الترسيب الحمضي

الفصل الثاني من كتاب

الجغرافيا التطبيقية : المبادئ والممارسة

أ. م. مانيون

ترجمة بتصرف

أ.د. مضر خليل عمر

مقدمة

يشمل الترسيب جميع أشكال الماء الصلبة والسائلة التي تترسب على سطح الأرض من الغلاف الجوي . ويشمل المطر والثلج والبرد والندى والثلج الممطر . جميع أشكال الترسيب حمضية طالما أن الرقم الهيدروجيني لها أقل من 7؛ وبشكل عام ، فإن الرقم الهيدروجيني للترسيب غير المتأثر بالنشاط البشري يبلغ 5.6 . وتنتج هذه الحالة الحمضية الطبيعية للترسيب عن اتحاد الماء وثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي لإنتاج حمض الكربونيك . ومع ذلك ، فإن مصطلح الترسيب الحمضي ، أو المطر الحمضي ، يُطلق عادةً على الترسيب الذي يتميز بدرجة حموضة أقل من 5.1 (إلسورث 1984) والذي يحتوي على أحماض الكبريتيك والنيتروز.

تُشتق هذه الأحماض من مصادر مختلفة ، من أهمها الوقود الأحفوري . تم التعرف على ظاهرة هطول الأمطار الحمضية لأول مرة من قبل روبرت أنجوس سميث ، وهو كيميائي اسكتلندي ، في عام 1852 بعد إجراء مسح لتلوث الهواء في مانشستر . صاغ سميث مصطلح "المطر الحمضي" ، الذي ربطه بانبعاثات ثاني أكسيد الكبريت من الوقود الأحفوري المحروق في المصانع المحلية . لاحظ العديد من المراقبين لاحقًا تأثير هطول الأمطار الحمضية على النظم البيئية المائية والبرية . على سبيل المثال ، لاحظ جورهام (1958) أن التركيب الكيميائي لبحيرات المرتفعات في منطقة البحيرات الإنجليزية قد تأثر بترسيب الأمطار الحمضية من الكتل الهوائية التي مرت فوق قلب الصناعة البريطانية .

على الرغم من هذا الاعتراف بتأثيره ، لم يظهر هطول الأمطار الحمضية كقضية بيئية رئيسية حتى أواخر الستينيات . بحلول هذا الوقت ، أصبح علماء البيئة الإسكندنافيون قلقين بشأن انخفاض مخزون الأسماك ؛ كما بدأوا يدركون النقل العابر للحدود للترسيب الحمضي ، أي تصدير الترسيب الحمضي من مناطق المصدر مثل المناطق الصناعية في أوروبا والمملكة المتحدة ونقله إلى مناطق بعيدة مثل الدول الإسكندنافية وترسيبه فيها . في هذا السياق ، أصبح الترسيب الحمضي قضية سياسية وبيئية . لم يكن الملوثون راغبين في إدراك ذلك ، وطالب الملوثون باتخاذ تدابير تخفيفية . يتجلى تأثير الترسيب الحمضي بطرق عديدة . قد تتأثر النظم البيئية الأرضية والمائية سلبًا من خلال انخفاض درجة الحموضة ، مما يؤثر سلبًا على الكائنات الحية وجودة المياه ؛ وقد تتضرر صحة الإنسان وقد تتآكل مواد البناء .

تُطبق الآن تدابير متفق عليها دوليًا للحد من الترسيب الحمضي في أوروبا وأمريكا الشمالية ، حيث تشتد المشكلة . أُنشئت أولى هذه الاتفاقيات عام ١٩٧٩. وكانت اتفاقية التلوث الجوي بعيد المدى عبر الحدود (CLRTAP) ، وهو بروتوكول اعتُمد عام ١٩٨٥، وأصبح يُعرف باسم "نادي الـ ٣٠٪" نظرًا للاتفاق بين أعضائه الخمسة والثلاثين على خفض انبعاثات الكبريت بنسبة ٣٠٪ عن مستويات عام ١٩٨٠ بحلول عام ١٩٩٣. رفضت بريطانيا وبولندا وإسبانيا والولايات المتحدة الأمريكية الانضمام إلى الاتفاقية ، على الرغم

من أنها نجحت جميعًا في النهاية في خفض انبعاثات الكبريت إلى حد ما . وُقع بروتوكول آخر عام ١٩٩٤ في أوسلو لتكييف الأهداف مع الملوثين بدلًا من إعادة تأكيد الأهداف العامة.

اقتصرت التدابير المذكورة أعلاه على نصف الكرة الشمالي ، حيث كان تأثير الترسيب الحمضي أشد وأوسع نطاقًا . وبحلول عام ١٧٥٠ تقريبًا ، كان التصنيع وحرق الوقود الأحفوري على نطاق واسع يحدثان ، مما أدى إلى انبعاثات غير منضبطة لأحماض الكبريتيك والنيتروز لما يقرب من ٢٥٠ عامًا . وكان التأثير شديدًا بشكل خاص في مناطق الصخور القاعدية الحمضية (مثل الجرانيت) التي تستقبل كتلًا هوائية من المناطق الصناعية . وفي حين أن التدابير الرامية إلى الحد من الترسيب الحمضي قد سهلت تعافي النظام البيئي بدرجة ما في أجزاء من المنطقة المعتدلة في نصف الكرة الشمالي ، فإن المشكلة تنتشر الآن إلى المناطق الاستوائية مع تحول الدول النامية إلى التصنيع ، وخاصة في جنوب شرق آسيا والصين . وبالتالي ، أصبح الترسيب الحمضي قضية بيئية عالمية الأبعاد بسرعة.

طبيعة المشكلة

كيمياء الترسيب الحمضي

يحدث الترسيب الحمضي عندما تتحد أكاسيد الكبريت والنيتروجين مع الماء في الغلاف الجوي لتوليد أحماض الكبريتيك والنيتريك والنيتروز، كما هو موضح في الشكل 3.1. على الرغم من أن كميات صغيرة من هذه الغازات تُنتج بشكل طبيعي من خلال الانفجارات البركانية ، وهي تدفقات ضمن الدورات الجيوكيميائية الطبيعية للنيتروجين والكبريت (الشكل 3.2) ، إلا أن النشاط البشري ، ولا سيما احتراق الوقود الأحفوري ، قد خلق تدفقات جديدة بين الغلاف الصخري والغلاف الجوي . وكما يوضح الشكل 3.2، كان التأثير البشري على هذه الدورات الجيوكيميائية كبيرًا (ينظر المناقشة في مانيون 1997؛ 1998).

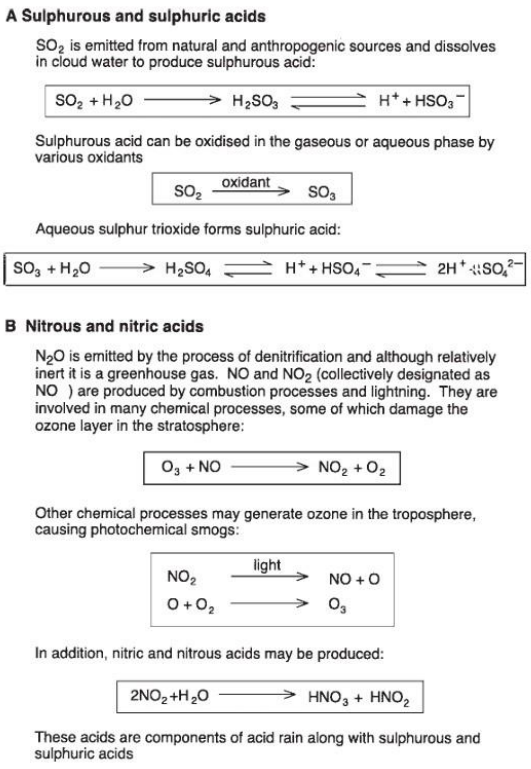
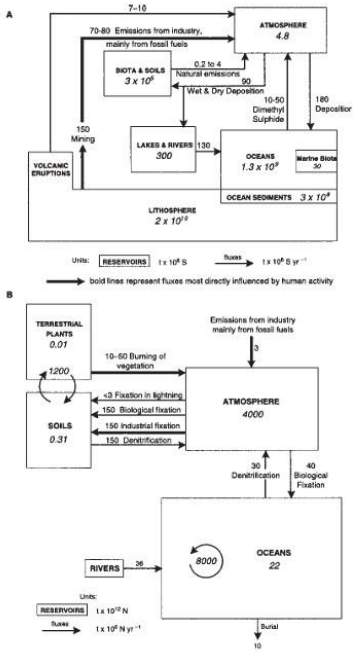


Figure 3.1 The formation (simplified) of the major components of acid rain in the troposphere.

Source: Mannion 1997.

Figure 3.2 The major reservoirs and fluxes in the global biogeochemical cycle of (A) sulphur and (B) nitrogen.

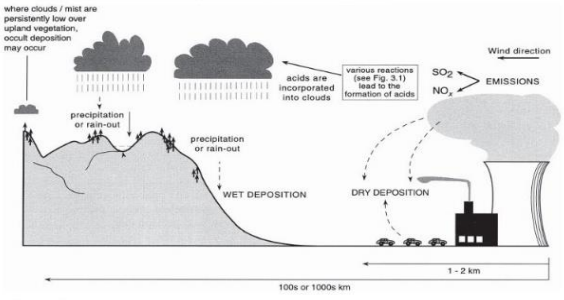


Sources: Based on (A) Charlson *et al.* (1992) and Schlesinger (1997); (B) Jaffe (1992) and Schlesinger (1997).

على سبيل المثال ، يتدفق احتراق الوقود الأحفوري ما بين 70 و 80 تيراغرام سنويًا من الكبريت من الغلاف الصخري إلى الغلاف الجوي ، وهو ما يعادل عشرة أضعاف التدفق البركاني . يُسرّع حرق الكتلة الحيوية أيضًا تدفق كلٍّ من الكبريت والنيتروجين من الغلاف الحيوي إلى الغلاف الجوي . فبمجرد تشكلها في طبقة التروبوسفير (الغلاف الجوي السفلي) ، تندمج الأحماض في السحب ، ويمكن أن تُنتج درجة حموضة منخفضة تصل إلى 2.6. ويمكن أن يكون لهذا تأثير كبير على النظم البيئية في المرتفعات العالية التي تشهد غطاءً سحابيًا منخفضًا أو ضبابًا لفترات طويلة نسبيًا . ويُعرف هذا بالترسيب الخفي .

بالإضافة إلى ذلك ، فإن جر الأحماض داخل السحب والكتل الهوائية يعني إمكانية نقلها مئات الكيلومترات خارج موقع إنتاجها الأولي بواسطة الرياح السائدة قبل ترسبها . ويُعد كلٌّ من هذا الترسيب والترسيب الخفي شكلين من الترسيب الرطب (الشكل 3.3). وكبديل ، قد يحدث الترسيب الجاف لأكاسيد الكبريت والنيتروجين على شكل غازات أو هباء جوي أو جسيمات . يُعرف هذا بالترسيب الجاف (انظر الشكل 3.3) ويحدث عادةً بالقرب من مصدر إنتاج أكسيد النيتروز وأكسيد الكبريت .

Figure 3.3 The processes involved in the formation and deposition of acid pollution.



Source: Based on Mannion 1997.

لكل من الترسيب الرطب والجاف تأثير بيئي، يعتمد حجمه على قدرة البيئة على معادلة ، أو تخفيف ، الترسيب الحمضي . على سبيل المثال ، في مناطق الصخور القاعدية القلوية مثل الحجر الجيري أو الطباشير، تتمتع التربة بدرجة حموضة عالية نسبيًا ، عادةً ما بين 6 و7.5 ، وقدرة عالية على تبادل الكاتيون . ولديها القدرة على معادلة الترسيب الحمضي نظرًا لوجود مواد مثل كربونات الكالسيوم وكربونات المغنيسيوم . وبالمثل، فإن البحيرات والأنهار... الشكل 3.2 الخزانات والتدفقات الرئيسية في الدورة الجيوكيميائية العالمية لـ (أ) الكبريت و(ب) النيتروجين.

في مناطق الصخر القاعدي القلوي ، تكون أقل عرضة للتحمض بسبب وجود أنيونات البيكربونات (HCO3-). أما مناطق الصخر القاعدي الحمضي ، مثل الجرانيت أو تلك ذات التربة الحمضية ، والخث ، والبحيرات ، فهي أكثر عرضة لمزيد من التحمض بسبب ضعف أو انعدام قدرة التخزين المؤقت . ونتيجة لذلك ، تتراكم أيونات الهيدروجين (H+) في النظام ، بينما تتحد أنيونات الكبريتات والنترات (SO42- وNO3-) بحرية مع الكاتيونات مثل الصوديوم والبوتاسيوم لتكوين ينتج مركبات يسهل غسلها أو ترشيحها من النظام . مع مرور الوقت ، تُفقَر التربة والخث تدريجيًا مع تناقص مخزون الكاتيون .

سيحد نقص العناصر الغذائية من نمو النباتات ، مما يجعل التربة والخث عرضة للتآكل . في البحيرات ، يُقلل تراكم أيونات الهيدروجين من الرقم الهيدروجيني . يمكن أن يكون لهذا آثار مباشرة وغير مباشرة على مخزون الأسماك ؛ حيث تتناقص ألاعداد و الأنواع مع تزايد الحموضة ، مما يُقلل من نجاحها التكاثري . علاوة على ذلك ، قد يحدث نفوق الأسماك عند حدوث طفرات في المياه الحمضية بسبب انفجارات السحب أو ذوبان الثلوج السريع في الشتاء . ترجع الآثار غير المباشرة للترسيب الحمضي إلى تأثيره على جوانب أخرى من الكيمياء البيئية . على وجه الخصوص ، يكون الألومنيوم أكثر قابلية للذوبان عند درجة حموضة منخفضة منه عند درجة حموضة عالية ، وبالتالي ، يُزال من التربة أو الخث إذا كانا يتعرضان لترسيب حمضي .

قد يصل الصرف من هذه الترب في نهاية المطاف إلى أحواض البحيرات ، حيث تؤثر تركيزات الألومنيوم العالية سلبًا على أعداد الأسماك . ويؤدي الجمع بين الرقم الهيدروجيني (pH) في نطاق 5.0-5.5 وتركيزات عالية من الألومنيوم في المياه التي تعاني من نقص الكالسيوم إلى تغيرات فسيولوجية في الأسماك ، وخاصة في الزريعة غير الناضجة ، ويمكن أن يسبب الموت . على سبيل المثال ، عند تركيزات أقل من 100 ميكروغرام/لتر، تضعف قدرة الأسماك على تنظيم محتواها من الملح والماء ، وعند تركيزات أعلى من 100 ميكروغرام/لتر، يتشكل هيدروكسيد الألومنيوم [Al(OH3)] كراسب جيلاتيني على خياشيم الأسماك . وفي النهاية ، يؤدي هذا إلى الموت من خلال ضعف التنفس (ينظر ويلبورن 1994 لمزيد من التفاصيل).

وفقًا لجليك (1993)، لا تعيش الأسماك عند درجة حموضة أقل من 3.5 ؛ لا تتحمل أسماك السلمون درجة حموضة تتراوح بين 3.5 و 4.0، على الرغم من أن أسماك التنش والروش والبايك والفرخ تستطيع البقاء على قيد الحياة ، وحتى عند درجة حموضة تتراوح بين 4.0 و4.5 ، من المرجح أن تتأثر أسماك السلمون البالغة سلبًا ، بينما ستستمر صغارها وبيضها في التدهور عند درجة حموضة تتراوح بين 4.5 و 5.6. هذا النطاق من درجة الحموضة مناسب لأسماك التنش والروش والكارب ، إلخ ، ولكن فقط عند درجة حموضة أعلى من 5 لا توجد آثار سلبية على أعداد الأسماك.

قد يتحد الألومنيوم في مياه البحيرات أيضًا مع الفوسفور لتكوين مركبات كيميائية ، مما يؤدي إلى إزالة الفوسفور بفعالية لامتصاصه بواسطة المنتجون الأساسيون مثل الطحالب . وبالتالي ، تنخفض الإنتاجية الأولية ، وينخفض إنتاجها الثانوي بدوره . في هذا السياق ، يؤثر الترسيب الحمضي على الدورة الجيوكيميائية

الحيوية للألمنيوم . كما يمكن أن يؤثر على دورة النيتروجين ؛ فعندما ينخفض الرقم الهيدروجيني إلى أقل من 5.7 ، يقل نشاط البكتيريا النترتية . وهذا يؤدي إلى تراكم الأمونيا ، التي عادةً ما تتأكسد إلى نترات بواسطة هذه البكتيريا ، في النظام . ويمكن لمجموعات معينة من الطحالب بعد ذلك استخدام الأمونيا في عملية بيوكيميائية معقدة تؤدي إلى تراكم أيونات الهيدروجين الإضافية ، وبالتالي تحمض المركبات . يتمثل التأثير العام للترسيب الحمضي في البيئات الأرضية والمائية في تقليل التنوع البيولوجي . ويحدث ذلك عن طريق تغيير الدورة الجيوكيميائية الحيوية وتوليد بيئة لا تستطيع فيها سوى الأنواع المحبة للأحماض البقاء على قيد الحياة . في كل من البيئات الأرضية والمائية ، قد يكون هناك أيضًا تراكم للمواد العضوية حيث تصبح سلاسل/شبكات الغذاء الرعوية والمحللة أقل نشاطًا مع تضاؤل التنوع.

جغرافية هطول الأمطار الحمضية

تباين هطول الأمطار الحمضية زمنيًا ومكانيًا . فقد بدأ على نطاق واسع في منتصف القرن الثامن عشر مع تكثيف التصنيع وانتشاره عبر بريطانيا وأوروبا . في نصف الكرة الشمالي ، تباين تأثير وتوقيت هطول الأمطار الحمضية وفقًا لقدرة بيئات محددة على التخزين ، بالإضافة إلى موقع الصناعة بالنسبة لاتجاهات الرياح السائدة . وينعكس انتشارها على نطاق واسع على نطاق نصف الكرة الأرضية في سجلات عينات الجليد القطبية . تُظهر عينات الجليد من القطب الشمالي زيادة كبيرة في الحموضة منذ حوالي عام 1800 . بالإضافة إلى ذلك ، كان سجل أكسيد النيتروز في عصور ما قبل الصناعة حوالي ارتفع تركيز الهطول الحمضي من 275 جزءًا من المليار (Raynaud et al. 1993) إلى حوالي 312 جزءًا من المليار في عام 1994 (Houghton et al. 1996)، على الرغم من أن بعض هذه الزيادة يُعزى إلى حرق الكتلة الحيوية واستخدام أسمدة النترات (ينظر Mannion 1998).

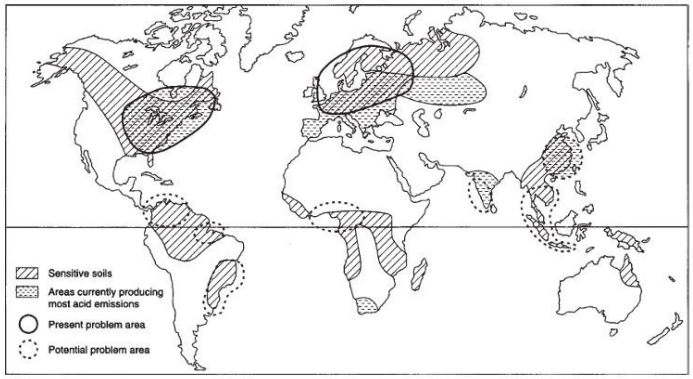
وقد كُشفت جوانب أخرى للأبعاد الزمنية لهطول الأمطار الحمضية من خلال دراسات أجريت على رواسب البحيرات وتربة الخث . يوفر هذا البحث سجلاً لتاريخ التلوث المحلي والإقليمي ، وسيتم تناوله أدناه فيما يتعلق بالمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية . يعتمد التوزيع المكاني لهطول الأمطار الحمضية على أماكن حدوث انبعاثات عالية من غازات النيتروز والكبريت ؛ كما يعتمد التوزيع المكاني لتحمض النظم البيئية على اتجاهات الرياح السائدة وقدرة التربة والصخور الأساسية على امتصاص التلوث في مناطق الترسيب . يقع معظم العالم الصناعي في المنطقة المعتدلة من نصف الكرة الشمالي ، لذا فإن مشاكل هطول الأمطار الحمضية وترسبها هي الأكثر حدة هنا .

والمناطق التي تم تحديدها حتى الآن (الشكل 3.4) على أنها الأكثر حدة هي الدول الاسكندنافية ، وأجزاء من شمال أوروبا وروسيا ، وأجزاء من الصين ، وشمال شرق الولايات المتحدة الأمريكية ، وشرق كندا . وتناقش دراسات الحالة من هذه المناطق أدناه . ويعود ذلك جزئيًا إلى أن هذه المناطق هي نفسها من أكبر المنتجين و/أو المستقبلين لتساقط الأمطار الحمضية . توضح البيانات الواردة في الجدولين 3.1 و3.2 أن أكبر المنتجين لأكاسيد الكبريت والنيتروز هم الولايات المتحدة الأمريكية ، والصين ، وألمانيا ، والاتحاد الروسي . ومع تقدم التصنيع في البلدان النامية ، وزيادة استهلاكها للوقود الأحفوري ، سيصبح هطول الأمطار الحمضية وترسبها مشكلة في المناطق الاستوائية وفي نصف الكرة الجنوبي ، كما هو موضح في الشكل 3.4.

لقد أتى تطبيق تدابير للحد من انبعاثات الكبريت في أوروبا وأمريكا الشمالية عام ١٩٨٥ (نادي الـ ٣٠٪) ببعض الثمار. وكما يوضح الجدول ٣,١، فقد انخفضت انبعاثات الكبريت في العديد من البلدان . ويعزى ذلك جزئيًا إلى استخدام أنواع وقود أقل غنىً بالكبريت، وبرامج كفاءة الطاقة، وتركيب تقنية إزالة

الكبريت في محطات الطاقة . كما تُوجَّه دعوات لاتخاذ تدابير إيجابية مماثلة للحد من انبعاثات غاز النيتروز، على الرغم من أن هذه الانبعاثات قد انخفضت بشكل عام مع انخفاض انبعاثات الكبريت . وستؤدي الاتفاقيات الدولية للحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من خلال برامج كفاءة الطاقة إلى انخفاض انبعاثات الأحماض.

Figure 3.4 Areas currently experiencing problems due to acid precipitation and areas likely to develop problems in the future.



Source: Based on Rodhe and Herrera 1988.

Table 3.1 Emissions of sulphurous gases for selected countries.

A	*Emissions $SO_2 \times 10^3$ tons per year*		
	1980	*1990*	*1995*
Belgium	828	317	253
Bulgaria	2050	2020	1497
Czech Republic	2257	1876	1091
Finland	584	260	96
France	3338	1298	986
Germany (E & W)	7514	5326	2995
Iceland	18	24	24
Italy	3800	1678	1437
Poland	4100	3210	2337
Russia (European)	7161	4460	2983
Spain	3319	2266	2061
UK	4913	3756	2365

B	*Emissions $SO_2 \times 10^3$ tons per year*		
	1975	*1980*	*1987*
Bangladesh	40	57	49
China	10,175	13,372	19,989
India	1652	2010	3074
Indonesia	201	329	485
Japan	2571	1604	1143
Malaysia	193	272	263
Nepal	3.7	4.9	30.9
North Korea	234	271	333
Pakistan	148	198	381
South Korea	1159	1918	1294
Taiwan	609	1036	605
Thailand	224	420	612

Sources: (A) European Monitoring and Evaluation Programme as quoted by Ågren (1997); (B) Quoted in Kato (1996).
Note: Note declines in Europe and increases in Asia.

Table 3.2 Emissions of nitrous gases for selected countries.

A	*Emissions of nitrogen oxides as $NO_2 \times 10^3$ tons per year*		
	1980	*1990*	*1995*
Belgium	442	352	345
Bulgaria	416	376	266
Czech Republic	937	742	412
Finland	295	300	259
France	1823	1585	1666
Germany (E & W)	3334	2640	2210
Iceland	18	20	23
Italy	1480	2047	2157
Poland	1229	1279	1120
Russia (European)	1734	2675	1995
Spain	950	1178	1223
UK	2416	2897	2295

B	*Emissions $NO_2 \times 10^3$ tons per year*		
	1975	*1980*	*1987*
Bangladesh	46	58	66
China	3727	4907	7371
India	1379	1673	2556
Indonesia	331	465	639
Japan	2329	2132	1935
Malaysia	90	126	177
Nepal	18	21	50
North Korea	325	383	468
Pakistan	101	164	231
South Korea	220	365	555
Taiwan	124	225	325
Thailand	182	255	384

Sources: (A) European Monitoring and Evaluation Programme as quoted by Ågren (1997); (B) Quoted in Kato (1996).
Note: Note increases almost everywhere; even where emission controls are in operation as in Europe they do not apply to nitrous gases.

وقد أدى خفض انبعاثات الكبريت إلى انتعاش النظام البيئي في بعض المناطق ، كما هو موضح أدناه . كما أثبت التحسين على المدى القصير نجاحه . ويشمل ذلك استخدام الجير لنظم بيئة البحيرات المُحمَّضة ؛ ومع ذلك، فإن تأثيرها قصير الأجل ، وهو نتاج معالجة الأعراض بدلاً من الأسباب الكامنة . ركزت الأبحاث أيضًا على تحديد المناطق المُعرَّضة للتحمض ؛ وقد أدى ذلك إلى صياغة مفهوم "الحمل الحرج" . وهو مقياس لكمية الترسب الحمضي التي يمكن لنظام بيئي أو بيئة امتصاصها دون التسبب في ضرر. يُمثل الحمل الحرج المفهوم الأساسي لبروتوكول أوسلو المُوقَّع عام ١٩٩٤. وقد تعهَّد الموقعون على خفض الانبعاثات الحمضية بحيث لا تتجاوز الأحمال الحرجة للمناطق المُعرَّضة للخطر . وبالتالي ، يُعد مفهوم الحمل الحرج أداة إدارية ، ويمكن استخدامها لنمذجة التغير البيئي المستقبلي استجابةً لزيادة أو نقصان هطول الأمطار الحمضية .

ومع ذلك ، يعتمد تحديد الحمل الحرج على معلومات حول حجم الترسب الحمضي ، والقدرة التخزينية للتربة ، والصخور الأساسية ، وما إلى ذلك ، ونوع الغطاء النباتي ، وعلم المياه . على سبيل المثال، Arp et al. استخدم (1996) نموذج توازن الكتلة في الحالة المستقرة لحساب أحمال الكبريت والنيتروجين الحرجة في غابات المرتفعات بجنوب أونتاريو، كندا . استخدم هذا النموذج بيانات حول الترسب الجوي الرطب للكاتيونات والأنيونات الرئيسية ، وتوافر النيتروجين والكالسيوم والمغنيسيوم والبوتاسيوم للاستخدام النباتي في مساحات تجذير التربة ، وامتصاص المغذيات واحتباسها في الكتلة الحيوية للغابات ، وتقديرات تجوية التربة ، ومتوسط درجة حرارة الهواء السنوية ، وهطول الأمطار، والتبخر .

يعكس هذا العوامل العديدة المتضمنة في حساب الأحمال الحرجة ، وأهمية محطات الرصد البيئي لتوفير البيانات الأساسية اللازمة . ومن الأمثلة على شبكات الرصد هذه شبكة رصد المياه الحمضية في المملكة المتحدة (AWMN)، التي تأسست عام 1988 (باتريك وآخرون، 1996) . وتتكون من إحدى عشرة بحيرة وإحدى عشرة مجرى مائي في مناطق حساسة للحموضة في المملكة المتحدة . تُرصد الخصائص الكيميائية والبيولوجية لهذه المواقع ، ويمكن استخدامها ، إلى جانب السجل الباليوليمنولوجي لرواسب البحيرة وبيانات شبكة رصد هطول الأمطار في المملكة المتحدة ، لتحديد اتجاهات الحموضة . يمكن أن يُسهم ذلك أيضًا في تحديد الأحمال الحرجة .

تشير البيانات التي تم تحليلها حتى الآن ، لعامي 1988 و1993، إلى عدم وجود اتجاهات إقليمية من حيث زيادة أو نقصان الحموضة . ومن المُسلّم به أيضًا أنه ينبغي إنشاء شبكات رصد في المناطق الصناعية الحديثة . على سبيل المثال ، أفاد ياجيشيتا (1995) أن وكالة البيئة اليابانية تدرس إنشاء مثل هذه الشبكة في شرق آسيا ؛ وهذا يُبرز الحاجة إلى بيانات أساسية قبل حدوث تحمض كبير، ويُؤكد على الطبيعة الدولية والجغرافية للمشكلة .

دراسات الحالة

تحمض البحيرات

تُمثل هذه مشكلة خطيرة في نصف الكرة الشمالي ، وخاصة في مناطق الصخور القاعدية الحمضية ، مثل أجزاء من الدول الاسكندنافية واسكتلندا وجنوب غرب كندا وشمال روسيا وشمال شرق الولايات المتحدة الأمريكية (ينظر الشكل 3.4) . بالإضافة إلى ذلك ، تُوفر العديد من الدراسات التي أُجريت على رواسب البحيرات في هذه المناطق وسيلةً لبناء سجلات التلوث ، والتي ساهمت أيضًا في تحديد أسباب التحمض . وقد تم إجراء الكثير من هذا البحث نُفِّذَ هذا البحث كجزء من مبادرتين رئيسيتين : دراسة التحمض البيئي القديم للبحيرات (PIRLA) في كندا والولايات المتحدة الأمريكية ؛ وبرنامج تحمض المياه السطحية (SWAP) في المملكة المتحدة والنرويج والسويد . وقد كشفت نتائج هذه المشاريع عن درجة وتوقيت التحمض الناتج عن الأنشطة البشرية ، وأظهرت أنه مشكلة خطيرة وواسعة الانتشار.

ويستغل جزء كبير من أبحاث PIRLA وSWAP حساسية أنواع الدياتومات (وهي طحالب وحيدة الخلية تُشكِّل أساس السلاسل الغذائية في العديد من بيئات المياه العذبة والبحرية) لدرجة الحموضة (pH) وانتشارها الواسع في رواسب البحيرات . وتُعرَف درجات تحمل الأنواع المُستخرَجة من رواسب البحيرات لدرجة الحموضة (pH) من دراسات أجريت على نظائرها الحية ؛ وبالتالي ، يُمكن بناء تاريخ تحمض البحيرات بناءً على عمليات إعادة بناء درجة الحموضة المُستدلة من الدياتومات . لم يؤثر التحمض على المُنتِجين الأساسيين مثل الدياتومات فحسب ، بل أثر أيضًا على التركيب النوعي لكائنات حية أخرى على جميع المستويات الغذائية .

بقايا بعض هذه الكائنات ، مثل المتفرعات (حيوانات مجهرية تعيش في المياه العذبة) والطحالب الذهبية (طحالب بلانكتونية ذات غلاف خارجي) وقد استُخدمت أيضًا بيانات تغطية القشور المكونة من السيليكا (قد توجد أيضًا أكياس في الرواسب) لاستنتاج تاريخ تلوث البحيرات ، إلى جانب الجسيمات الكربونية (مثل السخام والفحم) والسجل الطبقي لترسب المعادن الثقيلة (مثل الزنك والنحاس والمنغنيز والحديد). يقدم الجدول 3.3 نتائج العديد من مواقع SWAP و PIRLAالتي تم التحقيق فيها . ويُظهر الجدول أن العديد من البحيرات أصبحت مُحمَّضة بمقدار وحدة pH واحدة على الأقل . ونظرًا لأن الرقم الهيدروجيني يُقاس على

مقياس لوغاريتمي ، فإن انخفاض وحدة pH واحدة يُمثل زيادة قدرها عشرة أضعاف في تركيز أيونات الهيدروجين .

Table 3.3 Examples of changes in the pH of lake waters that have occurred since *c.* 1840 in the UK, Europe and North America

Site	*Location*	*pH change*	*Approx. date of initial pH change*
Loch Enoch	SW Scotland	0.9	1840
Loch Grannoch	SW Scotland	1.2	1925
Loch Dee	SW Scotland	0.5	1890
Round Loch Glenhead	SW Scotland	1.0	1950
Loch Laidon	SW Scotland	0.7	1850
Grosser Arbersee	W Germany	0.8	1965
Kleiner Arbersee	W Germany	0.8	1950
Gårdsjön	Sweden	1.5	1960
Hovvatn	Norway	0.75	1918
Holmvatn	Norway	0.5	1927
Malalajärvi	Finland	1.0	1950
Hirvilampi	Finland	0.7	1950
Big Moose Lake	USA	1.0	1950–60
Woods Lake	USA	0.4	1930s
Ledge Pond	USA	0.6	1880s
Beaver Lake	Canada	0.6	1950s
Lake B	Canada	1.6	1955
Lake CS	Canada	1.0	1955

Note: This is only a selection of the many lakes which are known to have become acidified since *c.* 1840.

في المملكة المتحدة ، كانت بحيرة جرانوك في جنوب غرب اسكتلندا واحدة من أكثر البحيرات تضررًا بانخفاض في الرقم الهيدروجيني بلغ 1.2، على الرغم من أن بحيرة جاردسيون في السويد ، بانخفاض في الرقم الهيدروجيني بلغ 1.5، تأثرت بشكل أكثر حدة . سُجِّل انخفاضٌ مماثلٌ في درجة الحموضة (pH) في شمال شرق الولايات المتحدة الأمريكية وكندا . وقد سمح تقدير عمر رواسب هذه البحيرات بتحديد توقيت التحمض . وكما يوضح الجدول 3.3، فقد تفاوت هذا التوقيت من موقعٍ لآخر . ففي البحيرات الاسكتلندية ، على سبيل المثال ، يعكس تفاوت التوقيت ، إلى حدٍّ ما ، درجةَ التخفيف داخل كل حوض . علاوةً على ذلك ، حدث معظم التحمض قبل أيِّ تشجير، وهو عاملٌ آخر غالبًا ما يرتبط بتحمض المياه العذبة . وقد أُجريت دراساتٌ مماثلةٌ عديدةٌ في أماكن أخرى (مثل النمسا وألمانيا وروسيا) ، وكانت النتائجُ مُشابهةً .

ويرد مثالٌ في الملحق 3.1. حيث انخفضت انبعاثات الغازات الحمضية ، إما بسبب ركود الصناعات الثقيلة أو من خلال ضوابط الانبعاثات ، هناك بعض الأدلة على حدوث تعافٍ للنظام البيئي . على سبيل المثال ، أفاد باتاربي (1994) أن مجتمعات الدياتوم في العديد من البحيرات الاسكتلندية تتغير في تركيبها مع انخفاض الانبعاثات الحمضية ، مما يؤدي بدوره إلى انخفاض حموضة مستجمعات المياه في البحيرات ومياهها . وبالمثل ، في شرق كندا ، أظهر غان وكيلر (1990) أن العديد من البحيرات تتميز المنطقة بتركيزات أقل من الألومنيوم والمعادن الثقيلة والكبريتات ، ودرجة حموضة أعلى مما كانت عليه في سبعينيات القرن الماضي ؛ وفي بعض الحالات ، أُعيد توطين سمك التروت .

علاوة على ذلك، في الأماكن التي أُجري فيها التكسير للبحيرات أو تربة مستجمعات المياه ، يُمكن حدوث تحسن سريع في درجة الحموضة . ويتضح ذلك من خلال عمل بليت ونيوتن (1996) على بحيرة وودز في جبال أديروندك في شمال شرق الولايات المتحدة الأمريكية ، وعمل ديكسيت وآخرون (1996) على بحيرات تروت أورورا في سودبوري ، كندا . في هذه الأخيرة ، تحسنت جودة المياه في بحيرتين لدرجة أنه أُعيد إدخال تروت أورورا في عام 1990 . ومع ذلك ، فإن التكسير ليس سوى حل قصير الأجل لأنه يعالج الأعراض بدلاً من الأسباب الكامنة . ولعل ما يثير القلق بالقدر نفسه فيما يتعلق بمشكلة الترسيب

الحمضي نفسها هو احتمالية حدوث تأثيرات إضافية ناجمة عن الاحتباس الحراري ، كما ناقش رايت وشيندلر (1995) . ويشيران إلى أن الزيادات في درجات الحرارة المتوقعة من خلال نماذج الدوران العام (GCMs) للمنطقة الشمالية قد تؤدي إلى زيادة تمعدن النيتروجين وأكسدة المركبات العضوية، بما في ذلك تلك التي تحتوي على الكبريت .

وبالتالي ، فرغم انخفاض الانبعاثات ، سيستمر التحمض ؛ وستستمر الأحماض الناتجة عن التمعدن في تحريك الألومنيوم . وقد تتضافر عوامل عديدة أيضًا للسماح بنفاذ الإشعاع ، بما في ذلك الأشعة فوق البنفسجية الضارة من النوع B (UV-B) ، إلى أعماق أكبر من المعتاد ، حيث قد يكون لها آثار بيئية ضارة (ينظر المناقشة في شندلر وآخرون، 1996) . بالإضافة إلى ذلك ، أُشير مؤخرًا إلى أن انخفاض إنتاج الغبار، وخاصةً الذي يحتوي على قواعد (مثل كربونات الكالسيوم وكربونات المغنيسيوم) ، قد يُلغي تأثير ضوابط الانبعاثات (هيدين ولايكينز، 1996). ويبدو أن نقص هذه القواعد في الغلاف الجوي ، بسبب التشريعات المتعلقة بجودة الهواء ، يُحتمل أن يُسبب انخفاضًا في التعادل بين المكونات الحمضية والقاعدية . وبالتالي ، فرغم القيود المفروضة على انبعاثات الأحماض ، قد يتفاقم تأثيرها البيئي . تعكس هذه القضايا التفاعل المعقد بين العديد من الدورات الجيوكيميائية وبين أشكال التلوث المختلفة .

تأثير هطول الأمطار الحمضية على النظم البيئية الأرضية:
الغابات وأراضي الخث

يحدث تأثير هطول الأمطار الحمضية على النظم البيئية الأرضية بشكل مباشر وغير مباشر. ويشمل التأثير المباشر ترسبًا رطبًا و/أو جافًا وخفيًا على النباتات ، مما قد يُضعف قدرتها على التمثيل الضوئي ويُسبب فقدانًا للتنوع البيولوجي ، حيث لا تبقى على قيد الحياة سوى الأنواع الأقل حساسية للأحماض . تنتج التأثيرات غير المباشرة عن تأثير الترسيب الحمضي على التربة ، وخاصةً على تركيبها الكيميائي وميكروبيولوجيتها . وعلاوة على ذلك ، وكما ذُكر سابقًا ، فإن أشكالًا أخرى من التلوث ، مثل تراكم الأوزون قد يتفاعل التروبوسفير والاحتباس الحراري مع الترسيب الحمضي مسببين ضررًا بالنظام البيئي .

يزيد ترسب أحماض النيتروز والكبريتوز من محتوى أيونات الهيدروجين في التربة ، ويسبب انخفاضًا في العناصر الغذائية الأساسية للنباتات (ينظر الجزء الثاني) ؛ ومع انخفاض النشاط الميكروبي ، تهيمن الفطريات على نظام المحللات . كما تنخفض أعداد ديدان الأرض وحيوانات التربة الأخرى ، مما يحد من اختلاط التربة وتصريفها وتهويتها . كما يُضعف فقدان القواعد والعناصر الغذائية الأساسية الأخرى نمو النباتات . ويوضح ذلك ليكنز وآخرون (1996) ، الذين رصدوا كيمياء التربة والمياه في النظام البيئي لغابة هوبارد بروك التجريبية ، نيو هامبشاير، الولايات المتحدة الأمريكية ، على مدى سنوات عديدة . وقد حدث انخفاض كبير في إجمالي الكالسيوم والمغنيسيوم في التربة ؛ وقد يُضعف هذا تعافي النظام البيئي مع انخفاض انبعاثات الأحماض .

يُعد انخفاض الكالسيوم والمغنيسيوم في التربة أيضًا سببًا رئيسيًا لتدهور الغابات في شبه جزيرة كولا في روسيا ، حيث يُعدّ مُصهر النيكل المصدر الرئيسي للترسيب الحمضي (كوبتسيك وموكينا، 1995) . قد تكون جميع هذه العوامل ، وربما عوامل أخرى ، مسؤولة عما يُعرف بالتدهور الكبير في صحة الغابات في أوروبا وأماكن أخرى . يُناقش الملحق 3.2 حالة تلف الغابات الأوروبية ، كما تُفصّل دراسة مُفصّلة لتغير الغطاء الحرجي في جمهورية التشيك في أردو وآخرون (1997) . معظم أراضي الخث حمضية بطبيعتها ، وبالتالي لا تُوفّر سوى قدرة ضئيلة على امتصاص الترسيب الحمضي . علاوة على ذلك ، في المناطق النائية

المُجاورة للمناطق الصناعية الكثيفة ، يُمكن أن يكون الضرر البيئي كبيرًا . ويتجلى ذلك في الخث المُغطّى بالغطاء النباتي في جبال بينينز في المملكة المتحدة . وفقًا لمراجعة لي (1998) ، تلقت منطقة أراضي الخث الواقعة بين مانشستر وشيفيلد كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكبريت من هذه المراكز الصناعية الرئيسية خلال القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين (قبل اتخاذ تدابير للسيطرة على انبعاثات الجسيمات في الخمسينيات) . وقد أدى هذا التلوث إلى فقدان التنوع البيولوجي ، ولا سيما لأنواع الطحالب ؛ فهذه الطحالب التي تُشكل المستنقعات معرضة بشكل خاص للملوثات لأنها تعتمد بشكل كبير على الترسب الجوي ...

في الواقع ، يمكن أن تكون المدن شديدة التلوث بشكل خاص بسبب حركة المرور الكثيفة . ويتجلى الضرر، وهو في الواقع شكل من أشكال التجوية ، للمباني والآثار الحضرية المهمة في العديد من المدن الكبرى في العالم . قد تتأثر مواد البناء مثل الرخام والحجر الجيري والحجر الرملي سلبًا ، وكذلك المعادن . جميعها تعاني من التآكل ، مما يشوه تفاصيل التصميم المعماري ، والذي يُعد ترميمه مكلفًا . وفقًا لماكورميك (1997) ، أُزيل حوالي 2.5 سم من حجر بورتلاند في كاتدرائية القديس بولس في لندن ، على الرغم من أن التأثير الميكانيكي للطقس لعب دورًا في ذلك أيضًا . حدثت مشاكل مماثلة في ستوكهولم ، السويد ، حيث شوهت الأضرار القصر الملكي وكنيسة ريدارهولم . يُظهر الحجر الرملي الكالسيت غوتلاند ، وكلاهما بُني في القرن الثامن عشر، أدلة على الانهيار والتحلل . يتخذ هذا شكل سطح متفتت ومفكك، وتكوين الجبس وأملاح أخرى ، وتغير اللون .

هناك أيضًا مخاوف جدية بشأن حالة العديد من المعالم الأثرية القديمة في المراكز الحضرية الحديثة ، كما هو الحال في أثينا ، اليونان ، بما في ذلك البارثينون في الأكروبوليس . بُنيت هذه المعالم من الحجر الجيري ، وبالتالي فهي عُرضة للتحلل ، حيث يُعادل الحجر الجيري القلوي الانبعاثات الحمضية . كما تعرضت المعالم الأثرية القديمة في أماكن أخرى للتشويه بفعل الأمطار الحمضية ، كما أفاد ويلفورد (1996) فيما يتعلق بآثار المايا في أمريكا الوسطى وشبه جزيرة يوكاتان في المكسيك .

مصدر الأمطار الحمضية هو مصافي النفط وآبار النفط غير المغطاة في المنطقة ، بالإضافة إلى مساهمة الحافلات السياحية . لا بد أن تكون التركيزات العالية من ثاني أكسيد الكبريت في العديد من المدن السوفيتية السابقة سببًا في أضرار جسيمة للنسيج الحضري . على سبيل المثال ، أفاد شاهجيدانوفا وبيرت (1994) أن انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت في عام 1988 تجاوزت 1000 طن سنويًا في سبع وعشرين مدينة . في نوريلسك ، في شبه جزيرة تايمير بسيبيريا ، بلغت الانبعاثات حوالي 2.2 × 106 طن ، أي ما يعادل 12.4 طنًا للفرد ؛ والمصدر الرئيسي هو مصاهر النحاس والنيكل التابعة لشركة نوريلسك للتعدين والجمع المعدني.

زادت الأضرار الناجمة عن هطول الأمطار الحمضية على "دير الراهبات" ، وهو جزء من مجمع المايا في أوكسمال ، المكسيك بشكل كبير منذ عام 1970، ولكن لم تسلم البنى الحضرية وصحة الإنسان من هذه المستويات الحادة من التلوث . كما هو الحال في النظم البيئية للبحيرات والأنظمة الأرضية ، يجب أن تشمل التدابير العلاجية تقليل الانبعاثات من خلال زيادة كفاءة الطاقة في المباني وأنظمة النقل ، وتقليل الاعتماد على السيارات .

تأثير الترسيب الحمضي على صحة الإنسان

تُعد جودة الهواء عاملاً مهمًا في صحة الإنسان ، وخاصةً فيما يتعلق بأمراض الجهاز التنفسي . ومع ذلك ، قد يكون للترسيب الحمضي آثار إضافية ، وإن كانت غير مباشرة ، على صحة الإنسان من خلال تأثيره على التربة وموارد المياه . وعلى وجه الخصوص ، قد تكون المعادن الثقيلة... تنطلق هذه المواد من

التربة بسبب الحموضة ؛ وقد تدخل بعد ذلك إلى السلاسل الغذائية المائية لتصل في النهاية إلى البشر . تُعد مشاكل الجهاز التنفسي الناتجة عن سوء جودة الهواء أكثر الأمراض شيوعًا التي يُساهم الترسيب الحمضي في حدوثها . سجّل ماكورميك (1997) عدد الوفيات الناجمة عن الضباب الدخاني الخطير في العالم الصناعي قبل عام 1965؛ ومن بين أسوأها تلك التي وقعت في لندن عامي 1873 و 1880، والتي تسببت مجتمعةً في 2500 حالة وفاة . كانت هذه أحداثًا متطرفة مرتبطة بالتصنيع وقلة الرقابة على جودة الهواء أو انعدامها . كان كبار السن والشباب وأولئك الذين يعانون من أمراض الجهاز التنفسي أكثر عرضة للخطر .

واليوم ، تُعدّ هذه الأحداث سمة مميزة للدول الصناعية الحديثة . علاوة على ذلك ، كانت هذه أحداثًا متطرفة ذات علاقة سببية واضحة . في العالم المتقدم ، قد لا تزال جودة الهواء في المناطق الحضرية رديئة (ينظر مثال نوريلسك، سيبيريا، في القسم السابق) بسبب انبعاثات الغازات بدلًا من الجسيمات . كما يشير ماكورميك ، قد تنشأ مشاكل صحية نتيجة التعرض المنتظم للهواء الذي يتميز بتلوث منخفض المستوى . ورغم أن العلاقة بين تلوث الهواء ومشاكل الجهاز التنفسي لم تُحدد بدقة ، إلا أن الزيادة الهائلة في هذه المشاكل ، وخاصة الربو ، تعكس التأثير الجزئي على الأقل لجودة الهواء ، مع أن عوامل أخرى قد تُسهم أيضًا . ويذكر ماكورميك أن "منظمة الصحة العالمية تُقدر أنه في أوروبا وحدها ، قد تكون المستويات المفرطة من ثاني أكسيد الكبريت مسؤولة عن 6000 إلى 13000 حالة وفاة إضافية سنويًا بين الأشخاص الذين تبلغ أعمارهم 65 عامًا أو أكثر، وتفاقم مشاكل الجهاز التنفسي المزمنة لدى 89000 إلى 203000 شخص، و58000 إلى 99000 حالة إضافية من أمراض الجهاز التنفسي السفلي لدى الأطفال".

وقد ناقش أوسكارسون وآخرون (1996) إمكانية حدوث مشاكل صحية بسبب التأثير غير المباشر لترسب الأحماض . كانوا قلقين بشكل خاص بشأن التأثير المحتمل للعناصر السامة مثل الرصاص والنحاس والزنك والكادميوم وميثيل الزئبق والسيلينيوم . قد تصبح هذه الأخيرة نادرة في ظل الظروف الحمضية ، وتسبب مشاكل صحية بسبب ندرتها ؛ وقد تسبب المعادن الأخرى مشاكل بسبب زيادة حركتها في ظل الظروف الحمضية ، وبالتالي دخولها في السلاسل والشبكات الغذائية بنسب متزايدة . بالإضافة إلى ذلك ، ستؤدي المياه الحمضية إلى زيادة استخراج المعادن مثل الرصاص من السباكة المنزلية . لم يتمكن أوسكارسون وآخرون من إيجاد علاقات واضحة بين المشاكل الصحية الناجمة عن تلوث المعادن والتحمض ، على الرغم من أنهم حددوا عددًا من الروابط المحتملة . ويشيرون إلى أن هوامش الأمان ضئيلة فيما يتعلق بتعرض البشر للمعادن السامة ، وأن الحد من الترسيب الحمضي ضروري قبل أن يتضح الضرر على صحة الإنسان.

الخلاصة

الترسيب الحمضي هو نتاج العصر الصناعي ، ويمثل اضطرابات بشرية المنشأ في دورات الكبريت والنيتروجين . كانت عواقبه بالغة الخطورة لدرجة أنها دفعت إلى إبرام اتفاقيات دولية ، حيث بُذلت جهود أولية متضافرة للحد من انبعاثات غازات النيتروز والكبريت في عام 1985. كانت هذه واحدة من أولى الاتفاقيات الدولية التي تُعالج مشكلة التلوث ، حيث سبقت بروتوكول مونتريال بشأن الأوزون بعامين . تتجلى فعالية بروتوكولات عام 1985 وما بعدها في أجزاء كثيرة من العالم الصناعي مع تحسن جودة مياه البحيرات والجداول . وفي بعض الحالات ، عادت أعداد الأسماك إلى طبيعتها .

على الرغم من هذه التحسينات ، ما يزال هطول الأمطار الحمضية عاملاً هاماً في التغير البيئي في نصف الكرة الشمالي ، ومن الضروري فرض المزيد من القيود على الانبعاثات ، وخاصة انبعاثات النيتروز . علاوة على ذلك ، تنتشر مشكلة الحموضة مع تسارع وتيرة التصنيع في العديد من البلدان النامية . وبالتالي

، من المتوقع أن يصبح هطول الأمطار الحمضية مشكلة عالمية . يُفهم التركيب الكيميائي للترسيب الحمضي من خلال ارتباطه بإنتاجه ، على الرغم من أن تفاعلاته مع المواد العضوية وغير العضوية في التربة والمياه تكون معقدة بمجرد ترسبه . ويؤثر على العديد من الدورات البيوجيوكيميائية الأخرى ، وخاصةً دورات المعادن الثقيلة ، التي قد تُسبب تركيزاتها المرتفعة المزيد من التغيرات في النظام البيئي .

المناطق الأكثر تضررًا هي تلك الواقعة على صخور قاعدية حمضية ، سواءً كانت قريبة من مصادر الانبعاثات أو تستقبل كتلًا هوائية من المراكز الصناعية . البحيرات ، والجداول ، والتربة ، والغابات قد تتضرر جميع النباتات والحيوانات الأخرى بسبب الترسيب الحمضي . كما يتحمل المجتمع مسؤولية الثروة الناتجة عن احتراق الوقود الأحفوري والتصنيع ؛ وقد يتشوه نسيج المراكز الحضرية ، وتزداد المخاطر على صحة الإنسان بسبب سوء جودة الهواء . ولعل الجانب الأكثر إثارة للقلق في الترسيب الحمضي هو تفاعله مع مشاكل بيئية أخرى مثل الاحتباس الحراري ، والتفاعلات والتداعيات غير المعروفة حتى الآن التي ستنجم عن هذه العلاقة . ومرة أخرى ، تتضمن الآليات الأساسية مجموعة من الدورات البيوجيوكيميائية . من يدري إلى أين قد يؤدي كل هذا ؟ يلعب الجغرافيون الفيزيائيون وغيرهم من العلماء التطبيقيين دورًا رئيسيًا في إيجاد إجابات لهذه الأسئلة من خلال أبحاثهم في العمليات البيئية.

الملحق 1

إعادة بناء درجة حموضة البحيرات باستخدام تحليل الدياتومات

1- الدياتومات طحالب وحيدة الخلية، تتواجد بكثرة في معظم البيئات المائية . تُشكل أساس السلاسل / الشبكات الغذائية ، والعديد من أنواعها حساسة بشكل خاص لدرجة حموضة الماء.

2- تتكون الفروستولات ، وهي المكون الهيكلي للدياتومات ، من السيليكا ، وهي مقاومة للتحلل . وبالتالي ، تندمج هذه الفروستولات في رواسب البحيرات عند موت الكائنات الحية . مع تراكم الرواسب ، تُحفظ عينة من تعداد الدياتومات . تعكس التغيرات في التجمعات ، من بين عوامل أخرى ، تغيرات في درجة الحموضة . بناءً على حساسية نظيراتها الحديثة لدرجة الحموضة ، تُوفر الدياتومات الأحفورية وسيلة لإعادة بناء تاريخ درجة حموضة مياه البحيرات .

3- تم إجراء هذا في العديد من البحيرات في المناطق الحساسة للحموضة، وترد بيانات بعضها في الجدول 3.3. يوضح الرسم التوضيحي أدناه إعادة بناء الرقم الهيدروجيني التفصيلي لإحدى تلك البحيرات ، وهي بحيرة راوند أوف جلينهيد (باتاربي وآخرون، 1988):

Table 3.3 Examples of changes in the pH of lake waters that have occurred since *c.* 1840 in the UK, Europe and North America

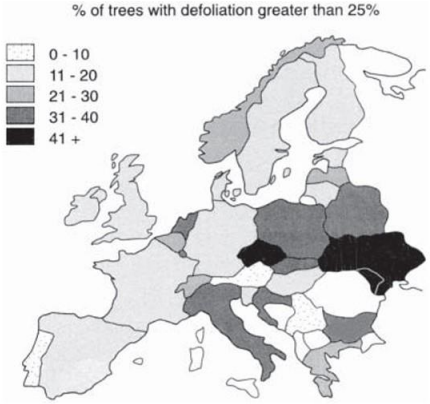
Site	*Location*	*pH change*	*Approx. date of initial pH change*
Loch Enoch	SW Scotland	0.9	1840
Loch Grannoch	SW Scotland	1.2	1925
Loch Dee	SW Scotland	0.5	1890
Round Loch Glenhead	SW Scotland	1.0	1950
Loch Laidon	SW Scotland	0.7	1850
Grosser Arbersee	W Germany	0.8	1965
Kleiner Arbersee	W Germany	0.8	1950
Gårdsjön	Sweden	1.5	1960
Hovvatn	Norway	0.75	1918
Holmvatn	Norway	0.5	1927
Malalajärvi	Finland	1.0	1950
Hirvilampi	Finland	0.7	1950
Big Moose Lake	USA	1.0	1950–60
Woods Lake	USA	0.4	1930s
Ledge Pond	USA	0.6	1880s
Beaver Lake	Canada	0.6	1950s
Lake B	Canada	1.6	1955
Lake CS	Canada	1.0	1955

Note: This is only a selection of the many lakes which are known to have become acidified since *c.* 1840.

الملحق 2

أضرار الغابات في أوروبا

1) يُعد هطول الأمطار الحمضية سببًا رئيسيًا مساهمًا في أضرار الغابات في أوروبا.
2) تشمل العوامل الأخرى الجفاف ، على الرغم من أن حدوث الجفاف قد يكون له تأثير أكبر في المناطق المتضررة بالأحماض ، مثل جنوب بولندا ، منه في المناطق التي يقل فيها هذا الضرر.
3) من المرجح أن يؤثر تأثير هطول الأمطار الحمضية على تربة الغابات على درجة الضرر الذي يلحق بالغابات . قد تُزال الكاتيونات ، وهي مغذيات أساسية مثل المغنيسيوم والكالسيوم ، من النظام البيئي ، بينما قد يكون للمعادن الثقيلة ، التي تترسب أيضًا في الترسبات الحمضية ، تأثير سام.
4) لا يقتصر الضرر على غطاء الغابة فحسب ، بل قد تتغير أيضًا النباتات الأرضية ، مع تحول نحو الأنواع المحبة للحموضة مثل الخلنج .
5) يوضح توزيع أضرار الغابات في أوروبا في الخريطة أدناه . وهذا يوضح أن أكبر ضرر قد حدث في شرق و وسط أوروبا ، مع أقل ضرر في المناطق البحرية الغربية .
6) إمدادات المغذيات ، حيثما تُفقد الأنواع وتصبح أراضي الخث أكثر حمضية ، قد يبدأ التعرية حيث تفقد الأسطح غطائها النباتي الواقي.
7) تأثير الترسيب الحمضي على الأنسجة الحضرية ، وجودة الهواء في المناطق الحضرية ، والمعالم الأثرية ، لا تُميز انبعاثات الأحماض بين البيئات الريفية والحضرية.



Source: Based on Elvingson 1997.