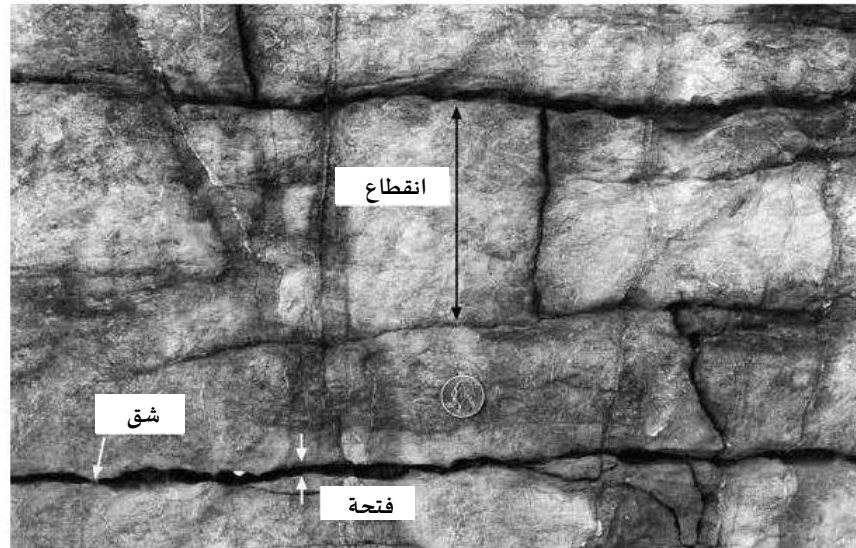
معادلات تدفق الموائع في الكسور غير المثالية مع تأثيرات مختلف المخالفات الهندسية ونهج نمذجة شبكة التصدع. تمت مناقشة نهج نمذجة شبكة التصدع بالتفصيل من [Bear et al. \(1993\)](#), [Zimmerman and Yeo \(2000\)](#), [Bear et al. \(1993\)](#), [Zimmerman and Yeo \(2000\)](#).



الشكل ٣٨-٥ نطاق المسامية (أعمدة أفقية) ومتوسط المسامية (دوائر) للصخور الصهارية والمتحولة. (من [Kresic, 2007a](#)؛ حقوق الطبع [Francis & Taylor](#)).



الشكل ٥-٣٩ نطاق المسامية (أعمدة أفقية) ومتوسط المسامية (دوائر) للصخور الصهارية والمتحولة. (من Kresic, 2007a:؛ حقوق الطبع Francis & Taylor).



الشكل ٥-٤٠ شقوق في الحجر الجيري الدولوميت، سالتفيل، فيرجينيا، مع اختلاف الفتحة والفصل والتشققات. لاحظ عملة ٢٥ سنتاً للمقياس في الوسط السفلي.

### طبقات المياه الجوفية الكارستية والطبقات الجوفية الكارستية السطحية

يوجد نوع ثالث من أنابيب التدفق (الشكل ٣٢-٥) بالإضافة إلى الأنواع الموجودة في طبقات المياه الجوفية الصخرية المتصدعة (أنابيب تدفق الأرضية والشقوق المستوية). في هذه الحالة، يشبه التدفق إلى حد كبير الأنابيب الفعلية ويمكن أن مع سطح ماء حر (تدفق قناة) أو تحت الضغط (التدفق في القنوات والأنابيب). يتم وصف السريان عبر أنبوب بمساحة مقطع عرضي متفاوتة بواسطة معادلة برنولي للسوائل اللزجة الحقيقية للسوائل اللزجة، كما هو موضح في الشكل ٤١-٥. بما أنه لا يوجد كسب أو فقدان للماء في الأنبوب، يبقى معدل التدفق كما هو بينما تتغير العناصر الهيدروليكية الأخرى من مقطع عرضي إلى آخر. خط الطاقة الكلي (E) للسريان يمكن أن ينخفض فقط من المقطع العرضي المتجه لأعلى نحو المقطع العرضي المتجه لأسفل من أنبوب التدفق نفسه (الأنبوب أو القناة) بسبب فقدان الطاقة. ومن ناحية أخرى، فإن خط الرأس الهيدروليكي (H) قد يتجه "لأعلى" و"لأسفل" على طول أنبوب التدفق نفسه مع زيادة مساحة المقطع العرضي أو تناقصها، على التوالي. سطح الطاقة الإجمالي، الذي يتضمن مكون سرعة التدفق ( $g/2av^2$ )، يمكن قياسه مباشرة فقط بواسطة جهاز Pitot، الذي لا يمكن تركيبه في معظم الظروف الميدانية. وتسجل ابار الرصد وأجهزة قياس الضغط، من ناحية أخرى، الرأس الهيدروليكي، والذي لا يشمل مكون سرعة التدفق. لذلك من المتصور أن مقياسين بيزومترين في أو بالقرب من نفس القناة الكارستية مع تدفق سريع قد لا يوفران معلومات مفيدة لحساب سرعة التدفق الحقيقية ومعدل التدفق بينهما بل قد تشير بشكل خاطئ إلى اتجاه التدفق المعاكس. في الواقع، كما ناقشنا (Bogli (1980)، فقد تبين أن الماء الذي يرتفع عبر أنبوب في ممر التوسيع يمكن أن يتدفق إلى الوراء فوق مجرى التدفق الرئيسي إلى أنبوب أخير بدلاً من ممر ضيق في نفس المجرى الرئيسي. هناك عوامل تعقيد إضافية عند محاولة حساب التدفق عبر القنوات الكارستية الطبيعية باستخدام نهج الأنبوب:

١. قد يكون التدفق عبر نفس القناة تحت ضغط و سطح حر على حد سواء.
٢. بما أن جدران الأنابيب والقنوات غير منتظمة إلى حد ما ("خشنة")، يجب تقدير معامل الخشونة ذي الصلة يجب تقديره وإدخاله في معادلة التدفق العام.
٣. قد يختلف المقطع العرضي للقناة بشكل كبير على مسافات قصيرة وفي نفس المنطقة العامة.
٤. قد يكون التدفق صفحياً ومضطرباً في نفس القناة، اعتماداً على سرعة التدفق، ومساحة المقطع العرضي وخشونة الجدار. ويوصف الشذوذ الذي يسبب التدفق المضطرب رياضياً من خلال عدد رينولدز وعامل الاحتكاك.
- ووفقاً (Palmer (1991، يكون التدفق في فتحات ما قبل الذوبان صفحياً بشكل حصري تقريباً. مع استمرار الذوبان يتطور التدفق المضطرب في تلك الفتحات التي تتسع إلى حجم كافٍ، حوالي  $w = 1-20$  مم، اعتماداً على التدرج الهيدروليكي ودرجة الحرارة (الشكل ٤٢-٥). ويحكم التدفق الصفحي للقناة المغلقة بواسطة معادلة Hagen-Poiseuille:

$$Q = \frac{R^2 \gamma_i A}{4\mu} \quad (٥,٣٣)$$

حيث  $R$  هو نصف القطر الهيدروليكي ( $r/2$  في الأنابيب، و  $w/2$  في الشقوق)، و  $c = 2$  في الأنابيب و  $3$  في الشقوق، و  $g$  و  $m$  هما الوزن النوعي واللزوجة الديناميكية للماء، و  $i$  هو التدرج الهيدروليكي معبراً عنه كعدد موجب بعد (فقدان الرأس/طول التدفق). التفريغ الخطي،  $q (= Q/b = \text{عرض السرعة})$ ، هو مصطلح مناسب يستخدم في الشقوق ذات البعد (ب) غير المحدد. يُعبر عن التدفق المضطرب في أي قناة مغلقة أو قناة مفتوحة بمعادلة Darcy-Weisbach:

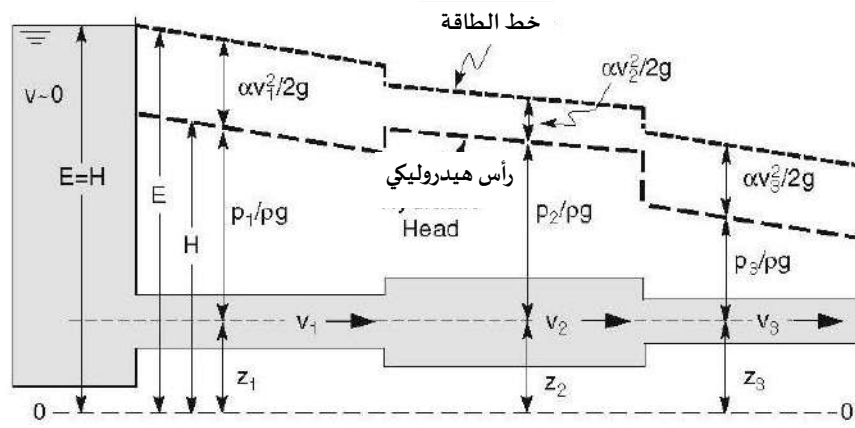
$$Q = A \sqrt{\frac{8Rgi}{f}} \quad (٥,٣٤)$$

حيث  $g$  هي شدة مجال الجاذبية و  $f$  هي عامل الاحتكاك. في التدفق المضطرب تمامًا،  $f = 0.03-0.1$  في أنبوب أو شق مستقيم نموذجي. عوامل الاحتكاك الظاهرة، والتي تتضمن فقدان الرأس المحلية عند الانحناءات وتغيرات مساحة المقطع العرضي، يمكن أن تكون أعلى من ذلك بكثير. التدفق المضطرب يتطور عند رقم رينولدز  $(Re) > 500$ ، حيث

$$Q = A \sqrt{\frac{8Rgi}{f}} \quad (٥,٣٥)$$

حيث  $r$  و  $v$  هما كثافة الماء والسرعة على التوالي.

بسبب التباين الكبير في المسامية الفعالة للكربونات الكارستية، حتى داخل نفس طبقة المياه الجوفية ويمكن أن تتفاوت سرعة المياه الجوفية في الكارست على مدى عدة مرات من حيث الحجم. لذلك يجب على المرء أن يكون حذرًا للغاية عند إطلاق عبارة (شائعة بشكل مدهش) مثل "سرعة المياه الجوفية في الكارست بشكل عام عالية جدًا." على الرغم من أن هذا قد يكون صحيحاً بالنسبة للتدفق المضطرب الذي يحدث في القنوات الكارستية، إلا أن الحجم الأكبر بشكل غير متناسب من أي طبقة مياه جوفية كارستية ذات سرعات مياه جوفية منخفضة نسبياً (التدفق الصفحي) من خلال الشقوق الصغيرة والارضية الصخرية (Kresic, 2007b). إحدى الطرق الشائعة لتحديد اتجاهات تدفق المياه الجوفية وسرعات التدفق الظاهرة في الكارست هي تتبع الصبغة. ومع ذلك، فإن معظم اختبارات تتبع الصبغة في الكارست مصممة لتقييم الروابط المحتملة بين المواقع المعروفة (أو المشتبه بها) لغرق المياه السطحية ومواقع انسكاب المياه الجوفية (الينابيع). ولأن هذه الوصلات تنطوي على نوع من مسارات التدفق التفضيلي (الحفر الامتصاصية-الينابيع)، فإن عادةً ما تكون السرعات الظاهرة المحسوبة من بيانات تتبع الصبغة منحازة نحو النهاية العالية. على سبيل المثال استناداً إلى نتائج ٤٣ اختبار تتبع في المناطق الكارستية في ولاية فرجينيا الغربية، فإن متوسط سرعة المياه الجوفية هو ٧١٦ م/يوم، في حين أن ٥٠ في المائة من الاختبارات تُظهر قيمًا تتراوح بين ٤٢٩ و ٢٦٥٥ م/يوم (٢٥% و ٧٥% من التوزيع التجريبي، على التوالي). من المثير للاهتمام أنه استناداً إلى ٢٨١ اختباراً لتتبع الصبغة، فإن السرعة الأكثر شيوعاً (١٤ في المئة من جميع الحالات) في الكارست الديناريكي الكلاسيكي في الهرسك، كما ذكر (Milanovic 1979)، متشابهة تمامًا، بين ٨٦٤



الشكل ٥-٤١ رسم توضيحي لمعادلة برنولي لسريان الموائع اللزجة الحقيقية عبر أنبوب ذي المقطع العرضي المتغير. خط الطاقة (E) عند أي مقطع عرضي معين هو مجموع رأس الارتفاع (z)، ورأس ضغط المائع (p/rg)، ورأس السرعة ( $\alpha v^2/2g$ ). ويعطي رأس ضغط المائع ورأس الارتفاع الرأس الهيدروليكي (H).



الشكل ٥-٤٢ قناة صغيرة، عرضها حوالي ٢٠ سم، تطورت في الحجر الجيري المتشقق.

و١٧٢٨ م/د. خمسة وعشرون في المائة من النتائج تظهر سرعة مياه جوفية أكبر من ٢٦٥٥ م/يوم في فيرجينيا الغربية وأكبر من ٥١٨٤ م/يوم في الهرسك. استندت الحسابات التقريبية المختلفة لسرعة التدفق على هندسة السمات الهيدروليكية، مثل الأسقوب والقنوات الطولية المرئية على الجدران والأرضيات والسقوف في ممرات الكهوف التي يمكن الوصول إليها (الشكل ٥-٤٣؛ انظر [White, 1988](#)، ص ٩٧-٩٨، [Bogli, 1980](#)، ص ١٦٣-١٦٤). على سبيل المثال، سرعة التدفق المحسوبة لممران في كهف وايت ليدي، وادي ليتل نيث، المملكة المتحدة، هي ١,٢١ م/ث ومعدل التدفق هو ٩,١٤ م<sup>٣</sup>/ث، لمساحة المقطع العرضي للتدفق البالغة ٧,٦ م<sup>٢</sup> وطول الإسكالب ٤,١ سم ([White, 1988](#)).

## ٥-٧-٢ الرؤوس الهيدروليكية التمثيلية

لا يمكن التأكيد على أهمية الرؤوس الهيدروليكية المقاسة ميدانيًا لأي نوع من حسابات تدفق المياه الجوفية بما فيه الكفاية. إنها جزء من جميع معادلات تدفق المياه الجوفية المعروضة في القسم السابق، لأنها تحدد التدرجات الهيدروليكية، وهي القوة الدافعة الرئيسية لتدفق المياه الجوفية. وهي أيضًا الهدف الرئيسي للمعايرة في النمذجة الرقمية للمياه الجوفية، وتصف الشروط الأولية للنموذج، وهي جزء من معظم شروط حدود النموذج. بدون معلومات كافية عن توزيع الرأس الهيدروليكي المعتمد على الوقت



الشكل ٥-٤٣ أسقوب على جدران كهف جيسي بالقرب من كارلسباد، نيو مكسيكو.

داخل المنطقة محل الاهتمام، فإن أي حساب لمعدلات تدفق المياه الجوفية هو تخميني إلى حد كبير. إن الرؤوس الهيدروليكية المقاسة في آبار المراقبة، ومقاييس الضغط، والجداول والبحيرات السطحية (البرك)، وفيها يتم دمج الينابيع في خرائط المياه الجوفية. يجب استخدام عدة مجموعات بيانات على الأقل لرسم خرائط المياه الجوفية للمنطقة محل الاهتمام. بالإضافة إلى ذلك، ينبغي جمع معلومات حول الظروف الهيدرولوجية المائية في المنطقة للأيام والأسابيع السابقة، مع إيلاء اهتمام خاص لوجود فترات رطوبة أو جفاف ممتدة. كل هذه المعلومات ضرورية من أجل رسم خريطة صحيحة. إن الخريطة الكنتورية هي تمثيل ثنائي الأبعاد لحقل تدفق ثلاثي الأبعاد، وعلى هذا النحو، فإن لها قيود. إذا كان من المعروف أن المنطقة (طبقة المياه الجوفية) ذات الأهمية لها تدرجات رأسية كبيرة ومعلومات ميدانية كافية، فمن المستحسن دائماً إنشاء خريطين على الأقل: واحدة لطبقة المياه الجوفية الضحلة وأخرى لطبقة المياه الجوفية العميقة. كما هو الحال مع الخرائط الجيولوجية والهيدروجيولوجية بشكل عام، يجب أن تكون الخريطة الكنتورية مصحوبة بعدة مقاطع عرضية توضح المواقع والنقاط الرأسية للرأس الهيدروليكي مع بيانات منشورة أو من الناحية المثالية تُظهر شبكة التدفق المقطعي بالكامل.

ربما تكون الحالة الأكثر خطأً وتضليلاً هي عندما تكون البيانات من آبار المراقبة التي تم فحصها على أعماق مختلفة في نظام مياه جوفية ذات تدرجات رأسية يتم تجميعها معاً وتحديدها كحزمة بيانات واحدة. ومن الأمثلة المثالية على ذلك الصخور المتشققة أو طبقة المياه الجوفية الكارستية ذات الرواسب السميكة (regolith) أو طبقة من الرواسب غير المجمعة فوقها. إذا كانت البيانات من الآبار التي تم فحصها على أعماق مختلفة في الرواسب غير المتصلبة والصخور الصلبة تم تجميعها وتحديد محيطها معاً، سيكون من المستحيل تفسير مكان تدفق المياه الجوفية فعلياً للأسباب التالية: (١) تعمل الرواسب الضحلة بشكل أساسي كوسط مسامي بين الحبيبات في الظروف غير المحصورة، وقد تتأثر اتجاهات التدفق الأفقي بخصائص تصريف سطحية محلية (صغيرة)، و(٢) أن الصخور الأساسية لها تدفق متقطع من خلال الشقوق في أعماق مختلفة، والتي غالباً ما تكون تحت ضغط (ظروف محصورة) وقد تتأثر بالخصائص الإقليمية، مثل الأنهار الرئيسية أو الينابيع. وبالتالي فإن التدفق في وسطين مساميين متميزين (البقايا وبالتالي قد يكون التدفق في اتجاهين عامين مختلفين في موقع معين، بما في ذلك تدرجات رأسية قوية من البقايا نحو الصخر الأساسي. إن إنشاء خريطة محيطية "متوسطة" واحدة لمثل هذا النظام لن يكون منطقياً من الناحية الهيدروجيولوجية.

في الصخور شديدة التشقق وطبقات المياه الجوفية الكارستية، حيث يكون تدفق المياه الجوفية غير متقطع (أي أنه يحدث بشكل رئيسي على طول مسارات التدفق التفضيلي)، لا ينطبق قانون دارسي ولا تعتبر شبكات التدفق طريقة مناسبة لتوصيف التدفق. ومع ذلك، فإن خرائط الخطوط الكنتورية في طبقات المياه الجوفية غير المتجانسة للغاية يتم بشكل روتيني من قبل العديد من المتخصصين، الذين غالباً ما يجدون أنفسهم يستبعدون بعض نقاط البيانات "الشاذة" أثناء في محاولة لوضع خريطة "طبيعية المظهر". يوضح الشكل ٤-٥ أنه في الطبقات الكارستية، لا يكاد يكون هناك أي قياس "غير معقول" وينبغي استبعاد أي قياس رأس هيدروليكي "غير معقول". قد تكون الخرائط الكنتورية التي تُظهر نمط التدفق الإقليمي في الصخور المتصدعة أو طبقة المياه

الجوفية الكارستية مبررة، حيث أن تدفق المياه الجوفية يبدأ من مناطق التغذية ويتقارب نحو الينابيع الكبيرة، والتي يجب أن تكون واضحة إذا كان هناك عدد كافٍ من آبار المراقبة المنتشرة بالتساوي.

وعادة ما تبرز المشاكل عند تفسير أنماط التدفق المحلي، كما هو موضح تخطيطياً في الشكل ٥-٤٥، والذي يوضح بعض الاختلافات الرئيسية بين طبقة المياه الجوفية الكارستية (يسار) وطبقة المياه الجوفية بين الحبيبية (يمين). كلا طبقتا المياه الجوفية لهما نفس اتجاه التدفق العام، من الشمال إلى الجنوب، كما هو موضح في عرض الخريطة. آبار موزعة بنمط ثلاثي، التي يتم حفرها في أي مكان في طبقة المياه الجوفية بين الحبيبية (شريطة أن تشكل مثلثاً "طبيعياً" نسبياً سيحدد بدقة معقولة الاتجاه العام لتدفق المياه الجوفية بناءً على الرأس الهيدروليكي المقاس. لا يمكن قول الشيء نفسه بالنسبة لحالة طبقة المياه الجوفية الكارستية، حيث قد يعطي مبدأ الآبار الثلاثة نتائج مختلفة جداً، اعتماداً على موقع الآبار الفردية بالنسبة لمسارات التدفق التفضيلية (القنوات الكارستية أو مناطق التصدع الكبيرة). وعلاوة على ذلك، فإن مجموعة من الآبار المتقاربة (على سبيل المثال، من امتار إلى كيلومترات) قد يظهر توزيعاً "عشوائياً" تماماً للرأس الهيدروليكي المقاس؛ وقد يتم إكمال بئر واحد في كتلة صخرية متجانسة، مع عدم وجود شقوق كبيرة ومسامية منخفضة للارضية، وقد يظهر حتى ما يسمى بالتأثير الزجاجي (عدم وجود تذبذب في منسوب المياه، بغض النظر عن ديناميكيات الهطول والرشح). من ناحية أخرى، قد يُظهر البئر الذي يبعد ١٠ أمتار أو نحو ذلك تذبذب الرأس الهيدروليكي لعدة أمتار أو أكثر (الشكل ٥-٤٦).

ومن "التعقيدات" الشائعة الأخرى في الكارست وجود مسارات تدفق تفضيلية (قنوات) على أعماق مختلفة. قد يكون للقنوات نفسها أدوار مختلفة اعتماداً على أنماط التغذية الموسمية، كما هو موضح في الشكل ٥-٤٩ (Bonacci, 1987). وأخيراً، تمتد مناطق تصريف الينابيع الكبيرة في الكارست عادةً إلى ما وراء التقسيمات الرسومية، وهو ما يجب اعتباره دائماً احتمالاً حقيقياً في أي حالة معينة. بعبارة أخرى ما لم يكن واضحاً من البيانات التي تم جمعها من الآبار، لا ينبغي استخدام التقسيمات الطبوغرافية كتقسيمات المياه الجوفية المستنبطة عند بناء الخرائط الكنتورية.

في الختام، فإن قياس الرؤوس الهيدروليكية ومن ثم تحديد التدرجات الهيدروليكية واتجاهات تدفق المياه الجوفية ليست مهمة سهلة بأي حال من الأحوال وتتطلب تخطيطاً جيداً من قبل هيدروجيولوجي متمرس. في نهاية المطاف، يعتمد عدد آبار المراقبة وأعماقها وأطوال نطاقاتها المثقبة وتكرار تسجيلات منسوب المياه بناءً على الهدف النهائي للدراسة. وكما سبق ذكره، فإن أحد الأخطاء الشائعة هو تطبيق نفس النهج لقياسات الرأس الهيدروليكي في أنواع مختلفة من طبقات المياه الجوفية؛ حيث أن طبقات المياه الجوفية المتشققة والكارستية تمثل تحدياً خاصاً، حتى بالنسبة للمحترفين الأكثر خبرة. لأن أحد أجزاء تدفق المياه الجوفية يحدث في الشقوق أو القنوات والجزء الآخر داخل الارضية الصخرية المسامية، ولا توفر قياسات الرؤوس الهيدروليكية إجابة مميزة. ويجب أن يتم تفسيرها دائماً في السياق الهيدروجيولوجي العام. وعادتنا ليس من الكافي استخدام معلومات الرؤوس الهيدروليكية فقط لتقييم اتجاهات تدفق المياه الجوفية التمثيلية (التدرجات الهيدروليكية). بشكل عام، يجب الجمع بين قياسات الرأس الهيدروليكي مع رسم الخرائط الهيدروجيولوجية، وربما تتبع الصبغة، وبالتأكيد الفهم شامل للعوامل الهيدروليكية المختلفة،

مثل التدفق من خلال الشقوق المترابطة والأنابيب. يظهر أحد الأمثلة المتطرفة الحقيقية في الشكل ٥-٥٠. بالنظر إلى الرؤوس الهيدروليكية المقاسة في مقاييس الضغط P4 و P3 و P2، يمكن للمرء أن يستنتج خطأً أن المياه الجوفية تتدفق بعيداً من النبع. عند التخطيط للقياسات الميدانية للرأس الهيدروليكي، يجب دائماً أخذ الحقائق التالية بعين الاعتبار (Kresic, 2007a):

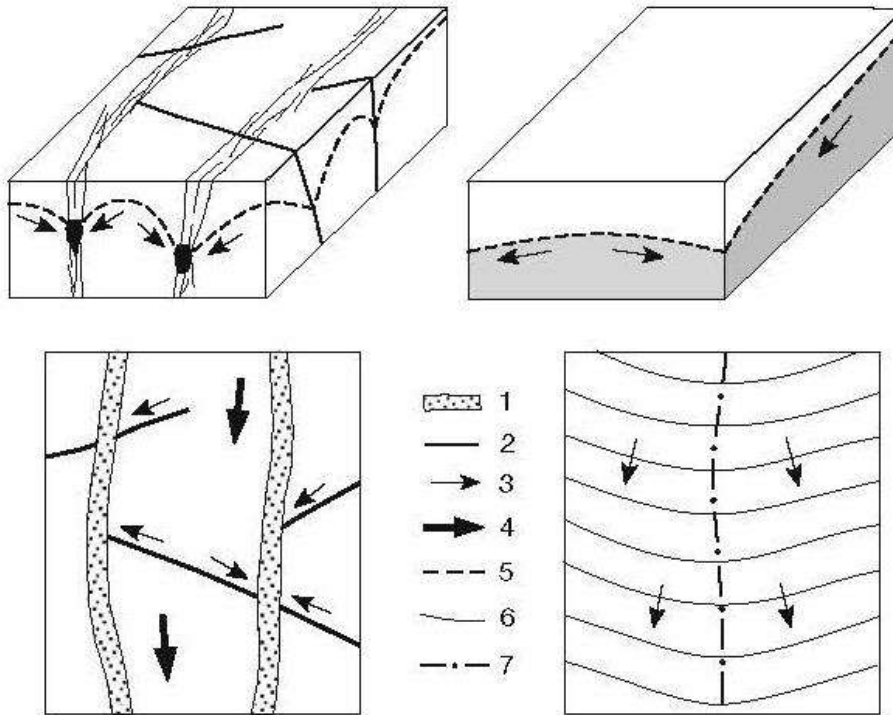
١. تتغير الرؤوس الهيدروليكية استجابةً لتغذية طبقة المياه الجوفية، موسميًا، وخاصة في طبقات المياه الجوفية غير المحصورة، بعد كل فترة تغذية (هطول الأمطار). لذلك يجب إجراء القياسات في الآبار المتعددة في أقصر فترة زمنية ممكنة (ما يسمى بالقياسات التجميعية). لإجراء تقييم التأثيرات الموسمية على تقلبات الرأس الهيدروليكي بدقة، يجب إجراء جولة واحدة على الأقل من القياسات التجميعية في كل موسم.
٢. تتغير الرؤوس الهيدروليكية في طبقات المياه الجوفية المحصورة استجابةً لتقلبات الضغط الجوي؛ وقد ينطبق هذا أيضًا على طبقات المياه الجوفية غير المحصورة في بعض الحالات. إن الطريقة الوحيدة المعقولة لتحديد بدقة حجم وأهمية مثل هذه التغيرات هو قياس الرأس الهيدروليكي والضغط البارومتري بشكل مستمر باستخدام محولات الضغط وأجهزة تسجيل البيانات.



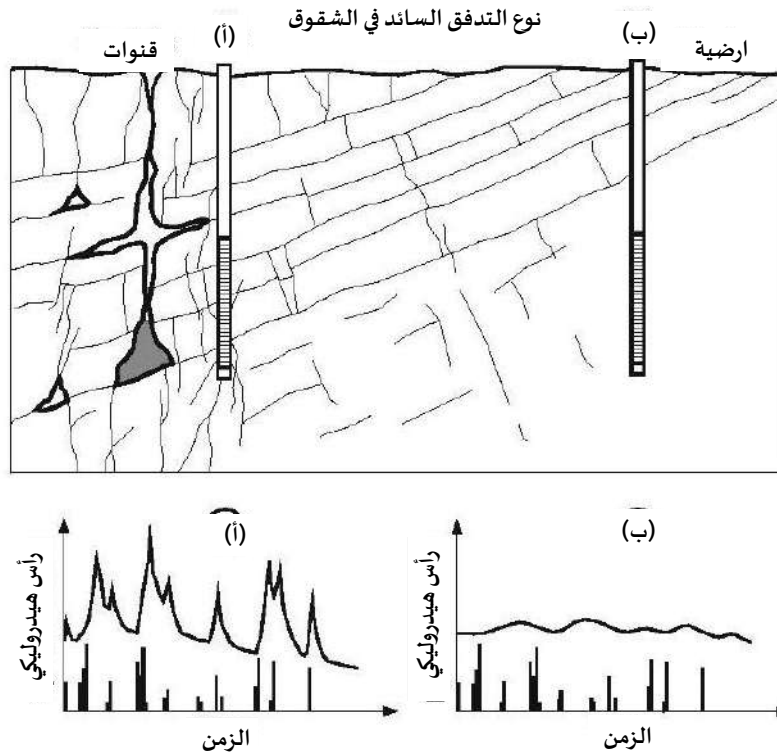
الشكل ٥-٤٤ شلال في كهف من الحجر الجيري، غرب فيرجينيا. (الصورة من William Jones, Karst Waters Institute).

٣. تستجيب الرؤوس الهيدروليكية في طبقة المياه الجوفية الساحلية لتقلبات المد والجزر التوافقية. ويمكن قياس هذه التغيرات بدقة من خلال إجراء قياسات مستمرة.

٤. قد تتغير الرؤوس الهيدروليكية استجابةً لبعض الضغوط الهيدروليكية المحلية على طبقة المياه الجوفية، مثل التشغيل الدوري لأبار الاستخراج في المنطقة المجاورة.



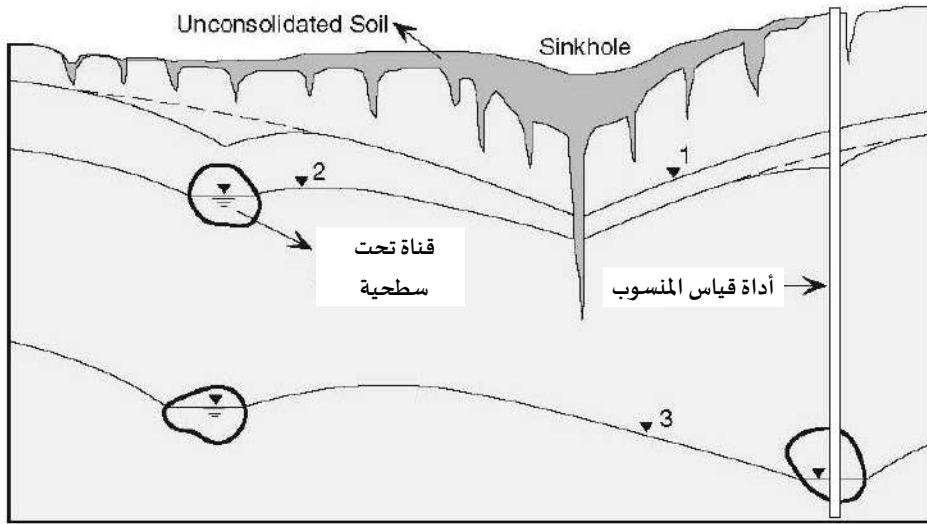
الشكل ٥-٤٥ تدفق المياه الجوفية في ثلاثة أبعاد وعرض خريطتها (في الأعلى) لصخرة متصدعة أو كارستية (يسار) وطبقة المياه الجوفية بين الحبيبية (يمين): (١) مسار التدفق التفضيلي (على سبيل المثال، منطقة الكسر أو الصدع أو القناة أو القناة الكارستية)، (٢) الكسر أو الصدع، (٣) اتجاه التدفق المحلي، (٤) اتجاه التدفق العام، (٥) موضع الرأس الهيدروليكي (منسوب المياه الجوفية في طبقة المياه الجوفية بين الخلايا الحبيبية)، (٦) خط كفاف الرأس الهيدروليكي، (٧) تقسيم المياه الجوفية. (من Kresic, 1991).



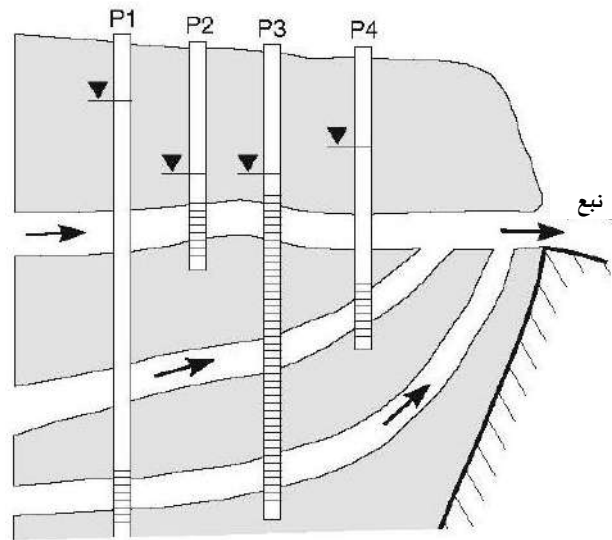
الشكل ٥-٤٦ اعتماد الرأس الهيدروليكي المقاس في آبار المراقبة على أنواع مختلفة من المسامية الفعالة (المردود النوعي) في طبقات المياه الجوفية الكارستية: أ، ارتفاع سريع للرأس الهيدروليكي بعد أحداث التغذية الرئيسية في أجزاء من طبقة المياه الجوفية مع وجود قنوات كبيرة وعدم وجود تخزين كبير في المصفوفة؛ ب، استجابة متأخرة ومثبطة لمصفوفة طبقة المياه الجوفية. قد يشمل التدفق الذي تهيمن عليه الكسور أي مزيج من هذين النقيضين. (من Kresic, 2007a؛ حقوق الطبع Francis & Taylor).

### ٥-٧-٣ النمذجة العددية

كما تم شرحه في الفصول السابقة، فإن الينابيع الكبيرة ذات الحجم الكافي التي تم تطويرها والتي سيتم تطويرها لإمدادات المياه العامة هي في معظم الحالات تصب في طبقات المياه الجوفية الكربونية الكارستية. نفس الوقت تفتقر معظم برامج الحاسوب المستخدمة على نطاق واسع للنمذجة الرقمية سميتها الجوفية، إن لم يكن جميعها، إلى القدرة على المحاكاة الفيزيائية للمسامية الثلاثية المميزه لطبقات المياه الجوفية الكارستية. وبالتالي، يتم تجنب النمذجة الرقمية للينابيع من قبل الهيدروجيولوجيين والمنذجين للمياه الجوفية أو قد ينخرطون في البحث عن مقارنة قد تنجح للوسائط المسامية المكافئة (EPM). أحد هذه المقاربات عند استخدام Modflow والأكواد المماثلة المبنية على قانون دارسي (غير مناسب على نمذجة الصخور المتصدعة وطبقات المياه الجوفية تتضمن تعيين قيم عالية جداً لتلك الخلايا النموذجية المعروفة أو المشتبه في احتوائها على قنوات عالية النفاذية. الشكل ٥-٤٩ يوضح كيف يمكن أن يؤدي هذا الإجراء إلى تمثيل معقول للمسارات التفضيلية وتوزيع الرأس الهيدروليكي المرصود ميدانياً.



الشكل ٥-٤٧ التأثير الذي تمارسه التضاريس والظواهر الكارستية على التغير في مستويات المياه الجوفية. (Bonacci, 1987؛ حقوق الطبع والنشر لسبرنجر-فيرلاغ).



الشكل ٥-٤٨ مثال على كيف أن آبار المراقبة المتقاربة في مجموعات قد تسجل رؤوساً هيدروليكية مختلفة جداً، اعتماداً على عمق وطول شاشات البئر. يُظهر البئر P3 ذو التثقيب الأطول التي تربط بين القنوات الثلاث نفس مستوى المياه في البئر P2 الأكثر ضخالة. وبالنظر إلى مستويات المياه المقاسة عند P4 وإما عند P2 أو P3، يمكن للمرء أن يستنتج بشكل خاطئ أن تدفق المياه الجوفية بعيداً عن النبع. (معدّل من Kupusovic, 1989).

لسوء الحظ، لا يمكن لأي من نماذج EPM إعادة إنتاج مكون التدفق السريع (القناة) من تصريف الينابيع بعد أحداث هطول الأمطار الكبرى والتفاعل الهيدروليكي المهم جداً بين القنوات والارضية المحيطة بها. وهذا يعني أنه مع ارتفاع الرأس الهيدروليكي بسرعة في القنوات، قد يكون هناك انتقال كبير جداً للمياه إلى الارضية المحيطة وتخزين المياه، شريطة أن يكون للارضية بعض المسامية الفعالة. في الوقت نفسه، قد يتفاعل النبع بسرعة (أحياناً في غضون ساعات) مع انتشار الضغط عبر القنوات الناجم عن المياه الراشحة حديثاً. وأخيراً، قد يبدأ تصريف المياه الراشحة حديثاً في النبع بعد عدة أيام فقط من هطول أمطار محلية في جزء بعيد من منطقة تصريف النبع.

في محاولة لمحاكاة سرعة المياه الجوفية العالية الواضحة على طول "خلايا المجرى" وما يرتبط بها من استجابة الينابيع ذات الصلة، يختار بعض مصممي نماذج EPM تعيين مسامية فعالة منخفضة جداً لتلك الخلايا النموذجية، أقل بكثير من خلايا الارضية المحيطة، وهو أمر غير منطقي. حتى لو أنتج هذا "الإجراء" التأثير المرغوب (التدفق السريع للمياه الجوفية)، فلن ينتج عنه رأس هيدروليكي أعلى في خلايا "القناة" في أي وقت معين افتراضياً - سيبقي نموذج EPM الرؤوس في هذه الخلايا أقل من الخلايا المحيطة بها نظراً لأنها تعمل دائماً كبالوعة خطية، حيث أنها تكون أكثر انتقالاً من بقية منطقة النموذج.

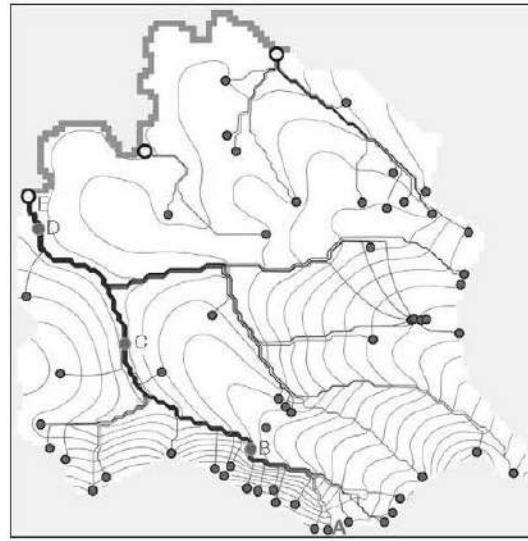
كما ذكر مراراً وتكراراً، فإن طبقات المياه الجوفية الكارستية والطبقات الجوفية الكاذبة معرضة بشكل خاص للتلوث. يمكن للملوثات أن تدخل بسهولة إلى باطن الأرض وقد تنتقل بسرعة عبر مسافات طويلة في طبقة المياه الجوفية. وغالباً ما لا تعمل عمليات إعاقة الملوثات وتخفيفها بفعالية في مثل هذه الأنظمة. ومن ثم، تحتاج طبقات المياه الجوفية التي تتدفق فيها المياه الجوفية سريعة التدفق إلى حماية واهتمام خاصين. إن المعرفة التفصيلية الهيدروجيولوجية الكارستية هي شرط مسبق لتحديد مناطق الحماية وإدارة الينابيع التي تصب طبقات المياه الجوفية الكارستية (الكاذبة). وللسوء الحظ، فإن مناطق المستجمع التي تساهم بالمياه لنبع واحد كبير أو بئر إمداد يمكن أن تكون واسعة النطاق. لذلك من الصعب تطوير نماذج رقمية موثوقة وقائمة على أساس فيزيائي لإدارة الينابيع بأموال محدودة في كثير من الأحيان، ومن غير الواقعي تحديد أقصى قدر من الحماية للنظام بأكمله، حيث أن القيود الناتجة عن استخدام الأراضي لن تكون مقبولة لدى بعض أصحاب المصلحة. وبالتالي فإن العديد من أنظمة إمدادات المياه العامة التي تستخدم ينابيع كبيرة تختار تجنب الجهود ذات الصلة وتختار الاعتماد على الحظ بدلاً من ذلك. وللسوء الحظ، قد تكون هذه المقامرة قاتلة في بعض الأحيان، كما يتضح من المثال التالي الذي تم نشره على نطاق واسع [Worthington, Smart, and Ruland \(2003\) and Goldscheider, Drewand Worthington \(2007\)](#). انظر أيضاً [www.iah.org/karst](#).

ووكرتون Walkerton هي بلدة ريفية في أونتاريو، كندا، يبلغ عدد سكانها حوالي ٥٠٠٠ نسمة. في مايو ٢٠٠٠، أصيب حوالي ٢٣٠٠ منهم بالمرض وتوفي ٧ منهم بسبب التلوث البكتيري لإمدادات المياه البلدية. كانت مسببات الأمراض الرئيسية هي الإشريكية الإشريكية القولونية O157:H7 (سلالة ممرضة من الإشريكية القولونية) وبكتيريا كامبيلوباكتر جيجوني. أشارت التحريات الوبائية اللاحقة إلى أن معظم تلوث إمدادات المياه حدث في غضون ساعات أو أيام على الأكثر بعد هطول أمطار غزيرة. كانت ثلاثة آبار بلدية قيد الاستخدام في وقت تفشي المرض. وبعد فترة وجيزة من تفشي المرض، تم إجراء تحقيق هيدروجيولوجي شمل حفر ٣٨ بئراً وتحري

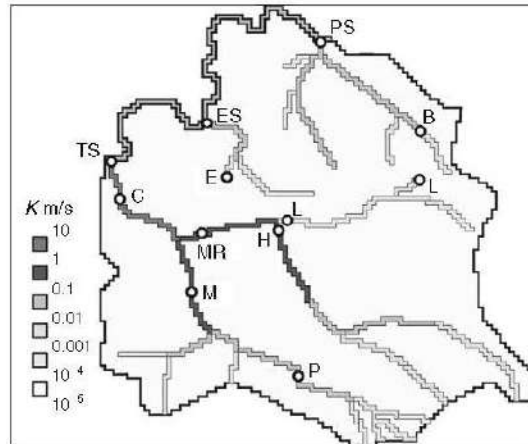
جيوفيزيائي سطحي وتحت سطحي ، واختبارات ضخ ، واختبار العديد من عينات المياه من أجل المعايير البكتريولوجية والفيزيائية. يتكون خزان المياه الجوفية في والكرتون، من ٧٠ مترًا من الطبقات المسطحة السميكة من الحجر الجيري والدولوستوني من حقبة الباليوزويك السميكة الذي يعلوه ٣-٣٠ مترًا من الرواسب الجليدية. أشار نموذج عددي للمياه الجوفية (باستخدام Modflow) إلى أن مناطق التقاط المياه الجوفية التي تستغرق ٣٠ يومًا وتمتد ٢٩٠ مترًا من البئر ٥، و ١٥٠ مترًا من البئر ٦، و ٢٠٠ مترًا من البئر ٧. تشير هذه النتائج إلى أنه إذا كان مسار المياه الجوفية متسببا في التلوث، فلا بد أن المصدر كان قريبًا جدًا من أحد الآبار. تم إجراء تحقيق عام (تحقيق والكرتون) في أسباب ما أصبح يُعرف باسم مأساة والكرتون. أثناء التحقيق، أثير سؤال حول ما إذا كان خزان المياه الجوفية قد يكون كارستيًا وبالتالي تدفقت المياه الجوفية بسرعة. لم يذكر التحقيق الهيدروجيولوجي الأصلي، الذي تم إجراؤه بعد تفشي الوباء، أي إمكانية تدفق المياه الجوفية الكارستية. وجدت التحقيقات اللاحقة التي أجراها خبراء الكارست أن هناك كانت العديد من المؤشرات على أن طبقة المياه الجوفية كارستية (Worthington et al., 2003). وشملت هذه المؤشرات وجود علاقة بين التلوث البكتيري في الآبار والأمطار السابقة، مما يدل على سرعة التغذية والتدفق إلى الآبار؛ تدفقات موضعية داخلية إلى الآبار وقد أظهرت صور الفيديو أنها فتحات بيضاوية متضخمة بشكل ذوباني على مستويات التطبق؛ وجود ينابيع ذات تصريفات تصل إلى ٤٠ لتر/ثانية؛ والتغيرات السريعة في التصريف والكمياء في هذه الينابيع بعد هطول الأمطار؛ والتغيرات السريعة والموضعية في التوصيل الكهربائي في البئر أثناء اختبار الضخ. تشير كل هذه الاختبارات بقوة إلى أن طبقة المياه الجوفية كارستية، ولكن الدليل الأكثر إقناعًا كان نتائج اختبارات تتبع طبقة المياه الجوفية. أشارت النمذجة العددية السابقة إلى أن سرعات المياه الجوفية كانت في حدود بضعة أمتار في اليوم، لكن اختبارات التتبع أثبتت أن السرعات الفعلية كانت أسرع بنحو ١٠٠ مرة (الشكل ٥-٥٠). في الختام، أظهرت التحقيقات التي أجراها الخبراء الكارستيون أن مصدر البكتيريا المسببة للأمراض يمكن أن يكون أبعد بكثير من الآبار مما أشارت إليه التحقيقات السابقة والنمذجة السابقة (Goldscheider et al., 2007).

يوضح هذا المثال أنه يجب توخي الحذر عند استخدام النمادج الرقمية لمحاكاة هيدروجيولوجيا الينابيع الكارستية الكبيرة والينابيع السطحية، بما في ذلك خيارات التصميم لالتقاط الينابيع، وتقدير مساحة تصريف الينابيع أو محاكاة مصير وانتقال الملوثات التي قد تؤثر على توافر مياه الينابيع. مع إدخال عملية التدفق المجرى (CFP) Modflow-2005 (Shoemaker et al., 2008)، لم يتبق أي أسباب عملية لتبرير استخدام نمادج الوسائط المسامية المكافئة لنمذجة الينابيع في المسام المزدوجة من طبقات المياه الجوفية ذات التدفق السريع للقنوات. يتمتع CFP بالقدرة على محاكاة ظروف تدفق المياه الجوفية المضطربة من خلال (١) اقتران معادلة تدفق المياه الجوفية التقليدية مع صياغات لشبكة منفصلة من الأنابيب الأسطوانية (الوضع ١)، (٢) إدخال طبقة تدفق عالية التوصيل يمكنها التبديل بين التدفق الصفحي والتدفق المضطرب (الوضع ٢)، أو (٣) اقتران شبكة أنابيب منفصلة أثناء إدخال طبقة تدفق عالية التوصيل يمكنها التبديل بين التدفق الصفحي والمضطرب (الوضع ٣). قد تمثل أنابيب التدفق الموصولة (الوضع ١) الانحلال أو في طبقات المياه الجوفية الكربونية أو الفراغات في الصخور المتصدعة أو أنابيب الحمم البازلتية ويمكن أن تكون مشبعة كلياً أو جزئياً تحت ظروف التدفق الصفحي أو المضطرب. قد تمثل طبقات التدفق التفضيلي (النمط ٢) (١) وسائط

مسامية حيث يُشتبه في حدوث تدفق مضطرب تحت التدرجات الهيدروليكية المرصودة؛ (٢) سمة تحت سطحية ذات مسامية ثانوية واحدة، مثل تكهف تحت الأرض واسع النطاق أفقياً وواضح المعالم؛ أو (٣) طبقة تدفق تفضيلية أفقية تتكون من العديد من الفراغات المترابطة.

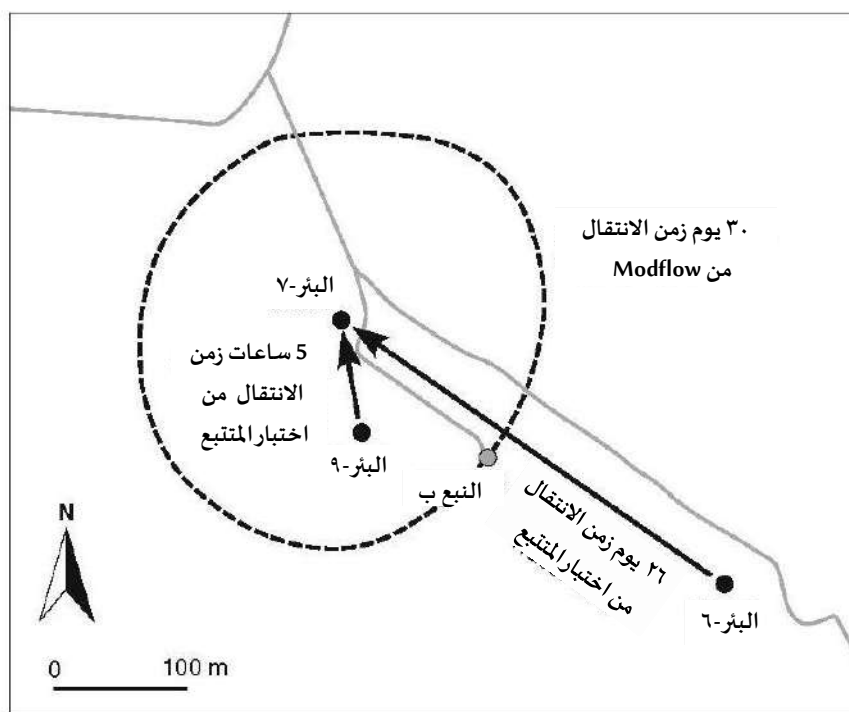


(i)



(ب)

الشكل ٥-٤٩ (أ) الرؤوس الهيدروليكية المنمذجة بنموذج رقمي لطبقة المياه الجوفية الكارستية يظهر اتفاقاً جيداً بين مسارات التدفق الفعلية والتدرجات الهيدروليكية. تذهب جميع مسارات التدفق ال ٥٤ إلى النبع الصحيح. (ب) توزيع التوصيل الهيدروليكي الذي نتج عنه الخريطة الموضحة في (أ). (بعد Worthington, 2003).



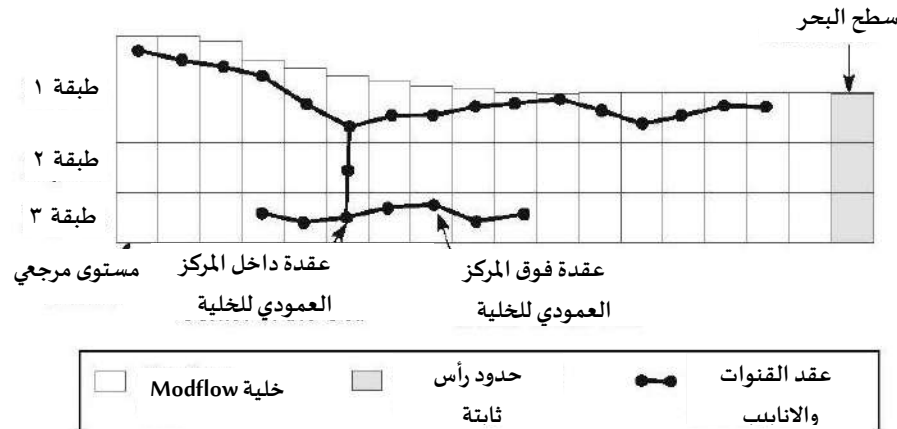
الشكل ٥-٥٠ مسارات وأزمنة انتقال أجهزة التتبع التي تم حقنها في بئري الرصد ٦ و ٩ واستعادتها في الضخ البئر ٧ تظهر السرعات التي تزيد عن ٣٠٠ متر في اليوم، مقارنةً بمنطقة التقاط لمدة ٣٠ يومًا للبئر ٧ المتوقعة باستخدام Modflow. (معدلة من [Worthington et al., 2003](#)).

تم تطوير عملية التدفق المجرى استجابةً للحاجة إلى برنامج كمبيوتر يأخذ في الحسبان الطبيعة المزدوجة المسامية للعديد من طبقات المياه الجوفية. كما كانت هناك رغبة أيضًا في توفير التوافق مع التطورات الأخيرة لنموذج المياه الجوفية المعياري (Modflow) التابع لهيئة المسح الجيولوجي الأمريكية. العديد من البرامج الحاسوبية البحثية متوفرة لمحاكاة طبقات المياه الجوفية ذات المسامية المزدوجة ولكن لم يتم توثيقها بالكامل للاستخدام على نطاق أوسع (على سبيل المثال، [Clemens et al., 1996](#); [Harbaugh et al., 2000](#) إلى [Modflow-2005](#) (Harbaugh et al., 2005)، مما جعل كود كمبيوتر تدفق المياه الجوفية أكثر معيارية ويسمح بإضافة عمليات جديدة إلى الكود بشكل أسهل.

تم تصميم برنامج حاسوب تدفق المياه الجوفية ليكون مرناً بما فيه الكفاية للاستخدام في المواقع ذات البيانات الميدانية المحدودة أو الوفيرة. في بعض البيئات الجيولوجية، مثل كهف ماموث في كنتاكي، تتوفر معلومات مفصلة (أو يمكن اشتقاقها) عن موقع الكهوف تحت السطح وقطرها وتعرجها وخشونتها. وتم وضع CFP (CFPM1) لهذه المواقع في الاعتبار. في مواقع أخرى، مثل طبقة

بسكاين المائية الجوفية في جنوب فلوريدا، تكون الوصلات والتوزيعات الفراغية معقدة للغاية داخل طبقات التدفق التفضيلي بحيث لا يمكن إجراء توصيف كامل. تم تصميم الوضع CFP 2 (CFPM2) لهذه المواقع في الاعتبار؛ على وجه التحديد، يتم تمثيل التدفق الصفحي والمضطرب من خلال الوصلات الفراغية المعقدة من خلال عدد محدود من معاملات الطبقة "الفعالة" أو "المصمتة".

من الخيارات القوية في CFP أنه في الحالات التي تحتوي على بيانات ميدانية وفيرة عن بنية الفراغ والسلوك الهيدروليكي، يمكن تصميم شبكات معقدة ثنائية أو ثلاثية الأبعاد من أنابيب تدفق القنوات والعقد لتمثيل الفراغات المترابطة أو المسدودة في باطن الأرض. تفترض حسابات التدفق وجود عقد أنابيب في مركز خلايا Modflow.



الشكل ٥-٥١ الاختلافات المحتملة في ارتفاع عقد القنوات في خلايا مودفلو. (من Shoemaker et al., 2008).

هناك استثناء في الاتجاه العمودي، حيث يوجد خياران. أولاً، يمكن تعيين ارتفاعات لعقد الأنابيب فوق المستوى المرجعي، وبالتالي لا تقتصر على الارتفاعات المركزية لخلايا Modflow. ثانياً، يمكن تعيين العقد الأنبوبية بمسافة أعلى أو أسفل من مركز خلية Modflow (الشكل ٥-٥١). مع هذا الخيار الثاني، إذا كانت المسافة مضبوطة على صفر، فإن عقد الأنابيب يفترض وجودها في المركز الرأسي لخلية Modflow (Shoemaker et al., 2008).

## المراجع

- Ahn, H., 2000. Modeling of groundwater heads based on second-order difference time series models. *J. Hydrol.* 234, 82–94.
- Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Autom. Control* AC-19 (6), 716–723.
- Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992. *Applied Ground Water Modeling; Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press, San Diego, CA.
- American Society for Testing and Materials, 1999a. ASTM standards on determining subsurface hydraulic properties and ground water modeling, second ed. ASTM, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials, 1990b. ASTM standards on ground water and vadose zone investigations; drilling, sampling, geophysical logging, well installation and decommissioning, second ed. ASTM, West Conshohocken, PA.
- Bauer, S., 2002. Simulation of the genesis of karst aquifers in carbonate rocks. Vol. 62 of *Tu "binger Geowissenschaftliche Arbeiten: Tu "bingen, Germany. Reihe C. Institut und Museum fu "r Geologie und Pala "ontologie der Universita "tTu "bingen*.
- Bear, J., Tsang, C.F., de Marsily, G. (Eds.), 1993. *Flow and contaminant transport in fractured rock*. Academic Press, San Diego, CA.
- Birk, S., 2002. Characterization of karst systems by simulating aquifer genesis and spring responses: Model development and application to gypsum karst: Vol. 60 of *Tu "binger Geowissenschaftliche Arbeiten: Tu "bingen, Germany. Reihe C. Institut und Museum fu "r Geologie und Pala "ontologie der Universita "tTu "bingen*.
- Birkens, M.F.P., Knotters, M., Hoogland, T., 2001. Space-time modeling of water table depth using a regionalized time series model and the Kalman filter. *Water Resour. Res.* 37 (5), 1277–1290.
- Bogli, A., 1980. *Karst hydrology and physical speleology*. Springer-Verlag, Berlin.
- Bonacci, O., 1987. *Karst Hydrology with Special Reference to the Dinaric Karst*. Springer-Verlag, Berlin.
- Bonacci, O., 1995. Ground water behaviour in karst: Example of the Ombla Spring (Croatia). *J. Hydrol.* 165 (1–4), 113–134.
- Bonacci, O., 2001. Monthly and annual effective infiltration coefficients in Dinaric karst: Example of the Gradole karst spring catchment. *J. Hydrol. Sci.* 46 (2), 287–299.

- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., 1976. Time Series Analysis. Forecasting and Control. Holden-Day, San Francisco.
- Bras, R.L., Rodriguez-Iturbe, I., 1994. Random functions and hydrology. Dover Publications, New York.
- Cacas, M.C., 1989. De ´veloppement d'un mode ´le tridimensionel stochastique discret por la simulation de l'e ´coulement et des transports de masse et de chaleur en milieu fracture ´. Ph.D. thesis, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, France.
- Canceill, M.F., 1974. In: Convolution et tarissement dans l'etude des relations pluie-debit. Pub. Com. Fr. AIH, Congress de Montpellier, AIH Memoires, Tome X, Paris, pp. 181–184.
- Chile ´s, J.P., 1989a. Three-dimensional geometric modeling of a fracture network. In: Buxton, B.E. (Ed.), Geostatistical Sensitivity, and Uncertainty Methods for Ground-Water Flow and Radionuclide Transport Modeling. Battelle Press, Columbus, OH, pp. 361–385.
- Chile ´s, J.P., 1989b. Mode ´lisation ge ´ostatistique de re ´seaux de fractures. In: Armstrong, M. (Ed.), Geostatistics, vol. 1. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, the Netherlands, pp. 57–76.
- Chile ´s, J.P., de Marsily, G., 1993. Stochastic models of fracture systems and their use in flow and transport modeling. In: Bear, J., Tsang, C.F., de Marsily, G. (Eds.), Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock. Academic Press, San Diego, CA, pp. 169–236.
- Clemens, T., Hu ´ckinghaus, D., Sauter, M., Liedl, R., Teutsch, G., 1996. A combined continuum and discrete network reactive transport model for the simulation of karst development. In: Calibration and reliability in groundwater modelling—Proceedings of the ModelCARE 96 Conference, Golden, Colorado, September 1996. International Association of Hydrological Sciences Publication 237, 309–318.
- Dawson, K., Istok, J., 1992. Aquifer testing: Design and analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Denic ´-Jukic ´, V., Jukic ´, D., 2003. Composite transfer functions for karst aquifers. J. Hydrol. 274, 80–94.
- Dooge, J.C.I., 1973. Linear Theory of Hydrologic Systems. Technical Bulletin No. 1468, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.
- Dreiss, S.J., 1982. Linear kernels for karst aquifers. Water Resour. Res. 18 (4), 865–876.
- Dreiss, S.J., 1989a. Regional scale transport in a karst aquifer. Part 1. Component separation of spring flow hydrographs. Water Resour. Res. 25 (1), 117–125.

- Dreiss, S.J., 1989b. Regional scale transport in a karst aquifer. Part 2. Linear systems and time moment analysis. *Water Resour. Res.* 25 (1), 126–134.
- Driscoll, F.G., 1989. *Groundwater and Wells*. Johnson Filtration Systems Inc., St. Paul, MN.
- Eagleman, J.R., 1967. Pan evaporation, potential and actual evapotranspiration. *J. Appl. Meteorol.* 6, 482–488.
- Eisenlohr, L., Kiraly, L., Bouzelboudjen, M., Rossier, I., 1997. Numerical versus statistical modeling of natural response of a karst hydrogeological system. *J. Hydrol.* 202, 244–262.
- Faybishenko, B., Witherspoon, P.A., Benson, S.M. (Eds.), 2000. *Dynamics of Fluids in Fractured Rock*, Geophysical Monograph 122. American Geophysical Union, Washington, DC.
- Ferris, J.G., Knowles, D.B., Brown, R.H., Stallman, R.W., 1962. *Theory of aquifer tests*. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1536-E, Washington, DC.
- Fleury, P., Ladouche, B., Conroux, Y., Jourde, H., Dörmfliger, N., 2008. Modelling the hydrologic functions of a karst aquifer under active water management—The Lez Spring. *J. Hydrol.* DOI: 10.1016/j.hydrol.2008.11.037.
- Ford, D.C., Williams, P.W., 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. Wiley, Chichester, UK.
- Freeze, A.R., Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Gabric, I., Kresic, N., 2009. Time Series Models. In: Kresic, N. (Ed.), *Groundwater Resources: Sustainability, Management, and Restoration*. McGraw Hill, New York, pp. 657–661.
- Goldscheider, N., Drew, D., Worthington, S., 2007. Introduction. In: Goldscheider, N., Drew, D. (Eds.), *Methods in karst hydrogeology*. International Contributions to Hydrogeology 26. International Association of Hydrogeologists, Taylor & Francis, London, pp. 1–8.
- Gottman, J.M., 1981. *Time-series analysis. A comprehensive introduction for social scientists*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Grasso, D.A., Jeannin, P.Y., 1994. Etude critique des methodes d'analyse de la reponse globale des systemes karstiques. Application au site de Bure (JU, Suisse). *Bulletin d'Hydrogeologie*. [Neuchatel] 13, 87–113.
- Hajdin, G., 1981. An example of the hydraulic explanation of the flow out of a karst spring and the piezometric levels in its hinterland. *Nas Krs Bull. Speleological Society VI* (10–11), 109–115.
- Harbaugh, A.W., 2005. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model—The ground-water flow process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, Reston, VA.

- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., McDonald, M.G., 2000. MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey modular ground-water model—User's guide to modularization concepts and the ground-water flow process. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, Reston, VA.
- Hirsch, R.M., 1979. Synthetic hydrology and water supply reliability. *Water Resour. Res.* 15 (6), 1603–1615.
- Houston, J.F.T., 1983. Ground-water systems simulation by time-series techniques. *Ground Water* 21 (3), 301–310.
- Hsieh, P.A., 2001. Topodrive and Particleflow—Two computer models for simulation and visualization of groundwater flow and transport of fluid particles in two dimensions. U.S. Geological Survey Open-File Report 01-286, Menlo Park, CA.
- Johnson, A.I., 1967. Specific yield—Compilation of specific yields for various materials. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1662-D, Washington, DC.
- Jukic ´, D., Denic ´-Jukic ´, V., 2006. Nonlinear kernel functions for karst aquifers. *J. Hydrol.* 328, 360–374.
- Kalman, R.E., 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Trans. ASME. J. Basic Engineering* 82, 35–43.
- Ketchum, J.N., Donovan, J.J., Avery, W.H., 2000. Recharge characteristics of a phreatic aquifer as determined by storage accumulation. *Hydrogeology Journal* 8, 579–593.
- Kim, S.J., Hyun, Y., Lee, K.K., 2005. Time series modeling for evaluation of groundwater discharge rates into an urban subway system. *Geosciences Journal* 9 (1), 15–22.
- Kiraly, L., 1998. Modelling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach. *Bulletin d'Hydrogeologie* 16, 77–98.
- Klemes ˇ, V., 1978. Physically based stochastic hydrologic analysis. In: Chow, V.T. (Ed.), *Advances in hydroscience*, vol. 11. Academic Press, New York, pp. 285–352.
- Knotteres, M., Bierkens, M.F.P., 2000. Physical basis of time series models for water table depths. *Water Resour. Res.* 36 (1), 181–188.
- Koch, R.W., 1985. A stochastic streamflow model based on physical principles. *Water Resour. Res.* 21 (4), 545–553.
- Kova ´cs, A., Sauter, M., 2007. Modelling karst hydrodynamics. In: Goldscheider, N., Drew, D. (Eds.), *Methods in karst hydrogeology. International Contributions to Hydrogeology* 26. International Association of Hydrogeologists, Taylor & Francis, London, pp. 201–222.

- Kresic, N., 1991. Kvantitativna hidrogeologija karsta sa elementima zaštite podzemnih voda (in Serbo-Croatian; Quantitative karst hydrogeology with elements of groundwater protection). Naučna knjiga, Beograd.
- Kresic, N., 1995. Stochastic properties of spring discharge. In: Dutton, A.R. (Ed.), Toxic substances and the hydrologic sciences. American Institute of Hydrology, Minneapolis, MN, pp. 582–590.
- Kresic, N., 1997. Quantitative solutions in hydrogeology and groundwater modeling. Lewis Publishers/CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kresic, N., 2007a. Hydrogeology and groundwater modeling, second ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.
- Kresic, N., 2007b. Hydraulic methods. In: Goldscheider, N., Drew, D. (Eds.), Methods in karst hydrogeology. International Contributions to Hydrogeology 26. International Association of Hydrogeologists, Taylor & Francis, London, pp. 65–92.
- Kresic, N. (guest editor), 2009a. Foreword: Ground Water in Karst. Ground Water, Theme Issue, vol. 47, no. 3, pp. 319–320.
- Kresic, N., 2009b. Groundwater Resources: Sustainability, Management, and Restoration. McGraw Hill, New York.
- Kresic, N., Papic, P., Golubovic, R., 1992. Elements of groundwater protection in a karst environment. Environ. Geol. Water Sci. 20 (3), 157–164.
- Kruseman, G.P., de Ridder, N.A., Verweij, J.M., 1991. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, second ed. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) Publication 47, Wageningen, the Netherlands.
- Kupusovic, T., 1989. Measurements of piezometric pressures along deep boreholes in karst area and their assessment. Nas i Krs i XV (26–27), 21–30.
- Lee, J.Y., Lee, K.K., 2000. Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system. J. Hydrol. 229 (3–4), 190–201.
- Lohman, S.W., 1972. Ground-water hydraulics. U.S. Geological Survey Professional Paper 708, Washington, DC.
- Long, J.C.S., 1983. Investigation of equivalent porous medium permeability in networks of discontinuous fractures. Ph.D. dissertation, Univ. of California, Berkeley.
- Long, J.C.S., Gilmour, P., Witherspoon, P.A., 1985. A model for steady fluid in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures. Water Resour. Res. 21 (8), 1105–1115.
- Maillet, E. (Ed.), 1905. Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. Herman, Paris.

- Mangin, A., 1984. Pour une meilleure connaissance des systemes hydrologiques a partir des analyses correlatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, v. 67, pp. 25–43.
- Margeta, J., Fistanic ´, I., 2004. Water quality modelling of Jadro Spring. *Water Sci. Technol.* 50 (11), 59–66.
- McCuen, R.H., Snyder, W.M., 1986. *Hydrologic modeling. Statistical Methods and Applications*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Meinzer, O.E., 1932. [reprinted 1959] Outline of methods for estimating ground-water supplies. Contributions to the hydrology of the United States, 1931. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 638-C, Washington, DC, pp. 99–144.
- Milanovic ´, P., 1979. Hidrogeologija karsta i metode istraz ´ivanja [Karst hydrogeology and methods of investigations; in Serbo-Croatian]. HE Trebis ´njica, Institut za koris ´tenje i zas ´titu voda na krs ´u, Trebinje, Yugoslavia.
- Montanari, A., Rosso, R., Taqqu, M.S., 2000. A seasonal fractional ARIMA model applied to the Nile River monthly flows at Aswan. *Water Resour. Res.* 36 (5), 1249–1259.
- Osborne, P.S., 1993. Suggested operating procedures for aquifer pumping tests. Ground Water Issue, U.S. Environmental Protection Agency, EPA/540/S-93/503, Washington, DC.
- Padilla, A., Pulido-Bosch, A., Calvache, M.L., Vallejos, A., 1996. The ARMA models applied to the flow of karstic springs. *Water Resour. Res.* 32 (5), 917–928.
- Palmer, W.C., 1965. Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce, Washington, DC.
- Palmer, A.N., 1991. Origin and morphology of limestone caves. *Geol. Soc. Am. Bull.* 103, 1–21.
- Prohaska, S., 1981. Stochastic ´ki model za dugoroc ´no prognoziranje rec ´nog oticaja [Stochastic model for long-term prognosis of river flow; in Serbo-Croatian]. Vode Vojvodine, Special Edition 1981, Novi Sad, Serbia.
- Pronk, M., Goldscheider, N., Zopfi, J., 2005. Dynamics and interaction of organic carbon, turbidity and bacteria in a karst aquifer system. *Hydrogeology Journal* 14, 473–484.
- Reilly, T.E., Harbaugh, A.W., 2004. Guidelines for evaluating ground-water flow models. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5038, Reston, VA.
- Rubinic ´, J., Fistanic ´, I., 2005. Application of time series modeling in karst water management. In: Stevanovic, Z., Milanovic, P. (Eds.), *Water resources and environmental problems in karst. Proceeding of the international conference and field seminar, Belgrade and Kotor, Institute of Hydrology, University of Belgrade, Serbia*, pp. 417–422.

- Salas, J.D., 1993. Analysis and modeling of hydrologic time series. In: Maidment, D.R. (Ed.), *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York, pp. 19.1–19.72.
- Salas, J.D., Boes, D.C., Smith, R.A., 1982. Estimation of ARMA models with seasonal parameters. *Water Resources Research* 18 (4), 1006–1010.
- Salas, J.D., Obeysekera, J.T.B., 1992. Conceptual basis of seasonal streamflow time series models. *Journal of Hydraulic Engineering* 118 (8), 1186–1194.
- Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V., Lane, W.L., 1985. *Applied modeling of hydrologic time series*. Water Resources Research Publication, Littleton, CO.
- San Antonio Water System, 2008. Aquifer Levels and Stats. Available at [www.saws.org/our\\_water/aquifer](http://www.saws.org/our_water/aquifer) (Accessed December 2012).
- Shoemaker, W.B., Kuniatsky, E.L., Birk, S., Bauer, S., Swain, E.D., 2008. Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A24, Reston, VA.
- Singh, V.P., 1988. *Rainfall-runoff Modeling, Hydrologic Systems*, vol. 1. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Snow, D.T., 1968. Rock fracture spacings, openings, and porosities. *J. Soil Mech. Found. Div., Amer. Soc. Civil Engineers* 94, 73–91.
- Snyder, W.M., 1968. Subsurface implications from surface hydrograph analysis. In: *Proceedings of Second Seepage Symposium*, Phoenix, AZ. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, pp. 35–45.
- Soulios, G., 1984. Effective infiltration into Greek karst. *J. Hydrol.* 75, 343–356.
- Stallman, R.W., 1971. *Aquifer-test, design, observation and data-analysis: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, book 3, chap. B1. U.S. Geological Survey, Washington, DC.
- Theis, C.V., 1935. The lowering of the piezometric surface and the rate and discharge of a well using ground-water storage.
- Transactions, American Geophysical Union 16, 519–524. U.S. Bureau of Reclamation, 1977. *Ground water manual*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Washington, DC.
- Thomas, H.A., Fiering, M.B., 1962. Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basin by simulation. In: Maas, A. et al. (Ed.), *Design of Water Resources Systems*, Chapter 12. Harvard University Press, Cambridge, MA, pp. 459–493.

- U.S. EPA, 1994. Assessment framework for ground-water model applications. OSWER Directive 9029.00, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC.
- Vecchia, A.V., Obeysekera, J.T.B., Salas, J.D., Boes, D.C., 1983. Aggregation and estimation for low-order periodic ARMA models. *Water Resour. Res.* 19 (5), 1297–1306.
- Voss, C.I., Provost, A.M., 2002. SUTRA: A model for saturated-unsaturated, variable-density ground-water flow with solute or energy transport. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4231, Reston, VA.
- Walton, W.C., 1987. *Groundwater Pumping Tests, Design and Analysis*. Lewis Publishers, Chelsea, MI.
- Weeks, W.D., Boughton, W.C., 1987. Tests of ARMA model forms for rainfall-runoff modelling. *J. Hydrol.* 91, 29–47.
- White, B.W., 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford University Press, New York.
- Williams, J.H., Lane Jr., J.W., Singha, K., Haeni, F.P., 2002. Application of advanced geophysical logging methods in the characterization of a fractured-sedimentary bedrock aquifer, Ventura County, California. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4083, Troy, NY.
- Witherspoon, P.A., 2000. Investigations at Berkeley on fracture flow in rocks: From the parallel plate model to chaotic systems. In: Faybishenko, B., Witherspoon, P.A., Benson, S.M. (Eds.), *Dynamics of Fluids in Fractured Rock, Geophysical Monograph 122*. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 1–58.
- Worthington, S., 2003. Characterization of the Mammoth Cave aquifer. In: *Significance of Caves in Watershed Management and Protection in Florida, Workshop Proceedings, April 16–17, 2003*. Florida Geological Survey Special Publication No. 53. Florida Geological Survey, Ocala, FL.
- Worthington, S.R.H., Smart, C.C., Ruland, W.W., 2003. Assessment of groundwater velocities to the municipal wells at Walkerton. In: *Proceeding of the 2002 joint annual conference of the Canadian Geotechnical Society and the Canadian chapter of the IAHR*. Niagara Falls, Ontario, pp. 1081–1086.
- Zimmerman, R.W., Yeo, I.W., 2000. Fluid flow in rock fractures: From the Navier-Stokes equations to cubic law. In: Faybishenko, P.A., Witherspoon, P.A., Benson, S.M. (Eds.), *Dynamics of Fluids in Fractured Rock, Geophysical Monograph 122*. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 213–224.

# جيوكيمياء ينابيع المياه

## ٦-١ الكيمياء الفيزيائية للمياه الطبيعية

### ٦-١-١ مقدمة

تنتج الينابيع عن تركيز مسارات تدفق المياه الجوفية، بحيث تصدر المياه من موقع واحد (أو عدد قليل من المواقع القريبة) بدلاً من التدفق المنتشر إلى الجداول السطحية. وعلى هذا النحو، تعكس كيمياء مياه الينابيع تفاعل المياه الجوفية مع الصخور المضيفة لها بالإضافة إلى أي كيميائية قد يتم إدخالها من المصادر السطحية. وبالتالي، فإن كيمياء مياه الينابيع لا تختلف في جوهرها عن كيمياء المياه الجوفية وتطبق نفس المبادئ.

يمكن التعامل مع كيمياء المياه بشكل عام، وكيمياء مياه الينابيع بشكل خاص، من وجهتي نظر. يمكن للمرء أن يبدأ بالمعادن التي تتكون منها الصخور المضيفة وخصائصها الديناميكية الحرارية وحساب قابلية ذوبان المعادن وتفاعلاتها. ومن هذا المنطلق، من حيث المبدأ، يمكن التنبؤ بكيمياء المياه. أما وجهة النظر الأخرى فهي البدء بالبيانات الثابتة - التحليلات الكيميائية لمياه الينابيع - ثم محاولة مقارنة البيانات مع التفسيرات النظرية. يتم استخدام كلا وجهتي النظر في المناقشة التالية.

معظم مياه الينابيع عبارة عن محاليل مائية مخففة بتركيزات من الأنواع الذائبة في حدود عشرات إلى مئات المليغرامات لكل لتر. بالنسبة للمحاليل المخففة، حيث لا تختلف كثافة المحلول اختلافاً كبيراً عن كثافة الماء النقي، فإن التركيز الحجمي (ملغم/لتر) والتركيز الكتلي (جزء في المليون) متكافئان عددياً. في حالات قليلة، مثل المياه المالحة، تكون كثافة المحلول عالية بما يكفي للتمييز. الكاتيونات الشائعة في مياه الينابيع هي  $Ca^{+2}$ ،  $Na^{+}$ ،  $Mg^{+2}$ ، و  $K^{+}$  في حين أن الأنيونات الأكثر شيوعاً هي  $HCO_3^{-}$ ،  $SO_4^{2-}$ ،  $Cl^{-}$ . وتشكل هذه العناصر معاً الأساس لتصنيف مياه الينابيع (وكذلك المياه الجوفية والمياه السطحية). المجموعات الرئيسية الثلاث هي المياه ثنائية الكربونات (بيكربونات)، حيث يميل الكالسيوم والمغنيسيوم إلى أن يكونا الكاتيونات المهيمنة؛ ومياه الكبريتات، حيث قد يكون المغنيسيوم أكبر من الكالسيوم مع وجود الأيونات القلوية أيضاً؛ ومياه الكلوريد، حيث تميل الأيونات القلوية إلى أن تكون مهيمنة. تعتمد الكيمياء المهيمنة عادةً على الصخور المضيفة للماء الذي ينبثق منه النبع. وتوجد عشرات الآلاف من الينابيع في مجموعة كبيرة ومتنوعة من البيئات الجيولوجية. كما توجد عشرات من التحاليل الكيميائية لمياه الينابيع. كل ما يمكن إنجازه في

استعراض قصير هو فرز هذه المياه هذه إلى فئات وإعطاء بعض المؤشرات على التركيبات الكيميائية والتفاعلات الكيميائية المتوقعة . ولتحقيق هذه الغاية، تم توفير جداول تهدف إلى توضيح النطاق في كيمياء مياه الينابيع. والجداول غنية بالمعلومات ولكنها بالتأكيد ليست شاملة.

## ٦-١-٢ التوازن الكيميائي والتشبع المعدني

أصبحت جيوكيمياء المياه في درجات الحرارة المنخفضة علمًا متطورًا على مدى العقود العديدة الماضية. ويمكن العثور على معلومات تفصيلية ممتازة عن كيمياء المياه الطبيعية في كتب مثل [Hem \(1985\)](#), [Stumm and Morel and Hering \(1993\)](#), [Langmuir \(1997\)](#), [Drever \(1997\)](#), [Morgan \(1996\)](#). بعض المعادن تذوب ببساطة في الماء وتتفكك إلى الأيونات المكونة لها. تتفاعل معادن أخرى كيميائيًا مع الماء، وغالبًا ما تشكل بعض الأيونات القابلة للذوبان وبعض البقايا الغير قابلة للذوبان. بالنسبة لتلك التي تذوب عن طريق التفكك الأيوني، يمتد نطاق الذوبان إلى عدة مراتب من حيث الحجم. بالنسبة لثلاثة معادن شائعة في درجات الحرارة المحيطة:

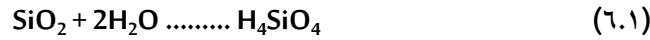
Halite	NaCl	350;000 mg/L
Gypsum	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	2500 mg/L
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	في المياه النقية 7mg/l

بالنسبة لأي من هذه المعادن، يوجد تركيز توازن معين، يُعرف ديناميكيًا حراريًا بالتركيز الذي تتوازن عنده الطاقات الحرة للأنواع على جانبي تفاعل الذوبان تمامًا أو حركيًا حيث يكون معدل الذوبان مساويًا لمعدل الترسيب. في الواقع غالبًا ما لا تكون تركيزات الأنواع الذائبة في حالة توازن مع معادن الصخور المضيفة. وينطبق هذا بشكل خاص على صخور الكربونات، حيث يكون عدم التوازن أداة تفسيرية مفيدة. ومع ذلك، فإن حسابات قابلية ذوبان المعادن توفر مرجعًا مفيدًا لتفسير الجيوكيمياء. يمكن مقارنة كيمياء الماء المتوقعة من حسابات التوازن مع كيمياء الماء في الواقع التي يحددها التحليل الكيميائي. وبسبب العدد الكبير من التفاعلات فإن من الأفضل إجراء هذه الحسابات بواسطة برامج حاسوبية مثل PHREEQC، الذي طورته هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية ([Parkhurst and Appelo, 2008](#)).

## ٦-٢ مياه الينابيع من صخور السيليكات

## ٦-٢-١ انحلال السيليكات والسيليكات

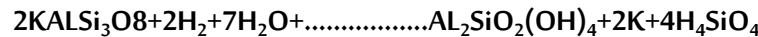
المعدن السائد في معظم صخور السيليكات هو الكوارتز،  $\text{SiO}_2$ . يذوب  $\text{SiO}_2$  بالتفاعل الكيميائي مع الماء:



بوصفه نوعاً متعادلاً مخففاً، فإن نشاط حمض الأورثوسيليك،  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ، يساوي أساساً تركيز يبلغ ٦,٣٩ مجم/لتر عند ٢٥ درجة مئوية. يُشتق بعض السيليكات في مياه الينابيع من تحلل معادن السيليكات الأخرى، وليس من انحلال الكوارتز عالي التبلور. السيليكات غير المتبلورة لديها قابلية ذوبان أعلى، ١١٧ ملغم/لتر بناءً على البيانات الديناميكية الحرارية الواردة في (Drever 1997). تفاعل الذوبان للكوارتز لا يمكن عكسه؛ لا يترسب الكوارتز البلوري من المحاليل الباردة. أي سيليكات تؤخذ في المحلول بواسطة أي تفاعل تميل إلى البقاء في المحلول. ونتيجة لذلك، فإن تركيزات  $\text{SiO}_2$  الموجودة في ينابيع صخور السيليكات غالباً ما تكون أعلى من الحد الأدنى الذي يفرضه الكوارتز البلوري.

قابلية ذوبان الكوارتز مستقلة عن الأس الهيدروجيني من خلال نظام الحمض حتى قيم الأس الهيدروجيني في نطاق ٩. يتسبب تأين حمض السيليك وتكوين الأنواع قليلة القوام في زيادة قابلية الذوبان بقوة عند درجة حموضة عالية، وهي ظروف نادرة ما توجد في المياه الطبيعية (الشكل ٦-١).

تتفاعل معظم معادن السيليكات المعقدة أيضاً مع الماء بدلاً من الذوبان عن طريق التفكك. على سبيل المثال، في طبقات المياه الجوفية الجرانيتية، ينتج عن تكسير الفلسبار معادن طينية وتحرر أيونات قلوية في المحلول:



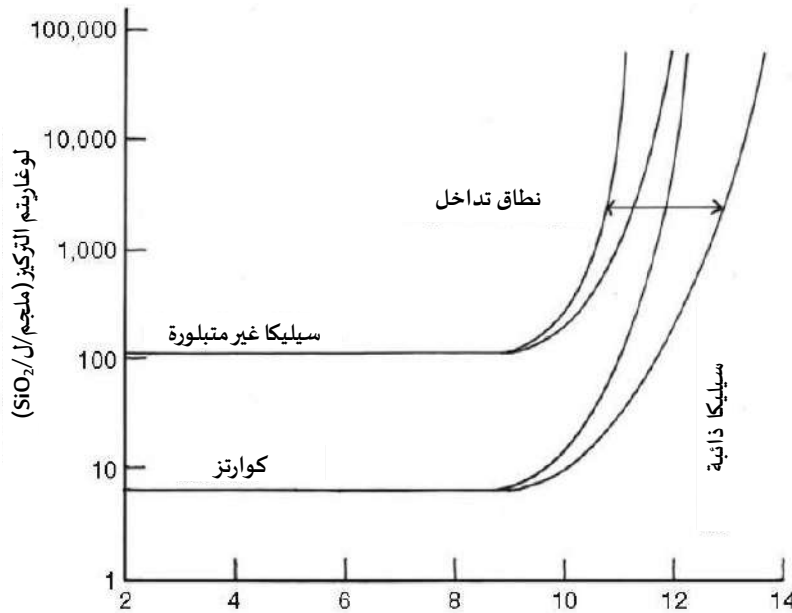
يميل الألومنيوم إلى أن يكون غير متحرك في الماء شبه المحايد، بحيث نادراً ما توجد الأنواع المحتوية على الألومنيوم في مياه الينابيع ذات درجة الحرارة المنخفضة. في مثال الأورثوكليز، تتغير نسبة Si/Al، ويبقى الألومنيوم في صورة كاولينيت، بينما يتحرك كل من البوتاسيوم وبعض السيليكات في المحلول. في ظل ظروف التجوية القاسية، تتفكك المعادن الطينية مثل الكاولينيت، مع تحول الألومنيوم إلى جيبسايت وتتحول السيليكات المتبقية إلى محلول:



## ٦-٢-٢ الينابيع في الصخور الطفلية والحجر الرملي والجرانيت

هناك الآلاف من الينابيع في الصخور الطفلية، والطينية، والرملية وكذلك في الجرانيت والصخور المتحولة، ولكن هذه الينابيع عادة ما يكون تصريفها منخفضاً وتقع في الغالب على مناطق التصدع أو نقاط الضعف البنيوية ذات الصلة. كانت العديد من المزارع القديمة تقع بالقرب من هذه الينابيع لأنها كانت توفر مصدراً موثقاً للمياه عالية الجودة. أما ينابيع صخور السيليكات فهي

ليست عالية الانتاجية ولكنها توفر إمدادات المياه للعديد من المنازل. وترد بعض التحليلات التمثيلية لمياه ينابيع صخور السيليكات في الجدول ٦-١. تم اختيار هذه التحاليل من تجميع د. [White, Hem, and Waring \(1963\)](#). تميل مياه الينابيع من صخور السيليكات إلى أن تكون مواد صلبة ذائبة كلية منخفضة للغاية. تكون السيليكات دائماً هي الأنواع السائدة تقريباً بتركيزات بضع عشرات من المليميغرامات لكل لتر، وهو أعلى بكثير من تركيز التوازن المتوقع من الكوارتز. وتتراوح تركيزات الحديد والألومنيوم والمنجنيز من منخفضة جداً إلى غير قابلة للكشف. وإذا لم تكن مرتبطة بمعادن أخرى، فإن هذه العناصر تشكل أكاسيد وهيدروكسيدات غير قابلة للذوبان في نظام الأس الهيدروجيني المحايد. يحتوي أحد ينابيع الصخور الطفلية على أس هيدروجيني أقل، ٤,٩، ويحتوي على تركيز قابل للقياس من الألومنيوم يبلغ ١,٥ ملغم/لتر. تحتوي معظم مياه الينابيع على تركيزات كبيرة من الكالسيوم والمغنيسيوم والبيكربونات. على الرغم من أن هذه الأنواع لا تتوافق مع السيليكات النقية، إلا أن معظم الصخور الطفلية والرملية تحتوي على الأقل على كميات بسيطة من معادن الكربونات. تميل هذه المعادن الثانوية إلى أن تكون المساهم الرئيسي في الأنواع المذابة.



الشكل ٦-١ مخطط المواصفات لنظام  $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  عند ٢٥ درجة مئوية. حُسبت قابلية ذوبان الكوارتز والسيليكات غير المتبلورة في منطقة الأس الهيدروجيني المنخفض من البيانات الديناميكية الحرارية. منحنيات الذوبان في منطقة الأس الهيدروجيني العالي مخططة بسبب أنواع السيليكات المعقدة الموجودة في هذه المنطقة.

## ٦-٢-٣ ينابيع المياه الباردة في الصخور البركانية

تميل الصخور البركانية المتكونة على شكل تدفقات من الحمم البركانية إلى أن تكون مسامية للغاية. وتشابة أنظمة الشقوق وكهوف أنابيب الحمم البركانية نفاذية القنوات الموجودة في الصخور الكربونية. وتدفقات الحمم البركانية ورواسب الخفاف ذات نفاذية للغاية. أما الصخور البركانية الأخرى فهي قليلة المسامية وزجاجية وتكاد تكون عديمة النفاذية. وكطبقة للمياه الجوفية يمكن أن تكون التضاريس البركانية غير متجانسة إلى حد كبير. ونتيجة لذلك، توجد بعض أكبر الينابيع في العالم في التضاريس البركانية، مماثلة لتلك الموجودة في التضاريس الكارستية. ومن الأمثلة على ذلك الينابيع الموجودة في نهر الأفعى في جنوب ولاية أيداهو والينابيع الكبيرة المماثلة التي تصب تدفقات الحمم البركانية في آيسلندا (الشكل ٦-٢).

وتحتوي الصخور البركانية - البازلت والأنديسايت ونظائرها الأكثر بلورية مثل الجابرو على معادن تحتوي على تركيزات أقل من السيليكا وتركيزات أعلى من المغنيسيوم والحديد. هذه المعادن النارية، تتشكل في درجات حرارة عالية، وهي غير مستقرة بشكل عام في وجود الماء. حيث تتفاعل المعادن النارية مع المياه الجوفية، وتطلق أيونات كلوية بالإضافة إلى المغنيسيوم والكالسيوم والسيليكا. بعض الأمثلة في الجدول ٦-١. لاحظ أن المغنيسيوم يميل إلى تجاوز الكالسيوم، ولكن بخلاف ذلك فإن تركيب مياه الينابيع البركانية الباردة تتشابه مع تركيب مياه الينابيع الأخرى من صخور السيليكات. بسبب البيئة المؤكسدة تكون تركيزات الحديد والمنجنيز منخفضة جدًا أولاً ويتم اكتشافها على الرغم من ارتفاع تركيزات هذه العناصر في الصخور المضيفة.

تم استخلاص القيم المتوسطة للأيونات الرئيسية من طبقة المياه الجوفية في سهل نهر الأفعى في جنوب أيداهو من تقرير Wood and Low (1988) (الجدول ٦-٢). يتضح على الفور من تركيزات الكالسيوم والمغنيسيوم وأيونات البيكربونات أن معادن الكربونات، على الرغم من احتمال وجودها بكميات ضئيلة، تهيمن على كيمياء هذه التضاريس البركانية الواسعة. بينما تركيزات الكلوريد متغيرة للغاية وقد تنتج جزئيًا من تلوث طبقة المياه الجوفية بالملح المستخدم في إزالة الجليد من الطرق في فصل الشتاء.

## ٦-٣ مياه الينابيع من صخور الكربونات

تصب معظم أكبر الينابيع في العالم من صخور الكربونات. غالباً ما تكون المياه الجوفية في طبقات المياه الجوفية الكربونية منظمة في أنظمة من القنوات، والتي يمكن الوصول إلى أجزاء منها في بعض الأحيان ككهوف قابلة للاستكشاف. تتنوع الينابيع الكربونية بشكل كبير في مظهرها الفيزيائي. يظهر بعضها على شكل برك مرتفعة في وديان الأنهار أو على طول خطوط ساحل الكربونات (الشكل ٦-٣). وينبتق بعضها من أكوام الحطام الصخري الذي يمنع الوصول إلى أي نظام تغذية. وينبتق بعضها من مناطق من الشقوق المركزة التي خضعت لتعديل انحلالي طفيف فقط. لكن الأكثر إثارة للإعجاب هي الينابيع التي تنبتق من فتحات الكهوف (الشكل ٤-٦). أثناء التدفق الأساسي، غالباً ما يمكن استكشاف القنوات المغذية لهذه الينابيع لمسافات طويلة. يكشف الاستكشاف من قبل

الغواصين أن العديد من القنوات المغذية تتموج في المستوى العمودي، بحيث أنه عند التدفق المنخفض، هناك أجزاء مملوءة بالهواء مع تيارات سطحية حرة وأجزاء مملوءة بالماء بالكامل ولكن إلى أعماق ضحلة فقط. و أثناء التدفق الفيضاني، قد تكون

جدول ٦-١ تحاليل مختارة لمياه الينابيع من الصخور السيليكاتية. (White et al 1963).													
Mn	Fe	Al	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	SiO <sub>2</sub>	pH	T(C)	الموقع
0	0.6	0.2	1.8	2.1	184	3	2.4	6	50	12	7.4	16.7	Melbourne Spring,
													St. Peter sandston
0.22	0.39	1.5	2.1	128	3.2	35	36	7.5	15	22	4.9	10	Park Lake Spring,
													Ohio shale
0	0	0	1	9.4	-	1.3	0.4	2.7	3.3	2	-	10	Weathertop Spring
													Clinton shale
0	0.08	0.1	2	1.9	42	1.2	11	1.4	44	55	7.2	12.8	East Fork Spring,
													Tertiary rhyolite
0	0.05	0.1	1.2	20	136	33	8.5	7.3	34	27	7.5	7.8	Snyder's Spring, ID
													quartz monzonite
-	-	-	7	22	279	1.2	19	42	20	31	8.2	12.2	Buell Park Spring,
													Olivine basalt
0	0	0	0	6.3	38	2.6	1.8	0.5	12	8.9	7.7	-	Bear Springs, ID
													Permian volcanics

ملاحظة : كل التركيزات بالمليجرام لكل لتر.



الشكل ٦-٢ ينابيع هراونفوس Hraunfoss تخرج من تدفق الحمم البركانية في آيسلندا.

جدول ٦-٢ متوسط التراكيب للمياه الجوفية والنبع من Snake River Plain, Idaho.

النوع	المتوسط	الانحراف المعياري	معامل التباين
$\text{Ca}^{2+}$	44	19.7	45%
$\text{Mg}^{2+}$	14.1	8.4	60%
$\text{Na}^{+}$	30.2	24.3	80%
$\text{K}^{+}$	4.6	38	83%
$\text{HCO}_3^{-}$	204.8	78.9	39%
$\text{Cl}^{-}$	20.6	19.3	94%
$\text{SO}_4^{2-}$	40	33.4	84%
$\text{SiO}_2$	36.4	15.4	42%

القناة بأكملها مغمورة بالمياه. وغالباً ما تحصل الينابيع الصخرية الكربونية (الكارستية) التي تصرف من أنظمة القنوات على التغذية السريعة من الجداول الغاطسة والمجري المائية المفتوحة. هذه التغذية لها فترة مكوث قصيرة جداً ومن المحتمل ألا تكون متوازنة مع الحجر الجيري أو صخور الدولوميت. وعلاوة على ذلك، فإن الحقن المباشر للمياه السطحية هو مصدر جاهز للملوثات، والتي قد تشق طريقها إلى النبع مع القليل من التخفيف أو الامتزاز. ويتطلب تفسير كيمياء مياه الينابيع الكربونية النظر في هيدروكيمياء الكالسيت والدولوميت.

### ٦-٣-١ انحلال الحجر الجيري والدولوميت

المعادن السائدة في صخور الكربونات هي الكالسيت،  $\text{CaCO}_3$ ، والدولوميت،  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . هذه المعادن قد تذوب عن طريق التفكك البسيط، ولكن قابليتها للذوبان في الماء النقي منخفضة جداً، حوالي ٧ مجم/لتر، مقارنة بالكوارتز:

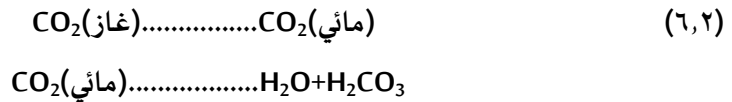


الشكل ٦-٣ نبع نهر إيكو ريفر، متنزه كهف الماموث الوطني، وهو نبع مرتفع مع قناة تغذية النبع ٦-٩ أمتار تحت مستوى النهر الأخضر القريب. (الصورة من Joe Kearns).

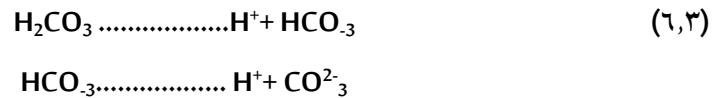


الشكل ٦-٤ نبع ماموث Mammoth Spring، وهو نبع كبير يخرج من نظام قنوات رئيسي، بنسلفانيا.

ومع ذلك، على عكس معادن السيليكات، فإن معادن الكربونات معرضة جداً للتفاعل بواسطة الأحماض. يمكن للمعادن الكربونية أن تتفاعل مع أي حمض عضوي أو غير عضوي، ولكن أهم حمض في معظم طبقات المياه الجوفية الكربونية هو حمض الكربونيك. يُشتق حمض الكربونيك من ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي أو في التربة. عندما يذوب ثاني أكسيد الكربون في الماء، يبقى معظمه ثاني أكسيد الكربون المائي لكن كمية صغيرة منه، حوالي ١٧،٠ في المائة، تتفاعل كيميائياً مع الماء لإنتاج حمض الكربونيك. ونظراً لصعوبة فصل ثاني أكسيد الكربون المائي عن حمض الكربونيك، فإن التفاعلين عادةً ما يؤخذاً معاً:



حمض الكربونيك هو حمض ضعيف يتأين جزئياً فقط ويفعل ذلك في خطوتين:



في هذه المعادلات، الحدود a هي الأنشطة الديناميكية الحرارية للأنواع المحددة. أما متواليات الاتزان K، تعتمد على درجة الحرارة. تم جدولة القيم العددية عند درجات حرارة مختلفة في [Drever \(1997\)](#). يتطلب تفسير مياه الينابيع الكارستية في ظل ظروف

التوازن حل جميع معادلات التوازن في وقت واحد. بالنسبة لحالة الحجر الجيري، هناك نظام ثلاثي الأطوار: حجر جيري صلب، يُفترض أنه يكون  $\text{CaCO}_3$  النقي؛ ومرحلة غازية مع ثاني أكسيد الكربون باعتباره المكون النشط الوحيد، موصوفاً بالضغط الجزئي،  $\text{PCO}_2$ ؛ والمرحلة المائية التي تحتوي على تركيزات متفاوتة للأنواع  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ،  $\text{Ca}^{2+}$ ،  $\text{HCO}_3^-$ ،  $\text{CO}_3^{2-}$ ، و  $\text{H}^+$ ،  $\text{OH}^-$ . بحساب ضغط ثاني أكسيد الكربون وتركيزات الأنواع المائية الستة، يكون هناك سبعة مجاهيل، تتطلب سبع علاقات مستقلة فيما بينها. تربط المعادلة (٦،٢) الحجر الجيري الصلب بالطور المائي.

### ٦-٣-٢ الحركة الكيميائية وعدم التوازن

تختلف طبقات المياه الجوفية الكارستية عن معظم الطبقات المائية الجوفية الأخرى بسبب قصر زمن انتقال المياه من مناطق التغذية إلى الينابيع. تنطبق تفاعلات الذوبان المختلفة الموصوفة سابقاً على ظروف التوازن. يختلف الوقت اللازم للمحاليل المائية لتحقيق التوازن اختلافاً كبيراً بين التفاعلات. إن الأدبيات المتعلقة بحركية انحلال الكالسيت ضخمة (Morse and Arvidson, 2002; Plummer, Wigley, and Parkhurst (1978). (Busenberg and Plummer, 1982; J. Herman and White, 1985; Pokrovsky and Schott, 2001; Pokrovsky, Golubev, and Schott, 2005). يبدو أن للدولوميت نظامان للذوبان. في حالة نقص التشبع المرتفع للغاية، يذوب الدولوميت بمعدلات في نفس نطاق الكالسيت، ومع ذلك، فإن منحنيات الذوبان تتسطح عند حوالي ١ في المائة من التشبع، وبعد ذلك الدولوميت أبطأ بكثير من الكالسيت، مما يتطلب أوقاتاً تتراوح بين أشهر وسنوات لتحقيق التوازن الكامل. وقد استُخدمت حركية الذوبان الرسمية بنجاح جيد في تفسير تطور نفاذية القناة. وقد تم إنشاء بعض النماذج الحاسوبية المعقدة للغاية (Dreybrodt, Gabrovsek and Romanov, 2005). ومع ذلك، لتفسير هيدروكيمياء مياه الينابيع الكارستية، يكفي فهم المقياس الزمني للتفاعلات المختلفة:

١. يبلغ الثابت الزمني لترطيب ثاني أكسيد الكربون حوالي ٣٠ ثانية.

٢. يكون تأيُن حمض الكربونيك بالملي ثانية، أي أنه لحظي بشكل أساسي.

٣. الوقت اللازم لانحلال الكالسيت هو عدة أيام.

٤. الوقت اللازم لانحلال الدولوميت هو عدة أيام تليها أسابيع.

ونتيجة لحركية التفاعل البطيئة لانحلال الحجر الجيري والدولوميت، فإن مياه الينابيع التي تصب في طبقات المياه الجوفية مع وجود أنظمة قنوات متطورة أو تغذية كبيرة من مصادر المياه الجوفية ليس من المرجح أن تكون في حالة توازن.

### ٦-٣-٣ التوصيف الكيميائي لمياه الينابيع الكربونية

يمكن توصيف ينابيع صخور الكربونات بجدول التحاليل الكيميائية ولكن هذه ليست مفيدة مثل المعاملات الثانوية التي يمكن حسابها من البيانات التحليلية الأولية. أكثر أربعة معاملات ذو فائدة هي:

### العسر

العسر هو واحد من أقدم معايير جودة المياه وكان في الأصل مقياساً لقدرة الماء على ترسيب الصابون. في الواقع، استخدمت اختبارات العسر القديمة محلول صابون قياسي. العسر هو مقياس لتركيزات الكالسيوم والمغنيسيوم معاً في الماء. وقد جرى العرف على تعريف العسر على أنه ملليغرام لكل لتر من كربونات الكالسيوم.

العسر ذو قيمة علمية محدودة بسبب التعامل مع جميع الأيونات القلوية الترابية الذائبة كما لو كانت الكالسيوم، لكنها تعطي إحساساً جيداً بكمية الكربونات الذائبة، وعلى هذا النحو، فهي معامل مفيد لجودة المياه. كمسألة عملية، يتناسب العسر مع التوصيلية النوعية في معظم المياه الكارستية. ويعطي الشكل ٥-٦ مجموعة مختارة من هذه العلاقات. ولأن التوصيلية النوعية تعتمد أيضاً على الأيونات الأخرى الموجودة في الماء، فمن المهم معايرة كل موقع دراسة بمجموعة من التحليلات الكيميائية. والتوصيلية هو أحد أقل البارامترات تعقيداً التي يمكن قياسها بأجهزة للمراقبة المستمرة.

### نسبة Ca/Mg

توفر النسبة المولية لتركيز أيون الكالسيوم إلى تركيز أيون المغنيسيوم معلومات عن نوع الصخور التي يتدفق منها النبع. تحتوي ينابيع الدولوميت على نسبة Ca/Mg قريبة من الوحدة. لأن معظم الصخور الجيرية تحتوي على بعض المغنيسيوم، لذلك فإن نسبة الكالسيوم/المغنيسيوم في ينابيع الصخور الجيرية تكون عادةً في حدود ٦-٨. قد تشير القيم المتوسطة إلى وجود كل من الحجر الجيري والدولوميت على طول مسار التدفق المؤدي إلى النبع.

### الضغط الجزئي المحسوب لـ CO<sub>2</sub>

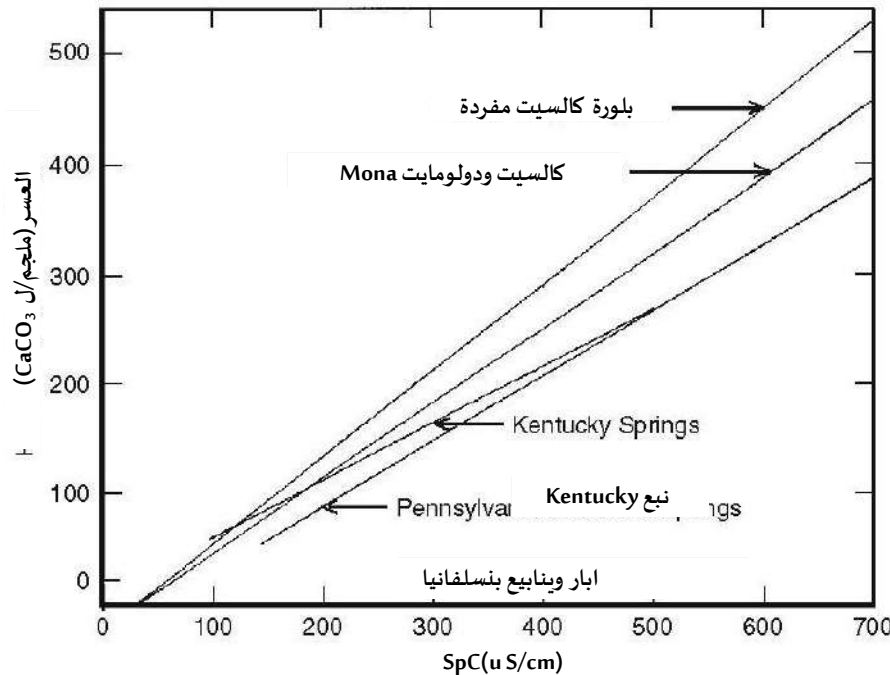
باستخدام المعادلات الأساسية لكيمياء الكربونات، من الممكن إعادة حساب الضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون الذي ستكون معه مياه الينابيع في حالة توازن.

### مؤشر التشبع

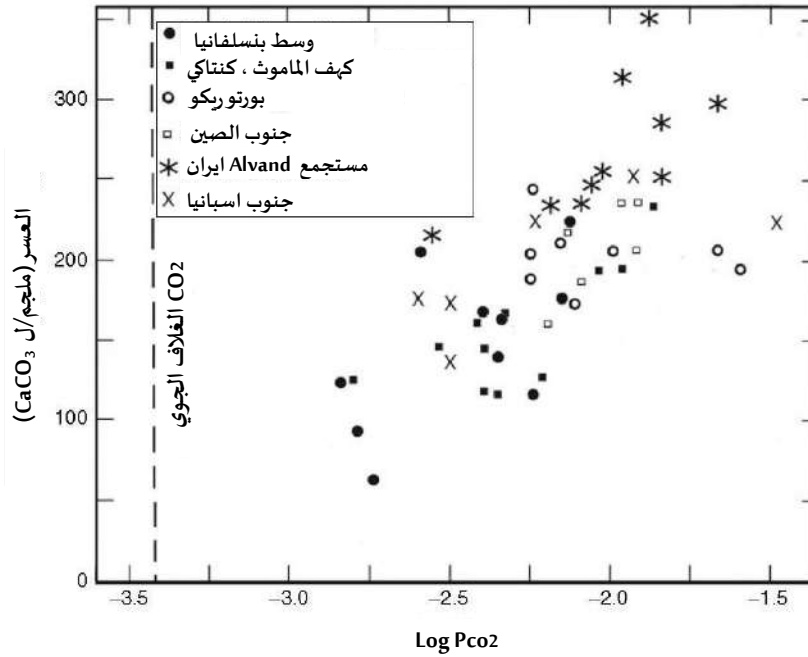
نظراً لأنه من غير المحتمل أن تكون مياه الينابيع الكارستية في حالة اتزان، فإن مؤشر التشبع يوفر قيمة عددية لاختلال التوازن، سواء كان التشبع ناقصاً أو مفرطاً.

#### ٦-٣-٤ كيمياء الينابيع الكارستية

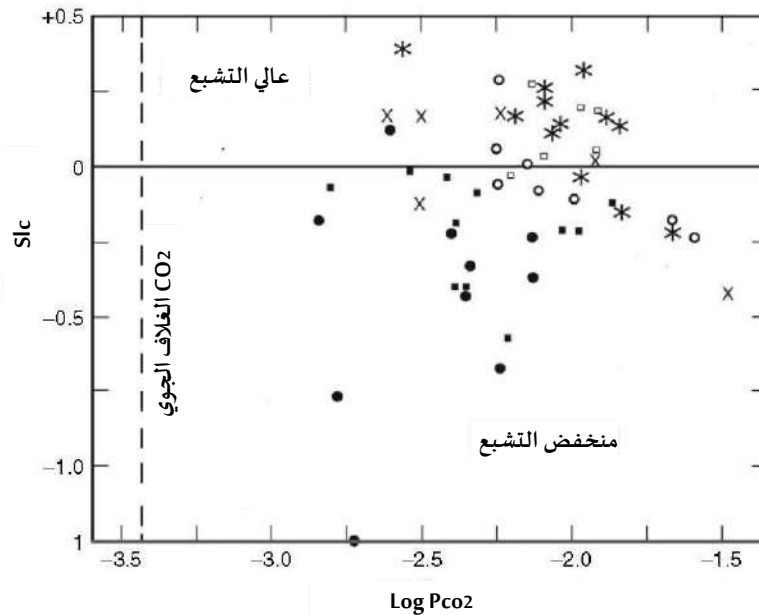
لإعطاء لمحة على الأقل عن نطاق قيم البارامترات التي تم قياسها في الينابيع الكارستية في العديد من المواقع والأماكن الجيولوجية، تم اختيار بعض الأمثلة من المؤلفات الكثيرة جداً. قدمت الأوراق العلمية المختارة كلاً من التحاليل الكيميائية التفصيلية لمياه الينابيع والمعايير المحسوبة لثاني أكسيد الكربون ومؤشر التشبع. تم رسم بيانات ٥٣ عينة من مياه الينابيع في الأشكال ٦-٦ و ٦-٧ و ٦-٨ إلى ١٢ نقطة بيانات من كل موقع من المواقع الستة. تمثل بيانات وسط بنسلفانيا كلاً من ينابيع التدفق المجري والينابيع المتدفقة المتصدعة من بيئة مناخية معتدلة (Shuster, 1970). أما بيانات منطقة كهف ماموث، كنتاكي، فهي من نبع تور هول، ونبع نهر إيكو ريفر، ونبع غراهام، وهي ثلاثة ينابيع كبيرة تصب من صخور المسيسيبي الجيرية في جنوب وسط كنتاكي (Hess, 1974). بيانات ريو كاموي مأخوذة من الانبعاث الرئيسي من الينابيع الأصغر في حوض تصريف ريو كاموي في الحزام الكارستي شمال بورتوريكو (Troester, 1994). جنوب الصين، البيانات مأخوذة من موقع تجريبي بالقرب من غويلين بمقاطعة غوانغشي (Liu et al., 2004). يقع حوض ألفاند شمال غرب سلسلة جبال زاجروس في غرب إيران (Karimi, Raeisi, and Bakalowicz, 2005). البيانات من جنوب إسبانيا من الينابيع في سييرا دي سيغورا القاحلة والقاحلة للغاية في كوردليرا بيتك، شمال شرق غرناطة، إسبانيا (Moral, Cruz-Sanjulia ´n, and Olias, 2008).



الشكل ٦-٥ العلاقة بين التوصيل النوعي والعسر. تستند الخطوط الموضحة إلى العديد من نقاط البيانات.



الشكل ٦-٦ توزيع الصلابة مقابل ضغط ثاني أكسيد الكربون في ينابيع كارستية مختارة. الرموز هي لمجموعات محددة من البيانات. انظر النص للحصول على وصف لمجموعات البيانات.



الشكل ٦-٧ توزيع مؤشر التشبع مقابل ضغط ثاني أكسيد الكربون في ينابيع كارستية مختارة. رموز المعاني هي نفسها المحددة في الشكل

تُظهر مخططات العسر كدالة لضغط ثاني أكسيد الكربون المحسوب (الشكل ٦-٦) قدرًا كبيرًا من التشتت ولكن مع وجود اتجاه عام لزيادة العسر مع زيادة ضغط ثاني أكسيد الكربون. ويتبع هذا الاتجاه منحنيات الذوبان للكالسيت والدولوميت (الشكل ٦-٤). تتراوح درجات الحرارة لعينات مياه الينابيع الموضحة من ١٠ إلى ٢٠ درجة مئوية، ولكن كيمياء العديد من هذه المياه تنحرف بشكل كبير عن مياه الكربونات النقية؛ لذا لا يمكن رسم منحنى ذوبان مرجعي مناسب لجميع البيانات. بشكل عام، لدى المياه من المناخات الاستوائية بعض ضغط ثاني أكسيد الكربون أعلى من المياه المعتدلة، ولكن، كما يتضح من التشتت في البيانات، فإن العلاقة ليست قوية. وعادة ما تظهر تركيزات ثاني أكسيد الكربون في مياه الينابيع الكارستية دورة موسمية. معظم ثاني أكسيد الكربون مشتق من التربة في الكارست السطحي ويختلف إنتاج التربة لثاني أكسيد الكربون باختلاف الموسم. ويكون أعلى ما يكون في موسم النمو، وينخفض (في المناخات المعتدلة) في فصل الشتاء، عندما تكون العمليات النباتية في حالة خمول.

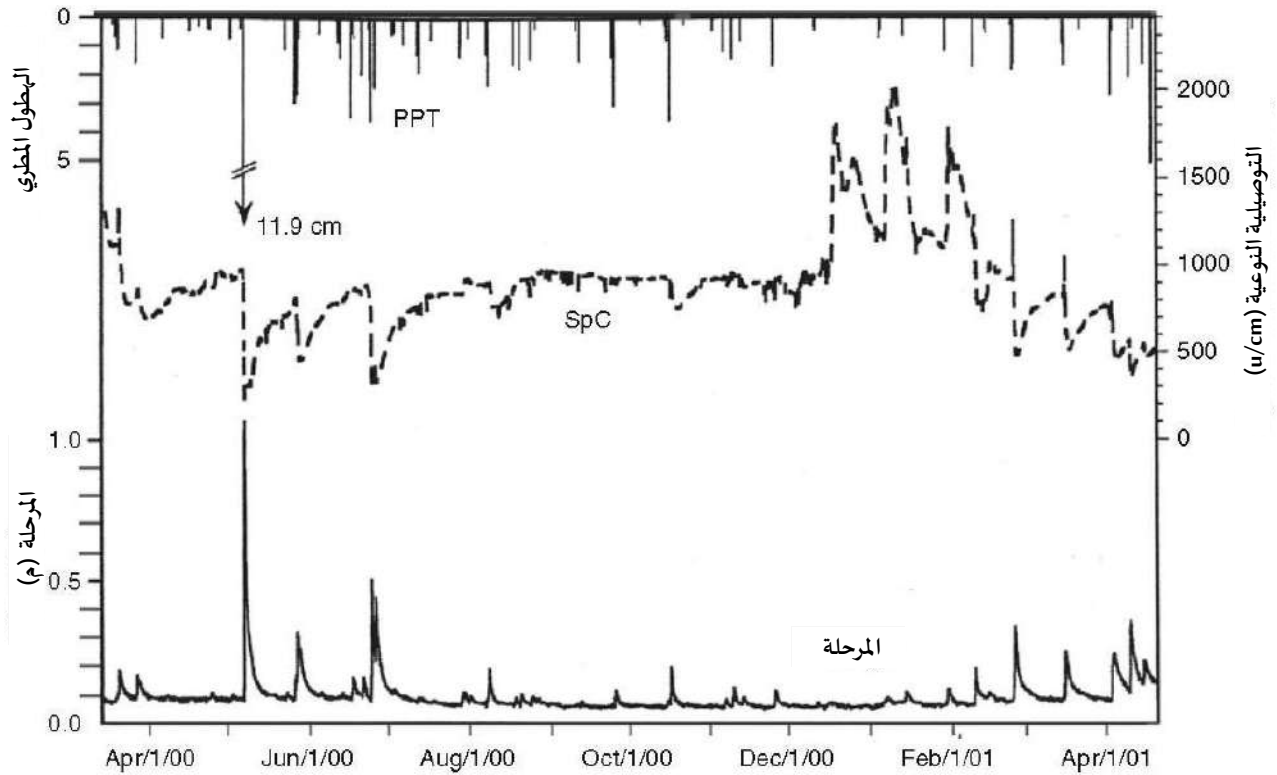
تُظهر مياه الينابيع الكارستية تباينًا كبيرًا في حالة التشبع فيما يتعلق بالكالسيت والدولوميت (الشكل ٦-٧). توضح مجموعة البيانات هذه سبب كون حسابات التوازن ذات قيمة هامشية في تفسير كيمياء المياه الكارستية. أما الينابيع ذات المناخ المعتدل في بنسلفانيا وكنيتاكي فمعظمها أقل من مصنفة. تصب الينابيع ذات المياه غير المشبعة بدرجة كبيرة في أنظمة القنوات المفتوحة. ومع ذلك، فإن حالة التشبع في حد ذاتها ليست مؤشرًا على وجود تصريف القنوات. بسبب تفرغ ثاني أكسيد الكربون على طول القنوات، قد تكون الينابيع التي يتم تصريفها من القنوات مفرطة التشبع. الينابيع الكبيرة في فلوريدا التي تتلقى الكثير من تغذيتها من التربة المتركمة تتغذى من قنوات كبيرة ومياه التصريف التي تتراوح من التشبع أو غير مشبعة (Katz et al., 1999).

### ٦-٣-٥ كيمياء الينابيع المعتمدة على الوقت: مرتسم الكيمياء ومرتسم العكورة والتدفق العاصف

تميل كيمياء الينابيع التي يتم تصريفها من الصخور غير الكربونية وأنظمة التصدع في الصخور الكربونية إلى أن تكون مستقلة زمنياً. وعلى الرغم من أن تصريف الينابيع قد يختلف إلى حد ما بين المواسم الرطبة والجافة، فإن تركيزات الأنواع الذائبة تختلف قليلاً جداً. تميل التفاعلات الكيميائية بين الماء والمعادن في طبقة المياه الجوفية إلى أن تكون قريبة من الاتزان. ولا ينطبق الأمر نفسه على الينابيع التي تصب من طبقات المياه الجوفية الكربونية الكارستية. كما لوحظ في العديد من المراجعات حول الهيدروجيولوجيا (على سبيل المثال، White, 2002)، تنقسم الينابيع الكارستية إلى ثلاث فئات عريضة: (١) تلك التي لها أوقات استجابة قصيرة بالنسبة لمتوسط التباعد بين العواصف، (٢) تلك التي لها أوقات استجابة أطول بكثير من متوسط التباعد بين العواصف، و (٣) الحالات الوسيطة حيث تكون أوقات الاستجابة قابلة للمقارنة مع التباعد بين العواصف. وبسبب الإنتاجية السريعة للفتتين (١) و (٣)، تصل مياه العواصف إلى النبع قبل أن يتسنى للمياه الوقت الكافي لتحقيق التوازن الكيميائي مع صخور الكربونات. ونتيجة لذلك، فإن التدفق الأساسي إلى النبع يتخفف بمياه العواصف العذبة نسبياً. يتجلى وصول مياه العواصف المخففة إلى النبع من خلال الانخفاض المفاجئ في العسر والمعايير الكيميائية الأخرى. ويرد رسم توضيحي في الشكل ٦-٨. في هذا المثال، تكون نبضات العاصفة منفصلة جيداً، مما يعطي قمم حادة مع انحسار سريع جداً على هيدروجراف النبع. والرصد المستمر

للتوصيلية النوعية يوفر مدخلا للتركيب الكيميائي للمياه مع للزمن الذي يتم عرضه على شكل رسم بياني كيميائي. يتطابق تدفق الأساس على الرسم الهيدروغرافي مع التوصيلية النوعية المرتفعة نسبياً على المخطط الكيميائي. قمم العواصف على الرسم الهيدروغرافي لها نظيراتها على هيئة انخفاضات مفاجئة على المخطط الكيميائي. ومع ذلك، فإن طرف الانحسار في مخطط الهيدروغراف عادةً ما يكون زمن استجابته أقصر من زمن استجابة طرف الانحسار في المخطط الكيميائي.

إن الينابيع الكارستية التي تصرف أنظمة القنوات المتكاملة لديها القدرة على نقل الجسيمات الطينية: الطين والطين وأحياناً الحبيبات الأكبر حجماً. غالباً ما يتم ملاحظة هذه الرواسب الطينية في القنوات التي يمكن الوصول إليها عن طريق استكشاف الكهوف. تُشتق هذه المواد من الجداول الغاطسة وحقن التربة السطحية من خلال الشقوق المفتوحة ومصارف المجاري.



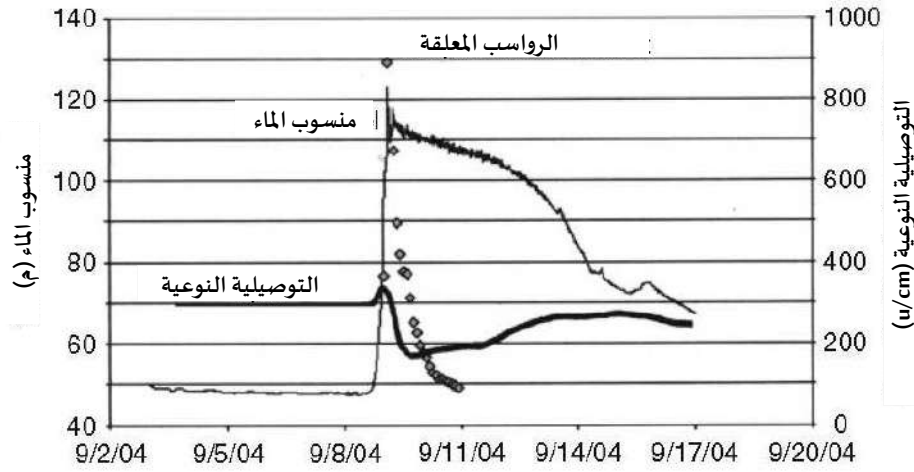
الشكل ٨-٦ سجل هطول الأمطار، وهيدروغراف التصريف، ومقياس كيميائي للتوصيل النوعي لنبع بلوجراس بالقرب من سانت لويس، ميسوري. (مقتبس من Winston and Criss, 2004).

وتتراوح أحجام الجسيمات من الجسيمات الغروية والطينية الحجم إلى الحصى والجلاميد الصخرية. يمكن فرز الترسبات التي تظهر في الكهوف إلى أوجه اعتماداً على حجم الجسيمات ودرجة الفرز (Bosch and White, 2004). المواد الموجودة في نطاق حجم الجسيمات الصغيرة يتم تحريكها بسهولة وتحملها تدفقات العواصف، هي مسؤولة عن تحول الينابيع الكارستية إلى عكرة أو موحلة أثناء العواصف.

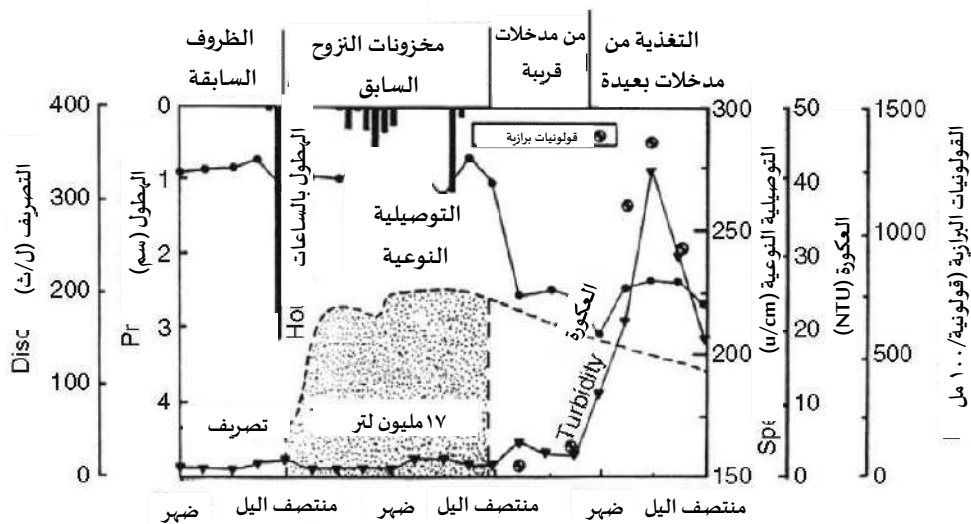
إن قياس الجسيمات العالقة في تصريف الينابيع، إما عن طريق أخذ عينات متكررة أو قياسات التعكر المستمرة يعطي مسباراً آخر لنظام طبقة المياه الجوفية: جهاز قياس التعكر. يتطلب تدفق الجسيمات الخشنة عواصف شديدة، لذلك لم يتم جمع سوى القليل من البيانات الكمية. في المثال الموضح في الشكل ٦-١٠، تسببت عاصفة شديدة في ارتفاع مفاجئ في طرف هيدروجراف النبع، والذي بسبب توزيع هطول الأمطار، كان له طرف انحسار طويل ومنحنى بشكل غير عادي. وكان مخطط العكارة بلغ ذروته بشكل حاد مع حركة الرواسب فقط خلال الطرف الصاعد والذروة الأولية للهيدروغراف.

أحد التفسيرات هو أن الرواسب الرخوة ذات الحبيبات الدقيقة التي تراكمت على جدران وأرضيات القناة تم تحريكها بواسطة التدفق الأول لتدفق العاصفة. وبمجرد استنفاد مخزون الرواسب الرخوة السائبة، اختفت العكارة في النبع. في حالات أخرى، تبقى الينابيع عكرة بسبب دخول الرواسب الجديدة من المصادر السطحية. ويكشف الفحص المعدني للرواسب، كما هو متوقع، عن وجود حبيبات دقيقة جداً من الكوارتز والمعادن الطينية، على الرغم من وجود معادن كربونية في أحد الينابيع (Herman et al., 2007). تُعد السجلات المستمرة لسلوك الينابيع الكارستية - السجلات المائية والكيميائية والعكسية - أداة قوية لتفسير طبقات المياه الجوفية الكارستية. مثال على كيفية تجميع هذه المعلومات في الشكل ٦-١٠ من عمل (Ryan and Meiman 1996). من الينابيع الكبيرة الجيرية الكارستية نبع Big Spring منتزه كهف الماموث الوطني. وهو يقع شمال النهر الأخضر ولا يرتبط بكهف الماموث ونظام الصرف الكارستي الكبير المرتبط به جنوب النهر الأخضر. يحتوي النبع على مستجمعات مياه مستطيلة تمتد إلى الأراضي الزراعية شمال حدود المنتزه. الجزء من مستجمع المياه داخل المنتزه هو غابات وغير متطورة. وبعد عاصفة كبيرة ارتفع هيدروجراف النبع الكبير بسرعة كبيرة، ولكن كيماء المياه ظلت ثابتة وانخفض بعد يوم واحد فقط من ارتفاع الهيدروجراف. ظل الرسم البياني ثابتاً ومنخفضاً لمدة ١٨ ساعة أخرى ثم حدثت ذروة التعكر. تزامنت ذروة التعكر مع ارتفاع في البكتيريا القولونية بمياه النبع والتفسير هو أن التصريف بين الارتفاع الأولي للهيدروغراف والهبوط في الرسم البياني الكيميائي يمثل المياه المخزنة في القنوات المغمورة.

بدأ التصريف المتزايد بعد العاصفة مباشرة بسبب ارتفاع الرأس الهيدروليكي في الروافد العليا من النظام ولكن بعد ٢٤ ساعة فقط وصلت مياه العاصفة نفسها إلى النبع. وبعد ١٨ ساعة أخرى وصلت مياه العاصفة من الأراضي الزراعية في أعلى المنبع، حاملةً الرواسب والبكتيريا القولونية إلى النبع. تم دعم التفسير الأخير من خلال تتبع الصبغة، والذي أظهر أن وقت السفر من الطرف العلوي للنظام إلى النبع هو نفس وقت الانتقال الذي أشار إليه مرتسم العكورة.



الشكل ٦-٩ رسم هيدروجرافي وكيموجرافي كيميائي ومقياس التعكر لنبع آرتش في مقاطعة بليز، بنسلفانيا، استجابةً إعصار فرانسييس. (من Herman, Toran, and White, 2008).



الشكل ٦-١٠ استجابة العاصفة لنبع Big Spring، في متزه كهف الماموث الوطني، كنتاكي، توضح أوقات وصول مياه العواصف وحمل الرواسب. (من Ryan and Meiman, 1996).

### ٦-٣-٦ ينابيع الترافرتين

تحتوي معظم مياه الينابيع الكربونية على ضغط ثاني أكسيد الكربون يزيد عن ما هو عليه في الغلاف الجوي. ونتيجة لذلك يتم تفريغ غاز ثاني أكسيد الكربون عند فوهة النبع وعلى طول مجرى النبع مع تدفق المياه بعيداً. يقترب الماء من التشبع أو يتجاوزه ويرتفع الأس الهيدروجيني. تحتوي بعض فتحات الينابيع على رواسب واسعة من الترافرتين. والبعض الآخر لا يحتوي على ذلك. وغالباً ما تحتوي الينابيع الكارستية المدارية على رواسب من الحجر الجيري بينما الينابيع الكارستية في المناخ المعتدل لا تحتوي على ذلك. وفي حالة الينابيع الحرارية، يؤدي التبريد أيضاً إلى ترسبات.

هناك بعض الالتباس في التسميات المتعلقة بهذه الرواسب. يستخدم مصطلح الترافرتين على نطاق واسع في الولايات المتحدة لجميع رواسب كربونات المياه العذبة، بما في ذلك الترافرتين في الكهوف، وعادة ما تكون كثيفة بلورية وخشنة؛ ورواسب الينابيع الحارة، هي أيضاً كثيفة وبلورية خشنة؛ بينما رواسب مجاري المياه الباردة السطحية، عادة ما تكون مسامية ودقيقة الحبيبات وذات مواد نباتية وميكروبية مدمجة كبيرة. وفي أماكن أخرى، يطلق على الرواسب الأخيرة اسم التوفا. تتواجد رواسب الترافرتين والتوفا على نطاق واسع في جميع أنحاء العالم (Herman and Hubbard, 1990; Ford and Pedley, 1996). بعض هذه الرواسب ضخمة جداً. ومن الأمثلة على ذلك بحيرات بليت في كرواتيا، التي تغذيها الينابيع الكارستية وتثبتها سدود الترافرتين (Emeis, 1997; Kempe and Richenow, 1997). مثال على الترافرتين الكربوني الكبير المترسب من الينابيع الساخنة هو الينابيع في حديقة يلوستون الوطنية، وايومنغ (Barger, 1978؛ الشكل ٦-١٢).



الشكل ٦-١١ رواسب الترافرتين الضخمة، بحيرات بليتفيتش، كرواتيا. (الصورة من William B. White)

إذا كان ترسب الترافرتين يعتبر عملية كيميائية بحتة، فإن وجود الترافرتين في بعض الينابيع وغيابه في البعض الآخر يمكن تفسيره بالمسار الكيميائي الذي تتخذه مياه الينابيع عند فقدان ثاني أكسيد الكربون. إن الينابيع ذات المناخ المعتدل، وخاصة تلك التي تصب في أنظمة القنوات، يكون ضغط ثاني أكسيد الكربون فيها من ١٠-٢٠ مرة من الوسط الجوي، والعديد من هذه الينابيع غير مشبعة فيما يتعلق بالكالسيت. أما الينابيع الاستوائية والينابيع التي تغذيها مياه مستمدة من تربة غنية بالمواد العضوية فتكون ضغوط ثاني أكسيد الكربون فيها أعلى من ثاني أكسيد الكربون عندما تبدأ عملية إزالة الغازات وقد تكون أقرب إلى التوازن. ويزداد مؤشر التشبع عندما يتم تفريغ غاز ثاني أكسيد الكربون مع عدم وجود الكالسيت، بينما تظل العسره ثابتة. ويتطلب ذلك أن يكون مؤشر التشبع حوالي ٠.٥ أو أكبر وذلك لدفع تنوي الكالسيت في غياب المحفزات أو القوالب. كما هو موضح في الشكل ٦-١٣، تصل الينابيع المناخية المعتدلة النموذجية إلى ضغط ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي وبالتالي تصل لتوازن جديد قبل أن يبدأ ترسب الكالسيت. وبالتالي، لا يوجد عادةً أي ترافرتين في هذه الينابيع. أما الينابيع الاستوائية والينابيع ذات التحميل العالي لثاني أكسيد الكربون فتعبر حدود  $SIC = 0.5$ ، وبعد ذلك يؤدي فقدان ثاني أكسيد الكربون إلى ترسب الترافرتين.



الشكل ٦-١٢ ترسبات الترافرتين (التوفا) في ينابيع ماموث الحارة، منتزه يلوستون الوطني. (الصورة من William B. White).

نبح Falling Spring في مقاطعة أَلْغاني، فيرجينيا، يعتبر نبع حراري مع ترسبات واسعة من الحجر الجيري حيث ينحدر النبع من فوق جرف. وقد تمت دراسة ترسب الترافرتين بتفصيل كبير (J. and Lorah, 1986, 1987, 1988; Lorah and Herman, 1988 A). (Herman).

وترد مجموعة مختارة من بياناتهم في الجدول ٦-٣. تحتوي المياه الخارجة من الحوض عند أبعد نقطة استكشاف في كهف النهر الدافئ (C9) على محتوى ثاني أكسيد الكربون أعلى بـ ٢٦٤ مرة من الوسط الجوي. يتم تفريغ ثاني أكسيد الكربون على طول ممر الكهف. عند النقطة C3، حيث يتصل التيار الدافئ مع تيار بارد من المياه الكارستية العادية، ثم ينخفض ثاني أكسيد الكربون إلى ٩٨ مرة عن الأرض ولكن مع تغير بسيط آخر في كيمياء المياه. عند النقطة (S1) حيث يخرج التيار إلى السطح على شكل نبع متساقط، ينخفض ثاني أكسيد الكربون إلى ٤٥ ضعف الوسط الجوي. وترجع التغيرات المفاجئة في التركيب بين C3 و S1 بسبب اختلاط التيار الدافئ بالتيار البارد. بالنسبة للـ ٠,٨ كم التالية، النبع المتساقط عبارة عن مجرى سطحي يتدفق في قناة ذات انحدار لطيف. لم يتم ترسيب أي حجر جيري على الرغم من أن مؤشر التشبع هو ٠,٣٥ وانخفاض ضغط ثاني أكسيد الكربون إلى ١٠ أضعاف الوسط الجوي. عند ٠,٨ كم، يدخل المجرى في قناة وعرة شديدة الانحدار (F1)، ويصل إلى قمة شلال (F3)، ويهبط ٢٠ متراً إلى قاع الشلال (F4). تحتوي القناة أعلى وأسفل الشلال على رواسب ضخمة من الحجر الجيري. إزالة الغازات بسبب التدفق المضطرب والشلال توفر التشبع العالي اللازم لدفع ترسب الترافرتين. تقع النقطة F2 على بعد ٠,٥ كم في اتجاه المصب من الشلال، وعند هذه المسافة، يرتفع الرقم الهيدروجيني للمياه إلى ٨,٤٣ وينخفض ضغط ثاني أكسيد الكربون إلى ضعف الوسط الجوي.

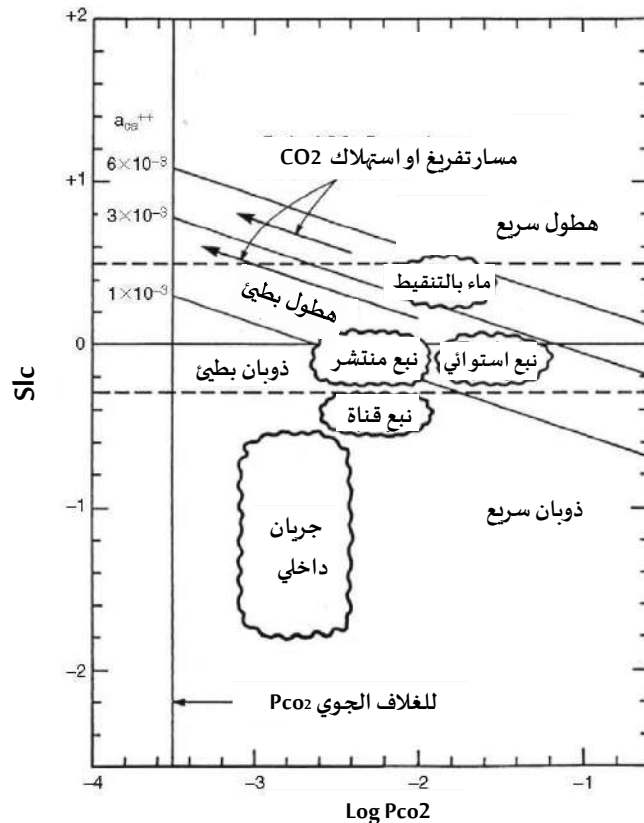
وتكون العمليات أكثر تعقيداً بكثير في التوفا السطحية، حيث تصبح العمليات الميكروبية مهمة (Pentecost, 2005). وتقوم البكتيريا الزرقاء على وجه الخصوص باستخلاص ثاني أكسيد الكربون من الماء كجزء من عملية الأيض. وهذا يقلل من ضغط ثاني أكسيد الكربون ويؤدي إلى ترسيب الترافرتين حتى في غياب تفريغ ثاني أكسيد الكربون.

### ٦-٣-٧ انتقال الملوثات في ينابيع الكربونات

طبقات المياه الجوفية الكربونية معرضة بشكل خاص للتلوث مع مدخلات مجاريها الغاطسة ومدخلات المجاري المائية وأنظمة القنوات السريعة التدفق. أولاً، بالطبع، هناك القليل من الرش أو لا يوجد رش على الإطلاق. مما يؤدي إلى الاجتياح المباشر للملوثات إلى المياه الجوفية. ثانياً، لا تنتشر الملوثات في طبقات المياه الجوفية الكارستية. بدلاً من الانتشار كعمود بطيء الحركة، كما هو معتاد لحركة الملوثات في طبقات المياه الجوفية المسامية، تبقى في نظام القناة وتتحرك مباشرة إلى النبع. علاوة على ذلك، قد يتم امتصاص الملوثات من الرواسب الطينية حيث تبقى مخزونة لفترات طويلة من الزمن إلى أن تندفع بفعل العواصف الاستثنائية. يعتمد انتقال الملوثات وتخزينها في طبقات المياه الجوفية الكارستية على الطبيعة الكيميائية للملوثات. وبعبارة عامة، يمكن تصنيف الملوثات على النحو التالي:

### المركبات القابلة للذوبان في الماء

تؤخذ المركبات القابلة للذوبان في الماء بشكل كامل في محلول بجميع التركيزات التي من المحتمل أن توجد بها البيئة الطبيعية. وهي تشمل الأيونات غير العضوية مثل النترات والنترات والأمونيا؛ والمركبات العضوية القطبية ذات الوزن الجزيئي المنخفض مثل الكحوليات، والأحماض الكربوكسيلية، والفينولات، والعديد من المواد الكيميائية الزراعية، والمستحضرات الصيدلانية. أيون النترات،  $\text{NO}_3$  هو ملوث واسع الانتشار في مياه الينابيع الكارستية. يتكون من أكسدة الأمونيا المنبعثة من الفضلات الحيوانية والبشرية، وغالباً ما تكون مع أيون النيتريت،  $\text{NO}_2$  كنوع بسيط. وبمجرد تكوينه، يكون النترات أيوناً محافظاً، بحيث يعتمد تركيزه في مياه الينابيع على التركيز فقط عند المصدر والتخفيف على طول مسار التدفق. وقد أجريت العديد من الدراسات حول التلوث بالنترات، مثل (Katz, Chelette, and Pratt (2004) and Panno and Kelly (2004). ويوجد أيون النترات في معظم مياه الينابيع الكربونية؛ أما الأمونيا والنترات فهما أقل شيوعاً. وتتأكسد الأمونيا والنترات بسهولة إلى نترات، لذلك فإن وجودها في مياه الينابيع يعتبر مؤشراً على وجود مصدر قريب للتلوث.



الشكل ٦-١٣ المسارات التطورية للمياه التي تفرز ثاني أكسيد الكربون. (من White, 1996).

جدول ٦-٣ التركيب الكيميائي لنبع Falling Spring على طول المجرى. White, 2007.

F2	F4	F3	F1	S1	C3	C7	C9	
21	21.5	23	23.8	25	27	32	35	T(C)
8.43	8.18	8.17	7.88	7.25	7	7.38	6.65	Ph
١٥١	163	163	165	164	204	217	232	Ca <sup>2+</sup>
28.8	29.1	27.3	27.9	27.9	36.2	45.4	47.3	Mg <sup>2+</sup>
5.1	4.5	4.4	5.3	4.4	6.1	6.8	6.9	Na <sup>2+</sup>
15.3	15.1	15.1	15.5	13.7	19.7	26.1	26.2	K <sup>2+</sup>
246	269	296	298	306	359	387	392	HCO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
277	277	277	275	279	327	435	431	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
1	1	1	1	1	1.2	1.6	1.6	F <sup>-</sup>
3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.4	4.2	4.2	Cl <sup>-</sup>
-3.14	-2.83	-2.77	-2.46	-1.8	-1.47	-1.8	-1.04	Log Pco <sub>2</sub>
2.1	4.3	4.9	10	45.9	98.1	45.9	264	Rel.CO <sub>2</sub>
+1.3	+1.15	+1.2	+0.94	+0.35	+0.26	+0.73	+0.08	Slc
ملاحظة : كل التركيزات بالمليجرام لكل لتر.								

تتراكم المواد الكيميائية الزراعية - الأسمدة والمبيدات الحشرية ومبيدات الأعشاب - في الينابيع وتتدفق إلى طبقات المياه الجوفية الكربونية أثناء العواصف. تظهر نبضات من المواد الكيميائية الزراعية في الينابيع الكارستية استجابة لتدفق العواصف (Mahler and Massei, 2007). فئة أخرى من المركبات العضوية التي أصبحت مصدر قلق هي المستحضرات الصيدلانية. حيث أن جزءاً كبيراً من الأدوية التي يتناولها الإنسان يمر عبر الجسم إلى نظام التخلص من النفايات. في المناطق الكارستية، يحمل الصرف من خزانات الصرف الصحي والمصادر ذات الصلة هذه المركبات إلى المياه الجوفية وإلى الينابيع الكارستية. تم العثور على الإستروجين الطبيعي ١٧-ب-إستراديول، في نبع ماراميك في ميسوري (Wicks, Kelley, and Peterson, 2004).

### سوائل الطور الخفيف الغير مائي

سوائل الطور الخفيف الغير مائي (LNAPLs) هي مركبات عضوية قابلة للذوبان قليلاً تطفو على الماء. ومن الأمثلة الأكثر شيوعاً الغاز ووقود الديزل وزيت التدفئة المنزلي والهيدروكربونات البترولية ذات الصلة. تطفو مركبات LNAPLs على الجداول والبرك الجوفية حيث تتسرب الجداول من خلال العوائق، مثل أكوام الانهيار. قد يؤدي ارتفاع منسوب المياه إلى دفع LNAPL المتجمع عبر العوائق لتكوين نبضة من الملوثات في النبع أو قد يدفع بالملوثات إلى أعلى في التشققات، حيث قد تظهر على السطح في القاع على شكل أبخرة سامة أو متفجرة. تميل LNAPLs إلى أن تكون محصورة في جيوب في أسقف القنوات، لذلك قد يستغرق تنظيف النظام وقتاً طويلاً (Ewers et al., 1991).

### السوائل الكثيفة الغير مائية الطور

السوائل الكثيفة الغير مائية الطور (DNAPLs) هي مركبات عضوية قابلة للذوبان قليلاً وأكثر كثافة من الماء. وهي في الغالب مركبات مكلورة (أو مبرومة). وهي تشمل المركبات المنخفضة الوزن والمتطايرة نسبياً مثل كلوريد الميثيلين،  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ؛ وثلاثي كلورو الإيثيلين،  $\text{C}_2\text{HCl}_3$  (TCE)؛ وبيركلورو الإيثيلين،  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  (PCE)، والتي تُستخدم على نطاق واسع كمذيبات ومزيلات للشحوم ومواد التنظيف الجاف. تُنقل هذه المواد بكميات من الصهاريج وغالباً ما يتم تخزينها في خزانات تحت الأرض. يمكن لحطام شاحنة أو خروج عربة صهريج عن مسارها أو تسرب من الصهريج أن يحقن هذه المواد مباشرة في طبقات المياه الجوفية الكارستية. تشمل السوائل غير الملوثة العضوية الثابتة الأخرى ثنائي الفينيل متعدد الكلور (PCBs). وهذه المركبات تعتبر سوائل زيتية غير متطايرة كانت تستخدم على نطاق واسع في المحولات الكهربائية وقد تم حقنها في طبقات المياه الجوفية الكارستية من خلال عمليات الإنقاذ التي تهدف إلى استعادة النحاس من المحولات الخردة. لسبب ما، كانت محاجر الحجر الجيري القديمة في كثير من الأحيان موقعاً لمثل هذه العمليات. واعتماداً على الكمية، يمكن أن تتراكم DNAPLs في برك تحت المياه في قيعان مجاري الكهوف وتغرق أيضاً في مسام الرواسب الكلسية لتحل محل المياه. قد لا تتدفق DNAPL في طبقات المياه الجوفية الكارستية تبعاً للتدرج الهيدروليكي للماء ولكن بدلاً من ذلك تتبع الشقوق ومستويات التطبيق. قد تظل الرواسب DNAPLs مخزنة في رواسب الكهوف المحجوزة حتى تتدفق العواصف الشديدة وتحرك كومة الرواسب. بشكل عام، يمكن أن يتبع الانتقال المحتمل لمواد DNAPLs عبر طبقة المياه الجوفية الكارستية العديد من المسارات ويستغرق وقتاً طويلاً جداً للوصول إلى نبع التصريف (Loop and White, 2001).

### المعادن

حوالي ثلثي العناصر الموجودة في الجدول الدوري عبارة عن فلزات، ولكن معظم هذه العناصر لا تكون مشاكل بيئية. لأنها نادرة في الطبيعة ونادراً ما تستخدم في المنتجات التجارية. هناك فلزات، الحديد والمنجنيز، يشكلان معظم الخلفية الطبيعية. ويوجد هذان المعدنان على نطاق واسع في الصخور الرسوبية، وتنتشر أكاسيدها المائية في رواسب الكهوف. يظهر النيكل والكروم في النفايات

الناتجة عن الطلاء بالكروم وأنشطة صناعة المعادن غير الحديدية الأخرى. يوجد الزنك والكاديوم المشابه كيميائياً ولكن الكاديوم الأكثرسمية على نطاق واسع كطلاءات "مجلفنة" على الأواني ومواد البناء والأشياء الأخرى التي من المحتمل أن ينتهي بها المطاف في مقالب القمامة. ويوجد الرصاص والزرنيخ والفاناديوم والمعادن الأخرى في المنتجات التجارية التي، عندما يتم التخلص منها كمخلفات يمكن أن تتسرب إلى أنظمة المياه الجوفية.

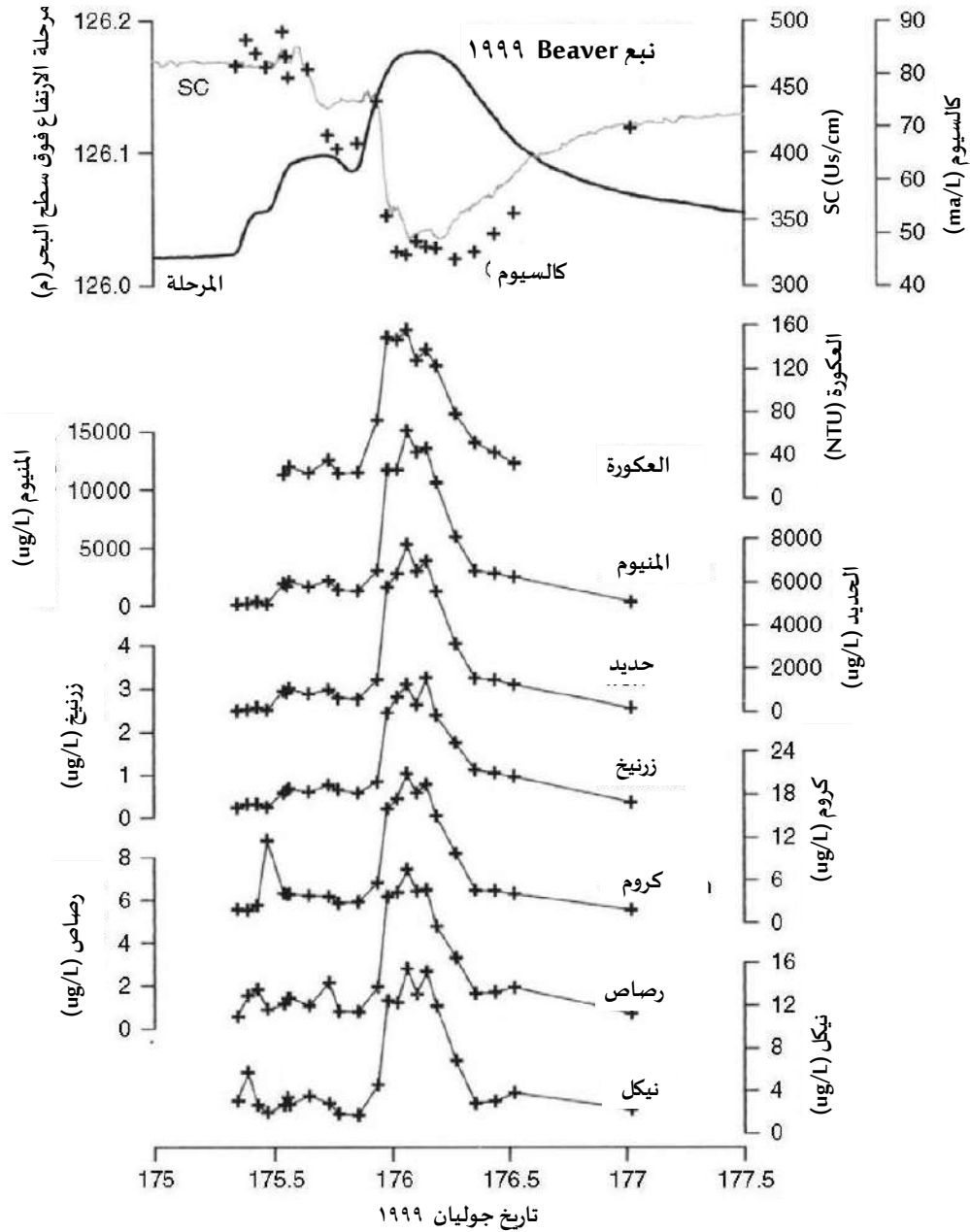
تشكل معظم المعادن أكاسيد وهيدروكسيدات و كربونات غير قابلة للذوبان بشكل كبير، مما يحد من ذوبانها في المياه الجوفية. ومع ذلك، فإن حدود الذوبان غالباً ما تكون أعلى من التركيزات المحددة كمعايير لمياه الشرب. يمكن امتزاز المعادن على الطين والجسيمات الأخرى وحملها عبر طبقات المياه الجوفية الكارستية كجسيمات معلقة أثناء تدفق العواصف. يتم توفير الدليل على هذه الآلية من خلال سلسلة من الرسوم البيانية الكيميائية التي تُظهر قمماً لتركيزات المعادن المختلفة تتطابق مع ذروة تركيز الألومنيوم، حيث أن الألومنيوم في تحليل العينات غير المفطرة يعتبر ممثلاً للمعادن الطينية العالقة (الشكل ١٤-٦).

### مسببات الأمراض

تنتقل الفيروسات والبكتيريا والبروتوزوا والكائنات الحية الأكبر حجماً بسهولة إلى طبقات المياه الجوفية الكارستية، بسبب غياب الرشح في التربة. وأكثرها انتشاراً هي بكتيريا القولونيات البرازية والعقدية البرازية. إن وجود هذه الكائنات الحية هو المؤشر الأكثر شيوعاً للتلوث من مياه الصرف الصحي أو الفضلات الحيوانية. أكثر ما يثير القلق بين الكائنات الأولية هو الجيارديا للمبلية التي يتم إطلاقها في شكل كيس في براز الحيوانات وهي موجودة في العديد من المياه السطحية. تحمل الجداول الغاطسة الكيسيات المستقرة إلى باطن الأرض، حيث تظهر مرة أخرى في الينابيع الكارستية. تنتقل مسببات الأمراض بحرية عبر طبقات المياه الجوفية الكارستية، إما ككائنات حرة أو، على الأرجح، ممتزة على جزيئات الرواسب الكلسية (Pronk et al., 2008).

### النفائات

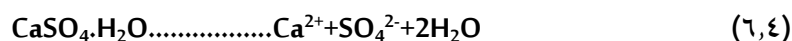
استخدم سكان الأرياف وحتى مجتمعات بأكملها، منذ زمن بعيد، الحفر الأرضية كمواقع للتخلص من النفائات. ويستخدم المزارعون بشكل روتيني المجاري للتخلص من الحيوانات النافقة والحاويات الفارغة من المواد الكيميائية الزراعية الخاصة بهم. وتوفر الجداول الغارقة ومصارف المجاري المائية الفريدة من نوعها بين طبقات المياه الجوفية مسارات يمكن أن تحمل النفائات السائبة لمسافات طويلة داخل طبقة المياه الجوفية. ويوفر ترسب القمامة على شكل "رواسب طينية" مصدراً لرشح وإطلاق الملوثات على مدى فترات طويلة من الزمن. تقع القمامة المنقولة أيضاً حيث يصعب أو يستحيل تنظيفها.



الشكل ٦-١٤ مخطط كيميائي للعاصفة لمختلف المعادن الثقيلة بالمقارنة مع هيدروجراف العاصفة. نبع بيفر ، غرب كنتاكي. (من Vesper and White, 2003).

#### ٦-٤ ينابيع الجبس

توجد أنظمة التصريف الكارستية بشكل شائع في الصخور الكربونية، ولكن الكارست تتطور أيضاً في الجبس. وعلى الرغم من أن الكارست الجبسي يوجد بشكل رئيسي في المناطق القاحلة وشبه القاحلة، إلا أنه يوجد على نطاق واسع في جميع أنحاء العالم (Klimchouk et al., 1996). وفيما يتعلق بضوابط التحكم في كيمياء مياه الينابيع، فإن للجبس تأثيراً أوسع بكثير ولا يقتصر على المناطق الكارستية الجبسية. يوجد الجبس على نطاق واسع كطبقات بينية ثانوية داخل الصخور الكربونية وفي الصخور الطفلية والرملية. الجبس هو المصدر المحتمل (إلى جانب البيريت المؤكسد ومعادن الكبريتيد الأخرى) للكثير من أيونات الكبريتات التي تظهر في معظم تحليلات مياه الينابيع حيث يذوب الجبس عن طريق تفاعل تفكك بسيط:



عند درجات حرارة أعلى ٥٨ درجة مئوية (٥٦ °C وفقاً لـ Melchoir و Langmuir) ودرجة حراره اقل إلى حد ما في وجود ما يكفي من الأملاح المذابة لخفض نشاط الماء، يفقد الجبس مياهه الناتجة من عملية إضافة الهيدروجين ومن التركيب البلوري ليصبح أنهيدريت،  $\text{CaSO}_4$ . لا يعتمد ذوبان الجبس بشدة على درجة الحرارة. فقابلية الذوبان يبلغ حدها الأقصى عند ٤٠ درجة مئوية وينخفض إلى النقطة الثابتة عند ٥٨ درجة مئوية، حيث يصبح الجبس والأنهيدريت، في حالة توازن. تستمر ذوبانية الجبس في الانخفاض في نطاق درجة الحراه المستقره الأعلى من ٥٨ درجة مئوية. وعليه فأن قابلية الأنهيدريت للذوبان تتراجع بقوة، وتتناقص مع ارتفاع درجة الحرارة. في مياه الجبس النقية، يقتصر تركيز  $\text{SO}_4$  على قيم تتراوح بين ١٤٠٠ ملغم/لتر، معتمدة على درجة الحرارة. تتسبب التركيزات العالية في ترسب الجبس. ومع ذلك، فإن مياه الكثير من الينابيع، وخاصة الينابيع المعدنية، تحتوي على كميات من كبريتات المغنيسيوم وكبريتات الصوديوم، وكلاهما قابل للذوبان بشكل كبير في الماء. يتم تحديد تركيزات كبريتات التوازن من خلال إجمالي المياه الكيمياء، وليس الجبس وحده.

#### ٦-٥ الينابيع المعدنية والينابيع الحرارية

تحتوي الينابيع المعدنية على تركيزات عالية من الأملاح الذائبة. والعديد من هذه الينابيع هي أيضاً ينابيع حرارية، حيث أن درجة حرارة مياه الينابيع أعلى من متوسط درجة الحرارة السنوية للمنطقة. وتتراوح درجة حرارتها من بضع درجات فوق درجة الحرارة المحيطة إلى درجة غليان الماء (أوفوق درجة غليان الماء في حالة بعض الينابيع البركانية). وغالباً ما يتم بناء المنتجعات الصحية حول الينابيع الحرارية والينابيع المعدنية بسبب الخصائص العلاجية المفترضة للمياه (Back et al., 1995; LaMoreaux and

يورد **الجدول ٦-٤** تحليلات لمجموعة صغيرة من الينابيع المعدنية. هذه الينابيع تعتبر (أو كانت) مواقع للمنتجات والمنتجات الصحية واستخدمت كمياه طبية كون المياه الدافئة مرغوبة للمنتجات الصحية. العنصر المفيد طبيًا هو التركيز العالي للكبريتات ، إلى جانب تركيز المغنيسيوم. يحتوي نبع بيدفورد على واحد من أعلى تركيزات المغنيسيوم في الينابيع المعدنية. يتدفق نبع بيدفورد من الحجر الجيري في درجة الحرارة المحيطة، وباستثناء المحتوى العالي من المواد الصلبة الذائبة، فإنه لا يختلف جوهريًا عن العديد من الينابيع الكارستية في جبال الأبلاش المطوية. كان المصدر الحراري للينابيع الحرارية في جبال الأبلاش موضوع بحث كبير لأنه لا يوجد مصدر بركاني معروف. ووفقًا ل **Hobba et al (1979)**،، الينابيع الحرارية في الأبلاش هي نتيجة التسخين الحراري الأرضي. يحتوي نبع الغليان (**الجدول ٦-٤**) على أعلى درجة حرارة وفقًا للحسابات تتطلب عمقًا أدنى لدوران المياه الجوفية يبلغ ١٦٠٠ م. كما تتطلب الينابيع أن تكون مسارات التدفق مفتوحة بما فيه الكفاية بحيث يمكن للمياه أن ترتفع من هذه الأعماق دون تبريد بسبب التلامس بالصخور القريبة من السطح.

جدول ٦-٤ بعض التحاليل الكيميائية النمذجية للينابيع المعدنية (2005) Boschetti et al.							
Boiler	BedFord	New Spa	Old Spa	BC	DBT	Telese	
39.9	10	40	40	53.3	31	20.1	T(C)
6.65	-	7.46	7.4	6.53	7.30	6.23	Ph
21	-	-	-	54.9	40.3	-	SiO <sub>2</sub>
132	558	96.7	68.13	488	162.5	42.3	Ca <sup>2+</sup>
40	146	16	31.6	67.9	25.4	68	Mg <sup>2+</sup>
7	< 5	-	-	325	133	100	Na <sup>2+</sup>
13	< 5	-	-	24.7	12.6	16	K <sup>2+</sup>
454	183	164	189	107	195	1617	HCO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
130	1764	140	144	1765	532	35.8	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
2.6	6	78	56.7	244	68	152	Cl <sup>-</sup>
ملاحظة : كل التركيزات بالمليجرام لكل لتر.							

## ٦-٥-١ الينابيع الكبريتية

تفرز الينابيع الكبريتية كبريتاً مخفضاً. وتتميز مياهها برائحة "الببيض الفاسد" الواضحة من  $H_2S$ . إن مصدر  $H_2S$  غير معروف في معظم الحالات ولكن يُعتقد أنه مشتق من البترول القريب. عندما يصل  $H_2S$  من العمق إلى المياه الجوفية المؤكسدة بالقرب من السطح، تنتج الأكسدة حمض الكبريتيك وأحياناً الكبريت الأصلي كخطوة وسيطة. العمليات الميكروبية مهمة في تفاعلات الأكسدة؛ وبالفعل، فإن علم الأحياء المجهرية للكهوف والينابيع الكبريتية مجال غني بالبحوث (Engel, 2007). وقد تم تقدير مياه الينابيع الكبريتية كمياه طبية. تشمل الينابيع ذات الكيمياء الكبريتية النشطة بشكل خاص التي تحفزها البكتيريا كهوف فراساسي في إيطاليا (Macalady et al., 2006)، وكهوف كين في وايومنغ (Bennett and Stern and Engel, 2004)، و Cueva de Villa، تاباسكو، المكسيك (Hose and Pizarowicz, 1999; Hose et al., 2000). تقع جميع هذه الكهوف في الحجر الجيري.

يكشف التحليل الكيميائي للمياه من كويفا دي فيلا لوز (الجدول ٦-٥) عن بعض المفاجآت. درجة الحرارة أعلى بقليل من درجة الحرارة المحيطة. يفرز النبع مياه مختلطة من بيكربونات كلوريد الكبريتات التي تكون مفرطة التشبع بالنسبة للكالسيوم وغير مشبعة بالنسبة للجبس. الشذوذ الوحيد هو تركيز  $H_2S$  المذاب والرقم الهيدروجيني بينما النبع قريب من التعادل. ومع ذلك، تحتوي بعض المياه التي تقطر من الحصائر البكتيرية على قيم أس هيدروجيني منخفضة تصل إلى الصفر. وعلى الرغم من أن الينابيع الكبريتية النشطة نادرة نسبياً، إلا أن فتحات المحاليل البكتيرية شائعة. وأصبح من المعترف به أن بعض أكبر الكهوف، على سبيل المثال، كهوف كارلسباد وليتشوغويلا، تم حفرها بواسطة حمض الكبريتيك الناتج عن أكسدة  $H_2S$  (Hill, 1994). تنتهي هذه إلى مجموعة الكهوف الهايبوجينية، المعترف بها الآن على نطاق واسع (Klimchouk, 2007).

## ٦-٥-٢ الينابيع المالحة والمختلطة

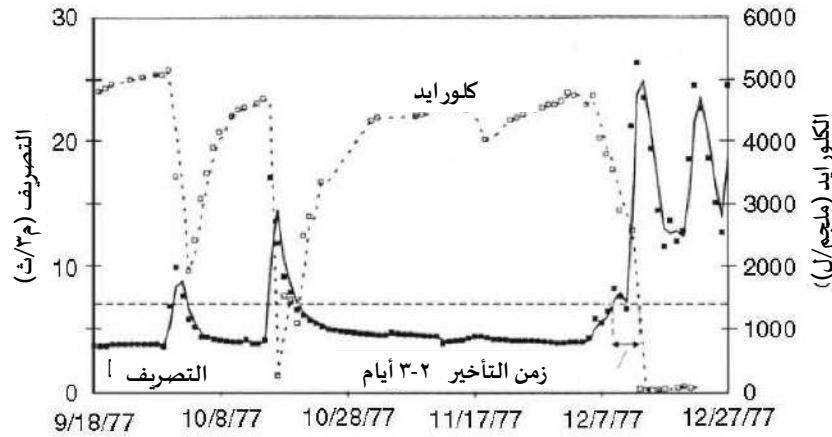
لكلوريد الصوديوم ومعظم أملاح الكلوريد الأخرى قابلية ذوبان عالية. يبلغ حد ذوبان كلوريد الصوديوم حوالي ٣٥,٥ في المائة من الوزن حسب درجة الحرارة. تحتوي العديد من الينابيع على تركيزات كبيرة من الكلوريد والفلزات القلوية كما هو موضح في التحليلات الواردة في الجداول. عندما تصل التركيزات إلى قيم مماثلة لمياه البحر (٣,٥ في المائة أو أعلى)، يشار إليها باسم المحاليل الملحية. أما الينابيع ذات التركيزات المتوسطة ولكن مع تركيزات كافية من كلوريد الصوديوم لإنتاج مذاق "مالح". تسمى مختلطة. قد تكون الآليات التالية الينابيع ذات المحتوى الملحي العالي:

١. الينابيع التي تحتوي على الملح المشتق من طبقات التبخير داخل مستجمع الينابيع.
٢. الينابيع الملوثة بمصادر بشرية المنشأ، وخاصة الملح المستخدم في إزالة الجليد من الطرق السريعة.
٣. الينابيع الساحلية المتأثرة بتسرب مياه البحر.
٤. ينابيع تصريف المحاليل الملحية لحقول النفط.

جدول ٦-٥ مثال على التركيب الكيميائي لينابيع الكبريت: مياه من كويفا فيلا لوز، توباسكو، المكسيك								
8	7	6	5	4	3	2	1	
28	28	28.1	28.1	28.1	28.1	28.3	27.5	T(C)
6.31	7.14	7.16	7	7.14	7.01	7.23	6.61	Ph
750	17.5	25	100	375	150	< 0.1	500	H <sub>2</sub> S
15	7	8	7	7	6	6	5	SiO <sub>2</sub>
285	393	407	424	417	394	383	396	Ca <sup>2+</sup>
65	88	78	61	69	80	97	81	Mg <sup>2+</sup>
-	-	-	-	-	-	477	484	Na <sup>2+</sup>
636	477	506	494	475	479	451	498	HCO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
520	910	940	920	940	980	980	940	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
735	803	792	807	782	767	792	814	Cl <sup>-</sup>
0.292	0.03	0.03	0.043	0.03	0.041	0.023	0.105	Pco <sub>2</sub> atm
-0.14	+0.65	+0.71	+0.56	+0.67	+0.52	+0.71	+0.13	SI <sub>cal</sub>
-0.54	-0.37	-0.35	-0.34	-0.33	-0.34	-0.35	-0.36	Si <sub>gyp</sub>
ملاحظة: كل التركيزات بالمليجرام لكل لتر.								

طورت طبقات المياه الجوفية الكربونية في المناطق الساحلية أنظمة قنوات تمتد تحت مستوى سطح البحر الحالي أثناء انخفاض مستوى البحر في العصر البليستوسيني. غمر ارتفاع منسوب مياه البحر بعض هذه القنوات، مما أدى إلى ظهور الينابيع قبالة الشاطئ. أما الينابيع الأخرى تقع على بعد مسافة ما داخل اليابسة ولكنها قد تفرز مياه معتدلة الملوحة. ويرد استعراض لهذه الأنواع من الينابيع من قبل (Fleury, Bakalowicz, and de Marsily, 2007). وقد يؤدي التصريف المتزايد للمياه العذبة أثناء تدفق العواصف إلى تخفيف المياه المالحة إلى مستويات مقبولة. (الشكل ٦-١٥). وبالتالي فإن جودة المياه في الينابيع الساحلية قليلة الملوحة هي مسألة خلط وليس كيمياء. هذه العملية قابلة للنمذجة. وقد تم إنشاء العديد من النماذج (على سبيل المثال،

(Lambrakis et al., 2000؛ Arfib and de Marsily, 2004؛ Maramathas, Pergialiotis, and Gialamas, 2006).



الشكل ٦-١٥ هيدروجراف ومخطط كيميائي لنبع أليروس في جزيرة كريست يوضح تخفيف المياه قليلة الملوحة عن طريق تدفق العواصف. (مقتبس من Lambrakis et al., 2000).

يسرد الجدول ٦-٦ تراكيب المياه من خمسة ينابيع يبدو أنها متأثرة من المحاليل الملحية لحقول النفط. الثلاثة الأولى من هذه هي مياه الكلوريد بيكربونات بتركيزات عالية من كل من كلوريد الصوديوم وبيكربونات الصوديوم. نبع Mercey Spring مختلطة قليلاً، وباستثناء كونها حرارية، لا تختلف كثيراً عن العديد من الينابيع الأخرى. يحتوي نبع النتن على تركيز كلوريد الصوديوم يبلغ ٣,٤٪، مما يجعلها قريبة جداً من تركيب مياه البحر. باستثناء نبع Mercey Spring، والبقية لديها تركيزات عالية من كبريتيد الهيدروجين، مما يشير إلى نفس البيئة البترولية كما هو موضح في السابق عن الينابيع الكبريتية.

### ٦-٥-٣ الينابيع الغازية من المصادر العميقة

ومن غير المعتاد بين الينابيع المعدنية تلك الينابيع المكربنة بشكل طبيعي. البيانات التحليلية لمجموعة من الينابيع في ساراتوجا في نيويورك، ومجموعة من الينابيع في مانيتو سبرينغز، كولورادو، ترد في الجدول ٦-٧.

تشترك المجموعتان من الينابيع في ضغط ثاني أكسيد الكربون، أعلى بكثير من الضغط المحيط بالسطح. كلاهما مياه بيكربونات. كما أن ينابيع ساراتوجا هي أيضاً ينابيع ملحية تحتوي على نسبة عالية من الصوديوم والكلوريد. إن تركيز الكبريتات في ينابيع ساراتوجا منخفض للغاية. ينابيع مانيتو هي في الأساس ينابيع بيكربونات مع تركيز أساسي للكبريتات. كان مصدر التركيز العالي لثاني أكسيد الكربون موضوع نقاش كبير. ويستبعد كل من التركيز واعتبارات نظائر الكربون المصادر الجوية والعضوية. كلتا المجموعتين من الينابيع تقعان على أنظمة صدع رئيسية، مما يشير إلى وجود مصدر عميق، من القشرة الأرضية أو الوشاح، لثاني أكسيد الكربون. ويمكن أن ينتج جزء كبير من محتوى البيكربونات من تفاعل ثاني أكسيد الكربون مع صخور الكربونات على طول مسار التدفق. وتكون درجات حرارة الينابيع أعلى بقليل من درجة الحرارة المحيطة على الأكثر. إذا كان هناك مصدر عميق فإن هجرة المياه

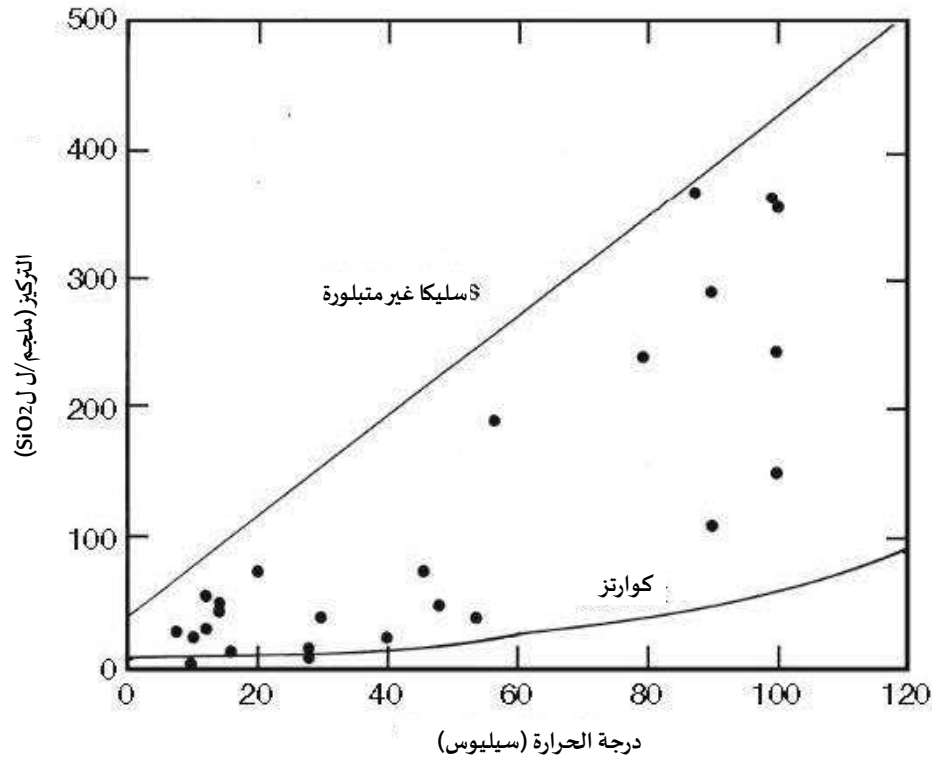
(أو الغازات) إلى أعلى الصدوع يجب أن تكون بطيئة بما فيه الكفاية لكي تصل المياه إلى درجة حرارة. وهناك أدلة قليلة على وجود تسخين على طول التدرج الحراري الأرضي.

جدول ٦-٦ التركيب الكيميائي لبعض الينابيع التي تفرز المحاليل الملحية لحقول النفط.					
Stinking Sp.	Mercey Sp.	Tolenas Sp.	Wilbur Sp.	Tuscan Sp.	
48	46	20	57	28.5	T(C)
6.7	8.6	6.7	7.2	8.4	Ph
60	-	0	178	172	H <sub>2</sub> S
48	75	75	190	15	SiO <sub>2</sub>
946	43	454	1.4	19	Ca <sup>2+</sup>
297	-	239	58	17	Mg <sup>2+</sup>
31	9	12	0.8	13	Sr <sup>2+</sup>
4.1	0	1.3	1	72	Ba <sup>2+</sup>
12600	830	6100	9146	7900	Na <sup>2+</sup>
571	7.1	180	460	59	K <sup>+</sup>
6.9	0.1	9	14	2	Li <sup>+</sup>
324	13	6340	7390	1060	HCO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
111	5	0.3	23	0	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
1.9	0.4	2	1.1	5	F <sup>-</sup>
21600	1300	7510	11000	11800	Cl <sup>-</sup>
15	0	20	15	5.3	Br <sup>-</sup>
1.3	20	3	16	1.3	I <sup>-</sup>
0	-	-	0.3	0.3	Mn
0.03	-	0.1	0.1	0.2	Fe
ملاحظة : كل التركيزات بالمليجرام لكل لتر					

● درجة الحرارة تتراوح من ٩-١٣ درجة مئوية.

## ٦-٥-٤ كيمياء الماء عند درجات الحرارة العالية

تعتمد جميع ثوابت التوازن لأي تفاعلات بين الماء والصخور في الأنظمة المغذية للينابيع على درجة الحرارة. علاوة على ذلك، تخضع بعض المعادن لتغيرات في الطور أو تفاعلات الجفاف مع ارتفاع درجة الحرارة، كما في حالة الجبس ومع ذلك، فإن تأثير زيادة درجة الحرارة في الغالب هو تغيير مزيج الأنواع المائية التي تنتج من تفاعلات التوازن. في درجات الحرارة المرتفعة تصبح العديد من المعادن أكثر قابلية للذوبان، ولان ثاني أكسيد الكربون أقل ذوبانية عند درجة الحرارة العالية، تنخفض قدره ذوبان الكالسيت والدولوميت عند نفس ضغط ثاني أكسيد الكربون. وعلى عكس اعتبارات التوازن، عادة ما تزداد معدلات التفاعلات بشكل كبير في درجات الحرارة العالية. مما يفسر سبب ظهور أدلة على وجود رد فعل بين الماء والصخور المضيفة في ينابيع المياه الساخنة أكثر بكثير من الباردة.

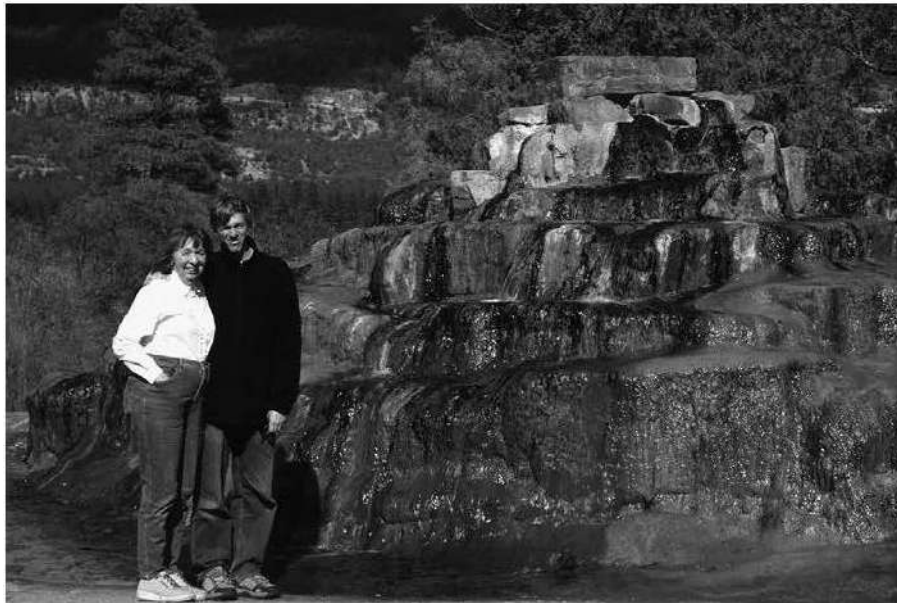


الشكل ٦-١٨ تركيزات  $\text{SiO}_2$  المأخوذة من الجداول ٦-١ و ٦-٤ و ٦-٥ إلى ٦-٩ كدالة لدرجة الحرارة.

بشكل عام، يزداد تركيز السيليكا الذائبة مع ارتفاع درجة الحرارة ولكن مع وجود مبعثر (الشكل ٦-١٦). وتشكل منحنيات الذوبان للكوارتز والسيليكا غير المتبلورة الحدين السفلي والعلوي على الرغم من أن اثنين من مياه السخان تقع فوق قمة الرسم البياني. إن زيادة قابلية الذوبان، وخاصة السيليكا، عند درجات الحرارة العالية تعني أن معظم الينابيع الحارة ترسب كميات كبيرة من المواد المعدنية (الشكل ٦-١٧) عندما تبرد المياه. تتكون العديد من هذه الرواسب من السيليكا المعاد ترسيبها على الرغم من أن بعضها يحتوي على كربونات. كما توجد أكاسيد الحديد والمنغنيز أيضاً.

#### ٦-٥-٥ الينابيع البركانية الحارة

يمكن أن تكون المياه الجوفية في المناطق البركانية النشطة التي تتسرب عبر المناطق المسامية العميقة شديدة السخونة وتنفذ من خلال فتحات لتشكل ينابيع حارة (الشكل ٦-١٨). التركيبات الكيميائية لبعض الينابيع في مناطق السخانات في الجدول ٦-٨. درجات الحرارة قريبة من درجة غليان الماء في الغلاف الجوي، كما هو متوقع لمناطق السخانات. تركيز السيليكا مرتفع، لكن تركيزات الأنواع الذائبة الأخرى هي منخفضة نسبياً، مما يشير إلى وقت تلامس قصير فقط مع الصخور الساخنة. يتراوح الأس الهيدروجيني من شبه متعادل إلى قلوي قليلاً. تتفاعل المياه الأخرى في المناطق البركانية النشطة بقوة مع الصخور وتفرز مياه شديدة الحموضة (الجدول ٦-٩). هذه المياه هي المسؤولة عن غليان "الأواني الطينية" والسماط المماثلة.



الشكل ٦-١٧ ترسبات الينابيع الحارة شمال دورانجو، كولورادو. (الصورة من William B. White)

جدول ٦-٨ التركيب الكيميائي لبعض ينابيع السخانات.( White et al 1963)						
Hveravellir	Haukadular	Geyser	Steamboat	Norris	Upper Basin	
90.5	100	101.5	89.2	84.5	94	T(C)
8.7	9.7	6.9	7.9	7.5	9.6	Ph
2.5	2.7	-	4.7	0	2.6	H <sub>2</sub> S
609	359	150	293	529	363	SiO <sub>2</sub>
2	0.4	40	5	5.8	0.8	Ca <sup>2+</sup>
0.5	0.5	0.2	0.8	0.2	0	Mg <sup>2+</sup>
0.003	0.02	0.3	0.5	0.4	0	Sr <sup>2+</sup>
156	233	350	653	439	352	Na <sup>2+</sup>
15	11	18	71	74	24	K <sup>+</sup>
0.2	0.2	2	7.6	8.4	5.2	Li <sup>+</sup>
112	0	29	305	27	0	HCO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
178	102	130	100	38	23	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
3.3	12	1.2	1.8	4.9	25	F <sup>-</sup>
63	126	482	865	744	405	Cl <sup>-</sup>
0	0.2	-	0.2	0.1	1.5	Br <sup>-</sup>
0	0	-	0.1	0	0.3	I <sup>-</sup>
0.55	0.89	-	0.5	-	0.2	Al
0	0	0.01	0.05	-	0	Mn
0.21	0.02	0.1	0.05	-	0.06	Fe
ملاحظة : كل التركيزات بالمليجرام لكل لتر.						

جدول ٦-٩ التركيب الكيميائي لبعض ينابيع البراكين الحامضية. (White et al 1963).

Locomotive	Bumpass Hell	Devils Kitchen	White Island	Green Dragon	
90	79	غليان	حار	87	T(C)
1.97	-	1.8	حمضي	2.47	Ph
30	14	1400	17	3.4	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
109	240	225	164	369	SiO <sub>2</sub>
2.2	6.5	47	2370	6.5	Ca <sup>2+</sup>
0	5.3	281	6770	0	Mg <sup>2+</sup>
2	32	12	7100	243	Na <sup>2+</sup>
3	13	5	926	61	K <sup>+</sup>
0	-	0	-	0	HCO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
758	718	5710	2170	454	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
15	1.1	0.5	57300	408	Cl <sup>-</sup>
2.4	31	1.4	1880	1.5	Al
-	-	1.4	24	-	Mn
-	18	63	10500	-	Fe <sup>2+</sup>
0.8	5.5	0	130	0.08	Fe <sup>3+</sup>
ملاحظة : كل التركيزات بالمليجرام لكل لتر.					



الشكل ٦-١٨ انفجار الماء المتصاعد من نبع ماء حار. بالقرب من جيسير، أيسلندا. (الصورة من William B. White).

تميل المياه إلى أن تكون مختزلة، وبعضها يحتوي على  $H_2S$ ، بحيث تظهر تركيزات عالية من الحديد الحديدي غير قابل للذوبان بشكل أساسي في الماء شبه المعتدل في رقمة الهيدروجيني ولكنه يصبح قابلاً للذوبان عند قيم الأس الهيدروجيني المنخفضة الموجودة في الينابيع. الظروف الاختزالية تنتج الحديد الحديدي، وهو أكثر قابلية للذوبان من حديد الحديد. ومن الغريب ضهورأيون الأمونيوم،  $NH_4$  أيضا.

## ٦-٦ - الاستنتاجات

توجد الينابيع في العديد من البيئات الجيولوجية ولكن كيميائيتها متشابهة بشكل مدهش. توجد نفس المجموعات من الكاتيونات والأنيونات في معظم مياه الينابيع. ما يميز ماء النبع عن الآخر هو:

١. التركيزات النسبية للأيونات السائدة،  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ .
٢. المزيغ النسبي من الأيونات القلوية،  $Na^+$ ،  $K^+$ ، والايونات الأرضية القلوية،  $Mg^{+2}$ ،  $Ca^{2+}$ .
٣. التركيز الكلي للأنواع المذابة.
٤. درجة الحرارة.
٥. وجود غازات ذائبة، وخاصة  $H_2S$  والزيادة في ثاني أكسيد الكربون.

## المراجع

- Arfib, B., de Marsily, G., 2004. Modeling the salinity of an inland coastal brackish karstic spring with a conduit-matrix model. Water Resour. Res. 40, W11506 doi:10.1029/2004WR003147.
- Back, W., Landa, E.R., Meeks, L., 1995. Bottled water, spas, and early years of water chemistry. Ground Water 33, 605–615.
- Barger, K.E., 1978. Geology and thermal history of Mammoth Hot Springs. Yellowstone National Park, Wyoming U.S. Geological Survey Bulletin 1444.
- Blatt, H., Middleton, G., Murray, R., 1980. Origin of Sedimentary Rocks. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

- Blount, C.W., Dickson, F.W., 1973. Gypsum-anhydrite equilibria in systems  $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$  and  $\text{CaSO}_4\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ . *Am. Mineral.* 58, 323–331.
- Boschetti, T., Venturelli, G., Toscani, L., Barbieri, M., Mucchino, C., 2005. The Bagni di Lucca thermal waters (Tuscany, Italy): An example of  $\text{Ca-SO}_4$  waters with high  $\text{Na/Cl}$  and low  $\text{Ca/SO}_4$  ratios. *J. Hydrol.* 307, 270–293.
- Bosch, R.F., White, W.B., 2004. Lithofacies and transport of clastic sediments in karst aquifers. In: Sasowsky, I.D., Mylroie, J. (Eds.), *Studies of Cave Sediments*. Kluwer Academic, New York, pp. 1–22.
- Busenberg, E., Plummer, L.N., 1982. The kinetics of dissolution of dolomite in  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  systems at 1.5 to 65 C and 0 to 1 atm  $\text{PCO}_2$ . *Am. J. Sci.* 282, 45–78.
- Drever, J.I., 1997. *The Geochemistry of Natural Waters*, third ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Dreybrodt, W., Gabrovšek, F., Romanov, D., 2005. *Processes of speleogenesis: A modeling approach*. *Carsologica* 4, ZRC Publishing, Karst Research Institute at ZRC SAZU, Postojna, Slovenia.
- Emeis, K.C., Richnow, H.H., Kempe, S., 1987. Travertine formation in Plitvice National Park, Yugoslavia: Chemical versus biological control. *Sedimentology* 34, 595–609.
- Engel, A.S., 2007. Observations on the biodiversity of sulfidic karst habitats. *Journal of Cave and Karst Studies* 69, 187–206.
- Engel, A.S., Stern, L.A., Bennett, P.C., 2004. Microbial contributions to cave formation: New insights into sulfuric acid speleogenesis. *Geology* 32, 369–372.
- Ewers, R.O., Duda, A.J., Estes, E.K., Idstein, P.J., Johnson, K.M., 1991. The transmission of light hydrocarbon contaminants. In: *Proceedings of the Third Conference on Hydrogeology, Ecology, Monitoring and Management of Ground Water in Karst Terranes*. National Ground Water Association, Nashville, TN, pp. 287–305.
- Fleury, P., Bakalowicz, M., de Marsily, G., 2007. Submarine springs and coastal karst aquifers: A review. *J. Hydrol.* 339, 79–92.
- Ford, T.D., Pedley, H.M., 1996. A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth-Sci. Rev.* 41, 117–175.
- Hem, J.D., 1985. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Waters*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254.
- Herman, E.K., Tancredi, J.H., Toran, L., White, W.B., 2007. Mineralogy of suspended sediment in three karst springs. *Hydrogeology Journal* 15, 255–266.

- Herman, E.K., Toran, L., White, W.B., 2008. Threshold events in spring discharge: Evidence from sediment and continuous water level measurement. *J. Hydrol.* 351, 98–106.
- Herman, J.S., Lorah, M.M., 1986. Groundwater geochemistry in Warm River Cave, Virginia. *National Speleological Society Bulletin* 48, 54–61.
- Herman, J.S., Lorah, M.M., 1987. CO<sub>2</sub> outgassing and calcite precipitation in Falling Spring Creek, Virginia, U.S.A. *Chem. Geol.* 62, 251–262.
- Herman, J.S., Lorah, M.M., 1988. Calcite precipitation rates in the field: Measurement and prediction for a travertine-depositing stream. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 2347–2355.
- Herman, J.S., White, W.B., 1985. Dissolution kinetics of dolomite: Effects of lithology and fluid flow velocity. *Geochim. Cosmochim. Acta* 49, 2017–2026.
- Herman, J.S., Hubbard Jr., D.A., 1990. Travertine-marl: Stream deposits in Virginia. Virginia Division of Mineral Resources Publication 101, Charlottesville, VA.
- Hess, J.W., 1974. Hydrochemical investigations of the Central Kentucky Karst aquifer system. Ph.D. thesis, The Pennsylvania State University.
- Hill, C.A., 1994. Sulfuric acid speleogenesis of Carlsbad Cavern and its relationship to hydrocarbons, Delaware Basin, New Mexico and Texas. *AAPG Bull.* 76, 1685–1694.
- Hobba, W.A., Chemerys, J.C., Fisher, D.W., Pearson Jr., F.J., 1977. Geochemical and hydrologic data for wells and springs in thermal-spring areas of the Appalachians. *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations* 77–25.
- Hobba, W.A., Fisher, D.W., Pearson Jr., F.J., Chemerys, J.C., 1979. Hydrology and geochemistry of thermal springs of the Appalachians. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1044-E.
- Hose, L.D., Pisarowicz, J.A., 1999. Cueva de Villa Luz, Tabasco, Mexico: Reconnaissance study of an active sulfur spring cave and ecosystem. *Journal of Cave and Karst Studies* 61, 13–21.
- Hose, L.D., Palmer, A.N., Palmer, M.V., Northup, D.E., Boston, P.J., DuChene, H.R., 2000. Microbiology and geochemistry in a hydrogen-sulphide-rich karst environment. *Chem. Geol.* 169, 399–423.
- Karimi, H., Raeisi, E., Bakalowicz, M., 2005. Characterizing the main karst aquifers of the Alvand basin, northwest of Zagros, Iran, by a hydrochemical approach. *Hydrogeology Journal* 13, 787–799.

- Katz, B.G., Hornsby, H.D., Bohlke, J.F., Mokray, M.F., 1999. Sources and chronology of nitrate contamination in spring waters, Suwannee River Basin, Florida. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99–4252.
- Katz, B.G., Chelette, A.R., Pratt, T.R., 2004. Use of chemical and isotopic tracers to assess nitrate contamination and groundwater age, Woodville Karst Plain, USA. *J. Hydrol.* 289, 36–61.
- Klimchouk, A., 2007. Hypogene speleogenesis: Hydrogeological and morphogenetic perspective. National Cave and Karst Research Institute Special Paper No. 1.
- Klimchouk, A., Lowe, D., Cooper, A., Sauro, U., 1996. Gypsum karst of the world. *International Journal of Speleology* 25.
- Lambrakis, N., Andreou, A.S., Polydoropoulos, P., Georgopoulos, E., Bountis, T., 2000. Nonlinear analysis and forecasting of a brackish karstic spring. *Water Resour. Res.* 36, 875–884.
- LaMoreaux, P.E., Tanner, J.T., 2001. *Springs and Bottled Waters of the World*. Springer, Berlin.
- Langmuir, D., 1971. The geochemistry of some carbonate ground waters in central Pennsylvania. *Geochim. Cosmochim. Acta* 35, 1023–1045.
- Langmuir, D., 1997. *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Langmuir, D., Melchior, D., 1985. The geochemistry of Ca, Sr, Ba and Ra sulfates in some deep brines from the Palo Duro Basin, Texas. *Geochim. Cosmochim. Acta* 49, 2423–2432.
- Liu Zaihua, Groves, C., Yuan Daoxian, Meiman, J., Jiang Guanghui, He Shiyi and Li Qiang, 2004. Hydrochemical variations during flood pulses in the south-west China peak cluster karst: Impacts of CaCO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> interactions. *Hydrologic Processes*, v. 18, pp. 2423–2437.
- Lohman, S.W., 1938. Ground water in south-central Pennsylvania. Pennsylvania Topographic and Geologic Survey Bulletin W-5, Harrisburg, PA.
- Loop, C.M., White, W.B., 2001. A conceptual model for DNAPL transport in karst ground water basins. *Ground Water* 39, 119–127.
- Lorah, M.M., Herman, J.S., 1988. The chemical evolution of a travertine-depositing stream: Geochemical processes and mass transfer reactions. *Water Resour. Res.* 24, 1541–1552.
- Luiszer, F.G., 1994. Speleogenesis of Cave of the Winds, Manitou Springs, Colorado. Karst Waters Institute Special Publication 1. Karst Waters Institute, Charles Town, WV, pp. 91–106.

- Macalady, J.L.L., Lyon, E.H., Koffman, B., Albertson, L.K., Meyer, K., Galdenzi, S., et al., 2006. Dominant microbial populations in limestone-corroding stream biofilms, Frasassi cave system, Italy. *Appl. Environ. Microbiol.* 72, 5596–5609.
- Mahler, B., Massei, N., 2007. Anthropogenic contaminants as tracers in an urbanizing karst aquifer. *J. Contam. Hydrol.* 91, 81–106.
- Maramathas, A., Pergialiotis, P., Gialamas, I., 2006. Contribution to the identification of the sea intrusion mechanism of brackish karst springs. *Hydrogeology Journal* 14, 657–662.
- Martinez, M.I., White, W.B., 1999. A laboratory investigation of the relative dissolution rates of the Lirio Limestone and the Isla de Mona Dolomite and implications for cave and karst development on Isla de Mona. *Journal of Cave and Karst Studies* 61, 7–12.
- Moral, F., Cruz-Sanjulia 'n, J.J., Olias, M., 2008. Geochemical evolution of groundwater in the carbonate aquifers of Sierra de Segura (Betic Cordillera, southern Spain). *J. Hydrol.* 360, 281–296.
- Morel, F.M.M., Hering, J.G., 1993. *Principles and Applications of Aquatic Chemistry*. John Wiley, New York.
- Morse, J.W., Arvidson, R.S., 2002. The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals. *Earth-Sci. Rev.* 58, 51–84.
- Panno, S.V., Kelly, W.R., 2004. Nitrate and herbicide loading in two groundwater basin of Illinois' sinkhole plain. *J. Hydrol.* 290, 229–242.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 2008. User's guide to PHREEQC (version 2)—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Available at: [wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC\\_coupled/phreeqc/html/final/html](http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/html/final/html).
- Paternoster, M., Mongelli, G., 2000. Hydrochemistry of the Telesse spring, southern Apennines, Italy. *Mineral. Petrogr. Acta* 43 167–178.
- Pentecost, A., 2005. *Travertine*. Springer-Verlag, Berlin.
- Plummer, L.N., Wigley, T.M.L., Parkhurst, D.L., 1978. The kinetics of calcite dissolution in CO<sub>2</sub>–water systems at 5 to 60 °C and 0.0 to 1.0 atm CO<sub>2</sub>. *Am. J. Sci.* 278, 179–216.
- Pokrovsky, O.S., Schott, J., 2001. Kinetics and mechanism of dolomite dissolution in neutral to alkaline solutions revisited. *Am J. Sci.* 301, 597–626.

- Pokrovsky, O.S., Golubev, S.V., Schott, J., 2005. Dissolution kinetics of calcite, dolomite and magnesite at 25 C and 0 to 50 atm pCO<sub>2</sub>. *Chemical Geology* 217, 239–255.
- Pronk, M., Goldscheider, N., Zopfi, J., Zwahlen, F., 2008. Percolation and particle transport in the unsaturated zone of a karst aquifer. *Ground Water*. doi: 10.1111/j.1745-6584.2008.00509.x.
- Putnam, G.W., Young, J.R., 1985. The bubbles revisited: The geology and geochemistry of “Saratoga” mineral waters. *Northeast Geol.* 7, 53–77.
- Ryan, M., Meiman, J., 1996. An examination of short-term variations in water quality at a karst spring in Kentucky. *Ground Water* 34, 23–30.
- Shuster, E.T., 1970. Seasonal variations in carbonate spring water chemistry related to ground water flow. M.S. thesis, The Pennsylvania State University.
- Stumm, W., Morgan, J.J., 1996. *Aquatic Chemistry*, third ed. John Wiley, New York.
- Torija Isasa, E., Orza ´ez Villa-Nueva, T., Garcı ´a Mata, M., Tenorio Sanz, D., de Pradena Lobo ´n, J.M., 2002. Ana ´lisis fı ´sico-quı ´mico de las aguas del Balneario de “Alhama de Granada” (Granada). *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia* 68, 359–371.
- Troester, J.W., 1994. The geochemistry, hydrogeology, and geomorphology of the Rio Camuy drainage basin, Puerto Rico: A humid tropical karst. Ph.D. thesis, The Pennsylvania State University.
- Vesper, D.J., White, W.B., 2003. Metal transport to karst springs during storm flow: An example from Fort Campbell, Kentucky/ Tennessee, USA. *J. Hydrol.* 276, 20–36.
- Waring, G.A., 1965. Thermal springs of the United States and other countries of the world—A summary. U.S. Geological Survey Professional Paper 492.
- White, D.E., Hem, J.D., Waring, G.A., 1963. Chemical composition of subsurface waters. U.S. Geological Survey Professional Paper 440-F.
- White, W.B., 1997. Thermodynamic equilibrium, kinetics, activation barriers, and reaction mechanisms for chemical reactions in karst terrains. *Env. Geol.* 30, 46–58.
- White, W.B., 2002. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Eng. Geol.* 65, 85–105.
- Wicks, C., Kelley, C., Peterson, E., 2004. Estrogen in a karstic aquifer. *Ground Water* 42, 384–389.

Winston, W.E., Criss, R.E., 2004. Dynamic hydrologic and geochemical response in a perennial karst spring. Water Resour. Res. 40, W05106.

Wood, W.W., Low, W.H., 1988. Solute geochemistry of the Snake River Plain regional aquifer system, Idaho and eastern Oregon. U.S. Geological Survey Professional Paper 1408-D.

## معالجة مياه الينابيع

## ٧-١ مقدمة

يحافظ الماء على الحياة. فهو يحرك العمليات الطبيعية. وهو مكوّن أساسي أو يُستخدم في كل مسعى بشري، سواء كان منزلياً أو زراعياً أو صناعياً. وفرة الماء نعمة وندرته نقمة تثير النزاعات والمعارك، بل وتنتهي الإمبراطوريات. ولا يمكن المبالغة في أهميتها في الماضي والمستقبل. في حين أن إمدادات المياه الطبيعية ثابتة بشكل أساسي، إلا أن الطلب عليها يزداد مع ازدياد عدد السكان. لذلك، يجب الاستفادة من كل مصدر للمياه على أكمل وجه.

كما تمت مناقشته في الفصل ٦، فإن الينابيع التي تتدفق من أنواع مختلفة من الصخور لها تركيبات كيميائية مختلفة. وقد يكون لها نوعية مياه شديدة التباين، سواء على المدى الطويل أو القصير. على سبيل المثال، الينابيع الناشئة من الصخور النارية عادةً ما تحتوي على محتوى صلب غير عضوي مذاب أقل من تلك التي تنشأ من الحجر الجيري، أو الصخور الرسوبية أو التربة. وعادة ما تحتوي الينابيع الناشئة من التربة ذات المستويات العالية من المواد العضوية على تركيزات أعلى من المركبات العضوية الذائبة ولون مياه ملحوظ. ولكن بشكل عام، تبقى الطبيعة الكيميائية والفيزيائية لمياه العديد من الينابيع مستقرة نسبياً مع مرور الوقت. الاستثناءات الملحوظة هي الينابيع التي تنشأ من التكوينات الكارستية، حيث أنها تتأثر بسرعة أكبر بالوقائع فوق سطح الأرض مثل العواصف والأنشطة البشرية، بما في ذلك الزراعة والممارسات غير السليمة للتخلص من النفايات. وهذا لأن مسارات تدفقها الأساسية غالباً ما تكون عبارة عن شقوق وكسور وقنوات داخل طبقات الصخور وبينها.

إن التباين في التدفق وحجم التخزين في النبع الكارستي، بالإضافة إلى مسافات الانتقال واستخدام الأراضي في منطقة التغذية يمكن أن يجعل النبع عرضة بشكل خاص للتلوث البشري المنشأ. وقابلية التأثر هذه تزيد من تقلب جودة المياه وتعقيد المعالجة التي قد تكون مطلوبة قبل استخدام مياه الينابيع.

وتشمل الملوثات البشرية المنشأ، والتي عادة ما تكون مركبات عضوية، المواد الكيميائية الصناعية، ومكونات الوقود، والإمدادات الزراعية مثل المبيدات الحشرية والأسمدة، ومؤخراً المواد الصيدلانية. وعادة ما تكون هذه المركبات مستقرة في المرحلة الذائبة.

لهذا السبب، يجب أن تكون طرق معالجة المياه كيميائية أو ميكانيكية نشطة، مما يزيد من تكاليفها الرأسمالية والتشغيلية مقارنةً بالتقنيات التقليدية.

يجب أن يُنظر إلى معظم الينابيع التي يُنظر إليها لإمدادات المياه في البداية على أنها تتأثر بالمياه السطحية (أو، كما تسمى في بعض البلدان، المياه الجوفية تحت التأثير المباشر، GWUDI)، وبالتالي تخضع للوائح المطبقة على معالجة المياه السطحية. تصنف المياه الجوفية ومياه الينابيع على أنها مياه جوفية تحت التأثير المباشر إذا اتصفت بأي مما يلي:

١. التواجد الكبير للجسيمات أو الحشرات أو الكائنات الحية الكبيرة الأخرى أو الطحالب أو مسببات الأمراض ذات القطر الكبير، مثل الجيارديا اللبيلية أو الكريبتوسبورديوم.

٢. التحولات الكبيرة والسريعة نسبياً في خصائص المياه، مثل التعكر أو درجة الحرارة أو التوصيل أو الأس الهيدروجيني، والتي ترتبط ارتباطاً وثيقاً بالظروف المناخية أو ظروف المياه السطحية.

الغرض من لوائح GWUDI في الولايات المتحدة هو حماية الصحة العامة. توجد الجيارديا اللبيلية والكريبتوسبورديوم طفيليات عادة في المياه السطحية. وتدخلان إلى البيئة من خلال التلوث البرازي، مثل مياه الصرف الصحي أو فضلات الحيوانات. وعندما تشق هذه الطفيليات طريقها إلى مياه الينابيع يمكن أن تتسبب في تفشي أمراض معوية شديدة، بما في ذلك الإسهال أو الغثيان أو تقلصات في المعدة. وعلى الرغم من أنها لا تشكل خطراً كبيراً على معظم الأشخاص، إلا أنها قد تكون قاتلة للأشخاص الذين يعانون من ضعف المناعة والضعف. ومن الصعب للغاية قتل الجيارديا اللبيلية والكريبتوسبورديوم باستخدام كميات الكلور التقليدية الكافية لتدمير البكتيريا. لذلك يجب على معالجة GWUDI بشكل أكثر شمولاً من معظم المياه الجوفية المستخرجة من الآبار العميقة أو الارتوازية.

وقد طورت وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) إجراءً لتحديد ما إذا كانت المياه الجوفية تحت التأثير المباشر للمياه السطحية باستخدام تحليل الجسيمات المجهرية (MPA). يحدد تحليل الجسيمات المجهرية للكائنات الحية التي تتواجد في المياه السطحية والتي يشيرونها في المياه الجوفية بوضوح إلى اختلاطهما معا (U.S. Environmental Protection Agency, 1991, 1992, 1998).

كما تمت مناقشته في الفصلين ٦ و ٨، فإن التعكر والتلوث الميكروبيولوجي المرتبط به يمثل المخاوف الرئيسية فيما يتعلق بجودة مياه الشرب في العديد من الينابيع ومعظم الينابيع الكارستية، الصغيرة والكبيرة. وبالتالي، وبالتالي فهي الهدف الرئيسي لمعالجة مياه الينابيع للاستخدام الصالح للشرب في معظم الحالات. يمكن الاطلاع على طبيعة وأصل التعكر والتلوث الميكروبيولوجي للمياه الجوفية بشكل عام في الكتب حول كيمياء المياه البيئية (على سبيل المثال، Matthes, 1982; Drever, 1988; Appelo and Postma, 2005). سنناقش بإيجاز فيما يلي بعض العناصر الرئيسية للتقييم الأولي لجودة مياه الينابيع لأغراض الشرب، باستخدام أدوات ميدانية محمولة وتحاليل مخبرية بسيطة. في بعض الأحيان تستخدم بالتبادل أو بشكل غير متسق، مما قد يتسبب في حدوث ارتباك أو حتى تقييمات خاطئة. ويجب أيضاً أن تكون العناصر نفسها بشكل متكرر (في حالات الأنظمة العامة الصغيرة أو مستخدمي

الينابيع الفردية) أو بشكل مستمر (في حالة أنظمة الإمداد العامة الكبيرة) في كل من المياه الخام (المؤثرة) المياه المعالجة (النفائات السائلة).

■ إجمالي المواد الصلبة الذائبة يسمى التركيز الكلي للمواد الذائبة في المياه الجوفية بالمواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS). يتم تحديده عادةً عن طريق وزن البقايا الجافة بعد تسخين الماء عادةً إلى ١٠٣ أو ١٨٠ درجة مئوية (تستخدم درجة الحرارة الأعلى للتخلص من المزيد من الماء المتبلور). يمكن أيضًا حساب TDS إذا كانت تركيزات الأيونات الرئيسية معروفة. ومع ذلك، بالنسبة لبعض أنواع المياه، قد تكون هناك حاجة إلى قائمة واسعة من التحليلات للحصول على الإجمالي بدقة. أثناء التبخير، يتم ترسيب ما يقرب من نصف أيونات كربونات الهيدروجين في صورة كربونات والنصف الآخر يتسرب في صورة ماء وثاني أكسيد الكربون. ويُؤخذ هذا الفقد في الاعتبار بإضافة نصف كمية  $\text{HCO}_3$  إلى بقايا التبخر (الجافة). بعض الفقد الآخر، مثل ترسيب الكبريتات في صورة جبس والتطاير الجزئي للأحماض والنيتروجين والبورون والمواد العضوية، قد يساهم في التباين بين المواد الصلبة الذائبة الكلية المحسوبة والمقاسة (Kresic, 2009).

■ التوصيلية النوعية يمكن تقسيم المواد الصلبة والسوائل التي تذوب في الماء إلى إلكتروليات وغير إلكتروليات. تتفكك الإلكتروليات، مثل الأملاح والقواعد والأحماض، إلى أشكال أيونية (أيونات موجبة وأيونات سالبة الشحنة) توصل التيار الكهربائي. أما الغير إلكتروليات غير الكهربائية، مثل السكر والكحوليات والعديد من المواد العضوية، توجد في المحلول المائي في صورة جزيئات غير مشحونة ولا توصل تيارًا كهربائيًا. تُسمى قدرة ١ سم ٣ من الماء لتوصيل التيار الكهربائي بالتوصيل النوعي (أو في بعض الأحيان ببساطة التوصيلية، على الرغم من اختلاف الوحدات). التوصيلية هي مقلوب المقاومة وتُقاس بوحدات تسمى سيمن (النظام الدولي) أو 1 mho سيمن يساوي ١ mho؛ واسم mho مشتق من وحدة المقاومة، أوم، بتهجئة الاسم بالعكس). يُعبّر عن التوصيل النوعي بالصيغة سيمن لكل سنتيمتر أو mho لكل سنتيمتر. نظرًا لأن mho عادةً ما يكون كبير جدًا بالنسبة لمعظم المياه الجوفية يتم قياس التوصيل النوعي بوحدة الميكروموس لكل سنتيمتر أو ميكروسيمن لكل سنتيمتر (mS/cm)، مع ضبط قراءات الجهاز على ٢٥ درجة مئوية، بحيث تكون الاختلافات في التوصيل دالة على فقط تركيز ونوع المكونات الذائبة الموجودة (درجة حرارة الماء لها أيضًا تأثير كبير على التوصيل). للحصول على تقدير أولي (تقريبي) للمواد الصلبة الذائبة الكلية، بوحدة الملليغرام لكل لتر في المياه العذبة الصالحة للشرب، يمكن ضرب التوصيل النوعي بالميكروموس لكل سنتيمتر في ٠,٧. وتبلغ الموصلية النوعية للماء النقي ٠,٠٥٥ ميكروموس عند ٢٥ درجة مئوية، والماء المقطر في المختبر ما بين ٠,٥ و ٥ ميكروموس ومياه الأمطار عادة ما بين ٥ و ٣٠ ميكروموس والمياه الجوفية الصالحة للشرب من ٣٠ إلى ٢٠٠٠ ميكروموس ومياه البحر من ٤٥٠٠ إلى ٥٥٠٠٠ ميكروموس ومياه حقول النفط المالحة تحتوي عادةً على أكثر من ١٠٠,٠٠٠ ميكروموس (Davis and DeWiest, 1991).

■ الملوحة، غالباً ما يستخدم مصطلح الملوحة للإشارة إلى إجمالي الأملاح الذائبة (الأنواع الأيونية) في المياه الجوفية، في سياق جودة المياه للاستخدامات الزراعية أو الاستهلاك البشري والحيواني. وقد تم اقتراح تصنيفات مختلفة للملوحة،

استناداً إلى أملاح معينة ونسبها (انظر [Matthess 1982](#)). أحد المشاكل مع مصطلح الملوحة هي أن الطعم المالح قد يكون ملحوظاً بالفعل عند تركيزات أعلى إلى حد ما من كلوريد الصوديوم (على سبيل المثال، ٣٠٠-٤٠٠ مجم/لتر)، على الرغم من أن التركيز الكلي لجميع الأملاح الذائبة قد لا "يؤهل" مياه جوفية معينة لاعتبارها مالحة. في الممارسة العملية، من الشائع تسمية المياه التي تحتوي على أقل من ١٠٠٠ ملليغرام لكل لتر (١ غرام/لتر) من المواد الصلبة الذائبة عذبة والمياه التي تحتوي على أكثر من ١٠,٠٠٠ ملغم/لتر مالحة. المياه قليلة الملوحة، والتي أصبحت أكثر أهمية لإمدادات المياه في جميع أنحاء العالم، وتتراوح نسبة المواد الصلبة الذائبة فيها بين ٢٠٠٠ ملليغرام/لتر و ١٠,٠٠٠ ملليغرام/لتر.

## ٧-٢ معايير مياه الشرب

### ٧-٢-١ معايير مياه الشرب الأولية

اللوائح الوطنية لمياه الشرب هي معايير واجبة النفاذ قانوناً وتنطبق على أنظمة المياه العامة. تعمل المعايير الأولية على حماية جودة مياه الشرب من خلال الحد من مستويات الملوثات المحددة التي يمكن أن تؤثر سلباً على الصحة العامة والمعروف أو المتوقع وجودها في المياه. وتتخذ هذه المعايير شكل الحد الأقصى لمستويات الملوثات (MCLs) أو تقنيات المعالجة. يجب أن تكون هذه المعايير عند نقطة الاستلام إلى أي مستخدم للنظام العام (أي نقطة الاستخدام أو نقطة التصريف من نظام توزيع المياه) أو، في بعض الحالات، في نقاط مختلفة في جميع أنحاء نظام التوزيع ([Environmental Protection Agency, 2003.U.S](#)). وبمجرد اختيار ملوثاً للتنظيم، فالهدف فحص التأثيرات الصحية للملوث ووضع هدف للحد الأقصى لمستوى الملوثات (MCLG). وهو الحد الأقصى لمستوى الملوث في مياه الشرب الذي لن تحدث عنده أي آثار ضارة معروفة أو متوقعة على الصحة والذي يسمح بهامش أمان كافٍ. لا تراعي معايير الحد الأقصى لمستوى الملوثات الرئيسية القصوى التكلفة والتقنيات. وقد تكون أهداف الصحة العامة غير قابلة للتنفيذ. وعند وضع معايير الحد الأدنى للملوثات العضوية الثابتة، من الأهمية دراسة حجم وطبيعة السكان المعرضين للملوث وطول فترة التعرض وتركيزه. نظراً لأن أهداف الحد الأدنى للملوثات العضوية الثابتة تراعي الصحة العامة فقط وليس حدود تكنولوجيا الكشف والمعالجة، وفي بعض الأحيان يتم تحديدها عند مستوى لا تستطيع أنظمة المياه الوفاء بها. بالنسبة لمعظم المواد المسرطنة (الملوثات المسببة للسرطان) والملوثات الميكروبيولوجية، يتم تحديد مستويات الملوثات الميكروبيولوجية عند مستوى الصفر لأنه لا يمكن في كثير من الأحيان تحديد مستوى آمن. ([U.S. Environmental Protection Agency, 2003, 2006a](#)).

يتم تحديد المستويات القصوى للملوثات، وهي الحدود القابلة للتنفيذ التي يجب أن تفي بها مياه الشرب الجاهزة أقرب ما يمكن إلى الحد الأقصى لمستوى الملوثات المسموح به. وتحدد قوانين مياه الشرب الأمانة المستوى الممكن على أنه المستوى الذي يمكن أن

يحدث باستخدام أفضل التقنيات المتاحة أو تقنيات المعالجة أو غيرها من الوسائل التي تحددها الجهات المختصة بعد فحص الفعالية في ظل الظروف الميدانية (أي ليس فقط في ظل الظروف المختبرية) وبعد أخذ التكلفة في الاعتبار. بالنسبة لبعض الملوثات، وخاصة الملوثات الميكروبيولوجية، لا توجد طريقة موثوقة من الناحيتين الاقتصادية والتقنية لقياس الملوث بتركيزات منخفضة بشكل خاص. في هذه الحالات، وضعت تقنيات للمعالجة. وهي إجراء قابل للتنفيذ أو مستوى من الأداء التكنولوجي التي يجب على أنظمة المياه العامة اتباعها لضمان السيطرة على الملوثات. أمثلة على القواعد التي تتضمن تقنيات المعالجة هي قاعدة معالجة المياه السطحية (تهدف في المقام الأول إلى الملوثات البيولوجية وتطهير المياه) وقاعدة الرصاص والنحاس.

واعتبارًا من يناير ٢٠٠٩، حددت وكالة حماية البيئة الأمريكية معايير الحد الأدنى للمياه أو تقنيات المعالجة ل ٨٧ ملوثًا مدرجًا في قائمة المعايير الوطنية لمياه الشرب الأولية (الجدول ٧-١).

## ٧-٢-٢ معايير مياه الشرب الثانوية

إن لوائح مياه الشرب الثانوية (NSDWRs، أو المعايير الثانوية) هي إرشادات غير قابلة للتنفيذ فيما يتعلق بالملوثات التي قد تسبب تأثيرات جسدية بسيطة (مثل تغير لون الجلد أو الأسنان أو لها تأثيرات جمالية) (مثل التأثير على طعم أو رائحة أو لون مياه الشرب). توصي الجهات المختصة بمعايير ثانوية لأنظمة المياه ولكنها لا تطلب من الأنظمة الامتثال لها. ومع ذلك، قد تختار الجهات المختصة اعتمادها كمعايير قابلة للتنفيذ. تهدف المعايير الثانوية لمياه الشرب إلى حماية "الرفاهية العامة" (U.S. Environmental Protection Agency, 2003). هناك خمسة عشر مكونًا مدرجًا في قائمة معايير مياه الشرب الثانوية الوطنية (الجدول ٧-٢).

## ٧-٣ تقنيات المعالجة

قبل استخدام المياه أو استهلاكها يجب إزالة المكونات الخطرة والمرفوضة في المياه أو تدميرها أو تحييدها. عادةً ما يتم التعامل مع أحد المكونات أولاً، بسبب الخطر أو الإزعاج الذي يسببه بالنسبة إلى جميع المكونات الأخرى، على الرغم من إمكانية الجمع بين التأثيرات عند وجود ملوثين أو أكثر أو يكون للملوث الرئيسي الموجود تأثيرات متعددة. وقد تم تطوير العديد من الطرق لمعالجة هذه المخاطر على مر القرون. وهناك العديد من الأبحاث الرامية إلى تقليل التكاليف وتحسين الأداء ومعالجة الملوثات الناشئة. التقنيات التي يحتمل تطبيقها على معالجة مياه الشرب فيما يلي. تتم مناقشة الطرق والمعدات بمزيد من التفصيل في العديد من الوثائق، بما في ذلك المعايير الموصى بها لأشغال المياه (Health Research Inc 2007).

يتم تحديد اختيار التكنولوجيا لحالة معينة من خلال معدل تدفق المياه المراد معالجتها وأعلى استخدام لها؛ والجيولوجيا الإقليمية والمحلية والهيدرولوجيا والأرصدة الجوفية؛ وتكلفة المواد والمعدات والعمالة والإمدادات؛ وعوامل أخرى تكون أهميتها محدودة بشكل عام ولكنها حاسمة في ظل ظروف معينة.

التهديد الذي تشكله مكونات المياه الجوفية هو في المقام الأول كيميائي أو بيولوجي أو فيزيائي بطبيعته. ومع ذلك، فإن تأثير كل طريقة من طرق المعالجة ليس محددًا. على سبيل المثال، يمكن أن يغير الترشيح من التعكر (التأثير الفيزيائي) وإزالة البكتيريا (التأثير البيولوجي)، في حين أن التهوية لأكسدة الحديد وترسيبه (التأثير الكيميائي) يمكن أن يقلل من تركيزات الفوسفات والزرنيخ من خلال الترسيب المشترك (التأثير الفيزيائي). ولذلك، فإن مكونات المياه الجوفية وتقنيات المعالجة المستخدمة للتحكم في المخاطر يتم عرضها هنا تقريبًا بالترتيب حسب التعقيد المتزايد للمشكلة التي يتم معالجتها وزيادة تعقيد المعالجة.

### ٧-٣-١ العكارة

الماء عديم اللون بشكل طبيعي. غالبًا ما تكون المشاكل الفيزيائية المرتبطة بإمدادات المياه مرئية للعين المجردة ولهذا السبب، قد تكون أول خاصية للمياه الجوفية التي يتم معالجتها، وفي الواقع المياه من أي مصدر طبيعي، عكرة أو ملونة. قد يكون السبب الجسيمات غير العضوية العالقة (الطيني أو الطين) أو العضوية (المواد النباتية أو الطحالب) أو الجسيمات العضوية الذائبة مثل الأحماض الدالية أو الفولفيك أو التانيك. تكون المواد المذابة الحقيقية في حالة جزيئات وأيونات منفصلة، والتي لها جميعًا أبعاد صغيرة جدًا (عادة ما بين ١٠-٦ و ١٠-٨ سم)، مما يجعل محلول الماء شفافًا للضوء. تحتوي المحاليل الغروية على جزيئات صلبة ومجموعات من الجزيئات أكبر من أيونات وجزيئات المذيب (الماء). عندما تكون الجسيمات الغروية موجودة بكميات كبيرة بما فيه الكفاية، فإنها تعطي الماء مظهرًا براقًا عن طريق تشتيت الضوء. على الرغم من عدم وجود تعريف واحد متفق عليه لما هي الأحجام الغروية بالضبط، فإن النطاق الشائع المذكور هو ما بين ١٠-٦ و ١٠-٤ سم (Matthess, 1982). يتم التعبير عن كمية المادة المذابة في الماء من حيث تركيزها، عادةً بالمليغرام لكل لتر (ملغم/لتر) أو أجزاء لكل مليون (جزء في المليون) وميكروغرام لكل لتر (أجزاء لكل مليار، جزء في المليار). يصعب أحيانًا التفريق بين بعض المواد المذابة الحقيقية والمحاليل الغروية التي قد تحمل جزيئات من نفس المادة المصدر. قد تكون تصفية الجسيمات الغروية أو ترسيب الجسيمات الغروية قبل تحديد التركيز الحقيقي للمذاب قد يكون ضروريًا في بعض الحالات. وهذا ينطبق بشكل خاص على معايير مياه الشرب، لأن كميات معظم المواد تعتمد على التركيزات الذائبة. تصمم الإجراءات التحليلية المختبرية عادةً لتحديد التركيزات الكلية لمادة ما ولا توفر بالضرورة مؤشرًا على جميع الأنواع الفردية (الأشكال الكيميائية) منها. ومع ذلك، إذا لزم الأمر، يمكن طلب هذه المواصفات.

الجدول ٧-١ المعايير الوطنية لمياه الشرب الأولية (من وكالة حماية البيئة الأمريكية، تم الوصول إليها في كانون الثاني/يناير ٢٠١٩؛ متاح على: [www.epa.gov/safewater/contaminants/index.html#listmcl](http://www.epa.gov/safewater/contaminants/index.html#listmcl))

الهدف الصحة العامة	المصادر الشائعة للملوثات في مياه الشرب	التأثيرات الصحية المحتملة من التعرض فوق مستوى MCL	MCL (mg/L)	الملوث	
0	اختلاط المياه بالصرف الصحي	مشاكل في الجهاز العصبي أو الدم	TT	الأكريلاميد	OC
0	الجريان السطحي من مبيدات الأعشاب المستخدمة في المحاصيل الزراعية	مشاكل في العين أو الكبد أو الكلى أو الطحال؛ فقر الدم؛ زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.002	ألاتشلو	OC
0	تآكل رواسب بعض المعادن المشعة وانبعاث إشعة ألفا	زيادة خطر الإصابة بالسرطان	15 بيكو كوري لكل لتر	جسيمات ألفا	R
0.006	التصريف من مصافي البترول؛ مثبطات الحريق؛ السيراميك؛ الإلكتروليتات؛ اللحام	زيادة في نسبة الكوليسترول في الدم؛ انخفاض سكر الدم	0.006	الأنثيمون	IOC
0	تآكل الرواسب الطبيعية؛ الجريان السطحي من البساتين، والجريان السطحي من الزجاج ونفايات إنتاج الزجاج والإلكترونيات	تلف الجلد أو مشاكل في الدورة الدموية وقد يزيد خطر الإصابة بالسرطان	0.01	الزرنبيخ	IOC
7	تحلل الأسمتت الأسبستي في أنابيب المياه؛ تآكل الرواسب الطبيعية	زيادة خطر الإصابة بالسلائل المعوية الحميدة	٧ ملايين ليف لكل لتر	الأسبستوس (ألياف < ١٠ مم)	IOC
0.003	الجريان السطحي من مبيدات الأعشاب المستخدمة في المحاصيل الزراعية	مشاكل في لجهاز القلبي الوعائي أو الجهاز التناسلي	0.003	الأترازين	OC
2	تصريف نفايات الحفر؛ تصريف معامل تكرير المعادن؛ تآكل الرواسب الطبيعية	ارتفاع في ضغط الدم	2	الباريوم	IOC
0	التصريف من المصانع؛ الرش من صهاريج تخزين الغاز ومداخن النفايات	فقر الدم؛ انخفاض في صفائح الدم؛ زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.005	البينزين	OC

تابع الجدول ٧-١					
هدف الصحة العامة	المصادر الشائعة للملوثات في مياه الشرب	التأثيرات الصحية المحتملة من التعرض فوق مستوى MCL	MCL (mg/L)	الملوث	
0	الرشح من بطانات المياه	صعوبات في الإنجاب؛ زيادة خطر الإصابة السرطان	0.0002	بنزو (أ) بيرين (PAHs)	OC
0.004	التصريف من مصافي المعادن ومصانع حرق الفحم؛ التصريف من الصناعات الكهربائية والفضائية والدفاعية	الآفات المعوية	0.004	البريليوم	IOC
0	تآكل رواسب بعض المعادن المشعة وانبعاث إشعاع بيتا	زيادة خطر الإصابة بالسرطان	4 ملليمتر في السنة	جسيمات بيتا وبواعث الفوتونات	R
0	المنتج الثانوي لتطهير مياه الشرب	زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.010	برومات	DBP
0	تآكل الأنابيب المجلفنة؛ تآكل الترسبات الطبيعية؛ التصريف من مصافي المعادن؛ الجريان السطحي من نفايات البطاريات والدهانات	تلف الكلى	0.005	الكاديوم	IOC
0.04	ارتشاح مادة تبخير التربة المستخدمة في الأرز والبرسيم	مشاكل في الدم أو الجهاز العصبي أو الجهاز التناسلي	0.04	كربوفوران	OC
0	التصريف من المصانع الكيميائية و الأنشطة الصناعية الأخرى	مشاكل الكبد؛ زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.005	رابع كلوريد الكربون	OC
41	مضافات المياه المستخدمة للسيطرة على الميكروبات	تهيج في العين/ الأنف؛ انزعاج في المعدة؛ فقر الدم	الحد الأقصى 4.01 =	الكلورامينات (مثل Cl <sub>2</sub> )	D
0	بقايا مبيدات النمل الأبيض المحظورة	مشاكل في الكبد أو الجهاز العصبي زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.002	كلوردان	OC

تابع الجدول ٧-١					
هدف الصحة العامة	المصادر الشائعة للملوثات في مياه الشرب	التأثيرات الصحية المحتملة من التعرض فوق مستوى MCL	MCL (mg/L)	الملوث	
41	مضافات المياه المستخدمة للسيطرة على الميكروبات	تهيج في العين/ الأنف؛ انزعاج في المعدة	الحد الاقصى 4.01 =	الكلور (في صورة Cl2)	D
0.81	مضافات المياه المستخدمة للسيطرة على الميكروبات	فقر الدم؛ الرضع والأطفال الصغار: تأثيرات الجهاز العصبي	0.004	ثاني أكسيد الكلور (مثل ClO2)	D
0.8	المنتج الثانوي لتطهير مياه الشرب	فقر الدم؛ الرضع والأطفال الصغار: تأثيرات الجهاز العصبي	1	الكلوريت	DBP
0.1	التصريف من مصانع المواد الكيميائية والمواد الكيميائية الزراعية	مشاكل في الكبد أو الكلى	0.1	الكلوروبنزين	OC
0.1	التصريف من مصانع الصلب واللباب؛ تآكل الرواسب الطبيعية	التهاب الجلد التحسسي	0.1	الكروم (الكلبي)	IOC
1.3	تآكل أنظمة السباكة المنزلية؛ تآكل الرواسب الطبيعية	التعرض قصير الأمد: ضيق في الجهاز الهضمي. التعرض طويل الأمد: تلف الكبد أو الكلى.	1.3	النحاس	IOC
0	الفضلات البرازية البشرية والحيوانية	أمراض الجهاز الهضمي (مثل الإسهال، القيء والتشنجات)	TT3	الكريبتوسبويد ريديوم	M
0.2	التصريف من مصانع الصلب/المعادن؛ التصريف من مصانع البلاستيك والأسمدة	تلف الأعصاب أو مشاكل في الغدة الدرقية	0.2	السيانيد (في الصورة الحرة)	IOC
0	الجريان السطحي من مبيدات الأعشاب المستخدمة في المحاصيل الزراعية	مشاكل في الكلى أو الكبد أو الغدة الكظرية	0.07	D-4.2	OC

تابع الجدول ٧-١					
هدف الصحة العامة	المصادر الشائعة للملوثات في مياه الشرب	التأثيرات الصحية المحتملة من التعرض فوق مستوى MCL	MCL (mg/L)	الملوث	
0.2	الجريان السطحي من مبيدات الأعشاب المستخدمة في الطرق	تغيرات طفيفة في الكلى	0.2	دالابون	OC
0	الجريان السطحي/الرشح من مادة تبخير التربة المستخدم في فول الصويا والقطن والأناناس والبساتين	صعوبات في الإنجاب؛ زيادة خطر الإصابة السرطان	0.0002	2،1-ثنائي برومو-3-كلوروإيزوبروبان (DBCP)	OC
0.6	التصريف من المصانع الكيميائية	مشاكل في الكبد أو الكلى أو الدورة الدموية	0.6	س-ثنائي كلورو البنزين	OC
0.075	التصريف من المصانع الكيميائية	فقر الدم؛ تلف الكبد أو الكلى أو الطحال؛ تغيرات في الدم	0.075	ب-ثنائي كلورو البنزين	OC
0	التصريف من المصانع الكيميائية	زيادة خطر الإصابة السرطان	0.005	١،٢-ثنائي كلورو الإيثان	OC
0.007	التصريف من المصانع الكيميائية	مشاكل الكبد	0.007	١،١-ثنائي كلورو الإيثيلين	OC
0.07	التصريف من المصانع الكيميائية	مشاكل الكبد	0.07	مكرر ١،٢-ثنائي كلورو الإيثيلين	OC
0.1	التصريف من المصانع الكيميائية	مشاكل الكبد	0.1	ترانس-١،٢-ثنائي كلورو الإيثيلين	OC
0	التصريف من المصانع الكيميائية	مشاكل الكبد؛ زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.005	ثنائي كلورو الميثان	OC

تابع الجدول ٧-١					
هدف الصحة العامة	المصادر الشائعة للملوثات في مياه الشرب	التأثيرات الصحية المحتملة من التعرض فوق مستوى MCL	MCL (mg/L)	الملوث	
0	التصريف من المصانع الكيميائية	زيادة خطر الإصابة السرطان	0.005	1،2-ثنائي كلور البروبان	OC
0.4	التصريف من المصانع الكيميائية	فقدان الوزن؛ مشاكل في الكبد؛ احتمال حدوث صعوبات في الإنجاب	0.4	ثنائي (2-) إيثيل هكسيل أديبات	OC
0	التصريف من المصانع المطاط والمصانع الكيميائية	مشاكل في الإنجاب؛ مشاكل في الكبد زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.006	ثنائي (2-) إيثيل هكسيل الفثالات	OC
0.007	الجريان السطحي من مبيدات الأعشاب المستخدمة في فول الصويا والخضروات	صعوبات في الإنجاب	0.007	دينوسيب	OC
0	الانبعاثات من حرق النفايات؛ التصريف من المصانع الكيميائية	صعوبات في الإنجاب؛ زيادة خطر الإصابة السرطان	0.00000003	الديوكسين (2،7،8،3-TCDD)	OC
0.02	الجريان السطحي من استخدام مبيدات الأعشاب	إعتام عدسة العين البيضاء	0.02	ديكوات	OC
0.1	الجريان السطحي من استخدام مبيدات الأعشاب	مشاكل في المعدة والأمعاء	0.1	إندوثال	OC
0.002	بقايا المبيدات الحشرية المحظورة	مشاكل في الكبد	0.002	إندرين	OC
0	تصريف من المصانع الكيميائية؛ شوائب بعض المواد الكيميائية لمعالجة المياه	زيادة خطر الإصابة بالسرطان؛ وعلى مدى فترة طويلة من الوقت، مشاكل في المعدة	TT8	الإبيكلوروهي درين	OC

تابع الجدول ٧-١					
هدف الصحة العامة	المصادر الشائعة للملوثات في مياه الشرب	التأثيرات الصحية المحتملة من التعرض فوق مستوى MCL	MCL (mg/L)	الملوث	
0.7	التصريف من مصافي البترول	مشاكل الكبد أو الكلى	0.7	الإيثيل بنزين	OC
0	التصريف من مصافي البترول	مشاكل في الكبد أو المعدة أو الجهاز التناسلي أو الكلى؛ زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.00005	ثنائي بروميد الإيثيلين	OC
4	مضافات الماء التي تعزز قوة الأسنان، تآكل الرواسب الطبيعية؛ التصريف من مصانع الأسمدة والألومنيوم	أمراض العظام وقد يصاب الأطفال بتبقع الأسنان	4	الفلورايد	IOC
0	الفضلات البرازية البشرية والحيوانية	أمراض الجهاز الهضمي (مثل الإسهال، القيء والتشنجات)	TT9	الجيارديا اللمبية	M
0.7	الجريان السطحي من استخدام مبيدات الأعشاب	مشاكل في الكلى؛ مشاكل في الإنجاب	0.7	الجلایفوسات	OC
N/A	منتج ثانوي لتطهير مياه الشرب	زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.06	أحماض الهالو أسيتيك (HAA5)	DBP
0	بقايا مبيد النمل الأبيض المحظور	تلف الكبد؛ زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.0004	هيبتاكلور	OC
0	تفكك الهيبتاكلور	تلف الكبد؛ زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.0002	إيبوكسيد الهيبتاكلور	OC
N/A	يقيس HPC مجموعة من البكتيريا التي موجودة بشكل طبيعي في البيئة	لا توجد آثار صحية؛	TT8	الصفائح المتغايرة التغذية	M
تابع الجدول ٧-١					

هدف الصحة العامة	المصادر الشائعة للملوثات في مياه الشرب	التأثيرات الصحية المحتملة من التعرض فوق مستوى MCL	MCL (mg/L)	الملوث	
0.05	إفرازات من المصانع الكيميائية	مشاكل في الكلى أو المعدة	0.05	سداسي كلورو- سيكلوبنتادين	OC
0	تآكل أنظمة السباكة المنزلية ؛ تآكل الرواسب الطبيعية	الرضع والأطفال: التأخير في النمو البدني أو العقلي؛ . البالغون: مشاكل في الكلى ارتفاع ضغط الدم	0.015	الرصاص	IOC
0	يوجد بشكل طبيعي في الماء؛ ويتكاثر في أنظمة التدفئة	داء الليجيونيلا ، وهو نوع من أنواع الالتهاب الرئوي	TT8	الليجيونيلا	M
0.0002	الجريان السطحي/النضح من المبيدات الحشرية المستخدمة على الماشية والخشب والحدائق	مشاكل في الكبد أو الكلى	0.0002	الليندين	OC
0.002	تآكل الرواسب الطبيعية؛ التصريفات من المصافي والمصانع؛ الجريان السطحي من مدافن النفايات والأراضي الزراعية	تلف الكلى	0.002	الزئبق (غير العضوي)	IOC
0.04	الجريان السطحي/الرشح من المبيدات الحشرية المستخدمة على الفاكهة والخضروات والبرسيم والماشية	صعوبات في الإنجاب	0.04	الميثوكسيكلور	OC
10	الجريان السطحي الناجم عن استخدام الأسمدة؛ والترشيح من خزانات الصرف الصحي ومياه الصرف الصحي؛ تآكل الرواسب الطبيعية	إذا تلقى الأطفال مياه تحتوي على جرعات زائدة من النترات ولم يتم علاجهم فقد يموتون ومن الأعراض ضيق التنفس أو متلازمة الطفل الأزرق	10	النترات (تقاس على هيئة نيتروجين)	IOC

تابع الجدول ٧-١					
هدف الصحة العامة	المصادر الشائعة للملوثات في مياه الشرب	التأثيرات الصحية المحتملة من التعرض فوق مستوى MCL	MCL (mg/L)	الملوث	
1	الجريان السطحي الناجم عن استخدام الأسمدة؛ والترشيح من خزانات الصرف الصحي ومياه الصرف الصحي؛ تآكل الرواسب الطبيعية	إذا تلقى الأطفال مياه تحتوي على جرعات زائدة من النترات ولم يتم علاجهم فقد يموتون ومن الأعراض ضيق التنفس ومتلازمة الطفل الأزرق	1	النيتريت (يقاس ك نيتروجين)	IOC
0.2	الجريان السطحي/التسرب من المبيدات الحشرية المستخدمة على التفاح والبطاطس والطماطم	تأثيرات طفيفة على الجهاز العصبي	0.2	أوكساميل (فيدات)	OC
0.001	التصريف من مصانع حفظ الأخشاب	مشاكل في الكبد أو الكلى؛ زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.001	الفينول الخماسي الكلور	OC
0.5	جريان مبيدات الأعشاب	مشاكل الكبد	0.5	بيكلورام	OC
0.0005	الجريان السطحي من مدافن النفايات؛ تصريف النفايات الكيميائية	تغيرات في الجلد؛ مشاكل في الغدة الصعترية وقصور في المناعة؛ مشاكل في الجهاز التناسلي أو العصبي؛ زيادة خطر السرطان	0.0005	ثنائي الفينيل متعدد الكلور (PCBs)	IOC
0	تآكل الرواسب الطبيعية	زيادة خطر الإصابة بالسرطان	5pCi/L	الراديوم ٢٢٦ والراديوم ٢٢٨ (مجتمعين)	R
0.05	التصريف من مصافي البترول؛ تآكل الرواسب الطبيعية؛ التصريف من المناجم	تساقط الشعر أو الأظافر؛ خدر في أصابع القدمين؛ مشاكل في الدورة الدموية	0.05	السيلينيوم	IOC

تابع الجدول ٧-١					
هدف الصحة العامة	المصادر الشائعة للملوثات في مياه الشرب	التأثيرات الصحية المحتملة من التعرض فوق مستوى MCL	MCL (mg/L)	الملوث	
0.004	الجريان السطحي لمبيدات الأعشاب	مشاكل الدم	0.004	السيمازين	OC
0.1	التصريف من مصانع المطاط والبلاستيك؛ الرشح من مدافن النفايات	مشاكل في الكبد أو الكلى أو الدورة الدموية	0.1	الستايرين	OC
0	التصريف من المصانع والمنظفات الجافة	مشاكل في الكبد؛ زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.005	رباعي كلورو الإيثيلين (PCE)	OC
0.005	الرشح من مواقع معالجة الخامات التصريف من الإلكترونيات والزجاج و مصانع الأدوية	تساقط الشعر؛ تغيرات في الدم؛ مشاكل في الكلى والأمعاء أو الكبد	0.002	الثاليوم	IOC
0.0005	الجريان السطحي من مدافن النفايات؛ تصريف النفايات الكيميائية	تغيرات في الجلد؛ مشاكل في الغدة الصعترية وقصور في المناعة؛ مشاكل في الجهاز التناسلي أو العصبي؛ زيادة خطر السرطان	0.0005	ثنائي الفينيل متعدد الكلور (PCBs)	IOC
1	رؤفازات من مصانع البترول	مشاكل في الجهاز العصبي أو الكلى أو الكبد	1	التولوين	OC
0	توجد البكتيريا القولونية بشكل طبيعي في البيئة وتأتي فقط من الفضلات البرازية البشرية والحيوانية	لا تمثل تهديدًا صحيًا في حد ذاته؛ فهو يُستخدم للإشارة إلى ما إذا كانت هناك بكتيريا أخرى ضارة.	5%	إجمالي القولونيات (البرازية والإشريكية)	M

تابع الجدول ٧-١					
هدف الصحة العامة	المصادر الشائعة للملوثات في مياه الشرب	التأثيرات الصحية المحتملة من التعرض فوق مستوى MCL	MCL (mg/L)	الملوث	
N/A	منتج ثانوي لتطهير مياه الشرب	مشاكل في الكبد أو الكلى أو الجهاز العصبي المركزي وزيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.08	إجمالي ثلاثي الميثان (TTHMs)	DBP
0	الجريان السطحي/الرشح من المبيدات الحشرية المستخدمة على القطن والماشية	مشاكل في الكلى أو الكبد أو الغدة الدرقية؛ زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.003	التوكسافين	OC
0.05	بقايا مبيدات الأعشاب المحظورة	مشاكل في الكبد	0.05	TP-5,4,2 (سيلفكس)	OC
0.07	إفرازات من مصانع تشطيب المنسوجات	تغيرات في الغدد الكظرية	0.07	1,2,4-ثلاثي كلورو البنزين	OC
0.2	التصريف من مواقع إزالة الشحوم المعدنية والمصانع الأخرى	مشاكل في الكبد أو الجهاز العصبي أو الدورة الدموية	0.2	1,1,1-ثلاثي كلورو الإيثان	OC
0.003	إفرازات مصانع الكيماويات الصناعية	مشاكل في الكبد أو الكلى أو الجهاز المناعي	0.005	1,1,2-ثلاثي كلورو الإيثان	OC
0	التصريف من مواقع إزالة الشحوم المعدنية والمصانع الأخرى	مشاكل الكبد؛ زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.005	ثلاثي كلورو الإيثيلين (TCE)	OC

تابع الجدول ٧-١					
هدف الصحة العامة	المصادر الشائعة للملوثات في مياه الشرب	التأثيرات الصحية المحتملة من التعرض فوق مستوى MCL	MCL (mg/L)	الملوث	
N/A	جريان التربة	ارتفاع مستويات التعكر غالباً ما ترتبط بمسببات الأمراض، مثل الفيروسات، والطفيليات، وبعض البكتيريا، والتي يمكن أن تسبب أعراضاً مثل الغثيان والتشنجات والإسهال والصداع المصاحب	TT3	العكورة	M
0	تآكل الرواسب الطبيعية	زيادة خطر الإصابة بالسرطان وتسمم الكلى	30mg/L	اليورانيوم	R
0	الرشح من أنابيب PVC؛ التصريف من مصانع البلاستيك	زيادة خطر الإصابة بالسرطان	0.002	كلوريد الفينيل	OC
0	الفضلات البرازية البشرية والحيوانية	أمراض الجهاز الهضمي (مثل الإسهال والقيء والتشنجات)	T3	الفيروسات (المعوية) T	M
10	إفرازات من مصانع البترول؛ التصريف من المصانع الكيميائية	تلف الجهاز العصبي	10	الزئبق (اجمالي)	OC

#### ١. التعاريف:

الحد الأقصى لمستوى التلوث المستهدف (MCLG)

الحد الأقصى لمستوى الملوثات (MCL)

الحد الأقصى لمستوى المطهر المتبقي المستهدف (MRDLG)

الحد الأقصى لمستوى المطهر المتبقي (MRDL)

تقنية المعالجة (TT)

٢. الوحدات بالمليغرام لكل لتر (ملغم/لتر) ما لم يذكر خلاف ذلك. المليغرامات لكل لتر تعادل أجزاء من المليون (ppm).

٣. تتطلب قواعد معالجة المياه السطحية التي وضعتها وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) من الأنظمة التي تستخدم المياه السطحية أو المياه الجوفية تحت التأثير المباشر للمياه السطحية (١) تطهير مياهها و(٢) ترشيح مياهها أو استيفاء معايير تجنب الترشح بحيث يتم التحكم في الملوثات التالية عند هذه المستويات: الكريبتوسبورديوم، إزالة ٩٩ بالمائة؛ الجيارديا المملية، إزالة/تعطيل بنسبة ٩٩,٩ في المائة؛ الفيروسات، إزالة/تعطيل بنسبة ٩٩,٩٩ في المائة. التعكر، لا يجوز أن يتجاوز ١ وحدة قياس NTU ويجب ألا يتجاوز ٠,٣ وحدة قياس NTU في ٩٥ في المائة من العينات اليومية في أي شهر. HPC، يجب ألا يتجاوز ٥٠٠ مستعمرة بكتيرية لكل مليلتر.

٤. لا يزيد عن ٥,٠ في المائة من العينات الإيجابية للقولونيات الكلية في الشهر. (بالنسبة لأنظمة المياه التي تجمع أقل من ٤٠ عينة روتينية في الشهر، لا يمكن أن تكون أكثر من ١ عينة يمكن أن تكون إيجابية القولونيات الكلية في الشهر). يجب تحليل كل عينة تحتوي على القولونيات الكلية إما للكشف عن القولونيات البرازية أو الإشريكية القولونية. إذا كانت عينتان متاليتان إيجابيتين للقولونيات البرازية الإشريكية القولونية وإحدى العينات إيجابية أيضاً للقولونيات البرازية الإشريكية القولونية، فإن النظام لديه انتهاك حاد ل MCL.

٥. القولونيات البرازية والإشريكية القولونية هي بكتيريا يشير وجودها إلى أن المياه قد تكون ملوثة بالفضلات البشرية أو الحيوانية.

٦. على الرغم من عدم وجود مجموعة من الملوثات التي تمثل الحد الأدنى المسموح به من مستوى الخطورة المسموح به جماعياً لهذه المجموعة من الملوثات، إلا أن هناك بعض الملوثات الفردية من هذا النوع: أحماض الهالو أسيتيك، حمض ثنائي كلورو أسيتيك (صفر)، وحمض ثلاثي كلورو أسيتيك (٠,٣ ملغم/لتر)، وثلاثي كلورو الميثان، وبرومو كلورو الميثان (صفر)، وبرومو فورم (صفر)، وثنائي برومو كلورو الميثان (٠,٠٦ ملغم/لتر). إذا تجاوز أكثر من ١٠ في المائة من عينات مياه الصنبور تتجاوز مستوى الإجراء، يجب على أنظمة المياه اتخاذ خطوات إضافية. بالنسبة للنحاس، مستوى العمل هو ١,٣ ملغم/لتر؛ وبالنسبة للرصاص، ٠,١٥ ملغم/لتر.

٧. يتم تنظيم الرصاص والنحاس من خلال تقنية معالجة تتطلب من الأنظمة التحكم في تآكل مياهها.

٨. يجب على كل نظام مياه أن يشهد، كتابياً، (باستخدام شهادة من طرف ثالث أو شهادة من المصنعين) أنه عندما يستخدم الأكريلاميد و/أو الإبيكلوروهيدرين في معالجة المياه، فإن مزيج (أو منتج) الجرعة ومستوى المونومر لا يتجاوز المستويات المحددة، على النحو التالي: مادة الأكريلاميد ¼ ٠,٠٥ في المائة بجرعة ١ ملغم/لتر (أو ما يعادله)؛ إبيكلوروهيدرين ¼ ٠,٠١ في المائة بجرعة ٢٠ ملغم/لتر (أو ما يعادله).

جدول ٧-٢ المعايير الوطنية الثانوية لمياه الشرب الثانوية (من وكالة حماية البيئة الأمريكية، تم الوصول إليها في كانون الثاني/يناير ٢٠١٩: متاح على: <a href="http://www.epa.gov/safewater/contaminants/index.html#listmcl">www.epa.gov/safewater/contaminants/index.html#listmcl</a> ).	
الملوث	المعيار الثانوي
الألومنيوم	٠,٢-٠,٥ مج/ل
كلوريد	٢٥٠ مج/ل
كلوريد الألومنيوم <sup>+</sup>	١٥ وحدة لونية
النحاس	١ مج/ل
التآكل	لا
الفلورايد	٢ مج/ل
عوامل الرغوة	٠,٥ مج/ل
الحديد	٠,٣ مج/ل
المنغنيز	٠,٠٥ مج/ل
الرائحة	الحد الثالث
الأس الهيدروجيني	٨,٥-٦,٥
الفضة	٠,١٠ مج/ل
الكبريتات	٢٥٠ مج/ل
إجمالي المواد الصلبة الذائبة	٥٠٠ مج/ل
الزنك	٥ مج/ل

### التنقية بدون معالجة مسبقة

يمكن أن تكون التنقية عملية واحدة أو متعددة الخطوات. في أبسط وضع، يتم تمرير الماء من خلال خزان حجمة كبير، بحيث يتحرك الماء ببطء. ويسمح بتقليل السرعة والاضطراب للجسيمات ذات السطح الصغير إلى الكتلة الصغيرة لتستقر قبل خروج الماء من الخزان، عادةً من خلال هيكل الفانوس. هذه العملية تحاكي عملية التصفية الطبيعية في بعض طبقات المياه الجوفية الكارستية الكبيرة التي تتلقى المياه العكرة عبر تيارات غارقة في مواقع بعيدة عن الينابيع الرئيسية الصاعدة (الشكل ٧-١). توفر طبقة المياه الجوفية المعالجة من خلال العمل كخزان ترسيب كبير. فالمياه سريعة الحركة، مثل المياه التي تتسارع في مجاري

التغذية أثناء العواصف تحمل الرواسب والحطام. عندما تدخل مياه التغذية إلى طبقة المياه الجوفية فإنها تتباطأ، وتبدأ الرواسب والمواد العضوية التي تحملها بالاستقرار (كما في الجرة في الشكل ٧-١). أفاد الغواصون أن أرضيات الكهوف تحت الماء مغطاة بطبقة سميكة من الطمي الذي يتم تحريكه بسهولة، مما يسبب "طمياً" أعنى في المياه الصافية عادةً (Eckhardt, 2009 ; [www.edwardsaquifer.net/movement/geology.html](http://www.edwardsaquifer.net/movement/geology.html)). يمكن أن تصبح خزانات المياه السطحية التي تم إنشاؤها في أعلى التدرج من المصارف الرئيسية والموجودة في الصخور غير الكارستية جزءاً من معالجة مياه الينابيع: المياه العكرة التي تتدفق إلى الخزان بعد أحداث هطول الأمطار الكبرى يُسمح لها بالاستقرار قبل إطلاقها ودخولها إلى طبقة المياه الجوفية الكارستية عبر المصارف (الشكل ٧-٢).

### الترشيح دون معالجة مسبقة

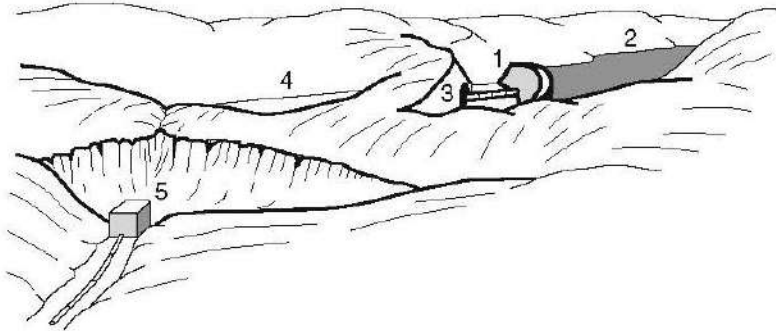
يعتبر الترشيح من الناحية النظرية طريقة معالجة بسيطة. يتم تمرير المياه الخام من خلال خزان أو وعاء يحتوي على وسائط ترشيح. ويحدد أداء النظام الأحجام النسبية للمادة المستهدفة والوسائط، وعمق (سمك) الوسائط، ومعدل تدفق المياه من خلال الوسائط. ببساطة، المساحات المترابطة بين جزيئات الوسائط يجب أن تكون صغيرة بما يكفي لمنع مرور التربة العالقة أو المواد العضوية العالقة. توجد العديد من الاختلافات حول هذا الموضوع.



الشكل ٧-١ (على اليسار) عينة من جريان مياه الأمطار التي تم جمعها من جدول هيلوتس كريك في منطقة التغذية في نبع كوماال مستجمع إدواردز المائي. (على اليمين) عينة مأخوذة من ينابيع كوماال في نفس اليوم؛ الينابيع معروفة بنقاؤها. (الصورة من Gregg Eckhardt).

### الرمل البطيء

قد تكون المرشحات الرملية البطيئة أقدم طريقة لمعالجة المياه بعد التنقية. حيث يتم وضع وسائط المرشح في قبو أو خزان وتوضع الوسائط الدقيقة فوق الوسائط الخشنة. وتقع الوسائط الخشنة نفسها على نظام الصرف السفلي. يمر الماء عبر مرشح الرمل البطيء، كما يوحي الاسم، ببطء. وهذا يعني أن يكون معدل تدفق المياه عبر المرشح بطيئاً جداً قبل أن يكون غير مقبول. يسمح الوقت الإضافي لطبقة أكثر سمكاً من الجسيمات الملتقطة بالتراكم بين أحداث التجديد. وهذا يسمح للمستعمرات البكتيرية



الشكل ٧-٢ رسم تخطيطي لتنظيم طبقة المياه الجوفية في بوجيه، صربيا والجبل الأسود. (١) السد؛ (٢) الخزان؛ (٣) حوض تموسا؛ (٤) الوادي الجاف؛ (٥) نبع بوكي الكارستي. (من Kresic, 1988).

بالتطور في طبقة الجسيمات الملتقطة. الطبيعة الفيزيائية للطبقة البكتيرية والتمثيل الغذائي للبكتيريا يزيد من قدرة المرشح على التقاط الجسيمات العالقة الدقيقة. عندما يصبح معدل معالجة المياه غير مقبول، تتم إزالة طبقة الوسائط العلوية ويتم بدء دورة جديدة. يمكن للمرشحات الرملية البطيئة إزالة المواد الصلبة العالقة ولكنها لا تلتقط الجسيمات الطينية أو تقلل من مستويات اللون. وهي سهلة البناء والتشغيل. (يمكن أن تتم إزالة الوسائط بواسطة عمالة غير ماهرة). ولأنها سهلة التشغيل والصيانة، غالباً ما تستخدم المرشحات الرملية البطيئة من قبل المجتمعات ذات الدخل المنخفض أو في حالات الطوارئ. وتتراوح معدلات التحميل النموذجية من ٠,٢ إلى ١,٠ ج/د/ق (١,٠-٠,٤ م<sup>٣</sup>/م<sup>٢</sup>/س). تتراوح دورات الترشيح النموذجية من شهرين إلى ستة أشهر. ترتبط الدورات الأطول بمياه خام ذات جودة أفضل.

### الرمال السريع

يشيع استخدام تقنية الرمل السريع في معالجة المياه البلدية الحديثة. تملأ الخزانات بالوسائط، وعادةً ما تكون رملية، كما يوحى الاسم. يمكن إضافة مواد أخرى، مثل الكربون المنشط الحبيبي أو الأنثراسايت المنشط الحبيبي لامتصاص المواد الكيميائية الذائبة، وخاصة المركبات العضوية. يتم وضع الماء من الأعلى ويتدفق إلى الأسفل عبر الوسائط إلى نظام تجميع تحت قوة الجاذبية. الجسيمات التي يلتقطها المرشح تقلل من المساحات المسامية، ونتيجة لذلك، يقل معدل مرور الماء من خلال المرشح. وعندما يصبح المعدل منخفضاً بشكل غير مقبول، يتم غسل المرشح غسلاً عكسياً. وللغسيل العكسي، يتم قطع إمدادات المياه الخام، ويتم ضخ الماء أو الماء والهواء (لزيادة التحريك) في القاع أسفل وسط المرشح. ويتم اختيار معدل الضخ لرفع وتحريك الوسائط، مما يتسبب في تنظيف جزيئات الوسائط لبعضها البعض، مما يؤدي إلى إزاحة الجسيمات الملتقطة سابقاً وإعادة تعليقها. ثم تتم إزالة مياه الغسيل العكسي من خلال نقاط التجميع أو الأحواض والتخلص منها. يُسمح للوسائط بالاستقرار في الخزان. يتم وضع الماء الخام مرة أخرى على السطح العلوي للمرشح وتكرر العملية. من الواضح أن المرشحات الرملية البطيئة تسبق تاريخ المرشحات الرملية السريعة، لأن التقنية الأخيرة لم تكن ممكنة قبل اختراع مضخات كبيرة وقوية بما يكفي لضخ مياه كافية لتعليق الوسائط وغسل الفلتر. تتراوح معدلات التحميل النموذجية من ٢ إلى ٥ ج/د/ق (٢ إلى ٥ إلى ١٢ م³/س) من سطح المرشح الرمل. يتطلب تشغيل ومراقبة وصيانة مرشح الرمل السريع خبرة وتدريباً مكثفاً. ومع ذلك، فإن أدائها المحسن مقارنة بالرمال البطيء يبرر إدارة المرشح الإضافي ونفقاته.

### الوسائط المطلية مسبقاً

تستخدم هذه المرشحات لإزالة المواد الصلبة الدقيقة من الماء. يتم وضع ملاط من الوسائط الدقيقة للغاية على عنصر صلب قابل للنفاذ. ويتم السماح لها أو تحفيزها على الاستقرار على العنصر بأقل قدر من الخلط، مما يعزز الطلاء المتساوي والموحد على العنصر. يتم استخدام الوسائط الدقيقة جداً، مثل التراب الدياتومي أو البيرلايت المطحون أو الفيرميكلوليت، بحيث يمكن التقاط الجسيمات الدقيقة إلى الجسيمات الدقيقة جداً. عندما يبدأ مزيج الوسائط والجسيمات الدقيقة الملتقطة في الأداء الغير مقبول، يتم شطف الوسائط المودعة والمواد الصلبة المتراكمة من العنصر الصلب ويتم التخلص منها. ثم يتم وضع طبقة جديدة من الوسائط الدقيقة على العنصر الصلب القابل للنفاذ. تتراوح معدلات التحميل من ٠,٥ إلى ٢ ج/د/ق (٢ إلى ١,٢ إلى ٥ م³/س) من سطح المرشح. تكاليف رأس مال العملية منخفضة نسبياً. ومع ذلك، تشمل العيوب وجود تشققات في طبقة الوسائط الدقيقة عندما لا يتم تطبيق الوسائط الدقيقة بشكل خاص، مما قد يسمح بمرور المياه المعالجة جزئياً فقط، وميل المرشحات إلى الانسداد بسرعة عند معالجة المياه عالية الرطوبة.

### التنقية أو الترشيح بعد التثثر

يمكن اتخاذ خطوات لتحسين التصفية أو الترشيح. يمكن رفع الرقم الهيدروجيني للمياه الخام أو استخدام مادة تثثر أو إضافة مادة تثثر (على سبيل المثال، أملاح الألومنيوم أو الحديد أو مركبات عضوية خاصة). كلتا العمليتين تقلل القوى الكهروستاتيكية، التي تتسبب في تنافر الجسيمات العالقة بعضها ببعض، مما يمنع التكتل. وبما أن تكتلات الجسيمات لها مساحة سطح أقل إلى نسبة الكتلة فتستقر بسرعة أكبر. التثثر أو التقنية الموصوفة في القسم التالي، الأكسدة، تزيد من فعالية التنقية أو الترشيح. وذلك لأن البكتيريا والمكونات الذائبة في المياه الجوفية يمكن أيضاً تغييرها فيزيائياً أو كيميائياً بواسطة مادة التثثر أو الأكسدة. البكتيريا والمواد الكيميائية يمكن أن تنحصر أو تنجذب إلى الكتل أو وسائط الترشيح أو حتى ترسب مباشرة. وللتصفية، توضع المياه المعالجة في خزان ترسيب حيث تستقر الجسيمات المتكتلة بسرعة أكبر من المياه غير المعالجة. وتسمح معالجة المياه باستخدام خزانات أصغر أو فترات استبقاء أقصر.

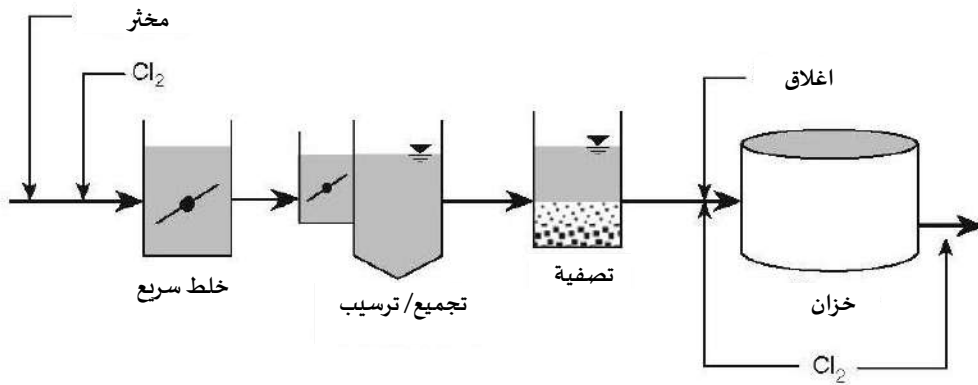
بالنسبة للترشيح، يتم تطبيق المياه المعالجة على أي من المرشحات الموصوفة سابقاً. بالنسبة للمرشحات ذات الحجم الكبير التي تستهدف الجسيمات الكبيرة نسبياً، مثل الرمل البطيء والرمل السريع، فإن كتل الجسيمات التي لها متوسط حجم أكبر تميل إلى البقاء على سطح المرشح، مما يجعل تجديدها أسهل. بالنسبة للمرشحات التي تستهدف الجسيمات الصغيرة نسبياً (الطيني والطين)، فإن إضافة مادة تثثر أو مادة الندف قد تمكن المرشح العلوي من التقاط الجسيمات الكبيرة وتكتلات الجسيمات الدقيقة، وهو جزء فعال من حيث التكلفة من مجموعة المعالجة. محطة معالجة المياه الأساسية، التي تشتمل على التلبد والترسيب والترشيح والتحكم في الأس الهيدروجيني والتطهير موضحة في الشكل ٧-٣. تم تطوير عملية تنقية جديدة مؤخراً. يتم فيها إطلاق فقاعات هواء صغيرة بالقرب من قاع الخزان ثم تراكم الفقاعات الصاعدة وتحملها إلى السطح، حيث تفيض في مزارب أو يتم قشطها والتخلص منها.

### ٧-٣-٢ الأكسدة

في بعض الأحيان، توجد مركبات عضوية ذائبة أو أملاح أو عناصر غير عضوية بمستويات تؤدي إلى تكون مذاقات أو روائح أو ألوان غير مرغوب فيها. يمكن إزالة أو ترسيب العديد من هذه العناصر من خلال الأكسدة. ثم تتم تنقية المياه المعالجة أو ترشيحها. الأكسدة فعالة أيضاً في إزالة العديد من الكائنات الحية الدقيقة وغالباً ما تستخدم لهذا الغرض الوحيد. وتتوفر مجموعة متنوعة من المؤكسدات. والعوامل التي يجب مراعاتها أثناء اختيار المؤكسد تشمل ما يلي:

- قوة المؤكسد (إمكانات نصف الخلية) المطلوبة للتحكم في الشوائب.
- تركيز الشوائب.
- شكل المؤكسد (سائل أو غاز أو صلب).
- تعقيد نظام المعالجة.

- احتياجات الموظفين.
- تكلفة المادة المؤكسدة.
- السلامة.



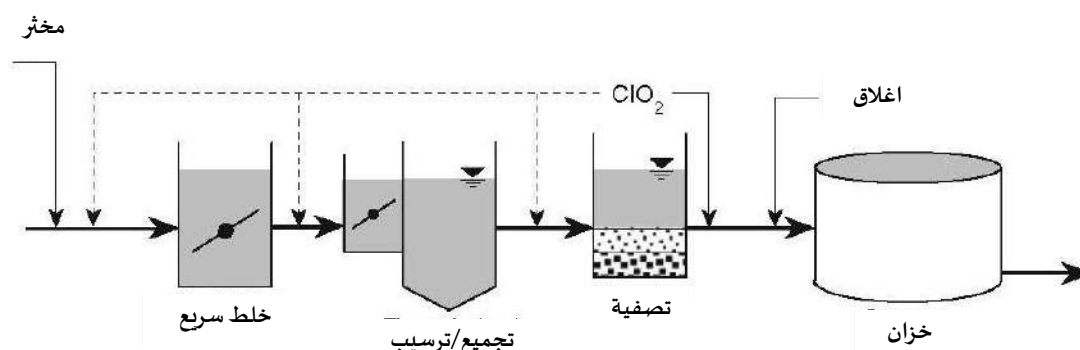
الشكل ٧-٣ محطة معالجة مياه الشرب الأساسية. (U.S. Environmental Protection Agency, 2005b).

أبسط أشكال الأكسدة هي التهوية. ويكون التلامس بين الغلاف الجوي والمياه الخام إلى أقصى حد خلال المرور عبر واحد من عدة أنواع من الهياكل. أبسط الهياكل هي المهويات المتتالية. ينحدر الماء إلى أسفل سلسلة من الدرجات أو كومة من الوسائط الخشنة أثناء نفخ الهواء في الاتجاه المعاكس. وبينما ينتشر الأكسجين في الماء، تتأكسد المعادن، مثل الحديد والمنجنيز والزنك، إلى شكل صلب وتترسب. وتنتقل الغازات، مثل كبريتيد الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون والمركبات العضوية المتطايرة من المرحلة الذائبة إلى الحالة الغازية في الهواء.

أجهزة التهوية الشائعة الأخرى هي الأعمدة المعبأة وناشرات الصواني والرشاشات وناشرات الفقاعات (الهواء المضغوط في قاع خزان الماء). تختلف تكاليف التشغيل والصيانة، اعتماداً على حجم المياه المعالجة، وتركيز الشوائب، وكتلة المواد الصلبة المنتجة، والتي تحدد السعة المطلوبة والأداء المطلوبين لأي مرشحات في المراحل النهائية. وأخيراً، تحدد طبيعة وكتلة الغازات والأبخرة المنقولة إلى الغلاف الجوي ما إذا كان يجب التحكم فيها. تتطلب جميع عمليات الأكسدة الأخرى شراء أو إنتاج مادة كيميائية مؤكسدة أو مركب مؤكسد. أكثر المؤكسدات الكيميائية الأكثر شيوعاً هي الكلور وثنائي أكسيد الكلور والأوزون والبرمنجنات. والمادة الأخرى هي الهيدروجين بيروكسيد الهيدروجين، وهيبوكلوريت، وأحادي وثنائي الكلورامينات، وحمض الهيپوكلوروس. يتم شراء جميع هذه المواد الكيميائية من الشركات المصنعة باستثناء الأوزون وثنائي أكسيد الكلور، وهما أقوى المواد المؤكسدة. يجب أن يتم

إنتاجها في الموقع واستخدامها على الفور. وترد في الشكلين ٧-٤ و ٧-٥ الأنشكال النموذجية لمحطات معالجة المياه التي تشتمل على ثاني أكسيد الكلور أو الأوزون، على التوالي.

الكلور هو أكثر المؤكسدات التجارية شيوعاً. ويتم استخدامه إما في صورة غازية أو سائلة باستخدام المعدات التي تتطلب الحد الأدنى من التشغيل والصيانة. ولسوء الحظ، فإن المنتجات الثانوية المتكونة أثناء تفاعل الكلور مع المركبات العضوية الطبيعية تشكل تهديدات صحية. ونتيجة لذلك، غيرت العديد من منشآت المعالجة المواد المؤكسدة التي تضيفها كمعالجة مسبقة أو أوقفت الأكسدة كخطوة ما قبل المعالجة.

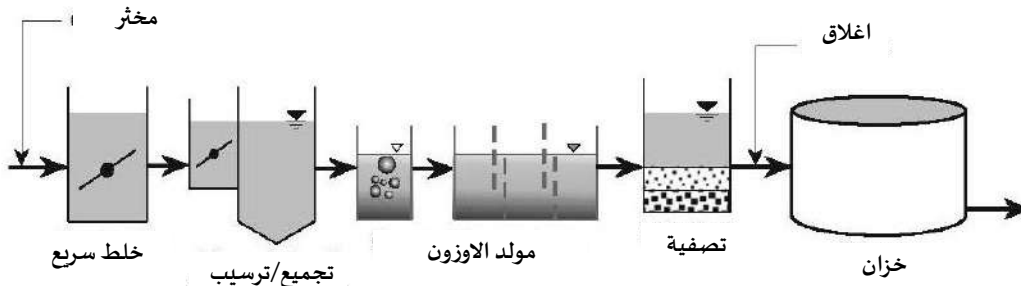


الشكل ٧-٤ الأكسدة في مصنع ثاني أكسيد الكلور. قد تكون نقطة إضافة ثاني أكسيد الكلور (١) قبل الخلط السريع، (٢) قبل التلبد، (٣) قبل الترشيح، أو (٤) بعد الترشيح. (U.S. Environmental Protection Agency, 2005b).

البرمنجنات، سواء البوتاسيوم أو الصوديوم، هي مؤكسد أقل قوة من الكلور. لا يمكنها إزالة نفس مجموعة المركبات العضوية. ويمكن أن تؤكسد البرمنجنات المواد غير العضوية الذائبة غير المرغوب فيها، مثل الحديد والمنجنيز. وتكون أيونات البرمنجنات، التي تكون وردية اللون في محلول مائي، ومرئية للعين المجردة عند تركيزات منخفضة تصل إلى ١ مجم/لتر (جزء في المليون). وإذا لم تكن تركيزات البرمنجنات أقل من الحد المرئي قد يشعر المستخدمون النهائيون بالقلق من لون المياه، على الرغم من أن مستويات البرمنجنات التي تقل عن ١ مجم/لتر لا تشكل أي خطراً على صحة الأفراد الأصحاء. ولهذا السبب، يجب حساب جرعة البرمنجنات بعناية ومراقبة وملاحظة آثارها وبقاياها بعناية. وفي الحالات غير العادية، يمكن إضافة معادل البرمنجنات.

الأوزون هو أقوى المؤكسدات المستخدمة في معالجة المياه. يتم تصنيعه في الموقع عن طريق تمرير الهواء أو الأكسجين من خلال مجال كهربائي قوي. نظراً للتكاليف الرأسمالية والتشغيلية والصيانة، فإن الأوزون هو جزء فقط من أنظمة المعالجة الكبيرة. يتم استخدام الأوزون على الفور. نظراً لأن الأوزون قوي جداً، وبالتالي يمكنه أكسدة المزيد من المكونات العضوية وغير العضوية للمياه

الخام أكثر من أي مؤكسد آخر. ولسوء الحظ وبسبب قوة الأوزون، يجب إدارة استخدامه وجرعته بعناية لتجنب إنتاج أشكال مؤكسدة من المركبات أو العناصر التي تحدث بشكل طبيعي والتي قد تشكل مخاطر على الجمهور. أكثر المواد غير العضوية شيوعاً التي تثير القلق هي البرومات والكروم سداسي التكافؤ.



الشكل ٧-٥ محطة أكسدة الأوزون. (U.S. Environmental Protection Agency, 2005b).

أصبح ثاني أكسيد الكلور مؤكسداً شائعاً لأنه لا يشكل منتجات ثانوية مكلورة. ويتم إنتاجه في الموقع ويستخدم على الفور. تكاليفه الرأسمالية والتشغيلية والصيانة أقل من الأوزون. ويجب عدم الإفراط في استخدام ثاني أكسيد الكلور لأن التركيزات المتبقية أقل من ١ مجم/لتر يمكن أن تسبب مشاكل في الرائحة والطعم.

### ٧-٣-٣ التطهير

يمكن لمسببات الأمراض، مثل الطفيليات الأولية (مثل الجيارديا والكريبتوسبورديوم) والبكتيريا والفيروسات في مياه الشرب - أن تسبب الأمراض المنهكة وحتى الوفاة (الجدول ٧-٣). الطرق والإجراءات الأساسية للتطهير هي نفسها الموصوفة للأكسدة. نظراً لأن جودة المياه تتدهور بمجرد دخولها إلى نظام التوزيع، فإن العديد من المرافق تستخدم مطهراً ثانوياً للحفاظ على الجودة الميكروبيولوجية للمياه. ويمكن أن تتلوث المياه في نظام التوزيع من خلال مجموعة متنوعة من مصادر التلوث، مثل التدفق العكسي، وتسريبات الأنابيب، وإعادة نمو البكتيريا في أنابيب التوزيع. في الولايات المتحدة، تفرض وكالة حماية البيئة أن تحتوي المياه المعالجة على مواد كيميائية زائدة كافية للتطهير للحفاظ على بقايا في نظام التوزيع وضمان عدم إعادة نمو الميكروبات أو إعادة التلوث في المياه أثناء توزيعها (EPA, 1999a, 2006b, U.S.). ومع ذلك، فإن فكرة الحاجة إلى مطهر متبقي ليست مقبولة عالمياً.

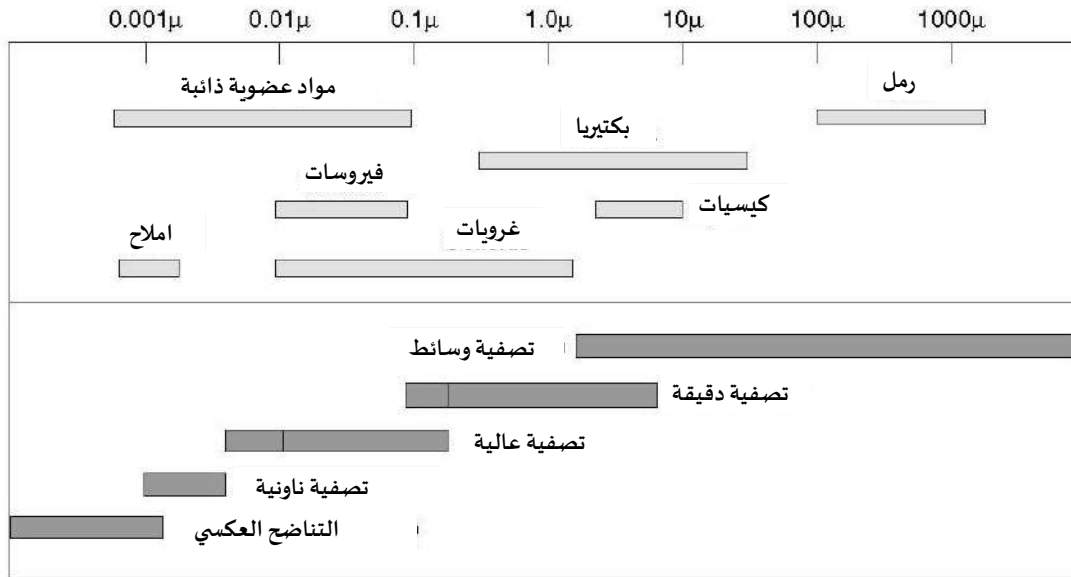
على سبيل المثال، بعض البلديات الأوروبية لا تطبق التطهير الثانوي (Franchi, 2009). وتعتمد كمية المعالجة الإضافية المطلوبة لنوع تحت التأثير المباشر للمياه السطحية على نتائج رصد الكريبتوسبورديوم في مياه المصدر ومستوى المعالجة الحالي. الأنظمة يمكنها معالجة الكريبتوسبورديوم عن طريق (١) إزالة الكريبتوسبورديوم من خلال عمليات الترشيح، مثل أو الترشيح بالوسائط، أو مرشحات الخراطيش، أو الأغشية، أو (٢) استخدام المطهرات الفعالة ضد الكريبتوسبورديوم مثل ثاني أكسيد الكلور والأشعة فوق البنفسجية والأوزون. الكلور والكلورامينات إلى حد كبير غير فعالة إلى حد كبير في تعطيل الكريبتوسبورديوم. تم عرض مزايا وعيوب طرق التطهير المختلفة في الجدول ٧-٤، وترد فعالية طرق التطهير المختلفة لمختلف مسببات الأمراض في الجدول ٧-٥.

ضوء الأشعة فوق البنفسجية مطهر فعال للبكتيريا والفيروسات والجيارديا والكريبتوسبورديوم ولا يشكل نواتج ثانوية للتطهير، مثل ثلاثي الميثان أو أحماض الهالوأسيتيك. ولأن الجسيمات قد تؤثر على أداء أنظمة الأشعة فوق البنفسجية (UV)، فإنها عادةً ما يتم تركيبها في اتجاه مجرى التدفق من مرشح لإزالة العكارة. جرعة الأشعة فوق البنفسجية ٤٠ مللي جول/سم<sup>٢</sup> كافية لإبطال مفعول ٣ لوجستيات من الكريبتوسبورديوم والجيارديا و ١ إلى ٢ لوغاريتم من الفيروسات. أظهرت الدراسات أن جرعة من الأشعة فوق البنفسجية تبلغ ٢٠٠ مللي جول/سم<sup>٢</sup> كافية لتعطيل ٤ لوغاريتمات من الفيروسات. ومع ذلك، ليس من الممكن التحقق من صحة مفاعل الأشعة فوق البنفسجية من أجل ٤ لوغاريتمات للفيروسات (U.S. Environmental Protection Agency, 2005b). وقد استخدمت الأنظمة القائمة على مصابيح الأشعة فوق البنفسجية منخفضة الضغط (LP) في محطات المعالجة الصغيرة ولكن لا يتم تركيبها عادةً في المنشآت الكبيرة نظراً لارتفاع عدد المصابيح المطلوبة. ولا تُستخدم أنظمة المصابيح متوسطة الضغط عادةً في المرافق الصغيرة نظراً لارتفاع التكاليف الرأسمالية مقارنةً بأنظمة LP بمعدلات تدفق منخفضة. جميع أنظمة الأشعة فوق البنفسجية مصممة مع معدات احتياطية لمفاعل إضافي واحد للأشعة فوق البنفسجية (1 np) أو ١٥ في المائة من السعة فوق التدفق التصميمي. أنظمة التطهير بالأشعة فوق البنفسجية حساسة لانقطاعات وتقلبات الطاقة. وعند تعطل مفاعل الأشعة فوق البنفسجية، قد يستغرق الأمر من ٤ إلى ١٠ دقائق حتى تستعيد مصابيح الأشعة فوق البنفسجية الطاقة الكاملة. قد تواجه المرافق ذات الطاقة الرديئة مشاكل مع تعطل نظام الأشعة فوق البنفسجية بشكل متكرر. وتتمثل إحدى طرق منع هذه المشكلة في تركيب مصدر طاقة غير متقطع، وهو في الأساس بطارية تعمل على تخفيف انقطاعات الطاقة وتقلباتها (U.S. Environmental Protection Agency, 2005b).

#### ٧-٣-٤ التطهير بالترشيح

إن تقنيات الترشيح المتقدمة التي تمت مناقشتها هنا قادرة على إزالة الجسيمات من جميع الأحجام، بما في ذلك الطمي والطين، والتقاط الكائنات الحية الدقيقة الصغيرة مثل الفيروسات (الشكل ٧-٦). ومرشحات الوسائط والعناصر القابلة للاستبدال، التي تستخدم عادةً لإزالة كل من التعكر والتلوث البكتيري لمياه الشرب، عرضة للمشكلتين التاليتين:

- المياه عالية التعكر يمكن أن تسد المرشح بسرعة. نظرًا لأن مرشحات الوسائط قادرة على التقاط الجسيمات الصغيرة جدًا، والتي يمكن أن تقلل بشكل كبير من إنتاجيتها، وقد يكون من المستحسن الترشيح المسبق لإزالة الجسيمات المتوسطة إلى الدقيقة قبل أن يزيل المرشح النهائي أصغر الجسيمات.
- قد يلزم إضافة مطهر إلى الماء، من حين لآخر أو بشكل مستمر، لضمان عدم وجود تجمعات بكتيرية تقوم باستقلاب المواد العضوية الملتصقة لكي لا تلوث الماء أو تغير لونه أو تستعمل وسائط الترشيح الوسائط، مما يقلل من كفاءتها.



الشكل ٦-٧ نطاق الفصل الغشائي المدفوع بالضغط. (U.S. Environmental Protection Agency, 2005b).

تُستخدم مرشحات العناصر القابلة للاستبدال لإزالة الجسيمات الصغيرة جدًا إلى الجسيمات المجهرية (تعكر الطهي إلى الكائنات الدقيقة). يتم وضع العنصر القابل للاستبدال، إما خرطوشة أو كيس، في مبنى معدني أو بلاستيكي. يمر الماء من خلال الوحدة حتى يصبح الفرق بين عدادات الضغط في أعلى وأسفل العنصر غير مقبول. يتم إيقاف تشغيل الصمامات من وإلى المبنى ثم يتم تصريف الماء من العنصر ويتم التخلص منه. يتم فتح المبنى، واستبدال العنصر المستخدم والتخلص منه، ويتم إغلاق المبنى. يتم فتح الصمامات، وتنفيس الهواء المحبوس وإعادة وحدة الفلتر للاستخدام. على الرغم من أن هذا هو السيناريو المعتاد، يمكن غسل بعض عناصر المرشح في بعض التطبيقات مرة أو أكثر قبل استبدالها.

تتوفر عناصر المرشح في مجموعة متنوعة من الأحجام والأشكال. يمكن استخدامها بشكل مستقل أو كعنصر من مجموعة معالجة، حيث تشكل خطوة الصقل النهائية. وتستخدم عناصر الترشيح أيضاً لحماية الوحدات الأخرى التي تستهدف المواد العضوية الذائبة أو المواد غير العضوية أو اللون. وهي تأتي في مجموعة متنوعة من الأحجام وقدرات العناصر بناءً على معدلات التدفق المطلوبة.

### مرشحات السيراميك

تستهدف عناصر الترشيح الخزفية الجسيمات الدقيقة جداً والبكتيريا. عناصر السيراميك هي في الغالب من الطين. وبالتالي، تكون المسامات بين الجسيمات صغيرة جداً ومثالية لالتقاط الجسيمات الدقيقة جداً والمجهرية الدقيقة جداً والجزيئات المجهرية. ومع ذلك، فإن متوسط أحجام المسام الصغيرة ومسار التدفق المتعرج يجعل هذه المرشحات عرضة بشكل كبير للانسداد المادي. ولذلك، يجب وضع مرشح آخر في المنبع لمرشح السيراميك لإزالة غالبية الجسيمات الدقيقة إلى المتوسطة، أو يجب تنفيذ دورات قصيرة لتنظيف المرشح أو استبداله. إنتاجية مرشح السيراميك منخفضة للغاية. هذا يحد من استخدامها الاقتصادي لإنتاج كميات صغيرة نسبياً من المياه النظيفة جداً للشرب أو الطهي في مساكن الأسرة الواحدة. إذا كانت كميات كبيرة من المواد العضوية في المياه يمكن أن تهاجمها البكتيريا، فقد يكون من الضروري إضافة مطهر إلى المرشح أو مجرى المياه لمنع مشاكل الطعم والرائحة المتعلقة بالتمثيل الغذائي البكتيري للمادة العضوية.

### المرشحات الغشائية

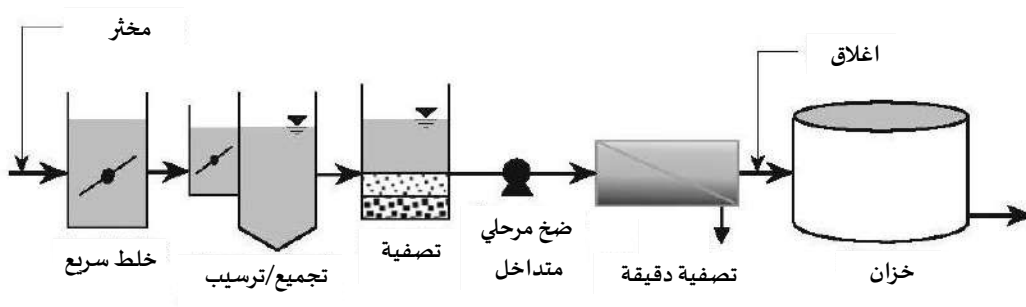
يتم إنفاق تكلفة إزالة مسببات الأمراض من مياه الشرب بشكل جيد من حيث رفاهية الإنسان والفعالية التي تزيد من صحة الفرد والمجتمع. يمكن لمواد الترشيح المتخصصة إزالة أدق الجسيمات العالقة، سواء كانت طميًا أو طينًا أو مسببات الأمراض. نظرًا لتنوع مواد الترشيح وأحجام وأشكال مبيت المرشحات المتاحة، يمكن العثور على مرشح غشائي لأي استخدام تقريبًا. المرشحات الغشائية سهلة التشغيل وتعمل بشكل جيد لمجموعة متنوعة من الأغراض. يتم وضع الماء الخام على جانب واحد من غشاء قابل للاختراق ويتم تطبيق إحدى القوى التالية:

- توضع المياه الخام تحت ضغط موجب.
- توضع المياه المعالجة تحت ضغط سالب.
- يتم ضغط المياه الخام بينما توضع المياه المعالجة تحت ضغط سلبي.

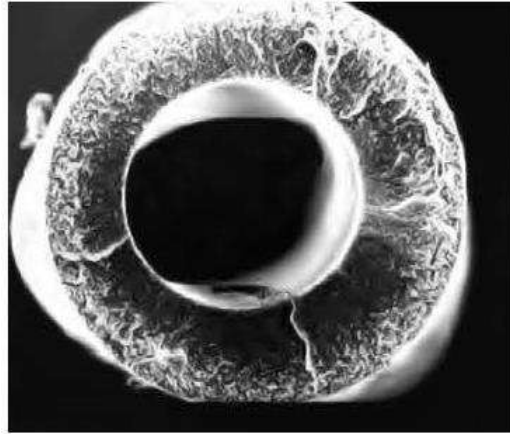
يتم اختيار أحجام مسام الغشاء لمنع حركة المواد الصلبة غير المرغوب فيها، والغرويات ومسببات الأمراض، والمواد المذابة، بما في ذلك الأملاح والأيونات الأولية، من خلال الغشاء. يتدفق الماء والمواد المعلقة أو المواد المذابة من خلال الغشاء لأن ضغط النظام أعلى على جانب الإمداد (الماء الخام). ويتم ضخ المياه المعالجة مباشرة في نظام الإمداد أو تتم معالجتها بشكل أكبر قبل هذه الخطوة. المياه المرفوضة، التي تحتوي الآن على تركيز أعلى من المواد التي لا يمكن أن تمر عبر الغشاء من المياه الخام، عادة ما تتم معالجتها

قبل أو بعد التصريف بموجب تصريح. يتراوح حجم الجسيمات التي يتم التحكم فيها أو إزالتها بواسطة غشاء معين بشكل عام من ١ إلى ١,٥ من الحجم. وتصنف المرشحات حسب نطاق ترشيح أحجام الجسيمات التي يتم التحكم فيها من أكبر إلى أصغر الجسيمات التي تمت إزالتها، أولها هو الترشيح بالوسائط، والترشيح الدقيق، والترشيح الفائق، والترشيح النانوي والتناضح العكسي. يمكن لترشيح الوسائط أن يزيل الغبار الناعم والبكتيريا الكبيرة؛ ويمكن للتناضح العكسي إزالة أيونات المعادن والأملاح والجزيئات العضوية البسيطة، مثل السكريات. ويستخدم هذا الأخير في تحلية مياه البحر.

ويوضح الشكل ٧-٧ محطة معالجة نموذجية للترشيح الدقيق أو الترشيح الفائق. يمكن للمرشح النانوي استبدال وحدة الترشيح الدقيق أو الترشيح الفائق في سلسلة المعالجة، إذا لزم الأمر. عادة ما تكون مواد الأغشية اصطناعية، وعادة ما تكون من البوليمرات. تسمح المواد المتاحة للمرشحات أو لأوعية المعالجة باستخدام الترشيح الغشائي لتنقية السوائل الصناعية والتجارية وكذلك إمدادات المياه. وقد انخفضت تكاليف تركيب وتشغيل وصيانة المرشحات الغشائية بشكل كبير في السنوات الـ ١٠-٢٠ الماضية، مما أدى إلى زيادة استخدامها في معالجة المياه الخام وكذلك العديد من العمليات الصناعية والتجارية. يمكن تكوين الأغشية على شكل أنابيب صغيرة أو خراطيش كبيرة أو صفائح. أمثلة على أنبوب مجوف وتظهر خرطوشة الجرح الحلزوني (الوحدة) في الشكلين ٧-٨ و ٧-٩ على التوالي. قد تعيق الجسيمات الكبيرة أو العديدة (العكارة الطينية) الغشاء بسرعة. في حين أن بعض الأغشية يمكن غسلها عكسياً لاستعادة هذه الوظيفة، فإن تلك المخصصة للتحكم في أصغر الجسيمات لا يمكن غسلها عكسياً ويجب تغيير الغشاء. لهذا السبب، فإن طبيعة المياه الخام والفوائد المحتملة من المعالجة المسبقة لإزالة غالبية الجسيمات العالقة إذا كان معدل المعالجة المخطط لها أو حجم السائل كبير.



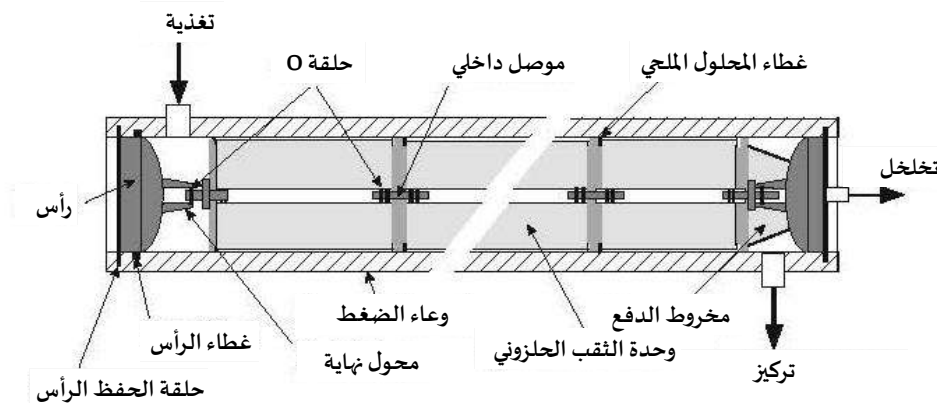
الشكل ٧-٧ محطة الترشيح الدقيق والترشيح الفائق. (U.S. Environmental Protection Agency, 2005b).



الشكل ٧-٨ صورة مجهرية للمقطع العرضي للألياف المجوفة. (U.S. Environmental Protection Agency, 2005a).

### الضغط

يمكن استخدام الضغط الإيجابي أو السلبي لتحسين معدل إنتاجية معظم المرشحات. ومع ذلك، فإن استخدام الضغط العالي جداً أو الفراغات يرفع فرق الضغط عبر الوسائط قد يفشل المرشح اعتماداً على الخصائص الفيزيائية للوسائط. زيادة الإنتاج المرتبطة عادةً بالترشيح المضغوط أو التفريغ تجعل الأنظمة الفرعية الإضافية المطلوبة لإزالة التعكر والتحكم في هذا المخاطر مقبولة، في كثير من الحالات. يعد فرق الضغط المتزايد بين نقاط أعلى وأسفل مرشح الغشاء مؤشراً على أن عنصر المرشح مسدود ويجب استبداله أو تنظيفه (إعادة الغسل). وينطبق الشيء نفسه على المرشحات الخزفية وأوعية الكربون المنشط الحبيبي (انظر القسم التالي).

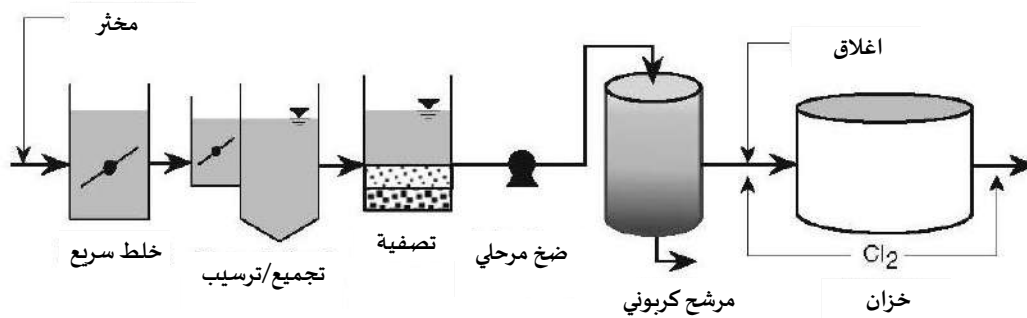


الشكل ٧-٩ وعاء الضغط النموذجي للوحدة النمطية الحلزونية (U.S. Environmental Protection Agency, 2005a).

### امتزاز الكربون

الكربون المنشط الحبيبي (GAC)، المصنوع من عدد من المواد المصدرة الأصلية، مثل الفحم القاري، قشرة جوز الهند وفحم الكوك البترولي والخشب والجفت، ويستخدم لامتصاص المكونات غير المرغوب فيها من المياه الخام. على الرغم من أن جزيئات GAC لها مساحة سطح عالية، وهي غير منتظمة فيزيائياً للغاية، ومتوفرة في مجموعة متنوعة من الأحجام، إلا أن الوسائط لا تستخدم عادةً لإزالة أو التقاط الجسيمات العالقة، مثل المواد العضوية أو الطين. ويرجع ذلك إلى أن جزءاً كبيراً من القدرة الامتزازية للوسائط، التي عادةً ما تعتمد على الشحنات الكهربائية الضعيفة، سوف تضع إذا تم منع الاتصال المادي بين الماء الخام و GAC بسبب الجسيمات العضوية وغير العضوية المتراكمة سابقاً.

كما ناقش [Franchi, \(2009\)](#) فإن السبب الرئيسي لاستخدام GAC هو قدرته على إزالة المركبات العضوية. يمكن ل GAC إزالة المركبات العضوية الاصطناعية بفعالية، مثل المذيبات العطرية (البنزين، التولوين والنيتروبينينات)، والعطريات المكلورة (مركبات ثنائي الفينيل متعدد الكلور متعدد الكلور، والكلوروبينينات، والكلورونافثالين)، والفينول والكلوروفينولات، والعطريات متعددة



الشكل ٧-١٠ وعاء الضغط النموذجي للوحدة النمطية الحلزونية (U.S. Environmental Protection Agency, 2005b).

النوى (مثل الأسينافثين والبنزوبيرين)، ومبيدات الآفات ومبيدات الأعشاب (مثل ال دي. دي. تي والألدرين والكلوردان وسباعي الكلور)، والأليفاتية المكلورة (مثل رابع كلوريد الكربون و كلو إيثرات الروكيل)، والهيدروكربونات عالية الوزن الجزيئي (الأصباغ والبنزين والأمينات). يمكن استخدام GAC في إزالة المركبات العضوية الطبيعية مثل الهيوميات (سلانف بروميد الميثيل ديسيليل) والمركبات المسببة للطعم والرائحة (Snoeyink and Summers, 1999). يوضح الشكل ٧-١٠ محطة نموذجية لمعالجة المياه باستخدام GAC.

أثناء التشغيل، عندما يتم استنفاد قدرة الامتزاز لمرشح GAC في نهاية المطاف، يجب استبدال الوسائط وتجديدها. واعتماداً على جودة المياه المراد معالجتها ومعدلات الترشيح، فإن الفترة الفاصلة بين استبدال الوسائط قد تكون أشهر أو سنوات. والمعالجة

المسبقة للحد من التحميل العضوي وإزالة المواد الصلبة العالقة التي قد تقلل من القدرة الامتزازية لـ GAC أو تسد عمود الامتزاز وهو خيار قيم في بعض الحالات. ومن النادر استخدام الكربون المنشط المسحوق في معالجة المياه الجوفية باستثناء إزالة كبريتيد الهيدروجين.

### ٧-٣-٥ تقنيات المعالجة المبتكرة

تشمل أساليب معالجة مياه الشرب المتطورة الأخرى امتزاز الأيونات غير العضوية على الراتنجيات التي يمكن تجديدها أو استبدالها، والتقطير. وتتطلب كلتا الطريقتين إدارة دقيقة وطاقة كبيرة وإمدادات وعمالة كبيرة وتوليد تيارات نفايات بتركيزات عالية من الشوائب. تيارات النفايات نفسها قد تتطلب المعالجة أو التخلص منها. نادرًا ما تكون أنظمة المعالجة بهذا التعقيد والتكلفة مبررة للمياه المستخدمة في الأغراض السكنية أو التجارية أو الصناعية ذات الحجم الكبير.

تعتمد المعالجة البيولوجية على تطوير غشاء حيوي رقيق يقوم باستقلاب المركبات العضوية غير المرغوب فيها، وعادةً تلك التي تحتوي على الكبريت أو النيتروجين، والتي تسبب طعمًا وروائح غير مقبولة. البكتيريا الأكثر كفاءة هي البكتيريا الهوائية. وبالتالي فإن الظروف المثلى للمعالجة البيولوجية تكون عالية في الأكسجين المذاب، مما يسمح للبكتيريا المتخصصة بأكسدة وترسيب المنجنيز والحديد والزرنيخ. ويمكن للمرشح البيولوجي المُدار بشكل صحيح أن يحقق جميع الأهداف الواقعية. ومع ذلك، فإن جميع الأنظمة البيولوجية تتطلب إشرافًا دقيقًا. ولذلك، على الرغم من أن هذه الأنظمة أصبحت أكثر شيوعًا، إلا أنها ليست شائعة في الولايات المتحدة كما هو الحال في أوروبا.

### ٧-٣-٦ تقنيات التناضح العكسي

يمكن استخدام تقنية التناضح العكسي (RO) لاستخراج المياه الصالحة للشرب من مياه البحر (حوالي ٣,٥ في المائة تقريباً من إجمالي المواد الصلبة الذائبة). ويتشابه استخدام التناضح العكسي لتحلية المياه مع التطبيقات الأخرى حيث يُستخدم التناضح العكسي ضغط الضخ للتغلب على الضغط التناضحي عبر الغشاء القابل للنفاذ، وتجبر هذه الأنظمة المياه على المرور عبر الغشاء لإنتاج تيار متخلل عالي الجودة. وتيار مرفوض يحتوي على أملاح وشوائب من مياه التغذية بتركيزات أعلى بكثير حيث يجب التخلص منها بشكل صحيح. بشكل عام، الأغشية المستخدمة لتحلية المياه هي أغشية مركبة من الأغشية الرقيقة (TFC)، تتكون من طبقة دعم من البولي سلفون وطبقة رقيقة من البولي أميد. وقد استخدمت أغشية أسيتات السليلوز في معالجة المياه المالحة ولكنها غير مناسبة لتحلية المياه. عادةً ما تكون أغشية تحلية المياه TFC من طبقتين، ولكن في بعض الأحيان يتم استخدام تكوينات ثلاثية الطبقات عندما تكون هناك حاجة إلى زيادة المتانة. تعمل أغشية TFC بشكل جيد على نطاق واسع من الأس الهيدروجيني ودرجات الحرارة. نقطة الضعف الأساسية لهذه الأغشية هو عدم توافقها مع المؤكسدات الكيميائية، والتي يمكن استخدامها للمعالجة المسبقة. تُستخدم تقنية التناضح العكسي أيضًا لمعالجة المياه الجوفية قليلة الملوحة في المناطق التي تأثرت فيها طبقات المياه

الجوفية بتسرب المياه المالحة، وكذلك في المناطق الداخلية بسبب ارتفاع منسوب المياه الجوفية الطبيعية عالية التمدن بشكل طبيعي. تشبه معالجة هذه المصادر معالجة تحلية مياه البحر، مع انخفاض ضغط التشغيل والمعالجة المسبقة الأقل.

تحلية الينابيع قليلة الملوحة والينابيع المغمورة

يتزايد عدد السكان في جميع أنحاء العالم، وخاصة في المناطق الساحلية والصحراوية، ويتزايد الطلب على مياه الشرب باستمرار. والحل الأكثر منطقية في مثل هذه المناطق هو استخدام التناضح العكسي لتحلية مياه البحر والينابيع قليلة الملوحة (في البر والمغمورة) والمياه الجوفية المعدنية. يمكن الحصول على الطاقة لهذه العملية من محطات توليد الطاقة التقليدية أو، في مناطق خطوط العرض الاستوائية، من منظومات الطاقة الشمسية. وعلى الرغم من أن غالبية محطات تحلية المياه الحالية تستخدم تقنية التناضح العكسي، إلا أن هناك بعض البدائل القابلة للتطبيق، مثل:

- الغسيل الكهربائي والغسيل الكهربائي العكسي.
- التقطير الوميضي متعدد المراحل.
- التقطير متعدد التأثير.
- ضغط البخار (ميكانيكي أو حراري).

على الرغم من التحديات المستمرة المرتبطة بتطبيق هذه التقنية بنجاح، إلا أن تقنية التناضح العكسي عادةً ما تكون لها مزايا مقارنة بتقنيات تحلية المياه المنافسة. الميزة الرئيسية هي أن تكلفة دورة الحياة (أي، رأس المال السنوي بالإضافة إلى تكاليف التشغيل والصيانة) عادةً ما تكون أقل من التقنيات الأخرى. ولهذا السبب، فإن ما يقرب من ثلثي محطات تحلية المياه التي يزيد عددها عن ٩٥٠٠ محطة تحلية في جميع أنحاء العالم هي منشآت لتحلية المياه بالتناضح العكسي. وكما هو الحال مع التقنيات الأخرى، فإن التحدي الرئيسي في التصميم والموقع لمنشأة التناضح العكسي هو التخلص من المحلول الملحي (أي، التخلص من التيار المرفوض). ويخضع هذا الأمر للوائح الدولة واللوائح الوطنية ويتم معالجته على أساس كل حالة على حدة.

### المعالجة المسبقة

المعالجة المسبقة الفعالة أمر بالغ الأهمية لتصميم وتشغيل منشأة التناضح العكسي لتحلية المياه. وهي مطلوبة للسيطرة على العديد من المشاكل المحتملة مثل:

- القشور المعدنية (أي كربونات الكالسيوم وكبريتات الكالسيوم).
- التلوث البيولوجي.
- التلوث بالحديد والمنغنيز وأكاسيد المعادن الأخرى.
- ترسيب السيليكا.
- تلوث الجسيمات والغرويات.

يمكن التحكم في القشور المعدنية والأكسدة والترسيب أو تقليلها باستخدام مثبتات القشور، مثل العوامل المخليبية والمواد الخافضة للتوتر السطحي. وقد يكون من الصعب السيطرة على الحشف الحيوي إذا كانت هناك إمكانية نمو ثابتة. بشكل عام، يوصى بإجراء اختبار تجريبي لتحديد المشاكل المحتملة، بما في ذلك الحشف الحيوي. وظروف النظام اللاهوائي مرغوب فيها، لأن البكتيريا اللاهوائية تنمو بشكل أبطأ بكثير من البكتيريا الهوائية. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن يضمن التصميم الميكانيكي الجيد إمكانية إجراء التنظيف الفعال (أي سرعات تدفق متقاطعة كافية وما إلى ذلك). يعد التدريب الجيد على التشغيل أمر بالغ الأهمية لسلامة الأغشية وتشغيلها. سوف يفشل النظام المصمم بشكل جيد في حالة إذا لم يكن المشغلون مدربين تدريباً جيداً ويقظين. يمكن للمشاكل التشغيلية أن تغير بسرعة اقتصاديات معالجة التناضح العكسي، على سبيل المثال، إذا افترض التخطيط الأصلي عمراً افتراضياً للأغشية يتراوح بين ثلاث إلى خمس سنوات ولكن يجب استبدالها كل سنة أو سنتين في ظل التشغيل الفعلي. تقنيات الفصل المختلفة مناسبة للتحكم في المواد الصلبة العالقة والرواسب والغرويات. وتشمل هذه التقنيات جميع التقنيات التي تمت مناقشتها سابقاً، بدءاً من التصفية (ربما مع التصفية الكيميائية) إلى الترشيح الحبيبي إلى التصفية (أي مرشحات الخراطيش، وشاشات التنظيف الذاتي، والترشيح الدقيق، والترشيح الفائق، والترشيح النانوي). يعد المشغلون المدربون على مراقبة هذه الأنظمة وصيانتها أمراً حيوياً للتحكم في الجسيمات والغرويات، وبالتالي أداء نظام التناضح العكسي.

### التكاليف الرأسمالية

التكاليف الرأسمالية لمحطات تحلية المياه متغيرة، بناءً على المعالجة المسبقة المطلوبة، ومخلفات ما بعد المعالجة، ومصادر المياه الخام ومآخذها، وطريقة التخلص من المحلول الملحي، وما شابه ذلك. بالنسبة للمحطات التي تزيد سعتها عن ١٠ مليون جالون في اليوم، تتراوح تكاليف الوحدة من ٣ إلى ٥ دولارات تقريباً لكل غرام من سعة المحطة. تميل تكاليف الوحدة إلى تنخفض مع زيادة السعة. استناداً إلى المبادئ التوجيهية للتكاليف التجريبية، تبلغ التكلفة التقديرية لمرفق سعة ٢٥ مليون جالون في اليوم حوالي ١٠٠ مليون دولار تقريباً. وهذا يتوافق بشكل جيد مع التكلفة المتوقعة لمحطة تحلية المياه بسعة ٢٥ مليون جالون في اليوم في تامبا، فلوريدا.

### تكاليف التشغيل والصيانة

المكونات الرئيسية لتكلفة التشغيل والصيانة هي الطاقة واستبدال الأغشية والعمالة والمواد الكيميائية. وترتبط تكلفة وحدة التشغيل والصيانة، مثلها مثل رأس المال، بحجم المحطة. فوق ١٠ مليون جالون في اليوم، تتراوح التكلفة الإجمالية للمياه (التشغيل والصيانة بالإضافة إلى خدمة الدين) من ١,٥٠ دولار إلى ٢,٥٠ دولار تقريباً لكل ١٠٠ جالون. بالنسبة للمحطة الافتراضية التي تبلغ سعتها ٢٥ ملغ/غالون تقريباً.

### استرداد الطاقة

تُستخدم طرق مختلفة لاستعادة الطاقة في تيار الرفض عالي الضغط من نظام التناضح العكسي لتقليل تكاليف الطاقة: عجلة بيلتون، ومبادل العمل، ومبادل الضغط، والشاحن التوربيني الهيدروليكي، وغرف متساوية الضغط. التقنيات الأربعة الأولى راسخة نسبياً. عجلة بيلتون هي الجهاز الأكثر استخداماً في المحطات الكبيرة. مبادلات الضغط أكثر شيوعاً في المنشآت الأصغر حجماً (أقل من ٢,٥ مليون م³ في اليوم).

تُستخدم غرف الضغط المتساوي لنقل طاقة الضغط من المحلول الملحي إلى التغذية مباشرة دون استخدام التوربينات أو المضخات (التي تقدم طبقة أخرى من عدم كفاءة العمود). أحد التحسينات الحديثة لهذه التقنية تستخدم دواراً بقناة دوارة لنقل الطاقة من المحلول الملحي إلى تيار التغذية. نظراً لتكوينه فإن هذا الجهاز يعمل أيضاً كمضخة عالية الضغط (مما يقلل من السعة المطلوبة لمضخات التغذية ذات الضغط العالي). تزعم مصادر الأدبيات أن كفاءة هذا الجهاز تصل إلى ٩٥ في المائة، مقارنةً بما يصل إلى ٨٥ في المائة (مع تجاهل عدم كفاءة العمود التي يتم إدخالها من خلال قيادة مضخة الضغط العالي).

### العلاقة بمحطات توليد الطاقة

تتراكم العديد من المزايا الناتجة عن تحديد موقع مرافق تحلية المياه بالقرب من محطات توليد الطاقة الكهربائية. هذه المزايا، التي تميل إلى تقليل التكاليف الرأسمالية وتكاليف التشغيل والصيانة المرتبطة بتحلية المياه، وتشمل:

- تقاسم مأخذ مياه البحر المشترك.
- الجمع بين تصريف المحلول الملحي بالتناضح العكسي مع تصريف مياه تبريد محطات توليد الطاقة (تقليل مياه التبريد العمود الحراري لمياه التبريد وتقليل ملوحة عمود المحلول الملحي).
- القدرة على النظر في إنشاء محطة تحلية مياه هجينة تتكون من عمليات التناضح العكسي والعمليات الحرارية (الكهرباء لمحطة التناضح العكسي وبخار النفايات منخفض الضغط للتحلية الحرارية).

### ٧-٤ دراسات حالة

#### ٧-٤-١ نظام معالجة مياه الينابيع على نطاق صغير، العراق

المياه الجوفية والينابيع هي مصادر المياه للعديد من القرى في شمال العراق. وتستخدم المياه الجوفية من الينابيع أو تستخدم الآبار في الزراعة التقليدية (الري وتربية الماشية لإمدادات الغذاء المحلية) وللإستهلاك البشري. وغالباً ما تكون المياه ذات نوعية رديئة من الناحية الصحية والجمالية لدرجة أنها غير مناسبة للعديد من هذه الاستخدامات. الكبريتيد هو أحد الملوثات الرئيسية التي تحدث بشكل طبيعي. وغالباً ما يضطر السكان المحليون في كثير من الأحيان إلى الهجرة لإيجاد موارد مائية أفضل. يضطر ما يقدر

بنحو ١٢٠,٠٠٠ شخص في هذه المنطقة إلى الاعتماد على إمدادات مياه دون المستوى المطلوب (Stevanovic and Iurkiewicz, 2004).

وتشمل مصادر المياه الموجودة أباراً عميقة (١٠٠-٢٠٠ قدم)، وأباراً ضحلة (٣٠-٥٠ قدماً)، وينابيع. ويشمل نظام الري النموذجي على مضخة بئر (باستثناء الأنظمة التي تغذيها الينابيع)، وقنوات خرسانية بالجاذبية أحواض صغيرة، وأنابيب مجلفنة مثقبة للري بالتنقيط. لا تحتوي هذه الأنظمة على معدات معالجة المياه ولكن يمكن للقنوات أن توفر بعض الاختزال للكبريتيد، إذا كان هناك وقت كافٍ لإطلاق كبريتيد الهيدروجين المذاب في الغلاف الجوي.

ويرد في الجدول ٧-٦ ملخص لأخذ عينات وتحليل ما يقرب من ١٤٠ مصدر مياه. لكل مصدر مائي، يتم عرض أفضل وأسوأ صفات المياه. إرشادات جودة المياه (أي إرشادات منظمة الصحة العالمية والمستويات التنظيمية لوكالة حماية البيئة الأمريكية) موضحة أيضاً في الجدول. القيم التي تزيد عن المعايير تضرر بخط غامق. وتظهر بالبنط العريض القيم الأخرى المثيرة للقلق، حتى إذا لم تكن موجودة ضمن المعايير مثل العسر الكلي البالغ ٣٥٥٢ ملغم/لتر، وهو غير مناسب للاستخدام المنزلي تظهر هذه البيانات تبايناً كبيراً بين أفضل المصادر وأسوأها داخل كل نوع من المصادر. من المفترض أن أعمدة البيانات الدنيا تعكس المصادر ذات أفضل جودة مياه ضمن كل فئة على عكس القيم الدنيا المأخوذة من مصادر عديدة ضمن كل فئة. يبدو أن هذا الأمر قابلاً للتطبيق، نظراً لأن عدداً من المعاملات مرتبطة من منظور تحليلي (على سبيل المثال، إجمالي المواد الصلبة الذائبة تشمل العسر، والبوتاسيوم، والصوديوم، والكلوريد).

من المفترض أن التعكر تم قياسه في المختبر وليس في الحقل. لذلك، من الممكن أن التعكر نتج عن ترسيب المكونات الذائبة أثناء الرحلة إلى المختبر. الحديد، إذا كان موجود، فسوف يترسب عند التعرض للأوكسجين. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تترسب كربونات الكالسيوم عند تسخين العينة أو عند ارتفاع درجة حرارة العينة أو عند إطلاق ثاني أكسيد الكربون المذاب، اعتماداً على مستوى الكالسيوم المذاب في العينة وعوامل أخرى. ولذلك، فإن مستويات التعكر المرتفعة لا تُستخدم بالضرورة كمؤشر على وجود تلوث ميكروبي في هذه الحالة (ولكن ليس بالضرورة أن تكون مستويات التعكر المرتفعة مؤشراً على التلوث الميكروبي في هذه الحالة (ولكنها لا تزال تعكس مشكلة جمالية كحد أدنى). ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن ارتفاع مستوى النترا في بعض المصادر يشير إلى وجود تلوث من مصادر حيوانية أو بشرية. ولذلك، يوصى بالمعالجة لإزالة التعكر والتطهير.

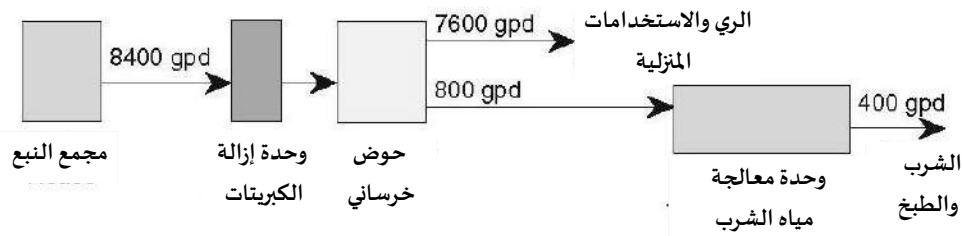
على الرغم من عدم ظهورها في الجدول ٧-٦، إلا أن معظم المصادر التي تم أخذ عينات منها تحتوي على تركيزات كبيرة من الكبريتيد. تشير نتائج أخذ العينات أيضاً إلى أنه قد تكون هناك مصادر ذات نوعية جيدة للاستهلاك البشري بعد إزالة الكبريتيد، مع معالجة قليلة أو بدون معالجة إضافية. وقد تتطلب إمدادات أخرى درجة عالية من المعالجة لتكون مقبولة للاستهلاك البشري.

### نطاق المشروع

وقد اقترح (Stevanovic and Lurkiewicz 2004) في البداية أنظمة معالجة المياه على نطاق صغير ونموذجي . تعمل هذه الأنظمة على تحسين سلامة وجودة إمدادات المياه في القرى للبشر والماشية والري وصحة الإنسان والحيوان والنبات. وتقلل هذه الفوائد من التكلفة المجتمعية للنظام. يتكون نظام القرية من وحدتي معالجة (الشكل ٧-١١):

١. سيعالج نظام إزالة كبريتيد الهيدروجين ما يقرب من ٨٠٠٠ جرام في اليوم للماشية والري، ونقل المياه المعالجة إلى وحدة معالجة مياه الشرب لمزيد من المعالجة الواقعة بالقرب من بئر أو نبع موجود.

٢. سيعالج نظام معالجة مياه الشرب حوالي ٤٠٠ جرام في اليوم للاستهلاك البشري. ستعتمد مكونات النظام الدقيقة في الوحدة على نوعية المياه الخام والمعالجة المسبقة. سيتم وضع الوحدة في القرية، مع وجود محطة لتعبئة أوعية المياه المنزلية أو ربطها بنظام أنابيب مضغوطة. تتواجد الكبريتيدات الذائبة في الماء في صورة غاز كبريتيد الهيدروجين وأيون. وتحدد نسبة كل منهما نسبة الأس الهيدروجيني للماء. يمكن تحقيق إزالة الكبريتيد عن طريق تجريد كبريتيد الهيدروجين من المحلول أو الأكسدة الكيميائية أو الأكسدة البيولوجية.



الشكل ٧-١١ تكوين نظام معالجة المياه المعياري الصغير.

إن تركيزات الكبريتيد العالية والمواقع الريفية تجعل الأكسدة الكيميائية غير عملية لهذه الأنظمة. كما أن الأكسدة البيولوجية ليست عملية أيضاً، نظراً لاهتمام المشغل المطلوب. يمكن أن يسبب التجريد الروائح المزعجة، ولكن الطبيعة الريفية للمنطقة تجعل من غير المرجح أن تكون هناك منازل قريبة من نظام معالجة المياه. لذلك، قد يتضمن النظام واحدة أو أكثر من تقنيات التجريد التالية:

١. برج تجريد مزود بتهوية قسرية (ضخ إلى أعلى البرج باستخدام مضخات الآبار).
  ٢. تهوية الهواء المنتشر في قناة خرسانية (مناسبة لكل من الينابيع والآبار).
  ٣. اضطراب القناة المستحث - أقسام متسلسلة هندسية كجزء من أنظمة قنوات الجاذبية أو وضع عوائق في قنوات الجاذبية لزيادة التجريد الذي يحدث بالفعل.
- بعد إزالة الكبريتيد، قد تكون بعض المصادر مناسبة للاستهلاك الأدمي دون مزيد من المعالجة الإضافية. ستكون هذه المصادر هي المصادر ذات الخصائص الموضحة في أعمدة الحد الأدنى في **الجدول ٧-٦**. بالنسبة لهذه المصادر، التي تكون منخفضة في التعكر والصلابة والمواد الصلبة الذائبة، لن تكون هناك حاجة إلا للتطهير والتخزين. يتكون التطهير من جهاز التطهير بالكور السلي، والذي يستخدم أقراص هيبوكلوريت الكالسيوم بدلاً من الهيبوكلوريت السائل (أي المبيض) أو الكلور الغازي، متبوعاً بوعاء صغير لتوفير وقت التلامس قبل التخزين. مع وجود تلامس كافٍ للتطهير قبل التخزين، فإن قصر الدائرة الكهربائية في خزان التخزين ليس مصدر قلق. بالنسبة لجميع المصادر باستثناء أفضل المصادر جودة، فإن المعالجة لإزالة مجموعة متنوعة من المكونات ضرورية لإنتاج مياه صالحة للاستهلاك البشري. ستطلب هذه المصادر معالجة لإزالة العكارة والعسر وعدد من المكونات الأخرى. وتتكون المعالجة من التليين وإزالة العكارة وتقليل المواد الصلبة الذائبة الكلية. التليين باستخدام وحدة VRTX، والتي من شأنها تحويل الكالسيوم والمغنيسيوم المذاب إلى أشكال غير ذائبة. وستتم ترشيحها من المياه باستخدام مرشح رملي قبل خطوة إزالة المواد الصلبة الذائبة الكلية، مع أي تعكر في الماء. تتكون إزالة المواد الصلبة الذائبة من وحدة تناضح عكسي صغيرة. المركز من نظام التناضح العكسي في خزان للغسيل العكسي اليومي للمرشح الرملي. سيكون التطهير كما نوقش سابقاً، يليه التخزين. إن مزايا النهج الموصوف، الذي يعالج القيود المفروضة على تقديم الخدمة، أي المعالجة منخفضة التكلفة للمياه ذات الجودة الرديئة للغاية، هي:

- تطبيق التقنيات التي لا تتطلب مواد كيميائية للمعالجة، مما يؤدي إلى انخفاض تكلفة تشغيل بشكل كبير.
- كفاءة عالية في استخدام المياه تتحقق من خلال استخدام المخلفات من نظام التناضح العكسي لغسل المرشح الرملي.
- معالجة تتطابق جودة المياه المعالجة مع الاستخدام المقصود (لا تستخدم مياه الشرب المعالجة في الري والماشية).
- حجم الوحدة المدمجة. تبلغ مساحة وحدة التطهير والتخزين ٨ × ١٠ قدم. تشغل المعالجة الكاملة ٨ × ٢٠ قدم.
- تقنيات المعالجة المتقدمة (التجفيف الهيدروديناميكي والتناضح العكسي) المعدلة لسهولة التشغيل بواسطة مشغل عديم الخبرة.

النتيجة من هذا النظام هي

- توفير مياه صالحة للري والثروة الحيوانية، مما يحسن قدرة السكان المحليين على توفير الغذاء محلياً وإقليمياً.

- توفير المياه الصالحة للاستهلاك البشري، مما يحسن صحة ونوعية حياة السكان المحليين وسيؤدي ذلك إلى القضاء على الحاجة إلى الهجرة الإقليمية لتحديد موقع المياه الصالحة للشرب.
- من المتوقع أن تؤدي مثل هذه التحسينات إلى تحسين الاقتصادات المحلية، مما قد يؤدي أيضاً إلى أشكال أخرى من النشاط الاقتصادي. وسيكون التنوع مفيداً لهذه المناطق.

### الجدوى المالية

من المتوقع أن توفر القرى العمالة اللازمة لبناء شبكات المياه و موقع للتخلص المسؤول بيئياً من مخلفات المعالجة والمواد المستهلكة. وهذا سيمنحهم حصة في نتائج المشروع وبناء الدعم المحلي. وعلى الرغم من الظروف الاقتصادية الصعبة في هذه المنطقة، من المهم أن يدفع المستهلكون ثمن المياه، حتى لو لم يغط في البداية تكلفة الإنتاج. وهذا من شأنه أن يشجع على استخدام المسؤول للمياه والحفاظ عليها (استناداً إلى خبرة وكالات المعونة الدولية). سيكون لهذا النظام تكاليف تشغيل وصيانة أقل من الأنظمة البديلة. المدخلات الرئيسية الوحيدة هي الكهرباء (لمضخة البئر ومضخة تغذية التناضح العكسي) والاستبدال الدوري للأغشية الغشاء (يتم تحديد تواريخها فيما بعد). ولذلك، من المتوقع أن تكون القرى قادرة على دفع التكلفة الحقيقية لإنتاج المياه مع تطور الاقتصادات المحلية.

### الاستدامة

جميع التحديات التي يطرحها هذا المشروع يمكن التحكم بها من خلال الاختبار المناسب والاهتمام بالتصميم المناسب. التحديات والحلول الخاصة بكل منها هي:

- سيعتمد مكون النظام على جودة مياه المصدر المحلي.
- نظام المعالجة المقترح لا يتطلب أي تعديل من قبل المشغلين.
- عدد قليل جداً من الأجزاء المتحركة لا يستخدم نظام المعالجة أي مواد كيميائية للمعالجة السائلة.
- يتم الحفاظ على الطاقة من خلال مطابقة قدرة المعالجة مع الاستخدام المقصود (على سبيل المثال، معالجة ٤٠٠ جرام في اليوم للاستهلاك البشري، بدلاً من معالجة ٨٠٠٠ جرام في اليوم بالكامل). يمكن استخدام الطاقة الشمسية لتشغيل وحدة معالجة مياه الشرب.

### قابلية التكرار والتوسع

بساطة التصميم ستسمح بوضع النظام في أي جزء من العالم بجودة مياه مماثلة، مثل الشرق الأوسط أو شمال أفريقيا وجنوب الصحراء الكبرى. بالنسبة للمناطق ذات خصائص جودة المياه المختلفة، يمكن تعديل نظام المعالجة لتلبية متطلبات جودة المياه الأخرى ويمكن توسيع نطاق النظام لإنتاج معدلات تدفق أكبر.

### ٧-٤-٢ تقنية الأوزون، ميشيغان

تم إنشاء عمود ١,٤ ديوكسان واسع النطاق، يمتد من ٣ إلى ٤ أميال وبعمق يزيد عن ٢٠٠ قدم، خلال عملية التخلص من مياه عملية التصنيع. تتكون معالجة المياه الجوفية الملوثة من استعادة ١٣٠٠ جالون في الدقيقة من العديد من آبار الإنتاج، ونقلها إلى موقع معالجة مركزي من خلال قوة الأنابيب الرئيسية، والأكسدة المتقدمة لإزالة الملوثات العضوية. ويتمثل التحدي الخاص في وجود البروم بشكل طبيعي في المياه الجوفية، والذي يمكن تحويله إلى برومات عن طريق المعالجة المفرطة في الشدة. ١، ٢-ديوكسان هو جزيء مستقر للغاية. فهو لا يتحلل بسهولة بواسطة البرمنجنات أو بيروكسيد الهيدروجين، أو الكلور أو البكتيريا. الأوزون هو مؤكسد قوي يمكنه تحليل الملوثات عبر آليتين. الأولى، ويشار إليها عادةً بالآلية المباشرة، وتتضمن تفاعل الأوزون الجزيئي مع الملوثات. وتتضمن الآلية الثانية، والمعروفة باسم الآلية غير المباشرة، أكسدة الملوثات بواسطة المؤكسدات الثانوية، خاصة جذر الهيدروكسيل، OH، الذي ينتج عندما يتحلل الأوزون. وتعتمد أهمية المسارات المباشرة وغير المباشرة لتحلل الملوثات على التفاعل النسبي للملوث مع الأوزون والجذور الثانوية.

### نظرة عامة

نظام Pall Ozone (O<sub>3</sub>)/بيروكسيد الهيدروجين (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) هو مفاعل تدفق مستمر يتم فيه إنتاج الأوزون (في شكل غاز) وبيروكسيد الهيدروجين بشكل مستمر. هذا النظام فعال للغاية في إزالة المواد العضوية المختلفة الموجودة في المياه الجوفية الملوثة ويمكنه تنقية وتطهير مياه الشرب والمعالجة. التأثيران الرئيسيان لخلط الأوزون مع بيروكسيد الهيدروجين هما (١) زيادة كفاءة الأكسدة عن طريق زيادة تحويل جزيئات الأوزون إلى جذور الهيدروكسيل و(٢) تحسين انتقال الأوزون من الطور الغازي إلى السائل بسبب زيادة معدلات تفاعل الأوزون. تنشأ جذور الهيدروكسيل في الماء أثناء تحليل الأوزون. بإضافة بيروكسيد الهيدروجين، يتم رفع معدل التحلل، مما يرفع تركيز جذور الهيدروكسيل:



تستخدم تقنية المعالجة Pall O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> باستخدام نقاط حقن مضمنة متعددة (الشكل ٧-١٢). يتم تحديد الوقت المناسب بين نقاط الحقن المتتالية بعناية لتعظيم معدل التدمير العضوي. هذا النظام فريد من نوعه، مقارنةً بالأنظمة المماثلة المتاحة تجاريًا، من حيث أنه لا يتطلب توليد الأوزون عالي الضغط (>١٥ رطل لكل بوصة مربعة). يمكن للنظام استخدام إما الأكسجين السائل أو

الأكسجين عالي النقاء في الموقع لتوليد غاز  $O_3$ . ويتم التحكم في النظام بواسطة وحدة تحكم منطقية قابلة للبرمجة. يوفر جهاز الاتصال التلقائي إخطارًا بحالات الإنذار إلى موظفي التشغيل خارج الموقع كما يسمح برنامج الكمبيوتر بتفاعل المشغل مع نظام وحدة التحكم. حيث يوفر تمثيلًا مرئيًا لظروف تشغيل النظام ويسمح للمشغل ببدء تشغيل وإيقاف المعدات وضبط نقاط ضبط النظام حسب الرغبة. النظام مزود بلوحات واجهة متقدمة للسماح بالمراقبة والتشغيل من مواقع بعيدة. يراقب معالج الكمبيوتر باستمرار مستويات الأكسجين والأوزون المحيطة باستمرار. يتم إيقاف تشغيل النظام تلقائيًا ويتم تشغيل مروحة العادم أو المبرد إذا كانت هناك حالة ارتفاع في مستوى الأوزون.

يتفاعل الأوزون مباشرة مع أيون البروميد لتكوين البرومات. يحول الأوزون أيون البروميد الطبيعي (Br) إلى أيون البروميت الطبيعي (BrO) إلى أيون البروميت ( $BrO_2$ ) وبعد ذلك إلى أيون البرومات ( $BrO_3^-$ ) ثم إلى أيون البرومات ( $BrO_3^-$ ). في الوقت الحالي، يبلغ الحد الأقصى لمستوى تلوث البرومات في مياه الشرب حاليًا ١٠ ملغم/لتر. إن  $Pall O_3/H_2O_2$  قادر على معالجة المواد العضوية مع الحفاظ على البرومات أقل بكثير من تركيز الحد الأقصى المطلوب.

مزايا تقنية المعالجة  $O_3/H_2O_2$  هي

- لا يوجد طعم أو رائحة متبقية تركها العملية.
- الإزالة الكاملة للمواد العضوية في الموقع دون توليد مخلفات.
- توليد الأوزون في الموقع.
- القدرة على تصميمها كوحدة متنقلة لتشغيلها في الأماكن السكنية أو التجارية (الشكل ٧-١٣).
- استخدام عدد أقل من المواد الكيميائية مقارنةً بأنظمة المعالجة الأخرى، وبالتالي تقليل الحاجة إلى التخزين في الموقع مع المخاطر والتكاليف المرتبطة بها.
- قدرة الأوزون على الأكسدة الجزئية للمواد العضوية غير المستهدفة في الماء إلى مركبات قابلة للتحلل الحيوي يمكن إزالتها عن طريق الترشيح البيولوجي.
- عدم قدرة الكائنات الدقيقة على مقاومة الأوزون.



الشكل ٧-١٢ نظام المعالجة بالأكسدة والأوزون المتقدم على نطاق كامل لمعدل تدفق ١٣٠٠ جالون في الدقيقة. التصميم وهندسة فرساد فتوحى، شركة بال.



الشكل ٧-١٣ الوحدة الميدانية المتنقلة لمعدل تدفق ٢٠٠ جالون في الدقيقة. التصميم وهندسة فرساد فتوحى، شركة Pall.

## ٧-٥ الخلاصة

إن الاستخدام النهائي والحالة الطبيعية لمياه الينابيع يحددان المعالجة المطبقة. الطلب على مياه الينابيع ومياه الاستخدام العام في تزايد مستمر مع تزايد عدد السكان. لذلك، فإن المياه الأقل جودة، هي المياه الوحيدة تقريباً غير المستخدمة بالكامل في الوقت الحالي، ستتطلب في نهاية المطاف معالجة قبل الاستخدام. تتشابه مكونات المياه التي تحتاج إلى تقليل أو إزالة تلك الموجودة في المياه الجوفية، على الرغم من أن الغازات المذابة، مثل كبريتيد الهيدروجين، قد يكون أكثر شيوعاً في أجزاء معينة من العالم، اعتماداً على الجيولوجيا التي تنشأ منها مياه الينابيع والمياه الجوفية.

التقنيات المستخدمة لتكييف مياه الينابيع هي تلك المستخدمة لمعالجة المياه الجوفية والمياه السطحية. هندستها وتشغيلها مفهومة جيداً ومتاحة بسهولة. التحدي الأهم هو المراقبة الكافية للينابيع التي تتأثر بسرعة بالأحداث السطحية، مثل أحداث الأمطار، وتعديل عمليات محطة المعالجة لإزالة المكونات الجديدة أو مواصلة التحكم في المستويات المتزايدة من تلك الموجودة بالفعل.

## المراجع

- Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005. Geochemistry, groundwater and pollution, second ed. Taylor & Francis/Balkema, Leiden, the Netherlands.
- Davis, S.N., DeWiest, J.M., 1991. Hydrogeology. Krieger Publishing Company, Malabar, FL.
- Drever, J.I., 1988. The Geochemistry of Natural Waters. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Earth Tech (Canada), 2005. Chlorine and Alternative Disinfectants Guidance Manual. Prepared for: Province of Manitoba (Canada) Water Stewardship. Canada Office of Drinking Water, Winnipeg, Manitoba.
- Eckhardt, G., 2009. Hydrogeology of the Edwards Aquifer. Available at [www.edwardsaquifer.net/geology.html#movement](http://www.edwardsaquifer.net/geology.html#movement).
- Franchi, A., 2009. Groundwater Treatment. In: Kresic, N. (Ed.), Groundwater Resources: Sustainability, Management and Restoration. McGraw-Hill, New York, pp. 437–482.
- Geldreich, E.E., 1972. Water-borne pathogens. In: Mitchell, R. (Ed.), Water Pollution Microbiology. John Wiley & Sons, New York, pp. 207–241.

- Health Research Inc., 2007. Recommended Standards for Water Works, 2007 Edition. Health Education Services Division, Albany, NY. Available at: [www.leafocean.com/test/10statepreface7.html](http://www.leafocean.com/test/10statepreface7.html).
- Kresic, N., 1988. Karst aquifers of the Lim catchment (Serbia). In: Des comptes rendus des seances de la Socie ´te Serbe de Geologie pour l'anne ´e 1985–1986. Belgrade, pp. 217–223.
- Kresic, N., 2009. Groundwater Resources: Sustainability, Management, and Restoration. McGraw-Hill, New York.
- Matthess, G., 1982. The Properties of Groundwater. John Willey & Sons, New York.
- Salvato Jr., J.A., 1972. Environmental Engineering and Sanitation, second ed. John Wiley & Sons, New York.
- Snoeyink, V.L., Summers, R.S., 1999. Adsorption of Organic Compounds. In: Letterman, R.D (Ed.), Water Quality and Treatment, fourth ed. American Water Works Association. McGraw Hill, New York, pp. 13.1–13.76.
- Stevanovic, Z., Iurkiewicz, A., 2004. Hydrogeology of northern Iraq, Vol. 2, Regional hydrogeology and aquifer systems. Spec. Ed. FAO (Spec. Emerg. Prog. Serv.), Rome.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1991. Guidance manual for compliance with the filtration and disinfection requirements for public water systems using surface water sources. Office of Drinking Water, Washington, DC, various paging.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1992. Consensus method for determining groundwater under the direct influence of surface water using microscopic particulate analysis (MPA). Office of Drinking Water, Washington, DC, EPA 910/9-92-029.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1998. National Primary Drinking Water Regulations: Interim Enhanced Surface Water Treatment; Final Rule. Fed. Regist. 63 (241), Rules and Regulations, 69477–69521.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1999a. Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual. Office of Water, EPA 815-R-99-014 Available at: [www.epa.gov/safewater/mbdp/alternative\\_disinfectants.guidance.pdf](http://www.epa.gov/safewater/mbdp/alternative_disinfectants.guidance.pdf) (Accessed January 2009).
- U.S. Environmental Protection Agency, 1999b. Enhanced Coagulation and Enhanced Precipitative Softening Guidance Manual. Office of Water. EPA 815-R-99-012. Available at: [www.epa.gov/safewater/mbdp/coaguide.pdf](http://www.epa.gov/safewater/mbdp/coaguide.pdf) (Accessed January 2009).

- U.S. Environmental Protection Agency, 1999c. Guidance Manual for Conducting Sanitary Surveys of Public Water Systems;
- Surface Water and Ground Water under the Direct Influence (GWUDI). Office of Water, EPA 815-R-99-016.
- U.S. Environmental Protection Agency, 2003. Overview of the Clean Water Act and the Safe Drinking Water Act. Available at: [www.epa.gov/OGWDW/dwa/electronic/ematerials](http://www.epa.gov/OGWDW/dwa/electronic/ematerials) (Accessed in September 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency, 2005a. Membrane Filtration Guidance Manual. Office of Water. EPA 815-R-06-009. Available at: [www.epa.gov/safewater/smallsys/pdfs/guide-smallsystems-sdwa.pdf](http://www.epa.gov/safewater/smallsys/pdfs/guide-smallsystems-sdwa.pdf) (Accessed January 2019).
- U.S. Environmental Protection Agency, 2005b. Technologies and Costs Document for the Final Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule and Final Stage 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rule. Office of Water. EPA 815-R-05 013 Available at: [www.epa.gov/safewater/disinfection/lt2/regulations.html](http://www.epa.gov/safewater/disinfection/lt2/regulations.html) (Accessed January 2009).
- U.S. Environmental Protection Agency, 2006a. Setting standards for safe drinking water. Office of Water, Office of Ground Water and Drinking Water. Available at: [www.epa.gov/safewater/standard/setting.html](http://www.epa.gov/safewater/standard/setting.html) (updated November 28, 2006; accessed December 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency, 2006b. Point-of-Use or Point-of-Entry Treatment Options for Small Drinking Water Systems. Office of Water. EPA 815-R-06-010 Available at [www.epa.gov/safewater.smallsys/ssinfo.htm](http://www.epa.gov/safewater.smallsys/ssinfo.htm) (Accessed January 2019).



## تحديد مناطق حماية الينابيع

### ٨-١ مقدمة

المياه العذبة من الينابيع هي المثال الرئيسي للموارد الطبيعية المتجددة: التي يمكن استخدامها، والتي تجدد من رشح مياه الأمطار في مستجمعات المياه اعتماداً على عدم تغير المناخ بشكل كبير. ومن إحدى الطرق الأكثر وضوحاً لإهدار هذا المورد هي تلوث المياه الجوفية. ولذلك، فإن تحديد مناطق حماية الينابيع وتنفيذ ممارسات استخدام الأراضي في هذه المناطق، تؤدي إلى الحد من الأنشطة الملوثة، وتلك هي مفاتيح للاستخدام المستدام لموارد مياه الشرب القيمة هذه (Adams and Foster, 1992; Ravbar, 2007). وهناك عناصر أخرى مهمة تشمل مراقبة جودة مياه الينابيع ومعالجة مياه الشرب، عادة عن طريق الترشيح والتطهير (الشكل ٨-١). كل هذه الأنشطة مطلوبة لضمان الحصول على مياه شرب آمنة من الينابيع وكذلك من موارد المياه العذبة الأخرى. تسبب معظم الأنشطة البشرية التلوث. والتخطيط المعقول لاستخدام الأراضي يتألف من إيجاد توازن بين حماية المياه الجوفية من جهة والأنشطة البشرية مثل الزراعة والصناعة من جهة أخرى. يجب أن تكون حماية المياه الجوفية أولوية قصوى في المناطق التي يمكن أن يصل التلوث لطبقة المياه الجوفية بسهولة وتؤثر على نبع أو بئر ضخ يستخدم لإمداد مياه الشرب لعدد كبير من السكان. ويتمثل تحدي تقسيم مناطق الحماية في تحديد هذه المناطق وإعطائها أولوية عالية. ومع ذلك، حتى في المناطق الأقل حساسية، يجب التقليل من الأنشطة الملوثة قدر الإمكان. وموارد المياه الجوفية التي لا يتم استخدامها في الوقت الحاضر يجب حمايتها للاستخدام المحتمل في المستقبل؛ علاوة على ذلك، فإن المياه الجوفية النظيفة هي أيضاً حاسمة للنظم الإيكولوجية المعتمدة على المياه الجوفية (Eamus and Froend, 2006) و"التنوع البيولوجي الخفي" في طبقات المياه الجوفية (Danielopol and Pospisil, 2001).

هناك نهجان عامان لحماية المياه الجوفية: هما حماية المورد وحماية المصدر. غالباً ما يستخدم مصطلح المورد لوصف جسم المياه الجوفية بأكمله. وفي المقابل يمكن أن يكون "المصدر" نبعاً مستغلاً، أو بئر ضخ، أو أي نوع آخر من نقاط استخراج المياه الجوفية

(Daly et al., 2002). إن مفهومي حماية المورد والمصدر مرتبطان بشكل لا يقبل التجزئة: فمن المستحيل حماية مصدر معين دون حماية المورد. ومع ذلك، من وجهة نظر مفاهيمية، من المفيد التمييز بين النهجين.

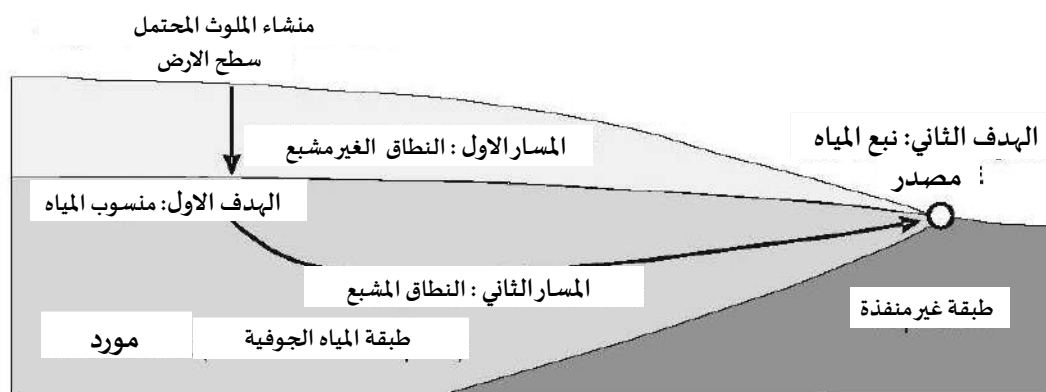


الشكل ٨-١ سلسلة الامان المطلوبة لضمان مياه الشرب المأمونة من الينابيع.

وهذا يقودنا إلى مفهوم أساسي آخر، وهو النموذج المفاهيمي للإدارة البيئية القائم على مبدأ (المنشاء-المسار-الهدف). "المنشأ" هو مكان الانطلاق المحتمل للملوثات، وعادةً ما يكون سطح الأرض؛ و"المسار" يشمل جميع مكونات النظام الطبيعي الذي ينتقل من خلالها الملوث المحتمل من المنشأ إلى الهدف؛ و"الهدف" هو المياه التي يحتمل أن تتأثر بالتلوث ويجب حمايتها. بالنسبة لحماية للمورد، فإن الهدف هو منسوب المياه الجوفية. ويتكون المسار بشكل أساسي من المنطقة غير المشبعة، حيث تتحرك المياه والملوثات إلى أسفل عن طريق الرش. بالنسبة لحماية المصدر، فالهدف هو النبع أو البئر، ويتضمن المسار المنطقة المشبعة من المياه الجوفية أو نظام طبقة المياه الجوفية، كما هو موضح في الشكل ٨-٢.

السؤال الأول والأكثر أهمية لحماية المصدر هو: أين تقع منطقة مستجمع مياه النبع؟ يشار أحياناً إلى منطقة المستجمع المائي أيضاً بمنطقة الصرف أو التغذية أو المستجمع. تختلف الطرق الهيدرولوجية لتحديد مناطق مستجمعات المياه، مثل اختبارات التتبع الاصطناعي. والسؤال الثاني هو: ما مدى سهولة دخول الملوثات إلى طبقة المياه الجوفية وانتقالها إلى النبع؟ يؤدي هذا السؤال إلى مفهوم مهم آخر، وهو مدى قابلية المياه الجوفية للتلوث، والذي يمكن تعريفها على أنها "مدى السهولة التي يمكن أن تدخل بها الملوثات إلى المياه الجوفية".

يمكن استخدام مصطلحي *قابلية التأثر بالتلوث والحماية الطبيعية من التلوث* بشكل متغير. فالقابلية الشديدة تعني حماية طبيعية منخفضة والعكس صحيح. يمكن التمييز بين نوعين رئيسيين من قابلية تأثر المياه الجوفية: قابلية التأثر الذاتية وقابلية التأثر النوعية. قابلية التأثر الذاتية تعتمد فقط على الخصائص الجيولوجية والهيدروجيولوجية لمنطقة ما وهي مستقلة عن نوع الملوثات. بالإضافة إلى ذلك، تأخذ قابلية التأثر النوعية في الاعتبار خصائص ملوث معين أو مجموعة من الملوثات وتفاعلها مع البيئة الجيولوجية. ويمكن استخدام خرائط قابلية التأثر كأساس لتحديد نطاقات حماية موارد ومصادر المياه الجوفية.



الشكل ٨-٢ نموذج المنشأ والمسار والهدف لحماية موارد المياه الجوفية ومصادرها.

خرائط قابلية التأثر (vulnerability) ليست قائمة بحد بذاتها ولكن يمكن دمجها مع أنواع أخرى من المعلومات، اعتماداً على الغرض. تُظهر خريطة المخاطر (Hazards) موقع ونوع الأنشطة الملوثة الفعلية أو المحتملة مثل الزراعة والصناعة ومواقع التخلص من النفايات. بينما تجمع خريطة الخطر (Risk) بين معلومات خريطة قابلية التأثر وخريطة المخاطر وتتيح تحديد المناطق التي تكون فيها المياه الجوفية فعلياً معرضة لخطر التلوث. وبالتالي، تُظهر خريطة الخطر ضرورة اتخاذ إجراءات، من الناحية المثالية عن طريق إزالة المخاطر القائمة وتغيير ممارسات استخدام الأراضي أو عن طريق تنفيذ أنظمة الإنذار المبكر. عنصر آخر من عناصر خطط حماية المياه الجوفية المناسبة هو تقييم أهمية المياه الجوفية أو مياه الينابيع لاستخدامها كمياه للشرب، أو للنظم الإيكولوجية للمياه السطحية المتصلة، أو لأغراض أخرى. إن النبع الكبير الذي يعتبر مصدراً لمياه الشرب لعدد كبير من السكان يصنف دائماً على أنه مهم، ويجب أن تكون حمايته ذات أولوية عالية (Ravbar and Goldscheider, 2007). يتعامل عدد كبير من التشريعات والمبادئ التوجيهية الوطنية والدولية مع تحديد نطاقات حماية موارد ومصادر المياه الجوفية. ومراجعة ومناقشة ومقارنة جميع

هذه المبادئ التوجيهية خارج نطاق هذا الفصل. واهداف هذا الفصل تتمثل في تقديم لمحة عامة موجزة عن مشاكل تلوث مياه الينابيع وعمليات التوهين الطبيعي، ومناقشة الأساس الهيدروجيولوجي لتحديد مناطق حماية الينابيع، وتقديم الطرق والتقنيات ذات الصلة. وبما أن معظم الينابيع الكبيرة في العالم هي الينابيع الكارستية، هناك تركيز خاص على هذا النوع من البيئة الهيدروجيولوجية.

## ٨-٢ ملخص لمشاكل التلوث في مياه الينابيع

### ٨-٢-١ مقدمة

يمكن أن تتواجد الملوثات في مياه الينابيع من مصادر مختلفة، مثل استخدام الأراضي الزراعية، ومواقع التخلص من النفايات، وتسرب صهاريج التخزين أو خطوط الأنابيب، وإطلاق مياه الصرف الصحي المنزلية غير المعالجة (الشكل ٨-٣)، والأنشطة الصناعية، وحوادث النقل في مستجمعات مياه الينابيع. ويمكن أن تؤثر الملوحة الناجمة عن الري غير السليم على جودة مياه الينابيع (Scanlon et al., 2007). ويمكن تصنيف الملوثات إلى مركبات كيميائية غير عضوية ومركبات كيميائية عضوية ومسببات الأمراض الميكروبية. بعض الملوثات، مثل النترات ( $\text{NO}_3$ )، ليست سامة بشكل حاد، لكن تركيزها العالي في مياه الشرب على مدى فترات طويلة من الزمن غير صحي للإنسان حيث تعتبر النترات من الملوثات الشائعة للمياه الجوفية في المناطق الزراعية (Boyer and Pasquarell, 1999). وبعض الملوثات تعتبر خطره حتى عند مستويات منخفضة للغاية. على سبيل المثال، يمكن لفيروس نوروك واحد في مياه الشرب أن يسبب العدوى (Szewzyk et al., 2000). كما يعد الكروم سداسي التكافؤ والبنزين مثالين من الملوثات العضوية وغير العضوية شديدة السمية، على التوالي.

ليس فقط السمية، بلغة الأهمية بالنسبة إلى خطرها الفعلي على صحة الإنسان ولكن أيضاً مصير الملوثات وانتقالها في طبقات المياه الجوفية. على سبيل المثال، يعتبر الرصاص معدناً ساماً شديد السمية في التربة والنباتات والهواء الجوي ولكنه لا يثير القلق عموماً في المياه الجوفية من الينابيع، نظراً لمحدودية حركته (Shokes and Moller, 1999). بطريقة مبسطة، يمكن تصنيف الملوثات إلى ملوثات محافظة وأخرى تفاعلية. الملوثات المتحفظة يعتمد انتقالها فقط على الخواص الهيدروليكية لطبقة المياه الجوفية، وخاصة سرعة التدفق وعدم التجانس الذي يسبب التشتت. بالإضافة إلى ذلك، تتأثر الملوثات التفاعلية بعمليات مختلفة، مثل الامتزاز، والهطول المطري، والتحول الكيميائي، والتحلل الحيوي، وبالنسبة للجسيمات الملوثة، الترسيب والترشيح (Fetter, 1999).

إن ثبات الملوثات في المياه الجوفية فيما يتعلق بوقت الانتقال إلى النبع هو مفتاح القضية الرئيسية في تحديد مناطق حماية المصدر. يمكن أن يتراوح زمن انتقال المياه الجوفية من ساعات في الممرات الكارستية إلى آلاف السنين أو أكثر في أنظمة الدوران

العميقة (Toth, 1999). أما المعادن السامة فلها زمن انتقال لانهائي ولكن يمكن تحويلها إلى أنواع أقل سمية عن طريق عمليات الأكسدة والاختزال وغيرها من العمليات، مثل تحويل الكرومات سداسي التكافؤ عالي السمية إلى كروم سداسي التكافؤ الأقل سمية. بعض المركبات العضوية الأخرى قابلة للتحلل البيولوجي، في حين أن بعضها الآخر غير قابل للتحلل البيولوجي، وذلك اعتمادًا على تركيبها الكيميائي وظروفها الجيوكيميائية الحيوية. حيث يتراوح ثبات مسببات الأمراض الميكروبية في المياه الجوفية من شبه غائبة إلى ما يقرب من اللانهائي.



الشكل ٨-٣ بئر حقن سابق بالقرب من مطعم في محطة للتزلج في شمال جبال الألب النمساوية، حيث تم إطلاق مياه الصرف الصحي غير المعالجة في طبقة المياه الجوفية الكارستية (الصورة: N. Goldscheider). ظهر متتبع تم حقنه في هذا العمود في خمسة ينابيع كارستية على مسافة تتراوح بين ١,٤ و ٥,٧ كم بعد ١٤ إلى ٢٧ ساعة. للاطلاع على التفاصيل انظر (Goldscheider 2005a).

تنشأ مسببات الأمراض الموجودة في مياه الينابيع بشكل عام من التلوث البرازي، وغالباً ما يكون سببها الأنشطة الزراعية في منطقة مستجمعات المياه أو إطلاق مياه الصرف الصحي المنزلية غير المعالجة (الشكل ٨-٣). معظم مسببات الأمراض البرازية لا يمكنها النمو أو التكاثر داخل طبقة المياه الجوفية وتستمر لفترات زمنية محدودة فقط. ولذلك، تستخدم معظم تشريعات حماية المياه الجوفية وقت الانتقال كمعيار رئيسي لتحديد "النطاقات الداخلية لحماية المصدر" (انظر القسم ٨-٤). على سبيل المثال، تستخدم التشريعات الألمانية خط زمن الانتقال البالغ ٥٠ يوماً، على افتراض أن معظم مسببات الأمراض سيتم ترشيحها أو تفقد تأثيرها بحلول ذلك الوقت، وهو نهج أثبت جدواه في معظم الحالات (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, 2006). ومؤشر بكتيريا البراز، مثل الإشريكية القولونية، تُستخدم للتحكم في السلامة الصحية للمياه. ومع ذلك، يمكن أن تستمر بعض مسببات الأمراض لفترة أطول، مثل كيسات الكريبتوسبورديوم (Bonadonna et al., 2002) وفيروسات معينة (Schaub and Oshiro, 2000)، والتي يمكن أن تستمر أيضاً على الرغم من معالجة المياه بالكلور (Lisle and Rose, 1995; Mackenzie et al 1994). لذلك، فإن عدم وجود الإشريكية القولونية لا يوفر أماناً مطلقاً (Brookes et al., 2005). وغالباً ما تكون مستويات الملوثات في مياه الينابيع متغيرة للغاية، خاصة عند الاستجابة للهطول المطري الشديد. لذلك، فإن المراقبة المستمرة لجودة المياه مهمة، وهي مكملية للتحليلات التفصيلية لعينات المياه المأخوذة على فترات زمنية منتظمة. ومع ذلك، فإن مسببات الأمراض الميكروبية والعديد من الملوثات الأخرى لا يمكن رصدها بشكل مستمر، ولذلك يجب رصد المعاملات البديلة كمؤشرات للتلوث. على سبيل المثال، ثبت أن الزيادة المتزامنة في الكربون العضوي الكلي والعكارة في مياه الينابيع الكارستية ترتبط بشكل جيد مع مستويات الإشريكية القولونية (الشكل ٨-٤). لذلك، يمكن استخدام المراقبة المستمرة لهذين العاملين "كنظام إنذار مبكر" للتلوث الميكروبي (Goldscheider and Zopfi, 2006; Pronk)، والتي يمكن تحسينها أكثر من خلال قياسات توزيع حجم الجسيمات (Pronk, Goldscheider, and Zopfi, 2007).

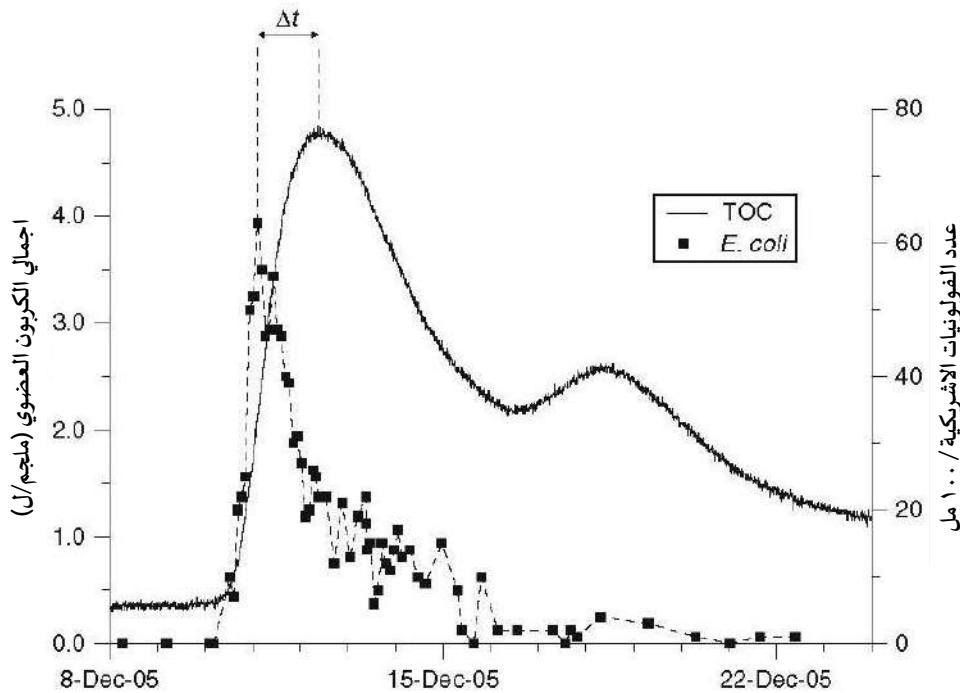
## ٨-٢-٢ مصادر التلوث

يمكن تجميع مصادر الملوثات وفقاً لامتدادها المكاني (مصادر مساحية، مصادر خطية، مصادر نقطية)، وخصائصها الزمنية (دائمة، دورية، متقطعة، مرة واحدة فقط)، والمنشأ العام للملوثات (زراعية، صناعية، منزلية، حضرية، عسكرية، طبيعية). ووفقاً لنوع الملوثات وكمية الملوثات المنبعثة.

اقترح Fetter (1999) تصنيفاً مفصلاً، وهو مستنسخ هنا بطريقة مختصرة:

- مصادر الملوثات المصممة لتصريف المواد تشمل خزانات الصرف الصحي وأحواض الصرف الصحي، وأنواع مختلفة من آبار الحقن، والتطبيقات الأرضية، مثل استخدام الحمأة من محطات معالجة مياه الصرف الصحي في التربة كسماد.

- المصادر المصممة لتخزين المواد أو معالجتها أو التخلص منها، مثل الأنواع المختلفة من مدافن ومقالب النفايات، ومخلفات المناجم، ومخازن المواد، والمقابر، ومدافن الحيوانات، وصهاريج التخزين فوق وتحت الأرض بالإضافة إلى مواقع التخلص من النفايات المشعة.
- المصادر المصممة لحفظ المواد أثناء النقل، بما في ذلك خطوط أنابيب النفط أو الغاز أو السوائل الأخرى وكذلك مجاري مياه الصرف الصحي؛ كما أن نقل المواد الخطرة بالشاحنات أو القطارات يمثل أيضاً مصادر محتملة للتلوث.



الشكل ٨-٤ تطور إجمالي الكربون العضوي (TOC) والبكتيريا البرازية (*E. coli*، CFU = وحدات تكوين المستعمرات) التي لوحظت في نبع كارستي في سويسرا بعد هطول أمطار غزيرة. ينشأ كل من الكربون العضوي والبكتيريا من مجرى مائي غارق يصرف من الأراضي الزراعية، وهو ما يفسر العلاقة العالية. وبالتالي تشير مستويات عالية من (TOC) إلى سوء جودة مياه الشرب. ويمكن تفسير أوقات الذروة المبكرة للبكتيريا ( $\Delta t$ ) من خلال سرعات نقل أعلى وسرعة موت البكتيريا التي تعتمد على الوقت للبكتيريا. ويوضح التباين الزمني العالي للتلوث البرازي أيضاً ضرورة منهجية جمع العينات بناء على الأحداث وتقنيات الرصد المستمر. للاطلاع على التفاصيل انظر [Pronk et al., \(2006,2007\)](#).

- مصادر تصريف المواد كنتيجة لأنشطة أخرى مخطط لها؛ وتشمل هذه المجموعة العديد من الأنشطة الزراعية، مثل الري الذي يتسبب في التملح، واستخدام المبيدات الحشرية والأسمدة الاصطناعية ومخلفات حيوانات المزارع، وكذلك استخدام ملح الطرق.
- المصادر التي توفر ممراً لدخول المياه الملوثة إلى طبقات المياه الجوفية، مثل إنتاج ومراقبة الآبار، وأعمال الحفر، ومنشآت الطاقة الحرارية الأرضية. على الرغم من أن هذه ليست مصادر تلوث بالمعنى الصحيح، إلا أن مثل هذه المنشآت يمكن أن تدخل الملوثات أو تسمح بالتلوث المتبادل بين طبقات المياه الجوفية المختلفة.
- المصادر الطبيعية التي تنشأ أو تتفاقم تصريفاتها بسبب الأنشطة البشرية؛ وهذا يشمل التفاعلات بين المياه السطحية والمياه الجوفية الناجمة عن الضخ (رشح الضفة) وتداخلات مياه البحر الناجمة عن الإفراط في ضخ المياه الجوفية الساحلية.

### ٨-٢-٣ الملوثات غير العضوية

تشتمل الملوثات غير العضوية على المعادن السامة وأنواع مختلفة من المغذيات والأملاح، والتي تحدث بشكل عام على شكل أنيونات وكاتيونات ذائبة. وبعض الملوثات غير العضوية لها عمر غير محدود: على سبيل المثال الكاديوم يبقى كاديوم دائماً؛ حيث يمكن تخفيفه عن طريق الامتزاز أو عمليات أخرى، ولكن لا توجد عملية طبيعية تقلل فعلياً من الكتلة الكلية للكاديوم. مركبات أخرى، مثل النترات ( $\text{NO}_3$ ) أو الأمونيا ( $\text{NH}_4$ )، يمكن أن تتحول (تتحلل) إلى مركبات أخرى، مثل غاز  $\text{N}_2$  أو غاز  $\text{N}_2\text{O}$ . وتعتبر المعادن السامة، مثل الرصاص ( $\text{Pb}$ )، من الملوثات الإشكالية في التربة والمياه السطحية والرواسب الحديثة، والهواء الجوي، خاصة في البيئات الحضرية. تتواجد المعادن السامة بشكل طبيعي في مناطق التعدين، لكن أنشطة التعدين تعزز إطلاقها في البيئة (Shokes and Moller, 1999). وبسبب محدودية حركتها، تكون المعادن السامة أقل تواتراً في المياه الجوفية. وغالباً ما تشكل الكاتيونات (على سبيل المثال،  $\text{Pb}^{2+}$ ) تكون عرضة للامتزاز، أو تترسب على شكل أكاسيد منخفضة الذوبان أو كبريتيدات أو معادن أخرى. ومع ذلك، في الأنظمة الكارستية يمكن أن تعمل الرواسب في المجاري والكهوف كمستودعات للمعادن السامة والملوثات الأخرى؛ وأثناء أحداث التدفق العالي، يمكن تعبئتها ونقلها نحو الينابيع الكبيرة (Vesper and White, 2004). بعض الكاتيونات المعدنية أكثر قدرة على الحركة، خاصة الكاديوم ( $\text{Cd}^{2+}$ )، وهو أيضاً شديد السمية. الزئبق شديد السمية ويمكن لبيكتيريا معينة أن تحوله إلى زئبق الميثيل عالي الحركة،  $\text{HgCH}_3$  أو ثنائي ميثيل الزئبق المتطاير،  $\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$  (Ehrlich, 1997). الزرنيخ (As) هو معدن سام يسبب تلوث المياه الجوفية على نطاق واسع ويؤدي إلى أمراض في العديد من مناطق العالم، على سبيل المثال، في الصين وبنغلاديش والبنغال الغربية (الهند)، حيث يتأثر عشرات أو مئات الملايين من الأشخاص (Nickson et al., 2000). التلوث الطبيعي بالزرنيخ يحدث في المناطق القاحلة إلى شبه القاحلة وفي أحواض المياه الجوفية الغربية المنخفضة، أي في المناطق المنبسطة والمنخفضة، حيث تكون المياه الجوفية بطيئة وغالباً ما يتم استغلالها بواسطة آبار الضخ العميقة (Kinniburgh and Smedley, 2002).

ولذلك، فإن الينابيع الكبيرة لا تتأثر عادةً بهذا النوع من التلوث. ومع ذلك، توجد أيضاً المياه الغنية بالزرنيخ في مناطق التعدين؛ وفي الماضي، كانت تستخدم أيضاً في المبيدات الحشرية، والتي ربما لا يزال بعضها مستخدماً في بعض المناطق. النترات ( $\text{NO}_3^-$ ) هو أحد الملوثات الشائعة للمياه الجوفية، خاصة في المناطق الزراعية، حيث تُستخدم مركبات النترات المختلفة كأسمدة (Boyer and Pasquarell, 1999). النترات ليست ضارة للغاية، ولكن التركيزات العالية منها على فترات طويلة من الزمن غير مواتية لصحة الإنسان. وغالباً ما تترافق مستويات النترات العالية مع أنواع أخرى من التلوث الزراعي، مثل البكتيريا البرازية أو المبيدات الحشرية، وبالتالي فهي علامة سيئة لجودة المياه بشكل عام. وبما أن النترات مادة مغذية، فإن زيادة تركيزاتها تؤثر أيضاً على النظام البيئي. في ظل ظروف الأكسدة، تنصرف النترات بشكل متحفظ؛ أما في ظروف الاختزال، فإنها تتحول ميكروبيولوجياً إلى غاز النيتروجين (بنزع النتروجين). وتحتوي مياه الصرف على مستويات عالية من الأمونيا ( $\text{NH}_4$ )، والتي غالباً ما تتحول إلى نترات في ظروف الأكسدة (Chapelle, 2000).

الأملاح الذائبة هي من مكونات المياه الطبيعية، ولكن زيادة مستوياتها الناجمة عن الأنشطة البشرية يمكن أن تجعل المياه غير صالحة للاستخدام. ويؤثر استخدام ملح الطرق محلياً على التربة والغطاء النباتي ولكن نادراً ما يتسبب في تلوث المياه الجوفية على نطاق واسع (Lundmark and Olofsson, 2007). استخراج الملح هو مصدر تلوث آخر (Siefert, Buchel, and Lebkuher-Neugebauer, 2006). ومع ذلك، فإن أخطر المشاكل ترجع إلى الممارسات الزراعية غير السليمة وممارسات الإدارة غير السليمة للمياه: مثل التملح عن طريق الري، وتسرب مياه البحر الناجم عن الإفراط في ضخ المياه من طبقات المياه الجوفية الساحلية، غالباً لأغراض الري أيضاً (Milnes and Renard, 2004; Scanlon et al., 2007).

#### ٨-٢-٤ الملوثات العضوية

يمكن تصنيف المركبات العضوية في المياه الجوفية إلى مواد طبيعية وأخرى بشرية المنشأ؛ وتشمل هذه الأخيرة المنتجات الكيميائية الاصطناعية وكذلك البترول، الذي هو من أصل طبيعي ولكن عادة ما يتم إطلاقه في البيئة بسبب النشاط البشري. يمكن أن يتواجد الكربون العضوي الطبيعي (OC) في شكل ذائب أو جسيمات، ويشار إلى مجموعها بالكربون العضوي الكلي. ينشأ الكربون العضوي الطبيعي في المياه الجوفية في الغالب من التربة والمياه السطحية التي تتسرب إلى طبقة المياه الجوفية ومن جميع أنواع النفايات العضوية، مثل السماد السائل. يعتبر ارتفاع مستويات الكربون العضوي في مياه الشرب غير صحي، لأن (١) وجود الكربون العضوي في مياه الشرب يشير إلى احتمال وجود بكتيريا برازية ومسببات الأمراض، والتي تنشأ من مصادر مماثلة (Pronk et al., 2006؛ انظر القسم التالي)؛ (٢) يمكن للمركبات العضوية تعبئة المعادن السامة، بما في ذلك النظائر المشعة، عن طريق التعقيد (Ranville et al., 2007)؛ و (٣) أثناء معالجة المياه، يتفاعل الكلور مع المواد العضوية الطبيعية لإنتاج منتجات التطهير الثانوية المسببة للسرطان (Bull et al., 1995).

وتثير الملوثات العضوية الاصطناعية عموماً قلقاً بيئياً أكبر. ويمكن تصنيفها وفقاً لتركيبها الكيميائي وتكوينها (على سبيل المثال، المركبات العطرية، الهيدروكربونات المهلجنة)، وفقاً لاستخدامها والغرض منها (مثل الوقود والمذيبات ومبيدات الآفات)، وفقاً لخصائصها الفيزيائية والكيميائية (مثل الوقود والمذيبات ومبيدات الآفات) والكيميائية (على سبيل المثال، قابليتها للذوبان في الماء، وكثافتها بالنسبة للماء، وتطايرها، وقابليتها للتحلل الحيوي)، أو وفقاً لسميتها. للمزيد من التفاصيل حول الملوثات العضوية، يمكن للقارئ الرجوع للأبحاث والكتب ذات الصلة (على سبيل المثال، ، Fetter, 1999; Appelo and Postma, 2005; Kresic, 2009).

## ٨-٢-٥ مسببات الأمراض الميكروبية

تسبب مسببات الأمراض الميكروبية في مياه الشرب عدة مليارات من الإصابات وعدة ملايين من الوفيات سنوياً، خاصة بين الأطفال في البلدان النامية (Montgomery and Elimelech, 2007). ومع ذلك، فإن الأمراض المنقولة بالمياه تحدث أيضاً في البلدان الغنية (Herwaldt et al., 1992). تشمل مسببات الأمراض في المياه الجوفية البكتيريا (على سبيل المثال، الكوليرا، كامبيلوباكتريجيوني، شيجيلا سب، سالمونيلا سب)، والأوليات وكيساتها (على سبيل المثال، الكريبتوسبورديوم الطفيلي، والجيارديا اللبيلية، والانتاموبيا هيسطوليتيكا)، والفيروسات (مثل فيروس نوروك، وشلل الأطفال، التهاب الكبد وفيروس الروتا) (Auckenthaler, 2000; Szewzyk et al., 2003; and Huggenberger, 2003).

أهم مسار لانتقال العدوى هو المسار البرازي الفموي، أي مياه الصرف الصحي التي تلوث مياه الشرب. يعتبر البراز من أصل بشري أكثر خطورة بشكل عام من براز الحيوانات، لأن بعض مسببات الأمراض، ولا سيما الفيروسات، محددة للغاية بالنسبة للمضيف (Smith, 2001). ولذلك، من المرجح أن يكون البراز البشري محتوي على مسببات الأمراض البشرية. كما أن الحالة الصحية العامة للسكان مهمة أيضاً: براز السكان الذين يعانون من سوء الحالة الصحية العامة مهم أيضاً. ولذلك، فإن الظروف الصحية السيئة والحماية غير الكافية للمياه الجوفية غالباً ما تكون نقطة انطلاق لحلقة مفرغة: يتسبب تلوث مياه الشرب في الإصابة بالأمراض، الأمر الذي يولد المزيد من مسببات الأمراض، والتي بدورها تسبب المزيد من تلوث المياه.

عادة ما تكون مسببات الأمراض في المياه الجوفية متجانسة؛ أي أنها تنشأ من الخارج وتدخل إلى طبقات المياه الجوفية على مسارات مختلفة. لا يمكن لمعظم مسببات الأمراض أن تنمو أو تتكاثر داخل طبقة المياه الجوفية وتستمر لفترات زمنية محدودة فقط. ولذلك، فإن معظم تشريعات حماية المياه الجوفية تستخدم وقت الانتقال كمعيار رئيسي لتحديد منطقة حماية المصدر الداخلي. على سبيل المثال، تستخدم التشريعات الألمانية معيار زمن الانتقال لمدة ٥٠ يوماً، على افتراض أن معظم مسببات الأمراض يتم ترشيحها أو تفقد تأثيرها بحلول ذلك الوقت، وهو نهج أثبت جدواه في معظم الحالات. ومع ذلك، يمكن أن تستمر بعض مسببات الأمراض لفترة أطول بكثير، لا سيما الأكياس الأولية (Bonadonna et al., 2002) وبعض أنواع الفيروسات (Schaub and Oshiro, 2000).

قد توجد العديد من مسببات الأمراض المحتملة في الماء، ومعظمها يصعب اكتشافها. لذلك، يشيع استخدام مؤشر البكتيريا البرازية (FIB) لتقييم السلامة الصحية للمياه. أهم أنواع البكتيريا البرازية هي الإشريكية القولونية، والتي تتواجد دائماً بأعداد كبيرة جداً في براز الحيوانات ذوات الدم الحار والبشر ولا توجد إلا هناك. ولذلك، فإن وجود الإشريكية القولونية أو غيرها من الألياف البكتيرية القولونية في عينة المياه يشير إلى تلوث برازي وبالتالي إلى احتمال وجود مسببات أمراض مختلفة (الشكل ٤-٨). على الرغم من أن هذا نهج راسخ وآمن بشكل عام، إلا أن له عيباً رئيسياً واحداً: بعض الفيروسات والكيسات الأولية، وخاصةً الكريبتوسبورidium، تستمر في البيئة لفترة أطول بكثير من جميع مسببات الأمراض الشائعة الاستخدام، ويمكنها أيضاً النجاة من معالجة المياه (Lisle and Rose, 1995; Mackenzie et al., 1994). لذلك، فإن عدم وجود الإشريكية القولونية لا يوفر أي أمان مطلق (Brookes et al., 2005).

### ٣-٨ طرق تحديد نطاقات مستجمعات المياه

#### ١-٣-٨ مقدمة

كما ذكرنا سابقاً، فإن السؤال الأول والأكثر أهمية لتقسيم نطاقات حماية المصادر هو، أين تقع منطقة مستجمع مياه النبع؟ يتطلب تحديد مناطق مستجمعات المياه مزيجاً من الطبوغرافيا والجغرافيا والاعتبارات الهيدرولوجية والهيدرولوجية باستخدام مجموعة متنوعة من طرق الاستقصاء، بما في ذلك التوازن المائي، والمتبعات الطبيعية، واختبارات التتبع الاصطناعية (Goldscheider and Drew, 2007). في النظم الهيدرولوجية المائية الكارستية، غالباً ما يمكن تقسيم مستجمعات الينابيع إلى مناطق تغذية ذاتية وأخرى غير ذاتية. منطقة التغذية الذاتية المنشأ هي المنطقة التي ترشح فيها مياه الأمطار أو المياه الذائبة بشكل منتشر من خلال التربة (إن وجدت) والمنطقة غير المشبعة إلى طبقة المياه الجوفية. أما منطقة التغذية الغير ذاتية المنشأ فتتكون من مناطق مجاورة تتكون من تكوينات جيولوجية أخرى تصب في اتجاه طبقة المياه الجوفية، وغالباً ما يكون ذلك عبر الجداول السطحية التي يتم امتصاصها في حفر ابتلاع بالقرب من التماس الجيولوجي. نظام الدانوب- في جنوب غرب ألمانيا هو مثال معروف: أثناء ظروف انخفاض التدفق، يتم امتصاص نهر الدانوب بأكمله في طبقة المياه الجوفية الكارستية عبر العديد من فتحات الابتلاع ويتدفق نحو نبع آخر، أكبر نبع في ألمانيا، على بعد ١٢ كم (Hotzl, 1996). في ظل هذه الظروف، يمثل مستجمع المياه السطحية لنهر الدانوب بأكمله عند هذه النقطة منطقة مستجمع المياه الجوفية لنبع Aach. من الخصائص الأخرى لأنظمة طبقات المياه الجوفية الكارستية هي تقسيمات المياه الجوفية، وبالتالي قد تتغير مستجمعات الينابيع كدالة للظروف الهيدرولوجية. في بعض الحالات، تتحول فتحات الابتلاع إلى ينابيع خلال ظروف التدفق العالي، بحيث لا تعود مستجمعات المياه السطحية جزءاً من مستجمعات



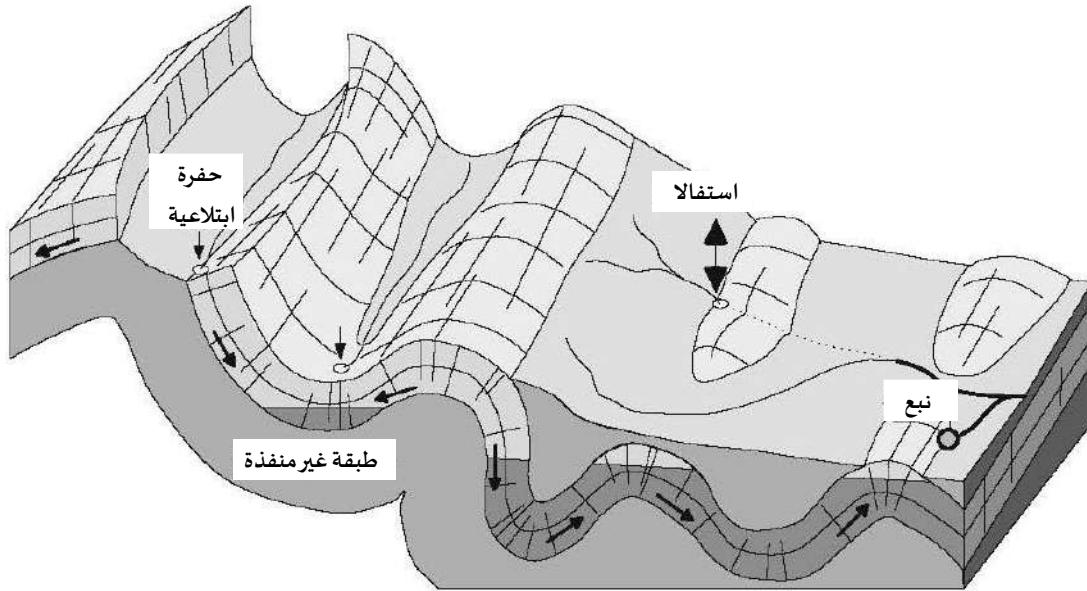
(i)



(ب)

الشكل ٨-٥ مدخل كهف في وادٍ كارستي في جبال الألب خلال ظروف هيدرولوجية مختلفة: (أ) خلال ظروف التدفق المنخفض، يغطس مجرى مائي في الكهف ويظهر متتابع محقون (اليورانين) في عدة ينابيع كارستية في أقصى في اتجاه المصب، مما يؤكد أن مستجمعات المياه تنتمي إلى منطقة التغذية التجميعية للينابيع؛ (ب) أثناء ظروف التدفق العالي، يعمل الكهف كنصب، ولا يعود مستجمع المياه في أعلى المجرى متصلاً بطبقة المياه الجوفية الكارستية. (الصور: N. Goldscheider).

الينابيع. ويُشار إلى التجاويف التي تعمل بالتناوب كثقوب ابتلاع وينابيع، اعتماداً على الظروف الهيدرولوجية بالاستفالا (estavelles) والإينورسالك (inversacs) (الشكل ٨-٥). يجب أن يؤخذ التباين الهيدرولوجي في الاعتبار عند ترسيم حدود مناطق مستجمعات الينابيع، وبالتالي، لتقسيم مناطق حماية مصادر المياه الجوفية.



الشكل ٨-٦ رسم تخطيطي يوضح أهمية الطبوغرافيا والطبقات والتركيب الجيولوجي في تدفق المياه الجوفية في نظام طبقة المياه الجوفية الكارستية. تشير المناطق الفاتحة والداكنة مع الأسهم إلى المنطقة غير المشبعة والمشبعة من الحجر الجيري الكارستي واتجاهات التدفق، على التوالي. (تم التعديل بعد Goldscheider, 2005a).

### ٨-٣-٢ التضاريس والجيولوجيا وتدفق المياه الجوفية

للطبوغرافيا تأثير رئيسي على أنماط جريان المياه الجوفية على نطاقات مختلفة (Toth, 1963, 1999)، وفي كثير من الأحيان العلاقة بين الطبوغرافيا وتقسيمات مستجمعات الينابيع ليست بهذه البساطة. الحدود الطبوغرافية عند سطح الأرض، مثل التلال الجبلية، ليست بالضرورة حدوداً مهمة لتدفق المياه الجوفية، خاصة في النظم الكارستية، حيث توجد العديد من الأمثلة على عبور التدفق أسفل التلال والوديان الجبلية (Bianchetti et al., 1992; Goldscheider, 2005a). في مثل هذه الحالات، من الخطأ تحديد مستجمعات مياه الينابيع فقط على أساس التضاريس. ومع ذلك، يجب أخذ الطبوغرافيا بعين الاعتبار: من الواضح أن كامل منطقة إعادة التغذية لنبع ما تقع دائماً فوق مستوى النبع، على الرغم من أن التدفق قد يحدث أيضاً تحت هذا المستوى، مع وجود خطوط تدفق ترتفع من أجزاء طبقة المياه الجوفية العميقة نحو الينابيع (الشكل ٨-٦) أو الجداول (Ophori and Toth, 1990). الينابيع الحرارية خارج المناطق البركانية هي المظهر الأكثر وضوحاً، للمياه الجوفية الدافئة العميقة التي ترتفع إلى السطح، ولكن منطقة التغذية تقع دائماً على ارتفاعات أعلى (مع الاستثناء النادر للتدفق الناجم عن الإجهاد التكتوني). كما أن الطبوغرافيا مفيدة أيضاً في تحديد مستجمعات الجداول المفقودة أو الجداول الغاطسة.

إن طبقة المياه الجوفية الذي تصرف نحو منبع هي جسم جيولوجي يتميز بهندسته وبنيته الداخلية، وخصائصه الهيدروجيولوجية وظروف حدوده الهيدروليكية (Burkhard et al., 1998). وعادة ما يتم تحديد هندسة طبقة المياه الجوفية من خلال العناصر الطباقية والتكتونية والطبوغرافية، مثل طبقة المياه الجوفية التي تتكون من الرمل والحصي في وادٍ محاط بصخور الشست الغير منفذة أو طبقة مياه جوفية تتكون من الحجر الجيري الكارستي التي تحتل موقعاً طبوغرافياً منخفضاً، مفصولة بصدوع عادية عن الصخور البلورية التي تصرف عن طريق السطح نحو طبقة المياه الجوفية الكارستية. يعتبر الاتجاه والخصائص الهيدروليكية للصدوع أمراً حاسماً بالنسبة لتدفق المياه الجوفية؛ حيث يمكن للصدوع أن تحد من طبقة المياه الجوفية أو تخلق وصلات هيدروليكية بين طبقات المياه الجوفية المختلفة؛ وغالباً ما تعمل التشققات والصدوع كقواطع مائية، بينما تميل الطيات إلى تشكيل المسارات الرئيسية لتدفق المياه الجوفية في أنظمة طبقات المياه الجوفية الكارستية (الشكل ٨-٦) (Goldscheider and Andreo, 2007). إن التوصيف التفصيلي الجيولوجي والهيدروجيولوجي لمنطقة ما يجعل من الممكن تحديد وتعيين مستجمعات الينابيع بشكل أفضل.

### ٨-٣-٣ التوازن المائي

يساعد تحديد التوازن المائي على تحديد حجم منطقة مستجمعات مياه الينابيع. بشكل عام، جميع تعبيرات الميزان المائي تكون على الشكل التالي:

$$\text{التدفق الخارج} - \text{التدفق الداخل} = \text{التغير في التخزين}$$

في أبسط الحالات، يمكن كتابة الرصيد المائي طويل الأجل للنبع ومستجمعات المياه فيه، دون الجريان السطحي والتغيرات في التخزين على النحو التالي:

$$QS = A(P - ET)$$

حيث QS هو متوسط التصريف السنوي للنبع، وA هي منطقة التغذية الذاتية، وP هي الهطول السنوي، وET هو التبخر والنتح السنوي ( $P - ET = R$ ، حيث R هو التغذية). على الرغم من أن مفهوم التوازن المائي بسيط من الناحية النظرية، إلا أن هناك العديد من التعقيدات عندما يتعلق الأمر بتطبيقاته العملية. وتتمثل الصعوبة الأكثر وضوحاً في التحديد الدقيق (القياس) للعناصر المختلفة للميزان المائي: هطول الأمطار، والتبخر والنتح، والأشكال المختلفة للجريان السطحي؛ كما أن تحديد البيانات الهيدرولوجية في المنطقة يمثل مشكلة أيضاً. علاوة على ذلك، فإن جميع عناصر الميزان المائي عادة ما تكون متغيرة في الزمن، خاصة في حالة النظم الكارستية، وهناك أيضاً تخزين للمياه وإطلاق المياه المخزنة. في العديد من الحالات، لا يكون النبع قيد الدراسة هو المنفذ الوحيد لطبقة المياه الجوفية: قد تكون هناك منافذ أخرى، بعضها يمكن الوصول إليها (مثل الينابيع الأخرى)، في حين أن البعض الآخر قد يكون مخفياً (مثل التصريف المباشر في الجداول أو الأنهار أو الأراضي الرطبة أو البحيرات أو البحر). إذا كانت مواقع التصريف غير معروفة، فإن الميزان المائي يقدم فقط الحد الأدنى لحجم مستجمعات الينابيع. التدفق من طبقات المياه الجوفية الأخرى أو التدفق التصاعدي للمياه الجوفية العميقة من أنظمة التدفق الإقليمي واسعة النطاق يمكن أن يزيد من تعقيد أو يحد من تطبيق الموازين المائية.

#### ٤-٣-٨ المتتبعات الطبيعية والاصطناعية

يمكن أن تساعد المتتبعات الطبيعية والاصطناعية (الموضحة بمزيد من التفصيل في الفصل ٣) في تحديد مستجمعات المياه الجوفية ومناطق حماية المصادر. تشمل المتتبعات الطبيعية درجة حرارة الماء، وكيمياء المياه، والنظائر المستقرة، ومعاملات أخرى. من السهل قياس درجات حرارة مياه الينابيع وتقلباتها، حتى بشكل مستمر، وتقدم الكثير من المعلومات. على سبيل المثال، تشير درجات الحرارة المرتفعة باستمرار إلى تدفق المياه الحرارية من أعماق أكبر؛ ويمكن أن تشير درجات الحرارة المنخفضة جداً إلى تدفق سريع للثلوج أو المياه الذائبة من ارتفاعات أعلى وغالباً ما تشير درجات حرارة مياه الينابيع المتغيرة للغاية إلى تدفق من المياه السطحية (Vaneverdingen, 1991).

النظائر المستقرة لجزيء الماء ( $O^{18}$ ) غالباً ما تستخدم لتحديد متوسط ارتفاع منطقة التغذية وهو أمر مفيد بشكل خاص في المناطق الجبلية. تساعد النظائر المستقرة أيضاً في استنتاج منشأ المياه: هطول الأمطار، أو ذوبان الثلوج، أو ذوبان الأنهار الجليدية، أو رشح المياه السطحية (Clark and Fritz, 1997؛ Criss et al., 2007).

يوفر التركيب الهيدروكيميائي للمياه معلومات حول طبقة (طبقات) المياه الجوفية التي تساهم في التصريف، والتدفق من المياه السطحية، ومشاكل التلوث، وجوانب أخرى (Hunkeler and Mudry, 2007). على سبيل المثال، تعتبر كيمياء المياه التي يهيمن

عليها ببيكربونات الكالسيوم من سمات طبقات المياه الجوفية الجيرية. وتشير المستويات المتزايدة من المغنيسيوم إلى وجود صخور الدولوميت في مستجمعات مياه الينابيع؛ ويمكن أن تتكون الكبريتات من طبقات الجبس أو الأنهيدريت أو من أكسدة معادن الكبريتيد. تجوية صخور الجرانيت والصخور السيليكاتية الأخرى عادةً ما يولد البوتاسيوم وكاتيونات أخرى؛ ومع زيادة أوقات الانتقال، يميل البوتاسيوم إلى الاستبدال بالصوديوم (Krauskopf and Bird, 1995). نادرًا ما تقدم المتتبعات الطبيعية دليلاً لا لبس فيه؛ فعلى سبيل المثال، يمكن أن ينشأ الصوديوم من محلول الملح الصخري والبلاجيوكليز (الأليت) التجوية أو تبادل الكاتيونات أو تداخلات مياه البحر أو ملح الطرق. ولذلك، فإن المؤشرات التي يتم الحصول عليها من المتتبعات الطبيعية يجب أن تقترن دائماً بأنواع أخرى من المعلومات.

تُعد المتتبعات الاصطناعية طريقة قوية وموثوقة لتحديد مناطق مستجمعات مياه الينابيع (انظر الفصل ٣). يتم تطبيق اختبارات التتبع بشكل شائع في أنظمة طبقات المياه الجوفية الكارستية ويمكن استخدامها أيضاً في البيئات الهيدرولوجية الأخرى. الأصباغ الفلورية، مثل اليورانين الذي يُشار إليه أيضاً باسم فلورسين الصوديوم أو باختصار، الفلورسين (الشكل ٨-٥)، هي أكثر متتبعات المياه الجوفية ملائمة في العديد من الحالات (Benischkem, Goldscheider, and Smart, 2007; Kass, 1998). يعد الكشف الإيجابي عن المتتبعات الإيجابية في النبع دليلاً قوياً على وجود اتصال هيدروليكي بين موقع الحقن والنبع؛ أي أن موقع الحقن يقع داخل مستجمع النبع.

اختبارات التتبع الكمي الكامل، التي تقدم سلسلة بيانات مفصلة للتركيز والوقت والتصريف، أو ما يسمى بمنحنيات اختراق المتتبع، توفر الكثير من المعلومات عن التدفق نحو الينابيع. وفي سياق منطقة الحماية فإن استرداد المتتبع، أي الكمية المطلقة أو النسبية من المتتبع الذي وصلت إلى النبع، تعتبر قيمة للغاية ولكنها غالباً ما تكون نتيجة غير مستغلة بشكل كافٍ. يمكن أن يرجع الاسترداد بنسبة أقل من ١٠٠ في المائة إلى العديد من الأسباب المختلفة، والتي غالباً ما يصعب تحديدها كمياً، مثل ظروف الحقن غير المثالية أو فقدان المتتبع عن طريق الامتزاز أو التحلل. ومع ذلك، عندما يتم استخدام متتبع محافظ (على سبيل المثال، يتصرف اليورانين بشكل محافظ في معظم البيئات الهيدروجيولوجية) وتكون الظروف التجريبية مواتية (على سبيل المثال، الحقن المباشر في المياه الجوفية المتدفقة)، تتيح عمليات استرداد المتتبع، إلى جانب بيانات التصريف، إمكانية تحديد معدلات التدفق الجوفي والإشارة إلى مواقع تصريف غير معروفة. يمكن توضيح هذا النهج على أفضل وجه من خلال مثال نظري. يوضح الرسم البياني في الشكل ٨-٧ نظاماً بسيطاً لطبقة المياه الجوفية الكارستية، يتكون من حفرة ابتلاع بمعدل تدفق يبلغ ٥ لتر/ثانية ونبع كارستي بتصريف ١٠٠ لتر/ثانية. تم حقن متتبع محافظ في حفرة ابتلاع، وسُجِّل منحنى اختراق كامل عند النبع؛ وبلغت نسبة استرداد المتتبع المحسوبة ١٧ في المائة. هذه البيانات التي تم الحصول عليها بسهولة، جنباً إلى جنب مع نموذج مفاهيمي بسيط لشبكة القنوات، مما يجعل من الممكن تحديد معدلات التدفق الجوفي في النظام باستخدام موازنات بسيطة للمياه والمتتبع (المعادلات والحلول في الشكل ٨-٧).

يمكن لهذه الأنواع من الاعتبارات تحسين مفهوم التوازن المائي الموصوف سابقاً بشكل كبير. في هذا المثال بالتحديد، يبلغ إجمالي تصريف النظام 5.88 (Qi) ضعف تصريف النبع المرصود. وبالمقابل، يجب أن تكون مساحة مستجمعات المياه أعلى بـ ٥,٨٨ ضعف مما هو متوقع من خلال تطبيق معادلات التوازن المائي البسيطة.

#### ٨-٤ مناطق حماية مصادر المياه الجوفية وقيود استخدام الأراضي

تفرّق العديد من المخططات الوطنية لحماية المياه الجوفية بين ثلاثة أنواع على الأقل من مناطق حماية المصادر، وغالباً ما يشار إليها باسم منطقة حماية فوهة البئر (المنطقة الأولى)، ومنطقة الحماية الداخلية (المنطقة الثانية)، ومنطقة الحماية الخارجية (المنطقة الثالثة)؛ وأحياناً ما يتم تقسيم المنطقتين الثانية والثالثة إلى مناطق فرعية أخرى. في الحالة الأكثر نموذجية والأبسط، تكون هذه المناطق مرتبة على التوالي حول بئر ضخ المياه الجوفية أو في اتجاه أعلى النبع المستغل (الشكل ٨-٨).

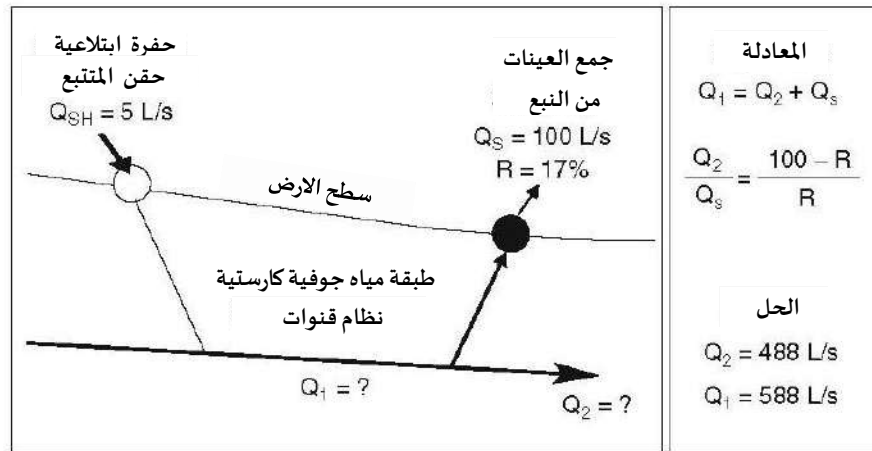
يتم حظر أو تقييد أنشطة استخدام الأراضي التي يحتمل أن تكون ملوثة في مناطق حماية المصدر، مع قيود متناقصة من المنطقة الأولى إلى المنطقة الثالثة. أما خارج هذه المناطق، فغالباً ما تكون الأنشطة الملوثة أيضاً مقيدة، أو يجب تقييدها لأسباب تتعلق بحماية الموارد المائية (المياه الجوفية والسطحية على حد سواء) أو لأسباب تتعلق بالحماية العامة للبيئة وصحة الإنسان. تتألف منطقة حماية فوهة البئر أو منطقة حماية فوهة النبع (المنطقة الأولى) من المنطقة المحيطة مباشرةً بمضخة البئر أو النبع المستغل، على التوالي. والغرض من هذه المنطقة هو حماية البئر أو النبع من أي نوع من أنواع التأثير المباشر أو الضرر الميكانيكي أو التلوث. اعتماداً على المبادئ التوجيهية الوطنية ذات الصلة، تمتد المنطقة الأولى عادةً من ١٠ إلى ٢٠ متراً حول البئر أو النبع؛ وعادةً ما تكون مسيجة وجميع الأنشطة التي لا تتعلق مباشرة بإمدادات مياه الشرب محظورة. وغالباً ما يتم تضمين مرافق التغذية الاصطناعية وحفر الابتلاع في المناطق الكارستية في هذه المنطقة.

صُممت منطقة الحماية الداخلية (المنطقة الثانية) في المقام الأول لمنع تلوث مياه الشرب بالكائنات الدقيقة البرازية والمسببة للأمراض. ولذلك، غالباً ما يُستخدم وقت الانتقال في طبقة المياه الجوفية كمعيار أساسي لتحديد المنطقة الثانية. تتخذ التشريعات الوطنية المختلفة أوقات انتقال مختلفة كحد أقصى، على سبيل المثال، ١٠ أيام في سويسرا، و ٥٠ يوماً في ألمانيا، و ١٠٠ يوم في أيرلندا، على افتراض أن معظم مسببات الأمراض البكتيرية الدقيقة يتم ترشيحها أو تفقد تأثيرها بعد هذه الفترة الزمنية (Department of Environment and Local Government, Environmental Protection Agency and Geological Survey of Ireland, 1999; Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, 2006; Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, 2004). الأنشطة التي تطلق ملوثات ميكروبية، مثل استخدام السماد السائل، محظورة في المنطقة الثانية؛

أنواع أخرى من ممارسات استخدام الأراضي الملوثة وأعمال البناء التي قد تعيق تدفق المياه الجوفية محظورة أيضاً.

في طبقات المياه الجوفية الرملية والحصوية، حيث تكون المسامية الفعالة عالية وغالبًا ما تكون سرعات التدفق حوالي ١ متر/اليوم، غالبًا ما ينتج عن نهج وقت الانتقال هذا منطقة ثانية تمتد من عدة عشرات إلى عدة مئات من الأمتار حول بئر الضخ؛ وكلما زادت سرعة تدفق المياه الجوفية في مجال التدفق الطبيعي كلما زاد امتداد المنطقة الثانية إلى أعلى البئر. عادةً ما يتم تطبيق نوعين من الطرق لتحديد المنطقة الثانية حول بئر الضخ: (١) الطرق الهيدروليكية، والتي تتراوح من الحسابات البسيطة نسبياً إلى نماذج تدفق وانتقال المياه الجوفية العددية الأكثر تطوراً، و(٢) اختبارات التتبع الاصطناعي، والتي تجعل من الممكن قياس زمن الانتقال مباشرةً من موقع حقن معين، مثل بئر المراقبة، إلى بئر الضخ. ومن الناحية المثالية، يتم الجمع بين الطريقتين (Goldscheider et al., 2008).

إذا تم استخدام نفس المعايير لطبقات المياه الجوفية الكارستية، حيث تتجاوز سرعات التدفق في شبكة القنوات في كثير من الأحيان ١٠٠ م/ساعة، فغالبًا ما سيتعين تصنيف مستجمعات المياه الجوفية للنوع بأكمله كم منطقة ثانية، وهو أمر غير ممكن بشكل عام من وجهة نظر عملية واقتصادية، على الرغم من أنه سيكون مناسباً من حيث سلامة مياه الشرب. ولذلك، غالبًا ما يتم استخدام أساليب مختلفة في طبقات المياه الجوفية الكارستية، مثل رسم الخرائط (انظر المزيد).



الشكل ٧-٨ حساب معدلات التدفق الجوفي عن طريق استرداد التتبع وقياسات التدفق في نظام طبقة مياه جوفية كارستية بسيطة: Q = التصريف، R = استرداد جهاز التتبع. مزيد من التوضيحات في النص.

صُممت منطقة الحماية الخارجية (المنطقة الثالثة) لمنع التلوث المزمّن بالملوثات الثابتة والمتنقلة وضمان أنه في حالة حدوث إطلاق ملوث عرضي، بالتالي يتوفر الوقت الكافي لدرء أي مخاطر على مياه الشرب. اعتماداً على اللوائح الوطنية المعنية والإطار الهيدروجيولوجي، فإن المنطقة الثالثة إما أن تشتمل على كامل منطقة مستجمع المياه في النبع أو بئر الضخ أو يتم تحديدها على

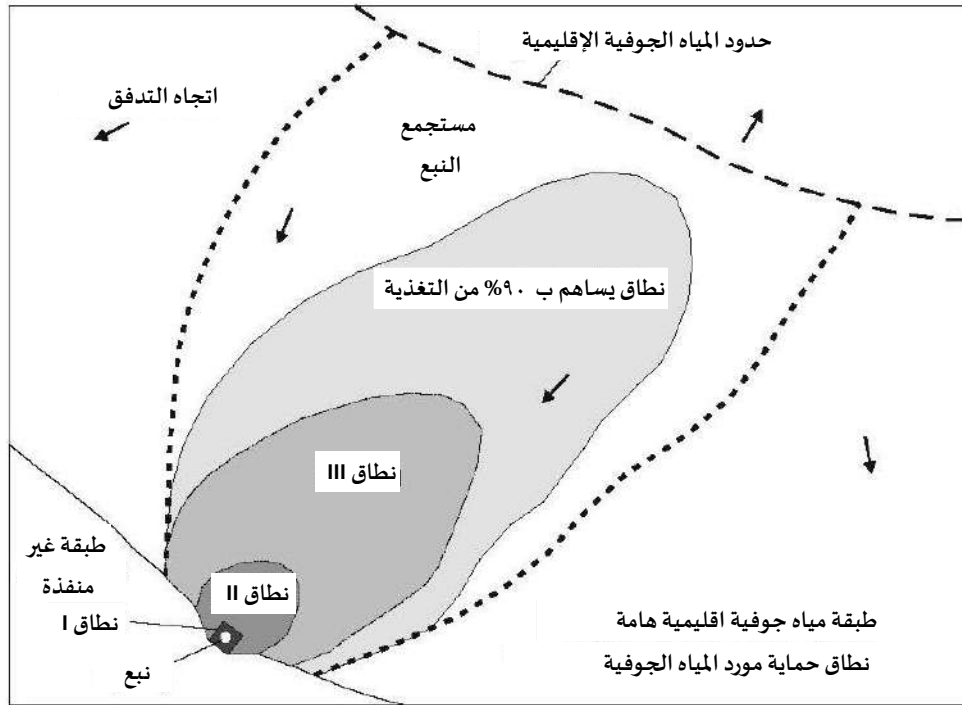
أساس المسافة أو وقت الانتقال. المنشآت التي تشكل تهديداً كبيراً للمياه الجوفية، مثل محطات الغاز أو تسرب مياه الصرف الصحي، غير مسموح بها في هذه المنطقة. يتم النظر في معايير هيدروجيولوجية مختلفة لتقليل أو توسيع أو زيادة تقسيم المنطقتين الثانية والثالثة. على سبيل المثال، عند وجود طبقات سميكة مترامية ذات نفاذية منخفضة، يمكن تخفيض منطقة الحماية وعندما ترشح الجداول السطحية إلى طبقة المياه الجوفية، يتم توسيع مناطق الحماية لتشمل مستجمع المجرى المائي، بالإضافة إلى المنحدرات التي تصب في اتجاه طبقة المياه الجوفية (Department of Environment and Local Government, Environmental Protection Agency and Geological Survey of Ireland, 1999; Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, 2006; Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, 2004).

تأخذ العديد من مخططات الحماية الوطنية في الاعتبار مناطق إضافية، مثل مناطق حماية الموارد لطبقة المياه الجوفية بأكملها (بما في ذلك المناطق الواقعة خارج مستجمع مياه الشرب المستغلة أو الآبار) أو منطقة تشمل منطقة التغذية الكاملة للنبع أو البئر المستغل. ومع ذلك، في بعض الحالات، تكون مساحة مستجمع المياه الجوفية للنبع كبير جداً ويتضمن مناطق لا تساهم إلا بالقليل جداً في تغذية طبقة المياه الجوفية وتصريف النبع.

لذلك، تتضمن مخططات حماية المياه الجوفية السويسرية منطقة تساهم بنسبة ٩٠ في المائة في تغذية مصدر المياه قيد الدراسة. عادة ما تكون هذه المنطقة أكبر من المنطقة الثالثة ولكنها في بعض الأحيان أصغر بكثير من منطقة مستجمع المياه بأكملها (الشكل ٨-٨) (Bussard et al., 2006; Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, 2004). القيود المفروضة على استخدام الأراضي في هذه المناطق الأوسع نطاقاً أقل صرامة من المنطقة الثالثة، لكنها توفر أماناً إضافياً ضد التلوث المزمع والمستمر، على سبيل المثال، بسبب النترات التي تنصرف بشكل متحفظ في المياه الجوفية الغنية بالأكسجين (Chapelle, 2001; Johnston et al., 1998).

تفرق مخططات حماية المياه الجوفية الأيرلندية بين "منطقة داخلية" و"منطقة خارجية" حول البئر أو النبع، بشكل عام على أساس زمن انتقال يبلغ ١٠٠ يوم. ثم يتم دمج هذه المناطق مع تقييم بسيط لقابلية التأثير (انظر أيضاً)، مع الأخذ بعين الاعتبار سُمك الطبقة العلوية والنفاذية للحصول على مناطق حماية المصادر واستجابات استخدام الأراضي (Department of Environment and Local Government, Environmental Protection Agency and Geological Survey of Ireland, 1999). بالنسبة لحماية المصدر تقسيم المناطق في المناطق الكارستية السلوفينية، اقترح (Ravbar and Goldscheider, 2007) مفهوماً مماثلاً دون استخدام معيار ٩٠ في المائة أو خط الـ ١٠٠ يوم من زمن الانتقال: يميز النهج السلوفيني بين المناطق التي تساهم دائماً وبشكل مباشر في النبع والمناطق التي ترتبط بشكل غير مباشر أو هامشي فقط بالنبع أو فقط خلال الأحداث الهيدروجيولوجية المتطرفة. ثم يتم تقسيم مستجمع النبع بعد ذلك على أساس خريطة قابلية التأثير للحصول على مناطق حماية المصدر.

بالنسبة لسلامة مياه الشرب، يجب تحديد مناطق حماية المصادر على أساس المعايير الهيدروجيولوجية، وينبغي فرض القيود المقابلة على استخدام الأراضي. ومع ذلك، نظراً لأن قيود استخدام الأراضي لها أيضاً آثار اجتماعية واقتصادية، مثل مدفوعات



الشكل ٨-٨ التوضيحات النموذجية لمناطق حماية مصدر المياه الجوفية لنبع كبير يقع عند تماس جيولوجي بين طبقة المياه الجوفية والحفرة المائية. المنطقة الأولى هي منطقة حماية رأس النبع؛ المنطقة الثانية والثالثة هما منطقتا الحماية الداخلية والخارجية على التوالي. تتضمن العديد من التشريعات الوطنية مناطق حماية إضافية أو مناطق حماية بديلة، مثل مستجمع الينابيع بأكمله أو منطقة تساهم بنسبة ٩٠% من مصدر المياه. طبقات المياه الجوفية المهمة إقليمياً خارج مستجمعات المياه الجوفية غالباً ما تصنف كمناطق حماية لمصادر المياه الجوفية. الشكل ليس بمقياس الرسم، ولكن أبعاد الخريطة في حدود الكيلومترات.

المعادلة للمزارعين أو القيود المفروضة على التنمية الصناعية وغالباً ما يتم تطبيق النهج العكسي، وغالباً ما يتم ثني مناطق الحماية ولقها وتجزئتها لتقليل التكاليف قصيرة الأجل (الشكل ٨-٩). ومن المفارقات أن هذا النهج غالباً ما يؤدي إلى تكاليف أعلى على المجتمع على المدى البعيد، لأن معالجة طبقات المياه الجوفية الملوثة ومعالجة مياه الشرب الملوثة عادة ما تكون أكثر كلفة من تنفيذ مناطق الحماية المناسبة. وعلى الرغم من أن المصالح الاجتماعية والاقتصادية الأخرى غير حماية المياه الجوفية مشروعة ويجب أن تكون في مخططات الإدارة الشاملة لاستخدام الأراضي، لا ينبغي لأخصائيي الهيدرولوجيا والمهندسين تكييف القوانين الهيدروليكية لتحقيق مناطق حماية "ملائمة".

## ٨-٥ تقييم قابلية تأثر المياه الجوفية ورسم خرائطها

## ٨-٥-١ العموميات والمصطلحات

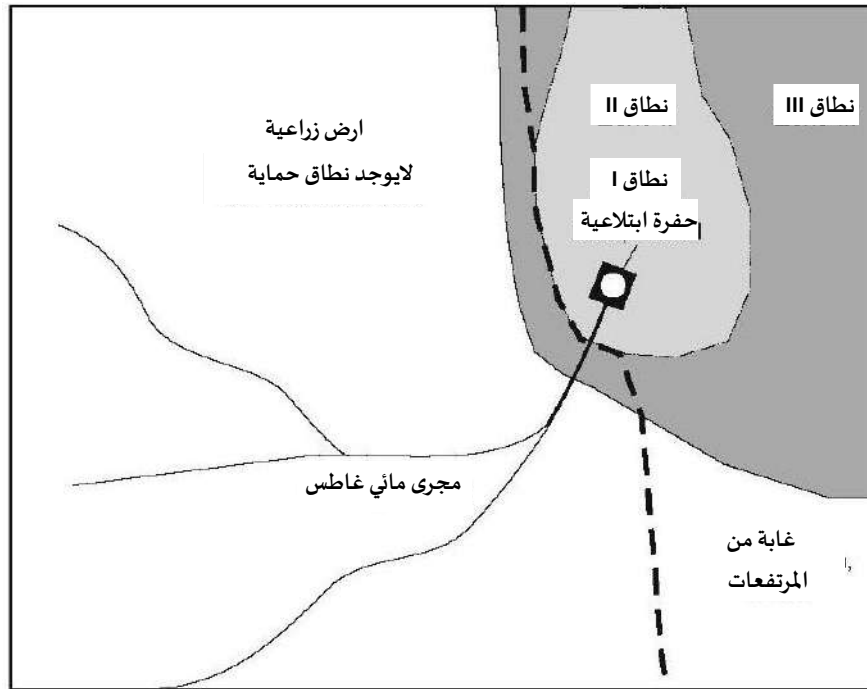
تم تقديم مصطلح قابلية تأثر (vulnerability) المياه الجوفية بالتلوث لأول مرة من قبل عالم الهيدرولوجيا الفرنسي [Margat, \(1968\)](#). يستند مفهوم قابلية تأثر المياه الجوفية على افتراض أن البيئة الطبيعية توفر درجة معينة من الحماية الطبيعية ضد الملوثات التي تدخل تحت السطح ([Vrba and Zaporozec, 1994](#)). ومن ثم فإن تقييم قابلية التأثر تتكون من تحديد العوامل التي تحدد درجة الحماية الطبيعية ضد التلوث، مثل سُمك وخصائص الطبقات التي تعلو السطح وظروف التسرب. يعني رسم خرائط قابلية التأثر تقسيم منطقة معينة، مثل مستجمع المياه النبع، إلى مناطق بدرجات مختلفة من قابلية التأثر. وتُستخدم الألوان الحمراء عادةً للإشارة إلى درجات عالية من قابلية التأثر (حماية طبيعية منخفضة)، بينما يشير اللون الأزرق إلى درجات قابلية تأثر أقل (حماية طبيعية عالية).

يمكن أن تساعد خرائط قابلية التأثر في إيجاد توازن بين حماية المياه الجوفية والمصالح الاقتصادية الأخرى. مثل الزراعة والصناعة. كما يمكن استخدام الخرائط كأساس لترسيم مناطق حماية المصادر الجوفية. بدلاً أو مكملاً للنهج التقليدي لتقسيم مناطق الحماية الموصوفة في القسم السابق. وهذا مفيد بشكل خاص لتقسيم مناطق الحماية في المناطق الكارستية، حيث غالباً ما تفشل المقاربات التقليدية القائمة على زمن الانتقال أو المسافة بسبب سرعات التدفق العالية ودرجة عدم التجانس. ففي سويسرا على سبيل المثال، يتم تحديد مناطق حماية الينابيع الكارستية على أساس خرائط القابلية باستخدام طريقة EPIK. تصنف المناطق ذات القابلية الشديدة والعالية والمتوسطة على أنها مناطق الحماية الأولى والثانية والثالثة على التوالي ([Doerflinger and Zwahlen, 1998](#)).

من المهم ملاحظة أن قابلية التأثر، بحكم تعريفها، مستقلة عن نوع استخدام الأراضي ووجود أو غياب مصادر التلوث ([Vrba and Zaporozec, 1994](#)). على سبيل المثال، يصنف المجرى السطحي الغاطس في حفرة ابتلاع واقعة على طبقة مياه جوفية كارستية على أنها منطقة ذات قابلية تأثر عالية، بغض النظر عن استخدام الأراضي في مستجمع المياه الجوفية. يتم عرض ممارسات استخدام الأراضي ومصادر التلوث على خرائط الخطر أو المخاطر، والتي ستتم مناقشتها لاحقاً. للأسف، هناك بعض الالتباس وعدم الاتساق فيما يتعلق بالمصطلحات.

يقارن الجدول ٨-١ بين المصطلحات المستخدمة عادة في أوروبا منذ عام ١٩٦٨ ([Margat, 1968; Zwahlen, 2004](#)) مع المصطلحات المستخدمة أحياناً في الولايات المتحدة (على سبيل المثال، [Croskrey and Groves, 2008](#)). من الممكن التفريق بين الضعف الجوهري والضعف المحدد، والذي يتم تعريفه على النحو التالي ([Daly et al., 2002; Vrba and Zaporozec, 1994; Zwahlen, 2004](#)):

- الضعف الجوهري (Intrinsic Vulnerability) للمياه الجوفية أمام الملوثات يأخذ في الاعتبار الخصائص الجيولوجية والهيدروولوجية، والهيدروجيولوجية لمنطقة ما ولكنها مستقلة عن طبيعة وخصائص الملوثات وخصائصها.
- تأخذ قابلية التأثير النوعية (Specific Vulnerability) في الاعتبار خصائص ملوث معين أو مجموعة معينة من الملوثات بالإضافة إلى قابلية التأثير الجوهري للمنطقة.



الشكل ٨-٩ مثال على مناطق حماية غير ملائمة بشكل واضح تنتهك المبادئ الهيدروجيولوجية الأساسية ولكنها تقلل التكاليف قصيرة المدى: مستجمع مجرى مائي يصرف أرضاً زراعية ويغرق في حفرة ابتلاع، والذي يتصل بنبع كارستي يستخدم لإمدادات مياه الشرب، لم يتم تضمينه في أي منطقة حماية، في حين أن تُصنَّف الأراضي الوعرة الحرجية القريبة ضمن مناطق الحماية، مما يقلل من مدفوعات المعادلة للمزارعين (على أساس على حالة حقيقية ولكن معممة).

على الرغم من أن الضعف الجوهري يبدو المفهوم الأبسط والأكثر عمومية، إلا أنه أكثر صعوبة من الناحية العلمية: كيف يمكن تحديد قابلية تأثر المياه الجوفية بالتلوث دون النظر في أي خصائص ملوثة محددة؟ يتمثل أحد الاحتمالات في افتراض وجود ملوث "عام" يتصرف بشكل محافظ تمامًا، أي أنه لا يظهر أي تفاعلات أو تفاعلات محددة مع مواد طبقة المياه الجوفية، مثل التأخير أو التحلل الحيوي. ولغرض تقسيم مناطق الحماية، فإن خرائط قابلية التأثير الجوهري بشكل عام أكثر فائدة وقابلية للتطبيق من خرائط قابلية التأثير النوعية، لأنها مناطق الحماية تهدف إلى منع جميع أنواع التلوث. ومع ذلك، عندما يكون أحد الملوثات أو مجموعة معينة من الملوثات مصدر قلق خاص، وقد تكون خرائط قابلية التأثير النوعية أكثر فائدة، مثل مبيدات الآفات أو المذيبات المكلورة. كما سبق ذكره في المقدمة، يستند تقييم قابلية التأثير إلى نموذج مفاهيمي للمنشاء-المسار-الهدف (الشكل ٨-٢)، والذي يوضح أيضًا الفرق بين تخطيط قابلية تأثر المورد والمصدر. توضح خريطة قابلية تأثر المورد قابلية تأثر طبقة المياه الجوفية بأكملها من التلوث؛ وبالتالي يتم أخذ منسوب المياه الجوفية كهدف. تُظهر خريطة قابلية تأثر المصدر قابلية تأثر مصدر مياه جوفية معين، مثل بئر ضخ أو نبع، والذي يتم تحديده بالتالي كهدف.

وبالتالي، فإن رسم خرائط قابلية تأثر المصدر تأخذ بعين الاعتبار فقط الرشح الرأسي للمياه (والمُلوثات) من سطح الأرض خلال المنطقة غير المشبعة باتجاه منسوب المياه الجوفية، في حين أن رسم خرائط قابلية تأثر المورد تأخذ بعين الاعتبار بالإضافة إلى ذلك هجرة الملوثات في المنطقة المشبعة من طبقة المياه الجوفية نحو النبع أو البئر.

لسوء الحظ، هناك عدد كبير من طرق رسم خرائط قابلية التأثير، والتي غالبًا ما تستند إلى تعريفات ومصطلحات و افتراضات مختلفة. بعض الطرق هي جزء من التشريعات الوطنية أو المبادئ التوجيهية الوطنية لحماية المياه الجوفية، مثل EPIK في سويسرا، في حين تم تطوير البعض الآخر لأغراض علمية. يقدم [Dassargues Hallet and Gogu \(2003\)](#) و [Zaporozec and Vrba \(1994\)](#) استعراضاً لمختلف طرق مختلفة لرسم خرائط قابلية التأثير. ومع ذلك، فقد أظهرت التجربة أن تطبيق أساليب مختلفة على نفس موقع الاختبار، باستخدام نفس قاعدة البيانات، غالبًا ما يؤدي إلى نتائج مختلفة وأحياناً متناقضة (على سبيل المثال، [Gogu et al., 2003](#)). ولذلك، فإن الإجراء الأوروبي COST Action 620 بشأن "قابلية التأثير والمخاطر ورسم خرائط لحماية طبقات المياه الجوفية الكربونية (الكارستية)" جمع حوالي ٥٠ من العلماء والممارسين وصانعي القرار من ١٥ دولة أوروبية لاقتراح إطار مفاهيمي مشترك لقابلية التأثير، ([Daly et al., 2002; Zwahlen, 2004](#)). يستخدم هذا الفصل في الغالب المصطلحات والمنهجية المقترحة من قبل هذه المجموعة، ولكنه يناقش أيضاً بإيجاز بعض الأساليب الموجودة سابقاً، مثل DRASTIC ([Aller et al., 1987](#)).

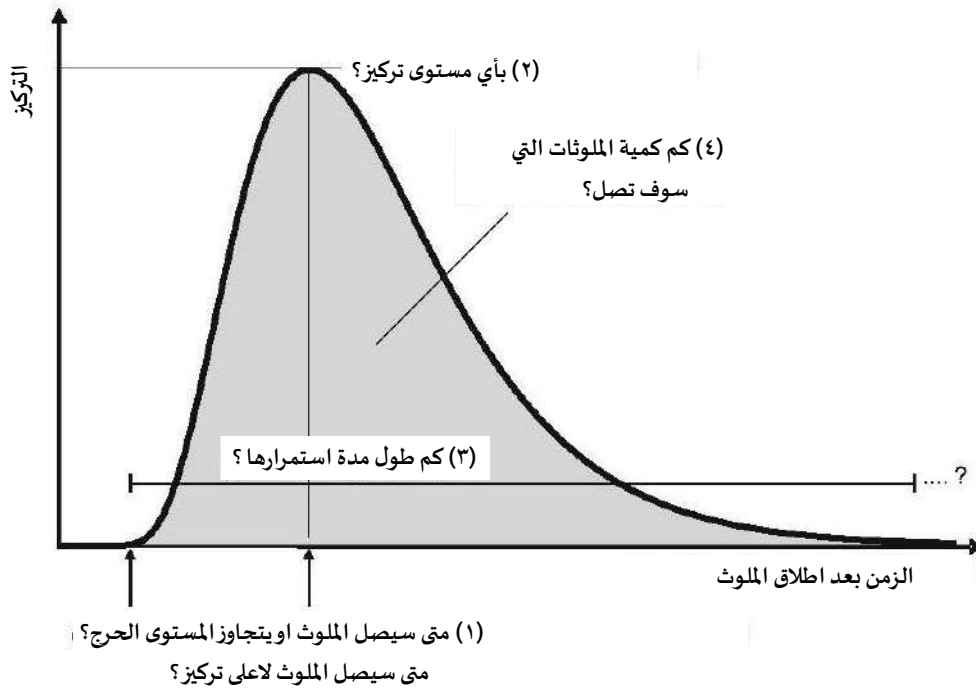
جدول ٨-١ استخدام المصطلحات في أوروبا مقارنة بالمصطلحات الموجودة في بعض المنشورات الأمريكية.	
المصطلح المستخدم في أوروبا	قابلية التأثير
المصطلح المستخدم في أمريكا	الحساسية
المعنى	سهولة دخول الملوثات للمياه الجوفية ، وهي معتمدة على الخصائص الفيزيائية للبيئة الهيدروجيولوجية ومستقلة عن استخدام الأراضي ومخاطر التلوث.
مثال	احتمالية حدوث تلوث للمياه الجوفية ، الممتدة على كلاً من الخصائص الفيزيائية للبيئة الهيدروجيولوجية ووجود مخاطر التلوث.
ملاحظة	مخلفات بالقرب من حفره امتصاصية في منطقة كارستية ، يعتبر نطاق خطر عالي (أوروبا) قابل للتأثر (أمريكا)
ملاحظة	حفره امتصاصية في منطقة كارستية ، يعتبر نطاق ذو قابلية عالية للتأثر (أوروبا) او حساس (أمريكا).
ملاحظة	كلاً من المصطلحين صحيحين ولديهما نفس المعنى ويمكن استخدامهما كمرادفين.
ملاحظة	مصطلح الخطر أكثر دقة ، بينما مصطلح قابلية التأثير مضلل ويجب تجنب استخدامه.
ملاحظة: يستخدم هذا الفصل المصطلحات الأوروبية ، حيث تم اقتراح مفهوم رسم قابلية التأثير لأول مرة من قبل عالم هيدروجيولوجيا فرنسي (Margat, 1968) ويمارس أكثر في أوروبا.	

## ٨-٥-٢ النهج الكمي لتقييم قابلية التأثير

غالبًا ما يكون مصطلح قابلية تأثر المياه الجوفية بالتلوث مفهومًا بشكل بدوي من قبل صناع القرار في عملية التخطيط وللمواطنين العاديين. ومع ذلك، هناك أيضًا عيوب في استخدام النهج الكيفي وحده. فخاصية غير محددة بدقة لا يمكن اشتقاقها بشكل لا لبس فيه من كميات قابلة للقياس ولا يمكن التحقق من صحتها. ولذلك، اقترح الإجراء ٦٢٠ الصادر عن لجنة العلوم والتكنولوجيا أساساً كمياً لتقييم قابلية التأثير. (Brouye `re et al., 2001; Daly et al., 2002; Goldscheider et al., 2001; Zwahlen, 2004).

عندما يحدث تلوث في مكان ما في مستجمع مياه النبع، فإن المزدودين للمياه ومستخدميها قد يسألوا عدة أسئلة أساسية (الشكل ٨-١٠): (١) متى سيصل التلوث لأول مرة إلى النبع أو البئر ومتى سيصل إلى أقصى مستوى له؟ (٢) ما هو أقصى مستوى تركيز للتلوث؟ (٣) كم من الوقت سيبقى التلوث أعلى من الحد الحرج، مثل الحد القانوني لمستوى التلوث في مياه الشرب؟ (٤) ما هي نسبة كمية الملوثات المنبعثة التي ستصل بالفعل إلى النبع؟ لذلك، فإن الجوانب الأساسية لتقييم قابلية تأثر المياه الجوفية هي وقت الانتقال والتركيز الأقصى، والمدة المتوقعة للتلوث، والكمية النسبية للملوث التي يمكن أن تصل بالفعل إلى الهدف - قد لا تصل نسبة من الملوثات إلى الهدف أبدًا ولكنها تغادر مستجمع المياه عن طريق الجريان السطحي أو الذهاب إلى نبع آخر (Daly et al., 2002). من بين هذه المعايير، ربما يكون وقت الانتقال هو الأكثر أهمية. لا سيما في سياق التلوث الميكروبي، لأن الموت وفقدان التأثير المعتمدين على الوقت هما عمليتا توهين مهمتان لمسببات الأمراض الميكروبية (الشكل ٨-٤). ومعظم العمليات الأخرى لتخفيف الملوثات ترتبط أيضًا بشكل مباشر أو غير مباشر بوقت الانتقال - فالمزيد من الوقت يعني عمومًا المزيد من إمكانيات التبادل الأيوني، والتحلل، والرشح، والعمليات الأخرى للعمل. علاوة على ذلك، فإن أوقات الانتقال الأطول تعني أيضًا المزيد من الوقت للاستجابة لأحداث التلوث العرضية. إن وقت الانتقال والمعايير الثلاثة الأخرى متداخلة. على سبيل المثال، تنخفض مستويات التركيز القصوى بشكل منهجي مع زيادة وقت ومسافة الانتقال. أما مدة التلوث المحتمل، من ناحية أخرى، فمن الصعب جدًا تحديدها.

يمكن القول أن أوقات الانتقال والجوانب الأخرى للتلوث المذكورة سابقًا لا يمكن تحديدها بدقة. أو تقييمها بشكل مباشر أو تخريطها ميدانيًا. ولذلك، فإن رسم خرائط قابلية التأثير يتكون من تحديد وتعيين تلك العوامل التي تتحكم في زمن الانتقال (الجانب الأكثر أهمية)، وانخفاض التركيز والمدة والكمية النسبية للملوثات التي يمكن أن تصل إلى الهدف. على سبيل المثال، يعتمد الانتقال على السُّمك والخصائص الهيدروليكية للطبقات التي تعلوها، والتي ينبغي أن تكون بالتالي مفتاحا هاما لتقييم قابلية التأثير.

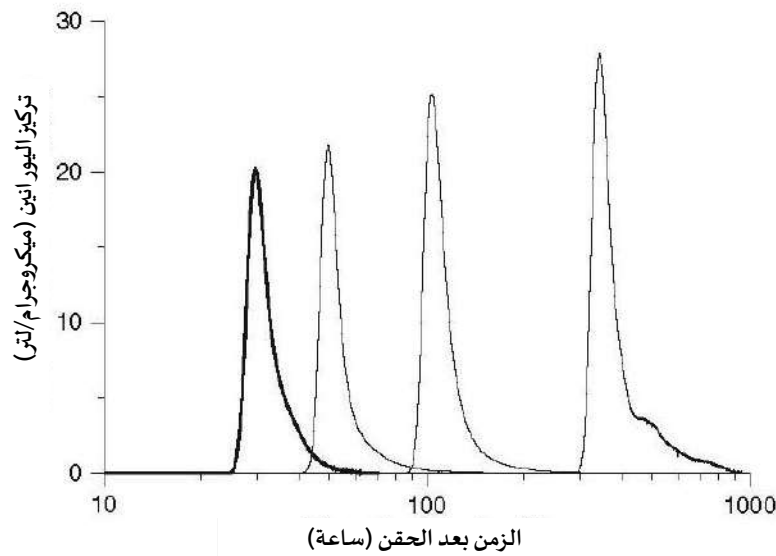


الشكل ٨-١٠ الأسئلة الأساسية التي قد يطرحها مستخدم المياه عند حدوث تلوث في مستجمع نبع مياه الشرب. يمكن أن تكون هذه الأسئلة أيضًا بمثابة أساس كمي لتقييم قابلية التأثير وتقسيم مناطق الحماية، مثل أن درجة عالية من الضعف تعني أن الملوث سيصل إلى النبع بعد وقت قصير وبتراكيزات عالية. وبالتالي ستكون هناك حاجة إلى تدابير حماية صارمة. (تم التعديل بعد Brouyere et al., 2001, and Zwahlen, 2004).

### ٨-٥-٣ أهمية التباين الهيدرولوجي لتقسيم مناطق حماية المصدر

في حين أن سرعات تدفق ومناسيب المياه الجوفية غالبًا ما تكون مستقرة نسبيًا في طبقات المياه الجوفية الغرينية والأنظمة الهيدروجيولوجية العميقة المحصورة، إلا أنه يمكن ملاحظة التباين الهيدرولوجي الكبير في العديد من أنظمة طبقات المياه الجوفية الكارستية. وغالبًا ما تتجاوز تقلبات منسوب المياه الجوفية في طبقات المياه الجوفية الكارستية ١٠ أمتار وأحيانًا ١٠٠ متر؛ وغالبًا ما تكون سرعات التدفق خلال ظروف التدفق العالي أعلى ب ٥-١٠ مرات أو حتى أكثر من سرعة التدفق المنخفض. (Goppert and Goldscheider, 2008; Pronk et al., 2007؛ الشكل ٨-١١)؛ يمكن أن تكون حالة تصريف الينابيع والحالة الهيدرولوجية لحفر الابتلاع خاضعة لتغيرات كبيرة (الشكل ٨-٥). وهذا يثير التساؤل حول كيفية تضمين التباين الهيدرولوجي في رسم خرائط قابلية التأثير. إحدى الإمكانات هو إعداد خرائط قابلية التأثير مختلفة لمختلف الظروف هيدرولوجية. ومع ذلك، بما أنه غالبًا ما تستخدم خرائط قابلية التأثير كأساس لتحديد مناطق حماية المياه الجوفية، فإن هذا النهج غير ممكن من الناحية العملية. الاحتمال الآخر

هو أخذ متوسط الظروف الهيدرولوجية كأساس لرسم خرائط قابلية التأثر. ومع ذلك، فإن أعلى مستويات التلوث في المناطق الكارستية غالباً ما تحدث لمياه الينابيع خلال ظروف التدفق العالي، الناجمة عن الأحداث الهيدرولوجية المتطرفة (Pronk et al 2007، الشكل ٨-٤)؛ وبالتالي، فإن الظروف المتوسطة ليس لها صلة تذكر بمسائل قابلية تأثر المياه الجوفية.



الشكل ٨-١١ نتائج أربعة اختبارات تتبع مع كل منها ١ كجم من اليورانين أجريت بين حفرة ابتلاع ونبع كارستي خلال ظروف هيدرولوجية مختلفة، تتراوح من ظروف التدفق المنخفضة جداً إلى ظروف التدفق العالي جداً. تتراوح أوقات الذروة ما بين أقل من ٣٠ ساعة وأكثر من ٣٠٠ ساعة، في حين أن التركيزات القصوى أقل تبايناً (Pronk et al, 2007). ويتطلب تحديد نطاقات حماية المصدر على أساس أوقات العبور تحديد الظروف الهيدرولوجية.

وبناءً على ذلك، اقترح Vias et al, (2006) استخدام الظروف الهيدرولوجية المتطرفة كنقطة مرجعية لتقييم قابلية التأثر، في حين أن Goldscheider et al, (2000) يعتبرون النقطة المرجعية هي ظروف التدفق العالي التي تحدث مرة واحدة على الأقل في السنة.

وقد تم وضع مخطط التقييم الأكثر تفصيلاً للنظر في التقلبات الهيدرولوجية للمناطق الكارستية السلوفينية التي تتميز بتقلبات رأسية وجانبية عالية لحدود المياه الجوفية (Ravbar and Goldscheider, 2007). وكما هو موضح في الشكل ٨-١، فإن تقسيم مناطق الحماية هو عنصر واحد فقط من سلسلة الأمان. يمكن للعناصر الثلاثة الأخرى أن تساعد أيضاً في معالجة مسألة التقلبات الهيدرولوجية: وهي الحد من الأنشطة الملوثة خلال فترات التدفق العالي وفترات التغذية العالية؛ الرصد المستمر لجودة المياه وأخذ العينات بناء على الأحداث وأخيراً وليس آخراً، زيادة معالجة مياه الشرب خلال فترات التدفق العالي عندما يكون من المتوقع ارتفاع مخاطر التلوث. في الختام، ينبغي النظر في التقلبات الهيدرولوجية لحماية مصادر المياه الجوفية، لا سيما في حالة الينابيع الكارستية التي تتميز بتقلبات عالية جداً.

#### ٨-٥-٤ عوامل تقييم قابلية التأثير

استناداً إلى الأعمال السابقة، اقترح الإجراء الأوروبي COST Action 620 نهجاً لتخطيط قابلية التأثير الجوهرية للمياه الجوفية والتي تعتبر إطاراً مفاهيمياً عاماً ومرناً بدلاً من كونها طريقة إلزامية (Daly et al., 2002; Zwahlen, 2004). على الرغم من أن هذا النهج قد تم تطويره أساساً للتطبيق في المناطق الكارستية، إلا أنه يمكن استخدامه أيضاً في أنواع أخرى من البيئات الهيدرولوجية، الأمر الذي يتطلب بعض التعديلات المتواضعة. ويمكن استخدام العديد من الطرق الموجودة أو المطورة حديثاً في هذا الإطار. وفقاً للأساس الكمي الموصوف سابقاً، يهدف هذا النهج إلى تقييم الخصائص التي تؤثر على وقت انتقال الملوث المحتمل من المنشأ إلى الهدف (الجانب الأكثر أهمية)، وكذلك انخفاض تركيزه، والكمية النسبية للملوثات التي يمكن أن تصل إلى الهدف، وفي بعض الحالات المحددة، مدة التلوث المحتمل.

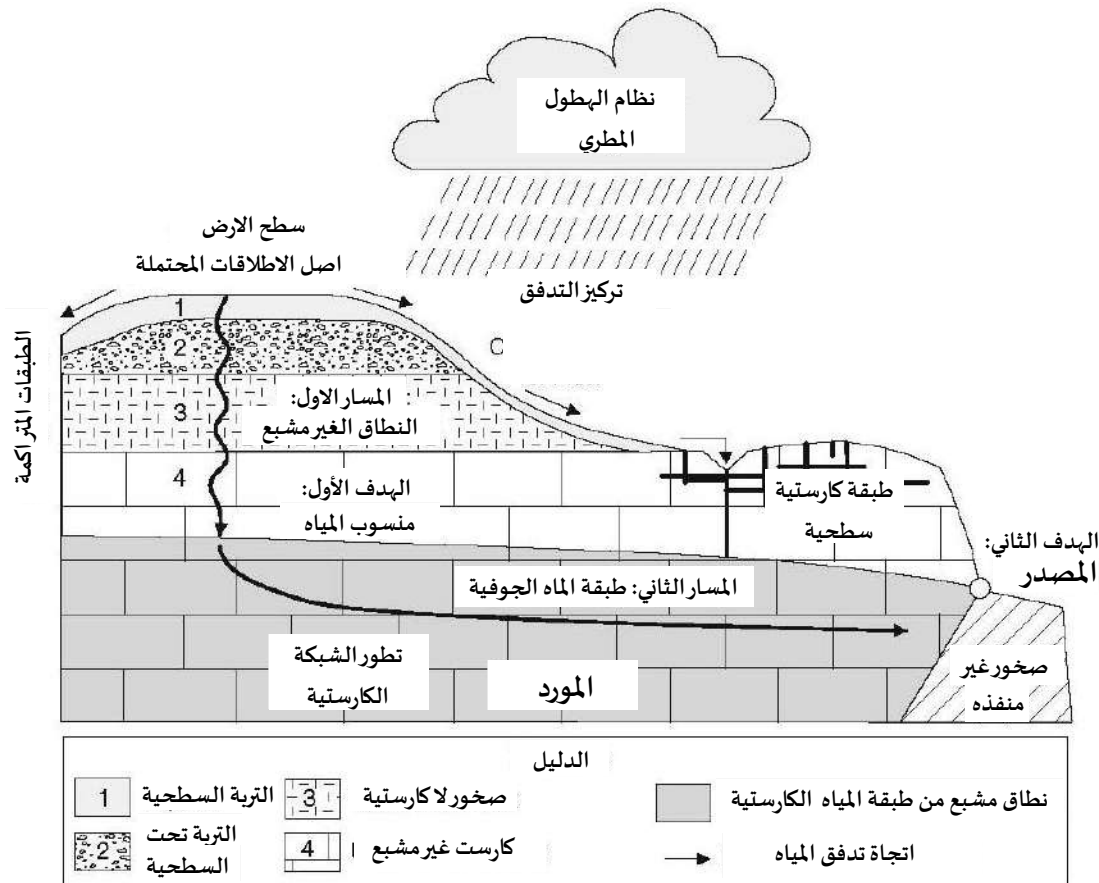
يعتمد النهج الأوروبي على نموذج المنشأ-المسار-الهدف (الشكل ٨-٢). يتم أخذ ما يصل إلى أربعة عوامل في الاعتبار لرسم خرائط قابلية التأثير، كما هو موضح في الشكل ٨-١٢: وهي الطبقات المتراكمة (O)، وتركيز التدفق (C)، ونظام هطول الأمطار (P)، وتطور الشبكة الكارستية (K). تمثل العوامل O و C و K الخصائص الهيدرولوجية للنظام، في حين أن العامل P هو عامل خارجي. بالنسبة لتخطيط قابلية تأثير المورد (الهدف = منسوب المياه الجوفية في طبقة المياه الجوفية)، يجب أخذ العوامل O و C و P في الاعتبار، بينما يجب تضمين العامل K لرسم خرائط قابلية تأثير المصدر (الهدف = النبع).

#### ٨-٥-٥ الطرق المتسقة مع النهج الأوروبي

تتفق عدة طرق مع الإطار المفاهيمي للنهج الأوروبي (Daly et al., 2002; Zwahlen, 2004)، كما هو موضح في الشكل ٨-١٢. يشمل ذلك الطرق المقترحة والمطبقة في الولايات المتحدة (Croskrey and Groves, 2008) وجنوب شرق آسيا (Nguyet and

(Goldscheider, 2008) هذه الطرق يمكن التوصية بها لرسم خرائط قابلية تأثر المياه الجوفية وتقسيم مناطق حماية المصدر، لا سيما في المناطق الكارستية.

تعتبر مخططات حماية المياه الجوفية الأيرلندية (Department of Environment and Local Government, Environmental Protection Agency and Geological Survey of Ireland, 1999) أساساً مهماً للنهج الأوروبي حيث أنها تستند إلى نموذج مفاهيمي واضح للمنشاء-المسار-الهدف، كما هو موضح في الشكل ٨-٢.



الشكل ٨-١٢ يستند النهج الأوروبي (EA) لرسم خرائط قابلية تأثر المياه الجوفية على نموذج مفاهيمي من المنشاء-المسار-الهدف ويمكن استخدامه لرسم خرائط قابلية تأثر الموارد والمصادر. تشمل العوامل الرئيسية نظام هطول الأمطار، والطبقات العلوية، وتركيز التدفق، وتطور الشبكة الكارستية. (تم التعديل بعد Goldscheider et al, 2000. ، Daly et al, 2002. ، Zwahlen, 2004).

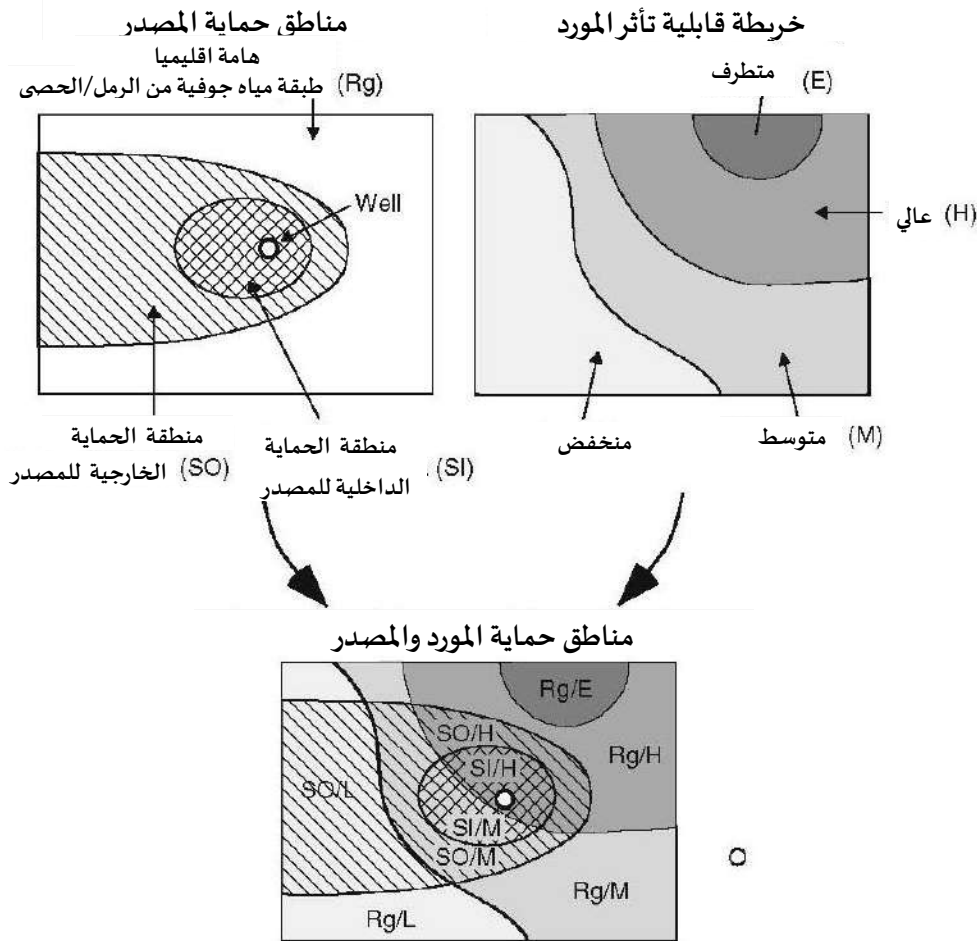
يتم الحصول نطاقات حماية المورد والمصدر من خلال الجمع بين أنواع مختلفة من الخرائط. وتأخذ خريطة قابلية تأثر المورد بعين الاعتبار بشكل أساسي سُمك وخصائص الطبقات المتراكمة، ولكن أيضاً ظروف الرشح المحددة في المناطق الكارستية (المقابلة لعوامل O و C، على التوالي).

تُظهر خريطة أخرى نقاط استخراج مياه الشرب (الينابيع أو الآبار) مع "مناطق حماية المصدر الداخلية" (SI) و"مناطق حماية المصادر الخارجية" (SO)، والتي يتم تحديدها عن طريق خط ١٠٠ يوم من وقت الانتقال. ثم يتم الحصول على مناطق حماية المصدر من خلال الجمع بين خريطة قابلية تأثر المورد مع مناطق حماية المصدر. ثم يتم تقسيم سطح الأرض المتبقي إلى مناطق مختلفة لحماية المورد، مع الأخذ بعين الاعتبار قيمة أو أهمية المورد ومدى قابلية تأثره (الشكل ٨-١٣).

إن طريقة EPIK (Doerfliger et al., 1999) هي أول طريقة تم تطويرها خصيصاً لرسم خرائط قابلية تأثر المصدر في المناطق الكارستية. وتأخذ هذه الطريقة في الاعتبار أربعة عوامل: تطور الظواهر الكارستية السطحية (E)، والغطاء الوافي (P)، وظروف الرشح (I)، وتطور الشبكة الكارستية (K). في سويسرا، تعتبر طريقة EPIK هي الطريقة الرسمية المستخدمة لتحديد مناطق حماية المصدر في المناطق الكارستية (Doerfliger and Zwahlen, 1998). وتُترجم درجات قابلية التأثير المختلفة مباشرةً إلى مناطق حماية: على سبيل المثال قابلية التأثير الشديدة للغاية تعني المنطقة الأولى، قابلية التأثير الشديدة تعني المنطقة الثانية، وقابلية التأثير المعتدلة تعني المنطقة الثالثة، والمناطق ذات قابلية التأثير المنخفضة لا يتم تضمينها في مناطق الحماية.

اقترحت طريقة PI (Goldscheider et al., 2000) لأول مرة النموذج المفاهيمي الذي استخدم فيما بعد كأساس للنهج الأوروبي (الشكل ٨-١٢). تتضمن هذه الطريقة عاملين مدرجين أيضاً في النهج الأوروبي، على الرغم من اختلاف المصطلحات: وهي الغطاء الوافي (العامل P) وظروف الرشح (العامل I) يتوافق مع عاملي O و C في النهج الأوروبي، على التوالي. يمكن استخدام طريقة PI لرسم خرائط قابلية تأثر موارد المياه الجوفية في جميع أنواع البيئات الهيدروجيولوجية، ولكنها تتضمن أدوات محددة لطبقات المياه الجوفية الكارستية. تتطلب هذه الطريقة قاعدة بيانات مفصلة نسبياً. تم اشتقاق طريقة COP (Vias et al., 2006) مباشرة من النهج الأوروبي وتتضمن ثلاثة من العوامل الأربعة: تركيز التدفق، والطبقات المتراكبة، ونظام هطول الأمطار. مخطط تقييم معامل المنطقة المشبعة الكارستية (K) قيد الإعداد، بحيث يمكن استخدام هذه الطريقة في رسم خرائط قابلية لتأثر مورد ومصدر المياه الجوفية الكارستية. تم تطبيق هذه الطريقة في أنظمة طبقات المياه الجوفية الكارستية الإسبانية (Andreo et al., 2006) وأماكن أخرى. للتطبيق في البلدان النامية أو المناطق الأخرى ذات التوفر المحدود للبيانات والموارد التقنية، اقترح (Nguyet, 2006) طريقة مبسطة لرسم خرائط قابلية تأثر موارد المياه الجوفية وتقييم المخاطر ورسم خرائط الخطر، والتي تم توسيعها مؤخراً لتخريط قابلية تأثر المصادر. تماماً مثل طريقة PI، يمكن استخدامها لجميع أنواع طبقات المياه الجوفية ولكنها تتضمن أدوات محددة لطبقات المياه الجوفية الكارستية. ونظراً لبساطتها، توضح هذه الطريقة بشكل جيد فكرة قابلية التأثير من خلال تراكب عدة خرائط أولية، وهو ما تسهله نظم المعلومات الجغرافية (الشكل ٨-١٤). اقترح (Croskrey and Groves, 2008) أيضاً طريقة بسيطة نسبياً ولكن متسقة لتخريط قابلية التأثير (أو "رسم خرائط الحساسية"؛ انظر الجدول ٨-١) في ولاية كنتاكي،

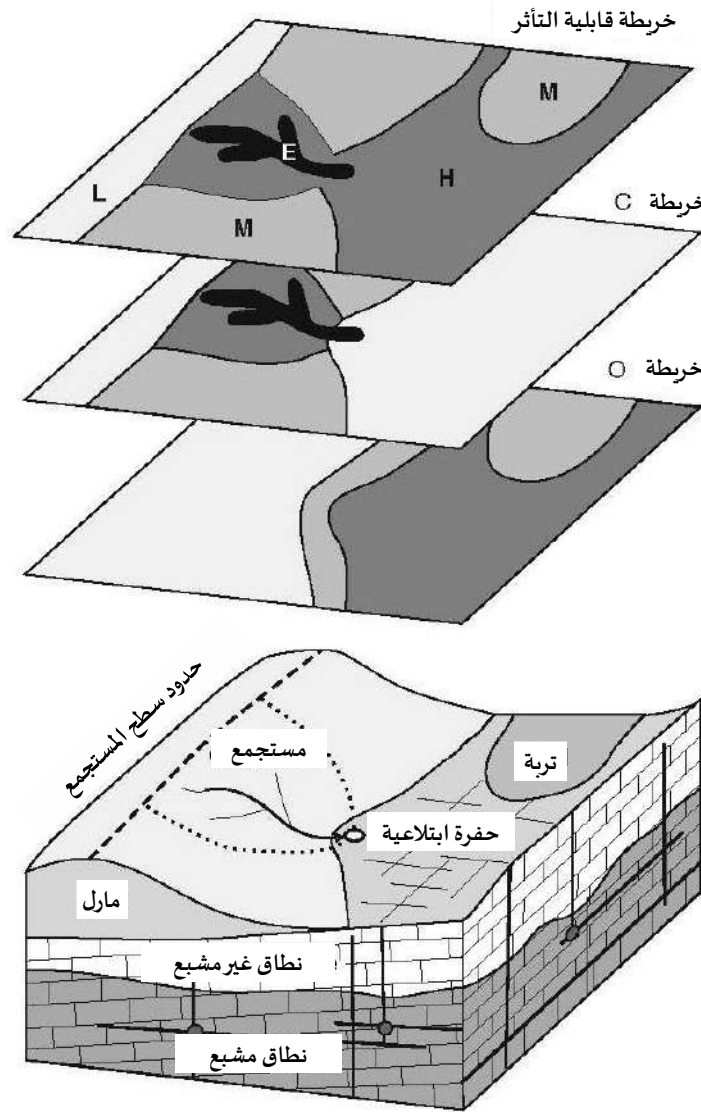
حيث تنتشر المناطق الكارستية على نطاق واسع وذات أهمية لإمدادات المياه العذبة. على غرار المفهوم الموضح في الشكل ٨-١٤، تأخذ هذه الطريقة بعين الاعتبار أيضاً ما يسمى بمناطق الجريان السطحي عالية الخطورة، حيث يمكن أن تنتقل الملوثات في الجريان السطحي من المناطق الأقل حساسية إلى المناطق ذات الحساسية العالية.



الشكل ٨-١٣ مخططات حماية المياه الجوفية الأيرلندية. مناطق حماية المصدر وما يقابلها من قيود استخدام الأراضي من خلال الجمع بين "مناطق حماية المصدر"، والتي يتم تحديدها على أساس زمن الانتقال في طبقة المياه الجوفية، وخريطة ضعف الموارد. (معدلة بعد

Environmental Protection Agency and Geological Survey, Department of Environment and Local Government

(of Ireland, 1999).



الشكل ٨-١٤ تستخدم الطريقة المبسطة لرسم خرائط ضعف المياه الجوفية عاملين: الطبقات المتراكمة (O) وتركيز التدفق (C). يرمز كل من (L) و (M) و (H) و (E) إلى قابلية التأثير المنخفضة والمتوسطة والعالية والمتطرفة على التوالي. من المهم أن نلاحظ أن الجريان السطحي نحو حفرة ابتلاع يمكن أن يتجاوز تماماً الوظيفة الوقائية للطبقات المتراكمة. في مثل هذه الحالة، يتجاوز العامل C ببساطة العامل O. (تم التعديل بعد Goldscheider and Nguyet, 2006).

اقترح (Ravbar and Goldscheider, 2007) نهج شامل لحماية المياه الجوفية لطبقات المياه الجوفية الكارستية والينابيع في سلوفينيا. يمثل هذا النهج السلوفي التفسير الأكثر اكتمالاً للنهج الأوروبي. وهو يتضمن طرق مفصلة لتخطيط قابلية تأثر مورد ومصدر المياه الجوفية (الشكل ٨-١٥)، وتقييم مخاطر التلوث، وتقييم قيمة أو أهمية مصدر أو مورد المياه الجوفية، ورسم خرائط الخطر. يوضح الشكلان ٨-١٦ و ٨-١٧ خريطة قابلية تأثر المورد وخريطة قابلية تأثر المصدر، على التوالي، تم إعدادها لمستجمع المياه الكارستية السلوفينية. يمكن ترجمة خريطة قابلية تأثر المصدر إلى مناطق حماية الينابيع.

#### ٨-٥-٦ استعراض طرق أخرى لرسم خرائط قابلية التأثر

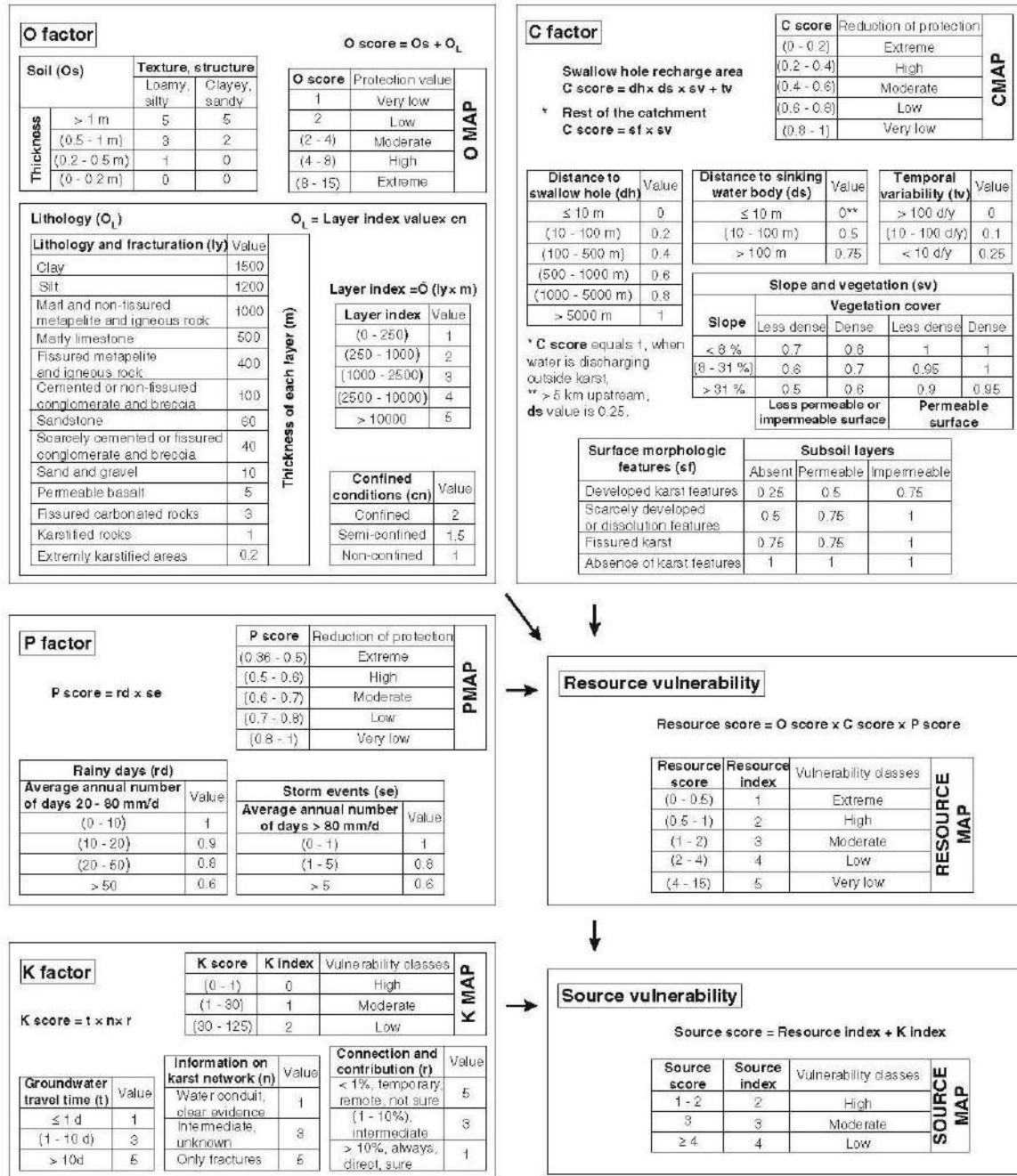
بالإضافة إلى الطرق الحديثة نسبياً الموضحة في الفصول السابقة، والتي يمكن استخدامها جميعاً في رسم خرائط قابلية تأثر المياه الجوفية في مستجمعات المياه الجوفية الكارستية، هناك عدد كبير من الطرق الأخرى، والتي تم تجميعها ومراجعتها ومقارنتها من قبل (Gogu et al. 2003), (Gogu (and Dassargues (2000), (Vrba and Zaporozec (1994), ٦٩ طريقة لرسم خرائط قابلية التأثر. ولا يتسع نطاق هذا الفصل لعرض ومناقشة جميع هذه الأساليب. سنناقش في الفقرات التالية بإيجاز بعض الأساليب الأكثر استخداماً والأكثر أهمية، مع الإقرار بأن اختيارها ذاتي إلى حد ما.

ربما تكون طريقة (Aller et al., 1987) DRASTIC هي الطريقة الأكثر شهرة والأكثر استخداماً في رسم خرائط قابلية التأثر. يتم تطبيقها بشكل متكرر في سياق حماية المياه الجوفية ومشاكل التلوث في الولايات المتحدة الأمريكية (Croskrey and Groves, 1994; Fritch et al., 2000; Kalinski et al., 2008; Rahman, 2008). يتم تقييم قابلية التأثر على أساس سبعة عوامل: العمق إلى منسوب المياه الجوفية (D)، صافي التغذية (R)، وسط طبقة المياه الجوفية (A)، وسط التربة (S)، والطبوغرافيا (T)، وتأثير منطقة التهوية (I)، والتوصيل الهيدروليكي (C). طريقة SINTACS الإيطالية تستخدم سبعة عوامل مشابهة جداً (Civita and De Maio, 2000).

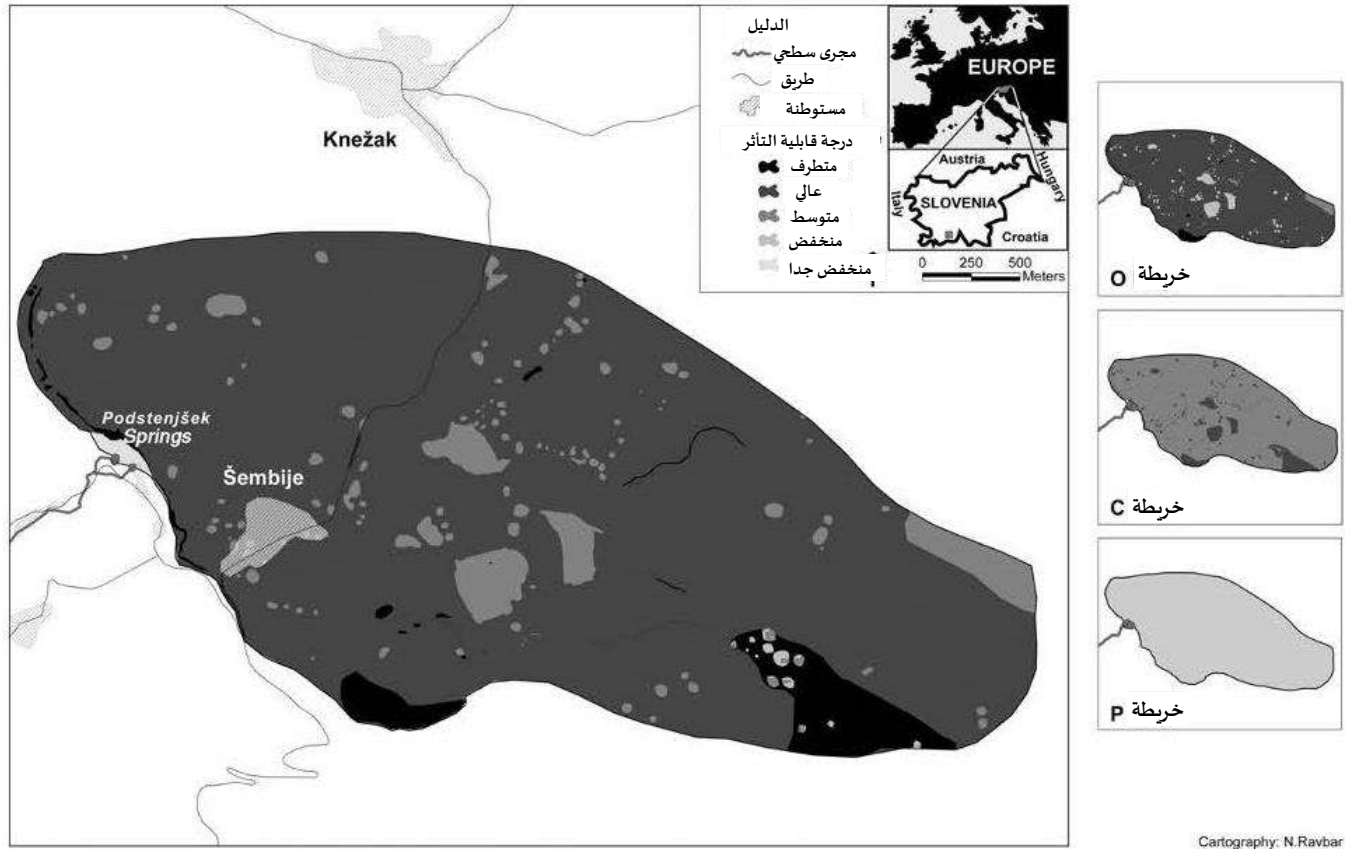
على الرغم من استخدامها على نطاق واسع، إلا أن طريقة DRASTIC لها عدة عيوب: أنها لا تستند إلى نموذج مفاهيمي واضح، مثل نموذج المنشاء-المسار-الهدف الموضح في الشكل ٨-٢. العديد من العوامل زائدة عن الحاجة، مثل العاملان A و C، لأن الموصلية الهيدروليكية تعتمد بشكل مباشر على وسط طبقة المياه الجوفية.

المشكلة الأكثر حدة هي عدم وجود نهج متعدد الأبعاد. قد يكون النهج أحادي البعد في DRASTIC كافياً لتقييم قابلية تأثر طبقة المياه الجوفية الغرينية النموذجية، حيث تتسرب المياه والملوثات عمودياً من سطح الأرض وصولاً إلى منسوب المياه الجوفية. ومع ذلك، في المناطق الكارستية، يمكن للتدفق الجانبي نحو حفر الابتلاع أن يتجاوز تماماً وظيفة الحماية التي توفرها الطبقات العلوية، كما هو موضح في الشكل ٨-١٢ والشكل ٨-١٣. لم يتم أخذ هذا السيناريو بعين الاعتبار في طريقة DRASTIC.

ولذلك، فإن تطبيق هذه الطريقة على مستجمعات الينابيع الكارستية يمكن أن يؤدي إلى نتائج غير مناسبة بشكل كبير في حين أن معظم المؤلفين الذين تم الاستشهاد بهم أبلغوا عن تطبيقات معقولة على البيئات الهيدروجيولوجية الأخرى. هناك نظام تصنيف



الشكل ٨-١٥ مخططات التقييم للنهج السلوفي لموارد المياه الجوفية (الكارستية) ومصادر ضعفها رسم الخرائط. تستخدم هذه الطريقة أربعة عوامل: الطبقات المتراكمة (O)، وتركيز التدفق (C)، ونظام هطول الأمطار (P)، وتطور الشبكة الكارستية (K) (Ravbar, 2007).



الشكل ٨-١٦ مثال لخريطة قابلية تأثر موارد المياه الجوفية، التي أعدت لمستجمع نبع كارست في سلوفينيا. يتم الحصول على الخريطة من خلال تراكم الخرائط التي تبين الوظيفة الوقائية للطبقات المتراكبة (O عامل/خريطة)، نظام هطول الأمطار (P)، وتركيز التدفق (C). يعكس النمط الفسيفسائي لمختلف فئات قابلية التأثر يعكس عدم تجانس الطبقات المختلفة. (Ravbar, 2007).

آخر لتقييم قابلية تأثر المياه الجوفية، يسمى GOD، اقترحه Foster, (1987) يأخذ GOD في الاعتبار نوع تموجد المياه الجوفية (G) (على سبيل المثال، لا توجد، محصورة، غير محصورة، غير محصورة)، والطبقة الصخرية التي تعلو المياه الجوفية (O) (على سبيل المثال، الطميية، الحصى، الحجر الرملي، الحجر الجيري)، وعمق منسوب المياه الجوفية (D). يتم تعيين قيمة لكل عامل بين ٠ و ١. يتم الحصول على القيمة الرقمية لقابلية التأثر بضرب العوامل الثلاثة وبالتالي تتراوح بين ٠,٠ (مهملاً) و ١,٠ (متطرف). صُمم GOD لجميع أنواع طبقات المياه الجوفية، لكن الخصائص الخاصة لطبقات المياه الجوفية الكارستية لم تؤخذ في الاعتبار. نظراً للتأثير القوي للعامل D، غالباً ما تكون قابلية تأثر الكارست غير مقدرة على سبيل المثال، طبقة المياه الجوفية الكارستية غير

المحصورة التي يزيد عمقها عن ١٠٠ متر من منسوب المياه الجوفية يتم تعيين قابلية تأثر معتدلة (٤، ٥)، على الرغم من أن الوظيفة الوقائية للحجر الجيري الكارستي غالباً ما تكون محدودة، وذلك بسبب وجود قنوات وممرات فوقية ورأسية.

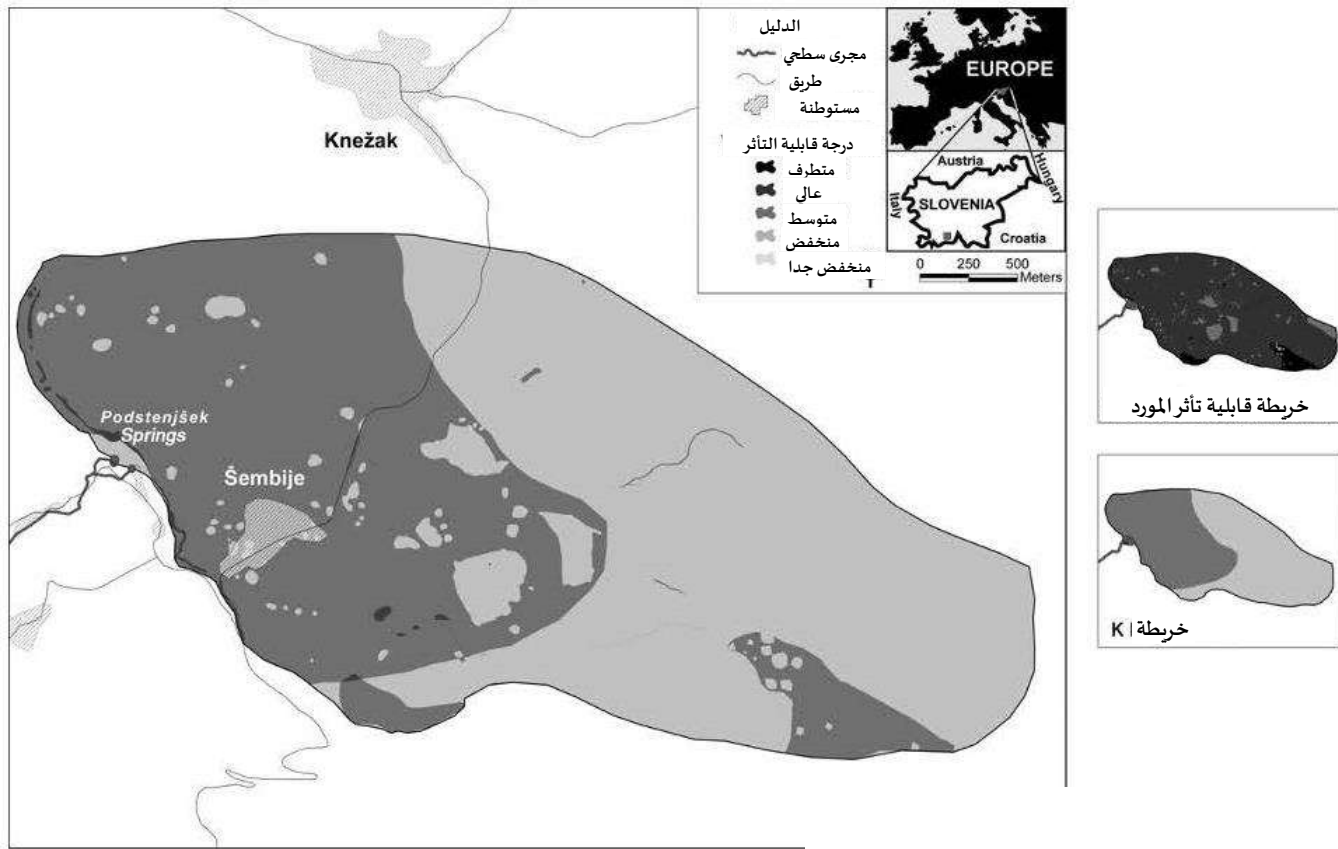
#### ٨-٥-٧ التحقق من صحة خرائط قابلية التأثر ومناطق حماية المصادر

غالباً ما تُستخدم خرائط قابلية التأثر كأساس لتحديد مناطق الحماية، مما يعني فرض قيود على استخدام الأراضي وبالتالي الآثار الاقتصادية، مثل دفع تعويضات للمزارعين. لذلك، يجب أن تكون خرائط قابلية التأثر قابلة للتحقق وموضوعية. ومع ذلك، أظهرت العديد من الدراسات أن هذا ليس هو الحال في كثير من الأحيان. عندما يتم تطبيق عدة طرق لرسم خرائط قابلية التأثر على نفس مستجمع المياه، تكون النتائج متنوعة ومتناقضة في بعض الأحيان (Draoui et al., 2008; Gogu et al., 2003; Vias et al., 2005; Goldscheider, 2005b). وبالتالي، من المهم التحقق من صحة خرائط قابلية التأثر. ويمكن القيام بذلك على أساس المفاهيم الكمية الموضحة في الشكل ٨-١٠. والجوانب الأربعة ذات الصلة هي (١) وقت الانتقال التلوث المحتمل من المنشأ إلى الهدف، (٢) انخفاض التركيز، (٣) مدة التلوث المحتمل و(٤) الكمية النسبية للملوثة الذي يمكن أن يصل إلى الهدف. يمكن التحقق من جميع هذه الجوانب عن طريق اختبارات التتبع الاصطناعي. قام Goldscheider et al. (2001) بالتحقق من صحة خريطة قابلية التأثر (طريقة EPIK) التي كان من المفترض استخدامها كأساس لتقسيم مناطق حماية مصادر المياه الجوفية في منطقة مستجمعات المياه الجوفية المياه في نبع كارست في الجورا السويسرية الجبال. تم إطلاق متبوعات مختلفة على سطح الأرض باستخدام صفيحة سقي، تلاها ٢٠ مم من الأمطار الاصطناعية (الري). تم تسجيل منحنيات اختراق المتبوعات في النبع. وتم استخدام المعايير التالية للتحقق من الصحة: وقت الحد الأقصى للتركيز (وقت الذروة)، والحد الأقصى الطبيعي للتركيز (أي الحد الأقصى للتركيز مقسوماً على كمية الحقن). واستعادة المتبوع (الشكل ٨-١٨). وقد أكدت النتائج إلى حد كبير تقييم قابلية التأثر ولكنها سمحت أيضاً بإجراء بعض التحسينات.

في بعض الحالات، قد تكون مدة التلوث المحتمل جانباً مهماً أيضاً. تقدم اختبارات التتبع في مستجمعات الينابيع الكارستية في بعض الأحيان منحنيات اختراق مع أوقات ذروة قصيرة و أقصى تركيزات عالية ولكن ذات ذيول طويلة جداً، على الرغم من أن الحقن تم بشكل فوري ومباشر في المياه الجوفية المتدفقة. يمكن لعمليات مختلفة أن تفسر هذا السلوك، مثل التفاعلات بين القناة والارضية (تأثيرات المسامية المزدوجة) أو التخزين الوسيط في مناطق السوائل غير المتحركة (Field and Pinsky, 2000; Goldscheider, 2008a). وبالتالي، فإن الملوثة المنطلق سيصل إلى الهدف بسرعة كبيرة وبمستويات تركيز عالية، ولكن التلوث سيستمر أيضاً لفترة طويلة (الشكل ٨-١٩).

وللتحقق من صحة تقييم قابلية التأثر الجوهري، ينبغي استخدام متبوعات محافظة، مثل اليورانين أو العديد من الصبغات الفلورية الأخرى أو متبوعات الأملاح الأنيونية، مثل الكلوريد. من أجل التحقق من صحة قابلية التأثر (انظر القسم التالي)، يمكن تطبيق المتبوعات التفاعلية. على سبيل المثال، من أجل التحقق من صحة تقييم قابلية التأثر لمسببات الأمراض الميكروبية، مثل

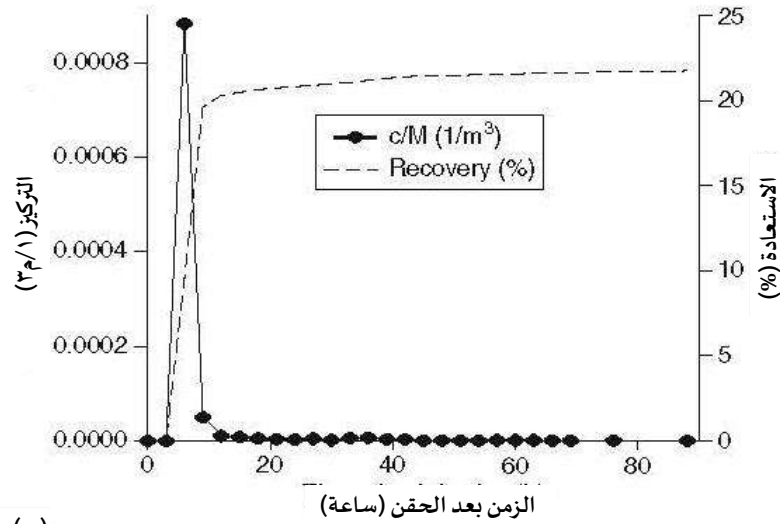
كيسات الكريبتوسبورديوم، يمكن استخدام كريات التتبع الفلورية الدقيقة كبداية للأكياس المسببة للأمراض (Harvey et al., 2008). يمكن العثور على أمثلة أخرى للتحقق من صحة خرائط قابلية التأثر عن طريق اختبارات التتبع، إلى جانب المزيد من التطورات المنهجية في (Perrin et al. (2004), Andreo et al. (2006), and Ravbar and Goldscheider (2009).



الشكل ٨-١٧ مثال لخريطة قابلية تأثر مصدر المياه الجوفية، والتي يمكن استخدامها كأساس لترسيم حدود مناطق حماية المصدر لنبع بودستينجيك الكارستي في سلوفينيا. يتم الحصول على الخريطة من خلال تراكم خريطة قابلية تأثر المصدر (الشكل ٨-١٦) وخريطة K، والتي تُظهر المسار في المنطقة المشبعة من طبقة المياه الجوفية الكارستية، أي التدفق نحو النبع. خريطة هشاشة المصدر هي مزيج من نمط الفسيفساء وترتيب مناطق الحماية. (Ravbar, 2007).

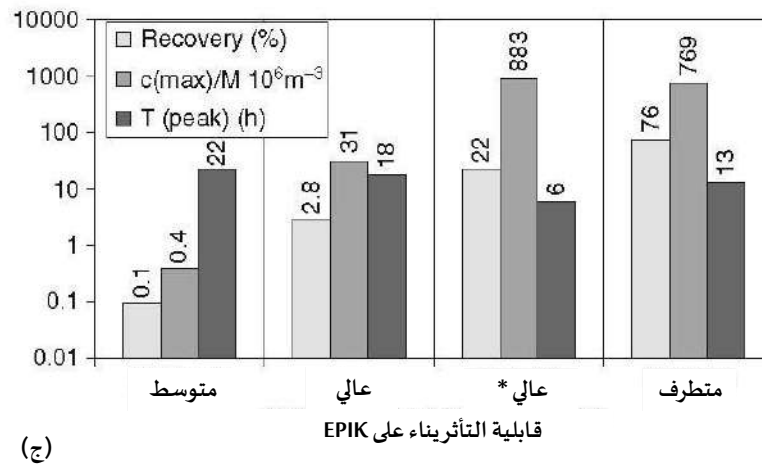


(i)



(ب)

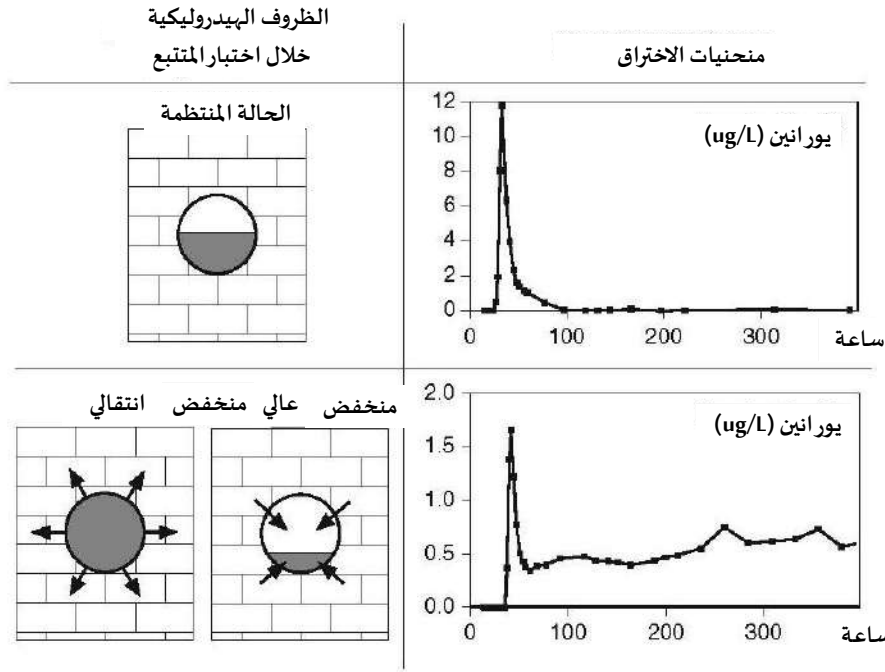
الشكل ٨-١٨ المثال الأول للتحقق من صحة خريطة قابلية التأثير (EPIK) عن طريق اختبارات التتبع المتعدد للنبع الكارستي بمستجمع المياه في جبال جورا السويسرية: (أ) انتشار متتبع (يوسين) على سطح الأرض؛ (ب) منحنى اختراق اليوسين المرصود عند النبع، مع تطبيقه حسب كمية الحقن؛ (يتبع)



الشكل ٨-١٨، تابع (ج) ملخص النتائج من أربعة مواقع حقن. واستخدم زمن الذروة (T)، والحد الأقصى المعياري للتركيزات (ج/م)، واستعادة التبع كمعايير للتحقق من الصحة، مما يؤكد إلى حد كبير تقييم قابلية التأثير لطريقة EPIK. تم تمييز النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق حقن اليوسين بعلامة النجمة. على الرغم من إطلاق اليوسين على سطح التربة، فقد بلغ ذروته في النبع بعد ٦ ساعات فقط من الحقن. (تم التعديل بعد Goldscheider et al., 2001).

## ٨-٦ تخطيط قابلية التأثير والمخاطر والخطر

تُظهر خرائط قابلية التأثير النوعية قابلية تأثير المياه الجوفية للملوث معين أو مجموعة من الملوثات. على الرغم من أن مثل هذه الخرائط يمكن أن تكون مفيدة للتخطيط الإقليمي لاستخدام الأراضي والمخاطر البيئية إلا أنها نادراً ما تستخدم كأساس لتحديد مناطق حماية الينابيع. ولذلك، لم تتم مناقشة قابلية التأثير بالتفصيل هنا. كما اقترح الإجراء الأوروبي COST Action 620 أيضاً منهجية لرسم خرائط قابلية التأثير النوعية (Zwahlen, 2004)، تم تطبيقها واختبارها لأول مرة بواسطة (Andreo et al., 2006). وبالإضافة إلى العوامل ذات الصلة بقابلية التأثير الذاتي، فإن تقييم قابلية التأثير النوعية تأخذ بعين الاعتبار التفاعلات بين الملوثات والبيئة الهيدروجيولوجية، مثل امتزاز الكاتيونات الفلزية السامة في المعادن الطينية، أو ترشيح مسببات الأمراض الميكروبية في المسام الدقيقة، أو تحليل المركبات العضوية كدالة للظروف البيوجيوكيميائية الحيوية. (Celico, Petrella, and Naclerio, 2007). اقترحوا تعديل طريقة DRASTIC لتقييم قابلية التأثير المحددة لطبقات المياه الجوفية الكربونية للتلوث الميكروبي. وتركز أمثلة أخرى على التلوث بالمبيدات (Arias-Estevéz et al., 2008; Stenemo et al., 2007a, 2007b) أو النترات (Masetti et al., 2008; Nolan and Hitt, 2006; Parker, Booth, and Foster, 1987). في سياق حماية المياه الجوفية، يتم تعريف المخاطر على أنها أنشطة ملوثة بالفعل أو يحتمل أن تكون ملوثة أو بنية التحتية.



الشكل ٨-١٩ منحنيات الاختراق لاختبارين من اختبارات المتتبع باستخدام اليورانيوم، تم رصدهما في نفس النبع الكارستي، ولكنهما أجريا خلال ظروف هيدرولوجية مختلفة. خلال ظروف التدفق العابرة، يظهر منحنى الاختراق المتتبع ذروة قصيرة ولكن ذيله طويل جداً، مما يشير إلى أن طبقات المياه الجوفية الكارستية ليست دائماً أنظمة سريعة التدفق. بسبب التخزين الوسيط، حتى إطلاق الملوثات على المدى القصير (العرضي) يمكن أن يتسبب في تلوث مياه الينابيع على المدى الطويل. (تم التعديل بعد Goldscheider, 2005a).

تصنيف المخاطر على أساس امتدادها المكاني إلى مخاطر نقطية (على سبيل المثال، خزانات الصرف الصحي، ومحطة البترين)، ومخاطر خطية (مثل الطرق وخطوط الأنابيب)، ومخاطر مساحية (مثل انتشار المبيدات الحشرية أو السماد السائل). يمكن تصنيف المخاطر أيضاً وفقاً لنوع وسمية الملوث، وكميته أو حمولته، واحتمالية حدوث التلوث، حيث تمثل إطلاقات التلوث العرضية والطارئة سيناريوهين أساسيين للتلوث. تناقش الأدبيات الضخمة مخاطر التلوث الزراعي والحضري وكيفية إدارتها، بما في ذلك دراسات (Boyer and Pasquarell (1999), Foster (2000), and Foster and Chilton(2004).

وفي نفس السياق، يستخدم مصطلح الخطر لوصف التهديد الفعلي للأنشطة الملوثة للمياه الجوفية (للاطلاع على المصطلحات، انظر الجدول ٨-١). ويعتمد خطر تلوث المياه الجوفية على كل من قابلية التأثر والمخاطر؛ يمكن تضمين قيمة أو أهمية مصدر أو مورد المياه الجوفية كجوانب إضافية. ومن الواضح أن الخطر المرتفع يكون موجوداً عندما توجد مخاطر خطيره في منطقة ذات قابلية تأثر شديدة (مثل بئر حقن مياه الصرف الصحي الموضحة في الشكل ٨-٣) داخل مستجمعات المياه الجوفية المستخدمة

كمصدر مياه الشرب الوحيد لعدد كبير من السكان. وعلى هذا الأساس، اقترح (Ravbar and Goldscheider, 2007) مخطط تقييم لرسم خرائط الخطر.

تُظهر خريطة الخطر ضرورة التصرف. يعني الخطر العالي، الذي عادة ما يشار إليه باللون الأحمر على خريطة الخطر، ما يلي أن خطر التلوث يؤثر بالفعل على المياه الجوفية أو يهددها. الزراعة المكثفة مع تكرار استخدام المبيدات والسماد السائل بشكل متكرر في مستجمعات المياه الجوفية المتصلة بنبع كارستي (كما هو موضح في الشكل ٨-٩) مثال نموذجي. في مثل هذه الحالات، يجب تقليل خطر التلوث من أجل الصحة العامة، وهو ما يمكن تحقيقه من خلال تحسين مناطق حماية المصادر الحالية وتغيير أو إزالة ممارسات استخدام الأراضي الحالية. كحل وسيط، فإن العناصر الأخرى في سلسلة الأمان الموضحة في الشكل ٨-١ قد تساعد أيضاً، مثل تحسين معالجة مياه الشرب. ومع ذلك، في المنظور طويل الأجل، فإن مناطق حماية المصدر المناسبة والقيود المفروضة على استخدام الأراضي هي وحدها التي تمثل حلاً مستداماً لتوفير مياه الشرب المأمونة.

## المراجع

- Adams, B., Foster, S.D., 1992. Land-surface zoning for groundwater protection. *Journal of the Institution of Water and Environmental Management* 6 (3), 312–320.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma.
- Andreo, B., Goldscheider, N., Vadillo, I., Vias, J.M., Neukum, C., Sinreich, M., et al., 2006. Karst groundwater protection: First application of a Pan-European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Libar (Southern Spain). *Sci. Total Environ.* 357 (1–3), 54–73.
- Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*, second ed. Balkema, Leiden, the Netherlands.
- Arias-Estevez, M., Lopez-Periago, E., Martinez-Carballo, E., Simal-Gandara, J., Mejuto, J.C., Garcia-Rio, L., 2008. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. *Agriculture Ecosystems and Environment* 123 (4), 247–260.

- Auckenthaler, A., Huguenberger, P. (Eds.), 2003. Pathogene Mikroorganismen im Grund- und Trinkwasser. Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland.
- Benischke, R., Goldscheider, N., Smart, C.C., 2007. Tracer techniques. In: Goldscheider, N., Drew, D. (Eds.), *Methods in karst hydrogeology. International Contributions to Hydrogeology*. Taylor & Francis/Balkema, London, pp. 147–170.
- Bianchetti, G., Roth, P., Vuataz, F.D., Vergain, J., 1992. Deep groundwater circulation in the Alps—Relations between water infiltration, induced seismicity and thermal springs—The case of Val-d'Illiez, Wallis, Switzerland. *Eclogae Geol. Helv.* 85 (2), 291–305.
- Bonadonna, L., Briancesco, R., Ottaviani, M., Veschetti, E., 2002. Occurrence of *Cryptosporidium* oocysts in sewage effluents and correlation with microbial, chemical and physical water variables. *Environ. Monit. Assess.* 75 (3), 241–252.
- Boyer, D.G., Pasquarell, G.C., 1999. Agricultural land use impacts on bacterial water quality in a karst groundwater aquifer. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 35 (2), 291–300.
- Brookes, J.D., Hipsey, M.R., Burch, M.D., Regel, R.H., Linden, L.G., Ferguson, C.M., et al., 2005. Relative value of surrogate indicators for detecting pathogens in lakes and reservoirs. *Environ. Sci. Technol.* 39 (22), 8614–8621.
- Brouye`re, S., Jeannin, P.Y., Dassargues, A., Goldscheider, N., Popescu, I.C., Sauter, M., et al., 2001. Evaluation and validation of vulnerability concepts using a physically based approach. In: *Seventh Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media. Sci. Tech. Envir., Me ´m. H. S. no. 13*, Besancon, France, 67–72.
- Bull, R.J., Birnbaum, L.S., Cantor, K.P., Rose, J.B., Butterworth, B.E., Pegram, R., et al., 1995. Water chlorination: Essential process or cancer hazard? *Fundam. Appl. Toxicol.* 28 (2), 155–166.
- Burkhard, M., Atteia, O., Sommaruga, A., Gogniat, S., Evard, D., 1998. Tectonics and hydrogeology of the Neuchatel Jura. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 91 (1), 177–183.
- Bussard, T., Tacher, L., Parriaux, A., Maitre, V., 2006. Methodology for delineating groundwater protection areas against persistent contaminants. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 39, 97–109.
- Celico, F., Petrella, E., Naclerio, G., 2007. Updating of a DRASTIC-based method for specific vulnerability assessment in carbonate aquifers. *Water International* 32 (3), 475–482.
- Chapelle, F.H., 2000. The significance of microbial processes in hydrogeology and geochemistry. *Hydrogeology Journal* 8 (1), 41–46.

- Chapelle, F.H., 2001. Ground-Water Microbiology and Geochemistry. John Wiley & Sons, New York.
- Civita, M., De Maio, M., 2000. Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilit  degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5 [Assessment and mapping of aquifer vulnerability using the parametric system SINTACSR5]. Pitagora Editrice, Bologna, Italy.
- Clark, I.D., Fritz, P., 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Criss, R., Davisson, L., Surbeck, H., Winston, W., 2007. Isotopic methods. In: Goldscheider, N., Drew, D. (Eds.), Methods in karst hydrogeology. International Contributions to Hydrogeology. Taylor & Francis/Balkema, London, pp. 123–145.
- Croskrey, A., Groves, C., 2008. Groundwater sensitivity mapping in Kentucky using GIS and digitally vectorized geologic quadrangles. *Env. Geol.* 54 (5), 913–920.
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., et al., 2002. Main concepts of the “European approach” to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal* 10 (2), 340–345.
- Danielopol, D.L., Pospisil, P., 2001. Hidden biodiversity in the groundwater of the Danube Flood Plain National Park (Austria). *Biodivers. Conserv.* 10 (10), 1711–1721.
- Department of Environment and Local Government, Environmental Protection Agency and Geological Survey of Ireland, 1999. Groundwater protection schemes. Department of Environment and Local Government, Environmental Protection Agency and Geological Survey of Ireland, Dublin.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, 2006. Richtlinien fu Trinkwasserschutzgebiete, Part 1: Schutzgebiete fur Grundwasser. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, DVGW-Regelwerk. Working Paper W 101, Eschborn.
- Doerfliger, N., Jeannin, P.Y., Zwahlen, F., 1999. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Env. Geol.* 39 (2), 165–176.
- Doerfliger, N., Zwahlen, F., 1998. Practical guide: Groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK). Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern.
- Draoui, M., Vias, J., Andreo, B., Targuisti, K., El Messari, J.S., 2008. A comparative study of four vulnerability mapping methods in a detritic aquifer under Mediterranean climatic conditions. *Env. Geol.* 54 (3), 455–463.
- Eamus, D., Froend, R., 2006. Groundwater-dependent ecosystems: The where, what and why of GDEs. *Aust. J. Bot.* 54 (2), 91–96.
- Ehrlich, H.L., 1997. Microbes and metals. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 48 (6), 687–692.

- Fetter, C.W., 1999. Contaminant Hydrogeology, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Field, M.S., Pinsky, P.F., 2000. A two-region nonequilibrium model for solute transport in solution conduits in karstic aquifers. *J. Contam. Hydrol.* 44 (3–4), 329–351.
- Foster, S.S.D., 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenboden, W., VanWaegeningh, W. (Eds.), *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*, TNO Committee on Hydrogeological Research, Proceedings and Information, 38, The Hague, pp. 69–86.
- Foster, S.S.D., 2000. Assessing and controlling the impacts of agriculture on groundwater—From barley barons to beef bans. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 33 (4), 263–280.
- Foster, S.S.D., Chilton, P.J., 2004. Downstream of downtown: urban wastewater as groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 12 (1), 115–120.
- Fritch, T.G., McKnight, C.L., Yelderman, J.C., Arnold, J.G., 2000. An aquifer vulnerability assessment of the Paluxy aquifer, central Texas, USA, using GIS and a modified DRASTIC approach. *Environ. Manage.* 25 (3), 337–345.
- Goßpert, N., Goldscheider, N., 2008. Solute and colloid transport in karst conduits under low- and high-flow conditions. *Ground Water* 46 (1), 61–68.
- Gogu, R.C., Dassargues, A., 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Env. Geol.* 39 (6), 549–559.
- Gogu, R.C., Hallet, V., Dassargues, A., 2003. Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques. Application to the Neblon river basin (Belgium). *Env. Geol.* 44 (8), 881–892.
- Goldscheider, N., 2005a. Fold structure and underground drainage pattern in the alpine karst system Hochifen-Gottesacker. *Eclogae Geol. Helv.* 98 (1), 1–17.
- Goldscheider, N., 2005b. Karst groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in the Swabian Alb, Germany. *Hydrogeology Journal* 13 (4), 555–564.
- Goldscheider, N., 2008. A new quantitative interpretation of the long-tail and plateau-like breakthrough curves from tracer tests in the artesian karst aquifer of Stuttgart, Germany. *Hydrogeology Journal* 16 (7), 1311–1317.
- Goldscheider, N., Andreo, B., 2007. The geological and geomorphological framework. In: Goldscheider, N., Drew, D. (Eds.), *Methods in Karst Hydrogeology*. International Contributions to Hydrogeology. Taylor & Francis, London, pp. 9–23.

- Goldscheider, N., Drew, D., 2007. Methods in karst hydrogeology. International Contributions to Hydrogeology 26. Taylor & Francis, London.
- Goldscheider, N., Hotzl, H., Fries, W., Jordan, P., 2001. Validation of a vulnerability map (EPIK) with tracer tests. Seventh Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, Besançon, France, pp. 167–170.
- Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S., Hotzl, H., 2000. The PI method—A GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Z. Angew. Geol.* 46 (3), 157–166.
- Goldscheider, N., Milnes, E., Fries, W., Joppen, M., 2008. Markierungsversuche und Modellierung zur Bewertung der Gefährdung eines Trinkwasserbrunnens [Tracer experiments and modelling for risk assessment of a drinking water well]. *Grundwasser*, published online.
- Harvey, R.W., Metge, D.W., Shapiro, A.M., Renken, R.A., Osborn, C.L., Ryan, J.N., et al., 2008. Pathogen and chemical transport in the karst limestone of the Biscayne aquifer: 3. Use of microspheres to estimate the transport potential of *Cryptosporidium parvum* oocysts. *Water Resour. Res.* 44 (8).
- Herwaldt, B.L., Craun, G.F., Stokes, S.L., Juranek, D.D., 1992. Outbreaks of waterborne disease in the United States, 1989–1990. *Journal American Water Works Association* 84 (4), 129–135.
- Hotzl, H., 1996. Origin of the Danube-Aach system. *Env. Geol.* 27 (2), 87–96.
- Hunkeler, D., Mudry, J., 2007. Hydrochemical tracers. In: Goldscheider, N., Drew, D. (Eds.), *Methods in karst hydrogeology. International Contributions to Hydrogeology*. Taylor & Francis/Balkema, London, pp. 93–121.
- Johnston, C.T., Cook, P.G., Frape, S.K., Plummer, L.N., Busenberg, E., Blackport, R.J., 1998. Ground water age and nitrate distribution within a glacial aquifer beneath a thick unsaturated zone. *Ground Water* 36 (1), 171–180.
- Kalinski, R.J., Kelly, W.E., Bogardi, I., Ehrman, R.L., Yamamoto, P.D., 1994. Correlation between DRASTIC vulnerabilities and incidents of VOC contamination of municipal wells in Nebraska. *Ground Water* 32 (1), 31–34.
- Kass, W., 1998. *Tracing Technique in Geohydrology*. Balkema, Rotterdam, the Netherlands.
- Krauskopf, K.B., Bird, D.K., 1995. *Introduction to geochemistry*. McGraw-Hill, New York.
- Kresic, N., 2009. *Groundwater Resources, Sustainability, Management and Restoration*. McGraw-Hill, New York.
- Lee, S., 2003. Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC system in Southern Korea. *Env. Geol.* 44 (6), 654–664.
- Lisle, J.T., Rose, J.B., 1995. *Cryptosporidium* contamination of water in the USA and UK—A minireview. *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua* 44 (3), 103–117.

- Lundmark, A., Olofsson, B., 2007. Chloride deposition and distribution in soils along a deiced highway—Assessment using different methods of measurement. *Water Air Soil Pollut.* 182 (1–4), 173–185.
- Lynch, S.D., Reynders, A.G., Schulze, R.E., 1997. A DRASTIC approach to groundwater vulnerability in South Africa. *S. Afr. J. Sci.* 93 (2), 59–60.
- Mackenzie, W.R., Hoxie, N.J., Proctor, M.E., Gradus, M.S., Blair, K.A., Peterson, D.E., et al., 1994. A massive outbreak in Milwaukee of *Cryptosporidium* infection transmitted through the public water-supply. *N. Engl. J. Med.* 331 (3), 161–167.
- Magiera, P., 2000. Methoden zur Abschätzung der Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers [Methods for the estimation of groundwater vulnerability to contamination]. *Grundwasser* 5 (3), 103–114.
- Margat, J., 1968. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. BRGM Publication 68 SGL 198 HYD, Orleans, France.
- Masetti, M., Poli, S., Sterlacchini, S., Beretta, G.P., Facchi, A., 2008. Spatial and statistical assessment of factors influencing nitrate contamination in groundwater. *J. Environ. Manage.* 86 (1), 272–281.
- Milnes, E., Renard, P., 2004. The problem of salt recycling and seawater intrusion in coastal irrigated plains: an example from the Kiti aquifer (Southern Cyprus). *Journal of Hydrology* 288 (3–4), 327–343.
- Montgomery, M.A., Elimelech, M., 2007. Water and sanitation in developing countries: Including health in the equation. *Environ. Sci. Technol.* 41 (1), 17–24.
- Nguyet, V.T.M., Goldscheider, N., 2006. A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and its first application in a tropical karst area, Vietnam. *Hydrogeology Journal* 14 (8), 1666–1675.
- Nickson, R.T., McArthur, J.M., Ravenscroft, P., Burgess, W.G., Ahmed, K.M., 2000. Mechanism of arsenic release to groundwater, Bangladesh and West Bengal. *Appl. Geochem.* 15 (4), 403–413.
- Nolan, B.T., Hitt, K.J., 2006. Vulnerability of shallow groundwater and drinking-water wells to nitrate in the United States. *Environ. Sci. Technol.* 40 (24), 7834–7840.
- Ophori, D., Toth, J., 1990. Relationships in regional groundwater discharge to streams—An analysis by numerical-simulation. *J. Hydrol.* 119 (1–4), 215–244.
- Parker, J.M., Booth, S.K., Foster, S.S.D., 1987. Penetration of Nitrate from Agricultural Soils into the Groundwater of the Norfolk Chalk. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part 2—Research and Theory* 83, 15–32.

- Perrin, J., Pochon, A., Jeannin, P.Y., Zwahlen, F., 2004. Vulnerability assessment in karstic areas: validation by field experiments. *Env. Geol.* 46 (2), 237–245.
- Pronk, M., Goldscheider, N., Zopfi, J., 2006. Dynamics and interaction of organic carbon, turbidity and bacteria in a karst aquifer system. *Hydrogeology Journal* 14 (4), 473–484.
- Pronk, M., Goldscheider, N., Zopfi, J., 2007. Particle-size distribution as indicator for fecal bacteria contamination of drinking water from karst springs. *Environ. Sci. Technol.* 41 (24), 8400–8405.
- Rahman, A., 2008. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography* 28 (1), 32–53.
- Ranville, J.F., Hendry, M.J., Reszat, T.N., Xie, Q.L., Honeyman, B.D., 2007. Quantifying uranium complexation by groundwater dissolved organic carbon using asymmetrical flow field-flow fractionation. *J. Contam. Hydrol.* 91 (3–4), 233–246.
- Ravbar, N., 2007. The protection of karst waters. *Carsologica, Postojna, Ljubljana, Slovenia*.
- Ravbar, N., Goldscheider, N., 2007. Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *Acta Carsologica* 36 (3), 397–411.
- Ravbar, N., Goldscheider, N., 2009. Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment. *Hydrogeology Journal*. 17 (3), 725–733.
- Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, 2004. *Wegleitung Grundwasserschutz [Practical guide: groundwater protection]*, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, Bern.
- Scanlon, B.R., Jolly, I., Sophocleous, M., Zhang, L., 2007. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water Resour. Res.* 43 (3).
- Schaub, S.A., Oshiro, R.K., 2000. Public health concerns about caliciviruses as waterborne contaminants. *J. Infect. Dis.* 181, 374–380.
- Shokes, T.E., Moller, G., 1999. Removal of dissolved heavy metals from acid rock drainage using iron metal. *Environ. Sci. Technol.* 33 (2), 282–287.
- Siefert, B., Buchel, G., Lebkuchner-Neugebauer, J., 2006. Potash mining waste pile Sollstedt (Thuringia): Investigations of the spreading of waste solutes in the Roethian Karst. *Grundwasser* 11 (2), 99–110.

- Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.* 17 (5), 517–568.
- Smith, J.L., 2001. A review of hepatitis E virus. *J. Food Prot.* 64 (4), 572–586.
- Stenemo, F., Lindahl, A.M.L., Gardenos, A., Jarvis, N., 2007a. Meta-modeling of the pesticide fate model MACRO for groundwater exposure assessments using artificial neural networks. *J. Contam. Hydrol.* 93 (1–4), 270–283.
- Stenemo, F., Ray, C., Yost, R., Matsuda, S., 2007b. A screening tool for vulnerability assessment of pesticide leaching to groundwater for the islands of Hawaii, USA. *Pest Manag. Sci.* 63 (4), 404–411.
- Szewzyk, U., Szewzyk, R., Manz, W., Schleifer, K.H., 2000. Microbiological safety of drinking water. *Annu. Rev. Microbiol.* 54, 81–127.
- Toth, J., 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J. Geophys. Res.* 68 (16), 4795–4812.
- Toth, J., 1999. Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal* 7 (1), 1–14.
- Vaneverdingen, R.O., 1991. Physical, chemical, and distributional aspects of Canadian springs. *Memoirs of the Entomological Society of Canada* 155, 7–28.
- Vesper, D.J., White, W.B., 2004. Spring and conduit sediments as storage reservoirs for heavy metals in karst aquifers. *Env. Geol.* 45 (4), 481–493.
- Vias, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., 2005. A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. *Env. Geol.* 47 (4), 586–595.
- Vias, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vardillo, I., Jimenez, P., 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: The COP method. *Hydrogeology Journal* 14 (6), 912–925.
- Vrba, J., Zaporozec, A. (Eds.), 1994. *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. International Contributions to Hydrogeology, 6, Hannover, Germany.
- Zwahlen, F., 2004. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report COST action 620. European Commission, Brussels.

## الاستفادة من الينابيع وتنظيمها

### ٩-١ مقدمة

إن استخدام مياه الينابيع والاستفادة منها هو فن قديم، ولسهولة الوصول إلى المياه، كانت المدن غالباً ما تقع بالقرب من الينابيع الكبيرة، في حين أن تلك المدن التي لم يكن لديها إمدادات مياه موثوقة تم تدميرها أو إزالتها لأنها لم تستطع النجاة في الظروف المتغيرة. وكقاعدة عامة، كانت المدن ذات المياه الوفيرة المستمدة من الينابيع والخزانات من مأخذ الينابيع والخزانات التي شُيّدت، وفرت قاعدة للتنمية المزدهرة وملأها آمناً لمواطنيها. على سبيل المثال، في المراكز التاريخية لروما والصين القديمة وبلاد ما بين النهرين ومصر، تم تطوير أنظمة للاستفادة من الينابيع أو حفر الآبار وتوصيل المياه أحياناً إلى نقاط بعيدة جداً. حتى في بابل القديمة، لم يكن تأمين المياه مشكلة. ولضمان إمدادات المياه إلى مدينة نينوى القديمة في بلاد ما بين النهرين، شيد الملك الآشوري سنحاريب ابن سرجون الثاني مأخذاً على نظام ينابيع خنيس وإحدى أولى القنوات لتوصيل المياه إلى أسوار المدينة. وحتى ذلك الحين أوجدت مياه الينابيع حلاً أفضل بكثير من مياه دجلة السطحية القريبة (الشكل ٩-١).

كان البحث عن المياه على طول ساحل البحر الأبيض المتوسط صعباً بشكل خاص، حيث كانت هناك العديد من الحضارات المتطورة. وقد وضع الفلاسفة وعلماء الرياضيات اليونانيون، مثل إقليدس وفيثاغورس وأرخميدس، مبادئ تصميم وتشغيل الهياكل الهيدروليكية التي تم تطويرها بشكل أكبر خلال العصر الروماني الذهبي لإمدادات المياه.

كان المهندس المعماري الروماني فيتروفيوس أول من ترك سجلاً مكتوباً يوضح أن الينابيع على المنحدرات الجبلية قد تتغذى من خلال هطول الأمطار في الغلاف الجوي، حيث وجد تفاعلها في الانتشار السريع للمياه المتسللة. العديد من النواير الجميلة شُيّدت في جميع أنحاء الإمبراطورية. باختصار، تجلت سيادة الرومان وهيمنتهم من خلال معرفتهم بالمياه، بما في ذلك فن التنقيب عن مياه الينابيع وتوصيلها (الشكل ٩-٢). بعد انهيار الإمبراطورية الرومانية، كانت هناك فترة طويلة من الصمت الهندسي فيما يتعلق باستخدام الينابيع، حيث بعد ذلك بكثير، تم إنشاء أول نظام مركزي لإمدادات المياه في باريس في القرن الثاني عشر، وفي لندن في القرن الثالث عشر، وقد حاولت العديد من المدن حل مشاكلها المائية عن طريق التقاط أنواع مختلفة من الينابيع وبشكل

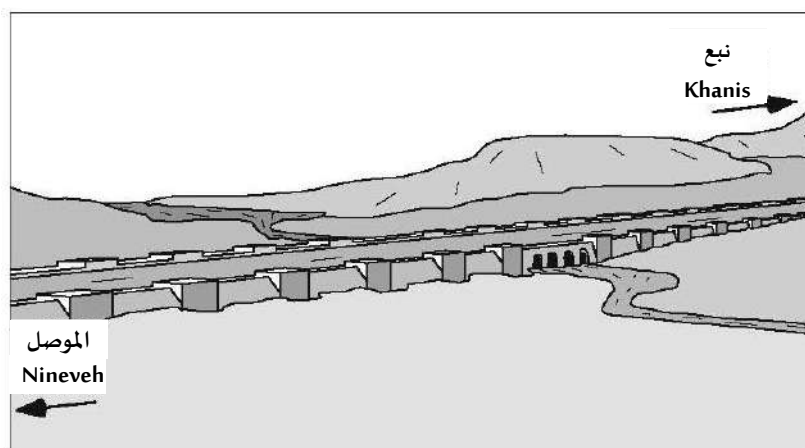
عام عن طريق توصيل مياه الينابيع إلى مراكز المدن بواسطة أنابيب الجاذبية المصنوعة من الخشب أو الرصاص أو الحديد أو السيراميك (الشكل ٩-٣).

ومع ذلك، كما نوقش في الفصل ١، مع التقدم السريع في تقنيات الحفر خلال القرن التاسع عشر وخاصة في القرن العشرين وبفضل الطاقة الميسورة التكلفة، واجه مستخدمو مياه الينابيع ضغطاً هائلاً من مستخدمي المياه الجوفية بشكل عام. يمكن القول إن ما يلي هو المثال الأكثر دراماتيكية على النطاق العالمي. فقد كان نبع رأس العين في سوريا بالقرب من الحدود التركية يساعد في الحفاظ على تدفق نهر الفرات عبر رافده الخابور. حتى أن بعض المراجع تشير إلى أنه كان أكبر نبع في العالم. ووفقاً **Burdon and Safadi, (1963)**، كان تصريفه يتراوح بين ٣٤,٥ و ١٠٧,٨ م<sup>٣</sup>/ث. وذكروا أن المياه الجوفية كانت تنبع من ١٣ ينبوعاً تصرف حوضاً واحداً تزيد مساحته عن ٨٠٠ كم<sup>٢</sup> يتكون من حجر جيري لعهد الأيوسين ومتبخرات الميوسين والحجر الجيري والصخور البازلتية. لسوء الحظ، لم يعد هذا النبع يتدفق. فقد تسبب الاستغلال المفرط لموارد المياه من خلال حفر العديد من الآبار المحفورة في المنطقة تسبب في استنزاف خطير في منسوب المياه الجوفية. ناقش **Hole and Smith (2004)** التغيرات البيئية والمناظر الطبيعية في شمال شرق سوريا على مدى المائة عام الماضية وتحولها من مراعي مفتوحة إلى أراضي مزروعة بكثافة. وكما هو الحال في معظم المناطق القاحلة أو شبه القاحلة، تتطلب الزراعة الناجحة إما رياً تكميلياً أو رياً كاملاً. لكن الخطط الطموحة جداً لتنمية الموارد المائية من أجل المحاصيل الصيفية وقرارات المزارعين الأفراد بتركيب الآبار أدت إلى تغيير جذري في الصرف الطبيعي لصالح استخراج المياه الجوفية وخزانات التخزين وقنوات الري. على الرغم من أن هذه اليوم واحدة من أكثر المناطق خصوبة وكثافة زراعية في الشرق الأدنى، يبقى أن نرى ما إذا كان هذا الاستخراج المكثف للمياه الجوفية مستداماً. أما بالنسبة لنبع رأس العين، فمن شبه المؤكد أنه لن يتدفق مرة أخرى، بغض النظر عن أي قرارات مستقبلية لإدارة المياه في هذا الجزء المضطرب من العالم.

## ٩-٢ الاستفادة من الينابيع

### ٩-٢-١ مياه الينابيع في إمدادات مياه الشرب

يمكن أن يلبي الصرف الطبيعي لطبقات المياه الجوفية من خلال الينابيع الطلب على المياه على نطاق واسع: من إمدادات المدن الكبيرة على المستوى الإقليمي، إلى إمداد أسرة واحدة أو عدة أسر معيشية فقط. على الرغم من أن هذه الأخيرة ليست مشكلة كبيرة من حيث كمية المياه، إلا أنه بالنسبة للمستهلكين الكبار، فإن طبقات المياه الجوفية الكبيرة جداً وتصريف الينابيع مطلوبان. على سبيل المثال، يوجد تقليد قديم في وسط وجنوب شرق أوروبا حيث تحصل ما يصل إلى خمس عواصم على المياه من الينابيع الكارستية (انظر الفصل ١٠,١). تفاصيل عن أحد أشهر ينابيع العواصم الأوروبية، وهو نبع كلا إيفر الذي تستخدمه محطات المياه في فيينا في الفصل ١٠,٢ (انظر أيضاً الشكل ٩-٤). غير أن الطلب المتزايد تسبب في قيام العديد من المدن باستبدال أو تعزيز نظامها المائي الأساسي، القائم على مياه الينابيع، بالمياه السطحية أو المياه الجوفية من طبقات المياه الجوفية الأخرى، وغالباً ما تكون

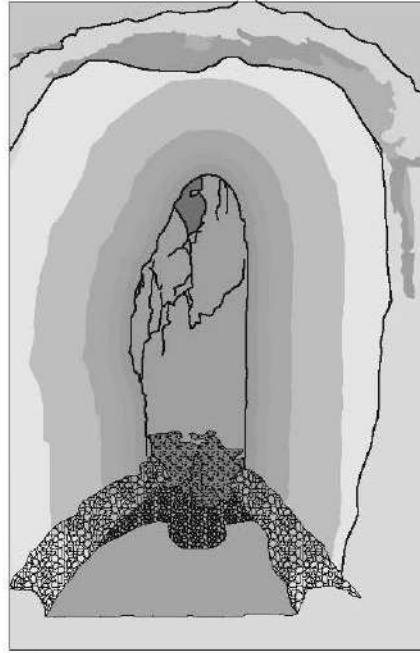


(١)

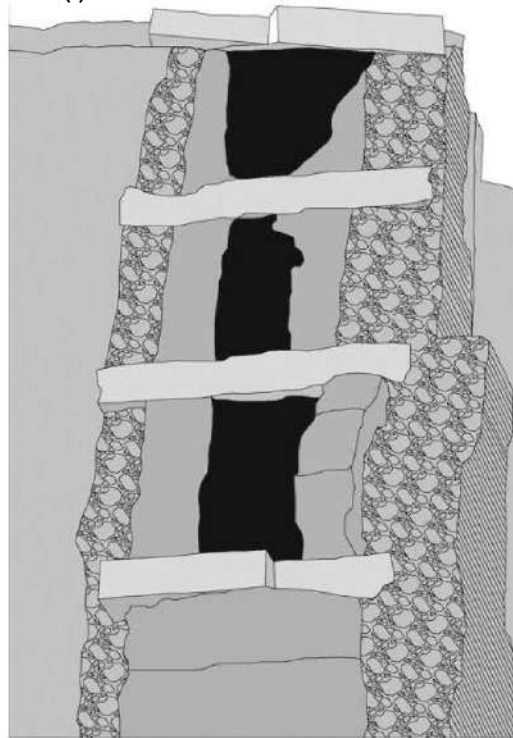


(ب)

الشكل ٩-١ (أ) قناة أعيد بناؤها لتزويد نينوى القديمة بالمياه؛ (ب) كهوف من صنع الإنسان فوق أنقاض مأخذ نبع خنيس (أتروش، شمال العراق).



(i)



(ب)

الشكل ٩-٢ (أ) أنفاق الصهاريج في تل بينسيان (روما)؛ (ب) مقطع من ثلاثة مستويات من القنوات التي تنقل المياه، قناة في بورتا ماجيوري، روما. (معدلة من Lombardi and Corazza, 2008).



(i)



(ب)

الشكل ٩-٣ (أ) رسم تخطيطي لنافورة تريفي الشهيرة، روما، من القرن الخامس عشر؛ (ب) النافورة اليوم؛ يتم تحويل المياه من نبع سالوني على بعد ١٠ كم عبر قناة فيرغيني القديمة.

المياه الغرينية. وفي العالم النامي، من الصعب جداً، بل من المستحيل أحياناً، تلبية الطلب المتزايد على المياه وتوفير المياه الكافية للسكان. والواقع أن النمو السكاني هو السبب الرئيسي في أن العديد من الينابيع الصغيرة التي كانت مستخدمة في السابق مهجورة الآن. التوجه نحو موارد مائية أكثر وفرة مثل المياه الغرينية أو مياه الأنهار، أو المياه من الخزانات المشيدة حديثاً، وهو اتجاه شائع. إذا كانت مستجمعات الينابيع محمية بشكل فعال من التلوث، فإن جودة المياه الجوفية التي يتم تصريفها عادة ما تكون عالية.

لذلك، من وجهة نظريئية، فإن مشاهدة قطرات ثمينة من مياه الينابيع المستخدمة في غسل الشوارع، على سبيل المثال، أولري المساحات الخضراء في المدينة أمر محزن. حتى لو تمت معالجة المياه باهظة الثمن، فليس من السهل أبداً فصل خطوط الأنابيب وتزويد المستهلكين المحددين بالمياه التقنية. المشكلة هي نفسها في كل مكان.

بالمقارنة مع المياه من مصادر أخرى، تتمتع مياه الينابيع بالعديد من المزايا من حيث جودة المياه. ومع ذلك، كما هو موضح في الفصل ٦، فإن الظروف الطبيعية لا تفضل دائماً جودة المياه: أمثلة على تدهور المياه التي تسببها الجيولوجيا معروفة في المناطق التي تتواجد فيها الصخور الملحية مثل الجبس أو الأنهيدريت أو الهاليت على نطاق واسع وكذلك من المناطق التي تتكون في معظمها من الصخور الملحية (يمكن أن تكون المعادن الثقيلة أو النشاط الإشعاعي مشاكل كبيرة). في مثل هذه الظروف، تكون معالجة المياه أمراً لا مفر منه وينبغي التخطيط له في المصدر أو نقطة الاستخدام ويجب أن تتم قبل وصول المياه إلى المستخدمين النهائيين (انظر الفصل ٧). وعلى الرغم من أن معايير مياه الشرب معايير تقييدية للغاية في معظم البلدان، إلا أن الهيئات التشريعية الوطنية تتسامح مع بعض المكونات المحددة، إذا كانت ناتجة عن الظروف الطبيعية المحلية. لهذا السبب، فإن منظمة الصحة العالمية (WHO) "وضعت توصيات فيما يتعلق بالمستويات القصوى المسموح بها من المكونات الكيميائية والعضوية في المياه. وعلاوة على ذلك، وبخلاف الحدود المفروضة على النترات والمبيدات الحشرية، لم يتم التوصل إلى اتفاق حتى الآن بشأن التوجيه الإطاري للمياه الصادر عن الاتحاد الأوروبي (WFD EU 2000/60) بشأن تنظيم مكونات المياه الأخرى. ولذلك، تظل مسؤولية الجهات الوطنية على تحديد مستويات الزرنيخ، والرصاص، والزنبق، والزنبق، والكاديوم، والنترات والكلوريد وأكسيد الكبريت، وكذلك ثلاثي كلورو الإيثان ورباعي كلورو الإيثان.

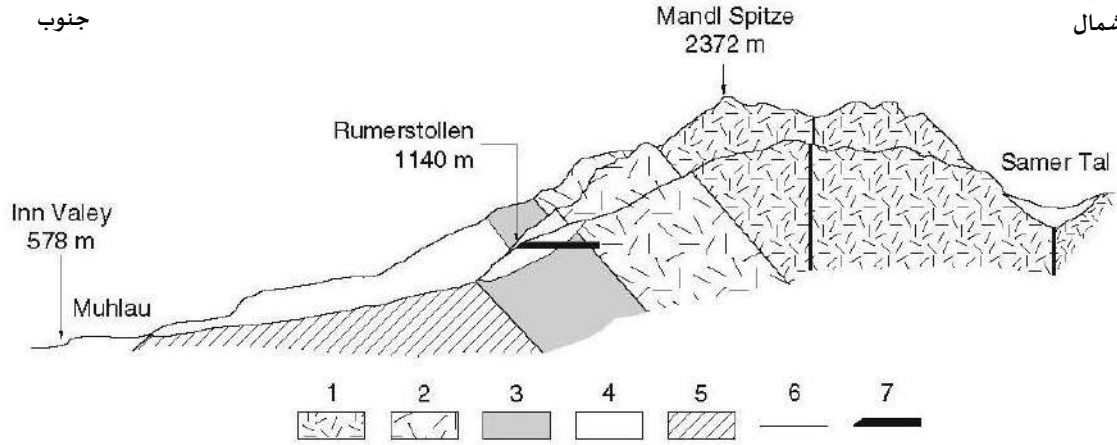
## ٩-٢-٢ مياه الينابيع في توليد الطاقة

في المناطق الجبلية والمرتفعة، غالباً ما تقع الينابيع على ارتفاعات أعلى من التجمعات السكانية، مما يتيح نقل المياه بالجاذبية ومن المزايا الإضافية في مثل هذه الحالات أن الرأس الهيدروليكي العالي للينابيع يمكن استخدامه في كل من إمدادات المياه وتوليد الطاقة الكهرومائية. ويمكن استخدام الينابيع لإمدادات المياه وتوليد الطاقة الكهرومائية. ومن الأمثلة على ذلك مشروع تم إنجازه في النمسا لإمداد المياه والطاقة إلى إنسبروك، منتجع التزلج الأولمبي الشهير وعاصمة تيرول (الشكل ٥-٩). وقد تم بناء أول مأخذ من ينابيع مو hlau لإنسبروك في عام ١٨٨٧ وأعيد بناؤه في الخمسينيات. [Grazia - \(1984\) dei and Zotl](#) وصف ظروف وصعوبات بناء نفق رومرستولين الجديد من خلال كتلة صخرية كارستية من الحجر الجيري الترياسي المغطى برواسب حديثة. حيث تقع فتحة النفق على ارتفاع ١١٤٠ متراً فوق متوسط مستوى سطح البحر، بينما يبلغ ارتفاع رأس النفق حوالي ٥٦٠ متراً فوق مستوى سطح البحر. يبلغ طول أروقة التجميع ٥٦٤ م، مع فروع إضافية بطول ١١٥٩ م. ويتم النقل بواسطة خطي أنابيب بقطر ٦٠٠ مم المياه إلى توربينين في محطة الطاقة. ويحصل حوالي ٢٥ في المائة من سكان إنسبروك على الطاقة من هذه المحطة. بالإضافة إلى ذلك، فإن المياه، لا تخضع لأي معالجة، وذات جودة ممتازة. ودرجة حرارة الماء ثابتة عند ٥ درجات مئوية. تبلغ نسبة التصريف السنوية حوالي

١:٢. الحد الأدنى، خلال أشهر الربيع الأولى، ٥٦٠ لتر/ثانية، بينما يبلغ الحد الأقصى خلال الصيف أكثر من ١٦٠٠ لتر/ثانية. يرجع التصريف الثابت نسبياً إلى تأخر تسرب الأمطار وذوبان الثلوج. هناك أيضاً فترة مكوث أطول داخل الحجر الجيري المتشقق والتي تتكون من فواصل ضيقة أكثر من الكهوف الكبيرة (Graziadei and Zotl, 1984).



الشكل ٩-٤ تفاصيل من نبع كايزربرون Kaiserbrunn (جبل راكس بالقرب من فيينا)، وهو تحفة فنية في تصميم التقاط الينابيع و الجودة من القرن التاسع عشر.



الشكل ٩-٥ مقطع عرضي لقناة مو هالو Muhlau gallery: (١) حجر جيرى ويترشتاينكالك؛ (٢) طبقة المياه الجوفية الكارستية من حجر جيرى موشيلكالك؛ (٣) حجر بوندسندشتاين الرملى وغراواكي؛ (٤) رواسب نهريّة وكاحلية، بريكسيا؛ (٥) مارل، حجر رملي، حجر جيرى، دولوميت؛ (٦) صدع؛ (٧) رواق. (مُعدّل من (Grazidai and Zötl, 1984).

تم تخزين المياه من العديد من الينابيع في خزانات سطحية اصطناعية. وبناءً على ذلك، في حالة السدود متعددة الأغراض، يمكن أن تساهم المياه من الينابيع المحتجزة بشكل مباشر في توليد الكهرباء. وتعتمد بعض أنظمة الطاقة الكهرومائية بشدة على التدفق الأساسي للينابيع. على سبيل المثال، أحد أكبر الينابيع في العالم، وهو نبع دومانلي في تركيا، بمتوسط تصريف يبلغ ٥٠ م<sup>٣</sup>/ثانية (Karanjac and Gunay, 1980)، وهو الآن محصور بخزان اصطناعي.

### ٩-٢-٣ مياه الينابيع في الزراعة

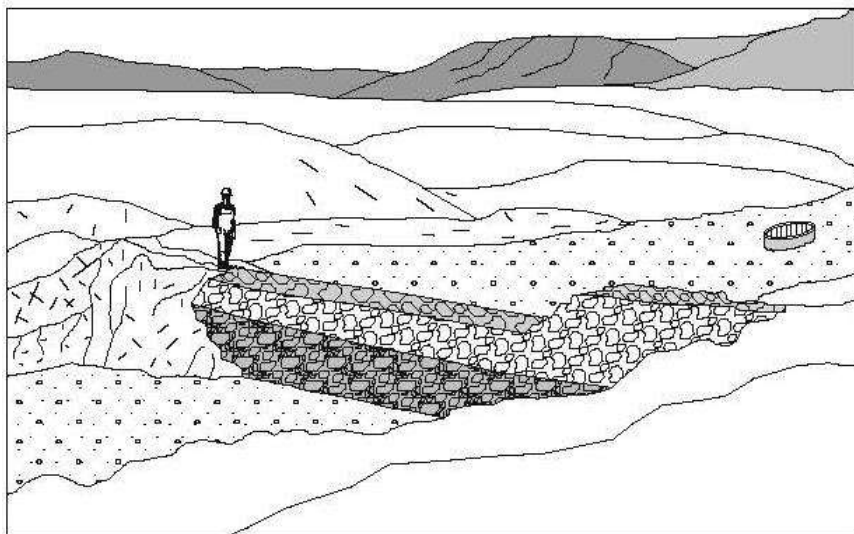
إن الري بمياه الينابيع له تقليد قديم جداً في المناطق القاحلة وشبه القاحلة، كما هو الحال في استخدام الينابيع لأغراض الشرب. على سبيل المثال، تدين بلاد ما بين النهرين، مهد الحضارة، بنموها الاقتصادي وازدهارها الاقتصادي إلى إنتاجها الغذائي القائم على الري. في حين أن تحويل القنوات من المجاري الرئيسية لنهري دجلة والفرات كان شائعاً في السهول، إلا أن أنظمة الري التقليدية الصغيرة بالجاذبية التي كانت تحوّل المياه من الينابيع أو الجداول الدائمة من خلال هياكل دائمة أو مؤقتة، كانت توفر المصدر الرئيسي للري في المناطق الجبلية والتلال (الشكل ٩-٦). وفي العديد من الأماكن في جميع أنحاء العالم وفرت مخططات الري الصغيرة هذه الغذاء للمجتمعات المحلية، وخففت من حدة الفقر، ومكّنت فائض الإنتاج للتجارة في الأسواق المحلية.

وتتألف البنية التحتية النموذجية لنظم الري التقليدية من أنقاض شبه دائمة أو من البناء سدود ومآخذ وقنوات محفورة تنقل المياه إلى المنطقة المروية. تتطلب البنية التحتية التقليدية صيانة كبيرة، ويمكن أن يكون فاقد المياه من خلال التسرب مرتفعاً جداً.

ويمكن استخدام هياكل السحب المحسنة وأنظمة النقل لتكون بانتظام من قنوات خرسانية أو أنابيب مثبتة. الحل الأخير مهم جداً لزيادة كفاءة النظام من خلال تقليل ليس فقط التسرب ولكن أيضاً الفاقد الناتج عن التبخر من القنوات المفتوحة. كما يساعد نقل المياه عبر الأنابيب في منع مشاكل الترسبات. الماء مورد محدود في معظم البلدان القاحلة، ومن المرجح أن يصبح أكثر محدودية في المستقبل. في حين أن الفاقد من المياه في تطبيق حقلي متوسط باستخدام أنظمة الجاذبية السطحية التقليدية تتراوح بانتظام بين ٤٠ و ٦٠ في المائة، فإن تقنيات الري الأخرى، مثل الري المضغوط أو الري بالتنقيط (تقنية موفرة للمياه)، يمكن أن تزداد الكفاءة ويمكن أن تنخفض نسبة الفاقد إلى ٢٥ في المائة. يعد تحسين كفاءة استخدام المياه، خاصة إذا كان مصدرها الينابيع، جانباً مهماً من جوانب الموارد المائية واستراتيجية الري في أماكن أخرى. ومن أكثر الطرق فعالية لحفظ المياه واستخدامها بشكل رشيد في المناطق القاحلة هي بناء السدود تحت السطحية. والواقع أن هذا النوع من الهياكل، الذي يقع عادةً بالقرب من الينابيع التي تنبع منها الجداول الدائمة أو المؤقتة، وتستخدم بانتظام لتخزين المياه الجوفية في الرواسب الغرينية. والهدف من ذلك هو وضع حاجز غير منفذ عبر مجرى النهر من سطح الأرض وصولاً إلى صخر الأساس وتجميع المياه من مجاري المياه السطحية المؤقتة، الوديان (الشكل ٩-٧).



الشكل ٩-٦ قناة خرسانية نموذجية لتحويل مياه الينابيع من الجبال نحو السهل (بوتاس، زاخو، شمال العراق).



الشكل ٧-٩ سد نموذجي تحت السطح (مبني من الحجر والتراب) يوضع في الرواسب السهلية.

يسرد [Kresic, \(2009\)](#) عدة مزايا رئيسية لهذه المنشآت مقارنة بالخزانات السطحية: تبخر محدود للغاية أو تبخر محدود جداً أو ضئيل، وعدم وجود خطر فشل السدود، وتأثيرها على البيئة بحجم أقل بكثير. العيب الرئيسي هو أنه لا يمكن لأي من طرق البناء الفعالة من حيث التكلفة ضمان عدم نفاذية السدود بالكامل.

وقد وُجد أن السدود تحت السطحية هي الحل المناسب للمناطق القاحلة ويتم تطبيقها على نطاق واسع في البرازيل والهند والجزائر وإثيوبيا وكينيا والعديد من البلدان الأخرى. في الحالات التي تكون فيها صخور الأساس وشفاف الأنهار غير منفذة بالكامل، تكون الفائدة هي امتلاء الخزان الغريني في منطقة المنبع (تأثير الاحتباس أثناء الفيضانات). في حالات الصخور القابلة للنفاذ الملامسة للطبقة الغرينية، يكون هذا الهيكل متعدد الوظائف: فهو لا يقوم فقط بخزن المياه في منطقة المنبع في فحسب، بل يعيد تغذية طبقة المياه الجوفية الصخرية الأساسية على مدار العام، كما هو الحال في مشروع منظمة الأغذية والزراعة الذي تم تنفيذه في عام ٢٠٠١ في غالي بصيرة بالقرب من مدينة دهاوك في شمال العراق ([Stevanovic, 2001](#)) ؛ الشكل ٨-٩. وأخيراً، هناك استخدام "كلاسيكي" لمياه الينابيع لسقي الحيوانات. توفر مياه الينابيع ذات النوعية الجيدة الأمان لصحة الحيوانات ونموها. لذلك، في البيئة الريفية، ومن الشائع رؤية أعداد كبيرة من الحيوانات في البيئة الريفية حول الينابيع أو البرك والمستنقعات التي تتشكل بالقرب منها.



الشكل ٩-٨ سد غالي بصيرة تحت السطح في شمال العراق. الهدف هو تخزين المياه القادمة من العديد من الينابيع الصغيرة على طول الوادي الغربي. يتم استخدام المياه المخزنة على مدار العام وتسهم في تغذية طبقة المياه الجوفية الكارستية الكامنة. (أعلى) منظر من جهة المنبع، الحاجز الخرساني قيد الإنشاء؛ (أسفل) منظر من جهة المصب، بعد اكتمال البناء.

#### ٩-٢-٤ الينابيع الحرارية في الاستجمام والعلاج بالمياه المعدنية

عادة ما تعتبر الينابيع التي تكون درجة حرارة مياهها أعلى من المتوسط السنوي لدرجة حرارة الهواء ينابيع حرارية، على الرغم من أن هناك تصنيفات تستخدم حد ٣٦ درجة مئوية للمياه الحرارية (انظر الفصل ٢). وغالبًا ما ترتبط كلمة معدنية بكلمة حرارية

للإشارة إلى ارتفاع محتواها من المكونات المعدنية الذائبة (أكثر من ٥٠٠ أو ١٠٠٠ جزء في المليون، حسب التصنيفات) الموجودة في الينابيع الحرارية. لطالما انجذب البشر إلى الينابيع الحرارية، وبمرور الوقت، انجذبت العديد من المنتجعات الصحية، والحمامات والمدن والتراث الثقافي في المناطق المجاورة لها، ولا تزال العديد من البلدان تدر دخلاً كبيراً من استغلال المياه الحرارية الطبيعية. إن تصريف وجودة مياه العديد من الينابيع الحرارية المهمة، نعرضها هنا بإيجاز.

تعد كارلوفي فاري Karlovy Vary (في جمهورية التشيك)، واحدة من أشهر المنتجعات الصحية الأوروبية. ذكر (Vrba, 1996) أنه "في أوائل القرن الثامن عشر، كانت كارلوفي فاري في أوائل القرن الثامن عشر مركزاً اجتماعياً مشهوراً لدى الحكام الأوروبيين، والنبلاء والأرستقراطيين الأوروبيين." وتعتمد قيمتها على ٧٩ ينبوعاً معدنياً ذات إنتاجية متفاوتة، منها ١٣ ينبوعاً معدنياً استخدمت في العلاج بالشرب. يرجع تاريخ أول تحليلات كيميائية للمياه إلى منتصف القرن التاسع عشر؛ ويرجع أول قياس مسجل لتصريف المياه المعدنية البالغ ٣٥ لتر/ثانية إلى نفس الفترة (Vrba, 1996). تنشأ ينابيع كارلوفي فاري في الصخور الجرانيتية الكربونية البرمية التي رشحت خلال التكوّن الهرسييني. تغطي صخور الجرانيت والجرانوديوريت المتشققة بشكل مكثف في بلوتون كارلوفي فاري مساحة ١٠٠٠ كم<sup>٢</sup> من الصخور المتآكلة والمتغيرة حرماًنياً. أقدم نبع معروف كان قريباً من نهر تيبل (والتي تعني "حار" باللغات السلافية) ويتكون من كهوف ضحلة تطورت في طبقات الأرجوانيت. ولمنع التسرب غير المنضبط نحو مجرى النهر، كان يتم إغلاقها بالطين والإسمنت بانتظام. في نهاية المطاف، في الثمانينيات، وبعد إجراء تحريات جيولوجية معقدة وحفر استكشافي على جانبي أحد الصدوع الرئيسية، تم حفر الآبار الأربعة المائلة إلى أعماق مختلفة (٤٤-٨٨ م) وأُتاحت استخدام حوالي ٣٠ لتر/ثانية. وقد أدى التقاط الينابيع بهذه الطريقة إلى زيادة واستقرار إنتاج المياه والغازات الحرارية (Vrba, 1996).

وتختلف درجة حرارة المياه من نبع إلى آخر، من ٣٠ إلى ٧٢ درجة مئوية. إجمالي المواد الصلبة الذائبة (TDS) بانتظام أكثر من ٦٠٠٠ ملغم/لتر، في حين أن الأيونات السائدة هي Na من بين الكاتيونات و  $\text{SO}_4$  و  $\text{Cl}$  و  $\text{HCO}_3$  من بين الأنيونات. يتراوح ثاني أكسيد الكربون الحر في حدود ٥٠٠-١٠٠٠ مجم/لتر. وتوفر درجات الحرارة والمحتويات المختلفة من ثاني أكسيد الكربون تأثيرات مختلفة في العلاج بالمياه المعدنية. الينابيع الباردة (الشكل ٩-٩) لها تأثيرات ملينة قليلاً، في حين أن الينابيع الأكثر دفئاً تثبط وتمنع إفراز العصارة الصفراوية والمعدية.

بادن-بادن Baden-Baden (جنوب غرب ألمانيا) هو منتجع صحي أوروبي شهير آخر مرتبط بالصخور الرسوبية والبركانية للتكوين الهرسييني (الكربوني البرمي). حيث تصب اثنا عشر نبعا حرارياً من طبقة مائية جوفية متصدعة بشكل مكثف في منطقة ضيقة نسبياً على ارتفاع حوالي ٣٠ متراً فوق قاع الوادي، مما يشير إلى إمكانية الانسداد بواسطة صدع رئيسي وتحويل المياه أفقياً إلى أعلى (Wohnlich, 1996). تبلغ درجة الحرارة المنخفضة ٣٢ درجة مئوية، بينما تبلغ درجة حرارة مياه الينابيع الأكثر سخونة ٦٩ درجة مئوية. تبلغ نسبة المواد الصلبة الذائبة حوالي ٣٠٠ جزء في المليون، في حين أن أيونات الصوديوم و أيونات الكلور تهيمن على التركيب الكيميائي. ومن المحتمل أن المياه المعدنية المالحة نشأت في صخور المتبخرات من صخور الراين ثم اختلطت بالمياه الجوفية

من الجرانيت المحيط بمنخفض بادن بادن. يذكر (Wohnlich, 1996) أن نظام طبقة المياه الجوفية مستقر للغاية؛ فدرجة الحرارة والتمعدن ثابتان تقريباً منذ بداية التسجيل المستمر في عام ١٨٩٤.

يبلغ إجمالي تصريف الينابيع حوالي ٩ لتر/ثانية. في نهاية القرن التاسع عشر، تم حفر نفقين من أجل تحويل المياه إلى الحمامات. وفي ستينيات القرن العشرين، وللإستفادة من المزيد من المياه، تم حفر بئرين على عمق ٣٠٠ و ٥٠٠ متر، وزاد من إجمالي تصريف المياه الجوفية بنحو ٣٠ في المائة. التأثير العلاجي الرئيسي لهذه المياه الشهيرة يأتي من نشاطها الإشعاعي، وأيونات Na و Li و F و Bo و Cl، بالإضافة إلى آثار من الكوبالت والزنك والنحاس.

وتتعلق التأثيرات العلاجية بشكل خاص بمشاكل القلب والأوعية الدموية واضطرابات التمثيل الغذائي ومشاكل الجهاز التنفسي، والروماتيزم والتهاب المفاصل. أقدم حمام في بادن بادن هو حمام فريدريشسباد الشهير، الذي تم افتتاحه في عام ١٨٧٧ (الشكل ٩-١٠).

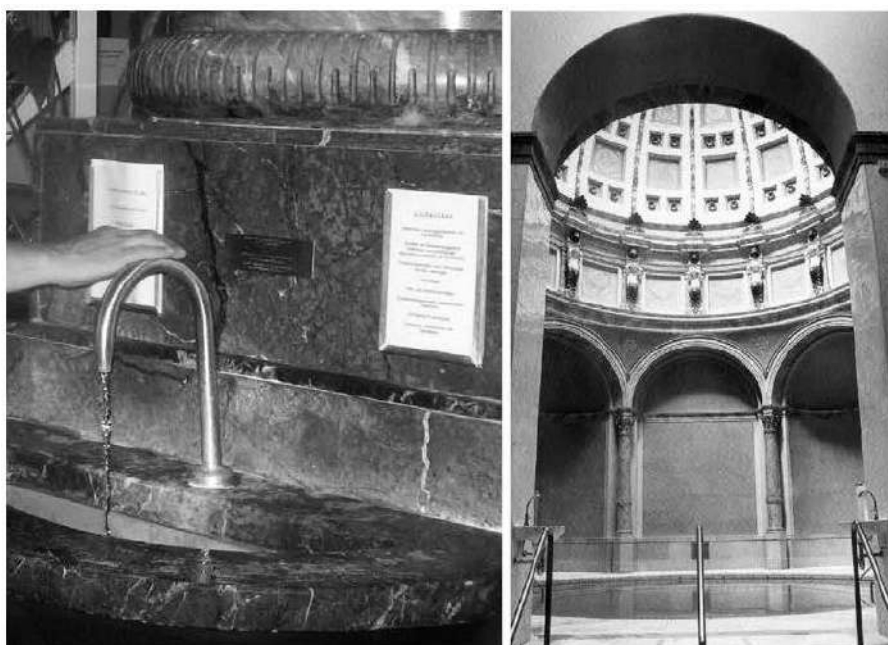


الشكل ٩-٩ نبع سفوبودا (الحرية) في كارلوفي فاري. (الصورة من Zarko Veljkovic).

أقدم منتج صحي في المجر، وهي دولة ذات تقاليد عريقة في تطوير الينابيع الحرارية والمعدنية، هو هيفيز Heviz بالقرب من الشواطئ الجنوبية لبحيرة بالاتون. ويعود تاريخ استخدامه النشط إلى العصر الروماني. وتقول الأسطورة أن العذراء المقدسة تسببت في ظهور النبع بعد صلاة استغاثة من ممرضة مسيحية أرادت شفاء طفل عاجز؛ فبدأ الماء الساخن والطين يتدفقان وشفى الطين المبخر الطفل الضعيف تمامًا. أصبح ذلك الطفل فيما بعد الإمبراطور الروماني الشرقي فلافيوس ثيودوسيوس. يختلف أصل مياه هيفيز اختلافاً كبيراً عن كارلو في فاري وبادن بادن بادن. إنه نبع كارستي كبير تصاعدي كبير من النوع الفوكلوسي. وتشكلت هذه البحيرة الكبيرة التي تبلغ مساحتها حوالي ٤,٤ هكتار فوق اثنين من الينابيع الحرارية الرئيسية (الشكل ٩-١١). يشير الغوص الاستكشافي في العمق السفلي ٣٨ و ٤١ م إلى وجود كهوف صغيرة تصرف مياه تبلغ درجة حرارتها حوالي ٤٠ درجة مئوية. ومع ذلك، تختلط المياه الساخنة من تلك الينابيع مع ينابيع المياه الباردة (١٧ درجة مئوية)، مما يوفر متوسط درجة حرارة مياه البحيرة ٣١ درجة مئوية. يُقدّر إجمالي التصريف بحوالي ٤٠٠ لتر/ثانية مع عدم وجود تباين كبير على مدار العام. تُستخدم المياه بنشاط في العلاج الطبي ولها طابع علاجي بسبب مكوناتها الكربونية والكبريتية والرادون الخفيف. تغطي طبقة طينية سمكية قاع البحيرة. كما يتم استغلالها للأغراض الطبية، وذلك بسبب غناها بالمكونات العضوية وغير العضوية، بالإضافة إلى وجود أملاح الراديوم. في رومانيا، أهم وأشهر أماكن تواجد المياه الحرارية في رومانيا هي بايلي هيركولاني Baile Herculane. وهناك العديد من الينابيع الطبيعية على طول الوادي الضيق لنهر سيرنا. آلية تكوين وتصريف هذه المياه معقدة للغاية وترتبط بوجود الجرانيت والصخور الطينية البرمية والجوراسية والحجر الجيري الطباشيري، في حين أن نقاط التصريف مهيأة بالصدوع والطيات الإقليمية. لذلك، يمكن القول أن المياه من هذه الينابيع تمثل مزيجاً من الصخور الكربونية والبركانية، أي الصخور الكارستية وطبقات المياه الجوفية المتصدعة. ويتأكد هذا من خلال المحتوى العالي من الكالسيوم وكبريتيد الهيدروجين. تحتوي منطقة التصريف الخطية الطويلة على ١٦ نبعا مع تدفق إجمالي للنبع يتراوح بين ٥٥ و ١٦٤ لتر/ثانية. تتراوح درجات حرارة المياه بين ١٧ و ٦١ درجة مئوية. مصدر المياه وآلية التصريف، والتي تم تمت دراستها من قبل العديد من الباحثين (Povara and Marin, 1984) موضحة في الشكل ٩-١٢.

## ٩-٢-٥ الينابيع كمصادر للطاقة الحرارية الأرضية

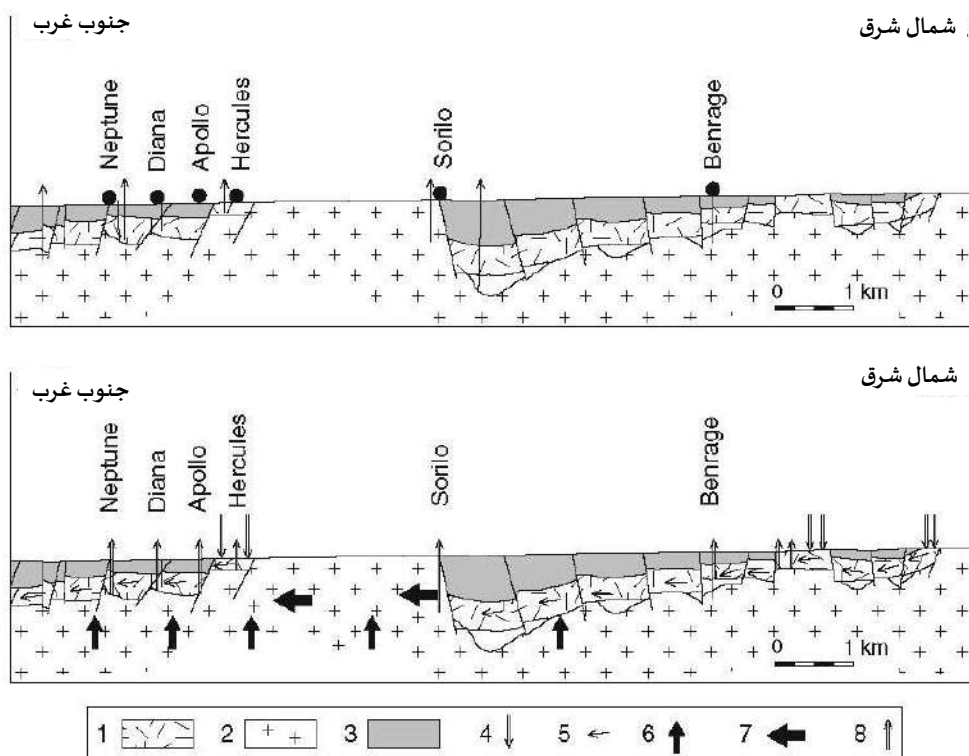
تعتبر الينابيع الحرارية من المؤشرات الأساسية لوجود السوائل الحرارية الأرضية. في بعض الأحيان نبع صغير جداً أو التسرب الصاعد المنتشر على السطح يشير إلى وجود خزان حراري أرضي تحت سطح الأرض. وعادة ما يكون هذا التصريف الطبيعي ممكناً من خلال الصدوع أو الكسور أو الفواصل وبالتالي تعتمد انتاجية النبع مباشرة على حجم وفتحة الانقطاعات الصخرية التي تسمح بدوران السائل (الماء أو البخار أو الغاز). خطوط الانفصام المعدني تمكّن أيضاً المياه الجوفية من التسرب إلى أعماق أكبر وتجميع الحرارة (الشكل ٩-١٣؛ انظر أيضاً الفصل ٢).



الشكل ٩-١٠ (يسار) صنوبر مياه بادن بادن المعدنية الصالحة للشرب؛ (يمين) حمام فريدرشسباد.



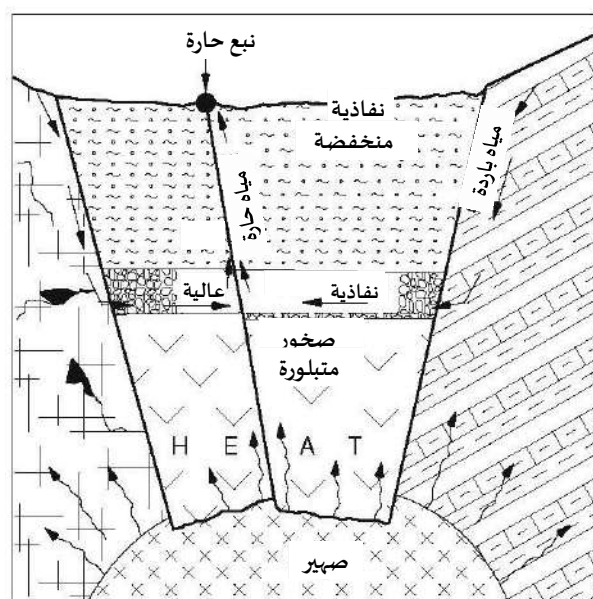
الشكل ٩-١١ بحيرة هيفيز الحرارية.



الشكل ٩-١٢ بايل هر كولان Baile Herculane. مقطع عرضي جيولوجي على طول الينابيع الرئيسية في الوادي (أعلى) ومخطط يوضح منشأ المياه الحرارية: (١) طبقة المياه الجوفية الكارستية من الحجر الجيري، (٢) طبقة المياه الجوفية الجرانيتية المتصدعة، (٣) صخور المرل والفلش (صخور غير منفذة الصخور)، (٤) التدفق الهابط (التغذية)، (٥) تدفق المياه الجوفية داخل طبقة المياه الجوفية الكارستية، (٦) التدفق الصاعد، (٧) الدوران الأفقي داخل طبقة المياه الجوفية المتصدعة، (٨) الصرف من خلال الصدوع. (من Povara and Marin, 1984).

تعود هذه المياه بعد ذلك إلى السطح مدفوعة بالضغط والحرارة من الخزان الرئيسي، وعادةً ما تكون مدفوعة من خلال قناة أخرى. وكثيراً ما يؤدي وجود المياه الجوفية الباردة في الأفاق العليا إلى خليط من السوائل الحرارية الأرضية الأصلية والمياه الجوفية العذبة. لذلك، عند التقاط الينابيع الحرارية، غالباً ما يتم تحويل التركيز الرئيسي من النبع نفسه نحو موقع الخزان الرئيسي (خزان المياه الجوفية) وموقع الشق (الشقوق) كمسار نقل. وفي الوقت الحاضر يتم تحديد العديد من حقول الطاقة الحرارية الأرضية النشطة بناءً على الينابيع التي تم تطويرها بعد ذلك عن طريق الحفر العميق، بعد إجراء المسوحات الجيولوجية والجيوفيزيائية المفصلة في المنطقة المجاورة. يعتمد العمق إلى مكن الطاقة الحرارية الأرضية الرئيسي على الظروف المحلية؛ حيث يتم تطوير بعض حقول الاستغلال على عمق بضعة مئات من الأمتار فقط، وفي أغلب الأحيان يتم حفر بئر للطاقة الحرارية الأرضية على عمق

أكثر من ١٠٠٠ متر. التدفق الحراري الذي يبلغ حوالي ٦ ميجاوات/م<sup>٢</sup> والتدرج الحراري الأرضي يبلغ ٣٠ درجة مئوية/كم يعتبران تقليدياً أمراً طبيعياً. وفي المناطق الشاذة، مثل "حلقة النار" في المحيط الهادئ



الشكل ٩-١٣ تسخين مياه الينابيع. (بعد White, 1967).

، قد تكون التدرجات الحرارية الأرضية المحلية والتدفقات الحرارية الأرضية أعلى بكثير. ومن أبرز البلدان التي لديها طاقة حرارية أرضية هي الولايات المتحدة وأيسلندا ونيوزيلندا واليابان والفلبين وإيطاليا وتركيا واليونان وإندونيسيا. ذكر كلا من Grant, (1982) وDonaldson, and Bixley أن أكبر حقول استغلال الطاقة الحرارية الأرضية للتدفئة وإنتاج الطاقة الكهربائية هي ريكيافيك (أيسلندا)،

ولارديريلو (توسكانا، إيطاليا)، ووايراكي (نيوزيلندا)، وجيسيرز (كاليفورنيا، الولايات المتحدة). في معظمها استنفد الضغط الأولي، ويتطلب الطلب المتزايد الضخ من الآبار العميقة كحل وحيد للحفاظ على معدل الاستغلال الأولي. وحالياً، يتم إنتاج الكهرباء من أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية في ٢٤ بلداً وتقترب من حوالي ٦٠ تيراوات/ساعة، بالإضافة إلى الاستخدام المباشر للطاقة الحرارية الأرضية، والذي يقترب من ٨٠ تيراوات/ساعة في جميع أنحاء العالم. بعض التقديرات أنه من الممكن زيادة قدرة الطاقة الحرارية

الأرضية الحرارية الأرضية المركبة في العالم من القدرة الحالية البالغة ١٠ جيجاوات إلى ٧٠ جيجاوات بالتكنولوجيا الحالية وإلى

١٤٠ جيجاوات بالتكنولوجيا المحسنة (Fridleifsson and Albetsson, 2008)

هناك مجموعة خاصة من الينابيع الساخنة هي السخانات (Geysers) التي تتميز بتدفق متقطع أو نابض (الفصل ٢). ومصطلح السخان مشتق في الواقع من النبع الحار (Geyser) الشهير في آيسلندا (الشكل ٩-١٤). تشتهر آيسلندا بنظامها الحراري الأرضي الغني جداً، حيث تتواجد المياه عند حوالي ٢٠٠ درجة مئوية على عمق أقل من ١٠٠٠ م. توجد العديد من السخانات في الولايات المتحدة ونيوزيلندا، وكذلك في آيسلندا، وجميعها مرتبطة بنشاط ما بعد البراكين.

في العقود الماضية ازداد الاهتمام بالبدايل لمصادر الطاقة غير المتجددة بشكل كبير خلال. وإلى جانب الطاقة الحرارية الأرضية واستغلال الينابيع الحارة والمياه الجوفية، هناك اهتمام كبير باستعمال مياه الينابيع الباردة أو مياه الينابيع الدافئة نسبياً. إن استخدام هذه الينابيع المنخفضة الحرارة (والمياه الجوفية بشكل عام) لتدفئة وتبريد المساحات بواسطة تقنية المضخات الحرارية قد اكتسبت قبولاً متزايداً، لا سيما داخل الاتحاد الأوروبي. وعادةً ما تستخدم المضخات الحرارية للمياه الجوفية ضاغطةً يستخرج الحرارة المتجددة من المياه الجوفية. حيث التأثير الحراري الذي توفره تلك المضخات عادةً ٣-٤ أضعاف مدخلات الطاقة الكهربائية. وهذا يعني أن المضخات الحرارية توفر الحرارة ٣-٤ مرات أرخص، مع انبعاث أقل بكثير من ثاني أكسيد الكربون.



الشكل ٩-١٤ السخان العظيم Great gEyser، معلم سياحي شهير في آيسلندا. (الصورة من M. Martinovic).

## ٩-٢-٦ صناعة مياه الينابيع المعبأة

تعبئة وبيع المياه المعبأة تقليد عريق جدًا، خاصة في أوروبا وأمريكا الشمالية. في القرن السادس عشر، تم توزيع مياه المنتجات الصحية في بلجيكا في بعض المدن الأوروبية الكبرى، في حين أن مياه أكوا دي نافيجاتوري الإيطالية استخدمت على نطاق واسع في القوارب التي أبحرت إلى العالم الجديد. وفي عام ١٧٦٧ م، اكتشف جوزيف بريستلي تقنية إضافة ثاني أكسيد الكربون إلى الماء لجعله يتلألأ. فتح ذلك آفاقًا جديدة تمامًا ومكّن من تحقيق المزيد من التطور التجاري للمياه المنعشة والمشروبات الغازية المشتقة من المياه الفوارة.

وخلال القرن التاسع عشر، تم إنشاء العديد من العلامات التجارية الفرنسية والبريطانية والإيطالية والألمانية. وبدأ تصدير المياه المعبأة في مستعمراتهم العديدة. أما أبوليناريس الألمانية، فهي مياه غازية مستخرجة من الصخور البركانية. وقدرت الإيرادات السنوية لصناعة المياه المعبأة في جميع أنحاء العالم اليوم بحوالي ١٣ مليار دولار أمريكي. ومن بين مصادر المياه المستخدمة في صناعة تعبئة المياه المعبأة، تعتبر مياه الينابيع الطبيعية هي المفضلة والأكثر استهلاكاً على نطاق واسع. تصنف أنواع المياه المعبأة بشكل عام على أنها (١) مياه قليلة المعادن (مياه المائدة) و(٢) مياه معدنية و(٣) مياه فوارة. في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية، يتم تحديد المحتوى المعدني وفقاً لحدود مختلفة. في الاتحاد الأوروبي، ٥٠٠ ملجم/لتر أو أقل من المواد الصلبة الذائبة هو معيار المياه منخفضة المعادن، بينما تحدد دول أوروبية أخرى هذا الحد عند ١٠٠٠ ملجم/لتر. في الولايات المتحدة الأمريكية، تحتوي المياه المعدنية على ما لا يقل عن ٢٥٠ ملجم/لتر من المواد الصلبة الذائبة، بينما المياه التي تحتوي على أكثر من ١٥٠٠ ملجم/لتر يجب أن تصرح عن "المحتوى المعدني المرتفع". تحتوي المياه الغازية على نسبة طبيعية أو مضافة ثاني أكسيد الكربون بنسبة مساوية للكمية الموجودة في الماء عند خروجه من المصدر. ومع ذلك، للحصول على المزيد من الانتعاش من الشائعات أيضاً إضافة كمية من ثاني أكسيد الكربون أعلى بكثير من المستوى الطبيعي. مثل هذه العمليات لا تعتبر معالجات اصطناعية مثل التقطير أو التناضح العكسي، على سبيل المثال، والتي يمكن أيضاً تطبيقها قبل التعبئة. لذلك من المهم جداً التمييز بوضوح بين "المياه الطبيعية" والمياه التي تخضع لأي عملية تكنولوجية. لا تفرق صناعة التعبئة في كثير من الأحيان بين أنواع المنشآت المائية وقد تروج أن كل من مياه الينابيع والمياه المستخرجة من الآبار على أنها "مياه ينابيع". ولعل أشهرها من بين آلاف الينابيع المهمة التي يتم تسويقها تجارياً في جميع أنحاء العالم هي بيريه وإيفيان، وكلاهما من أصل فرنسي. وقد تم استخدام نبع إيفيان في هوت سافوا في هوت سافوا منذ ١٨٢٦. وتنبع المياه من الأمطار وذوبان الثلوج التي تغذي طبقة المياه الجوفية الكارستية في جبال الألب. يتدفق النبع في الغالب كتدفق جوفي إلى الرواسب الجليدية التي تعلوها، وهي في الأساس رمال، حيث تتم عملية الرشح والتنقية الطبيعية الإضافية. وتحتوي المياه على نسبة تمعدن منخفضة وهي من الكالسيوم-بيكربونات المغنيسيوم. في حين أن إيفيان هو نبع كارستي نموذجي مع تصريف غير نمطي، فإن بيريه يصدر من الصخور البركانية. الذي بدا وكأنه بركة باردة وغازية. تم استخدام هذه الينابيع بنشاط لأغراض تجارية منذ عام ١٨٦٣،

تتميز مياه يبريه بانخفاض محتواها المعدني؛ حيث تقل نسبة المواد الصلبة الذائبة عن ٥٠٠ ملج/لتر. وهي مكربنة بشكل طبيعي (ثاني أكسيد الكربون)، مياه بيكربونات الكالسيوم والكربونات النموذجية، مع درجة حموضة ٥,٥. واليوم، وحاليا يتم التقاط الينابيع عن طريق الآبار بطريقة محددة: تتمثل بالتقاط المياه والغاز الكربوني الطبيعي بشكل مستقل في طبقات معزولة مختلفة. ويتم تحقيق إعادة التوازن المناسب للمعادن والكربنة في عملية التعبئة.

### ٩-٣ التقاط الينابيع

عندما نفكر في النبع الطبيعي، ما الذي قد يتبادر إلى الذهن أولاً؟ شلالاته الجميلة أم خريرمياه؟ مياهه الباردة والعذبة، مياه الشرب المثالية؟ على الرغم من جاذبية هذه الصور، إلا أنه من المعروف جيداً أنه ليست كل الينابيع جميلة ولا مياهها صالحة للشرب دائماً. ومع ذلك، فهي تمثل أحد المصادر الأساسية للحياة على كوكبنا: إن النبع هو في الواقع المكان الذي تصل فيه المياه الجوفية الثمينة الغير مرئية الدائمة التدفق الى السطح.

والآن، تخيلوا مرة أخرى نبعا واسألوا هذه المرة: كم عدد الأشخاص الذين يأتون إليه لالتقاط المياه من أجل الاستخدام المشترك؟ على أساس منتظم، عدد قليل جداً من السكان المحليين بالإضافة إلى المهندسين، يمكنهم القيام بهذه المهمة. وجميع أولئك الذين تتاح لهم الفرصة لأداء هذه المهمة يجب أن يشعروا بالفخر، بل وأكثر من ذلك، يجب أن يشعروا بالمسؤولية. لماذا؟ أولاً، لأن فرصة تغيير الطبيعة لا تُمنح للجميع؛ وثانياً، لأن القيام بذلك بطريقة صديقة للبيئة ليست بالمهمة السهلة. وقد أصبحت المهمة الأخيرة أكثر إلحاحاً خلال العقود الأخيرة. قد لا يفهم الأشخاص عديمو الخبرة العديد من القضايا البيئية الهامة المتعلقة باحتجاز الينابيع، مثل السماح لبعض المياه بالتدفق في اتجاه مجرى النهر لمستخدمين آخرين، بما في ذلك الحيوانات والكائنات الحية في المجرى المائي، أو منع ترك القمامة في موقع النبع. قد تكون القائمة كثيرة جداً، مما يؤكد أن التقاط النبع "بالطريقة الصحيحة" يتطلب العديد من الاعتبارات والخطوات.

#### ٩-٣-١ الخصائص الطبيعية للينابيع وتأثيرها على تصميم الالتقاط

في الفصل ٢ من هذا الكتاب، تمت مناقشة تصنيف الينابيع بالتفصيل، وتعلمنا أنه للتمييز بين الينابيع، هناك العديد من العوامل المهمة مثل الخصائص الهيدروجيولوجية والهيدروليكية، ونمط التصريف (الحجم والتذبذب والموسمية)، والخصائص الفيزيائية والكيميائية لمياهها. والأفضل بالطبع هو التقاط مياه الينابيع الدائمة. هذا النهج وحده يوفر حلاً موثوقاً ويؤدي إلى إمدادات مياه مستقرة. ومع ذلك، إذا لم تكن هناك خيارات أخرى، فحتى التحكم في التدفق الموسمي أمر معقول. يمكن تحقيق هذا التحكم من

خلال الاستفادة من الأجزاء العميقة من طبقة المياه الجوفية بواسطة الآبار أو استخدام السدود السطحية لتخزين المياه لاستخدامها لاحقاً.

يعتمد حجم الخزان الهندسي في النبع إلى حد كبير على كمية المياه التي تحتاج إلى التحكم بها. بالنسبة للينابيع الصغيرة، في بعض الأحيان يكون الهيكل البسيط جداً وكافياً، مثل حجرة النبع. إذا تم تطويره بشكل صحيح، يمكن حتى لتدفق مياه الينابيع الصغيرة جداً خلال موسم الجفاف أن يوفر المياه التي تشتد الحاجة إليها. وفي حالات أخرى، يلزم إنشاء هياكل كبيرة ومعقدة، مثل الأحواض الخرسانية المسلحة أو حتى السدود (Kresic, 2009). ولكن، مهما كان الحجم، فإن المهمة الرئيسية للتصميم هي محاولة التحكم في أكبر قدر ممكن من المياه الإضافية قدر الإمكان. عندها فقط نكون في وضع يسمح لنا بإدارة المياه، واستخدام الكمية المطلوبة، وتمكين الفائض من المياه الفائضة من التدفق بحرية في اتجاه مجرى النهر.

لجعل المناقشة حول "النبع الصغير" أو "النبع منخفض التصريف" أكثر دقة، عند استخدام هذه المصطلحات النسبية هذه، نقترح اعتبار العائد الأقل من ٠,١ لتر/ثانية كقيمة أساسية. بالنسبة لهذا المردود، فإن غرفة تجميع أقل من ١٠ م<sup>٣</sup> (على سبيل المثال، ٢,٢٥ × ٢ × ٢ م) ستكون كبيرة بما يكفي لتخزين التدفق الكامل ليوم واحد (٢٤ ساعة). بالنسبة لعائد أقل ١٠ مرات أقل (٠,٠١ لتر/ثانية)، فإن بناء غرفة كبيرة غير ضروري، حيث أن حجرة نبع صغيرة بمساحة ١ م<sup>٣</sup> فقط يمكن أن يستوعب وحده كمية المياه التي يتم تصريفها يومياً. للسماح بالتدفق الحر من خلاله، فمن الأفضل أن تكون حجرة النبع مملوءة بالكامل بالحصى ولا تحتوي على مساحة تخزين. وعلى النقيض من ذلك، من أجل إنتاجية تبلغ ١ لتر/ثانية أو أعلى، يوصى بتوسيع حجرة التجميع إلى ١٠ م<sup>٣</sup> أو إنشاء خزان أو بناء خزان أكبر بجانبها بحيث يمكن التعامل مع توصيل المياه بكفاءة من حيث التوقيت.

## ٩-٣-٢ مبادئ التقاط الينابيع

بصرف النظر عن نوع النبع ونظام التدفق، يجب تقييم الجوانب التالية بعناية قبل اتخاذ قرار الاستفادة من مياه الينابيع:

١. المنطقة المجاورة للمستهلكين أو نقطة الاستخدام.
٢. طبوغرافية موقع النبع، ومسار خط الأنابيب المحتمل، ومنطقة الاستخدام. من المهم إجراء تقييم وفحص لموقع النبع قبل إنشاء جميع المرافق الضرورية، مثل الخزانات ووحدات معالجة المياه والمنشآت الكهربائية والمرافق المماثلة.
٣. جيولوجيا موقع النبع ومنطقة مستجمع المياه بأكملها (الأحواض الطبوغرافية والهيدروجيولوجية).
٤. متطلبات المياه لمختلف المجموعات الاستهلاكية (الشرب، سقي الحيوانات، الري، الصناعات الصغيرة والكبيرة، والاستجمام).
٥. تكلفة المشروع. العنصر المالي ضروري لمعظم المشاريع: مقارنة البدائل، والحلول المثلى وتقييم الاثر البيئي كلها شروط أساسية لتنفيذ المشروع.

من وجهة نظر عملية، لا تتطلب جميع المشاريع نفس المستوى التقني والتفاصيل الفنية. يوصي النهج الهندسي الحديث بالإجراءات التالية:

١. التأكد من إمكانية الوصول إلى موقع النبع.
٢. تقييم التضاريس والظروف العامة للموقع وإمكانية تعديله وتكييفه.
٣. حساب المسافة والتدرج الهيدروليكي بين النبع ونقاط الاستخدام.
٤. النظر في الفوائد الإضافية مثل توليد الطاقة أو توفير الطاقة.
٥. إجراء استطلاع هيدروجيولوجي.
٦. جمع المعلومات حول نظام هطول الأمطار وتقييم ميزانية المياه بشكل تقريبي.
٧. تقدير الحد الأدنى من تصريف الينابيع أو قياسه (موصى به) والحصول على بيانات حول نظام تدفق الينابيع، خاصة في موسم انخفاض المياه.
٨. التحقق من الخصائص الفيزيائية ونوعية المياه في الموقع، وأخذ عينات وإجراء التحليل الكيميائي في المختبر. يوصى بشدة بمراقبة التغيرات الموسمية في نوعية المياه، وبالنسبة للينابيع الكارستية مراقبة تأثير العواصف.
٩. حماية المياه في مستجمعات المياه - مراقبة الملوثات المحتملة، وتقييم التدابير الوقائية التي يجب اتخاذها ضد التلوث، وتحديد مناطق الحماية الصحية بشكل تقريبي وتقريباً أين يجب أن تكون منطقة التسييج حول النبع.
١٠. تقدير الطلب على المياه - نوع المستهلكين وعددهم والنمو المستقبلي.
١١. النظر في المتطلبات البيئية - التحقق من السياسات والممارسات المائية العامة والمحلية، وتقييم التعارضات المحتملة من استخدام المياه، وتقليل التأثير على مستهلكي المصب والحياة البرية والكائنات الحية في المياه السطحية.
١٢. التفكير في البدائل - النظر في مصادر أخرى، والاستفادة من المياه الجوفية بطريقة مختلفة، وتنظيم نظام الينابيع، التغذية الاصطناعية.

١٣. تحسين تصميم الالتقاط.

١٤. اختيار نوع التصميم وإنشاءه، مع النظر الكامل للظروف البيئية والجمالية للموقع.

١٥. حساب تكاليف الإنشاء والتشغيل والصيانة.

عندما تكون هناك حاجة إلى اتخاذ قرار بشأن نبع صغيرة وبنيّة بسيطة نسبياً، فإن عددًا أقل من هذه الإجراءات يمكن القيام بها. أخيراً، يكون النجاح أكبر عندما يتم تقديم أبسط هيكل سحب ويتم الحصول على نفس النتائج. "لماذا نستخدم فيلاً بينما يفي الحمار بالغرض؟" ينطوي التحسين على حل وسط بين الرغبات والفرص. بشكل عام، يمكن تقييم الخيار المختار بناءً على الإجابات على الأسئلة التالية:

١. كيف يتم الوفاء بمتطلبات المياه (هل يتم تلبيتها بالكامل أم لا)؟

٢. كيف يتم ضمان الحد الأدنى من السعة واستقرار التدفق؟

٣. كيف يتم الحفاظ على جودة المياه وحمايتها ومراقبتها؟

٤. كيف يتم تخفيف الأثر البيئي السلبي؟

٥. كيف يتم تخفيض تكلفة البناء؟

### ٩-٣-٣ هياكل التقاط الينابيع

هناك مجموعتان رئيسيتان من الهياكل لتطوير الينابيع:

١. هياكل التقاط بسيطة بدون تدخلات اصطناعية كبيرة. والهدف منها هو تجميع المياه وحمايتها وتأمين إيصال تدفق مستقر للمستخدمين بأبسط طريقة ممكنة.

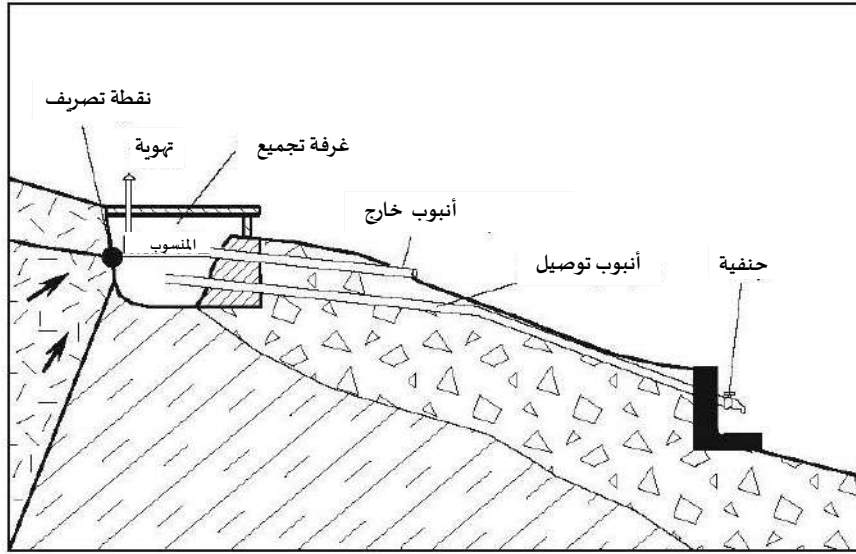
٢. هياكل التقاط معقدة لتنظيم تصريف المياه. وتشمل هذه الهياكل مجموعة متنوعة من الوسائل الحفاظ على التدفق أو زيادته (المضخات المثبتة، والآبار المحفورة، والأروقة، والأعمدة، والخنادق، وأنابيب التجميع المثقوبة والسدود).

العناصر الأساسية، ولكنها ليست إلزامية، لالتقاط الينابيع هي:

- غرفة الينبوع (غرفة التجميع).
- التخزين (الخزان).
- أنابيب (للتوزيع والاستخدام والفيضان والتنظيف).
- مضخة.
- معالجة المياه.
- أخرى (مثل الردم، وصندوق الرواسب، وجدران القطع، وجدران الاحتفاظ، وخندق الصرف، والغطاء والسدود، والتهوية، الصمامات، السياج، معدات المراقبة، المرافق الكهربائية، غرفة الصيانة).

غرفة التجميع هي الجزء الرئيس من تصميم الالتقاط البسيط. في حالة الينابيع الهابطة (ينابيع الجاذبية)، يتألف التصميم البسيط من مجرد حجرة مرتبطة بشكل جانبي بالتكوين الصخري الذي ينتج الماء (الشكل ٩-١٥). ويكون الجدار المقترن بطبقة المياه الجوفية مثقوبًا أو مفتوحًا بالكامل (في حالة وجود طبقة المياه الجوفية الصخرية المتماسكة) للسماح بالتدفق. ومن الشائع جدًا أن يكون هيكل التقاط نبع الجاذبية عند سفح المنحدرات.

عندما تتدفق المياه تحت الضغط (ينابيع صاعدة)، يجب أن تكون الحجرة فوق التدفق مباشرةً ومفتوحًا في الأسفل. في حالة الينابيع المعدنية الصاعدة بالغاز، من الشائع أن يتم حفر حفرة إضافية أو حفر أسفل حجرة النبع الذي يصل إلى الصدع أو الشق الرئيسي الذي ينقل المياه إلى الأعلى. وغالبًا ما يستخدم أنبوب صغير القطر لجلب المياه إلى السطح عن طريق الحفاظ على الغازات عند أقصى مستوى ممكن (Filipovic and Dimitrijevic, 1991).

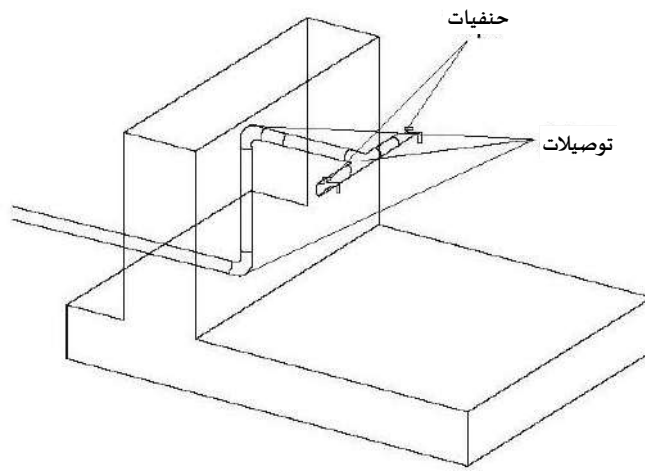


الشكل ٩-١٥ حجرة النبع البسيط (حجرة التجميع) ونقطة الاستخدام القريبة.

يجب تصميم حجرة النبع بفيضان يسمح بتدفق المياه الفائضة بحرية وعدم إغراق المدخل. بعض المساحة الإضافية بين الحد الأقصى لمستوى الماء في الحجرة والسقف تكون دائماً مطلوبة. يمكن ملء حجرة التجميع بالحصى أو الحجر. في هذه الحالة، يجب ترك مساحة فارغة ("جيب")، عادة في الوسط، يجب تركها مدخل أنبوب التوصيل. تعمل الحجرة كمخزن ويجب أن تستوعب بشكل مثالي التباين اليومي في استهلاك المياه. إذا زادت عكورة المياه الجوفية الملتقطة، يمكن إنشاء خزان إضافي من المياه الصافية إلى جانب غرفة التجميع. يدخل الماء إلى الحجرة الأولى، التي تسمى حجرة الرواسب، حيث تترسب الجسيمات الدقيقة (الجسيمات) ثم تفيض في خزان المياه الصافية. وتعتبر الأنابيب جزءاً لا يتجزأ من أي عملية تجميع للينابيع (الأشكال من ٩-١٥ إلى ٩-١٧). وبصرف النظر عن توصيل المياه إلى نقاط الاستخدام أو شبكة التوزيع، فهي ضرورية أيضاً لإزالة أي مياه زائدة غير مرغوب فيها داخل المآخذ (أنبوب الفائض). إذا كان أنبوب التوصيل مسدوداً لأي سبب من الأسباب، فإن الماء سوف يرتفع في الحجرة ولكن فقط إلى ارتفاع أنبوب الفائض. بالإضافة إلى ذلك، تضمن الأنابيب تصريف جميع المياه المخزنة عند تنظيف الحجرة، وهو أمر مطلوب بشكل دوري (أنبوب المخرج السفلي أو أنبوب التصريف). جميع الأنابيب يجب أن تحتوي على غلاف شبكي على كلا الطرفين لمنع الانسداد أو دخول القوارض والحشرات الصغيرة.

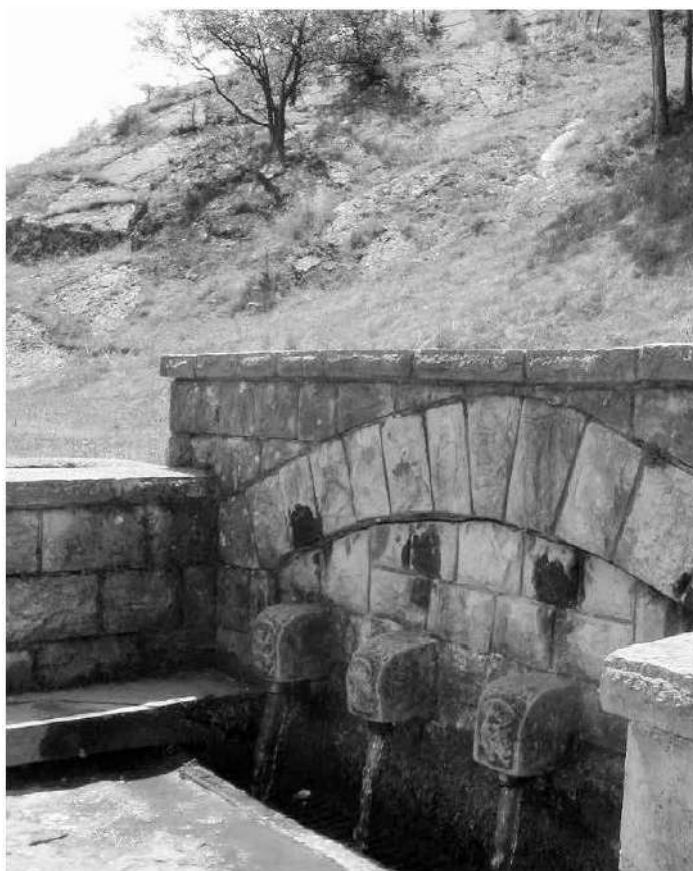
يجب أن يوضع مدخل أنبوب التوصيل على عمق ٠,٣ متر على الأقل تحت مستوى أدنى موضع حيث تندفع المياه من الصخور. من الناحية المثالية، يجب وضع الأنبوب على درجة انحدار منتظمة من المدخل إلى المخرج. علاوة على ذلك، يجب ألا يكون هناك مساحة مرتفعة أو دائرة يمكن أن يكون فيها انحصار للهواء أو الرواسب.

يتم تركيب المضخات داخل الهيكل فقط إذا كان ضخ المياه ضرورياً. كون العلاقة بين ارتفاع المأخذ ونقطة الاستخدام تملي مثل هذه الشروط. ويمكن أن تكون المضخات أيضاً جزءاً من هيكل التنظيم، مما يتيح الوصول إلى مياه أكثر مما يوفره التصريف الطبيعي. ويمكن إنشاء غرفة مضخات منفصلة بجوار هيكل التصريف الرئيسي (الشكل ٩-١٨). ومع ذلك، وبسبب تكاليف التشغيل والمخاوف الأخرى، ينبغي تجنب رفع المياه كلما أمكن ذلك.



الشكل ٩-١٦ الصنابير والوصلات وأنابيب التوصيل في نقطة الاستخدام.

يعتمد تصميم مرافق معالجة المياه على نوعية المياه الخام. يمكن أن تكون محطة معالجة المياه كبيرة جداً وتقنيات المعالجة المطبقة معقدة للغاية إذا كانت جودة المياه غير مرضية أو متغيرة على مدار العام. إذا كانت نسبة التعكر مرتفعة قليلاً فقط، فيجب أن يكون الردم وحجرة الرواسب كافية لتنقية المياه. ومع ذلك، في حالة التعكر الشديد، يتم إنشاء أحواض ذات مرشحات سريعة أو بطيئة إما مباشرة داخل الهيكل أو في محطة معالجة منفصلة. وقد تملي جودة المياه المتدهورة الحاجة إلى التهوية أو حتى الأوزون؛ لذلك، ولذلك إذا زاد عدد العمليات فإن هناك حاجة إلى مساحة أكبر وينبغي إنشاء محطة المعالجة بعيداً عن الهيكل الرئيسي. وغالباً ما تقع مثل هذه المحطات بالقرب من المستخدمين النهائيين وليس بالقرب من موقع التقاط النبع نفسه.



الشكل ٩-١٧ التقاط نبع نموذجي مع عدة حنفيات.

تحتوي العديد من الينابيع على مياه لا تحتاج إلى معالجة أو تقتصر المعالجة على التطهير الأولي (القضاء على البكتيريا)، بحيث تكون المعالجة بالكلور أو المعالجة بالأشعة فوق البنفسجية كافية. تُستخدم أجهزة يتم تركيب أجهزة تطهير ذاتية صغيرة بشكل منتظم داخل العديد من الهياكل المستخدمة الامدادات المركزية للمياه (الشكل ٩-١٩).

الردم هو المادة الحصوية أو الرملية ("حزمة الحصى") التي تملأ الفراغ بين طبقة المياه الجوفية وغرفة النبع (أو توضع داخل الغرفة). يعتمد حجم حبيبات مادة الردم على نوعية المياه والسرعة. عندما تكون هناك حاجة إلى ترشيح أطول، يمكن أن تتكون مادة الردم من أحجام حبيبات تتراوح بين كسرات الصخور إلى الرمال الناعمة، بحيث يتدفق الماء أولاً من خلال مواد أكثر مسامية وخشونة ثم يصل إلى الحبيبات الأبق حجماً. تكون هذه الطبقات إما جانبية كما في حالة الينابيع الهابطة أو متراكبة عمودياً إذا كان النبع من النوع الصاعد. تهدف الجدران المقطوعة أو الخنادق المجمعة إلى جلب المياه إلى أقصى حد وتوجيهها إلى حجرة النبع. وهي مهمة جداً للنوع المنتشر من النوايض ويمكن أن يكون لها أشكال مختلفة، مثل ٧ أو ٧. لمنع التسرب من القاع وفقدان المياه،

يجب أن تقتزن الجدران بعناية مع الصخور الموجودة تحتها وإغلاقها بإسمنت غير منفذ للمياه. مثال على الجدران المقطوعة الطويلة جدًا موضح في الشكل ٩-٢٠.

جدران الاحتجاز شائعة جدًا حول ينابيع الجاذبية. عندما يكون الارتفاع خشنًا، فإنه يحمي الهيكل من الحطام أو الانهيارات الأرضية، ولكنها يمكن أن تدعم أيضًا تجميع المياه وتوجيهها. واعتمادًا على ضغط المواد الأصلية (الصخور)، يمكن أن تكون جدار الاحتجاز مصنوعًا من الخرسانة المسلحة ولكن يمكن أيضًا أن تكون بسيطة جدًا ورخيصة في البناء باستخدام الحجر (الشكل ٩-٢١).

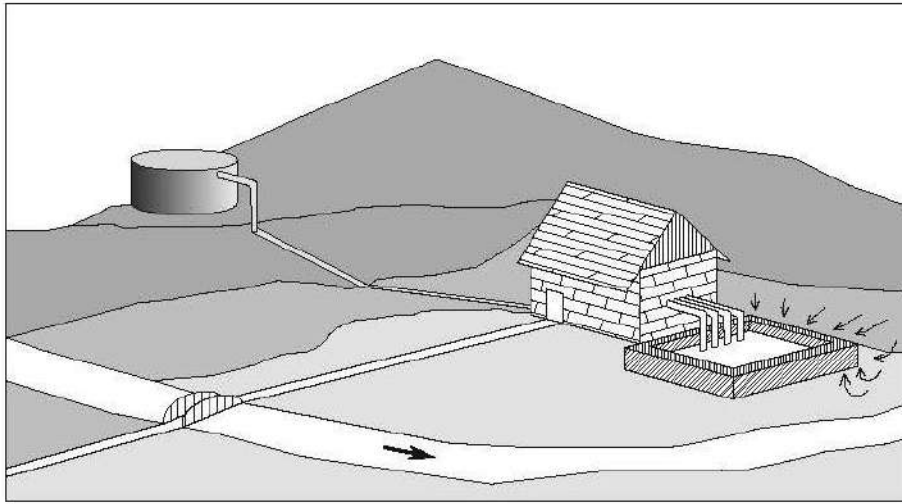
يهدف خندق الصرف (الخندق) في المقام الأول إلى تجميع وتحويل جميع مياه الأمطار أو مياه الجريان السطحي ومنع تسربها إلى حجرة النبع. وينبغي أن يكون حجم الخندق دائمًا لتحويل الحد الأقصى للتدفق. يمكن أيضًا إنشاء خنادق لتجميع المياه وتحويلها إلى نقطة تجميع مشتركة.

يجب أن يضمن الغطاء ومانع التسرب إحكام إغلاق الحوض. بحيث يتم الحجز بعد التنظيف والحفر، وبناء حجرة النبع، وأخيرًا الردم. يمكن أن تكون مواد الحجز صناعية، مثل أنواع البلاستيك المختلفة، أو طبيعية، مثل طبقة طينية مضغوطة، غالبًا ما تكون مغطاة فوقها بالعشب (الشكل ٩-٢٢). وبعد الغطاء الخرساني أو المعدني شائعًا لحجز مداخل الهياكل المشيدة للاستفادة من الينابيع الصاعدة أو الخزانات المحفورة تحت السطح. يجب أن تحيط كل من الأغشية والحواجز بعملية التقاط الينابيع بشكل كامل لمنع دخول أي تلوث سطحي وضوء الشمس إلى غرفة النبع.

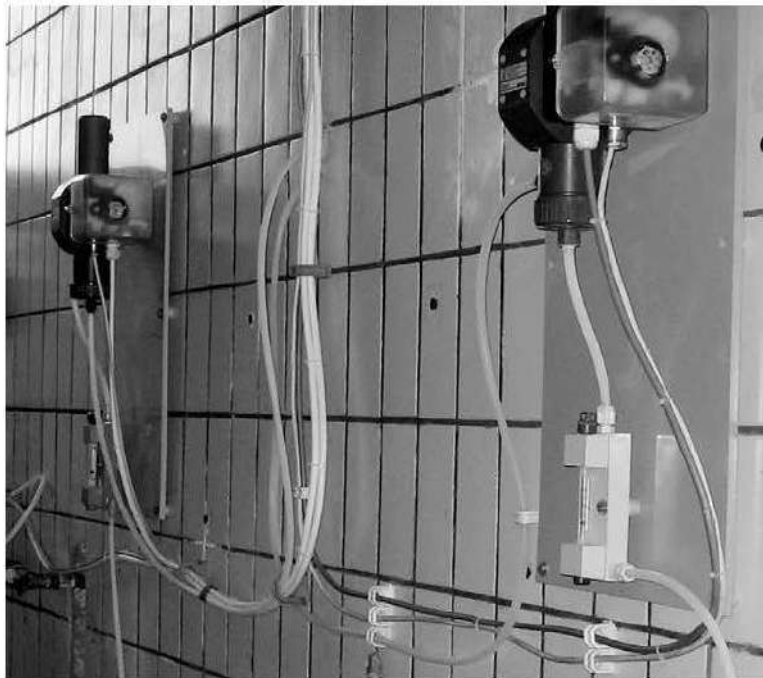
تتيح فتحات التهوية الحد الأدنى من التهوية للجزء الداخلي من حجرة النبع. يمكن إدارة التهوية عن طريق وضع نوافذ على جدران الخزان، ولكن عندئذٍ يجب وضع شبكة شبكية أو سلكية لمنع وصول الزوار أو الطيور غير المرغوب فيها. وبالنسبة للخزانات الأكبر حجمًا، فإن وجود المزيد من الفتحات يضمن تهوية مكثفة (الشكل ٩-٢٣). عادة ما يحيط سياج بالمأخذ الرئيسي والمرفق الأخرى المجاورة. يجب أن يتوافق مع منطقة الحماية الصحية. في الواقع، وكإجراء احترازي، يجب أن يمنع السياج وصول جميع الأشخاص والحيوانات. في حالة الإغلاق الجيد فوق وحول حجرة النبع أو التدفق الصاعد، يمكن تطبيق التدابير والتسييج (الشكل ٩-٢٤).

تعتبر الصمامات جزءًا من كل هيكل حجرة النبع تقريبًا (الشكل ٩-٢٥). يمكن تركيبها على أنابيب السحب والفيضان وأنابيب التوزيع، وأنابيب التنظيف. تمكن الصمامات المتواجدة على أنابيب التوزيع من تعديل الانتاجية.

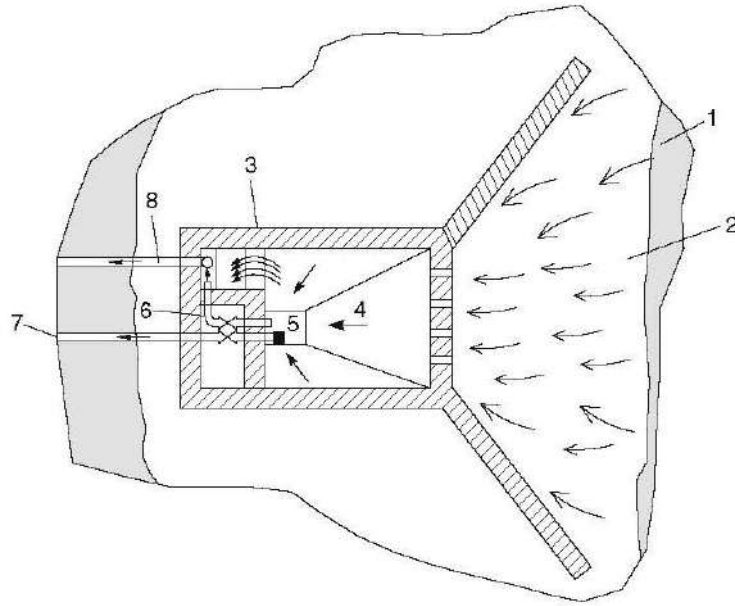
يتم تركيب معد/ات /مرقبة بانتظام في الينابيع الكبيرة وتلك التي يتم استغلالها للحصول على مياه مركزية. وهي تشمل أدوات مختلفة لقياس التدفق، والمعاملات الفيزيائية والكيميائية، مثل التعكس ودرجة الحرارة والأس الهيدروجيني والتوصيلية (الشكل ٩-٢٦). تتيح التقنيات الحديثة تركيب أجهزة استشعار مختلفة (مجسات) في نقاط التجميع أو في الخزانات والتسجيل التلقائي للبيانات. ويمكن لأجهزة تسجيل البيانات تخزين كميات كبيرة من المعلومات وتسهيل عملية المراقبة وعملية الرصد. إن جمع وتحليل بيانات الرصد مهمة بشكل خاص لإدارة الينابيع والتخطيط للاستغلال المستقبلي.



الشكل ٩-١٨ التقاط النبع مع حوض تجميع وغرفة ضخ. يتم ضخ المياه إلى الخزان الأسطواني لتوزيعها بالجاذبية.



الشكل ٩-١٩ جهاز الكلورة الآلي.



الشكل ٩-٢٠ مخطط توضيحي لالتقاط النبع مع جدران القطع: (١) طبقة المياه الجوفية، (٢) الردم المحيط بالنبع، (٣) حجرة النبع وجدران القطع من الخرسانة المسلحة، (٤) حجرة الرواسب (الغرفة الأولى)، (٥) المأخذ، (٦) أنابيب توزيع المياه النظيفة، (٧) أنابيب الفائض، (٨) الأنابيب إلى التخزين أو المعالجة أو مباشرة إلى المستهلكين. (معدلة من [Jahic, 1988](#)).



الشكل ٩-٢١ حائط احتجاز طويل خلف التقاط الينبوع، نبع توبسايدر، بلغراد، صربيا.



الشكل ٩-٢٢ نبع كايزربرون المستخدم لإمداد فيينا بالمياه منذ القرن التاسع عشر. يظهر المأخذ المغطى بالعشب والخزان مع مصرف فيض بقطر كبير أسفل المدخل الرئيسي.



الشكل ٩-٢٣ غرفة الصيانة والخزان المغطى بالعشب مع فتحة تهوية واحدة ومدخل بغطاء معدني، أوبيكفيت نبع بالقرب من صوفيا، بلغاريا.



الشكل ٩-٢٤ التقاط النبع محاط بسياج خشبي. تشير اللافتة على العمود إلى منطقة الحماية الصحية الأولى (نبع هايدوك في كوسوتنيك بلغراد، صربيا).



الشكل ٩-٢٥ الأنابيب والصمامات ذات القطر الكبير المستخدمة لتحويل المياه في اتجاهات مختلفة.

تشرف على عمليات التقاط الينابيع الكبيرة غرفة تحكم (عمليات). ويمكن أن يتضمن النظام نظاماً آلي محوسباً للتحكم في الانتاجية، ومراقبة المياه الجودة أو معالجة المياه الخام. تقوم العديد من مرافق المياه الكبيرة بتنفيذ هذا النهج باستخدام تقنية يشار إليها عادةً باسم SCADA (التحكم الإشرافي والحصول على البيانات). وفي الختام، فإن التقاط النبع وتركيب المرافق ليست عملية روتينية. فلكل نبع له خصوصياته، ولا توجد قاعدة تغطي جميع الحالات. ومع ذلك، فإن الممارسة الهندسية الشائعة هي تحديد أحد أنواع الينابيع الرئيسية التالية وتكييف هيكل الجمع الأساسي المناسب للظروف الفعلية في الموقع:

- نبع هابط.
- نبع تصاعدي.
- نبع تدفق متحد المركز.
- نبع تصريف منتشر (تدفق تسرب).
- نبع مع تدفق رفع الغاز.
- نبع محصور.

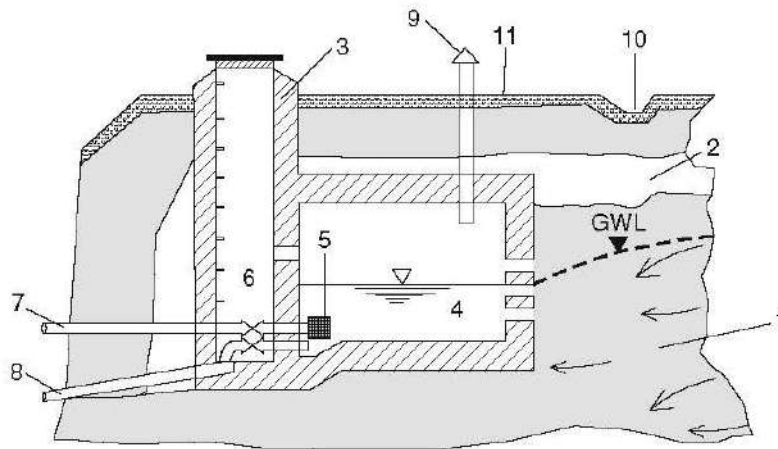
توضح الأشكال ٢٧-٩ إلى ٣٠-٩ بعض الأنواع الأساسية لالتقاط الينابيع.



الشكل ٢٦-٩ المعدات المتنقلة لمراقبة جودة المياه الجوفية.

## ٩-٣-٤ أعمال البناء

لا تتبع أعمال البناء لالتقاط الينابيع في كثير من الأحيان ما يتم تصميمه وتخطيطه بدقة، وذلك لأن العديد من العوامل لا تظهر إلا بعد الحفر وتنظيف الموقع. لذلك، يجب أن يكون المشروع مرناً بما يكفي للسماح بتكييف تفاصيل التصميم أو حجم العمل مع الظروف الخاصة بالموقع. لهذا السبب، يلزم الإشراف المستمر من قبل مهندس التصميم. أثناء تنظيف موقع النبع، ويجب إزالة جميع الكسرات الصخرية والصخور المنفصلة والحواجز. وبمجرد تنظيف نقاط التصريف بالكامل وإزالة الصخور، يجب مراقبة منشأ التدفق والبيئة المحيطة به بعناية. إذا كانت المياه تصدر من فتحة واحدة، تكون مهمة الالتقاط أسهل بكثير.



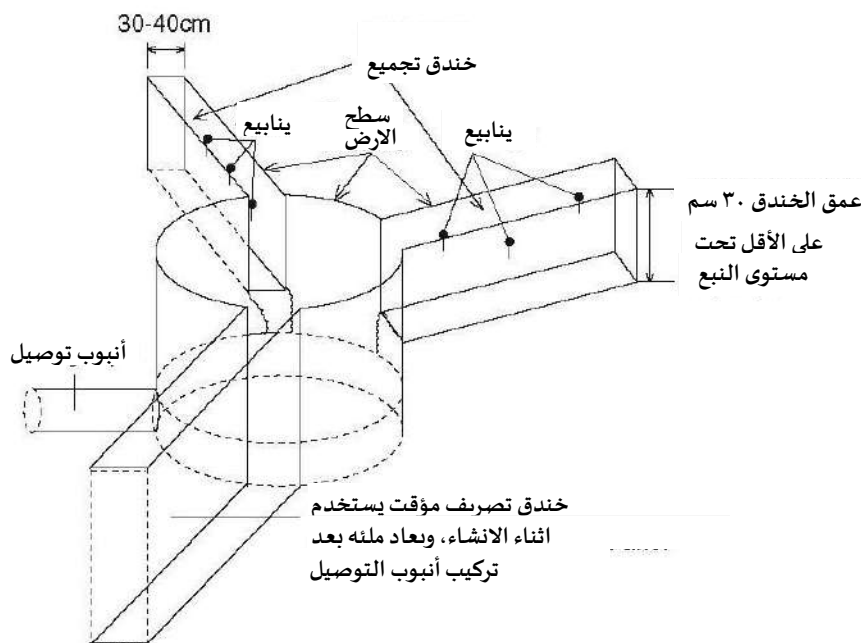
الشكل ٩-٢٧ التقاط نبع هابط: (١) طبقة المياه الجوفية، (٢) الحاجز الذي يغطي حجرة النبع، (٣) حجرة النبع الخرسانية المسلحة مع فتحات في الجدار الخلفي، (٤) غرفة التجميع الرئيسية، (٥) المأخذ مع مرشح، (٦) غرفة الصيانة، (٧) أنبوب التوصيل، (٨) أنبوب التنظيف، (٩) فتحة التهوية، (١٠) خندق الصرف، (١١) التربة العلوية. (معدلة من [Jahic, 1988](#))

أما إذا كان هناك أكثر من فتحة قريبة من بعضها البعض، فيجب اختبارها بمحاولة سد أصغر الفتحات مؤقتاً. إذا زاد التصريف من الفتحات الرئيسية، فيجب عندئذٍ التدخل لتركيز التدفق عن طريق إغلاق المنافذ الأصغر بشكل دائم. في الحالات التي لا تكون فيها الفتحات المنفصلة قريبة من بعضها البعض، يجب تركيب أنابيب تصريف مثقبة أو تركيب خنادق تجميعية لتجميع مياه الينابيع وتحويلها. وغالباً ما يكون مطلوباً حفر التربة أو حفر الصخور، ولكن لتجنب الإضرار بالطبقة التحتية غير المنفذة، والتي توجه التدفق، يجب أن يتم ذلك دائماً بعناية فائقة؛ وإلا فقد "تسرب" المياه. ويمكن استخدام الطبقة غير المنفذة كأساس لحجرة النبع. إذا كان البحث عن نقطة التصريف الرئيسية والشق يؤدي إلى الصخور الصلبة (الصلبة)، يجب أن يتم تحديد اتجاه وأبعاد الشقوق عن كثب. يمكن أن يؤدي الحفر أو توسيع الشقوق ميكانيكياً في الصخور الكارستية إلى زيادة التدفق. ومع ذلك، فإن

التجربة تعلمنا أن استخدام المتفجرات ليس حلاً مناسباً للحصول على المزيد من المياه (بالإضافة إلى كونها خطرة على العمال والبيئة). يجب أن تكون غرفة التجميع أو الخزان أو الحجرة مصنوعة من الخرسانة المسلحة. وبالتالي، يجب نقل الأدوات، والألواح، والخشب الرقائقي، وصناديق الخلط، وقضبان التسليح، وحديد التسليح، والشبكات السلكية، والمعدات والأجهزة المماثلة إلى الموقع واستخدامها في هذا البناء. يجب تقطيع مواد البناء الخشبية إلى قطع بأحجام مناسبة وتركيبها بواسطة نجارين مهرة قبل صب الخرسانة. ويجب أن تكون الألواح مثبتة بشكل صحيح (مدعمة) ومثبتة في الأسفل لتجنب أو تقليل التسرب. كذلك يجب أن تتكون الخرسانة من الأسمنت والرمل والحصى مخلوطة بنسبة ١:٢:٣ أو ما شابه ذلك. ويجب إضافة كمية كافية من الماء؛ فالإفراط في الماء يجعل الخرسانة ضعيفة. من الأفضل صب الخرسانة بواسطة خلاط. وقبل ذلك الدك الجيد بهدف منع الجيوب الهوائية أو الفراغات.

وبمجرد الانتهاء من عملية الصب، يجب تغطية الهيكل بعناية بالبلاستيك لمنع حدوث ترطيب إضافي. ومع ذلك، إذا كان الطقس مشمساً وجافاً جداً، فإن رش الخرسانة بالماء قليلاً جداً لعدة أيام ثم إزالة القوالب الخشبية. في النهاية، ثم إجراء فحص دقيق للشقوق المحتملة أو أي تشققات خرسانية. وفي حالة وجود شقوق مفتوحة، سيحدث تسرب للمياه. وعندما تكون الينابيع أصغر، يمكن استخدام مواد معدنية أو بلاستيكية (غير قابلة للتآكل) بدل الهيكل الخرساني. يمكن بناء غرفة المضخات أو أي هيكل بالإضافة إلى الهيكل الأساسي من الطوب والملاط لأنها لا تحتاج إلى أن تكون قوية. ولإبعاد الرواسب والمواد العضوية يجب أن تكون المواد المستخدمة للأنابيب والصمامات والصنابير مصنفة للاستخدام في مياه الشرب ونظيفة وفوق كل شيء غير قابلة للتآكل لكون الأنابيب البلاستيكية خفيفة ومرنة للنقل والتوصيل على التوالي. بعد اكتمال أعمال البناء بالكامل، فإن المعالجة بالكور الزلزامية. ويجب أن يتبع هذا التطهير أخذ عينات من المياه واختبارها (كيميائياً وبكتريولوجياً) بعد عدة أيام، مما يسمح بحدوث التنظيف الطبيعي لالتقاط النبع. يعد الإغلاق بالطين حول النبع أو فوقه أرخص حل لمشكلة تسرب الملوثات السطحية. وضغط خليط الطين هو الخطوة التالية. ويوصى باستخدام ماكينة دحرجة لتسطيح الطبقة العلوية لأن الحفاظ على رطوبة الطين معظم الوقت سيمنع التشقق. إضافة طبقة تربة إضافية (دبال) مع العشب والزهور فوق الطين المضغوط لا تجعل موقع التقاط النبع مبهجاً فحسب، بل هو أيضاً تذكيراً بالحاجة إلى الري بشكل متقطع. ولضمان عدم تجمد المعدات أو الأنابيب. بينما يتم تخزين المياه وتغطيتها في الحجرة أو الخزان تحت سطح الأرض لا تتأثر عادة، فإن أنابيب التوزيع والصمامات يجب دائماً تركيبها تحت مستوى الصقيع أو عزلها بشكل صحيح. يجب أن تكون أعمدة السياج متباعدة من ٢-٣ أمتار ويجب أن يكون ارتفاعها ٣ أمتار كافية. ويجب أن تكون أساساتها على عمق ٥-١٠ متر، ويجب أن يكون السياج مترا بكثافة ٢,٠ متر تقريباً. بعد اكتمال البناء، يجب التخلص من جميع المعدات المستخدمة والأسلاك المتبقية ونشارة الخشب أو ما شابهها والزيت ويجب إزالة علب الزيوت وزيت التشحيم وأكياس الأسمنت وجميع القمامة من الموقع والتخلص منها بأمان. ويجب صيانة غرفة التجميع وحجرة النبع والأنابيب والمعدات المركبة. إذا كان يتم استخدام التقاط النبع لإمدادات المياه المركزية لعدد كبير من المستهلكين، يجب أن تكون الصيانة نشاطاً منظماً جيداً وموقوتاً بدقة. يعد انسداد غرفة (غرف) التجميع مشكلة متكررة أثناء الاستغلال. إذا حدث انسداد، فإن كمية أقل

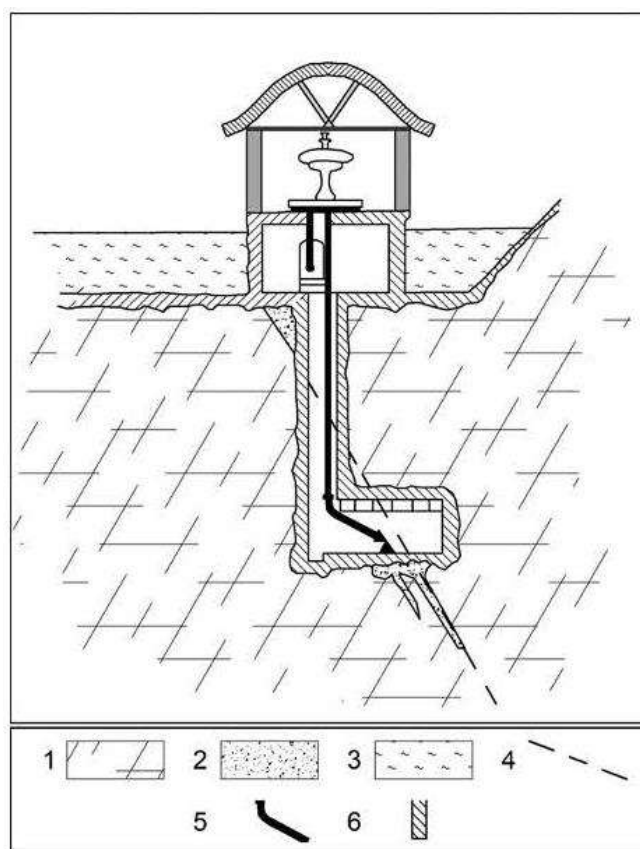
الشكل ٢٨-٩ التقاط نبع صاعد مع تدفق متحد المركز في مستودع مياه جوفية كارستية: (١) طبقة مياه جوفية كارستية، (٢) ردم، (٣) كهوف، (٤) ختم طيني، (٥) غطاء رملي طيني، (٦) تربة علوية، (٧) غطاء عشبي، (٨) خرسانة مسلحة لغرفتين وغرفة وصول، (٩ أ) حجرة رواسب، (٩ ب) خزان مياه نظيفة، (١٠) غرفة صيانة مع صمامات، (١١) أنابيب الفائض وأنابيب توصيل، (١٢) مدخل، (١٣) فتحة تهوية.



الشكل ٩-٢٩ التقاط نبع تصريف منتشر. تتجمع المياه في خنادق وتتدفق إلى خزان أسطواني (عمود). (معدل من Coffman and John, 1984).

### ٩-٣-٥ دراسات حالة

يظهر الشكلين ٩-٣١ و ٩-٣١ التقاط نبع تسرب يستخدم لإمدادات المياه في قرية ميهيلوفاتش Mihajlovac في شرق صربيا وكانت الخطوة الأولى هي تحديد موقع منطقة التصريف الأولية عن طريق الحفر الجزئي للرواسب في الوادي الغربي الضيق الرقيق الممتد إلى أسفل المنحدر من التسريبات. كان تصريف المياه الجوفية المرصودة حوالي ٨ لتر/ثانية من ثلاثة ينابيع صغيرة ثابتة (جميعها على نفس المستوى) على طول منطقة تصريف خطية بطول ٥ أمتار. بعد إزالة كسرات الصخور الكبيرة، تم بناء جدارين متوازيين من الخرسانة المسلحة. بعد الانتهاء من بناء الجدران، تم غسل المواد الطميية وتسويتها وتغطيتها بسدادة طينية غير منفذة. بعد ضغط الطين، تم وضع طبقة من التربة فوقها وتغطيتها جزئياً بكسرات صخرية لمنع التآكل. وتم توجيه المياه المجراة التي تم التقاطها وإغلاقها بالكامل إلى خزان تخزين، مبني أيضاً من الخرسانة المسلحة (الشكل ٩-٣٢). وبجانب خزان التخزين توجد غرفة الصيانة الرئيسية، تضم صمامات التحكم وجهاز الكلورة الآلي. الهيكل بأكمله مغطى بالتربة باستثناء صفيحة خرسانية ذات مدخل علوي. ما يقرب من ٥ إلى ٦ لتر/ثانية من المياه من التقاط الينابيع (الارتفاع ٦٢ م فوق سطح البحر) يتم تحويلها بالجاذبية من خلال خط أنابيب طوله ٧٠٠ متر (قطره ١٠٠ مم) إلى غرفة ضخ في القرية (٤٢ م). ومن هذه الغرفة، يتم ضخ المياه إلى خزانين فوق القرية على ارتفاع ٧٥ م و ٧٨ م. يمكن لكل خزان تخزين ١٢٥ م³ من المياه ويزود شبكة توزيع المياه في القرية. (Gaon, 1975).



الشكل ٩-٣٠ التقاط نبع معدني صاعد مع تدفق مرفوع بالغاز: (١) صخرة متصدعة، (٢) صدع مع بريشيا، (٣) سدادة طينية، (٤) صدع محتمل، (٥) أنبوب صغير تم إدخاله مباشرة في الشق يمنع تسرب ثاني أكسيد الكربون، (٦) خرسانة مسلحة. (معدلة من Filipovic and Dimitrijevic, 1991).

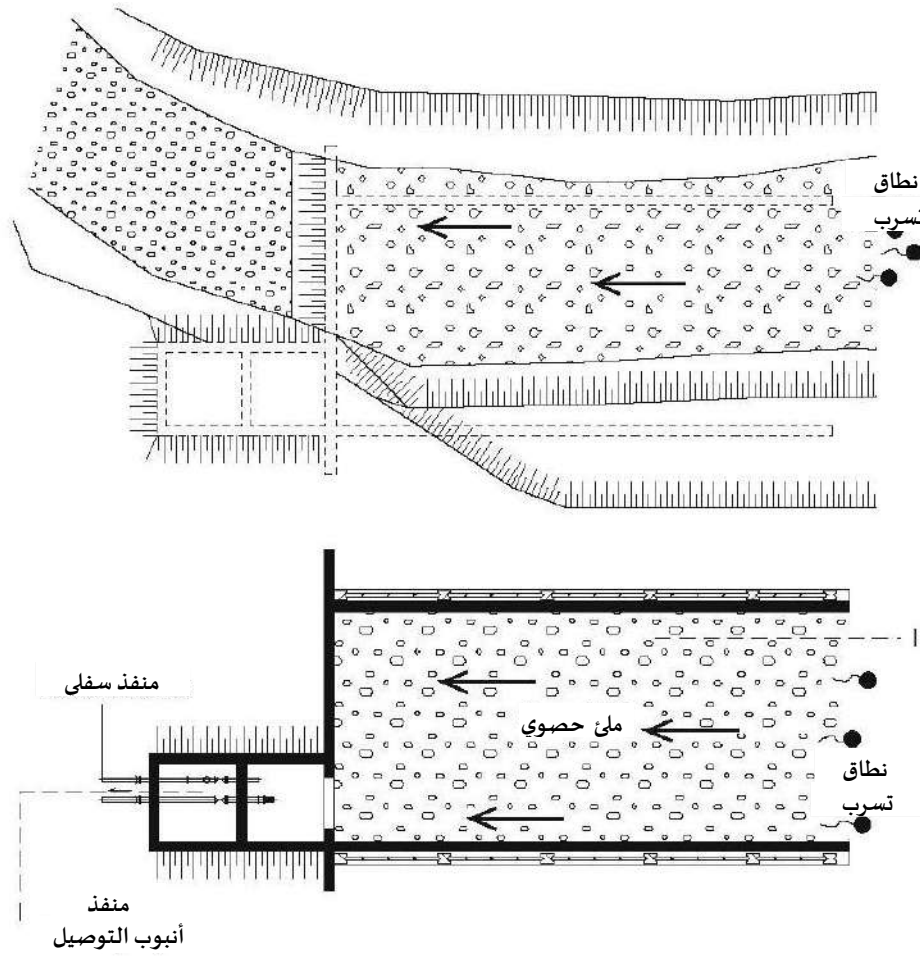
يظهر الشكلين ٩-٣٣ و ٩-٣٤ تطوير واستخدام نبع كارستي كبير، فوكوفوفريلو، لإمداد المياه في سجينيتسا، جنوب غرب صربيا. قبل اكتمال هذا المشروع، أدى استخدام المياه غير الصحية إلى انتشار وباء أصاب حوالي ١٠٠٠ شخص. في ذلك الوقت، كان يتم توزيع المياه دون كلورة بواسطة خط أنابيب من مأخذ بسيط في سينيكو فريلو، أحد الينابيع الكارستية القريبة. نسبت التحريات اللاحقة تفشي المرض إلى الطبيعة الكارستية لمنطقة تصريف الينابيع، والتي تأوي العديد من المزارع الحيوانية. بالنسبة لمشروع إمدادات المياه الجديد في سينييتسا، تم رسم الخرائط الهيدروجيولوجية، بما في ذلك حفر العديد من الآبار الاستكشافية، نتج عنه اقتراح الاستفادة من مياه الينابيع في فوكوفوفريلو الصاعدة (Gaon, 1987). تصدر مياه النبع من عدة نقاط تصريف ولها إنتاجية مستقرة على مدار العام (معامل التماثل ١,٥). بحد أدنى مقيس يبلغ ٢٢٠ لتر/ثانية. ونظراً لقرب مواقع

التصريف في النبع تم التوصل إلى أن الحل الأكثر ملاءمة هو تجميعها جميعاً معاً ووضعها تحت سقف واحد مشترك. يحتوي التقاط النبع على العناصر التالية (Gaon, 1987):

- تغطي غرفة السحب الرئيسية السطح، حيث يتم تصريف جميع الينابيع الصاعدة.
- الجدران الخرسانية المسلحة مبنية من الحجر الجيري غير المجوّف.
- يبلغ ارتفاع السقف الخرساني ١ متر فوق الحد الأقصى لمستوى المياه داخل المأخذ.
- توفر فتحات التهوية هواءً نقياً إضافياً بالداخل.
- المأخذ مملوء بالحصى والمواد الرملية الخشنة.
- يتم توجيه المياه نحو غرفة تجميع المياه النظيفة بسعة ١٠٠ م<sup>٣</sup>.
- من الحجر، يتم تحويل المياه من خلال أنبوب قطره ٥٠٠ مم نحو غرفة المضخة، حيث تتم عملية الكلورة.
- التطهير بالكلور هو المعالجة الوحيدة للمياه.
- مضختان بالطرد المركزي ترفعان المياه إلى ١٤٠٠ م<sup>٣</sup> فوق المدينة.

يوضح الشكل ٣٥-٩ صور التقاط نبع توبليك المستخدم في إمدادات المياه لمصنع أسمنت هولسيم وقرية بوبوفاك القريبة من وسط صربيا. حصل النبع على اسمه من درجة حرارة المياه المرتفعة قليلاً، والتي تبلغ حوالي ١٥ درجة مئوية، والتي تظل ثابتة خلال أشهر الشتاء الباردة. وعادة ما تكون هذه الينابيع صاعدة، كما هو الحال مع توبليك. طبقة المياه الجوفية كارسية وتتكون من الحجر الجيري الجوراسي المتجمد جيداً. يبلغ التصريف المسجل هو ٣٠ لتر/ثانية. بعد الانتهاء من الحفر وإزالة الشظايا الصخرية، تقرر ملء المنخفض بالحصى وتغطيته بسقف خرساني مسطح كبير. يوفر الحشو بالحصى عملية الترشيح، بينما يمنع السقف التأثيرات الخارجية. الخصائص الرئيسية لالتقاط النبع هي كالتالي:

- تم تركيب ثلاث طبقات رشح في خزان السحب الرئيسي. وهي، من الأسفل إلى الأعلى، صخور كبيرة كسرات صخرية كبيرة والحصى والرمل.
- تم تركيب عدة أعمدة قطرها ١ متر داخل الهيكل لتمكين التهوية وكذلك الوصول إلى المياه المخزنة.
- أنبوب التصريف الواصل بين الأعمدة يحوّل المياه بالجاذبية إلى خزان المياه النظيفة وغرفة المضخات.
- السقف الخرساني المسلح مغطى جزئياً بالتربة.
- يقوم خندق التحويل بتجميع وتحويل جميع مياه الجريان السطحي.
- أنبوب الفائض يصرف المياه الجوفية الزائدة أثناء فترات ارتفاع المياه.



الشكل ٩-٣١ تصميم التقاط نبع Mihajlovac. (من شركة WIGA).

#### ٩-٤ تنظيم النبع

ينطوي تنظيم النبع على تدخلات هندسية مختلفة تهدف إلى التحكم في تدفقه وإدارة توزيع مياهه. بشكل عام، يشبه التحكم في تصريف النبع التحكم في تصريف المياه السطحية. هناك ثلاثة متطلبات رئيسية لتنظيم النبع هي أن يكون:

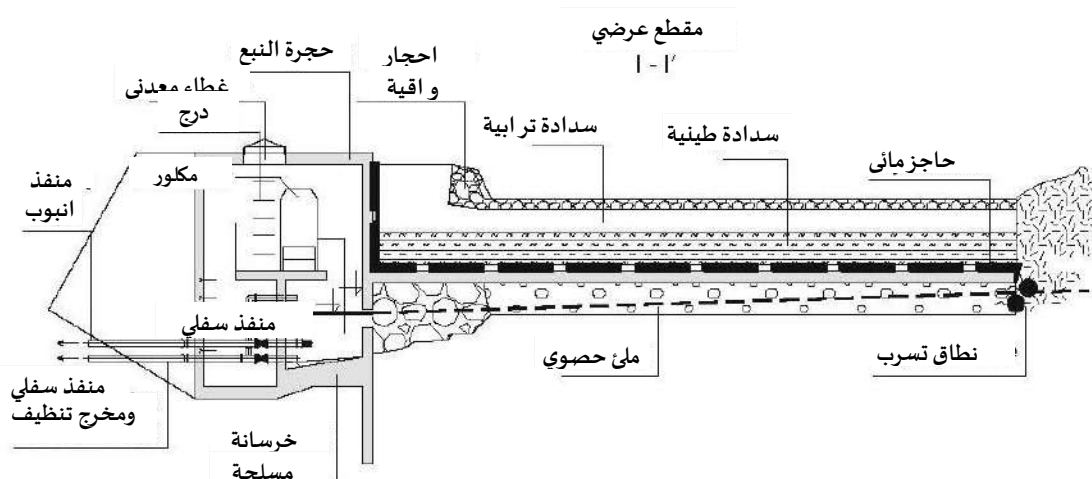
١. ممكنًا من الناحية المادية.

٢. سليم بيئيًا.

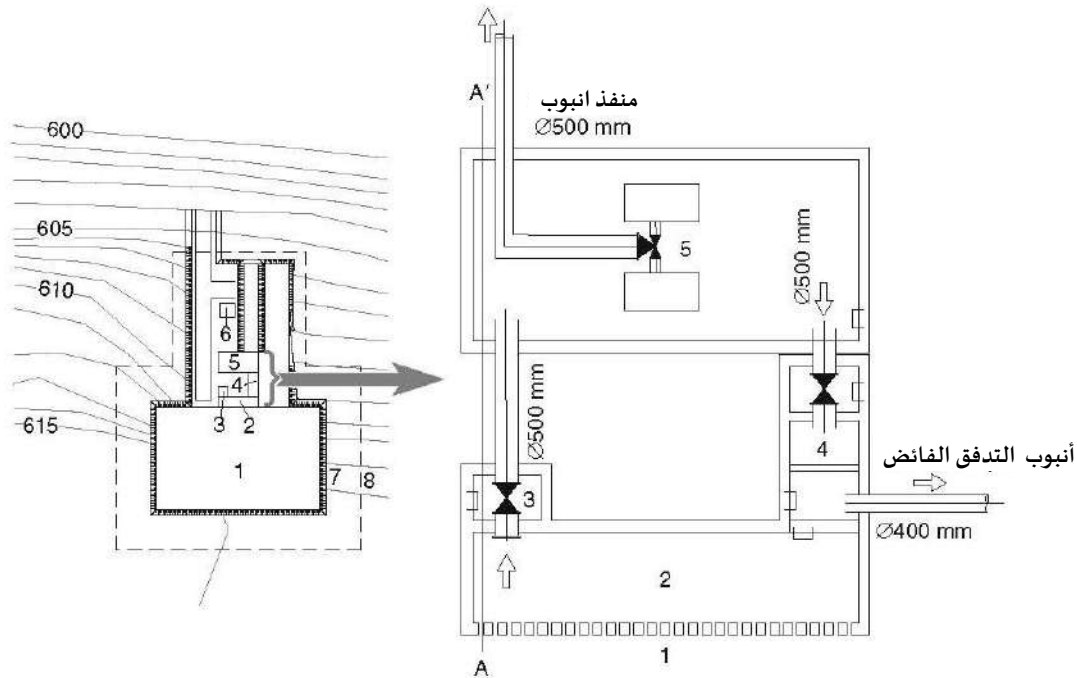
٣. ممكنًا اقتصاديًا.

### الحالة الفيزيائية

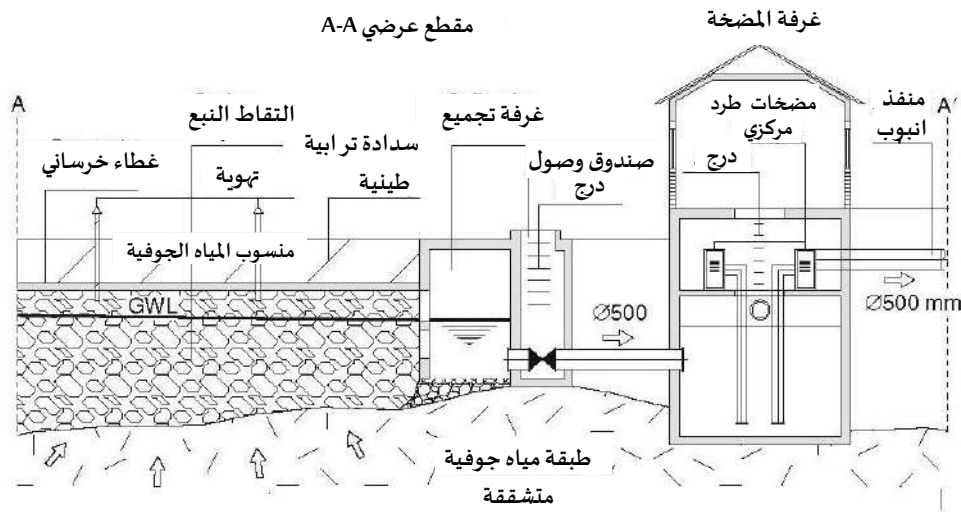
من المفهوم أنه لا يمكن تنظيم جميع الينابيع. بالإضافة إلى ذلك، بدون بحث شامل مسبق، فإن أي محاولة مباشرة للتحكم بها ستبوء بالفشل. معرفة خصائص طبقة المياه الجوفية (نظام التصريف وموضع الرأس الهيدروليكي في طبقة المياه الجوفية)، وسمك المنطقة المشبعة، وطبقة المياه الجوفية والنفاذية والتخزين ذات أهمية رئيسية. من وجهة نظر التطبيق، هناك حالتان رئيسيتان للمياه الجوفية المخزنة في طبقة المياه الجوفية (الأشكال ٩-٣٦ و ٩-٣٧). في الحالة الأولى، لا يوجد تخزين كبير تحت ارتفاع تصريف الينابيع، مما يترك أي فرص لاستخراج مياه جوفية إضافية تتجاوز ما يتدفق بشكل طبيعي. في حالة وجود منطقة مشبعة أكثر سمكاً وتخزين طبقة المياه الجوفية تحت ارتفاع النبع، فمن الممكن فيزيائياً استخراج المزيد من المياه أكثر مما يتم تصريفه بحرية من طبقة المياه الجوفية. وترتبط غالبية مشاريع تنظيم الينابيع التي تم تنفيذها بنجاح بالمناطق الكارستية. كانت معرفة خصائص طبقة المياه الجوفية الكارستية أساسية لهذه المشاريع، ولا سيما نظام التصريف، وموقع وضع قاعدة الضواهر الكارستية، وكثافتها. وبصرف النظر عن نفاذية الأرضية الصخرية، تعتبر أبعاد وموقع القنوات الكارستية الرئيسية التي تزود النبع بالمياه من العناصر الرئيسية في نفاذية طبقة المياه الجوفية الكارستية. لذلك غالباً ما تشمل التحريات الخاصة بتنظيم الينابيع في كثير من الأحيان استكشاف الكهوف. على سبيل المثال، في الكارست الديناريكي والكارباتي الكارستي، العديد من الينابيع الكبيرة الصاعدة مع قنوات مستكشفة إلى أعماق ٧٠-٨٠ م تم تنظيمها أو في انتظار تصميم جديد للتحكم في التصريف للتحكم (Toulomudjian, 2005; S. Milanovic, 2005; Stevanovic et al., 2005).



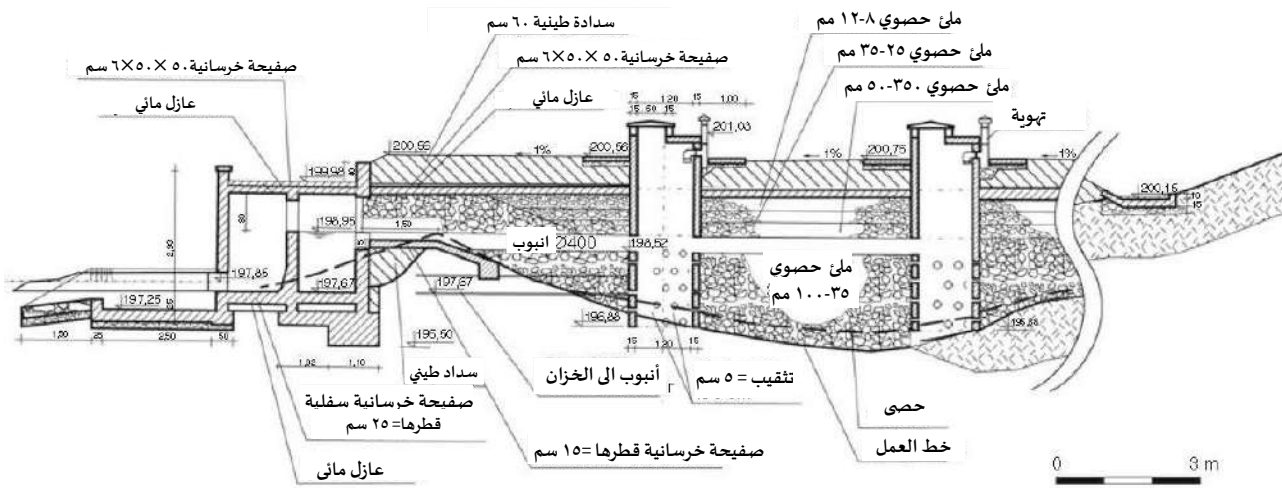
الشكل ٩-٣٢ المقطع العرضي I-I من التقاط نبع Mihajlovac. (من شركة WIGA).



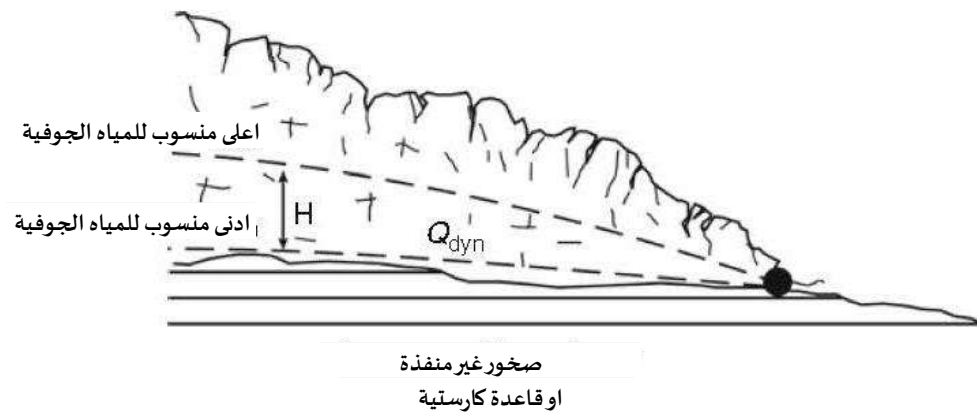
الشكل ٩-٣٣ التقاط نبع Vuckovo Vrelo: (١) غرفة السحب الرئيسية المغطاة بسقف خرساني فوق جميع الينابيع الصاعدة والمملوءة بغطاء من الحصى؛ التفاصيل: (٢) حجرة تجميع المياه النظيفة، (٣) حجرة الوصول لتشغيل الصمام، (٤) غرفة الوصول لأنابيب الفائض، (٥) غرفة المضخة مع مضختين طرد مركزي، (٦) غرفة العمليات والصيانة، (٧) الجدران الخرسانية، (٨) السياج. (من شركة WIGA).



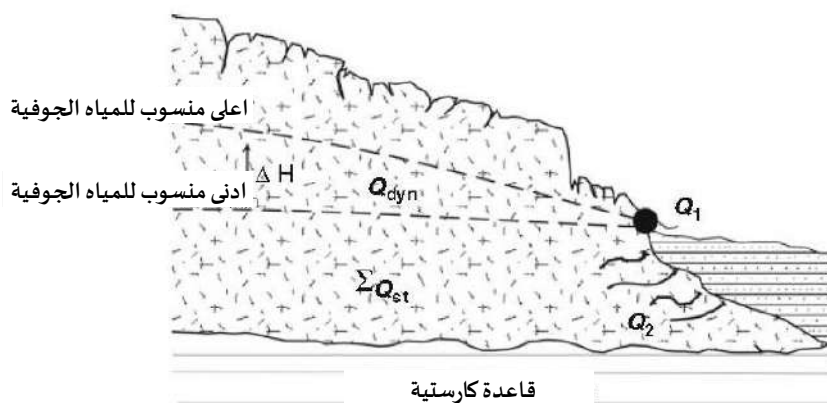
الشكل ٩-٣٤ المقطع العرضي A-A لالتقاط نبع Sjenicko Vrelo. (من شركة WIGA).



الشكل ٩-٣٥ مقطع عرضي لالتقاط نبع Toplik. (من شركة Hydroproject).



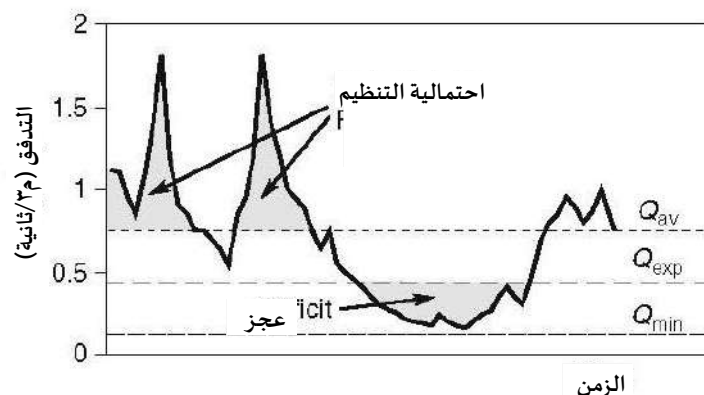
الشكل ٩-٣٦ نبع الجاذبية مع صخور قاعدية ضحلة غير منفذة. تتوفر فقط احتياطات المياه الجوفية الديناميكية ( $Q_{dyn}$ ) لطبقة المياه الجوفية الكارستية.



الشكل ٩-٣٧ طبقة المياه الجوفية الحارسيه ذات القاعده الحارسيه العميقه التي يتم تصريفها بواسطة نبع صاعد (Q1) وتدفق تحت السطح (Q2). احتياطي المياه الجوفية الثابتة (Qst) متاح للسحب الإضافي.

إن التغذية السريعة والتصريف السريع ليست علامات جيدة إذا كان الهدف هو تنظيم النبع. إذا كان هيدروجراف تصريف النبع الملاحظ أو تقلبات الرأس الهيدروليكي تظهر استجابة سريعة لهطول الأمطار في منطقة الصرف وأوقات انتقال قصيرة، فمن المحتمل أن يكون لطبقة المياه الجوفية تخزين محدود. على سبيل المثال، في الصخور الكارستية والصخور المتشققة، قد تحتوي الطبقات القريبة من السطح على كسور وانقطاعات وتجاويف لا يمكنها دائماً استقبال كل المياه الراشحة ونقلها إلى عمق طبقة المياه الجوفية. إذا كانت هذه هي الحالة، فإن الجريان السطحي وبعد اكتمال التشبع، يقوم بتنشيط العديد من الينابيع المؤقتة بسرعة. مثل هذه الحالات التي تتدفق فيها المياه "في كل مكان" بعد نوبات العواصف شائعة في المناطق الكارستية تشير إلى السعة التخزينية المنخفضة.

وفي الختام، بالنسبة لتنظيم الينابيع، يفضل أن يكون النبع من النوع الصاعد، حيث يتم تصريفه عند حاجز جانبي كامل (الشكل ٩-٣٧). إذا لم يكن الحاجز غير نافذ أو عميق، فهذا يسمح ببعض التصريف تحت سطحي من خزان المياه الجوفية الرئيسي، ويمكن أن تركز هياكل التنظيم بجانب النبع على التقاط التدفق الجوفي الأعظم أو على الاستفادة من طبقة المياه الجوفية الثانوية.



الشكل ٩-٣٨ هيدروجراف نموذجي لنبع كارسكي مع إمكانية التنظيم. سعة الاستغلال (exp) أكبر من الحد الأدنى الطبيعي للتصريف (Qmin) ولا تزال أقل من احتياطي المياه الجوفية الديناميكي الذي يمثلته متوسط التصريف السنوي (Qav).

### الحالة البيئية

الهدف من تنظيم الينابيع، أولاً وقبل كل شيء، هو تأمين كميات إضافية من المياه خلال فترات الطلب المتزايد، مع الاعتماد في الوقت نفسه على تجديد مخزون المياه الجوفية بشكل كافٍ خلال مواسم الأمطار (الشكل ٩-٣٨). إن التوازن الرئيسي في تحقيق هذا الهدف هو منع الاستغلال المفرط لطبقة المياه الجوفية (السحب من طبقة المياه الجوفية). إن الاستغلال المستدام للمياه الجوفية، بما في ذلك مصطلح الانتاجية الامنة، هو موضوع ساخن بين صناع القرار في قطاع المياه وعلماء الهيدرولوجيا على حد سواء. وهناك نهج "مرن" أكثر حداثة لهذا الموضوع (Custodio, 1992; Margat, 1992; Burke and Moench, 2000) يمكن تلخيصه بالاقتراس التالي:

"إن السحب المخطط له لطبقة المياه الجوفية هو خيار استراتيجي لإدارة الموارد المائية حيث يتم فهم وحساب الآثار المادية والاجتماعية والاقتصادية الكاملة، مع مرور الوقت. إن انخفاض منسوب المياه الجوفية لا يشير بالضرورة إلى الإفراط في استخراج المياه الجوفية" (Burke and Moench, 2000). لا يمكن تحقيق هذا "السحب المخطط له" في كل مكان. يمكن تطبيق الاستخراج المفرط عندما يكون ممكناً من الناحية الفيزيائية لتوفير كميات إضافية من المياه في فترات الجفاف الحرجة، ولكن هذا "القرض" من الاحتياطيات طويلة الأجل من المفترض ان يعاد. وهناك سيناريوهان متطرفان ممكنان:

١. أن تكون إمكانات التجديد كافية لتغطية "القرض" خلال فترة زمنية قصيرة (خلال نفس الدورة الهيدرولوجية أو الدورة الهيدرولوجية التالية).

٢. لا يمكن تعويض العجز ويكون انخفاض منسوب المياه الجوفية مضموناً.

وعلى الرغم من أن السيناريو الأول لا يمثل مشكلة كبيرة، إلا أن السيناريو الثاني يمكن مقارنته بالتهور وعدم الاستدامة. وعلاوة على ذلك، يمكن أن تكون إدارة المياه مهمة حساسة للغاية، نظراً لأن جزءاً كبيراً من المياه الجوفية في العالم مخزونة في مناطق ذات مناخ جاف أو شبه جاف مع تغذية قليلة أو معدومة في الوقت الحاضر لطبقات المياه الجوفية.

#### الحالة الاقتصادية

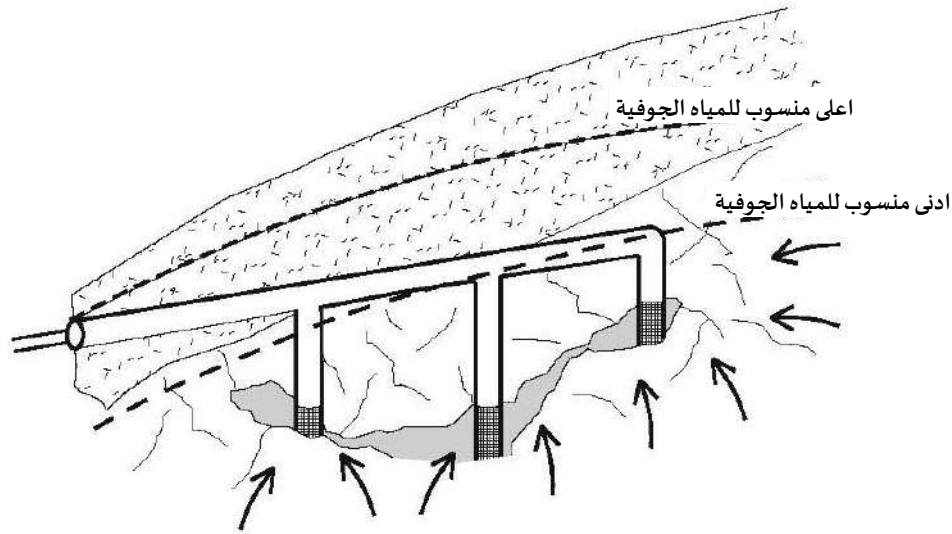
إن تنفيذ مشاريع كبيرة للتحكم في المياه الجوفية، مثل بناء خزانات تحت الأرض، يمكن أن تكون مهمة مكلفة وحساسة للغاية. على الرغم من أن العديد من التحليلات تظهر أن الفوائد غالباً ما تفوق العواقب السلبية، إلا أن الخوف من النتائج غير المؤكدة (وغير المرئية) والاستثمارات الكبيرة قد أدى إلى تعليق العديد من هذه المشاريع.

المشاريع الأصغر حجماً، مثل حفر الآبار بالقرب من الينابيع والضحخ المؤقت لكمية مطلوبة من المياه، وهي أقل تكلفة ويمكن تنفيذها بسهولة. ومع ذلك، نجد أن معدلات الاستخراج التي توفرها هذه "الأداة" كبيرة، ويجب أن تكون مرآبة المياه الجوفية إلزامية. وإلا، فإن الضخ غير المحدود لا يؤدي فقط إلى تأثيرات سلبية على البيئة فحسب، بل يتسبب أيضاً في خسائر اقتصادية. قد لا تظهر العواقب على الفور؛ ولكن إذا حدث استنزاف كبير طويل الأجل في منسوب المياه الجوفية، يمكن اعتبار ذلك كعلامة واضحة على أن "الأداة" ليست مستدامة.

#### ٩-٤-١ أنواع هياكل التنظيم

هناك أنواع مختلفة من هياكل التنظيم. في حالة الينابيع الفوقية العميقة في الكارست، من الممكن تركيب مضخات في القنوات المغمورة تحت ارتفاع النبع وضخ المياه من النبع خلال فترات ارتفاع الطلب على المياه (Avias 1984; Stevanovic and Filipovic, 1994). كما تُستخدم الآبار العميقة أو الخنادق الأفقية كثيراً لنفس الغرض. وقد أسفرت الآبار الأنبوبية العمودية ذات القطر الكبير حتى الآن عن أفضل النتائج، لأن تكنولوجيا الحفر تمارس على نطاق واسع ويتم تحسينها باستمرار. ونادراً ما يتم تنفيذ الهياكل الأكثر تعقيداً مثل السدود تحت سطحية بسبب تكلفتها والنتائج غير المؤكدة على الرغم من وجود العديد من الأفكار والتصاميم الجيدة. نناقش فيما يلي بإيجاز عدة وسائل شائعة للحصول على مياه جوفية أكثر من التصريفات الطبيعية في النبع.

إن البحث عن المزيد من المياه في طبقات المياه الجوفية الكارستية أو في طبقات المياه الجوفية الصخرية المتشققة التي يتم تصريفها من النبع هو أمر دقيق دائماً. تؤدي الوسائط الغير متباينة الخواص وغير المتجانسة إلى تكوين مسارات تدفق تفضيلية، مثل على طول الشقوق، والصدوع، والقنوات، وقنوات الكهوف الكبيرة. والعثور على مثل هذه المسارات والوصول إليها باستخدام الآبار والمضخات أمر غير مؤكد دائماً ولكنه ضروري للحصول على تدفق إضافي. عندما تكون المنطقة المشبعة تحت الضغط (الناجم عن الصخور منخفضة النفاذية التي تعلوها) وتكون الظروف الطبوغرافية مواتية، فمن الممكن تركيب آبار أنبوبية أفقية أو مائلة لتصريف الجاذبية الحرة لطبقة المياه الجوفية (الشكل ٩-٣٩).



الشكل ٩-٣٩ التقاط نبع كارستي محصور مع ممر تصريف. تُحفر ثلاثة أعمدة صغيرة من الرواق الرئيسي للتحكم بالتدفق الصاعد (الارتوازي) خلال أقصى مستويات المياه الجوفية (GWL الأقصى). قد يستلزم خفض الضغط الارتوازي خلال موسم الجفاف (الحد الأدنى لمستوى المياه الجوفية القصوى) الضخ. يوفر الرواق المياه إلى نقطة الاستخدام عن طريق الجاذبية.

في حالة الينابيع الحاجزة (التماسية)، غالبًا ما يتم إنشاء مساحات أفقية أو مائلة قليلاً تحت التصريف للوصول إلى الجزء المحصور من طبقة المياه الجوفية وتمكين التصريف الحرجي الجاذبية. وهي تسمى أحياناً المنافذ السفلية، نظرًا لوظيفتها التي تشبه أنابيب تصريف المخارج من غرف النبع. ومن خلال الأنابيب وتركيب الصمامات، من الممكن التحكم الكامل في التدفق. وهذا أمر مهم إذا كان استخدام المياه موسميًا ويمكن تخزين المياه لحين الحاجة إليها. لحجب التدفق من طبقة المياه الجوفية إلى منشأه التجميع يتم إنشاء باب صد، على غرار الأبواب المستخدمة داخل العديد من المناجم الجوفية. قد تؤدي زيادة مستوى المياه عند نقطة التصريف في بعض الأحيان إلى زيادة في الرأس الهيدروليكي داخل طبقة المياه الجوفية. وهذا تأثير احتباس كلاسيكي (الشكل ٩-٤٠). لذلك، في العديد من الينابيع في جميع أنحاء العالم يتم بناء جدران الاحتفاظ والسدود الصغيرة والأحواض للحفاظ على مستوى المياه عند أعلى موضع ممكن، مما يتيح تخزين أكبر تحت الأرض (انظر الفصل ١٠،٧). يتم تطبيق نفس المبدأ في حالة السدود الجوفية. يمكن للسد الجوفي أن يرفع الرأس الهيدروليكي في خزان المياه الجوفية بشكل كبير، إذا كان يتحكم بشكل كامل أو في الغالب ويمنع نقطة التصريف. لا تختلف هذه الهياكل كثيرًا عن السدود تحت السطحية الموصوفة سابقًا؛ فالفكرة واحدة، وهي تخزين المزيد من المياه الجوفية داخل الصخور. والاختلاف يكمن في نوع الصخور وموقع السد. في حين أن السدود تحت السطحية عبارة عن هياكل ضحلة نسبيًا لتجميع المياه في الترسبات الغرينية في اتجاه مجرى النبع، فإن السدود الجوفية تقع عند النبع وتخلق تخزين المياه داخل طبقة المياه الجوفية الأساسية.

هناك العديد من المزايا للخزانات الجوفية مقارنة بالخزانات السطحية. ومن هذه المزايا ما يلي:

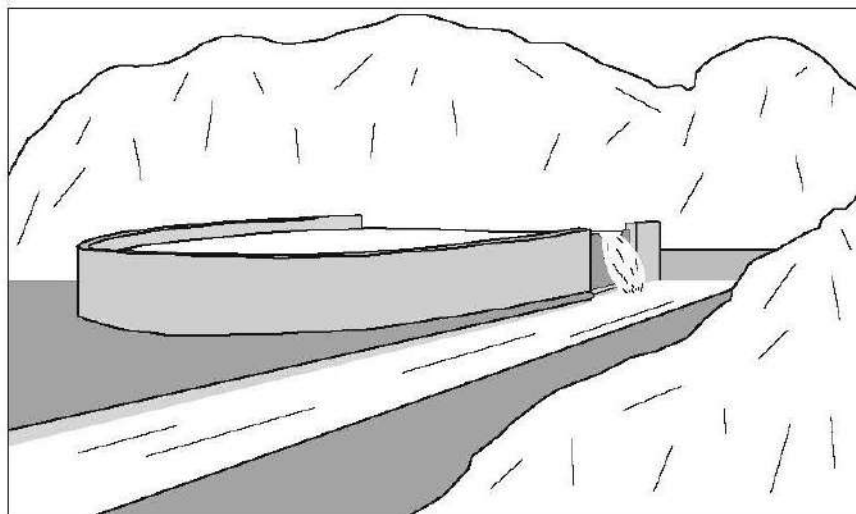
- لا توجد مشاكل تتعلق بفيضانات البنية التحتية أو الأراضي الخصبة أو الآثار أو التعويضات لنقل السكان.
- لا يوجد تهديد بانهيار السدود والدمار الكبير في اتجاه مجرى النهر.
- الحد الأدنى من فقدان المياه بسبب التبخر.
- لا يوجد تأثير سلبي على جودة المياه كما هو الحال في الخزانات السطحية (التخثث والترسيب).

بالإضافة إلى عمليات التحري والبناء المكلفة، فإن الخزان الجوفي له مشكلتين رئيسيتين: التسرب المحتمل من الخزان ومساحة التخزين التي لا يمكن التنبؤ بها دائماً داخل خزان المياه الجوفية. ومهما كان حجم برنامج التحري الذي يتم إجراؤه، لا يوجد ضمان بنسبة ١٠٠ في المائة ضد التسرب. ولذلك، بالنسبة لمثل هذا المشروع، من الأفضل تحديد وجود تدفق متحد المركز والمسارات المسبقة، ويفضل أن تكون قناة تصريف رئيسية واحدة. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن تكون قناة التصريف الرئيسية نفسها متطورة بشكل جيد داخل طبقة المياه الجوفية وتمتد إلى شبكة القنوات الثانوية. وإلا فإن من المحتمل أن تكون سعة التخزين محدودة. تعتبر طبقات المياه الجوفية الكارستية مواتية من وجهة النظر هذه. والشرط الأساسي لنجاح السد الجوفي هو أن يكون النبع ملامساً لصخور غير منفذة للمياه الجوفية ومن الناحية المثالية يجب أن يكون محاطاً بها بالكامل من الناحية الجانبية. بالنظر إلى هذا الشرط، هناك خياران هندسيان رئيسيان لجعل إنشاء الخزان داخل طبقة المياه الجوفية وفوق منسوب المياه الجوفية الطبيعية ممكناً:

١. إنشاء سد على سطح الأرض أمام النبع مباشرة. يجب أن يكون السد صحيحاً مؤسساً بشكل صحيح في الأسفل ومقروناً بشكل جانبي بصخور غير منفذة لمنع التسرب (الشكل ٩-٤١).

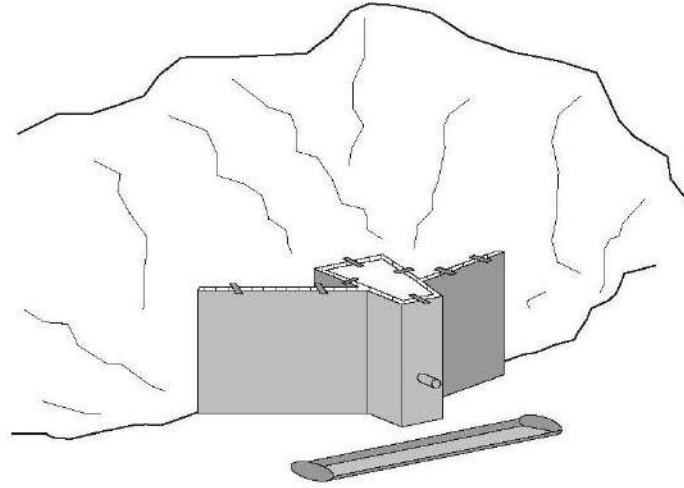
٢. سد قناة النبع بسد خرساني أو سد مانع للماء (عادة ما تكون مبنية من الخرسانة، حيث أن أي مادة أخرى يمكن غسلها بسهولة).

في كلتا الحالتين يتم تنفيذ الحشو بشكل منتظم لسد التسرب السفلي والجانبى. ومع ذلك، في بعض الأحيان، حتى الحواجز الكثيفة جداً (الأبار على مسافات ١ متر) لا يمكنها وقف التسرب غير المرغوب فيه، خاصةً عند وجود صخور كارستية للغاية. عندما لا تكون المنطقة المشبعة عميقة جداً، يمكن تركيب جدران عازلة أو غشاء مانع لتسرب المياه بدلاً من ذلك قد يكون فعالاً لتنظيم وتوجيه التدفق. تم وصف خيار لسد مقترح في نبع بيلي دريم في الفصل ١٠،١ (Peric, Simic, and Milivojevic, 1980). بالنسبة لنفس النبع، يظهر الشكل ٩-٤٢ هيكل تنظيم بديل مع حاجز مائي مانع للماء.

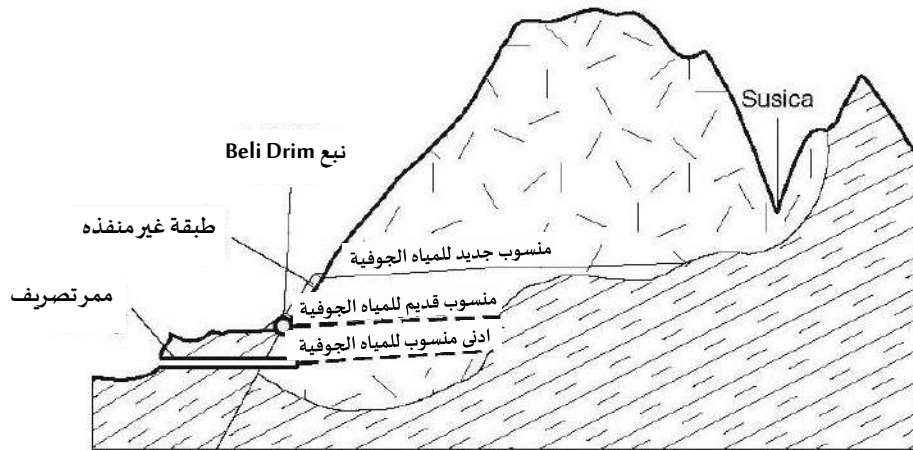


الشكل ٩-٤٠ سد صغير شبه بيضاوي الشكل شُيِّدَ حول نبع عند سفح الجبل ورُبط بالصخر. يقاس الفيضان بسد على شكل حرف V.

يمكن أن يكون لتخزين مياه جوفية إضافية بعض أوجه القصور. كما يؤكد [P. Milanovic, \(2000\)](#) على عدم استقرار الصخور وفشل الانهيار الناجم عن الزلازل المحلية كمشاكل رئيسية ويصف العديد من هذه الحالات من الممارسة الهندسية في المناطق الكارستية في الديناريات (البلقان) والصين. مثال توضيحي للغاية مثال على سد تجريبي لسد منطقة أوبود إستافيل (فاتنيكو بولي، شرق الهرسك). خلال موسم الجفاف، تم تركيب سدادة خرسانية في القناة الرئيسية لمنع فيضان البولي (منخفض كارست)، وهو ما يحدث بانتظام كل عام. بعد هطول أمطار غزيرة (٢٠٠ ملم في ٢٤ ساعة)، ازداد ضغط المياه في القناة المسدودة إلى ١٠,٦ بار وبدأت العديد من الينابيع الجديدة في التصريف على ارتفاعات مختلفة، بارتفاعات تصل إلى ١٠٠ متر فوق سطح الأرض. وقدر إجمالي إنتاج الينابيع الجديدة بأكثر من ١٠ م<sup>٣</sup>/ثانية. وأعقب ظهور الينابيع الجديدة انفجارات من الهواء المحتجز والموجات الزلزالية المحلية القوية. بعد أن تضررت بعض المنازل في المنطقة المجاورة، تم إجراء تفجير عاجل للسدادة. بدأت المياه بالتدفق وسرعان ما انخفض الضغط. تم تفريغ المياه المخزنة بالكامل في غضون ٦ ساعات تقريباً، مما يشير إلى قابلية جيدة جداً للنقل ولكن قدرة منخفضة جداً على إعاقه طبقة المياه الجوفية الكارستية ([P. Milanovic, 2000](#)).



الشكل ٩-٤١ التقاط نبع صغير مقترن بجدران مقطوعة. إن مبدأ بناء سد كبير مشابه جداً.



الشكل ٩-٤٢ تصميم بديل لخزان تحت الأرض في نبع بيلي دريم، ميتوهيا، صربيا. يقوم سد محكم الإغلاق بإنشاء منسوب جديد للمياه الجوفية الاصطناعية (GWL)، بينما يتم التحكم في التصريف بواسطة رواق أفقي أسفل منسوب المياه الجوفية القديمة. (من [Peric et al., 1980](#)).

## ٩-٤-٢ دراسات حالة

تم تنفيذ العديد من مشاريع التحكم في الينابيع في جميع أنحاء العالم، بما في ذلك العديد من الأمثلة حيث لم تنجح محاولات الحصول على المزيد من المياه من طبقة المياه الجوفية. نتيجة المشاكل الأكثر شيوعاً مثل تسرب المياه أسفل أو حول التقاط الينابيع، وانهيار الصخور والمآخذ، والآبار المحفورة غير المنتجة، والخنادق التي تم إنشاؤها فوق متوسط ظروف منسوب المياه الجوفية. كما تم إنجاز العديد من المشاريع بنجاح من حيث الوصول إلى مياه إضافية ولكنها اعتبرت في نهاية المطاف فاشلة بسبب الاستخدام غير المناسب أو تدهور جودة المياه. لذلك عند النظر في مثل هذه المشاريع، من الأهمية بمكان تنفيذ برنامج رصد شامل طويل الأجل لكمية المياه ونوعيتها قبل وأثناء وبعد الإنشاء.

ضخ مياه الينابيع من القنوات والشفافات عادةً ما يتم تصريف المياه الجوفية الكارستية من خلال القنوات الكبيرة والكهوف والتركييب السيفونية. وكما ذكرنا سابقاً غالباً ما تسمح الينابيع الصاعدة بتركيب مضخات في القنوات المغمورة الواقعة بشكل كبير تحت ارتفاع النبع؛ ويمكن أن يوفر الضخ الكمية المطلوبة من المياه خلال فترات ارتفاع الطلب وانخفاض التصريف الطبيعي. وقد تم تطبيق هذا الحل في العديد من الينابيع في جميع أنحاء العالم.

ومن الأمثلة الناجحة المعروفة جيداً في الكارست الساحلي في جنوب فرنسا ونبع ليز، الذي يوفر المياه لمدينة مونبلييه. وقد ألهم هذا المثال (Avias, 1984) والترويج له على نطاق واسع العديد من المحاولات المماثلة في جميع أنحاء العالم. وفيما يتعلق بمشروع "ليز" المذكور في الفصل ٢، فيما يلي بعض الملاحظات الإضافية. زاد الطلب على المياه في مونبلييه بأكثر من ٧٠ ضعفاً على مدار الـ ١٥٠ عاماً الماضية، من ٢٥ لتر/ثانية فقط إلى أكثر من ١٨٠٠ لتر/ثانية. ومن الشائع في ممارسة المياه التخلي عن الإمداد القائم على مياه الينابيع بسبب التوسع الكبير للمدن والتصنيع السريع. ومع ذلك، لم يكن هذا هو الحال في مونبلييه، وذلك بفضل الفكرة الهندسية للاستفادة من مياه إضافية في أعماق طبقة المياه الجوفية. سمح استكشاف قنوات الكهوف العميقة المغمورة ورسم خرائطها الدقيقة ببناء عمود استخراج، ورواق ووضع مضخات عالية السعة. وكان الغوص في القنوات لأكثر من ٥٠٠ متر من مدخل الكهف المغمور وإلى أعماق تزيد عن ١٠٠ متر مهمة حساسة، ولكنها الآن بمثابة إثبات للمفهوم في جميع أنحاء العالم. وقد تم تطبيق حل مماثل مؤخراً في نبع مودرو أوكو الفوقاني وهو أحد مصادر إمدادات المياه في نيس، ثاني أكبر مدينة في صربيا. واستناداً إلى اختبار الضخ الأولي الذي أجري في سبعينيات القرن الماضي، والذي أكد وجود خزان جوفي عميق وكبير يصرف حوضاً كارستياً تبلغ مساحته أكثر من ٧٠ كم<sup>٢</sup> تم تنفيذ برنامج استقصاء لتنظيم الينابيع في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين. وشمل الغطس الاستكشافي إلى عمق ٨٦ م واختبار ضخ جديد بواسطة مضختين مثبتتين على عمق حوالي ٣٠ م (الشكل ٤-٤٣). وبمعدل ضخ يتراوح بين ١٥٠-٣٥٠ لتر/ثانية، بلغ الحد الأقصى للسحب عند النبع ٢١ م. استناداً إلى نتائج اختبار الضخ، تم التوصل إلى أن النبع يمكن أن يوفر ٢٦٠-٢٨٠ لتر/ثانية إضافية من المياه باستمرار لمدة شهرين، مع انخفاض في القناة الكارستية بمقدار ٥٠-٦٠ م. إذا كان متوسط التصريف من ٥٠-١٥٠ لتر/ثانية خلال موسم الجفاف كمرجع، فإن الكمية الإضافية من المياه تمثل زيادة كبيرة في تلبية احتياجات المياه (Jevtic et al 2005). تم حفر بئرين جديدين بقطر ٧٢٠ مم، وبعمق ٨٠ متراً فوق النبع وتم الانتهاء من حفرهما

في القناة الرأسية. وأكد الرصد المستمر منذ ذلك الحين أن المياه المستخرجة من طبقة المياه الجوفية الكارستية خلال مواسم الجفاف (احتياطي ثابت) يتم تجديدها بشكل منتظم خلال فترات التغذية المكثفة لطبقة المياه الجوفية في الشتاء وأوائل الربيع.

### تنظيم النبع بالسدود الجوفية

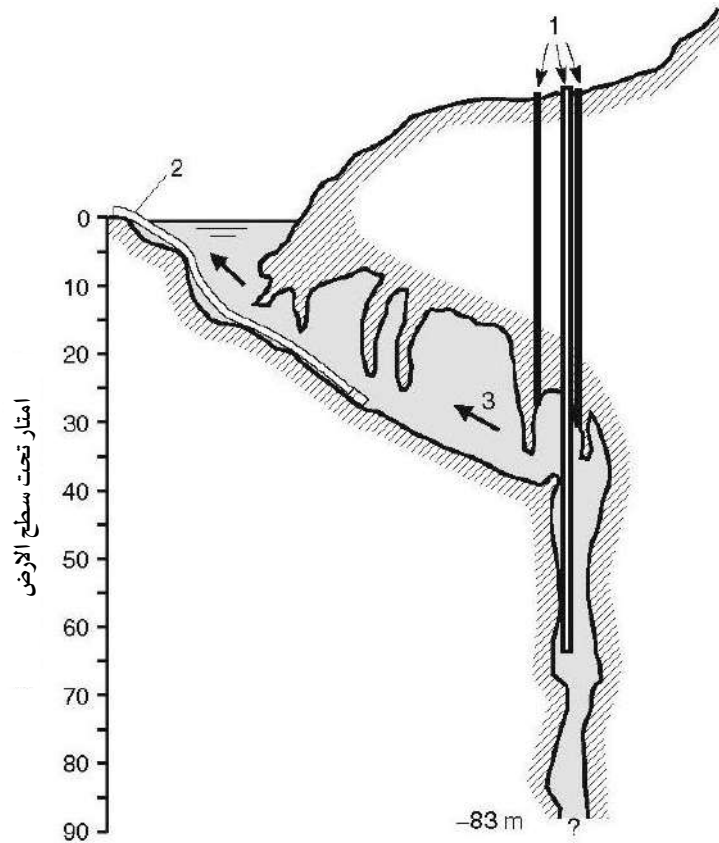
على الرغم من إجراء العديد من المشاريع والتجارب مع السدود الجوفية في أوروبا وفي شمال أمريكا الشمالية (Peric et al., 1980; P. Milanovic, 2000, 2004)، فإن التجربة العملية الرئيسية تم الحصول عليها من المشاريع المنفذة في الصين (Yaoru, Jie, and Zhang, 1973; Yaoru, 1986) واليابان (Ishida et al., 2005). في الصين وحدها، تم الانتهاء من حوالي ٢٠ خزاناً تحت الأرض لأغراض مختلفة (إمدادات المياه، والري، والطاقة الكهرومائية) وتتيح تخزين المياه التي تتراوح بين  $10^6 \times 31$  م<sup>٣</sup> إلى  $10^7 \times 31$  م<sup>٣</sup> في خزانات فردية. على الرغم من أن هذه المشاريع تختلف في التصميم، إلا أن الحلول الموصوفة سابقاً مع وجود سد أمام النبع وسد قناة التصريف كانت من بين أكثر الحلول التي تم تنفيذها (الشكل ٩-٤٤). يعتبر خزان كويي في مقاطعة يوننان أحد أكبر هذه الخزانات، حيث تم تشكيله خلف سد بارتفاع ٢٥ متراً؛ ويبلغ فرق الرأس الهيدروليكي بين الخزان الجوفي (السد) ومحطة الطاقة السطحية المنحدرة إلى الأسفل ١٠٩ أمتار لتوليد ٢٥ ميغاواط من الطاقة الكهربائية (Yaoru, 1986).

### تنظيم الينابيع المالحة

إن وجود ينابيع مياه عذبة تحت سطح البحر في سلسلة تلال كالانكيس على الخط الساحلي بين مارسيليس وكاسيس معروف منذ سنوات عديدة. أكبر نبعين هما بورميو وبيستوان ويصرفان معاً ٣ م<sup>٣</sup>/ثانية من خلال القنوات الكارستية المغمورة. في عام ١٩٦٤، ولإيجاد استجابة مناسبة للطلبات المتزايدة بسرعة على المياه في مدينة مرسيليا، قامت مؤسستان فرنسيتان هما مكتب البحوث الجيولوجية والتعدين (BRGM) وشركة مياه محلية من مرسيليا (SEM)، بالاتحاد لتصبحا جمعية Syndicat de Recherches de Port-Miou وأجرت مسحاً حقلياً موسعاً: مسح جيولوجي وجيوفيزيائي، وطوبوغرافي، وقياسات التدفق، واختبار الصبغة، واستكشاف الغوص في بورت-ميو (على عمق ١٤٧ متراً تحت سطح البحر وعلى مسافة ٢٢٣٠ متراً من المدخل)، وفي بيس طوان (على عمق ٣١ متراً تحت سطح البحر وعلى مسافة ٣ كم تقريباً من المدخل).

أدى مسح بورت ميو إلى بناء أول سد تحت الأرض في عام ١٩٧٢ (الشكل ٩-٤٥) وإغلاق كامل لممر الكهف الطبيعي بسد ثاني تحت الأرض (Potier, Ricour, and Tar dieu, 2005). وكان الهدف من السد الأول هو منع تسرب المياه المالحة دون تعديل الضغط في طبقة المياه الجوفية. تم اعتماد مبدأ سد "chicane". وقد تضمن ذلك بناء زوج من السدود على بعد ٥٣٠ متر من مخرج البحر: سد في أعلى المنبع على أرضية الرواق وسد في أسفل المجرى على الرواق (الشكل ٩-٤٥). لم يوقف بناء سدود chicanes المياه المالحة تماماً من تلويث المياه الجوفية العذبة، ولكن كان له تأثير إيجابي كبير: بعد بناء السد، انخفضت ملوحة المياه من ٤-٥ جم/لتر إلى ٢-٣ جم/لتر عند السطح ومن ١٨-٢٠ جم/لتر إلى ٣-٤ جم/لتر عند منبع السد على عمق ٢٠ متراً تحت سطح البحر. وبعد بضع سنوات،

تقرر تعديل المشروع الأولي بإغلاق الممر بالكامل وإنشاء مجرى مائي..وقد تم اتخاذ العديد من التدابير الأخرى للتحكم في الضغط في طبقة المياه الجوفية خلال نوبات الفيضان، وفي الوقت نفسه، الحد من تسرب المياه المالحة. ومع ذلك، فإن الوقاية الكاملة من التملح لم تكن ممكنة.



الشكل ٩-٤٣ نبع مودرو أوكو ("العين اللازوردية") في كروباتش، نيس، صربيا: (١) البئر والآبار الاستكشافية، (٢) المضخة وخط الأنابيب، (٣) اتجاه تدفق المياه الجوفية. (بعد Jevtic et al., 2005).

## مر اقية آثار تنظيم الينابيع

مكنت المسوحات الهيدرولوجية التي أجريت خلال العقدين الأخيرين من القرن العشرين من بناء العديد من الأنظمة الناجحة للتحكم الاصطناعي في طبقات المياه الجوفية الكارستية في صربيا (Stevanovic et al., 2007).

تم إنشاء أكبر نظام للتحكم في طبقة المياه الجوفية في نبع مرليس الكارستي (معدل التدفق ٨٠-١٠٠٠ لتر/ثانية) كجزء من نظام المياه الإقليمي، "بوغوفينا"، الذي يزود العديد من بلدات منطقة تيموك في شرق صربيا. هذا المشروع هو حل انتقالي إلى أن يتم بناء السد السطحي على نهر كرني تيموك القريب.

وكان جزء مهم من المشروع هو إنشاء نظام مراقبة وإنذار لمنع حدوث أي اضطراب في تدفق النهر الملحوظ تاريخياً خلال ظروف التدفق الأساسي (الشكل ٩-٤٦)، وهو المطلب الرئيسي لسلطات إدارة المياه. تتكون شبكة الرصد من ٤ محطات مناخية جديدة و ١٠ محطات رصد على نهر كرني تيموك ورو افده. إن معادلة التوازن المائي المقدرة لطبقة المياه الجوفية الكارستية في نهر مرليس لسنة جفاف هيدرولوجية هي

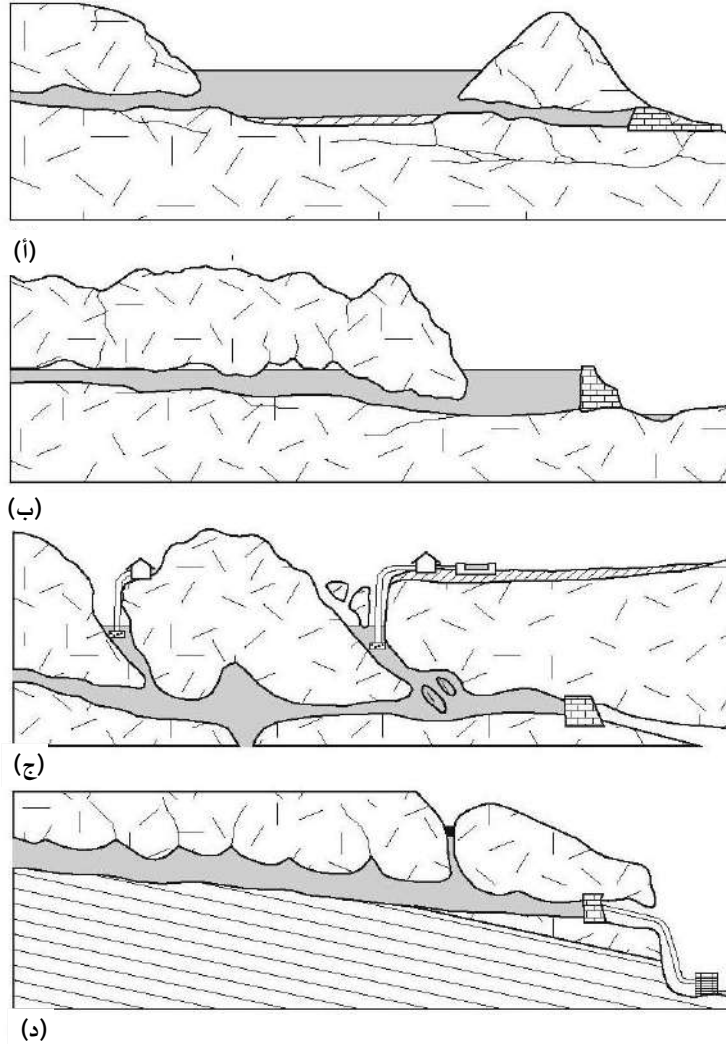
$$I_{ef} + Q_{sf} = Q_{sp} + Q_{und} \pm V \pm E$$

$$8.2 + 7.2 = 8.8 + 8.2 - 1.6 (\times 10^6 m^3)$$

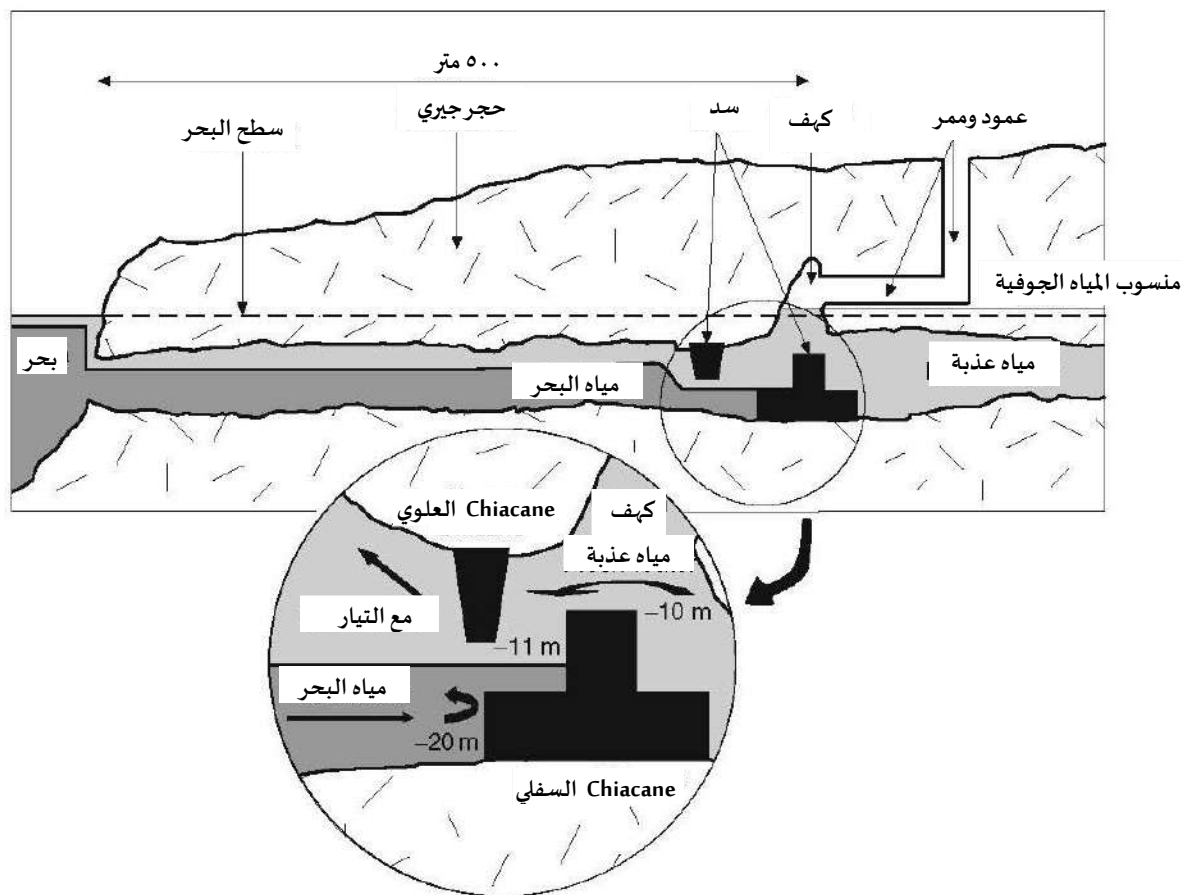
حيث  $I_{ef}$  هو التسرب الفعال (في هذه الحالة ٢٠ في المائة من هطول الأمطار)؛  $Q_{sf}$  هو تسرب المياه السطحية من عدة مجاري مائية غارقة في مستجمعات المياه العلوية؛  $Q_{sp}$  هو التصريف من خلال النبع؛  $Q_{und}$  هو الصرف الجوفي في مجرى نهر كرني تيموك؛  $V$  هو التغير السنوي لاحتياطي المياه الجوفية؛  $E$  هو خطأ حسابي محتمل. لتقدير الظروف الفيزيائية للتحكم في طبقة المياه الجوفية، تم إجراء اختبار ضخ استمر عدة أيام أُجري في نبع مرليس. قبل الضخ، كان التدفق الطبيعي للنبع قبل الضخ ١٧٢ لتر/ثانية، بينما خلال الاختبار، تم ضخ ٣٢٥ لتر/ثانية باستمرار (Stevanovic and Dragisic, 1995).

وكان السحب عند التصريف ٢ م، بينما انخفض المنسوب في أقرب آبار المراقبة بمقدار متر واحد فقط (الشكل ٩-٤٧ و ٩-٤٨). ويبين الشكل ٩-٤٩ السحب المحسوب عند النبع مقابل معدلات ضخ مختلفة لمتوسط نفاذية طبقة المياه الجوفية ٠,٢ م/ثانية المحددة من اختبار الضخ. أثناء اختبار الضخ، أدى التبع المستمر لنهر كرني تيموك بواسطة صبغة الفلورسين إلى تحديد عدم وجود آثار في النبع. وهذا يؤكد دوران المياه الجوفية العميقة نحو النبع وعدم فقدان التدفق النهري عند السحب المحدد في النبع. شمل التصميم النهائي لنظام إمدادات المياه في مرليس أربعة آبار استغلالية (الشكل ٩-٥٠) وشبكة مراقبة على نهر كرني تيموك. وتراوح معدلات ضخ الآبار الفردية من ٥٠ إلى ١١٠ لتر/ثانية. ومعدل الاستخراج المجمع للنظام الجديد، مقارنةً بالتدفق الطبيعي الأدنى للنبع لمرليس، زاد بنسبة ٤٠٠ في المائة تقريباً. واستناداً إلى نتائج التحريات، تم إصدار تصريح الاستغلال لمصدر مرليس من قبل المنظمين لضخ غير محدود من الآبار لجميع تدفقات نهر كرني تيموك التي تزيد عن ٨٥٠ لتر/ثانية. تم وضع قيود جزئية

للتدفقات الأقل. ومع ذلك، منذ أن أصبح النظام الجديد يعمل بكامل طاقته، لم يتم تسجيل أي تراجع أو انخفاض كبير في التدفق الطبيعي للنهر خلال ظروف التدفق الأساسي (Stevanovic et al., 2007). خلال السنتين اللتين تم تحليلهما (٢٠٠٥ و ٢٠٠٦)، بلغ إجمالي حجم المياه الجوفية المستخرجة  $1.6 \times 3$  م٣ أدت إلى انخفاض التدفق في نهر كرني تيموك بنسبة ٧,٥ في المائة فقط (الشكل ٩-٥١).



الشكل ٩-٤٤ مشاريع تنظيم الينابيع المنفذة في الصين، (أ و ب) مع خزانات جوفية و سطحية، (ج) مع سد جوفي وضخ المياه من المجاري العميقة، (د) مع سد جوفي ونقل المياه بالجاذبية إلى خزان المياه. (معدلة من Yaoru, 1986).

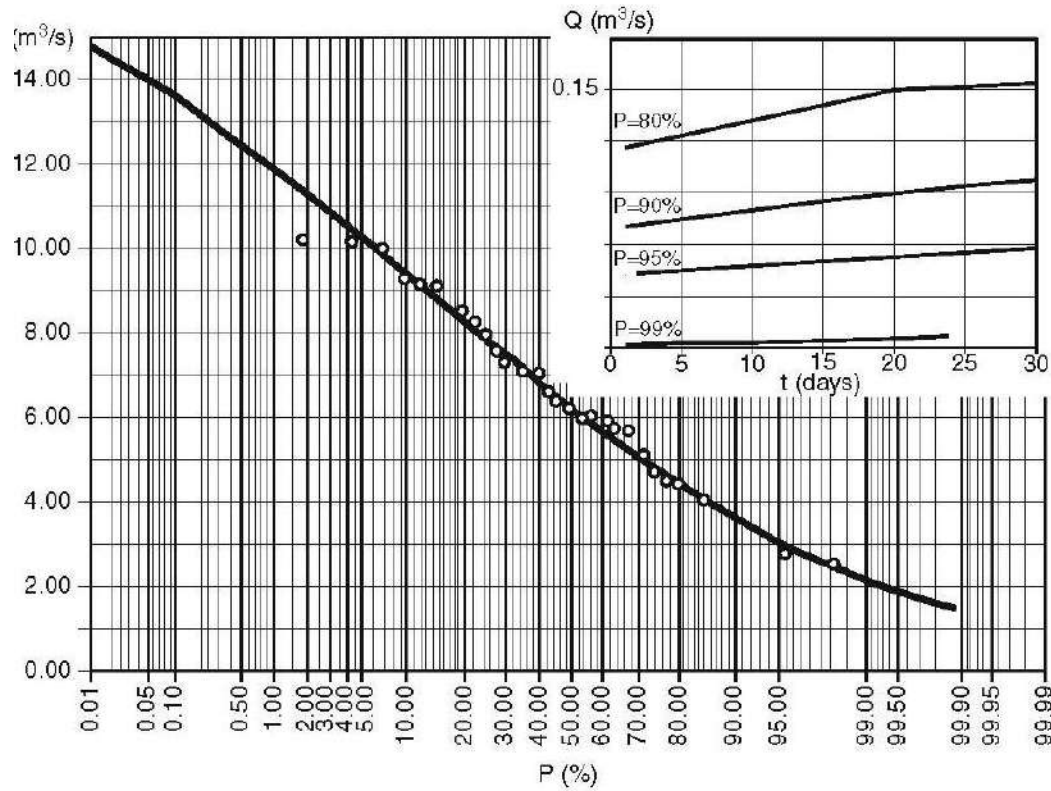


الشكل ٩-٤٥ سد بورت ميو الجوفي. يدفع السد المقلوب المياه العذبة إلى الأسفل، بينما يمنع السد الموجود على أرضية الكهف المياه المالحة من الزحف إلى أعلى النهر في رواق الاستغلال. (بعد Potier, 2005).

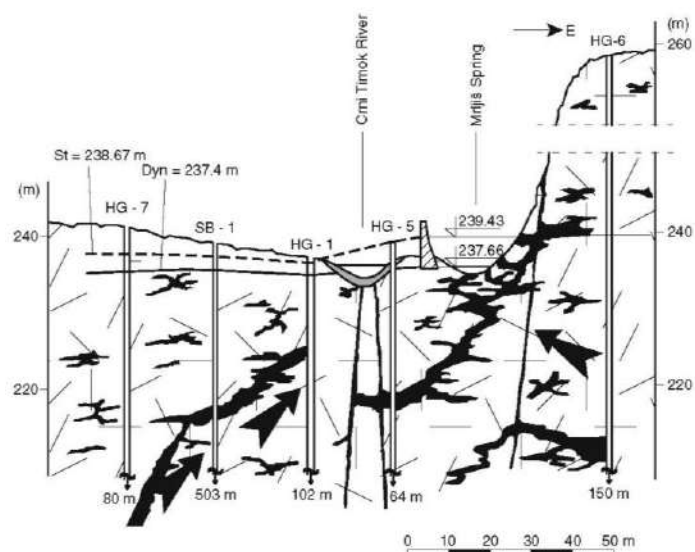
كما أكدت المقارنة بين هطول الأمطار السنوي والتدفق السنوي لنهر كرني تيموك قبل وبعد التنظيم أيضاً وجود تأثير طفيف فقط من قبل المأخذ الجديد على نظام تدفق النهر (الشكل ٩-٥٢).

ومع ذلك، فإن هذا النوع من التحكم في النبع له آثار أخرى على البيئة، سواء كانت إيجابية وسلبية على حد سواء. فنتيجة للضخ المكثف، يجف نبع مرلجيس كل عام خلال فترة الركود، بينما تتعافى تدفقات الينابيع بانتظام في أواخر الخريف أو خلال فصل الشتاء. مقارنة جودة المياه الجوفية قبل وبعد بناء آبار الضخ الزائد في الينابيع تظهر تأثيراً إيجابياً بشكل عام من تنظيم النبع. بعض مؤشرات جودة المياه التي كانت غير مواتية في السابق مثل الزيادة الطفيفة في تمعدن ومحتوى أيونات المغنيسيوم وأيونات ثاني أكسيد الكبريت في المياه الجوفية، والتي كانت نتيجة لبطء الدوران داخل الأجزاء العميقة من طبقة المياه الجوفية، والتي

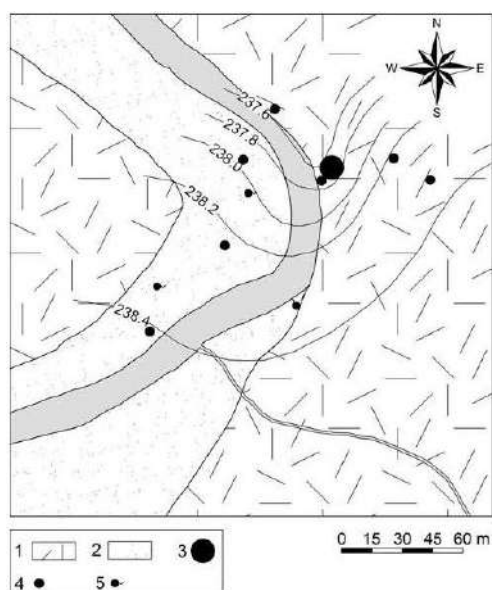
تحسنت نتيجة الضخ. أكثر من ذلك، فإن مشاكل جودة المياه الشائعة في طبقات المياه الجوفية الكارستية، مثل تعكر الينابيع والتلوث البكتريولوجي، قد اختفت الآن تقريباً. وبصفة عامة، فإن المياه الجوفية المستخرجة منخفضة التمعدن وجيدة (التوصيل الكهربائي هو ٤٠٠-٤٥٠ مللي ثانية/سم)، ولا تتطلب أي معالجة باستثناء المعالجة بالكلور قبل استهلاكها.



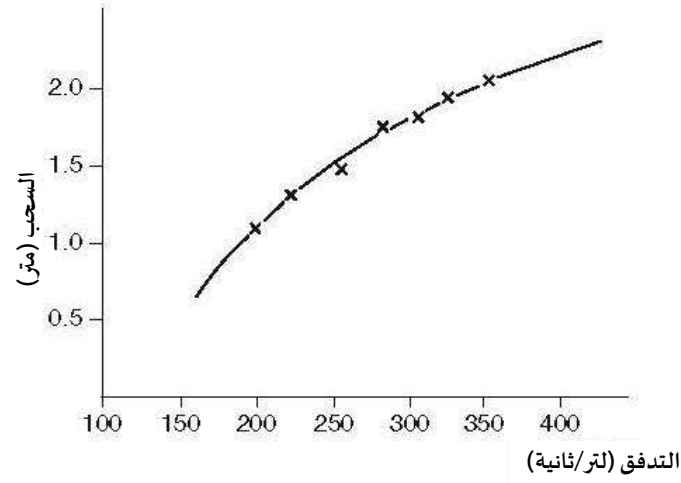
الشكل ٩-٤٦-٩ احتمال ومدة الحد الأدنى لمتوسط التدفق الشهري الأدنى لكرني تيموك.



الشكل ٩-٤٧ اختبار الضخ في نبع مرلجيس: St = منسوب المياه الجوفية الساكن (قبل الضخ); Dyn = السحب (المستوى الديناميكي).



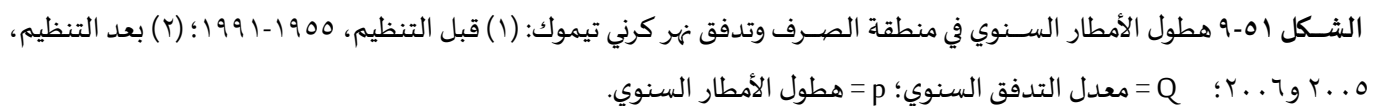
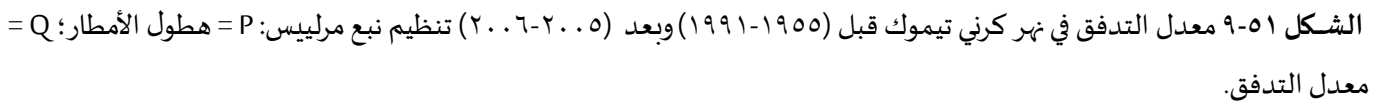
الشكل ٩-٤٨ خريطة نبع مرلجيس والخطوط الكنتورية لمنسوب المياه الجوفية أثناء ضخ الينبوع: (١) طبقة المياه الجوفية الكارثية، (٢) الطميية، (٣) نبع مرلجيس، (٤) البئر، (٥) النبع الصغير.



الشكل ٩-٤٩ السحب (S) مقابل معدل الضخ (Q) في نبع Mrljis.



الشكل ٩-٥٠ ضخ البئر 4 BOG بين نهر Crni Timok ونبع Mrljis.



## المراجع

- Avias, J., 1984. Captage des sources karstiques avec pompage en periode d'etiage. L'exemple de la source du Lez. In: Burger, A., Dubertet, L. (Eds.), *Hydrogeology of Karstic Terrains, Case Histories, Int. Contrib. to Hydrogeol.*, vol. 1. IAH, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 117–119.
- Burdon, D., Safadi, C., 1963. Ras-El-Ain: The great karst spring of Mesopotamia. An hydrogeological study. *J. Hydrol.* 1, 58–95.
- Burke, J.J., Moench, H.M., 2000. Groundwater and society: Resources, tensions and opportunities. Spec ed. of DESA and ISET, UN public, ST/ESA/265, New York.
- Coffman, C.R., John, B.C., 1984. Spring water development. Assistance to soil and water conservation programme — phase II.
- Field Doc. no. 7 ETH/81/003. Soil and water conservation. Dept. of Min. of Agri. Ethiopia and FAO, Addis Ababa.
- Custodio, E., 1992. Hydrogeological and hydrochemical aspects of aquifer overexploitation. In: *Selec. Pap. of IAH*, vol. 3. Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 3–27.
- Filipovic, B., Dimitrijevic, N., 1991. Mineral waters [in Serbian]. Spec. ed. Fac. Min. Geol, (FMG), University of Belgrade, Belgrade, Serbia.
- Fridleifsson, G.O., Albertsson, A., 2008. Geothermal energy and the energy race. Abstracts of 33rd Intern. Geol. Congress, on CD, Oslo.
- Gaon, M., 1975. Design of spring capture and Mihajlovac's waterworks [in Serbian]. Hidrosanitas, WIGA Co., Belgrade, Serbia (unpublished).
- Gaon, M., 1987. Sjenica water supply project. Design and report [in Serbian]. Hidrosanitas, WIGA Co., Belgrade, Serbia (unpublished).
- Grant, M., Donaldson, I., Bixley, P., 1982. Geothermal reservoir engineering. In: *Energ. Sci. and Engin. Res. Techn. Manag.* Academic Press, New York.
- Graziadei, W., Zötl, J.G., 1984. Karstwater gallery and hydroelectric power plant "Mušhlau" — The water supply of Innsbruck (Austria). In: Burger, A., Dubertet, L. (Eds.), *Hydrogeology of Karstic Terrains, Case Histories, Int. Contrib. to Hydrogeol.*, vol. 1. IAH, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 113–116.

- Hole, F., Smith, R., 2004. Arid land agriculture in northeastern Syria—Will this be a tragedy of the commons? In: Gutman, G., et al., (Eds.), *Land Change Science*. Kluwer Acad. Publ., pp. 209–222.
- Ishida, S., Tsuchihara, T., Fazeli, M.A., Imaizumi, M., 2005. Evaluation of impact of an irrigation project with a mega-subsurface dam on nitrate concentration in groundwater from the Ryukyu limestone aquifer, Miyako island, Okinawa, Japan. In: Stevanovic, Z., Milanovic, P. (Eds.), *Water Resources and Environmental Problems in Karst—CVIJIC ' 2005*, Spec. ed. FMG, Belgrade, Serbia, pp. 121–126.
- Jahic, M., 1988. *Urban Waterworks* [in Serbian]. Society of Water Technology, Belgrade, Serbia.
- Jevtic, G., Dimkic, D., Dimkic, M., Josipovic, J., 2005. Regulation of the Krupac spring outflow regime. In: Stevanovic, Z., Milanovic, P. (Eds.), *Water Resources and Environmental Problems in Karst—CVIJIC ' 2005*, Spec. ed., FMG, Belgrade, Serbia, pp. 321–326.
- Karanjac, J., Gu "nay, G., 1980. Dumanli Spring, Turkey—The Largest Karstic Spring in the World? *J. Hydrol.* 45, 219–231.
- Kresic, N., 2009. *Groundwater resources: Sustainability, management and restoration*. McGraw-Hill, New York.
- Lombardi, L., Corazza, A., 2008. L'acqua e la citta ` in epoca antica. In: *La Geologia di Roma, dal centro storico alla periferia*, Part I. In: *Memoire Serv. Geol. d'Italia*, vol. LXXX. S.E.L.C.A, Florence, pp. 189–219.
- Margat, J., 1992. The overexploitation of aquifers. In: *Selec. Selec. Pap. of IAH*, vol. 3. Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 29–40.
- Milanovic, P., 2000. *Geological engineering in karst. Dams, reservoirs, grouting, groundwater protection, water tapping, tunneling*. Zebra Publ. Ltd, Belgrade, Serbia.
- Milanovic, P., 2004. *Water resources engineering in karst*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Milanovic, S., 2005. Hydrogeological characteristics of some deep siphonal springs in Serbia and Montenegro karst. In: Stevanovic, P., Milanovic, P. (Eds.), *Water Resources and Environmental Problems in Karst—CVIJIC ' 2005*, Spec. ed. FMG, Belgrade, Serbia, pp. 451–458.
- Peric, J., Simic, M., Milivojevic, M., 1980. Feasibility study of storing Beli Drim water within underground reservoirs for water supply and irrigation of Metohija [in Serbian]. In: *Transactions of FMG*, vol. 22. Belgrade, Serbia.

- Potier, L., Ricour, J., Tardieu, B., 2005. Port-Miou and Bestouan freshwater submarine springs (Cassis—France) investigations and works (1964—1978). In: Stevanovic, Z., Milanovic, P. (Eds.), *Water Resources and Environmental Problems in Karst—CVIJC ' 2005*, Spec. ed. FMG, Belgrade, Serbia, pp. 267—274.
- Povara, I., Marin, C., 1984. Hercule thermomineral spring. Hydrogeological and hydrochemical considerations. In: *Theoretical and Applied Karstology*. vol. 1. Bucharest, pp. 183—193.
- Stevanovic, Z., 2001. Subsurface dams—Efficient groundwater regulation scheme. Brayatti Press, 18 Erbil, Iraq, pp. 277—290.
- Stevanovic, Z., Dragisic, V., 1995. An example of regulation of karst aquifer. In: Gu "nay, G., Johnson, I. (Eds.), *Karst waters and environmental impacts*. Balkema, Rotterdam, pp. 19—26.
- Stevanovic, Z., Filipovic ' , B., 1994. Hydrogeology of carbonate rocks of Carpatho—Balkanides. In: Stevanovic, Z., Filipovic, B. (Eds.), *Ground waters in carbonate rocks of the Carpathian—Balkan mountain range*, Spec. ed. CBGA, Alston, Jersey, UK, pp. 35—112.
- Stevanovic, Z., Jemcov, I., Milanovic, S., 2007. Management of karst aquifers in Serbia for water supply. *Environ. Geol.* 51 (5), 743—748.
- Toulomudjian, C., 2005. The springs of Montenegro and Dinaric karst. In: Stevanovic, Z., Milanovic, P. (Eds.), *Water Resources and Environmental Problems in Karst—CVIJC ' 2005*, Spec. ed. FMG, Belgrade, Serbia, pp. 443—450.
- Vrba, J., 1996. Thermal mineral water springs in Karlovy Vary. *Environ. Geol.* 27 (2), 120—125.
- White, D.E., 1967. Some principles of geyser activity, mainly from Steamboat Springs, Nevada. *Amer. J. Sci.* 265, 641—684.
- Wohnlich, S., 1996. The spa of Baden-Baden, Germany. *Environ. Geol.* 27 (2), 108—109.
- Yaoru, L., 1986. Karst in China, Landscapes, types, rules [in Chinese]. Spec. ed. Geol. Publ. House, Beijing, China.
- Yaoru, L., Jie, X.A., Zhang, S.H., 1973. The development of karst in China and some of its hydrogeological and engineering geological conditions. *Acta Geol. Sinica* (1), 121—136.