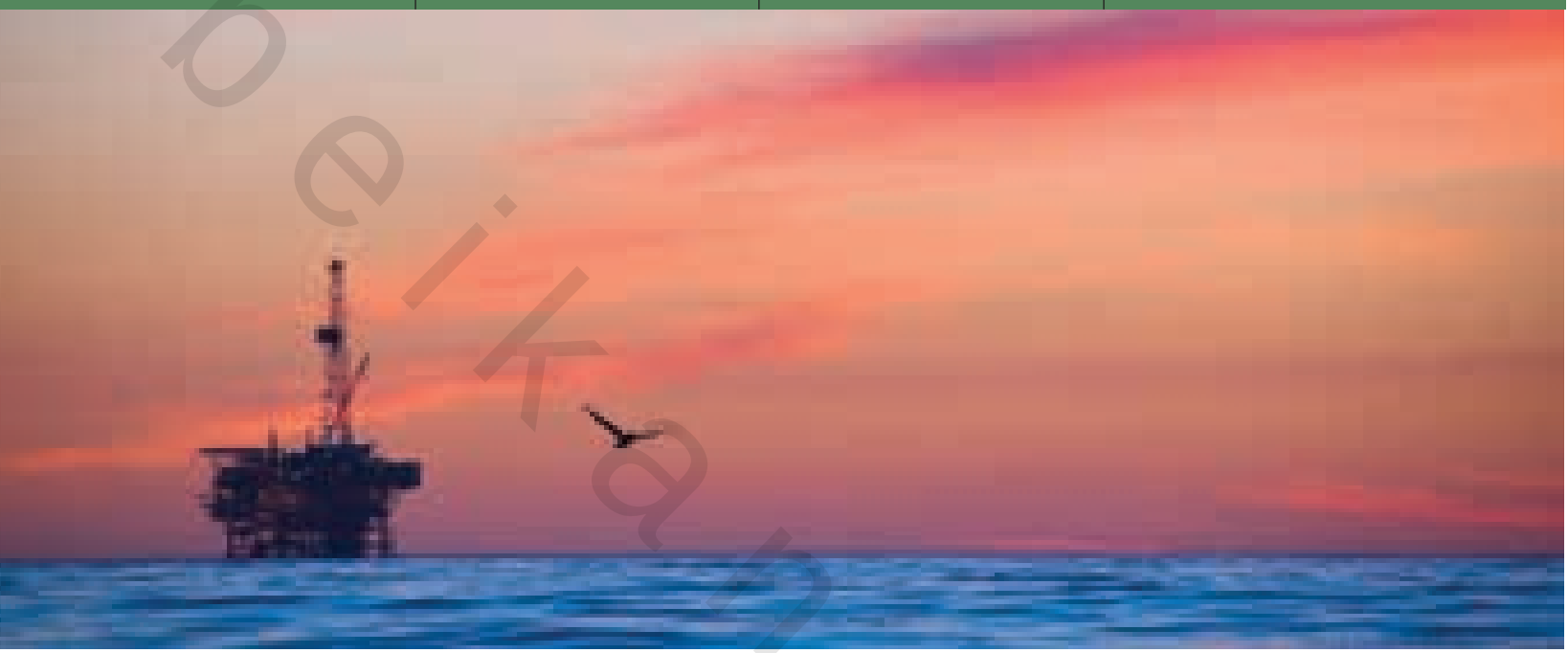
الجزء الثالث

الفصل 12
مصادر المياه

الفصل 13
تلوث المياه ومعالجتها

الفصل 14
المصادر المعدنية ومعالجتها

الفصل 15
مصادر الطاقة



تطوير استكشاف النفط في قناة سانتا بربارا في كاليفورنيا التي ما زالت تمثل نقطة خلاف في البحث عن طريقة لتلبية حاجتنا إلى النفط والمحافظة على البيئة معًا.

(Getty Images/National Geographic Creative/James Forte)

المصادر والتلوث Resources and Pollution

كان الشعب الأمريكي من الحضر في الجزء الأول من القرن العشرين. واليوم، يعيش جميع الأمريكيين تقريبًا في مناطق حضرية أو قريبة منها، بحيث تزيد الكثافة البشرية على 50000 نسمة. ومن المتوقع أنه بحلول عام 2000 سيكون ما يزيد على 50% من السكان مقيمين في مناطق حضرية. لذلك فإن نمو سكان الحضر من مظاهر الحياة الأساسية في الولايات المتحدة.

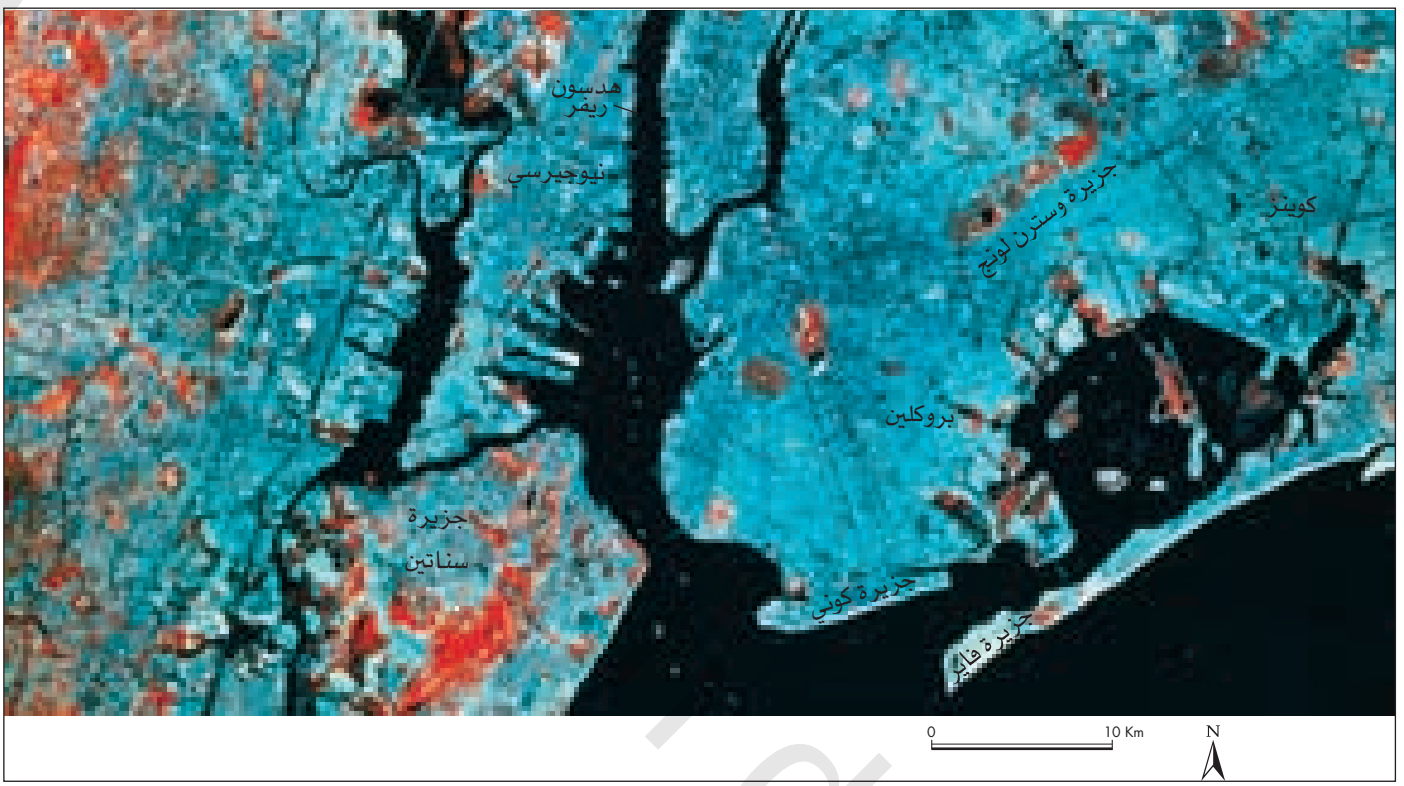
تهتم الفصول من 12 إلى 15 بالعلاقة المعقدة بين الشعب والمصادر، ولكون هذه العلاقات قوية جدًّا في المناطق الحضرية، فإن اهتمامًا خاصًّا قد أُعطي للمشكلات النابعة من الأنشطة البشرية والإهمال الذي يخلق وجه أرضنا الحضري. يستعرض الفصل 12 علاقات عدة بين علم المياه واستخداماتها، مؤكدًا العمليات المائية ووفرتها واستعمالاتها وإدارتها. أما الفصل 13 فيبحث في موضوع تلوث المياه.

ويهتم الفصل 14 بالمصادر المعدنية، في حين يبحث الفصل 15 موضوع الطاقة مع التأكيد على مصادرها وقضاياها البيئية.

obeikandl.com

الفصل الثاني عشر 12

مصادر المياه
Water Resources



صورة من ارتفاع عالٍ للونج إيلاند (Long Island)، تُظهر الصورة بروكلن (*Brooklyn*) وجزءًا من كوينز (*Queens*)، يمثّل اللون الأحمر الغطاء الأخضر السليم. ويشير المربّع الأحمر في مانهاتن آيلاند (*Manhattan Island*) إلى المتنزّه المركزي (*Central Park*) *(Science source / Photo Researchers, Inc)*.

12-1 الماء: منظور عام موجز
WATER: A BRIEF GLOBAL PERSPECTIVE

تتضمّن دورة الماء العامة أو الدورة الهيدرولوجية حركة الماء أو انتقاله من أحد مستودعات التخزين الأرضية، مثل المحيطات، والبحيرات، والغلاف الجوّي إلى المستودع الآخر، وفي إحدى أبسط صورها، يمكن تصوّر دورة الماء بماء يتحرّك من المحيطات إلى الغلاف الجوّي، ويتساقط من الجوّ على صورة مطر وثلج، ثمّ يعود إلى المحيطات بصورة جريان سطحي وجريان تحت سطحي، أو يعود إلى الجوّ بالتبخّر. يوضّح الشكل (12-1) الطبيعة التدويرية لحركة الماء، وتتضمّن العمليات الرئيسة لهذه الحركة: التبخّر، والهطل، والنتح (فقدان الماء من النباتات إلى الجو)، والجريان السطحي، وجريان المياه الجوفية تحت السطحي، وهي موضحة كمّيًّا في الشكل (12-2). تعادل كمّية الماء المنقولة سنويًّا من المحيط إلى اليابسة، الكمّية العائدة عن طريق الأنهار وجريان المياه الجوفية إلى المحيط؛ بسبب التوازن بين مجموع كمّية التبخّر والهطل[2]، والماء العائد إلى المحيط متغيّر؛ لأنّه يحمل الحصى والرمل والطمي والطين المعرّاة من الأرض، إضافة إلى أنّ الجريان العائد يحمل كثيرًا من الكيميائيات الطبيعية، أو المركبات المحتجزة التي صنعها الإنسان أو لها علاقة به، مثل المخلّفات العضوية والموادّ الغذائية، إضافة إلى آلاف الكيميائيات المستخدمة في الزراعة والصناعة والعمليات العمرانية.

الماء مصدر غير متجانس يتوافر بصورة سائل، أو صلب، أو غاز على سطح الأرض أو بالقرب منه، وقد يتراوح زمن مكوث الماء في المستودع أو الخزّان من أيّام قليلة إلى آلاف السنين، اعتمادًا على مكان توافره الخاص، (الجدول 12-1). أضف إلى ذلك أنّ أكثر من (99%) من مياه الأرض غير مناسبة للاستعمال البشري؛ إمّا بسبب الملوحة كما في حالة ماء البحر، أو بسبب حالة الماء وموقعه كما في حالة الماء المختزن في الجليد والمجالد، لذلك يتنافس الناس كلّهم على ما مقداره (1%) من المياه المتوافرة على الأرض[1].

12-2 المياه السطحية
SURFACE WATER

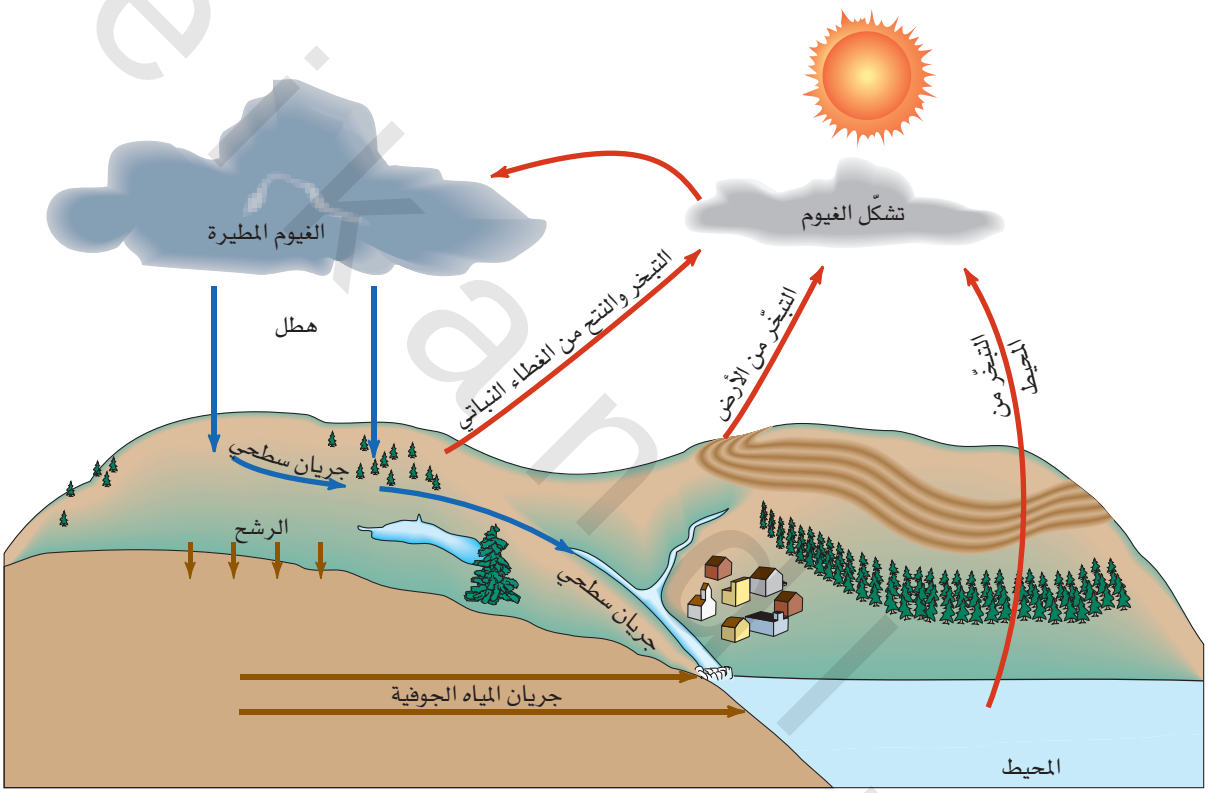
الجريان السطحي والإنتاج الترسيبي
SURFACE RUNOFF AND SEDIMENT YIELD

للجريان السطحي تأثيرات مهمّة على كلّ من نقل الموادّ الأرضية والتعرية، إذ يستطيع الماء السطحي إزاحة الأتربة والأجزاء الصخرية (الشكل 12-3).

الأهداف التعلّمية LEARNING OBJECTIVES

يُعدّ الماء واحدًا من المصادر الأساسية، ويُعدّ ضمان المحافظة على كمّية تزويد مائي كافية وآمنة ومستدامة واحدًا من أهمّ الأهداف البيئية، لذا، سندرس في هذا الفصل موضوع تزويد المياه واستخدامها وإدارتها، وسنركّز على الأهداف التعليمية الآتية:

- فهم دورة المياه والمفاهيم الأساسية المتعلّقة بتزويدها.
- فهم الأنواع الرئيسة لاستخدام المياه.
- تعرّف عمليات المياه الجوفية والسطحية الأساسية.
- القدرة على مناقشة المبادئ الرئيسة المتعلقة بإدارة المياه.
- معرفة مفهوم الأراضي الرطبة (Wetlands) وأهمّيتها البيئية.
- معرفة سبب نقص المياه العالمي وربطه بالتزويد الغذائي.



شكل (12–1) دورة الماء. رسم بياني مثالي يبيّن العمليات المهمّة للدورة المائية ونقل الماء، يكون التساقط في معظم المناطق بصورة ثلج، ويسهم ذوبانه في الربيع والصيف في زيادة الجريان السطحي وترشيح الماء إلى المياه الجوفية (عُدّل من المرجع:

(Modified after Council on Environmental Quality and Department of State, 1980. The Global Report to the Present, vol. 2).

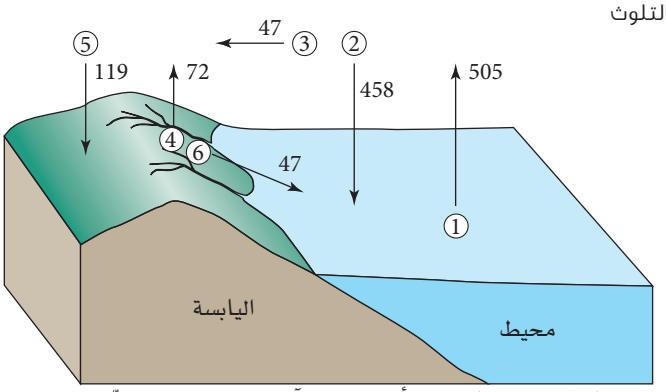
يستطيع الماء تحريك الموادّ في حالة ذائبة أو جزيئات معلّقة، ويعتمد عدد الجزيئات المنقولة عن طريق الماء السطحي وحجمها على كمّية المياه وعمقها، إضافة إلى سرعة الجريان، فكلّما كان جريان النهر أو الجدول سريعًا، كانت الجزيئات المحمولة أكبر، وعليه، تتوافر كمّيات أكبر للموادّ المنقولة؛ لذلك فإنّ العوامل التي تؤثّر في الجريان السطحي، تؤثّر أيضًا في عمليات تعرية الموادّ ونقلها وترسيبها.

يتوزع الماء الساقط على الأرض بين ما يسمّى (Watersheds)، أو مناطق تجميع مياه الأمطار وجريانها نحو نقطة واحدة أو حوض التصريف؛ وهو مساحة من الأرض تسهم في تجميع المياه ودفعها إلى جدول أو نهر معيّن، ويُعدّ حوض التصريف وحدة أساسية من مناظر التضاريس الطبيعية. يوضّح الشكل (12–4) حوضي تصريف متجاورين (أ و ب) لهما الصفات الجيولوجية نفسها، إذ يسمّى الحدّ الفاصل بين الحوضين (*Drainage divide*) خط تقسيم المياه. يمكن تقسيم أحواض التصريف الكبيرة إلى أحواض صغيرة، فعلى سبيل المثال:

حوض تصريف نهر المسسيبي يجري فيما مساحته(40%) من مساحة الولايات المتّحدة، ويحتوي على كثير من الأحواض الصغيرة، مثل حوضي أوهايو ومسسيبي، حيث يمكن أيضًا تقسيم الأحواض الصغيرة، مثل حوض أوهايو إلى أحواض أصغر، ونلاحظ أنّ نقطتين من المطر تفصل بينهما

مثال على موازنات الماء العالمية

- الماء المنقول إلى الأرض من الغلاف الجوّي (1)
= الماء الراجع للمحيط (6)
- مجموع المتبخّر (1) + (4)
= مجموع الهطل (2) + (5)



الجريان السنوي للماء على الأرض بوحدة آلاف الكيلومترات المكعّبة

(1) التبخّر من المحيطات للجوّ
(2) الهطل على المحيطات
(3) نقل الماء من الجوّ للأرض
(4) التبخّر للجوّ من الأرض
(5) الهطل على الأرض
(6) جريان الماء السطحي والجوفي من الأرض للمحيطات

شكل (12–2) النقل العالمي للمياه. حركة الماء في دورة الماء العالمية. وحدة القياس هي ألف كيلومتر مكعّب (km^3) في السنة (المعلومات من:

(Data from Gleick, P. H. 1993. An Introduction to Global Fresh Water Issues. Water in Crisis, P.H. Gleick, ed. New York: Oxford University Press. 3-12)

الجدول (12–1): التزويد المائي العالمي (أمثلة مختارة)

الموقع	المساحة السطحية	حجم الماء	نسبة مجموع الماء	متوسّط زمن المكوث المحسوب
المحيطات	361,000,000	1,230,000,000	97.2	آلاف السنوات
الغلاف الجوّي	510,000,000	12,700	0.001	9 أيّام
الجداول والأنهار	–	1,200	0.0001	أسبوعان
المياه الجوفية ضحلة لغاية عمق (0,8 km)	130,000,000	4,000,000	0.31	المئات إلى كثير من آلاف السنوات
البحيرات (الماء العذب)	855,000	123,000	0.009	عشرات السنوات
غطاء الجليد والمجالد	28,200,000	28,600,000	2.15	لغاية العشرات من آلاف السنوات وأكثر

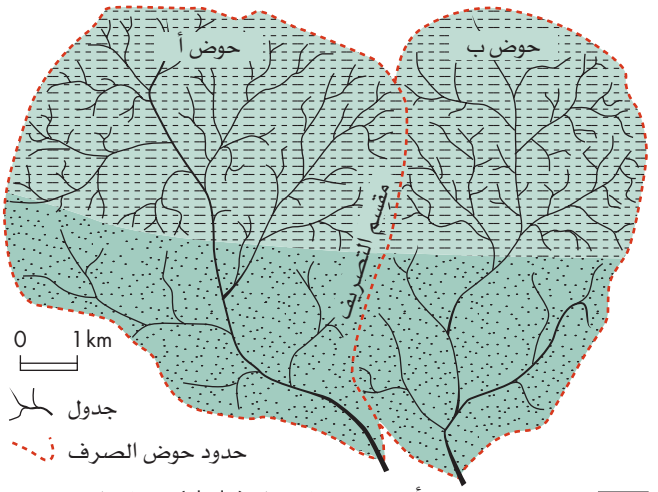
المصدر: *Data from U.S. Geological Survey.*

شكل (12–3) تعرية التربة. الجريان السطحي غالبًا ما يسبّب تشكيل أخاديد صغيرة مثل المبينة في هذا الشكل.

(المصدر: إذن من:

(Courtesy of U.S. Department of Agriculture)

obeikandl.com



الشكل (12–4) حوض تصريف. سيجري الماء الساقط على أحد جانبي الحدّ الفاصل الوسطي في الحوض أو في الجهة الأخرى. وسيجري الماء الساقط في الحوض (ب). كلا الحوضين لهما الجيولوجية نفسها المكوّنة من الغضار والرمل.

بضع سنتمترات فقط على جانبي مقسم التصريف القارّي، وهو مقسم تصريف كبير المقياس، وعلى جانبيه تنساب أنهار في اتجاهين متعاكسين، قد تنتهي هاتان النقطتان بعد أسابيع عدّة في محيطين مختلفين تفصل بينهما آلاف الكيلومترات، ويمكن أن نتصوّر أيضًا حوض التصريف بوصفه أرضًا تسهم بمائها الذي يجري على السطح لشبكة تصريف محدّدة، التي هي مجموعة من القنوات تشكّل مع بعضها حوض تصريف، حيث تتضمّن شبكة التصريف في حوض (أ) الشكل (12–4)، القنوات كلّها القادمة من جداول منابع المياه في أعلى حوض التصريف إلى القناة الرئيسة الوحيدة في أدنى حوض التصريف، لذلك فإنّ مصطلح حوض التصريف يعود على مساحة من الأرض، بينما يعود مصطلح شبكة التصريف على قنوات الأنهار والجداول الفعلية في حوض التصريف.

العوامل المؤثّرة في الجريان السطحي والنتاج الترسيبي

Factors Affecting Runoff and Sediment Yield

تختلف كمّية الجريان السطحي ونتاج الترسيب المحمول عن طريق الجريان السطحي بصورة كبيرة بين أحواض الترسيب والأنهار؛ بسبب اختلاف الخصائص الجيولوجية والطوبوغرافية والمناخية، ووفرة الغطاء النباتي، إضافة إلى استخدامات الأراضي كحوض التصريف المعين، وهي خصائص تتغيّر مع الزمن، إذ يمكن للمشاهد العادي أن يلاحظ الفرق بين كمّية الرسوبيات المحمولة عن طريق النهر في حالتي الفيضان والجريان الضعيف، حيث تختلط مياه الفيضانات بالطين.

العوامل الجيولوجية: تشمل العوامل الجيولوجية الرئيسة المؤثّرة في الجريان السطحي والترسيب كلًّا من نوع الصخور والتربة، والتركيب المعدني، ودرجة التجوية، والخصائص التركيبية للتربة والصخور، إذ غالبًا ما تسمح التربة ذات المحتوى الطيني الكثيف على سطح صخر غضاري، وأنواع صخور متكشّفة مع قليل من التصدّعات، بحركة قليلة للماء إلى الأسفل، وأن تصبح جزءًا من الجريان تحت السطحي، حيث يكون الجريان السطحي للماء الساقط على هذا النوع من الموادّ سريعًا، وينتج عنه عدد من الجداول، وعلى النقيض من ذلك، تمتصّ التربة ذات المحتوى الرملي على أسطح رملية، وصخور ذات تشقّق عالٍ كمّية أكبر من الماء الهاطل، وتمتاز بجريان سطحي أقلّ وجداول أقلّ، انظر الشكل (12–4).

يقع الغضار (Shale) تحت الجزء العلوي من الحوضين (أ، ب)، بينما يقع الحجر الرملي تحت الجزء السفلي من الحوضين؛ ولأنّ للغضار قدرة أكبر على تكوين جريان سطحي مقارنة بالرمل ذي المسامية العالية، فإنّ كثافة التصريف – التي هي طول قناة الجدول في وحدة المساحة – تكون أكبر بكثير في الغضار مقارنة بمنطقة الرمل، إذ تتحدّد كثافة التصريف لأيّ منطقة من الأرض عن طريق قياس مجموع أطوال قنوات الجداول والأنهار في المنطقة، وقسمتها على مجموع المساحة.

العوامل الطوبوغرافية: يعود مصطلح (*relief*) على الفرق في الارتفاع بين أعلى نقطة وأخفض نقطة لأيّ منطقة من الأرض، فكلّما كان فرق الارتفاع لحوض التصريف أكبر، ازدادت احتمالية وجود أنهار ذات انحدار حادّ في الحوض، وانحدار أعلى للأرض، وميلان بالقرب من القناة، إذ تكمن أهمّية فرق الارتفاع والانحدار في تأثيرهما في سرعة الماء في النهر، ومعدّل ترشيح الماء في التربة والصخور، ومعدّل الجريان فوق السطح، وعليه، فإنّ هذه الخصائص تؤثّر في معدّل دخول الجريان السطحي وتحت السطحي إلى الأنهار.

العوامل المناخية: تتضمّن العوامل المناخية المؤثّرة في الجريان السطحي ونقل الرسوبيات كلًّا من: نوع الهطل الحاصل، وكثافته، ومدّته نسبةً إلى مجموع التغيّر المناخي السنوي، وكذلك أنواع العواصف المطرية، حيث يرتبط تكوّن كمّية كبيرة من الماء والرسوبيات بوجه عام بتوافر عواصف مطرية قليلة التكرار وعالية الشدّة، فوق طوبوغرافية غير مستقرّة ومنحدرة، تقع تحتها صخور وأتربة ذات قدرة تعرية عالية.

عوامل الغطاء النباتي: يؤثر الغطاء النباتي في الجريان السطحي والنتاج الترسيبي، فهو قادر على التأثير في جريان الأنهار بطرق عدّة، هي:

- قد يقلّل الغطاء النباتي من الجريان السطحي بزيادة كمّية المطر المحتجز والمزال عن طريق التبخّر.
- يؤدّي نقصان الغطاء النباتي أو فقدانه بسبب التغيّر المناخي، والحرائق، واستخدامات الأراضي مثل رعي المواشي، إلى زيادة الجريان السطحي أو إنتاج الرسوبيات أو كليهما، (الشكل 12–5).
- تقلّل النباتات المتوافرة على جانبي النهر تعرية التيّار العائد؛ لأنّ جذورها تقيّد أجزاء التربة وتثبّتها في مكانها.
- في مناطق تجميع وجريان مياه الأمطار نحو نقطة واحدة (أو أحواض التصريف) في الغابات، قد يكون تأثير حطام القطع الشجرية الكبير المكوّن من الجذوع وقطع الخشب كبيرًا على صورة قناة النهر أو العمليات النهرية.

وتنتج بيئات البرك المهمّة بالنسبة إلى مساكن الأسماك في أحواض التصريف ذات الانحدار الشديد عن طريق حطام أخشاب كبير، (الشكل 12–6).

obeikan.com

(أ)

(ب)

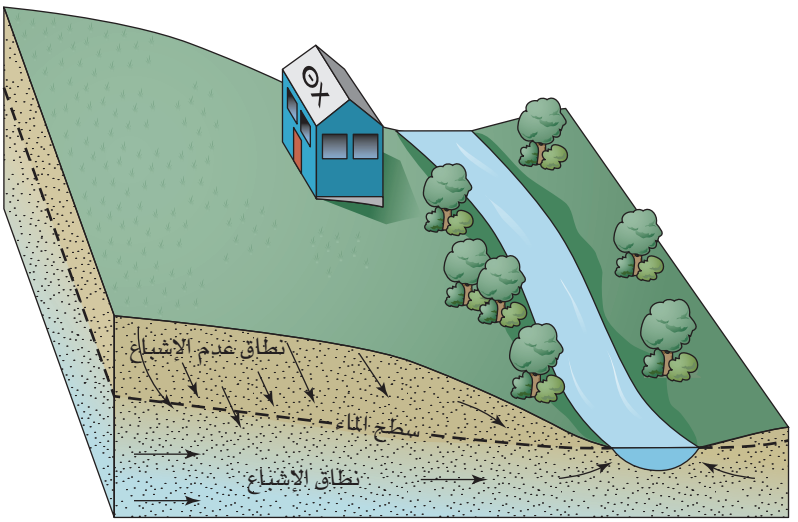
الشكل (12–5) الحرائق والرعي الجائر يزيدان من تعرية التربة. (أ) فقدان الغطاء النباتي عن طريق حرائق الغابات في إحدى غابات ياكون/ كندا *(Yukon Territory Canada)* عام 1995م (المرجع: *Stephen J. Krasemann / Photo Research, Inc*). (ب) رعي الأغنام (هنا في جنوب إفريقيا) يمكن أن يزيد الجريان السطحي، ما يؤدّي إلى تعرية التربة (المرجع: *Nigel J. Dennis Photo Researchers, Inc*).

الشكل (12–6) حطام خشبي كبير في نهر. تُعدّ جذوع الخشب الأحمر الكبيرة في جدول برايري في كاليفورنيا *(Prairie Creek California)* الموضّحة هنا، مسؤولة عن نشأة برك مائية مهمّة في تزويد مساكن الأسماك للبيئة النهرية. مثل هذه الحطامات الخشبية الكبيرة قد تمكث في النهر مئات السنوات (المرجع: *Charles A. Lauzy / Charless Mauzy Photography*).

عوامل استعمالات الأراضي: تُعدّ الزراعة والتنمية الحضرية استخدامات أراضٍ ذات تأثير في الجريان السطحي والنتاج الترسيبي، وعادة ما تزيد الزراعة من الجريان السطحي والنتاج الترسيبي، حيث تحرث الأرض للمحصول، (انظر الفصل الثالث)، قد يؤدّي التحضّر من خلال إنشاء الشوارع، ومواقف السيّارات، والمباني السكنية والصناعية إلى زيادة في الجريان السطحي بصورة كبيرة؛ بسبب الكمّيات الكبيرة للمساحات المعبّدة غير المنفّذة المغطية لسطح الأرض (انظر الفصلين الثالث والسادس).

12-3 الماء الجوفي GROUNDWATER

المصدر الرئيس للمياه الجوفية هو الهطل المطري، الذي يتسرب من خلال سطح الأرض إلى التربة والصخور، وأهمّ نطاقين في المياه الجوفية، هما **نطاق التهوية (Vadose Zone)** و**نطاق الإشباع (Zone of Saturation)**، انظر الشكل (12–7)، ويشتمل نطاق التهوية على الموادّ الأرضية فوق **سطح المياه الجوفية (water table)**، الذي هو الحدّ



شكل (12–7) نطاقات الماء الجوفي. رسم توضيحي نموذجي يبيّن نطاقي الماء الجوفي: نطاق عدم الإشباع ونطاق الإشباع، ويظهر في الرسم أيضًا سطح الماء واتّجاه جريان الماء الجوفي.

الفاصل بين النطاقين وهذه الموادّ مكوّنة من التربة ورسوبيات الأنهار (alluvium) والصخور، ونادرًا ما يكون نطاق التهوية مشبعًا، إذ كان يسمّى حتى وقت قريب، نطاق عدم الإشباع (*Unsaturated Zone*)، إلّا أن بعض المناطق المشبعة قد تتوافر في هذا النطاق، عندما يتحرّك الماء خلالها بعد الهطل، ولهذا النطاق أهمّية كبيرة؛ لأنّ الملوّثات التي ترشح من السطح تمرّ من خلاله، قبل أن تصل نطاق الإشباع تحت سطح المياه الجوفية؛ لذلك يُعدّ هذا النطاق خلال عمليات المراقبة البيئية السطحية، منطقة تحذير مبكّر لتلوّث محتمل للمياه الجوفية.

يبدأ الماء الذي يصل نطاق التشبّع عادة رحلته من خلال الرّشح من السطح، حيث تشتمل العوامل المؤثّرة في عملية الرّشح على الآتي:

- **الطوبوغرافية:** كلّما كانت الطوبوغرافية أكثر انحدارًا، كان الجريان السطحي أكبر، ما يقلل من الرّشح.
- **نوعية التربة والصخور:** تمتلك التربة والصخور الغنية بالفتحات الكثيرة الناتجة عن التشقّقات أو الفراغات بين الحبيبات معدّلات ترشيح عالية.
- **كمّية الهطل وشدّته:** التساقط ذو الشدّة المتدنية يدعم حدوث الرّشح، بينما يدعم التساقط ذو الشدة العالية الجريان السطحي.
- **الغطاء النباتي:** الأوراق والجذوع تحتجز الهطل، ثمّ ينساب الماء بهدوء على سطح الأرض، ما يزيد من الرّشح.
- **استخدام الأراضي:** تقلّل الأراضي الحضرية ذات المناطق المعبّدة والأسطح من الرّشح، أمّا الممارسات الزراعية فغالبًا ما تزيد الجريان السطحي وتعرية التربة مقلّلة من الرّشح، كذلك يقلّل قطع الأشجار بالكامل في بعض المناطق من الغطاء النباتي، ما يزيد من تعرية التربة والجريان السطحي، وذلك يقلّل من الرّشح.

يدخل الماء المتسرّب خلال نطاق عدم التهوية إلى نطاق الإشباع، حيث يحدث جريان الماء الجوفي، وتمتلئ بالماء الفراغات جميعها الموجودة بين الحبّات في التربة والصخور التي تشكّل نطاق الإشباع – وهذا هو تعريف مصطلح "مشبع" (*Saturated*)، السطح العلوي لنطاق الإشباع هو سطح المياه الجوفية.

خزّانات المياه الجوفية Aquifers

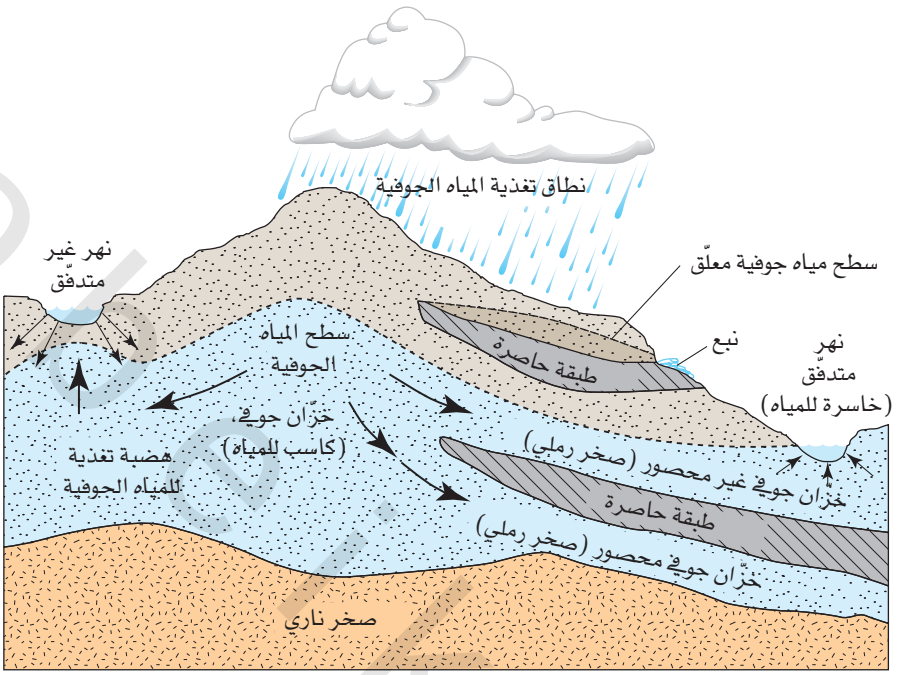
تسمّى الموادّ الأرضية القادرة على الإمداد بالماء الجوفي بمعدّل مفيد، ومن خلال بئر محفورة فيها خزّان الماء الجوفي (**aquifer**)، انظر الشكل (12–8). تُعدّ رسوبيات الحصى والرمل والتربة، والصخور الرملية ذات الشقوق والتكسّرات، والصخور الجرانيتية والمتحوّلة ذات المسامية العالية الناتجة عن الشقوق والتكسّرات، خزانات جوفية جيّدة، إذا توافر فيها الماء الجوفي، وتحدّ الطبقة الصخرية الحاصرة (*confining layer*)، مثل صخور الطين أو الغضار من حركة الماء الجوفي أو تمنعها.

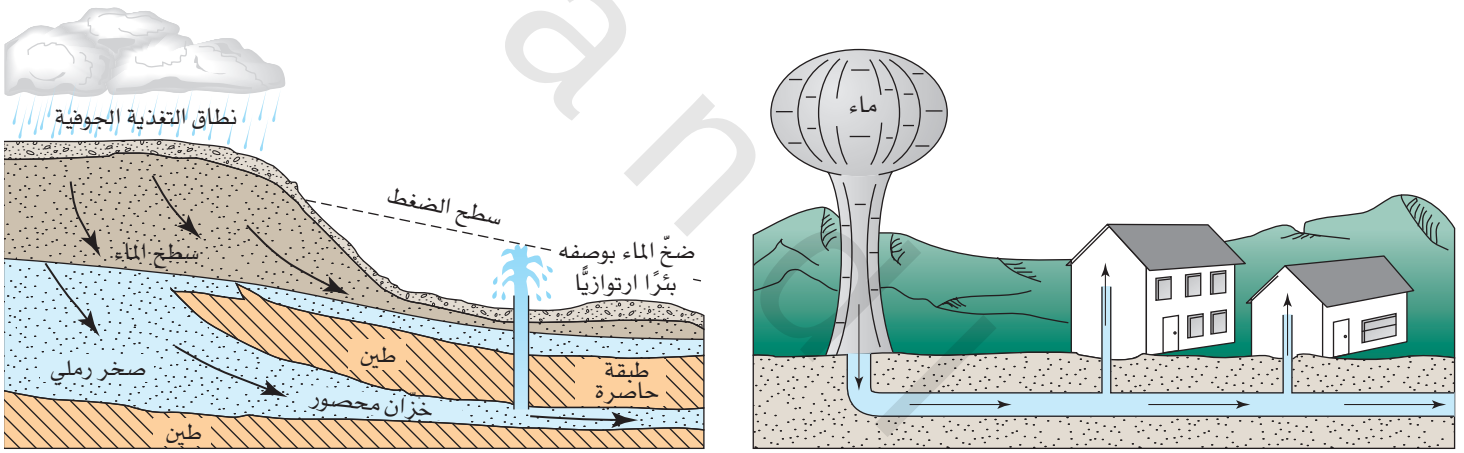
يسمّى الخزّان الخزّان غير المحصور (*unconfined aquifer*)، إذا لم يكن هناك طبقة حاصرة تقيّد سطح نطاق الإشباع العلوي على سطح المياه الجوفية، انظر الشكل (12–8)، والعكس من ذلك في الخزّان المحصور (confined aquifer)، ويمكن توافر كلّ من الخزّانين في المنطقة نفسها، أمّا الخزّان المعلّق (*perched aquifer*)، فهو نطاق مشبع محدود، يقع فوق سطح المياه الجوفية الإقليمي.

قد يكون الماء تحت الطبقة الحاصرة واقعًا تحت الضغط، ما يولّد ظروفًا ارتوازية، تشبه من حيث تأثيرها برج الماء، الذي يولّد ضغطًا مائيًّا للمنازل، انظر الشكل (12–9أ)، تتحرّك المياه الجوفية في النظام الارتوازي (*artesian well*) نحو الأسفل، ثم بصورة جانبية، حيث تكون محصورة

obeikandl.com

الشكل (12–8) الخزّانات الجوفية. سطح ماء معلّق وجداول مائية متدفّقة (خاسرة للمياه)، وغير متدفّقة (كاسبة للمياه).



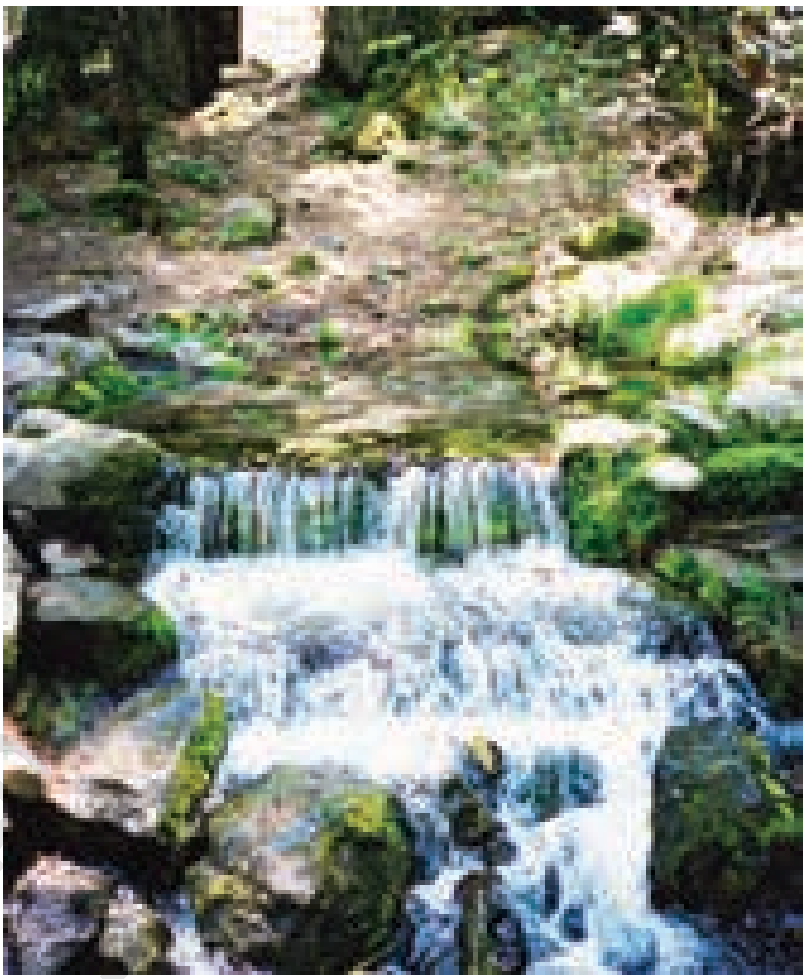


(أ) (ب)

الشكل (12–9) نشأة نظام البئر الارتوازي. (أ) يرتفع الماء في المنازل؛ بسبب الضغط المتولّد من مستوى الماء في البرج، وسينخفض الضغط قليلًا، إذا حصل احتكاك ضئيل في الأنابيب. (ب) ينحدر سطح الضغط أو سطح الماء بعيدًا عن المصدر في الأنظمة الطبيعية؛ بسبب الاحتكاك في نظام الجريان، لكن الماء يستمرّ في عملية الارتفاع فوق سطح الأرض، إذا شكّلت الجزيئات غير المنفّذة، مثل الطين طبقة حاصرة تحجز هروب الماء.

وتحت تأثير الضغط، وعليه، قد يرتفع الماء نحو الأعلى من خلال شقوق الصخور، ليشكّل نبعًا ارتوازيًّا، وقد يشكّل أيضًا بئرًا ارتوازيًّا، انظر الشكل (12–9ب).

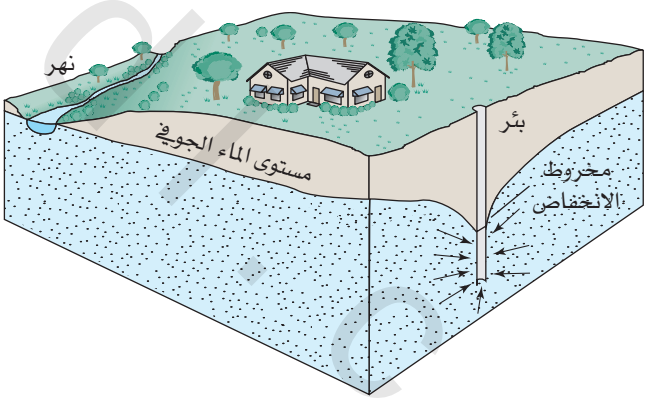
تُعدّ تغذية المياه الجوفية (*groundwater recharge*) بوجه عام، عملية تزويد الخزّانات الجوفية بالمياه، وقد تنتج عن عمليات طبيعية، مثل الهطل المطري الذي يُعدّ من أكثرها شيوعًا، انظر الشكل (12–8)، وقد تنتج أيضًا عن تأثير الإنسان، مثل تسرّب المياه وترشيحها من خطوط المياه المكسورة، أو التسرّب من القناة، أو نتيجة لريّ المحاصيل، ومن صور عملية ضخّ المياه الجوفية (*groundwater discharge*) من الخزّانات الجوفية، خروج المياه بصورة طبيعية من النبع، الّذي يتشكّل عندما يتقاطع الماء الجاري في خزّان جوفي مع سطح الأرض، حيث يمكن أن يشكّل ضخّ الماء من النبع بداية جدول أو نهر، انظر الشكل (12–10)، ويحدث ضخّ الماء الجوفي أيضًا عندما يُستخرج الماء من بئر، وعندها يتشكّل مخروط الانخفاض في مستوى الماء (*Cone of depression*)، على سطح المياه الجوفية أو سطح الضغط الارتوازي، انظر الشكل (12–11)، ومن الممكن أن يغيّر مخروط انخفاض كبير من اتّجاه حركة المياه الجوفية في منطقة، أضف إلى ذلك أنّ الضخّ الجائر يتسبّب في خفض مستوى المياه الجوفية إلى الأسفل بصورة كبيرة، وذلك يستدعي تخفيض معدّل الضخّ أو حفر آبار أكثر



الشكل (12–10) النبع (Spring). تصريف الماء الجوفي من نبع فيرن (*Fern Spring*) في الطرف الجنوبي لوادي يوسيمايت (*Yosemite valley*) كاليفورنيا. يخرج النبع من أسفل انحدار تلة، مثلما هو حال معظم الينابيع، ويبلغ عرض النهر الناتج عن النبع قرابة مترين. (*Edward A. Keller*)

حركة المياه الجوفية
Groundwater Movement

يعتمد معدّل حركة المياه الجوفية واتّجاهها في خزّان جوفي بصورة جزئية على كلّ من ميلان سطح الماء (gradient)، أو ما يسمّى الميلان الهيدروليكي (*Hydraulic gradient*)، ونوع الموادّ الأرضية في الخزان، وبوجه عام، يكون الميلان الهيدروليكي للخزّان غير المحصور بمستوى ميلان سطح الماء تقريبًا، وتسمّى قابلية أيّ مادّة تسمح للماء بالتحرّك خلالها التوصيلية الهيدروليكية (*hydraulic conductivity*) أو النفاذية، التي يعبّر عنها بوحدات المتر المكعّب (m^3) من الماء في اليوم، خلال مساحة مقطع عرضي مقداره متر مربّع m^2 أي ($m^3/day/m^2$)، حيث تُختصر بـ (m/day)، وبدورها تعتمد التوصيلية الهيدروليكية أو النفاذية بصورة جزئية على حجم الفراغات المفتوحة بين الحبيبات في الخزّان، وعلى مدى اتصال هذه الفراغات ببعضها، فيما تسمّى نسبة الفراغات غير المغلقة، أي الفراغات الخالية (void spaces) في الرسوبيات المسامية (*porosity*)، التي تتغيّر مما مقداره (1%) للصخر الجرانيتي ذي التكسّرات القليلة إلى (50%) للطين، انظر الجدول (12–2) الّذي يوضّح مقدار قيمة المسامية والنفاذية لموادّ أرضية مختارة، لاحظ أنّ بعض الموادّ ذات المسامية العالية، مثل الطين تمتاز بتوصيلية أو نفاذية منخفضة؛ لأنّ الفراغات بين الحبّات صغيرة جدًّا، وتجذب الماء فيها بصورة قوية، بينما يمتلك كلّ من الرمل والحصى مسامية عالية، مع وجود فراغات كبيرة نسبيًّا بين الحبّات وتوصيلية عالية.



الشكل (12–11) ضخّ الماء الجوفي (Pumping groundwater). ينتج مخروط الانخفاض في مستوى الماء عن ضخّ الماء من البئر.

عمقًا، ما يتطلّب تكاليف أكثر، لعملية قد لا تنجح؛ لأنّها تعتمد على الظروف الهيدرولوجية، فعلى سبيل المثال: تُعدّ عملية تنزيل مستمرّ في أعماق الآبار، لتعديل آثار الضخّ الجائر للآبار المحفورة في صخور نارية وصخور متحوّلة عملية محدودة جدًّا، إذ يُضخّ الماء الناتج عن هذه الآبار من أنظمة شقوق مفتوحة تميل إلى الانغلاق أو التضييق في العدد والحجم مع العمق، إضافة إلى أنّ نوعية الماء المستخرج تصبح أقلّ جودة، إذا استخرجت من مياه عميقة تحتوي على الكثير من المعادن الذائبة.

obeikandl.com

الجدول (12-2): المسامية والنفاذية لموادّ أرضية مختارة.

	المادّة	المسامية (%)	النفاذية [1] (m/day)
موادّ غير متماسكة	طين	50	0.041
	رمل	35	32.8
	حصى	25	205.0
	حصى ورمل	20	82.0
صخور	حجر رملي	15	28.7
	حجر جيري أو غضار كثيف	5	0.041
	جرانيت	1	0.0041

سمي في الأعمال القديمة معامل النفاذية.

المصدر: بتصرف من لينسلي، كوهلر، بولهس، 1958. علم المياه للمهندسين. نيويورك: ماكجروهيل. طبعة 1958 ماكجروهيل للكتب. استخدم بترخيص من شركة ماكجروهيل.

تفسّر هذه الخصائص السبب في أنّ الرمل والحصى تُعدّ خزّانات جوفية جيّدة، ولماذا يشكّل الطين موادّ عازلة (aquitards) (موادّ أرضية تحجز، لكنها لا تمنع حركة المياه الجوفية)، يتحرّك الماء الجوفي بصورة سريعة في الرمل وبطيئة جدًّا في الأطيان، ويتناسب معدّل جريان المياه الجوفية طرديًّا مع حاصل ضرب الميلان الهيدروليكي والنفاذية (التوصيلية الهيدروليكية)، في معادلة مشهورة تسمّى قانون دارسي (Darcy's Law)، الّذي يسمح لنا بالتعبير عن العلاقة الكمّية بين الميلان الهيدروليكي والنفاذية من جهة، وجريان المياه الجوفية من جهة أخرى، بحلّ الكثير من المسائل، مثل معدّل جريان المياه الجوفية وسرعة استنزافها أو تعويضها (انظر بعض التطبيقات الرقمية في حركة المياه الجوفية).

تزويد الماء الجوفي

Groundwater Supply

يستخدم نصف سكان الولايات المتّحدة الأمريكية تقريبًا المياه الجوفية بوصفها مصدرًا رئيسًا لماء الشرب؛ لذلك، تُعدّ حماية مصادر المياه الجوفية مشكلة بيئية ذات اهتمام شعبي رئيس (انظر: تاريخ حالة: لونج إيلاند، نيويورك *Long Island, New York*)، ولحسن الطالع، فإنّ كمّية المياه الجوفية المتوافرة في الولايات المتّحدة الأمريكية كبيرة، إذ تبلغ ضمن ألـ (0.8 km) من سطح الأرض قرابة (125,000 إلى 224,000 km^3)، إلّا أنّ الحدّ الأدنى لهذا الرقم يعادل مجموع جريان نهر المسيسيبي خلال المئتي سنة الماضية، ولسوء الطالع، تؤدّي تكلفة ضخّ المياه الجوفية وأعمال الاستكشاف إلى تقليل مجموع كمّية المياه الجوفية المتوافرة. يتجاوز ضخّ المياه الجوفية من الآبار في معظم أجزاء أمريكا ما يُعوّض بالتغذية الطبيعية لها، وفي هذه الحالة يُعدّ الماء الجوفي في حالة «تعدين» «mined»، ومن الممكن أن يُعدّ مصدرًا غير متجدد، إضافة إلى ذلك، يُعدّ الضخّ الجائر مشكلة خطيرة في كلّ من السهول العالية في المناطق بين تكساس وأوكلاهوما (Texas – Oklahoma – High Plains)، وكذلك كاليفورنيا وأريزونا ونيفادا ونيومكسيكو والمناطق المعزولة في لويزيانا والمسيسيبي وأركانساس ومنطقة الخليج الأطلسي الجنوبي، انظر الشكل (12-12أ)، حيث يعادل مقدار الضخّ الجائر في مناطق السهول العالية بين تكساس وأوكلاهوما وحدها، مجموع الجريان الطبيعي لنهر كولورادو، أمّا الخزّان الجوفي أوجلالا (Ogallala aquifer) المكوّن من طبقات الرمل والحصى الحاملة للماء، فيتوضّع تحت هذه المنطقة من جنوب داكوتا (South Dakota) إلى تكساس (Texas)، انظر الشكل (12-2ب)، وعلى الرغم من أنّ الخزّان يحمل كمّيات غزيرة من الماء، إلّا أنّ استخدام مياهه يفوق التغذية الطبيعية بمقدار (20) ضعفًا في بعض المناطق، وقد انخفض منسوب الماء الجوفي في معظم مناطق الخزّان في السنوات القليلة الماضية؛ لذلك، من الممكن أن تعود كثير من الأراضي الزراعية التي تُروى من مياهه الآن إلى أراضٍ قاحلة، إذا استنزف هذا المصدر. تعاني أيضًا بعض البلدان والمدن في تلك المنطقة مشكلات في تزويد المياه، فمثلًا: ما زالت مستويات المياه الجوفية عالية في المنطقة الواقعة على طول نهر بليت (Platte River) في شمالي كانساس (Kansas)، ويتوافر ماء كافٍ في الوقت الحالي، لكن وإلى الجنوب بعيدًا وفي مناطق جنوبي غرب كانساس والمنطقة التي تشبه يد المقلاة (Panhandle) في غرب تكساس، حيث نزول مستوى الماء الجوفي على أشدّه، فمن المتوقّع أن تدوم عملية تزويد المياه الجوفية لعقد آخر من الزمن أو ما شابه، ويصبح تزويد المياه مع الوقت مشكلة للمناطق العمرانية في مدينة ألسس (Ulysses) في ولاية كانساس (Kansas)، التي عدد سكانها (6000) نسمة، ومدينة لاباك (Lubbock) في تكساس، وعدد سكانها (200,000)، فمنذ عقود مضت جفّت ينابيع سميرون (Lower Cimerron) في جنوب ألسس، التي تُعدّ حفرة مياه مشهورة على طول الجزء الجاف من طريق "سانتا في تريل" (Santa Fe Trail)؛ وذلك بسبب ضخّ الماء الجوفي، وهو يشير إلى ما يمكن أن يحدث مستقبلًا، إضافة إلى أنّ كلًّا من "ألسس ولاباك"، تواجه نقصًا في المياه، ما يتطلّب إنفاق ملايين الدولارات لإيجاد مصادر بديلة، حيث استنزفت حاليًّا نسبة بسيطة فقط من مجموع المياه الجوفية للولايات المتّحدة، إلّا أنّ مستوياتها في نزول، يُضاف إلى ذلك، أنّ الماء المنتج من الآبار يقلّ من جهة، وتزداد تكلفة الطاقة المستخدمة لضخّه من جهة أخرى، فقد أدّى ريّ المزروعات في مناطق هاي بلينز (High Plains) أو السهول العليا وخزّان أوجلالا Ogallala Aquifer، مدّة أكثر من نصف قرن، إلى المشكلات المائية الحاليّة في تلك المناطق.

12-4 الاتصال بين المياه السطحية والمياه الجوفية:

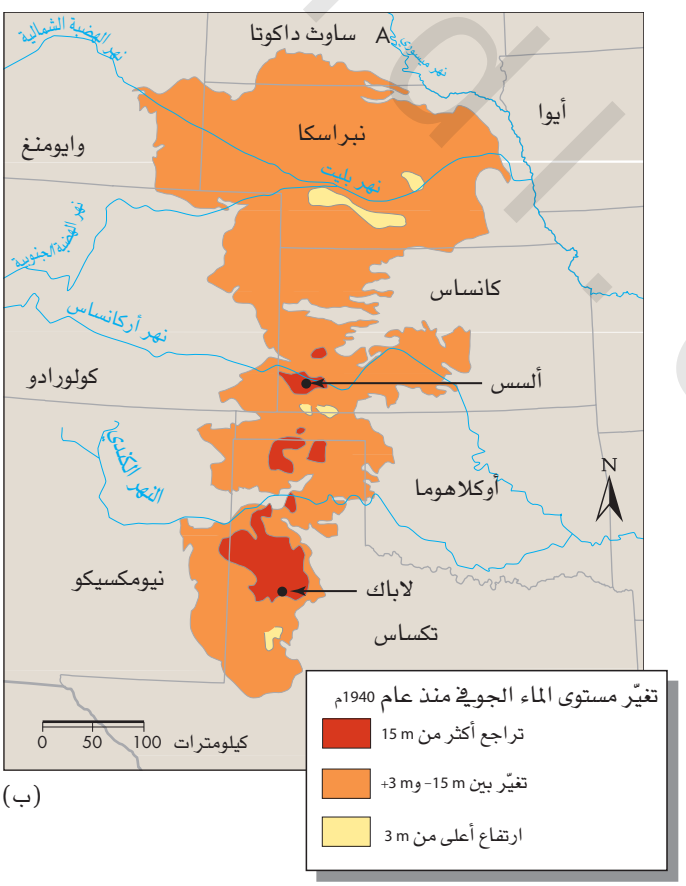
الماء السطحي والماء الجوفي

Surface Water and Groundwater

الماء السطحي والماء الجوفي مرتبطان جدًّا، لدرجة أنّنا نعدّهما جزءًا من المصدر نفسه[5]، يوضّح الشكل (12-13) صورة من صور الاتصال بين الماء السطحي والماء الجوفي، فالماء السطحي يرشح من البحيرة إلى الماء الجوفي، ويتلقى النهر ماءً متدفّقًا من الماء الجوفي، حيث يرجع الماء الجوفي عند الساحل إلى السطح من خلال الأراضي الرطبة (wetlands)، ثمّ ينساب إلى المحيط.

ترتبط بيئات المياه السطحية الطبيعية كلّها تقريبًا، مثل الأنهار والبحيرات والأراضي الرطبة، وكذلك البيئات المائية التي هي من صنع الإنسان، مثل السدود، بصورة قوية بالمياه الجوفية، إضافة إلى أنّ ضخّ المياه الجوفية من خلال الآبار، يمكن أن يقلّل جريان النهر ومستوى الماء في البحيرة، ويؤدّي سحب المياه السطحية إلى استنزاف المياه الجوفية؛ لذلك، تتطلّب إدارة المياه الجوفية معرفة عملية الاتصال والترابط بين المياه الجوفية والسطحية وفهمها[5].

(أ)

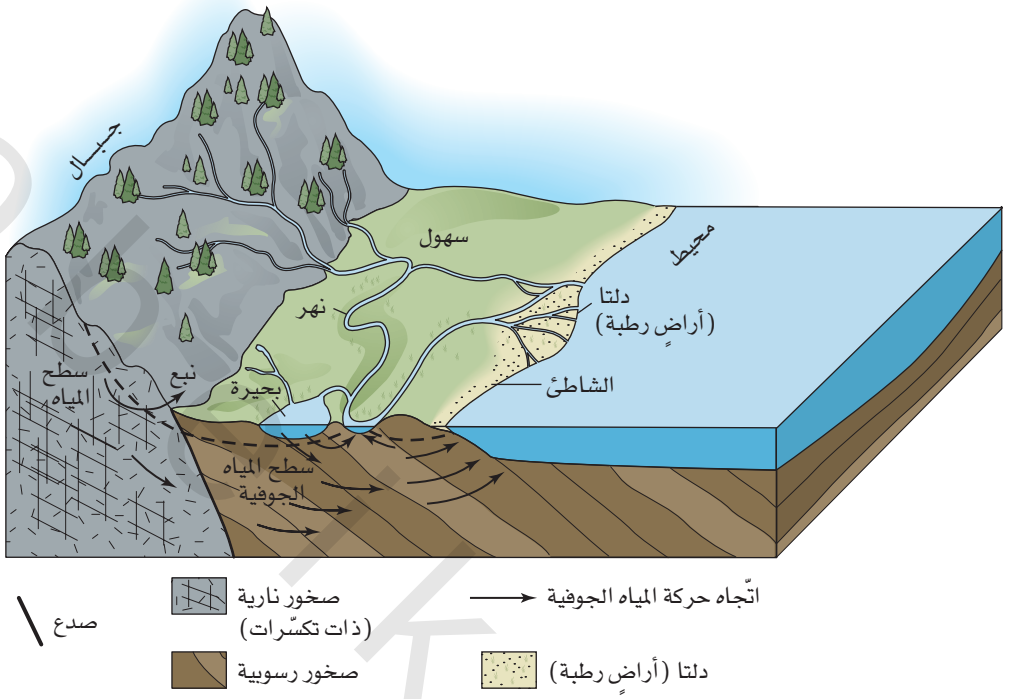


(ب)

الشكل (12–12) تعدين (استنزاف) الماء الجوفي. (أ) استنزاف الماء الجوفي للولايات الأمريكية المتّصلة. (ب) تفصيل نمط تغيّر مستوى المياه الجوفية في خزّان أوجـلالا (*Ogallala*)، في مناطق السهول المرتفعة من تكساس إلى أوكـلاهـوما (*Texas – Oklahoma High Plains*). ألسس (كانساس) ولاباك (تكساس) مدينتان تقعان في منطقة نزول مستوى الماء الجوفي الكثيف، وكلاهما تعانيان نقصًا حادًا في الماء.

(المصدر: *US Geological Survey*).

Obeikandl.com



الشكل (12–13) الاتصالات (أو التفاعلات) بين المياه السطحية والمياه الجوفية. رسم بياني مثالي يُظهر بعض الطرق التي يتّصل أو يتفاعل الماء السطحي مع الماء الجوفي من خلالها، في التضاريس من الجبال إلى البحر. يتحرّك الماء الجوفي مثلًا إلى الأعلى على طول الصدع، ليصرف الماء على صورة نبع، ثمّ ينساب الماء نحو البحيرات والأنهار في السهول والدلتا والشواطئ، ثمّ بعيدًا عن الشاطئ نحو المحيط.

يظهر الشكل (12–8) بعض صور الاتصال بين الأنهار والمياه الجوفية، ويمكن بالتحديد، تعريف نوعين من الأنهار: (*effluent streams*) الأنهار المتدفّقة الرابحة للمياه، وهي التي تميل إلى أن تكون دائمة الجريان، أي تجري طوال السنة، وفي المواسم الجافّة ينساب الماء من المياه الجوفية إلى الأنهار ليحافظ على جريان النهر (الشكل 12–8 يمين)، أمّا الأنهار غير المتدفّقة أو الخاسرة (influent streams) للمياه، فغالبًا ما تكون فوق سطح الماء في كلّ مكان، على طول مجرى قنواتها، وتجري هذه الأنهار نتيجة للهطل المطري فقط، حيث يتحرّك الماء من الأنهار الخاسرة نحو الأسفل،

بعض التطبيقات الرقمية PUTTING SOME NUMBERS ON

حركة المياه الجوفية Groundwater Movement

عام 1856م كان المهندس هنري دارسي (Henry Darcy) يعمل في مرافق مصلحة أو سلطة توصيل المياه إلى ديجون (Dijon)، فرنسا، وأجرى عددًا من التجارب المهمّة، فأظهرت أنّ تصريف المياه الجوفية (Q) يمكن تعريفه بأنّه: حاصل ضرب مساحة المقطع العرضي للجريان (A) والميل (الانحدار) الهيدروليكي (I) والنفاذية (التوصيلية الهيدروليكية) (K). أي:

$$Q = KIA \quad (1)$$

الوحدة في كلّ جانب من المعادلة هي وحدة جريان حجمي (مثل متر مكعّب في اليوم)، حيث تعرف هذه العلاقة بقانون دارسي (Darcy's Law).

الكمّية ($Q/A = KI$) تسمّى تدفّق دارسي [(Darcy Flux (v)] ويمكن القول إنّ:

$$Q = vA \text{ أو } v = Q/A \quad (2)$$

إضافة إلى أنّ (v) لها وحدات سرعة، أي إنّ تدفّق دارسي هو سرعة ظاهرية، ولكي نحدّد السرعة الحقيقية للماء الجوفي في خزّان جوفي (vx)، يجب أن نتذكّر أنّ الماء يتحرّك خلال الفراغات بين الحبّات؛ لذلك، تتأثّر سرعته بالمسامية الخاصّة بمادة الخزان، وإذا رمزنا للمسامية بـ (n)، فعندها تكون مساحة المقطع العرضي الفعلية للجريان هي: (An)، وعليه، ينتج من العلاقة ($Q = VA$) علاقة جديدة هي:

$$vx = KI/n \text{ أو } vx = Q/An = v/n \quad (3)$$

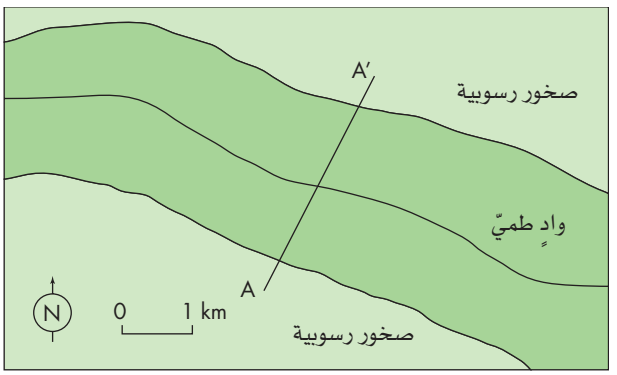
السرعة الفعلية (vx) تعادل ثلاثة أمثال تدفّق دارسي (على افتراض أنّ متوسّط المسامية $n = 0.33$).

تسمّى القوّة المحرّكة لجريان الماء الجوفي الطاقة الكامنة أو **جهد السائل** (**Fluid Potential**) أو ما يعرف بـ "**الرأس الهيدروليكي**" (**Hydraulic Head**)، الذي هو عند نقطة القياس، حاصل جمع ارتفاع الماء (رأس الارتفاع elevation head)، والنسبة بين ضغط السائل إلى وحدة الوزن للماء (أو رأس الضغط pressure head). الفرق في قيم "الرأس الهيدروليكي" (Hydraulic heads) بين نقطتين (h) مقسومًا على طول مسافة الجريان (L)، يعطينا الميل أو الانحدار الهيدروليكي Hydraulic Gradient (I).

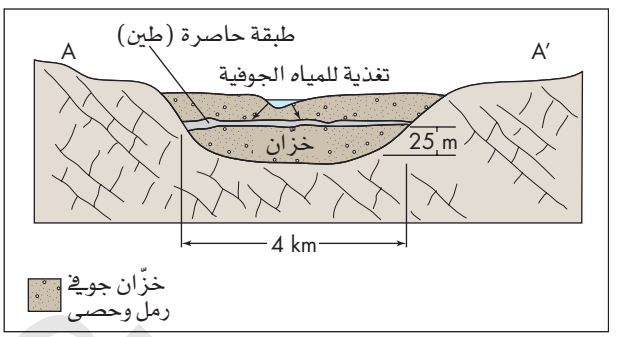
يتحرّك الماء الجوفي من منطقة الرأس الهيدروليكي الأعلى إلى منطقة الرأس الهيدروليكي الأدنى؛ لذلك قد يتحرّك للأسفل أو جانبيًّا أو للأعلى، معتمدًا على الظروف المحلية.

توجد تطبيقات كثيرة لقانون دارسي في مسائل المياه الجوفية، مثلًا: خذ منطقة ما تتوافر تحتها صخور رسوبية ومناخها شبه جافّ، ويقطع المنطقة نهر في وادٍ عرضه قرابة (4 km)، وتشكّل رسوبيات النهر فيها خزّانًا محصورًا بطبقة طين، حيث يوجد بئران المسافة بينهما (1 km) تقريبًا في اتّجاه أسفل الوادي (الشكل 12–أ/أ). يبيّن مقطع عرضي بين البئرين في الوادي

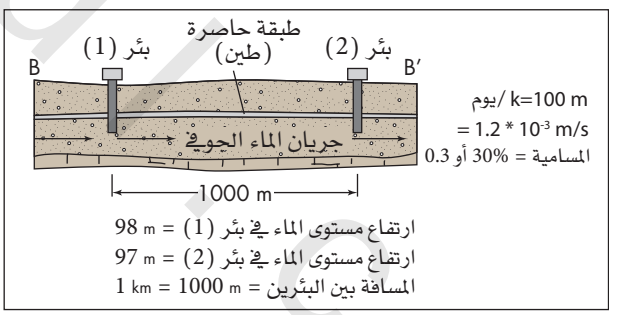
(الشكل 12-أ/ب)، أنّ سمك النطاق المشبع قرابة (25 m)، ويتكوّن من رمل وحصى ذات نفاذية مقدارها 100 m/day، (1.2×10^{-3} m/s). أمّا مسامية الخزّان فتبلغ (30%) (0.3). يوضّح الشكل (12-أ/جـ) مقطعًا في اتّجاه أسفل الوادي، وتبلغ المسافة الفاصلة بين البئرين قرابة (1000 m)، وارتفاع الماء في البئرين (1) 98 m و (2) 97 m على الترتيب. حيث يمكن طرح سؤالين حول الشكل (12-أ):



(أ)



(ب)



(جـ)

الشكل (12 أ) خريطة افتراضية لوادٍ طميّ يحتوي خزّانًا جوفيًّا محصورًا. (أ) مقطع بطول الوادي. (ب) مقطع بعمق الوادي. (جـ) توضيح ظروف الماء الجوفي في الخزّان.

1. ما قيمة تصريف المياه الجوفية (Q) بوحدة (m^3/s أو جالون/ يوم)، التي تتحرّك في الخزّان في اتّجاه أسفل الوادي؟
2. ما زمن انتقال المياه الجوفية (T) بين البئرين (1) و (2)؟ هذا السؤال مهمّ جدًّا من ناحية بيئية، إذا رُصدت حالة تلوّث للمياه في البئر (1)، ونريد أن نعرف متى سيصل التلوّث إلى البئر (2).

تتطلّب إجابة هذين السؤالين تطبيق قانون دارسي للوضع الموضّح أعلاه، وللإجابة عن السؤال الأول، الّذي يسأل عن مقدار الماء المتحرّك في الخزّان تذكّر أنّ ($Q = KIA$)، ولذلك نريد معرفة (Q). الميل أو الانحدار الهيدروليكي هو نسبة الفرق في ارتفاع الماء (رأس الضغط) بين البئرين، إلى طول مسار جريان الماء بين البئرين، والفرق في ارتفاع الماء في البئرين (1) و(2) هو متر واحد (1 m)، وطول مسار الجريان (1000 m)، إذن: الميل الهيدروليكي (I) هو (1×10^{-3}) 0.001، وقيمة النفاذية تساوي 1.2×10^{-3}m/s أمّا مساحة المقطع العرضي للخزّان (A) فتساوي 4000 m × 25 m أو (1×10^5 m^2) 100,000 m^2، وبضرب هذه الأرقام، نجد أنّ التصريف (Q) يساوي 0.12 m^3/s. هذا يساوي (10,368) m^3/day، وهو ما يعادل (2.7) مليون جالون/يوميًا طبعًا، لا يمكن ضخّ هذا المقدار كلّه من الماء من داخل الخزّان؛ لذلك، فإنّ إجراء ما يسمّى فحص الضخّ (Pump Test) ضروري، لمعرفة كم يمكن الضخّ فعليًّا من الخزّان من مجموع الـ (2.7) مليون جالون/يوميًا، دون أن نستنزف المصدر.

بالرجوع إلى السؤال الثاني، المتعلّق بزمن انتقال الماء من بئر إلى آخر، نطبّق قانون دارسي أيضًا، وفي هذه الحالة نحسب تدفّق دارسي [Darcy Flux (v)] من المعادلة (1)، أي:

$$V = Q/A = Kl \qquad (4)$$

تذكّر أنّ تدفّق دارسي (Darcy Flux) هو مجرّد سرعة ظاهرية، ولا تعكس الحقيقة القائمة، أنّ سرعة المياه الجوفية الفعلية، هي من خلال المسامات الموجودة بين الحبّات الرملية والحصوية في الخزّان، فالسرعة الفعلية (vx)، هي نسبة حاصل ضرب (Kl) إلى المسامية باستخدام معادلة رقم (3):

$$vx = kl/n$$
$$= (1.2 \times 10^{-3}\ m/s)(1 \times 10^{-3})/0.3$$
$$= 4.0 \times 10^{-6}\ m/s$$

وزمن الانتقال (T) عندها هو النسبة بين طول مسار الجريان (L) إلى سرعة الماء المتحرّك خلال المسامات (vx). هذا يعرف من الحقيقة: أنّ المسافة (L)، هي حاصل ضرب السرعة (vx) والزمن (T)؛ ($L = v\,x\,T$). حيث $T = 1000\ m/4.0 \times 10^{-6}\ m/s = 2.5 = 10^8$ s وهو ما يعادل (7.9) سنوات تقريبًا.

خلال نطاق عدم الإشباع (vadose zone) إلى سطح الماء الجوفي، مشكّلًا هضبة تغذية للمياه الجوفية (الشكل 12-8 يسار)، وتكون الأنهار الخاسرة متقطّعة أو سريعة الزوال؛ لذلك تجري مدة معيّنة من السنة.

وهناك أهمّية من ناحية بيئية للأنهار الخاسرة؛ لأنّ الملوّثات المصاحبة لهذه الأنهار، قد تتحرّك إلى الأسفل خلال الطبقات الواقعة أسفل النهر، ما يؤدّي إلى تلوّث المياه الجوفية، حيث تُعدّ أرضيات الأنهار الجافّة أكثر عرضة لهذا النوع من المشكلات، فعلى سبيل المثال: نهر موهافي (Mojave River) في صحراء جنوب كاليفورنيا، هو نهر جافّ في معظم أوقات السنة بجوار منطقة بارستو (Barstow)، وقد كان قاع النهر موقعًا لمحطّة قطارات، فكانت القطارات والمعدّات الأخرى تُنظّف بالمنظّفات فيها؛ لذا، رشحت هذه الملوّثات وتسرّبت إلى الأسفل من خلال نطاق عدم الإشباع، ولوّثت المياه الجوفية التي تستخدمها تجمّعات سكنية عدة للشرب واستخدامات منزلية أخرى.

Obeikandl.com

تاريخ حالة CASE HISTORY

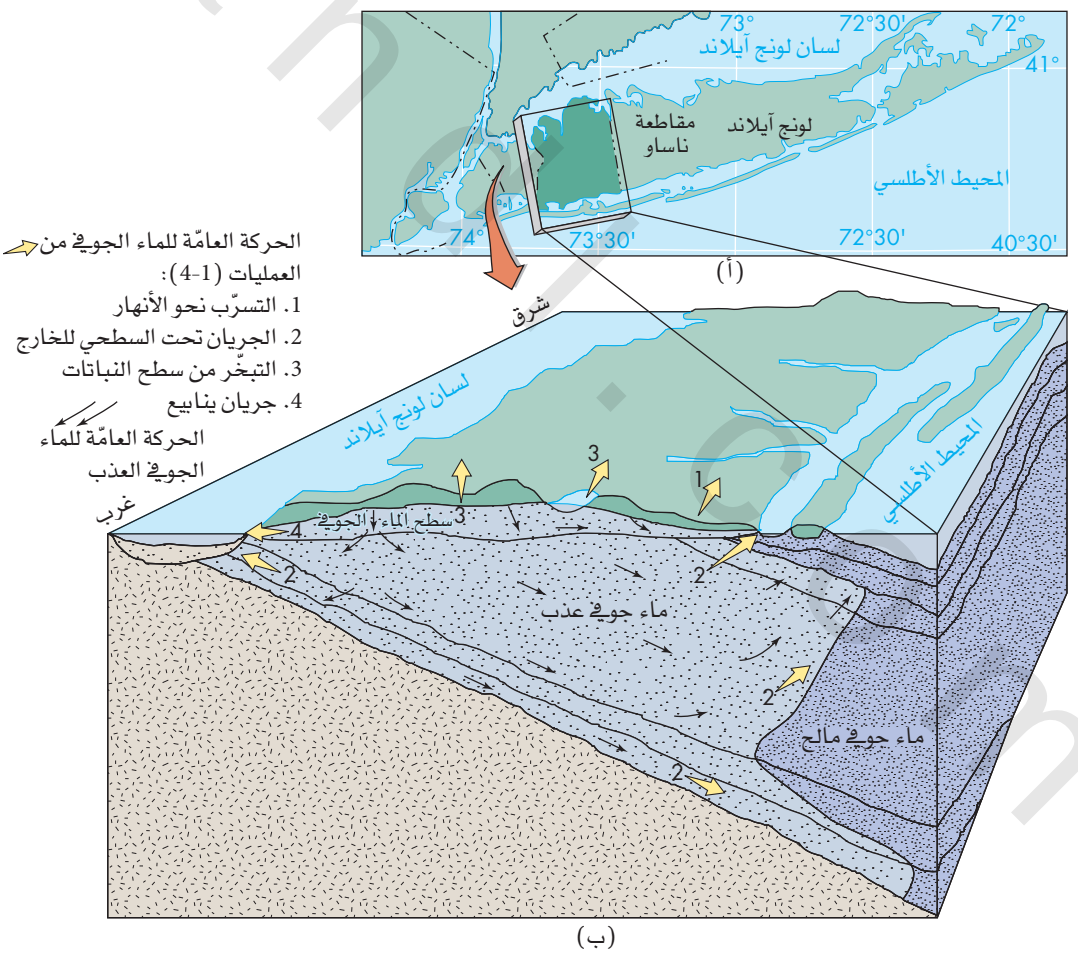
لونج آيلاند في ولاية نيويورك Long Island, New York

يحتوي القسم الغربي للونج آيلاند على مناطق بروكلن (Brooklyn) وكوينز (Queens) موطن الملايين من الناس (شكل 12–ب). يُعدّ تلوّث المياه الجوفية في المنطقة مشكلة خطيرة في الجزء الغربي من الجزيرة، منذ بداية القرن العشرين على الأقلّ، ويعتمد الناس فيها على الماء المستورد من مناطق أعلى ولاية نيويورك، إذ لا تستورد مقاطعتا ناسو (Nassau) وسافولك (Saffolk) في النهاية الشرقية للجزيرة الماء، وتتمّ مراقبة الماء فيهما بحرص، ومع ذلك فهما تعانيان مشكلات تلوّث المياه[3].

يتوافر الماء الجوفي بكثرة في مقاطعة ناسو (Nassau)، وعلى الرغم من ذلك، فقد أدّى الضخّ الكثيف في السنوات الأخيرة إلى هبوط مستوى الماء إلى أعماق تصل إلى (15 m) في بعض المناطق، وأصبحت الأنهار التي اعتادت على الجريان طوال العام، نتيجة تسرّب المياه الجوفية إليها، تعاني انخفاضًا في الجريان أو الجفاف، وتجري في أوقات المطر فقط[4].

أدّى هبوط مستوى المياه الجوفية إلى تسلل المياه الجوفية المالحة، وهي ما تُعرف بمشكلة "اندفاع المياه المالحة" (salt – water intrusion)، إلّا أنّ أكثر المشكلات خطورة من حيث التلوّث في مقاطعة ناساو (Nassau County) مرتبطة بالتمدن، فهناك مصادر عدة للتلوّث تشمل الجريان في المناطق الحضرية، وتسرّب المياه العادمة من خزّانات مجاري البيوت والصرف الصحي، والملح المستخدم في تذويب الثلوج على الشوارع، والنفايات الصناعية وغيرها من النفايات الصلبة، حيث تصل هذه الملوثات إلى المياه السطحية، ثمّ تنتقل في اتّجاه المياه الجوفية، ومن الملاحظ أنّ الكمّية الأكبر من الملوّثات، تقع أسفل المناطق الحضرية ذات الوجود السكاني العالي، وقد انخفض مستوى الماء الجوفي في هذه المناطق بصورة كبيرة، وتتسرّب عادة ملوّثات النيتريت (Nitrates) الناتجة عن خزّانات الصرف الصحي المنزلية والأسمدة الزراعية إلى البيئات تحت السطحية[3، 4]، وأخيرًا، تشكّل المكبّات المحتوية على النفايات المدنية والقريبة من السطح مشكلة كبيرة؛ لأنّها تحتوي على ملوّثات كثيرة لا يمكن تجنّبها، وعليه، فقد أُغلق كثير منها في المنطقة.

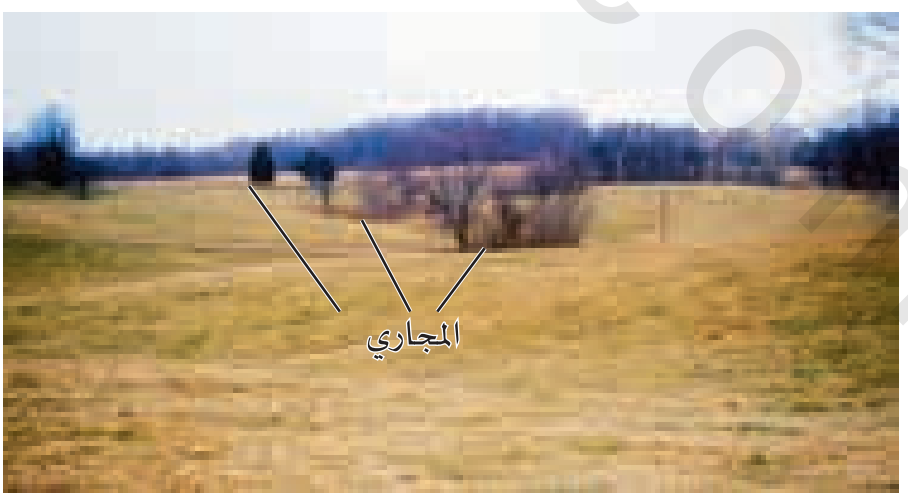
تظهر الدروس المستفادة من مشكلات المياه الجوفية في لونج آيلاند (Long Island)، أنّ الحاجة إلى المياه في المنطقة يجب أن تنسجم مع الخطر الناتج عن تلوثها، فالمناطق الحضرية في حاجة دائمًا إلى المياه الجوفية، لكن الأنشطة الحضرية في الوقت نفسه، تؤدّي إلى تلوّث هذه المصادر. سيُناقش تلوّث المياه بالتفصيل في الفصل الثالث عشر.



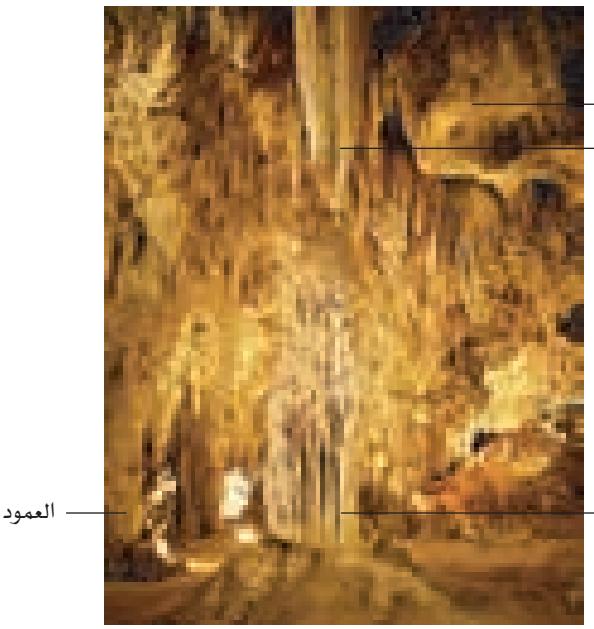
الشكل (12 ب) حركة جريان الماء الجوفي في لونج آيلاند، نيويورك. (Long Island, NY). الحركة العامّة لجريان الماء الجوفي والسطحي لمقاطعة نساسوا. المصدر:
From Alley, W. M. Reilly, T. E., and Frank, O.L., 1999, U.S. Geological Survey Circular 1186

الكارستية (تكون الفراغات) Karst تنتج بعض الصور المثيرة عن الاتصال أو التفاعل بين المياه السطحية والمياه الجوفية في المناطق التي يقع تحتها صخور قابلة للذوبان، مثل الحجر الجيري، الّذي عادة ما يكون متراصًّا وكثيفًا ورقيق التطبّق، وفيه فواصل وشقوق كثيرة، وينشأ عن هذا النوع من الصخور الجيرية نوع معيّن من التضاريس ناتج عن تحويل جريان المياه السطحية في اتّجاه ممرّات تحت سطحية، حيث تُعرف هذه التضاريس **بالكارستية (Karst topography)**، وهي شائعة جدًّا في الولايات الأمريكية، حيث تتوافر صخور رسوبية أصلًا تحت (25%) من أراضيها، وعادةً ما يكون سطح الأرض في التضاريس الكارستية منقّطًا بحُفر تشكّلت عن طريق التجوية الكيميائية، وتعرف **بحُفر البالوعة (Sinkholes)**، التي تختلف في الحجم من متر إلى مئات عدّة من الأمتار في العرض، وهي تنتج بإحدى الطريقتين الآتيتين: (1) تجوية عن طريق المحاليل على سطح الصخور الجيرية، حيث يتحوّل مجرى الماء في اتّجاه التضاريس تحت السطحية تحت حُفر البالوعة. (2) عن طريق حُفر تنتج بفعل انهيار الموادّ الأرضية السطحية، مشكّلةً نظام مغارات وكهوف تحت سطحي، ما يؤدّي إلى تكوّن حُفر بالوعة انهيارية (الشكل 12–14) أضف إلى ذلك، أنّ عملية ذوبان الصخر الجيري بالمحاليل هي عملية تجوية كيميائية، والصخر الجيري حساس لعمليات التجوية الكيميائية بوجه خاص؛ بسبب الأحماض المتوافرة عادةً في البيئة الطبيعة، ومع توسّع هذه الحُفر المتكوّنة من السوائل، وتحرّك الماء من خلالها إلى الأسفل عبر الصخور الجيرية يتشكّل نظام أو سلسلة من الكهوف والمغارات، وغالبًا ما يشكل السطح المنقّط في منطقة كارستية مظهرًا يعرف بسطح الكارست (Karst Plain)، مثل سطح متشل (Mitchell Plain) في جنوب ولاية إنديانا الظاهر في الشكل (12–15)؛ ولأنّ الصخر الجيري شائع جدًّا، فإنّ الولايات الأمريكية المتّصلة كلّها تحتوي على بعض المظاهر الكارستية: مثل كهوف كارلزباد (Carlsbad Caverns) في جنوب شرق ولاية نيو مكسيكو (New Mexico)، وهي ذات منظر جمالي رائع، وهناك أحزمة رئيسة للطوبوغرافية الكارستية في أمريكا تضمّ: (1) منطقة تمتدّ في كلّ من ولاية تنسّي (Tennessee) وفرجينيا (Virginia) وميريلاند (Maryland) وبنسلفانيا (Pennsylvania). (2) مناطق جنوب وسط إنديانا (Indiana) وغرب وسط كنتاكي (Kentucky). (3) منطقة هضاب Salem – Springfield (Plateaus) لولاية ميزوري (Missouri). (4) وسط تكساس. (5) مناطق وسط فلوريدا، إلّا أنّ أشهر نظام الكهوف الكارستية في أمريكا كهف ماموث (Mammoth Cave) في كنتكي، وقد أُجريت أبحاث كثيرة لتفسير سبب حدوث هذه الكهوف وكيفية تطوّرها مع الوقت، ومن الواضح أنّ الماء الجوفي المتحرّك عبر الصخور، هو المسؤول الرئيس عن تكوينها، إذ تميل أنظمة الكهوف إلى التشكّل على سطح الماء أو قريبة منه، حيث يتوافر تعويض مستمرّ للماء غير المشبّع بنواتج تجوية الصخر الجيري؛ ولأنّ معظم أنظمة الكهوف تحتوي على عدد من المستويات، فيُعتقد أنّ كلّ مستوًى يمثّل حقبة مختلفة من حقب تكوّن الكهوف، وعليه يمكن أن يُعزى ذلك إلى تذبذب في مستوى سطح الماء الجوفي، وعادةً ما تتوسّع الكهوف بفعل حركة الماء الجوفي خلال أسطح التطبّق (Bedding Plains) أو

الشكل (12–14) حُفرة بالوعة Collapsed sinkhole منهارة في منطقة جولي هول *(Golly Hole)* ألاباما *Alabama* المصدر: *(Geological Survey of Alabama).*



الشكل (12–15) هضبة متشل الكارستية في جنوب إنديانا مع كثير من حُفر البالوعة (*Sinkholes*). *(Samuel S Frushour, Indiana Geologyical Survey)*



الشكل (12–16) تشكّلات كهفية في نظام كهوف كارلزباد (Carlsbad Caverns) في نيومكسيكو، وتحتوي على هوابط *Stalactite* تتدلّى من السقف، وصواعد تنمو من الأرضية وتكلّسات، تتكوّن عندما يجري الماء ببطء إلى أسفل الجدران أو على طول سطح مائل. وللتمييز، وجود الحرف ج "g" في كلمة الصواعد "*Stalagmite*" يذكّرنا بكلمة الأرضية *Ground*، إذ إنّها تتشكّل من الأرض للأعلى (المصدر: *Bruce Roberts / Photo Researchers, Inc*).

الشقوق، مشكلةً بعد مرور الوقت كهوفًا أكبر تسمّى (Cavern)، وإذا تحرّك مستوى الماء الجوفي إلى الأسفل، فيبدأ الماء المنساب خلال الكهوف بترسيب كربونات الكالسيوم الجيرية على الجوانب والأرضيات والسقف، مكوّنًا ما يعرف بالحجارة الطافية أو التكلّسات (Flow stone) والصواعد (Stalagmites) والهوابط (Stalactites)، انظر الشكل (12–16).

تسبّب الطبوغرافية الكارستية من منظور بيئي المشكلات الآتية:

- تلوّث المياه، إذا ما استخدمت الحفر لطرح النفايات، إذ يُعدّ قاع هذه الحفر قريبًا من سطح المياه الجوفية، ما يساعد على ضخّ النفايات مباشرة نحو المياه الجوفية.
- الأنظمة الكهفية عرضة للانهيار، وتكوّن الحفر، التي قد تضرّ بالبنايات الموجودة على السطح والطرق والمرافق الأخرى (انظر الفصل السابع).
- اُستنزفت مصادر المياه في معظم المناطق التي يقع الحجر الجيري تحتها في أمريكا، مثل هضبة إدوارد (Edward Plateau) في تكساس، ونتيجة لذلك تعرّضت ينابيع كارستية مهمّة، يتدفّق منها الماء الجوفي للتغيير، حيث تتدفّق الينابيع الآن بصورة أقل، أو تجفّ تمامًا، ولهذه التغيّرات عواقب بيئية مهمّة؛ لأنّ معظم هذه الينابيع تحتوي صورًا من الكائنات الحية المفضّلة لبيئة الينابيع، ويسبّب نقصانها نقصًا في التنوّع الحيوي، وذلك يزيد من عدد الأنواع المهدّدة بالانقراض، (انظر تاريخ حالة: خزّان جوفي إدوارد في تكساس (*The Edwards Aquifer*): الماء الجوفي مُتنازع عليه).

تاريخ حالة CASE HISTORY

خزان إدوارد للمياه الجوفية في تكساس - النزاع على المياه الجوفية

The Edwards Aquifer, Texas—Water Resource in Conflict

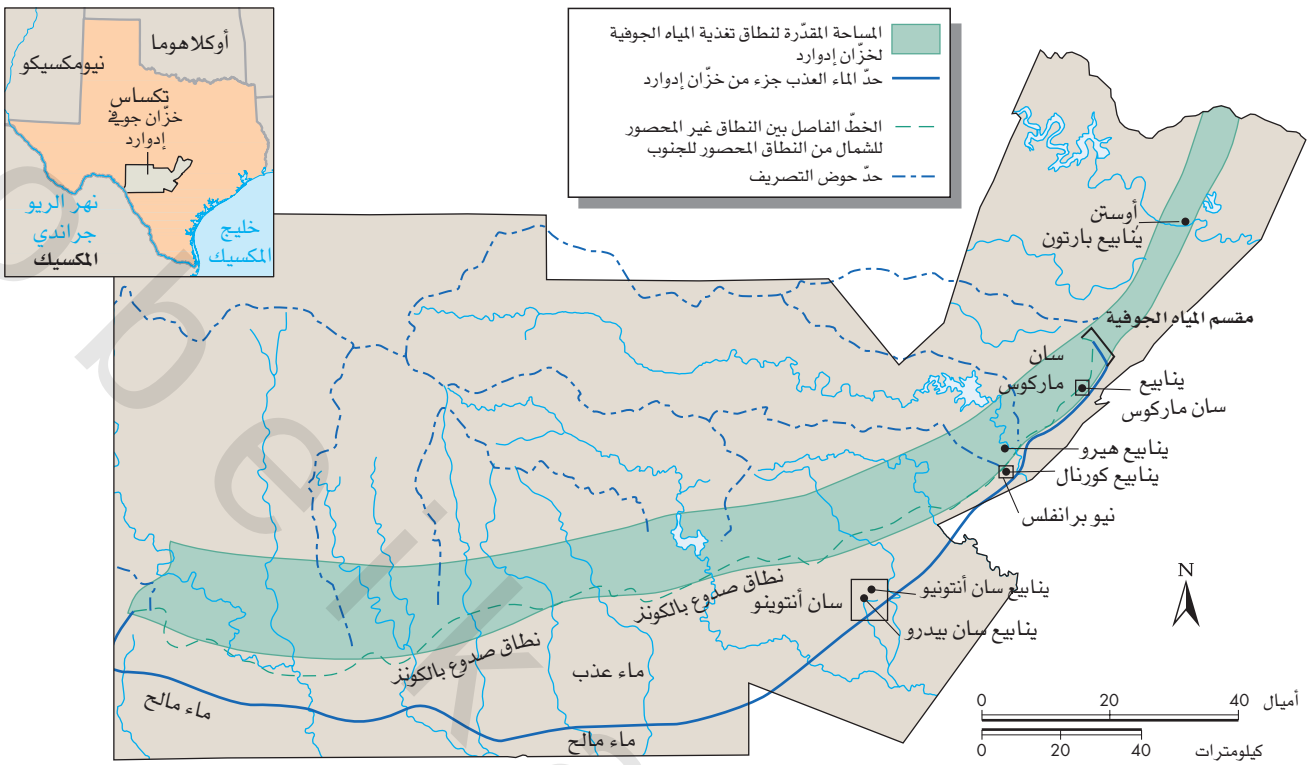
كتب مارك توين (Mark Twain): "الويسكي للشرب والماء للصراع حوله". لقد سبّب خزّان جوفي إدوارد (Edwards Aquifer) في وسط تكساس، الذي هو نظام جريان كارستي نشأ في الصخور الجيرية، نزاعًا حول الماء، وقد تصاعدت حدّة النزاع إلى ما يصل حدّ الحرب شبه المفتوحة من النواحي القانونية والسياسية والاقتصادية[6].

إنّ جيولوجية هذا الخزّان لافتة للنظر، والمياه التي تغذّيه مصدرها بصورة رئيسة من مياه نهر جارٍ فوق الخزّان، باستثناء المناطق التي يصبح فيها الخزّان محصورًا بطبقات طين وطفل، ونتج عن مجموع كلّ من التراكيب الجيولوجية، بما فيها الطيّات ونطاق من الصدوع العادية، إضافة إلى نظام الجريان الكارستي، خزّان جوفي معقّد، ذو نقاط تصريف للمياه الجوفية عند الينابيع الكارستية الرئيسة، (الشكل 12–ج). وهذه الينابيع تُعدّ بؤرة الاهتمامات المتصارعة على مصادر المياه في المنطقة، فعلى سبيل المثال: تُزوّد مياه بركة سباحة ينابيع بارتون (Barton Springs Swimming Pool) في مدينة أوستن (Austin) في تكساس، عن طريق فتحات مغمورة في الماء في صخر جيري ذي تكسّرات، مثلما هو موضّح في الضفة اليمنى للبركة في الشكل (12– د)، إضافة إلى توفيرها مناطق مهمّة للتسلية، تشكل ينابيع بارتون البيئة الوحيدة للسلمندر، الذي يعيش في ينابيع بارتون والمعرّض للخطر.

تجسّد مدينة أوستن بصورة كبيرة الصراع بين التحضّر المتزايد والطلب على مصادر المياه، إذًا، كيف يمكن لسكان تكساس الاستمرار في المحافظة على بيئة ذات نوعية جيّدة، في مواجهة الطلب المتزايد على المياه من قبل مدن، مثل أوستن وسان آنتونيو؟ من الواضح أنّه ستكون هناك تبعات وتشعّبات اجتماعية واقتصادية وبيئية مهمّة للقرارات المستقبلية، المتعلّقة باستخدام مياه خزّان إدوارد (Edwards Aquifer) ومصادر مياهه الوافرة، ولاتّخاذ هذه القرارات، يتعيّن على صانعي القرار إجراء تقييم هيدروجيولوجي دقيق للخزّان كلّه، ومعرفة كيف يمكن تقسيم حصص المياه للمستخدمين المختلفين، دون تخريب الأنظمة البيئية.

يُعدّ خزّان إدوارد واحدًا من أهمّ الخزّانات المنتجة في شمال أمريكا، فهو يزوّد أكثر من مليوني إنسان بالمياه، بما فيها مدينة سان أنتونيو، وكذلك البلدات الصغيرة والصناعات والزراعة في المنطقة، إنّ إنتاج الماء من بئر واحد في الخزّان، يمكن أن يكون كبيرًا جدًّا بصورة لا تصدق، حيث يُعدّ البئر الذي حفر عام 1991م واحدًا من أكبر آبار العالم، فهو يجري دون ضخّ آلي بمعدّل (25,000) جالون/دقيقة، بما يكفي لملء بركة سباحة حديقة خلفية ذات حجم كبير في دقيقة واحدة[6].

Obeikandl.com



الشكل (12 جـ) خزّان جوفي إدوارد في تكساس، يُظهر موقع منطقة التغذية للمياه الجوفية والينابيع الرئيسة (المصدر: *(Modified and Simplified after Loaiciga, H. A., Maidment, D. R., and Valdes, J. B., 1999, Climate Change Impacts in a Regional Karst Aquifer, Texas, U.S.A, Journal of Hydrology 227: 13-94).*

الشكل (12 د) نبع بارتون الكراستي (Barton Karst Spring) قرب أوستن (*Austin*) تكساس (المصدر: *Marshall Frech/ TEC*).

يُغذّى خزّان إدوارد بصورة رئيسة من خلال الأنهار الخاسرة (Influent Streams)، التي تجري فوق منطقة التغذية، حيث يغور الماء عبر الصخور الجيرية (الشكل 12-ج)، ويعتمد معدّل التغذية على مدّة جريان الأنهار وحجمه، إلّا أنّ معدّل الضخّ من الخزّان ازداد بصورة ثابتة مع مرور السنوات، مع أنّ التغذية الطبيعية للماء لمعظم أجزاء الخزّان، تجاوزت كمّية الضخّ وتصريف الينابيع، وهما مصدران مهمّان لتصريف المياه من الخزان؛ ومع ذلك وبسبب الطلب المتزايد على المياه للتحضّر المتزايد والزراعة، فإنّ الاحتياجات للمياه في المنطقة تتجاوز الآن الوفرة التاريخية لها، فمثلًا خلال فترة جفاف طويلة امتدّت من عام 1947م إلى عام 1956م، تعرض اثنان من الينابيع الكبيرة لانخفاض خطير في التصريف، وتوقّفت ينابيع كومال (Comal Springs) عن الجريان مدّة أربعة شهور عام 1956م، وانخفض التصريف من ينابيع سان ماركوس (San Marcos Springs) إلى مستوى هدّد الأنظمة البيئية المهمّة، التي تعتمد على مياه الينابيع، ومنذ الجفاف أُضيفت كثير من أنواع الكائنات الحيّة إلى قائمة قانون الأنواع المهدّدة بالانقراض عام 1973م (Endangered Species Act of 1973)، وقد أُدرج كلّ من سلمندر سان ماركوس (San Marcos Salamander) القاطن في ينابيع سان ماركوس، وسمك فاونتن دارتر (Fountain Darter Fish)، والأرز البري في تكساس (Texas Wild Rice) إلى قائمة الأنواع المهدّدة بالانقراض، وقد قُدّمت قضية محاكمة عام 1991م، عن طريق نادي سييرا (Sierra Club)، ضد دائرة الأسماك والحياة البرية الأمريكية ودوائر أخرى، لضمان توفير جريان كافٍ للينابيع للحفاظ على الأنظمة البيئية، وحدّدت الدعوى الحدّ الأدنى لجريانات النهر المطلوبة للحفاظ على بيئة الينابيع، ولسوء الطالع، تظهر النتائج التاريخية أنّه لا يمكن الحفاظ على جريان معيّن للينابيع، خلال مواسم الجفاف القوية؛ لذلك فإنّ النزاع سوف يستمر، وإضافة إلى ذلك، أدّت زيادة أعداد السكان إلى مضاعفة الطلب على المياه، إذ لا يتوافر مصدر بديل لها، قابل للتزويد بكمّيات كافية، وذات جودة عالية، وسعر معقول مقارنة بمياه خزّان إدوارد، وقد تكون حلول محتملة للنزاع على الماء في منطقة خزّان إدوارد مكلفة وغير متوافرة في الوقت الراهن، وبالتأكيد غير موافق عليها من الأطراف جميعها.

وهناك أمور شائكة أخرى إلى الأسفل في مجرى المياه بعيدًا عن منطقة التغذية، تُبقي مصادر المياه السطحية مهمّة لمدن مثل كوربس كرستي (Corpus Christi)، لكنّ المطلوب مستويات جريان للمياه، قادرة على المحافظة على صحّة البيئات ومصبات الأنهار في تكساس، وهذا المستوى من الجريان مهمّ جدًّا للمحافظة على مساكن الكائنات الحية ضمن بيئة مصبّات أنهار مناسبة[7].

مشكلة نقص المياه ليست المشكلة الوحيدة التي تهدّد الخزان، فعلى سبيل المثال: أُجريت دراسات في منطقة أوستن (Austin) على ينابيع بارتون (Barton Springs)، بيّنت أنّ كلًّا من المياه الجوفية والمياه السطحية في بعض المناطق تحتوي على كثير من الملوّثات بتراكيز أعلى من الطبيعي، مثل: الرسوبيات، والموادّ الهيدروكربونية، والمبيدات الحشرية، والنيتريت، والمعادن الثقيلة والبكتيريا، وأوضحت دراسات استكشافية لتوزيع هذه الملوّثات ومستواها نسبة إلى استخدامات الأراضي المحلية، أنّ علاقة قوية بين الملوّثات والمناطق المأهولة من الخزّان وذات النمو السكاني والتنمية الحضرية العالية[6].

تتضمّن حلول مستقبلية لمشكلة نقص المياه في منطقة خزّان إدوارد، زيادة مصادر تزويد المياه ما يُقلل الطلبات على المياه، إضافة إلى إدارة المصادر المائية الحالية بصورة أكثر فاعلية، من خلال تطبيق معايير مُثلى للمحافظة على المياه، ويبدو الحلّ الأخير الأكثر احتمالًا للتطبيق، إذ يذهب حاليًّا أكثر من نصف استخدام المياه من الخزّان لتزويد المناطق المدنية والزراعة، فيما تستخدم المناطق الريفية الجزء الباقي[7]، وتوزيع الاستعمالات هذا غير مثاليّ، حيث إنّ متطلبات الزراعة للمياه غالبًا ما تفوق متطلبات المناطق المدنية بصورة كبيرة، إذًا، فقد تؤدّي جهود الحفاظ على المياه، بما فيها إعادة استخدام المياه وزيادة جريان النبع، خلال مواسم الجفاف إلى تخفيف النقص في المياه في منطقة خزّان إدوارد.

ويُعدّ خزّان إدوارد تاريخ حالة مهمّة لإدارة مصادر المياه، وفي صميم هذه الحالة مصدر مائي طبيعي مهمّ، حيث تؤدي عوامل جيولوجية، وهيدرولوجية، وبيولوجية، وسياسية، وقانونية، واجتماعية واقتصادية دورًا مهمًّا فيه، ومن الواضح أن يستمرّ الخزّان في إبقاء حالة النزاع، حيث تجسّد الاهتمامات المختلفة بالماء صورة المستقبل لمصادر المياه الثمينة في هذا الجزء من ولاية تكساس، وقدتنبّأ إداريّو المياه، أنّه بحلول عام 2050م، سوف تزداد معدّلات ضخّ المياه من الخزّان بنسبة (50%)، ويعتقد أنّ ضخّ المياه الكافية للحفاظ على الأنظمة البيئية وصحّة البيئة، سيكون أقلّ بنسبة (10%) من معدّل الضخّ الحالي، وبالطبع، سيكون هناك تذبذب طبيعي نتيجة الجريان المتغيّر للنهر؛ وقد يكون الضخّ من الآبار أعلى في بعض المناطق مقارنة بأخرى، إلّا أنّه خلال الجفاف، سيكون مستخدمو المياه كلّهم تحت الضغط؛ لذلك تُصمّم الآن خطط إدارة للمياه الجوفية لخزّان إدوارد، مع الأخذ في الحسبان، أنّ العجز في تزويد المياه، سوف ينمو مع الوقت بصورة ثابتة.

5-12 تحلية المياه DESALINATION

تُعدّ تحلية مياه البحر مصدرًا من مصادر المياه في أكثر من (15000) محطّة حول العالم، ولكي يصبح الماء قابلًا للشرب أو ما يعرف بـ (Potable)، يجب أن تُخفّض كمّية الأملاح في الماء بصورة كبيرة جدًّا، إذ تنتج محطّات التحلية الكبيرة ماءً ذا تكلفة تفوق بأضعاف عدّة تكلفة الماء المنتج بالطرق التقليدية؛ ولأنّ الطرق المختلفة التي تزيل الملح فعليًّا تحتاج إلى طاقة، لذلك ترتبط عملية إنتاج الماء بالتحلية بارتفاع تكلفة الطاقة، وقد خفّضت تقنيات حديثة من متطلّبات الطاقة المستخدمة في تحلية المياه، ونتيجة لذلك، سوف تزداد استخدامات الماء المحلّى، خصوصًا مع ازدياد الضغوط على مصادر المياه التقليدية.

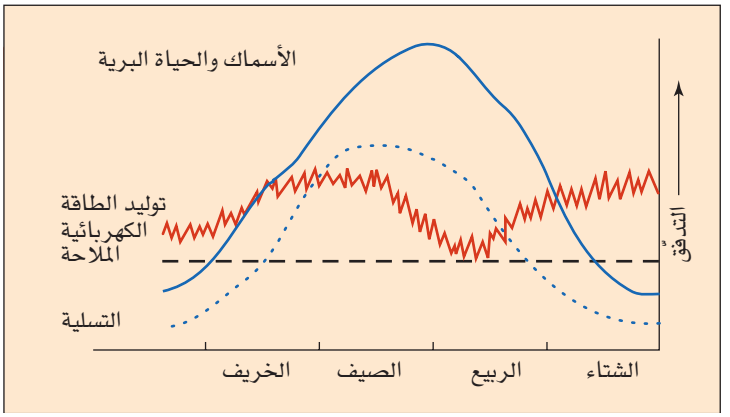
6-12 استخدام المياه WATER USE

لمناقشة استخدام المياه، يجب أن نميّز بين "الاستخدام البعيد عن النهر" (Offstream use)، وهو الماء الذي تتمّ إزالته أو تحويله من مصدره، مثل: الماء المستخدم في الرّي، وإنتاج الكهرباء بالطرق الحرارية الكهربائية، والعمليات الصناعية، وتزويد الناس بالماء، أمّا الاستخدام الاستهلاكي (Consumptive Use)، فهو نوع من أنواع "الاستخدام البعيد عن النهر" حيث لا يعود الماء إلى النهر أو مصدر المياه الجوفي مباشرة بعد الاستخدام، وهذا هو الماء الذي تبخّر أو أصبح جزءًا من تركيب النبات والمحاصيل أو المنتجات، أو يستهلك عن طريق الحيوانات والإنسان[2، 8]، وأمّا النوع الثاني المسمّى "الاستخدام في النهر" (Instream Use)، فالماء المستخدم لا يؤخذ من المصدر أو لا يسحب منه، مثل: استخدام مياه النهر في الملاحة، وإنتاج الكهرباء، ومواطن السمك، و"الحياة الفطرية"، والماء المستخدم بوصفه وسيلة للتسلية. غالبًا ما ينتج عن الاستخدامات المتعدّدة للماء في النهر جدل أو نزاع؛ لأنّ كلّ استخدام يتطلّب ظروفًا معيّنة مختلفة، لمنع حدوث تدمير أو تأثير ضار، فمثلًا: تتطلّب الأسماك و"الحياة الفطرية" تذبذبًا موسميًّا في مستويات الماء، ومعدّل جريان للتكاثر المثالي، وهذه المستويات والمعدّلات تختلف عن مستويات متطلبات توليد الطاقة الكهربائية ومعدّلاتها، التي تحتاج إلى تذبذبات يومية كبيرة في تصريف النهر، لتلائم متطلّبات الطاقة، وبالطريقة نفسها، قد تختلف هذه المتطلّبات عن متطلّبات الشحن النهري أو ملاحة القوارب، ومن جهة أخرى، قد يتطلّب التدفّق أو التفريغ (Discharge) الذي يزيل أحمال الرسوبيات من النهر، نمط جريان مختلف كذلك. يوضّح الشكل (12-17) الأنماط الموسمية للتدفّق أو التفريغ (Discharge) لبعض هذه الاستخدامات.

نقل المياه أو تحريكها في اتّجاه الناس
Movement of Water to People

في الحضارة الحديثة تُحرّك المياه، وتُنقل مسافات شاسعة، من المناطق ذات الهطل المطري العالي إلى مناطق الاستخدام الأكثر للمياه، ففي كاليفورنيا مثلًا، هناك طلب على نظام السدود لمياه الأنهار الشمالية؛ وذلك لتزويد المدن في الجزء الجنوبي من الولاية، في حين يحصل ثلثا الجريان السطحي في كاليفورنيا شمال مدينة سان فرانسسكو (San Francisco)، حيث يتوافر فائض من الماء، نجد أنّه يحصل في المقابل استخدام لثلثي كمّية المياه في المناطق جنوب سان فرانسسكو، حيث يوجد عجز في المياه، وفي السنوات الأخيرة شُيّدت قنوات من قبل مشروع مياه كاليفورنيا (California Water Project)، ومشروع سنترال فالي (Central Valley Project)، حيث حُرّكت كمّيات كبيرة من المياه من الجزء الشمالي نحو الجزء الجنوبي للولاية (الشكل 12-18)، إلّا أنّ هذا التحريك أثّر في الأنظمة البيئية سلبيًّا، وخصوصًا مناطق تجمّعات الأسماك وصيدها (Fisheries) في بعض أنهار شمال كاليفورنيا.

Obeikandi.com



الشكل (12–17) الاستخدامات المختلفة للماء في نهر متنازع حوله. رسم بياني يقارن «استخدامات الماء داخل النهر» والتدفّقات أو التفريغات المختلفة لكلّ استخدام. التدفّق أو التفريغ (*Discharge*): هو كمّية الماء المارّة عبر مكان ما، وتقاس بوحدات المتر المكعّب لكلّ ثانية (m^3/s). النمط المتعرّج لمنحنى توليد الطاقة الكهربائية من الماء ناتج عن تغيّر سريع (غالبًا يوميّ) في الماء المحرّر من السدّ لتوليد الكهرباء، وتعكس التغيّرات الموسمية الكبيرة احتياجات الصيف والشتاء من الطاقة لأغراض التبريد والتدفئة. أمّا الخطّ المستقيم فيمثّل نمط استخدام الملاحة بالقوارب والبارجات.

(أ)

(ب)

الشكل (12–18) تحريك المياه ونقلها للناس. (أ) نظام قنوات جرّ المياه في كاليفورنيا. (ب) قناة كاليفورنيا الجارّة للماء في منطقة *(San Joaquin Valley)*

المصدر: *Zeiss Me/ istock photo.com*.

لكنّ لوس أنجلوس لا تنفرد لوحدها بهذه الصفة، إذ إنّ كثيرًا من المدن الكبيرة في العالم مضطرّة إلى جرّ المياه من مناطق بعيدة جدًّا عنها، مثلًا: استوردت مدينة نيويورك المياه من المناطق المجاورة أكثر من (100) عام. ويمثّل كلّ من تزويد المياه واستخدامها في مدينة نيويورك نمطين متكرّرين، ففي الأصل استُخدمت المياه الجوفية المحلية والأنهار ونهر هدسون (*Hudson River*)، إلّا أنّ احتياجات الماء تجاوزت كمّيات التزويد، وعام 1842م أُنشئ أوّل سدّ ضخم على بعد أكثر من (48 km) شمال المدينة، ومع توسّع المدينة بصورة سريعة من منهاتن (*Manhattan*) إلى لونج آيلاند (*Long Island*) تزايدت احتياجات المياه مرّة أخرى، أمّا الخزّانات الجوفية الرملية لمنطقة لونج آيلاند، فقد كانت في البداية مصدرًا لمياه الشرب، إلّا أنّ هذا الماء اُستنفد بمعدّل أسرع من معدّل تغذية مياه الأمطار، ولوّثت الحفر الامتصاصية المياه الجوفية، واندفعت مياه المحيط المالحة نحو المياه الجوفية أيضًا (انظر تاريخ حالة: لونج آيلاند، نيويورك)، ثمّ أُنشئ سدّ أكبر عام 1900م في كورتون (Corton)، غير أنّ التوسّع الإضافي للمدينة أعاد الكرّة مرّة أخرى للنمط نفسه: استخدام أوّلي للمياه الجوفية وتلوّث وتملّح، واستخدام ضار للمصادر المائية متبوعًا ببناء سدود جديدة أكبر، في مناطق ذات غابات في اتّجاه أعلى الولاية.

ما زال نمط استيراد المدن للمياه مستمرًّا، فعلى سبيل المثال: تتفاوض مدينة سان دييغو (*San Diego*) في كاليفورنيا مع سلطات المياه الزراعية، في الشرق في منطقة وادي كوشيلا (*Coachella Velley*) من أجل شراء الماء، حيث تُطلب كمّيات إضافية من الماء، لدعم تطوّر المدينة، وإنشاء نظام تزويد مياه مستقلّ عن جارتها الكبيرة الشمالية لوس أنجلوس (*Los Angles*)، التي تُعطيها الماء، حيث إنّ افتقاد العمران والتطوّر في المراكز الحضرية لكمّيات كافية من المياه في الوقت الحالي أو المستقبل، يُعدّ مشكلة لكثير من المدن، بما فيها أتلانتا (*Atlanta*)، ونيويورك، وميامي (*Miami*)، وشيكاغو (*Chicago*) وأوستن، ودنفر (*Denver*)، ولوس أنجلوس وسان دييغو، وربّما يجب على التطوّر والتجمّعات السكنية في هذه المناطق أن يصبح محدودًا، ويجب على المزيد من السكان الرحيل إلى مناطق قريبة من المصادر الجيّدة، وربّما يكون هذا الحلّ مستحبًّا من منظور بيئي؛ لأنّه يستلزم نقل المياه أو ترحيلها بصورة أقلّ مسافات طويلة للناس، وعليه، يمكن استخدام المزيد من المياه محليًّا قرب مصادرها الأصلية، وستسمح المناطق التي تتطوّر بالقرب من مصادر المياه بمرونة

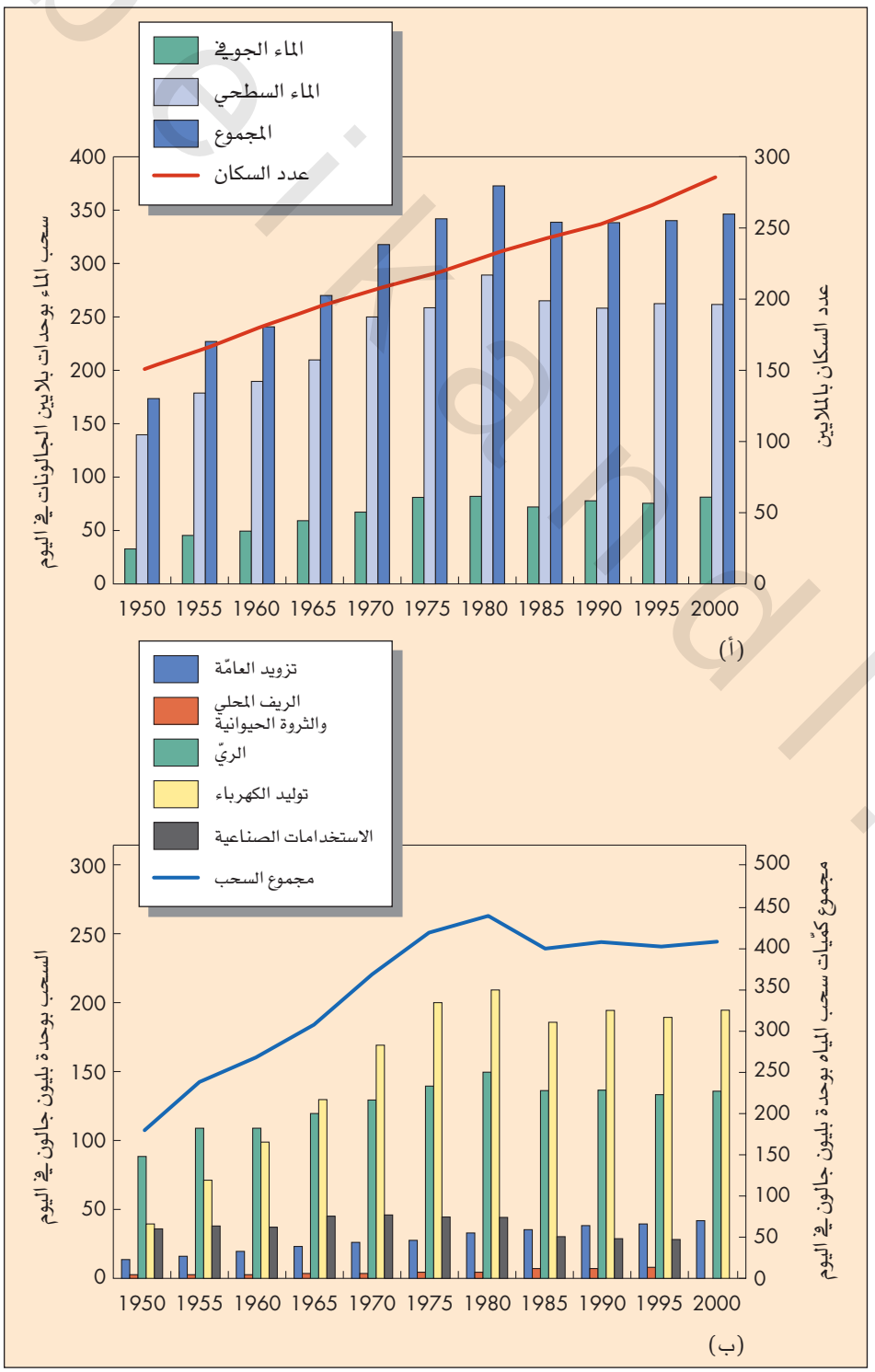
obeikan.com

أكبر في استعمال المياه، وستفقد كمّيات أقلّ من المياه خلال التبخّر والتسرّب من خلال القنوات الناقلة لها، ما يترك ماءً أكثر للأنظمة البيئية.

أنماط في استعمالات المياه
Trends in Water Use

تشكّل استعمالات المياه في العالم ما نسبته (70%) للزراعة، و(20%) للصناعة، و(10%) للاستعمالات المدنية والريفية للسكان، وتعطينا أنماط استخراج المياه في الولايات الأمريكية رؤية مثيرة للانتباه، ومهمّة أيضًا لإدارة مصادر المياه. يوضّح الشكل (12-19أ) أنماط سحب المياه خلال الفترة (1950م-2000م) (المعلومات الحكومية الأحدث)، حيث تظهر هذه المعلومات الآتي:

- يتجاوز السحب من المياه السطحية السحب من المياه الجوفية بصورة كبيرة.
- ازداد سحب المياه لغاية عام 1980م، ثمّ تناقص بعد ذلك، ثمّ أصبح ثابتًا، وبلغ عدد سكان أمريكا قرابة (151) مليونًا عام 1950م، واستمرّ في الازدياد ليصل إلى (290) مليونًا تقريبًا عام 2000م؛



الشكل (12-19) أنماط سحب المياه في أمريكا. (أ) سحب المياه العذبة بحسب فئة استخدام المياه (1950م-2000م). (ب) مجموع (عذب ومالح) السحوبات بحسب فئة استخدام المياه (1960م2000-م) المصدر:
(Hutson, S. S., et al., 2004 Estimated use of water in the United States in 2000. U.S Geological Survey Circular 1268).

obeikandl.com

لذلك خلال الفترة التي انخفض فيها سحب المياه، ثم ثبُت أو استقرّ (1980–2000) كان عدد السكان يزداد مع الوقت، ويعني هذا النمط حدوث إدارة ومحافظة جيّدتان للماء خلال فترة ألـ (20) سنة تلك[8].

ويظهر الشكل (12–19ب) أنماط سحب الماء العذب والماء المالح بحسب فئة استعمال المياه، من عام 1960م إلى عام 2000م، حيث تظهر المعلومات الآتية:

- احتياجات الزراعة وصناعة توليد الطاقة الكهروحرارية (Thermoelectric)، هما أكثر القطاعات استهلاكًا للماء.
- ازداد استعمال الماء من قبل العامّة في كلّ من المناطق الحضرية والريفية، خلال تلك الفترة، وهو نمط يُعزى إلى الزيادة في أعداد السكان.
- استقرّ استخدام الماء للريّ في الزراعة عام 1980م، وانخفض قليلًا بعد ذلك، وقد يعزى هذا النمط إلى الجهود المبذولة في الحفاظ على الماء.
- استخدام الماء لتوليد الطاقة الكهربائية بصورة كبيرة من عام 1960م–1980م، عندما بدأت كثير من محطّات توليد الطاقة في العمل، لكن السحب بعد ذلك انخفض؛ بسبب الاستخدام الفعّال للماء.
- منذ عام 1980م استخدمت الصناعة كمّيات قليلة جدًّا من المياه العذبة، ويُعزى هذا الانخفاض جزئيًّا إلى التقنيات الجديدة، التي تتطلّب كميات أقلّ من المياه، إضافة إلى الفعالية المحسّنة للمحطّات، وكذلك ازدياد ممارسة تدوير المياه.

تتوافر مؤشّرات مشجّعة على أنّ الناس أصبح لديهم وعي أكبر عن المصادر المائية، والحاجة إلى الحفاظ عليها، ونتيجة لذلك، قلّ الطلب على الماء في كثير من الولايات، ومن العلامات المشجّعة الأخرى، أنّ الماء العادم المستصلح أصبح أكثر شيوعًا، ويبلغ قرابة بليون جالون في اليوم، وهو ما يعادل خمسة أضعاف ما كان عليه قبل (50) عامًا[8]، وما زال النمط مستمرًّا، حيث يتمّ إيجاد طرق أكثر ابتكارًا، لإعادة استخدام المياه، وخصوصًا الماء المستصلح.

الحالية، أو السيطرة على تزايد التلوّث.

المحافظة على المياه
Water Conservation

ماذا يمكن فعله لاستعمال المياه بفاعلية وتقليل السحب والاستهلاك؟ لأنّ الريّ هو واحد من أكبر استخدامات المياه، فإنّ الريّ الزراعي المحسّن، قد يقلّل من سحب المياه بنسبة (20–30%)، حيث تهدر ممارسات الريّ السيّئة كمّيات كبيرة من المياه، لا تستفيد منها المزروعات، وتتضمّن التقنيات المستخدمة لتحسين الحفاظ على مياه الريّ الزراعي، استخدام قنوات معزولة الأرضية (مبطّنة) ومغطّاة تقلّل من التسرّب والتبخّر، إضافة إلى استخدام المراقبة والجدولة الدورية لتصريف الماء من القنوات باستخدام الحاسوب، واستخدام متكامل أكثر للمياه السطحية والجوفية، والريّ الليلي الّذي يقلّل كمّية التبخّر، واستخدام أنظمة ري محسّنة، مثل الرشّاشات المائية والري بالتنقيط، وكذلك إعداد أفضل للأراضي لاستعمالات المياه بصورة سليمة. يعادل الاستعمال المنزلي (مدني وريفي) للماء ما نسبته (10%) من معدّلات السحب الكلّي على مستوى أمريكا، إلّا أنّه مركّز وله مشكلات محلية كبيرة، ومن الممكن تقليل السحب في الاستعمالات المنزلية بصورة كبيرة وبتكلفة قليلة نسبيًّا، إذا استخدمنا مثلًا أدوات ذات فاعلية للحمّام والبالوعات، وريّ الحدائق والمروج الخضراء ليلًا، واستخدام نظام الري بالتنقيط للنباتات المنزلية. ويمكن كذلك تخفيض الماء المستخدم في توليد الكهرباء بنسبة (25%) إلى (3%)، باستخدام أبراج تبريد المصمّمة لاستهلاك ماء قليل، أو العمل دون ماء، ويمكن للصناعة أن تقلّل أيضًا سحب المياه، بزيادة ممارسات معالجة المياه في المصنع أو تدويرها، أو بتطوير معدّات وعمليات جديدة تستهلك ماءً أقلّ، إنّ مجال الحفاظ على الماء متغيّر بسرعة، ومن المتوقّع أنّ عددًا من الاختراعات المستقبلية، سوف تقلّل مجموع المسحوب من الماء، على الرغم من الاستهلاك المتزايد[2].

12-7 إدارة المياه في المستقبل
WATER MANAGEMENT IN THE FUTURE

إدارة مصادر المياه قضية معقّدة، وستصبح أكثر صعوبة مع ازدياد الطلب على الماء (راجع: نظرة متفحّصة: إدارة نهر كولورادو)، فعلى الرغم من أنّ مشكلات تزويد المياه كبيرة جدًّا في جنوب غرب أمريكا والمناطق الجافّة وشبه الجافّة الأخرى من العالم، إلّا أنّ هذه المشكلات أيضًا تواجه مدنًا كبيرة في مناطق رطبة، مثل نيويورك وأتلانتا، ومع ذلك، تتوافر بعض الخيارات، مثل تحديد مصادر تزويد بديلة، وحماية وإدارة أفضل للمصادر

نظرة متفحّصة A CLOSER LOOK

إدارة نهر كولورادو Management of Colorado River

يُعدّ نهر كولورادو النهر الرئيس في جنوب غرب الولايات المتّحدة، وهناك جانبان مهمّان يتعلقان بإدارة مياهه: (1) إدارة مصادر المياه للناس، و(2) إدارة النهر في منطقة الجراند كانيون (Grand Canyon)، للمحافظة على بيئة النهر، وسوف نناقش كلا الجانبين هنا:

إدارة المياه Managing the Water

لا يمكن لأيّ مناقشة عن مصادر المياه وإدارتها، أن تكون كاملة دون ذكر حوض نهر كولورادو والجدل الذي يحيط باستخدام مياهه، فقد استخدم الناس مياه نهر كولوراد أكثر من (800) عام، وكانت لدى الأمريكيين الأصليين الأوائل، الذين كانوا في الحوض، ثقافة حضارية كبيرة ذات نظام توزيع مائي معقّد، ومعظم قنواتهم الأولى نُظّفت فيما بعد من الأنقاض، واستخدمت من قبل المهاجرين المستوطنين في فترة 1860م[9]، وبالنظر إلى هذا التاريخ المبكّر، قد نفاجأ إذا علمنا أنّ النهر لم يكن كليًّا مكتشفًا لغاية عام 1869م، عندما أبحر جون وسلي باول (John Wesley Powell) بقوارب خشبية عبر الجراند كانيون (Grand Canyon)، الّذي أصبح فيما بعد مديرًا للمؤسّسة المعروفة (U.S Geological Survey)، أو "هيئة الجيولوجيا الأمريكية"، وعلى الرغم من أنّ مياه نهر كولورادو توزّع عبر قنوات طبيعية وقنوات صناعية إلى الملايين من سكان المناطق المدنية والمناطق الزراعية، مثل أمبيريال فالي (Imperial Valley) في

كاليفورنيا، إلّا أنّ الحوض نفسه الذي تبلغ مساحته ($632,000\ km^2$)، يُعدّ ذا انتشار قليل ومتقطّع السكان، وتُعدّ مدينة يوما (Yuma) في أريزونا، التي يبلغ عدد سكانها (42,000) نسمة، أكبر مدينة على النهر، وضمن الحوض نفسه، فإنّ مدن لاس فيغاس (Las Vegas)، وفينيكس (Phoenix) وتوسان (Tucson) هي فقط التي يزيد سكانها على (50,000) مواطن، ومع ذلك، فإنّ قرابة (20%) فقط من مجموع السكان في الحوض هم ريفيون، وهناك مساحات شاسعة من الحوض ذات عدد منخفض جدًّا من السكان، وفي مساحات تقاس بآلاف عدّة من الكيلومترات المربّعة لا يوجد سكان دائمون[9].

تقع منابع نهر كولورادو في منطقة جبال (Wind River Mountains) في ولاية وايومنغ (Wyoming)، وخلال رحلة النهر التي تبلغ (2,300 km) في طولها إلى البحر، يجري النهر خلال أو يتاخم ولايات، مثل وايومنغ، وكولورادو، ويوتا (Utah) نيومكسيكو، ونيفادا (Nevada) أريزونا وكاليفونيا إضافة إلى المكسيك، (الشكل 12-ي)، وعلى الرغم من أنّ حوض التصريف كبير جدًّا، ويشمل معظم جنوب غرب أمريكا، إلّا أنّ الجريان السنوي للنهر يبلغ (3%) فقط من جريان المسيسيبي، وأقلّ من عُشر نهر كولومبيا؛ لذلك، يُعدّ جريان نهر كولورادو من حيث حجمه متواضعًا، ومع ذلك أصبح واحدًا من أكثر الأنهار في العالم تنظيمًا بالتشريعات، وأكثرها جدلًا وتنازعًا حوله، إذ امتدت التنازعات التي حصلت منذ عقود إلى نطاق أبعد بكثير من حوض النهر، وأصبحت تشمل مراكز مدنية كبيرة ومناطق زراعية متطوّرة في كاليفورنيا وكولورادو ونيومكسيكو وأريزونا، ونتج عن حاجة تلك المناطق شبه الجافّة للمياه إلى استخدام مفرط لها، إضافة إلى تدهور نوعية المياه، وظهرت بصورة دورية اتفاقيات بين الولايات وقضايا تسوية في المحاكم واتفاقات أو معاهدات دولية، إضافة إلى المشاحنات بين الأشخاص الذين يستخدمون المياه على طول النهر.

ويستمرّ ميراث القوانين المتراكمة وقرارات المحاكم، إضافة إلى أنماط استخدام المياه المتغيّرة في التأثير في حياة ملايين السكان وطرق عيشهم في كلّ من أمريكا والمكسيك[10].

قُسّمت مياه النهر في النهاية إلى حصص بين المستخدمين المختلفين على طول النهر، بما فيها الولايات السبع في جمهورية المكسيك، وتمّ هذا التقسيم عبر سنوات عدة من المفاوضات والاتفاقيات الدولية والاتفاقيات بين الولايات والعقود والتشريعات الفدرالية وقرارات المحاكم، ويسمّى نظام التشريعات جميعها الخاصّ بالنهر "قانون النهر"، ومن أهمّ وثائقه "معاهدة نهر كولورادو عام 1922م"، التي قسّمت حقوق المياه بناءً على حوض علوي وحوض سفلي، وكذلك الاتفاقية مع المكسيك عام 1944م، التي أعطت للمكسيك ما مقداره ($1.85\ km^3$) بوصفه تزويدًا سنويًّا من مياه النهر، وكان أحدث القرارات قرار المحكمة العليا في أمريكا عام 1963م، الذي تضمّن ولايتي أريزونا وكاليفورنيا، وقد رفضت أريزونا توقيع معاهدة عام 1922م، إذ كان لها نزاع طويل مع كاليفورنيا على موضوع حصص الماء، ثمّ قرّرت المحكمة أن تتنازل جنوب كاليفورنيا عما مقداره ($0.74\ km^3$) من مياه كولورادو، وصادق الكونغريس أخيرًا على قانون السيطرة على ملوحة حوض نهر كولورادو عام 1974م، حيث سمح القانون لمجموعة إجراءات بالسيطرة على الأثر السلبي للملوحة في النهر، بما في ذلك إنشاء محطّات تحلية لتحسين نوعية المياه.

تبقى قضايا إدارة مياه نهر كولورادو معقّدة؛ لأنّ مياه النهر كلّها تم الحديث حولها بالفعل في الوقت الذي يزداد فيه الطلب على الماء، ويقدم تاريخ إدارة مياه نهر كولورادو مجموعة أسئلة رئيسة، من المحتمل أن تواجه أجزاءً

الشكل (12 هـ) حوض نهر كولورادو. يُظهر السدود الرئيسة، وتقسيم منطقة التصريف لأغراض إدارة الحوض. تعرّضت الدلتا التي كانت يومًا منطقة رطبة كبيرة على رأس خليج المكسيك لدمار كبير، نتيجة لتحويل المياه للاستخدامات المختلفة.

obeikandl.com

أخرى من جنوب غرب أمريكا في السنوات المقبلة، مثل:

- كيف يمكن توزيع حصص مصادر مياه محدودة؟
- كيف يمكن الحفاظ على نوعية (جودة) المياه؟

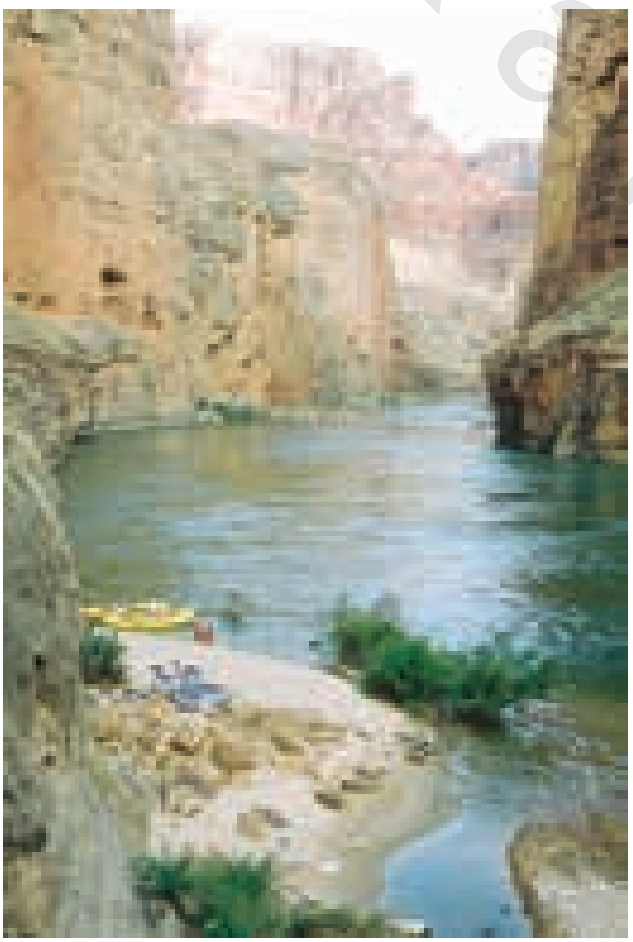
بوصفه مثالًا على قضية إدارة المياه المعقّدة، خذ مثلًا قناة الأمريكيين (All American canal)، التي تقع على طول الحدود الأمريكية المكسيكية، انظر الشكل (12–18أ)، وهي مبطّنة من الأسفل بالأرض فقط، ونتيجةً لذلك، يتسرّب الماء القادم من نهر كولورادو، الّذي يجري في القناة، إلى داخل الأرض ليصل المياه الجوفية، وهذا الماء هو مصدر جدل، يتطوّر مع الوقت إلى حرب مياه سياسية، وربّما تُبطّن أرضية القناة لما طوله (36–km) لذلك الجزء من القناة، الذي يوصل الماء إلى مدينة سان دييغو، والهدف هو إيقاف تسرّب الماء الفاقد الذي يرشح نحو المياه الجوفية من القناة، وسوف يؤثّر هذا سلبًا في المزارعين المكسيكيين، حيث تسهم بلايين الجالونات من ماء المياه الجوفية المتسرّب في تغذية المياه الجوفية، وهو المصدر الذي يعتمد عليه المزارعون المكسيكيون لري المحاصيل، منذ أكثر من (60) عامًا، إذ لا تمنع الاتفاقية الموقّعة مع المكسيك عام 1944م بتبطين القناة، إلّا أنّ المكسيكيين يعدّون أخذ الماء الذي اعتمدوا عليه عقودًا مسألة لا أخلاقية، ويقولون: إنّ أخذ الماء سيؤدّي إلى فشل الزراعة عندهم، ما سيؤدّي إلى المزيد من الهجرة غير الشرعية إلى الولايات الأمريكية، أي إنّ شيئًا يقلّل الفرص في المكسيك، سيؤدّي إلى زيادة الهجرة إلى أمريكا، لكنّ المنطق الأخلاقي يبدو أقوى، إضافة إلى أنّ الماء الذي استخدم عقودًا في المكسيك، والّذي لم يخطّط له عندما أنشئت القناة، يُعدّ سابقة يجب أن تُحترم.

إدارة نهر كولورادو في جراند كانيون
Managing the Colorado River in the Grand Canyon

يمثّل الوادي العظيم (جراند كانيون) (Grand Canyon) الخاص بنهر كولورادو (الشكل 12–ف)، مثالًا جيّدًا على كيفية تعديل النهر لنفسه؛ بسبب تأثير سدّ كبير فيه، فعام 1963م تمّ بناء سدّ جلن كانيون (Glen Canyon Dam) في أعلى النهر للجراند كانيون (الشكل 12–ي)، وغيّر إنشاء السدّ بصورة كبيرة نمط الجريان والعمليات النهرية في أسفل النهر، وقد تمّ ترويض النهر من وجهة نظر هيدرولوجية، وقبل إنشاء السدّ، كان أقصى جريان للنهر يصل شهري مارس ويونيو خلال فترة ذوبان الثلج في الربيع، ثمّ يقلّ بقية العام، باستثناء حالات الفيضان المفاجئ، نتيجة عواصف مطرية في أعلى النهر، وخلال فترات التصريف أو التفريغ العالي، يمتلك النهر قدرة عالية على نقل الرسوبيات (غالبًا رمل وغرين)، ويجرف مجرى القناة بقوّة، إضافة إلى أنّ الفيضانات العالية حرّكت الصخور الصغيرة في منحدر النهر، التي تشكّلت بفعل جريان النهر فوق المراوح النهرية، والرسوبيات الناتجة عن جريان الحطام الصخري، والتي تصل إلى النهر الرئيس من فروعه، وعندما يحصل الجريان الصيفي الضحل، يصبح النهر قادرًا فقط على حمل رسوبيات قليلة، لذلك كان الترسيب على طول النهر يشكّل أشرطة رسوبية كبيرة، ومصاطب تسمّى "شواطئ" من قبل الناس الذين كانوا يبحرون في النهر.

وبعد بناء السدّ، انخفض أعلى جريان سنوي للنهر الفائض بنسبة (66%)، أمّا أعلى جريان للفيضانات مدة (10) سنوات فقد انخفض بنسبة (75%)، ومن جهة أخرى، سيطر السدّ على جريان الماء إلى درجة أنّ متوسّط التفريغ أو التصريف (Discharge) ازداد بنسبة (66%)، فالجريانات غير مستقرّة لدرجة كبيرة، وبسبب الحاجة إلى التذبذب في الجريان، من أجل توليد الكهرباء، فإنّ مستوى الماء يمكن أن يتغيّر لغاية (5) أمتار في اليوم، أضف إلى ذلك أنّ السدّ والبحيرة خلفه يحتجزان الرسوبيات ويمنعانها من الحركة إلى أسفل النهر، ما يقلل بصورة كبيرة حمولة النهر للرسوبيات بعد السدّ مباشرة؛ لذلك تعاني بعض الحواجز الرملية الكبيرة، التي تشكّل مساكن مهمّة للكائنات الحية، نقص إمداد الرمل، ولذلك تتعرّض للتعرية مع الوقت، ويحصل انخفاض أقلّ في حمولة الرسوبيات أبعد قليلًا أسفل النهر؛ وذلك لأنّ القنوات الفرعية للنهر تستمرّ في جلب الرسوبيات إلى النهر[11]، ومن الجدير ذكره، أنّ التغيّر في هيدرولوجية نهر كولورادو في الجراند كانيون، غيّر بصورة كبيرة مورفولوجية (أو صورة) النهر، وأصبحت المنحدرات أكثر خطورة؛ لأنّ الفيضانات الكبيرة التي اعتادت في الماضي على تحريك القطع الصخرية الكبيرة بعيدًا أسفل النهر، لم تعد موجودة.

أدّت التغيّرات في جريان النهر أيضًا، وخصوصًا غياب الجريانات العالية، إلى تحوّلات في الغطاءات النباتية، فقبل بناء السدّ توافرت ثلاثة أنواع من أحزمة الغطاء النباتي المتوازية على المنحدرات أعلى النهر، وبالقرب من النهر وعلى أشرطة الترسيب الرملي، كانت النباتات سريعة الزوال تنمو، وتزال عن طريق فيضانات الربيع السنوية، أمّا فوق خطّ أعلى حدّ للماء،



الشكل (12و) نهر كولورادو في جراند كانيون. تُستخدم الأشرطة الرملية أو "الشواطئ" في الزاوية اليسرى السفلية من قبل المبحرين في النهر، الذين ازداد عددهم، وأثروا في الوادي، أصبح عدد الناس المسموح لهم بالإبحار عبر النهر الآن مقيّدًا (المصدر: *Larry Minden Minden Pictures*).

فتتوافر كتل من الأشجار القرنية (المسكيت وكات كلاو أكاكيا) (Mesquite and Cat Acacia)، المختلطة مع الصبار (Cactus) وريشة الأباتشي (Apache Plume)، وحزام من الأغصان الهشّة والصبار البرميل توافرت إلى الأعلى[12]، وقد روّض إغلاق السد عام 1963م فيضانات الربيع مدّة (20) سنة، وترسّخت في حزام جديد على طول ضفاف الأنهار نباتات لم تكن موجودة في السابق في الوادي، مثل التمارسك أو الطرفاء، وهي شجرة نحيلة الأغصان (Tamarisk or Salt Cedar)، أو ما تعرف بأرز الملح، إضافة إلى الصفصاف الأصلي في المنطقة.

أدّى ذوبان ثلوج قياسي وغير مسبوق في جبال روكي (Rocky Mountains) في يونيو من عام 1983م، إلى إطلاق كمّية مياه تعادل ثلاثة أضعاف ما كان يطلق في الظروف الطبيعية تقريبًا، أي مثل كمّية متوسّط فيضانات الربيع قبل بناء السدّ، وقد نظّفت الفيضانات الناتجة أرضية النهر وضفافه، وحرّرت الرسوبيات المختزنة، التي غذّت بدورها الرسوبيات في الأشرطة الرملية، وكذلك نظّفت أشجار التمارسك أو أرز الملح (Salt Cedar) والصفصاف وقطّعتها، إذ كان لتأثير تحرير كمّيات كبيرة من الماء فائدة مهمّة لبيئة النهر، وهذا يؤكّد أهمّية الفيضانات الكبيرة في الحفاظ على النظام النهري، ضمن حالة أكثر طبيعية، فيما بعد وبوصفها عملية تجريبية أُطلق "فيضان اختباري" من مياه السدّ في الفترة من السادس والعشرين من مارس والثاني من إبريل عام 1996م؛ وذلك لإعادة توزيع حمولة الرمل، وقد نتج عن الفيضانات تكوين (55) شاطئًا جديدًا، وإضافة الرمل إلى (75%) من الشواطئ القائمة، ما أسهم في تجديد المستنقعات (الأهوار) والماء خلف السدّ أو خلف العوائق، الذي يُعدّ مهمًّا بوصفه مساكن للأسماك الأصلية والأنواع المهدّدة بالانقراض، وكان الماء المحرّر من السد ماءً باردًا، لذلك أُنشئت برك تربية لأسماك السلمون المرقّط كأسي الهيأة، أمّا السمك الأصلي الذي يفضّل ماءً دافئًا، مثل الأسماك الكبيرة (لغاية (6) أقدام في الطول)، مثل سمك (Squaw)، فقد أصبحت مهدّدة بالانقراض؛ بسبب التغيّر في بيئة المسكن ونشر سمك السلمون المرقّط، وقد عُدّت الفيضانات الاختبارية نجاحًا[13]، على الرغم من أنّ أجزاءً كبيرة من رسوبيات الرمل الجديدة قد عُرّيت بصورة كبيرة[14].

لقد أعادت فيضانات الاختبار عام 1996م تحريك الرمل، وجرفته من أرضية نهر كولورادو وضفافه أسفل منطقة سدّ جلن كانيون (Glen Canyon Dam)، ورسّبته على الأشرطة الرملية، وأُضيف القليل من الرمل إلى النظام النهري المكوّن من روافد النهر؛ لأنّها لم تكن في وضعية فيضانات خلال فترة الاختبار، وقد تمّ تعدين الرمل من النهر أسفل السدّ؛ لأنّه محدود، ومصدره غير متجدّد وغير قادر على تزويد الأشرطة الرملية بالرمل بصفة دائمة، إذ اُقتُرحت أفكار إبداعية جديدة[14، 15]، منها: التقاط المزيد من الرمل الواصل من نهر باريا (Paria River)، الذي يدخل نهر كولورادو بعد السدّ، قرب "ليس فاري" (Lees Farry)، عن طريق تحرير كمّيات مياه مناسبة من السدّ لتزويد الأشرطة الرملية[15]، ومن النتائج المستنتجة لهذه الدراسة، أنّه بتحرير كمّيات مناسبة من ماء السدّ، فإنّه من الممكن تجديد الرمل الذي يُفقد، وعليه، يلتقي نهر كولورادو الصغير (Little Colorado River)، وهو نهر كبير نسبيًّا، بمساحة تصريف تبلغ ($67,340\ km^2$) (الشكل 12-ي)، مع نهر كولورادو.

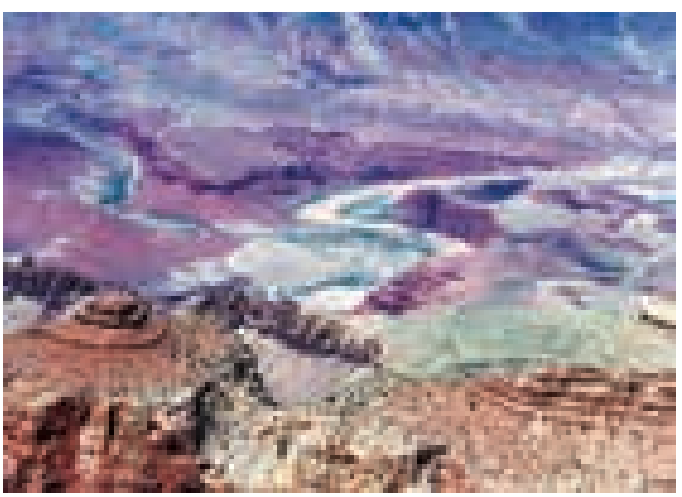
وعام 1993م أدّى فيضان في نهر (Little Colorado)، إلى توصيل كمّيات كبيرة من الرمل إلى نهر كولورادو في الجراند كانيون، وتكوّنت شواطئ بارزة، لكن لسوء الطالع، تعرّضت الشواطئ للتعرية بصورة كاملة تقريبًا بعد مرور سنة، وذلك بفعل جريان نهر كولورادو، إذ كانت المشكلة تكمن في أنّ الشواطئ لم تترسّب بصورة كافية من حيث الارتفاع فوق أرضية النهر؛ ولذلك كانت عرضة للتعرية من فيضانات منطقة ما بعد السدّ الطبيعية، وكانت الفكرة المستنتجة، أن يتم تزامن تحرير مياه جريان الفيضانات من سدّ جلن كانيون مع فيضانات الربيع الغنية بالرمال في نهر (Little Colorado)، لذا، سيكون الفيضان الناتج عن اتحاد الفيضانات في النهرين أكبر، وعليه، سوف يترسّب الرمل الجديد من نهر (Little Colorado)، على نحو أعلى فوق أرضية النهر (الشكل 12- ز)، وسيكون أقلّ عرضة للإزالة من جريانات نهر كولورادو المنخفضة، وقد استنتج التقييم الهيدرولوجي لنهر (Little Colorado)، أنّ فرصة تغذية الرمل على الشواطئ تحدث، في المتوسّط، مرّة كلّ (8) سنوات، أمّا الخطّة المقترحة، فهي: إعادة تكوين جريان نهري وظروف نقل رسوبيات بصورة تحافظ على النظام البيئي الطبيعي للوادي، التي توافرت قبل بناء سدّ جلن كانيون[14] (Glen Canyon Dam).

تأثير سلبي آخر لسدّ جلن كانيون تمثّل في زيادة أعداد الناس، الذين يبحرون في النهر بالطوّافات عبر (Grand Canyon)، فعلى الرغم من أنّ الإبحار بالنهر محصور الآن على حدّ (15,000) شخص سنويًّا، إلّا أنّ الأثر السلبي طويل الأمد على مصادر الوادي يُعدّ كبيرًا، وقد نجح أقلّ من (100) مستكشف فقط، في القيام برحلة عبر طول الوادي كلّه، قبل عام 1950م.

يجب علينا أن نسلم، أنّ نهر كولورادو في السبعينيات والثمانينيات كان نهرًا متغيّرًا، على الرغم من فيضانات عامي 1983م و1996م، التي أزالت التغيّرات، ولا يمكن أن نتوقّع من جهود استرجاع ظروف النهر الطبيعية أن تعيد النهر إلى حالته قبل بناء السدّ[11، 15]، وفي الناحية الأخرى، ستحسّن الإدارة المثلى للجريانات ونقل الرسوبيات، وتحافظ على الأنظمة البيئية بصورة أفضل.

أخيرًا، ونتيجة لاستخدامات المياه في مناطق أعلى النهر، تدهورت منطقة الدلتا لنهر كولورادو، التي كانت يومًا منطقة رطبة رئيسة، وخلال بعض السنوات لم يصل الماء إلى البحر.

أصبحت المدن التي تحتاج إلى الماء، تعدّها سلعة، مثل البترول والغاز،



الشكل (12 ز) نهر كولوراد الصغير (Little Colorado). تمتلك قناة النهر كمّيات كبيرة من الرمل الذي يساعد على الحفاظ على "شواطئ الأشرطة" الرملية في نهر كولورادو (*Edward A. Kellen*).

تشترى وتباع في الأسواق المفتوحة، وإذا كانت المدن مستعدّة لدفع ثمن المياه، ومسموح لها تجاوز تشريعات المياه الحالية، فعندها سوف يتغيّر تحصيص المياه وتسعيرها، مثلما هي معروفة الآن، وإذا ازدادت التسعيرة بصورة كافية، فإنّ "مياهًا جديدة" من مصادر مختلفة قد تصبح متوافرة، فعلى سبيل المثال: قد تتعاقد سلطات الريّ في المناطق الزراعية مع المدن، لتزويد المياه للمناطق المدنية، وهذه الترتيبات يمكن أن تتمّ دون التأثير سلبًا في المحاصيل، باستخدام إجراءات تحافظ على الماء، لتخفيف فاقد الماء الحالي؛ بسبب التبخّر والتسرّب من القنوات غير المبطّنة، إذ لا تمتلك معظم سلطات الريّ حاليًّا رأس المال الكافي لتمويل وسائل المحافظة هذه على المياه؛ لأنّها ذات تكلفة عالية، إلّا أنّ المدن المحتاجة إلى الماء، قد يكون بمقدورها تمويل مثل هذه المشروعات، ومن الواضح أنّ الماء سيصبح أكثر تكلفة في المستقبل، وإذا كانت تسعيرتها الفعلية صحيحة، فإنّ مشروعات ابتكارية كثيرة قد تصبح متوافرة.

اقترحت لونا ليوبولد (Luna Leopold)، وهي رائدة في مجال دراسة الأنهار ومصادر المياه، فلسفة جديدة لإدارة المياه، تعتمد على عوامل جيولوجية وجغرافية ومناخية، إضافة إلى العوامل التقليدية الاقتصادية والاجتماعية والسياسية، فلا يمكن أن تكون إدارة المياه ناجحة، ما دامت تعالج بصورة ساذجة من منظور اقتصادي وسياسي.

إنّ مصطلح **استخدام الماء** هو أكثر انسجامًا؛ لأنّنا نادرًا ما نقوم بإدارة الماء[16]، وجوهر فلسفة ليوبولد في إدارة المياه، هو أنّ الماء السطحي والماء الجوفي كليهما عرضة للتدفّق الطبيعي، وفي السنوات المطيرة، يتوافر الماء السطحي بكثرة، وينتعش الماء الجوفي القريب من السطح بسبب ذلك، وخلال هذه السنوات الرطبة، نأمل أن تتحمّل منشآت السيطرة على الفيضان جميعها والجسور وعبارات العواصف المطرية الماء الفائض، إذ صُمّمت لتتحمّل جريانًا معيّنًا، وتجاوز هذا الجريان قد يسبّب خرابًا أو فيضانات، وقد استنتجت ليوبولد، أنّنا أكثر استعدادًا وجاهزية للتعامل مع الفيضانات، مقارنة بالتعامل مع نقص المياه؛ لذلك يجب أن تتوافر إستراتيجيات محدّدة، لتخفيف الصعوبات في مواجهة نقص المياه خلال السنوات الجافة، على سبيل المثال: المياه تحت السطحية في مواقع مختلفة في غربي الولايات الأمريكية، إمّا عميقة جدًّا، لكي تستخلص اقتصاديًّا أو تعاني مشكلة في النوعية، إضافة إلى أنّ، هذه المياه قد تكون معزولة عن الدورة الهيدرولوجية الحالية؛ لذلك قد لا تكون مغذّاة طبيعيًّا من المياه السطحية، وقد يكون الماء من هذه المصادر متوافرًا، إذا وضعت خطّط لحفر الآبار وربطها بالشبكة المائية القائمة، ومن الممكن أن تُعدّ معالجة المياه العادمة لإعادة استخدامها أيضًا أحد الخيارات في حالات الطوارئ، فإعادة استخدام الماء بصورة منتظمة قد يكون مكلفًا أو معترضًا عليها لأسباب أخرى، ومن الحكمة أن نقوم بعمل تخطيط مسبق، لإعادة استخدام الماء المعالج خلال الظروف الطارئة[16].

تزدهر عملية تغذية المياه الجوفية في السنوات المطيرة، ويجب استخدام الماء السطحي عندما يكون متوافرًا، مع الاحتفاظ بالماء الجوفي للسنوات الجافّة، وبعبارة أخرى، يمكن ضخّ الماء الجوفي خارج الأرض بمعدّل يتجاوز معدّل التغذية الصناعية خلال السنوات المطيرة، إذًا، تدرك خطّة إدارة المياه هذه، أنّ الزيادة والعجز في المياه، هي عملية طبيعية، ويمكن التخطيط لها تباعًا.

عولمة مصادر المياه: مفهوم الماء الافتراضي

Globalization of Water Resources: The Concept of Virtual Water

عندما نفكر في مصادر المياه، فإنّنا عادة نصوغ السؤال بمفهوم الحوض المائي أو المياه الجوفية، إلّا أنّ هناك مفهومًا جديدًا للماء، وهو أن نفكر في الماء على مقياس عالمي بما يعرف **بالماء الافتراضي (Virtual Water)**، الذي يمكن تعريفه بكمّية الماء اللازمة لإنتاج منتج، مثل سيارة أو محصول مثل الأرز، حيث تقاس كمّية محتوى الماء الافتراضي (Virtual) في المكان الذي أنتج فيه المنتج أو نما فيه المحصول، ويسمّى افتراضيًّا (Virtual)؛ لأنّ محتوى الماء في المنتج أو المحصول قليل جدًّا، نسبة إلى كمّية الماء التي استخدمت لإنتاج السلعة[17].

يظهر مفهوم الماء الافتراضي (virtual) أنّ الناس في أماكن مثل أوروبا الغربية يمكنهم أن يؤثّروا سلبًا وبصورة مباشرة في مصادر المياه الإقليمية في الولايات المتّحدة أو البرازيل، عن طريق المنتج الذي يستوردونه، مثلًا، تستخدم الولايات المتّحدة والبرازيل الكثير من مصادر مياهها لإنتاج منتجات الغذاء التي تصدّر حول العالم، إذ إنّ لاستخدام الماء في إنتاج الغذاء عواقب مترتّبة على مصادر المياه الإقليمية وتخوّفات بيئية، مثل استنزاف مصادر المياه الجوفية في الولايات الأمريكية، أو قطع الأخشاب في حوض الأمازون للزراعة.

ويُعدّ مفهوم الماء الافتراضي (virtual) مفهومًا مفيدًا في تخطيط مصادر المياه على المستويين المحلي والإقليمي، فعلى بلد ذي مناخ جافّ ومصادر مياه محدودة، أن يختار بين استخدام هذه المصادر المائية في الزراعة أو في الاستخدامات الأخرى، لدعم الأنظمة البيئية الرطبة (Ecosystems)، إذ يبلغ المعدّل العالمي من الماء اللازم لإنتاج طن واحد من الأرز قرابة ($2300\ m^3$)، حيث تُعدّ زراعة الأرز في مثل تلك البلدان ذات المصادر المائية الوفيرة مسألة مقبولة، أمّا في البلدان الواقعة في مناخ جافّ فمن الأفضل استيراد الأرز من مناطق أخرى، لتوفير مصادر مياه محلية وإقليمية للاستعمالات الأخرى، وهي فكرة الماء الافتراضي الذي وفّرناه باستيراد هذا المنتج، ومن المهمّ جدًّا فحص مصادر المياه العالمية والتوفيرات الممكنة في استخدام المياه، وهو جزء مهمّ لاستدامة مخزون مصادر المياه العالمية، ففي الوقت الحالي مثلًا، تقلّل أسواق التجارة العالمية الاستهلاك العالمي للماء، عن طريق الزراعة بنسبة تبلغ قرابة (5%)[17].

8-12 الماء والأنظمة البيئية

WATER AND ECOSYSTEMS

نشأت الأنظمة البيئية العالمية استجابة لظروف طبيعية، تتضمّن المناخ، والتزويد الغذائي، والتربة والهيدرولوجية للمنطقة، وأيّ تغيير في هذه العوامل سوف يؤثّر في الأنظمة البيئية، وخصوصًا التغييرات المستحدثة من الإنسان، التي يكون لها تأثيرات كبيرة، إذ يقوم الناس بتدمير الأنظمة البيئية على نطاق عالمي، وأصبحت الظروف الهيدرولوجية، وبالتحديد عمليات المياه السطحية ونوعية المياه، عوامل تحدّد استمرارية بعض الأنظمة البيئية، وخصوصًا الأراضي الرطبة (*Wetlands*)[18]. (راجع فقرة نظرة متفحّصة: الأراضي الرطبة).

Preview

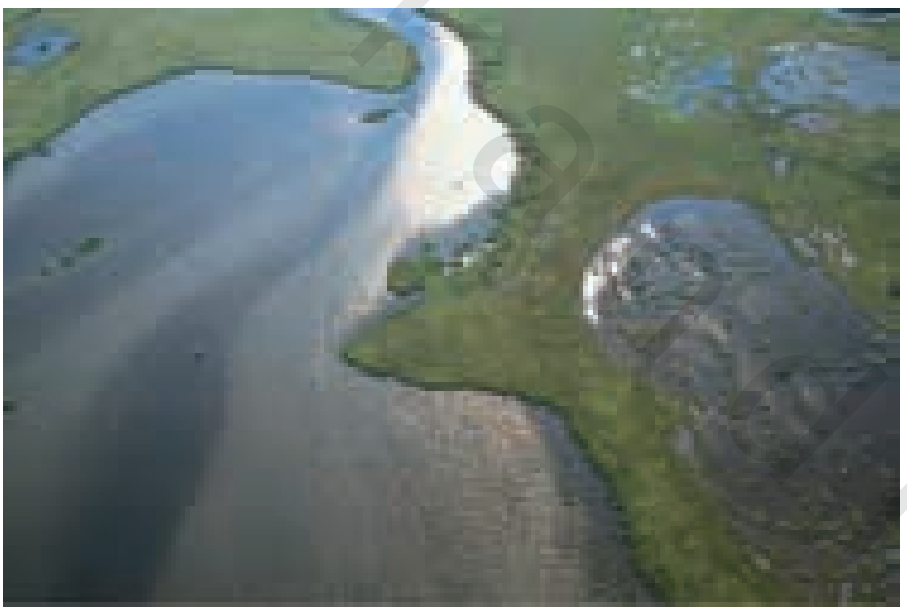
نظرة متفحّصة A CLOSER LOOK

الأراضي الرطبة Wetlands

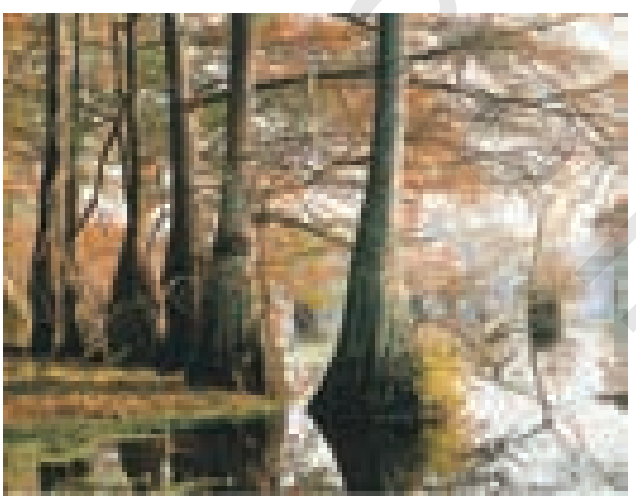
يطلق مصطلح **الأراضي الرطبة "Wetlands"** على مظاهر أو تضاريس متنوّعة، مثل:

- المستنقعات (Swamps)، وهي أراضٍ رطبة مبتلّة بالماء بصورة متكرّرة أو دائمة.
- مستنقعات الخث أو النبات المتفحّم (Bogs)، وهي الأراضي الرطبة التي يتراكم فيها الخث (فحم ناتج عن النباتات والأوراق الساقطة في المستنقع).
- حُفر أو أخاديد المروج (Prairie Potholes)، وهي برك صغيرة تشبه مستنقعات المارشيز (marshlike ponds).
- البرك الربيعية [Vernal pools]، وهي منخفضات ضحلة تحتوي على الماء بين الحين والآخر.

بعض هذه المظاهر موضّح في الشكل (12-جـ)، والمظهر الشائع والتعريف العملي للأراضي المبتلّة، هو أنّها إمّا مبتلّة بالماء، أو أنّ الأرض مشبعة بالماء لعمق سنتمترات قليلة أيامًا عدّة من السنة، أمّا ما يحدّد الأراضي الرطبة توافر أو عدم توافرها، فهي الهيدرولوجية أو الرطوبة (wetness)، وكذلك أنواع الغطاء النباتي والتربة، ومن هذه العوامل الثلاثة، تُعدّ الهيدرولوجية أصعبها، من حيث التعريف أو التوضيح؛ لأنّ بعض الأراضي الرطبة تكون رطبة مدة قصيرة من العام، إلّا أنّ توافر الماء حتى لو فترات قصيرة وعلى أساس منتظم، يؤدّي إلى تربات أراضٍ رطبة مميّزة، وبالأخص الغطاء النباتي المتكيف، ويساعد تعرّف تربات الأراضي المبتلة والنباتات على تشخيص الأراضي الرطبة نفسها في معظم الحالات بصورة كبيرة[20، 21].



(أ)



(ب)

(جـ)

الشكل (12 ج) أنواع مختلفة من الأراضي الرطبة. (أ) مستنقع أملاح خليج شيسابيك *(Chesapeake Bay Salt Marsh)* المرجع: *(Comstock Images)* (ب) مستنقعات خشب السرو ذات الماء العذب *(Freshwater Cypress Swamp)* في شمال كارولينا. المصدر: *Carr Clifton/Minden Pictures* (جـ) حفر المروج في داكوتاز *(Dakotas)* *Jim Brandenburg/Minden Pictures.*

تتميّز الأراضي الرطبة والأنظمة البيئية المصاحبة لها بكثير من الخصائص البيئية، منها:

- تزويد الأراضي الرطبة الشاطئية، مثل مستنقعات الملح، مناطق عازلة تمنع التعرية الشاطئية الناتجة عن العواصف والأمواج البحرية العالية.
- تُعدّ الأراضي الرطبة أحد المواقع الطبيعية التي تعمل مثل المرشحات، بحيث تحجز النباتات التي تنمو فيها الرسوبيات والمغذّيات والملوّثات بفعالية.
- تعمل الأراضي الرطبة في المياه العذبة كأنّها إسفنج طبيعي، فتخزّن الماء في أثناء الفيضانات، ما يساعد على أخطار الفيضانات في الأراضي النهرية السفلى، ثمّ يتحرّر الماء المخزّن بعد الفيضان، فينتعش التدفّق الخفيف للنظام النهري.
- عادة ما تكون الأراضي الرطبة أراضي عالية الانتاج؛ وذلك لأنّ تدوير كثير من المغذّيات والموادّ الكيماوية يتمّ فيها، بينما تقوم بإيواء كثير من الأنواع النباتية والحيوانية.
- غالبًا ما تكون الأراضي الرطبة في المياه العذبة مناطق تغذية لخزّانات المياه الجوفية، وتقوم بعضها بتغذية الينابيع، بوصفه مثالًا على تغذية المياه الجوفية.

على الرغم من أنّ معظم المستنقعات الساحلية محمية في الولايات الأمريكية، إلّا أنّ الأراضي الرطبة ذات المياه العذبة (Fresh Water Wetlands) ما زالت مهدّدة في مناطق عدة، ويقدّر أنّ ما نسبته (1%) من الأراضي الرطبة في أمريكا يفقد كلّ سنتين، أمّا الأراضي الرطبة ذات الماء العذب، فتشكّل مجمل هذا الفقدان تقريبًا، فقد اختفى قرابة نصف مجموع الأراضي الرطبة في أمريكا في المئتي سنة الأخيرة فقط، بما فيها قرابة (90%) من أراضي المياه العذبة، نتيجة سحب المياه منها للزراعة أو التنمية الحضرية.

لذلك أدّى تدمير هذه الأراضي الرطبة وتخريبها إلى بذل جهود متنامية لاستعادة هذه المناطق، ولسوء الطالع، فإنّ الاستعادة ليست دائمًا مهمّة سهلة؛ لأنّ الأراضي الرطبة هي وليدة ظروف هيدرولوجية معقّدة، ومن الصعب استرجاعها، إذا استنزف الماء أو استخدم في مجالات أخرى، ويقوم الباحثون بالتوثيق الدقيق لهيدرولوجية الأراضي الرطبة، إضافة إلى حركة نقل الرسوبيات والموادّ الغذائية للكائنات في المنطقة، إذ كلّما جُمعت معلومات أكثر عن كيفيّة تكوّن الأراضي الرطبة، كانت عملية استرجاعها ذات احتمالية نجاح أكبر.

أضف إلى ذلك أنّ لتنمية مصادر المياه من خلال بناء السدود والخزّانات والقنوات تأثيرات بيئية سلبية متنوّعة على نطاقات مختلفة، حيث تصمّم عادةً السدود والخزّانات (البحيرات) المصاحبة لتكون متعدّدة الاستخدامات أو الوظائف، مثل: تزويد المياه للزراعة، ووسيلة للسيطرة على الفيضانات، وأماكن للتسلية، ومن الصعب التوفيق بين هذه الاستعمالات في بحيرة سدّ معيّن، مثلًا: الطلب على الماء للزراعة عالٍ في موسم الصيف، ما يؤدّي إلى خفض مستوى الماء في بحيرة السدّ، ومن ثم تكوين مصاطب منبسطة من الطين، لكنّ الناس المهتمين بالترفيه، سيجدون أنّ خفض مستوى الماء ومصاطب الطين يعكّران تسليتهم، ويقلّلان من المنظر الجمالي، كذلك، يؤثّر الطلب الزائد على الماء وخفض مستوى الماء في السدّ، في الحياة البرية في الماء، من خلال تدمير فرص تكاثر الأسماك أو حصرها، (راجع: مناقشة موضوع السدود وتوليد الطاقة في الفصل الخامس عشر)، وتقوم السدود والبحيرات المرافقة، بغرس مفهوم كاذب للأمان في نفوس الناس، الذين يقطنون أسفل مجرى النهر، ويعتقدون أنّهم محميّون من الفيضانات، أمّا التأثيرات البيئية الثلاثة للسدود، فهي:

- فقدان الأراضي ومصادرها البيولوجية والثقافية في حالة تعرّضها للفيضانات.
- تحتجز بحيرة السدّ الرسوبيات التي تنقل من أعلى مجرى النهر عن طريق الأنهار والجداول، وتقلّل الرسوبيات المحتجزة من السعة الحجمية لتخزين الماء في السدّ، والأهمّ من ذلك، تحتجز البحيرة الرسوبيات التي تنقل إلى أسفل مجرى النهر في الوضع الطبيعي، لتغذي النهر والبيئات الساحلية، فعندما تحرم الأنهار والسواحل من الرسوبيات، تحصل التعرية النهرية في أسفل مجرى النهر بعيدًا عن السدّ، وتحصل التعرية الساحلية على الشواطئ.
- تغيّر هيدرولوجية أسفل مجرى النهر ونظام نقل الرسوبيات من بيئة النهر كلّها مؤثّرةً في الكائنات الحية التي تعيش هناك، (راجع: نظرة متفحّصة: إدارة مياه نهر كولورادو).

إزالة السدود Removal of Dams

كان التصوّر أنّ السدود منشآت دائمة حتى زمن قريب، ومن الواضح أن هذا التصوّر بدأ يتغير، فقد بُنيت السدود في أمريكا منذ عقود عدة، والكثير منها، وخصوصًا الصغيرة امتلأت بالرسوبيات، وفقدت قدرتها على استيعاب الماء، وهناك تخوف متزايد أيضًا من أنّ السدود تجزّئ نظام بيئة النهر بفصله إلى بيئتين: واحدة فوق السدّ، والأخرى في الأسفل، مع اتصال قليل بينهما، وأقوى الطروحات لإزالة السدود بيئية، تهدف إلى استعادة صورة الأنهار ووظيفتها، ففي أمريكا أُزيل قرابة (200) سدّ معظمها صغير، بما فيها سدّ إدوارد (Edwards Dam) قرب أوغستا (Augusta) في ولاية "مين" (Maine) في السنوات الأخيرة، حيث فتح ذلك قرابة (29 km) من مساكن النهر للأسماك المهاجرة؛ ولأنّ السدّ أُزيل عام 1999م، أصبح بإمكان أسماك، مثل سلمون المحيط الأطلسي (Atlantic Salmon) والشابل أو الصابوغة (Shad) أو القاروس أو ذئب البحر المقلم (Striped Bass) وأنواع أخرى من الأسماك، الهجرة إلى أعلى النهر للمرّة الأولى منذ (160) سنة[22]، وفي الساحل الغربي لأمريكا أُزيل سدّ مارموت (Marmot Dam) على نهر ساندي (Sandy River)، في شمال غربي أوريغون (Northwest Oregon) عام 2007م، وامتلأ السدّ البالغ عرضه (50 m)، وارتفاعه (15 m)، بما يعادل ($750{,}000\ m^3$) من الرمل والحصى، حيث كانت إزالته بمنزلة تجربة علمية، فهو سدّ صغير نسبيًّا، وأُزيل بسرعة، فتمكّن النهر من تعديل وضعيّته إلى حدّ الحمولة الرسوبية الزائدة، التي نتجت بسبب تحرير الرسوبيات المخزونة، التي تراكمت طوال قرابة (100) عام خلف السدّ[23]، ويبدو أنّ عملية الإزالة كانت ناجحة، ويسبح السالمون الآن مرّة أخرى إلى أعلى النهر للتكاثر، وباستطاعة الناس الآن الإبحار في النهر، بعد أن كانوا غير قادرين على ذلك مدة قرن.

وقد أُزيل عدد من السدود أيضًا في أمريكا، وقائمة السدود المرشّحة للإزالة في ازدياد، حيث إنّ إزالة السدّ مفهوم بسيط نسبيًّا، لكنّه يتضمّن مشكلات معقّدة تتعلّق بالرسوبيات والماء، إذ قد تشتمل إزالة السدود الكبيرة على ملايين الأمتار المكعّبة من الرسوبيات المختزنة، ما يستدعي

obeikandl.com

التخطيط بصورة دقيقة لتحرير الرسوبيات وتجنّب المشكلات أسفل النهر، حيث يمتلك النهر عادةٍ توازنًا نوعا ما، بين كمّية الرسوبيات التي يحملها وتصريف الماء، وإذا أُدخلت كمّية كبيرة من الرسوبيات بصورة فجائية، فقد ينتج عنها ترسيب كبير في قناة النهر، وقد تمتلئ البرك بالرسوبيات، ما يقلل في الغالب من قدرة القناة على حمل جريانات الفيضانات؛ ونتيجة لذلك، يترتّب حدوث زيادة في أخطار الفيضانات؛ بسبب تحرير كمّية كبيرة من الرسوبيات، إذًا من الواضح أنّ إزالة السدود تعطي فرصة لاستعادة الأنظمة البيئية، ومع تلك الفرصة تأتي أيضًا المسؤولية للتخطيط الحريص والدقيق، لإزالة السدود والتعامل مع الرسوبيات[23].

أكبر السدود في طور التخطيط لإزالتها سدّ جلاينز كانيون (Glines Canyon Dam) على نهر ألوها (Elwha River)، الموجود على منطقة لسان باجيت (Puget Sound) في ولاية واشنطن، حيث أُنشئ السدّ في بداية القرن الثامن عشر، ويبلغ ارتفاعه (70 m)، وقد كان النهر قبل بنائه يدعم كائنات، مثل مجموعات كبيرة من السلمون وسمك الترونة (السلمون المرقّط) ذي الرأس الفولاذي (Steel Head Trout)، وعندما مُنعت هذه الأسماك من الهجرة إلى أعلى النهر، ومن ثم منعها عن بيئة مساكن التكاثر، انخفضت أعدادها بصورة كبيرة، إذ كانت مجموعات السلمون تحضر الموادّ المغذية من المحيط إلى النهر والتضاريس (landscape)، وقد قامت الطيور والدببة والحيوانات الأخرى التي تتغذى على السلمون،بنقل الموادّ الغذائية المهمّة إلى أنظمة الغابات البيئية، وأصبح من المفهوم أنّه دون مجموعات السلمون، ربما سيعاني النظام البيئي تناقص الموادّ المغذية المهمّة، ومن المتوقّع أن تتمّ إزالة السدّ خلال مراحل؛ وذلك لتقليل الآثار السلبية على مناطق أسفل النهر؛ بسبب تحرير كمّيات كبيرة من الرسوبيات، حيث ستكلّف إزالة السدّ قرابة (185) مليون دولار، ومن المتوقّع أن تستعيد إزالة سد جلاينز كانيون مع سدّ آخر على نهر إلوها (Elwha)، الاتصال بين أنظمة بيئة النهر، ما يسمح للسلمون وأنواع أخرى من الأسماك بالعودة بأعداد كبيرة[24].

9-12 نقص طارئ في المياه العالمية EMERGING GLOBAL WATER SHORTAGES

أدركنا أخيرًا، أنّ حالات العجز المنفصلة في المياه، هي مؤشّر لنمط عالمي لاستنزاف المصدر[25]، حيث تُستنزف المياه الجوفية الآن حول العالم، ويتمّ تعدينها من خزّانات جوفية تستخدم غالبًا في الزراعة، إذ تجفّ الآن برك كبيرة، مثل بحر الآرال (Aral Sea) الذي ذكر في الفصل الأول، وكذلك تعاني بعض الأنهار الكبيرة، مثل نهر كولورادو (Colorado River) في أمريكا والنهر الأصفر (Yellow River) في الصين، الجفاف في بعض السنوات، ولا تصل إلى البحر، بينما أنهار أخرى، مثل النيل (Nile) في إفريقيا، انخفض جريانها أو تفريغها بنسبة أكبر من (90%)، لقد تضاعف الطلب على المياه في آخر (50) عامًا، وخلال ألـ (50) عامًا نفسها، تضاعف عدد سكان الأرض مرّتين، وفي ألـ (50) عامًا المقبلة، من المتوقّع أن يزداد عدد السكان بمقدار (2 إلى 3) بلايين، وهناك تخوّف من أنّه دون إدارة حريصة لمصادر المياه، لن يتوافر الماء بصورة كافية لإنتاج الغذاء لـ (8 إلى 9) بلايين إنسان عام 2050م، إذ نلاحظ أنّ حالات عجز المياه الطارئة والناشئة ستكون مرتبطة بنقص محتمل في الإنتاج الغذائي، والمشكلة أنّ الزيادة الهائلة في إنتاج الحبوب، تعتمد على مياه الري، وهي غالبًا من المياه الجوفية، وهذه المصادر نفسها تُستنزف تقريبًا في كلّ مكان يتم فيه إنتاج الحبوب، مثل أمريكا، والصين، والهند، والباكستان، والمكسيك[25]، وعندما يحصل عجز في المياه، فإنّ نقصًا في الغذاء سيتبعه، والحل واضح، وهو: السيطرة على نمو سكان العالم والحفاظ على الماء.

هذا الفصل قدّم لعدد من الحلول للحفاظ على مصادر المياه، من خلال استخدام أقلّ واستصلاح أكثر، ولتجنّب أزمة في إنتاج الغذاء، فإنّ هناك الكثير الذي يجب عمله، ومن الأخبار الجيّدة، أنّ الحلّ ممكن، لكنّه يستلزم الكثير من روح المبادرة في العمل.

ملخّص SUMMARY

تتضمّن دورة الماء العالمية حركة الماء وتخزينه ونقله من أحد أجزاء الدورة إلى آخر، وحركة الماء على سطح الأرض، وهي الجريان السطحي والجريان القريب من سطح الأرض، هي الجزء من الدورة ذو الأهمّية المباشرة الكبيرة بالنسبة إلى الناس.

تشكّل أحواض التصريف (Watersheads) وحدة أساسية من التضايس، ويختلف الجريان السطحي كثيرًا من حوض لآخر، إذ يتأثر بعوامل جغرافية ومناخية وبيولوجية، مياه الأمطار هي المصدر الرئيس للمياه الجوفية، التي ترشح من خلال منطقة التغذية على سطح الأرض، وتتحرّك إلى الأسفل خلال نطاق عدم الإشباع (Vadose Zone)، الذي نادرًا ما يكون مشبعًا، ثم إلى نطاق الإشباع. إنّ الخزّان الجوفي (Aquifer) هو نطاق من الموادّ الأرضية القادرة على تزويد الماء بمعدّل مفيد من خلال بئر، ويُعدّ الاتصال بين الماء السطحي والماء الجوفي مهمًّا من ناحية بيئية؛ لأنّ التلوّث في الماء السطحي قد يلوّث في النهاية الماء الجوفي. المناطق الكارستية هي مناطق حساسة للتلوّث بصورة أكبر من غيرها.

يُعدّ تزويد المياه محدودًا جدًّا عالميًّا حتى في المناطق ذات الهطل والجريان السطحي العاليين؛ بسبب عدم قدرتنا على تخزين الجريان السطحي كلّه، وكذلك بسبب التغيّر الكبير في جريانات الأنهار السنوية، وفي معظم المناطق يتم تعدين الماء الجوفي، ما ينتج عنه ضخّ المياه بمعدّل يفوق التغذية الطبيعية للمياه الجوفية، إذ غيّر تعدين المياه الجوفية في بعض المناطق خصائص الأرض بصورة دائمة، وتم تصنيف استخدامات المياه إلى "استخدام بعيد عن النهر" بما فيها الاستخدامات الاستهلاكية و"الاستخدام في النهر"، وعادةً ما يكون للاستخدامات المتعدّدة داخل النهر، مثل توليد الكهرباء والترفيه ومساكن الأسماك والحياة البرية المائية، متطلّبات متصارعة على الماء، أمّا حصحصة المياه لتلبية الاستخدامات المختلفة، فيعدّ أمرًا خلافيًّا.

تحتاج إدارة مصادر المياه إلى فلسفة جديدة، تأخذ في الحسبان العوامل الجيولوجية والجغرافية والمناخية، وتوظف بدائل مبتكرة، ومفهوم الماء الظاهري أو الواقعي أداة جديدة للحفاظ على الماء.

يُعدّ الماء جزءًا مكمّلًا للأنظمة البيئية، والاستخدام المتزايد له من قبل الناس، هو أهمّ الأسباب المدمّرة للأنظمة البيئية، وفقدان الأراضي الرطبة أو تدميرها، موضوع بيئي ذو أهمّية كبيرة في أمريكا؛ لأنّ جزءًا كبيرًا من هذه الأنظمة البيئية، تم بالفعل فقدانه بما فيه ما يعادل (90%) من الأراضي الرطبة في المياه العذبة.

نواجه الآن نقصًا عالميًّا في الماء مرتبطًا بإنتاج الغذاء، لذلك مطلوب إدارة تتّسم بروح المبادرة للتعامل مع مصادر المياه بصورة كبيرة، لإنتاج غذاء كاف خلال ألـ (50) عامًا المقبلة، حيث إنّ سكان العالم يزدادون بقرابة (2 إلى 3) بلايين إنسان.

REFERENCES المراجع

1. **Vandas, S. J., Winter, T. C., and Battaglin, W. A.** 2002. *Water and the Environment*. Alexandria, VA. American Geological Institute.
2. **Gleick, P. H.** 1993. An Introduction to Global Fresh Water issues. *Water in Crisis*. P. H. Gleick. ed. New York: Oxford University Press. 3–12.
3. **Foxworthy, G. L.** 1978. Nassau County, Long Island, New York—Water problems in humid country. *Nature to Be Commanded*. G. D. Robinson and A. M. Spieker, ed. 555–68. U.S. Geological Survey Professional Paper 950.
4. **Alley, W. M., Reilly, T. E., and Franke, O. L.** 1999. *Sustainability of Ground-water Resources*. U.S. Geological Survey Circular 1186.
5. **Winter, T. C., et al.** 1998. *Ground water and surface water: A single resource*. U.S. Geological Survey Circular 1139.
6. **Sharp, J. M., Jr., and Banner, J. L.** 1997. The Edwards aquifer: A resource in conflict. *GSA Today* 7(8):1–8.
7. **Loaiciga, H. A., Maidment, D. R., and Valdes, J. B.** 1999. Climate-change impacts in a regional karst aquifer, Texas, U.S.A. *Journal of Hydrology* 227:173–94.
8. **Hutson, S. S., et al.** 2004. Estimated use of water in the United States in 2000. *U. S. Geological Survey Circular 1268*.
9. **Graf, W. L.** 1985. *The Colorado River*. Association of American Geographers.
10. **Hundley, N., Jr.** 1986. The West against itself: The Colorado River—An institutional history. *New courses for the Colorado River*; G. D. Weatherford and F. L. Brown, eds. Albuquerque: University of New Mexico Press.
11. **Dolan, R., Howard, A., and Gallenson, A.** 1974. Man's impact on the Colorado River and the Grand Canyon. *American Scientist* 62:392–401.
12. **Lavender, D.** 1984. Great News from the Grand Canyon. *Arizona Highways Magazine*, January, 33–38.
13. **Hecht, J.** 1996. Grand Canyon flood a roaring success. *New Scientist* 151: 8.
14. **Lucchitta, I., and Leopold, L. B.** 1999. Floods and sandbars in the Grand Canyon. *Geology Today* 9:1–7.
15. **Wright, S. A., et al.** 2008. Is there enough sand? Evaluating the fate of Grand Canyon sandbars. GSA Today. 18 (8): 4–10.
16. **Leopold, L. B.** 1977. A reverence for rivers. *Geology* 5: 429–30.
17. **Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K.** 2008. Globalization of water. Malden, M.A.: Blackwell Publishing.
18. **Covich, A. P.** 1993. Water and ecosystems. *Water in Crisis*. P. H. Gleick, ed. New York: Oxford University Press. 40–55.
19. **Gleick, P. H.,** ed. 1993. *Water in Crisis*, Table F.1. New York: Oxford University Press.
20. **Levinson, M.** 1984. Nurseries of life. *National Wildlife*. Special Report, February/March, 18–21.
21. **Holloway, M.** 1991. High and dry. *Scientific American* 265(6):16–20.
22. **State of Maine.** 2001. A brief history of the Edwards Dam. http://janus.state.me.us. Accessed 1/15/00.
23. **O'Connor, J., Major, J., and Grant, G.** 2008. The dams come down. *Geotimes* 53(3):22–28.
24. **American Rivers.** Elwha River Restoration. http://www.americanrivers.org. Accessed 3/1/06.
25. **Brown, L. R.** 2003. *Plan B. Rescuing a Planet under Stress and a Civilization in Trouble*. New York: W. W. Norton.

KEY TERMS المصطلحات المفتاحية

خزّان جوفي (Aquifer)، (ص 349)
استخدام استهلاكي (Consumptive Use)، (ص 360)
قانون دارسي (Darcy's Law)، (ص 352)
تدفّق دارسي (Darcy Flux)، (ص 355)
تحلية المياه (Desalination)، (ص 360)
حوض التصريف (Drainage basin or water shed)، (ص 345)
طاقة السائل أو الرأس الهيدرولوجي (fluid potential of hydraulic head)، (ص 345)
استخدام الماء داخل النهر (In stream use)، (ص 360)
تضاريس الكارست (Karst topography)، (ص 357)
استخدام الماء خارج النهر (offstream use)، (ص 360)
حفرة البالوعة (Sinkhole)، (ص 357)
نطاق عدم الإشباع (Vadose Zone)، (ص 348)
الماء الظاهري أو الحقيقي أو الواقعي (Virtual Water)، (ص 367)
دورة الماء (Water cycle)، (ص 344)
مستوى المياه الجوفية (Water table)، (ص 367)
الأراضي الرطبة (Wetlands)، (ص 368)
نطاق الإشباع (Zone of Saturation)، (ص 348)

SOME QUESTIONS TO THINK ABOUT بعض الأسئلة للتفكير

1. ما أنواع الأراضي الرطبة المتوافرة في منطقتك؟ ضع خطة عمل لجرد الأراضي الرطبة، واعمل تقييمًا لمعرفة مقدار ما دُمّر أو فُقد. هل استعادة الأراضي الرطبة ممكنة في منطقتك؟ وإلى ماذا تحتاج أن تفعل لتجعل هذا الجهد ناجحًا؟
2. اعمل تقييمًا لأزمة المياه الجوفية، التي تلوح في الأفق بخزّان إدوارد (Edwards Aquifer) في تكساس، وراعِ الجوانب الاجتماعية والاقتصادية والبيئية.
3. كيف يمكن أن يساعد مفهوم الماء الظاهري أو الحقيقي أو الواقعي (Virtual Water) على الحفاظ على إدارة مصادر المياه العالمية؟
4. كيف يمكن أن تقارن بين الاستخدام الظاهري أو الحقيقي (Virtual) للمياه في فلوريدا (Florida)، مع ذلك في أريزونا (Arizona)؟ ولماذا يتعيّن عليك إجراء المقارنة؟
5. هل تعتقد أنّنا نعيش في فقاعة غذاء (Food – bubble)، قد تنفجر في العقود القليلة المقبلة؟ أي، هل الربط بين الغذاء والماء سيؤدّي إلى نقصان في إنتاج الغذاء وزيادة معاناة الإنسان؟

Online Manual.com

الفصل الثالث عشر

تلوّث المياه ومعالجتها

Water Pollution and Treatment

تنتج عن تلوّث المياه الحاد أخطار صحّية. يحمل هذا المجرى مياه المجاري والفضلات السامّة إلى نهر الريو جراندي (*Rio Grande*) في المكسيك.
(Tim Richardson/Richardson Photography)

1-13 نظرة عامّة لتلوّث المياه
AN OVERVIEW OF WATER POLLUTION

تلوّث المياه: مصطلح يعود إلى تردّي نوعية المياه (water quality)، عند قياس خصائصها البيولوجية والكيميائية والفيزيائية. ويتم الحكم عليه بناء على الهدف من استخدام المياه أو ابتعادها عن الخصائص الطبيعية أو مدى تأثيراتها البيئية والصحية، وهو من منظور الصحّة العامّة والبيئة، أيّ مادّة يشكّل فائضها المحدّد أذًى للكائنات الحية، لذلك فإنّ الفائض من العناصر الثقيلة (heavy metals) أو نظائر مشعّة معيّنة أو عنصر الفوسفور أو النيتروجين أو الصوديوم أو أيّ من العناصر المفيدة (أو حتى الضرورية)، إضافة إلى أنواع معيّنة من البكتيريا والفيروسات الحاملة للأمراض تُعدّ جميعها ملوّثات، وفي بعض الحالات، تُعدّ مادّة ما ملوّثة لقسم معيّن من مجتمع معيّن؛ لكنّها غير ملوّثة لأقسام أخرى، فعلى سبيل المثال: لا يُعدّ فائض قليل من الصوديوم بوصفه ملحًا ضارًّا في الغالب، لكنّه ضارّ لبعض الناس الذين يتبعون حمية غذائية. يسرد الجدول (13–1) بعض المصادر الشائعة لتلوّث المياه.

الجدول (13–1): مصادر شائعة لتلوّث المياه بنوعيها pollution and/or contamination

تسرّبات صهاريج تخزين (الوقود) والأنابيب
تسرّبات مواقع طرح النفايات، مثل المكبّات
الترشيح من أنظمة الصرف الصحّي والحفر الامتصاصية
حوادث الانسكابات والتسرّبات (من حوادث القطارات والشاحنات على سبيل المثال)
تسرّبات الأنشطة الزراعية، مثل الحظائر
اندفاع الماء المالح من المحيطات إلى خزّانات المياه الجوفية الساحلية
التسرّبات والترشيح من أكوام نفايات المناجم والمخلفات
تسرّبات الريّ بالرش
تشغيل غير سليم لآبار الحقن
تسرّب الماء الحمضي من المناجم
تسرب الجريان الراجع من الري
ترشح الجريان السطحي الحضري والصناعي والزراعي

الأهداف التعلُّمية LEARNING OBJECTIVES

واحدة من أخطر المشكلات البيئية للبلايين من الناس على سطح الأرض، هي نقص مصادر تزويد الماء الخالي من التلوّث والأمراض للاستهلاك الشخصي، لذا سنركّز في هذا الفصل على الأهداف التعلمية الآتية:

- القدرة على تعريف تلوّث الماء ومناقشة بعض الملوّثات الشائعة.
- إعطاء أهمّية لمشكلات تلوّث مختارة، مثل التخثّث (eutrophication) وتصريف المناجم الحمضي (acid mine drainage).
- التمييز بين مصادر التلوّث من النقطية (point sources) وغير النقطية (nonpoint sources).
- فهم العمليات التي تؤدّي إلى تلوّث المياه الجوفية وكيفيّة معالجتها.
- تعرّف بعض القضايا المهمّة المتعلقة بالمعايير القياسية لجودة المياه (water quality standards).
- فهم مبادئ معالجة المياه العادمة، المرتبطة بالتخلّص من مياه الصرف الصحّي في خزان التفسخ (septic-tank sewage disposal) ومحطّات معالجة المياه العادمة.
- إعطاء أهمّية لعمليات استصلاح المياه العادمة ومعالجتها، التي تتضمّن استرداد المصدر.
- تعرّف القوانين المتعلّقة بالمياه السطحية والجوفية، إضافة إلى بعض التشريعات الفدرالية (الدولية) المهمّة لحماية مصادر المياه.

المشكلات المرتبطة بتلوّث الماء متنوّعة بصورة كبيرة، ومن أهمّها أزمنة مكوث الملوّثات وحجوم الماء المخزّنة في الأجزاء المختلفة للدورة الهيدرولوجية؛ لأنّ هذه العوامل ترتبط بإمكانية حصول التلوّث، فمثلًا: يمكث الماء في النهر زمنًا قصيرًا، يبلغ قرابة أسبوعين؛ لذلك سيستغرق حدث تلوّث مرّة واحدة (على ألّا يتضمّن التصاق الملوّث بالرسوبيات على ضفاف النهر، ما يطيل زمن المكوث) زمنًا قصيرًا؛ لأنّ الماء سيغادر النهر بصورة سريعة، في المقابل، قد يدخل الملوّث نفسه إلى بحيرة أو محيط، حيث أزمنة المكوث أطول والتعامل مع الملوّثات أصعب.

تنتج معظم حالات التلوّث، مثل انسكابات المياه العادمة أو حوادث الشاحنات أو القطارات المحمّلة للنفايات، تلوّثات مرّة واحدة، وهي شائعة جدًّا في هذه الأيام، لكنّ التلوّث أكثر عرضةً لأن يحدث من العمليات المزمنة، التي تطلق الملوّثات مباشرة إلى النهر (شاهد الفقرة الافتتاحية)، وتمكث المياه الجوفية أزمنة أطول، بعكس مياه النهر، (من مئات إلى آلاف السنين)؛ لذلك، فإنّ التخلّص الطبيعي من الملوّثات فيها، عملية بطيئة جدًّا، وإصلاحها مكلف وشاق.

أعظم مشكلات التلوّث في العالم اليوم، هي نقص ماء الشرب الخالي من الأمراض لقرابة (20%) من سكان العالم، ويعاني قرابة (20%) آخرون ظروف صرف صحّي سيئة، تسبّب الأمراض المحمولة بالماء، وتقتل قرابة مليوني شخص سنويًّا تقريبًا، معظمهم من الأطفال تحت سن الخامسة، أمّا التلوّث الكيميائي، فهو أيضًا مشكلة ناشئة على نطاق عالمي، ويحدث في كلّ مكان تقريبًا حيث يُوجَد الناس، حيث تطلق العمليات والأنشطة الزراعية والصناعية والمدنية ملوّثات كيميائية، ذات تأثير غير معروف بدقّة في البيئة والإنسان[1]. يسرد الجدول (13–2) التدفّق السنوي للكيميائيات الشائعة، التي تسبب تلوّث المياه، أمّا الشكل (13–1) فيوضّح مسارات حركة الملوّثات (pathways) في البيئة.

13-2 ملوّثات مائية مختارة
SELECTED WATER POLLUTANTS

موادّ متنوّعة كثيرة قد تلوّث المياه السطحية والجوفية، وستركّز دراستنا هنا على الملوّثات التي تستهلك الأُكسجين، مثل الكائنات الدقيقة المسبّبة للأمراض والموادّ الغذائية والنفط والكيميائيات الخطرة والعناصر الثقيلة والموادّ المشعّة والرسوبيات.

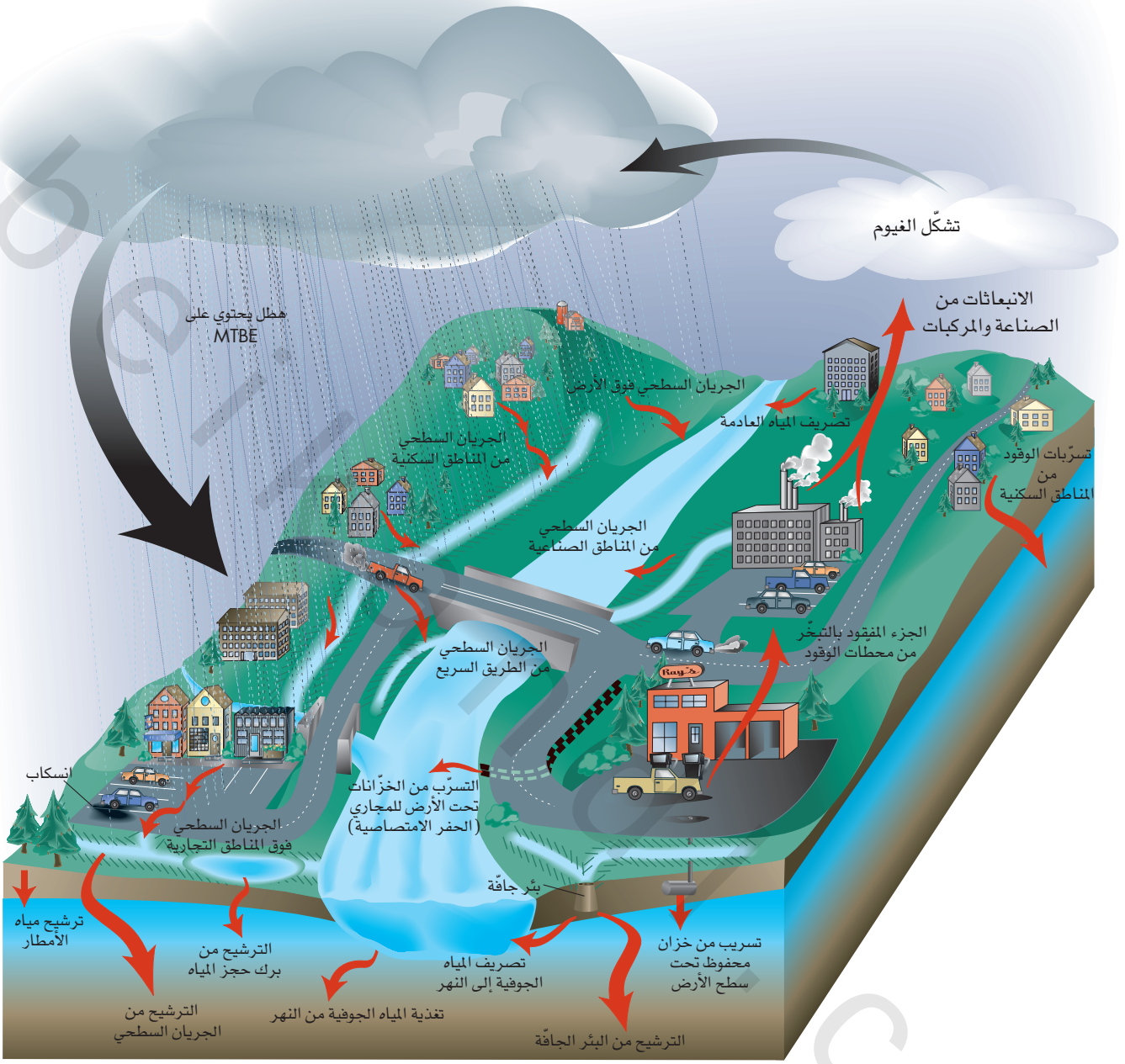
الجدول (13–2): ملوّثات كيميائية مختارة، تنتجها الأنشطة الزراعية والصناعية والمدنية أو تستخدمها أو تحرّرها، للتأثير في جودة الماء (المعدّلات بوحدة مليون 10^6 طن في السنة)

الموادّ الغذائية في أنهار العالم	
النيتروجين غير العضوي	16
عنصر الفوسفور	3.4
العناصر الثقيلة (heavy metals) في الأنظمة المائية	
الزئبق، الرصاص، الخارصين، النحاس، الكادميوم، النكل، الكروم	0.1–1
الإنتاج العالمي من الكيميائيات الأخرى المؤثّرة في جودة المياه	
الأسمدة	140
الكيميائيات العضوية المصنعة	300
الانسكابات النفطية	0.4

المصدر:
Data from Schwarzenbach, R.P., et al., 2006. The challenge of micropollutants in aquatic systems, Science 313: 1072-77.

الملوّثات التي تستهلك الأُكسجين
Oxygen-Demanding Waste

تتحلّل الموادّ العضوية للكائنات الميّتة في الأنهار؛ لأنّها تستهلك عن طريق البكتيريا التي تتطلب الأُكسجين، فإذا توافر نشاط بكتيري كبير، فإنّ الأُكسجين يتناقص إلى مستويات متدنية، تؤدّي إلى موت الأسماك والكائنات الأخرى. والنهر الخالي من الأُكسجين هو نهر ميّت، يخلو من الأسماك والكائنات الكثيرة التي تهمّنا، وتعرف كمّية الأُكسجين اللازمة للتحلل عن طريق البكتيريا بالطلب البيوكيميائي للأكسجين **(Biochemical Oxygen Demand) (BOD)**. وهو قياس روتيني في إدارة جودة



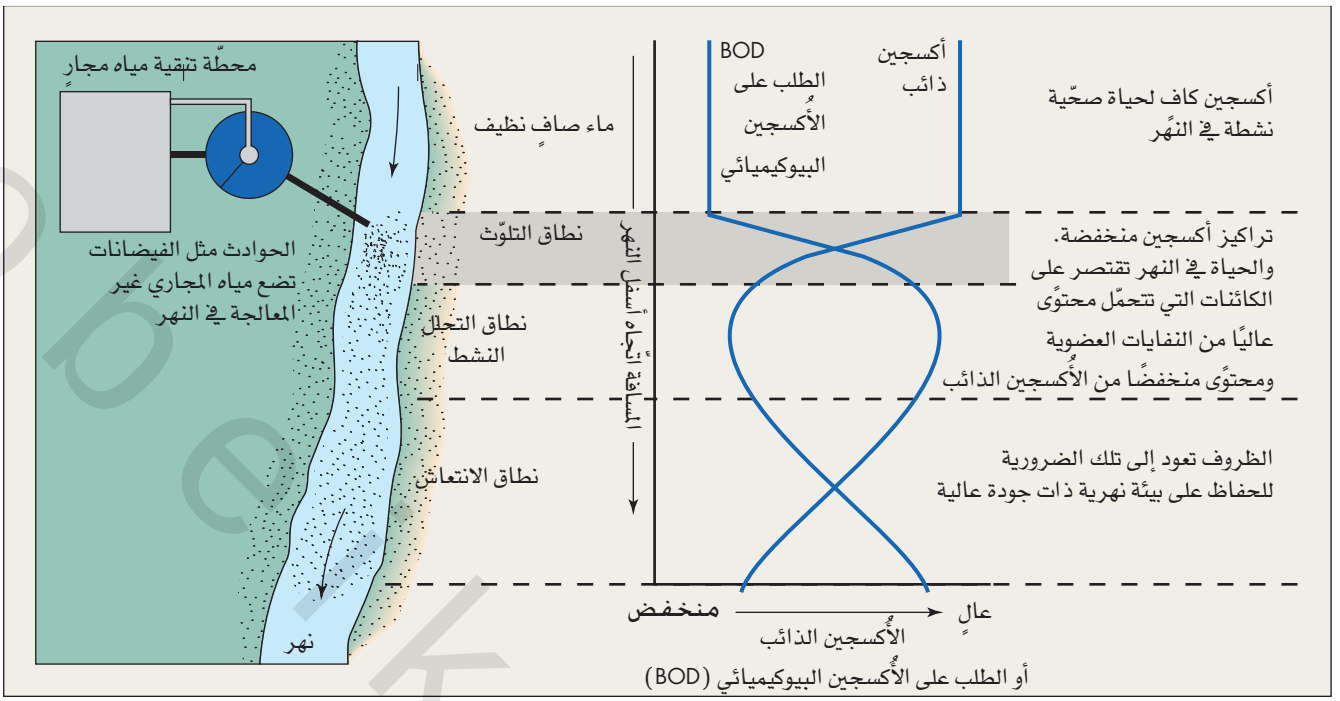
الشكل (13-1): **مسارات حركة الملوّثات الكيميائية** ضمن الدورة الهيدرولوجية للبيئة. المصدر:
(Modified from Delzer, G.C., et al., 1996, Occurrence of gasoline oxygenate MTBE and BTEX compounds in urban storm water in the United States, 1991-95, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigation Report 964145–).

المياه، ويقاس (**BOD**) بالمليجرامات/لتر من الأُكسجين المستهلك، مدّة خمسة أيّام على درجة حرارة (20°C) مئوية، حيث تدلّ القيمة المرتفعة لـ(BOD) على محتوى عالٍ من الموادّ العضوية المتحلّلة في الماء.

تأتي الموادّ العضوية الميّتة في الأنهار والجداول من مصادر طبيعية (الأوراق الميّتة من الغابات)، وكذلك من الزراعة ومياه الصرف الصحّي الحضري، ويأتي قرابة (33%) من مجموع ألـ (BOD) في الأنهار من الأنشطة الزراعية، إلّا أنّ المناطق الحضرية، وخصوصًا تلك التي تمتلك أنظمة مشتركة للصرف الصحّي وتصريف مياه الأمطار، قد تضيف قدرًا كبيرًا من (BOD) إلى الأنهار في أثناء الفيضانات، عندما تطفح كمّيات المياه العادمة في خطوط المجاري الداخلة إلى محطّات المعالجة، وتفيض نحو الأنهار مسبّبةً حوادث تلوّث.

العتبة أو الحدّ لحدوث تلوّث المياه، هو مقدار من الأُكسجين الذائب لأقلّ من (5) مليجرامات/لتر من الماء. يوضّح الشكل (13–2) تأثير الـ (BOD) في محتوى الأُكسجين الذائب في نهر، عندما تدخله مياه المجاري غير المعالجة نتيجة لحادث انسكاب.

يمكن تمييز ثلاثة نطاقات، هي: نطاق التلوّث (*pollution zone*)، ويمتاز بقيمة عالية لـ (BOD) ومتدنية للأكسجين الذائب، حيث يبدأ التحلّل الأوّلي للفضلات، أمّا في نطاق التحلّل النشط (*active decomposition*)،



الشكل (13–2): **العلاقة بين الأُكسجين الذائب والطلب على الأُكسجين (BOD)** لنهر ما، تبعاً للصرف الصّحي.

فتتوافر أقلّ كمّية للأكسجين الذائب نتيجة للتحلل البيوكيميائي، حيث تنتقل الفضلات العضوية مع التيّار إلى أسفل النهر، وفي نطاق الانتعاش (*recovery zone*) يزداد الأُكسجين الذائب، وينخفض ألـ (BOD)؛ لأنّ معظم الفضلات العضوية المستهلكة للأكسجين في المياه العادمة قد تحللت، وبدأت العمليات النهرية الطبيعية بتزويد مياه النهر بالأُكسجين الذائب، وإضافة إلى ذلك، فإنّ الأنهار جميعها لديها القدرة إلى حدّ ما على تحليل النفايات العضوية بعد دخولها النهر، لكنّ المشكلة تبدأ عندما يطفح النهر بالفضلات العضوية المستهلكة للأكسجين، متغلّبةً بذلك على طاقة النهر الطبيعية للتنظيف.

الكائنات الحية المسبّبة للأمراض
Pathogenic Organisms

تُعدّ الكائنات الحية الدقيقة المسبّبة للأمراض من أهمّ الملوّثات البيولوجية، ومن الأمراض الرئيسة المحمولة عن طريق الماء، الكوليرا ومعديات التيفوئيد (Tephoid infections) والتهاب الكبد الوبائي (hepatitis) والديزنطاريا أو الزحار (dysentery)؛ وبسبب صعوبة مراقبة الكائنات الحية المسبّبة للأمراض مباشرةً، فإنّنا نلجأ إلى قياس أعداد بكتيريا العصويات (القولونية) البرازية (**Fecal coliform bacteria**)، بوصفه قياسًا شائعًا معياريًّا للتلوّث البيولوجي، إضافة إلى أنّ هذه البكتيريا الشائعة وغير الضارّة، تُعدّ مكوّنات طبيعية في أمعاء الإنسان، وتتوافر في فضلاته كلّها.

ومع ذلك، فليست أنواع بكتيريا العصويات (القولونية) البرازية كلّها غير ضارّة، فمثلًا: البكتيريا المسمّاة (*Escherichia coli or E. coli 0157*)، وهي سلالة من (*E. coli*) تُعدّ مسؤولة عن كثير من الأمراض والوفيات البشرية، إذ تصدر موادّ سامّة قوية في الإنسان، قد ينتج عنها إسهال مع دم وجفاف وفشل كلوي ثمّ الموت، فعام 1993م، انتشرت الأمراض بسبب (*E. coli* 0157)؛ حيث تناول الناس لحومًا ملوّثة في أحد مطاعم الوجبات السريعة، وعام 1998م لوّثت بكتيريا (*E. coli* 0157) الماء في حديقة مائية في ولاية جورجيا (Georgia)، وأحد مصادر تزويد المياه في بلدة من وايومنغ (Wyoming)، ما أدّى إلى حدوث أمراض وحالة وفاة.

أمّا أسوأ حالة لانتشار الأمراض بسبب (*E. coli* 0157) في تاريخ كندا، فقد حصلت في مارس من عام 2000م، في والكيرتون (Walkerton) في أونتاريو (Ontario)، ويعتقد أنّ سبب التلوّث يعود لتوافر بكتيريا (*E.coli* 0157)في سماد الروث البقري الطبيعي، بعد تسرّبه نحو مصادر تزويد المياه خلال عاصفة مطرية قوية، وفيضانات حصلت في الثاني عشر من مارس في العام نفسه، حيث علمت مصلحة المياه العامّة بالتلوّث مبكرًا (في الثامن عشر من مارس)، إلّا أنّها لم تبلّغ السلطات الصحّية، ونتيجة لذلك، توفّي (5) أشخاص، وأُدخل (20) شخصًا إلى العناية المركّزة، ومرض (700) شخص تقريبًا بأعراض شديدة، مثل التشنّجات والتقيؤ والإسهال، معظمهم من كبار السن والأطفال، الّذين كانوا أكثر عرضة للمضاعفات، التي سبّبتها الأمراض، والتي قد تؤدّي إلى تعطيل الكبد، فكان أوّل الضحايا طفلين في عمر عامين وامرأة عجوز عمرها (82) عامًا، وتولّى موظفو الدولة أخيرًا إدارة عملية تزويد المياه، ووزّعوا على المواطنين قارورات مياه معدنية، وقد بلغ عدد الوفيات على الأقلّ سبعة أشخاص، وأصيب بالعدوى أكثر من (1000) شخص.

أجرت السلطات تحقيقات وبصورة خاصّة؛ لمعرفة سبب التأخير بين تحديد المصدر المحتمل للمشكلة وعملية تحذير الناس. فلولا التأخير، لربما أمكن تجنّب حالات الأمراض التي حصلت. إنّ الدرس الحقيقي الذي يمكن تعلّمه

من حادثة تلوّث مياه "والكيرتون" أنّنا نبقى عرضةً لحوادث تلوّث المياه؛ ولذلك يجب أن نبقى حذرين في مسألة فحص مياه الشرب، والتبليغ عن المشكلات حال وقوعها للسلطات الصحّية.

تمّ عام 2006م تتبّع تلوّث بكتيري (*E. coli* 0157) أيضًا، نسب لمزارع في شمال كاليفورنيا، حيث تلوّثت السبانخ التي وزّعت في (23) ولاية، وتعرّض قرابة (150) شخصًا للمرض، توفي منهم شخص واحد، أمّا عام 2009م، فقد سبّب تلوّث منتج زبدة الفول السوداني (peanut butter) أمراضاً للمئات ببكتيريا (*E. coli*)، وأدّى إلى وفيات في أنحاء متفرّقة من أمريكا.

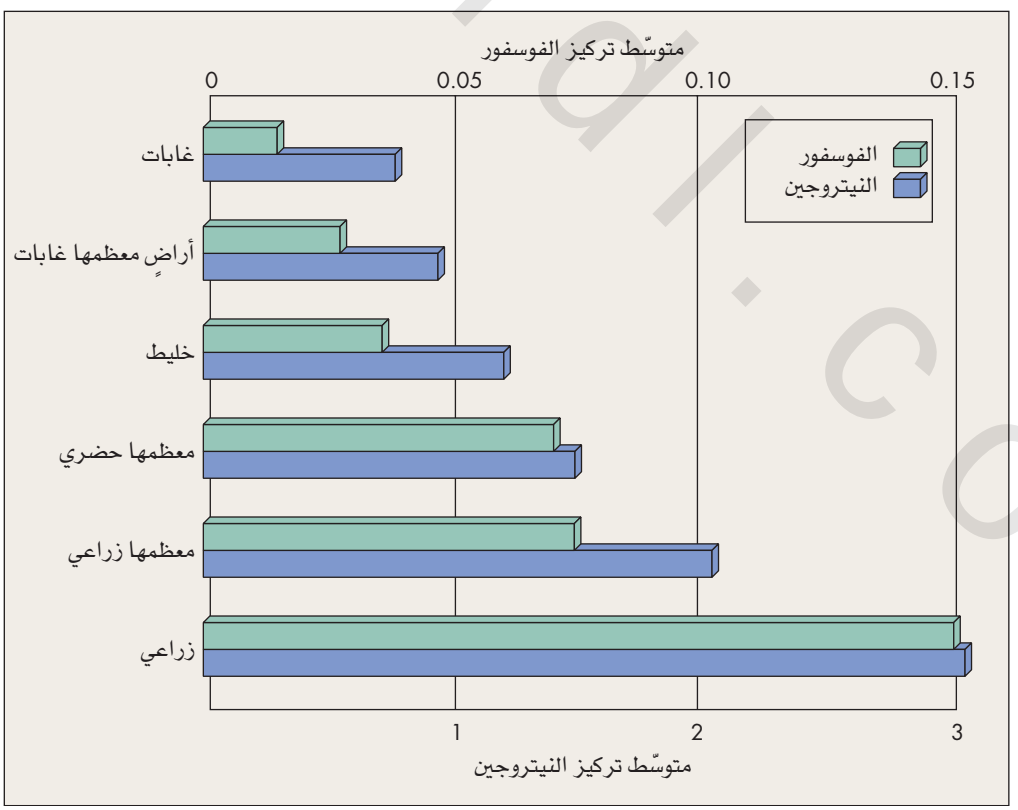
أدّت الأوبئة في الماضي إلى تفشي الأمراض، وقتل آلاف الناس في المدن الأمريكية، وتمّ تقليل هذه الأوبئة بصورة كبيرة، من خلال فصل مياه الصرف الصحّي عن مياه الشرب، ومعالجة مياه الشرب قبل الاستهلاك، إلّا أنّ مثل هذه الإجراءات مع الأسف، لا تطبّق في أنحاء العالم جميعها، ويتعرّض الملايين من سكان العالم سنويًّا، وخصوصًا في الدول الفقيرة للأمراض المنقولة عن طريق الماء، مثل، تفشي الكوليرا في أمريكا الجنوبية في التسعينيات، وعلى الرغم من أنّ الدول النامية أكثر عرضة للتأثّر بذلك، إلّا أنّ خطر الأمراض المنقولة عن طريق الماء يهدّد دول العالم كلّها.

ويتفاقم الخطر الناتج عن تفشي الأمراض عند حدوث الكوارث، مثل الزلازل والفيضانات والأعاصير، حيث تدمّر هذه الأحداث خطوط الصرف الصحّي، أو تسبّب فيضانها، ما يؤدّي إلى تلوّث مصادر تزويد المياه، فعلى سبيل المثال: بعد حصول زلزال نورث ريدج (Northridge) عام 1994م، نُصح السكان في منطقة سان فيرناندو (San Fernando) في حوض لوس أنجلوس (Los Angeles Basin)، بغلي الماء لتنقيته من البكتيريا.

المغذّيات Nutrients

قد تؤدّي الموادّ الغذائية التي يحرّرها الإنسان نحو البيئة إلى تلوّث المياه، ومن أهمّ هذه الموادّ الفوسفور والنيتروجين، اللذان ينتجان عن موادّ مختلفة، مثل الأسمدة والمنظّفات ومخلّفات محطّات معالجة المياه العادمة، حيث يرتبط تركيز الفوسفور والنيتروجين في الأنهار باستعمالات الأراضي، إذ تتميّز الأراضي المغطّاة بالغابات بأقلّ التراكيز منهما، بينما تتوافر أعلى التراكيز في الأراضي الزراعية، مثل حقول المزارع المسمّدة وحقول تسمين المواشي، انظر الشكل (13-3)، وتسهم المناطق الحضرية في زيادة الفوسفور والنيتروجين في المياه المحلية، خصوصًا عندما تطلق محطّات معالجة المياه العادمة مياهها المعالجة نحو الأنهار والبحيرات أو المحيطات، حيث إنّ هذه المحطات ذات فاعلية في تخفيض الملوّثات العضوية ومسبّبات الأمراض، ودون وجود معالجة متطوّرة، تتمكّن المغذّيات من العبور ضمن أنظمة المعالجة.

تسبّب عملية إطلاق تراكيز عالية من النيتروجين والفوسفور في الماء عن طريق الإنسان ظاهرة تسمّى بالتخثّث الحضاري (**Cultural Eutrophication**)، والتخثّث أو التغذية المفرطة (*Eutrophication*) مشتقّة من اليونانية، وتعني (مغذٍّ جيّد)، وهي ظاهرة طبيعية تتميّز بزيادة سريعة في وفرة الحياة النباتية خصوصًا الطحالب، حيث تؤدّي التكدّسات الهائلة لها إلى تكوين حصائر سميكة، قد تغطي أحيانًا سطح الماء في البرك والبحيرات العذبة، فتحجز بذلك دخول أشعة الشمس للنباتات في الأسفل، وتسبّب موتها، إضافة إلى أنّ الطحالب تستهلك الأكسجين عندما تموت وتتحلل، ما يؤدّي إلى تقليل مستواه في الماء، وذلك قد يقتل الأسماك والكائنات المائية كذلك.



الشكل (13-3): العلاقة بين استعمالات الأراضي ومتوسط النيتروجين والفوسفور في الأنهار (ملجم/لتر)

(المصدر: *Source: Council on Environmental Quality*, 1978).

obeikandl.com

قد تؤدّي التكدّسات الناتجة عن الطحالب الزرقاء والخضراء إلى إنتاج موادّ سامّة بوصفها جزءًا من دورة حياتها، فقد لوحظ تغيّر لون البحيرات في وسكنسين (Wisconsin)، ومينيسوتا (Minnesota)، وأريغون (Oregon) إلى اللون الأخضر البازيلائي (Pea green)، وتكوّن موادّ سامّة فيها، تؤدّي إلى موت الكلاب والحيوانات الأخرى التي تشرب من مائها، وقد عانى السكان القريبون من هذه البحيرات روائح كريهة، إضافة إلى طفح جلدي وصداع وتقرّح للحناجر (Sore throats)، إلّا أنّ الموادّ السامّة لم تقتل الناس؛ لأنّهم تجنّبوا التعامل مع الماء.

أمّا في البيئات البحرية فقد تؤدّي المغذّيات المتوافرة في المياه القريبة من الشواطئ إلى تكوين تكدّسات من الطحالب البحرية (seaweeds)، حيث تصبح مصدر إزعاج عندما تتفكّك وتتحرّك بسهولة، ثمّ تتراكم على الشواطئ، وقد تؤدّي الطحالب إلى تدمير الشعاب المرجانية أو قتلها في المناطق المدارية، مثلًا، تعاني جزيرة ماوي (Maui Island) في هاواي، مشكلة تخثّث حضري ناتج عن المغذّيات، التي تدخل البيئات القريبة من الشاطئ، من أنشطة طرح النفايات والجريان السطحي من الأراضي الزراعية، يُضاف إلى ذلك أنّ الشواطئ في بعض المناطق تتلوّث بالطحالب، التي تتقدّم نحو الشاطئ، حيث تتعفّن، وتصدر رائحة نتنة، وتشكّل مساكن للحشرات المزعجة، التي تؤدّي إلى إبعاد السائحين، انظر الشكل (13-4).

هناك مشكلة خطيرة يسبّبها تكدّس الطحالب في خليج المكسيك (Gulf of Mexico)، بعيدًا عن الشاطئ المحاذي لولاية لويزيانا (Louisiana)، تعرف «بالمنطقة الميتة» (Dead zone) انظر الشكل (13-5)، وتنشأ في الصيف فوق منطقة كبيرة تعادل مساحة ولاية نيوجيرسي، حيث يمتاز الماء في تلك المنطقة بتراكيز منخفضة من الأكسجين، ما يؤدّي إلى قتل المحار والسرطانات وتراكم الطحالب هناك، الّذي يعتقد أنّ سببه نهر المسسيبي (Mississippi River)، الذي يجري في (48) ولاية تقريبًا، معظم أراضيها زراعية، فالمادّة الغذائية المسبّبة للمشكلة، هي النيتروجين الذي يستخدم بكمّيات كبيرة في تسميد الحقول، وليس للمشكلة حلّ سهل، باستمرار استخدام الأسمدة في الزراعة؛ لذلك، فإنّ جزءًا من الحلّ، تعديل الممارسات الزراعية، باستخدام كمّيات أقلّ من النيتروجين وبكفاءة أكبر، ما يقلّل من تدفّق الموادّ الغذائية في اتّجاه النهر[2].

النفط Oil

أدّى تدفّق النفط إلى المياه السطحية (الأنهار والبحيرات والمحيطات) إلى مشكلات تلوّث كبيرة، إذ تحصل أكبر حالات انسكاب النفط في المياه بسبب حوادث ناقلات النفط، مثل حادث اصطدام ناقلة إكسون فالديز (*Exxon Valdez*) بأرضية خليج بلاي المرجانية (Bligh Reef)، على بعد (40 km) تقريبًا إلى الجنوب من فالديز (Valdez)، في ألاسكا في خليج

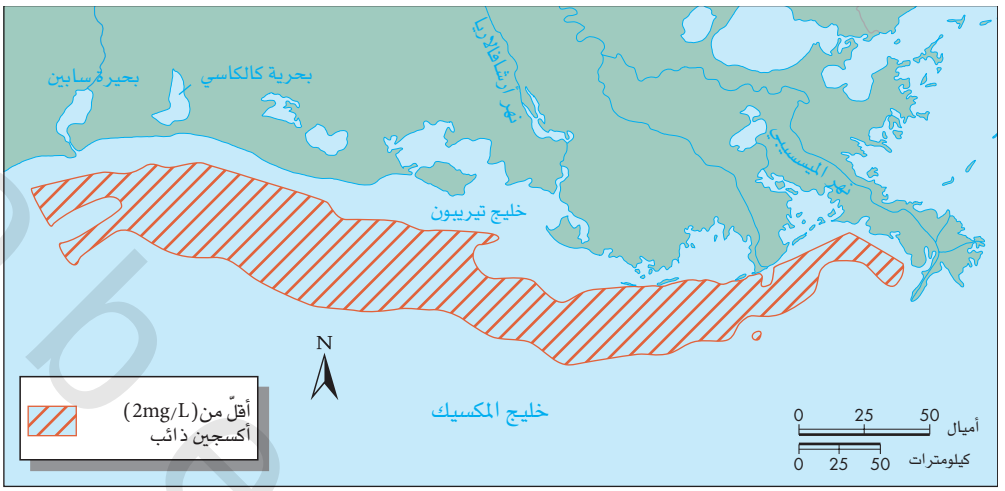
(أ)

(ب)

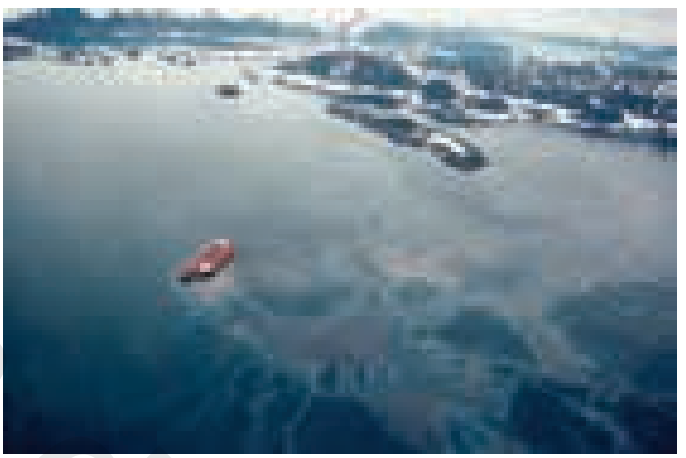
(جـ)

الشكل (13-4أ): الشقق السكنية (الشاليهات) على شاطئ جزيرة ماوي في هاواي. (أ) الخطّ البني على طول حافّة الشاطئ تراكم الطحالب البحرية. (ب) تتراكم الطحالب على الشاطئ لعمق نصف متر، ويتجنّب الناس على الشاطئ هذه المناطق. (جـ) عادة ما تمتلك الشاليهات محطّات صغيرة لمعالجة المياه، مثل الظاهرة في الصورة داخل السياج المغطّى بالنباتات، التي تقدّم معالجة أوّلية وثانوية، وبعد المعالجة تُحقن المياه إلى أسفل الأرض على عمق ضحل، لكنّ المعالجة لا تزيل الموادّ الغذائية، مثل الفوسفور والنيتروجين، والتي تشجّع تراكم الطحالب البحرية في البيئات القريبة من الشاطئ (المصدر: *Source: Edward A. Keller*).

obeikan.com



الشكل (13–5): المنطقة الميّتة في خليج المكسيك. المنطقة في خليج المكسيك في شهر يوليو لعام 2001م، حيث تركيز الأكسجين في المياه القاعية يعادل (2 mg/L) (المصدر *Modified after Rabalais, Turner, and Wiseman, 2001, Hypoxia Studies*).



(أ)

(ب)

الشكل (13-6): انسكاب النفط من الناقلة إكسون فالديز في ولاية ألاسكا عام 1989م. (أ): صورة جوّية لتفريغ النفط من الناقلة المعطوبة، في الجهة اليسرى إلى الناقلة إكسون باتون راج (Exxon Baton Rouge) الأصغر في الجهة اليمنى. ويمكن ملاحظة النفط المتدفّق يطفو على الماء بوضوح. (المصدر: Natalie B. Fobes/Getty Images Inc) (ب) محاولة تنظيف النفط من البيئة البحرية، عن طريق الغسل والرش بالماء الساخن (المصدر: *I. L. Atlan/Corbis/Sygma*).

برنس ويليامز (Prince William Sound)، الذي حصل بعد منتصف الليل في 24/3/1999م، وأدّى إلى انسكاب النفط الخام من الناقلة بمعدّل (20,000) برميل في الساعة، انظر الشكل (13–6)، فقد كانت الناقلة محمّلة بـ (1.2) مليون برميل من النفط الخام، وتدفّق منها للبحر ما مقداره (250,000) برميل (11 مليون جالون) من حمولة الناقلة، التي يبلغ طولها (300–m)، ونُقل ما تبقّى في الناقلة إلى سفينة أخرى[3].

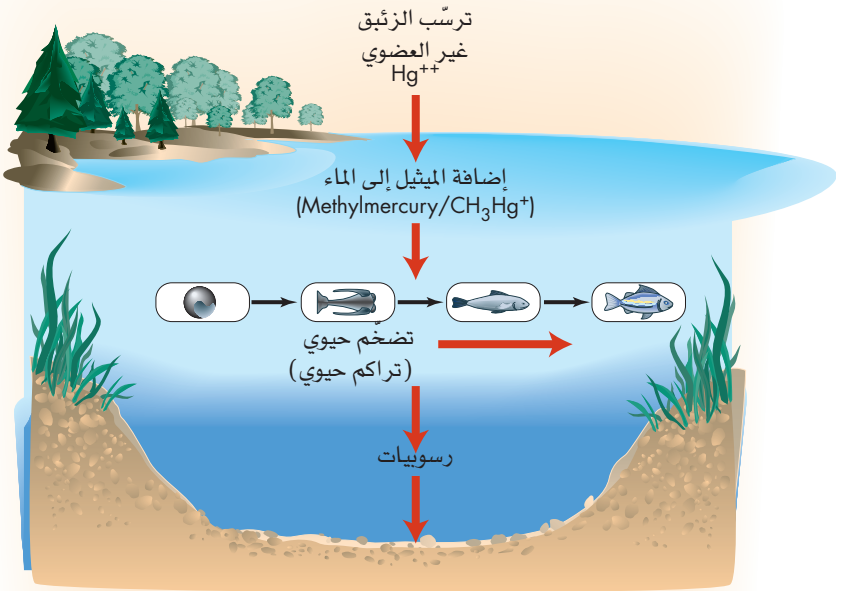
تدفّق النفط المنسكب إلى واحدة من أهمّ المناطق البيئية البحرية في العالم، من حيث الازدهار الحيوي، انظر الشكل (13–6)، ويُعدّ هذا التلوّث النفطي أكبر تلوّث في تاريخ أمريكا، فقد كانت التأثيرات السلبية قصيرة المدى كبيرة جدًّا، حيث تأثّرت مزارع الأسماك التجارية والترفيهية، وكذلك السياحة في المنطقة بصورة كبيرة، وماتت الكثير من الطيور البحرية والثدييات، إلّا أنّ الدروس المستفادة من الحادث أدّت إلى بروز إستراتيجيات إدارة جيّدة، للتعامل مع الناقلات النفطية، وخطط الطوارئ التي تقلّل من الآثار البيئية المدمّرة.

كذلك حصل انسكاب كبير عام 2006م؛ بسبب الحرب في لبنان، عندما قُصفت محطّة توليد كهرباء شاطئية، ما أدّى إلى انسكاب قرابة (100,000) برميل من الوقود النفطي إلى البحر الأبيض المتوسط، حيث تلوّث أكثر من نصف شواطئ لبنان.

المواد السامّة Toxic Substances

معظم الموادّ التي تدخل المياه السطحية والجوفية تُعدّ سامّة للكائنات الحية، وسوف نتناول ثلاثة أنواع من هذه الموادّ، وهي: الكيميائيات العضوية الصناعية، والمعادن الثقيلة، والفضلات المشعّة.

الكيميائيات العضوية الصناعية: المركّبات العضوية هي مركّبات الكربون، التي تصنع طبيعيًّا عن طريق الكائنات الحية، أو صناعيًّا عن طريق العمليات الصناعية، إذ تُستخدم أكثر من (100,000) مادّة كيمائية في الوقت الحاضر، وبعضها استخدم في الماضي. من الصعب التعميم فيما يتعلّق بالآثار البيئية والصحّية للمركبات العضوية الصناعية؛ لأن هذه المركبات كثيرة، ولها استخدامات كثيرة، وتنتج تأثيرات عدة.



الشكل (13-7): الزئبق في البيئة. إدخال الزئبق وتغيّره في الأنظمة المائية.

(Modified from U.S. Geological Survey, 1995, Mercury contamination of aquatic ecosystems U.S. Geological Survey FS-216-95)

هناك استخدامات كثيرة للمركّبات العضوية الصناعية، وخصوصًا في العمليات الصناعية، مثل صناعات مكافحة الحشرات، والموادّ الصيدلانية، والموادّ المضافة للأطعمة، وبعض هذه الموادّ تسمّى ملوّثات عضوية عنيدة أو مستمرّة التواصل (Persistent Organic Pollutants)، إذ صُنّعت هذه المركّبات منذ عقود ماضية، قبل أن يُكتشف أثرها الضارّ على البيئة؛ لذلك تمّ حظر استخدام كثير منها أو تقليله، ويدرج الجدول (13-3) قائمة بأهمّ الملوّثات العضوية العنيدة (POPs) واستخداماتها، ولـ (POPs) خصائص عامّة كثيرة تفيد في تعريفها[4]، أوّلًا: لها ترتيب قائم على عنصر الكربون، وعادة تحتوي على عنصر الكلورين المتفاعل، ثانيًا: معظمها تنتج عن صنع الإنسان، لذلك هي مركّبات كيميائية مصنّعة، ثالثًا: تستمرّ في البيئة أو تتواصل من حيث البقاء، أي عنيدة لا تتحلّل بسرعة، وهي ملوّثة للبيئة وسامة،

الجدول (13-3): ملوّثات عضوية عنيدة مختارة.

المادّة الكيميائية	مثال على الاستخدام
الدارين *Aldrin*[أ]	مبيد حشرات
الترازين *Altrazine*	مبيد أعشاب
ددت *DDT*	مبيد حشرات
دلدرين *Dieldrin*[أ]	مبيد حشرات
إندرين *Endrin*[ب]	مبيد حشرات
PCBs[أ]	سوائل غازية في المحوّلات الكهربائية
ديوكسينز *Dioxins*	منتج ثانوي لإنتاج مبيدات الأعشاب

[أ] منع من الاستخدام في الولايات المتّحدة والعديد من الدول الأخرى.

[ب] حدّد استخدامه أو منع في العديد من الدول الأخرى.

(Source data in part from McGinn, Anne, " Phasing Out Persistent Organic Pollutants," in Lester R. Brown, et al., State of the World 200 (New York: Norton, 200).

وتميل إلى التراكم في الأنسجة الحية، رابعًا: تتوافر في صور عدّة؛ لذلك يسهل نقلها عن طريق الماء أو الرياح أو مع الرسوبيات مسافات طويلة.

وبوصفه مثالًا مهمًّا جدًّا وخطيرًا على هذه المركّبات التي تلوّث الماء فإنّ مادّة (Methyl tertbutyl ether or MTBE) هي أخطرها، حيث طالبت تعديلات قانون الهواء النظيف (Clean Air Act Amendments) التي أقرّت عام 1990م، المدن التي تعاني مشكلات تلوّث الهواء، باستخدام ما يسمّى «مضافات تحسين الأكسجين للوقود»، أو ما يعرف بـ «Oxygen additives»؛ لذلك أُضيفت مادّة (MTBE) إلى الوقود، بهدف زيادة محتوى الأكسجين فيه، وتقليل انبعاثات أول أكسيد الكربون من المركبات التي تحرق الوقود، إذ استُخدمت هذه المادّة؛ لأنّها اقتصادية أكثر من الموادّ المضافة الأخرى، الكحول مثلًا، إلّا أنّها مادّة ذائبة جدًّا في الماء؛ لذلك تتوافر على صورة ملوّثات المركبات العضوية المتطايرة (Volatile Organic Compounds VOCs) في المياه الجوفية، وهناك فرضيات لتوافر (MTBE) في المياه الجوفية الضحلة يعزى إلى ثلاثة مصادر: الجريان السطحي من المناطق الحضرية، والتسرّب من خزّانات الوقود تحت الأرض، أو التسرّب من محطّات تعبئة الوقود، عندما يمتلئ خزّان السيارة بالوقود، ويفيض إلى الأرض.

ومن التناقض أن تؤدّي إضافة موادّ بهدف تحسين جودة الهواء إلى تلويث المياه الجوفية، التي تستخدم بوصفها مصدرًا مهمًّا لمياه الشرب لقرابة (15) مليون إنسان في كاليفورنيا، فعام 1997م أدّت مادّة (MTBE) إلى تلويث المياه الجوفية في سانتا مونيكا (Santa Monica, California)، ما أجبر المدينة على وقف ضخّ المياه الجوفية، وهذا أدّى إلى استثناء ما نسبته (50%) من مجموع مصادر المياه الجوفية في المدينة، وقد تراوحت تراكيز مادّة (MTBE) في مياه سانتا مونيكا الجوفية من (8 إلى 600) ميكروجرام لكلّ لتر (µg/liter). نهاية صفحة 379 وفيما يتعلّق بالقيمة المعيارية المسموح بها لهذه المادّة، فقد بيّنت وكالة حماية البيئة الأمريكية (U.S. EPA)، أنّ تركيزًا بين (20-40 µg) للمادّة في كلّ لتر من الماء، كافٍ لتكوين طعم ورائحة غير مقبولين للماء، ومثل هذا التركيز في الماء، سيؤدّي إلى انبعاث رائحة تشبه رائحة زيت التيربنتين (Turpentine) أو

obeikandl.com

الدهان الجديد، وهو شيء مقرف أو مسبّب للغثيان عند بعض الناس، وما زالت الدراسات جارية حول سمّية مادّة (MTBE)، إذ يخشى بعض الباحثين أن تكون هذه المادّة مسرطنة، وبسبب مشكلات التلوّث، منعت بعض الولايات، مثل كاليفورنيا استخدام هذه المادّة، ثمّ تبعتها معظم الولايات، وعام 2006م حُظر استخدامها في أنحاء أمريكا جميعها، ومع ذلك تبقى مادّة (MTBE) ملوّثًا للمياه الجوفية، ومن الممكن أن تلوّث المياه السطحية (راجع فقرة بعض التطبيقات الرقمية على تلوّث المياه). يوضّح الشكل (13-1) مسارات تحرّك مادّة (MTBE)، إضافة إلى ملوّثات المركّبات العضوية المتطايرة الأخرى في الدورة الهيدرولوجية لمنطقة حضرية[5].

المعادن الثقيلة Heavy Metals: تُعدّ المعادن الثقيلة مثل الرصاص (lead) والزئبق (mercury) والخارصين (zinc) والكادميوم (cadmium) والزرنيخ (arsenic) ملوّثات خطيرة، وعادة ما تترسّب مع الرسوبيات الطبيعية في قاع قنوات الأنهار، أمّا إذا ترسّبت هذه المعادن في سهول الفيضانات، فإنّها قد تدخل إلى النباتات، وتصبح جزءًا منها، بما في ذلك محاصيل الغذاء والحيوانات، فعندما يذوب المعدن في الماء المستخدم في الزراعة أو الاستخدام المنزلي، فإنّ التسمّم بالمعادن الثقيلة قد يحدث نتيجة لذلك.

ومثال على ذلك، خذ تلويث الزئبق (mercury) للأنظمة البيئية المائية، إذ عُرف هذا النوع من التلوّث منذ عقود، وخصوصًا في البرك والبحيرات والأنهار وحتى المحيطات[5].

وربما حدثت أشهر حالات التلوّث الكبيرة بالزئبق في منطقة ميناماتا (Minamata) في اليابان، التي تُعدّ بلدة ساحلية على جزيرة كيشو (Kyushu Island)، التي أصبحت موقع مرض خطير، اكتشف أوّل مرّة في منتصف القرن العشرين، وسمّي مرض القطط الراقصة؛ لأنّه لوحظ

PUTTING SOME NUMBERS ON بعض التطبيقات الرقمية

Water Pollution تلوّث المياه

Average Residence Time (ART) متوسّط زمن المكوث

متوسّط زمن المكوث لعنصر كيميائي أو مركّب، هو مفهوم مهمّ في تقييم كثير من المشكلات البيئية، ويعرف متوسّط زمن المكوث بنسبة حجم الخزّان أو البركة من مادّة ما، مثلًا كمّية الماء في سدّ؛ إلى معدّل النقل (أي الحركة) لهذا العنصر أو المركّب داخل الخزّان والمعادلة، هي:

$$\text{ART} = S/F$$

تساعد معرفة زمن المكوث لمادّة كيميائية في البيئة، مثل مكوّن ملوّث في الهواء أو الماء أو التربة، على الفهم الكمّي لهذه المادّة بطريقة أفضل؛ وعليه، يمكن استخدام هذا المفهوم لإجراء تقييم أفضل لطبيعة هذا الملوّث وامتداده في الزمان والمكان، ما يساعد على تطوير إستراتيجية للقضاء على حدّة هذا الملوّث أو التخفيف منها.

لنأخذ مثالًا بسيطًا: يبيّن الشكل (13-أ) خريطة لخزّان (سدّ) أوك كريك (*Oak Creek Reservoir*). لهذا السدّ نهران أو جدولان (*two creeks*) يغذّيانه مجتمعين بما مقداره ($0.1\ m^3/s$) من الماء، فيما تحرّر فتحة التصريف من السدّ ما مقداره ($0.1\ m^3/s$) نحو نهر أو جدول أوك (*Oak Creek*) بعد السدّ. والسدّ مغطًى، ويُعدّ مصدر تزويد مياه لقرية (*Mission Village*)، ومن الممكن إهمال قيمة التبخّر من السدّ في هذا المثال البسيط، ويتوافر ملوّث مثل (*MTBE*) في السدّ نتج عن إضافة هذه المادّة للوقود، بهدف التقليل من انبعاثات أوّل أكسيد الكربون، وهي مادّة سامّة بتراكيز منخفضة (20-40 µg/liter) في الماء، وتصدر رائحة مثل زيت التيربنتين (*Turpentine*)، وتُعدّ مصدر إزعاج لبعض الناس، حيث تذوب بسرعة في الماء، ولذلك تنتقل بسرعة الماء نفسها، أمّا مصدر هذه المادّة في السدّ، فيعود إلى مبنًى قديم لتخزين الوقود (تمّت إزالته الآن)، وقد أوصلت تسرّبات الوقود من المبنى هذه المادّة إلى التربة والصخور المجاورة، عبر المياه الجوفية إلى مياه النهر، وبسبب الاهتمام بخطورة هذه المادّة في كاليفورنيا وولايات أخرى، حُظر استخدامها عام 2006م.

يمكن طرح الأسئلة الآتية عن الماء وعن مادّة (MTBE) في نهر أوك كريك.

1. ما زمن مكوث الماء في السدّ؟
2. ما كمّية (MTBE) في السدّ؟ وما معدّل نقلها إليه (الكمّية في وحدة الزمن)؟ وما زمن وضعها في السدّ؟ لأنّ مادّة (MTBE) والماء يتحرّكان معًا؛ لذلك زمن المكوث لهما يجب أن يكون واحدًا، ويمكن إثبات ذلك.

زمن مكوث الماء في السدّ ART of Water in Oak Creek Reservoir

لإجراء هذه الحسابات يمكن الاستعانة بعوامل التحويل بين القيم والوحدات في الأغلفة الداخلية للكتاب.

أي زمن مكوث الماء في السدّ، هو (23) يومًا.

$$\frac{200{,}000\ m^3}{0.1\ m^3/sec} = \text{ART}_{\text{ماء}} = \frac{S}{F} = \text{ART}_{\text{ماء}}$$

أو

$$\frac{2 \times 10^5\ m^3}{0.1\ m^3/sec}$$

تختصر وحدات m^3 مع بعضها

$$\text{ART} = 2{,}000{,}000\ s \quad \text{أو} \quad 2 \times 10^6\ s$$

حوّل $2 \times 10^6\ s/y$

$$\frac{\text{ثانية}}{\text{سنة}} \times \frac{60\ \text{ثانية}}{1\ \text{دقيقة}} \times \frac{60\ \text{دقيقة}}{1\ \text{ساعة}} \times \frac{24\ \text{ساعة}}{1\ \text{يوم}} \times \frac{365\ \text{يوم}}{1\ \text{سنة}}$$

وباختصار الوحدات والضرب، يكون هناك 31.536.000 s/yr وهي:

$$3.1536 \times 10^7\ s/yr$$

وبالتالي يكون عمر القطعة الفنية التي وجدت في أول ترتيب هو:

$$\frac{2{,}000{,}000\ s}{31{,}536{,}000\ s/yr} \text{ or } \frac{2 \times 10^6\ s}{3.1536 \times 10^7\ s/yr}$$

obeikandl.com

زمن مكوث (MTBE) في السدّ

ART for MTBE in Oak Creek Reservoir

تم قياس تركيز زمن المكوث في الماء قرب السدّ، ووجد أنّه يساوي (15 μg/l)، لذلك مجموع كمّية أو حجم (MTBE) في الماء، هو حاصل ضرب التركيز في

$$2 \times 10^5\ m^3 \times \frac{10^3 l}{m^3} \times \frac{15 \mu g}{l} = 3 \times 10^9 \mu g \text{ or } 3 \times 10^3 g$$

الحجم.

معدّل خروج **الماء** من السدّ، هو $(0.1\ m^3/s)$، وهذا الماء يحتوي ما مقداره

$$\text{MTBE/s} = \frac{0.1\ m^3}{sec} \times \frac{10^3\ l}{m^3} \times \frac{15\ \mu g}{l} \times \frac{10^{-6}\ g}{\mu g}$$
$$= 1.5 \times 10^{-3}\ g/s$$

(15 μg/l) من مادّة (MTBE).

إذا افترضنا أنّ زمن مكوث الماء ومادّة (MTBE) في السدّ القيمة نفسها، هذا نتج لأنّ مادّة (MTBE) تذوب في الماء، لكن لو حصل لها التصاق برسوبيات السدّ، لكان زمن المكوث أطول. الموادّ الكيميائية في خزّان كبير أو ذات معدّل النقل الصغير، تميل لامتلاك أزمنة مكوث أطول، في هذا المثال قسنا أزمنة مكوث الماء وألـ (MTBE) في السدّ، وكذلك معدّل

$$ART_{MTBE} = \frac{S}{F} = \frac{3 \times 10^3\ g}{1.5 \times 10^{-3}\ g/sec}$$
$$= 2 \times 10^6\ sec,\ or\ 0.063\ yr\ (23\ days)$$

الدخول والمقدار لـ (MTBE).

قرية ميشين (Mission) هي تجمّع سكني صغير في بيئة شبه جافّة، وقد أدّى تسرّب الوقود من مبنى لتخزين الوقود ومادّة (MTBE) إلى وجود هذه المادّة في الماء الجوفي، وتتسرّب المادّة الآن نحو ماء النهر، فهل يمكن أن تفكّر في طريقة لتخفيف تركيز (MTBE) في الماء أو القضاء عليه؟

معدّل الدخول للسدّ
0.08 m^3/s من نهر أوك
0.02 m^3/s من نهر كولد سبرنغز
المجموع = 0.1 m^3/s
~ 3.15 x 106 m3/yr أو 3.15 x 109 l/yr
أو ~ 0.82 بليون جالون/سنة
ما يعادل ~ 2.50 فدان – سنة.

الشكل (13 أ): مخطّط مثالي لسدّ مغطّى ملوّث بـ (**MTBE**).

obeikandl.com

في القطط، التي بدا للناس أنّها مجنونة، ترقص على صورة دوائر، مع وجود رغوة على الفم، ولوحظ أيضًا أنّ الطيور تصطدم في أثناء طيرانها بالنباتات أو تسقط على الأرض، وكذلك أصيب السكان وأغلبهم من عائلات صيادي السمك بالمرض، إذ كانت الأعراض الأولى له على صورة حالات إرهاق شديد، وتهيّجات شديدة مع خدران في الأرجل والأذرع وصداع في الرأس وصعوبة في البلع، أمّا بعض الأعراض الشديدة، فكانت عدم وضوح في الرؤية وفقدان للسمع والتنسيق العضلي، وقد اشتكى بعض الناس من طعمًا معدنيًّا في الفم، وعانوا الإسهال، وبعد أن أخذ المرض دورته توفي قرابة (40) شخصًا، وأصيب أكثر من (100) شخص بإعاقات شديدة، كان الناس الذين عانوا المرض يقطنون منطقة صغيرة، ومعظم طعامهم من الأسماك، التي يصطادونها من خليج ميناماتا (Minamata Bay).

بعد تعقّب المرض تبيّن أنّ مصدر التلوّث مصنع لمادّة فينيل كلوريد (Vinyl Chloride)، يقع على خليج ميناماتا، ويستخدم الزئبق في العمليات التصنيعية، حيث يُصرّف غير العضوي منه بصورة نفايات إلى الخليج، إذ اعتقدوا أنّ الزئبق لن يصل إلى السلسلة الغذائية، إلّا أنّ البكتيريا المتوافرة في الخليج حوّلت الزئبق غير العضوي إلى مادّة أخرى تسمّى ميثيل ميركوري (Methyl mercury) (سيتم مناقشتها بالتفصيل فيما بعد)، وهي مادّة تمرّ بسرعة عبر أغشية الأنسجة، وتنتقل عبر الجسم عن طريق خلايا الدم الحمراء؛ لذلك يمكن أن تدخل وتدمّر خلايا الدماغ، حيث تعتمد التأثيرات المؤذية لهذه المادّة على عوامل عدّة، تشتمل على كمّية المادّة التي تعرّض لها الجسم، وكمّية الامتصاص (Intake)، ومدّة التعرّض أو التكشّف للمادة، وكذلك نوع الكائن الحي المتعرّض للتلوّث أو جنسه، وتأثيرات الزئبق التي غالبًا تتأخّر من أسابيع عدّة إلى أشهر داخل الأشخاص المصابين بالتلوّث منذ تاريخ الإصابة به، كذلك إذا توقّف امتصاص الزئبق، تختفي بعض الأعراض، وتبقى الأعراض الأخرى التي يصعب إيقافها[6].

عرف المرض بعد ذلك بمرض ميناماتا (Minamata Disease)، وأصيب به قرابة (800) شخص، لكنّ عدد الذين تعرّضوا له يفوق بضعة آلاف، حيث توقّف تلوّث الزئبق في الخليج عام 1968م. هناك مصادر طبيعية عدة للزئبق، مثل البراكين وتعرية رسوبيات الزئبق الطبيعية، إلّا أنّ اهتمامنا ينصب في معظم الحالات على الزئبق الناتج عن عمليات حرق الفحم وحرق النفايات ومعالجة المعادن في المصانع، وعلى الرغم من أنّ معدّلات إدخال الزئبق للبيئة من أنشطة الإنسان غير مفهومة كلّيًّا، إلّا أنّه يعتقد أنّ أنشطة الإنسان ضاعفت من كمّية الزئبق في الغلاف الجوي بقرابة مرّتين أو ثلاث مرّات، حيث تزداد نسبة توافره بمعدّل (1.5%) في السنة[7]، أمّا المصدر الرئيس للزئبق في الأنظمة المائية، فهو ترسّب هذا العنصر من الجوّ مع مياه الأمطار، فما إن يصل الزئبق غير العضوي إلى الماء (Hg^{2+})، حتى يدخل في دورة معقّدة تحصل خلالها عملية تسمّى (Methylation)، وفيها تحوّل الأنشطة البكتيرية الزئبق إلى مادّة (ميثيل ميركوري CH_3Hg^+ Methyl mercury)، وهذه العملية مهمّة من الناحية البيئية؛ لأنّ مادّة الميثيل ميركوري أكثر سمّية من الزئبق غير العضوي، وتحتاج الكائنات الحية إلى وقت طويل لتتخلص أنسجتها منها، مقارنة بالزمن اللازم للتخلص من الزئبق غير العضوي، ومع تواصل عمليات تغلغل هذه المادّة وترسّبها في السلسلة الغذائية، تحصل عملية تسمّى التضخّم الأحيائي (Biomagnification)، التي من خلالها يزداد تركيز مادّة الميثيل ميركوري إلى مستويات أعلى في السلسلة الغذائية؛ لذلك يحتوي جسم سمكة كبيرة على كمّية أكبر من هذه المادّة، مقارنة بجسم سمكة صغيرة في بركة ماء، أو مقارنة بحشرة صغيرة؛ بسبب تغذّي السمكة الكبيرة على الكائنات الأصغر. يوضّح الشكل (13-7) بعض جوانب دورة الزئبق في الطبيعة، ويظهر الجانب المتعلّق بإدخال الزئبق إلى البيئة في دورته، ترسّب الزئبق غير العضوي إلى حدوث عملية تكوين ميثيل ميركوري، وفي الجانب المتعلّق بخروج الزئبق أو مغادرته للدورة، يدخل الزئبق إلى جسم الأسماك، ثمّ إلى الكائنات التي تتغذّى عليها، انظر الشكل (13-8)، حيث تحرّر الرسوبيات الزئبق بعمليات عدّة، مثل إعادة طرح الزئبق أو تعليقه في الماء، وهذا يؤدّي إلى دخوله إلى السلسلة الغذائية أو إلى الغلاف الجوي مرّة أخرى، من خلال عملية التطاير (Volatilization)، وهي عملية تحويل السائل أو الصلب إلى بخار.

الزرنيخ (Arsenic) هو أيضًا مثال على معدن سامّ جدًّا، يتوافر بصورة طبيعية في التربة والصخور والمياه، وهناك استخدامات صناعية وتجارية كثيرة له، مثل تصنيع الزجاج والمبيدات الحشرية وحافظات الأخشاب، وقد يدخل إلى مصادر المياه من خلال مجموعة من العمليات، مثل المطر

الشكل (13-8): قد تحتوي الأسماك على معادن سامّة. يتناول الناس الذين يأكلون السمك في جزر فيجي (Fiji Islands) موادّ كيميائية بما فيها المعادن المتوافرة في أنسجة الأسماك. وتلوّث السمك بالزئبق مشكلة محتملة، وخصوصًا سمك التونا (Tuna) وسمك أبو سيف (*Sword fish*)

المصدر: *(Peter Arnold Inc)*.

obeikandi.com

الطبيعي وذوبان الثلوج وجريان المياه الجوفية، ويمكن كذلك إطلاقه من خلال المياه العادمة الصناعية والعمليات الزراعية، ويمكن أيضًا تحريره من خلال استخدام المبيدات الحشرية، أو حرق الوقود الأحفوري، أو بصفته ناتجًا عن عمليات التعدين.

عُرف الزرنيخ بوصفه نوعًا من أنواع السموم القاتلة منذ عصور قديمة، وأدرك العلماء حديثًا، أنّ ارتفاع نسبته في ماء الشرب، يؤدّي إلى مشكلات صحّية مختلفة تؤثّر في الأعضاء، مثل المثانة والرئة والكلية، وكذلك يسبّب أمراضًا تصيب الجهاز العصبي المركزي، ويُعدّ الزرنيخ أيضًا مادّة مسرطنة.

تُعدّ مشكلة تلوّث مياه الشرب بالزرنيخ حاليًّا مشكلة عالمية، فعلى الرغم من أنّها غير موجودة في مصادر تزويد المياه جميعها في العالم، إلّا أنّها موجودة في كثير منها، مثلًا أصاب تلوّث مياه الشرب بالزرنيخ في بنجلاديش الملايين من السكان، الذين يُعدّون من أكثر الناس فقرًا على الأرض، أمّا الأبحاث الحالية، فتهدف إلى تحديد الأماكن التي يحصل فيها تلوّث الزرنيخ، وتطوير طرق أو تقنيات مناسبة لتجنّب أخطار التعرّض للزرنيخ أو تقليلها[8].

الفضلات المشعّة تُعدّ الفضلات المشعّة في الماء مشكلة تلوّث خطيرة، تسبّب القلق لعلماء البيئة من التأثيرات المحتملة الناتجة عن التعرّض طويل الأمد لجرعات منخفضة من الإشعاعات على الناس والحيوانات والنباتات (انظر الفصل الخامس عشر).

الرسوبيات Sediment

تتكوّن الرسوبيات من قطع صخرية ومعدنية غير متماسكة، يتراوح أصغرها من حيث الحجم من حبّات الرمل إلى حبّات الغرين والطين الصغيرة جدًّا، وهذه الحبّات أو الجزيئات الصغيرة هي المسؤولة عن مشكلات تلوّث المياه بالرسوبيات، التي تُعدّ أكبر الملوّثات من حيث الحجم، ومن الواضح أنّ الرسوبيات في الماء، هي موارد غير أنّها في غير محلّها، حيث تستنزف التربة، المصدر المهمّ، وتقلّل من جودة الماء الذي تدخل فيه، وقد ترسّب موادّ غير مرغوب فيها على أراضي المحاصيل الخصبة أو الأراضي الأخرى المفيدة، انظر الشكل (13-9). تمّت معالجة موضوع التلوّث بالرسوبيات بالتفصيل في الفصل الثالث.

التلوّث الحراري Thermal Pollution

وهو التسخين بفعل الإنسان للماء فوق درجاته الطبيعية، من خلال تصريف مياه حارّة من العمليات الصناعية ومحطّات توليد الطاقة الكهربائية، ما يؤدّي إلى مشكلات عدة، أوّلها، أنّ الماء الساخن يمتلك كمّية أقلّ من الأُكسجين مقارنة بالماء البارد، لدرجة أنّ الماء الذي تزداد حرارته بضع درجات فقط عن الماء المجاور، يكون أقلّ احتواءً على الأكسجين، ثانيًا، يحابي الماء الأكثر سخونة أجناسًا معيّنة من الكائنات الحية على أخرى، وذلك قد يزيد معدّلات النمو لكائنات غير مرغوبة، مثل أنواع معيّنة من النباتات والأسماك، لكنّه في بعض الأحيان، قد يساعد على بقاء أفضل لأنواع معيّنة (مفضّلة) من الأسماك، وخصوصًا في موسم الشتاء.

3-13 تلوّث المياه السطحية ومعالجته
SURFACE-WATER POLLUTION AND TREATMENT

يحصل تلوّث المياه السطحية عندما تدخلها كمّية زائدة من الموادّ الضارة أو غير المرغوب فيها، وتتعدى القدرة الطبيعة للجسم المائي للاستفادة من هذه المادّة أو إزالتها أو تحويلها إلى مادّة غير ضارة، وتطلق ملوّثات المياه السطحية من مصادر محلية تدعى مصادر نقطية (Point Sources).

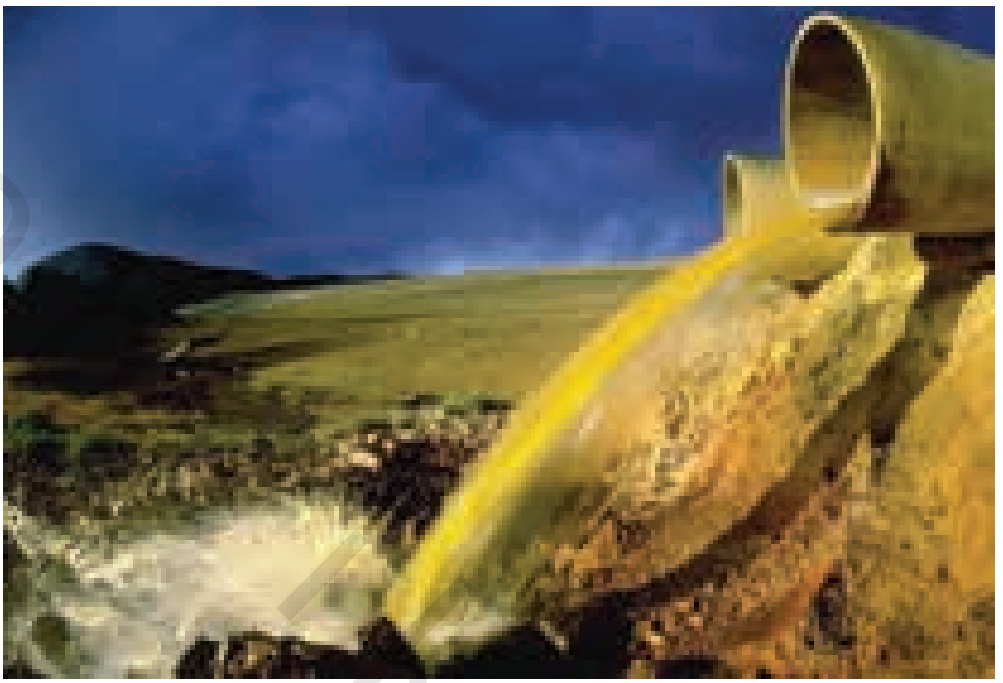
المصادر النقطية لتلوّث المياه السطحية
Point Sources of Surface-Water Pollution

المصادر النقطية هي مصادر منفصلة ومحصورة، مثل الأنابيب التي تفرّغ محتواها داخل نهر؛ بسبب تصريف مواقع صناعية أو بلدية (الشكل 13-10)، وفي الغالب تتمّ السيطرة على المصادر النقطية للتلوّث الناتجة عن الصناعات، عن طريق المعالجة في الموقع أو طرحها، وهي تخضع للقوانين والتراخيص المتبعة، وكذلك تخضع المصادر البلدية للقوانين والتراخيص.

المصادر غير النقطية لتلوّث المياه الجوفية
Nonpoint Sources of Surface-Water Pollution

المصادر غير النقطية منتشرة على مساحة أوسع، وتتحكّم فيها عوامل، مثل استخدامات الأراضي، والمناخ، وهيدرولوجية المنطقة، والطوبوغرافية، والغطاء النباتي، والأصل، والجيولوجيا.

الشكل (13-9): مثال على التلوّث بالرسوبيات. توضّح الصورة عملية إزالة الرسوبيات بالآليات الثقيلة، بعد الفيضان الذي حدث في جوليتا (Goleta) كاليفورنيا عام 1995م. إذ كان مصدر الرسوبيات نهر مجاور تعرّض للفيضان، ورسّب حمولته في وكالة سيارات جديدة المصدر: *(Rafael Moldanado/ Santa Barbar News-Press)*.



الشكل (13-10): مصادر تلوّث نقطية. يصرف هذا الأنبوب المياه العادمة المعالجة جزئيًا، من منجم تعدين الموليبدينيوم في كلايماكس (Climax Molybdenum Mine) في كولورادو، حيث تخضع المصادر النقطية في أمريكا للقانون. المصدر: *(Jim Richardson/ Richardson Photography)*

ومن المصادر غير النقطية الشائعة الجريان السطحي من الشوارع والساحات أو الحقول، أمّا المصادر الناتجة عن المناطق الريفية، فتكون غالبًا مترافقة مع الزراعة والغابات أو التعدين، (ارجع إلى نظرة متفحّصة: تصريف المناجم الحمضي).

من الصعب السيطرة على التلوّث من المصادر غير النقطية أو الجريان السطحي الملوّث، إذ يحتوي هذا النوع على أصناف التلوّث كلّها من المعادن الثقيلة إلى الكيميائيات والرسوبيات، حتى عندما تغسل سيارتك في كراج المنزل، فإنّ موادّ التنظيف والزيت في الماء المتدفّق، تنساب نحو عبّارات مياه الأمطار، التي تصبّ في النهاية في نهر، وأنت بذلك تسهم في جريان سطحي ملوّث، وينتج الجريان السطحي الملوّث أيضًا، عندما يشطف ماء المطر المبيدات الحشرية من النباتات في حديقة المنزل، ثم يجري الماء في اتّجاه النهر أو يرشح من السطح إلى المياه الجوفية، وبالطريقة نفسها، فإنّ المطر والجريان السطحي من ساحات المصانع والمخازن تُعدّ أيضًا مصدرًا للملوّثات غير النقطية[9].

تقليل تلوّث المياه السطحية: قصّة نجاح نهر كوياهوغا

Reduction of Surface-Water Pollution: The Cuyahoga River Success Story

هناك جهود متضافرة في الولايات المتّحدة الأمريكية، لتقليل تلوّث المياه وتحسين جودتها، حيث إنّ الفرضية القائمة، أنّ الناس لديهم حقّ أساسي في ماء آمن للشرب والسباحة والزراعة والصناعة، إذ كانت جودة المياه بالقرب من المراكز السكانية الحضرية رديئة في فترة من الفترات، وأسوأ ممّا هي عليه الآن، خذ مثلًا قصّة نهر كوياهوغا (Cuyahoga River)، فالمجالد القارّية (الأنهار الجليدية glaciers) التي شكّلت البحيرات العظمى (Great Lakes)، انحسرت آخر مرّة من الولايات الأمريكية قبل (10,000) سنة، وفي المنطقة الواقعة شمال أوهايو، تشكّل نهر يجري نحو ما عرف فيما بعد ببحيرة إري (Lake Erie)، حيث أطلق سكان أمريكا الأصليون، الذين سكنوا المنطقة قبل قرابة (2000) سنة، اسم كوياهوغا (Cuyahoga) على هذا النهر، ويعني بلغتهم النهر المتعرّج، وقد كان للنهر استخدامات مهمّة للسكان، الذين قطنوا على طول النهر، واعتمدوا عليه بصفته مجرًى أو طريقة للتنقل ونقل البضائع التجارية مع الآخرين.

قدم تجار الفرو من أوروبا إلى المنطقة في القرنين السابع عشر والثامن عشر، لتبادل التجارة مع السكان الأصليين لأمريكا، إلّا أنّ الحرب التي نشبت عام 1812م طردت السكان من وادي نهر كوياهوغا، وبعد بضع عقود من الزمن، وصلت الحركة الصناعية إلى الوادي، وأُنشئت قنوات تصل النهر ببحيرة إيري، التي كانت تحمل حمولات شحن كثيرة في ذلك الوقت، ومع نمو الصناعة في الوادي، وبالتحديد في مدينة كليفلاند (Cleveland) في أوهايو، أصبحت مشكلة تلوّث النهر أكثر شيوعًا، إذ إنّ القوانين التي تمنع عملية طرح النفايات في النهر لم تتوافر في ذلك الوقت، ومع وصول صناعة النفط إلى المنطقة، أصبح النهر ملوّثًا أكثر، فماتت الأسماك وكائنات حية أخرى تعيش في النهر نتيجة لذلك، وأصبح النهر أكثر الأنهار تلوّثًا في أمريكا، وقد شهد النهر عام 1969م حدثًا تاريخيًّا بيئيًّا، عندما أشعلت شرارات من أحد القطارات، الماء المنقوع بالنفط في النهر مشعلةً سطح الماء! وعندها أصبحت قضية احتراق النهر قضية حشد وتظاهر للتوعية البيئية بالموضوع.

أصبح نهر كوياهوغا الآن أكثر نظافة، ولم يعد يشتعل مرّة أخرى[10]، وحُوّلت أجزاء من النهر إلى نطاقات أو أحزمة خضراء، فحوّلت النهر من منهل مجارٍ مفتوح إلى مصدر وطني ذي قيمة كبيرة، ونقطة جذب للتجديد الاقتصادي والبيئي، إلّا أنّه بعد مروره بمدينتي كليفلاند وآكرون، يُعدّ مع الأسف نهرًا صناعيًّا وبعض أجزائه ملوّثة، أمّا الأجزاء العلوية، فقد حُوّل بعضها إلى ما يعرف بنهر ولاية أوهايو ذي المناظر الخلّابة (State of Ohio Scenic River)، حيث وضعت منطقة الترفيه الوطنية لوادي كاياهوغا (Cuyahoga Valley National Recreation Area) بين مدينتي كليفلاند وآكرون، وخُصّصت في النهاية أجزاء من المقاطع الوسطى والسفلى من الوادي، لتصبح مواقع تراث وطني (National Heritage Sites).

A CLOSER LOOK نظرة متفحّصة

تصريف المناجم الحمضي Acid Mine Drainage

تصريف المناجم الحمضي (Acid Mine Drainage) يطلق على عملية تحرير مياه من المناجم التعدينية، بمحتوى حمضي عالٍ ونسبة عالية من المعادن الذائبة، التي تخرج من مواقع تعدين الفحم أو المعادن تحديدًا، والتصريف الحمضي من المناجم، هو ماء يحتوي على تراكيز عالية من حمض الكبريتيك (sulfuric acid, H_2SO_4)، الذي ينساب من بعض مناطق التعدين، ويؤدّي إلى تلويث مصادر المياه السطحية.

ينتج التصريف الحمضي للمناجم عن عمليات جيوكيميائية وميكروبيولوجية معقّدة، عندما تتلامس مجموعة معادل الكبريتيد (sulfide minerals) (المترافقة دومًا مع خامات الفحم أو المعادن، مثل الخارصين zinc والرصاص والنحاس) مع الماء الغني بالأكسجين قريبًا من السطح، على سبيل المثال: توافر معدن البايرايت (Pyrite FeS_2) دومًا مع خامات المعادن أو الفحم، الذي يتأكسد بوجود الماء والبكتيريا مكوّنًا حمض الكبريتيك (sulfuric acid). ومصدر الماء قد يكون ماءً سطحيًّا يرشح إلى داخل المنجم، أو قد يكون ماءً جوفيًّا على عمق ضحل يتحرّك عبر المنجم، وبالطريقة نفسها، قد يتلامس الماء السطحي أو الماء الجوفي غير العميق مع مخلفات المناجم أو ما يعرف بـ (tailings)، ويتفاعل مع معادن مجموعة الكبريتيد، ليشكّل تصريفات من الماء الحمضي (acid-rich water)، والمعادلة العامّة لهذا التفاعل، هي:

$$4\ FeS_2 + 15\ O_2 + 14\ H_2O \rightarrow 4\ Fe(OH)_3 + 8\ H_2SO_4$$

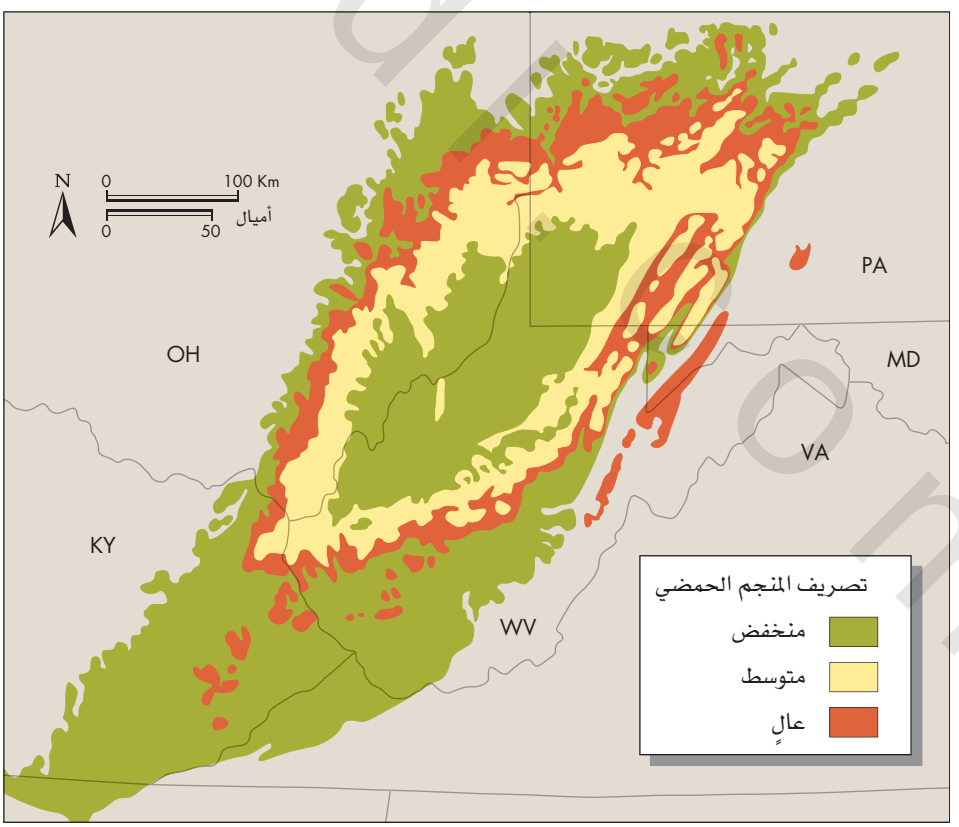
بايرايت Pyrite + أكسجين + ماء ← هيدروكسيد الحديديك + حمض الكبريتيك

عندما يرتحل الماء الغني بحمض الكبريتيك والمعادن الذائبة بعيدًا عن منطقة التعدين، فقد يؤدّي إلى تلويث مصادر المياه السطحية والجوفية، وإذا صادف الماء الغني بالحمض نهرًا أو بحيرة، فإنّ تدميرًا كبيرًا للأنظمة البيئية قد يحصل، حيث يُعدّ الماء الحمضي سامًّا جدًّا للنباتات والحيوانات في الأنظمة المائية، وقد يقوم الماء الحمضي بإعادة تحريك موادّ كيميائية أخرى متوافرة في النظام.

تُعدّ مشكلة التلوّث بسبب تصريفات المياه الحمضية من المناجم، واحدةً من أكبر المشكلات البيئية التلوّثية في معظم مناطق أمريكا، مثل أجزاء من ولايات وايومنغ (*Wyoming*) وإلينوي (*Illinois*) وإنديانا وكنتكي وتنيسي وميزوري وكانساس وأوكلاهوما وويست فيرجنيا وميريلاند وبنسلفانيا وأهايو وكولورادو.

ويظهر الشكل (13 ب) المناطق المحتملة للتلوّث بالتصريفات الحمضية من المناجم، في مناطق الأبالاش (*Appalachian Region*) في شرق الولايات المتّحدة الأمريكية. يُعدّ الأثر الكلّي السلبي الناتج عن التلوّث بالمياه الحمضية التعدينية كبيرًا جدًّا، حيث تلوّثت آلاف الكيلومترات من الأنهار في أمريكا (الشكل 13 جـ).

عُدّت منطقة تار كريك (نهر القطران) (*Tar Creek*) في أوكلاهوما من قبل وكالة حماية البيئة الأمريكية (*EPA*)، أسوأ مثال على التلوّث بالمياه الحمضية التعدينية في أمريكا كلّها، حيث تلوّثت الأنهار في المنطقة بصورة كبيرة بفعل مياه غنية بالأحماض، من مناجم مهجورة في مقاطعة المناجم ثلاثية الولايات (*Tri-State Mining District*) لولايات كانساس وأوكلاهوما وميزوري، إذ



الشكل (13 ب): احتمالات التلوّث بسبب تصريفات الماء الحمضي. الصخور الحاملة للفحم في أجزاء من جبال الأبالاش *Appalachian Mountains*

(U.S. Geological Survey 2008, Acid drainage introduction, http://energy.er.usgs.gov. Accessed 1/19/09.)

الشكل (13 ج): **تصريف ماء حمضي.** ينساب الماء من هذا المنجم المهجور في كولورادو، بصفته مثالًا على تصريف الماء الحمضي، والماء ملوّث أيضًا بمعادن ثقيلة، مثل مركّبات الحديد التي تسبّب اللون البرتقالي المصدر: *(Source: Tim Haske/Profiles west/ Index Stock Photography, Inc).*

جرى تعدين خامات الكبريتيد (*sulfide deposits*)، التي تحتوي على معادن الرصاص والخارصين في نهاية القرن التاسع عشر، وانتهت عمليات التعدين في بعض المناطق بحلول فترة الستينيات.

وخلال عمليات تشغيل المناجم، جفّت المناطق تحت السطحية من خلال ضخّ الماء الجوفي للخارج، الذي تدفّق للمنطقة بصورة مستمرّة، وعندما توقّفت عمليات التعدين، ارتفع منسوب الماء الجوفي بصورة طبيعية، وانغمرت بعض المناجم بالماء، وتحرّك الماء بعيدًا عنها ملوّثًا الأنهار المجاورة، لذلك تبقى منطقة التعدين بين الولايات المذكورة الثلاث محطّ اهتمام بيئي، حيث تمّ القيام بعمل شاق للتخفيف من آثار التلوّث، أمّا حلّ المشكلة المحتمل لتقليل أخطار تصريفات المياه الحمضية في هذه المناطق، فهو استخدام طرق إيجابية للمعالجة تستخدم موادّ كيميائية طبيعية و/أو تفاعلات بيولوجية في أنظمة مسيطر عليها، لمعالجة تصريفات المياه الحمضية، وأبسط هذه الأمثلة للبيئات المسيطر عليها، هو استخدام قناة مبنية من الصخور الجيرية تجري فيها المياه الحمضية، حيث يتفاعل الماء الغني بالأحماض مع حجارة الجير المطحونة، ما يؤدّي إلى معادلة الأحماض.

ما النتيجة النهائية لنهر كوياهوقا ووديانه ومناطقه الحضرية الخلّابة؟ يبدو أنّ النهر مبجّل جدًّا من الناس في أوهايو، ومن المتأمّل أن يبقى نموذجًا تسويقيًّا لعملية الاستعادة الإيجابية لنهر ملوّث، تظهر كيف يمكن استرجاع حتى أكثر الأنهار تلوّثًا.أصبحت قصص نجاح الأنهار الملوّثة، مثل قصّة نهر كوياهوقا، في السنوات الأخيرة مشجعة، وربّما من أشهرها قصّة نهر ديترويت (Detroit River)، ففي فترة الخمسينيات وبداية الستينيات كان نهر ديترويت يُعدّ نهرًا ميّتًا، حين كان مكبّ نفايات مفتوحًا للصرف الصحّي والكيميائيات والقمامة المنزلية، إذ كانت أطنان من الفوسفور تُطرح في النهر يوميًّا، حيث تتوافر طبقة رقيقة من النفط بسمك (0.5 cm) فوق النهر، أمّا الحياة النهرية المائية، فكانت مدمّرة بصورة كبيرة، وماتت الآلاف من الأسماك والبط، وعلى الرغم من أنّ نهر ديترويت لا يُعدّ الآن من الأنهار المزدهرة، إلّا أنّ تحسينات كبيرة حصلت من خلال عمليات السيطرة على التلوّثات الصناعية والبلدية، حيث خُفّضت انسكابات النفط والموادّ المستخدمة في التشحيم بنسبة (82%)، وانخفضت تصريفات الفوسفور والمياه العادمة بنسبة كبيرة أيضًا، فعادت الأسماك لتظهر في النهر مرّة أخرى، وأصبحت جوانب النهر نظيفة، ومن قصص النجاح الأخرى أيضًا، قصّة نهر هدسون في ولاية نيويورك (New York›s Hudson River) (شاهد قصّة تاريخ حالة: تنظيف نهر هدسون)، وقصّة نهر بمغ واست Pemige Wasset River في ولاية نيو هامبشير (New Hampshire)، ونهر فرنش بورد (French Board River) في ولاية North Carolina، ونهر السافانّا (Savanna River) في جنوب شرق أمريكا، هذه الأمثلة جميعها تثبت أنّ تجنّب ملوّثات الأنهار تؤدّي إلى نتائج إيجابية[11].

ومن الأنظمة الابتكارية في تنظيف المياه للاستخدامات البشرية، نذكر مثال نظام يستخدم الموادّ الأرضية الطبيعية لتصفية الماء من أجل الاستهلاك البشري، يطبّق في منطقة في ولاية متشغين (Michigan) على بحيرة متشغين، حيث تقع مدينة لدينغتون (Ludington)، التي يبلغ عدد سكانها في الصيف (10,000) نسمة، إذ تستخدم هذه المدينة الرمال والحصى المتوافرة تحت قاع البحيرة؛ لتصفية ماء البحيرة بصفتها خطوة فلترة أوّلية، ثمّ معالجة المياه للشرب، فأُنشئ نظام من آبار السحب الأفقية، دفنت في الرمل والحصى على عمق (4 إلى 5 أمتار تحت قاع البحيرة، وتسحب المياه إلى الخارج للاستخدامات البلدية، معالجة بعمليات الكلورة فقط.

سنتطرّق لبعض التفاصيل عن قدرة الصخور والتربة على فلترة الشوائب، في فقرة تلوّث المياه الجوفية ومعالجتها المقبلة.

4-13 تلوّث المياه الجوفية ومعالجتها

GROUNDWATER POLLUTION AND TREATMENT

يعتمد نصف سكان الولايات المتّحدة الأمريكية تقريبًا على المياه الجوفية بوصفها مصدرًا لمياه الشرب؛ لذلك يهتمّون كثيرًا بالملوّثات الكيميائية والكائنات الدقيقة، التي قد تدخل إلى المياه الجوفية، حيث يعتمد الخطر الذي قد يسبّبه ملوّث ما، متوافر في المياه الجوفية على عوامل عدّة، بما فيها كمّية وحجم الملوّث الذي دخل الماء وتركيزه أو سُمّيته في البيئة، ومدى تعرّض الناس والكائنات الأخرى لهذا الملوّث.

اعتقد الكثير من العلماء أنّ المياه الجوفية صافية من الملوّثات وآمنة للشرب، إلّا أنّنا نعدّ معرفتنا بحقيقة قابلية المياه الجوفية السهلة للتلوّث بأنواع كثيرة من الملوّثات (الجدول 13-4)، مصدر قلق وتنبيه لضرورة حمايتها من التلوّث. إضافة إلى ذلك، فإنّه يصعب في بعض الأحيان تعرّف الملوّثات السامّة جدًّا.

أصبحت مشكلة تلوّث المياه في أمريكا حاليًّا واضحة جدًّا، وذلك مع شيوع فحوصات المياه، مثلًا: مدينة أتلانتك سيتي في نيوجيرسي (Atlantic city، New Jersey) ومدينة ميامي في فلوريدا (Miami، Florida) من المدن الشرقية في أمريكا المهدّدة بتلوّث في المياه الجوفية، التي تتحرّك ببطء نحو آبارهما، ومن المعروف أنّ (75%) من ألـ (175,000) موقع لطرح النفايات المعروفة في أمريكا، قد تؤدّي إلى تكوين كتل من المياه الجوفية الملوّثة المنسابة في الخزّان على صورة سحابة (plume)، تتحرّك داخل المياه الجوفية وفي اتّجاه حركتها نفسه، وتُعدّ معظم الكيميائيات التي نجدها في الماء سامّة أو موادّ مسرطنة محتملة، ومن الظاهر أنّنا كنا نجري تجربة وطنية كبيرة المدى، فيما يتعلّق بتأثيرات التعرّض المزمن لمستويات منخفضة من الملوّثات على الناس!

Obeikandl.com

تاريخ حالة CASE HISTORY

تنظيف نهر هدسون Cleaning up the Hudson

بصفة نهر هدسون مثالًا جيّدًا على تصميم الناس على تنظيف الأنهار الملوّثة، نأخذ قصّة تقييمه وتنظيفه من ملوّثات مجموعة أل PCBs (polychlorinated biphenyls)، استخدمت مجموعة ألـ (PCBs)، التي تشبه التركيبة الكيميائية لمادّة (DDT) والديوكسين (Dioxin) بصورة رئيسة في صناعة المكثّفات الكهربائية والمحوّلات، وقد بدأ طرح هذه الكيميائيات من مصرفين على نهر هدسون عام 1950م، ثمّ توقّف بعد ذلك عام 1977م، ومن المعتقد أنّ هناك قرابة (295.000 kg) من مادّة (PCBs) في رسوبيات النهر، حيث يصل تركيز هذه المادّة في الرسوبيات لغاية (1500) جزء من المليون (ppm) قرب المصرفين، مقارنة بتركيز يصل إلى أقلّ من (10) أجزاء من المليون (ppm) لمسافة بضع مئات من الكيلومترات، في اتّجاه أسفل النهر قرب مدينة نيويورك (New York City). أمّا المصادر الرئيسة لطرح أل (PCBs) في منطقة العاصمة لنيويورك، فهي مياه المجاري والجريان السطحي الحضري، حيث وصّلت ما مقداره نصف كمّية أل (PCBs) إلى منطقة ميناء هدسون – نيويورك في السنوات الأخيرة[14]، يذكر أنّ إدارة الغذاء والدواء الأمريكية (U.S. Food and Drug Administration) تسمح بأقلّ من (2.5) جزء من المليون (ppm) من مادّة (PCBs) في منتجات الألبان، في حين أنّ الحدّ الأقصى المسموح به في المياه الجوفية بحسب ولاية نيويورك، هو (0.1) جزء من البليون (ppb).

من المعروف أنّ (PCBs) موادّ مسرطنة، وتسبّب اضطرابات في الكبد والجهاز العصبي والدم وجهاز الاستجابة المناعية لدى الإنسان، كذلك، فإنّ هذه المجموعة غير قابلة للتحطيم في البيئة الطبيعية؛ لذلك تتراكم في الطبقات أو المستويات العليا للسلسلة الغذائية، وهذا هو محطّ الاهتمام، وقد أظهرت نتائج عيّنات مائية مسافة (240–km) من النهر، توافر متوسّط تركيز لـ (PCBs) يتراوح ما بين (0.1 إلى 0.4) جزء من البليون (ppb)، لكن أل (PCBs) متركّزة لمستويات أعلى في بعض الأسماك، ونتيجة لذلك، عانى الصيّادون في الجزء السفلي من النهر خسائر اقتصادية كبيرة من التلوّث؛ بسبب حظر صناعة صيد السمك كلّها تقريبًا، وتأثّر هواية صيد الأسماك الترفيهية[13، 14].

راعت عمليات تنظيف النهر بديلين،هما [13، 14]:

- تجريف مناطق التلوّث الساخنة (hot spots)، التي يفوق فيها التلوّث بمادّة (50) (PCBs) جزءًا من المليون (ppm)، ومن المتأمّل أن يقلّل التجريف من الزمن اللازم لتنظيف النهر نفسه بالعمليات الطبيعية، مثل نقل الرسوبيات إلى المحيط، ودفن أكثر الرسوبيات تلوّثًا بالعمليات النهرية الترسيبية وعملية إزالة الكلورة البيوكيميائية، عن طريق الكائنات الحية في الرسوبيات النهرية.
- عدم القيام بأيّ إجراء، وهذا البديل سيسمح للعمليات الطبيعية بتنظيف أل (PCBs)، إذ يفترض هذا البديل، أنّ مصادر إدخال أل (PCBs) والكيميائيات إلى النهر قد خُفّضت بصورة كبيرة.

بدأت عمليات التجريف لإزالة الرسوبيات الملوّثة بمادّة أل (PCBs) في نهر هدسون عام 2009م، وسوف تُزال المئات من الأطنان الرسوبية الملوّثة (الحمأة السامّة toxic sludge) وتُنقل، لتطرح في مكبّ نفايات في غرب تكساس، إضافة إلى التنظيف الطبيعي الحاصل في النهر، حيث كانت تراكيز أل (PCBs) في الرسوبيات، التي نقلها النهر إلى الأسفل في المجرى، أقلّ بمرّات عدّة في فترة الثمانينيات من تراكيز فترة السبعينيات، ويبلغ زمن الاستجابة اللازم للوصول إلى عمر النصف (Half-life) في تراكيز مادّة أل (PCBs) في نهر هدسون (أي الزمن اللازم لتخفيض تركيز مادّة أل (PCBs) إلى النصف) قرابة (3.5) سنوات، إلّا أنّ إدخال هذه المادّة إلى النهر انخفض بصورة كبيرة؛ بسبب القيود التي وضعتها وكالة حماية البيئة الأمريكية (U.S. EPA) على صناعة هذه الموادّ الكيميائية [14].

الجدول (13–4): مصادر شائعة لتلويث المياه الجوفية (بنوعيها المسبّبة لـ (pollution أو contamination).

التسرّبات من صهريج تخزين (الوقود) والأنابيب
التسرّبات من مواقع طرح النفايات مثل المكبّات
الترشيح من أنظمة الصرف الصحّي والحفر الامتصاصية
حوادث الانسكابات والتسرّبات (من حوادث القطارات والشاحنات)
التسرّبات من الأنشطة الزراعية مثل الحظائر
اندفاع الماء المالح من المحيطات إلى خزّانات المياه الجوفية الساحلية
التسرّبات والترشيح من أكوام نفايات المناجم والمخلّفات
التسرّبات من الري بالرشّ
تشغيل غير سليم لآبار الحقن
تسرّب الماء الحمضي من المناجم
التسرّب من الجريان الراجع من الري
ترشح الجريان السطحي الحضري والصناعي والزراعي

ومن المؤسف أن النتائج النهائية للتجربة لن تعرف منذ سنوات عدة[15]، حيث تقترح النتائج الأوّلية وجوب المبادرة بالتصرّف الآن، قبل أن تنفجر قنبلة موقوتة من المشكلات الصحّية.

مقارنة تلوّث المياه الجوفية والسطحية

Comparison of Groundwater and Surface-Water Pollution

تجعل الاختلافات في البيئات والظروف الفيزيائية والجيولوجية والبيولوجية، المشكلات المرافقة لتلوّث المياه الجوفية مختلفة بصورة كبيرة، عن تلك المرافقة لتلوّث المياه السطحية، ففي حالة تلوّث المياه السطحية، تؤدّي سرعة الجريان إلى تخفيف سريع في تركيز الملوّثات وعملية انتشار سريعة لها، وتؤدّي وفرة الأكسجين وأشعة الشمس إلى تحطيم سريع للملوّثات، إلّا أنّ الوضع مختلف بصورة واضحة في حالة المياه الجوفية، حيث إنّ فرصة تخفيف التراكيز وانتشار الملوّثات محدودة، وفرصة التحطيم البكتيري للملوّثات محصورة في نطاق التربة لعمق أمتار قليلة تحت السطح، نهاية صفحة 387 وغالبًا ما تكون القنوات التي يجري خلالها الماء الجوفي صغيرة جدًّا ومتغيّرة؛ لذلك فإنّ معدّل الحركة صغير، باستثناء بعض القنوات الكبيرة الناتجة عن ذوبان الصخور، بفعل المحاليل الحمضية في الصخور الجيرية، إضافة إلى

obeikandl.com

ذلـك، يقتل نقص الأكسجين في المياه الجوفيـة الكائنات الدقيقة، التي تحتاج إليـه للقيام بعمليات تحطيم الملوّثات، ومن الممكن أن تكون هذه البيئة مناسبة للبكتيريا اللاهوائية، التي تعيش في البيئات قليلة أو عديمة الأُكسجين.

ويعكس زمن المكوث الطبيعي الطويل للمياه الجوفية (والبالغ المئات إلى آلاف السنين) الوضع المثالي للحفظ العميق والمعزول، الذي توفّره الخزّانات المائية الجوفية، ولا تستغرق المياه الجوفية كلّها مئات السنين، للانضمام مرّة أخرى إلى صور المياه المتحرّكة بسرعة في الدورة الهيدرولوجية، إلّا أنّ معظم المياه الجوفية بعيدة عن تأثير نتح النباتات أو تبخّرها إلى الغلاف الجوي، والعكس من ذلك عندما لا تكون عميقة، فقد تتعرّض للتبخّر عن طريق نتح النباتات، أو التصريف نحو الأنهار، أو استخدام الإنسان أو إساءة استعماله لها، التي تُعدّ ممارسة مهمّة؛ بسبب تأثيرها التدميري على مصادر المياه الجوفية، وتكاليف تنظيفها الباهظة، والحاجة المتزايدة لاستخدامها؛ لأن الطلب على المياه يزداد مع الوقت لكلّ فرد.

التبادل بين المياه الجوفية والموادّ المحيطة بها

Exchanges between Groundwater and Its Surroundings

قد تشكّل الموادّ الطبيعية المحيطة بالمياه الجوفية، مثل التربة والرسوبيات والصخور التي يتحرّك الماء الجوفي خلالها، فلاتر طبيعية، وقد يتبادل الماء موادّ معيّنة مع التربة والصخور، وتحت ظروف ملائمة، يقوم هذا النظام الطبيعي للفلترة بتنظيف الماء، ويحجز الكائنات الحية الدقيقة المسبّبة للأمراض، والجسيمات التي تحتوي على موادّ سامّة ويحطّمها بيولوجيًّا، أمّا إذا كانت الصخور والرسوبيات ملوّثة أصلًا بصورة كبيرة، أو تحتوي طبيعيًّا على موادّ أو عناصر سامّة متوافرة فيها، مثل الزرنيخ (arsenic)، فعندها قد تتسبّب عملية التبادل الطبيعية في جعل الماء أكثر سُمّية.

مثال مهم ذو مضامين بيئية خطيرة، في منطقة وادي سان واكين (San Joaquin Valley) في الغرب من ولاية كاليفورنيا، حيث يتوافر عنصر السلينيوم شديد السمية في التربة، بسبب مياه الري الزراعية، وهو سام للإنسان أيضًا، فقد وصل التصريف تحت السطحي للمياه الغنية بالسلينيوم من الحقول إلى المياه السطحية، وسبّب مشكلات نمو للطيور المائية (water fowl)، وقد أُدرك حديثًا حجم مشكلة التلوّث الناتج عن التصريف المائي من المناطق الزراعية، ويمتلك السلينيوم، مثل المعادن الثقيلة الأخرى شخصية مزدوجة، فهو مهمّ للعمليات الحيوية بتراكيز قليلة جدًّا، وسامّ بتراكيز أعلى (انظر نظرة متفحّصة: السلينيوم في وادي سان واكين).

تذيب المياه الجوفية المتحرّكة عبر الصخور والتربة خليطًا من المعادن والغازات، التي قد تكون مؤذية أو مزعجة للإنسان، مثال على ذلك: الحديد على صورة هيدروكسيد الحديد، الّذي يلوث الماء باللون البني، ويترك تغيّرات لونيّة بنيّة على الملابس المغسولة وتمديدات المواسير، والكالسيوم الذي يسبّب عسر الماء، وكبريتيد الهيدروجين الذي يسبّب الرائحة، التي تشبه رائحة البيض المتعفّن في الماء.

إنّ قدرة معظم أنواع التربة والصخور على فلترة الموادّ الصلبة بما فيها الملوّثات الصلبة، عن طريق وسائل فيزيائية طبيعية، عملية معروفة جيّدًا، إذ تختلف هذه القدرة باختلاف حجوم الحبيبات أو الجسيمات المكوّنة لنظام الفلترة، واختلاف صورها وترتيبها، مثلما هو الدليل الواضح في استخدام أنواع من الرمل والموادّ الأخرى في محطّات تنقية المياه، ومن المعروف أيضًا، مقدرة المعادن الطينية ومعادن أخرى معيّنة، على التقاط بعض العناصر والمركبات الذائبة في المحاليل وتبادلها سواء كانت موجبة الشحنة أو سالبة، هذا التبادل إضافة إلى خاصية الامتصاص (absorption)، مثل امتصاص مادّة صلبة لسائل، أو خاصية «الإدمصاص» (adsorption)، وهي التصاق مادّة ما بسطح مادّة أخرى، مثل إدمصاص أو التصاق سائل بسطح مادّة صلبة، وكذلك عمليات الترسيب، جميعها مهمّة في عمليات الاحتجاز والالتقاط للملوّثات، فلهذه العمليات وحدات محدّدة للقدرة، وهي قابلة للعكس، ويمكن أيضًا إغفالها بسهولة في تصميم مرافق معالجة الملوّثات في الماء وتنقيتها، بالاعتماد على تربة البيئة الجيولوجية وصخورها، فالتغافل أو التجاهل، الذي قد يسبّب تلوّث المياه، مهمّ بصورة خاصّة في التطبيقات أو الممارسات على الأرض بالنسبة إلى المياه العادمة.

A CLOSER LOOK نظرة متفحّصة

Selenium in the San Joaquin Valley السلينيوم في وادي سان واكين

يُعدّ وادي سان واكين في وسط كاليفورنيا واحدًا من أغنى المناطق الزراعية في العالم، وقد ساعدت عمليات الريّ المكثّفة، من مياه الآبار العميقة والمياه المنقولة بالقنوات، من نطاق جبال منطقة سييرا نيفادا (Sierra Nevada) الجبلية على تطوّر الزراعة على الجانب الغربي من الوادي.

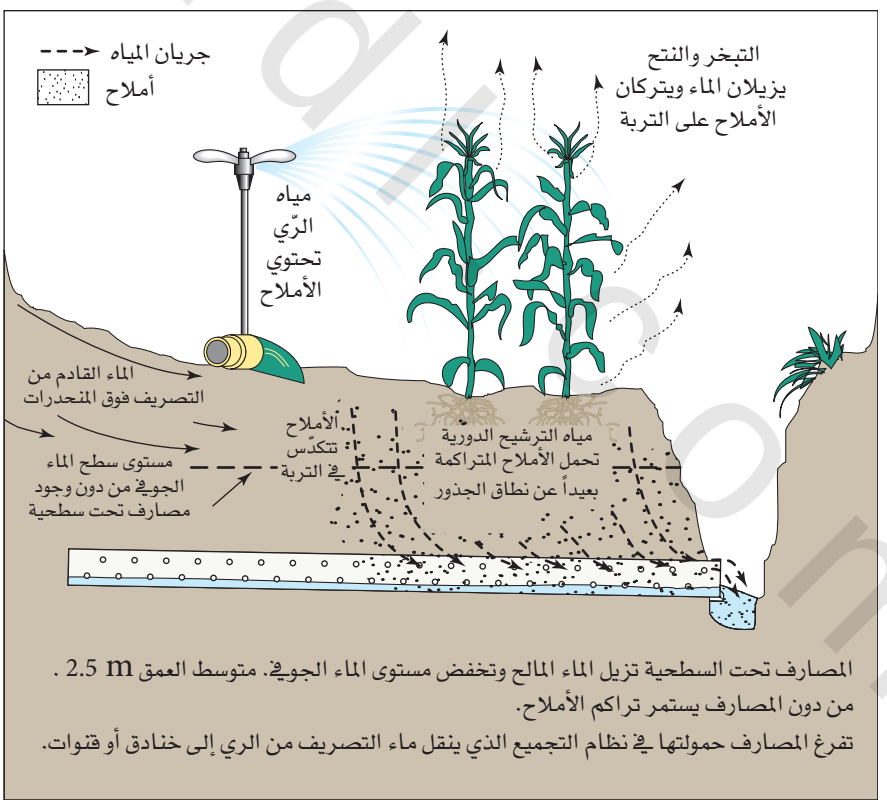
وتكوّنت التربة على الجانب الغربي من الوادي (الشكل 13 د)، في رسوبيات المراوح الطّمية (alluvial fans) التي نشرتها نطاقات الجبال الساحلية، وبسبب كمّية الهطل المطري البالغة (25 cm) سنويًّا، تصبح الحاجة ضرورية إلى الري للإنتاج الزراعي في المنطقة، حيث تبرز مشكلة تصريف في الجهة الغربية للوادي؛ بسبب توافر حواجز من الصخور الطينية على عمق (3 إلى 15) مترًا، التي تحدّ من حركة الماء والأملاح إلى الأسفل، ففي عمليات الريّ، تشكّل هذه الحواجز الطينية نطاق تشبّع بالماء قرب السطح، بعيدًا بصورة واضحة عن مستوى المياه الجوفية، وهو ما يعرف بظرف «الماء الجوفي الجاثم» «perched ground water»، ومع استمرار عمليات الريّ وإضافة المياه للمزروعات، فإنّ نطاق التشبّع بالماء ينمو إلى الأعلى، ويصل إلى نطاق جذور المحاصيل ويغرقها بالماء[16].

يحتوي الماء المستخدم في الري أنواعًا مختلفة من الأملاح، وعندما يتبخّر الماء وتطرحها النباتات بفعل عمليات النتح، تترك الأملاح على سطح التربة، وتُزال في أثناء شطف التربة الدوري بالمياه العذبة؛ لذا تبرز الحاجة إلى المصارف تحت السطحية لإزالة الماء المالح، (الشكل 13 هـ)، فتُوصّل مصارف من أنابيب فخارية (مثقّبة لتدخيل الماء) مع المصارف الأكبر (خنادق أو قنوات)، التي تصرف الماء نحو نظام تصريف أكبر، مكوّن غالبًا من شبكة قنوات.

أُنشئت قناة تصريف سان لويس (San Luis Drain) بين عامي 1968م و1975م (قناة أسمنتية مبطّنة بطول (135–km))، لنقل مياه تصريف الريّ نحو الشمال، في اتّجاه منطقة خليج سان فرانسيسكو. (San Francisco Bay Area).

الشكل (13د): وادي سان واكين ومصرف مياه سان لويس، الّذي يصبّ في سدّ كسترسن

(Modified from K.Tanji, A. Lauchli, and J. Meyer, 1986, Selenium in the San Joaquin Valley, Environment 28[6]).

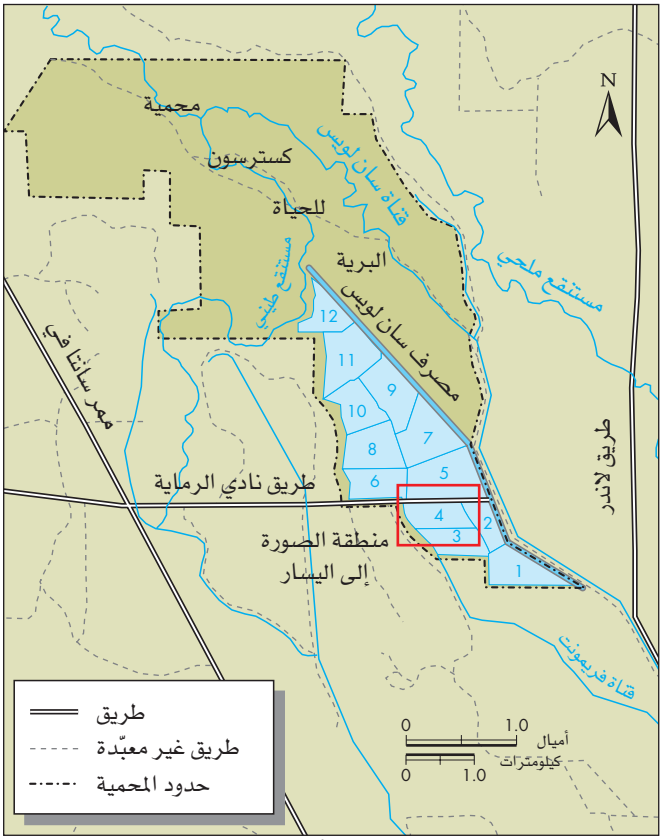


المصارف تحت السطحية تزيل الماء المالح وتخفض مستوى الماء الجوفي. متوسط العمق 2.5 m .
من دون المصارف يستمر تراكم الأملاح.
تفرغ المصارف حمولتها في نظام التجميع الذي ينقل ماء التصريف من الري إلى خنادق أو قنوات.

الشكل (13هـ): **المصارف تحت السطحية.** رسم بياني يوضّح الحاجة إلى نظام تصريف تحت سطحي في الجهة الغربية لوادي واكين.

(Modified after U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1984, Drainage and salt disposal, Information Bulletin 1, San Luis Unit, Central Valley Project, California).

obeikandl.com



(أ)

(ب)

الشكل (13 ز): خريطة بحيرة سدّ كسترسون

(ا) صورة جوّية للموقع.
(After US Deparment of Interior, 1987, Kesterson program, Fact Sheet No.4)

(ب) صورة البحيرة رقم (4) مملوءة بمياه التصريف الزراعية الملوّثة بالسيلينيوم، عندما أخذت الصورة عام 1983م
(San Luis National Wildlife Refuge Complex)

وبسبب محدودية التمويل والشكوك حول الآثار البيئية لتصريف مياه الري نحو الخليج، لم يكتمل بناء المصرف في اتّجاه الخليج، ونتيجة لذلك، أصبحت مجموعة برك سدّ كسترسن (Kesterson *Reservoir*) البالغة (12) بركة بعمق (1.3 m) ، وسطح مساحته قرابة (486) هكتار (والهكتار يساوي 10,000 مترًا مربعًا)، هي الملاذ النهائي لمياه التصريف من الري (الشكل 13 و) (الشكل 13 ز)، والسدّ هو جزء من محمية كسترسن الكبيرة للحياة البرية (Kesterson Wildlife).

خلال السنوات القليلة الأولى لإنشاء سدّ كسترسن، كان أغلب الجريان في المصرف يتكوّن من ماء عذب، يُشترى لتوفير الماء لمحمية كسترسن للحياة البرية، التي أُسّست بصورة أساسية للطيور المائية، بدأ السدّ باستقبال ماء التصريف من الريّ، الراجع من حقول الزراعة عام 1978م، وبحلول عام1981م، كان هذا الماء هو المصدر الرئيس المغذّي للسدّ، وقد بدا أنّ القناة والسدّ يشكّلان نظامًا جيّدًا، للتخلّص من المياه الراجعة من الري، بوصفها مياه غير نظيفة، ومن المؤسف أنّه مع ترشّح الماء داخل التربة، بدأ الماء بالتقاط معدن السلينيوم (من المعادن الثقيلة)، إضافة إلى الأملاح والموادّ الكيماوية الزراعية، إذ ينتج السلينيوم عن عمليات تجوية الصخور الرسوبية في نطاقات الجبال الساحلية (Coast Ranges) في الجهة الغربية من الوادي، فتحمل هذه الرسوبيات بما فيها السلينيوم، عن طريق الأنهار والجداول إلى منطقة وادي سان واكين، حيث تترسّب هناك.

أظهرت دراسة لمصلحة الحياة البرية والأسماك الأمريكية عام 1982م، توافر تراكيز عالية للسلينيوم في الأسماك في سدّ كسترسن، وقد رُصدت فراخ ميّتة أو مشوّهة للطيور المائية والحيوانات البرية الأخرى في الفترة من 1983م – 1985م، وأظهر تحليل العيّنات المائية أنّ تركيز السلينيوم في البرك تراوح بين (390 – 60) جزءًا من البليون (ppb)، ووصل تركيز السلينيوم في عيّنات أُخذت من مياه التصريف الزراعي إلى قرابة (4000) جزء من البليون (ppb)، فتراكيز السلينيوم هذه، تفوق مرّات كثيرة الحدّ المعياري المسموح به، من قبل وكالة حماية البيئة الأمريكية، وتبيّن نتيجة للدراسات، أنّ سبب موت فراخ الطيور المائية وتشوّهها يعود إلى السلينيوم، وقد تمّت الإشارة بوضوح إلى مصدر السلينيوم، وهو مصرف سان لويس (San Luis Drain)، فعندما ينتشر الماء في السدّ، يتمّ تركيزه بصورة كبيرة في الرسوبيات، انتقالًا من الماء، ثمّ من الرسوبيات إلى النباتات، ثمّ إلى الحيوانات، وهي العملية المسماة «التضخيم الحيوي» (Biomagnifications).

عام 1985م صُنّفت المياه العادمة لكسترسن بأنّها خطرة، وتشكّل تهديدًا للصحّة العامّة، وأصدر مجلس مراقبة مصادر المياه في كاليفورنيا (California Water Resources Control Board) في ذلك الوقت، أمرًا لمكتب الاستصلاح الأمريكي (U.S Bureau of Reclamation) المسؤول عن تشغيل السدّ، بوجوب تخفيف الوضع الخطر للتلوّث في السدّ، وأُمهلوا خمسة شهور لعمل خطّة للتنظيف، ومدّة ثلاث سنوات لتطبيقها[16]، حيث تكوّنت الإستراتيجية السريعة التي أُتبعت، من ثلاثة محاور: الأوّل، إطلاق مشروع مراقبة، والثاني التأكّد من أنّ الطيور المائية لن تستخدم مياه الأراضي الرطبة في الموقع (تمّ هذا من خلال عملية إخافة الطيور)، والثالث تخفيف تعرّض الناس للخطر.

قصّة سدّ كسترسن التاريخية مثيرة؛ لأنّها تعطي نظرة متبصّرة في التخطيط البيئي وعمليات المراجعة، حيث حدّدت النقاط البيئية المهمّة والآثار السلبية بفعل عملية الفحص (Scoping Process)، التي حدّدت القضايا الآتية:

- تنظيم سدّ كسترسن ومصرف سان لويس وترتيبهما بعد عملية التنظيف.

- الآثار البيئية والاجتماعية والاقتصادية بمنع سدّ كسترسن من استقبال مياه الصرف الزراعي.
- الآثار السلبية المحتملة للسلينيوم والملوّثات الأخرى في مياه الصرف الزراعي على الصحّة العامّة.
- أخذ بدائل أخرى في الحسبان لتنظيف الماء والتربة والرسوبيات والغطاء النباتي.
- احتمالية تحرّك المياه الجوفية الملوّثة بعيدًا عن منطقة السدّ.

في شهر أكتوبر عام 1986م أصدرت وزارة الداخلية الأمريكية، من خلال مكتب الاستصلاح (Bureau of Reclamation) التقرير النهائي لدراسة الأثر البيئي، الذي تناول الآثار البيئية للبدائل المقترحة لتنظيف سدّ كسترسن ومصرف سان لويس[17]. وفي أواخر شهر مارس لعام 1987م، أمر مجلس حماية مصادر مياه كاليفورنيا (California Water Resources Control Board) مكتب الاستصلاح بتجريف الغطاء النباتي والأتربة الملوّثة كلّها، وطرحها في مكبّ مغلق من الأعلى ومبطّن من الأسفل وخاضع للرقابة، وطالب المجلس المكتب أيضًا بتنفيذ إجراءات تخفيف للخسائر التي حصلت على محمية كسترسن للمياه البرية، من خلال تزويد أراضٍ رطبة بديلة للحياة البرية، وقد قدّرت تكلفة خطّة التخلص من الأجزاء الملوّثة وطرحها بقرابة (50) مليون دولار، وعلى الرغم من أنّ خطّة الطرح هذه، قد تساعد على حلّ مشكلة كسترسن، إلّا أنّه في حالة الانتشار الواسع لمشكلة السلينيوم في غربي وادي سان واكين (كما هو الحال في الواقع)، فإنّ الحلّ المطلوب، يجب أن يكون حلًّا عامًّا وطويل الأمد، ولا يستطيع الناس أن يتحمّلوا تكلفة إنشاء سلسلة من مكبّات النفايات السامّة وصيانتها، للتخلّص من التربة والنباتات الملوّثة في الوادي، إلّا أنّ الأبحاث ما زالت قائمة لتقييم مشكلة السلينيوم، ولذلك قد تتغيّر الخطّة الأوّلية مع الوقت، عند الحصول على معلومات إضافية.

البرنامج الوطني لقياس جودة المياه National Water-Quality Assessment Program

شهد ربع القرن الماضي استثمارات كبيرة وتحسينات عظيمة في تصنيع وإنتاج محطّات التنقية، بهدف تقليل كمّيات الملوّثات المطروحة نحو مصادر المياه، وقد أدّت هذه البرامج إلى تحسين جودة المياه في أمريكا بصورة كبيرة، وهناك قلق مستمرّ من آثار ملوّثات المياه من الموادّ المغذّية، والسموم ومسبّبات الأمراض لصحّة الإنسان وصحّة الأنظمة البيئية المائية، واستجابة لهذه الحاجة، بدأت هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية (U.S. Geological Survey) عام 1991م في برنامج لتقييم جودة المياه في أنحاء أمريكا كلّها، وقام البرنامج على المكاملة بين كلّ من أنظمة المياه السطحية والجوفية، وذلك لمراقبة الأنظمة البيئية المائية ودراستها، أمّا أهداف البرنامج فكانت:

(1) وصف دقيق لظروف جودة المياه الحالية، لمعظم الأنهار العذبة والخزّانات الجوفية في أمريكا.

(2) مراقبة جودة المياه ووصف تغيّراتها مع الوقت.

(3) تسريع فهم العوامل الطبيعية والإنسانية، التي تؤثّر في جودة المياه ونوعيتها في البلد.

الخزّانات الجوفية الرئيسة التي يتم مراقبتها ودراستها موضّحة في الشكل (13-11)، وهناك ما يزيد على (100) نهر وجدول تُراقب كذلك[18].

ومن أكبر الأنظمة المائية التي تُراقب حوض نهر ديلوير (Delaware River Basin)، الذي يشمل أجزاء من بنسلفانيا ونيوجرسي ونيويورك ودلوير (الشكل 13-12)، ويشتمل حوض التصريف على أجزاء عدة من تقسيمات المناطق الجغرافية الأمريكية، ذات التضاريس المتنوعة (Physiographic Provinces)، وهي مناطق تمتاز كلّ واحدة منها بطوبوغرافية متشابهة، ولها نوعية الصخور نفسها والتاريخ الجيولوجي نفسه، إذ تتنوّع هذه الأقاليم (Provinces) من المناطق ذات الأراضي المنبسطة نسبيًّا في السهول الساحلية (Coastal plain)، والأراضي العالية الواسعة في بيدمونت (Piedmont)، حيث يعيش (80%) من سكان الحوض في المناطق الوعرة من إقليم الجبال والأودية، وإقليم هضاب الأبالاش (Appalachian Plateaus) في الأجزاء الشمالية من حوض التصريف، وتتقسم أراضي حوض نهر ديلوير إلى: أراضي غابات (60%)، وأراضٍ زراعية (24%)، ومناطق حضرية سكنية (9%)، وأراضي المسطّحات المائية وأنواع متفرّقة من صور الأراضي (7%)[19]، وتشتمل قضايا جودة المياه الرئيسة التي تُدرس في حوض نهر ديلوير على الأمور الآتية[19]:

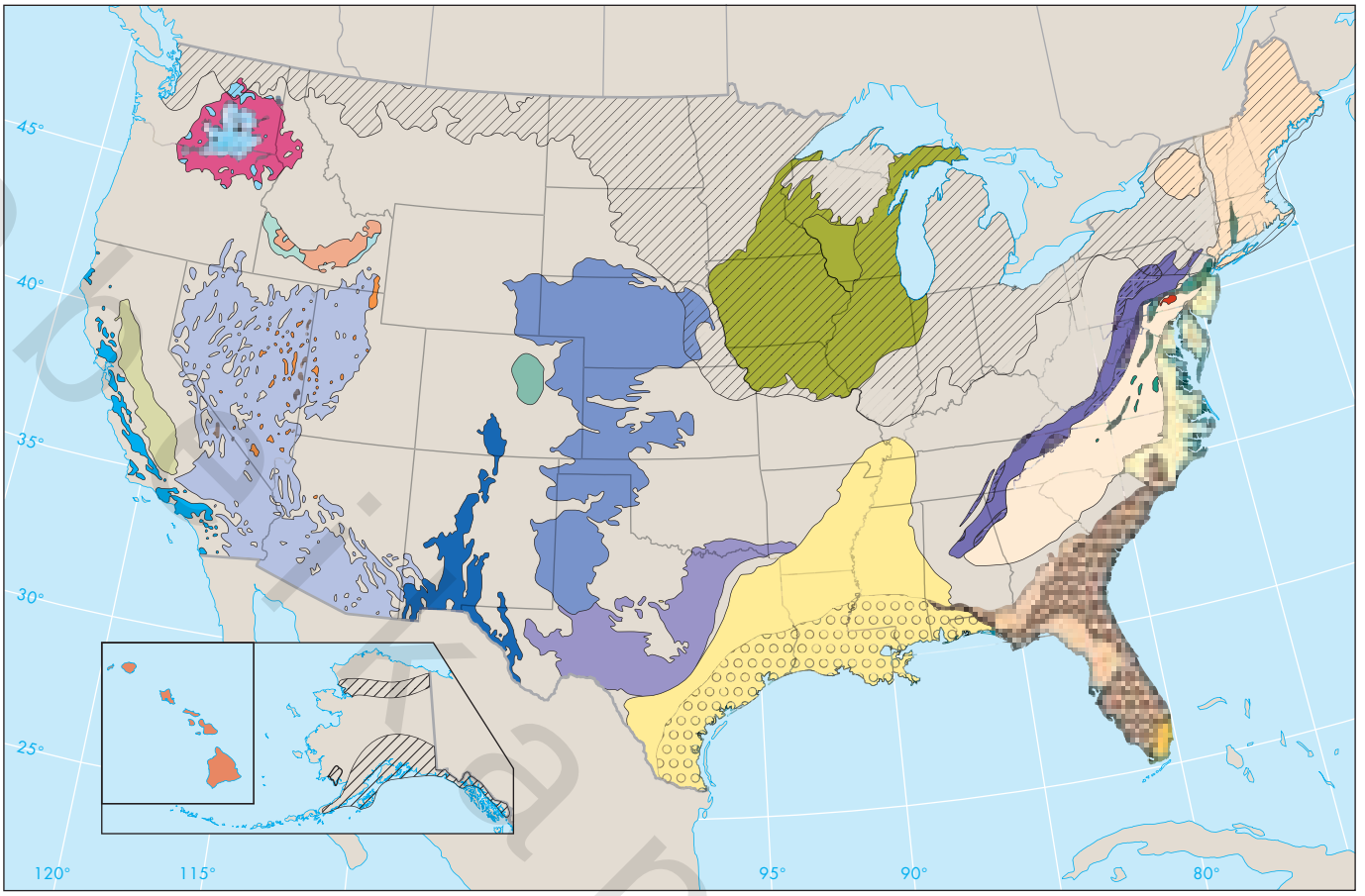
- تأثيرات النظام المائي الطبيعي في توزيع الملوّثات ومصيرها وفاعليتها في الماء والرسوبيات والكائنات الحية.
- العلاقة بين جريان الماء في النهر وتركيزات الموادّ المغذية والملوّثات وناقلات الأمراض.
- توافر الملوّثات بما فيها ناقلات الأمراض والمبيدات الحشرية في مصادر تزويد مياه الشرب، وفي المياه المستخدمة في الأنشطة الترفيهية.
- إنشاء خطط إدارة للمياه وإستراتيجيات لحماية المناطق في حوض النهر، التي تمتاز بجودة مياه عالية.
- تأثيرات أنظمة الصرف الصحي المستخدمة لمعالجة مياه المجاري من البيوت في نوعية المياه وبيئات الأنهار.
- تأثيرات ضخّ المياه الجوفية في نوعية المياه.
- تأثيرات تصريف المياه من مناجم الفحم في نوعية المياه وبيئات الأنهار.

إضافة إلى أنّ دراسة حوض نهر ديلوير، تهدف إلى تحديد أيّ المعلومات مفيدة في التنبّؤ بآثار التغيّر المناخي[20]، حيث تقوم الخطّة على مراقبة النهر، من حيث التغيّرات الحاصلة استجابة للاحترار العالمي، وأثره في تخزين المياه لمدينة نيويورك، وكذلك المحافظة على متطلّبات جريان النهر للاستخدامات المتنوّعة في الحوض، والسيطرة على هجرة المياه المالحة إلى مصبّ النهر مع ارتفاع مستوى سطح البحر[20].

تسرّب المياه المالحة Saltwater Intrusion

لا ينتج تلوّث الخزّانات الجوفية عن طرح النفايات على سطح الأرض أو داخلها فقط، فالضخّ الجائر أو استنزاف المياه الجوفية، يسمح للمياه الرديئة بالهجرة من الخزّانات المجاورة والبحر نحو الخزّان، ما يسبب مشكلات تلوّث، وقد أدّى تسرّب المياه المالحة إلى مصادر المياه العذبة إلى حدوث مشكلات في المناطق الساحلية في نيويورك وفلوريدا وكاليفورنيا ومناطق أخرى.

Obeikandl.com



الشكل (13-11): الخزّانات الرئيسة في أمريكا. الخزّانات الجوفية هنا هي جزء من البرنامج الوطني لتقييم جودة المياه.
(Hamilton, P. A. Rowe, G. I. and Myers, D. N., 2008, National water – quality assessment program, http://water.usgs.gov/nawqa. Accessed 1/19/09)

يوضّح الشكل (13–13أ) المبادئ العامّة لتسرّب المياه المالحة. عادةً يكون مستوى سطح الماء الجوفي مائلًا في اتّجاه المحيط، بينما ينحدر جسم مائي على صورة إسفين في اتّجاه اليابسة؛ لذلك، ومع غياب الطبقة الحاصرة، فقد يتوافر الماء المالح قرب الساحل تحت سطح الأرض، ولأنّ الماء العذب أقلّ كثافة بشيء قليل من الماء المالح؛ لذا يطفو الماء العذب فوق الماء المالح، حيث يفسّر الفرق في الكثافة، سبب توافر طبقة من

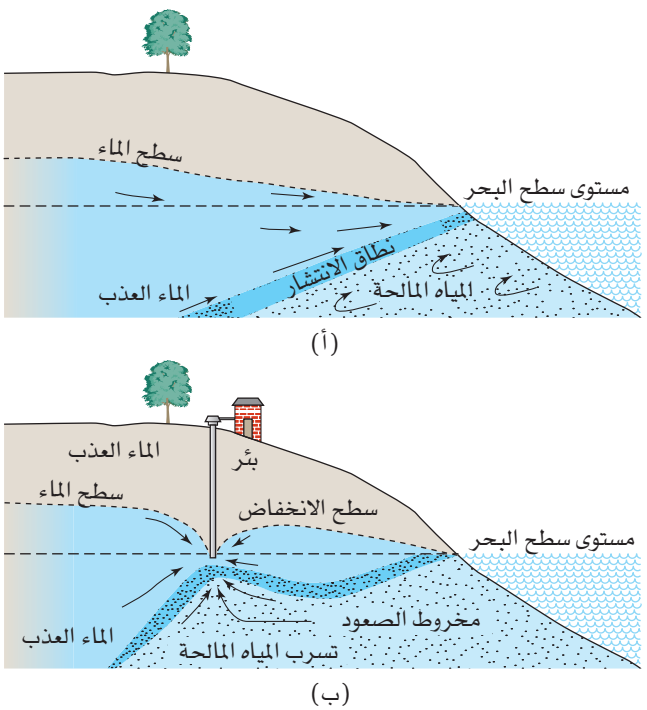
معالجة المياه الجوفية

Groundwater Treatment

لو راجعنا مشكلة صعوبة كشف تلوّث المياه الجوفية من حيث طول زمن مكوث المياه الجوفية، وتردّي نوعية مياه الخزّان الملوّث، وكذلك صعوبة استصلاح الخزّان وتكلفته المرتفعة، لمنعنا أيّ نفايات أو ملوّثات محتملة من دخول أيّ جزء من نظام الخزّانات الجوفية، إلّا أنّ هذا حلم مستحيل، فالاستجابة لتلوّث المياه الجوفية، يجب أن تكون بتعلّم كيفيّة معالجة العمليات الطبيعية للنفايات، حتى إذا أصبح من الصعب على التربة والصخور معالجة النفايات أو تخزينها أو إعادة تدويرها، تمكّنا من تطوير عمليات تجعل من النفايات قابلة للمعالجة والتخزين أو إعادة التدوير.

إنّ تصحيح مشكلات تلوّث الخزّانات الجوفية ونطاق عدم الإشباع ليست عملية مستحيلة، لكنّها قد تكون معقّدة ومكلفة، وتتطلب تقييمًا ومعالجة دقيقين، حيث تشتمل الخطوات المهمّة في تصويب مشكلة تلوّث المياه الجوفية على:

- **تشخيص جيولوجية المنطقة**: وهذا مهمّ بصورة خاصّة؛ لأنّ المظاهر الجيولوجية، مثل القنوات المدفونة الأكثر نفاذية، والمسامات الكبيرة في التربة والتراكيب الجيولوجية، مثل الصخور المتشقّقة أو المطوية أو المتصدّعة، قد تكون العوامل السائدة المتحكّمة في اتّجاه جريان المياه الجوفية.
- **تشخيص الهيدرولوجية**: يجب أن تُحدّد العوامل الهيدرولوجية، مثل عمق المياه الجوفية واتّجاه الجريان ومعدّل الجريان، إذ يشتمل تشخيص الهيدرولوجية أيضًا، على تحديد العلاقات بين المياه السطحية وعمليات المياه الجوفية المؤثّرة في الموقع.



الشكل (13-13): تسرّب الماء المالح. (أ) نظام الماء الجوفي قرب الساحل في الظروف الطبيعية. (ب) بئر مع كلّ من مخروط الانخفاض ومخروط الصعود، عندما يشتدّ الضخّ، قد يرتفع مخروط الصعود إلى الأعلى موصلًا الماء المالح إلى البئر.

الشكل (13-12): أحواض الأنهار التي تُدرس لمراقبة المياه ووصف جودتها. حوض نهر ديلوير مع الأقاليم الجغرافية التي يمرّ بها (المصدر: *U.S. Geological Survey, 1999, National water-quality assessment program, Delaware River basin, U. S. Geological Survey FS – 056-99).*

الماء العذب في المحيط، بعيدًا عن دلتا النهر. عندما تحفر الآبار، يتشكّل مخروط الانخفاض (*Cone of Depression*) في سطح الماء الجوفي العذب (الشكل 13-13ب)، الذي يسمح بتسرّب الماء المالح، عند ارتفاع الواجهة (أو الحدّ الفاصل) بين الماء العذب والماء المالح، ويتشكّل مخروط الصعود (*Cone of Ascension*) استجابة لفقدان الماء العذب.

openkandi.com

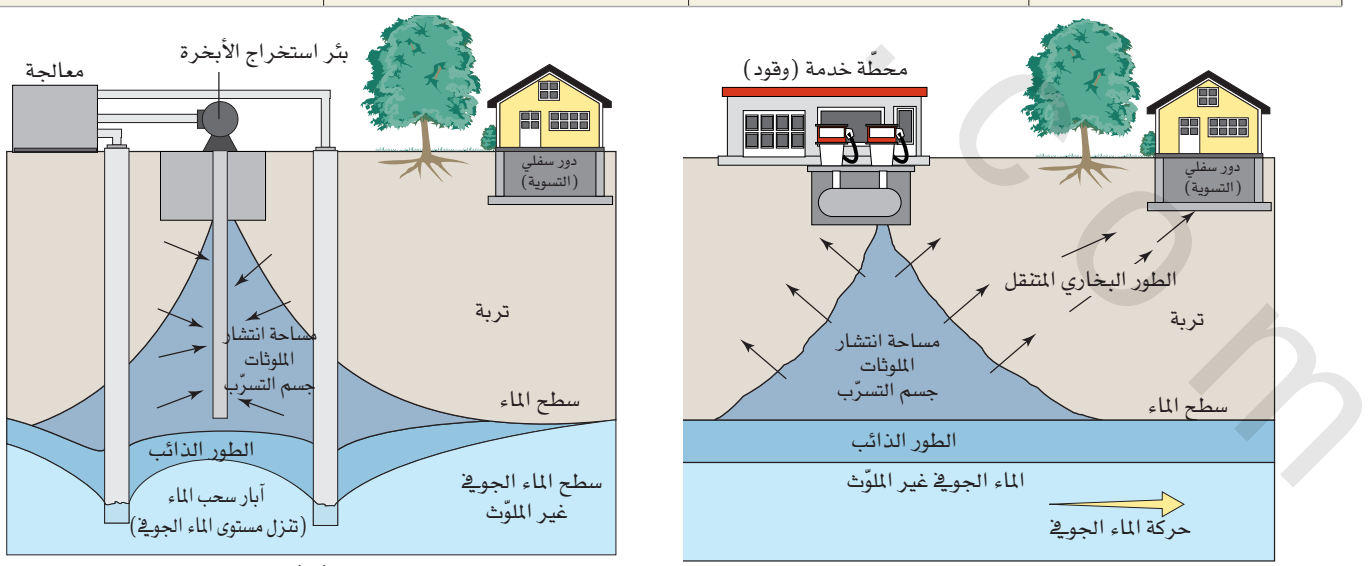
- **تحديد الملوّثات وعمليات النقل**: وتحدّد الملوّثات من خلال عمليات تقييم دقيقة للموقع وجمع عيّنات، مثلًا: بعض الملوّثات، مثل الوقود، هي من الموادّ الطافية؛ لذلك معظم الوقود سيتوافر فوق سطح الماء؛ لأنّ كثافته أقلّ من الماء، لكن بعض المكوّنات في الوقود تكون ذائبة في الماء، لذلك سيكون هناك جزء من الملوّثات أيضًا ذائب في الماء، ومن جهة أخرى، ملوّثات مثل ثلاثي كلور الإيثلين (Trichloroethylene TCE)، وهو مذيب يستخدم في عمليات التنظيف الجافّ (dry clean)، وأثقل من الماء، لذلك سوف يغطس داخل الماء بدلًا من الطفو فوقها، ملوّثات أخرى، مثل الأملاح تكون ذائبة جدًّا في الماء، سوف تتحرّك مع اتّجاه حركة الماء الجوفي نفسه.
- **إطلاق عملية تنظيف الماء الجوفي**: يظهر الجدول (13-5) بعض طرق معالجة المياه الجوفية ونطاق عدم الإشباع، حيث تعتمد الطريقة المختارة لتنظيف المياه الجوفية على مجموعة متغيّرات، مثل نوع الملوّثات ووسيلة نقلها، وخصائص البيئة المحلية مثل عمق المياه الجوفية، والخصائص الجيولوجية.

بصفته مثالًا على معالجة المياه الجوفية، ادرس الشكل (13-14أ) الّذي يبيّن موقعًا لمحطّة وقود وخزّان تحت الأرض فيه تسريب. معظم مادّة الملوّث تطفو على سطح الماء، وبعضها يذوب، ويتحرّك مع الماء الجوفي، وتكون حركة المادّة في طور البخار (vapor phase) بعيدة عن الجسم المتسرّب. ويظهر الشكل (13-14أ) الموقع نفسه بعد تشغيل نظام يتكوّن من آبار سحب الماء وبئر استخراج البخار (الموادّ المتطايرة في الوقود)، إذ تُخفّض آبار سحب الماء مستوى الماء الجوفي في الموقع، ويقوم بئر استخراج البخار المزوّد بمضخّة هواء بشفط الملوّث في حالة البخار، حيث يمكن معالجته.

تشكّل خزّانات الوقود تحت الأرضية المتسرّبة، ظاهرة شائعة للتلوّث في البيئات الحضرية (المدنية) المعاصرة، ففي السنوات الأخيرة، شُدّدت التعليمات على الخزّانات تحت الأرضية لتخزين الوقود، ولم يعد من غير المألوف مشاهدة آليات منصّات الحفر تفحص محطّة وقود، ثمّ ملاحظة عملية إزالة الخزّانات تحت الأرضية فيما بعد، ثمّ البدء بعملية معالجة الوقود المتسرّب. في حالات تلوّث معيّنة، يكون من الصعب معرفة المكان الذي جاء منه الملوّث، مثل الوقود، فمثلًا على معظم تقاطعات الشوارع في أمريكا تتوافر أكثر من محطّة وقود، لديها سلسلة من الخزّانات تحت الأرضية التي دفنت في أزمنة مختلفة، لذلك فإنّ الدعوى القضائية والمشكلات المترافقة حول المسؤولية المتعلقة بتلوّث المياه الجوفية من هذه الخزّانات، ما زالت صعبة وشائكة.

الجدول (13-5): طرق معالجة المياه الجوفية ونطاق عدم الإشباع.

طبقة معالجة منفّذة	المعالجة البيولوجية "Bioremediation"	استخراج البخار "Vapor Extraction"	آبار الاستخراج "Extraction wells"
توفّر معالجة من خلال التلامس، حيث تتحرّك كتلة الماء الملوّث خلال طبقة المعالجة في اتّجاه الماء الجوفي نفسه، وتشجّع هذه الطريقة معادلة الملوّث بفعل عمليات كيميائية وفيزيائية وبيولوجية.	حقن موادّ مغذية وهواء (أكسجين) لتشجيع نمو كائنات حية، تعمل على تحطيم الملوّث في الماء الجوفي.	يستخدم بئر لاستخراج البخار ثم معالجته.	تتم عن طريق ضخّ الماء الجوفي الملوّث للخارج ومعالجته بالفلترة وعمليات الأكسدة أو الإزالة عن طريق الهواء للملوّثات المتغايرة "air stripping".



الشكل (13-14): نموذج مثالي للتسرب من خزان مدفون. (أ) وسيلة معالجة ممكنة (ب). راجع النص للتوضيح
(المصدر: *Courtesy of University of California – Santa Barbara Vadose Zone Laboratory and David Springer*).

obeikandl.com

5-13 معايير جودة المياه
WATER-QUALITY STANDARDS

سؤال قد يسأله الناس: كم هو آمن الماء الذي نشرب؟ يعتقد الأمريكيون أنّ لديهم ماء شرب ذا جودة عالية، وواحدًا من أفضل المتوافر في العالم، لمعظم الأجزاء في أمريكا، نعم يمتلكون ماءً ذا جودة عالية، لكن في السنوات الأخيرة أصبحت لدينا القدرة على قياس تراكيز لغاية أجزاء من البليون (ppb)، وفي بعض الحالات لغاية أجزاء من التريليون (ppt) من الماء، لذا، فالسؤال الآن هو: كم تبلغ خطورة هذه الملوّثات؟ وإلى أيّ درجة يمكن أن يكون بعضها خطيرًا؟ من الممكن أن يعتقد الواحد منّا، أنّ كمّيات قليلة من الملوّثات لا يمكن أن تكون خطيرة، إلّا أنّ وكالة حماية البيئة الأمريكية (U.S. Environmental Protection Agency EPA) تذكرنا بأنّ فيروسًا واحدًا لا يرى بالعين المجرّدة قد يسبّب مرضًا، ويستطيع الأطباء أن يحدّدوا أيّ الأمراض التي يسبّبها فيروس معيّن، إلّا أنّنا ما زلنا أقلّ ثقة في معرفة آثار التعرّض طويل الأمد، لكمّيات قليلة من الموادّ الكيماوية.

لهذا السبب فوّض الكونجرس الأمريكي وكالة حماية البيئة الأمريكية، بإنشاء معايير للحدّ الأدنى وطنيًّا للملوّثات في مياه الشرب، لكثير من الموادّ الكيماوية وموادّ أخرى، وعام 1986م وسّع الكونجرس قانون مياه الشرب الآمنة (Safe Drinking Water Act)، الذي صدر عام 1974م ليشتمل على (83) ملوّثًا، وقد منعت التعليمات الجديدة بوصفها جزءًا من مجموعة تعليمات أخرى، عملية استخدام عنصر الرصاص في أشغال أو عمليات صيانة أنظمة مياه الشرب وشبكاتها.

الآثار الصحّية السلبية الناتجة عن الرصاص معروفة جدًّا، حيث تسبب التراكيز العالية منه تدميرًا للجهاز العصبي والكليتين، وهو سامّ بصورة خاصّة للأطفال والنساء الحوامل[21].

وضعت وكالة حماية البيئة الأمريكية معايير قياسية لعدد من الملوّثات، التي قد تتوافر في مياه الشرب، ومن هذه الملوّثات يتوافر ملوّثان فقط، يسبّبان تهديدًا فوريًّا على الصحّة، إذا تجاوزت حدود تراكيزها الحدّ المعياري المسموح به، وهذان الملوّثان هما[21]:

- بكتيريا عصيّات القولون (Coliforms bacteria)، وهي مؤشّر على تلوّث المياه بكائنات حية مسبّبة لأمراض ضارّة.
- النترات (Nitrate)؛ لأنّ أيّ تلوّث بها فوق الحدّ المسموح، يؤدّي إلى خطر فوري على الأطفال، فإذا كانت تراكيز النترات عالية في دم الأطفال في عمر عام، فقد تتفاعل مع الدم، وتنتج مرض فقر دم يسمّى «الطفل الأزرق» (Blue Baby).

الجدول (13–6): المعايير المقياسية الوطنية لمياه الشرب/ بعض الأمثلة.

الملوّث	مستوى التلوّث الأعلى المسموح (Maximum contaminant level (MCL) (mg/l)	تعليقات / المشكلات
ملوّثات غير عضوية		
الزرنيخ (arsenic)	0.05	سامّ جدًّا
كادميوم (cadmium)	0.01	مشكلات في الكلية
الرصاص (lead)	0.015[1]	سامّ جدًّا
الزئبق (mercury)	0.002	الكلية والجهاز العصبي
السلينيوم (selenium)	0.01	الجهاز العصبي
الأسبستوس (asbestos)	7MFL[2]	أورام حميدة
فلورايد (fluoride)	4	تدمير الهيكل العظمي
ملوّثات عضوية		
المبيدات الحشرية (pesticides)		
إندرين (endrin)	0.0002	الجهاز العصبي، الكلية
لندين (lindane)	0.004	الجهاز العصبي، الكلية، الكبد
ميثوكسيكلور	0.1	
مبيدات الأعشاب		
D2.4	0.07	الكبد والكلية والجهاز العصبي
سلفيكس (silvex)	0.05	الجهاز العصبي والكبد والكلية
الكيميائيات العضوية المتطايرة		
البنزين	0.005	السرطان
رابع كلوريد الكربون	0.005	إمكانية حدوث سرطان
ثلاثي كلور الإثيلين	0.005	احتمال حدوث سرطان
كلوريد الفينيل	0.002	خطر حدوث السرطان
كائنات ميكرو بيولوجية		
بكتيريا عصيّات القولون البرازية	1 cell/100 mL	مؤشّر على تلوّث بالكائنات المسبّبة للأمراض

1 مستوى بدء التحرّك للعمل للرصاص، مرتبط بمعالجة الماء لتخفيض مستوى الرصاص إلى مستوى آمن. لا يوجد أعلى مستوى تلوّث للرصاص (No MCL for Lead).

2 وحدة مليون خيط لكلّ لتر (Million fibers/ liter) وطول الخيط الأكبر من (10) ميكرومتر المصدر: (U.S. Environmental protection agency).

obeikandl.com

يوضّح الجدول (13–6) بعض الملوّثات المدرجة في المعايير الوطنية الرئيسة لمياه الشرب (National Primary Drinking Water Standards)، التي أصدرتها وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) والمشكلات الصحّية المرتبطة بالملوّث.

والأهداف المرجوّة من هذه المعايير والتعليمات المتعلّقة بمياه الشرب، هي[21]:

- التأكّد من أنّ مصادر مياهنا تُعالج لإزالة الملوّثات الخطرة.
- فحص مصادر تزويد المياه ومراقبتها بصورة منتظمة.
- إعطاء معلومات للمواطنين ليكونوا واعين بجودة المياه والفحوصات، التي تُجرى على مصادرهم المائية.

6-13 معالجة المياه العادمة WASTEWATER TREATMENT

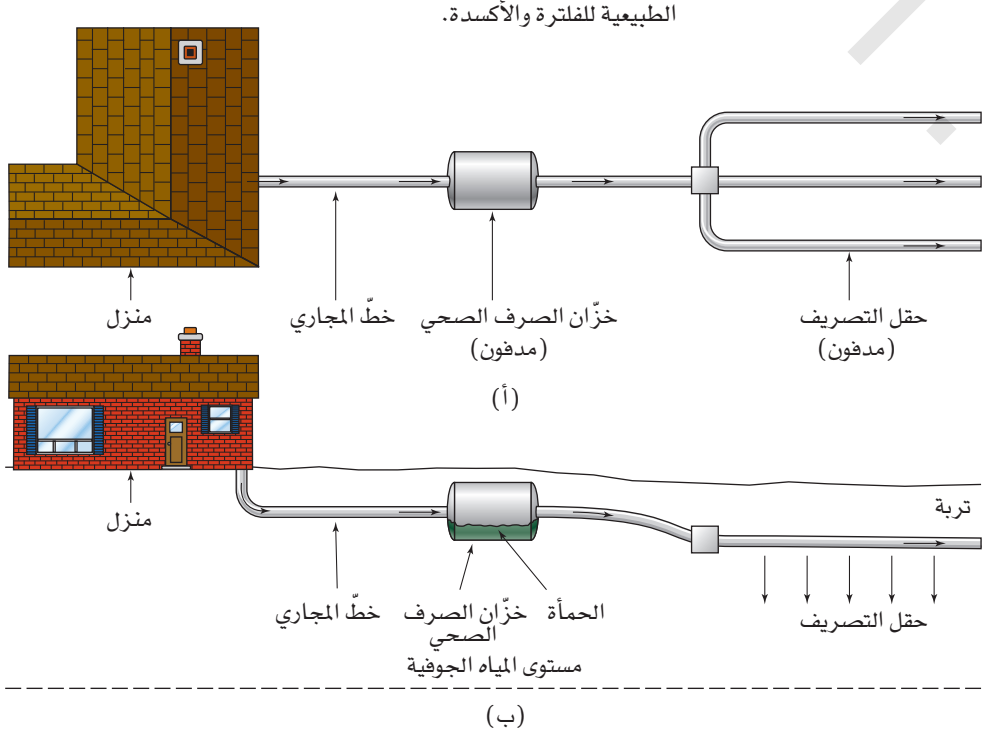
تتردّى جودة المياة المستخدمة للأغراض المنزلية أو الصناعية نتيجة لكثير من الملوّثات، بما فيها الملوّثات المستهلكة أو المتطلّبة للأكسجين (oxygen–demanding materials)، البكتيريا، والموادّ المغذّية، والأملاح، والموادّ الصلبة العالقة وكيمائيات أخرى، وينصّ القانون في الولايات المتّحدة الأمريكية، على ضرورة معالجة هذه الملوّثات في المياه العادمة، قبل إعادة إطلاقها إلى البيئة، فمعالجة المياه العادمة في أمريكا هي مشروعات عمل كبرى، تُكلّف عشرات البلايين سنويًّا، أمّا في المناطق الريفية، فتُستخدم طرق معالجة تقليدية، مثل أنظمة الحفر الامتصاصية، وفي التجمّعات السكانية الأكبر، تُجمّع المياه العادمة من شبكة المجاري، وتركّز في محطّات المعالجة. وهناك ضغط في معظم مناطق أمريكا على مصادر المياه؛ لذلك ابتُكرت طرق ريادية لاستصلاح المياه العادمة؛ من أجل إعادة استخدامها في ريّ الحقول والحدائق العامّة وملاعب الجولف، بدلًا من تصريفها إلى أقرب جسم مائي، وتُطوّر حاليًّا تقنيات جديدة، لتحويل المياه العادمة إلى مصدر مائي يمكن استخدامه، حيث يقول الأشخاص القائمون على تطوير هذه التقنيات: إنّ مواقع معالجة المياه العادمة، يجب ألا تكون مخفية عن أعين الناس وأنوفهم، بل يجب أن نتوقّع معالجة المياه العادمة بتكلفة قليلة مع إنتاج الورد والشجيرات، في وضعيات تشبه الحدائق بصورة أكبر[22].

نظام الحفر أو الخزّانات الامتصاصية للتخلص من مياه المجاري
Septic-Tank Sewage Disposal

يستمرّ انتقال السكان في الولايات المتّحدة الأمريكية من المناطق الريفية إلى المدينة أو المناطق المتحضّرة، على الرغم من أنّ شبكة مجاري البلدية ومنشآت معالجة المياه العادمة، مازالت أكثر الطرق فعالية في التخلّص من المجاري، إلّا أنّ إنشاء أنظمة الصرف الصحّي والمجاري ما زال عاجزًا عن مواكبة الزيادة في نمو السكان، لذلك، مازال نظام خزّانات التخلّص من مياه الصرف الصحّي الفردية (الشخصية) **(individual septic–tank disposal systems)**، يُعدّ طريقة مهمّة للتخلّص من مياه الصرف الصحي، إذ يوجد في أمريكا أكثر من (22) مليون نظام من هذا النوع، في حالة استخدام فعلي، وقرابة نصف مليون خزّان تُضاف سنويًّا، ونتيجة لذلك، تُستخدم خزّانات التخلّص من مياه الصرف الصحّي من قبل (30%) من سكّان أمريكا[23]، ولأنّ الأراضي ليست جميعها مناسبة لإنشاء خزان التخلّص من الصرف الصحّي، فمن الضروري إجراء تقييم للموقع، الذي غالبًا ما يكون متطلبًا قانونيًّا، قبل إعطاء رخصة إنشاء الخزّان.

الأجزاء الرئيسة **لخزّان الصرف الصحّي** موضّحة في الشكل (13–15)، حيث يمتدّ خطّ المجاري من المنزل أو مكان العمل إلى خزّان مدفون تحت الأرض، لتجميع مياه الصرف الصحّي في الحديقة الخلفية.

تترسّب المادّة العضوية الصلبة إلى قاع الخزان، حيث يتمّ تحطيمها وتمييعها (تحويلها إلى مادّة سائلة) عن طريق فعل البكتيريا، وهذا جزء من عملية المعالجة، التي تقلّل من المادّة العضوية الصلبة إلى حالة أكثر سيولة، أمّا الجزء السائل من الخزّان، فيُصرّف إلى ما يسمّى حقل التصريف (drain field)، أو ما يعرف بحقل الامتصاص (absorption field)، وهو نظام مكوّن من أنابيب مثقّبة، تدفن على عمق قليل، أو تُصّرف هذه المياه إلى ما يسمّى «بئر جاف» «dry well»، وهو بئر عميق ذو قطر كبير يملأ بالحصى، ومن خلاله يرشح الماء غير النظيف إلى البيئة المحيطة، ومع انسياب المياه داخل التربة، فإنّها تُعالج طبيعيًّا بصورة مستمرّة، وتُنقّى عن طريق العمليات الطبيعية للفلترة والأكسدة.



الشكل (13-15): خزّان (أو الحفرة الامتصاصية) للتخلّص من الصرف الصحي. نظام تخلّص من المجاري لمنزل (أ) منظر علوي (خريطة)، (ب) مقطع عرضي.

obeikandl.com

تشتمل العوامل الجيولوجية التي تؤثّر في ملاءمة موقع ما، ليكون مناسبًا لوضع نظام خزّان الصرف الصحّي المنزلي، على عوامل عدّة، مثل نوع التربة، وعمق المياه الجوفية، وعمق الصخر الأساس، وطوبوغرافية الموقع، وهذه المتغيّرات عادة ما توثّق في أيّ دراسة وصف تربة في مسوحات التربة لمنطقة ما، حيث تُنشر معلومات مسوحات التربة من قبل مصلحة الحفاظ على التربة (Soil Conservation Service)، وهي مهمّة جدًّا عند تقييم ملاءمة الأرض لاستخدامات معينة، مثل ملاءمتها لوضع خزّان صرف صحّي منزلي، والاعتماد على خرائط التربة للتنبّؤ بمحدّدات استخدام الموقع، تنحصر فقط بمساحة ليست أقلّ من بضعة آلاف كيلو مترات مربّعة، حيث تتغيّر التربة ضمن أمتار قليلة، لذلك من الضروري عادة، إجراء تقييم خاصّ بالموقع عن طريق عالم أو مهندس تربة، ولحساب مساحة حقل التصريف المطلوب، يجب معرفة معدّل ترشيح الماء داخل التربة، وهذا ما يتمّ تحديده من خلال فحوص التربة.

قد تفشل حقول تصريف المجاري المنزلية لأسباب عدّة، أهمّها: توافر تربة ذات تصريف سيئ، وهي تؤدّي إلى ارتفاع منسوب المياه العادمة إلى السطح في الجو الماطر، حيث نتوقّع توافر مثل هذا النوع من التربة في التربات أو الصخور ذات المحتوى العالي للمعان الطينية، مثل صخر الغضار (shale) ذي النفاذية المتدنية، وفي المناطق ذات مستوى الماء الجوفي القريب من السطح، أو في المناطق ذات الفيضانات المتكرّرة.

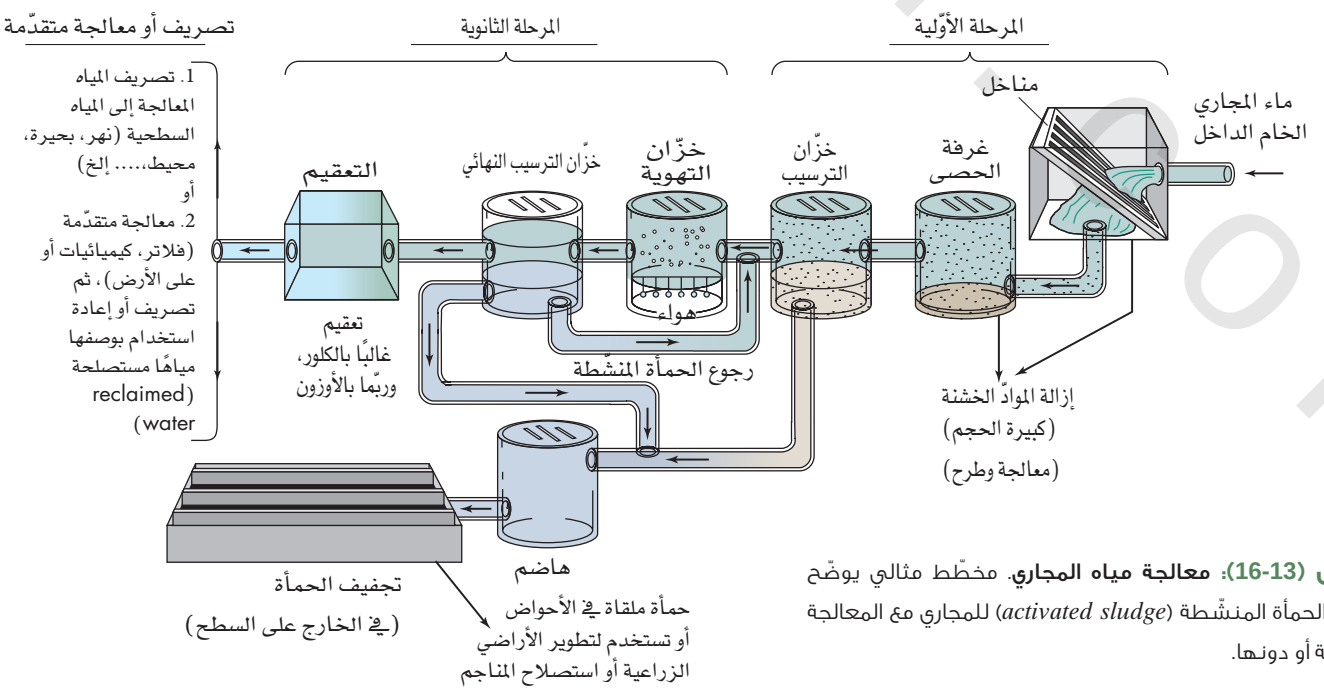
عندما يفشل نظم خزّان التصريف الصحّي المنزلي، تطفو عادة الفضلات فوق حقل التصريف، مكوّنة خطرًا محتملًا على الصحّة، وهذا النوع من المشكلات تسهل ملاحظته، لكن مع الأسف، أنّ ما يحصل تحت سطح التربة ليس من السهل مشاهدته، وإذا حصل ترشيح كبير للمياه العادمة في اتّجاه سطح المياه الجوفية، فقد تتلوّث، فأنظمة خزّانات الصرف الصحّي التي على هذه الصورة، والتي تخدم تجمعات تجارية وصناعية صغيرة، تشكّل تهديدًا أكبر؛ لأنّها تسبّب تلوّث المياه الجوفية، بسبب خطورة ملوّثات مياه الصرف الصحي المترشّحة، التي تشتمل على النترات (nitrates) ومعادن ثقيلة (heavy metals)، مثل الخارصين (zinc) والنحاس (copper) والرصاص (lead) والموادّ الكيميائية المصنّعة (synthetic organic chemicals)، مثل البنزين (benzene) ورابع كلوريد الكربون (carbon tetrachloride) وكلوريد الفينيل (vinyl chloride)، وقد كشفت وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) في السنوات الأخيرة، عن أنظمة تصريف تقليدية لتجمّعات تجارية وصناعية، أدّت إلى مشكلات تلوّث المياه الجوفية بصورة كبيرة، ما استدعى القيام بعمليات تنظيف[23].

محطات تنقية (معالجة) المياه العادمة
Wastewater-Treatment Plants

إنّ الأهداف الرئيسة من معالجة المياه العادمة في مجاري البيوت والصناعات، تحطيم كمّية الموادّ العضوية الصلبة والموادّ المستهلكة للأكسجين (BOD) وتقليلها، إضافة إلى قتل البكتيريا في المياه العادمة، حيث تُطوّر تقنيات جديدة لإزالة الموادّ المغذّية والموادّ غير العضوية الذائبة الضارّة، التي قد تتوافر في المياه العادمة.

تحتوي محطّات معالجة المياه العادمة في الغالب على مرحلتين أو ثلاث مراحل (الشكل 16-13):

- **المعالجة الابتدائية أو الأوّلية Primary treatment**، وتحتوي على عملية الغربلة (screening)، التي تزيل الحصى المكوّن من الرمل والحجارة والجزيئات الكبيرة الأخرى، ثمّ عملية الترسيب (sedimentation)، ومن خلالها تترسّب معظم الجسيمات (غالبيّتها عضوية)، لتشكّل رسوبيات تشبه الطين تسمّى الحمأة (sludge) أو الطين أو الرمل اللزج، وهو الراسب الطيني من مياه المجاري في محطات التنقية، حيث تُضخّ الحمأة إلى الهاضم (digester)، ويرسل الماء العادم المنقّى جزئيًّا إلى المرحلة الثانية للمعالجة في المحطّة، تزيل المرحلة الأوّلية ما مقداره (30%) إلى (40%) من ملوّثات المياه العادمة[24].
- **المعالجة الثانوية Secondary Treatment**: على الرغم من توافر طرق عدة، إلّا أنّ أكثرها شيوعًا في مرحلة المعالجة الثانوية، هي طريقة الحمأة المنشطة (activated sludge)، إذ تدخل المياه العادمة المصفّاة جزئيًّا في المرحلة الابتدائية إلى خزّان التهوية (aeration tank)، حيث تتمّ عملية ضخّ هواء إلى داخل الخزّان، وتقوم البكتيريا الهوائية أو المتطلّبة للأكسجين بتحطيم معظم الموادّ العضوية المتبقّية في المياه الداخلة، ثم تُضخّ المياه من خزّان التهوية إلى خزّان الترسيب النهائي (final sedimentation tank)، حيث تترسّب الحمأة، وتضخّ



الشكل (13-16): معالجة مياه المجاري. مخطّط مثالي يوضّح معالجة الحمأة المنشّطة (*activated sludge*) للمجاري مع المعالجة المتقدّمة أو دونها.

Open Knowledge .com

إلى الهاضم (digester)، بعض الحمأة الغنية بالبكتيريا تُرجع إلى خزّان التهوية بصفتها حمأة منشّطة (activated sludge)، لتقوم بدور مبدأ الحركة مرّة أخرى، لذلك تُستخدم البكتيريا مرّات عدة، أمّا الهاضم (digester) فيوفّر بيئة عديمة الأكسجين، التي تنشط فيها البكتيريا اللاهوائية، فتحطم الموادّ العضوية في الحمأة القادمة من خزّاني الترسيب الابتدائي والثانوي، وبهذا التحلل اللاهوائي للموادّ العضوية، ينتج غاز الميثان، وهو منتج جانبي يمكن استخدامه بوصفه وقودًا لتشغيل نظام التدفئة أو التبريد في المحطّة، أو لتشغيل بعض المعدّات، وبعد انتهاء المرحلة الثانوية تكون قرابة (90%) من الملوّثات العضوية (BOD) في المياه العادمة قد أُزيلت، تجدر الإشارة إلى أنّ هذه المرحلة لا تزيل النيتروجين والفوسفور والمعادن الثقيلة والكيميائيات المصنّعة من قبل الإنسان، مثل المذيبات والمبيدات الحشرية[24].

وآخر خطوة في المرحلة الثانوية هي عملية التعقيم أو التطهير (disinfection) للمياه الخارجة، باستخدام الكلور أو الأوزون، ثمّ يُصرّف الماء المعالج الخارج إلى أجسام المياه السطحية (الأنهار والبحيرات أو المحيط، وتبقى مشكلات نوعية المياه ممكنة الحدوث، راجع نظرة متفحّصة: ميناء بوسطن – تنظيف كنز وطني)، وفي بعض الحالات تُصرّف المياه إلى آبار التخلّص من المياه العادمة المعالجة، مثل جزيرة ماوي في هاواي (Maui، Hawaii).

- **المعالجة المتقدّمة**: وتستخدم لإزالة الموادّ المغذية (نيتروجين وفوسفور) والمعادن الثقيلة أو كيميائيات محدّدة، وقد تكون هذه المرحلة ضرورية في حالة الطلب على ماء معالج ذي جودة عالية جدًّا، وذلك لاستخدامات معيّنة، مثلًا: مساكن الحياة البرية، أو ريّ ملاعب الجولف، أو الحدائق العامة، أو المحاصيل الزراعية التي تؤكل. ويسمّى الماء المعالج المستخدم في هذه الاستعمالات ماءً مستصلحًا (reclaimed water)، أمّا وسائل المعالجة المتقدّمة، فتشتمل على استخدام موادّ كيمائية وفلاتر رمل أو فلاتر كربون، وبعد انتهاء مرحلة المعالجة المتقدّمة، تكون قرابة (95%) من الملوّثات قد أُزيلت من المياه العادمة.

أحد الجوانب المزعجة في معالجة المياه العادمة، هو التخلّص من الحمأة (sludge)، إذ قد تحتوي الناتجة عن معالجة مياه عادمة من الصناعة على معادن ثقيلة وموادّ سامّة أخرى، لذلك تُعدّ فضلات خطيرة، ولذلك معظم الدول تطلب الآن من قطاعات الصناعة، معالجة مياهها العادمة بوصفها مرحلة أولى لإزالة المعادن الثقيلة، قبل إرسالها إلى محطّات التنقية المحلية (البلدية).

تقدّر كمّيات الحمأة (sludge) المنتجة في عمليات تنقية المياه العادمة وبحسابات متحفّظة بقرابة (112–54) جرامًا لكلّ شخص في اليوم، وتكلّف عمليات التخلّص منها ما مقداره (25 إلى 50%) من ميزانيات تكاليف تشغيل محطّات التنقية.

وأهداف معالجة الحمأة (sludge) والتخلص منها، هي[26]:

- تحويل المادّة العضوية في المياه العادمة إلى صورة مستقرّة نسبيًّا.
- تقليل حجم الحمأة (sludge) من خلال إزالة الجزء السائل (الماء).
- تحطيم الكائنات الحية الضارّة في المياه العادمة أو السيطرة عليها.
- إنتاج منتجات جانبية إضافية، التي من خلال استخدامها أو بيعها تُقلل كلفة معالجة الحمأة أو التخلّص منها.

تُنجز عمليات التخلّص من الحمأة (sludge) من خلال الحرق (incineration)، أو الدفن في مكبّ نفايات، أو استخدامها في استصلاح الأراضي، أو طرحها في المحيط، إلّا أنّه من منظور بيئي، فإنّ أفضل طرق التخلص منها، هي باستخدامها في تحسين نسيج التربة وخصوبتها، وخصوصًا في المناطق التي تعاني آثار التعدين الذي يزيل التربة ويدمّرها، وعلى الرغم من أنّه يصعب التخلّص من الكمّيات الهائلة من الحمأة (sludge) كلّها، الناتجة عن معالجة مياه مجاري المدن الكبرى، أو استخدامها في أغراض مفيدة، إلّا أنّ الكثير من الصناعات والمؤسّسات وقطاعات الزراعة، يمكنها الاستفادة من فضلات الحيوانات والإنسان من خلال تحويلها إلى موارد.

الأراضي الرطبة بوصفها مواقع معالجة المياه العادمة

Wetlands as Wastewater-Treatment Sites

تُعدّ الأراضي الرطبة الطبيعية أو التي أنشأها الإنسان مواقع جيّدة لمعالجة (أو معالجتها جزئيًّا) المياه العادمة أو أيّ مياه ذات نوعية رديئة، إذ إنّ الأراضي الرطبة خيار محبّب للتجمّعات السكانية، التي لا تستطيع شراء محطّات التنقية التقليدية غالية الثمن، أو للذين يرغبون في استخدام بدائل للمحطّات التقليدية، وقد سجّلت كلّ من ولايتي لويزيانا وأريزونا ذات المناخات المختلفة دافئ رطب وحار جاف على الترتيب، قصص نجاح في استخدام الأراضي الرطبة لمعالجة المياه العادمة.

حيث طُبّق استخدام طرق متطوّرة لمعالجة المياه العادمة في لويزيانا، من خلال استخدام مياه عادمة غنية بالنيتروجين والفوسفور في أراضٍ رطبة ساحلية، ما أدّى إلى تحسين جودة المياه، حيث تقوم نباتات الأراضي الرطبة باستخدام هذه المغذّيات في دورة حياتها، وفي لويزيانا، أدّى استخدام الأراضي الرطبة الساحلية لإزالة المغذّيات من المياه العادمة إلى توفير اقتصادي كبير، مقارنة باستخدام طرق معالجة المياه العادمة التقليدية المتطوّرة[27].

أمّا قرب فينيكس في ولاية أريزونا فتُستخدم الأراضي الرطبة من صنع الإنسان لمعالجة المياه العادمة الزراعية، ذات النوعية الرديئة والمحتوى العالي من النيتروجين، حيث تتوافر الأراضي الزراعية الرطبة الصناعية داخل تجمّع سكاني، وتتكوّن من برك ونباتات الأراضي الرطبة، وبكتيريا تقلّل كمّية النيتروجين إلى مستويات مقبولة، قبل تصريف الماء إلى نهر مجاور، حيث ينساب الماء داخل الأراضي ليصبح مياهًا جوفية.

تجديد المياه العادمة أو إصلاحها

Wastewater Renovation

تسمّى عملية إعادة تدوير (Recycling) المياه العادمة «تجديد المياه العادمة والمحافظة عليها» (Wastewater renovation and conservation)، وهي موضّحة في الشكل (13 – 17)، الذي يبيّن العمليات الرئيسة، وهي الآتي: يعود الماء المعالج في محطّات التنقية للمزارع، ليستخدم في ريّ المحاصيل عن طريق رشّاشات (sprinkles) أو أيّ نظام ريّ آخر، حيث تتمّ عملية تجديد للمياه العادمة، من خلال التنقية الطبيعية للمياه المعالجة العادمة، في أثناء ترشيحها ببطء داخل التربة، لتغذي في النهاية مصادر المياه الجوفية بماء نظيف، ثمّ يُعاد سحب الماء من الآبار الجوفية، أي إعادة استخدامه (reuse)، أو حفظه (*conservation*) عند استخدامه في تزويد المناطق السكنية والصناعية أو الزراعية[28]. بالطبع ليست جوانب الدورة كلّها تنطبق بالتساوي على مشكلة مياه عادمة معيّنة.

يختلف تجديد (renovation) المياه العادمة من حظائر تربية الماشية بصورة كبيرة عن تجديد المياه العادمة من المواقع الصناعية أو البلدية، لكن المبدأ العام للتجديد منطبق والعمليات متشابهة نظريًّا.

مدينة بوسطن مدينة متجذّرة في التاريخ الأمريكي، وأسماء كلّ من صامويل

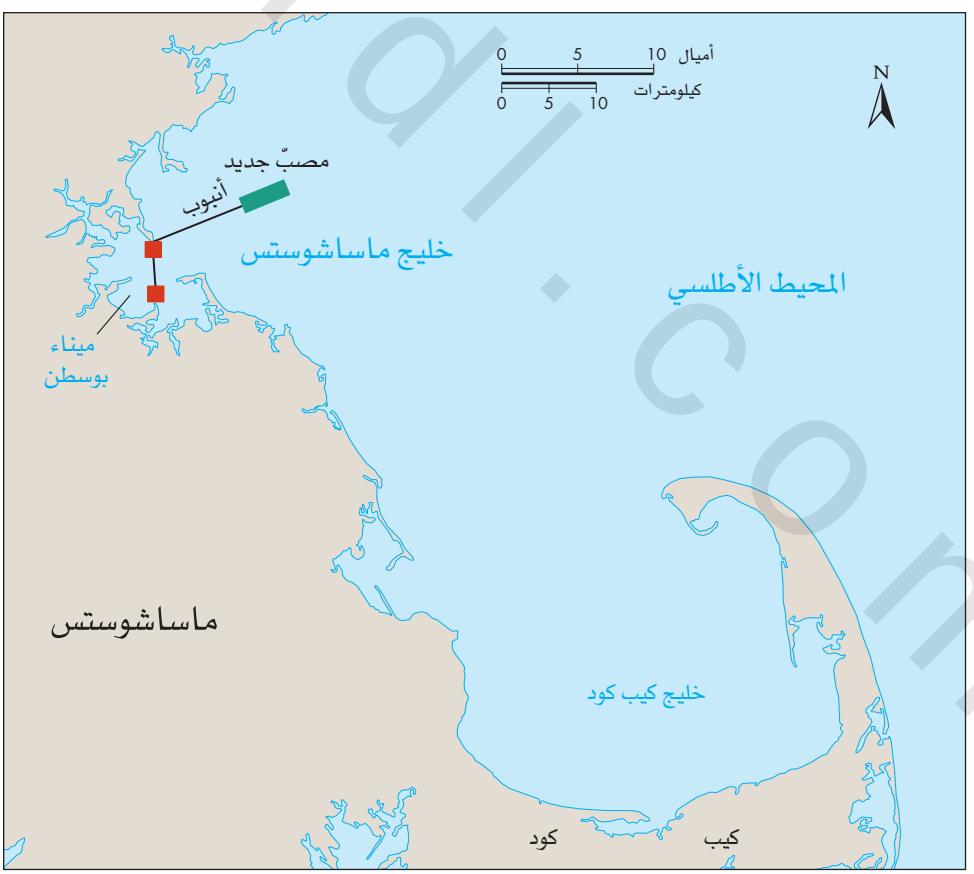
نظرة متفحّصة A CLOSER LOOK

ميناء بوسطن: تنظيف كنز وطني Boston Harbor—Cleaning up a National Treasure

آدامز (Samuel Adams) وبول ريفير (Paul Rever) تخطر على البال مباشرة نسبة إلى أواخر القرن السابع عشر، عندما كانت المستعمرات الأمريكية تناضل لنيل الحرية من بريطانيا، فعام 1773م قاد صامويل آدامز مجموعة المقاتلين للهجوم على ثلاث سفن بريطانية، وقذفوا حمولتها من الشاي في ميناء بوسطن، القضية التي كان المقاتلون يؤكدونها، إنّ الضرائب المفروضة على الشاي، كانت غير عادلة، وأصبح الحدث يعرف بـ (حفلة شاي بوسطن) (Boston Tea Party). لكن الشاي الذي قذفه المقاتلون في ميناء بوسطن لم يلوث الميناء، إذ أدّى طرح أنواع النفايات جميعها في المياه في المدينة المتنامية إلى تلويث الميناء، ومدّة (300) عام كان ميناء بوسطن مكبّ نفايات للمياه العادمة والمياه المعالجة والمياه الملوّثة من فيضان خطوط المجاري ومناهلها، خلال العواصف المطرية، وأخيرًا، في القرن العشرين أصدرت المحكمة أوامر بأن تتخذ إجراءات لتنظيف الميناء.

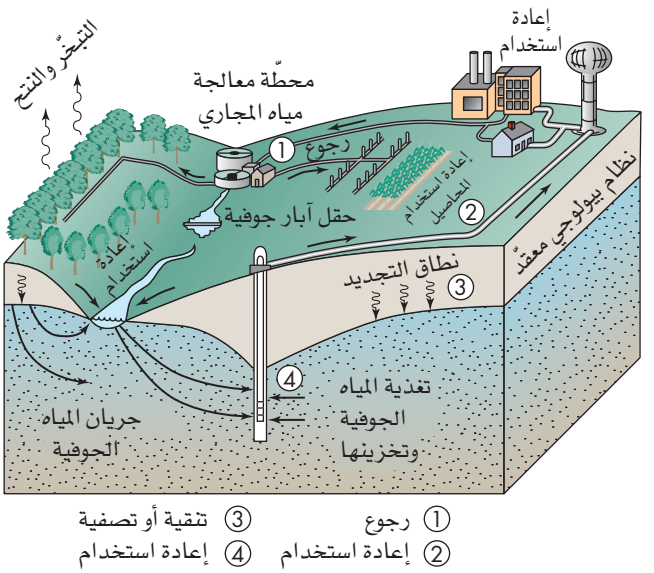
بعد دراسة ميناء بوسطن والمنطقة البعيدة عن الشاطئ في المياه في خليج ماساشوستس (Massachusetts Bay)، اتُّخذ قرار بإعادة تحديد مواقع التخلّص من النفايات (المسمّاة بالمصبّات أو الشلالات) لتوضع بعيدًا عن الشاطئ قليلًا، داخل الماء من ميناء بوسطن (الشكل 13 ز)، وقد حصل التلوّث؛ لأنّ الفضلات التي كانت تطرح في الميناء، كانت تتحرّك في اتّجاه جزء صغير وضحل من خليج ماساشوستس، وعلى الرغم من توافر حركة مدّ وجزر قوية للأمواج ما بين الخليج والميناء،إلّا أنّ زمن الشطف (أو الغسل بالماء) يبلغ مدّة أسبوع، والطرح للمياه العادمة من «مصبّات أو شلالات» المجاري، كان كافيًا لإحداث مشكلة تلوّث، لقد أظهرت دراسة خليج ماساشوستس أنّه إذا ما وضعت مصبّات النفايات في مكان بعيد قليلًا عن الشاطئ، حيث الماء أكثر عمقًا والتيّارات البحرية أقوى، فإنّ مستويات التلوّث سوف تنخفض في ميناء بوسطن[25].

من الواضح أنّ نقل مصبّات النفايات قليلًا إلى الداخل بعيدًا عن الشاطئ، كان خطوة في الاتّجاه الصحيح، لكن الحلّ على المدى الطويل لمشكلة التلوّث، التي تطرح الملوّثات في النظام البيئي البحري، يحتاج إلى إجراءات إضافية، وحتى لو وضعت الملوّثات في الماء بعيدًا عن الشاطئ، في مناطق التدوير القوي بفعل التيّارات والماء العميق، فإنّها في النهاية سوف تتراكم، وتسبّب دمارًا بيئيًّا؛ لذلك، فإنّ أيّ حلّ على المدى البعيد، يجب أن يتضمّن تخفيضًا لحجم الملوّثات من مصدرها، ومن أجل ذلك الهدف، طالبت خطّة بوسطن الإقليمية لمعالجة المياه العادمة، بإنشاء محطّة معالجة جديدة، تصمّم بصورة خاصّة لتخفيض مستوى الملوّثات بصورة كبيرة، قبل طرحها في الخليج، هذا التصرّف يعترف بأنّ التخفيف (للتركيز بزيادة حجم المذيب) أو (dilution) وحده، لا يستطيع حلّ مشكلة إدارة المياه العادمة الحضرية. واليوم، فإنّ محطّة تنقية دير إيلاند لمعالجة المياه العادمة (Deer Island Sewage Treatment Plant)، التي كلّفت (3.8) بلايين دولار، تجمع المياه العادمة من (43) تجمّعًا سكنيًّا كبيرًا في بوسطن، وتعالجها. ونقل مصبّات النفايات بعيدًا عن الشاطئ، إذا ما دُمج مع عملية تخفيض حجم الملوّثات، يُعدّ مثالًا إيجابيًّا، لما يمكن فعله لإدارة مشكلة المياه العادمة، وتقليل مشكلات البيئة بصورة أمثل[25].



الشكل (13 ز): ميناء بوسطن وخليج ماساشوستس. يظهر مصبّات المجاري القديمة (المربّعات الحمراء) والمصبّات الجديدة (المستطيل الأخضر) على بعد (15 km) من الشاطئ. المصدر:
(Modified after U.S. Geological Survey FS - 185 - 97, 1997)

obeikandi.com



الشكل (13 – 17) تجديد المياه العادمة ودورة حفظها (المراجع: *(Pasizek, R.R., and Myers, E. A., 1968, Proceedings of the Forth American Water Resources Conference).*

تُعدّ عمليات الرجوع والتجديد مهمّة لتدوير المياه العادمة، وتؤدي كلّ من نوعية التربة والصخور الطوبوغرافية والمناخ والغطاء النباتي دورًا مهمًّا فيها، ومن المهم جدًّا في أثناء التخطيط لعمليات الرجوع والتجديد، أن تكون التربة قادرة على استيعاب الفضلات في المياه العادمة، وأن تكون النباتات المختارة قادرة على أخذ الموادّ الغذائية (الملوّثات) في المياه العادمة، وأن يكون حجم الماء العادم الذي سيستخدم بصورة آمنة معلومًا[28].

تمّ أخيرًا في مقاطعة كلايتون في ولاية جورجيا إلى الجنوب من أتلانتا، إطلاق مشروع ضخم لتجديد المياه العادمة وحفظها، ويستخدم المشروع مياه عادمة تستخدم في ريّ غابة صنوبر، حيث ستُحصد الأشجار في دورات مدّتها (20) سنة، إذ إنّ الغابة جزء من حوض التصريف (مسقط المياه) (watershed)، التي تزوّد الماء للمنطقة، لذلك تتمّ إعادة تدوير المياه العادمة لتصبح جزءًا من مصادر تزويد ماء الشرب[29].

7-13 التشريعات الفدرالية (الوطنية) FEDERAL LEGISLATION

كانت حقبة منتصف التسعينيات في الولايات المتّحدة الأمريكية وقت جدل وخلاف حول مسألة تلوّث المياه، فالجمهوريون، وهم مسيطرون وقتها على مجلس النواب ومجلس الشيوخ منذ عام 1994م، حاولوا إعادة صياغة أهمّ القوانين البيئية، بما فيها قانون الماء النظيف (Clean Water Act) عام 1972م، الذي عُدّل عام 1977م، وقد كان هدفهم إعطاء مرونة لقطاع الصناعة لاختيار كيفية الالتزام بالقوانين والأنظمة البيئية، فيما يتعلّق بتلوّث المياه، أمّا قطاع الصناعة فكان يفضل تقديم أنظمة، في نظرهم، فعّالة من حيث التكلفة، دون أن تؤدّي إلى زيادة التدمير البيئي، لكن البيئيين عدّوا محاولة إعادة صياغة قانون الماء النظيف خطوة إلى الوراء، في تاريخ مدّته (20) عامًا، للكفاح من أجل تنظيف مصادر المياه الأمريكية، ومن الواضح أنّ الجمهوريين أساؤوا تفسير الرأي العام في هذه المسألة.

أظهرت الدراسة تلو الدراسة والمسح تلو المسح، أنّ هناك دعمًا قويًّا في أمريكا اليوم لبيئة نظيفة، والناس مستعدّون للدفع من أجل الحصول على هواء نقي وماء أنظف لهذا الجيل والأجيال المقبلة، لقد كانت هناك ردود فعل غاضبة وانتقادات للخطوات، التي اتُّخذت لإضعاف القوانين البيئية، وبالتحديد تلك التي تخصّ مصادر المياه؛ لذلك استمرّ الجدال، وشكّل قانون جودة المياه عام 1987م سياسة وطنية للسيطرة على مصادر تلوّث مياه غير النقطية (Nonpoint Sources)، لكنّه لم يذهب بعيدًا في حماية مصادر المياه[30].

فرض الرئيس كلينتون عام 2000م وفي تحدّ للكونجرس الأمريكي، تعليمات حماية جديدة ضد تلوّث المياه، لحماية الآلاف من الأنهار والبحيرات من مصادر التلوّث غير النقطية، الناتجة عن الزراعة والصناعة والعمران، إذ تُدار الأوامر من قبل وكالة حماية البيئة الأمريكية، التي تعمل مع الولايات والمجتمعات المحلية، لإنتاج برامج مفصّلة، تهدف إلى تقليل تلوّث هذه الأنهار والجداول والبحيرات ومصادر الأنهار، التي لا تحقّق حدود المعايير الدنيا للمواصفات القياسية المتعلّقة بجودة المياه، حيث تظهر التعليمات المطبّقة بصورة إلزامية أنّ مصادر التلوّث غير النقطية للمياه تُعدّ مشكلة خطيرة من الصعب تنظيمها، وتتطلّب الخطّة على الأقلّ (15) سنة لتنفيذها بصورة كاملة، وقد تمّت معارضة الخطّة من الكونجرس سنوات، ومن قبل بعض المجموعات الزراعية أيضًا، وكذلك قطاع المرافق العامّة وحتى غرفة التجارة الأمريكية، وعام 2001م علّق الرئيس الأمريكي الجديد والمنتخب مؤقّتًا، تنفيذ بعض التعليمات بما فيها تعليمات السيطرة على الزرنيخ (arsenic) في الماء، على الرغم من معارضة الكثيرين الذين كانوا قلقين من احتمالية قيام الناس بشرب ماء ملوّث، قامت معارضة الذين كانوا ضد إجراءات السيطرة على مصادر التلوّث على: (1) متطلّبات السيطرة مكلفة (بلايين الدولارات) و(2) الحكومات المحلية في الولايات المتّحدة ذات وضع أفضل لتطبيق تعليماتها الخاصة، ومع ذلك، فإنّ التعليمات والأنظمة الآن في حيّز التنفيذ، وهي خطوة أخرى في طريق السيطرة على تلوّث المياه، التي بدأت منذ سنوات عدة في الماضي في الولايات المتّحدة الأمريكية.

8-13 ما الذي يمكن فعله لتخفيف آثار تلوّث المياه؟ WHAT CAN BE DONE TO REDUCE EFFECTS OF WATER POLLUTION?

لقد وثّق هذا الفصل لائحة طويلة من ملوّثات المياه، تراوحت ما بين الكائنات المسبّبة للأمراض إلى الملوّثات الكيمائية، ونعرض ما يمكن فعله للتعامل مع مشكلات تلوّث المياه بصورة أفضل، إذ إنّ اقتراحات عدة هناك، ومنها:

- تطوير طرق أفضل وتنقيحها، لتقييم مشكلات تلوّث المياه وآثارها في الحياة المائية وصحّة الناس.
- تنفيذ تقنيات جديدة ومبتكرة وفعّالة من حيث التكلفة المالية لمعالجة المياه العادمة.
- تطوير منتجات وعمليات من شأنها تقليل إنتاج الملوّثات المائية وطرحها في البيئة.

SUMMARY ملخّص

تلوّث المياه هو تدهور نوعية المياه وجودتها، عند قياسها بالمعايير الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، إذ تراعي هذه المعايير الاستخدام المنشود للمياه، ومدى الانحراف عن الوضع الطبيعي، والتأثير في الصحّة العامة والآثار البيئية، فأهمّ مشكلة تلوّث للمياه اليوم، هي نقص كمّيات المياه غير الملوّثة للبلايين من الناس.

ملوّثات المياه السطحية نوعان: نقطية وغير نقطية، وملوّثات الماء الرئيسة، هي الفضلات المستهلكة للأكسجين، وتقاس عن طريق (BOD)، والكائنات المسبّبة للأمراض، وتقاس ببكتيريا القولون العصوية، والموادّ الغذائية التي تؤدّي إلى ظاهرة التخثّث (Eutrophication)، التي تؤدّي أيضًا إلى حجب أشعة الشمس ونقص الأكسجين؛ بسبب النمو الهائل للطحالب، وكذلك النفط والموادّ السامة، بما فيها المركّبات المصنّعة العضوية وغير العضوية والمعادن الثقيلة والموادّ المشعّة والحرارة والرسوبيات، يطلق تصريف المناجم الحمضي على الماء المتدفّق من المناجم ذي التركيز العالي من حمض الكبريتيك، الذي ينتج عن مناطق تعدين الفحم أو المعادن، مؤدّيًا إلى تلوّث المياه السطحية والجوفية.

قامت التشريعات الفدرالية الأمريكية بإنشاء معايير جودة للمياه في أمريكا، اشتملت على وضع حدود للقيم العليا (MCLs) للملوّثات التي قد تتوافر في مياه الشرب، وكان الهدف الرئيس من هذه المعايير القياسية، ضمان معالجة مصادر تزويد المياه لإزالة الملوّثات الضارّة، وأنّ جودة المياه تُفحص، وتراقب بصورة دورية.

تشتمل منشآت معالجة المياه العادمة على أنظمة التخلّص من مياه المجاري، عن طريق خزّانات أو حفر امتصاص ومحطّات معالجة المياه، حيث تُستخدم حفر الامتصاص في المنازل وتجمّعات الأنشطة التجارية والصناعية الصغيرة، وهي شائعة جدًّا في أمريكا اليوم، وقد يؤدّي فشل هذه الأنظمة إلى تلوّث كبير في مصادر المياه الجوفية؛ لذا تقوم محطّات معالجة المياه العادمة بجمع المياه الخارجة من مجاري المنازل ومعالجتها، حيث ينمو استخدام المياه المستصلحة في أمريكا بسرعة هذه الأيّام، وخصوصًا في المناطق المعرّضة لحدوث نقص في مياهها.

REFERENCES المراجع

1. **Schwarzenbach, R. P., et al.** 2006. The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science* 313:1072–77.
2. **Mitch, W. J., et al.** 2001. The Gulf of Mexico hypoxia—Approaches to reducing nitrate in the Mississippi River or reducing a persistent large-scale ecological problem. *BioScience* (in press).
3. **Oil Spill Issue.** 1989. *Alaska Fish and Game* 21(4).
4. **McGinn, A. P.** 2000. POPs culture. *World Watch*, April 1, 26–36.
5. **Delzer, G. C., et al.** 1996. *Occurrence of gasoline oxygenate MTBE and BTEX compounds in urban storm water in the United States, 1991–1995*. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 96–4145.
6. **Waldbott, G. L.** 1978. *Health Effects of Environmental Pollutants*. 2nd ed. Saint Louis, MO: C. V. Moseby.
7. **U.S. Geological Survey.** 1995. *Mercury contamination of aquatic ecosystems*. U.S. Geological Survey FS-216-95.
8. **Author unknown.** Arsenic exposure. http://www.sos-arsenic.net. Accessed 9/22/06.
9. **Parfit, M.** 1993. Troubled waters run deep. *National Geographic* 184(5A):78–89.
10. **Environmental Protection Agency.** 2002. American Heritage Rivers, Cuyahoga River. http://www.epa.gov/rivers/98river/fscuya.html. Accessed 1/9/02.
11. **Council on Environmental Quality.** 1979. *Environmental quality*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.
12. **Anonymous.** 1982. U.S. Geological Survey activities, fiscal year 1982. *U.S. Geological Survey Circular* 875:90–3.
13. **Geiser, K., and Waneck, G.** 1983. PCBs and Warren County. *Science for the People*.
14. **Bopp, R. F., and Simpson, H. J.** 1989. *Contamination of the Hudson River: The sediment record in contaminated marine sediments—assessment and remediation*. Washington, DC: National Academy Press.
15. **Carey, J.** 1984. Is it safe to drink? *National Wildlife*, Special Report, February/March, 19–21.
16. **Tanji, K., Lauchli, A., and Meyer, J.** 1986. Selenium in the San Joaquin Valley. *Environment* 28(6):6–11, 34-39.
17. **U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.** 1987. Kesterson Program. Fact Sheet No. 4.
18. **Hamilton, P. A., Rowe, G. L. and Myers, D. N.** 2008. *National water-quality assessment program*. http://water.usgs.gov/nawqa. Accessed 1/19/09.
19. **U.S. Geological Survey.** 1999. *National water-quality assessment program, Delaware River basin.* U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-056-99.
20. **Moss, M. E., and Lins, H. S.** 1989. *Water resources in the 21st century*. U.S. Geological Survey Circular 1030.
21. **Environmental Protection Agency.** 1991. *Is your drinking water safe?* EPA 570-9-91-0005.
22. **Jewell, W. J.** 1994. Resource-recovery wastewater treatment. *American Scientist* 82(4):366–75.
23. **Bedient, P. B., Rifai, H. S., and Newell, C. J.** 1994. *Groundwater contamination*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
24. **Leeden, F., Troise, F. L., and Todd, D. K.** 1990. *The water encyclopedia*. 2nd ed. Chelsea, MI: Lewis Publishers.
25. **U.S. Geological Survey.** 1997. *Predicting the impact of relocating Boston's sewage outfall*. U.S.G.S. Fact Sheet 185–97.
26. **American Chemical Society.** 1969. Clean our environment: *The chemical basis for action*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.
27. **Breaux, A., Fuber, S., and Day, J.** 1995. Using natural coastal wetland systems: An economic benefit analysis. *Journal of Environmental Management* 44:285–91.
28. **Parizek, R. R., and Myers, E. A.** 1968. Recharge of ground water from renovated sewage effluent by spray irrigation. *Proceedings of the Fourth American Water Resources Conference*. 425–43.

obeikandl.com

29. **Bastian, R. K., and Benforado, J.** 1983. Waste treatment: Doing what comes naturally. *Technology Review*, February/March, 59–66.

30. **Hileman, B.** 1995. Rewrite of Clean Water Act draws praise, fire. *Chemical & Engineering News* 73:8.

المصطلحات المفتاحية KEY TERMS

تلوّث (Pollution)، (ص 383)
تصريف المنجم الحمضي (acid mine drainage)، (ص 385)
معالجة أوّلية (Primary treatment)، (ص 397)
المعالجة المتقدّمة (Advanced treatment)، (ص 398)
مياه مستصلحة (Reclaimed water)، (ص 398)
الطلب البيوكيميائي للأكسجين (Biochemical oxygen demand (BOD))، (ص 374)
المعالجة الثانوية (Secondary treatment)، (ص 398)
التخثّث الحضاري (Cultural eutrophication)، (ص 376)
خزّان الصرف الصحّي (Septic tank)، (ص 396)
بكتيريا العصويات (القولونية) البرازية (Fecal coliform bacteria)، (ص 375)
تجديد المياه العادمة والمحافظة عليها (Wastewater renovation and conservation)، (ص 398)
مصادر غير نقطية (Non point sources)، (ص 383)
تلوث المياه (Water pollution)، (ص 372)
مصادر نقطية (Point sources)، (ص 383)
ملوّثات (Pollutant)، (ص 400)

بعض الأسئلة للتفكير SOME QUESTIONS TO THINK ABOUT

1. عدّ قائمة بمصادر تلوّث المياه النقطية وغير النقطية، التي تتوافر في منطقتك، وبيّن بحرص كيف يمكن إقصاؤها، أو تقليل تأثيرها، وذلك بوصفه جزءًا من إستراتيجية تقليل التأثير.
2. زر محطّة تنقية مياه عادمة. ما العمليات التي تستخدم في المحطّة؟ هل يُستخدم مبدأ التعافي أو تجديد المياه العادمة والمحافظة عليها؟ ما الحسنات التي تترتب على استخدام النظام الحيوي في المعالجة، مثل استخدام النباتات؟ وما السيئات لذلك؟
3. ما درجة الأمان المتوافرة في مصدر المياه الذي يصلك؟ ما الأساس الذي اعتمدته في إجابتك؟ ماذا تحتاج أن تعرف للتأكّد من إجابتك؟
4. تنعم جزيرة ماوي في هاواي بصناعة سياحية قوية، إذ تفسد الشواطئ القريبة من المناطق المأهولة أحيانًا، نتيجة لتراكم الطحالب المتحلّلة (seaweed)، وينتج عنها روائح كريهة جدًّا، بحيث تبعد الناس عن الشواطئ، وقد ثبت أنّ الطحالب تزداد (تزدهر) في المياه الضحلة البعيدة عن الشاطئ، وذلك استجابة لإضافة المغذّيات الواردة من المياه العادمة الحضرية وجريان المياه الزراعية، وتُعالج المياه العادمة الحضرية لمناطق متطوّرة محدودة بالمعالجة الثانوية، من خلال سلسلة من الوحدات الصغيرة، حيث تُحقن تلك المياه في الأرض قريبًا من المحيط. كيف يمكنك تطوير مشروع بحث، لتحديد فيما إذا كان سبب التخثّث الذي يحدث في المنطقة، ناتجًا عن حقن المياه العادمة الحضرية أو جريان المياه الزراعية؟ كيف يمكن التحكّم في كلّ من مصدري التلوّث المذكورين، من أجل المحافظة على نوعية المياه في البيئة القريبة من الشاطئ، وإيقاف ازدهار الطحالب؟

obeikandl.com

الفصل الرابع عشر

المصادر المعدنية والبيئة

Mineral Resources and Environment

كان ملعب فوسيل تراس للجولف حتى وقت قريب موقع منجم صلصال *(Courtesy Fossil Trace Golf Course)*

14-1 المعادن واستخداماتها البشرية

MINERALS AND HUMAN USE

تعتمد مجتمعاتنا على توافر المصادر المعدنية[1]، تمعّن في إفطارك لهذا اليوم، فقد تكون شربت مستخدمًا كأسًا زجاجية مصنوعة بصورة أساسية من الرمل الزجاجي، وأكلت من صحن مصنوع من الصلصال، واستخدمت الملح الذي استخرج من الأرض لتحسين طعم الغذاء، وأكلت فاكهة زرعت ونبتت بمساعدة الأسمدة، مثل كربونات البوتاسيوم (البوتاس) والفوسفور، واستخدمت أدوات مصنوعة من الفولاذ الذي لا يصدأ، والمنتج من الحديد والمعادن الأخرى، وإذا قرأت مجلة أو صحيفة يومية فتأمّل وأنت تقرأ، الورق المصنوع من حشوات الصلصال، وإذا قرع جرس الهاتف، وأجبت عليه، تكون قد استخدمت قرابة (40) معدنًا داخل الهاتف، وقد تكون استمعت إلى الموسيقا مستخدمًا جهازك الإلكتروني، أو رتّبت مواعيدك على جهاز الهاتف المحمول، إذ صنعت هذه الأجهزة من الفلزّات ومشتقات البترول، وعندما تذهب إلى المدرسة، واستخدمت الحاسوب أو أجهزة أخرى، هذه الأجهزة والأدوات كلّها مصنوعة من المعادن (الشكل 14-1)[1-3].

المعادن مهمّة جدًّا في حياة الإنسان، حيث يرتفع مستوى الحياة، ويزدهر، بازدياد توافرها بصورها النافعة، فهي دليل على ثروة المجتمع، وبها تطورت المجتمعات التي نجحت في تحديد ثرواتها المعدنية واستغلالها أو استيرادها واستخدامها، ولولاها لما ازدهرت الحضارة التكنولوجية الحديثة التي نشهدها حاليًّا، إضافة إلى أنّها تُعدّ جزءًا مهمًّا في اقتصاد كثير من الدول، فهي مهمّة في اقتصاد الولايات المتّحدة الأمريكية للأسباب الآتية، انظر الجدول (14-1)[4]:

- بلغت قيمة المعادن التي أُنتجت عام 2006م (67) بليون دولار تقريبًا.
- بلغت القيمة السنوية للموادّ المنتجة من المعادن مئات البلايين من الدولارات، ما يعادل قرابة (5%) من الناتج المحلي الإجمالي.
- بلغت قيمة الفلزّات ومنتجات المعادن المستعادة قرابة نصف قيمة الخامات المعدنية المحلية، وهي مساهمة مهمّة من الممكن أن تُعدّ المعادن موروثنا غير المتجدّد من الماضي الجيولوجي، وعلى الرغم من تكوّن ترسّبات حديثة من العمليات الأرضية المعاصرة، إلّا أنّ هذه العمليات بطيئة جدًّا، بحيث لن يكون لها استخدام في وقتنا الحالي،

الأهداف التعلُّمية LEARNING OBJECTIVES

تعتمد مجتمعاتنا المتمدّنة بصورة كلّية على توافر المصادر المعدنية، فعدد السكان في تزايد، وسنواجه زيادة في أزمة المصادر، إذ يخشى أن تكون الأرض قد وصلت إلى قدرتها على تحمّل التراجع البيئي المتعلّق باستخلاص المعادن ومعالجتها واستخدامها، ومن هذا المنطلق، فسنركز الاهتمام في هذا الفصل على الأهداف التعليمية الآتية:

- فهم العلاقة بين السكان واستغلال المصادر.
- فهم سبب أهمّية المعادن لمجتمعاتنا المتمدّنة.
- إدراك الفرق بين المصدر والاحتياط، وسبب أهمّية هذا الفرق.
- معرفة العوامل التي تتحكّم في وفرة المصادر المعدنية.
- تعرّف الآثار البيئية الناتجة عن تطوير المعادن.
- معرفة الفوائد الممكنة التي يمكن أن توفّرها التكنولوجيا الحيوية لتنقية البيئة المصاحبة لعمليات استخلاص المعادن وإنتاجها.
- تعرّف الدور الاقتصادي والبيئي الذي يؤديه تدوير المصادر المعدنية.
- فهم العلاقة بين المحافظة المستدامة واستخدام المعادن.

إذ تتوافر الترسّبات المعدنية بصورة مخفية في مناطق صغيرة؛ لذا، علينا اكتشافها، ولسوء الطالع، فقد استُغلّت معظم الترسّبات سهلة المنال، وإذا قُدّر لحضارتنا أن تختفي بعلومها وتكنولوجيتها كلّها، فسيكون اكتشاف معادن أكثر صعوبة على الحضارات اللاحقة، مقارنة بالصعوبة التي واجهها أسلافنا، وبعكس الموارد الحيوية التي هي موارد متجدّدة، فإنّ المعادن قابلة للاستهلاك، ولا يمكن إدارتها، مفترضين أنّ العمليات الأرضية ستقوم بتعويضها في فترة زمنية معقولة، فقد تساعد عمليات التدوير والمحافظة على المصادر على إطالة فترة توافر مواردنا المعدنية، إلّا أنّ المصدر سوف ينفد في النهاية.

المصادر والاحتياطيات
Resources and Reserves

يمكن تعريف المصادر المعدنية بوجه عام، بأنّها عناصر أو مركّبات أو معادن أو صخور، مركّزة بهيئة تسمح باستخلاصها والحصول عليها، بصورة تجعلها سلعة صالحة للاستخدام، ومن إحدى وجهات النظر، أنّ هذا التعريف لا يُعدّ كافيًا؛ لأنّ المصدر لا يستخلص في العادة، إلّا إذا ترتّب على ذلك ربح مادّي، أمّا من ناحية واقعية، فيمكن تعريف المصدر المعدني، بأنّه تركيز لمادّة متوافرة طبيعيًّا (صلبة أو سائلة أو غازية) في باطن الأرض أو على السطح، بهيئة يمكن استغلالها حاليًّا أو مستقبلًا بصورة مربحة، وأمّا الاحتياط، فهو ذلك الجزء من المصدر الذي تمّ تحديده، وهو متوافر حاليًّا، ويمكن استخلاصه بصورة قانونية ومربحة، وبناءً على ذلك، فإنّ التفريق بين المصادر والاحتياط، يعتمد على العوامل الجيولوجية الحالية والعوامل الاقتصادية والقانونية.

لا تُصنّف المصادر كلّها ضمن الاحتياطيات (الشكل 14–2)، وبوصفه مثالًا للمساعدة على فهم هذه النقطة، فكّر في ممتلكاتك المالية، فاحتياطياتك هي الأرصدة، مثل النقود في جيبك أو في البنك، بينما تضمّ المصادر مجموع الأموال المتوقّع كسبها خلال حياتك، يُعدّ هذا التفريق حرجًا لك؛ لأنّ المصادر أرصدة مجمّدة أو أموال ستأتي في السنة المقبلة، ولا تمكّنك من دفع فاتورة الشهر الحالي[5].

تستطيع قيمة احتياطيات الفضّة توضيح بعض النقاط المهمّة حول المصادر والاحتياطيات، إذ تحتوي القشرة الأرضية على ترليونين طن متريّ تقريبًا من الفضّة، وهذه كمّية تفوق الاستخدام السنوي العالمي للفضة بصورة كبيرة، الّذي يبلغ (10,000) طن متريّ، فلو توافرت الفضّة بصورة فلزّ نقي مركّز داخل منجم كبير، فسيزوّدنا بحاجتنا منها مئات ملايين السنوات، اعتمادًا على معدّل استهلاكنا الحالي، إلّا أنّ معظمها يتوافر بتركيزات منخفضة جدًّا، بحيث لا يمكن استغلاله بصورة اقتصادية باستخدام التكنولوجيا المتوافرة حاليًّا، تمثّل الاحتياطيات المعروفة للفضّة، الكمّيات التي يمكن الحصول عليها حاليًّا، باستخدام التكنولوجيا المتوافرة، وتبلغ (200,000) طن متريّ فقط، أي ما يكفي لتزويدنا بالفضّة مدّة (20) سنة، وذلك اعتمادًا على معدّل استهلاكنا الحالي.

توافر المصادر المعدنية واستخدامها
Availability and Use of Mineral Resources

توافر المعدن بصورة مجدّدة وتركيز محدّد وبكمّيات محدّدة، يحدّده التاريخ الجيولوجي، وهذا بعينه موضوع جيولوجي، إذ تُعدّ أنواع المصادر المعدنية وحدود توافرها، مجالًا للأسئلة التكنولوجية والاجتماعية، وهي ما سنوضّحه في هذا الفصل.

أنواع بعض المصادر Types of Mineral Resources

تُعدّ بعض المصادر المعدنية ضرورية للحياة، ومثال ذلك الملح أو معدن الهاليت ($NaCl$)، فقد سافر الناس الأوائل مسافات طويلة للحصول عليه، عندما افتقدوه محليًّا، وما زال الملح مهمًّا إلى يومنا هذا مثلما كان دائمًا، فله استخدامات طبية، كالسيارة التي تستخدم لتوصيل الكيميائيات، مثل اليود الذي يساعد على منع تضخّم الغدّة الدرقية.

obeikandl.com

1. حاسوب ويحتوي على ذهب، وسليكا، ونيكل، وألومنيوم، وزنك، وحديد، ومنتجات البترول وقرابة (30) معدنًا آخر.
2. قلم رصاص، ويحتوي على جرانيت وصلصال.
3. هاتف، ويحتوي على نحاس، ذهب، مشتقات البترول.
4. كتب، وتحتوي على حجر جيري وصلصال.
5. قلم حبر، ويحتوي على حجر جيري، مايكا، مشتقات البترول، صلصال، سليكا، طلق.
6. تلفون محمول، ويحتوي على ذهب، نيكل، سليكا، زنك، مشتقات البترول.
7. كاميرا، وتحتوي على سليكا، زنك، نحاس، ألومنيوم، مشتقات البترول.
8. الكرسي يحتوي على ألومنيوم ومشتقات البترول.
9. تلفزيون، ويحتوي على ألومنيوم ونحاس وحديد ونيكل وسليكا وعناصر أرضية نادرة وسترونشيوم.
10. جهاز ستيريو، ويحتوي على ذهب وحديد ونيكل وبيريليوم ومشتقات البترول.
11. قرص مدمج، ويحتوي على ألومنيوم ومشتقات البترول.
12. خزّانة حديدية، وتحتوي على حديد ونيكل وزخرفة نحاسية صفراء مكوّنة من نحاس وزنك.
13. السجادة، وتحتوي على الحجر الجيري ومشتقات البترول والسيلينيوم.
14. الجدار مكوّن من الجبس والصلصال والفيرميكوليت وكربونات الكالسيوم المايكا.

الشكل (14–1) المعادن المتوافرة في مكتب مثالي. *Modified after U.S Geological Survey Circular 1289.2006*

يضاف اليود إلى الملح الذي يستخدمه الناس جميعهم، وقد يضاف الفلور إلى الملح؛ للمساعدة على منع تسوّس الأسنان، ومن الممكن إضافة الأدوية إلى الملح؛ لمكافحة الملاريا وداء الخيطيات اللمفاوية، وهو مرض يشوّه الوجه، ينتج عن ديدان سبّبت المرض لأكثر من (120) مليون إنسان، معظمهم في آسيا وإفريقيا وأمريكا الجنوبية[6]، وبعض المعادن الأخرى الماس مثلًا، تُرغب لجمالها، وكثير من المعادن ضروري لإنتاج مستوًى معيّن من التقدّم التكنولوجي والمحافظة عليه.

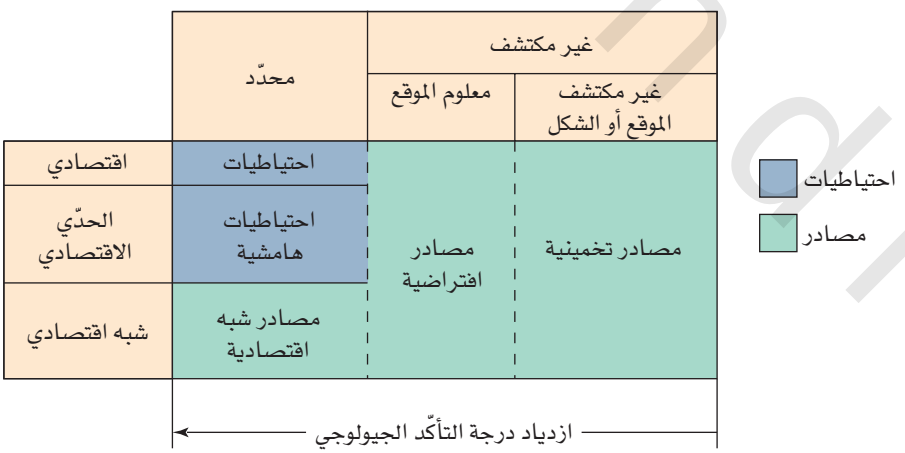
يمكن تقسيم المصادر المعدنية الأرضية إلى مجموعات عريقة عدّة، وذلك تبعًا لاستخداماتها، وهي:

- العناصر اللازمة لإنتاج الفلزّات والتكنولوجيا، وتصنّف اعتمادًا على مدى انتشارها، حيث تضمّ الفلزّات السائدة: الحديد والألومنيوم والكروم والمنجنيز والتيتانيوم والماغنسيوم، وتضم الفلزّات القليلة كلًّا من: النحاس والرصاص والزنك والقصدير والذهب والفضة والبلاتين واليورانيوم والزئبق والمليدينيوم.
- موادّ البناء، مثل بحصة الرمل والحصى والحجر المكسور للباطون، والصلصال لصناعة الآجر (القرميد)، والرماد البركاني لاستخدامه في بناء الجدران.
- المعادن المستخدمة في الصناعات الكيميائية، مثل المعادن الكثيرة المستخدمة في إنتاج الموادّ البتروكيماوية، وهي موادّ تصنّع من الغاز الطبيعي أو البترول مثل البلاستيك.
- المعادن المستخدمة في الزراعة، مثل الأسمدة.

الجدول (14–1): إنتاج الولايات المتحدة من موادّ مختارة عام 2006 م مع قيمتها واستخدامها

المادّة	مجمل الإنتاج (مليون طن متري)	مجمل القيمة (2006م) (مليون دولار)	بعض الاستخدامات المختارة: النسب مقارنة بمجمل الاستهلاك
حجر مكسّر	1700	13,800	استخدامات غير محدّدة (43%)، (83%) مما تبقّى تستخدم في بحصة البناء، (14%) في الصناعات الكيميائية واستخلاص الفلزات.
الرمل والحصى	1300	8500	بحصة الباطون (43%)، (41%) مما تبقى استخدامات غير محدّدة، رصفة طرق (23%)، ركام (12%).
الحديد والصلب	98	11,200	السيّارات (13%)، البناء (14%)، الحاويات (4%).
الأسمنت	98	12,900	الباطون الجاهز (70%)، منتجات الباطون (10%).
الملح	44	1800	الصناعات الكيميائية (45%)، منع التجمد على الطرق (30%) الغذاء والزراعة (7%).
الصلصال	41	1800	الأسمدة (93%).
الفوسفات	30	1110	الأسمدة (93%).
الجبس	21	192	ألواح الجدران (50%).
الألومنيوم	2.3	6100	المواصلات (32%)، التغليف (26%)، البناء (16%)، الكهربائيات (8%).
النحاس	1.2	8310	البناء (43%)، الكهربائيات (24%)، المعدّات الصناعية والآلات (12%).
الرصاص	0.42	715	البطّاريات، تنكات الوقود، اللحام، الأختام الاتّجاهات (71%).
الذهب	0.00025	4900	الجواهر (70%)، والصناعات (23%)، والأسنان (7%).

المصدر *U.S Geological Survey Minerals Year Book, Vol1, 2007*



الشكل (14–2) المصادر والاحتياطيات. تصنيف المصادر المعدنية المستخدمة من قبل المساحة الجيولوجية الأمريكية ودائرة المناجم الأمريكية *(After U.S Geological Survey Circular 831)*

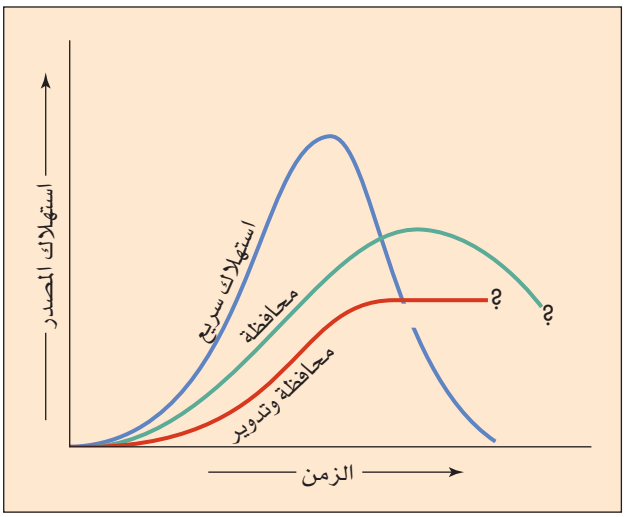
عندما نفكّر في المصادر المعدنية، فإنّنا نفكّر في الفلزّات التي تستخدم في الموادّ الإنشائية، وإذا استثنينا الحديد، فإنّ أغلب المصادر المعدنية غير فلزّية، ولو أخذ الاستهلاك العالمي السنوي لبعض العناصر في الحسبان، فستجد أنّ كلًّا من الصوديوم والحديد، تستخدم بمعدّل يتراوح بين (1–0.1) بليون طن/سنويًّا، ويستخدم كلّ من النيتروجين والكبريت والبوتاسيوم والكالسيوم، بمعدّل يتراوح بين (100–10) مليون طن/سنويًّا تقريبًا، حيث تستخدم هذه العناصر الأربعة بصفتها محسنات للتربة (أسمدة) بصورة أساسية، ويبلغ الاستهلاك العالمي السنوي لكلّ من الزنك والنحاس والألومنيوم والرصاص، بين (3–10) ملايين طن تقريبًا، بينما يبلغ الاستهلاك السنوي للذهب والفضة قرابة (10,000) طن أو أقلّ، يكوّن الحديد قرابة (95%)من استهلاك الفلزّات كلّها، ويستخدم كلّ من النيكل والكروم والكوبلت والمنجنيز في سبائك الحديد، مثل الفولاذ الذي لا يصدأ، والذي هو خليط من الحديد وبعض العناصر الأخرى، وبناءً على ما سبق، يمكننا الاستنتاج أنّ المصادر المعدنية غير الفلزّية (باستثناء الحديد)، تستهلك بوتيرة عالية جدًّا، مقارنة بالعناصر الفلزّية.

الاستجابة للوفرة المحدودة

Responses to Limited Availability

ليست المشكلة الأساسية المصاحبة لتوافر المصادر المعدنية، هي حقيقة استنزافها وانقراضها، وإنّما تكاليف المحافظة على احتياطيات ملائمة أو احتياط اقتصادي من خلال التعدين والتدوير، إذ تزيد في بعض الأحيان تكاليف التعدين من قيمة المادّة، وعندما تصبح وفرة أحد المعادن محدودة، يتمّ اللجوء إلى حلول عدّة ممكنة، منها:

Openkandil.com



الشكل (14–3) منحنيات الاستنزاف نموذج المنحنيات الثلاثة. استنزاف افتراضي ناتج عن استخدام المصادر المعدنية.

- البحث عن مصادر جديدة.
- البحث عن البدائل.
- تدوير ما تمّ الحصول عليه سابقًا.
- قلّل من الاستخدام، واجعله أكثر فاعلية لما هو متوافر.
- استغنِ عنه.

يمكننا استخدام مصدر معدني محدّد بطرق مختلفة: استهلاك سريع، أو استهلاك مع الاستدامة، أو استهلاك واستدامة مع التدوير، إذ يعتمد انتقاء الخيار جزئيًّا على معايير اقتصادية وسياسية واجتماعية. يظهر الشكل (14–3) منحنيات استنزاف افتراضي، ترتبط بكلّ من هذه الخيارات الثلاثة تاريخيًّا، حيث استُهلكت المصادر بسرعة باستثناء الفلزّات النفيسة، وكلّما أصبحت أعداد أكبر من المصادر محدودة، فيتوقّع أن تزداد المحافظة عليها وتدويرها، وبالتأكيد، فإنّ التوجّه نحو تدوير الفلزّات، مثل النحاس والرصاص والألومنيوم، جيّد التأسيس.

كلّما زاد عدد السكان، وتزايدت الرغبة في الحصول على مستويات عليا للعيش، توسّع الطلب على المصادر بسرعات عالية، إذ تضمّ الولايات المتّحدة (5%) فقط من سكان العالم، ولكنّ المواطن الأمريكي يستهلك حصّة غير متكافئة من المصادر المعدنية، بما فيها معظم الألومنيوم والنحاس والنيكل، فلو قُدّرت زيادة معدّل استهلاك الفرد للفلزّات في العالم، ليصبح مساويًا لما هو متوافر في الولايات المتّحدة، لأصبحنا في حاجة إلى زيادة معدّلات الإنتاج مرّات كثيرة عمّا هي عليه الحال الآن، وحيث إنّ هذه الزيادة في الإنتاج غير محتملة، فعلى الدول الغنية البحث عن بدائل لبعض المعادن، أو استخدام نسبة أقلّ من الإنتاج العالمي السنوي، ولحسن الطالع، فقد طُبّقت البدائل واستُخدمت، فعلى سبيل المثال: انخفض معدّل استهلاك الفرد للمعادن (غير الوقود) في الولايات المتّحدة بصورة ملحوظة خلال الأعوام 1980م–2009م.

لا يكفي التزويد المحلي من المصادر المعدنية الاستخدامات الحالية في الولايات المتّحدة وبعض الدول الغنية، لذلك تلجأ إلى الاستيراد من دول أخرى، فعلى سبيل المثال: تستورد الولايات المتّحدة كلّ ما تحتاج إليه من الجرانيت والمنجنيز والسترونشيوم والقصدير والبلاتين والكروم، لاستخداماتها الصناعية وغيرها.

تهتم الدول الصناعية بصورة خاصّة باحتمالات انقطاع إمدادات المعادن، نتيجة اضطرابات سياسية أو اقتصادية أو عسكرية في الدول المزوّدة، إذ تعتمد الولايات المتّحدة إضافة إلى كثير من الدول والمناطق، بما في ذلك أوروبا الغربية واليابان والصين والهند حاليًّا، على الإمداد الثابت من المستوردات، من أجل المحافظة على طلب المعادن للصناعة، وبالطبع، لا يعني استيراد المعدن إلى الدولة أنّه غير متوافر فيها بكمّيات قابلة للتعدين، إذ من الممكن أن تتوافر أسباب اقتصادية وسياسية وبيئية، تجعل الاستيراد عمليًّا وأكثر سهولة وأكثر رغبة.

2-14 جيولوجية المصادر المعدنية
GEOLOGY OF MINERAL RESOURCES

ترتبط جيولوجية المصادر المعدنية بصورة جوهرية بالدورة الجيولوجية الكلّية (انظر الفصل الثاني)، لذلك، فإنّ مظاهر عمليات الدورة كلّها تقريبًا، تشارك بصورة كبيرة أو صغيرة في إنتاج تركيزات للموادّ المفيدة.

تركيز الفلزّات محليًّا
Local Concentrations of Metals

يستمدّ مصطلح الخام أحيانًا للدلالة على المعادن الفلزّية المفيدة، التي يمكن تعدينها بصورة مربحة، والمناطق التي يتوافر فيها الخام بتراكيز عالية من تلك المعادن، ويتغيّر تركيز الفلزّ اللازم لتصنيف المعدن بأنّه خام بحسب التقدّم التكنولوجي والوضع الاقتصادي والسياسي، فقبل اختراع عملية صهر الخامات بالحرارة لاستخلاص الفلزات، كانت الخامات فقط تلك الموجودة في الطبيعة بصيغتها النقية، مثل الذهب الذي كان يُستخرج في الأصل بوصفه مادة نقية طبيعية، امتدت مناجم الذهب في الوقت الحالي، وتوسّعت إلى أعماق سحيقة في باطن الأرض، حيث تتطلّب عملية استخلاص بضع أونصات من الذهب، تكسير أطنان عدّة من الصخور، وعلى الرغم من أنّ ما يحويه الصخر كمّيات قليلة من الذهب، إلّا أنّه يُعدّ خامًا له؛ لأنّنا نستطيع استخلاص الذهب الخالص منه.

معامل تركيز الفلزّ، هو النسبة بين تراكيزه الضرورية ليصبح قابلًا للتعدين بصورة اقتصادية، إلى متوسّط تركيز الفلزّ في القشرة الأرضية. يسرد الجدول (14–2) بعض العناصر الفلزية، ومتوسّط تراكيزها، وتراكيزها في الخامات، ومعامل التركيز، حيث يبلغ متوسّط تركيز الألومنيوم في القشرة الأرضية قرابة (8%)، ويتطلّب أن يصبح قرابة (35%) في الصخر لتعدينه بصورة اقتصادية، وهذا يعني أنّ نسبة معامل تركيز الألومنيوم (4).

أمّا من ناحية أخرى، فإنّ تركيز الزئبق في خاماته يصل إلى قرابة (0,1%)، بمعنى أن يكون معامل التركيز قرابة (10,000)، كي يكون قابلًا للتعدين بصورة اقتصادية، وعلى الرغم من ذلك، فإنّ خامات الزئبق منتشرة في مناطق محدّدة، بحيث تتوافر مصاحبة لخامات فلزّية أخرى. (نظرة متفحّصة: تكتونية الصفائح والمعادن)، ومن الجدير ذكره، أنّ قيمة التركيز المطلوب في الخام تتغيّر، وكذلك معامل التركيز، تبعًا للطلب على الفلز.

obeikan.com

الجدول (14-2): عوامل التركيز التقريبية الضرورية لبعض الفلزّات، قبل تعدينها بصورة اقتصادية

الفلزّ	التركيز الطبيعي (%)	التركيز في الخام	معامل التركيز التقريبي
الذهب	0.0000004	0.001	2500
الزئبق	0.00001	0.1	10500
الرصاص	0.0015	4	2500
النحاس	0.005	0.4-0.8	80-160
الحديد	5	20-69	4-14
الألومنيوم	8	35	4

المصدر:
Data from U.S. Geological Survey Professional Paper 820,1973

يمكن تصنيف المصادر المعدنية التي لها قيمة اقتصادية إلى أصناف عدّة، وذلك اعتمادًا على كيفيّة تكوّنها جيولوجيًّا:

- **العمليات النارية**، وتتضمّن انفصال البلّورات، والعمليات الماغماتية المتأخّرة، والاستبدال الحرمائي (hydrothermal).
- **العمليات المتحوّلة** المصاحبة للتحوّل التماسي والتحوّل الإقليمي.
- **العمليات الترسيبية**، وتتضمّن تراكم المعادن في البيئات البحرية والبحيرية والنهرية وبيئة الريح والمثلجات.
- **العمليات الحيوية**.
- **عمليات التجوية**، مثل تكوّن التربة، وزيادة تراكيز العناصر غير الذائبة للمعادن في مكانها في الركام الصخري المتعرّض للتجوية.

يسرد الجدول (14-3) أمثلة على رسوبيات الخامات لكلّ من العمليات السابقة.

العمليات النارية Igneous Processes

تنتج معظم ترسّبات الخامات الناشئة من العمليات النارية؛ بسبب عمليات إثراء تؤدّي إلى تركيز خامات الفلزّات المطلوبة بصورة اقتصادية، مثل النحاس والنيكل أو الذهب، ويحتوي كامل الصخر في بعض الحالات بلّورات متناثرة يمكن استخلاصها بصورة اقتصادية، وربما يكون أفضل الأمثلة المعروفة على ذلك، توافر بلّورات الماس، التي تتوافر في صخر ناري خشن النسيج يدعى الكيمبرليت (Kimberlite)، الذي يتميّز بتوافره على صورة جسم صخري أسطواني الهيئة، يتناقص قطره كلّما زاد العمق، انظر الشكل (14-4)، إذ يُعدّ كامل أسطوانة الكيمبرليت ترسّبات الخام، وتكون بلّورات الماس مبعثرة في أرجاء الصخر كلّه[7].

يتشكّل الماس الذي يتألّف من الكربون على درجات حرارة وضغط عالية جدًّا، وربّما على أعماق تزيد على (150 km) تحت القشرة الأرضية في باطن الوشاح الأرضي، ويتوقّع أن يكون عمر بعض صخور الكيمبرليت في جنوب إفريقيا ما يصل إلى بليوني سنة، إضافة إلى أنّ الماس لا يكون مستقرًّا عن السطح خلال الزمن الجيولوجي، ولذلك فسيتحوّل إلى معدن الجرافيت (graphite) (وهو المعدن الذي يتوافر في قلم الرصاص)، فلا

الجدول (14-3): أمثلة على الأنواع المختلفة للمصادر المعدنية

النوع	المثال
النارية	
المنتشرة	الماس -جنوب إفريقيا
استقرار البلّورات	الكروميت ستيل - واتر، مونتانا
الماغماتية المتأخّرة	المغنيتيت -أديروندوك، مونتانا، نيويورك
البغماتيت	البيريك والليثيوم - بلاك هيلز، جنوب داكوتا
الحرمائية	النحاس - بوطو، مونتانا
المتحوّلة	
التحوّل التماسي	الرصاص والفضّة - ليدفيلي، كولورادو
التحوّل الإقليمي	الإسبستوس - كوبيك، كندا
الرسوبية	
المتبخّرات (البحيرة أو المحيط)	البوتاسيوم - كارلسباد، نيومكسيكو
رسوبيات التبر في النهر	الذهب - منحدرات جبال نيفادا، كاليفورنيا
الجليديات (الثلاجات)	الرمل والحصى- شمال إنديانا
أعماق المحيط	عقيدات أكنسيد المنجنيز- وسط المحيط الأطلسي وجنوبه
الحيوية	الفوسفات - كلوريدا
التجوية	
تربة المتبقّيات	البوكسيت- آركنساس
الإثراء الثانوي	النحاس- أوتاه

المصدر: *Modified from Robert J. Foster, 1983, General Geology, 4th ed., Columbus, OH: Charles E. Merrill*

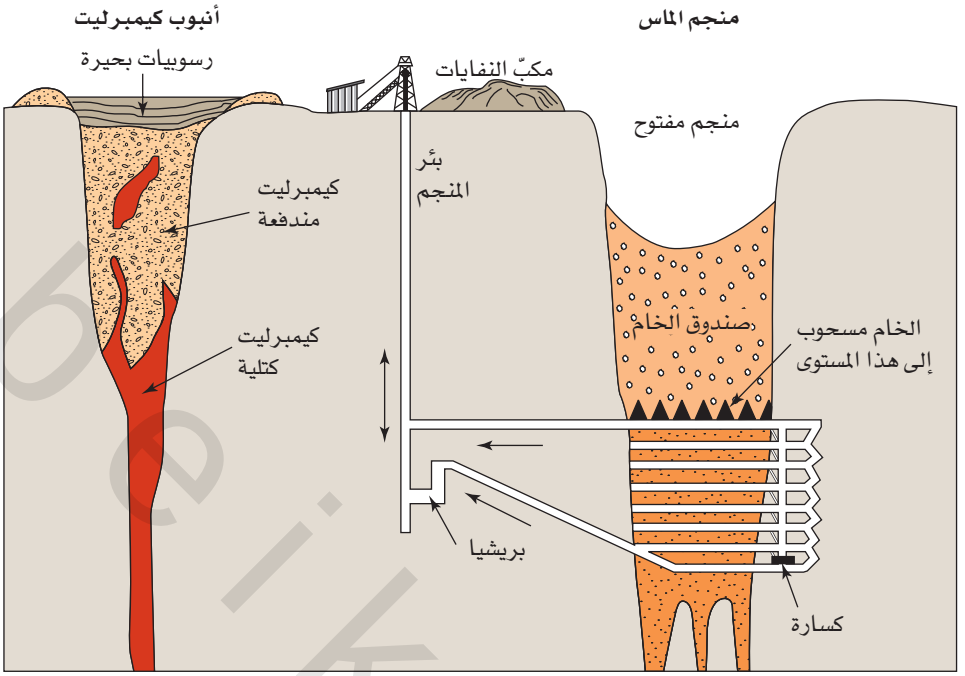
تبادر ببيع ما تمتلكه من الماس الآن! ولا تقلق، فلن تحدث عملية التحوّر على درجة الحرارة والضغط على السطح، ومن هنا، ومع أنّ الماس شبه مستقرّ، إلّا أنّه سيبقى رائعًا وغامضًا طوال فترة حياة البشرية، وتشير حقيقة قدم عمر أسطوانة الكيمبرليت، إلى أنّها لا بدّ أنها اندفعت من الأعماق الكبيرة إلى السطح بسرعة متناهية؛ لأنّه لو لم تكن تلك هي الحالة، لما بقي الماس على صورته، وإنّما تحوّر وتغيّر إلى الجرافيت.

استقرار البلّورات في القعر Crystal Settling

تنشأ ترسّبات خامات عالية التركيز بفضل العمليات النارية، نتيجة لعملية تدعى استقرار البلّورات، التي تتبلور أوّلًا، وتُعزل عن تلك التي تتبلور لاحقًا، فمثلًا، عندما تبرد الماغما، تغطس المعادن الثقيلة التي تتبلور أولًا، وتستقرّ في قعر غرفة الصهير، ما يؤدّي إلى تكوّن طبقة غنية، تتكوّن ترسّبات الكروميت (خامات الكروم) بفضل هذه العملية، انظر الشكل (14-5).

العمليات الماغماتية المتأخّرة والإحلال الحرمائي Late Magmatic Processes and Hydrothermal Replacement

تحدث العمليات الماغماتية المتأخّرة، بعد أن تكون معظم الماغما تبلورت، وتبقّت الموادّ النادرة والفلزية الثقيلة في محاليل مائية وغازية، وقد يحصر



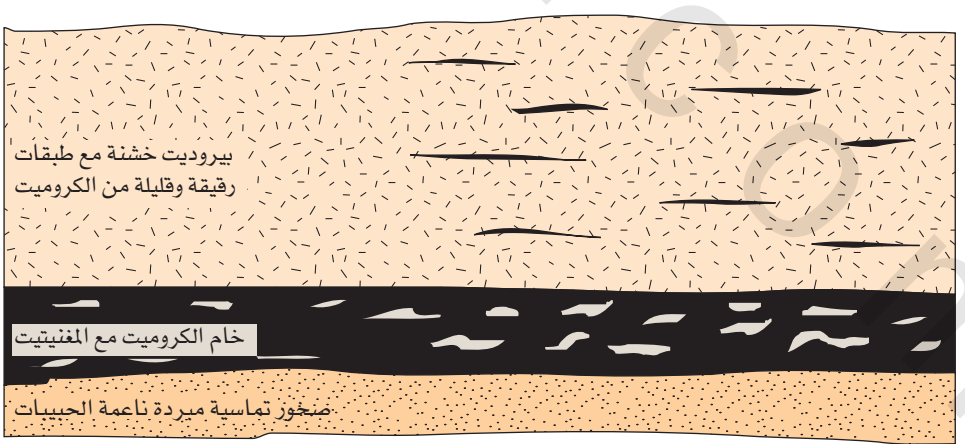
(أ)

الشكل (14–4): **أنبوب الماس** (أ) رسم مثالي، يظهر أحد أنابيب الماس النموذجية في جنوب إفريقيا. تنتشر الماسات في أرجاء الجسم الأسطواني من صخور الكيمبرليت النارية.

(From Kesler, S.E, 1994, Mineral Resources, economics and the environment, New York: Macmillan)

(ب) منظر جوّي لمنجم الماس في كيمبرلي، جنوب إفريقيا. يمثل هذا أحد أكبر الحفريات في العالم التي حُفرت باليد.

(Helen Thompson/Animals Animals/ Earth Sconces)



الشكل (14–5): كيف يمكن أن تنشأ الكروميت. تتبلور الكروميت أوّلًا؛ ولأنّ البلورات ثقيلة الوزن، فإنّها تغطس إلى القعر، وتتراكم على هيئة طبقات.

(From Foster, 1983, General Geology, 4th ed., Columns, OH: Charles E. Merrill)

هذا المحلول الفلزي المتأخّر في داخل الشقوق، أو يستقرّ بين الفراغات والفجوات الخلالية بين البلورات المتشكّلة أوّلًا.

تشكّل بعض محاليل المراحل المتأخّرة الأخرى صخرًا ناريًّا خشن الحبيبات يعرف بالبيغماتيت (pegmatite)، التي تكون غنية بمعادن الفلسبار والمايكا والكوارتز، إضافة إلى بعض المعادن النادرة، لقد تم تعدين البيغماتيت بكثافة من أجل الحصول على معادن الفلسبار والمايكا والسبوديومين (أحد معادن الليثيوم)، إضافة إلى الصلصال الذي يتشكّل من تجوية الفلسبار.

الترسّبات المعدنية الحرمائية، هي إحدى ترسّبات الخامات الشائعة، وتنشأ من العمليات الماغماتية المتأخّرة، وتؤدّي إلى تمعدنات متنوّعة، بما فيها الذهب والفضّة والنحاس والزئبق والرصاص والزنك وفلزّات أخرى، وكذلك كثير من المعادن اللافلزّية.

نظرة متفحّصة A CLOSER LOOK

حركية الصفائح والمعادن Plate Tectonics and Minerals

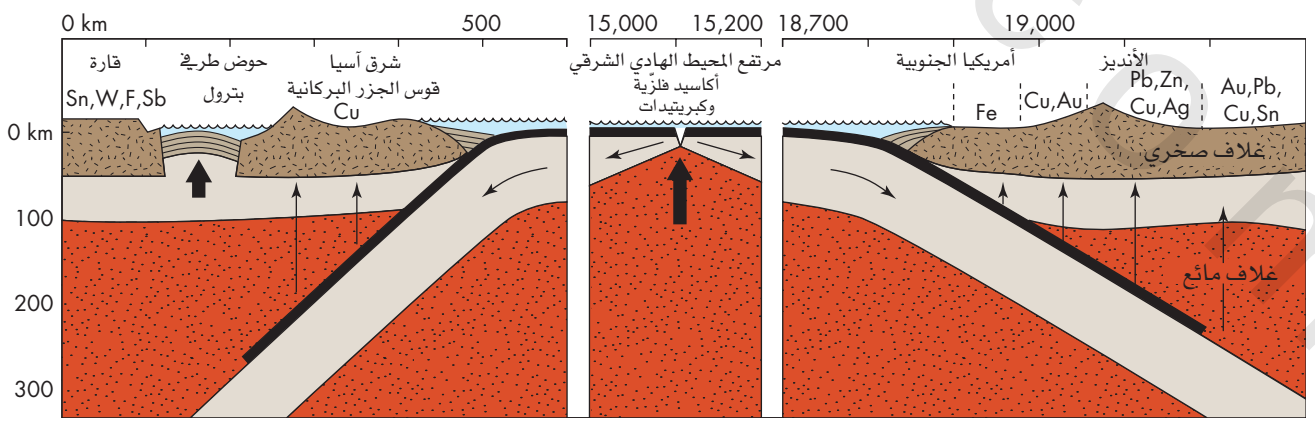
من أجل الوصول إلى فهم واسع وواضح لجيولوجية المصادر المعدنية، وجد ارتباط حدود الصفائح التكتونية بنشأة ترسّبات الخامات تلك، مثل الحديد والذهب والنحاس والزئبق (الشكل 14 أ). تكمن الفكرة في ربط التمعدنات بالعمليات الفاعلة على حدود الصفائح المتباعدة والحدود المتقاربة، (انظر الفصل الثاني).

ترتبط نشأة ترسّبات الخامات الفلزية عند الحدود المتباعدة بهجرة (حركة) مياه المحيط، إذ تهبط مياه المحيط الباردة الثقيلة خلال كثير من الشقوق المتوافرة في صخور البازلت عند ظهر المحيط، وتزداد درجة حرارة المياه نتيجة اتّصالها أو اقترابها من الصخور المنصهرة (الماغما) القريبة، تكون المياه الدافئة أكثر خفّة ونشاطًا كيميائيًّا، فتصعد إلى الأعلى (تحمل للأعلى) خلال الصخور المشقّقة، وتغسل الفلزّات، وتحمل الفلزّات ذائبة في المحلول وتترسّب على صورة كبريتيدات فلزّية، وتشكّل تراكيب تشبه المدخنة، تبعث الدخان الأسود ومياهًا ساخنة مشحونة بالمعادن (المداخن السوداء)[8]. اكتشفت كثير من ترسّبات الكبريتيدات على امتداد ظهر المحيط، وبلا شكّ سيُكتشف كثير منها.

يفترض أن يكون أصل ترسّبات الخامات الفلزية عند حدود الصفائح المتقاربة، ناتجًا عن الانصهار الجزئي للصخور المشبّعة بمياه البحر التابعة للغلاف الصخري المحيطي في نطاق الطرح، وتسبّب درجة الحرارة والضغط المرتفعان الانصهار، وتسهّل تحرّر الفلزّات، وتحرّك من الصخور المنصهرة جزئيًّا، تصبح الفلزّات التي تكوّنت في الصخور عالية التركيز، وتصعد إلى الأعلى كلّما زادت المكوّنات السائلة للماغما، وأخيرًا، تفلت السوائل الغنية بالفلزّات من الماغما، وتترسّب الفلزّات داخل الصخور المضيفة.

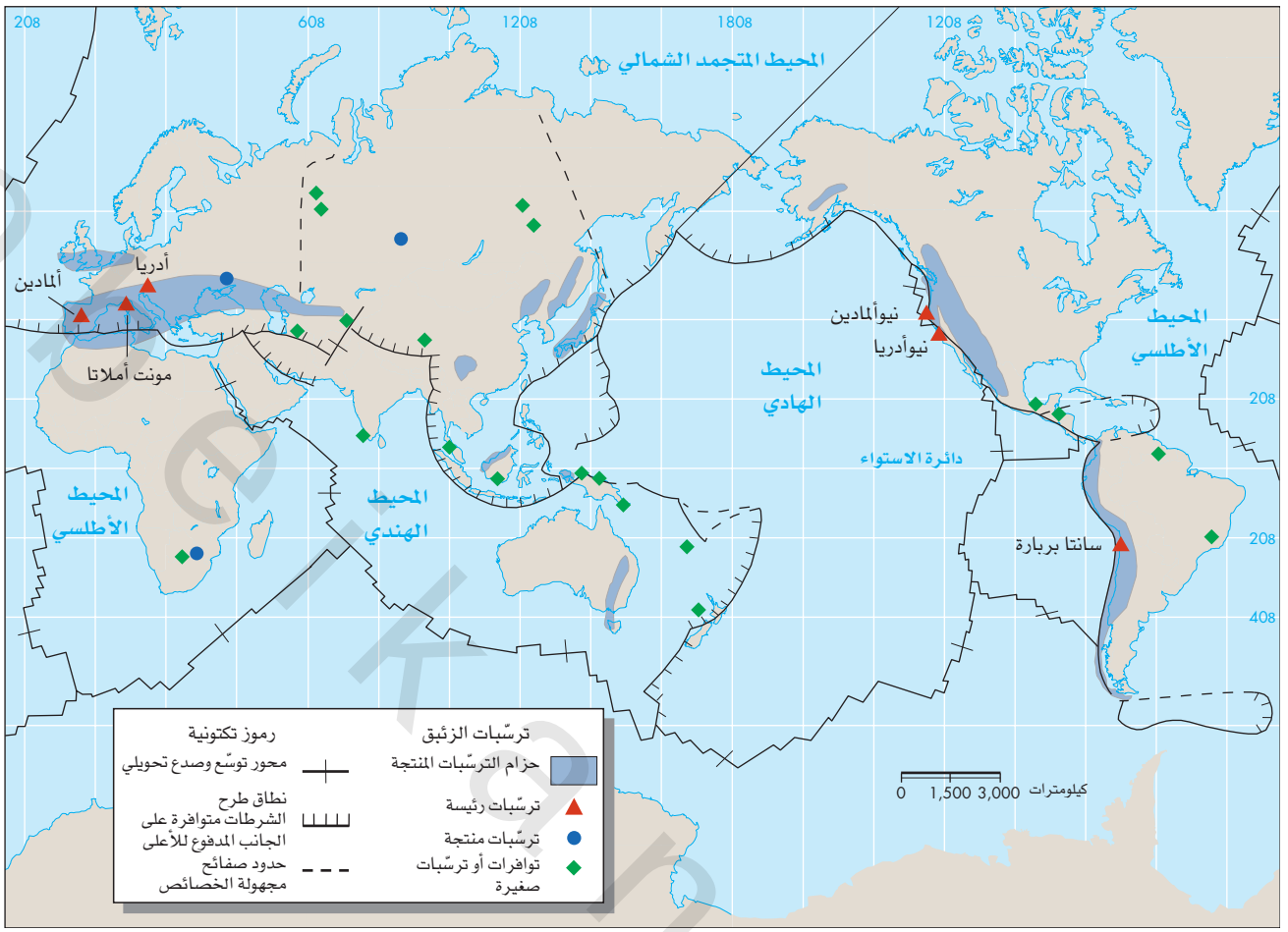
ربما يكون أفضل الترسّبات الفلزية عند نطاقات الطرح، هو التوافرات العالمية لترسّبات الزئبق المعروفة، (الشكل 14ب). تصاحب أحزمة الترسّبات المنتجة للزئبق جميعها بالأنظمة البركانية المتوافرة قريبًا من حدود الصفائح المتقاربة، وقد اقترح أن يكون الزئبق متوافرًا أصلًا في الرسوبيات المحيطية في القشرة، وتكثّفت خارجة من الصفيحة الغاطسة، وتوضّعت على مستوًى أعلى فوق نطاق الطرح.

النقطة المهمّة من الناحية الاقتصادية، هي تميّز نطاق التقاء الصفائح المتقاربة بوجود أنشطة بركانية وتكتونية، وهي أماكن محتملة لتوافر الزئبق، مثل هذه التفسيرات يمكن أن تعمّم على ترسّبات الخامات الأخرى، ولكن هنا خطورة في تبسيط الأمور؛ لأنّ كثيرًا من الترسّبات لا ترتبط مباشرة بحدود الصفائح، (الشكل 14جـ).



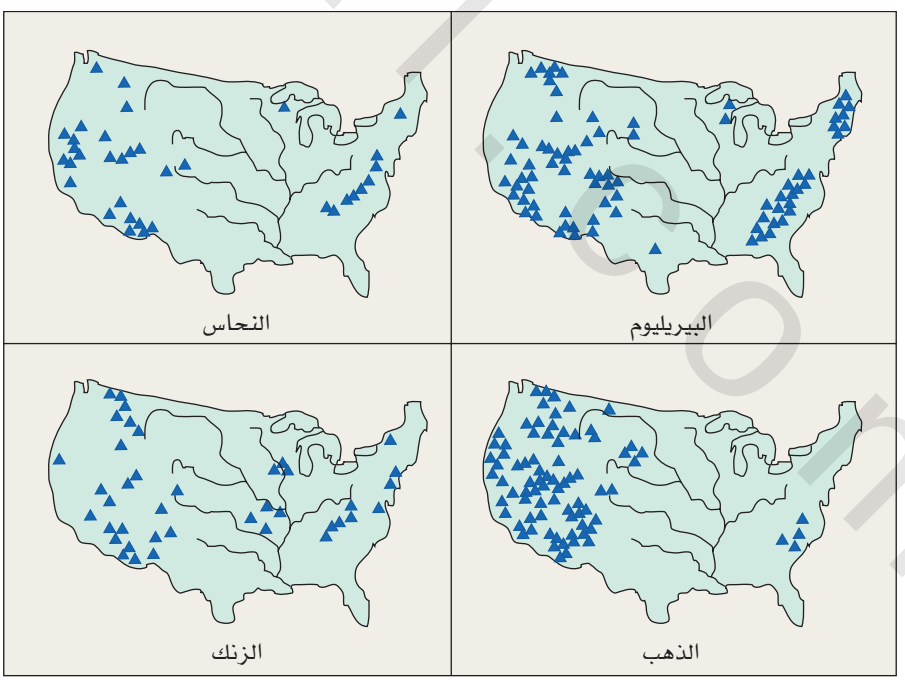
الشكل (14 أ) الصفائح التكتونية والترسّبات المعدنية. مخطّط يبيّن العلاقة بين مرتفع المحيط الأطلسي الشرقي (حدّ صفائح توسّعي) وحوافّ المحيط الهادي (حدود صفائح متقاربة) وترسّبات الخامات الفلزّية. (*After NOAA, California Geology 3015, 1977*)

obeikandl.com



الشكل (14 ب) ترسّبات الزئبق العلاقة بين ترسّبات الزئبق ونطاقات الطرح النشطة حديثًا

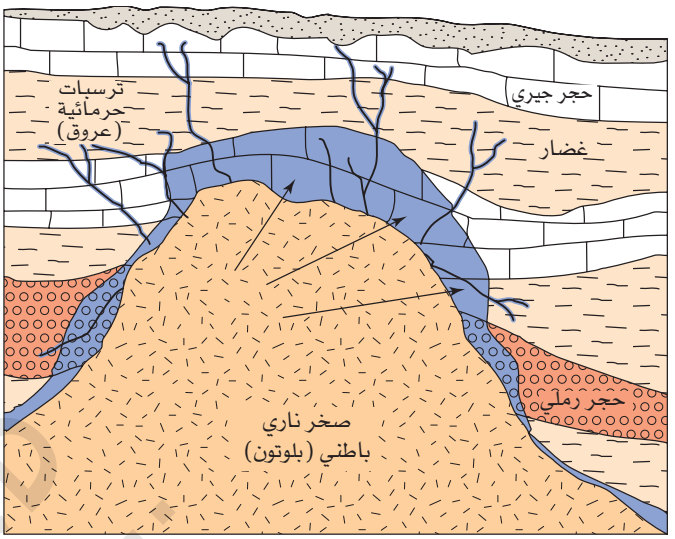
(From Brobst, D.A., and Pratt, W.R. eds, 1973, U.S. Geological Survey Professional Paper 820)



الشكل (14جـ) توافر الترسّبات الاقتصادية لبعض الفلزّات المنتقاة في الولايات المتّحدة.

(Data from mineral resource maps of the U.S. Geological Survey)

Obeikandl.com



الشكل (6–14) ترسّبات الخامات الحرمائية والتماسية.
كيف يمكن أن تنشأ ترسّبات الخامات الحرمائية والتماسية؟

نطاق تحوّل تماسي، حيث يمكن أن تتوافر الترسّبات المعدنية. لاحظ أنّ النطاق أكثر سعة في صخر الحجر الجيري من الحجر الرملي أو الغضار؛ سبب هذه النتيجة أنّ الحجر الجيري أكثر نشاطًا من الناحية الكيميائية في ظل التحوّل التماسي.

المحاليل الحرمائية التي تصنع ترسّبات الخام، هي محاليل تمعدنية تهاجر خلال الصخور المضيفة، وتتبلور على هيئة عروق وقواطع صغيرة، انظر الشكل (6–14)، تتكوّن الموادّ المعدنية مباشرة من الصخر الناري الأمّ، أو يتكوّن من عمليات التحوّل الناتجة عن اندفاع المحاليل الماغماتية إلى الصخور المحيطة (تمّ شرح التغيّرات الناتجة عن عمليات التحوّل المسمّى التحوّل التماسي في فقرة عمليات التحوّل)، إذ ليس بالإمكان تحديد الصخر الناري الأمّ لكثير من الترسّبات الحرمائية؛ ولذلك يبقى أصلها مجهولًا، ويتوقّع أن تكون المياه الجوفية المتحرّكة مسؤولة عن تكوّن بعض هذه الترسّبات، وذلك من خلال مرورها قريبًا من الماغما المدفونة عميقًا، فتسخن، وتثرى بالمعادن نتيجة الاتّصال[7، 9].

يمكن تعرّف نوعين من الترسّبات الحرمائية، وهي المالئة للفجوات والإحلالات، حيث تتكوّن الترسّبات المالئة للفجوات، عندما تهاجر المحاليل الحرمائية خلال فتحات الصخور (مثل أنظمة الشقوق أو الثقوب الخلالية أو سطوح التطبق)، وتُرسّب (تبلور) خامات معدنية، أمّا الترسّبات الإحلالية فتتكوّن من المحاليل الحرمائية، التي تتفاعل مع الصخر المضيف، وتشكّل نطاقًا تبدأ منه الخامات المعدنية بالترسّب من السوائل الغنية بالتمعدنات، وتحلّ محلّ بعض أجزاء الصخر المضيف، وعلى الرغم من الاعتقاد بسعة انتشار الترسّبات الإحلالية، عند درجات الحرارة والضغط المرتفعة، أكثر من الترسّبات المالئة للفجوات، إلّا أنّ كلا النوعين يتوافران بارتباط وثيق، بحيث يؤدّي أحدهما إلى الآخر، بمعنى أنّ الفراغات تكون قد ملئت من المحاليل الحرمائية، وحدث في الوقت نفسه عملية استبدال للصخر المحاذي للفراغات المملوءة[7، 9].

تُعدّ العمليات الحرمائية الإحلالية مهمّة؛ لأنّها إذا استثنيت خامات الحديد والمعادن اللافلزّية، مسؤولة عن أكبر الترسّبات المعدنية العالمية وأكثرها أهمّية، فقد تكوّنت بعض هذه الترسّبات بسبب إحلال كتلي شامل لأجزاء الصخر المضيف جميعها، بالخامات المعدنية التي تنتهي فجأة، وتكوّنت أنواع أخرى نتيجة إحلالات على صورة نطاقات رقيقة على امتداد الشقوق، وتكوّنت غيرها من ترسّبات الإحلال الانتشاري، الذي قد يتضمّن كمّيات هائلة من الخامات منخفضة النوعية نسبيًّا[7، 9].

يُعدّ تسلسل الأحداث الجيولوجية الحقيقي الذي يقود إلى تطوّر الترسّبات الحرمائية معقّدًا دائمًا، فلو أخذت في الحسبان على سبيل المثال، ترسّبات النحاس الانتشارية الهائلة المتوافرة في شمال تشيلي، فإنّه يتوقّع ارتباط التمعدن الحقيقي بنشاط ناري وتصدّع وطي حدثت قبل (60–70) مليون سنة، تتوافر ترسّبات الخامات على هيئة كتلة مسطّحة طولية، موجودة على امتداد نطاق تشقّقات وتصدّعات، تفصل بين نوعين من الصخور الجرانيتية، حيث يعزى سبب زيادة تركيز النحاس إلى عدد من العوامل:

- صخر ناري مصدر تزويد النحاس.
- نطاق الشقوق سهّل حركة السوائل، ووفّر النحاس.
- تغيّر الصخر المضيف وتكسّره، ما جهّزه ليكون صالحًا لعملية الإحلال والترسيب، الذي أدّى إلى تكوّن الخام.
- غسل النحاس وتحريره من صخر المصدر، وترسيبه ثانية بفعل المياه الخلالية، ما زاد من تركيز الخام[7، 9].

عمليات التحوّل Metamorphic Processes

التحوّل التماسي Contact Metamorphism غالبًا ما تتوافر ترسّبات الخامات على امتداد الحدّ الفاصل بين الصخور النارية والصخور المحيطة التي تقتحمها، حيث تتميّز هذه المنطقة بالتحوّل التماسي، الناتج عن الحرارة والضغط ونشاط السوائل الكيميائية التابعة للماغما المتبردة، التي تتفاعل مع الصخور المحيطة التي تدعى الصخور المضيفة، ويتغيّر عرض نطاق التحوّل التماسي تبعًا لنوع الصخر المضيف، انظر الشكل (6–14)، ويكون عرض النطاق عادة أعرض في الحجر الجيري؛ وذلك لأنّ الحجر الجيري أكثر عرضة للتفاعلات: تحرّر غاز ثاني أكسيد الكربون، يزيد من انتشار الموادّ الكيميائية الأوّلية، وغالبًا ما يكون النطاق ضيّقًا في صخر الغضار؛ لأن النسيج ناعم الحبيبات يؤخّر انتشار المحاليل الحارّة النشطة كيميائيًّا، ويكون النطاق متوسّطًا في الحجر الرملي، ومثل ما ذكرنا سابقًا، تنشأ بعض الترسّبات المعدنية في مناطق التماس مع السوائل الماغماتية، ويتكوّن بعضها الآخر من تفاعل تلك السوائل مع الصخر المضيف.

التحوّل الإقليمي Regional Metamorphism قد يحدث التحوّل نتيجة ازدياد إقليمي في درجة الحرارة، والضغط المصاحب لعمليات الدفن السحيقة للصخور أو المصاحب للنشاط التكتوني، ويمكن لهذا التحوّل الإقليمي أن يغيّر معادن الصخور القائمة ونسيجها، وينتج ترسّبات الخامات كالإسبست والطلق والجرافيت، وكذلك كثير من الترسّبات اللافلزّية.

openkan.com

يعتقد أن التحوّل سبب محتمل في نشأة بعض السوائل الحرمائية، وبالتحديد فإنّ التحوّل يمكن أن يكون المسبّب في نطاقات درجات الحرارة العالية والضغط المرتفع، حيث قد تُصنع المحاليل، وتُجبر على الخروج إلى الصخور المحيطة من أجل تكوين ترسّبات الإحلال أو مالئة الفجوات، فعلى سبيل المثال، النحاس الطبيعي الذي يتوافر على امتداد قمّة تدفّقات البازلت القديمة في محافظة النحاس في ميتشغن، قد تشكّل ظاهريًّا نتيجة تحوّل البازلت وتغيّره، الذي حرّر النحاس والموادّ الأخرى التي كوّنت الترسبات[7، 9].

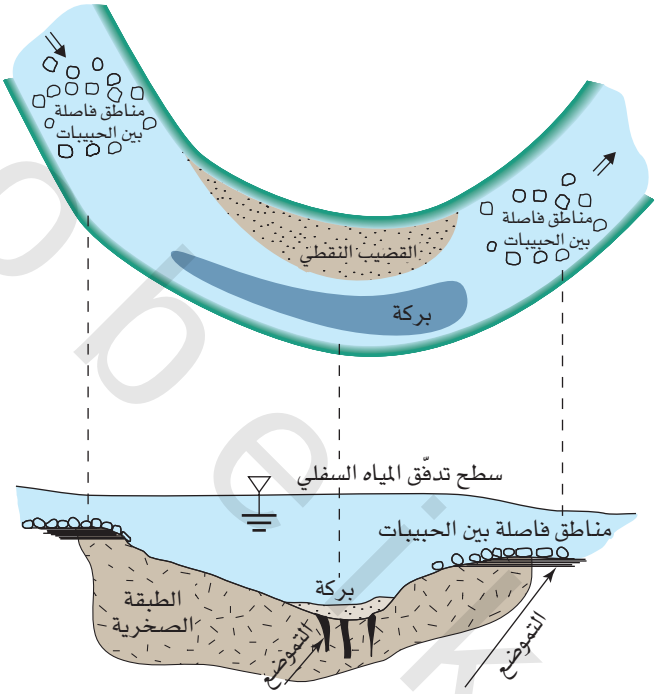
لقد ركّز شرحنا عن العمليات النارية والمتحوّلة أساسًا على ترسّبات الخامات، ولكنّ العمليات النارية والمتحوّلة مسؤولة أيضًا عن إنتاج كمّيات جيّدة من الحجر الذي يستخدم في صناعة الإنشاءات والبناء، إذ يتمّ تحجير الجرانيت والبازلت والرخام (حجر جيري متحوّل)، السّليت (غضار متحوّل) والكوارتزيت (حجر رملي متحوّل)، إضافة إلى صخور أخرى من أجل الحصول على كسارة الحجارة وحجارة البناء في الولايات المتّحدة الأمريكية. تستخدم الحجارة في كثير من الاستخدامات في أعمال البناء، وقد يستغرب البعض هذه المعلومة، ففي مجمل القيمة وباستثناء الحديد والفولاذ، تُعدّ صناعة الحجارة إحدى أكبر الصناعات المعدنية في الولايات المتّحدة عدا الوقود، انظر الجدول (14–2)[10].

العمليات الرسوبية
Sedimentary Processes

تُعدّ العمليات الرسوبية في العادة عمليات مهمّة في تركيز الموادّ الاقتصادية القيّمة بكمّيات كافية للاستغلال، فعندما تنتقل الرسوبيات تقوم الرياح أو المياه الجارية بالمساعدة على عزل الرسوبيات وفصلها، اعتمادًا على حجم الحبيبات وشكلها وكثافتها، لذلك فإنّ أكثر أنواع الرمل أو الرمل والحصى جودة للبناء، تلك التي تخلو من الموادّ الناعمة التي أزيلت عن طريق المياه أو الرياح، وتُعدّ رمال الكثبان وترسّبات الشاطئ وترسّبات القنوات النهرية من الأمثلة الجيّدة على ذلك.

الرمل والحصى Sand and Gravel تصل قيمة صناعة الرمل والحصى في الولايات المتّحدة إلى قرابة (8.5) بليون دولار في السنة، ومن حيث حجم التعدين، تُعدّ إحدى أكبر الصناعات المعدنية في الولايات المتّحدة عدا الوقود، إذ بلغت (1300) مليون طن عام 2006م، حيث يُحصل على معظم الرمل والحصى في الوقت الحالي من مجاري الأنهار ومن ترسّبات الجليديات، وتنتج الولايات المتّحدة الآن كمّيات من الرمل والحصى تزيد على حاجاتها، إلّا أنّ الطلب عليها في ازدياد، وتؤدّي القيود البيئية المفروضة على الاستغلال إلى انتقال عمليات استغلال الرمل والحصى بعيدًا عن المناطق المأهولة، لذلك يتوقّع زيادة النقص في تزويد الرمل والحصى، كلّما زاد تطوير الأراضي وحُصرت المواقع القابلة للاستغلال[10]، ومن الممكن أن يؤدّي الاستغلال من مجاري الأنهار وسهول الفيضان النشطة إلى تدهور بيئة النهر، لذلك تصبح الاعتراضات على الاستغلال من الأنهار أكثر انتشارًا.

ترسّبات التّبر placer تنقل العمليات النهرية، وتفرز جميع أنواع الموادّ اعتماداً على حجمها وعلى كثافتها، لذلك لو احتوت الطبقة الصخرية في حوض النهر فلزات ثقيلة مثل الذهب، وسالت الأودية خلال الحوض، فإنّها قد تؤدّي إلى تركيز الفلز الثقيل على صورة **ترسّبات التبر** (خامات تكوّنت من توضّع الرسوبيات)، في المناطق التي ينخفض فيها اضطراب



قد ينحصر الذهب داخل الكسور الصخرية المفتوحة تحت البركة بين الموادّ الخشنة في المنطقة الفاصلة بينها.

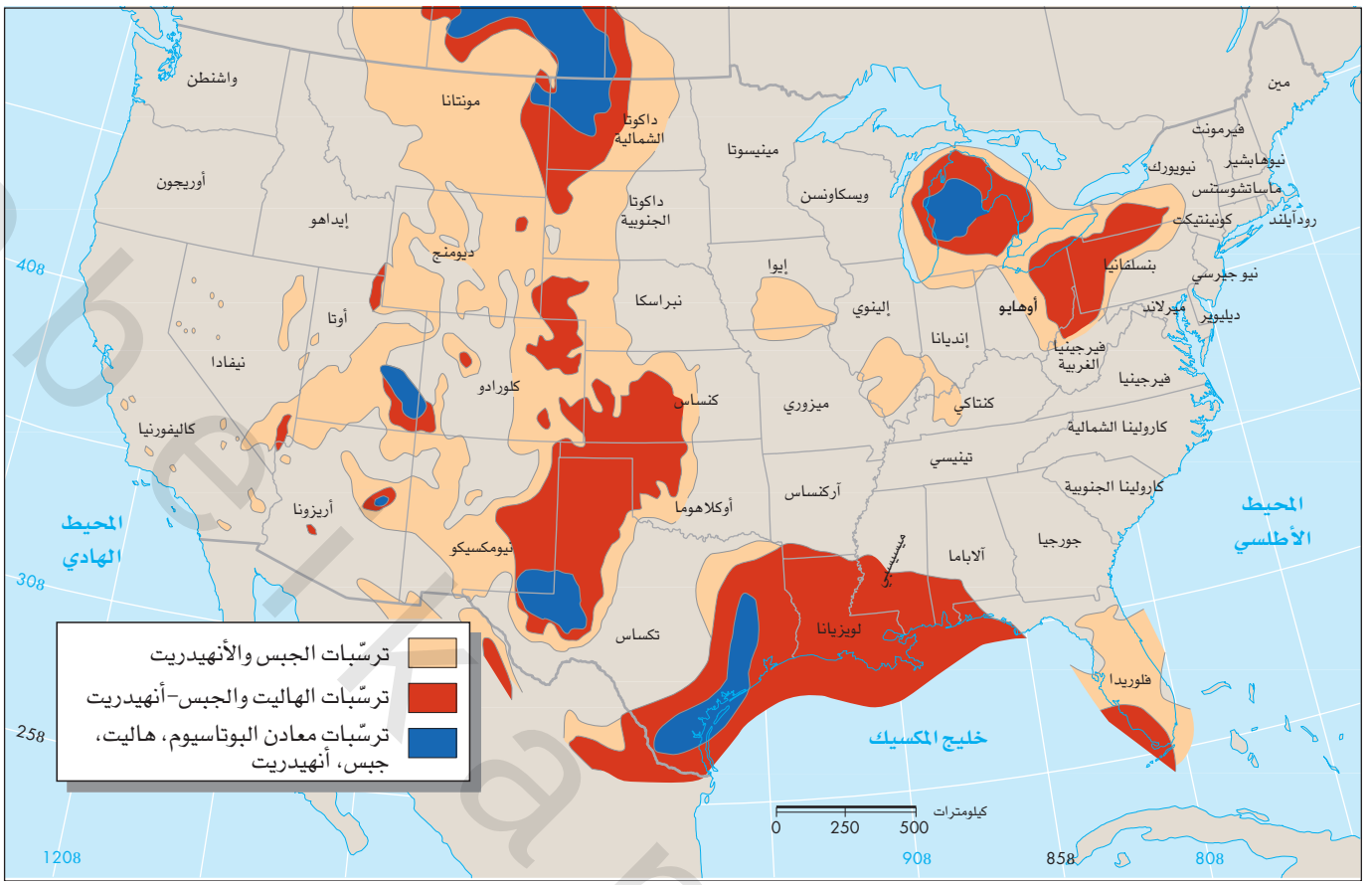
الشكل (14–7) مخطط تموضع الذهب لمجرى الوادي ومنظوره. تظهر المناطق التي يمكن أن تتوافر فيها ترسّبات مثقلات الذهب.

التيار وسرعته، مثل المناطق الفاصلة بين الحبيبات أو في الشقوق المفتوحة أو الكسور في قعر البحيرة، أو عند الجزء الداخلي من التواء النهر، انظر الشكل (14–7)، ويعرف تعدين الذهب من المثقلات بأنّه "طريقة الرجل الفقير"؛ لأنّ عامل التعدين لا يحتاج إلّا إلى مجرفة وصحن وظهر صلب قوي، للعمل في جوانب النهر المستعادة.

ساعدت عمليات تعدين الذهب من المثقلات لتحفيز استيطان كاليفورنيا وألاسكا ومناطق أخرى في الولايات المتحدة، هذا إضافة إلى أنّ الذهب في كاليفورنيا، جذب العاملين في التعدين الذين يمتلكون الخبرات الضرورية، لتحديد مصادر أخرى وتطويرها في غرب الحدود المشتركة للولايات المتّحدة وألاسكا، إذ تمّ تركيز ترسّبات المثقلات من الذهب والماس عن طريق العمليات الشاطئية وعن طريق فعل الأمواج، ويتمّ تعدين رمال الشاطئ والترسّبات القريبة منه في إفريقيا ومناطق أخرى.

ترسّبات المتبخرات Evaporite Deposits تحمل الأنهار والأودية التي تصبّ في المحيطات والبحيرات كمّيات هائلة من الموادّ الذائبة، التي اشتقّت من تجوية الصخور، ومن الناحية الجيولوجية، يمكن عزل مسطّحات بحرية ضحلة من حين إلى آخر؛ بسبب النشاط التكتوني (عمليات الرفع)، الذي يؤدّي إلى تحديد الانتقال ليسهّل التبخّر، وفي حالات أخرى، أنتج التغيّر المناخي خلال العصور الجليدية بحيرات داخلية كبيرة دون مخارج جفّت في النهاية، وفي الحالات كلّها، عندما يتقدّم التبخّر، تترسّب الموادّ الذائبة، وتشكّل أنواعًا عريضة من المركّبات والمعادن والصخور، تدعى ترسّبات المتبخرات، التي تتبوّأ أهمّية اقتصادية.

openkan.com



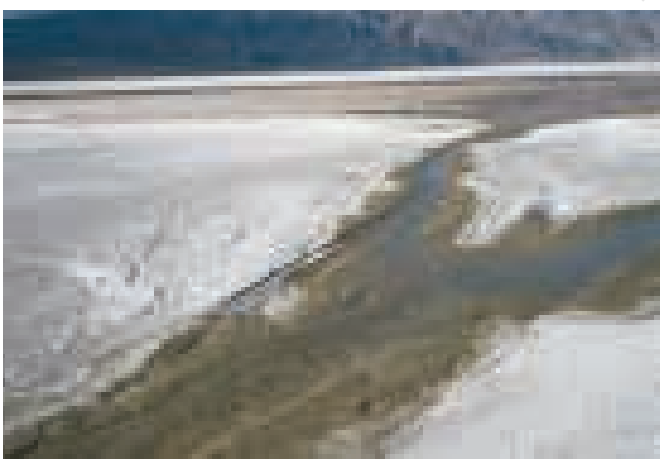
الشكل (14–8) ترسّبات المتبخرات البحرية في الولايات المتّحدة.

After Brobst, D.A., and Pratt, W.P. eds. 1973, U.S. Geological Survey Professional Paper

يمكن وضع معظم ترسّبات المتبخرات في واحدة من ثلاث مجموعات: المتبخرات البحرية (صلبة)، مثل أملاح الصوديوم والبوتاسيوم وكربونات الكالسيوم والجبس والأنهيدريت، المتبخرات اللابحرية (صلبة)، مثل كربونات الصوديوم والكالسيوم والكبريتات والبورات والنيترات، ومركبات محدودة من اليود والسترونشيوم، والمحاليل الملحية (محاليل مشتقّة من الآبار والينابيع الحارّة وأملاح البحيرات الداخلية ومياه البحار)، مثل البروم واليود وكلوريد الكالسيوم والماغنسيوم.

تُعدّ الفلزّات الثقيلة، مثل النحاس والرصاص والزنك، المصاحبة للمحاليل الملحية ورسوبيات البحر الأحمر، وبحر السلتون ومناطق أخرى، مصادر مهمّة يمكن استغلالها في المستقبل، وتتوافر ترسّبات واسعة لترسّبات المتبخرات البحرية في الولايات المتّحدة، انظر الشكل (14–8)، حيث تتكوّن الترسّبات الرئيسة من الهاليت (الملح الشائع، $NaCl$) والجبس ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) والأنهيدريت ($CaSO_4$) والحجر الجيري متداخل التطبّق، ويتوافر الحجر الجيري والجبس والأنهيدريت في أحواض المتبخرات البحرية جميعها تقريبًا، ويتوافر الهاليت ومعادن البوتاسيوم في عدد قليل منها، وتستخدم موادّ المتبخرات بصورة واسعة في الصناعة والزراعة[11].

يمكن أن تشكّل ترسّبات متطبّقة قد تمتدّ إلى مئات الكيلومترات، وبأسمكة تصل إلى آلاف الأمتار، حيث تمثّل المتبخرات نتائج تبخّر مياه البحر في الأحواض الضحلة المنعزلة، التي تكون دورتها محدودة، وتتوزّع الترسّبات المختلفة في كثير من أحواض المتبخرات البحرية، في نطاقات عريضة تعكس التغيّر في الملوحة والعوامل الأخرى، التي تتحكّم في ترسيب المتبخرات، بمعنى أنّ موادّ مختلفة يمكن أن تترسّب في الوقت نفسه، في



الشكل (14–9): ترسّبات ملح أبيض يتكوّن في ديث فالي، كاليفورنيا.

يترسّب الملح كلّما تبخّرت المياه

(Willard Clay/Tony Stone Worldwide)

الأجزاء المختلفة لحوض المتبخرات، وعلى سبيل المثال: يترسّب الهاليت عندما تكون المياه الملحية عالية الملوحة، ويترسب الجبس عندما تكون الملوحة أقلّ من ذلك، انظر الشكل (14–9)، تُعدّ الترسّبات الاقتصادية لمعادن متبخرات البوتاسيوم نادرة نسبيًّا، ومن الممكن أن تتشكّل من المياه الملحية عالية التركيز.

تتكوّن ترسّبات المتبخرات اللابحرية نتيجة تبخّر البحيرات في الأحواض المغلقة، ومن الممكن أن يؤدّي النشاط التكتوني الصدوع مثـ ً، إلى

تكوين أحواض مغلقة، بحيث تدخل إليها المياه، ولا تخرج منها، ومن أجل المحافظة على البيئة المفضّلة لترسيب معادن المتبخرات، لا بدّ أن يستمرّ النشاط التكتوني في رفع الحواجز عبرالمخارج الممكنة للمياه، أو تخفيض قاع الحوض بوتيرة أسرع مما تستطيع الرسوبيات رفعه، حتى في ظل هذه الظروف، لا يمكن أن تتشكّل ترسّبات المتبخرات الاقتصادية، إلّا إذا توافرت كمّيات كافية من الأملاح الذائبة المغسولة عن طريق المياه السطحية الجوفية، في اتّجاه الحوض من المناطق المرتفعة المحيطة، وأخيرًا، وفي حال توافر الظروف الملائمة كافة، بما فيها توافر الحوض المعزول وتوافر الجريان السطحي المناسب بالأملاح الذائبة، فقد لا تتكوّن المتبخرات اللابحرية الملائمة، مثل كربونات الصوديوم والبوريت، إلّا إذا كانت جيولوجية المرتفعات المحيطة بالحوض ملائمة، وتنتج جريانًا سطحيًّا يحتوي على كمّيات ملائمة من محاليل المعادن المذكورة[11].

تضغط بعض طبقات المتبخرات من الصخور التي تعلوها، وتتحرّك، ثمّ تثقب أو تدخل في الصخور التي تعلوها، ويُعدّ اندفاع الملح الذي يدعى القباب الملحية شائع الحدوث، في الجلف كوست في الولايات المتّحدة، ويحدث أيضًا في شمال غرب ألمانيا وفي إيران ومناطق أخرى، حيث تُعدّ القباب الملحية في منطقة الجلف كوست مهمّة اقتصاديًّا؛ لأنّها:

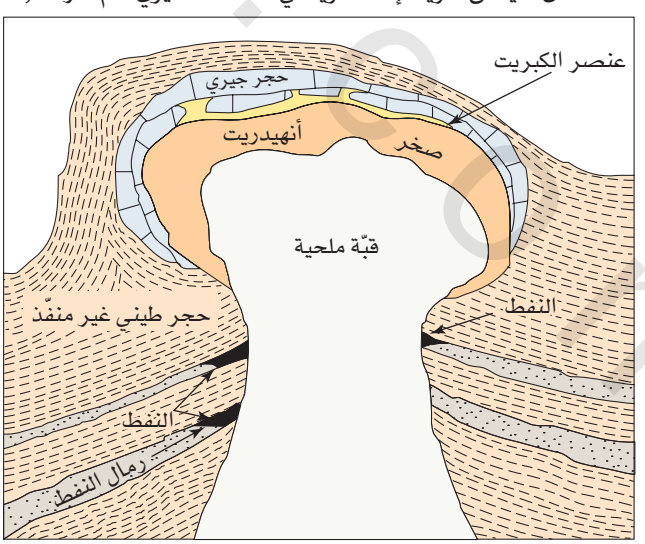
- مصدر مهمّ للملح النقي تقريبًا، وبعضها يحتوي على ترسّبات واسعة لعنصر الكبريت، انظر الشكل (14-10).
- بعضها يحتوي على احتياطيات النفط في جوانبه.

وتُعدّ القباب الملحية من الناحية البيئية مهمّة أيضًا؛ لأنّها مناطق دائمة للتخلّص من النفايات المشعّة؛ ولأنّ القباب الملحية تتّجه نحو التحرّك، فإنّ ملاءمتها تكون بصفتها مواقع للتخلّص من النفايات الخطرة.

تُعدّ المتبخرات الناتجة عن مصادر المياه الملحية في الولايات المتّحدة كبيرة، انظر الجدول (14-4)، "مفترضين عدم إمكانية حدوث نقص في فترة زمنية طويلة؛ وبسبب استمرار اعتماد كثير من المتبخرات "قيمة الموقع"؛ لأنّ شحن هذه السلع المعدنية يزيد من أسعارها، لذلك يبقى اكتشاف ترسّبات عالية الجودة قريبًا من مناطق استهلاكها هدفًا مهمًّا[11].

عمليات بيولوجية Biological Processes

الكائنات الحية قادرة على تكوين كثير من المعادن، مثل معادن الجير الكلسية والمغنيسية في الأصداف، والفوسفات الكلسي في العظام، فبعض هذه المعادن لا يمكن تكوينه إلّا عضويًّا في الغلاف الحيوي، تمّ تعرّف (31)



الشكل (14-10): قبّة ملحية مقطع عرضي خلال قبّة ملحية نموذجية تشبه النوع المتوافر في جلف كوست/ الولايات المتّحدة.

الجدول (14-4): مصادر المتبخرات والمياه الملحية في الولايات المتّحدة، معبر عنها بسنوات الإمداد محسوبة على معدّلات الاستهلاك المحلي.

السلعة	المصادر المميّزة المعروفة[أ] الاحتياطيات والترسّبات شبه الاقتصادية [ب]	المصادر غير المكتشفة المصادر المفترضة [جـ] والتخمينية [د]
مركّبات البوتاسيوم	100 سنة	عمليًّا غير قابلة للنضوب
الملح	1000+ سنة	غير محدودة
الجبس والأنهيدريت	500+ سنة	عمليًّا غير قابلة للنضوب
كربونات الصوديوم	6000 سنة	5000 سنة
كبريتات الصوديوم	700 سنة	2000 سنة
البوريت	300 سنة	1000 سنة
النيتريت	غير محدودة (الهواء)	غير محدود (الهواء)
السترونشيوم	500 سنة	2000 سنة
البروم	غير محدود (مياه البحر)	غير محدود (مياه البحر)
اليود	100 سنة	500 سنة
كلوريد الكالسيوم	100+ سنة	1000+ سنة
ماغنسيوم	غير محدود (مياه البحر)	غير محدود (مياه البحر)

(أ) مصادر معروفة: ترسّبات محدودة معروفة، تمّ تقييمها (أو لم يتمّ) من حيث الامتدادات والنوعية، التي تحتوي على معادن، من الممكن استغلالها بصورة اقتصادية أوّلًا، باستخدام الظروف التكنولوجية والاقتصادية الحالية.

(ب) الاحتياطيات: ترسّبات معروفة، بحيث يمكن استغلال المعادن منها بفائدة، مستخدمين العوامل التكنولوجية والاقتصادية المتوافرة.

(جـ) مصادر مفترضة: ترسّبات معدنية غير مكتشفة، سواء كانت قابلة للاستغلال أو نوعيتها شبه اقتصادية، ولكن متوقع توافرها من الناحية الجيولوجية؛ لأنّها متوافرة في مناطق معروفة.

(د) مصادر تخمينية: ترسّبات معدنية غير مكتشفة، سواء كانت قابلة للاستغلال أو شبه اقتصادية، قد تتوافر في مناطق مجهولة أو بصورة غير معروفة أو غير تقليدية.

المصدر: Smith G. I., et al., 1973, U.S. Geological Survey Professional Paper 820.

معدنًا ينتج بالطرق البيولوجية، إذ تسهم المعادن من أصل حيوي بصورة مهمّة في توضّعات (خامات) الصخور الرسوبية[12].

صخور الفوسفات مثال جيّد للترسّبات المعدنية، الناتجة عن طريق عمليات جيولوجية مرتبطة بالتوضع البحري الرسوبي، حيث يشيع توافر الصخور الرسوبية الغنية بالفوسفات في بعض الولايات الغربية وفي تينيسي وكارولينا الشمالية وفلوريدا، والمعدن الشائع الحامل للفوسفات في هذه الصخور هو الأباتيت، وهو فوسفات كلسي له ارتباط بالعظام والأسنان، إذ تستخلص الأسماك والكائنات البحرية الأخرى الفوسفات من ماء البحر لتكوّن الأباتيت، حيث ينتج الترسّب المعدني من تراكم عظام الأسماك والأسنان الغنية بالفوسفات، ويُعدّ منجم الفوسفات المعروف بوادي العظم، (40 km) تقريبًا شرق تامبا-فلوريدا، الأغنى في العالم في إنتاج

الشكل (14–11): **منجم فوسفات في فلوريدا بصورة حفرة مفتوحة كبيرة**، تتشكّل التضاريس من أكوام النفايات المعدنية، إضافة إلى برك المياه الساكنة. تمّت استعادة بعض الأراضي في الجزء العلوي من الصورة، لتستعمل للرعي.

(Phillipe Diederich/The New York Times).

الفوسفات، انظر الشكل (14–11). هذا الترسّب (الخام) صخور رسوبية بحرية تتكوّن جزئيًّا من الحيوانات البحرية التي عاشت قبل (10–15) مليون سنة، عندما كان وادي العظام في قاع بحر ضحل، وقد بلغ إنتاج هذا المنجم ثلث إنتاج العالم من الفوسفات.

يُعدّ الجوانو (براز الطيور) مصدرًا آخر غنيًّا بالفوسفور، يتجمّع حيث المستعمرات الكبيرة من الطيور البحرية ذات الأعشاش في مناخ جافّ، حتى يتحوّل الجوانو إلى كتلة جافّة تشبه الصخر، وهكذا يتبيّن أنّ تكوّن أحد المصادر الرئيسة للفوسفات، يعتمد على ظروف بيولوجية وجغرافية فريدة.

عمليات التجوية Weathering Processes

التجوية مسؤولة عن تركيز بعض الموادّ للدرجة التي يمكن معها استخراجها بصورة مربحة، تستطيع عمليات التجوية إنتاج ترسّبات خامات متبقية في المادة المجوّاة، ومن ثم، التسبّب في إثراء ثانوي لخام منخفض الدرجة.

ترسّبات الخامات المتبقية Residual Ore Deposits

يمكن أن تُنتج التجوية الشديدة للصخور والتربة ترسّبات متبقية للموادّ التي ذائبيتها أقلّ، وتكون لها قيمة اقتصادية، على سبيل المثال: تشكل التجوية الشديدة لبعض الصخور نوعًا من التربة، يسمّى لاتريت (تربة متبقية مشتقة من صخور نارية غنية بالألومنيوم والحديد)، إذ تركز عمليات التجوية نسبيًّا الأكاسيد المائية غير الذائبة للألومنيوم والحديد، بينما تختار التربة والعمليات الحيوية العناصر الأكثر قابلية للإذابة، وتستخلصها، فإذا تركز أكسيد الألومنيوم المتبقي بصورة كافية، فإنّه يكوّن خامًا للألومنيوم يعرف بالبوكسيت، انظر الشكل (14–12)، وتتوافر ترسّبات مهمّة للنيكل والكوبالت أيضًا في تربة اللاتريت، التي تنشأ من الصخور النارية الغنية بالمعادن الفيرومغنيسية[13].

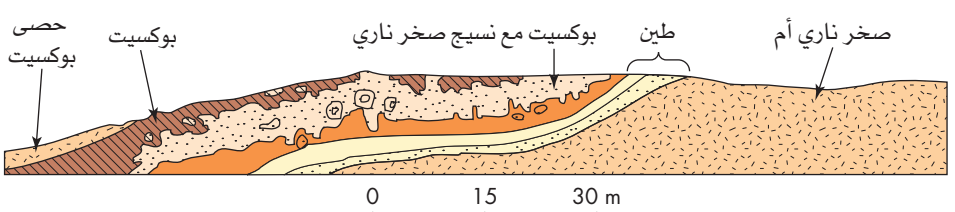
عادة ما تُكوّن الترسّبات غير الذائبة للذهب الطبيعي ترسّبات المتبقيات، بمعنى أنّها لا تتحرك من مكانها إلّا إذا تعرضت للحت والتعرية، وتراكمت في تجوية الصخور وفي التربة، حيث تتزايد إمكانية تراكم خامات المعادن غير الذائبة عندما يكون الصخر الأم مكوّنًا من الموادّ الذائبة نسبيًّا، مثل الحجر الجيري، انظر الشكل (14–13)، أضف إلى ذلك أنّ ترسّبات المتبقيات في تجوية الصخور والتربة، يجب أن تُقيّم بحرص؛ وذلك لأنّ نسبتها تكون عالية جدًّا في الأجزاء السطحية والقريبة من السطح، مقارنة بنسبتها في الصخر الأم غير المتعرض للتجوية.

الإثراء الثانوي Secondary Enrichment

التجوية مشمولة أيضًا في عمليات الإثراء الثانوي، لإنتاج ترسّبات خامات الكبريتيدات من خامات أوّلية متدنية التركيز، حيث يكون الخام الأولي المحتوي على فلزات، مثل كبريتيد الحديد والنحاس والفضة، بالقرب من السطح، في حالة تماس مع ماء التربة الحمضي قليلًا في بيئة غنية بالأكسجين، وعندما تتأكسد الكبريتيدات، فإنّها تذوب مكوّنة محاليل غنية بحمض الكبريتيك وكبريتات الفضة والنحاس، فتهاجر هذه المحاليل إلى الأسفل، منتجة طبقة مغسولة خالية من الخامات المعدنية. يبيّن الشكل (14–14) خامًا أوليًّا تعرّض للأكسدة والغسيل، وتستمر الأكسدة تحت المنطقة المغسولة مع استمرار حركة المحاليل الكبريتية إلى الأسفل في اتجاه مستوى المياه الجوفية، وإذا لم يكن الأكسجين متوافرًا تحت مستوى المياه الجوفية، فإنّ المحاليل تترسب بصفتها كبريتيدات، ما يؤدّي إلى زيادة المحتوى المعدني للخام الأولي إلى (10) أضعاف تركيزه الأصلي تقريبًا، بهذه الطريقة يصبح الخام متدني الدرجة أفضل، وتتحسن كذلك نوعية الخام عالي الدرجة[7، 9].

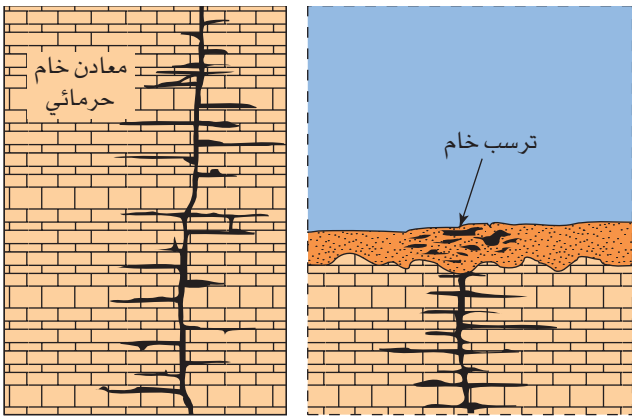
توافر غطاء من أكسيد الحديد على السطح يشير إلى إمكانية توافر خام غني تحته، إلّا أنّ هذا ليس صحيحًا دائمًا، وتوافر كبريتيد الحديد (مثلًا البيريت) في الخام مهم، خاصة لتكوّن نطاق إثراء ثانوي، وقلّما يحدث الإثراء الثانوي دونه؛ لأنّه بتوافر الأكسجين والماء يكوّن حمض الكبريتيك، وهو مذيب مهم، أضف إلى ذلك أنّ النفاذية الكافية للخام، عامل آخر يساعد على تكوّن ترسّبات خامات الإثراء الثانوي، حتى يسمح للماء والمحاليل بالهجرة الحرة إلى الأسفل، فإذا توافرت هذه الشروط في خام أولي، فإنّ غطاءه من أكسيد الحديد المحمرّ يشير بالتأكيد إلى أنّ الإثراء الثانوي قد حدث بالفعل[7، 9].

أصبحت ترسّبات عدّة متناثرة مجدية اقتصاديًّا؛ بسبب الإثراء الثانوي الذي أدّى إلى تركيز الفلزّات المتناثرة، فعلى سبيل المثال: التركيز الثانوي لخامات النحاس المتناثرة في ميامي وأريزونا، زاد درجة الخام من أقلّ من



الشكل (14–12): **خام الألومنيوم مقطع في منجم بوكسيت برودن–آركنساس.** تكوّن البوكسيت بالتجوية الشديدة للصخور النارية الغنية بالألومنيوم.

(After G. Mackenenzie, Jr., et al., 1958, U. S. Geological Survey Professional Paper 299)

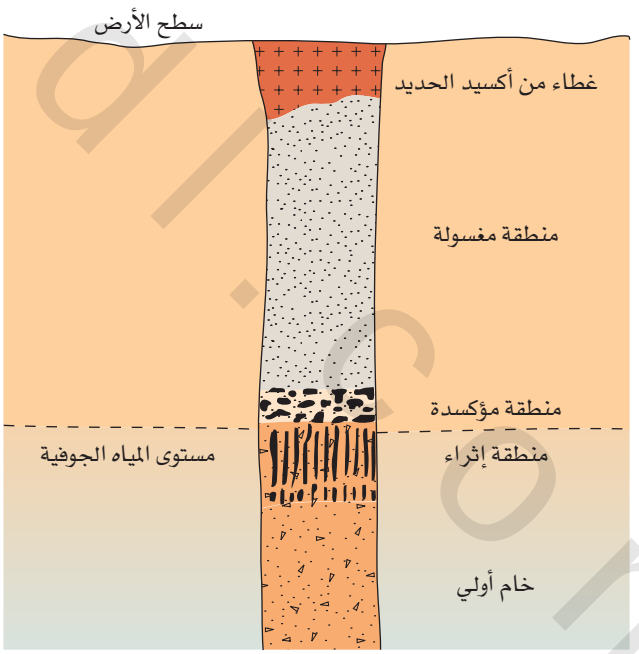


الشكل (14–13) ترسّب خام متبقٍّ، يظهر كيف يمكن أن يكون ترسب خام من المعادن غير الذائبة عن طريق التجوية، وكيف تكون التربة المتبقية، عندما يتجوّى الحجر الجيري المحتوي على الخام، تتركز المعادن في التربة المتبقية. *(From Foster, 193, General Geology, 4th ed., Columbus, OH: Charles E. Merril)*

(1%) نحاس إلى (5%)، في بعض نطاقات الإثراء المحلية[7، 9].

معادن أخرى من البحر
Other Minerals from the Sea

تُعدّ الموارد المعدنية في ماء البحر أو قاع المحيط مترامية الأطراف، وفي بعض



الشكل (14–14) الإثراء الثانوي، نطاقات نموذجية تتكوّن خلال عمليات الإثراء الثانوي. معادن خام الكبريتيدات في الخام الأولي تأكسدت وتغيرت، ثم غُسلت من المنطقة المؤكسدة، وأُعيد ترسيبها في منطقة الإثراء. الغطاء من أكسيد الحديد ذو لون محمر عادة، ويساعد على تحديد ترسّبات الخام التي تعرضت للإثراء.

الأحيان غير محدودة، مثل الماغنسيوم الذي استخلص أول مرة من ماء البحر في أمريكا عام 1940م، وبحلول عام 1972م أنتجت إحدى الشركات في تكساس (80%) من الماغنسيوم المحلي في أمريكا، باستخدام ماء البحر بوصفه مصدرًا للمادة الخام، وفي عام 1993م، استخلصت (3) شركات في تكساس ويوتا وواشنطن الماغنسيوم من ماء البحر والمحاليل الملحية للبحيرات ومن الدولوميت (معدن مكوّن من كربونات الكالسيوم والماغنسيوم).

قد يشكل قاع المحيط العميق في النهاية موقع فورة المعادن الآتية: الخامات الكبريتيدية الكتلية المرتبطة بالفوّهات أو الفتحات الحرمائية، وعقيدات أكسيد المنجنيز، وقشور المنجنيز الغنية بالكوبالت.

ترسّبات الكبريتيدات Sulfide Deposits

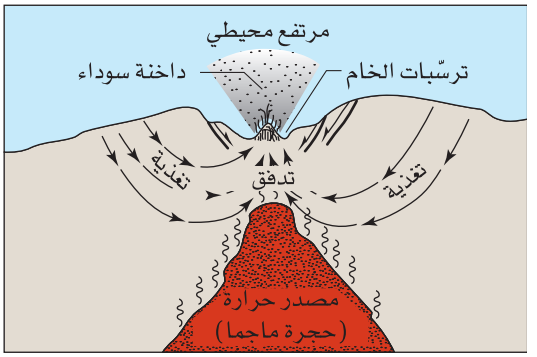
تنتج الترسّبات الكبريتيدية الكتلية، المحتوية على الزنك والنحاس والحديد وكمّيات قليلة من الفضة، عند حدود الصفائح المتباعدة (الحيود المحيطية) بقوى تكتونية الصفائح، حيث يجبر الضغط الناتج عن وزن آلاف الأمتار من الماء عند الحيود مياه البحر الباردة، على التحرّك عميقًا في شقوق الصخر المتعددة، فتسخن عن طريق الصهير الصاعد إلى درجة حرارة تصل إلى (350 °C)، وينتج ضغط الماء الساخن فتحات تعرف بسحائب الدخان الأسود، ينبعث منها ماء حار داكن اللون غني بالمعادن على هيئة عيون حارة، انظر الشكل (14–15)، ويؤدّي دوران ماء البحر إلى غسل الصخور المحيطة وإزالة الفلزّات، التي كانت قد ترسبت عند اندفاع الماء الغني بالمعادن في مياه البحر الباردة، فتترسب معادن الكبريتيدات قرب الفتحات مشكلة تكاوين غنية بالفلزّات تشبه الأبراج، ولهذه الفتحات الساخنة أهمّية بيولوجية خاصة في أنّها تدعم توافر مجموعة فريدة من الحيوانات، تشمل الأصداف الكبيرة والديدان الأنبوبية والسرطعانات البيضاء، فأنظمة التبيؤ في هذه الحيوانات، التي تعتمد في وجودها على مركبات الكبريت المنبعثة من سحائب الدخان الأسود بعملية تصنيع كيميائي، تقابل عملية التمثيل الضوئي، التي تدعم توافر أنظمة التبيؤ المعروفة كلّها على سطح الأرض.

إنّ امتداد ترسّبات معادن الكبريتيدات على طول الحيود المحيطية غير معروف بصورة جيّدة، على الرغم من أنّها تُعدّ مواقع مناسبة لبعض الخامات، يبدو أنّه من غير المحتمل أن يكون استخراج مثل هذه الترسّبات أو استخلاصها ذا جدوى اقتصادية في المستقبل القريب، بالتأكيد، يجب أن يقيّم التدهور البيئي المحتمل، مثل تناقص جودة المياه والتلوّث بالرسوبيات، بحذر قبل المباشرة في أيّ نشاط تعديني.

إنّ دراسة تكوّن ترسّبات الكبريتيدات الكتلية في منطقة الحيود المحيطية، يساعد الجيولوجيين على فهم بعض الترسّبات المعدنية على اليابسة، فيعتقد مثلًا، أنّ ترسّبات الكبريتيدات الكتلية، التي يتمّ تعدينها في قبرص، كانت قد تكوّنت قرب حيد محيطي، وأنّها ارتفعت بعد ذلك إلى السطح.

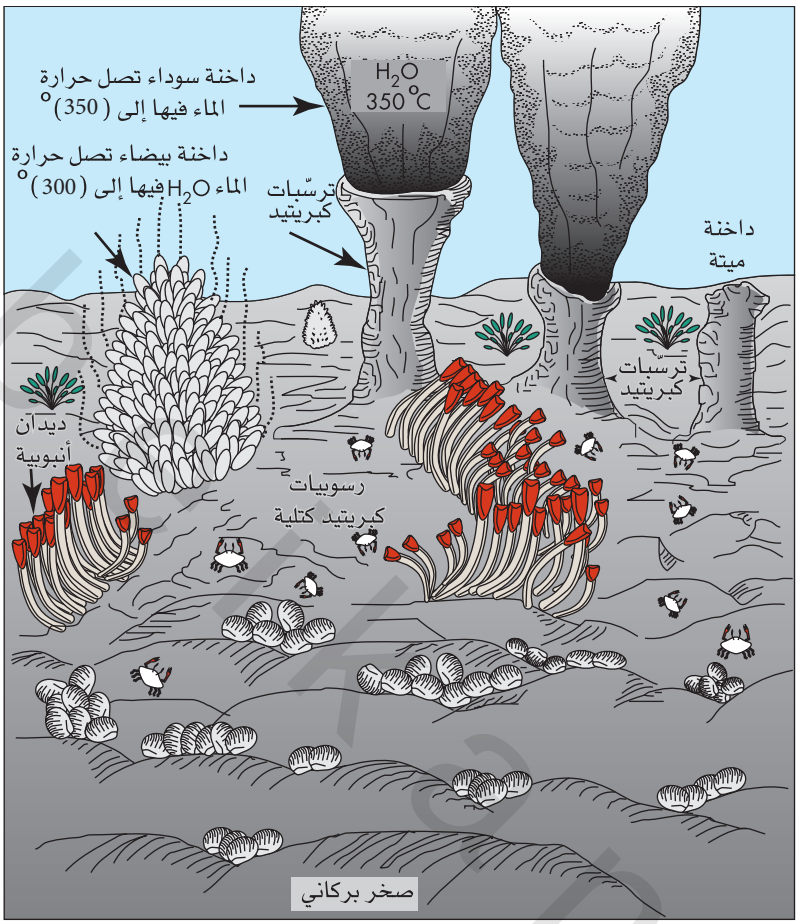
عقيدات أكسيد المنجنيز Manganese Oxide Nodules

تغطي **عقيدات أكسيد المنجنيز** مساحات شاسعة من قاع المحيط العميق، انظر الشكل (14–16)، وتحتوي على المنجنيز (24%)، والحديد (14%)، مع نحاس ثانوي (1%)، وكوبالت (0.25%)، وتتوافر العقيدات في المحيط الاطلسي بعيدًا عن فلوريدا، إلّا أنّ التجمعات الأغنى والأكثر انتشارًا، تتوافر في مناطق واسعة في شمال شرق المحيط الهادي ووسطه وجنوبه، حيث



(أ)

(جـ)



(ب)

الشكل (14–15): الحيد البحري والترسّبات الكبريتيدية. (أ) بيئة حيد بحري حرمائية. (ب) تفاصيل سحائب الدخان السوداء، حيث تتكوّن ترسّبات الكبريتيدات الكتلية. (جـ) صورة لداخنة سوداء. *(R. Hayman/USGS)*

تغطي (50% – 20) من قاع المحيط هناك[14].

تكون عقيدات المنجنيز متمايزة عادة وملتحمة محليًّا، فتكوّن رصفات مستمرة. على الرغم من أنها قد تتوافر أحيانًا مدفونة بالرسوبيات، إلّا أنّها تتوافر عادة بصورة رسوبيات على السطح في قاع المحيط، ويتراوح قطرها من بضعة ملمترات إلى بضعة ديسيمترات (بعضها بحجم الكرات الزجاجية الصغيرة –الجلول– إلى حجم الطابة في لعبة البيسبول)، حيث تتكوّن كلّ عقيدة من نواة حولها طبقات متراكزة من أكاسيد الحديد والمنجنيز والموادّ الأخرى، وقد تكون النواة جزءًا من عقيدة مكسرة أو من صخر بركاني، وفي بعض الأحيان أحفورة، والجدير بالذكر أنّ العقيدات تكثر في أعماق (5–7 km) كم من قاع المحيط، حيث إنّه أقلّ تراكم للرسوبيات هناك[9، 14].

أصل العقيدات غير مفهوم بصورة كاملة، إلّا أنّه يفترض أنها تتكوّن بطرق عدّة، والنظرية الأكثر احتمالًا، أنّها تتكوّن من مادة مجوّاة من القارات، ومنقولة بالأنهار إلى المحيطات، حيث تحمل تيارات المحيط المادة إلى موقع الترسيب في الأحواض المحيطية العميقة، وقد تأتي المعادن المكوّنة للعقيدات أيضًا من البراكين تحت البحرية، أو تنبعث خلال العمليات الفيزيائية أو البيوكيميائية والتفاعلات، التي تحدث بالقرب من حد التماس

الشكل (14–16): عقيدة أكسيد منجنيز من قاع المحيط. يظهر هنا مقطع عرضي في العقيدة، لاحظ الترسّبات الفلزية والتركيب الحلقي. قطر العقيدة قرابة (7 cm).

Open Knowledge

بين الماء والرسوبيات خلال توضع الترسبات وبعده[14].

يشمل تعدين عقيدات المنجنيز رفع العقيدات عن القاع إلى سفينة التعدين، قد يتم عمل هذا باستخدام جهاز شفط أو كشط، وعلى الرغم من أنّ تعدين العقيدات يبدو ممكنًا من الناحية التكنولوجية، إلّا أنّ الإنتاج سوف يكون مكلفًا مقارنة بتعدين المنجنيز على الأرض، إضافة إلى ذلك، هناك شكوك حول العقيدات، وكذلك سيتسبّب تعدين العقيدات في تخريب كبير لقاع البحر، وتدهور في نوعية مياهه محليًّا، ما يؤدّي إلى إثارة مخاوف بيئية[7].

قشور المنجنيز الغنية بالكوبالت تتوافر القشور المحيطية الغنية بالكوبالت والمنجنيز في وسط وجنوب غرب المحيط الهادي على أطراف الجبال تحت البحرية والحيود البركانية والجزر، ويتغيّر تركيز الكوبالت مع عمق الماء: أقصى تركيز (2.5%) عند أعماق (1–2.5 km)، ومتوسط سمك القشرة قرابة (2 cm)، وعمليات تكوّنها غير مفهومة جيّدًا، يقوم علماء المساحة الجيولوجية الأمريكية بدراسة طبيعة القشور وامتدادها، وما تحتويه من نيكل وبلاتين ونحاس وموليبدنوم (إضافة إلى الكوبالت) [15].

14-3 الأثر البيئي للتطوير المعدني
ENVIRONMENTAL IMPACT OF MINERAL DEVELOPMENT

يخشى كثير من العلماء والمراقبين الآخرين، أنّ تزايد عدد السكان سيؤدّي إلى زيادة الطلب على الموارد المعدنية، وأنّ العالم سيواجه أزمة موارد، زيادة على ذلك، ستحدث هذه الأزمة قريبة من الحد في قدرتها على امتصاص التلوّث، المرتبط بالمعادن في كلّ من الهواء والماء والموارد البيولوجية[6]، سنأخذ هذه الاحتمالية في الحسبان عند مناقشتنا للتأثيرات البيئية المتعلقة بالتطوير المعدني (باستثناء موارد الطاقة، انظر الفصل الخامس عشر).

يعتمد الأثر البيئي لاستغلال المعادن على عوامل، مثل طرق التعدين، والظروف الهيدرولوجية المحلية، والمناخ، وأنواع الصخور، والتضاريس وعوامل أخرى ذات علاقة، وزيادة على ذلك، يتغيّر التأثير بحسب مرحلة تطوير المورد، فمرحلة الاستكشاف والاختبار تنطوي على تأثيرات بيئية أقلّ من التأثيرات في مراحل الاستخراج والمعالجة، فالفترة الزمنية من الاستكشاف إلى الإنتاج المنجمي، قد تمتد سنوات عدّة (أو أكثر) في الولايات المتّحدة، وتعتمد جزئيًّا على الاهتمامات أو المخاوف البيئية، في الدول ذات التشريعات الأقل تعقيدًا، الفترة الزمنية بين الاستكشاف والإنتاج المنجمي قد تكون أقصر كثيرًا، إلّا أنّ التغاضي عن التشريعات البيئية أو عدم تطبيقها، يمكن أن يؤدّي إلى تدهور مهم في الماء والهواء وأنظمة التبيؤ الأخرى.

الأثر البيئي للاستكشاف والاختبار المعدني
Impact of Mineral Exploration and Testing

تتباين أنشطة الاستكشاف والاختبار للترسّبات المعدنية من جمع وتحليل معطيات يُحصل عليها بالاستشعار عن بعد إلى العمل الميداني، الذي يشمل التخريط السطحي والحفر وجمع معطيات جيوكيميائية وجيوفيزيائية، وبوجه عام، فإنّ تأثير الاستكشاف على البيئة يكون أقلّ ما يمكن، إذا تم توخي الحذر في المناطق الحساسة، مثل بعض المناطق الجافة، والمستنقعية، والأراضي دائمة التجمد، فبعض الأراضي الجافة تغطيها طبقة رقيقة من الحصى فوق بضعة سنتمترات من الغرين الناعم، حيث تعرف طبقة الحصيات هذه، التي تحمي المادة الأكثر نعومة، من حت الريح بالرصفة الصحراوية، حيث يتعرّض الغرين الناعم للحت، عند اضطراب هذه الطبقة بشق الطرق أو الأنشطة الأخرى، ما يؤدّي إلى إضعاف الخواص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية للتربة، في المنطقة المحاذية مباشرة، وكذلك تكوّن ندب (حفر) فيها تستمر سنوات عدّة، وفي مناطق أخرى، مثل المستنقعات والتندرا الشمالية، فإنّ التربة الرطبة الغنية بالمادة العضوية، تجعل الأرض حساسة حتى بالنسبة إلى حركة النقل الخفيف.

تأثير استخراج المعادن ومعالجتها (أو تركيزها)
Impact of Minera l Extraction and Processing

يحتمل أن يكون لتعدين الموارد وتركيزها تأثير سيئ وضار في الماء والهواء والموارد البيولوجية، وإضافة إلى التأثيرات المباشرة لهذه الأنشطة، يمكن أن تؤدّي إلى تأثيرات اجتماعية ضارة في التبيؤات، عن طريق زيادة الطلب على السكن والخدمات الأخرى في مناطق التعدين، فهذه التأثيرات جزء من الثمن الذي ندفعه مقابل انتفاعنا باستهلاك المعدن، وتوقع أن يتم تعدين الموارد دون التأثير في أيّ من جوانب البيئة المحلية أمر غير واقعي، إلّا أنّه يتعين أن نبقي التدهور البيئي أقلّ ما يمكن، وقد يكون هذا صعبًا جدًّا؛ لأنّه مع استمرار زيادة الطلب على المعادن، تتناقص ترسّبات المعادن عالية التركيز؛ لذا، لتأمين معادن أكثر نطوّر عمليات أكبر لتعدين ترسّبات أكثر فقرًا، فعام 2000م بلغ مجموع ما استعمل من الأرض لأغراض التعدين (0.2%) من مساحة الأرض، أو ($300000\ km^2$).

حاليًّا، أقل من (0.3%) أو ($29000\ km^2$)، من مساحة أراضي الولايات المتّحدة الكلية، مخصص للمناجم السطحية والمحاجر، وبالمقارنة، فإنّ البرية ومياهها وأراضي المتنزّهات الوطنية تغطي قرابة ($500000\ km^2$) من الأرض، حيث يميل التدهور البيئي إلى الازدياد خارج حدود الحفريات ومناطق المعامل في كلّ من المناجم السطحية وتحت السطحية، إضافة إلى ذلك، تغيّر عمليات التعدين الكبيرة تضاريس سطح الأرض، عن طريق إزالة الموادّ من بعض المناطق وإلقاء النفايات في مناطق أخرى، وفي أحسن الأحوال، ينتج عن هذه الأنشطة تغيّر نحو الأسوأ في المناظر الطبيعية الأصلية، وأحيانًا تدهور بيئي شديد، فتأثير عملية تعدين واحدة ظاهرة محلية أو موضعية، لكن التواجدات المحلية المتعدّدة تمثل في النهاية مشكلة أكبر.

تستخدم النفايات من المناجم في الولايات المتّحدة قرابة (60%) من الأرض المخصصة للتعدين لاستخراج المعادن، وتستخدم الـ (40%) المتبقية في التخلص من نفايات التعدين، فمعظم النفايات صخور أو موادّ فوق الخام (تزال للوصول إلى الخام)، وتُعدّ هذه عملية كبيرة للتخلص من النفايات التعدينية، التي تمثل (40%) من النفايات الصلبة كلّها، التي يتم إنتاجها في أمريكا[7]، فخلال آخر (100) سنة تراكم (50) بليون طن تقريبًا، من نفايات التعدين في الولايات المتّحدة، بمعدل سنوي (1–2) بليون طن[16].

openkeriton

أنواع طرق التعدين وتأثيراتها
Types of Mining and Their Impact

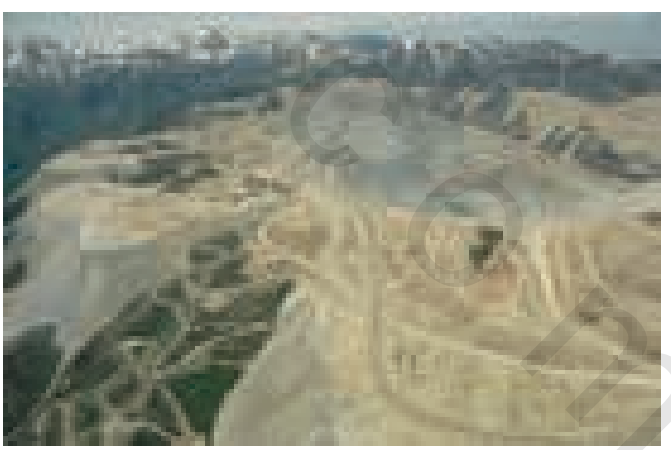
تُعدّ أنواع طرق التعدين وتأثيراتها، عمل مناجم سطحية أو تحت سطحية في منطقة ما، قضية رئيسة لها صبغة عملية في التعدين، والتعدين السطحي اقتصادي أكثر، لكنّ تأثيراته البيئية المباشرة أكثر، وقد تغيّرت النزعة في السنوات الأخيرة من التعدين الباطني إلى التعدين السطحي، واستعمال مناجم سطحية كبيرة من نوع الحفرة المفتوحة، مثل منجم نحاس خانق بنجهام النهري في يوتا، انظر الشكل (14–17). هذا المنجم من أكبر الحفريات التي حفرها الإنسان، إذ يغطي مساحة ($8\ km^2$)، وأقصى عمق فيه ($800\ m$).

يستخدم الغسل أحيانًا بوصفه أسلوبًا أو طريقة تعدين، وهو عملية ارتشاح السائل خلال الترسب، على سبيل المثال: تحتوي بعض ترسّبات الذهب على حبيبات ذهب ناعمة متناثرة، فإذا استخدمت العمليات التقليدية في استخلاصه، فسيكون هذا غير مجدٍ من الناحية الاقتصادية، إذ تستخدم في بعض هذه الترسّبات طريقة تسمّى رشح الأكوام، حيث يرش محلول سيانيد مخفف على كوم خام الذهب المكسر، ما يؤدّي إلى إذابته الذهب في أثناء ارتشاح السيانيد خلال الكوم، ثمّ تجمع المحاليل الحاملة للذهب في بركة مبطنة بالبلاستيك، وتعامل لاستخلاصه منها، وتجدر الإشارة هنا إلى وجوب التحكم في طريقة التعدين (الاستخلاص) ومراقبتها بحرص شديد؛ لأنّ السيانيد سام جدًّا، فلو وقع حادث، فالاحتمال كبير لأن تسبّب عملية التعدين تلوّثًا شديدًا للمياه الجوفية، لذا، تُجرى الأبحاث لتطوير رشح موضعي بالسيانيد، لإلغاء الحاجة إلى إزالة الخام من الأرض، إلّا أنّ التحكم في محلول الرشح ومراقبته سوف يمثل مشكلة صعبة[17].

تلوّث الماء Water Pollution تتعرّض موارد الماء للتدهور بسبب التعدين، إذ يتغيّر التصريف السطحي أحيانًا في موقع التعدين، وقد ترتشح المياه الجارية من الهطل خلال مادة النفايات، غاسلة العناصر الشحيحة والمعادن، وقد تكون العناصر الشحيحة المغسولة من نفايات التعدين، والمتركزة في الماء أو التربة أو النبات، سامة تسبّب الأمراض للناس والحيوانات الأخرى، التي تشرب الماء، وتأكل النبات، وتستخدم التربة. تشمل العناصر الشحيحة التي يحتمل أنّها ضارة الكادميوم والكوبالت والنحاس والرصاص والموليبدنوم والزنك، ومن الواضح أنّ الأشرطة البيضاء في الشكل (14–18)، ترسّبات معدنية غسلت من نفايات منجم للزنك في كولورادو، إذ يمكن للترسّبات الشبيهة أن تغطي الصخور في الأنهار مسافة كيلومترات عدّة (في اتجاه حركة مياه النهر) بعيدًا عن منطقة التعدين، ومن الممكن أن تساعد البرك التي أُنشئت خصيصًا لتجميع المياه الجارية الملوثة، إلّا أنّه من غير المتوقع أن تقضي على المشكلات كلها.

يمكن أن تتلوّث المياه الجوفية أيضًا بعمليات التعدين، عندما يحدث تماس بين النفايات والمياه السطحية التي تتحرك ببطء، فارتشاح المياه السطحية أو حركة المياه الجوفية خلال أكوام النفايات، يتسبّب في رشح المعادن الكبريتيدية، التي قد تلوّث المياه السطحية، وتسبب مشكلات تدعو إلى القلق؛ لأنّ استعادة المياه الجوفية الملوثة صعبة ومكلفة جدًّا.

ومن الممكن أيضًا أن تتسبّب المناجم المهجورة في كثير من المشكلات الخطيرة، فعلى سبيل المثال: التعدين الجوفي للرصاص والزنك في المنطقة التي تلتقي فيها ولايات كانساس وميسوري وأوكلاهوما، بدأت في أواخر القرن (19)، على الرغم من توقعها في بعض المناطق عام



الشكل (14–17): منجم نحاس خانق بنجهام بالقرب من مدينة (Salt Lake) في يوتا. لاحظ الحجم الكبير لنفاية المنجم، الأكوام الكبيرة للمادة فاتحة اللون في اليسار وفي الأجزاء السفلية من الصورة. *(Michael Collier)*

الشكل (14–18): المياه الجارية من نفايات المناجم. منجم للزنك في كولورادو، الأشرطة البيضاء ترسّبات معدنية مغسولة من نفايات المنجم، وكثير من مثل هذه المواقع ناتجة عن الممارسات التعدينية السابقة في الولايات المتّحدة، وغير مسموح بها الآن. *(Edward A. Keller)*

1960م، إلّا أنّها تسبّبت في مشكلات تلوّث مائي خطرة منذ ذلك الوقت، فالمناجم الممتدة إلى عمق (100 m) تحت مستوى المياه الجوفية ضخت إلى أن جفت، عندما كانت المناجم منتجة، وقد فاضت المياه على بعض المناجم منذ توقف التعدين، وجرت إلى القنوات القريبة، فالماء حمضي جدًّا والمعادن الكبريتيدية في المنجم تتفاعل مع الأكسجين والمياه الجوفية لتكوّن حمض الكبريتيك، وهي مشكلة تعرف بـ "تصريف المياه الحمضية للمناجم" (انظر نظرة متفحصة، تصريف مياه المناجم الحمضية في الفصل الثالث عشر).

كانت هذه مشكلة حادة في وادي القار في أوكلاهوما، لدرجة أنّ وكالة حماية البيئة عدّتها عام 1982م منطقة النفايات الأخطر، وفي بيوت – مونتانا مثال آخر على تصريف المياه المنجمية، حيث منجم بيركلي، وهو منجم شريطي للنحاس، عمقه أكثر من (200 m) ممتلئ بمياه حمضية سامة وتشكل بحيرة، انظر الشكل (14–19)، فقد حافظت المضخات على إبقاء الحفرة جافة، لكنها لم تعد تشغل بعد إغلاق المنجم عام 1982م، ويعتقد بعض الناس، أن البحيرة ستصبح مكانًا جاذبًا للسياح، لكنها لآخرين تهديد متزايد للبيئة، إذ يجب إخافة الطرائد في المنطقة؛ لكي لا تقترب من المنطقة، أمّا الطيور التي تهبط إلى البحيرة، فتموت بعد أن تشرب من مائها، وهناك قلق متزايد من أن البحيرة قد ترتشح مياهها في يوم من الأيام، فتلوّث المياه الجوفية لمنطقة "بيوت"[18]، وقد طوّرت خطط في التسعينيات من القرن الماضي لتنظيف الموقع، تضمنت معاملة الماء الملوث، وقد بدأ ذلك فعلًا من عام 2003م.

يمكن أن يرتبط تصريف المياه الحمضية للمناجم في بعض الحالات مع السياحة والتزلج، حيث ينشأ هذا الارتباط؛ لأنّ أماكن تزلج، مثل تلك المتوافرة في المقاطعات التعدينية في كولورادو، وتستخدم ماكينات لصنع الجليد في بداية موسم التزلج ونهايته، عندما يكون هطل الثلج الطبيعي أقلّ احتمالًا، إذ يتطلب صنع الجليد توافر الماء، وعندما تُسحب المياه من الأنهار الملوثة بمياه التصريف الحمضية من المناجم، فقد ينتشر التلوّث

الشكل (14–19): منجم مغلق مملوء بالمياه السامة. حفرة بيركلي بالقرب من بيوت – مونتانا، بحيرة ملوثة في منجم نحاس مغلق (مهجور).
(Calvin Larsen/Photo Researchers, Inc.)

إلى الأرض بانصهار الجليد، وقد تواجه منتجعات التزلج وضعًا لا تحسد عليه، إذا سحبت المياه الغنية بالأحماض لصنع الجليد، للإبقاء على أماكن التزلج مفتوحة؛ لأنّ هناك خطرًا لحدوث تلوّث في الأرض، فعدم إنتاج جليد صناعي، اختيار قد يحدّ من استعمال المنتجعات السياحية، وينتج عنه خسارة مادية، ومن الجدير بالذكر أنّ منتجعات التزلج التي تُصنّع الجليد من ماء غير ملوث مأخوذ من الجداول، قد تتسبّب أيضًا في حدوث مشكلات، تتمثل بعدم حدوث تخفيف للملوثات في اتجاه مصب النهر.

بصفته مثالًا أخيرًا على تأثيرات تلوّث الماء من مناطق التعدين، فكر فيما حدث في إسبانيا ربيع عام 1998م، فقد بدأت هذه الحادثة بالقرب من قرية آرنال كولارو المناجم القريبة من سفيل، حيث انطلقت مياه التعدين الحمضية، المحتوية على خليط سام من الكادميوم والزنك والرصاص والزرنيخ والسيانيد والفلزّات الثقيلة الأخرى بصورة مفاجئة، عندما انهار جزء عرضه (50 m) من مقطع سد ترابي يحتوي على النفايات، واندفعت قرابة (7) ملايين m^3 من المياه العادمة السامة إلى الأسفل، في اتجاه نهر جواديامار، الذي ينساب في واحدة من أغنى المناطق البيئية – الأراضي الرطبة- في أوروبا، ولحسن الطالع،أنّ التدفق حصل عندما كانت المياه الجوفية تتحرك بصورة طبيعية من خزّان دونانا إلى سطح النهر، وليس العكس، فالنتائج ستكون أكبر بكثير، لو كانت حركة المياه العادمة السامة في اتجاه الخزّان المائي.

شملت المنطقة المتأثرة متنزّه دونانا الوطني، وهو أكبر محمية طبيعية في أوروبا، ومكان لجذب السياح، يمتد على أرض مساحتها (75000) فدان، والمتنزه موطن لكثير من الطيور النادرة، واللينكس اللبيري (قطة برية)، والسلاحف وأجناس أخرى، وقد تحرك المهندسون بسرعة لإنشاء حواجز واحتواء الفيضان، وتجميع الطين السام ومعاملته في موقع قريب من السد؛ لمنع دخوله إلى منطقة المتنزه الوطني.

أشارت التقارير إلى أنّ هذه الحادثة دمرت أشجار فواكه ومحاصيل أخرى، عندما غمرت مياه الفيضان السامة والطين الأرض (مارتينيز، اتصال شخصي، 1998م)، وقد نتج عن انطلاق الكيميائيات السامة سلسلة من السمية، فالسرطعانات الميتة والمحتضرة، وكذلك الأسماك والحيوانات الأخرى، بما فيها بعض الخيول التي يحتمل أنّها شربت من المياه الملوثة أو مسّت الطين المسموم، اجتذبت الطيور والحيوانات الأخرى التي تتغذى على الفضلات، ما أدّى إلى توسيع انتشار السمية في النظام البيئي، فاستخدم العاملون المتفجرات والنواسف لإخافة الطيور وآكلات الفضلات ومنعها من الاقتراب من المناطق السامة، ثمّ قام المئات من العاملين والمتطوعين، بتجميع أعداد كبيرة من الأيائل والأسماك والسرطعانات والضفادع الميتة في الأيام التي أعقبت الحادث.

وقع هذا الحادث فجأة، وقدكان من المتوقع حدوثه، إذ كانت هناك بعض الإشارات التحذيرية المبكرة منذ سنوات خلت، بما فيها تساؤلات حول معالجة الموادّ السامة القريبة جدًّا من المتنزه الوطني، إضافة إلى أنّ الشركة التي تدير المنجم عانت مشكلات مشابهة في أمريكا الجنوبية (J. Chacon، اتصال شخصي، 1998م).

هذا الحادث بالتأكيد، رفع وتيرة الوعي أو الاهتمام البيئي في إسبانيا وأجزاء أخرى من العالم، بما فيها مناطق التعدين في غرب الولايات المتّحدة، الخاصة بالأخطار البيئية المحتملة المتعلقة بإدارة نفايات التعدين الخطرة.

تلوّث الهواء عمليات الاستخراج والتجهيز لها آثار ضارة في نوعية الهواء، فقد أطلقت المصادر كمّيات كبيرة من الملوثات إلى الغلاف الجوي، بما فيها ثاني أكسيد الكبريت، وهو مكوّن رئيس في المطر الحمضي والثلج، وقد يؤثر الغبار من مناجم المعادن في موارد الهواء، على الرغم من حقيقة توخي الحرص أحيانًا، من أجل تقليل الغبار برش الماء على الطرق والمناطق الأخرى المنتجة له.

أضف إلى ذلك، أنّ المناجم تسهم في تلوّث الماء، فيمكن أن تسهم أيضًا في تلوّثه حتى بعد توقفها عن العمل، على سبيل المثال: تسربت الغازات السامة من مناطق المناجم المهجورة، في منطقة لتعدين الفحم في روسيا إلى البيوت، من خلال الطوابق السفلية، وستغلق المناجم في النهاية في أماكن متعددة في العالم، عندما يصبح العمل فيها غير مربح، وهكذا، فإنّ التخطيط لتلافي التلوّث المستقبلي للماء والهواء نتيجة للأنشطة التعدينية السابقة، هدف مهم للناس الذين يعيشون في المناطق التي كان التعدين، ومازال يشكل الاستعمال الرئيس للأرض فيها.

التاثير في البيئة البيولوجية التغيرات الفيزيائية في الأرض والتربة والماء والهواء المرتبطة بالتعدين بصورة مباشرة أو غير مباشرة تؤثر في البيئة البيولوجية، حيث تشمل التأثيرات المباشرة موت النباتات والحيوانات والناس؛ بسبب الأنشطة التعدينية أو التماس مع التربة السامة أو الماء من المناجم (انظر نظرة متفحصة: التعدين والسمية)، أما التأثيرات غير المباشرة، فتشمل التغيّرات التي تحدث في تدوير الأغذية في الكتلة الحية للكائنات كلّها (biomass)، وتمايز الأجناس، واستقرارية أنظمة التبيؤ، فهذه التأثيرات غير المباشرة ناتجة عن تغيرات في وفرة المياه الجوفية أو السطحية أو في نوعيتها، والتدفق الدوري أو المفاجئ للملوثات، من خلال انهيار الحواجز والبرك أو من خلال تحويلات الماء أو حدوث خرق في الحواجز، يدمر الأنظمة البيئية المحلية أيضًا.

نظرة متفحّصة A CLOSER LOOK

التعدين والسمية Mining and Toxicity

مرض إتايي-إتايي Itai-Itai Disease

أدّى هذا المرض الخطر والمزمن المعروف بـ "إتايي-إتايي" إلى موت الكثير من الناس في اليابان في حوض نهر زنتسو، فهذا المرض المؤلم جدًّا (إتايي معناها آخ...آخ) يهاجم العظام، فيؤدّي إلى ترققها وهشاشتها فتنكسر بسهولة، وقد انتشر المرض مع نهاية الحرب العالمية الثانية تقريبًا، عندما دمرت البيئة الصناعية اليابانية، وتمّ تجاهل الممارسات الجيدة في التخلص من النفايات بصورة كبيرة، فعمليات تعدين الزنك والرصاص والكادميوم ألقت نفاياتها في الأنهار، واستعمل المزارعون القاطنون في المناطق السفلى من النهر هذه المياه لاحتياجاتهم الخاصة وفي الزراعة، لم يُعرف سبب المرض سنوات، ولكن عام 1960م، عندما أُعيد فحص عظام الضحايا وأنسجتهم، تبيّن أنّها تحتوي على تراكيز عالية من الزنك والرصاص والكادميوم.

قياس تراكيز الفلزّات الثقيلة في حوض نهر زنتسو بيّن أنّ عيّنات المياه، كانت تحتوي على أقل من جزء في المليون من الكادميوم و(50) جزءًا في المليون من الزنك، وقد تركزت هذه الفلزّات في رسوبيات النهر وعلى الأخص في النباتات، سبب الزيادة في التركيز من الماء إلى الرسوبيات إلى النباتات مثال على ما يسمى بالتعظيم البيولوجي، وقد تبيّن في إحدى مجموعات المعطيات المكوّنة من (5) عينات أنّ متوسط الكادميوم في التربة الملوثة (6) أجزاء في المليون، وكان المتوسط (1250) جزءًا في المليون في جذور النباتات، و(125) جزءًا في المليون في الرز المحصود، بينت التجارب فيما بعد، أنّ الفئران التي غذّيت على حمية غذائية تحتوي على (100) جزء في المليون من الكادميوم فقدت (3%) من أنسجتها العظمية الكلية، وتلك التي غذّيت على حمية غذائية تحتوي على (30) جزءًا في المليون كادميوم و(300) جزء في المليون زنك و(150) جزءًا في المليون نحاس، فقدت (33%) تقريبًا من نسيجها العظمي الكلي[20].

على الرغم من أنّ قياسات الفلزّات الثقيلة في ماء حوض نهر زنتسيو وتربته ونباتاته، أظهرت نتائج متباينة نوعًا ما، إلّا أنّ النزعة العامة واضحة، وهي أنّ العلماء متأكدون من أنّ الفلزّات الثقيلة، خصوصًا الكادميوم عندما يكون متوافرًا بتراكيز، تبلغ بضعة أجزاء في المليون في التربة أو في الرز، هي السبب في مرض إتايي إتايي[20].

الزئبق وتعدين الذهب Mercury and Gold Mining

استعمل الزئبق في تعدين الذهب منذ أيام الرومان، قبل بضعة آلاف من السنين، فهذا الفلز الطبيعي في حالته السائلة مفيد في تعدين الذهب؛ لأنّ حبيباته تلتصق مع الفلز السائل، ما يجعل استعادة الذهب أسهل، وقد عومل قرابة (1.14) بليون متر مكعب من الحصى الحامل للذهب، عن طريق التعدين المائي في الولايات المتّحدة، خلال فورة الذهب في كاليفورنيا من 1850م-1880م، وقد استخدم الزئبق خلال تلك الفترة للمساعدة على استعادة الذهب، ويقدّر أنّ قرابة (4500) طن متري من الزئبق فقدت، وتسربت في البيئة، وأنّ جزءًا كبيرًا منه ما زال يشق طريقه في اتجاه مجاري الأنهار والسهول الفيضية، آتيًا في الأصل من مناطق التعدين في سييرا نيفادا إلى منطقة الخليج في سان فرانسيسكو، وهناك قلق بشأن هذا الزئبق؛ لأنّه فلز سام، ويمكن أن يدمر خلايا الدماغ عند التعرض إليه، مسببًا مرض التهاب الأعصاب والجهاز العصبي، المتمثّل في الإعياء وحدوث خدر في الأذرع والأرجل[21].

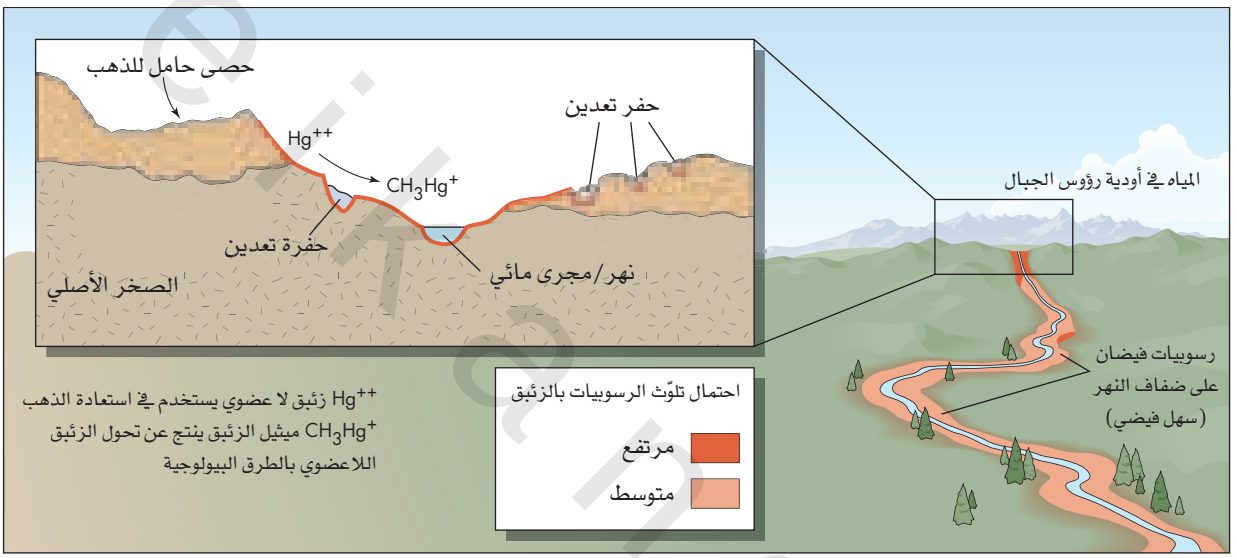
القضايا البيئية الرئيسة المتعلقة بسمية الزئبق في كاليفورنيا ومناطق التعدين الأخرى تشمل الآتي:

- بقع ساخنة من تلوّث الزئبق في مواقع التعدين.
- تلوّث الرسوبيات بالزئبق، وانتقاله في اتجاه مصبات الجداول والأنهار.
- التراكم البيولوجي للزئبق من الماء إلى الرسوبيات والنباتات والحيوانات والناس.
- قضايا صحّية ناتجة عن تعرض الناس والكائنات الأخرى للزئبق.

obeikandl.com

يبيّن الشكل (14 د) مسارات الرسوبيات الملوثة بالزئبق من منطقة تعدين للذهب. لاحظ أنّ الزئبق اللاعضوي استعمل في البداية لاستعادة الذهب، لكنّ العمليات البيولوجية في البيئة تُحوّله إلى ميثيل الزئبق، وهذه أكثر صور الزئبق سمية، إذ إنّ سمية الزئبق واحتمالية تلوّث الرسوبيات أعلى ما تكون في منطقة التعدين، لكن نتيجة لانتقال الرسوبيات الحاملة للزئبق، فقد تستمر المشكلات لكيلومترات عدّة في اتجاه جريان النهر.

وصل سعر الذهب إلى (3) أضعاف ما كان عليه عام 2001م؛ بسبب هذا الارتفاع تُطوّر مناجم الذهب في مناطق متعددة من العالم، مثل إندونيسيا وأمريكا الجنوبية وإفريقيا، حيث الملايين من المعدِّنين الفقراء، الذين يحتالون على العيش معتمدين على البيئة السطحية الأقرب بغسل الذهب عن الأتربة (panning) (الشكل 14 د)، ويعتقد أنه يتم استعمال (500) طن من الزئبق سنويًّا في التعدين، ما يعرض ملايين المعدِّنين وعائلاتهم لتأثيرات الزئبق السامة، ففي منطقة واحدة في جزيرة بورنيو الإندونيسية أُزيلت أجزاء كبيرة من الغابة الاستوائية بغية تعدينها، وقد نتج عن ذلك أرض نفاية فيها برك تحتوي على الزئبق، حيث قامت الولايات المتّحدة والاتحاد الأوروبي في السنوات الأخيرة، بتصدير كمّيات كبيرة من الزئبق لأقطار يتم تعدين الذهب فيها، وقد تمّ أخيرًا إصدار قانون في الولايات المتّحدة، لحظر مثل هذه الصادرات أو تقليلها، خصوصًا للأقطار التي يتم التعدين فيها باستعمال الزئبق، دون مراعاة إجراءات الأمن والسلامة بصورة صحيحة.



الشكل (14 د): الزئبق وتعدين الذهب. (أ) مسارات تلوّث بالزئبق في الرسوبيات، من مناطق التعدين في اتجاه جريان المياه السطحية والأنهار (ب) فصل القطع الصخرية الحاملة للذهب عن الموادّ الأخرى بالغسل.

(modified from USGS). (Indonesia AP photo, Dita Alangkara)

التأثير الاجتماعي: التأثير الاجتماعي للتعدين واسع النطاق، ينتج عن التدفق السريع للعمال إلى مناطق غير مهيأة للتطوير، حيث يحدث ضغط على الخدمات المحلية بما فيها تزويد المياه، وأنظمة المجاري والتخلص من النفايات الصلبة، والمدارس والبيوت المستأجرة، ويحدث تحول سريع في استخدام الأرض من مراعٍ مفتوحة أو غابات أو أرض زراعية إلى مجتمع مدني، فعدد السكان الكبير يُشكل ضغطًا على مناطق الاستجمام القريبة والمناطق البرية، التي يمكن أن يكون بعضها في حالة اتزان تبيُّئي هشّ، ويؤثر نشاط الإنسان والتمدن في مجاري الأنهار المحلية، من خلال التلوّث بالرسوبيات وتدهور جودة المياه وزيادة المياه الجارية، كذلك تتراجع نوعية الهواء بسبب العدد الأكبر للسيارات، والغبار من الإنشاءات، وتوليد الطاقة لتشغيل المعدات والأجهزة.

قد تنتج التأثيرات الاجتماعية الضارة عن تنقل العاملين في التعدين أو ترحيلهم؛ بسبب إغلاق المناجم واستخدام الأجهزة الأتوماتيكية؛ وذلك لأنّ البلدات الكبيرة المحيطة بالمناجم الكبيرة، تبدأ بالاعتماد في دخلها على العاملين في التعدين، وقد ظهر في الغرب الأمريكي القديم ما يعرف "ببلدات الأشباح" نتيجة إغلاق المناجم، ويؤثر حاليًّا سعر الفحم والمعادن الأخرى بصورة مباشرة في حياة كثير من البلدات الصغيرة، خصوصًا في الجزء الأمريكي من جبال الأبلاش، الذي أخذ حصة كبيرة من إغلاقات المناجم، فقد نتج هذا الإغلاق للمناجم جزئيًّا عن تدني أسعار الفحم وارتفاع كلف التعدين.

التشريعات البيئية الخاصة بالصناعة التعدينية أحد أسباب ارتفاع تكاليف التعدين، وإساءة استعمال كلّ من الأرض المعدِّنين أدّى إلى بلورة سياسات تعدين وتكوين اتحادات للعمال، وقد ساعدت التشريعات على جعل التعدين أكثر أمنًا، وسهّلت استعادة الأرض، إلّا أنّ بعض شركات التعدين تعتقد، ولها بعض الحق في ذلك، أنّ التشريعات ليست مرنة بدرجة كافية، مثلًا، إذا كانت التلال الأصلية قد سُويت، فيمكن بعد الانتهاء من التعدين استعمال بعض المناطق بوصفها أرضًا زراعية، إلّا أنّ التشريعات البيئية تتطلب أن تعاد الأرض إلى طبيعتها التلّية الأصلية، على الرغم من أنّ التلال تمثّل أرضًا زراعية متدنية الجودة.

تقليل الآثار الناجمة عن تطوير المعادن
Minimizing the Impact of Mineral Development

تقليل التأثيرات البيئية المحتملة لتطوير المعادن إلى الحدّ الأدنى، يتطلب فحص الدورة الكاملة لاستعمال المعدن، من الاستكشاف إلى الاستخراج ومرورًا بالتصفية أو التنقية وانتهاءً بتحضير المنتوج وإدارة النفايات، وتحرز الأقطار المتطورة تكنولوجيًّا تقدّمًا في عكس الضرر الناجم عن التعدين في الماضي، وفي تقليل تأثير عمليات الاستخراج والتركيز التي تتمّ حاليًّا، ونقل هذه المعرفة إلى الدول النامية، حيث يحدث الكثير من التعدين، مسؤولية الدول المتطورة، إذ تنظم القوانين البيئية الانبعاثات والتخلص من النفايات، وتتطلب إجراءات استصلاح بعد الانتهاء من عمليات التعدين، إضافة إلى ذلك، فإنّ التقنيات الجديدة، خصوصًا التقنية الحيوية، توفر للتعدين طريقة صديقة للبيئة.

التشريعات البيئية Environmental Regulation معظم التدهور البيئي الرئيس المرتبط بالتعدين في الدول المتطورة، هو بقايا لممارسات هي الآن ممنوعة أو محظورة بحسب التشريعات البيئية، وما حدث في منطقة (Sudbury)، أونتاريو-كندا مثال آخر على تدهور بيئي شديد ناتج عن صهر خام النيكل، مدة امتدت (100) سنة، نتج عنه أرض عقيمة بحدود ($100\ km^2$)، وهناك ($350\ km^2$) دمرت بصورة كبيرة من ملوثات الهواء المنبعثة من المصاهر، انظر الشكل (14-20)، إذ أنتج ترسيب الزئبق والزرنيخ والكادميوم من بين الفلزّات الأخرى، تأثيرات مدمرة على الأرض والماء والموارد البيولوجية في المنطقة، واحتوت انبعاثات المصاهر أيضًا على كمّيات هائلة من ثاني أكسيد الكبريت، أي إنّها وفرت مصدرًا رئيسًا للمطر الحمضي[7].

حاليًّا، على المصاهر في الولايات المتّحدة أن تلتزم بمواصفات الموادّ المنبعثة في الهواء، تماشيًا مع قانون الهواء النظيف، وبناءً عليه، أعادت المصاهر في الولايات المتّحدة استرجاع ثاني أكسيد الكبريت الناتج عن انبعاثات مصاهرهم كلّه. سنّت كندا تشريعًا مشابهًا للهواء النظيف، وقلّلت مصاهر المعادن في منطقة (Sudbury) انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت

الشكل (14-20): تأثيرات المصاهر تُعدّ الأرض القاحلة بالقرب من بحيرة **سانت شارلز**، سودبري، أونتاريو -كندا، أحد أكبر مصادر المطر الحمضي في أمريكا الشمالية. يؤدّي المطر الحمضي وتوضّع الفلزّات الثقيلة السامة الناتجة عن انبعاثات المصاهر (مداخنها الطويلة مرئية في الأفق) إلى قتل الغطاء النباتي. استعيد جزء كبير من الغطاء النباتي بعد التقاط هذه الصورة. *(Bill Brooks/Alamy)*

Obeikandl.com

نظرة متفحّصة A CLOSER LOOK

منجم هوم ستيك-ولاية داكوتا الجنوبية Homestake Mine, South Dakota

منجم ذهب هوم ستيك في داكوتا الجنوبية، الذي أغلق عام 2001م بعد (125) سنة من التعدين، يعطي مثالًا مهمًّا على الاستعمال الحالي للتقنية الحيوية، في تنظيف بيئة كانت قد تدهورت بسبب النشاط التعديني. هدف دراسة هوم ستيك اختبار استعمال الأكسدة الحيوية، باستخدام البكتيريا لتحويل الملوثات في الماء إلى مركبات آمنة من الناحية البيئية[23].

ينتج عن عملية التعدين في هوم ستيك تدفّق للماء من منجم الذهب إلى جدول سمك السلمون المرقط القريب، حيث تحتوي المياه العادمة غير المعالجة على تراكيز من السيانيد ضارة بالسلمون، فطريقة المعالجة التي طوّرت في منجم هوم ستيك تستخدم البكتيريا، التي لها قدرة طبيعية على أكسدة السيانيد إلى نيترات غير سامة[22]، ويتم تجميع البكتريا من برك نفايات المنجم وتزرع؛ لكي تسمح بحدوث نشاط بيولوجي، عندما يكون تركيز السيانيد مرتفعًا، ومن ثم بناء مستعمرات منها على أسطح دوارة خاصة، يمرّ الماء الملوث من خلالها قبل أن يسيل في جدول النهر، حيث تقوم البكتيريا أيضًا، باستخلاص الفلزّات النفيسة من المياه العادمة، التي يمكن تركيزها بطرق أخرى[22]. لقد أدّى هذا النظام في هوم ستيك إلى إنقاص السيانيد في المياه العادمة من (10) أجزاء في المليون تقريبًا إلى أقلّ من (0.2) جزء في المليون، أي أقلّ من التركيز الذي تتطلبه مواصفات جودة (نوعية) المياه في جداول السلمون، لذلك تصرف المياه إلى هذه الجداول؛ نظرًا لأنّ عملية تخفيض السيانيد ينتج عنها كمّيات زائدة من الأمونيا في الماء، فقد تم تصميم معالجة ثانوية بالبكتيريا، لتحويل الأمونيا إلى مركبات نيترات، حتى يكون الماء الذي يصرف مطابقًا لمعايير جودة مياه الجداول[23].

إلى النصف تقريبًا، وهناك تخفيضات أخرى مبرمجة في المستقبل، وقد حصلت بعض الاستعادة الطبيعية نتيجة نقصان الملوثات المنبعثة من مصاهر المعادن، وزيدت هذه الاستعادة بزراعة الأشجار وإضافة الجير إلى البحيرات؛ للمساعدة على معادلة الأحماض، إضافة إلى الاستعادة الطبيعية، أدّت الإجراءات المذكورة إلى استعادة قرابة (40%) من الغطاء النباتي من الأرض القاحلة المحيطة بالمصاهر[7].

تُعدّ استعادة الأرض التي تتكوّن من تحضيرها للاستعمالات المستقبلية بعد توقف أنشطة التعدين، أمرًا ضروريًّا، إذا كان التعدين قد تسبّب في تأثيرات ضارة، وإذا كانت الأرض سوف تستعمل لأغراض أخرى، فاستعادة الأرض المستخدمة في التعدين متطلب قانوني هذه الأيام، وقد استُعيدت قرابة (50%) من الأرض المستغلة في الصناعات التعدينية في الولايات المتحدة. سيتم مناقشة طرق استعادة المناجم في الفصل الخامس عشر، عندما نناقش تأثير تعدين الفحم في البيئة.

التقنية الحيوية Biotechnology عمليات بيولوجية متعددة تستخدم لاستخلاص الفلزّات وتجهيزها، ويحتمل أن يكون لها عواقب اقتصادية وبيئية مهمّة، إذ تستعمل في **التقنية الحيوية** عمليات مثل الأكسدة الحيوية والامتصاص والغسل الحيويين والهندسة الوراثية للميكروبات، ولها قدرة كبيرة على استخلاص الفلزّات، وتقليل التدهور البيئي إلى أدنى حدّ (انظر نظرة متفحّصة: منجم هوم ستيك-جنوب داكوتا). إنّ التقنية الحيوية ما زالت في مهدها، واستعمالاتها المحتملة بدأ تطبيقها في صناعات التعدين والفلزات[22، 23].

الغسل المساعد حيويًّا إحدى التقنيات الحيوية الواعدة، وتستعمل فيه كائنات دقيقة لاستعادة الفلزات، في هذه التقنية تقوم البكتيريا بأكسدة خام الذهب المكسر والمتوافر في خزّان، فتحرّر الذهب المتناثر الذي يمكن عندها أن يعامل بالغسيل عن طريق السيانيد، وعلى الرغم من إعادة تدوير السيانيد خلال التعدين، إلّا أنّه سام جدًّا، وإذا تدفّق إلى البيئة عن غير قصد، فيمكن أن يلوث موارد المياه الجوفية، وقد تمّ بناء مصنع في نيفادا لإنتاج (50000) أونصة تروي ذهبية سنويًّا، باستخدام الغسيل المساعد حيويًّا، هذه الطريقة بديل جيّد لاستخلاص الذهب اقتصاديًّا وبيئيًّا[22].

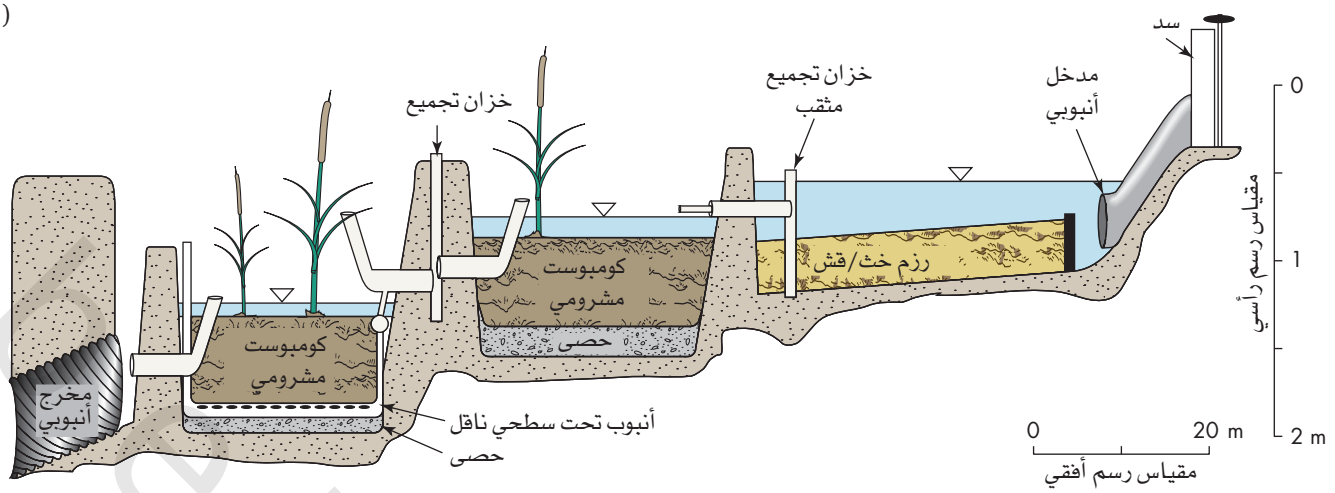
تستخدم التقنية الحيوية التي طوّرها مكتب التعدين الأمريكي، واختبرها في معاملة مياه المناجم الحمضية، فالأراضي الرطبة التي أنشئت في مئات المواقع، استغلت النباتات القادرة على تحمل الأحماض في إزالة الفلزّات، ومعادلة الحمض باستخدام الأنشطة البيولوجية، انظر الشكل (14-21)، البكتريا المؤكسدة وتلك المختزلة للكبريتات تؤديان دورًا مهمًّا في الأراضي الرطبة، وما زالت الأبحاث مستمرة لتطوير تصميم محسن للأرض الرطبة، يحتاج إلى القليل من الصيانة[22].

باختصار تقليل التأثيرات البيئية المرتبطة بتطوير المعادن إلى الحد الأدنى، قد يتبع مسارات عدّة، هي:

- **التشريعات البيئية التي تتصدى لمشكلات**، مثل تلوّث الرسوبيات والماء والهواء الناتجة عن الجوانب المختلفة لدورة المعدن، ويمكن أن تتصدى تشريعات إضافية أخرى إلى استعادة الأرض المستخدمة في التعدين (انظر نظرة متفحصة: تحويل المنجم القريب من جولدن-كولورادو إلى ملعب جولف).
- **معاملة النفايات في الموقع وبعيدًا عنه**؛ تقليل مشكلات التعدين الموقعية والبعيدة عن الموقع بالتحكم في تلوّث الرسوبيات والماء والهواء، باستخدام الأساليب الهندسية وطرق المحافظة الجيّدتين، هدف عام.
- **ممارسة ألـ (3Rs) في إدارة النفايات، وهي**: تقليل كمّيات النفايات المنتجة (reduce)، إعادة استخدام (re-use) الموادّ في قناة النفايات قدر الإمكان، تعظيم فرص إعادة التدوير (recycle).

obeikandl.com

(أ)



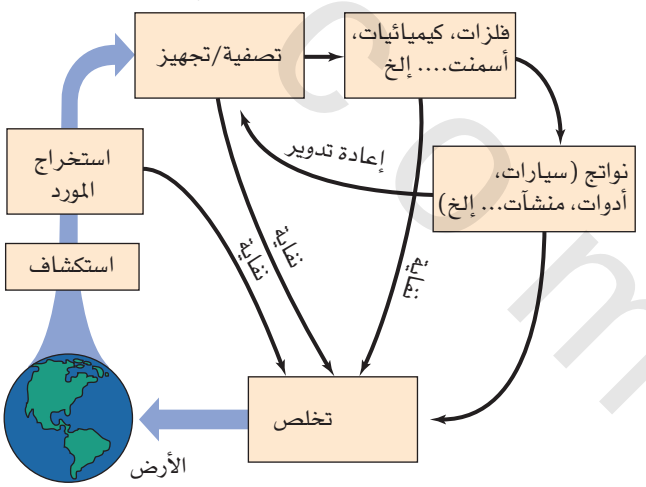
(ب)

الشكل (14–21): التقنية الحيوية ونفايات التعدين. (أ) رسم توضيحي للأراضي الرطبة، التي أنشئت لاستخدام التقنية الحيوية في تنظيف المياه العادمة الناتجة عن المناجم. تستدعي الخطة إنشاء برك ضحلة عدّة مبطّنة بالكومبوست أو التربة العليا أو الحجر الجيري المكسر. النبات المستخدم هو نبات ذيل القطة. تعيش البكتيريا في الكومبوست في قاع البرك التي تم إنشاؤها. (ب) صورة للأراضي الرطبة المنشأة صناعيًا.
(National Institute for occupational Safety & Healthy)

14-4 إعادة تدوير الموارد المعدنية
RECYCLING MINERAL RESOURCES

يكشف الشكل الخاص بدورة الموارد المعدنية، أنّ كثيرًا من مكوّناتها لها علاقة بالتخلص من النفايات انظر الشكل (14–22). في الحقيقة، ترتبط التأثيرات البيئية الأوّلية لاستغلال مورد معين، بما يتم إنتاجه من نفايات، التي تقوم بإنتاج ملوثات قد تكون سامّة للبشر، وخطيرة على أنظمة التبيؤ الطبيعية والغلاف الحيوي، ومنظرها غير مريح للعين، وقد تؤدّي إلى تدهور الهواء والماء والتربة، إضافة إلى النفاية والمعادن الأخرى التي لا يعاد تدويرها، والتي تؤدّي إلى استنزاف الموارد المعدنية غير المتجددة، إذ لا فائدة منها للمجتمع البشري، فإعادة تدوير الموارد إحدى الطرق المستخدمة لتقليل هذه النفايات.

ومن الممكن أن تُعدّ النفايات في بعض أجزاء دورة المعدن خامات؛ لأنّها تحتوي على موادّ يمكن إعادة تدويرها واستعمالها، لتوفير الطاقة



الشكل (14–22): تتولد النفايات في أجزاء متعددة من دورة المعدن. مخطّط انسيابي لدورة الموارد المعدنية.

نظرة متفحّصة A CLOSER LOOK

تحويل منجم قريب من جولدن في كولورادو إلى ملعب جولف

Mine Near Golden, Colorado, Is Transformed into a Golf Course

ملعب جولف رابح للجوائز، موجود الآن على أرض كانت منذ (100) سنة خلت منجم حفرة مفتوحة (محجر) في صخر الحجر الجيري بالقرب من مدينة جولدن، كولورادو (انظر الصورة الافتتاحية لهذا الفصل). أنتج هذا المنجم الطين من بين طبقات الحجر الجيري لعمل الطوب، واستخدم الطوب بوصفه مادة بناء في مباني منطقة دنفر، بما فيها حصن كولورادو الحكومي، وقد احتوى موقع التعدين على حفر غير مرئية، تحتوي على جدران رأسية من الحجر الجيري، إضافة إلى مطمر للنفايات، فالمنطقة ذات مناظر خلابة في سفوح وجبال روكي، وتحوّلت حاليًّا، جروف الحجر الجيري التي تركت بعد عملية التعدين، بما يتكشف فيها من نباتات وأحافير ديناصور، إلى ملعب جولف أطلق عليه اسم (Fossil Trace)، وهذا يعكس إرثه الجيولوجي، حيث تؤدّي الدروب إلى أفضل المناطق لرؤية الأحافير، وهذا حافز إضافي لزيارة المنطقة. الأراضي الرطبة المنشأة إضافة إلى (3) بحيرات لتخزين المياه الجارية من الفيضانات، تساعد على حماية جولدن من خطر الفيضانات السريعة، إذ كانت الرغبة في إنشاء ملعب جولف عمومي منذ البدء في برنامج الاستعادة، وقد بيّنت استعادة المنجم، أنّ المناجم السابقة يمكن استعادتها وتحويلها إلى ممتلكات قيمة.

نادي جولف طريق الأحافير حالة فريدة لاستعادة منجم، إلّا أنّ كلّ موقع محتمل للاستعادة، فيه فرص تعتمد على الظروف المحلية الفيزيائية والهيدرولوجية والبيولوجية.

أو المنتجات[24، 25]. أضف إلى ذلك، أنّ ممارسة إعادة استخدام موادّ النفايات ليست أمرًا جديدًا، وبعض الفلزّات، مثل الحديد والألومنيوم والنحاس والرصاص أُعيد استعمالها سنوات عدّة، مثلًا، عام 2006م بلغت القيمة الإجمالية للفولاذ المُدوّر في الولايات المتّحدة (18.5) بليون دولار، بنسبة كبيرة تصل إلى قرابة (50%)، إذ يعاد تدوير الحديد والفولاذ بكمّيات كبيرة لأسباب ثلاثة، هي: أولًا، الحجم الهائل لسوقهما، ونتيجة لذلك هناك صناعة كبيرة تتكوّن من جمع الخردة ومعالجتها. ثانيًا، إذا لم تدوّر هذه الموادّ، فإنّ ذلك سيشكل عبئًا اقتصاديًّا. ثالثًا، ستنتج تأثيرات بيئية مهمّة مرتبطة بالتخلص من أكثر من (50) مليون طن من الحديد والفولاذ في حال عدم تدويرها.

الفلزّات الأخرى التي تدوّر بكمّيات كبيرة من خلال الفلزّ الكلي المستعمل، وقيمتها المادية بلايين الدولارات، هي: الرصاص (73% ، 1.96$ بليون)، والألومنيوم (43%، 9.38$ بلايين)، والنحاس (32% ، 6.72$ بلايين)، والنيكل (43%، 2.62$ بليون)، والتيتانيوم (47%، 0.25$ بليون)، حيث إنّ إعادة تدوير الألومنيوم، تقلل من الحاجة لاستيراد خامه، وتوفر قرابة (95%) من الطاقة المطلوبة لإنتاج ألومنيوم جديد من البوكسيت، ويقدّر أنّ كلّ طن من الفولاذ المدوّر يوفّر (2500 kg) (1136 lb) من خام الحديد، (1000 lb) (455 kg) من الفحم، و(40 lb) (18 kg) من الحجر الجيري، إضافة إلى ذلك، فإنّ ثلث الطاقة فقط، مطلوب لإنتاج الفولاذ من الخردة المدوّرة مقارنة بالطاقة للخام الطبيعي، أخيرًا، يدوّر الفلز (المعدن) من ملايين السيارات التي يتمّ التخلص منها سنويًّا في الولايات المتّحدة[27].

5-14 المعادن والاستدامة

Mineral and Sustainability

يبدو أنّ هناك تعارضًا بين التنمية المستدامة واستعمال المعادن؛ لأنّ الاستدامة مفهوم طويل الأمد يشمل إيجاد طرق لتأمين الأجيال المقبلة بحصتها من موارد الأرض، إضافة إلى أنّ الموارد المعدنية غير المتجدّدة تستهلك مع مرور الزمن، ومن الممكن إيجاد حلول للموارد المعدنية غير المتجدّدة، تتوافق مع روح (جوهر) الاستدامة إن لم تتفق مع نصها، وهذا ممكن لأنّ الحاجة تكون أحيانًا لاستعمالات المعدن، وليس المعدن نفسه، فعلى سبيل المثال: نعدّن النحاس لاستعماله في الأسلاك لنقل الكهرباء أو النبضات الكهربائية، فما نريده خصائص النحاس، وليس النحاس نفسه، وبالنسبة إلى أسلاك التليفون، فيمكننا استعمال كيبلات ألياف زجاجية، ونستغني بذلك عن النحاس، وبصورة مشابهة في الكاميرات الرقمية، ليست هناك حاجة لتطوير الفيلم باستعمال الفضة، فصناعة التصوير غير مهتمّة بالفضة، وإنّما بوظائفها المحدّدة في التصوير، وهكذا، يمكن الاستعاضة عن معدن غير متجدّد بإيجاد طرق جديدة لعمل الأشياء، أضف إلى ذلك، أنّنا نتعلم أيضًا، أنّه بالإمكان استخدام الموادّ الخام للمعادن بفعالية أكبر، مثلًا، برج إيفل يمكن أن يُبنى اليوم بربع كمّية الفولاذ التي استعملت في بنائه في أواخر عام 1800م[28].

إيجاد بدائل أو طرق لاستعمال الموارد غير المتجددة بفعالية أكبر، يحتاج عادة إلى عقود عدّة من البحث والتطوير، والوقت المتاح لإيجاد حلّ لاستنزاف معدن غير متجدد، هو النسبة (R) إلى (C)، حيث (R) الاحتياطي و(C) سرعة الاستهلاك، إلّا أنّ حجم الاحتياطي كمّية غير ثابتة مع الزمن؛ لأنّها تتغيّر مع التكنولوجيا والاقتصاد، ولذلك نسبة (R) إلى (C) ليست الوقت الذي يبقى الاحتياطي فيه بحسب سرعة الاستهلاك الحالية، مثلًا: تذبذبت نسب (R) إلى (C) لفلزات، مثل الزنك والنحاس، في آخر (50) سنة حول (30) سنة تقريبًا، وخلال تلك الفترة تزايد استهلاك الفلزّات (3) أضعاف، وقد كان هذا ممكنًا؛ لأنّنا اكتشفنا ترسّبات جديدة من الفلزات، وتوفر النسبة رؤية عن مدى ضآلة توافر بعض الفلزات، والتي تُعدّ ذات تزويد قليل، ونحتاج إلى أن نجد بدائل عنها[28].

باختصار، للتوفيق بين التنمية المستدامة والموارد المعدنية غير المتجدّدة، نحتاج إلى إيجاد طرق أكثر حكمة لاستعمال الموارد، حيث يشمل هذا، تطوير طرق فعالة أكثر في استكشاف الموارد المعدنية، واستخدام الموارد المتوافرة، وإعادة التدوير، واستغلال ذكاء الإنسان في إيجاد بدائل للمعادن، التي هي في حالة نقص من حيث التزويد.

Obeikandl.com

ملخّص SUMMARY

توافر الموارد المعدنية أحد مقاييس ثراء المجتمعات، فالحضارة التكنولوجية الحديثة مثلما نعرفها لا يمكن أن تتمّ دون استغلال تلك الموارد، إلّا أنّنا لا نستطيع الإبقاء على نمو أسيّ في عدد السكان، اعتمادًا على قاعدة محدودة من الموارد، والترسّبات المعدنية بسبب العمليات الجيولوجية البطيئة جدًّا، يجب أن تُعدّ موارد غير متجددة.

المورد المعدني هو تركيز لمادة أرضية طبيعية بصورة تجعل استخراجها حاليًّا أو مستقبلًا ممكنًا، احتياطي المعدن هو ذلك الجزء من المورد المعدني المتوافر حاليًّا للاستخراج قانونيًّا واقتصاديًّا، ومن المهمّ أن نتذكر أن الموارد ليست كلّها احتياطيات، ولا يمكن أن تستخدم الموارد في سدّ النقص الحاصل، إلّا بعد أن تُستكشف، ويتم الحصول عليها.

يمكن أن تصنّف الموارد المعدنية بحسب استخدامها إلى فلزّات، وموادّ بناء، ومعادن للصناعة الكيميائية، ومعادن في الزراعة، إذ تستهلك المعادن اللافلزية بكمّيات أكبر من أيّ فلز باستثناء الحديد، وعندما يصبح معدن ما نادرًا، فإنّ البدائل الممكنة هي إيجاد مصادر جديدة له، أو إعادة تدويره، أو إيجاد بديل عنه، أو استخدام كمّية أقلّ، أو الاستغناء عنه كليًّا، فالولايات المتّحدة والشعوب الغنية الأخرى، ليست لديها كمّيات محلية كافية من كثير من الموارد المعدنية للاستعمال الحالي، ويجب عليها زيادتها عن طريق استيرادها من الدول الأخرى، ومع تحوّل هذه الأقطار إلى الصناعة ونموها، قد يصبح الاستيراد أكثر صعوبة، وقد يترتب في هذه الحالة على الأقطار الغنية إيجاد بدائل لبعض المعادن أو استعمال جزء أقل ممّا كانت تستعمله سابقًا من إنتاج العالم السنوي، فهذه التحوّلات تحدث بالفعل في الولايات المتّحدة حاليًّا، والدليل على ذلك حدوث هبوط في استهلاك المعادن (غير الوقود) لكل نسمة منذ الثمانينيات (1980م) من القرن الماضي.

جيولوجية الموارد المعدنية معقّدة، وترتبط ارتباطًا وثيقًا بالجوانب المختلفة للدورة الجيولوجية، حيث تستخرج الموارد المعدنية عادة من الخامات، إذ يعطى مصطلح خام للموادّ الأرضية الطبيعية المتوافرة بكمّيات شاذة، أعلى بكثير من الخلفية التي يمكن استخراجها بربح، وحتى يُصنّف الترسب الحامل للمعدن بوصفه خامًا، يجب أن يكون له معامل تركيز محدّد (النسبة بين تركيز المعدن في الخام إلى متوسط تركيزه في القشرة الأرضية)، إذ يعكس معامل تركيز معدن الظروف الجيولوجية والاقتصادية.

يعتمد التأثير البيئي لاستغلال المعدن على عدد من العوامل، تشمل طرق التعدين، والظروف الهيدرولوجية المحلية، والمناخ، وأنواع الصخور، وحجم العملية، والتضاريس وكثير من العوامل المترابطة الأخرى، إضافة إلى ذلك، يتغيّر التأثير بحسب مرحلة تطوير المورد، وبوجه عام، فإنّ تأثير استكشاف المعدن واختباره قليل إلّا في المناطق الهشّة (الحسّاسة)، ومن ناحية أخرى، قد يكون لتعدين المعدن تأثيرات ضارة رئيسة على الأرض والماء والهواء والموارد البيولوجية، وقد يؤدّي إلى تأثيرات اجتماعية على البيئة، نظرًا للطلب المتزايد على السكن والخدمات في مناطق التعدين.

بسبب تزايد الطلب على الموارد المعدنية، يجب أن نكافح لتوظيف الممارسات الصحيحة في الهندسة والمحافظة، التي ستقلل المشكلات الناتجة عن تطوير المعادن في كل من الموقع وبعيدًا عنه، فالتطبيق الحالي للتكنولوجيا الحيوية في استخلاص الفلزّات وتقليل التلوّث يعد بالكثير، وقد قلّ التدهور البيئي المرتبط بالتعدين وتجهيز الخامات في الدول الأكثر تطورًا بصورة محسوسة في السنوات الأخيرة، نظرًا لتطوير إستراتيجيات للحدّ من التلوّث، وسن تشريعات وإجراءات مطورة للتحكم في التلوّث والاستصلاح، فمثل هذه التقنيات والتشريعات لا تكون متوافرة أحيانًا في الدول الأقل تطورًا، التي تطمح لتطوير مواردها المعدنية؛ لذا، فإنّ نقل التكنولوجيا مسؤولية الدول الأكثر تطورًا، بحيث يكون التّدهور البيئي المرتبط بأنشطة التعدين أقلّ ما يمكن على المستوى المحلي والإقليمي والعالمي.

إعادة تدوير الموارد المعدنية إحدى الطرق المتّبعة في تأخير حدوث أزمة أو الحدّ جزئيًّا منها؛ بسبب تضافر كلّ من زيادة عدد السكان وقاعدة محدودة من الموارد.

التنمية المستدامة واستعمال موارد المعادن غير المتجدّدة، لا يجب أن يكونا أمرين متعارضين مثلما يبدو لأول وهلة، ونحتاج إلى إيجاد طرق لاستخدام مواردنا بحكمة أكبر، بإيجاد البدائل وإعادة التدوير والمحافظة عليها.

بوكسيت (Bauxite)، (416)

تقنية حيوية (Biotechnology)، (424)

معامل تركيز (Concentration factor)، (407)

المراجع REFERENCES

1. **Kropschot, S. J. and Johnson, K. M.** 2006. *U.S.G. S. Mineral Resources Program*. U. S. G. S. Circular 1289. Menlo Park, California.
2. **Prospectors & Developers Association of Canada.** Minerals & use. http://www.pdac.ca. Accessed 9/5/06.
3. **Barsotti, A. F.** 1992. Wake up and smell the coffee. *Minerals Today*, October, 12–17.
4. **U.S. Geological Survey.** 1997. The role of non-fuel minerals in the U.S. economy. http://www.minerals.usgs.gov. Accessed 1/15/07.
5. **Brobst, D. A., Pratt, W. P., and McKelvey, V. E.** 1973. *Summary of United States mineral resources*. U.S. Geological Survey Circular 682.
6. **Willyard, C.** 2008. Salt of the Earth. *Geotimes* 53.6. 22–27.
7. **Kesler, S. F.** 1994. *Mineral resources, economics and the environment*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
8. **NOAA.** 1977 Earth's cristal plate boundaries: Energy and mineral resources. California Geology 30(5):108–109
9. **Craig, J. R., Vaughan, D. J., and Skinner, B. J.** 1996. *Resources of the Earth*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
10. **U. S. Department of Interior, Bureau of Mines.** 1993. *Mineral Commodity Summaries, 1993*. I28.148:993.
11. **Smith, G. I., et al.** 1973. Evaporites and brines. In *United States Mineral Resources*, D. A. Brobst and W. P. Pratt, eds. U.S. Geological Survey Professional Paper 820, 197–216.

12. **Lowenstam, H. A.** 1981. Minerals formed by organisms. *Science* 211:1126–30.
13. **Cornwall, H. R.** 1973. Nickel. In *United States Mineral Resources*, D. A. Brobst and W. P. Pratt, eds. U.S. Geological Survey Professional Paper 820. 437–42.
14. **Van, N., et al.** 1973. Manganese. In *United States Mineral Resources*, D. A. Brobst and W. P. Pratt, eds. U.S. Geological Survey Professional Paper 820. 385–99.
15. **McGregor, B. A., and Lockwood, M.** (no date). *Mapping and research in the exclusive economic zone*. U.S. Geological Survey and NOAA.
16. **U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines.** 1991. Research 92.Biotechnology—Using nature to clean up waste 128.115(992):16–21.
17. **Silva, M. A.** 1988. Cyanide heap leaching in California. *California Geology* 41(7):147–56.
18. **Woodbury, R.** 1998. The giant cup of poison. *Time* 151(12):4.
19. **Pettyjohn, W. A.** 1972. Nothing is without poison. In *Man and His Physical Environment*. G. D. McKenzie and R. O. Utgard, ed. Minneapolis: Burgess Publishing. 109–10.
20. **Takahisa, H.** 1971. *Discussion on environmental geochemistry in health and disease*, H. L. Cannon and H. C. Hupps, eds. Geological Society of America Memoir 123. 221–22.
21. **Alpers, C. N., et al.**, 2005. *Mercury Contamination from historical gold mining in California*. U. S. Geological Survey Fact Sheet 2005-3014.
22. **Jeffers, T. H.** 1991. Using microorganisms to recover metals. *Minerals Today*, June, 14–1.
23. **Haynes, B. W.** 1990. Environmental technology research. *Minerals Today*, May, 13–17.
24. **Sullivan, P. M., et al.** 1973. *Resource recovery from raw urban refuse*. Report of Investigations 7760. Washington, DC: U.S. Bureau of Mines.
25. **Davis, F. F.** 1972. Urban ore. *California Geology*, May, 99–112.
26. **U.S. Geological Survey.** 2007. Minerals yearbook 2006—Recycling metals. http://www.minerals.usgs.gov. Accessed 1/15/07.
27. **Brown, L., et al.** 1995. Steel recycling rising. In *Vital signs 1995*. Washington, DC: Worldwatch Institute.
28. **Wellmar, F. W., and Kosinowoski, M.** 2003. Sustainable development and the use of non-renewable sources. *Geotimes* 48(12):14–17.

المصطلحات المفتاحية KEY TERMS

تحوّل تماسي (412)، (Contact metamorphism)
متبخّرات (413)، (Evaporite)
حرمائي (410)، (hydrothermal)
عقيدات أكسيد المنجنيز (417)، (Manganese oxide nodules)
خام (407)، (Ore)
بيجماتيت (410)، (pegmatite)
ترسّبات التبر (413)، (placer deposits)
تحوّل إقليمي (412)، (Regional metamorphism)
احتياطي (404)، (Reserve)
مصدر (415)، (resource)
قباب ملحية (415)، (Salt domes)

بعض الأسئلة للتفكير SOME QUESTIONS TO THINK ABOUT

1. تأتي التغيرات التكنولوجية هذه الأيام من الاتجاهات كلّها، والاستعمال المتزايد للبريد الإلكتروني يهدّد بتحويل مجتمعنا إلى مجتمع بلا ورق، فلدينا الآن نقود إلكترونية، وهي تقنية تسمح لنا بأن ندفع فواتيرنا من خلال الحواسيب الشخصية، وأن نطبع ما نريد من المجلات والجرائد التي نشارك فيها، وتأتينا عبر الإنترنت. ما تأثير هذه التقنية على استغلال الموارد؟ للإجابة عن هذا السؤال، ابدأ بإنشاء قائمة لموارد مصادر المعادن الضرورية لمجتمع كثير الاستعمال للورق. ثم طوّر خطة لتقليل التأثير في الموارد الطبيعية عند التحوّل إلى مجتمع بلا ورق.
2. لأنّنا نعرف أنّ الموارد المعنية محدودة، فهناك طريقتان للنظر إلى استعمالنا الحالي والمستقبلي لهذه الموارد، أحد الآراء يقول: إنّنا نسير في اتجاه أزمة معدنية مع تزايد عدد سكان الأرض، رأي آخر يقول: مع تزايد عدد السكان تزداد احتمالية التجديد، وعليه، سنجد طرقًا لتكييف استعمالنا للمعادن مع عدد السكان. كيف يمكن اختبار هذين الرأيين؟
3. التقنية الحيوية والهندسة الوراثية أدوات محتملة لتنظيف البيئة، وقد ناقشنا بعض أمثلة التقنية الحيوية في هذا الفصل، وقلنا: يمكن أن تزرع البكتيريا لتعادل الأحماض في المجاري النهرية من المناجم، ويمكن إنشاء الأراضي الرطبة الصناعية، التي تنقي العمليات البيولوجية فيها الماء الملوث بسبب التعدين وتركيز الخامات. ما رأيك في التقنية الحيوية والهندسة الوراثية؟ كيف يمكن نقل هذه التقنية إلى صناعة المعادن في الولايات المتّحدة والدول الأخرى؟

Obeikandl.com

الفصل الخامس عشر

مصادر الطاقة

ENERGY RESOURCES

صدمة ارتفاع البنزين. كان ارتفاع سعار البنزين عام 2008م المفاجئ صدمة على كثير من المستهلكين، بمن فيهم أولئك العاملون في هذه المحطّة في جنوب كاليفورنيا، فقد بقيت أسعار النفط متذبذبة إلى بداية القرن الحادي والعشرين،حيث تغيّر الوضع إلى الارتفاع.

15-1 القلق حول مصادر الطاقة ليس جديدًا: صدمات الطاقة في الماضي والحاضر

WORRY OVER ENERGY SOURCES IS NOTHING NEW: ENERGY SHOCKS PAST AND PRESENT

كانت منازل الأثرياء الرومان منذ ألفي سنة مضت، تحتوي على تدفئة مركزية تستهلك كمّيات ضخمة من الخشب، ربما بقدر (125 kg/hr)، فكان الخشب الوقود اليومي بقدر النفط والغاز في الولايات المتحدة الأمريكية اليوم، وقد أحدث استنفاد إمدادات الخشب المحلية نقصًا وصدمة للمجتمع الروماني، ما دفعهم إلى استيراده من مسافات تبعد (1600 km) لتعويض النقص، وكلما شحّت إمدادات الخشب، واجه الرومان صدمة طاقة ثانية، وذلك دفعهم إلى استخدام الطاقة الشمسية بوصفها مصدرًا بديلًا للطاقة، فنجحوا في ذلك، وأصبحوا على درجة عالية من الكفاءة في استخدامها، ووضعوا قوانين تحمي حق الأشخاص في استخدامها، ففي بعض الحالات، مُنع تشييد المباني التي تحجب أشعة الشمس عن المباني المجاورة؛ لإنّها تسلب حق الآخرين من موارد الطاقة الشمسية[1].

خلال صيف عام 2008م، صُدم مواطنو الولايات المتحدة بالارتفاع السريع في أسعار الوقود، فقد جاءت الزيادة الحادة بعد سنوات كانت الأسعار فيها منخفضة (وبخاصة في التسعينيات)؛ بسبب وفرة النفط والغاز، كانت أسباب زيادة الأسعار معقّدة، واستندت إلى عوامل عدّة، منها: تخفيض معدلات الإنتاج في الدول المنتجة للنفط، والاضطرابات السياسية وحرب الشرق الأوسط، وفرض حكومة الولايات المتحدة الأنظمة التي تطالب منتجي النفط بالحد من تلوّث الهواء، من خلال إعادة تصنيع البنزين مع الإضافات التي تنتج وقودًا أقلّ تلويثًا، إضافة إلى الاشتباه في التلاعب في الأسعار من قبل شركات النفط، ما أدّى إلى نقص كمّيات الإنتاج، وقد وصل سعر برميل النفط الخام إلى أكثر من (100$)/برميل بحلول أغسطس عام 2008م، إلّا أنّه انخفض بصورة كبيرة في نهاية العام نفسه، وبحلول عام 2009م، وصل سعر البرميل إلى (80$) تقريبًا، هذه الزيادة لم تكن الأولى، فقد حصلت كثير من مثل هذه الصدمات النفطية في غضون أقلّ من (30) عامًا.

الأهداف التعلّمية LEARNING OBJECTIVES

يستهلك مجتمع عالي التقنية في الولايات المتحدة حصة غير متناسبة من إجمالي الطاقة المنتجة في العالم، مع أنّ عدد سكان الولايات المتحدة يعادل قرابة (5%) فقط من سكان العالم، إلّا أنّهم يستهلكون ما يقارب (25%) من مجموع الطاقة العالمية. فكيف يمكن كسر الاعتماد على الطاقة، مثل الفحم والنفط التي تضر بالبيئة، دون التضحية بمستوى المعيشة؟ في هذا الفصل، سنتعرّف الأجوبة الممكنة عن هذا السؤال المهم.

سنركز في هذا الدرس على الأهداف التعليمية الآتية:

- فهم مصطلح ذروة النفط، وكيف يؤثر في البيئة الاقتصادية والاجتماعية.

معرفة أنماط الاستهلاك العام للطاقة في الولايات المتحدة.

- معرفة أنواع الوقود الأحفوري الرئيسة والتأثيرات البيئية المرتبطة بمجال تنميتها.
- تعرف الطاقة النووية وأهمية القضايا البيئية المرتبطة بها، وتعرف الطاقة الحرارية الأرضية، وكيفيّة إنتاجها، ومستقبلها بوصفها مصدرًا للطاقة.
- معرفة الأنواع الرئيسة للطاقة البديلة والمتجدّدة، وأهميتها البيئية.
- تعرّف القضايا المهمّة المتعلقة بسياسة الطاقة، ولاسيما الفرق بين مسار الطريق الصعب والطريق السهل، ومفهوم التنمية المستدامة للطاقة.

سبقت الزيادة في سعر البنزين ما تسمّى «أزمة الطاقة في كاليفورنيا» التي انطوت على انقطاع متكرر في التيار الكهربائي عام 2001م، فنبهت هذه الأزمة الدولة بأكملها، حيث نتجت في جزء منها؛ بسبب الازدهار والنمو السكاني في كاليفورنيا، وزيادة الطلب على الطاقة، فاستوردت كاليفورنيا نسبة كبيرة من احتياجاتها من الطاقة الكهربائية، وفشلت في توفير ما يكفي من مصادر جديدة للطاقة على الشبكة، واضطرت الشركات العاملة في تزويد الطاقة المعتمدة سابقًا، إلى شراء الطاقة في حالات الطوارئ من الموردين، بأسعار تزيد بنسبة (900%) عن معدل السعر الطبيعي، فأفلست واحدة من أكبر شركات الطاقة في الولاية، وبدأ حاكم ولاية كاليفورنيا تحقيقًا حول الاحتكار غير القانوني للسوق، والتلاعب في الأسعار من قبل الموردين في مجال الطاقة، حيث يجري حاليًّا بناء المزيد من محطات الطاقة، ولكن مداها في المستقبل القصير غير مؤكد.

يوضّح استخدام الرومان للطاقة الشمسية أن مشكلات الطاقة ليست جديدة، فعندما تحدث صدمات الطاقة بنقص أحد مصادرها نبحث عن البدائل، والأمر المقلق اليوم، أن يصل إنتاج النفط إلى ذروته في العقد المقبل أو قرابة ذلك، مصطلح ذروة النفط **(Peak Oil)** عبارة تشير إلى الوقت الذي يُستخرج فيه نصف النفط من الأرض، (انظر إلى نظرة متّفحصة: ذروة النفط)، ومثلما هو الحال مع الرومان، سوف نحتاج إلى بدائل للطاقة، وربّما ستكون الطاقة الشمسية مرّة أخرى.

في هذا الفصل، سوف نستكشف استخدامات الطاقة الحالية، والآثار البيئية الناجمة عن استهلاكها، وما يحمله المستقبل، من حيث وضع التنمية المستدامة للطاقة.

نظرة متفحّصة A CLOSER LOOK

ذروة النفط: متى ستحدث؟ وما أهميتها؟

Peak Oil: When Will It Occur and What Is Its Importance?

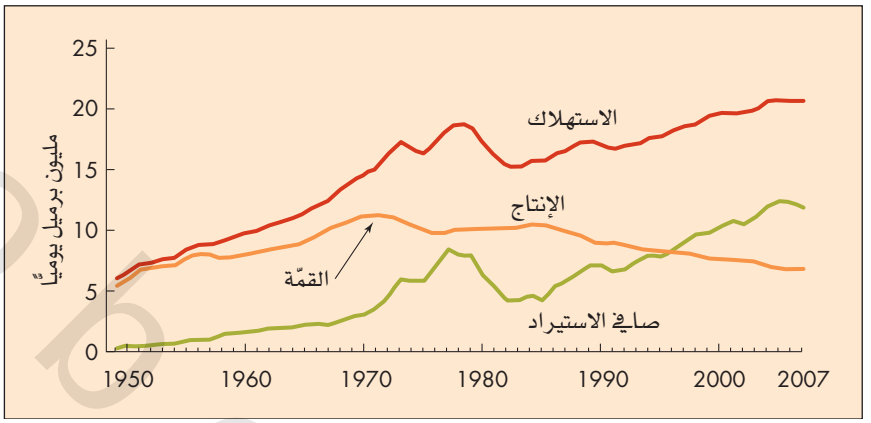
جاء ازدهار الولايات المتحدة، وزيادة عمر حياة الإنسان، نتيجة وفرة الطاقة منخفضة التكلفة على صورة النفط الخام، وفي حين أنّ فوائد النفط لا يمكن إنكارها، فهناك أيضًا مشكلات بيئية مرتبطة بها، بدءًا من تلوّث الماء والهواء إلى ظاهرة الاحتباس الحراري العالمي، ونحن على وشك أن نتعلم الحياة الأكثر تكلفة مع نفط أقل، فالمسألة ليست إذا كانت ذروة إنتاج النفط ستحدث، وإنّما العواقب الاقتصادية والسياسية التي سوف تترتب على المجتمع بحدوثها[3].

يبين الشكل (15–1) واقع ذروة النفط في الولايات المتحدة، حيث بلغت الولايات المتحدة ذروتها في إنتاج النفط (مثلما كان متوقعًا في سنوات سابقة) عام 1970م بمقدار (11.3) مليون برميل يوميًّا، حيث استوردت الولايات المتحدة في ذلك العام (3.2) ملايين برميل يوميًّا، وقد عادلت الواردات الإنتاج فقط بحلول عام 1996م، أمّا عام 2007م، فقد وصل إنتاج النفط في الولايات المتحدة إلى قرابة (6.9) ملايين برميل يوميًّا، وبلغت الواردات (12) مليون برميل يوميًّا.

تاريخ النفط العالمي من حيث معدّل الاكتشاف والاستهلاك (الشكل 15–2)، هو عامل مهم في ذروة النفط، فقد اكتُشف عام 1960م ما يقارب خمسة أضعاف ما يُستهلك من النفط، ومع ذلك، كانت الكمية المكتشفة تعادل الكمية المستهلكة بحلول عام 1980م، أمّا عام 2000م، فقد كان استهلاك النفط ثلاثة أضعاف الكمية المكتشفة، هذا الاتجاه ليس مستدامًا، والحقيقة المؤسفة، أنّ النفط يستهلك بسرعة نسبة إلى الموارد الجديدة التي يُعثر عليها، وقد أعلنت شركات النفط عام 2006م عن أكبر اكتشاف للنفط في الولايات المتحدة، وإذا تمّ استغلال (15) مليار برميل واستهلاكها من قبل المستخدمين في السوق العالمية، فإنّها ستوفر النفط قرابة ستة أشهر، وإذا تمّ توفير ألـ (15) مليار برميل للولايات المتحدة، فستكفيها عامين فقط.

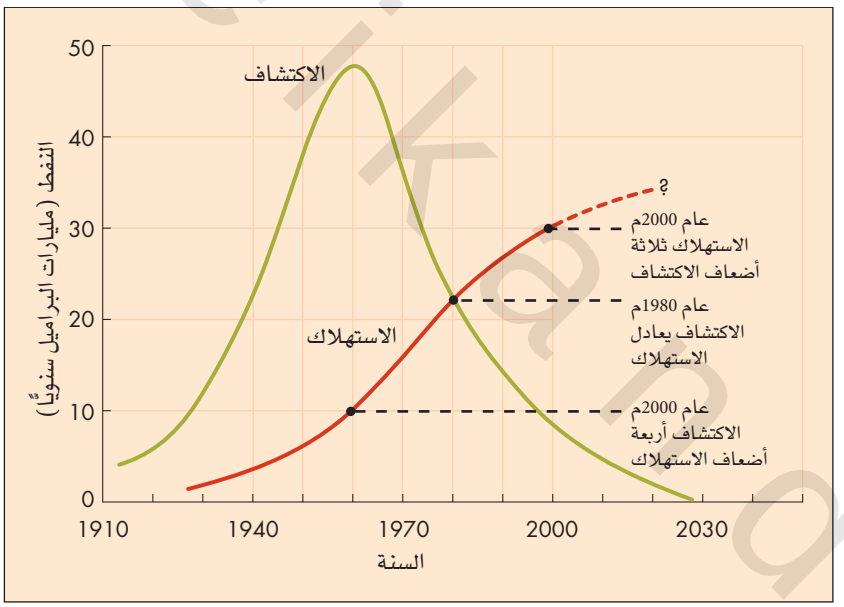
يوضّح الشكل (15–3أ) مفهوم ذروة إنتاج النفط، لا نعرف بالتحديد متى سوف تكون ذروة الإنتاج؛ لأنّها تعتمد – في جزء منها– على التكنولوجيا، وخصوصًا الحدّ الأقصى لما يمكننا استخراجه من الآبار المنتجة فعليًّا،

(يتبع)



الشكل (15–1): تاريخ إنتاج النفط الأمريكي

بلغ ذروته عام 1970م. ومائل الإنتاج الواردات بحلول عام 1996م، وبحلول عام 2007م أصبحت الواردات (1.7) ضعف الإنتاج. (مُعدّل من إدارة معلومات الطاقة النشرة السنوية للطاقة، 2007م).



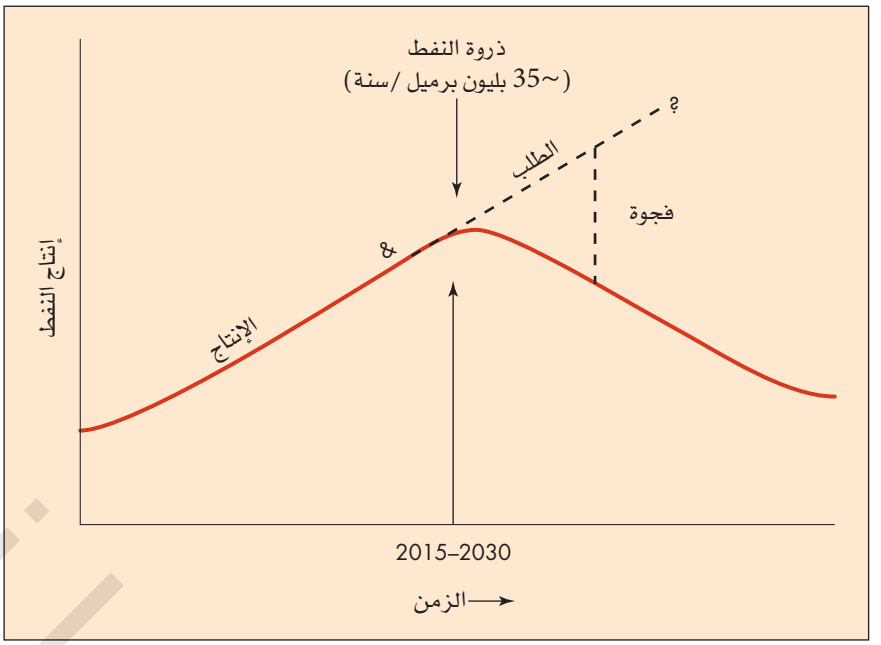
الشكل (15–2): استهلاك النفط العالمي واستخراجه

بلغت ذروة اكتشاف النفط عام 1960م، وتجاوز الاستهلاك الاكتشاف بحلول عام 1980م. (مُعدّل بعد K, Aleklett، النفط: طريق وعرة إلى الأمام، مشاهدة العالم 19:1 (2006م): 10–12).

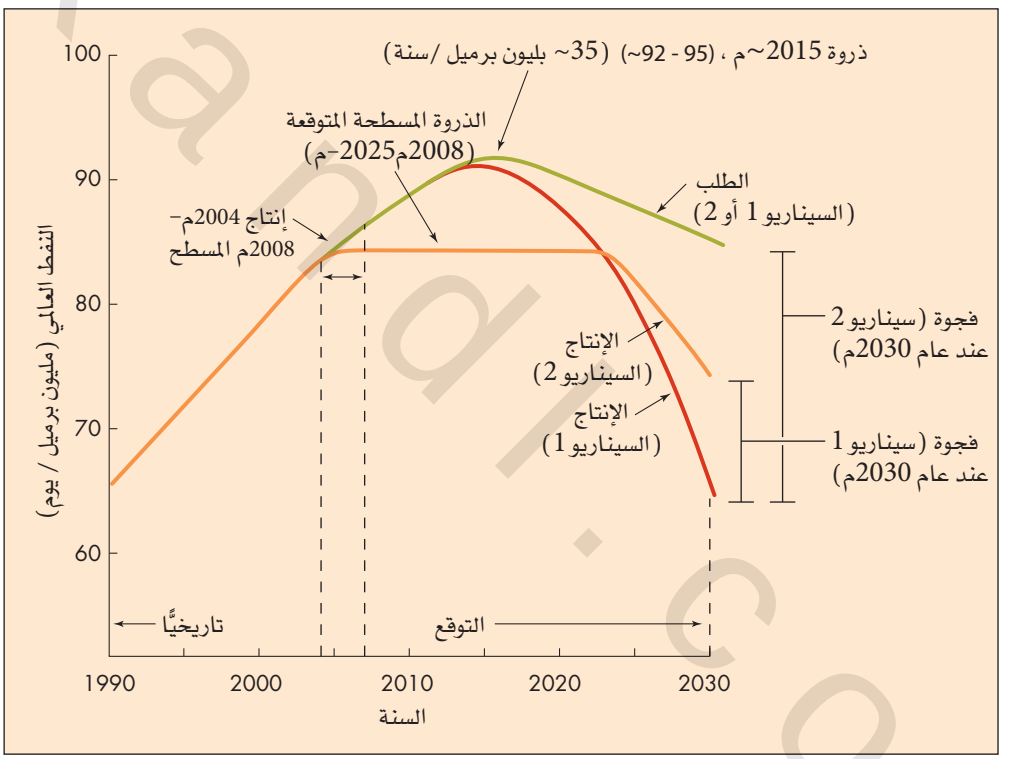
وتعتمد كذلك على المحافظة وعلى استخدام أنواع بديلة للوقود، مثل الإيثانول (الوقود الحيوي)، لنفترض أن تكون ذروة الإنتاج قرابة (35) مليار برميل سنويًّا (95 مليون برميل يوميًّا)، وستصل الذروة في وقت ما بين عامي 2015م و2030م، فقد ظل معدّل نمو النفط في العام الماضي أو قرابة ذلك ثابتًا تقريبًا، وعليه، تبدو الزيادة معقولة في معدل الإنتاج الحالي من (31) مليار برميل إلى (35) مليار برميل تقريبًا في غضون بضعة عقود، حيث تصبح الفجوة بين الإنتاج والطلب واضحة، عند حدوث ذروة الإنتاج وزيادة الطلب، ويوضّح الشكل (15–3ب) سيناريوهين محتملين: الأول، ذروة مستوية من عام 2004م إلى عام 2025م (كان الإنتاج من عام 2004م إلى عام 2008م مستقرًّا نسبيًّا عند قرابة (82) مليون برميل يوميًّا)، وستنشأ الفجوة قريبًا. الثاني، إذا أدّت زيادة الإنتاج إلى مواكبة الطلب عام 2015م، عندها ستحدث الفجوة بعد عام 2015م، وسوف تزداد التكلفة كلما أصبح واقع ذروة النفط حقيقيًّا، وإذا لم نستعدّ لهذه الذروة، فسيصبح الاضطراب الاقتصادي والسياسي للمجتمع أمرًا لا مفر منه، لايزال لدنيا الوقت للتحضير للذروة في نهاية المطاف، واستخدام بقايا الوقود الأحفوري للمساعدة على التحول إلى مصادر الطاقة الأخرى، في السيناريو الأكثر تفاؤلًا، فإنّ التحول من النفط إلى الأنواع البديلة من الوقود، لن يحدث إلى أن تأخذ خيارات المنافسة على التكلفة مكانها[4].

لن ينفد النفط بحدوث الذروة في إنتاجه، إلّا أنّ تكلفته ستصبح أكبر بكثير، ومتى حدث هذا، فستكون الذروة مختلفة عن أي مشكلة واجهناها في الماضي، إضافة إلى أنّ التعداد السكاني سوف يزيد مليارات عدّة في العقود المقبلة، بما في ذلك البلدان ذات الاقتصاد المتنامي مثل الصين والهند، وسيزيد استهلاكها للنفط، فقد تضاعفت واردات الصين منه في السنوات الخمس المقبلة! ولأنّ الإمدادات ستقل، فستكون المنافسة الاقتصادية والتداعيات الاجتماعية والسياسية على النفط هائلة، وقد يصبح التخطيط للحفاظ عليه والتحول إلى مصادر الطاقة البديلة في العقود المقبلة حرجًا، إذ لا يمكننا ترك عصر النفط وراءنا إلى أن تحل محله البدائل.

Open Kandil.com



(أ)



(ب)

الشكل (15–3): ذروة النفط

(أ) مخطط مثالي يوضّح مفهوم "ذروة النفط"، عند إنتاج نصف نفط العالم، وعندما يكون الطلب أكبر من الإنتاج، ستتطوّر الفجوة (العجز)، وقد يحدث هذا بين عامي 2015م و2030م. (ب) هناك سيناريوهان لذروة النفط: السيناريو الأول، قمة مستوية حتى عام 2025م، يعقبها انخفاض في الإنتاج. السيناريو الثاني، مع ذروة عام 2015م، يعقبها انخفاض. (البيانات من Roberts, P). (2008م. الجغرافية الوطنية (213) 6؛ 86–91).

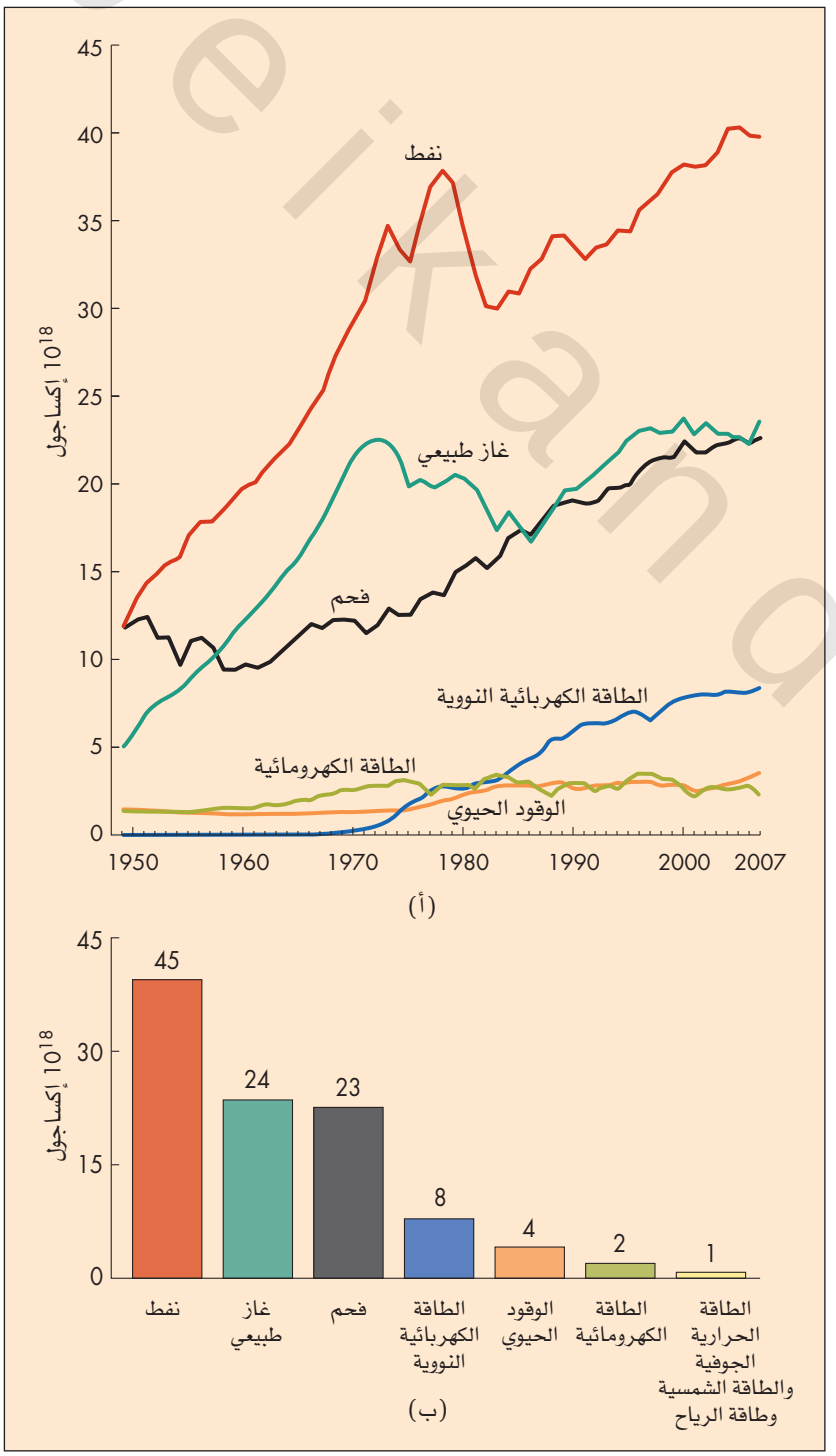
جلب 14 أغسطس عام 2003م صدمة في الطاقة لمدينة نيويورك والمنطقة المحيطة بها؛ نتيجة حدوث انقطاع هائل للتيار الكهربائي في ثماني ولايات، وتأثر أكثر من (50) مليون نسمة، فقد حوصر البعض في المصاعد والقطارات الكهربائية تحت الأرض، وأُعيدت الطاقة في غضون (24) ساعة في معظم الأماكن، فقد بدأ الفشل في إنتاج التيار الكهربائي في محطة الطاقة في الولايات المتحدة، وتعاقب بسرعة ليصبح فشلًا على نطاق واسع، وأكد انقطاع التيار الكهربائي المتكرر اعتمادنا على نظام توزيع طاقة مركزي متهالك، والحاجة إلى تحسين إدارة الطاقة.

برزت الطاقة من المستوى المحلي إلى المستوى العالمي بصفتها مركزًا للاقتصاد، والسياسة الخارجية، ومسألة بيئية[2]، وسوف تحدّد كيفية استجابتنا لقضايا الطاقة إلى حدّ كبير، من نحن؟ وما نحن عليه؟ وستبقى كذلك في القرن الحادي والعشرين.

obeikandi.com

2-15 إمدادات الطاقة والطلب عليها
ENERGY SUPPLY AND ENERGY DEMAND

ما يقرب من (90%) من الطاقة المستهلكة في الولايات المتحدة اليوم من الفحم، والغاز الطبيعي، والبترول أو النفط، حيث تسمّى مصادر الطاقة هذه أحيانًا الوقود الأحفوري؛ بسبب نشأتها العضوية، وتُعدّ هذه الأنواع من الوقود من مصادر الطاقة غير المتجددة، أمّا النسبة المتبقية من الطاقة المستهلكة (10%)، فتُنتج من الطاقة المائية والطاقة النووية، فلا يزال لدينا احتياطات ضخمة من الفحم، إلّا أنّ مصادر الطاقة الرئيسة الجديدة من الغاز الطبيعي والبترول أصبحت نادرة، وفي الحقيقة، أنّنا نستورد النفط أكثر بكثير ممّا ننتج، ما يجعلنا عرضة لتغيير الظروف العالمية، التي تؤثر في وفرة إمدادات النفط الخام، ومن الممكن توقع عدد قليل من محطات الطاقة الكهرومائية الكبيرة الجديدة، إضافة إلى أنّ تخطيط محطات جديدة للطاقة النووية وبناءها أصبح غير مؤكد لأسباب عدة، إذ أصبحت مصادر الطاقة البديلة في الآونة الأخيرة، مثل الطاقة الشمسية للمنازل والمزارع والمكاتب، أكثر جدوى من الناحية الاقتصادية، ما جعلها أكثر شيوعًا. تظهر التغيرات في استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة في الشكل (15-4).



الشكل (15-4): طاقة الولايات المتحدة

(أ) استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة من عام 1950م إلى عام 2007 م بحسب المصدر. (ب) استهلاك الطاقة عام 2007م. (معدل من نشرة الطاقة السنوية إدارة معلومات الطاقة، 2007م).

Obeikandl.com

كانت الزيادة حادة في استهلاك الطاقة من عام 1950م وحتى عام 2007م، وانخفض معدل الزيادة بعد النقص في منتصف السبعينيات وحتى منتصف الثمانينيات، ثمّ زاد معدل استهلاك الطاقة مرة أخرى خلال العقد الأخير من القرن العشرين؛ بسبب وفرة النفط الرخيص، إذ زاد استهلاك الطاقة بقرابة (30) إكسا-جول منذ عام 1985م (انظر إلى نظرة متفحصة: وحدات الطاقة لتفسير الإكسا- جول)، وقد أظهرت سياسات الحفاظ على الطاقة، مثل استخدام السيارات الجديدة التي تتطلب أن تكون أكثر كفاءة في استهلاك الوقود، وعزل المباني بصورة أفضل، نجاحًا جزئيًّا، ومع ذلك، بقينا في نهاية القرن العشرين مدمنين على الوقود الأحفوري، وسوف تكون سياسة الطاقة الأمريكية مسألة مهمّة في العقود المقبلة. سنناقش بعض الموضوعات ذات الصلة بسياسة الطاقة في الجدول (15-1)[2].

توقعات العرض والطلب على الطاقة في أفضل الأحوال صعبة؛ لأنّ الافتراضات التقنية والاقتصادية والسياسية والاجتماعية التي تكمن وراء هذه التوقعات تتغيّر باستمرار، فمن الواضح مع ذلك، أنه يتعيّن علينا مواصلة البحث، وتطوير مصادر الطاقة المحتملة وممارسات الحفظ وتقييمها، جنبًا إلى جنب مع جودة البيئة، لضمان ما يكفي من الطاقة والحفاظ على مجتمعنا الصناعي، أضف إلى ذلك أنّ التدفئة هي الاستخدام الرئيس للطاقة في الولايات المتحدة، في التطبيقات الأقل من (300°C)، مع أخذ هذه الأفكار في الحسبان، فسوف نستكشف بعض الجوانب الجيولوجية والبيئية لمصادر الطاقة المعروفة، بما في ذلك الفحم، والنفط، ومصادر الطاقة النووية، فضلًا على أهمية مصادر محتملة، مثل الصخر الزيتي، ورمال القار، وموارد الحرارة الجوفية، وسوف نحاول أيضًا مناقشة مصادر الطاقة المتجددة، والطاقة المائية، والرياح، والطاقة الشمسية.

15-3 الوقود الأحفوري FOSSIL FUELS

ترتبط نشأة الوقود الأحفوري- الفحم والنفط والغاز- ارتباطًا وثيقًا بالدورة الجيولوجية، ومصدر هذه الأنواع من الوقود أساسًا، الطاقة الشمسية المخزنة على صورة مواد عضوية، التي تمّ تحولها عن طريق العمليات الفيزيائية والكيميائية الحيوية بعد الدفن، إذ تعتمد الولايات المتحدة على الوقود الأحفوري في الطاقة التي تستهلكها كلّها تقريبًا، وهذا الوضع يتغيّر، إلّا أنّه بطيء.

تجب موازنة الاختلال البيئي المرتبط باستكشاف الوقود الأحفوري وتطويره، مقابل الفوائد المكتسبة من الطاقة، وهي ليست خيارًا أو اقتراحًا، إذ يمكن أن تساعد ممارسات الحفظ الجيدة إضافة إلى السيطرة على التلوث والاستصلاح، على الحد من الاختلال البيئي المرتبط بالوقود الأحفوري.

نظرة متفحّصة A CLOSER LOOK

وحدات الطاقة Energy Units

الوحدة الأساسية للطاقة المستهلكة هي الجول (J)، ويعرّف الجول الواحد بأنّه قوة (1) نيوتن تعمل على مسافة متر واحد، ويعرّف النيوتن (N)، بأنّه القوة اللازمة لإنتاج تسارع متر واحد لكل ثانية على كتلة من (1 kg)، وقد زاد مجمل استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة بين عام 1950م وعام 2007م من (30) إكسا-جول إلى قرابة (100) إكسا-جول ((EJ 1) إكسا-جول يساوي (10^{18}) جول، ويساوي (Btu (10^{15}) تقريبًا (وحدة حرارية بريطانية)، ووحدات الطاقة هي معدلات الزمن للطاقة أو الجول لكل ثانية (J/s)؛ (1) جول/ ثانية هو الواط (w)، إذ تنتج محطات الطاقة الكبيرة قرابة (1000) ميجا واط، وهو بليون واط (1 GW). حيث تباع الطاقة الكهربائية عادة بالكيلو واط - ساعة (kWh)، هذه الوحدة هي (1000 W) مطبّقة على ساعة واحدة (3600 S). وعليه، فإنّ (1 kWh) هو (3,600,000 J) أو (3.6 MJ).

الجدول (15-1): سياسة الطاقة. ما الموضوعات قيد المناقشة.

١. تشجيع استخدام مصادر الطاقة التقليدية: استخدام الغاز الطبيعي أكثر، وذلك بهدف تقليل اعتمادنا على الطاقة من الدول الأجنبية.
٢. تشجيع الطاقة البديلة: دعم الإعانات المالية لطاقة الرياح ومصادر الطاقة البديلة الأخرى، مثل الطاقة الشمسية الحرارية، والهيدروجين، والوقود الحيوي (الإيثانول والديزل الحيوي)، وزيادة كمية الوقود الحيوي المخلوطة مع البنزين الذي يباع في الولايات المتحدة.
٣. توفير البنية التحتية للطاقة: التأكد من أنّ الكهرباء تصل من خلال بنية تحتية حديثة يعتمد عليها.
٤. تعزيز تدابير الحفظ: وضع معايير أعلى كفاءة في المباني الفدرالية والمنتجات المنزلية، ما هو مطلوب الآن، أن تستخدم النفايات الحرارية الناتجة عن توليد الطاقة الكهربائية والعمليات الصناعية، في إنتاج الطاقة الكهربائية أو غيرها من المنتجات، أوصت معايير كفاءة الوقود للسيارات، والشاحنات، وسيارات الدفع الرباعي، بتقديم ائتمانات ضريبية جديدة لتشغيل نظام كفاءة في استخدام الطاقة وتطبيقاتها في المنازل، وتقديم ائتمان ضريبي لشراء سيارة ذات كفاءة في استخدام الوقود الهجين أو الديزل النظيف.
٥. النظر بجدية للطاقة النووية: إدراك أنّ محطات الطاقة النووية تستطيع توليد كميات كبيرة من الكهرباء، دون انبعاث تلوث الهواء أو المساهمة في تغيّر المناخ (الاحتباس الحراري).
٦. تعزيز البحوث: تطوير مصادر الطاقة البديلة، والبحث عن طرق مبتكرة لتحسين محطات الفحم، والمساعدة على بناء محطات الفحم النظيف، وتحديد كيفية الاستفادة بأمان من كميات النفط الهائلة المحاصرة في الصخر الزيتي ورمال القطران، وتطوير سيارات خالية من التلوث.

obeikandi.com

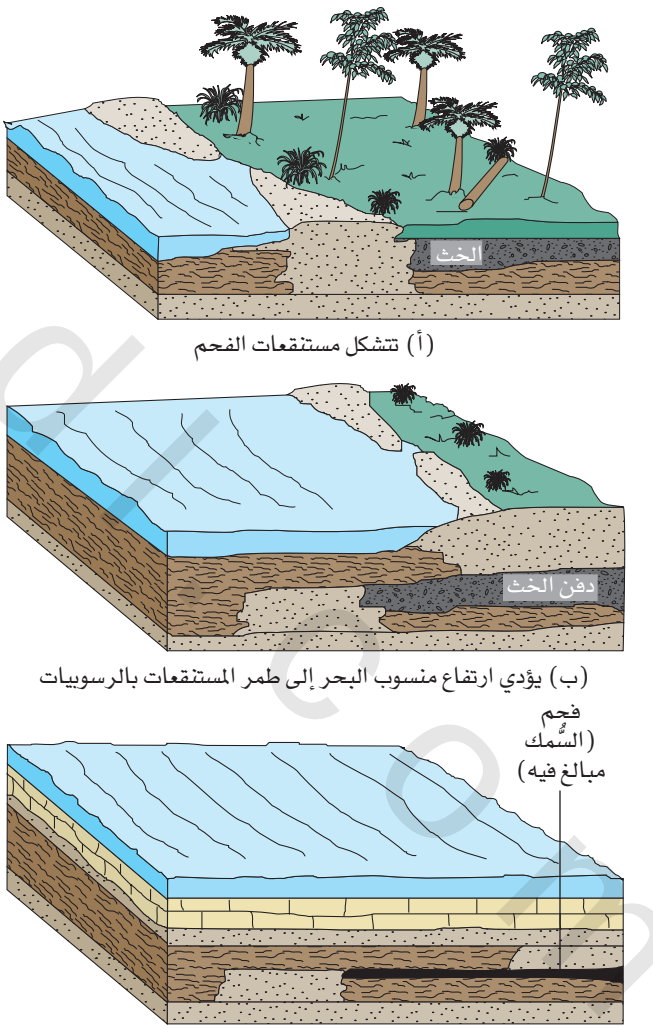
الفحم Coal

الفحم أحد أنواع الوقود الأحفوري الرئيسة، ويمثل حرقه قرابة (20%) من إجمالي استهلاك الطاقة في الولايات االمتحدة، والثمن البيئي لاستهلاكه خطير.

جيولوجية الفحم Geology of Coal

يتكوّن الفحم مثل غيره من الوقود الأحفوري من المواد العضوية الناجية من الأكسدة في دورة الكربون، وأساسه بقايا النباتات المتحوّلة، التي ازدهرت في المياه العذبة أو مياه المستنقعات المالحة القديمة، والتي تتوافر عادة في مصبات الأنهار، والبحيرات الساحلية، والسهول الساحلية المنخفضة أو الدلتا.

تبدأ عمليات تشكل الفحم في المستنقعات الغنية بالحياة النباتية، حيث تستبعد التربة المشبعة بالمياه، الكثير من الأكسجين المتوافر عادة فيها (الشكل 15–5)، فتتحلل النباتات جزيئيًّا في هذه البيئة، التي تعاني نقصًا في الأكسجين، وتتراكم ببطء لتشكيل طبقة سميكة من المواد تسمّى فحم المستنقعات، قد تكون المستنقعات وتراكمات الفحم فيها أغرقت، نتيجة ارتفاع بطيء في مستوى سطح البحر طويل الأمد؛ بسبب ارتفاع فعلي في مستوى سطح البحر أو غرق الأرض؛ لذلك تترسب فوق فحم المستنقعات رسوبيات، مثل الرمل والغضار والطين، والمواد الغنية بالكربونات، وكلما زاد ترسيب المزيد من الرسوبيات، زاد خروج الماء والغازات العضوية أو المتطايرة خارجًا، وزادت نسبة الكربون في الفحم المضغوط، وكلما استمرت هذه العملية، فإنّ فحم المستنقعات في النهاية يتحوّل إلى فحم، ولأنّ هناك طبقات عدّة من الفحم في المنطقة نفسها في كثير من الأحيان، فيعتقد العلماء أنّ مستوى سطح البحر قد انخفض، وارتفع بالتناوب، ما أتاح فرصة تطورها، ثمّ غرقها في مستنقعات الفحم[5].



(أ) تتشكل مستنقعات الفحم

(ب) يؤدي ارتفاع منسوب البحر إلى طمر المستنقعات بالرسوبيات

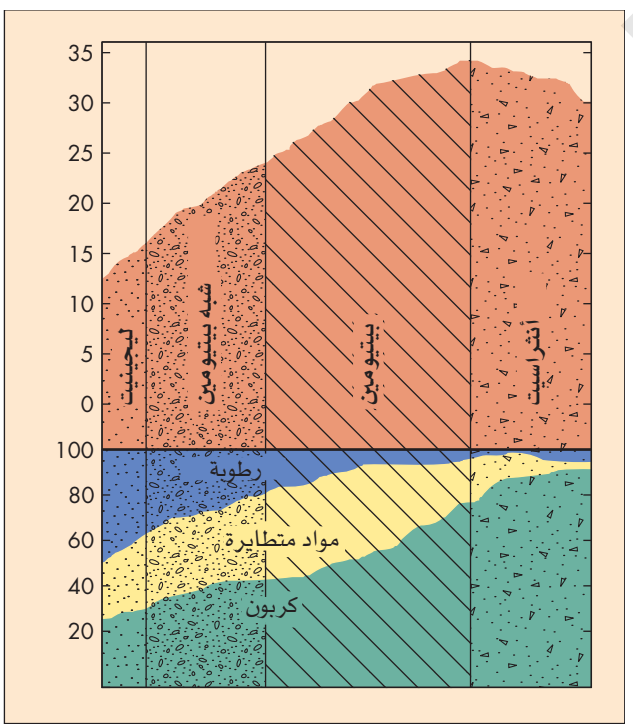
(جـ) رصّ الخث(peat) ليتشكل الفحم

الشكل (15–5): كيف يتكوّن الفحم، العمليات التي تحول بقايا النباتات أو فحم المستنقعات إلى فحم. يجب أن يمرّ وقت كبير من الزمن الجيولوجي قبل اكتمال عملية التحول.

تصنيف الفحم وتوزيعه

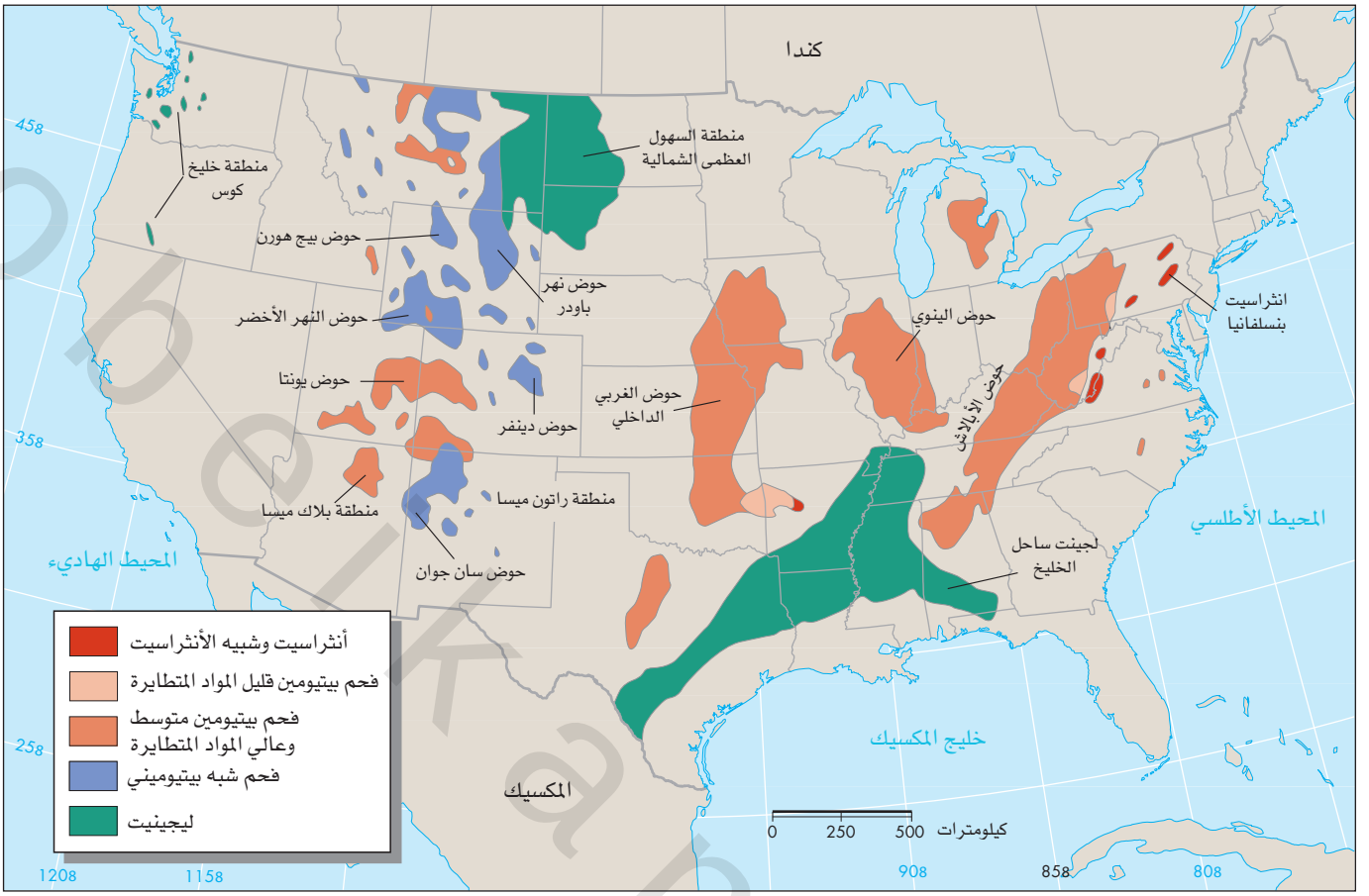
Classification and Distribution of Coal

يصنف الفحم عادة وفق نوع الكبريت ومحتواه، إذ يرتكز النوع – بوجه عام – على كل من نسبة الكربون في الفحم والقيمة الحرارية عند الاحتراق، وتزيد النسبة المئوية للكربون في الفحم وسط أربعة أنواع متوافرة في الأرض، من الليغنيت (lignite) إلى شبه بيتومين (bituminous) إلى بيتومين إلى فحم الأنثراسايت (anthracite) (الشكل 15–6). يوضح الشكل (15–6) أيضًا، أنّ الحدّ الأقصى للمحتوى الحراري متوافر في فحم البيتومين، الذي يكون فيه القليل من المواد المتطايرة، مثل الأكسجين والهيدروجين والنيتروجين، وينخفض فيه محتوى الرطوبة، ويكون المحتوى الحراري هو الحد الأدنى في الليغنيت، الذي له مستوًى عالٍ من الرطوبة. يبين الشكل (15–7) (أ) توزيع

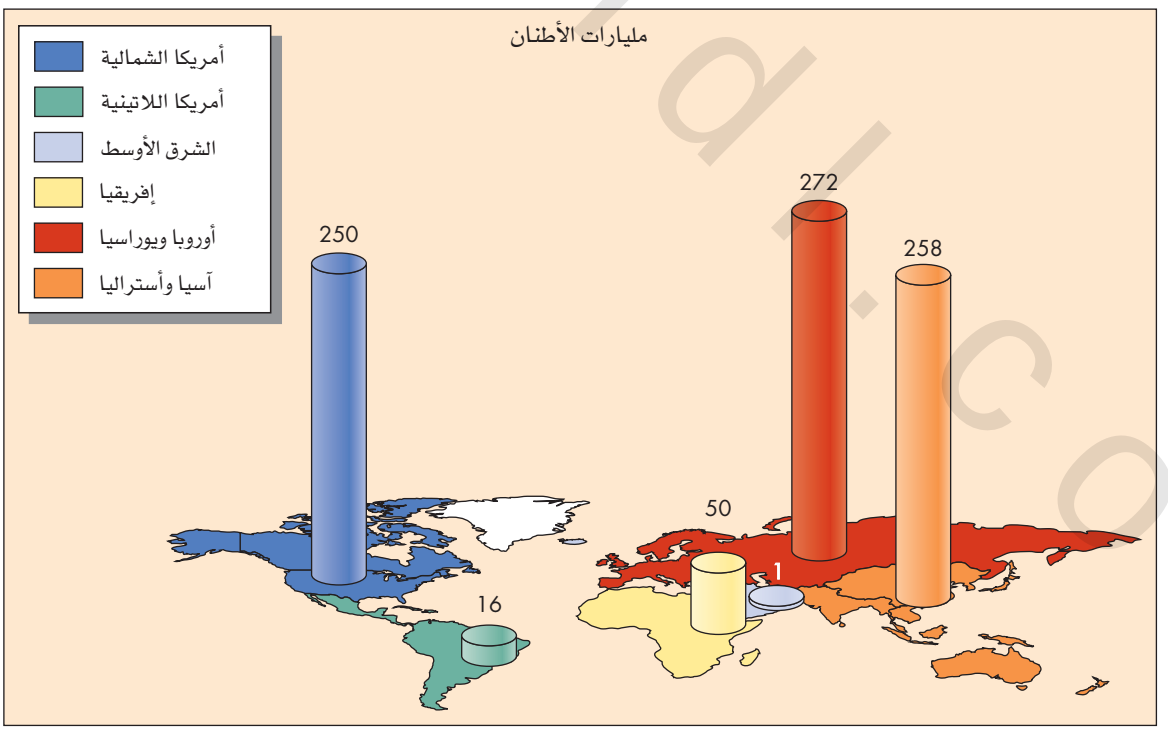


الشكل (15–6): أنواع الفحم الصور العامة لأنواع الفحم، اعتمادًا على النسبة المئوية من المحتوى الرطوبي، والمواد المتطايرة، والكربون. قيمة الحرارة لأنواع الفحم المختلفة موضحة أيضًا. *After Brobst, D. A, and Pratt, W. P., eds. (1973. U.S. Geological Survey Professional Papers 820*

Open Textbook Library



(أ)



(ب)

الشكل (15–7): احتياطي الفحم العالمي. (أ) مناطق الفحم في الولايات المتحدة المتجاورة. *(Carbini, S., And Schweinfurth,S. P. 1986 U.S. Geological Survey Circular 979)*. (ب) احتياطي الفحم العالمي (مليارات الأطنان المترية) عام 2007م. الولايات المتحدة الأمريكية لديها قرابة (25) في المئة من إجمالي الاحتياطي. على عكس النفط، احتياطات الفحم تتوزع على نحو متساوٍ حول العالم. (شركة البترول العالمية. 2008م. مراجعة إحصائية للطاقة العالمية).

obeikandl.com

الأنواع الشائعة من الفحم في الولايات المتحدة المتجاورة، (ب) توزيع احتياطي العالم من الفحم، الذي يبلغ قرابة (1000) مليار طن متري، لدى الولايات المتحدة (25) مخططًا في المئة منه، ويشير مستوى الاستهلاك السنوي العالمي قرابة (59) مليار طن، إلى أنّ الاحتياطات المعروفة تكفي لأكثر من (200) عام، بناءً على معدل الاستهلاك العالمي[6]، ومع ذلك، فمن المحتمل أن تستزف الاحتياطات عاجلًا في البلدان التي تمر بمرحلة التصنيع المكثفة مثل الصين.

يمكن أن تصنف نسبة الكبريت في الفحم بوجه عام، على أنّها منخفضة (صفر إلى (10%))، أو متوسطة (1.1 إلى (3%))، أو مرتفعة (أكثر من (3%))، ومع تساوي العوامل الأخرى جميعها، يؤدي استخدام الفحم منخفض الكبريت بوصفه وقودًا لمحطات الطاقة، إلى تقليل إصدارات ثاني أكسيد الكبريت (SO_2)، وتقليل تلوث الهواء، إذ إنّ معظم الفحم في الولايات المتحدة من النوع منخفض-الكبريت؛ ومع ذلك، فإنّ الفحم منخفض الكبريت الأكثر شيوعًا، هو منخفض الدرجة نسبيًّا، وقد عُثر على نوعية من فحم شبه البيتيومين في غرب نهر المسيسيبي (الجدول 15-2)[7]، ولذلك، ولتجنب تلوث الهواء، يجب أن تستمر محطات توليد الطاقة الكهربائية الحرارية على الساحل الشرقي المكتظ بالسكان، في معالجة الفحم المحلي لتقليل كمية الكبريت قبل الحرق، أو استخلاص الكبريت بعد الحرق، فقد تزيد كلفة الطاقة الكهربائية الحرارية، إلّا أنّها تبقى اقتصادية أكثر من نقل الفحم منخفض الكبريت من غرب نهر المسيسيبي.

أثر تعدين الفحم Impact of Coal Mining

يتم معظم التعدين في الولايات المتحدة عن طريق المناجم المفتوحة، أو تعدين الأشرطة الذي بدأ في أواخر القرن التاسع عشر، وازداد بصورة مطردة، في حين استقر الإنتاج من المناجم تحت الأرض؛ ونتيجة لذلك، يُحصل على معظم الفحم اليوم من المناجم السطحية غربي نهر المسيسيبي، وقد أصبح التعدين السطحي أكثر شيوعًا في السنوات الأخيرة، في الأبالاش باستخدام تقنية تعرف باسم إزالة أعلى الجبل، حيث يعدن الفحم من أعالي الجبال، وتجري النفايات الصخرية الناتجة عن التعدين في الأودية، بينما تخزن حمأة الفحم الناتجة عن المعالجة خلف سدود حمأة مخلفات الفحم، ويكون شريط التعدين في كثير من الحالات، من الناحية التكنولوجية والاقتصادية أكثر فائدة من التعدين تحت الأرض، إذ إنّ زيادة الطلب على الفحم سوف تؤدي إلى زيادة مناجم تعدين الأشرطة وانتشارها، لاستخراج قرابة (40) مليار طن متري من احتياطات الفحم، من خلال تقنية التعدين السطحي، إضافة إلى ذلك، فإنّ ما يقارب من (90) مليار طن متري أخرى من الفحم ضمن (50 m) من السطح، سيكون استخراجها متاحًا إذا دعت الحاجة إلى ذلك، ولوضع هذا في المنظور، افترض أنّ الإنتاج السنوي للولايات المتحدة قرابة (1) مليار طن متري، وأنّ الإنتاج العالمي (5) مليارات طن متري/سنة[6].

يختلف أثر المناجم السطحية الكبيرة بحسب المنطقة اعتمادًا على التضاريس والمناخ، والأهمّ من ذلك ممارسات الاستصلاح والتأهيل، حيث إنّ تصريف المناجم للمياه الحمضية في المناطق الرطبة مع وفرة هطل الأمطار، يُعدّ مشكلة خطيرة، انظر الشكل (15-8)، إذ تتسرب المياه السطحية إلى نفايات ضفاف الأنهار (المادة المتبقية بعد الفحم أو المعادن الأخرى المُزالة)، وتتفاعل مع معادن الكبريتيد، مثل البايرايت (FeS_2)، فينتج حمض الكبريتيك الذي يرشح على الجداول ومصادر المياه الجوفية ويلوثها، فعلى الرغم من أنّ المياه الحمضية تُصرَف من المناجم تحت السطحية، ومقاطع الطرق، والمناطق التي يتوافر فيها الفحم ومعدن البايرايت بصورة كبيرة، إلّا أنّ المشكلة تتضاعف، عندما تبقى مساحات واسعة مغطاة بالمواد المتناثرة مكشوفة للمياه السطحية، إذ من الممكن تقليل صرف الحمض من خلال الاستخدام الأمثل لأسلوب تحويل المياه التي تجمع جريان المياه السطحية والجوفية، قبل دخولها إلى منطقة التعدين، وإبعادها عن مواد يحتمل أن تكون ملوثة، فهذا الأسلوب يمكن أن يقلل من التعرية، والتلوث، وتكلفة معالجة المياه[8].

مشكلات المياه المرتبطة بالتعدين ليست واضحة في المناطق الجافة وشبه الجافة، مثلما هو الحال في المناطق الرطبة، ومع ذلك، فقد تكون الأراضي القاحلة أكثر حساسية لأنشطة التعدين، مثل التنقيب وبناء الطرق، ففي بعض المناطق القاحلة تكون الأرض حسّاسة جدًّا، حتى إنّ آثار الإطارات عبر الأراضي تبقى سنوات، فالتربة غالبًا رقيقة، والمياه شحيحة، ويكون العمل على استصلاح الأراضي أمرًا صعبًا.

الجدول (15-2): توزيع موارد الفحم في الولايات المتحدة وفقًا للنوع ومحتوى الكبريت (منخفضة، أو متوسطة أو مرتفعة).

على سبيل المثال: (97) في المئة من الأنثراسيت يحتوي على كبريت منخفض، و(43) في المئة من فحم البيتيومين يحتوي على كبريت عالٍ.

النوع	محتوى الكبريت[1]		
	منخفض	متوسط	مرتفع
97.1	2.9	–	الأنثراسيت
29.8	26.8	43.4	فحم البيتيومين
99.6	0.4	–	فحم شبه-البيتيومين
90.7	9.3	–	الليجنيت
65.0	15.0	20.0	الأصناف جميعها

الشكل (15-8): تصريف منجم الحمض. يلوث تصريف المياه الغنية بالحمض، من تشقق الفحم المكشوف، هذا الجدول في ولاية أوهايو.
(Kent and Donna Dannen/Photo Researchers, Inc.)

الشكل (15–9): **تعدين الفحم حفارة كبيرة على مصطبة منجم**، ولاية كولورادو، إزالة الفحم وتحميله في شاحنات كبيرة؛ لتسليمه إلى محطة للطاقة قبالة موقع التعدين. *(Edward A. Keller)*

لدى طرق تعدين الأشرطة جميعها القابلية للتلويث، ويمكن أن تقلل عادات الاستصلاح من الأضرار البيئية الناتجة عن قطاع التعدين (الشكل 15–9)، يبدأ الاستصلاح بالفصل بين التربة والغطاء الصخري (الصخر الذي يغطي الفحم)، وبعد التعدين تُستبدل التربة السطحية المُزالة، فهذه الطريقة شائعة الاستخدام، وهي وسيلة ناجحة للحد من تلوث المياه، عندما يقترن بهيكلة الغطاء النباتي وإعادته[8].

تنظم المبادئ الفدرالية الإتحادية قطاع تعدين الفحم في الولايات المتحدة، فهي تتطلب استعادة الأراضي المُعدّنة لدعم استخدامها الأولي قبل حصول التعدين، وتشمل الاستعادة التخلص من النفايات، وتسوية الأراضي وزراعتها، انظر الشكل (15–10)، إذ إنّ الأمل بعد الاستصلاح، أن تظهر أراضي المناجم، وتؤدي دورًا مثلما فعلت قبل استخراج الفحم، وهي مهمّة صعبة، وليست ناجحة تمامًا، إضافة إلى أنّها تحظر لوائح قطاع التعدين في الأراضي الزراعية الخصبة، ومنح المزارعين ومربي الماشية الفرصة أو حق النقض للتعدين على أرضهم، حتى لو كانوا لا يملكون حقوق التعدين، وقد نتجت أيضًا أخطار عن التعدين تحت الأرض للفحم، وغيرها من الموارد، وتتسبّب في قدر كبير من التدهور البيئي، ومن ذلك: (1) قد يلوث الماء الحمضي المصرّف من المناجم عبر السيول المائية. (2) هبوط سطح الأرض وانهياره إلى داخل الحفر فوق المناجم تحت الأرض، ما يضر بالمباني والطرق وغيرها من الهياكل. (3) حرائق الفحم التي تبدأ في المناجم قد تحرق، وتبعث الدخان سنوات عدّة.

استخدام الفحم في المستقبل والآثار البيئية
Future Use and Environmental Impacts of Coal

يزيد الطلب على الفحم بسبب الموارد المحدودة من النفط والغاز الطبيعي، والمخاوف بشأن إمدادات الطاقة في ولاية كاليفورنيا وفي أنحاء البلاد جميعها؛ لذا، تخطط صناعة الفحم إلى زيادة نشاط التعدين، فما زالت الأزمة في إمدادات النفط والغاز بعيدة سنوات، إلّا أنّ حدوثها سيشكل ضغوطًا على صناعة الفحم، لفتح المزيد من المناجم في كلّ من أحواض الفحم الشرقية والغربية في الولايات المتحدة، ما يترتب على هذا الحل تأثيرات بيئية كبيرة لأسباب عدّة، هي [5]، [9]، [10]:

- ستكون الكثير من الأراضي قطاعًا مُعدّنًا، ما يتطلب استصلاح دقيق.
- على عكس النفط والغاز، يترك حرق الفحم الكثير من الرماد ((5–20%) من الكمية الأصلية للفحم)، الذي يجب جمعه والتخلص منه في مكب النفايات، إذ يمكن استخدام بعضه بوصفه تعبئة في تنمية الأراضي أو لأغراض أخرى، إلّا أنّ قرابة (85%) عديم الجدوى في الوقت الحاضر.
- التعامل مع كميات هائلة من الفحم خلال مراحل التعدين جميعها، المعالجة، والتخلص من نفايات التعدين، والشحن، والحرق، والتخلص من الرماد، لها آثار بيئية سلبية محتملة، بما في ذلك تلوّث المياه وتلوّث الهواء (انظر إلى نظرة متفحصة: حمأة الفحم في جبال الأبالاش)، ومن المرجح أن يسبّب إطلاق بعض آثار العناصر مشكلات صحية خطيرة في الماء، والتربة، والهواء؛ وتدهور الجمالية في المناجم، ومحطات الطاقة، والمرافق الأخرى المرتبطة بصناعة الفحم.

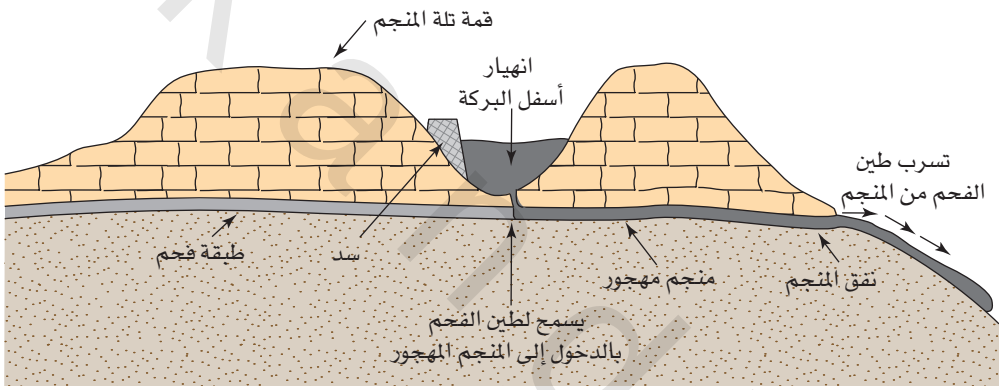
الشكل (15–10): **الأراضي المستصلحة على مصطبة منجم، كولورادو**. الموقع في المقدّمة كان مجرد استبدال التربة بعد التعدين، في حين المواقع المزروعة قد تمّ استصلاحها تمامًا. *(Edward A. Keller)*

obeikandi.com

نظرة متفحّصة A CLOSER LOOK

حمأة الفحم في جبال الأبالاش Coal Sludge in the Appalachian Mountains

ينتج عن تعدين الفحم ومعالجته في جبال الأبالاش الكثير من النفايات، وتؤدي عملية معالجة الفحم إلى نشوء مخلفات تعرف باسم الحمأة أو الطين، وهو حمأة سميكة تتكوّن من الماء مع جزيئات من الفحم والصخر والطين، وغالبًا ما تُخزّن حمأة الفحم في محتجزات خلف السدّ، إذ إنّ هناك المئات من محتجزات حمأة الفحم في ولاية فرجينيا الغربية، وبنسلفانيا، وكنتاكي، وقد حدثت تسع حالات فشل في محتجزات حمأة الفحم خلال السنوات الـ (30) الماضية، فقد فشل سد نفايات الفحم في بوفالو اليونانية / فرجينيا الغربية، الذي يحتوي على حمأة الفحم عام 1972م، وقتلت الفيضانات الناجمة عن ذلك (118) شخصًا، بينما أدّى إلى تدمير قرابة (500) منزل، وقد أدّى هذا الحدث إلى اقتراحات وتوصيات وقوانين، للحد من احتمالات حصول أحداث مستقبلية، ومع ذلك، فقد وقعت أحداث أخرى، مثل ما حصل في 11 أكتوبر عام 2000م، عندما انطلق قرابة مليون متر مكعب (250 مليون جالون) من الحمأة السوداء الكثيفة، في نظام نهر ساندي الكبير في جنوب شرق ولاية كنتاكي، حيث خُزّنت الحمأة في محتجزات تقع داخل منجم فحم مهجور، وسمح انهيار أرضية المحتجز في المنجم بتدفق الحمأة خلال المنجم وإلى البيئة وعلى أفنية الناس والطرق وإلى روافد نهر ساندي الكبير، وتلوّثت أكثر من (100 km) من النهر من الحمأة، ودُمّرت الحياة (بما في ذلك مئات الآلاف من الأسماك) في النهر، فقد كان التسرب واحدًا من أسوأ الكوارث البيئية في جنوبي الولايات المتحدة، المحتجز نفسه كان مماثلًا عام 1994م، ولكن تسرّب الحمأة كان أقلّ، إذ فُحصت قبل ثلاثة أسابيع من تسرب أكتوبر عام 2001م، وقد لا تكون التوصيات التي أعقبت تسرب عام 1994م أُتّبعت، إضافة إلى أنّه لم يكن هناك ما يكفي من الصخور الصلبة، فوق المنجم المهجور لدعم الحمأة الثقيلة (الشكل 15 أ)[13].



الشكل (15 أ): التلوث الناتج عن تسرب حمأة الفحم. رسم بياني مثالي يبين كيفية حدوث تسرب من موقع لتخزين طين الفحم. في هذه الحالة، يسمح الانهيار عبر منجم فحم مهجور بتسرب الطين.

- يشكل الرماد المتطاير خطرًا محتملًا، إذ ينتج عن حرق الفحم المطحون في محطة توليد الطاقة، ويجمع في برك تجميع الرماد المجاورة لمحطات توليد الكهرباء، وهو سام، ويجب التخلص منه، قد تحتوي البرك ملايين عدّة من الأمتار المكعبة من الرماد الرطب، فقد فشلت هياكل حجز وحفظ بركة الرماد في محطة الطاقة الأحفورية كنغستون في ولاية تينيسي في 22 ديسمبر من عام 2008م، ما أدّى إلى طوفان من الماء والرماد نحو المنحدر، وتدمير منازل عدّة، وقطع خط الغاز، وتلويث النهر[11].
- حُرقت مليارات أطنان مترية من الفحم في أنحاء العالم جميعها، ما أدّى إلى انبعاث كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون (CO_2) في الغلاف الجوي، حيث تُعدّ الصين والولايات المتحدة وروسيا أكثر الدول مساهمة في انبعاث هذا الغاز، ويعتقد أن يكون ثاني أكسيد الكربون، وهو "غازات الدفيئة"، خطيرًا في إنتاج ظاهرة الاحتباس الحراري. (سيناقش الاحتباس الحراري في الفصل السادس عشر).

لا يمكن التغلب على المشكلات البيئية المرتبطة بالفحم، ويمكن التقليل منها بالتخطيط الدقيق والحذر، فبزيادة التجارة العالمية، ستصبح مناجم جديدة مع فحم أكثر نظافة متاحة أكثر، على سبيل المثال: تُطوّر مناجم الفحم في بورنيو، التي تنتج فحمًا منخفض الدرجة ومنخفض الكبريت بنسبة كبيرة جدًّا، إذ وصف بـ "الغاز الطبيعي الصلب"؛ لأنّه مصدر طاقة نقي جدًّا، فهذه الرسوبيات النظيفة من الفحم في بورنيو سميكة، ولها بضعة أمتار من الغطاء الصخري[12]، وبغض النظر عن مصادرها ونوعيتها، قد تكون هناك بدائل قليلة لتعدين كميات هائلة من الفحم، حيث ستكون في المستقبل في حاجة إلى كميات هائلة من الفحم لتغذية محطات توليد الطاقة الحرارية، ولتوفير النفط والغاز عن طريق تغويز (التحويل إلى غاز) وتسييل الفحم؛ لذا، فإنّ أحد الأهداف المهمّة، هو البحث عن سبيل لاستخدام الفحم الذي يقلل من الاختلالات البيئية.

الهيدروكربونات: النفط والغاز
Hydrocarbons: Oil and Gas

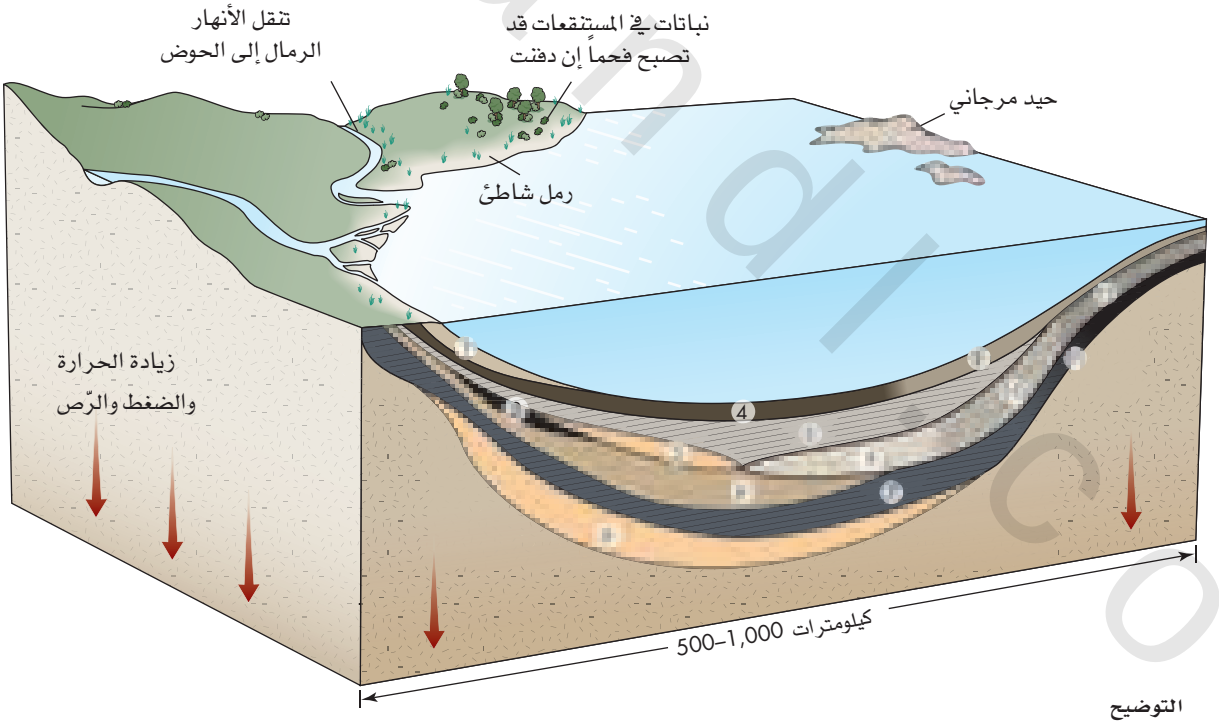
تُعدّ النفط، (النفط الخام)، والغاز الطبيعي من المواد الهيدروكربونية، التي تتكوّن من الكربون، والهيدروجين، والأكسجين. **الغاز الطبيعي** في الغالب غاز الميثان (CH_4). عادة ما يعادل غاز الميثان أكثر من (80%)

من غازات الطاقة المتوافرة، إذ تشمل غازات الطاقة-الطبيعية الأخرى كلًّا من الإيثان، والبروبان، والبوتان، والهيدروجين[14]. ومثلما هو الفحم، فإنّ الهيدروكربونات وقود أحفوري تشكل من المواد العضوية، التي نجت من التحلل الكامل بعد الدفن، وقد عُثر على النفط والغاز في رسوبيات كثيفة استُخرجت بكثرة من الآبار، وتتوافر أيضًا بصورة كبيرة في الصخر الزيتي ورمل القطران.

جيولوجية رسوبيات النفط والغاز
Geology of Oil and Gas Deposits

إلى جانب المياه، النفط هو السائل الأكثر وفرة في قشرة الأرض، ومع ذلك، فإنّ العمليات التي تشكله ما زالت مفهومة جزئيًّا فقط، وقد تقبل معظم علماء الجيولوجيا، أنّ أصل النفط والغاز يعود إلى المواد العضوية التي دفنت مع الرواسب البحرية أو رواسب البحيرات، وتشمل البيئات الملائمة التي تنجو فيها بقايا المواد العضوية من الأكسدة، المناطق القريبة من الشاطئ، التي تتميّز بالترسيب السريع، والتي سرعان ما تدفن المواد العضوية، أو في مناطق المياه العميقة، التي تتميز بنقص الأكسجين في الأعماق، الذي يحدّ من التحلل الهوائي، إضافة إلى ذلك، يصنف مكان تكوّن النفط والغاز بوجه عام على هيئة خسف، وأحواض ترسيبية، انظر الشكل (15–11)، والذي تترسب فيه الرواسب الأحدث فوق الرواسب الأقدم بصورة مستمرة؛ ما يُعرض المواد الأقدم المدفونة على أعماق أكثر لارتفاع تدريجي في درجات الحرارة والضغوط[15].

ينشأ النفط والغاز أساسًا في رواسب دقيقة الحبيبات غنية بالمواد العضوية يطلق عليها صخر المصدر (source rock)، حيث تتعرض للدفن على أعماق (1 – 3 km)، وتتعرض لحرارة وضغط، ونتيجة لارتفاع درجة الحرارة والضغط، جنبًا إلى جنب مع العمليات الأخرى، يبدأ التحول الكيميائي لبقايا المواد العضوية، ويتكوّن نفط وغاز حراري الأصل، انظر الشكل (15–12)، ويسمّى الغاز الطبيعي الذي يتشكل قريبًا من سطح الأرض عن طريق العمليات البيولوجية الغاز الحيوي، ومثال على ذلك، غاز الميثان الناتج في مكبات النفايات ومخلفات الاضمحلال، ويبدأ الهيدروكربون بعد تشكيله في الهجرة إلى الأعلى، حيث يكون الضغط منخفضًا مع زيادة في المسامية، ثمّ تندمج هذه الهجرة الأولية خلال صخر المصدر مع الهجرة الثانوية، حيث يتحرك النفط والغاز بحرية أكثر داخل صخور خشنة الحبيبات وعالية النفاذية، التي تسمّى صخور المكمن (reservoir rock)، مثل الصخر الرملي أو الحجر الجيري المكسر، ليتسرب النفط والغاز إلى السطح إذا كان المسار خاليًا، وهذا قد يفسر سبب توافر معظم النفط والغاز في الصخور الأصغر عمرًا جيولوجيًّا (عمر أقل من 100 مليون سنة)، حيث يأخذ الهيدروكربون في الصخور القديمة وقتًا أطول، حتى يصل إلى السطح ويتسرب[15]، غالبًا ما تستغرق العملية برمتها من الترسيب الأولي إلى الدفن العميق ملايين السنين[14]. عندما يعيق النفط والغاز في هجرتهما إلى الأعلى حاجز منيع نسبيًّا، فإنّهما يتراكمان في صخور المكمن، وإذا كان للحاجز أو صخر الغطاء (cap rock) شكل هندسي ملائم، مثل القبة أو الطية المحدبة، فإنّ النفط والغاز سوف يحاصران في حركتهما إلى الأعلى، في قمّة القبة أو في الطية



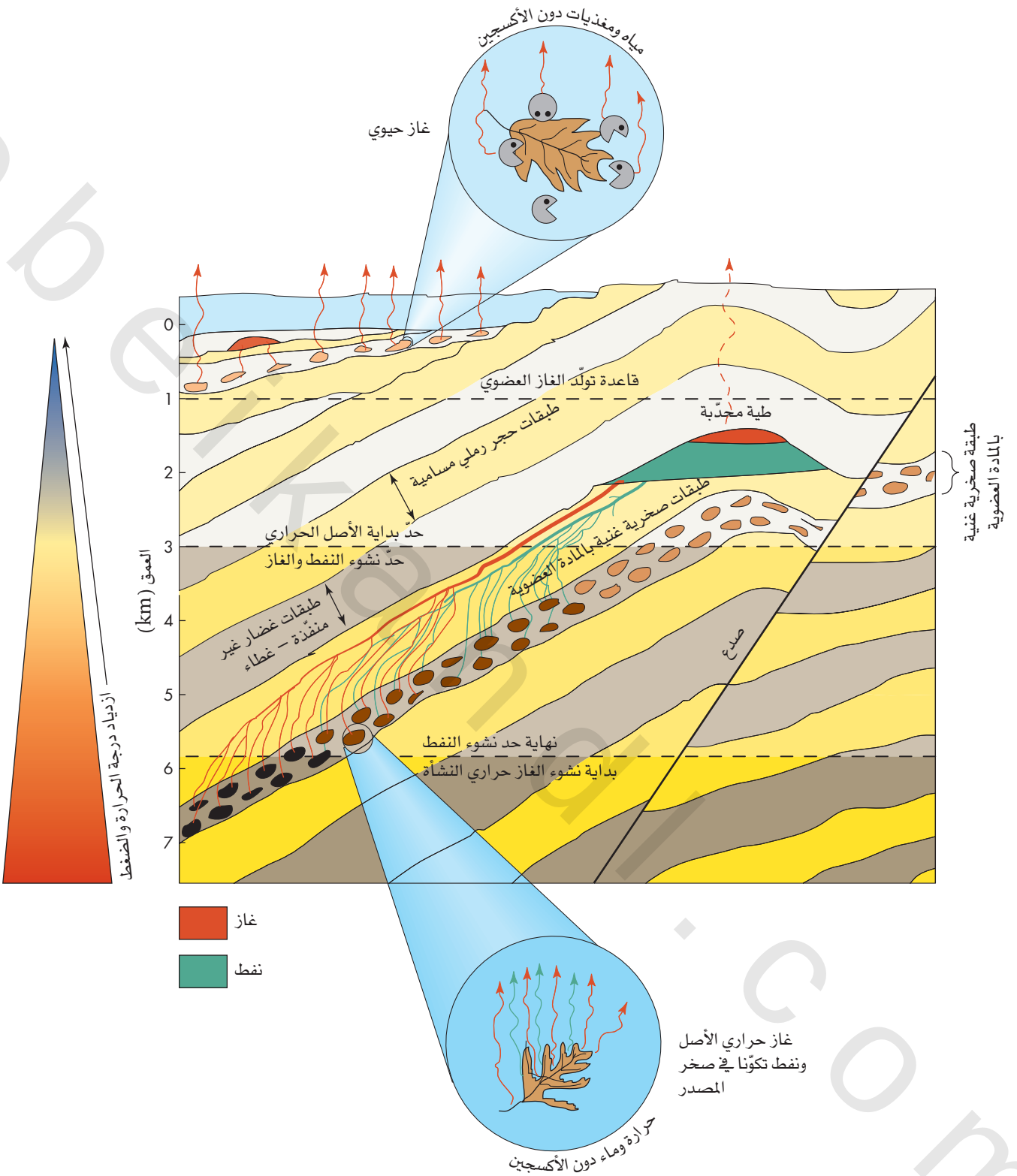
التوضيح

1. رمل دلتا
2. فحم
3. حجر رملي (رمل شاطئ مرصوص)
4. طين أسود ترسب من مياه البحر
5. غضار تكون من رصّ الطين
6. حجر رملي بني (تشكل من رصّ رمل النهر والدلتا) *
7. غضار قديم (تؤدي الحرارة على هذا العمق إلى تحويل المادة العضوية إلى نفط)
8. حجر رملي قديم *
9. حجر جيري *
10. حيد مرجاني قديم *
11. نفط هاجر من الغضار إلى الحيد المرجاني، وشكل خزانًا نفطيًّا *
12. دولوميت تشكل من تحلل الحجر الجيري من المياه الجوفية *

* *خزان غاز أو نفط مستقبلي كامن*

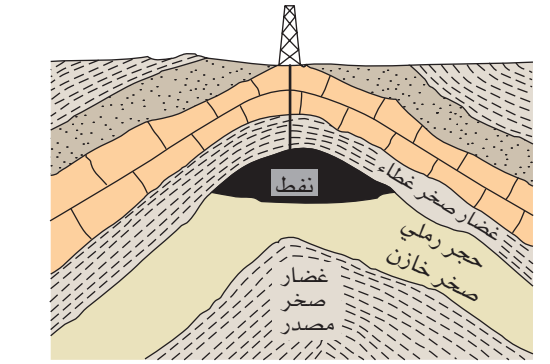
الشكل (15–11): **حوض الترسيب.** العمليات والرواسب المرتبطة بتكوين النفط. (معدلة بعد المركز الكندي لمعلومات الطاقة، 1999م).

obeikandi.com

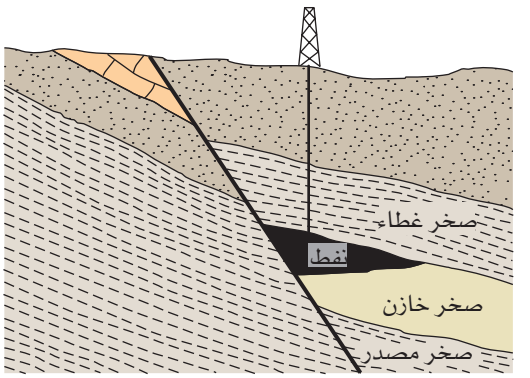


الشكل (15–12): كيفية تكون النفط والغاز. رسم مثالي يوضّح العمق اللازم لتشكل الغاز الحيوي والغاز الطبيعي (الحراري) والنفط. McCabe, P. J., Gautier, D. L., Lewan, M. D., and Turner, 1993. مستقبل طاقة الغازات. المنشور الدوري للمسح الجيولوجي 1115. الولايات المتحدة)

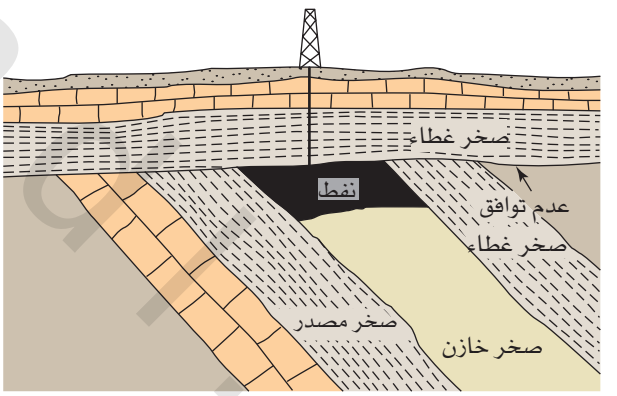
المحدبة تحت صخر الغطاء، انظر الشكل (15–12)[15]، الذي يوضح مصيدة (trap)طية محدبة، ومصيدتين محتملتين بسبب فالق (صدع fault) أو سطح عدم توافق، وهو تآكل السطح المدفون، وهذه ليست الأنواع الوحيدة الممكنة من المصايد؛ فأيّ صخر يحتوي على مسامية ونفاذية عالية نسبيًّا، ويتصل بصخر المصدر الذي يحتوي على الهيدروكربون، قد يصبح مكمنًا، إذ إنّ المكمن يتشكل إذا أعيقت هجرة النفط والغاز إلى الأعلى، بسبب صخر الغطاء الذي يتوضع لاصطياد الهيدروكربون في نقطة ارتفاع مركزية[12].



(أ) مصيدة طية محدبة



(ب) مصيدة صدع



(ج) مصيدة عدم توافق

الشكل (15–13): أنواع مصايد النفط (Oil traps). (أ) الطية المحدّبة. (ب) الصدع. (ج) سطح عدم التوافق.

إنتاج النفط Oil Production

تسترد الآبار الإنتاجية النفط في الحقل النفطي من خلال طرق استرداد أولية أو محسنة، إذ يستخدم الاسترداد الأولي الضغط الطبيعي للخزان في نقل النفط إلى البئر، حيث يمكن بعد ذلك ضخها إلى السطح، ولا يصل هذا الضخ عادة إلى أكثر من (25) في المئة من إجمالي البترول في البئر، فتعزيز زيادة معدل الاسترداد إلى (50) في المئة أو إلى (60) في المئة أو أكثر، يتطلب طرق الاسترداد المحسنة، ويعالج التحسين ضغط الخزان عن طريق حقن البئر بالغاز الطبيعي أو الماء أو البخار أو المواد الكيميائية أو مزيج من ذلك، ما يدفع النفط إلى الآبار، حيث يمكن رفعه إلى السطح بالوسائل المألوفة، مثل مضخات التمايل المعروفة بـ"رأس الحصان"، والمضخات الغاطسة، أو طرق الرفع الأخرى.

يجلب إنتاج النفط إلى السطح دائمًا كميات متفاوتة من المياه المالحة، أو المحلول الملحي، إضافة إلى النفط، وبعد فصل النفط والماء، لا بدّ من التخلص من المحلول الملحي؛ لأنّه سام لبيئة السطح، عن طريق الحقن بوصفه جزءًا ثانويًّا من الاسترداد، والتبخير في حفر مفتوحة مبطنة، أو عن طريق إعادة حقنها؛ للتخلص منها في آبار عميقة خارج الحقل النفطي، وقد كانت بعض مواقع التخلص من النفايات في حقول النفط، أولى منشآت التخلص من النفايات الخطرة، وأصبح بعضها مواقع للتخلص من المخلفات الصناعية الخطرة.

توزيع النفط والغاز وكمّيتهما Distribution and Quantity of Oil and Gas

يُعدّ توزيع النفط والغاز في المكان والزمن الجيولوجي معقدًا نوعًا ما، وبوجه عام، هناك ثلاثة مبادئ يمكن تطبيقها، هي:

- **أولًا:** النفط التجاري يُنتج على وجه الحصر تقريبًا، من الصخور الرسوبية المترسبة خلال السنوات الـ(500) مليون الأخيرة من تاريخ الأرض.
- **ثانيًا:** على الرغم من توافر كثير من حقول النفط في العالم، إلّا أنّ معظم الإنتاج الكلي يأتي من حقول منتجة نسبتها ضئيلة.
- **ثالثًا:** معظم حقول نفط العالم الضخمة تقع على تقاطعات الصفائح، التي نشطت في الـ (70) مليون سنة الأخيرة.

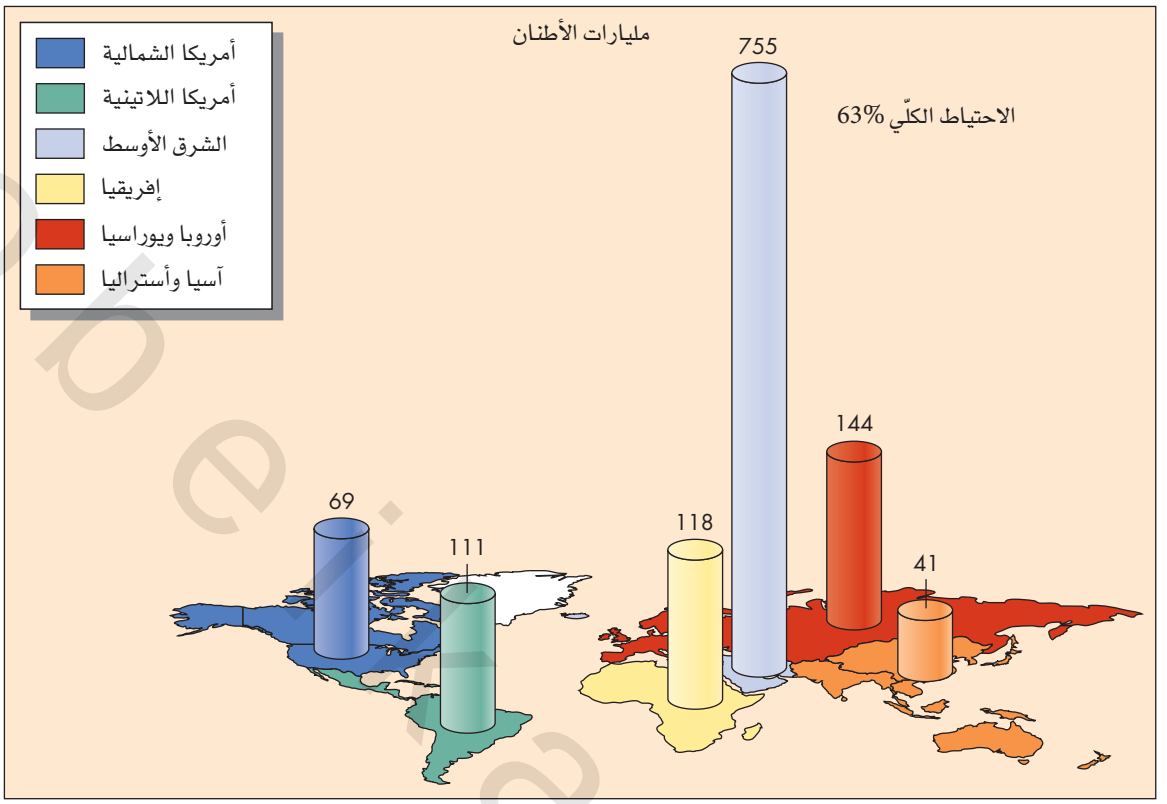
من الصعب تقييم احتياطي البترول في الولايات المتحدة، ناهيك عن المتوافر في العالم بأسره، ومع ذلك، يبين الشكل (14–15) تقييمًا حديثًا لاحتياطي العالم من النفط الخام، حيث تقع معظم احتياطات النفط في الشرق الأوسط (63%)، وتتوافر (70%) من احتياطات الغاز الطبيعي في الاتحاد السوفياتي السابق والشرق الأوسط، ولا توحي الأرقام بأننا نسير إلى نفاد النفط الخام في الوقت القريب، ومع ذلك، هناك شكوك بشأن الحجم المقدر لاحتياطي النفط والموارد المحتملة، إذ من المرجّح أن تحدث الذروة في إنتاج النفط بين عامي 2020م و2050م. (انظر فتح قضية تاريخية).

الغاز الطبيعي وقود نظيف نسبيًّا مقارنة بالفحم والنفط، ولديه الإمكانات ليحل محل النفط والفحم، خلال فترة الانتقال من الوقود الأحفوري إلى مصادر الطاقة البديلة، إذ إنّ كمية الغاز الطبيعي في أنحاء العالم جميعها كبيرة جدًّا، ما يكفي أن تستمر قرابة قرن واحد بمعدلات استهلاك الآونة الأخيرة، ولايزال التنقيب عنه في الولايات المتحدة جاريًا، وقد تمّ العثور على كميات كبيرة من الغاز الجديد وتطويرها، حيث تمّت مناقشة اثنين من التطورات الأخيرة، ميثان طبقة الفحم الحجري وميثان الهيدرات، بصفتهما أمثلة.

ميثان طبقة-الفحم الحجري Coal-Bed Methane

تجري "حمى الطاقة" في حقول الفحم في غربي الولايات المتحدة، ويحتوي الفحم على كميات كبيرة من غاز الميثان المخزن على سطوح المواد العضوية في الفحم، حيث تكفي احتياطات غاز الميثان منطقة وايومنغ، بما في ذلك آساتش وأحواض نهر الطاقة، وتوفر الغاز الطبيعي للولايات المتحدة مدة خمس سنوات، فقد حُفر أكثر من (10000) بئر لاسترداد غاز الميثان، ومن الجدير ذكره، أنّ آبار ميثان طبقة الفحم (الغاز الطبيعي) تُعدّ آبارًا ضحلة واقتصادية أكثر بكثير من الآبار النموذجية للنفط، فهذا المصدر الجديد نسبيًّا من غاز الميثان يُعدّ واعدًا، وسوف يقلل من كمية الطاقة المستوردة، إلّا أنّ هناك مخاوف بيئية مرتبطة بالتطور الشديد لغاز ميثان طبقة الفحم،

obeikandl.com



(ب)

الشكل (15–14):
احتياطات النفط. احتياطات النفط العالمية المؤكدة (مليارات البراميل) عام 2007م، حيث يهيمن الشرق الأوسط على قرابة ثلثي إجمالي الاحتياطات. (شركة النفط البريطانية، 2008م. المراجعة الإحصائية للطاقة العالمية).

منها[16]:

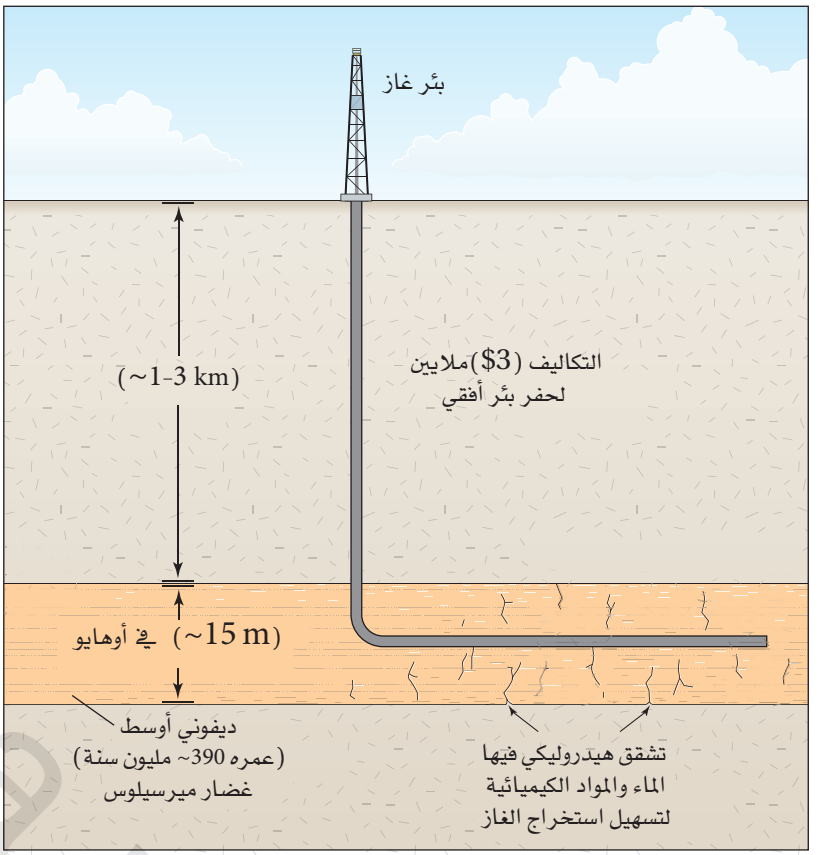
- التخلص من المياه المالحة المنتجة مع غاز الميثان.
- استخراج المياه الجوفية (انخفاض المصادر المائية)، المرتبطة باستخراج غاز الميثان.
- هجرة غاز الميثان (الغاز المتفجر، القابل للاشتعال) بعيدًا عن مواقع الآبار.
- خفض إنتاج المحصول، إذا استُخدمت المياه المالحة في ري المحاصيل.
- تلوث مياه السيول وفقدان تدفق الينابيع، نتيجة استخراج المياه الجوفية، وتصريف مياه المناجم التي تدخل إلى السيول والأنهار.
- التعرية والجريان السطحي من الأراضي المبعثرة للطرق، ومواقع البئر، وعمليات غاز الميثان ونقله.

خلاصة القول: ميثان طبقة الفحم مصدر مهم للطاقة، ومع ذلك، يجب أن يُقيّم استخراجه ومعالجته ونقله إلى المستخدمين عن كثب؛ لتحديد أفضل السبل للتقليل من الآثار البيئية الضارة المحتملة أو القضاء عليها، ويتعيّن بعد ذلك تنفيذ خطوات لحماية البيئة بسن القوانين وتنفيذ سياسات تضمن ذلك، تمامًا مثلما نقوم به مع غيرها من أنواع استغلال الطاقة واستخدامها، إذ إنّ استخراج أيّ وقود أحفوري، هو في جوهره عملية ترافقها احتمالية إحداث الضرر بالبيئة، وغاز ميثان طبقة الفحم ليس مستثنًى من ذلك.

الحجر الطيني الأسود (الغاز الطبيعي المحكم)

الشكل (15–15): الغاز الضيق Tight Gas. يضم غضار العصر الديفوني في شمال شرق الولايات المتحدة كميات وفيرة من الغاز الطبيعي، الذي يثير حمى الطاقة. (المساحة الجيولوجية الأمريكية).

Openandi.com



الشكل (15–16): **بئر الغاز في الصخر الطيني الصلب:** البئر العميق يتحول في الأعماق إلى أفقي.

Black shale (tight natural gas)

الصخر الطيني من العصر الديفوني المدفون على بعد كيلومتر، تحت شمالي الأبالاش، يحتوي على (500) تريليون قدم مكعب من الغاز الطبيعي ((10%) هو مصدر محتمل)، إذ يتوزع غاز الميثان في أنحاء الصخر الطيني الأسود جميعها بصفتها خزانًا غير تقليدي، مقارنة بحقول الغاز، حيث غاز الميثان متوافر في التجاويف، انظر الشكل (15–15) الذي يبين المساحة الشاسعة التي يسيطر عليها صخر مارسيلو[17]. إنّ استخلاص غاز الميثان مكلف، إضافة إلى أنّ الآبار العميقة التي تتحول في العمق إلى وضع أفقي ضرورية، انظر الشكل (15–16). حيث يستخدم الماء وغيره من المواد الكيميائية بعد ذلك في كسر الصخور (التكسير المائي) لتسهيل استخلاص الغاز، ويحدث اندفاع الطاقة لاختبار الغاز الطبيعي المحكم وتطوير استخلاصه، الذي يثير القلق في هذه المسألة أن يؤدي الحفر والتكسير إلى تلوث الموارد المائية، كما هو الحال في مدينة نيويورك التي تخشى تلوث مواردها المائية القادمة من الشمال.

هيدرات الميثان Methane Hydrate

مصدر معروف محتمل للغاز الطبيعي، فغاز الميثان هو مصدر الطاقة المرجح والمتوقع أن يحل محل النفط خلال فترة الانتقال من الوقود الأحفوري إلى مصادر الطاقة البديلة والمتجددة، ومن المنظور البيئي، فإن حرق الغاز الطبيعي – وبخاصة غاز الميثان – لإنتاج الكهرباء ونقل الناس في المركبات، هو أفضل من حرق غيره من الوقود الأحفوري؛ لأنّه ينتج ملوثات هواء، مثل الكبريت وثاني أكسيد الكربون والجسيمات، بنسبة أقل مما تنتجه أنواع الوقود الأحفوري الأخرى.

ومن المعروف منذ سنوات، أن رواسب هيدرات غاز الميثان متوافرة على عمق قرابة (1000 m) تحت قاع البحر، وهي مادة بيضاء شبيهة بالجليد، تتكوّن من جزيئات غاز الميثان ومحاطة بـ «أقفاص» من الماء المجمد، التي تشكلت نتيجة الهضم الميكروبي للمواد العضوية في الرسوبيات، إضافة إلى أنّ رسوبيات هيدرات غاز الميثان تتوافر أيضًا على اليابسة، فقد اكتشفت رسوبيات اليابسة الأولى في المناطق دائمة الجليد في سيبيريا وشمال أمريكا، حيث تسمى غاز السبخة.

تتوافر رسوبيات هيدرات غاز الميثان في أنحاء المحيط الهادي والمحيط الأطلسي جميعها، وتُعدّ مصدرًا كامنًا في البيئة البحرية، بما يقارب ضعف كمية الكربون في كل من الغاز الطبيعي والنفط ورسوبيات الفحم على الأرض[18]، وهي كمية كافية لتوفير احتياجات العالم من الطاقة في المستقبل، إذا أمكن الحصول عليها، وعلى الرغم من هذا الشرط، فإن هيدرات الميثان تبدو جذابة بصورة خاصة لدول مثل اليابان، التي تعتمد كليًّا على النفط والفحم الأجنبي لتلبية احتياجاتها من الوقود الأحفوري.

تُعدّ مهمة استخلاص هيدرات غاز الميثان صعبة، فهي تتوافر على طول الأجزاء السفلى من المنحدرات القارية، على عمق مياه يزيد على (1 km) غالبًا، وهو عمق ليس من السهل على معظم منصات الحفر أن تعمل فيه بأمان، أضف إلى ذلك أنّ الرسوبيات نفسها تمتد تحت رسوبيات قاع المحيط مسافة تبلغ مئات عدّة من الأمتار، وسيكون تطوير طريقة لإنتاج الغاز ونقله إلى الأرض مهمة معقدة، فهيدرات الميثان تتوافر في مناطق ذات ضغط عالٍ وبرودة شديدة؛ بسبب الأعماق المحيطية، وتتحلل بسرعة على عمق مياه يبلغ قرابة (500 m)، ما يسمح لغاز الميثان بالرحيل في تدفق للفقاعات إلى السطح، ومن الممكن أن تدخل إلى الغلاف الجوي، وهذه ميزة تشكل تهديدًا للبيئة؛ لأنّ الميثان غاز دفيء قوي، إضافة إلى أنّ هذه العملية قد تسهم في ظاهرة الاحتباس الحراري (انظر الفصل السادس

obeikandl.com

عشر)، إذ يعتقد بعض العلماء أنّ تحلل غاز هيدرات الميثان قد أسهم في ظاهرة الاحتباس الحراري في الماضي، فلايزال الغاز ينبعث حتى اليوم، وقد اكتشف باحثون من روسيا في صيف عام 1998م هيدرات غاز ميثان غير مستقر قبالة سواحل النرويج، وخلصوا إلى أنّ الرسوبيات قد تسببت في واحدة من أكبر انبعاثات الميثان الموثقة، وقد سجل العلماء خلال الانبعاث أعمدة كبيرة (تصل إلى ارتفاع نصف كيلومتر) من غاز الميثان منبعثة من الرسوبيات تحت قاع البحر إلى الغلاف الجوي.

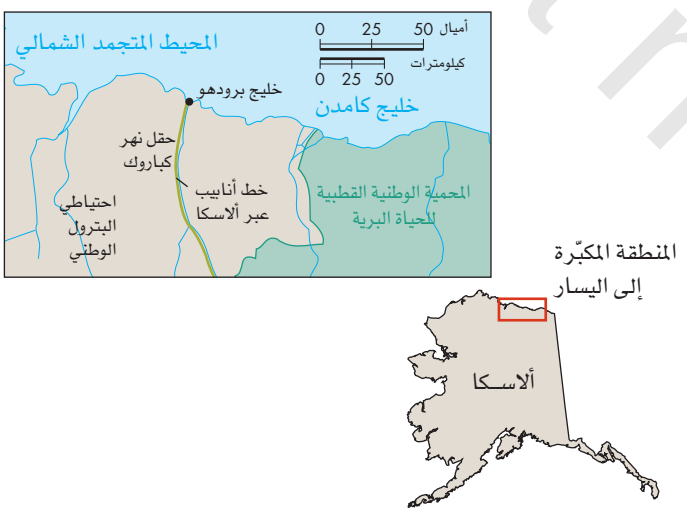
ويعتقد بعض العلماء أن انبعاث غاز الميثان من الهيدرات بسرعة من مصدر واحد كبير قد يؤدي إلى تغيرات مناخية خلال فترة قصيرة من الزمن، ومن المعتقد أيضًا، أن مثل هذه الانبعاثات يمكن أن تكون مسؤولة عن الزيادة السريعة في ارتفاع درجات الحرارة، التي حدثت في غضون بضعة عقود في أثناء العصر الجليدي الأخير، منذ ما يقارب (15000) سنة مضت، حيث تتوافر أدلة على حدوث انبعاثات كبيرة من غاز الميثان من قاع البحر، إضافة إلى توافر حقول حوضية كبيرة تشبه تلك الناتجة عن انفجار قنبلة، تكسو قاع البحر، على مقربة من رسوبيات هيدرات الميثان، إذ يبلغ عمق بعض الفوهات قرابة (30 m)، وقطرها (700 m)، وتشير إلى أنها ناتجة عن انفجار ثوران غاز الميثان.

ربما أنّنا لن نحاول استغلال هيدرات غاز الميثان حتى يصبح سعر النفط باهظًا جدًّا، وحينها لن يكون لدينا خيار سوى التطلع إلى البدائل، وقد يكون هذا قريبًا! حيث يجري النظر في خطط محتملة عدة لاستغلال الرسوبيات، حيث يُعدّ التقدم في هذا المجال على مدى السنوات القليلة المقبلة مرجّحًا[18].

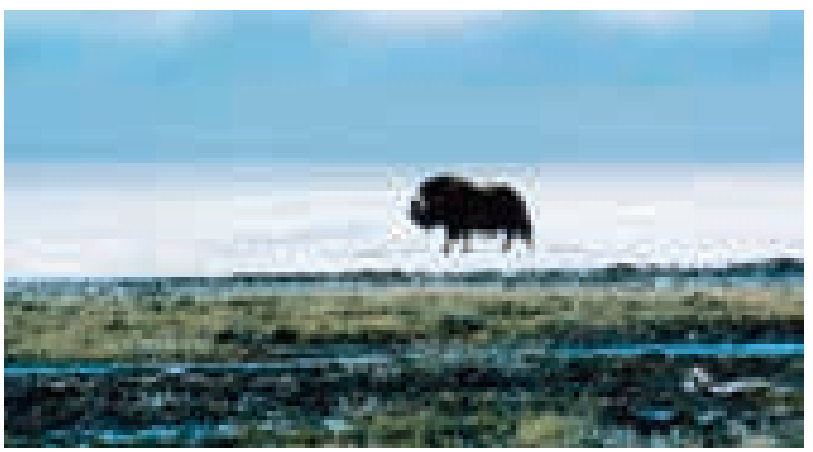
أثر الاستكشاف والتطوير
Impact of Exploration and Development

يتفاوت الأثر البيئي للتنقيب وتنمية النفط والغاز من آثار بيئية لا تذكر – مثل استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد في الاستكشاف – إلى آثار مهمة وكبيرة – مثل تأثير المشروعات الذي لا مفر منه المتمثل في خط الأنابيب عبر – ألاسكا، ويمكن أن يشمل أثر التنقيب عن النفط والغاز بناء الطرق، والحفر الاستكشافي وبناء خط إمداد المناطق النائية، حيث تتسبب هذه الأنشطة بشكل عام في تأثير سلبي قليل في المناظر الطبيعية والموارد، باستثناء المناطق الحساسة، بما في ذلك بعض البيئات الجافة وشبه الجافة وبعض المناطق دائمة الصقيع، حيث يكون التأثير فيها أكبر.

وتتضمن تنمية حقول النفط والغاز حفر الآبار على سطح الأرض أو تحت قاع البحر، والتخلص من المياه العادمة التي تُجلب إلى السطح مع البترول، ونقل النفط عن طريق الناقلات أو خطوط الأنابيب أو طرق أخرى إلى مصافي التكرير، وتحويل النفط الخام إلى منتجات مفيدة، إذ تتوافر في كل خطوة براهين على إمكانية حدوث اختلال بيئي، بما في ذلك المشكلات المرتبطة بالتخلص من المياه العادمة، كانسكابات النفط العرضية، وتسرب الأنابيب في حقول النفط، وغرق سفن ناقلات النفط، وتلوث الهواء في مصافي



(أ)



(ب)

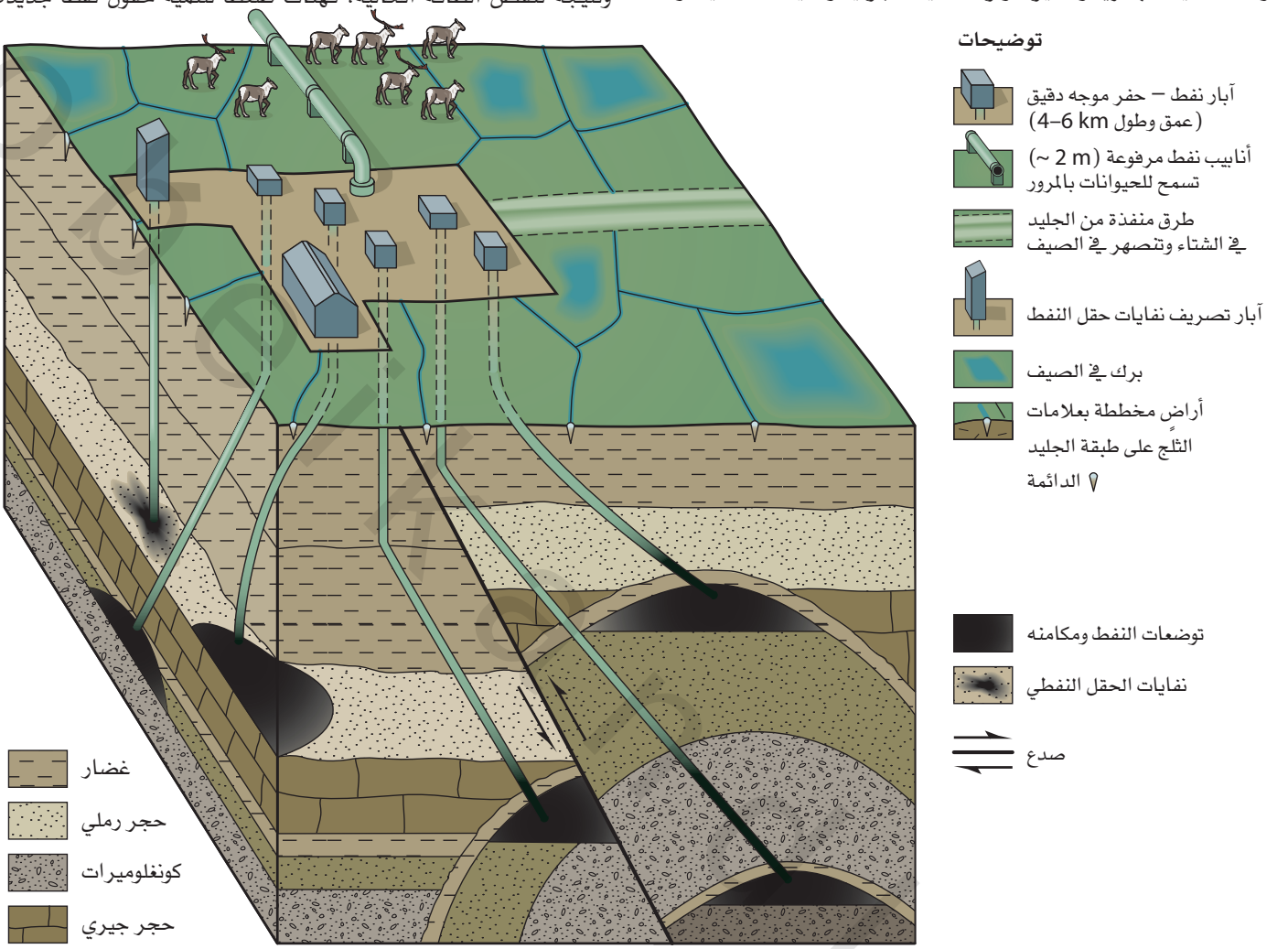
الشكل (15–17): المحمية الوطنية القطبية للحياة البرية.
(أ) خارطة، مع موقع المحمية الوطنية القطبية للحياة البرية.
(ب) جبال، سهول، والحياة البرية للمنطقة.

(Ted Kerasote/Photo Researchers)

Obeikandl.com

تكرير النفط، فعلى سبيل المثال: أفسدت انسكابات النفط الخطيرة على طول سواحل أوروبا وأمريكا الشمالية الشواطئ ومصبات الأنهار والموانئ، وقتلت الحياة البحرية والطيور، ولوثت المياه الجوفية والمياه السطحية، وقد تسببت في مشكلات اقتصادية للمناطق الساحلية التي تعتمد على التجارة السياحية.

ونتيجة لنقص الطاقة الحالية، فهناك ضغط لتنمية حقول نفط جديدة



(أ)

(ب)

الشكل (15–18): تقنية جديدة لحفر النفط ونقله. (أ) بعض التكنولوجيا الحديثة التي يمكنها تقليل الأخطار الناتجة عن تطوير النفط في محمية الحياة البرية الوطنية القطبية. (ب) مقطع كاريبو أسفل خط الأنابيب المرفوع. *(U.S Fish and Wildlife Service /Getty Images Inc).*

في المناطق البحرية والمناطق البرية، مثل محمية الحياة البرية الوطنية القطبية (ANWR) في ألاسكا، حيث تتوافر كثير من مليارات براميل النفط (الشكل 15-17).

تتكوّن النقاشات المؤيدة لأعمال استكشاف النفط وتطويره في محمية الحياة البرية الوطنية القطبية من ثلاثة جوانب، هي:

أولًا: أن حاجة الولايات المتحدة من النفط في تزايد، وأنّ النفط المتوافر في محمية الحياة البرية الوطنية القطبية سيقلل من الاستيراد. ثانيًا: سيؤدي تطوير النفط الجديد إلى إيجاد فرص عمل وتطور اقتصادي في ألاسكا. ثالثًا: استخدام تقنيات متطورة في الاستكشاف وحفر آبار النفط سيؤدي إلى أضرار بيئية أقل من استخدام التقنيات السابقة (الشكل 15- 18أ).

وتشمل هذه التقنيات:

- استخدام الحفر الموجه من المواقع المركزية، حيث تنتشر كثير من الآبار تحت الأرض من موقع واحد، مثل مكابح عجلة الدراجة (الشكل 15-18أ)، فهذه التقنية تقلل مساحة الأرض المتضررة بسبب الحفر إلى قرابة (40) هكتارًا (100 فدان).
- رفع خطوط الأنابيب فوق سطح الأرض للسماح للحيوانات بالهجرة (الشكل 15-18ب).
- تجنب بناء الطرق الدائمة، حيث تبنى الطرق من الجليد في الشتاء، وتذوب في الصيف (الشكل 15-18أ).

يقول معارضو التنقيب وتنمية النفط في محمية الحياة البرية الوطنية القطبية (محمية ولاية ألاسكا):

- سوف تؤثر التكنولوجيا الأكثر ملاءمة سلبًا في محمية ألاسكا.
- يتعيّن أن تبقى بعض المناطق البرية على وضعها، وسوف يغير الحفر محمية ألاسكا بصورة دائمة.
- تنمية حقول النفط ضارة في حد ذاتها؛ لأنها تقتضي توافر مجمع صناعي واسع من الآلات والمركبات وخطوط الأنابيب والناس.
- لن تكون مساهمة النفط تحت محمية ألاسكا مساهمة كبيرة في إمدادات النفط للولايات المتحدة، على الرغم من انتشارها على مدى عقود، وستوفر نسبة ضئيلة من إجمالي استهلاكنا للنفط خلال تلك الفترة، وفي المجموع، سيوفر النفط نفسه في محمية ألاسكا فقط قرابة 6 أشهر إلى سنتين من إمدادات النفط.

يعكس القرار بشأن تطوير النفط في محمية ألاسكا العلاقة بين العلم والقيم، فالعلم يقول: إننا نستطيع تنمية النفط مع أضرار بيئية أقل مما كانت عليه في الماضي، إلّا أنها قد تكون "أقل بدرجة أكثر من اللازم، وستُحدّد قيمنا عن طريق الموازنة بين حاجتنا الاقتصادية للنفط ضد رغبتنا للحفاظ على منطقة الحياة البرية الأصلية.

تأثير الاستخدام Impact of Use

لعل الأثر الخطير والمألوف المرتبط بالنفط، هو تلوث الهواء الناتج في المناطق الحضرية عندما يُحرق الوقود الأحفوري لإنتاج الطاقة من أجل توليد الكهرباء والتدفئة والسيارات، ومثلما يحدث في حرق الفحم، فإنّ حرق النفط والغاز يحرر غاز ثاني أكسيد الكربون، وهو الغاز الدفيء الرئيس الذي ينتجه الإنسان (انظر الفصل السادس عشر).

الصخر الزيتي ورمال القطران Oil Shales and Tar Sands

يتضمن استخراج البترول من الصخر الزيتي ورمال القطران السطحية أو تحت السطحية استخدام تقنيات راسخة، ويحتاج الأمر إلى طرق اقتصادية لتنمية موارد الصخر الزيتي، بحيث تُقلل الاضطرابات البيئية.

الصخر الزيتي صخر رسوبي دقيق الحبيبات، يحتوي على المواد العضوية التي تنتج عند تسخينها كميات كبيرة من النفط والغاز (المردود النفطي عمومًا من 100-200 لتر/طن من الصخر الزيتي)، ولكنها غير قابلة للذوبان في المذيبات البترولية العادية، حيث تعرف هذه العملية بالتقطير المدمر، وقد عُثر على أشهر الصخور الزيتية في الولايات المتحدة تحت أجزاء من ولاية كولورادو وولاية يوتا وولاية وايومنغ، في تكوين النهر الأخضر (عمره (50) مليون سنة)، الذي يتألف تكوينه من طبقات الصخر الزيتي المتعاقبة مع كميات متفاوتة من الحجر الرملي وحجر الغرين والحجر الطيني والرماد البركاني المضغوط.

تُعدّ موارد الصخر الزيتي ضخمة، ويحتمل استخراج قرابة مئة مليار برميل نفط منه، حيث إنّ استخلاص الصخر الزيتي باستخدام التكنولوجيا المعروفة مكلف، ومع ذلك ونتيجة لارتفاع سعر النفط، فسيعاد النظر في استخراجه[19].

رمال القار صخور مشربة بزيت القار أو الأسفلت أو غيرها من المواد البترولية، التي لا يمكن استخلاصها بصورة تجارية بالطرق التقليدية، ومصطلح رمل القار مربك إلى حد ما؛ لأنه يشمل أنواعًا عدة من الصخور، مثل الغضار والحجر الجيري، إضافة إلى الحجر الرملي المتماسك وغير المتماسك، ومع ذلك، فإنّ كلًّا من هذه الصخور يحتوي على مجموعة متنوعة من منتجات البترول شبه السائل والصلب وشبه الصلب، حيث يرشح بعض هذه المنتجات من الصخور، وتصعب إزالة بعضها الآخر، حتى باستخدام الماء المغلي[20]. وعلى الرغم من مماثلة نفط رمال القار للنفط المستخرج من الآبار، إلّا أنّ نفط رمال القار أكثر لزوجة بكثير، وعليه، فاستخلاصه أكثر صعوبة، أمّا بالنسبة إلى جيولوجية رمال القار، فهناك استنتاج واحد ممكن بخصوصها، وهو أنها تشكلت في الأساس بالطريقة نفسها التي تشكل فيها النفط السائل، مع هروب الكثير من المواد المتطايرة والسوائل المصاحبة في صخور المكمن، وبقاء المكونات الأكثر لزوجة، مثل رمال القطران.

حُدّدت تراكمات كبيرة من رمال القار، فعلى سبيل المثال: تغطي رمال قار أثاباسكا في ألبرتا- كندا مساحة تُقدّر بقرابة (87,000 km^2)، وتحتوي على احتياطي يقدر بـ (300) مليار برميل من النفط يمكن استخراجها، ويمكن استخراج قرابة النصف (173 مليار برميل) في اليوم بصورة اقتصادية، حيث تنتج رمال القار هذه الآن قرابة مليون برميل من النفط الخام الصناعي يوميًّا من مناجم الأشرطة الكبيرة[20]، إذ تستورد الولايات المتحدة النفط من كندا أكثر من أي بلد آخر، ونصفه تقريبًا من رمال القار[12]،[20].

15-4 مستقبل النفط FUTURE OF OIL

تشير التقديرات الحديثة إلى أن احتياطات النفط المؤكدة في العالم سوف تستمر بضعة عقود، في ظل معدلات الإنتاج الحالية من النفط والغاز الطبيعي[3]،[21]، ومع ذلك، فالسؤال المهم الذي يتعيّن طرحه، هو ليس كم من الوقت سيستمر إنتاج النفط بمعدلاته الحالية والمستقبلية، ولكن،

Obeikan

في أي مرحلة سوف نصل إلى ذروة الإنتاج؟ هذا السؤال مهم؛ لأنه بالوصول إلى ذروة الإنتاج، سوف يكون النفط المتوافر أقل، ما يؤدي إلى نقص في الإمدادات وصدمات في السعر، ومن المرجح أن تحدث ذروة إنتاج النفط العالمي في حياة كثير من الناس اليوم[22]، وفي وقت أقرب بكثير مما توقعه معظم الناس من قبل؛ ونتيجة لذلك، فلعله لم يبقَ سوى القليل من الوقت، للتكيف مع التغيرات المحتملة في نمط الحياة والاقتصاديات في عهد ما بعد النفط. يقول خبير الطاقة والتر يونغ- كويست: «إننا محظوظون بأن نعيش في فترة مزدهرة من التاريخ البشري، فقد أصبح ممكنًا بفضل ما ورثناه من عمليات تشكيل النفط التي عملت مدة (500) مليون سنة مضت[22]، ونعتقد أنّ النفط الخام لن ينفد منّا تمامًا»، ومع أنّ الناس يعتمدون على النفط بنسبة (40%) من احتياجات الطاقة، فسيتسبب نقصه الكبير في كثير من المشكلات[22،23].

تقدم العوامل الآتية أدلة على الاتجاه نحو أزمة النفط الخام المحتملة:

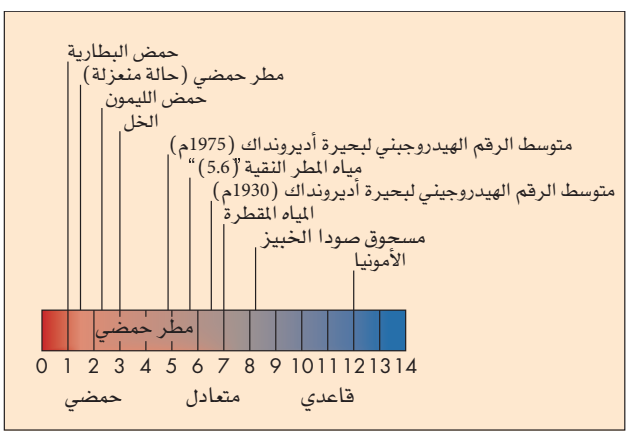
- نقترب من الأزمة، حين يُستهلك نصف إجمالي النفط الخام من حقول النفط التقليدية على الأرض تقريبًا[22]، أعد النظر في «نظرة متفحصة» على ذروة النفط في افتتاحية هذا الفصل، حيث تشير التقديرات الأخيرة إلى أن مزيدًا من النفط (قرابة 20%) سيُكتشف أكثر مما كان متوقعًا في السنوات القليلة الماضية، وعلاوة على ذلك، فإنّ المزيد من النفط يتوافر في الحقول المعروفة أكثر مما كان يعتقد في وقت سابق، ومع ذلك، فإنّ الولايات المتحدة استهلكت فعليًّا ما يقارب نصف مواردها النفطية، ما يستلزم واردات نفط إضافية في المستقبل.
- يبلغ مجموع احتياطي العالم المؤكد ما يقارب (1–2) تريليون برميل[3،23]، ومن المقدّر أنه يمكن استخراج قرابة (3) تريليونات برميل من النفط الخام في نهاية المطاف من الموارد النفطية المتبقية.
- يبلغ الاستهلاك العالمي اليوم قرابة (31) مليار برميل/سنة (85 مليون برميل/يوم)، بينما يُكتشف برميل واحد فقط مقابل كل (3) براميل من النفط المستهلك[23].
- يستند الانخفاض المتوقع في إنتاج النفط إلى الكمية المقدرة من النفط الذي قد يُستخرج في نهاية المطاف، فضلًا على التوقعات من الاكتشافات الجديدة، ومعدلات الاستهلاك في المستقبل، وتحسين التكنولوجيا لاستخراج المزيد من النفط من الحقول النفطية السابقة والحالية التي يجري ضخها، ومن المتوقع أن تحدث الذروة في إنتاج النفط الخام العالمي (35 مليار برميل/سنة) بحلول عام 2015م إلى عام 2030م، إذ يعتمد هذا على ما إذا كنت متفائلًا أو متشائمًا[23]، فإنتاج 35 مليار برميل/سنة، هو ما يقارب (10) في المئة زيادة على الإنتاج اليومي، وسواء اعتقدت أنّ زيادة الإنتاج ستكون مشكلة أو لا، فهذا يعتمد على وجهة نظرك في النقص المتوقع اعتمادًا على التاريخ الماضي لاستهلاك النفط، حيث تغلبنا على كثير من النقص المتوقع في الماضي، ومع ذلك، فإنّ معظم خبراء النفط يعتقدون أنّ ذروة النفط لن تستمر سوى عقود قليلة[3،4].
- من المتوقع أنّ إنتاج كميات كبيرة من النفط في الولايات المتحدة لن يتجاوز ما بعد عام 2090م، حيث سيستنفد إنتاج النفط العالمي بحلول عام 2100م تقريبًا[23].

ما الرد المناسب على التصريحات المذكورة أعلاه؟ نحن في حاجة إلى البدء في برنامج تعليمي أساسي، بحيث يُبَلّغ كل من الناس والحكومات بنضوب النفط المحتمل في القرن الواحد والعشرين، إضافة إلى أنّ التخطيط والتعليم مهمّان جدًّا؛ من أجل تجنب مواجهات عسكرية في المستقبل مثل حرب الخليج، ونقص الطعام بسبب قلة توافر النفط لإنتاج الأسمدة للزراعة، إذ يتعيّن قبل أن يحدث نقص حاد في النفط تطوير مصادر طاقة من احتياطات الفحم الهائلة، مثل التغويز (إنتاج الغاز) والتسييل على نطاق واسع، إضافة إلى مصادر الطاقة الأخرى النفط والغاز من الصخر الزيتي والطاقة الذرية، ويجب أن نؤكد اعتمادنا على مصادر الطاقة البديلة بصورة أكبر، بما في ذلك الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والهيدروجين، حيث ستؤثر هذه التغيرات بشدة في مجتمعنا الحاضر القائم على البترول، ومع ذلك، هناك على ما يبدو مشكلة لا يمكن التغلب عليها، إذا أردنا تنفيذ خطط مجدية قصيرة- وطويلة المدى، للتخلص من مرحلة النفط في وقت واحد بالتحول إلى الغاز الطبيعي، ومرحلة في مصادر الطاقة البديلة.

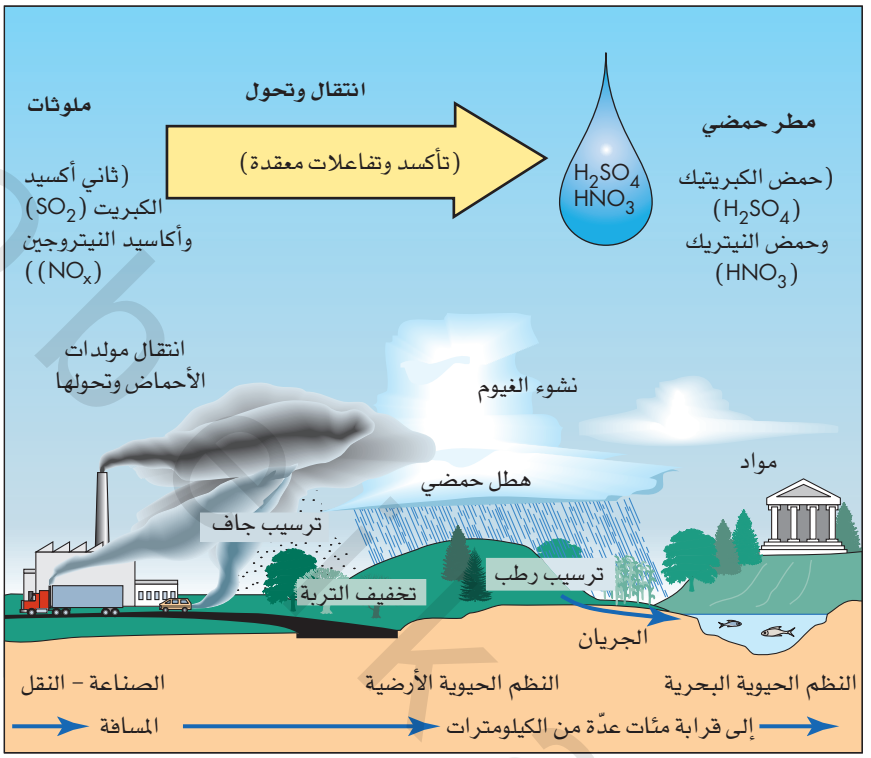
وبعد أن حصلنا على فهم أفضل لطبيعة الوقود الأحفوري ووفرته، سوف ننتقل إلى موضوع الأمطار الحمضية، وهي من العواقب البيئية الرئيسة لحرق الوقود الأحفوري.

5-15 الوقود الأحفوري والمطر الحمضي
FOSSIL FUEL AND ACID RAIN

المطر الحمضي: يعتقد أن يكون مشكلة بيئية إقليمية إلى عالمية مرتبطة بحرق الوقود الأحفوري، وعلى الرغم من أنّ المطر الحمضي يحدث بصورة رئيسة من حرق الفحم، إلّا أنّ احتراق البنزين يسهم أيضًا في المشكلة، ويعود المطر الحمضي إلى كل من ترسيب الحمض الرطب والجاف، الذي ينتج عن تفاعل الملوثات، وهي الحمض التمهيدي، مثل ثاني أكسيد الكبريت (SO_2). وأكاسيد النيتروجين (NO_x) مع بخار الماء في الغلاف الجوي، حيث تنتج الأحماض، فيحدث ترسيب الحمض الجاف عندما تسقط الجزيئات التي تحتوي على الحمض التمهيدي إلى الأرض، وبعدها يتفاعل مع الماء لإنتاج الأحماض؛ لذلك، فإنّ ترسب الحمض هو المصطلح الأكثر دقة على الرغم من شيوع استخدام المطر الحمضي، ويُعرّف المطر الحمضي بأنه أمطار يكون فيها الرقم الهيدروجيني (pH) للهطل أقل من (5.6) إذ إنّ الرقم الهيدروجيني، هو القيمة العددية للتركيز النسبي لأيون الهيدروجين (H^+) في المحلول، الذي يستخدم لوصف حمضية المحاليل، حيث يكون المحلول



الشكل (15–19): مقياس الرقم الهيدروجيني. تظهر قيم لمجموعة متنوعة من المواد. (معدلة من بعد وكالة حماية البيئة الأمريكية، 1980م).

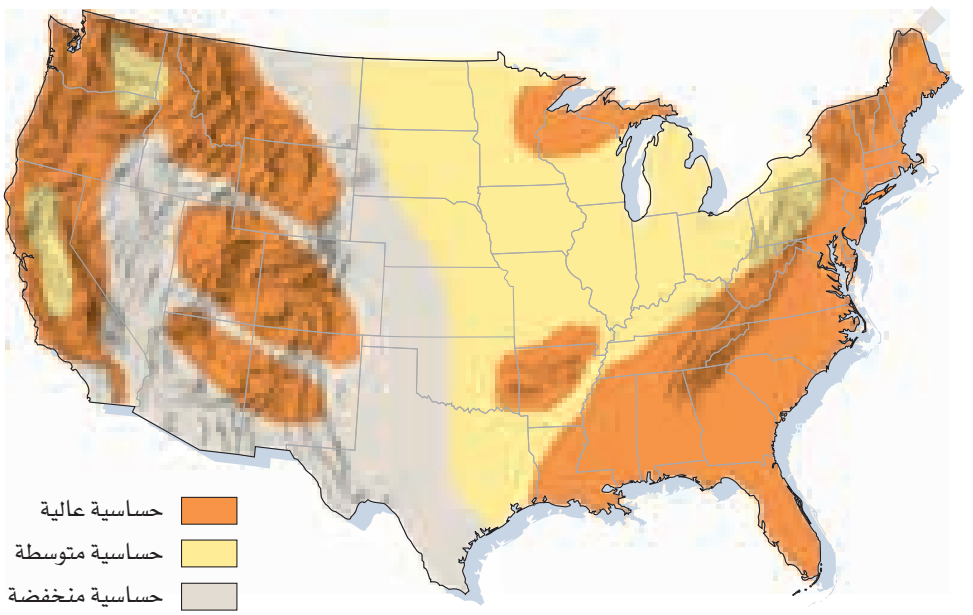


الشكل (15–20): **كيفيّة تكوّن المطر الحمضي.** الطرق والعمليات المرتبطة بالمطر الحمضي.

(Modified after Albirtton, D. L., as presented in Miller, J. M)

عند الرقم الهيدروجيني (7) محلولًا متعادلًا، أي إنه ليس حمضيًّا، أمّا هطل المطر الطبيعي، فهو حمضي قليلًا ودرجة حموضته (5.6) تقريبًا، ويسببها اتحاد الماء مع ثاني أكسيد الكربون لإنتاج حمض الكربونيك الضعيف ($H_2O + CO_2 \rightarrow H_2CO_3$)، إذ إنّ مقياس الرقم الهيدروجيني سالب المقياس اللوغاريتمي، فعلى سبيل المثال: قيمة الرقم الهيدروجيني (3) هي أكثر حمضية بعشر مرات من قيمة الرقم الهيدروجيني (4)، وأكثر بـ (100) مرة من قيمة الرقم الهيدروجيني (5)، انظر الشكل (15–19)، وقد قيست قيمة رقم هيدروجيني لهطل الأمطار في ويلنغ- غرب ولاية فرجينيا مرة، حيث بلغت (1.5)، وبذلك تبلغ حمضيتها كحمضية المعدة تقريبًا، وقد سُجلت قيم منخفضة للرقم الهيدروجيني تصل إلى (3) في أماكن أخرى.

يطلق حرق الوقود الأحفوري في الولايات المتحدة اليوم قرابة (17) مليون طن سنويًّا من أكسيد النيتروجين، وقرابة (13) مليون طن من ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي، حيث تتحول هذه الأكاسيد بعد انبعاثها إلى جزيئات كبريتات (SO_4) أو نترات (NO_3)، التي يمكن أن تتحد مع بخار الماء، وتشكل في النهاية حمض الكبريتيك (H_2SO_4) وحمض النيتريك (HNO_3). ربما تسافر هذه الأحماض مسافات طويلة مع الرياح السائدة، وقد تترسب بوصفها مطرًا حمضيًّا (الشكل 15–20). مشكلة المطر الحمضي، فنحن الأكثر دراية بما ينتج عن ثاني أكسيد الكبريت، الذي ينبعث أساسًا من حرق الفحم في محطات الطاقة التي تنتج الكهرباء في شرقي الولايات المتحدة.



الشكل (15–21): خريطة توزيع المناطق في الولايات المتحدة بحسب حساسيتها للمطر الحمضي (من وكالة حماية البيئة الأمريكية، 1980م).

الشكل (15–22): المطر الحمضي يدمر الحجر. تلوث الهواء والمطر الحمضي يدمران المباني والتماثيل في كثير من المناطق الحضرية، ويظهر هنا الأكروبوليس في أثينا، اليونان. تضررت التماثيل ووضعت التماثيل الأصلية في عبوات زجاجية داخل مبانٍ شيّدت خصيصًا لها.

التأثيرات البيئية للمطر الحمضي
Environmental Effects of Acid Rain

تؤثر الجيولوجيا وأنماط المناخ ونوع الغطاء النباتي وتركيب التربة في الآثار المحتملة للمطر الحمضي، ويبين الشكل (15–21) المناطق الحساسة للمطر الحمضي في الولايات المتحدة، التي استند تحديدها إلى بعض العوامل المذكورة أعلاه، فقد حددت المناطق الحساسة بصورة خاصة، بأنها الطبقات الصخرية والتربة أو الماء التي لا يمكنها تخفيف (تعديل) مدخلات الحمض فيها، فعلى سبيل المثال: تمتلك المناطق التي تسودها الصخور الجرانيتية القليل من نشاط تخفيف درجة الحموضة، وتشير معادلة درجة الحموضة إلى قدرة المادة على تعديل الأحماض، حيث تعرف هذه المواد بالمخففات، وتشمل كربونات الكالسيوم أو الكالسايت ($CaCO_3$)، وتتوافر في كثير من أنواع التربة والصخور، مثل الحجر الجيري، حيث تتفاعل كربونات الكالسيوم مع أيونات الهيدروجين في الماء الحمضي، فيزيلها عن طريق تشكيل أيونات البيكربونات (HCO_3^-) وتحييد الحمض.

تشمل التأثيرات البيئية الرئيسة للمطر الحمضي الآتي:

- الأضرار التي تلحق بالغطاء النباتي، وبخاصة موارد الغابات، مثل الأشجار دائمة الخضرة في ألمانيا وأشجار التنوب الأحمر في ولاية فيرمونت، وربما تقلل خصوبة التربة نتيجة إزالة المغذيات خارجًا بسبب الحمض، أو نتيجة تحرير المواد السامة إلى التربة بسبب الحمض، وهذا هو الأثر الرئيس للمطر الحمضي في الغطاء النباتي.
- الأضرار التي لحقت بأنظمة البحيرة البيئية، قد يضر المطر الحمضي بأنظمة البحيرة البيئية من خلال: (1) تعطيل دورات حياة الأسماك والضفادع وجراد البحر و(2) التداخل مع الدورات الطبيعية للمواد الغذائية والعناصر الكيميائية الأخرى الضرورية للحياة، إذ يميل المطر الحمضي إلى إبقاء المواد المغذية في المحلول، بحيث تترك البحيرة بدلًا من تدويرها في النظام؛ ونتيجة لذلك، قد لا تنمو النباتات المائية والحيوانات التي تتغذى عليها؛ لأنه لم يبقَ لديها سوى القليل لتأكله، فيمرر هذا التدهور في السلسلة الغذائية للأسماك، وغيرها من الحيوانات الكبيرة الأخرى، وقد عُثر على الآثار السلبية الناتجة عن المطر الحمضي لأنظمة البحيرة في كندا والدول الإسكندنافية.
- الأضرار التي لحقت بالمنشآت الإنسانية، ألحق المطر الحمضي الضرر بمواد البناء والبلاستيك والأسمنت والبناء والفولاذ المجلفن وكثير من أنواع الصخور، وخصوصًا الحجر الجيري والحجر الرملي والرخام (الشكل 15–22)، وقد تضررت المباني والتماثيل التي لا بديل لها في المدن حول العالم بصورة كبيرة، ما أسفر عن خسائر سنوية تصل إلى مليارات الدولارات.

الحل لمشكلة المطر الحمضي
A Solution to the Acid Rain Problem

يمكن تعويض تحمّض البحيرة عن طريق الإضافة الدورية للمواد التي تعمل على تحييد الحمض، مثل كربونات الكالسيوم، وعلى الرغم من استخدام هذا

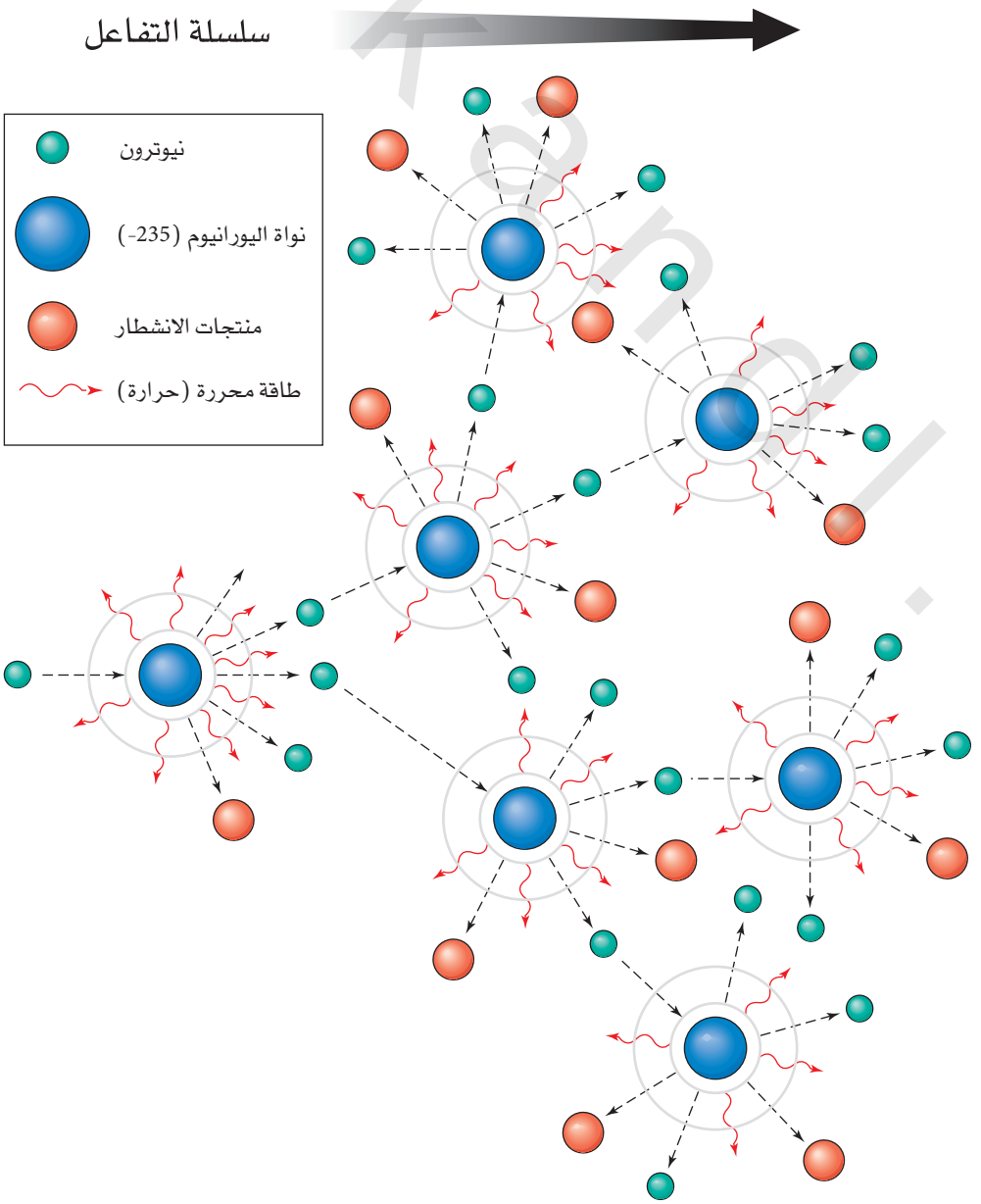
obeikandl.com

العلاج في مناطق عدّة، بما في ذلك ولاية نيويورك والسويد وكندا، فإنّ تأثير إضافة مواد تحييد الحمض قصير الأجل، وهو حل مكلف لمشكلة تحمّض البحيرة، والحل العملي الوحيد على المدى الطويل لهذه المشكلة، هو الحد من انبعاثات المواد الكيميائية التي تسبب المشكلة، وأفضل طريقة لذلك من وجهة النظر البيئية، هي الممارسة القوية للحفاظ على الطاقة، ما سيؤدي إلى انخفاض الانبعاثات، أما الطريقة الثانية، فهي معالجة الفحم قبل الحرق وخلاله وبعده، من أجل حصر ثاني أكسيد الكبريت قبل أن ينبعث إلى البيئة. إن اختزال أكسيد النيتروجين أكثر صعوبة؛ لأنه يحدث بصورة رئيسة عن طريق احتراق البنزين في السيارات، ومع ذلك، تتوافر إستراتيجيات المراقبة للحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين، ومن المشجع في الأمر، أنّ الحد من الملوثات التي تتسبب في المطر الحمضي، هو هدف وطني ودولي ناجح، ومن المؤسف أنّ مشكلة المطر الحمضي لن تزول في وقت قريب، حتى مع التقليل من انبعاثات الأحماض التمهيدية، وقد تتراكم ترسبات الحمض في التربة عقودًا، وستظل آثارها باقية عقودًا مقبلة[24، 25].

6-15 الطاقة النووية
NUCLEAR ENERGY

الطاقة الناتجة عن الانشطار
Energy from Fission

يعتمد إنتاج الطاقة النووية في الغالب على الانشطار، وهو انقسام الأنوية الذرية عن طريق قصفها بالنيوترون، فعلى سبيل المثال: يطلق انشطار نواة اليورانيوم (235-) ثلاثة نيوترونات، وتتألف شظايا الانشطار من أنوية عناصر مشعة أخفّ من اليورانيوم إضافة إلى الطاقة على صورة حرارة (انظر إلى نظرة متفحصة: النشاط الإشعاعي)، حيث تضرب النيوترونات المنبعثة ذرات اليورانيوم (235-) الأخرى، مطلقةً المزيد من النيوترونات ونواتج الانشطار والحرارة، وتستمر العمليات في سلسلة تفاعلات، فكلما انشطر المزيد من اليورانيوم، أطلقت النيوترونات بصورة أكثر (الشكل 15-23)، وتؤدي سلسلة تفاعلات غير منضبطة - من النوع الذي



الشكل (15-23): الانشطار النووي، سلسلة التفاعلات. انشطار اليورانيوم (235-). نيوترون يصطدم بنواة يورانيوم (235-)، منتجًا شظايا انشطار ونيوترونات حرة ومطلقًا الحرارة. كل نيوترون منبعث يمكن أن يصطدم بذرة يورانيوم (235) أخرى، مطلقًا المزيد من النيوترونات وشظايا الانشطار وطاقة، إضافة إلى أنّ استمرار العملية يطور سلسلة التفاعل.

Obeikandl.com

يستخدم في الأسلحة النووية- إلى انفجار سريع، ومع ذلك، تستخدم التفاعلات النووية المستدامة أو المستقرة في المفاعلات لتوفير الحرارة لتوليد الكهرباء.

حدث أول انشطار نووي متحكم فيه مثبت عام 1942م، ما مهد الطريق إلى استخدام اليورانيوم في المتفجرات وبوصفه مصدرًا للحرارة التي توفر البخار لتوليد الكهرباء، إذ يطلق انشطار كيلوجرام واحد من اليورانيوم كمية الطاقة نفسها تقريبًا المتحررة من حرق (16) طنًّا متريًّا من الفحم.

تتوافر في عينة اليورانيوم ثلاثة نظائر من اليورانيوم تحدث بصورة طبيعية: يورانيوم (238−) ويمثل قرابة (99.3%) من اليورانيوم الطبيعي، ويورانيوم (235−) الذي يشكل فقط أقل من (0.7%)، ويورانيوم (234−) ويشكل قرابة (0.005%)، حيث إنّ اليورانيوم (235−) هو المادة الوحيدة القابلة للانشطار التي تحدث بصورة طبيعية؛ لذا، فهو ضروري لإنتاج الطاقة النووية، حيث يُعالج اليورانيوم الطبيعي لزيادة كمية اليورانيوم (235−) من (0.7%) إلى قرابة (3%)، قبل أن يُستخدم في المفاعل، ويطلق على الوقود المعالج باليورانيوم المخصب.

اليورانيوم (238−) ليس قابلًا للانشطار بصورة طبيعية، ولكنه «مادة خصبة»؛ وذلك لأنه يتحول إلى بلوتونيوم (239−) عندما يقصف عن طريق النيوترونات، وهي مادة قابلة للانشطار[26].

جيولوجية اليورانيوم وتوزيعه
Geology and Distribution of Uranium

يبلغ متوسط التركيز الطبيعي لليورانيوم في القشرة الأرضية ما يقارب جزأين في المليون (ppm)، وينشأ في الماغما، ويتركز بقرابة (4) أجزاء في المليون في الصخر الجرانيتي، حيث يتركز في مجموعة متنوعة من المعادن، ويتوافر بعض اليورانيوم أيضًا في الصخور النارية، التي تنشأ في المرحلة المتأخرة، مثل البيجماتيت.

يشكل اليورانيوم عددًا كبيرًا من المعادن عُثر على الكثير منها وعُدّن، وقد أُنتج اليورانيوم في السنوات القليلة الماضية من أنواع الترسبات، هي الحجر الرملي المشرب بمعادن اليورانيوم، والعروق الحاملة لمواد اليورانيوم المتوافرة في شقوق الصخر، وترسبات التبر التي يبلغ عمرها (2,2) مليار سنة، وهي الآن على صورة صخور رسوبية خشنة الحبيبات.

تصميم المفاعل وتشغيله
Reactor Design and Operation

تستهلك معظم المفاعلات اليوم مواد قابلة للانشطار أكثر مما تنتج، وتعرف باسم مفاعلات الاحتراق، فالمفاعل ذاته هو جزء من نظام تزويد البخار

نظرة متفحّصة A CLOSER LOOK

النشاط الإشعاعي Radioactivity

الذرات كلها في العنصر نفسه لها العدد الذري نفسه؛ لذلك يتساوى عدد البروتونات في أنويتها، والنظائر هي ذرات لعنصر واحد له أعداد مختلفة من النيوترونات، وعليه، فإن لها كتلًا ذرية مختلفة، تُحدد بعدد البروتونات زائد عدد النيوترونات في النواة، على سبيل المثال: لليورانيوم اثنان من النظائر، هما ($^{235}U_{92}$ و$^{238}U_{92}$) تحتوي الذرات في كل من هذه النظائر العدد الذري (92)، وأعداد كتلتها الذرية (235 و238) على التوالي، وقد تكتب هذه النظائر على صورة يورانيوم (235−) ويورانيوم (238−)، أو ($U^{-}235$ و$U^{-}238$) على التوالي.

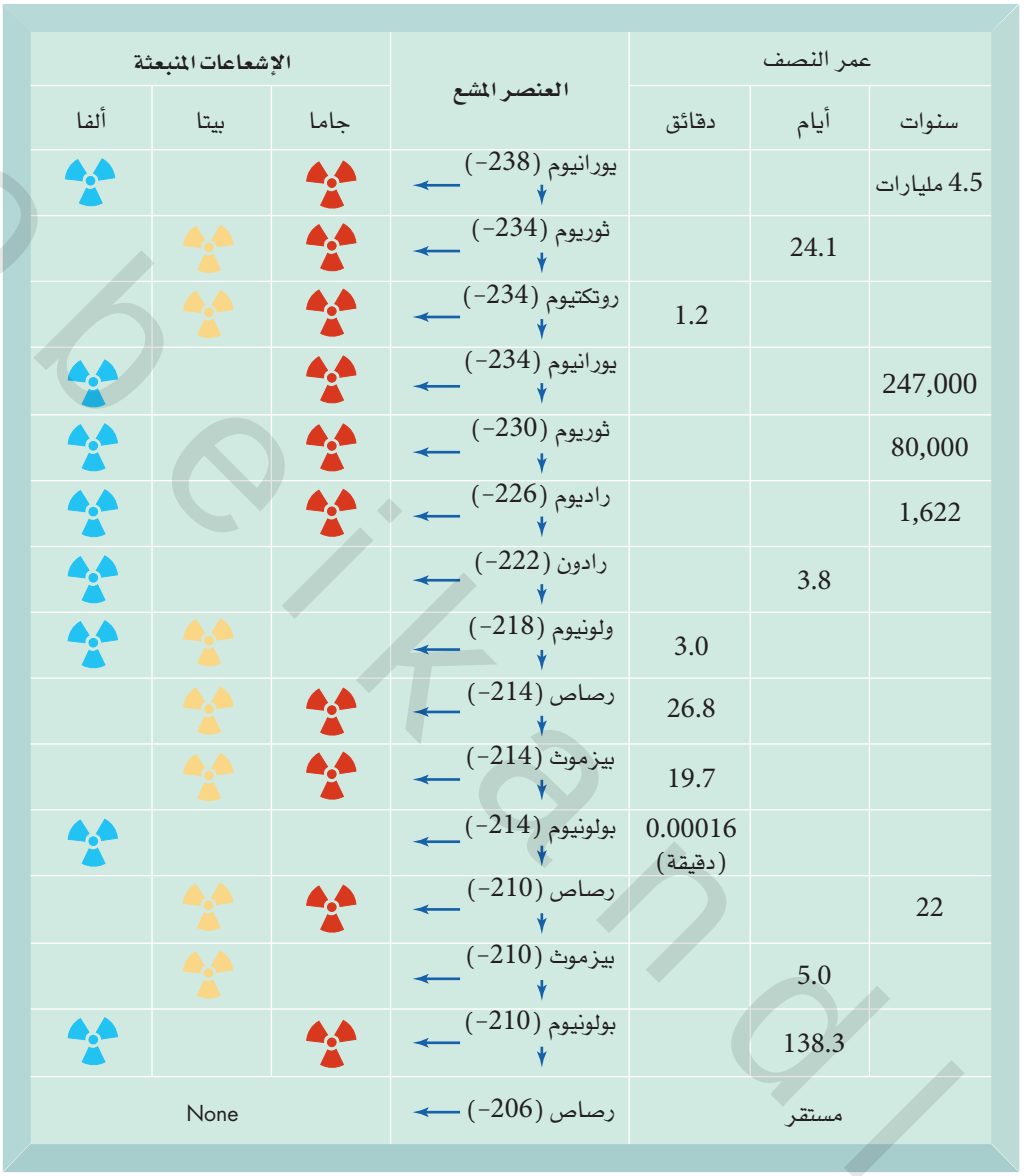
تسمى بعض النظائر النظائر المشعة؛ لأنها نشطة إشعاعيًّا، وتتحلل تلقائيًّا تحللًا نوويًّا، حيث يحدث التحلل النووي عندما يمر النظير المشع في تغير نووي، فينبعث منه واحدة أو أكثر من صور النشاط الإشعاعي، وتنبعث الأنواع الرئيسة الثلاثة من الإشعاع في أثناء التحلل النووي، وتسمى جسيمات ألفا (α)، وجسيمات بيتا (β)، وجسيمات جاما (γ)، إذ إنّ لكل نظير مشع انبعاثاته الخاصة المميزة، فبعضها يبعث نوعًا واحدًا فقط، في حين تبعث أخرى خليطًا من أنواع الإشعاع. تحتوي جسيمات ألفا على بروتونين ونيوترونين، ما يجعلها كثيفة أكثر بكثير من غيرها من الأنواع الأخرى من الانبعاثات المشعة، ونتيجة انحلال ألفا وانبعاث جسيماتها، يتغير عدد البروتونات والنيوترونات في نواة الذرة، ويتكوّن نظير عنصر مختلف، على سبيل المثال: ذرة غاز الرادون (222−)، التي لديها (86) بروتونًا، تطلق جسيم ألفا، وبهذه الطريقة تتحول إلى ذرة بولونيوم (218−) التي تمتلك (84) بروتونًا، إضافة إلى أنّ حركة جسيمات ألفا بسبب كتلتها العظيمة، وهي الأقل سرعة بين الانبعاثات المشعة تمتلك أدنى طاقة، وتسافر مسافات أقصر من (5 إلى 8 cm) في الهواء تقريبًا، وتخترق عمقًا في المادة الصلبة أقل مما تفعل انبعاثات بيتا وجاما[27].

جسيمات بيتا هي إلكترونات نشطة لها كتلة صغيرة، مقارنة بجسيمات ألفا، حيث يحدث اضمحلال بيتا، عندما يتغير واحد من النيوترونات في نواة النظير تلقائيًّا[27]، لاحظ أنّ الإلكترون المنبعث هو نتاج التحول، تذكر أنّ الإلكترونات متوافرة حول النواة، وليس في داخلها.

تنبعث أشعة جاما من النظائر في إشعاع جاما، ولا يتغير عدد البروتونات والنيوترونات، وتماثل أشعة جاما الأشعة السينية الطبية، ولكنها عادة ما تكون أكثر نشاطًا وأكثر اختراقًا، إضافة إلى أنّ لدى أشعة جاما الطاقة الأعلى في الانبعاثات المشعة كلها، وتسافر بصورة أسرع وأبعد، ويكون اختراقها أكثر عمقًا مما تفعل جسيمات ألفا وبيتا.

هناك سمة مهمة للنظير المشع، هي عمر النصف، وهو الوقت اللازم لنصف كمية معينة من النظير المشع للاضمحلال إلى صورة أخرى، وكل نظير مشع لديه خاصية عمر نصف فريدة، فغاز الرادون (222−) على سبيل المثال، له عمر نصف قصير نسبيًّا من (3,8) أيام، بينما يبلغ عمر النصف للكربون (14−) وهو نظير مشع من الكربون (5570) سنة، ويبلغ عمر نصف يورانيوم U−235 (700) مليون سنة؛ ويورانيوم U−238 (4.5) مليار سنة.

تمر بعض النظائر المشعة، وبخاصة تلك الثقيلة جدًّا، في مراحل متسلسلة من الاضمحلال الإشعاعي، حتى تصبح في النهاية نظائر مستقرة أو غير مشعة، ويبين الشكل (15 ب) سلسلة اضمحلال اليورانيوم (U−238) عبر راديوم (226−) وغاز الرادون (222−) وبولونيوم (218−) إلى نظير مستقر من الرصاص (206−) حيث إنّ أهم حقيقتين حول كل عملية تحول، هما نوع الإشعاع المنبعث وعمر النصف للنظير الذي تحول (الشكل 15 ب)، وغالبًا ما يشار إلى الاضمحلال من نظير مشع إلى آخر بمصطلح الذرة الأم والذرة الوليد، فعلى سبيل المثال، الذرة الأم للرادون (222−) هو غاز له عمر نصف (3.8) أيام، يضمحل بانبعاث جسيم ألفا إلى الذرة الوليد بولونيوم (218−)، وهي صلبة، ولها عمر نصف (187) ثانية[27].



الشكل (15 ب): سلسلة الاضمحلال ونصف العمر من اليورانيوم (238–) المشع إلى الرصاص (206–) المستقر. *(From Schroyer, F., ed. 1985. Radioactive Waste, 2nd ed. American Institue of professional Geologits)*

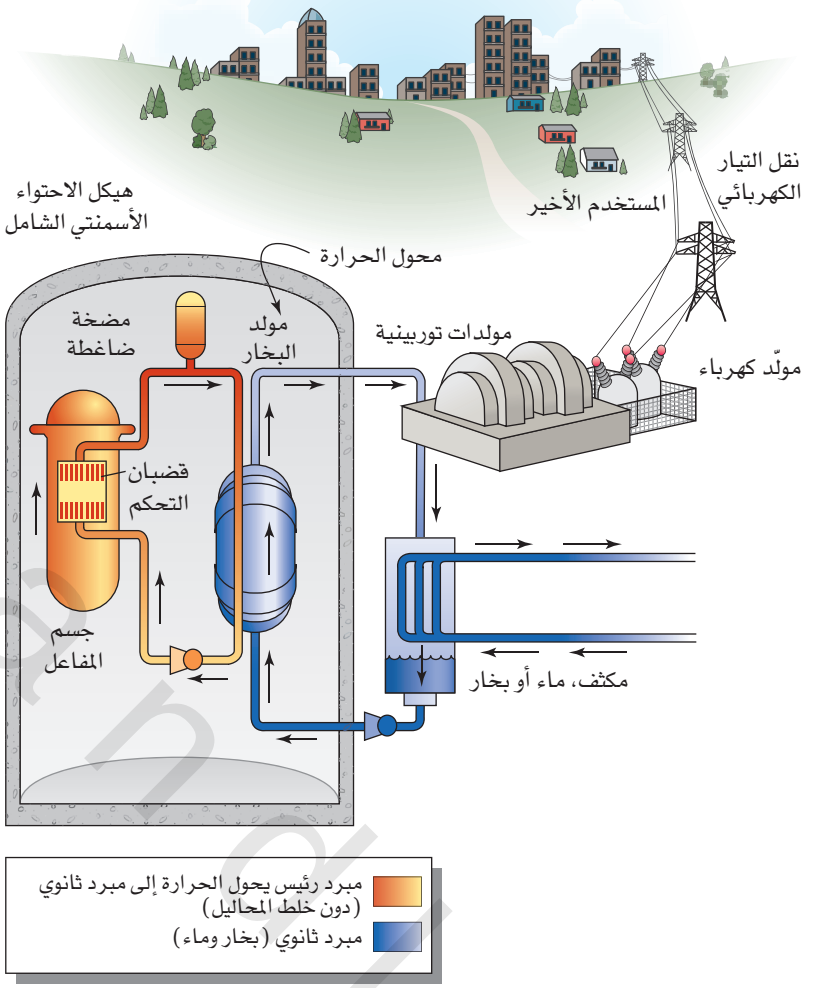
النووي، الذي ينتج البخار لتشغيل المولدات التوربينية التي تنتج الكهرباء.

تتألف المكونات الرئيسة للمفاعل من اللب وقضبان التحكم والمبردات وجسم المفاعل، ويقع لب المفاعل داخل جسم المفاعل المصنوع من الفولاذ المقاوم للصدأ، حيث تجري سلسلة التفاعل، ولزيادة السلامة والأمان، يوضع المفاعل كاملًا في داخل بناء مقام من الخرسانة المسلحة تسمى هيكل الاحتواء الشامل، ويتألف الوقود من يورانيوم مخصب، معبأ في وحدة الوقود الفرعية في اللب، حيث تتم المحافظة على سلسلة تفاعل الانشطار المستقر عن طريق التحكم في تركيز الوقود، وعدد النيوترونات المنبعثة المتوافرة لإحداث الانشطار. يُعدّ الحدّ الأدنى لتركيز الوقود ضروريًّا للحفاظ على التفاعل المتسلسل المكتفي ذاتيًّا أو الحرج، ويُعدّ التحكم في عدد النيوترونات ضروريًّا لتنظيم معدل التفاعل، حيث يتمّ ذلك عن طريق قضبان التحكم، التي تحتوي على مواد تعمل على التقاط النيوترونات، ومنعها من قصف النوى الأخرى، إذ تسرع سلسلة التفاعل، عندما تُسحب القضبان خارج اللب، وتصبح بطيئة، عندما تُدرج في اللب.

توزع المضخات المحلول المبرد (عادة الماء) خلال المفاعل لاستخراج الحرارة الناتجة عن الانشطار في المفاعل، ويجب أن يتطابق معدل توليد الحرارة مع معدل الحرارة الذي يحمل بعيدًا عن طريق المحلول المبرد، وهي مهمة ليست صعبة، إضافة إلى أنّ المفاعلات تعمل عادة بصورة سلسة ومستقرة، ومع ذلك وقعت حوادث نووية رئيسة، عندما حدث خطأ وتراكمت الحرارة في لب المفاعل، إذ يرجع الانهيار إلى الحادث النووي الذي يصبح فيه الوقود النووي ساخنًا جدًّا، بحيث يشكل كتلة منصهرة، فيفشل جسم المفاعل في الاحتواء، ما يؤدي إلى تسرب النشاط الإشعاعي وتلويث البيئة.

أمّا الأجزاء الأخرى من نظام الطاقة النووية، فهي المضخات والحلقات الرئيسة للمبرد، التي توزع المحلول المبرد خلال المفاعل وخلال مبدلات الحرارة أو مولدات البخار، التي تستخدم حرارة الانشطار المبرد في صنع البخار. يبين المفاعل الموضح في الشكل (15–24) مفاعل الماء المضغوط (PWR)، الذي صُمّم أولًا في الولايات المتحدة (70% من المفاعلات النووية في الولايات المتحدة الأمريكية، هي PWR)، ثمّ عُدّل في فرنسا وألمانيا إلى (EPR)، حيث يرجع حرف ألـ (E) إلى دول أوروبا و(PR) تعني أنه يستخدم الماء المضغوط في حلقة النشاط الإشعاعي الرئيسة؛ للحفاظ على الماء من الغليان، وقد حَسّن المفاعل النووي الأوروبي المضغوط (EPR) تدابير السلامة المصممة لزيادة خفض احتمالية انهيار اللب وتقليل إمكانية انبعاث

الشكل (15–24): مفاعل الماء المضغوط. رسم بياني مثالي للمفاعل النووي المائي المضغوط.



أنشطة إشعاعية هائلة، ففي حالة حدوث انهيار اللب تحت الضغط المنخفض، فإنّه يقلل وقت انبعاثات النشاط الإشعاعي الهائل، ويحدد مساحة المنطقة المعرضة. بدأ أول مفاعل (EPR 1600 ميجاواط) في فنلندا عام 2005م، ومن المقرر أن يبدأ تشغيله عام 2009م، إلّا أنّه أُجل إلى عام 2012م، وقد صاحب التأخير الطويل ازدياد كبير في الكلفة؛ بسبب مشكلات تنظيمية ومشكلات البناء (الخرسانة واللحام)، ما أثار القلق، ومع ذلك، فإنّ تصميم المفاعل الأوروبي (EPR) يستبدل التصاميم التي كانت متوافرة منذ عقود، ويضيف ميزات تحسين السلامة، حيث يجري التخطيط للمفاعلات الأوروبية الأخرى بما فيها بعض المفاعلات المتوافرة في الولايات المتحدة، بوصفها صناعة للطاقة النووية العالمية التي لاتزال تتطور وتنمو[28، 29].

الأخطار المرتبطة بمفاعلات الانشطار
Risks Associated with Fission Reactors

كانت الطاقة النووية والآثار الضارة المحتملة المرتبطة بها من الموضوعات التي أثارت جدلًا حادًّا، وهذه ظاهرة صحية؛ لأننا يجب أن نواصل دراسة العواقب المترتبة على توليد الطاقة النووية بحذر شديد.

يستخدم الانشطار النووي، وينتج النظائر المشعة، حيث تطلق كميات مختلفة من الإشعاعات إلى البيئة في كل خطوة في الدورة النووية، ابتداءً باستخراج اليورانيوم ومعالجته، ومراقبة الانشطار في المفاعلات، وإعادة معالجة الوقود النووي، والتخلص النهائي من المخلفات الإشعاعية، وترتبط أخطار جادة بنقل المواد النووية والتخلص منها، إضافة إلى إمداد الدول الأخرى بالمفاعلات، أضف إلى ذلك، لأنّ البلوتونيوم ينتج عن المفاعلات النووية، فيمكن استخدامه في صنع الأسلحة النووية والأنشطة الإرهابية، وإمكانية القيام بتصرفات غير مسؤولة من الحكومات، إضافة إلى الأخطار المتوافرة في أي صورة أخرى من صور إنتاج الطاقة.

لا يمكن حدوث الانفجار النووي في المفاعل النووي؛ بسبب سلسلة التفاعلات الخارجة عن السيطرة؛ لأن المواد المنشطرة المستخدمة لا يصل تركيزها إلى الصورة المؤدية للانفجار، ومع ذلك، يمكن أن تنتج التفاعلات الكيميائية غير المرغوب فيها في المفاعل انفجارات تطلق مواد مشعة إلى البيئة، وعلى الرغم من انخفاض تقديرات فرص وقوع حادث كارثي، إلّا أنها تزيد مع زيادة عدد المفاعلات العاملة، فقد وقعت الحوادث الرئيسة بالفعل، بما فيها جزيرة الأميال الثلاثة قرب هاريسبيرغ في بنسيلفانيا عام 1979م،

obeikandl.com

وحادث تشيرنوبيل الكارثي عام 1986م في الاتحاد السوفياتي السابق (أوكرانيا حاليًّا).

جزيرة الأميال الثلاثة Three Mile Island

وقع واحد من أخطر أحداث الطاقة النووية في التاريخ الأمريكي، في 28 مارس من عام 1979م، في محطة الطاقة النووية للجزيرة قرب هاريسبيرغ، بنسيلفانيا، إذ أسفر عطل في الصمام إضافة إلى أخطاء بشرية في محطة الطاقة النووية عن انهيار جزئي في اللب، وانبعاث النظائر المشعة إلى البيئة، وعلى الرغم من كثافة الإشعاعات التي انبعثت في المنطقة الداخلية من هيكل الاحتواء، إلّا أنّ كمية قليلة نسبيًّا من الإشعاعات انبعثت إلى البيئة.

أظهرت حادثة جزيرة الأميال الثلاثة بوضوح، أنّ هناك مشكلات محتملة مصاحبة للطاقة النووية، فقد كانت الطاقة النووية تاريخيًّا آمنة نسبيًّا، ولم تكن ولاية بنسلفانيا مهيأة للحادث، وكان الخوف أحد آثار الحادث الخطيرة، والمدهش في الأمر، أنه لم يُسمح لأي موظف من قسم الصحة المشاركة في جلسات الإحاطة.

بسبب عدم فهم الآثار طويلة الأمد للتعرض لمستويات منخفضة من الإشعاعات على المدى الطويل، فإنّه ليس من السهل تقدير آثار التعرض لجزيرة الأميال الثلاثة، حتى لو كان بسيطًا، أضف إلى ذلك، أوضحت حادثة جزيرة الأميال الثلاثة، أن مجتمعنا في حاجة إلى تحسين الطريقة التي يتعامل بها مع الأزمات الناشئة عن إطلاق الملوثات الناجمة عن التكنولوجيا الحديثة[30].

تشيرنوبيل Chernobyl

اتضح نقص الاستعداد بصورة كبيرة من خلال الأحداث التي بدأت في صباح يوم الإثنين 28 إبريل عام 1986م، حين بحث العاملون في المنشأة النووية في السويد، بصورة جديّة عن مصدر المستويات المرتفعة من الإشعاعات قرب محطة الطاقة الخاصة بهم، واستنتجوا أنّ منشأتهم لم تكن هي التي سربت الإشعاع، وأنّ الأنشطة الإشعاعية قادمة من الاتحاد السوفياتي عن طريق الرياح السائدة، حيث اعترف السوفيات بوقوع حادث في محطة للطاقة النووية لهم في تشيرنوبيل في 26 من إبريل، كان هذا الإشعار الأول بأنّ أسوأ حادث في العالم في تاريخ الطاقة النووية قد حدث.

يُعتقد أنّ النظام الذي يوفر مياه التبريد لمفاعل تشيرنوبيل فشل نتيجة خطأ بشري، تسبب في ارتفاع درجة حرارة لب المفاعل إلى أكثر من (3000°C)، فانصهر وقود اليورانيوم، ودمّرت الانفجارات الناتجة قمة المبنى فوق المفاعل، واشتعل الجرافيت المحيط بقضبان الوقود، فأنتجت النيران غيمة من الجزيئات المشعة التي ارتفعت عاليًا إلى الغلاف الجوي، وتأكدت (237) حالة إصابة بأمراض حادة ناتجة عن الإشعاع، ومات (31) شخصًا من مرض الإشعاع[31]، وتعرض قرابة (3) مليارات شخص في نصف الكرة الشمالي إلى كميات متفاوتة من الإشعاع من تشيرنوبيل في الأيام اللاحقة للحادث، باستثناء منطقة الـ (30 km) المحيطة بتشيرنوبيل، حيث تعرض الإنسان بصورة قليلة نسبيًّا، أما في أوروبا فقد كان التعرض الأعلى أقل من كمية الإشعاعات الطبيعية التي وردت على مدار عام واحد[31].

أُجلي ما يقارب (115000) شخص في منطقة الـ (30 km) تلك، وقُدّر أن ما يصل إلى (24000) شخص تلقى متوسط جرعة إشعاع أعلى بمئات عدّة من المرات من التعرض السنوي الطبيعي، دُرست حالة هذه المجموعة من الأشخاص بعناية، ووجد أنّ العدد السنوي لحالات سرطان الغدة الدرقية في مرحلة الطفولة ارتفع باطراد في بلدان ثلاثة، هي بيلاروسيا وأوكرانيا والاتحاد السوفياتي (الأكثر تضررًا من كارثة تشيرنوبيل) منذ الحادث، وعام 1994م، اكتُشفت (132) حالة جديدة من سرطان الغدة الدرقية، أمّا مجموع حالات سرطان الغدة الدرقية عند الأطفال والمراهقين منذ الحادث، فقد بلغ (653) حالة، ويُعتقد أنّ حالات السرطان هذه لها صلة بالحادث، على الرغم من أنّ العوامل الأخرى بما فيها التلوث البيئي، قد تؤدي أيضًا دورًا في ذلك، ومن المتوقع تعرض نسبة ضئيلة من مليون طفل للإشعاع في نهاية المطاف، ويصابون بسرطان الغدة الدرقية[32]، أمّا في خارج منطقة الـ (30 km)، فقد كان خطر الإصابة بالسرطان قليلًا، ومع ذلك، بيَّن أحد التقديرات أنّ كارثة تشيرنوبيل سوف تكون في نهاية المطاف مسؤولة عن أكثر من (15000) حالة وفاة في أنحاء العالم جميعها.

واصلت المواد المشعة في تلويث التربة والغطاء النباتي والمياه السطحية والمياه الجوفية في المنطقة المحيطة بتشيرنوبيل، وشكلت خطرًا على النباتات والحيوانات، وستبقى المنطقة التي أُخليت غير صالحة للسكن مدة طويلة جدًّا، ما لم يُعثر على طريقة لإزالة الإشعاعات[31]، أمّا تقديرات التكلفة الإجمالية لحادثة تشيرنوبيل، فتختلف على نطاق واسع، ولكنها ربما تتجاوز (200) مليار دولار.

وعلى الرغم من اتهام السوفيات بعدم إبداء ما يكفي من الاهتمام بسلامة المفاعل واستخدام معدات قديمة، فلايزال الناس يتساءلون عن إمكانية حدوث مثل هذا الحادث مرة أخرى في مكان آخر؛ لأن هناك مئات عدّة من المفاعلات تنتج الطاقة في العالم اليوم، والجواب هو نعم، فقد سُجلت قرابة (10) حوادث أطلقت جزيئات مشعة ما بين عام 1967م وعام 2001م؛ لذلك، فعلى الرغم من أنّ كارثة تشيرنوبيل تُعدّ أخطر حادث نووي حتى الآن، إلّا أنها بالتأكيد ليست الأولى، ولا يُتوقع أن تكون الأخيرة، وبوصفه نتيجة لحادثة تشيرنوبيل، أصبح تحليل أخطار الطاقة النووية الآن تجربة حياة حقيقية بدلًا من محاكاة الحاسوب.

أغلق تشيرنوبيل في النهاية في 15 ديسمبر عام 2000م، وأغلق أيضًا المفاعل رقم (3) بعد 14 سنة من الحادث في المفاعل رقم (4)، وأغلق المفاعل رقم (2) عام 1991م بعد الحريق، إضافة إلى إغلاق المفاعل رقم (1) عام 1996م، الذي جاء نتيجة للضغط الدولي، مع الاتفاق الغربي على دفع أعمال التنظيف، وبناء محطتين جديدتين للطاقة النووية في مواقع أخرى في أوكرانيا.

وقد لا تكون المنطقة حول الحادث آمنة مئات السنين، فمدينة برايبيات تقع على بعد (5 km) من تشيرنوبيل، وهي «مدينة الشبح»، وكان تعداد السكان فيها وقت الحادث قرابة (48,000)، وهي اليوم مدينة مهجورة، مبانيها السكنية خالية، ومركباتها صدئة، وطرقاتها مكسرة، فقد أخليت خلال يومين من الحادث، إذ كان ذلك قبل ثلاثة أيام من عيد العمال، الذي كان احتفالًا بالقوة السوفياتية.

لاتزال حالات سرطان الغدة الدرقية في ازدياد حتى اليوم، غير أنه لم يتكشف التأثير النهائي للحادث النووي الأخطر في العالم بصورة تامة[33]، فعدد الوفيات حتى الآن أقل مما كان متوقعًا، ولكن التلوث أكثر انتشارًا من المتوقع.

Obeikandl.com

مستقبل الطاقة من الانشطار النووي
The Future of Energy from Fission

تنتج الطاقة النووية قرابة (20) في المئة من الكهرباء في الولايات المتحدة اليوم، وقرابة (104) مفاعلات قيد التشغيل الآن، أكثر من (80) في المئة منها في شرقي الولايات المتحدة.

ولاية فيرمونت هي الولاية التي لديها أكبر نسبة من الطاقة الكهربائية المولدة من محطات الطاقة النووية (74%)، ثمّ جنوب كارولينا (57%) ونيوجيرسي (51%) وولاية كونيتيكت (49%)، وهناك حاجة إلى المزيد من المفاعلات لتحقيق مساهمة الطاقة الكامنة لليورانيوم.

اقترحت الولايات المتحدة أخيرًا، وجوب توسيع نطاق الطاقة النووية في المستقبل بوصفها سياسة وطنية، وقد وافق بالتأكيد أكثر الأمريكيين على الاقتراح أكثر مما كان في السنوات السابقة، ومع ذلك، لاتزال هناك معارضة كبيرة للفكرة[34، 35].

في الواقع، قد يكون الانشطار النووي أحد الأجوبة لمشكلات الطاقة لدينا، حيث يجري تقييم استخدامه بجدية للزيادة في المستقبل؛ لأنها مصدر بديل للوقود الأحفوري، التي لا تطلق ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي (الذي يسهم في ظاهرة الاحتباس الحراري)، ولا تطلق الملوثات التي تتسبب في المطر الحمضي، ومع ذلك، تأتي مسؤولية ضمان استخدام الطاقة النووية للناس وليس ضدهم، وأن الأجيال القادمة سترث بيئة جيّدة، وخالية من القلق حول النفايات النووية الخطرة.

إدارة المخلفات المشعة
Radioactive Waste Management

إدارة المخلفات المشعة: التخلص الآمن من المخلفات المشعة قضية بيئية كبيرة تواجه الولايات المتحدة وبقية العالم، فهي المنتجات الثانوية التي يجب أن تتوقّعها عندما تُنتج الكهرباء من المفاعلات النووية أو الأسلحة الناتجة عن البلوتونيوم، حيث يمكن تصنيف النفايات المشعة إلى ثلاث فئات عامة، هي: مستوى منخفض من النفايات، ومخلفات ما بعد اليورانيوم، ومستوى مرتفع من النفايات.

النفايات المشعة ذات المستوى المنخفض
Low-Level Radioactive Wastes

تحتوي النفايات المشعة ذات المستوى المنخفض على كميات قليلة فقط من المواد المشعة، وتتضمن تنوعًا واسعًا من المواد، كالرواسب والمحاليل الناتجة عن العمليات الكيميائية، والنفايات المصنعة السائلة أو الصلبة، والحمأة والأحماض، ومعدات ملوثة قليلة، وأدوات وبلاستيك وزجاج وخشب وقماش ومواد أخرى[36]، وقبل التخلص من النفايات المشعة السائلة ذات المستوى المنخفض، فإنّها تُحول إلى الحالة الصلبة، أو تُعلب مع مواد قابلة لامتصاص ما لا يقل عن ضعفي حجم السائل الحالي[37].

لا يولّد اضمحلال المواد المشعة للنفايات ذات المستوى المنخفض قدرًا كبيرًا من الحرارة، إذ إنّ القاعدة العامة هي وجوب عزل المادة عن البيئة مدة (500) سنة؛ للتأكد من أنّ مستوى النشاط الإشعاعي لا يشكل خطرًا، وتعتمد فلسفة إدارة النفايات ذات المستوى المنخفض في الولايات المتحدة على «التخفيف والشتيت»، وتشير التجربة إلى أنه يمكن دفن نفايات المواد المشعة منخفضة المستوى بأمان وبعناية محكمة، ومراقبة المناطق القريبة من سطح الدفن، الذي تحدّ فيه الظروف الهيدرولوجية والجيولوجية من هجرة النشاط الإشعاعي[37]، وقد دُفنت مثل هذه المخلفات في مواقع عدّة في الولايات، من بينها واشنطن ونيفادا ونيومكسيكو وميسوري إلينوي وأوهايو وتينيسي وكونيتيكت وجنوب كارولينا ونيويورك.

وعلى الرغم من التدابير الوقائية الكثيرة، فلم تقدّم كثير من مواقع دفن النفايات المشعة ذات المستوى المنخفض، بما في ذلك تلك المتوافرة في تينيسي وواشنطن، الحماية الكافية للبيئة، وقد يرجع هذا الفشل في جزء منه على الأقل، إلى سوء فهم البيئة الهيدرولوجية والجيولوجية، فعلى سبيل المثال: تشير دراسة لمختبر أوك ريدج الوطني في ولاية تينيسي، إلى هجرة المواد المشعة من أحد مواقع الدفن، في الأماكن حيث يكون منسوب المياه الجوفية أقل من (7) أمتار تحت سطح الأرض، وخلُصت الدراسة إلى أنّ احتواء النفايات في تلك المنطقة صعب؛ بسبب قصر وقت مكوث المياه في نطاق التهوية، وبعبارة أخرى، لا تستغرق المواد المشعة السائلة المنبعثة من مواقع مكب النفايات وقتًا طويلًا للتسرب إلى نطاق التهوية، ورشوحها إلى المياه الجوفية[35]، ومع ذلك، فبالقرب من بيتي- نيفادا، حيث يبلغ عمق منسوب المياه الجوفية ما يقارب (100 m)، لاقت منشأة التخلص من النفايات المشعة ذات المستوى المنخفض على ما يبدو نجاحًا في احتواء النفايات المشعة، إذ يستند نجاحها جزئيًّا على المدى الطويل من الوقت اللازم لتوليد أي ملوثات قد تدخل إلى المياه الجوفية[37].

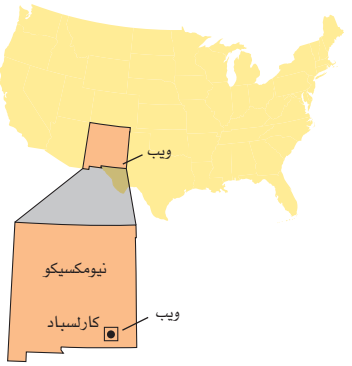
نفايات ما بعد اليورانيوم Transuranic Waste

نفايات ما بعد اليورانيوم مخلفات نووية، تتألف من عناصر مشعة من صنع الإنسان، وأكثرثقلًا من اليورانيوم، وهي في معظمها نفايات صناعية، مثل الملابس والستائر والأدوات والمعدات التي تلوثت، وعلى الرغم من أن النفايات ذات مستوًى منخفض من حيث كثافة النشاط الإشعاعي، فلدى البلوتونيوم ذي عمر- نصف طويل الوقت اللازم لانخفاض النشاط الإشعاعي إلى نصف مستواه الأصلي، ويتطلب عزله من البيئة قرابة (250000) سنة.

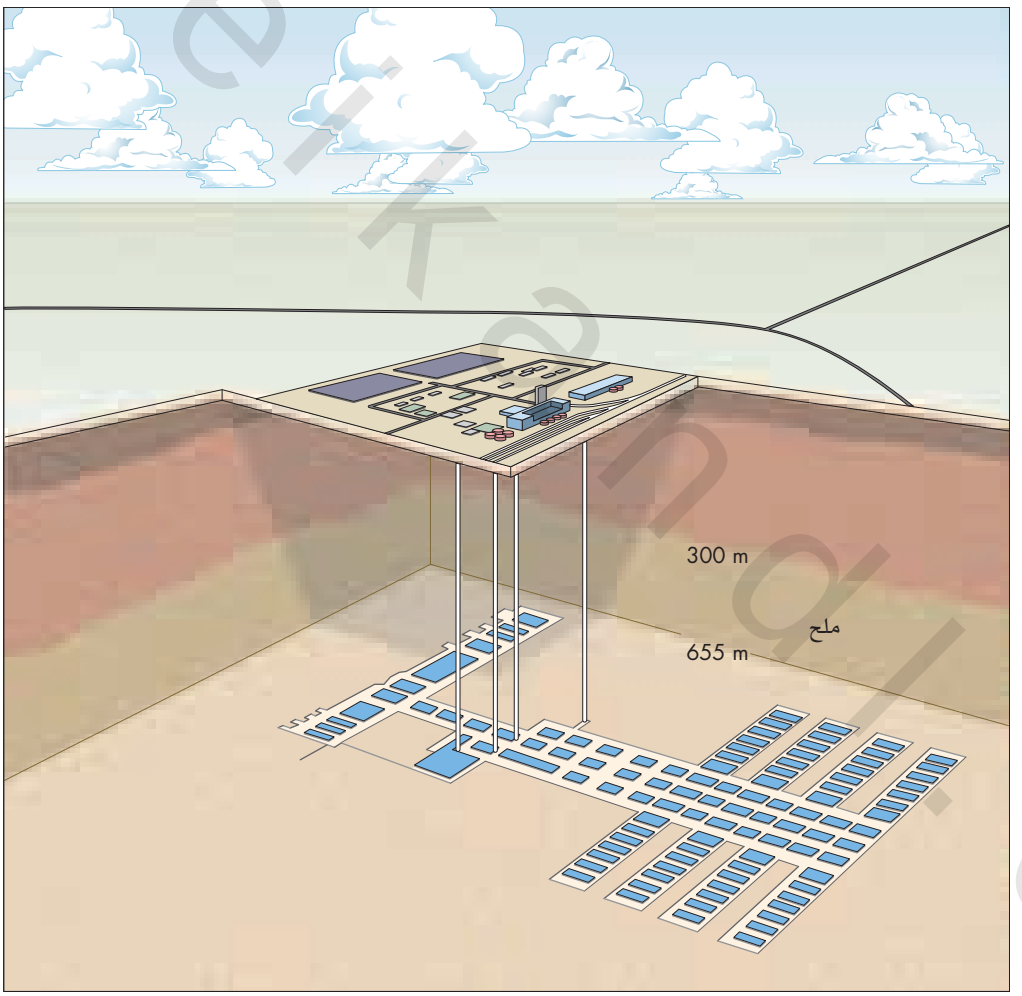
إن معظم مخلفات ما بعد اليورانيوم من إنتاج الأسلحة النووية، ومن تنظيف مرافق الأسلحة النووية السابقة، ويجري نقلها مثلما حصل عام 1991، إلى موقع التخلص من النفايات قرب كارلسباد، نيومكسيكو، حيث عزلت النفايات على عمق (655 m)، في طبقات ملحية سمكها مئات عدّة من الأمتار (الشكل 15-25)، إذ إن للملح الصخري في موقع نيومكسيكو حسنات عدّة، منها[38، 39]:

- يبلغ عمر الملح قرابة (225) مليون سنة، وتُعدّ المنطقة مستقرة جيولوجيًّا وذات نشاط زلزالي قليل جدًّا.
- تعدين الملح سهل، ولا يتبعه تدفق للمياه الجوفية، وتبلغ سعة حجرات الملح المحفورة قرابة (10 m) عرضًا، و(4 m) ارتفاعًا، وتُستخدم للتخلص من النفايات.
- يتدفق الملح الصخري بصورة بطيئة إلى فتحات المنجم؛ ونتيجة لذلك، يغلق بطبيعة الحال المساحات الممتلئة بالنفايات في مرفق التخزين خلال (100-200) عام، ويؤدي إلى إغلاق محكم للنفايات.

Obeikandi.com



(أ)



(ب)

الشكل (15–25): منشأة نيومكسيكو للتخلص من النفايات النووية. رسم بياني مثالي (للمحطة التجريبية لعزل النفايات) موقع التخلص من نفايات ما بعد اليورانيوم في نيومكسيكو. (قسم الطاقة الأمريكي).

موقع التخلص من النفايات في نيومكسيكو مهم؛ لأنه أول موقع جيولوجي للتخلص من النفايات النووية في الولايات المتحدة، ويُقيّم هذا المشروع الرائد بعناية فائقة، فالسلامة هي الاهتمام الرئيس، وقد وضعت إجراءات نقل المخلفات بأمان قدر الإمكان إلى موقع التخلص منها، ووضعها تحت الأرض في منشأة التخلص من النفايات، وستبقى النفايات خطيرة آلافًا عدة من السنوات؛ ولذلك، فإن هناك شكوكًا بخصوص مستقبل اللغات والثقافات في الموقع، وقد وضعت تحذيرات واضحة فوق الأرض وتحتها، وحُدّد الموقع بوضوح؛ للمساعدة على ضمان عدم تدخل إنساني في المستقبل[37].

النفايات المشعة ذات المستوى المرتفع

High-Level Radioactive Wastes

تنتج النفايات المشعة ذات المستوى المرتفع بوصفها وقودًا متجمّعًا في المفاعلات النووية، وإذا أصبحت ملوثة أو سدّت بكميات كبيرة من نواتج الانشطار، فيجب أن يُزال الوقود المستهلك بصورة دورية، ويُعاد تصنيعه أو يتمّ التخلص منه، إذ إنّ تصنيع تجمعات الوقود لن يُعاد على الأرجح في المستقبل القريب في الولايات المتحدة، ما دامت إعادة التصنيع أكثر غلاءً من استخراج اليورانيوم الجديد وتركيزه، التي تشتمل على مشكلات إدارة

obeikandl.com

المخلفات الحالية، من إزالة ونقل وتخزين إلى حيث التخلص النهائي من تجمعات الوقود المستهلك، وجدير بالذكر، أنّ الوقود النووي المستهلك يخزّن اليوم في الولايات المتحدة في حاويات خرسانة فولاذية مبطنة في محطات الطاقة النووية.

مدى مشكلة التخلص من النفايات ذات المستوى المرتفع

تشمل المواد المشعة الخطرة الناتجة عن المفاعلات النووية شظايا الانشطار، مثل الكربتون (85-)، والسترونتيوم (90-)، والسيزيوم (137-)، ولكل واحدة من هذه العناصر المشعة عمر نصف مختلف، حيث كان اختلاف أعمار النصف المرتبطة بشظايا الانشطار واحدًا من التحديات الكبيرة، التي واجهت إدارة التخلص من النفايات المشعة.

وبوجه عام، يُطلب على الأقل (10) أعمار نصف أو أكثر، قبل أن تُعدّ المادة غير خطرة على الصحة؛ لذلك، سيتطلب خليط من شظايا الانشطار المذكورة أعلاه مئات السنين من الحجز عن المحيط الحيوي، تنتج المفاعلات أيضًا كميات صغيرة من البلوتونيوم (239-) عمر النصف لها (24000 سنة)، وهي النظائر التي ينتجها الإنسان والتي لا تحدث بصورة طبيعية؛ لأنّ البلوتونيوم وشظايا الانشطار الخاصة به يجب أن تعزل من البيئة البيولوجية مدة ربع مليون سنة أو أكثر، فالتخلص الدائم منها هو مشكلة جيولوجية.

التخلص من النفايات ذات المستوى المرتفع في البيئة الجيولوجية

يمكن أن توفر البيئة الجيولوجية معظم الاحتواء الآمن والأكيد للمخلفات المشعة ذات المستوى المرتفع، وقد شُرع في برنامج فدرالي وحكومي شامل، عن طريق سياسة النفايات النووية من قانون عام 1982م للتخلص من النفايات النووية ذات المستوى المرتفع، فقد كانت إدارة الطاقة مسؤولة عن التحقيق في كثير من المواقع المحتملة، وقُدم القانون في الأصل للرئيس ليوصي بالموقع بحلول عام 1987م، ففي ديسمبر من عام 1987م، عدّل الكونجرس القانون، وحدد موقع جبل يوكا في جنوبي نيفادا فقط لتقييمه، وتحديد ما إذا كان يمكن التخلص من النفايات المشعة ذات المستوى المرتفع فيه، حيث يعتقد بعض العلماء وغيرهم أنّه تمّ اختيار الموقع ليس اعتمادًا على جيولوجيته، على الرغم من ملاءمة صفات الصخر في الموقع للتخلص من النفايات، وإنّما لأنه منطقة محجوزة للنشاط النووي الحالي، وعليه، سيواجه الحدّ الأدنى من المعارضة الاجتماعية والسياسية[40]، ومع ذلك، كانت المعارضة مكثفة وناجحة على ما يبدو، فبعد إنفاق المليارات من الدولارات يظهر الآن أنّ جبل يوكا ليس الموقع المناسب للتخلص من النفايات النووية، إلّا أنّ جيولوجية الموقع تستحق النقاش.

فالصخر في موقع جبل يوكا هو تف بركاني مضغوط بكثافة (يتألف من الرماد البركاني المضغوط)، ويبلغ الهطل قرابة (15 cm/yr) تتبخر معظم مياهه، ويبلغ عمق المخزن المحتمل (300 m) تقريبًا تحت سطح الجبل، إذ إنّ مثل هذا المستودع يمكن أن يشيّد جيّدًا فوق منسوب المياه الجوفية، وقد أنهى قسم الطاقة والمسح الجيولوجي الأمريكي التقييم العلمي الشامل لهذا الموقع، وساعدت الدراسة على تحديد مدى قدرة الوضع الجيولوجي والهيدرولوجي على عزل النفايات النووية ذات المستوى المرتفع عن البيئة[41].

السلامة على المدى الطويل

لاتزال المشكلة الرئيسة مع التخلص من النفايات المشعة ذات المستوى المرتفع تتمركز حول السؤال الآتي: ما مصداقية التنبؤات الجيولوجية بعيدة المدى، بمعنى إمكانية التنبؤات للظروف في المستقبل على مدى آلاف إلى ملايين السنين[42]؟ لا توجد إجابة سهلة عن هذا السؤال؛ لأن العمليات الجيولوجية تختلف مع مرور الوقت والمسافة، فالمناخ يتغير على فترات طويلة من الزمن، وتتغير أيضًا مناطق التعرية والترسيب ونشاط المياه الجوفية، على سبيل المثال: الزلازل الكبيرة تحدث على بعد مئات أو حتى آلاف الكيلومترات من الموقع، وهي بدورها تغير بصورة دائمة مستويات المياه الجوفية، حيث إنّ السجل الزلزالي المعروف لغربي الولايات المتحدة يعود إلى (100) عام، وتقديرات النشاط الزلزالي في المستقبل ضعيفة في أحسن الأحوال، إضافة إلى أنّ الجيولوجيين يستطيعون في نهاية المطاف تقييم الاستقرار النسبي للماضي الجيولوجي، ولكنهم لا يستطيعون ضمان الاستقرار في المستقبل؛ ولذلك، فإنّ صانعي القرار، وليس الجيولوجيون في حاجة إلى تقييم عدم التيقّن من التنبؤات، في ضوء الضغوط السياسية والاقتصادية والمخاوف الاجتماعية[42]، وهذه المشكلات لا تعني أنّ البيئة الجيولوجية ليست مناسبة لاحتواء الآمن للمخلفات المشعة ذات المستوى المرتفع، ولكن يجب توخي الحذر، للتأكد من أفضل قرار يمكن اتخاذه في هذه المسألة الحساسة والمثيرة للجدل.

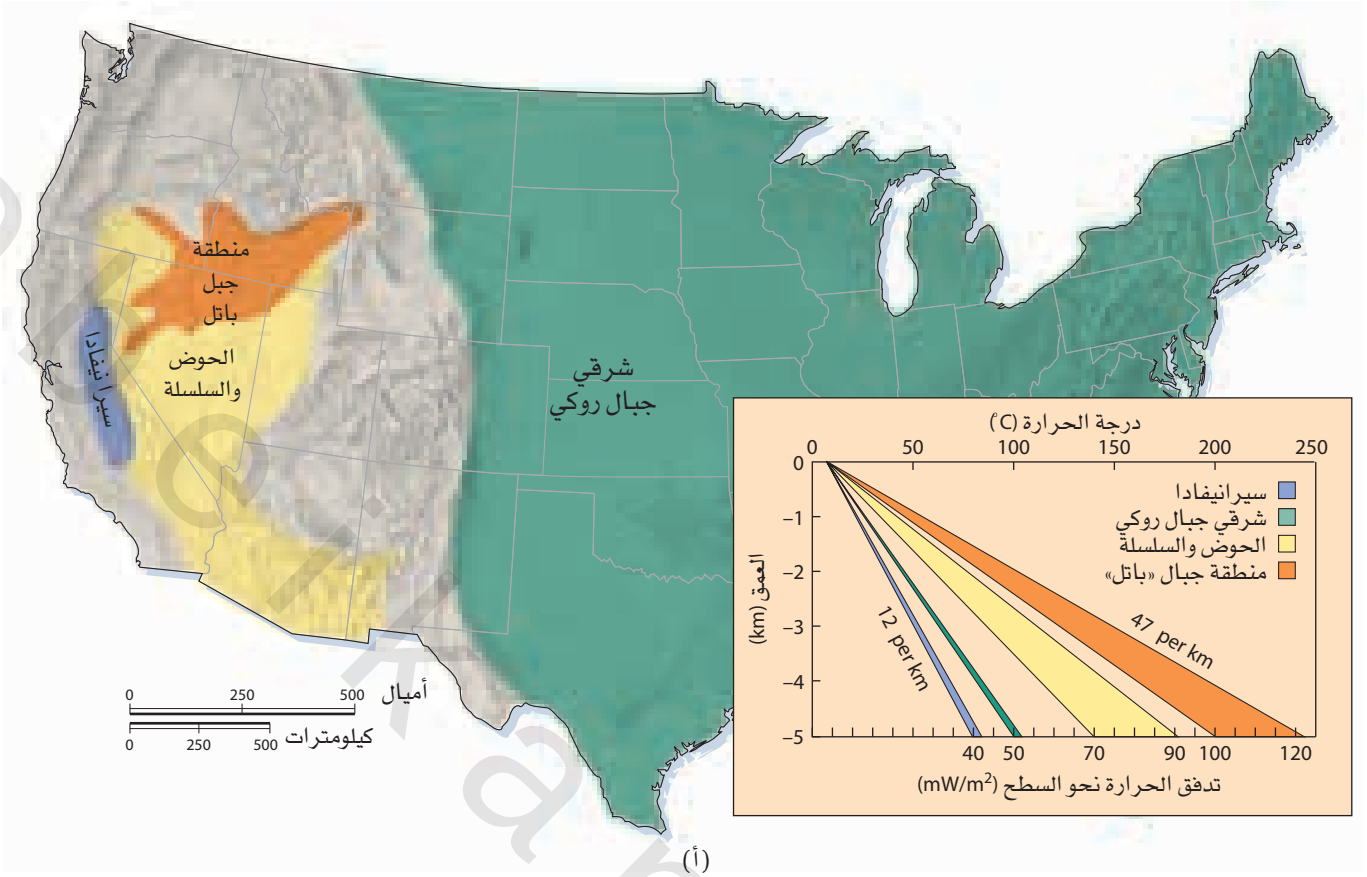
الطاقة من الاندماج Energy from Fusion

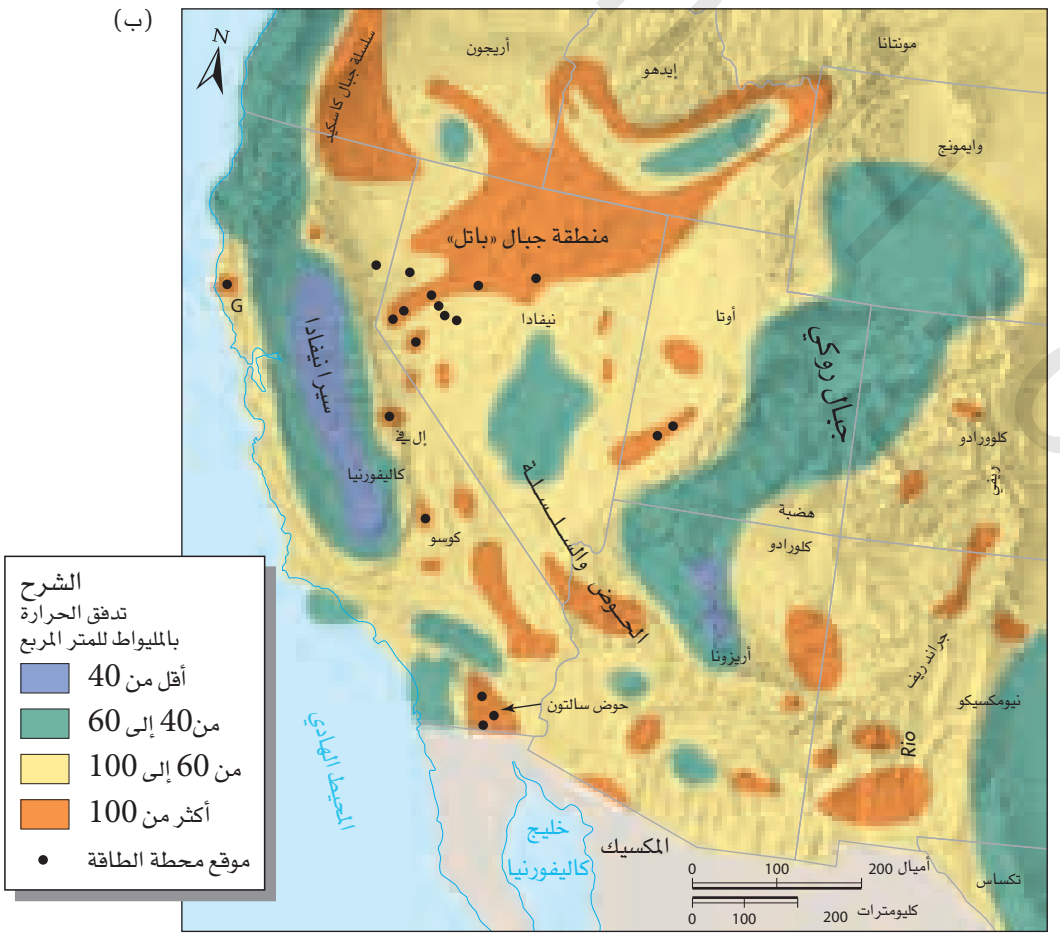
بعكس الانشطار النووي، يجمع الاندماج النووي نوى العناصر الخفيفة لإنتاج العناصر الأكثر ثقلًا منها، وتطلق عملية الاندماج النووي الطاقة، وهي مصدر الطاقة في شمسنا وفي النجوم الأخرى، حيث إنّ تسخير الاندماج النووي هو هدف البحوث التي التقت ولاقت بعض النجاح، وليس من المؤكّد بعد، ما إذا كان تشييد محطات طاقة الاندماج التجارية ممكنًا، والتي هي قادرة على المنافسة مع مصادر الطاقة الأخرى بصورة اقتصادية، ومن وجهة نظر بيئية، يبدو الاندماج جذابًا؛ لأنّ القليل من النفايات المشعة تنتج، ولأن آثار الاستخراج والنقل قليلة مقارنة بتلك الناتجة عن الوقود الأحفوري والانشطار النووي، وجدير بالذكر أنّ وقود الاندماج هو الهيدروجين، الذي يتوافر بصورة غير محدودة؛ ونتيجة لذلك، فإن للاندماج قدرة على أن يكون مصدرًا غير محدود للطاقة بالنسبة إلى المستقبل، ومع ذلك، لا نملك إلى الآن التكنولوجيا اللازمة لتسخير الهيدروجين في احتياجاتنا من الطاقة[6].

7-15 الطاقة الحرارية الأرضية GEOTHERMAL ENERGY

إنّ استخدام الطاقة الحرارية الأرضية – الحرارة الطبيعية من باطن الأرض –، هو تطبيق مشوّق في المعرفة الجيولوجية والتكنولوجيا الهندسية، ولعل فكرة تسخير حرارة الأرض الباطنية ليست جديدة، فقد طورت طاقة الحرارة الأرضية في إيطاليا باستخدام البخار الجاف، عام 1904م، وتستخدم الآن في توليد الكهرباء في كثير من المواقع حول العالم، بما في ذلك عدد قليل في غربي الولايات المتحدة وهاواي، وفي كثير من المواقع الأخرى، تكون طاقة الحرارة الأرضية غير حارة بما فيه الكفاية لإنتاج الطاقة الكهربائية المستخدمة في تدفئة المباني أو في الأغراض الصناعية، وتستخدم منشآت

openkfupm.com





الشكل (15–26): تدفق الحرارة في الولايات المتحدة. (أ) تدرّجات الحرارة الأرضية (12° إلى 47°)، التدفق الحراري والعمومي في الولايات المتحدة. (ب) خريطة أكثر تفصيلًا لتدفق الحرارة لغربي الولايات المتحدة وأماكن محطات الطاقة الحرارية الأرضية، واحد ميللي واط/م2 يعادل (10,000) واط/كم2.

الطاقة الحرارية الأرضية الحالية القليل فقط من إجمالي الطاقة، التي يمكن استغلالها في نهاية المطاف، من خزان الأرض للحرارة الباطنية ذات موارد الحرارة الأرضية الشاسعة، فإذا أمكن التقاط (1) في المئة فقط من طاقة الحرارة الأرضية في (10 km) من القشرة الأرضية العلوية، فإنّ الكمية ستبلغ قرابة (500) ضعف المجموع العالمي من موارد النفط والغاز[43].

جيولوجية الطاقة الحرارية الأرضية
Geology of Geothermal Energy

يُعدّ إنتاج الحرارة الطبيعية من باطن الأرض مفهومًا بصورة جزئية، فنحن نعلم أنّ لبعض المناطق تدفقًا حراريًّا عاليًا من الأسفل أكثر من غيرها، ويرتبط الجزء الأكبر من هذه الأماكن بالعمليات التكتونية، فحدود الصفائح المتباعدة والمتقاربة، هي مناطق تتدفق فيها الحرارة الطبيعية من الأرض بصورة كبيرة، ولم يكن توافق أماكن محطات الطاقة الحرارية ومناطق النشاط البركاني المعروف مصادفة.

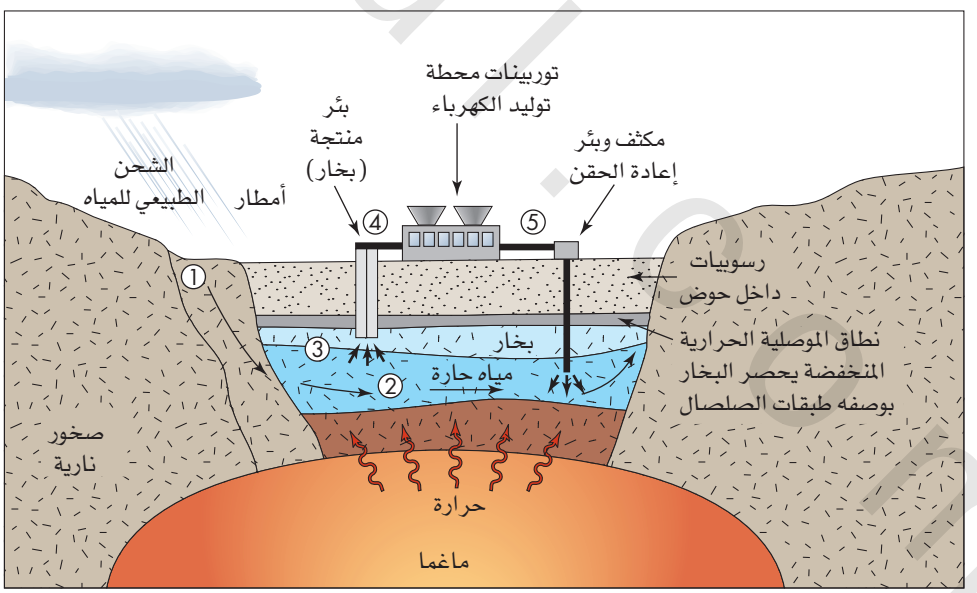
تزداد درجات الحرارة مع العمق تحت سطح الأرض، وتقاس في درجة/كيلومتر، ويشار إليها بالتدرج (للممال) الحراري الأرضي، حيث يتفاوت تدرج الحرارة الأرضية في الولايات المتحدة من (12°C إلى 47°C)/كيلومتر، انظر الشكل (15–26).

وبوجه عام، فإن زيادة الانحدار تزيد التدفق الحراري إلى السطح، ويشير الانحدار الحاد للممال الحراري الأرضي إلى أنّ الصخور الساخنة أكثر قربًا إلى السطح من المعتاد، ويبلغ الانحدار المعتدل من (30°C) إلى (45°C)/كيلو متر ، أضف إلى ذلك أنه عُثر عليها على طول مساحات شاسعة في غربي حوض الولايات المتحدة وامتدادها، وخصوصًا في منطقة جبل المعركة (الشكل 15–26أ)، ومن الواضح أنّ هناك احتمالية جيدة للتنقيب عن الحرارة الأرضية في هذه المنطقة مع بعض الاستثناءات، ويبين الشكل (15–26ب)

الشكل (15–27): محطة الطاقة الحرارية الأرضية. منظر جوي لمحطة طاقة الينابيع الحارة شمال سان فرانسيسكو، كاليفورنيا. المنشأة هي الأكبر في العالم في مجال تنمية الطاقة الكهربائية الحرارية.

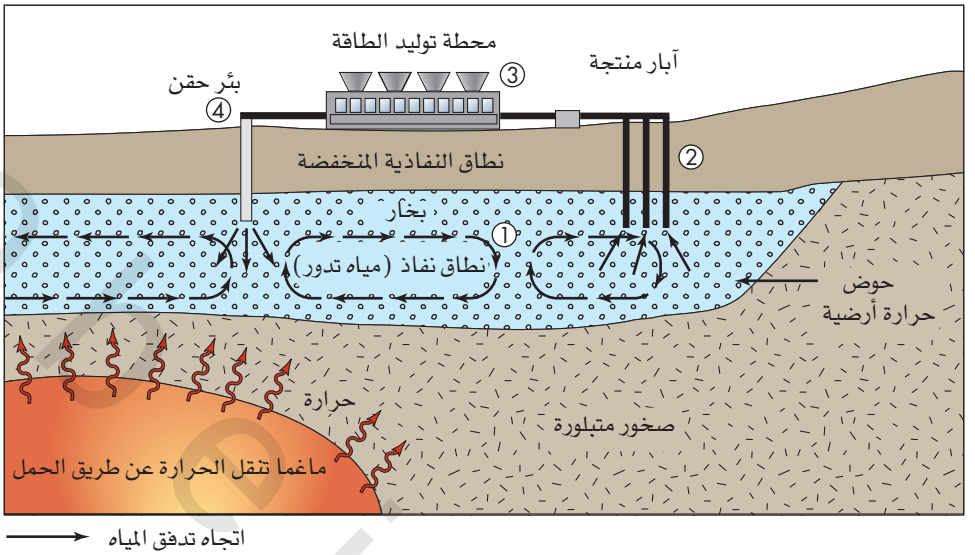
التدفق الحراري لغربي الولايات المتحدة، على طول مواقع توافر محطات الطاقة الحرارية الأرضية، حيث يبلغ إجمالي إنتاج الطاقة قرابة (3000) ميجاواط، أكثر من (90%) منها في كاليفورنيا، إذ يُنتج قرابة الثلث من إجمالي الإنتاج في منشأة ينابيع الماء الحار، الواقعة على بعد (145 km) شمال سان فرانسيسكو، كاليفورنيا، فقد أُنتجت الطاقة الكهربائية من البخار سنوات عدة (الحرارة الأرضية في الشكل (15–26ب) وانظر الشكل (15–27)، وسينتج بئر الحرارة الأرضية التجاري المثالي ما بين (5 و8) ميجاواط من الطاقة الكهربائية[43]. (تذكر الواحد واط = واحد جول/ثانية. انظر إلى نظرة متفحصة: وحدات الطاقة).

يمكن أن تعرف كثيرًا من أنظمة الحرارة الأرضية على أساس المعايير الجيولوجية، فلكل نظام أصل مختلف، وإمكانية مختلفة بوصفها مصدرًا للطاقة.



الشكل (15–28): نظام الحرارة الجوفية البخاري ومحطة الطاقة. المخطط المثالي لنظام الحرارة الجوفية البخار السائد. الآبار تنتج البخار الذي يشغّل التوربينات لإنتاج الكهرباء.

1. شحن طبيعي من الأمطار.
2. مياه حارة ناتجة عن العمليات الأرضية.
3. بخار إلى بئر منتجة.
4. بخار إلى التوربينات لتوليد الكهرباء.
5. مياه يُعاد حقنها في جوف الأرض.



الشكل (15–29): نظام الماء–الحار للحرارة الجوفية. (أ) يفصل البخار عن الماء في محطة الطاقة، ويستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية. يُحقن الماء ليعود إلى نظام الحرارة الجوفية من خلال بئر التصريف. (ب) بحيرات الماموث، كاليفورنيا، محطة طاقة الماء الحار للحرارة الجوفية، تستخدم المحطة (12) بئر إنتاج و(6) آبار حقن، في إنتاج (40 MW)، تكفي لتوفير طاقة لقرية (40,000) منزل.

1. مياه تدور داخل حوض حرارة أرضية.
2. آبار تضخ المياه والبخار.
3. توربينات توليد الكهرباء.
4. مياه يُعاد حقنها في جوف الأرض.

أنظمة حمل الحرارة الأرضية

Hydrothermal Convection Systems

تتميز أنظمة حمل الحرارة الأرضية بتوافر حوض حرارة أرضية، فيه مقدار متغير من المياه الساخنة الدوارة، ويتوافر نوعان أساسيان منها، هما: أنظمة بخارية، وأنظمة المياه الحارة، فأنظمة حمل الحرارة الأرضية البخارية، هي خزانات حرارة أرضية يتوافر فيها كل من الماء والبخار، انظر الشكل (15–28)، وتصبح مستويات الضغط بالقرب من السطح أقل منها في الأعماق، ويتحول الماء بسرعة إلى بخار عالي الحرارة، بحيث يمكن استغلاله، ومدّ أنابيب مباشرة منها إلى توربينات توليد الكهرباء، ولهذه الأنظمة على نحو مميز إعادة شحن بطيء للمياه الجوفية، ما يعني أنّ الصخور الساخنة ستغلي، وستؤدي إلى غليان المزيد من الماء بصورة أكثر، فيمكن استبداله بمقدار الوقت نفسه، عن طريق التغذية الطبيعية أو عن طريق حقن الماء من المكثف بعد توليد الطاقة. الأنظمة البخارية غير شائعة، وقد حُدّدت ثلاثة فقط في الولايات المتحدة، وهي ينابيع الماء الحار في كاليفورنيا، ومتنزه لاسن الوطني في كاليفورنيا، ومتنزه يلوستون الوطني في وايومنغ[43].

يزيد انتشار أنظمة حمل الحرارة الأرضية للمياه الحارة في الولايات المتحدة أكثر بقرابة (20) مرة من الأنظمة البخارية، ويتوافر نطاق توزيع الماء الساخن لأنظمة المياه الحارة التي تكون فيها درجات الحرارة أعلى من (150°C)، وينتقل عند استغلاله إلى منطقة منخفضة الضغط، ما ينتج عنه على السطح خليط من البخار والماء، حيث تجب إزالة الماء من البخار قبل استخدامه لدفع التوربينات[43]. ومثلما هو مبين في الشكل (15–29)، فيمكن أن يحقن الماء للعودة إلى الخزان لإعادة تسخينه.

يستخدم الماء الساخن من الموارد الحرارية الأرضية في عدد من الاستخدامات المباشرة المحتملة، فعلى سبيل المثال: تستخدم آيسلندا الماء الساخن في التدفئة والعمليات الصناعية، وتتوافر مياه حرارية أرضية ساخنة بصورة كبيرة بالقرب من السطح في جنوبي كاسكيد رانجيز قرب شلالات كلاماث في ولاية أوريغون، تُستخدم في تدفئة المنازل والمباني الحكومية والتجارية، ومزارع إنتاج الألبان والأجبان، ومزارع تربية الأسماك والبيوت الزراعية، وتستخدم في جنوب-غرب فرنسا (منطقة باريس) حرارة الأرض الجوفية الناتجة عن مياه حرارتها (60–80°C) في تدفئة قرابة (200,000) شقة، وفي تسخين المياه للاستخدامات المنزلية[43].

أنظمة المياه الجوفية Groundwater Systems

فكرة استخدام المياه الجوفية في درجات الحرارة تحت الأرضية الضحلة الطبيعية، هي فكرة جديدة نسبيًّا، حيث تصل درجة حرارة المياه الجوفية إلى قرابة (13°C) سيلسيوس على عمق (100 m)، وتُعدّ هذه المياه باردة إذا استخدمت في الاستحمام، ولكنها دافئة مقارنة بدرجة حرارة هواء الشتاء في شرقي الولايات المتحدة، وباردة مقارنة بدرجات حرارة فصل الصيف، حيث يمكن للمضخات الحرارية التي ترفع درجة حرارة الهواء والماء أو تخفضها، استغلال الاختلافات الحرارية هذه لتدفئة المباني في الشتاء وتبريدها في الصيف، عن طريق نقل الحرارة بين المياه الجوفية والهواء في المباني، على الرغم من أنها طريقة مكلفة في المباني؛ بسبب حفر الآبار. وجدير بالذكر، أنّ أنظمة الحرارة الأرضية التي تستغل درجة حرارة مياه جوفية ثابتة، تعمل في كثير من الأماكن في الولايات المتحدة، وتُعدّ التكنولوجيا الخاصة بها معروفة جيدًا، ويسهل الحصول على المعدات الخاصة بها، فكلما ارتفعت كلفة الطاقة، أصبحت مثل هذه الأنظمة أكثر جاذبية.

الآثار البيئية لتنمية طاقة الحرارة الأرضية
Environmental Impact of Geothermal Energy Development

تُعدّ الآثار البيئية السلبية لتنمية طاقة الحرارة الجوفية المكثفة أقل حدة من تلك الناتجة عن مصادر الطاقة الأخرى، ولكنها مع ذلك كبيرة، وتشمل المشكلات البيئية المرتبطة بطاقة الحرارة الجوفية على انتشار الضوضاء في الموقع، وانبعاثات الغاز، وحدوث الندوب على الأرض، ولحسن الطالع، أنّ تنمية طاقة الحرارة الأرضية لا تتطلب نقلًا واسعًا للمواد الخام، أو التكرير الذي أصبح سمة ملازمة لتنمية الوقود الأحفوري.

تولّد محطات الطاقة الأرضية أقل من (1%) من أكاسيد النيتروجين، و(5%) فقط من ثاني أكسيد الكربون الناتج عن محطات طاقة حرق الفحم التي تولّد كميات مماثلة من الطاقة[43]، إضافة إلى أنّ طاقة الحرارة الأرضية لا تنتج ملوثات الدقائق الجوية المرتبطة بحرق الوقود الأحفوري أو مخلفات المواد المشعة.

ترتبط بإنتاج طاقة الحرارة الجوفية أخطار بيئية خاصة بها باستثناء الأنظمة البخارية، فتنتج الطاقة الجوفية ملوثات حرارية إلى حد كبير مكونة من مخلفات المياه الحارة، وقد تكون مخلفات المياه ملحية أو معدنية، أو تسبب تآكل الأنابيب والمضخات والمعدات الأخرى؛ لذا، تتلخص خطة التخلص من هذه المياه بإعادة حقنها إلى خزان الطاقة الحرارية، فقد تؤثر تنمية طاقة الحرارة الجوفية في النهاية سلبًا في نشاط ينابيع الماء الحار القريبة، عن طريق خفض مصدر الحرارة التي تنشط الينابيع الحارة أو تغييره، ونتيجة لذلك، وضعت تشريعات فدرالية لحماية الينابيع، مثل ينابيع «أولد فيثفول» المشهورة، والينابيع الحارة في متنزه «يلوستون» الوطني، عن طريق حظر تنمية الطاقة الجوفية في المتنزهات الوطنية، والأمر غير المعروف هو كيف تكون صورة الحماية الكافية، وكم تبلغ مساحة المنطقة العازلة الضرورية، للتأكد من أن تنمية الطاقة الجوفية خارج حدود المتنزه لا تضر ينابيع يلوستون والينابيع الحارة.

مستقبل طاقة الحرارة الأرضية
Future of Geothermal Energy

طاقة الحرارة الأرضية قابلة للتطبيق في مواقع محددة بمصدر الطاقة فقط، ويقدر العائد من جزء صغير من هذه الموارد الضخمة بما يتجاوز إلى حد بعيد مئات من محطات الطاقة النووية الحديثة، وتعادل كلفة إنتاج الكهرباء من كثير من حقول الحرارة الأرضية تكاليف إنتاجها من المصادر الأخرى، مثل طاقة الرياح والغاز الطبيعي.

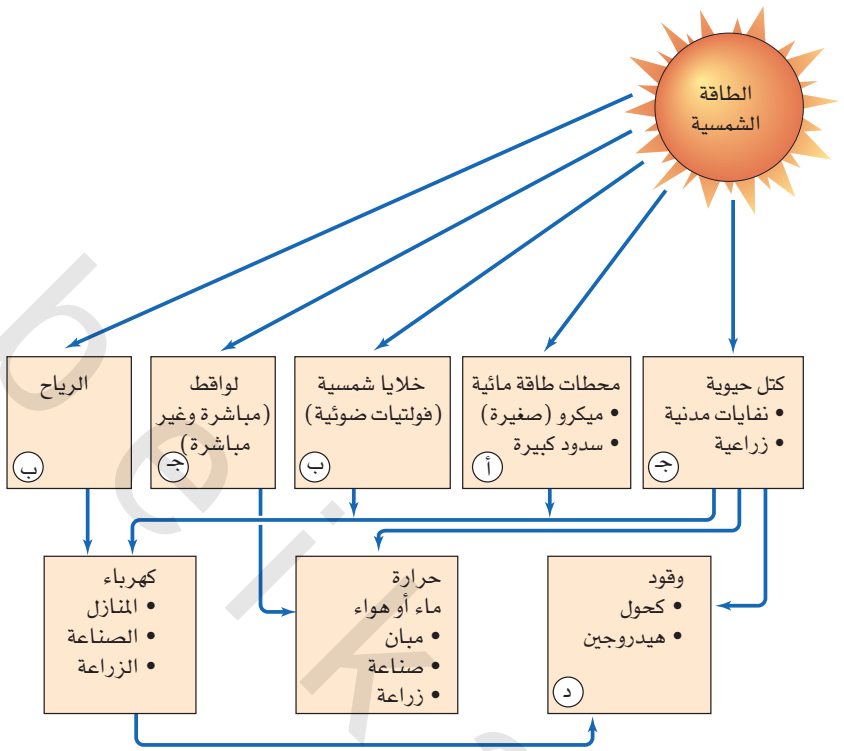
تزود طاقة الحرارة الأرضية حاليًّا جزءًا أصغر من (1%) فقط من الطاقة الكهربائية المنتجة في الولايات المتحدة، ومن غير المرجح أن يتجاوز إجمالي الإنتاج من مصادر طاقة الحرارة الأرضية نسبة ضئيلة، ما يقارب (10%) على الأكثر من الكهرباء المنتجة في المستقبل القريب، وهذه النظرة صحيحة حتى بالنسبة إلى كاليفورنيا، التي تُنتَج طاقة الحرارة الأرضية فيها، ومن المرجح توسيع منشآتها، حيث تبلغ إمدادات طاقة الحرارة الأرضية فيها حاليًّا قرابة (6%) من الكهرباء، ومع ذلك ازداد النمو في إنتاج الطاقة من موارد الحرارة الأرضية بصورة كبيرة في العقود القليلة الماضية، وسوف يستمر الازدياد[43].

15-8 مصادر الطاقة المتجددة
RENEWABLE ENERGY SOURCES

يُعدّ الوقود الأحفوري أحد مصادر الطاقة الرئيسة المستخدمة اليوم، إذ يزوّد بما يقارب (90%) من الطاقة العالمية المستهلكة، وقد صنفت المصادر الأخرى كلها على أنها مصدر بديل، وتقسم إلى مجموعتين: الطاقة المتجددة والطاقة غير المتجددة، حيث تتضمن مصادر الطاقة البديلة غير المتجددة الطاقة النووية وطاقة الحرارة الأرضية، التي تمّت مناقشتها سابقًا، أما مصادر الطاقة المتجددة، فهي الطاقة الشمسية، والطاقة المائية، والهيدروجين، وطاقة الرياح، والطاقة المستمدة من الكتل الحيوية.

ينمو استخدام مصادر الطاقة البديلة، وبخاصة طاقة الشمس والرياح بمعدلات هائلة، حيث أثبتت الآن أنها قادرة على منافسة الوقود الأحفوري الملوّث لهواء المدن، مسببًا المطر الحمضي وارتفاع حرارة المناخ إلى مستوًى غير مقبول، فهي مصادر طاقة لا تسبب تغيرات مناخية حادة، ولا تغير الطقس لإنتاج العواصف القاتلة أو الجفاف، إضافة إلى أنّها لا ترفع مستويات سطح البحر حول العالم، ولا تتسبب في زيادة تآكل السواحل التي تهدد المناطق المنخفضة بما فيها آيسلندا، بل تقدم أفضل فرصة لكسر

الشكل (15–30): أنواع الطاقة الشمسية المتجددة. أمثلة مختارة متطورة أو كامنة.



(أ) إنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية المتجددة.
(ب) تتطور بسرعة، لها إمكانيات عالية، تتطور طاقة الرياح والطاقة الشمسية بمعدل (30%) في سنة.
(جـ) تستخدم في الوقت الحالي، مصدر طاقة مهمًّا.
(د) مصدر وقود مهم جدًّا كامن للتحول من الوقود الأحفوري.

الإدمان على الوقود الأحفوري، ولتنمية سياسة الطاقة المستدامة التي لن تضر بالأرض[44، 45].

يكمن الهدف الأساسي للتأكد من نجاح الطاقة البديلة في مطابقة مصادر الطاقة المتجددة مع المواقع التي تتوافر فيها تلك الموارد الطبيعية بأعلى جودة، على سبيل المثال: وضع محطات الطاقة الشمسية في جنوب غرب الولايات المتحدة، حيث تكون أشعة الشمس أكثر شدة، ووضع حقول الرياح في منطقة السهول الكبرى في تكساس وفي الشمال الشرقي وكاليفورنيا، حيث تكون شدة الرياح قوية وثابتة، واستخدام الكتل الحيوية في محطات الطاقة الحالية التي تعمل بحرق الفحم في أماكن، حيث موارد وقود الغابات والزراعة وفيرة[46].

تناقش مصادر الطاقة المتجددة عادة بوصفها مجموعة؛ لأنها مشتقة من طاقة الشمس، التي تعرف على نطاق واسع، حيث تضم كثيرًا من مصادر الطاقة المتجددة، مثلما هو مبين في الشكل (15–30)، وتُعدّ قابلة للتجدد؛ بسبب إعادة توليدها عن طريق الشمس بمدة زمنية تكون مفيدة للناس، ومن مميزات مصادر الطاقة المتجددة أنها لا تنضب، وغالبًا ما يصاحبها الحد الأدنى من التدهور البيئي، فباستثناء حرق الوقود الحيوي أو مشتقاته وحرق النفايات المدنية، فإن الطاقة الشمسية لا تستلزم حرق الوقود، وعليه، فإنها لا تشكل تهديدًا بزيادة ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي وتعديل المناخ، وثمة جانب آخر مهم لها، وهو أن المهلة الزمنية اللازمة لتنفيذ التكنولوجيا غالبًا ما تكون قصيرة، مقارنة بتنمية المصادر الجديدة، أو بناء محطات الطاقة التي تستخدم الوقود الأحفوري أو النووي.

تصل إلى سطح الأرض كمية إجمالية ضخمة من الطاقة الشمسية، حيث تساوي (10) أسابيع تقريبًا من الطاقة الشمسية على المقياس العالمي الطاقة المخزنة في الاحتياطات المعروفة جميعها من الفحم والنفط والغاز الطبيعي على الأرض، ويبلغ معدل المردود من مصدر الطاقة الشمسية قرابة (80) ضعف الطاقة المستخدمة الآن من قبل الناس على الأرض.

الطاقة الشمسية Solar Energy

تستخدم الطاقة الشمسية مباشرة من خلال أنظمتها السلبية أو الفعَّالة، حيث تشمل أنظمة الطاقة الشمسية السلبية تصميمًا معماريًّا يعزّز امتصاص الطاقة الشمسية واستغلال ميزة التغيرات الطبيعية فيها التي تحدث على مدار السنة دون الحاجة إلى طاقة ميكانيكية، إذ تستخدم التقنية البسيطة تصميمًا يتدلى على المباني، ويحجز أشعة الشمس الصيفية عالية الزاوية، بحيث يسمح لأشعة الشمس الشتوية قليلة الزاوية باختراق الغرف وتدفئتها، والطريقة الأخرى لذلك، عن طريق بناء جدار يمتص الطاقة الشمسية، ثم يبعثها إلى داخل الغرفة، فتعمل على تدفئتها، فكثير من المنازل والمباني الأخرى في جنوب غرب الولايات المتحدة إضافة إلى أجزاء أخرى من البلاد تستخدم الآن أنظمة الطاقة الشمسية السلبية؛ لتوفير جزء من احتياجاتها من الطاقة[46]، أمّا أنظمة الطاقة الشمسية الفعَّالة فتتطلب طاقة ميكانيكية، وعادة ما تكون المضخات والأجهزة الأخرى، التي توزع الهواء أو الماء أو السوائل الأخرى من اللواقط الشمسية لتدفئة الخزان، حيث تخزن الحرارة لحين استخدامها.

اللواقط الشمسية Solar Collectors

هي في العادة لوحات مسطحة تتكوّن من لوحة زجاجية على خلفية سوداء، حيث توزع المياه من خلال الأنابيب، وتدخل أشعة الشمس إلى الزجاج، وتُمتص عن طريق الخلفية السوداء، فيسخن الماء في أنابيب التوزيع من (38° إلى 93°C) [47]، إذ إنّ عدد الأنظمة التي تستخدم هذه المجمعات في الولايات المتحدة مستمر في النمو.

الخلايا الكهروضوئية Photovoltaics

وهي التكنولوجيا التي تحول أشعة الشمس مباشرة إلى كهرباء، تستخدم مادة صلبة شبه موصلة، تعرف باسم الخلايا الكهروضوئية، التي تنمو بمعدل (35%) في سنة، لذلك فهي مصدر الطاقة الأسرع نموًّا في العالم اليوم، وتستخدم الأنظمة خلايا كهروضوئية أو خلايا شمسية مصنوعة من السليكون أو المواد الأخرى ومكونات الحالة-الصلبة الإلكترونية مع أجزاء متحركة أو دونها، حيث تشيّد الخلايا في وحدات قياسية موحدة يمكن دمجها لإنتاج أنظمة مختلفة الأحجام؛ ونتيجة لذلك، يمكن أن يكون إنتاج الطاقة مطابقًا للاستخدام المقصود، إذ تُنتج الكهرباء عندما تضرب أشعة الشمس الخلية، ما يتسبب في تدفق الإلكترونات خارج الخلية من خلال الأسلاك الكهربائية.

تبرز الخلايا الكهروضوئية بوصفها مصدرًا كبيرًا للطاقة في البلدان النامية الفقيرة نسبيًّا، التي ليست لديها القدرة المادية لبناء محطات الطاقة المركزية الكبيرة التي تحرق الوقود الأحفوري، وندرك الآن أنّ تكنولوجيا الطاقة الشمسية بسيطة وغير مكلفة نسبيًّا، وقادرة أيضًا على تلبية استخدامات الإنسان للطاقة في معظم الأماكن في العالم.

شركة واحدة للطاقة الشمسية في الولايات المتحدة تزوّد القرى في كثير من البلدان بأنظمة الخلايا الكهروضوئية، بتكلفة تركيب منخفضة تبلغ بضع مئات الدولارات لكل أسرة[48]، حيث يشكل قرميد السطح الشمسي محطة الطاقة الخاصة بكل بيت[49]، ومن الممكن أن توضع لوحات الخلايا الشمسية أيضًا على أسطح المباني أو الجدران أو على زجاج النافذة[46].

وعلى الرغم من أنّ هناك حالات محددة تكون فيها كلفة استخدام الخلايا الكهروضوئية مساوية للطاقة المتصلة بالشبكات، فإن الخلايا الكهروضوئية لاتزال إلى حد كبير أكثر تكلفة من مصادر الطاقة التقليدية، إلّا أنّ الفجوة في التكلفة تضيق بصورة بطيئة[44، 50، 51].

الطاقة الشمسية والبيئة

Solar Energy and the Environment

الأثر البيئي لاستخدام الطاقة الشمسية قليل نسبيًّا، إذ يتكوّن الضرر الرئيس بسبب تشتت الطاقة الشمسية نسبيًّا، ما يستوجب الحاجة إلى مساحة كبيرة من الأرض لتوليد كمية كبيرة من الطاقة، وتهمل هذه المشكلة عند دمج اللواقط الشمسية مع المنشآت الحالية، مثل إضافة سخانات المياه الساخنة الشمسية على سطوح المباني الحالية، حيث يمكن التقليل من أثر أنظمة الطاقة الشمسية عن طريق تحديد أنظمة مركزية في المناطق التي لا تستخدم للأغراض الأخرى، والاستفادة من مجمعات الطاقة الشمسية المشتتة على المباني الحالية، حيثما كان ذلك ممكنًا.

الهيدروجين Hydrogen

الهيدروجين هو الوقود المحترق عن طريق الشمس، وهو أخفّ العناصر وزنًا وأكثرها وفرة في الكون، وربما يكون وقود المستقبل ومفتاح الطاقة النظيفة، فهو وقود عالي الجودة، ويمكن استخدامه بسهولة في أي من الطرق التي نستخدم فيها عادة الوقود الأحفوري، كالطاقة التي تستخدم للسيارات ومحركات الشاحنات أو لتدفئة المياه أو المباني، إذ يمكن أن ينتج الكهرباء عندما يستخدم في خلايا الوقود المماثلة للبطاريات، ويمكن أن ينقل الهيدروجين مثل الغاز الطبيعي في خطوط الأنابيب، ويخزّن في خزانات، ويمكن إنتاجه باستخدام الطاقة الشمسية أو مصادر الطاقة المتجددة الأخرى، لفصل الماء إلى أكسجين وهيدروجين. ويُعدّ الهيدروجين وقودًا نظيفًا؛ لأن الماء يتكوّن من نواتج احتراقه؛ لذلك فهو لا يسهم في ظاهرة الاحترار العالمي أو تلوث الهواء أو المطر الحمضي، ومن المتوقع أن تستمر الأبحاث العلمية عليه؛ ولذلك ربما ينخفض سعر الوقود الناتج بصورة واضحة في المستقبل، فلدى هاواي التي تستورد النفط بنسبة (88%) من احتياجتها للطاقة، وفرة في الحرارة الأرضية والطاقة الشمسية وموارد الرياح، التي يمكن أن تستخدم لإنتاج الهيدروجين، حيث تأمل في نهاية المطاف أن تكون شبكة مصدرة للطاقة في صورة من صور الهيدروجين، وقد أعلنت آيسلندا في نهاية القرن العشرين، أنها تنوي أن تكون أول مجتمع يستخدم الهيدروجين، وستصدره إلى أوروبا بحلول عام 2050م[52، 54].

طاقة المياه Water Power

مصدر قديم للطاقة، فقد استخدم الماء بنجاح بوصفه مصدرًا للطاقة منذ عهد الإمبراطورية الرومانية، وكانت النواعير التي تدور في غرب أوروبا في القرن السابع عشر تسخر الطاقة لتحريك المياه وتحويلها إلى طاقة ميكانيكية، واستخدمت النواعير الكبيرة خلال القرنين الثامن عشر والتاسع عشر في تزويد الطاقة لتشغيل مطاحن الحبوب والمناشر والماكنات الأخرى في الولايات المتحدة.

الطاقة الكهرومائية Hydroelectric Power

تزود محطات الطاقة الكهرومائية اليوم قرابة (10%) من إجمالي الكهرباء المنتجة في الولايات المتحدة، وعلى الرغم من ازدياد الكمية الكلية من الطاقة الكهربائية المنتجة عن طريق جريان الماء بعض الشيء في السنوات المقبلة، إلّا أنه من الممكن أن تقل النسبة نتيجة تزايد استخدام مصادر الطاقة الأخرى، مثل الطاقة النووية وطاقة الرياح والطاقة الشمسية وطاقة الحرارة الأرضية بسرعة أكبر.

يُنتفع من أكثر المواقع ملاءمة للسدود الكبيرة في إنتاج الطاقة الكهرومائية فعليًّا، ومع ذلك، ربما تكون نظم الطاقة الكهرومائية على النطاق الضيّق أكثر شيوعًا في المستقبل، فهذه الأنظمة المصممة للمنازل الفردية أو المزارع أو الصناعات الصغيرة، تنتج عادة طاقة أقل من (100 kW)، وتسمى أنظمة الطاقة الكهرومائية الصغيرة (الشكل 15-31)[55]، وهي واحدة من أقدم مصادر الطاقة في العالم وأكثرها شيوعًا، إذ إنّ لدى كثير من المواقع في مناطق عدة إمكانية إنتاج طاقة كهربائية على مقياس صغير، فالمناطق الجبلية واعدة بصورة خاصة؛ لأن الطاقة الكامنة من جداول المياه متاحة بسهولة، حيث تعتمد تنمية الطاقة الكهرومائية الصغيرة بحكم طبيعتها، على محدودية المكان وعلى القوانين المحلية والوضع الاقتصادي للمنطقة والقيود الهيدروجيولوجية.

الشكل (15–31): الطاقة الكهرومائية الصغيرة. اندفاع جدول محطة الطاقة الكهرومائية الصغيرة في بحيرة سيلفر في سييرا نيفادا / كاليفورنيا.
(Edward A. Keller)

يُعدّ ابتكار طرق جديدة لتطوير طاقة المياه موضوع البحث والتطوير الجاري، فعلى سبيل المثال: يمكن استخدام طاقة أمواج المحيط التي تضرب الشاطئ في ضغط الهواء، الذي يدفع بقوة خلال التوربين المنتج للكهرباء، والخطة الأخرى هي استخدام الطاقة من حركة النهر البطيئة في إنتاج الكهرباء، فالفكرة وضع عوائق عمودية لتتدفق على مجرى النهر الذي يحدث اضطرابات من التدفق، وتهتز لإنتاج الطاقة.

يمكن أن تستخدم الطاقة الكهرومائية في توليد الطاقة الكهربائية، أو الطاقة الميكانيكية لتشغيل الآلات، حيث تساعد محطات الطاقة الكهرومائية على خفض التكلفة العالية من الطاقة المستوردة، ومساعدة العمليات الصغيرة لتصبح أكثر استقلالية بشأن مزودي الخدمات المحلية[55].

طاقة المد والجزر Tidal Power

صورة أخرى من صور طاقة المياه، قد تكون مشتقة من المد والجزر في المحيط في بعض الأماكن، حيث التضاريس المفضلة لذلك، مثل منطقة خليج «فاندي Fundy» شمال شرقي الولايات المتحدة وكندا، إذ يصل أقصى ارتفاع للمد والجزر في خليج فاندي قرابة (15 m)، ويبلغ أدنى ارتفاع ضروري للنظر في إمكانية تطوير طاقة المد والجزر قرابة (8 m).

تسخّر طاقة المد والجزر عن طريق بناء سد عبر مدخل الخليج، فيتكوّن حوض على جانب اليابسة من السد، وينشئ السد فرقًا في مستوى الماء بين المحيط والحوض، فكلما ارتفع الماء في الحوض بعد ذلك، أو سقط، فإنّه يستغل لتشغيل التوربينات التي تنتج التيار الكهربائي، وتنتج محطة طاقة المد والجزر على نهر رانس، بالقرب من سانت مالو في فرنسا أكثر من (200,000 kW) من الطاقة الكهربائية من (24) وحدة طاقة عبر السد.

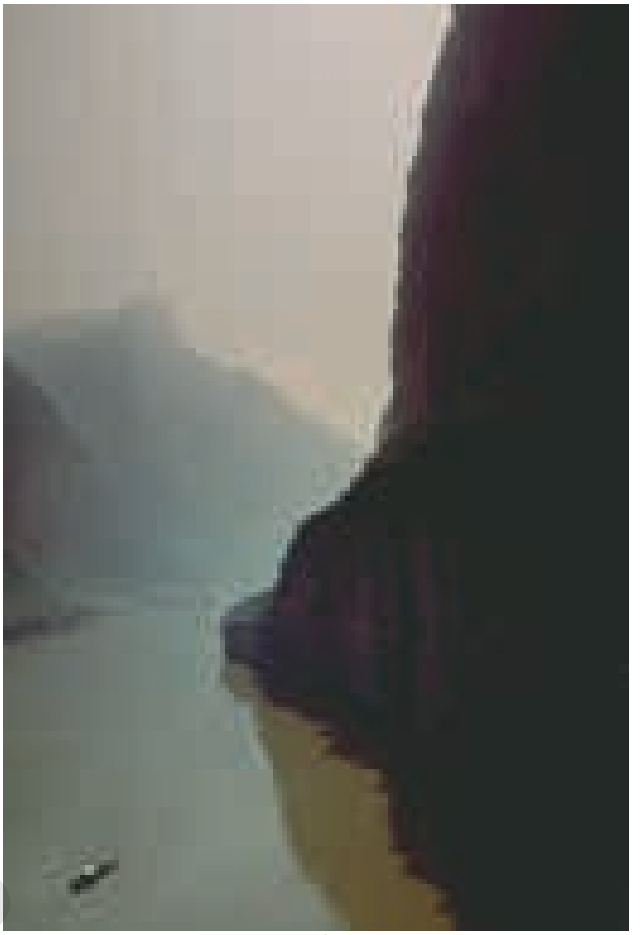
طاقة المياه والبيئة Water Power and Environment

طاقة المياه نظيفة، فهي لا تحتاج إلى حرق الوقود، ولا تلوث الغلاف الجوي، ولا تنتج مواد مشعة أو مخلفات أخرى، وهي فعالة أيضًا، إلّا أنّ ثمنًا بيئيًّا يجب دفعه بأي طريقة. قد يحصر انحدار الماء فوق السدود العالية غاز النيتروجين، وهو الغاز الرئيس في الهواء، ليدخل بعدها إلى دم السمك، ويتمدد فيقتلها، وهذه العملية مماثلة لما يحدث للغواصين عند ارتفاعهم بسرعة كبيرة وإصابتهم بالتواء، فقد قتل النيتروجين الكثير من السمك الطريد المهاجر في شمال غرب المحيط الهادي، أضف إلى ذلك، أنّ السدود تحصر الرسوبيات التي تصل إلى البحر، وتجدد الرمال المتوافرة على الشاطئ، إضافة إلى أنّ بناء السدود لتسخير طاقة الماء، يمكن أن يتسبب أيضًا في نزوح الناس، وفقدان الأرض لخزانها، وفقدان الحياة البرية، والتغيرات السلبية في بيئة النهر ومصبّه بصورة هيدرولوجية، يُضاف إلى ذلك أيضًا، أنّ كثيرًا من الناس لا يريدون أن تتحول الأنهار البرية إلى سلسلة من البحيرات، عن طريق بناء سدود متقطعة، وفي الحقيقة، أُزيلت سدود عدة في الولايات المتحدة، ويجري النظر في إزالة سدود أخرى نتيجة للآثار البيئية السلبية التي تسببها هذه السدود.

على الرغم من المشكلات المتأصلة المرتبطة بالسدود، فقد بُني أكبر سد في العالم في الصين، إذ شرّد سد الخوانق الثلاث على نهر اليانغتسي قرابة مليوني شخص من منازلهم، وأغرق المدن والمزارع والحقول والمواقع السياحية ومناظر نهر الخوانق الطبيعية الخلابة (الشكل 15–32)، وقد أسهم السد في انقراض دولفين نهر اليانغتسي، وأصبح جزء الموطن الأصلي لكثير من النباتات والحيوانات على قمم الجبال جزرًا في الخزان العملاق، ما أدى إلى فقدان تنوع الأصناف.

يبلغ ارتفاع السد قرابة (185 m)، وعرضه أكثر من (1.6 km)، وعندما يمتلئ فسوف ينتج خزان طوله يقارب (600 km)، وهناك قلق من أن يصبح الخزان ملوثًا بمياه الصرف الصحي والملوثات الصناعية، التي يتم التخلص منها حاليًّا في النهر، محوّلة الخزان الطويل الضيق إلى قناة مجارٍ مفتوحة، وقد تقصي مرافئ الشحن في المياه العميقة في نهاية المنبع للخزان، حيث من المرجح أن تترسب الرواسب، وعلى صعيد أكثر إيجابية سوف ينتج (26) توربينًا عملاقًا قرابة (18,000 MW) من الكهرباء، التي تساوي ما تنتجه (18) محطة طاقة نووية أو طاقة حرق الفحم، ومع ذلك، يشير معارضو السد إلى أنّ سلسلة السدود على روافد نهر اليانغتسي قد تنتج طاقة كهربائية، بينما لا تسبب ضررًا بيئيًّا للنهر الرئيس[56].

openingeo.com



(أ)

(ب)

الشكل (15–32): سد الخوانق الثلاث على نهر اليانغتسي الصيني.
(أ) خانق تشوتانغ، و(ب) بناء أقفال مؤقتة قرب موقع السد على خانق شيلينغ.
(Bob Sacha/Bob Sacha Photography

فـي حين أن مستقبل نمو طاقة الماء على النطاق الواسع غير محدود؛ بسبب الاعتراضات على بناء السد، وحقيقة أن كثيرًا من المواقع الجيدة للسدود قد استخدمـت بالفعل، يبدو أنّ هناك اهتمامًـا متزايدًا في الطاقة الكهرومائية الصغيـرة، أو السدود الصغيرة لتوريـد الكهرباء أو الطاقة الميكانيكية، ومع ذلك، قد يكون الأثر البيئـي لكثير من منشآت الطاقة الكهرومائية الصغيرة كبيـرًا. تغير المواقـع تدفق التيار الطبيعي التي تؤثر فـي الكائنات الحية في التيار والإنتاجية. تمتلئ السدود الصغيرة والخزانات أيضًا بالرواسب بسرعة أكبر بكثير من المنشآت الكبيرة؛ لذلك تكون حياتها المفيدة قصيرة.

لأن تنمية الطاقة الكهرومائية الصغيرة يمكن أن تؤثر سلبًا في بيئة التيار، فيجب الاهتمام الدقيق بتنميتها على منطقة واسعة، فقد يسبب عدد قليل من المواقع تراجعًا بيئيًّا قليلًا، أمّا إذا أصبح العدد مفرطًا، فقد يكون التأثير في المنطقة الأكثر اتساعًا ملموسًا، ويجب أن يؤخذ هذا الاعتبار في الكثير من صور التكنولوجيا التي تضم مواقع صغيرة، فقد يكون تأثير الموقع الواحد في المنطقة الواسعة لا يذكر تقريبًا، ولكن كلما كان عدد المواقع في ازدياد، يصبح إجمالي التأثير كبيرًا.

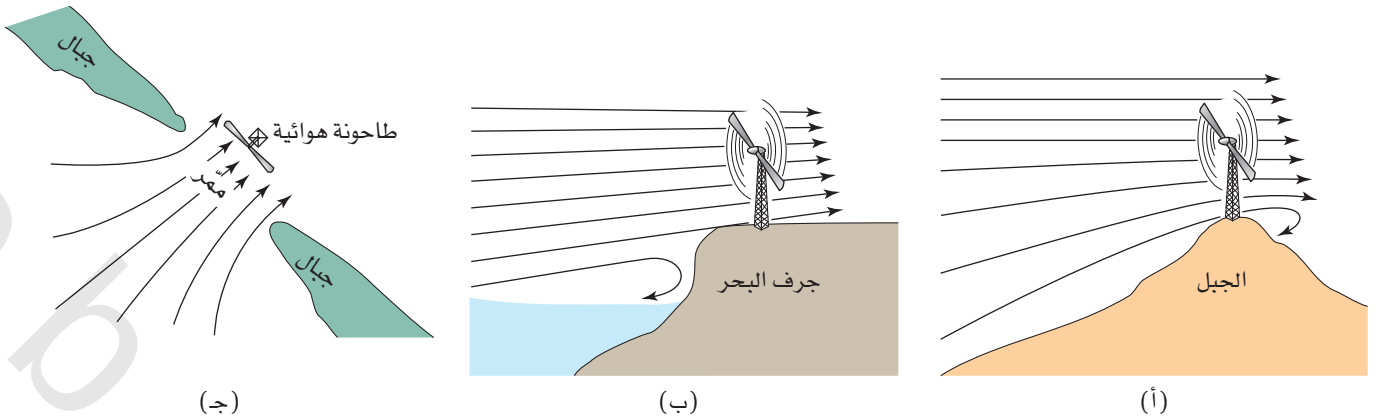
طاقة الرياح Wind Power

وهي مثل الطاقة الشمسية تطورت على مدى فترة طويلة من الزمن، مع بداية الحضارات الصينية والفارسية تقريبًا، وقد دفعت الرياح السفن، ودفعت الطواحين لطحن الحبوب أو ضخ المياه، واستخدمت في الآونة الأخيرة في توليد الكهرباء. تنتج الرياح عندما تتباين حرارة سطح الأرض، وتوجد كتلًا هوائية مع اختلاف محتويات الحرارة والكثافة، فإمكانية الحصول على الطاقة من الرياح هائلة، ومع ذلك، هناك مشكلات عند استخدامها؛ لأنها متغيرة بصورة كبيرة في الوقت والمكان والشدة، وعلى الرغم من ذلك، فإنّ طاقة الرياح واحدة من الأنواع الأكثر سرعة في النمو والواعدة بصورة أكثر، وهي من الناحية التكنولوجية من المصادر المتقدمة للطاقة البديلة (تتضاعف كل بضع سنوات)[44].

أصبح التنقيب عن الرياح مسعًى مهمًّا، وعلى المقياس الوطني، فإنّ المناطق التي تحوي الإمكانية الأعظم لتوليد الطاقة من الرياح، هي شمال غرب المنطقة الساحلية في المحيط الهادي، والمنطقة الساحلية لشمال شرقي الولايات المتحدة، والحزام الممتد من شمالي تكساس عبر ولايات جبال روكي وداكوتا، إضافة إلى مواقع أخرى جيدة، مثل المناطق الجبلية شمال كارولينا وشمالي وادي كوتشيلا في جنوب كاليفورنيا.

قد يكون اتجاه الرياح وسرعتها ومدتها في موقع معين متغيرة تمامًا، حيث تعتمد على التضاريس المحلية وعلى مقدار الاختلافات في درجة الحرارة المحلية إلى الإقليمية في الغلاف الجوي، تنتج الرياح بوجه عام وحتى في المواقع الجيدة، أقل من (30%) مما لو كانت متوافرة طوال اليوم في كل يوم، وعلاوة على ذلك، فغالبًا ما تكون الرياح عاصفية أكثر في الليل، عندما يكون الطلب على الكهرباء منخفضًا[44]، فعلى سبيل المثال: تزيد سرعة الرياح غالبًا فوق قمم التلال، أو قد تكون مركزة من خلال المرور الجبلي،

openingdrop.com



(أ) (ب) (جـ)

(د)

الشكل (15–33): المناطق التي تتزايد فيها مصادر الرياح. كيف يمكن أن تنشأ الرياح، وتزداد سرعتها بسبب التضاريس رأسيًّا (أ وب)، أو أفقيًّا (جـ). يتطلب تركيب طواحين هواء طويلة على قمم المرتفعات أو التلال المواجهة للبحر للتخلص من التيارات السطحية. (د) حقل طواحين هواء قديم في كاليفورنيا، الحقول الحديثة أكبر.

(Glen Allison/Getty Images Inc)

إذ إنّ الزيادة في سرعتها فوق الجبل ترجع إلى التقارب الرأسي للرياح، في حين تعزى هذه الزيادة جزيئًّا في الممرات إلى التقارب الأفقي (الشكل 15–33أ–جـ)، ولأن هيأة الجبل أو الممرات غالبًا ما تكون مرتبطة بالجيولوجيا المحلية أو الإقليمية، فإن التنقيب عن طاقة الرياح مشكلة جيولوجية، إضافة إلى أنها مشكلة جغرافية وذات علاقة بالأرصاد الجوية.

تمت في السنوات الأخيرة تحسينات كبيرة في حجم طواحين الهواء وكمية الطاقة التي تنتجها، عندما أصبحت كثير من الدول الأوروبية والولايات المتحدة مهتمة بالمولدات المدفوعة بطاقة الرياح على نطاق واسع، ففي الولايات المتحدة تقع الآلاف من طواحين الهواء في مزارع الرياح (الشكل 15–33د)، وتوربينات الرياح الكبيرة لولاية الفن أكبر من ذلك بكثير، فكل واحد ينتج من (3 إلى 5) ميجاواط، وهو ما يكفي من الطاقة لآلاف عدة من المنازل، أمّا أهم مزايا طاقة الرياح، فهي أن الرياح واسعة الانتشار، ووفيرة، وهي مصدر لا ينضب؛ لذا، أصبحت طاقة الرياح مصدرًا للطاقة غير مكلف (تكلفة تتنافس مع الوقود الأحفوري وأقل كلفة من الطاقة النووية)، وهي مصدر نظيف للكهرباء، ولا تسبب تلوث الهواء أو انبعاث ثاني أكسيد الكربون الذي يغير المناخ. لهذه الأسباب طاقة الرياح هي مصدر الطاقة الأسرع نموًّا في العالم، ومع ذلك، لدى طاقة الرياح بعض الآثار السلبية، منها:

- قد تقتل طواحين الهواء الطيور، وخصوصًا الكبيرة الجارحة، مثل الصقور والبواشق التي تحلق بالقرب من المروحة في أثناء تركيزها على الفريسة، والتوربينات الأحدث أكثر أمانًا للطيور من القديمة.
- تتطلب مزارع طواحين الهواء الكبيرة أرضًا للطرقات ومنصات طواحين الهواء والمعدات الأخرى.
- قد تضعف طواحين الهواء مساحة الموارد السياحية.

نمت طاقة الرياح في العقد الأخير بصورة مدهشة (30%) في السنة تقريبًا، مقارنة بـ (1 إلى 2%) لكل سنة من نمو النفط، حيث تضاعفت طاقة الرياح في الولايات المتحدة في سنتين تقريبًا، ويعتقد أنّ موارد لطاقة الرياح تتوافر في ثلاث ولايات فقط، هي تكساس وجنوب داكوتا وشمال داكوتا، وهي كافية لتلبية احتياجات البلد بأكمله من الطاقة، وتقع أكبر مزرعة للرياح في العالم، في واشنطن وأوريغون، على الجسور فوق نهر كولومبيا، وسوف تنتج (300) ميجاواط من الكهرباء في وحدة تكلفة من الطاقة مقارنة بالغاز الطبيعي، ومع ذلك، لاتزال الكثير من موارد طاقة الرياح غير مستغلة، حيث تحرق الصين كميات هائلة من الفحم بتكلفة بيئية مأساوية، تتضمن تعرّض الناس في المدن لخليط من الغازات المميتة والجسيمات، إضافة إلى تعرض المناطق الريفية الصينية للدخان من حرق الفحم في المنازل، ما زاد من خطر سرطان الرئة بمعامل (9) أو أكثر، هذه التكاليف البيئية مستمرة، على الرغم من احتمالية أن تضاعف الصين قدرتها الحالية، عن طريق توليد الكهرباء من الرياح وحدها[49، 57].

تُتخذ طاقة الرياح على محمل الجد، إذ إنها تولد الكهرباء في الولايات المتحدة لملايين عدة من المنازل في الضواحي، على الرغم من أنّ الرياح توفر أقل من (1%) من الطلب العالمي على الكهرباء، ويشير معدل نموها إلى أنها ستكون موردًا رئيسًا للطاقة في المستقبل القريب بصورة نسبية، ويشير سيناريو واحد إلى أنّ طاقة الرياح يمكن أن توفر (10%) من الكهرباء العالمية في العقود القليلة المقبلة، أمّا على المدى البعيد، فيمكن أن توفر طاقة الرياح طاقة أكثر من الطاقة المائية، التي توفر حاليًّا ما يقارب (20%) من الكهرباء في العالم[57]، حيث تُعدّ الولايات المتحدة الرائدة

عالميًّا في إنتاج طاقة الرياح فيما يقارب (20,000 MW)، وهذا يساوي إنتاج قرابة (20) محطة طاقة نووية أو أحفورية كبيرة.

الوقود الحيوي Biofuels

هو الاسم الجديد لأقدم وقود استخدمه الإنسان، فقد أحرق أسلافنا من العصر الحديث الأقرب الخشب للحصول على الدفء ولطهي الطعام، إذ إنّ مصادر طاقة الوقود الحيوي هي مواد عضوية، مثل المواد النباتية والمخلفات الحيوانية، فالوقود الحيوي هو المادة العضوية التي يمكن حرقها مباشرة أو تحويلها إلى صورة أكثر ملاءمة ثمّ حرقها، على سبيل المثال: نستطيع حرق الخشب في موقد أو تحويله إلى فحم، ومن ثم حرقه.

قدمت الكتلة الحيوية مصدرًا رئيسًا من الطاقة للبشر خلال معظم تاريخ الحضارة، فعندما أزيلت الغابات في شمال أمريكا بقصد الزراعة، استخدمت تقنية تعرف باسم التحزيم، الذي يتضمن التقطيع خلال اللحاء على طول الطريق حول قاعدة الشجرة، حيث تحرق مستعمرات الغابات بعد أن يقتل التحزيم الشجرة لإعداد الأرض للزراعة.

الحطب هو الوقود الحيوي الأكثر شهرة والأكثر استخدامًا، ولكن هناك كثير من أنواع وقود الكتلة الحيوية، ففي الهند وبلاد أخرى يُحرق روث الماشيه لأغراض الطهي، والخُث صورة من صور النباتات الميتة المضغوطة، التي توفر الحرارة ووقود الطهي في الدول الشمالية مثل أسكتلندا، حيث إنه متوافر بكثرة.

يستخدم أكثر من مليار شخص في العالم اليوم الخشب بوصفه مصدرًا رئيسًا للطاقة في التدفئة والطهي، إذ يمكن توليد الطاقة من الكتلة الحيوية مباشرة عن طريق حرق الوقود الحيوي لإنتاج الكهرباء، أو عن طريق التقطير، أو معالجة الكتلة الحيوية لإنتاج الوقود الحيوي، مثل الإيثانول أوالميثانول أو الميثان[44، 58].

إنّ المصادر الأساسية للوقود الحيوي في شمال أمريكا هي المنتجات الحرجية والمنتجات الزراعية والنفايات الحضرية القابلة للاشتعال، ويمكن هضم السماد من المواشي أو المخلفات العضوية الأخرى عن طريق الكائنات الحية الدقيقة لتشكيل غاز الميثان، وبعد ذلك تحرق لإنتاج الكهرباء، أو أن تستخدم في خلايا الوقود، إذ إنّ استخدام غاز الميثان الحيوي من السماد مفضل جدًّا للسماح بانبعاثاتها في داخل الغلاف الجوي، حيث إنها تسهم في ظاهرة الاحتباس الحراري[58].

9-15 المحافظة والكفاءة والتوليد المشترك للطاقة

CONSERVATION, EFFICIENCY, AND COGENERATION

قررنا في وقت سابق من هذا الفصل، أننا يجب أن نعتاد على العيش مع عدم اليقين فيما يتعلق بتوافر الطاقة وتكلفتها، والآثار البيئية لاستخدامها، أضف إلى ذلك، أنه يمكننا أن نتوقع صدمات خطيرة اجتماعية واقتصادية وسياسية ستظل تحدث باستمرار، وتعطل تدفق الطاقة لأجزاء مختلفة من العالم.

من الصعب التنبؤ بالعرض والطلب على الطاقة؛ لأن الافتراضات الكامنة وراء التوقعات التقنية والاقتصادية والسياسية والاجتماعية تتغير باستمرار، ويجب أن تؤخذ الاختلافات السنوية الكبيرة في استهلاك الطاقة في الحسبان: ذروات استهلاك الطاقة خلال الشتاء، مع الذروة الثانوية التي تحدث في الصيف، وقد يتغير هذا النمط؛ بسبب التغيرات المستقبلية في عدد السكان أو تدابير المحافظة (ترشيد الاستهلاك) المكثفة، أو بسبب تصميم أفضل للمباني، ومن الممكن أيضًا تغير نمط الاستخدام الحالي للطاقة، بالاعتماد الأكثر على الطاقة الشمسية.

نُفّذ تحرك قوي لتغيير أنماط استهلاك الطاقة من خلال تدابير، مثل ترشيد الاستهلاك، وزيادة الكفاءة، والتوليد المشترك للطاقة، حيث تشير المحافظة على الطاقة إلى الاعتدال في الطلب عليها في الولايات المتحدة، وهذا يعني بصورة عملية ضبط استخدام الطاقة؛ لتقليل نفقات الطاقة الضرورية لإنجاز مهمة معينة إذ تستلزم الكفاءة تصميم واستخدام المعدات التي يمكن أن تنتج مزيدًا من الطاقة، وتهدر كمية أقل منها[59]، ومما يجدر ذكره، أنّ توليد الطاقة المشتركة يشير إلى عدد العمليات التي تلتقط بعض الحرارة المهدورة الناتجة وتستخدمها عن طريق توليد الطاقة والعمليات الصناعية، فضلًا على إطلاق انبعاثاتها البسيطة إلى الغلاف الجوي أو إلى الماء، وتسبب التلوث الحراري[60].

ومن الجدير بالذكر أنّ المفاهيم الثلاثة (المحافظة وزيادة الكفاءة وتوليد الطاقة المشتركة) مترابطة، فعلى سبيل المثال: عندما تُنتَج الكهرباء في محطات طاقة حرق الفحم الكبيرة، فإن كميات عظيمة من الحرارة قد تنبعث إلى الغلاف الجوي، وعادة ما تستخدم ثلاث وحدات لحرق الوقود في إنتاج وحدة واحدة من الكهرباء، حيث يبلغ فقدان الطاقة قرابة (67%)، إذ إنّ استخدام «وحدة الوقود» هو إجراء عشوائي، فيمكن على سبيل المثال، أن يكون برميل النفط أو طنًّا من الفحم، ويشتمل التوليد المشترك للطاقة على إعادة تدوير هذه النفايات الحرارية؛ ولذلك نستطيع زيادة كفاءة محطة طاقة تقليدية من (33%) لتصل إلى (75%)، وبعبارة أخرى، فإن توليد الطاقة المشتركة يقلل من فقدان الطاقة من (67%) إلى أقل من (25%).

10-15 سياسة الطاقة بالنسبة إلى المستقبل

ENERGY POLICY FOR THE FUTURE

لاتزال سياسة الطاقة اليوم على مفترق الطرق، ويؤدي طريق واحد إلى العثور على كميات أكبر من أي وقت مضى من الوقود الأحفوري، وبناء محطات طاقة مركزية أكبر، حيث يعني اتباع هذا الطريق مواصلة «الأعمال كالمعتاد»، وهذا هو النهج الأكثر راحة؛ فهي لا تحتاج إلى تفكير جديد أو مراجعة الظروف السياسية أو الاقتصادية أو الاجتماعية، إضافة إلى أنها تشمل توقعًا قليلًا لنضوب لا مفر منه في موارد الوقود الأحفوري.

يجادل المؤيدون لمسار الأعمال كالمعتاد، بأنّ المشكلات البيئية وقعت في بعض البلدان؛ لأن الناس اضطروا إلى استخدام الموارد المحلية، مثل الخشب للطاقة، بدلًا من الحفاظ على الأرض والسيطرة على تآكل التربة، ويعتقد داعمو العمل الشاق على المسار المعتاد، أنّ طريقة حل هذه المشكلات هي توفير أشخاص مع الطاقة الرخيصة التي تستخدم تصنيعًا أكثر كثافة وأكثر تكنولوجيا، ومن ناحية أخرى، يجب على الولايات المتحدة

وبلدان أخرى تزخر بموارد ضخمة من الفحم أو البترول، استغلال هذه الموارد لمنع التراجع البيئي فيها، ويؤكد مؤيدو هذه الرؤية، أنّ السماح بحرّية صناعة الطاقة لتطوير الموارد المتاحة يضمن توافر إمدادات ثابتة من الطاقة، وضررًا بيئيًّا كليًّا، أقل ممّا إذا قامت الحكومة بتنظيم صناعة الطاقة، ويشيرون إلى أنّ الزيادة الحالية في حرق الحطب عبر الولايات المتحدة بوصفه مؤشرًا مبكرًا لآثار السيطرة الحكومية القوية على إمدادات الطاقة، حيث يتذرعون بأنه سيكون للاستنزاف النهائي لموارد الغابات تأثير ضار على البيئة، كما حدث في الكثير من الدول الأخرى، إذ يشير مسار الأعمال إلى الهيمنة على تخطيط الطاقة في الولايات المتحدة كالمعتاد، إلّا أنّ هناك إشارات على أنّ سياسة الطاقة متغيرة.

أموري لوفينز واحد من أبطال التغيير في سياسة الطاقة، ويجادل من أجل بدائل الطاقة المتجددة والمرنة واللامركزية والمعتدلة بيئيًّا[61]، ويبدو أننا نتحرك الآن ببطء من منهج الأعمال كالمعتاد في سياسة الطاقة في الولايات المتحدة إلى الإستراتيجيات التي تحقق الآتي: زيادة كفاءة الطاقة، وزيادة مصادر الطاقة البديلة، أو للتحول من الفحم إلى مصادر الطاقة الأخرى، أو التقليل بصورة كبيرة من العواقب البيئية الناتجة عن حرق الفحم، وتقلّل من اعتمادنا على النفط الأجنبي (لم تحسم الطريقة لعمل هذا بعد؛ وربما ستشتمل على استخدام الكثير من الوقود الحيوي وغاز الميثان والطاقة النووية).

تستهلك الولايات المتحدة اليوم (100 EJ) جول سنويًّا تقريبًا من الطاقة، وتشير التوقعات إلى أنّ استهلاك الولايات المتحدة من الطاقة عام 2050م سيكون قرابة (160 EJ) جول، والأسئلة المهمّة هي: ماذا سيكون مصدر النمو المتوقع في استهلاك الطاقة؟ هل سنتبع السياسة الماضية والأعمال كالمعتاد (الفحم، النفط، الطاقة النووية)؟ أو هل سنتحول إلى مصادر الطاقة البديلة (الرياح، الطاقة الشمسية، الحرارة الأرضية)؟ ولعل ما يبدو بصورة مؤكدة، أنّ مصادر الطاقة لدينا ستكون أكثر تنوعًا في المستقبل مما هي عليه اليوم[62، 63].

سياسة الطاقة المستدامة
Sustainable Energy Policy

التخطيط للطاقة في المستقبل معقد؛ حيث إنّ حرق الوقود الأحفوري يضعف البيئة العالمية، ويأتي البحث عن مسار جديد للطاقة بسبب[62، 64]:

(1) اقتراب عصر النفط الرخيص من النهاية، هذا هو الواقع، سواء حدث ذلك هذا العام أو بعد (20) سنة من الآن. (2) أصبحت الفرص التكنولوجية والاقتصادية مواتية لتنمية الطاقة البديلة والمتجددة واستخدامها أكثر من السابق. (3) سوف يساعد استخدام الوقود الأحفوري على تخفيض الاضمحلال البيئي، عن طريق تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون والملوثات الهوائية وعن طريق زيادة الأمن، وعلى الرغم من توافر فحم كافٍ لآخر مئات عدة من السنين، فالمؤيدون يفضلون استخدام طاقة الفحم المستدامة بوصفها مصدر طاقة انتقاليًّا على المدى القصير، بدلًا من أن تكون مصدرًا للطاقة على المدى الطويل، ويجادل آخرون من أجل الحدّ بصورة كبيرة من استخدام الفحم، واستخدام الغاز الطبيعي بوصفه مصدرًا انتقاليًّا للطاقة على مصادر الطاقة المتجددة، ومن وجهة نظرهم، فإنّ تنمية سياسة الطاقة المستدامة، تعني إيجاد مصادر مفيدة من الطاقة التي يمكن المحافظة عليها، والتي لا تلوّث الغلاف الجوي، ولا تسبّب الاضطرابات المناخية، مثل الاحترار العالمي أو تشكّل خطرًا غير مقبول.

ومن المفترض أن ينطوي التغيير إلى سياسة الطاقة المستدامة الجديدة، على مواصلة استخدام الوقود الأحفوري في صورة ما للنقل، وستظل الطاقة الكهربائية ضرورية لكثير من الأغراض، وهذا يعني استخدام طاقة بديلة أكثر (تتضمن الطاقة النووية)، وتطوير طرق نظيفة لاستخدام الفحم، ويجب أن يكون اتخاذنا مسار طاقة واحدًا قادرًا على توفير الطاقة التي نحتاج إليها للأنشطة الإنسانية، دون تهديد كوكب الأرض، فهذا هو جوهر سياسة الطاقة المستدامة.

ملخّص SUMMARY

زيادة شهية سكان العالم أكثر من أي وقت مضى على الطاقة مذهلة، فقد حان الوقت للسؤال على محمل الجد، عن الحاجة والرغبة في زيادة الطلب على الطاقة الكهربائية والصور الأخرى من الطاقة في المجتمعات الصناعية، ونوعية الحياة لا ترتبط بالضرورة مباشرة بزيادة استهلاك الطاقة، فالوقود الأحفوري–الفحم، والنفط، والغاز– هو أساسًا مخزن للطاقة الشمسية على صورة مادة عضوية، نجت من التدمير عن طريق الأكسدة، وعلى الرغم من أنّ العمليات الجيولوجية المستمرة شكلت هذا الوقود، فهي بطيئة جدًّا لتكون ذات فائدة لنا؛ لذلك يُعدّ الوقود الأحفوري مصدر طاقة غير متجدد، ويجب أن يكون الاختلال البيئي المرتبط بالتنقيب وتنمية هذه الموارد متوازنًا مع الفوائد المكتسبة من الطاقة، وهذا التطور ليس خيارًا أو اقتراحًا، فيمكن أن تساعد ممارسات المحافظة الجيدة، متحدة مع السيطرة على التلوث وإصلاح الأراضي، على التقليل من الاختلال البيئي المرتبط بالوقود الأحفوري.

لا تزال هناك إمدادات ضخمة من الفحم في العالم، تقع (25%) منها في الولايات المتحدة، إذ تحدد درجة الكربون أو محتوى الفحم منه قيمته بوصفه وقودًا، بينما يحدد محتواه من الكبريت مقدار تلوث الغلاف الجوي بأكاسيد الكبريت.

يتوافر النفط والغاز في رسوبيات كبيرة تسمى الحقول، وتقع معظم الحقول بالقرب من حدود الصفيحة التكتونية، وقد تم تعدين حقول النفط على نطاق واسع عن طريق الآبار النفطية، التي تضخ النفط والغاز إلى السطح، ونقترب من الوقت المعروف بذروة النفط متى استخدمنا قرابة النصف من النفط الكلي للأرض، فسوف يقل الإنتاج بعد الذروة، وربما تكون هناك فجوة بين الطلب والإنتاج، وباستثناء اكتشاف كثير من الحقول الرئيسة الجديدة، فسوف يحدث العجز في النفط والغاز في المستقبل، إذ أسفر العجز الوشيك في الضغط إلى تطوير حقول نفط جديدة، بعضها في المناطق البرية الحساسة، مثل المحمية الوطنية للحياة البرية في القطب الشمالي، حيث يمكن استعادة النفط من مواد أرضية تسمّى الصخر الزيتي ورمال القار، ولكن تقنيات تعدينها بيئيًّا واقتصاديًّا لم تُطوّر تطويرًا كاملًا سليمًا. إن احتمالات الاختلال البيئي متوافرة في مراحل تنمية النفط واستخدامه كلها، حيث تشمل الاختلالات انسكاب النفط من الناقلات، وتلوث الهواء من حرق نواتج البترول في السيارات ومحطات الطاقة، وينتج عن احتراق الوقود الأحفوري أيضًا انبعاثات أكسيد الكبريت، المسؤول في جزء منه عن المطر الحمضي.

يُنتج الانشطار النووي كميات هائلة من الحرارة، يمكن أن تستخدم في توليد الكهرباء في محطة الطاقة النووية، وتنتج أيضًا نفايات مشعة يجب التخلص منها بأمان، ويبقى الانشطار مصدرًا مهمًّا للطاقة، إلّا أنّه سوف يكون مستدامًا فقط إذا طُوّرت مفاعلات المولّد، إنّ إمكانية الأخطار البيئية والصحية، وكذلك زيادة تكلفة بناء محطات الطاقة النووية الكبيرة،

تبقى عوامل يتعين النظر فيها، وسنواصل النضال مع مشكلة التخلص من النفايات المشعة، فالقضية العلمية، والاقتصادية، الاجتماعية، والسياسية تشمل إدارة الأخطار. استخدام طاقة الحرارة الأرضية أصبح أكثر انتشارًا في غربي الولايات المتحدة، حيث تدفق الحرارة الطبيعية من الأرض مرتفع نسبيًّا، وعلى الرغم من أنّ الطاقة الكهربائية الناتجة عن حرارة الأرض الباطنية ربما لا تتجاوز (10%) من إجمالي الطاقة الكهربائية المولدة، فمن الممكن أن تكون كبيرة، ولطاقة الحرارة الأرضية ثمن بيئي، فهبوط السطح قد يكون بسبب ارتداد السوائل والحرارة، إضافة إلى الهزات الأرضية، التي قد تكون بسبب حقن مخلفات المياه الساخنة العائدة إلى الأرض.

تعتمد مصادر الطاقة المتجددة على الطاقة الشمسية، ويمكن أن تأخذ صورًا متنوعة، تشمل الأشعة الشمسية المباشرة، والماء، والرياح، والطاقة من الكتلة الحيوية، وتشمل الكتلة الحيوية المعاد تدويرها من المخلفات الحضرية، حيث تستخدم مصادر الطاقة هذه بوجه عام في إنتاج الطاقة الكهربائية؛ ولأنها لن تكون مستنزفة، فمن الممكن الاعتماد عليها على المدى الطويل، وهي تمتلك سمات مختلفة، ولكنها تتسبب عادة في اختلال بيئي قليل، وعلى الرغم من أنّ حرق الكتلة الحيوية لا يلوّث الغلاف الجوي، إلّا أنّ معظم هذه المصادر محلية ومتقطعة، وبعضها لايزال باهظ الإنتاج. إن النمو المستمر وتنمية الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وكذلك تطوير تكنولوجيا وأفكار جديدة، مثل خلايا الوقود، ستصبح أكثر أهمية في المستقبل، ونظرا لأنّ الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، أكثر وفرة، ولا تتضب، ونظيفة، فهي مصدر الطاقة الأسرع نموًّا في العالم، أمّا الطاقة الهيدرومائية، فممّا لاشك فيه أنها مستمرة في أن تكون مصدرًا مهمًّا للكهرباء في المستقبل، إلّا أنّه ليس من المتوقع أن تنمو كثيرًا في الولايات المتحدة؛ بسبب قلة المواقع المحتملة والاعتبارات البيئية.

لايـزال مستقبل الطاقة غير مؤكد، ومن المؤكـد مع ذلك، أننا سنواصل النظر بجديـة أكثر فـي المحافظة علـى كفـاءة الطاقة، وتوليـد الطاقـة المشترك، والأهـداف علـى الأرجح لكفاءتهـا والمحافظة عليها وتوليدهـا المشترك، هي فـي مجال تدفئة المنازل وعمليات التصنيع المختلفة والسيارات، وتساوي هذه المجالات مجتمعة (60%) تقريبًا من إجمالي الطاقة المستخدمة في الولايات المتحـدة اليوم. لانزال عند مفترق الطرق فيما يتعلق بسياسة الطاقة، فالخيار هو بيـن مصـادر الطاقة المركزيـة، والتكنولوجيـا العالية باستخـدام الوقود الأحفـوري، ومصادر الطاقة المتجددة المرنة، ولعـل أفضل مسار يكون بخلط القديم والحديث، وضمان العقلانية، والتحول السلس من اعتمادنا على الوقود الأحفوري، إذ إنّ هدفنا هو تطوير خطة تزوّدنا بالطاقة المستدامة التي نحتاج إليها، دون أن تؤذي البيئة أو تعرّض أمننا القومي للخطر.

REFERENCES المراجع

1. **Butti, K., and Perlin, J.** 1980. *The Golden Thread: 2500 years of Solar Architecture and Technology*. Palo Alto, CA: Cheshire Books.
2. **McKibben, B.** 2007. Energizing America. *Sierra* 92:1, 30–38; 112–113.
3. **Alekett, K.** 2006. Oil: A bumpy road ahead. *World Watch* 19:1, 10–12.
4. **Cavanay, R.** 2006. Global oil about to peak? A recurring myth. *World Watch* 19:1, 13–15.
5. **Greb, S. F., et al.** 2006. *Coal and the Environment*. Alexandria, VA: American Geophysical Institute.
6. **Craig, J. R., Vaughan, D. J., and Skinner, B. J.** 1996. *Resources of the Earth*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
7. **Garbini, S., and Schweinfurth, S. P.,** eds. 1986. U.S. Geological Survey Circular 979.
8. **U.S. Environmental Protection Agency.** 1973. *Processes, procedures and methods to control pollution from mining activities*. EPA-430/9-73-001.
9. **Webber, M. E.** 2009. Coal-to-liquids: The good, the bad and the ugly. *Earth* 54(4):44–47.
10. **Berlin Snell, M.** 2007. Can coal be clean? *Sierra* 92:1, 32–33.
11. **Environmental Protection Agency.** 2009. EPAs response to the TVA Kingston Fossil Plant Fly ash release. http://www.epa.gov/region4/kingston. Accessed 3/15/09.
12. **Kesler, S. E.** 1994. *Mineral resources, economics and the environment*. New York: Macmillan.
13. **Vendetti, J.** 2001. Storing coal slurry. *Geotimes* 46(12): 7.
14. **McCabe, P. J., et al.** 1993. *The future of energy gases*. U.S. Geological Survey Circular 1115.
15. **Canadian Centre for Energy.** How is oil formed? http://www.centerforenergy.com. Accessed 3/16/09.
16. **Nuccio, V.** 1997. *Coal-bed methane—An untapped energy resource and an environmental concern*. U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-019-97.
17. **Milici, R. C. and Swezey, C. S.** 2006. Assessment of Appalachian Basin Oil and Gas Resources: Devonian Shale-Middle and Upper Paleozoic Total Petroleum System. *U.S. Geological Survey Open File Report 2006-1237*. Reston, VA.
18. **Suess, E., Bohrmann, G., Greinert, J., and Lauch, E.** 1999. Flammable ice. *Scientific American* 28(5): 76–83.
19. **Dyni, J. R.** 2006. Geology and resources of some world oil-shale deposits. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5294*. Reston, VA.
20. **Kunzig, R.** 2009. The Canadian Oil Boom. *National Geographic* 215:3, 34–59.
21. **British Petroleum Company.** 2008. B. P. Statistical review of world energy.
22. **Youngquist, W.** 1998. Spending our great inheritance. Then what? *Geotimes* 43(7):24–27.
23. **Edwards, J. D.** 1997. Crude oil and alternative energy production forecast for the twenty-first century: The end of the hydrocarbon era. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 81(8):1292–1305.
24. **Krajick, K.** 2001. Long-term data show lingering effects from acid rain. *Science* 292: 195–96.
25. **Jenkins, J., et al.** 2007. *Acid rain in the Adirondacks*. New York, Ithaca: Comstock Publishing Associates.
26. **Finch,W. I.** 2002. Uranium fuel for nuclear energy. U.S. Geological Survey Bulletin 2179-A. Reston, VA.
27. **Brenner, D. J.** 1989. *Radon: Risk and Remedy*. New York: W. H. Freeman.
28. **O'Leary, J.** 1997. A new reactor for a new Europe. Mechanical Engineering Power (supplement) American Society of Mechanical Engineering. Accessed at http://www.memagazine.org.
29. **Energy Information Administration**. 2009. U.S. nuclear reactors. http://www.eia.doe.gov/cneaf/nuclear. Accessed 2/25/09.
30. **MacLeod, G. K.** 1981. Some public health lessons from Three Mile Island: A case study in chaos. *Ambio* 10: 18–23.
31. **Anspaugh, L. R., Catlin, R. J., and Goldman, M.** 1988. The global impact of the Chernobyl reactor accident. *Science* 242:1513–18.
32. **Balter, M.** 1995. Chernobyl's thyroid cancer toll. *Science* 270:1758.
33. **Fletcher, M.** 2000. The last days of Chernobyl. *Times* 2, November 14, 3–5. London.

Open Knowledge

34. **Rauber, P.** 2007. Why not nukes? *Sierra* 92:1, 37.
35. **Anomalous.** 2003. The future of nuclear power. Massachusetts Institute of Technology.
36. **Office of Industry Relations.** 1974. *The nuclear industry, 1974*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.
37. **Fischer, J. N.** 1986. *Hydrologic factors in the selection of shallow land burial for the disposal of low-level radioactive waste*. U.S. Geological Survey Circular 973.
38. **Weart, W. D., Rempe, M. T., and Powers, D. W.** 1998. The waste isolation plant. *Geotimes*, October, 14–19.
39. **U.S. Department of Energy.** 1999. Waste isolation pilot plant, Carlsbad, New Mexico. http://www.wipp.carlsbad.nm.us. Accessed 6/20/01.
40. **Hunt, C. B.** 1983. How safe are nuclear waste sites? *Geotimes* 28(7):21–22.
41. **U.S. Department of Energy.** 1990. *Yucca Mountain project: Technical status report*. DE90015030.
42. **Bredehoeft, J. D., et al.** 1978. *Geologic disposal of high-level radioactive wastes—Earth science perspectives*. U.S. Geological Survey Circular 779.
43. **Duffield, W. A. and Sass, J. H.** 2003. *Geothermal energy—Clean Power from the Earth's Heat*. U.S. Geological Survey Circular 1249.
44. **Wald, M. L.** 2009. The power of renewables. *Scientific American* 300(3), 57–61.
45. **Flavin, C., and Dunn, S.** 1999. Reinventing the energy system. In *State of the world 1999: A Worldwatch Institute report on progress toward a sustainable society*. L. R. Brown and others, eds. New York: W. W. Norton.
46. **Berger, J. J.** 2000. *Beating the Heat*. Berkeley, CA: Berkeley Hills Books.
47. **Miller, E. W.** 1993. *Energy and American society. A Reference Handbook*. Santa Barbara, CA: ABC-CLIO.
48. **Mayur, R., and Daviss, B.** 1998. The technology of hope. *The Futurist*, October, 46–51.
49. **Brown, L. R.** 1999. Crossing the threshold. *Worldwatch*, March–April, 12–22.
50. **Quinn, R.** 1997. Sunlight brightens our energy future. *The World and I*, March, 156–63.
51. **Hunt, S. C., Sawin, J. L., and Stair, P.** 2006. *Cultivating renewable alternatives to oil. State of the World 2006*. W. Stark, ed. New York: W. W. Norton. 61–77.
52. **Seth, D.** 2001. *Hydrogen futures: Toward a sustainable energy system*. Worldwatch Paper 157. Washington, DC: Worldwatch Institute.
53. **Kartha, S., and Grimes, P.** 1994. Fuel cells: energy conversion for the next century. *Physics Today* 47:54–61.
54. **Haggin, J.** 1995. Fuel-cell development reaches demonstration stage. *Chemical & Engineering News* 73:28–30.
55. **Alward, R., Eisenbart, S., and Volkman, J.** 1979. *Micro-hydro power: Reviewing an old concept*. Washington, DC: U.S. Department of Energy, National Center for Appropriate Technology.
56. **Zich, R.** 1997. China's Three Gorges: Before the flood. *National Geographic* 192(3):2–33.
57. **Flavin, C.** 1999. The bull market in energy. *Worldwatch*, March–April, 24–27.
58. **Cuellar, A. D. and Webber, M. E.** 2008. Cow power: the energy and emissions benefits of converting manure to biogas. *Environmental Research Letters* 3(034002), 1–8.
59. **Miller, P.** 2009. Saving energy. *National Geography* 215:3, 60–81.
60. **Lindley, D. 2009**. The energy should always work twice. *Nature* 458:7235, 138–141.
61. **Lovins, A. B.** 1979. *Soft energy paths: Towards a durable peace*. New York: Harper & Row.
62. **Duval, J.** 2007. The fix. *Sierra* 92:1, 40–41.
63. **Flafin, C.** 2008. Low-carbon energy: a roadmap. *Worldwatch report 178*. Worldwatch Institute. Washington DC.
64. **Sorkhabi, R.** 2008. What drives oil and gasoline prices? *Earth* 53(11), 36–43.

المصطلحات المفتاحية KEY TERMS

ذروة النفط (peak oil)، (ص 431)
سياسة الطاقة المستدامة (sustainable energy policy)، (ص 470)
طاقة المد والجزر (tidal power)، (ص 465)
طاقة المياه (water power)، (ص 465)
طاقة الرياح (wind power)، (ص 466)
الكفاءة (efficiency)، (ص 469)
الوقود الأحفوري (fossil fuels)، (ص 434)
خلية الوقود (fuel cell)، (ص 465)
طاقة الحرارة الأرضية (geothermal energy)، (ص 459)
الغاز الطبيعي (natural gas)، (ص 440)
الطاقة النووية (nuclear energy)، (ص 452)
النفط (oil)، (ص 440)
المطر الحمضي (acid rain)، (ص 449)
الطاقة البديلة (alternative energy)، (ص 463)
الوقود الحيوي (biofuel)، (ص 468)
الفحم (coal)، (ص 436)
طبقة غاز الميثان–الفحم (coal-bed methan)، (ص 443)
توليد الطاقة المشترك (cogeneration)، (ص 469)
الحفظ (preservation)، (ص 469)

بعض الأسئلة للتفكير SOME QUESTIONS TO THINK ABOUT

1. عندما بدأنا باستخدام الوقود الأحفوري، وبخاصة النفط، لم نكن نعلم الآثار البيئية المحتملة لتنمية النفط وحرقه، ولم نشعر بالقلق حيال ذلك. افترض أنه كان علينا في ذلك الوقت الانتهاء من تقرير الأثر البيئي فيما يتعلق باستخدام النفط، والتمكن من التنبؤ بالعواقب، مثل تلوّث الهواء، والسمّية، والمطر الحمضي. هل تعتقد أننا كنا سنطوّر استخدام النفط بالسرعة نفسها التي فعلناها، وصرنا نعتمد عليها؟ برر إجابتك.

2. هل تعتقد أنّ ذروة النفط سوف تكون لحظة حاسمة في تاريخ البشرية؟ لماذا؟ ولماذا لا؟

3. تعني تنمية الطاقة المستدامة تطوير سياسة الطاقة ومصادرها، التي ستوفر احتياجات المجتمع من الطاقة دون إيذاء البيئة. هل تعتقد أنّ هذا أمر ممكن؟ ضع الخطوط العريضة لخطة عمل لنقل الولايات المتحدة إلى تنمية الطاقة المستدامة.

4. هل تعتقد أنّ القرار بعدم التخلص من النفايات النووية ذات المستوى المرتفع في جبل يوكا كان قرارًا حكيمًا؟ لماذا؟ لماذا لا؟

Online Khan Academy