

أسئلة متواترة

أسئلة متواترة

هذه الأسئلة التي يتكرر طرحها استخلصت من الفصول الواردة بالتقرير ذي الصلة، وجرى تجميعها هنا. ولدى الإشارة إلى أسئلة معينة من هذا النوع، يرجى الإشارة إلى الفصل المقابل في التقرير الذي نشأت فيه هذه الأسئلة (مثل السؤال 3.1 جزء من الفصل 3).

أسئلة متواترة

- السؤال 1.1 إذا كان فهم النظام المناخي قد تزايد، فلماذا لم ينخفض نطاق إسقاطات درجات الحرارة؟ 121
- السؤال 2.1 كيف نعرف أن العالم قد تعرض للاحتراق؟ 123
- السؤال 2.2 هل حدثت أية تغييرات في الظواهر المناخية المتطرفة؟ 125
- السؤال 3.1 هل يحدث احتراق للمحيطات؟ 127
- السؤال 3.2 هل تتوافر أدلة على حدوث تغييرات في دورة مياه الأرض؟ 129
- السؤال 3.3 ما هي صلة تمحض المحيطات البشرية المنشأ بتغير المناخ؟ 131
- السؤال 4.1 كيف يتغير الجليد البحري في منطقتي القطب الشمالي والقطب الجنوبي؟ 133
- السؤال 4.2 هل الأنهار الجليدية آخذة في الاختفاء في المناطق الجبلية؟ 135
- السؤال 5.1 هل تمثل الشمس قوة محرك رئيسية للتغيرات الحديثة في المناخ؟ 137
- السؤال 5.2 لماذا معدل التغير الحالي في مستوى سطح البحر غير معتاد؟ 139
- السؤال 6.1 هل يمكن أن يؤدي إطلاق الميثان أو ثاني أكسيد الكربون بسرعة من انصهار التربة الصقيعية أو احتراق المحيطات إلى إحداث زيادة كبيرة في الاحتراق؟ 141
- السؤال 6.2 ماذا يحدث لثاني أكسيد الكربون عقب انبعاثه في الغلاف الجوي؟ 143
- السؤال 7.1 كيف تؤثر السحب في المناخ وتغير المناخ؟ 145
- السؤال 7.2 كيف يؤثر الهباء الجوي في المناخ وتغير المناخ؟ 147
- السؤال 7.3 هل يمكن للهندسة الجيولوجية إبطال تغير المناخ، وما هي الآثار الجانبية التي قد تحدث؟ 149
- السؤال 8.1 ما مدى أهمية بخار الماء لتغير المناخ؟ 153
- السؤال 8.2 هل للتحسينات في جودة الهواء تأثير على تغير المناخ؟ 155
- السؤال 9.1 هل تتحسن النماذج المناخية، وكيف سنعرف ذلك؟ 157
- السؤال 10.1 المناخ يتغير دائماً. كيف نحدد أسباب التغيرات المرصودة؟ 159
- السؤال 10.2 متى تصبح التأثيرات البشرية على المناخ واضحة على النطاقات المحلية؟ 161
- السؤال 11.1 إذا لم تكن قادراً على التنبؤ بالطقس في الشهر القادم، فكيف تستطيع أن تتنبأ بالمناخ في العقد القادم؟ 163
- السؤال 11.2 كيف تؤثر الانفجارات البركانية في المناخ وفي قدرتنا على التنبؤ بالمناخ؟ 165
- السؤال 12.1 لماذا يستخدم هذا العدد الكبير من النماذج والسيناريوهات لوضع إسقاطات تغير المناخ؟ 167
- السؤال 12.2 كيف ستتغير الدورة المائية للأرض؟ 169
- السؤال 12.3 ماذا سيحدث لمناخ المستقبل إذا أوقفنا الانبعاثات اليوم؟ 171
- السؤال 13.1 لماذا يختلف التغير في مستوى سطح البحار الإقليمية عن المتوسط العالمي؟ 173
- السؤال 13.2 هل ستساهم الصفائح الجليدية لغرينلاند والقطب الجنوبي في تغيير مستوى سطح البحر خلال الفترة المتبقية من القرن؟ 175
- السؤال 14.1 كيف يؤثر تغير المناخ في الرياح الموسمية؟ 179
- السؤال 14.2 كيف ترتبط إسقاطات المستقبل للمناخ لإقليمي بإسقاطات المتوسطات العالمية؟ 181

السؤال 1.1 | إذا كان فهم النظام المناخي قد تزايد، فلماذا لم ينخفض نطاق إسقاطات درجات الحرارة؟

تتفق النماذج المستخدمة في كيفية حساب الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ لإسقاطات درجات الحرارة مع اتجاه التغير العالمي في المستقبل إلا أنه لا يمكن التنبؤ على وجه الدقة بالحجم المتوقع لتلك التغيرات. فيمكن لمعدلات انبعاث غازات الاحتباس الحراري أن تتخذ أي مسار من المسارات الكثيرة المحتملة، كما أن بعض العمليات الفيزيائية الأساسية لم تفهم بعد بصورة كاملة، مما يجعل من العسير نمذجتها. ونؤدي أوجه عدم اليقين هذه مقترنة بالتقلبية المناخية الطبيعية من عام لآخر إلى «نطاق من عدم اليقين» في إسقاطات درجات الحرارة.

ولا يمكن إحداث خفض مادي في نطاق عدم اليقين الذي يحيط بانبعاثات غازات الاحتباس الحراري المتوقعة، وانبعاثات سلاسل الهباء الجوي (التي تعتمد على إسقاطات الأحوال الاجتماعية والاقتصادية في المستقبل). ومع ذلك، فإن تحسن الفهم والنماذج المناخية بالإضافة إلى قصور الرصدات - قد تخفض من نطاق عدم اليقين المحيط ببعض العوامل التي تؤثر في استجابة المناخ لتلك التغيرات في الانبعاثات. غير أن تعقيدات النظام المناخي تسببت في تباطؤ هذه العملية (السؤال 1.1، الشكل 1)

وقد أحرز علم المناخ الكثير من أوجه التقدم المهمة منذ تقرير التقييم الأخير الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ وذلك بفضل التحسينات في القياسات وتحليل البيانات في نظم الغلاف الجليدي، والغلاف الجوي، واليابسة، والغلاف الحيوي، والمحيطات. كما أصبح لدى العلماء فهم أفضل وأدوات لنمذجة دور السحب والجليد البحري والهباء الجوي، وامتزاج المحيطات الصغيرة النطاق، ودورة الكربون، وغير ذلك من العمليات. وتعني زيادة عمليات الرصد أنه يمكن الآن تقييم النماذج بقدر أكبر من الدقة، وأنه يمكن تقييد الإسقاطات بصورة أفضل. وعلى سبيل المثال، تزايدت دقة إسقاطات مستوى سطح البحر مع تحسن النماذج وتحليل الرصدات مما أدى إلى تحقيق التوازن في الموازنة الحالية لارتفاع مستوى سطح البحر.

وعلى الرغم من أوجه التقدم هذه، مازال هناك نطاق في الإسقاطات المعقولة للمناخ العالمي والإقليمي في المستقبل - وهو ما يطلق عليه العلماء تعبير «نطاق عدم اليقين». وتتوقف نطاقات عدم اليقين هذه على المتغير قيد النظر (كمية الأمطار مقابل درجة الحرارة، مثلاً) والمدى المكاني والزمني (مثل المتوسطات الإقليمية مقابل المتوسطات العالمية). وتنشأ أوجه عدم اليقين في الإسقاطات المناخية عن التقلبية الطبيعية وعدم اليقين المحيط بمعدل الانبعاثات في المستقبل واستجابة المناخ لها. ويمكن أن تحدث أيضاً لأن طرائق تمثيل بعض العمليات المعروفة لم تصقل بعد، ولعدم إدراج بعض العمليات في النماذج.

وتوجد حدود أساسية لمدى الدقة التي يمكن بها إسقاط درجات الحرارة السنوية بسبب الطبيعة غير المنتظمة للنظام المناخي. وعلاوة على ذلك، فإن الإسقاطات على نطاق العقود معرضة للظروف السائدة - مثل درجة حرارة أعماق المحيطات - غير المعروفة بدرجة جيدة. فبعض التقلبية الطبيعية على مدى العقود تنشأ عن تفاعلات بين المحيط، والغلاف الجوي واليابسة والمجال الحيوي والغلاف الجليدي، كما ترتبط ببعض الظواهر مثل ظاهرة النينو / التذبذب الجنوبي وتذبذب شمال الأطلسي (للإطلاع على تفاصيل أنماط ومعاملات تقلبية المناخ، انظر الإطار 2.5).

كما تسهم الثورات البركانية والتباينات في النواتج الشمسية في التقلبية الطبيعية وإن كانت هذه مدفوعة خارجياً ويمكن تفسيرها. ويمكن أيضاً النظر إلى هذه التقلبية الطبيعية كجزء من «الضوضاء» في سجل المناخ مما يوفر الخلفية التي يمكن في ضوءها رصد «علامات» تغير المناخ البشرية المنشأ.

وللتقلبية الطبيعية تأثير على عدم اليقين على النطاقين الإقليمي والمحلي أكبر من تأثيرها على النطاقات القارية أو العالمية. فهي كامنة في نظام الأرض، ولن تبدد زيادة المعارف أوجه عدم اليقين التي تسببها. غير أن من المحتمل إحراز بعض التقدم - وخاصة في الإسقاطات حتى عدد قليل من السنوات القادمة - التي تستفيد من التقدم الذي يتحقق في المعارف عن الغلاف الجليدي أو حالة المحيطات وعملياتها، مثلاً. وهذا مجال نشط لإجراء البحوث. وعندما يجري توزيع المتغيرات المناخية على نطاق العقود الزمنية أو أطول من ذلك، تتناقص الأهمية النسبية للتقلبية الداخلية مما يؤدي إلى إبراز الإرشادات الطويلة الأجل (السؤال 1.1، الشكل 1). ويتسق هذا البعد الطويل الأجل مع التعريف الشائع عن المناخ بأنه متوسط على امتداد 30 عاماً.

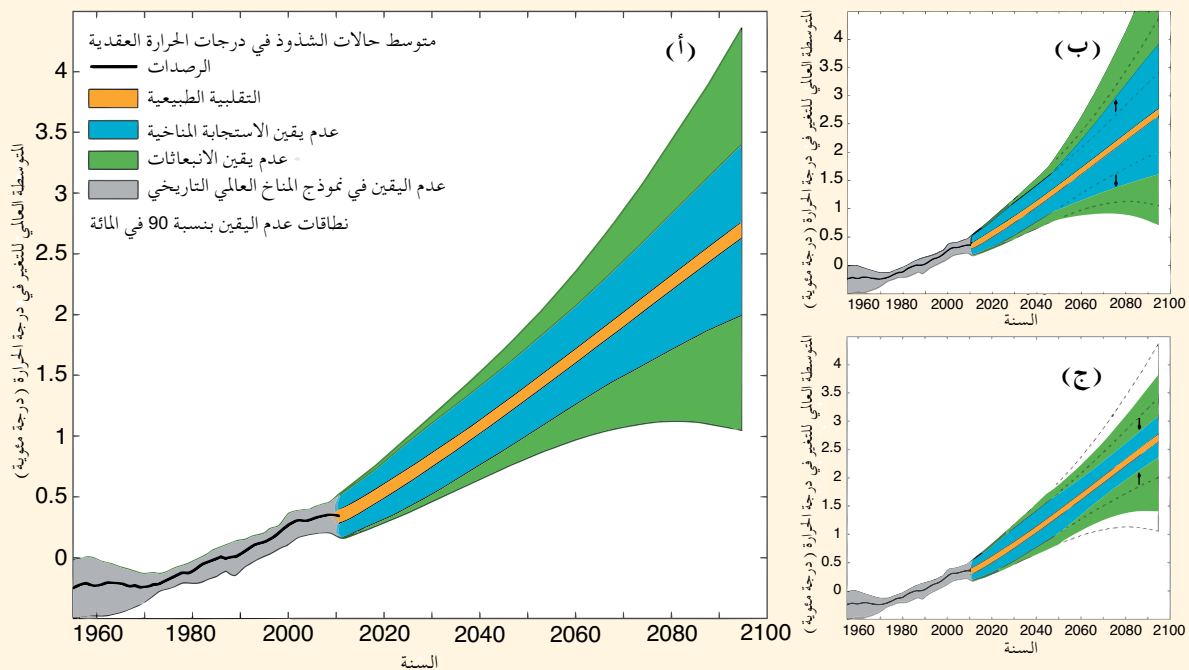
وينشأ مصدر ثان لعدم اليقين من المسارات المحتملة الكثيرة التي قد تتخذها معدلات انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وسلاسل الهباء الجوي، ومن اتجاهات التغير المستقبلية في استخدام الأراضي. ومع ذلك، فإن الإسقاطات المناخية تعتمد على مدخلات من هذه المتغيرات. وللحصول على هذه التقديرات، ينظر العلماء في عدد من السيناريوهات البديلة للمجتمع البشري في المستقبل، من حيث السكان، والتغيرات الاقتصادية والتكنولوجية، والخيارات السياسية. ثم تقدر الانبعاثات المحتملة في إطار كل سيناريو. وتوفر الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ الإستمارة لصنع السياسات، ومن ثم فإن الإسقاطات المناخية لمختلف السيناريوهات المتعلقة بالانبعاثات يمكن أن تفيد في إظهار الانعكاسات المناخية المحتملة لمختلف خيارات السياسات. ويقصد من هذه السيناريوهات أن تكون متوافقة مع النطاق الكامل لسيناريوهات الانبعاثات التي يرد وصف لها في هذه الدراسة العلمية الراهنة التي تتضمن أو لا تتضمن سياسة مناخية. وعلى ذلك فقد صممت لتقديم عينات لعدم اليقين في السيناريوهات في المستقبل.

والإسقاطات للسنوات القليلة القادمة والعقود حساسة لانبعاثات المركبات قصيرة العمر مثل الهباء الجوي والميثان. غير أن الإسقاطات الأكثر بعداً تكون أكثر حساسية للسيناريوهات البديلة المحيطة بالانبعاثات غازات الاحتباس الحراري التي تبقى في الغلاف الجوي لفترة طويلة. ولن تنخفض أوجه عدم اليقين المعتمدة على السيناريوهات بفعل التحسينات في علم المناخ، وستصبح أوجه عدم اليقين هذه السمة الغالبة في الإسقاطات على مدى الفترات الزمنية الأطول (مثل 2100) (السؤال 1.1، الشكل 1).

وتأتي المساهمة النهائية في نطاق عدم اليقين من معرفتنا غير المكتملة عن الكيفية التي سيستجيب بها المناخ للانبعاثات البشرية المنشأ في المستقبل، والتغير في استخدام الأراضي. ويستخدم العلماء بالدرجة الأولى النماذج المناخية العالمية المعتمدة على الحاسوب في تقدير هذه الاستجابة. وقد وضعت مجموعات مختلفة من العلماء في أنحاء العالم بضعة عشرات من النماذج المناخية العالمية. واعتمد في بناء جميع النماذج على نفس المبادئ الفيزيائية إلا أن الأمر يحتاج إلى بعض عمليات التقريب بالنظر إلى أن النظام المناخي يتسم بالتعقيد البالغ. إذ تختار المجموعات المختلفة عمليات تقريب مختلفة بصورة طفيفة لعرض عمليات معينة في الغلاف الجوي مثل السحب. وتنتج هذه الاختيارات الفروق في الإسقاطات المناخية من النماذج المختلفة. ويوصف هذا الإسهام في نطاق عدم اليقين بأنه «عدم يقين الاستجابة» أو «عدم يقين النموذج».

ويعني التعقيد الذي يتسم به نظام الأرض أن مناخ المستقبل قد يتبع الكثير من السيناريوهات المختلفة، إلا أنه يظل متسقاً مع الفهم الحالي والنماذج الحالية. ومع استطلاعة سجلات الرصد، وتحسن النماذج، سيتمكن الباحثون، في حدود قيود نطاق التقلبية الطبيعية، من تضيق ذلك النطاق القائم في درجة الحرارة المحتملة في العقود القليلة القادمة (السؤال 1.1، الشكل 1). كما يمكن استخدام المعلومات عن الحالة الراهنة للمحيطات والغلاف الجليدي في إنتاج إسقاطات أفضل حتى سنوات قليلة قادمة.

ومع تحسن العلم، يمكن إضافة عمليات جيوفيزيائية جديدة إلى النماذج المناخية، ويمكن تحسين العروض التي أدرجت بالفعل. وقد يبدو أن هذه التطورات قد زادت من تقديرات عدم اليقين المستمدة من النماذج بشأن الاستجابة المناخية، إلا أن هذه الزيادة لا تجسد سوى التقييم الكمي لمصادر عدم اليقين التي لم يسبق قياسها (السؤال 1.1، الشكل 1). ومع إضافة المزيد من العمليات المهمة، تنخفض تأثيرات العمليات غير المقيمة كمياً، ويمكن أن تتزايد الثقة في الإسقاطات.



السؤال 1.1، الشكل 1 يبين الشكل التخطيطي الأهمية النسبية لمختلف أوجه عدم اليقين، وتطورها مع الزمن. (أ) متوسط التغير العشري في درجة الحرارة السطحية (الدرجات المئوية) من السجل التاريخي (الخط الأسود)، ومع تقديرات النموذج المناخي لعدم اليقين في الفترة التاريخية (الخط الرمادي)، مع الإسقاطات المناخية للمستقبل وعدم اليقين. ويجري تسوية القيم بحسب المتوسطات من 1961 إلى 1980. وتستمد التقلبية الطبيعية (اللون البرتقالي) من التقلبية فيما بين السنوات المستمدة من النموذج، ويفترض أنها ثابتة مع الوقت. ويقدر عدم اليقين بشأن الانبعاثات (اللون الأخضر) باعتباره المتوسط المستمد من النموذج للفرق في الإسقاطات المتعلقة بمختلف السيناريوهات. ويستند عدم اليقين بشأن الاستجابة المناخية (الخط الأزرق المستمر) إلى امتداد النموذج المناخي بالإضافة إلى أوجه عدم اليقين المضافة من دورة الكربون فضلاً عن التقديرات الأولية لعدم اليقين المضاف لعمليات النمذجة السريعة. واستناداً إلى ما ذكره Hawkins و (2011) Sutton و Huntingford وآخرون (2009). (ب) وقد يبدو عدم يقين استجابة المناخ في ازدياد عند اكتشاف عملية جديدة ذات صلة بالموضوع، إلا أن هذا الزيادةات تجسد تقنياً لعدم اليقين الذي لم يسبق قياسه أو (ج) يمكن أن تتناقض مع التحسينات الإضافية في النموذج وفي قيود الرصد. ويعني نطاق عدم اليقين المقدم البالغ 90 في المائة أن درجة الحرارة تقدر بأنها في نفس النطاق مع احتمالية 90 في المائة.

السؤال 2.1 | كيف نعرف أن العالم قد تعرض للاحتراق؟

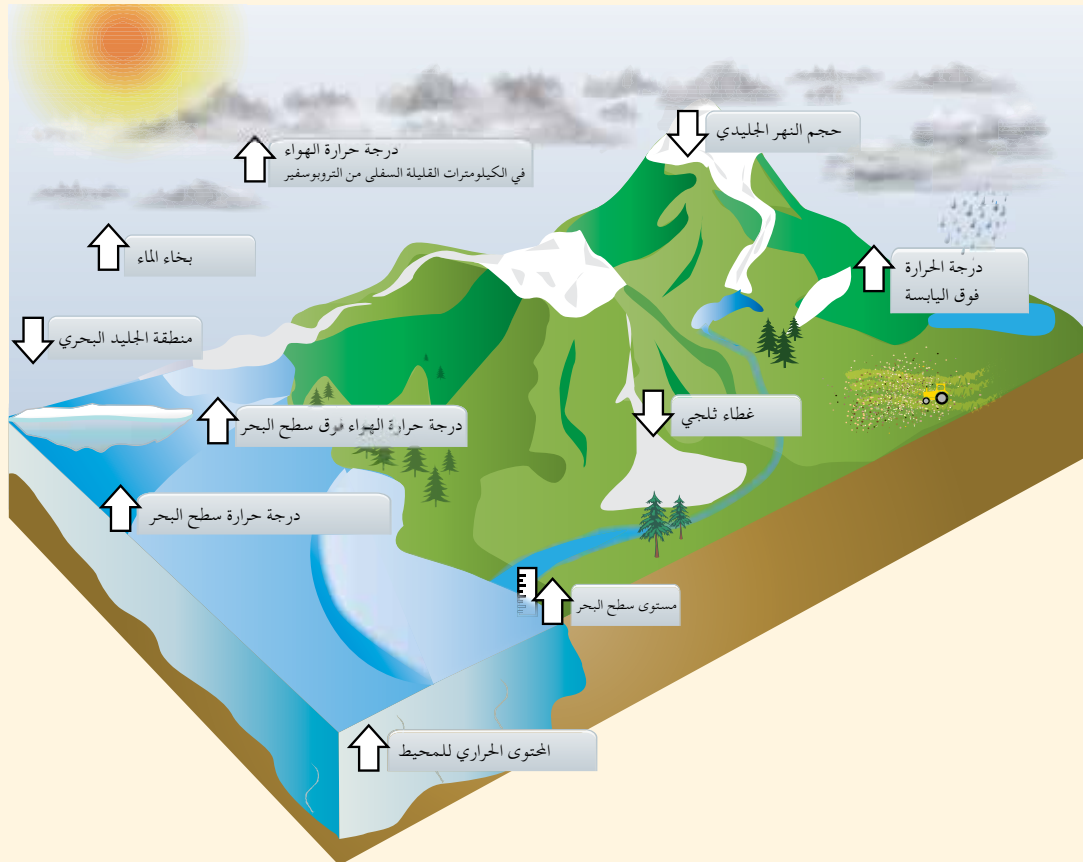
تأتي الأدلة على احترار العالم من مؤشرات مناخية مستقلة متعددة تتراوح بين مستوى عال في الغلاف الجوي إلى أعماق المحيطات. وتتضمن هذه الأدلة التغيرات في درجات حرارة سطح الأرض والغلاف الجوي والمحيطات، والأنهار الجليدية، والغطاء الثلجي، والجليد البحري، ومستوى سطح البحر، وبخار الماء في الغلاف الجوي. وقد تحقق العلماء من جميع أنحاء العالم بصورة مستقلة من هذه الأدلة مرات كثيرة. لا جدال إذاً في أن العالم يتعرض للاحتراق منذ القرن التاسع عشر.

وكثيراً ما تتركز المناقشات بشأن احترار المناخ على التحيزات المتبقية المحتملة في سجلات درجات الحرارة المستمدة من محطات الطقس القائمة على اليابسة. وهذه السجلات بالغة الأهمية، إلا أنها لا تمثل سوى مؤشر واحد على حدوث تغيرات في النظام المناخي. وتأتي الأدلة الأشمل على احترار العالم من طائفة عريضة من القياسات المستقلة المتساوقة فيزيائياً للكثير من العناصر الأخرى المترابطة بقوة في النظام المناخي (السؤال 2.1، الشكل 1).

ويعد ارتفاع المتوسط العالمي في درجات الحرارة السطحية أفضل مؤشر معروف عن تغير المناخ. وعلى الرغم من أن كل عام وحتى كل عقد ليس أكثر حرارة مما قبله، فإن درجات الحرارة السطحية العالمية إزادت احتراراً بدرجة ملموسة منذ عام 1900.

ويتوافق احترار درجات حرارة اليابسة بصورة وثيقة مع اتجاه الاحترار المرصود فوق المحيطات. كذلك فإن احترار درجات حرارة هواء المحيطات الذي يقاس من على متن السفن، ودرجات حرارة سطح البحر ذاته تتوافق على النحو الذي بينته الكثير من التحليلات المستقلة.

ونظراً لأن الغلاف الجوي والمحيطات من الأجسام المائعة، ينبغي النظر إلى الاحترار عند السطح أيضاً في الطبقات السفلى من الغلاف الجوي، وبصورة عميقة في الأجزاء العليا من المحيطات، وتؤكد الرصدات أن هذا هو الحال في الحقيقة. وبين تحليل القياسات التي تجرى بالمسابير الرادوية من بالونات الطقس والسواتل حدوث احترار دائماً في التروبوسفير، أو طبقة الطقس النشطة في الغلاف الجوي. وخبزن أكثر من 90 في المائة من الطاقة الزائدة التي امتصها النظام المناخي منذ سبعينيات القرن الماضي على الأقل في المحيطات كما يتضح من السجلات العالمية للمحتوى الحراري للمحيطات والتي تعود إلى خمسينيات القرن الماضي.



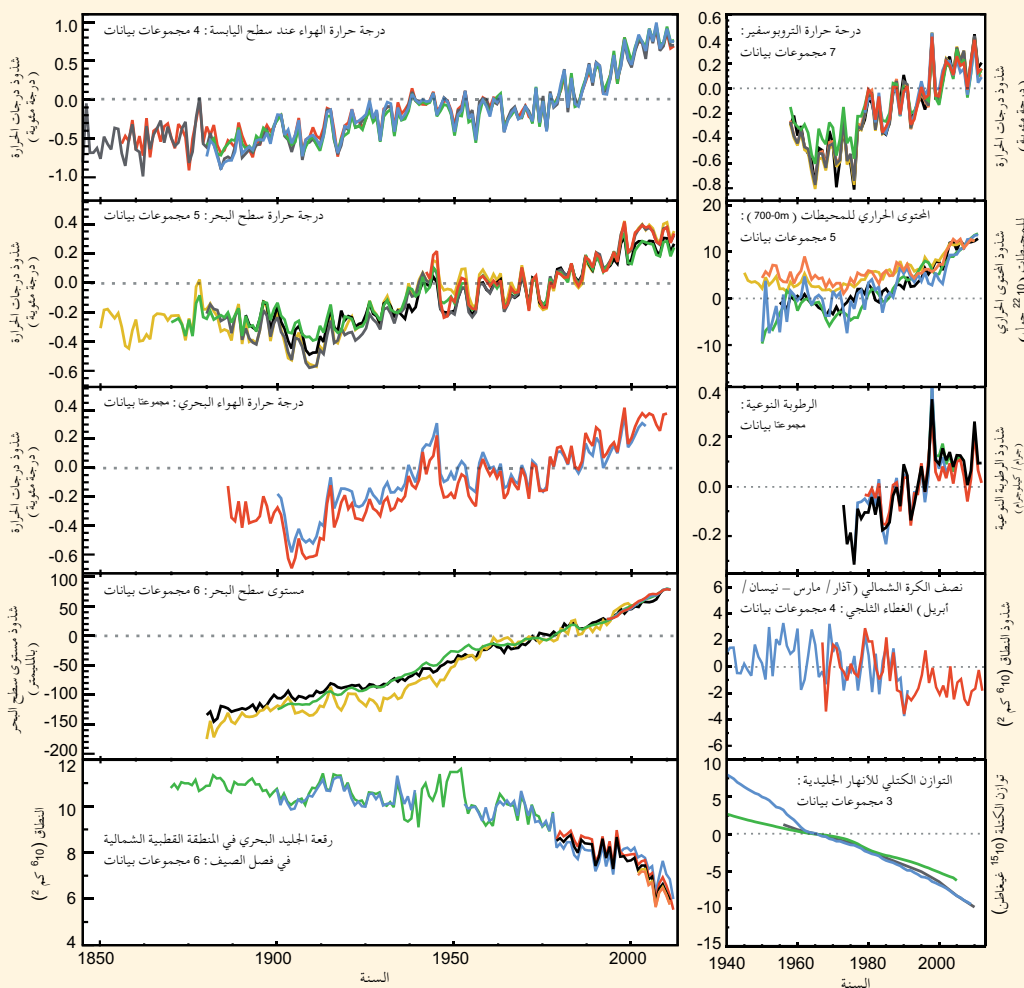
السؤال 2.1، الشكل 1 | تظهر التحليلات المستقلة الكثير من مكونات النظام المناخي التي يتوقع أن تتغير في عالم يتعرض للاحتراق الاتجاهات المتساوقة مع الاحترار (يبين اتجاه السهم علامة التغير) على النحو المبين في السؤال 2.1، الشكل 2.

ومع احترار المحيطات، تتمدد المياه ذاتها. وهذا التمدد هو أحد القوى المحركة الرئيسية للارتفاع الذي رصد بصورة مستقلة في مستويات سطح البحر خلال القرن الماضي. كما يسهم انصهار الأنهار الجليدية، والصفائح الجليدية، مثلما تسهم التغيرات في تخزين واستخدام المياه على اليابسة.

والعالم الأكثر حرارة عالم رطب أيضاً لأن الهواء الحار يحتفظ بقدر أكبر من بخار الماء. وتبين التحليلات العالمية أن الرطوبة النوعية، التي تقيس كمية بخار الماء في الغلاف الجوي، زادت أيضاً في كل من اليابسة والمحيطات.

والأجزاء المتجمدة من كوكب الأرض - والمعروفة معاً بالغلاف الجليدي - تتأثر بالتغيرات المحلية لدرجات الحرارة وتؤثر فيها. وقد تقلصت كمية الجليد الموجودة في الأنهار الجليدية عالمياً سنوياً لأكثر من 20 سنة، وتسهم الكتلة المفقودة، جزئياً، في الارتفاع المرصود في مستوى سطح البحر. والغطاء الثلجي حساس للتغيرات في درجات الحرارة وخاصة خلال الربيع، عندما يبدأ الثلج في الانصهار. وقد تقلص الغطاء الثلجي الربيعي عبر نصف الكرة الأرضية الشمالي منذ خمسينيات القرن الماضي. وقد رصدت خسائر ضخمة في الجليد البحري في المنطقة القطبية الشمالية منذ بدء عمليات التسجيل بالسواتل، وخاصة عند وصول رقعة الأنهار الجليدية إلى الحد الأدنى خلال شهر أيلول / سبتمبر في نهاية فصل الانصهار السنوي. وعلى العكس من ذلك، كانت الزيادة في الجليد البحري في منطقة القطب الجنوبي ضئيلة.

وقد يكون أي تحليل بمفرده غير مقنع، إلا أن تحليل هذه المؤشرات المختلفة ومجموعات البيانات المستقلة أدى إلى وصول الكثير من مجموعات البحوث المستقلة إلى نفس النتيجة. فمن مياه المحيطات العميقة إلى قمة التروبوسفير، تشير جميع الأدلة المستقاة من احترار الهواء والمحيطات، وانصهار الجليد، وارتفاع مستوى سطح البحر بصورة قاطعة إلى نتيجة واحدة هي أن العالم قد تعرض للاحتار منذ أواخر القرن التاسع عشر (السؤال 2.1، الشكل 2).



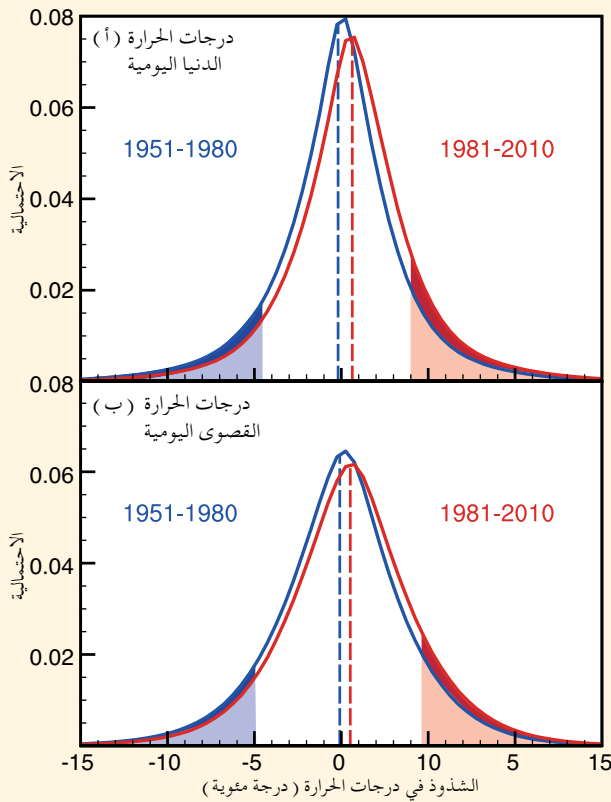
السؤال 2.1، الشكل 2 | المؤشرات المستقلة المتعددة على تغير المناخ العالمي. يمثل كل خط تقديراً مستنبطاً بصورة مستقلة للتغير في عنصر مناخي. وفي كل لوحة جرى تسوية جميع مجموعات البيانات لتكون فترة مشتركة للسجل. وتتضمن المواد التكميلية 2 من موجز 5 التفاصيل الكاملة عن مصدر مجموعات البيانات الذي يذهب إلى لوحة بعينها.

السؤال 2.2 | هل حدثت أية تغييرات في الظواهر المناخية المتطرفة؟

تتوافر أدلة قوية على أن الاحترار قد أسفر عن تغييرات في درجات الحرارة المتطرفة — بما في ذلك موجات الحرارة — منذ منتصف القرن العشرين. والأرجح أن الزيادات في الأمطار الغزيرة قد حدث أيضاً خلال هذه الفترة إلا أنه يتباين فيما بين الأقاليم. غير أننا أقل تأكيداً، بشأن الظواهر المتطرفة الأخرى مثل تواتر العواصف المدارية باستثناء بعض المناطق المحدودة، بأنه حدثت تغييرات ملموسة في السجل المرصود.

ومن موجات الحرارة إلى نوبات البرد ومن حالات الجفاف إلى الأمطار المسببة للفيضانات، يفرض تسجيل وتحليل الظواهر المناخية المتطرفة تحديات فريدة ليس فقط لأن هذه الظواهر نادرة الحدوث بل لأنها تحدث أيضاً بالاقتران مع ظروف مدمرة. وعلاوة على ذلك، لا يتوافر تعريف موحد في الدراسات العلمية عما يشكل ظاهرة مناخية متطرفة، ويؤدي ذلك إلى تعقيد عمليات التقييم العالمية المقارنة.

وعلى الرغم من أن الظاهرة المناخية المتطرفة، بالمعنى المطلق، سوف تختلف من مكان لآخر — فيوم حار في المناطق المدارية، مثلاً، قد ينطوي على درجة حرارة مختلفة عن يوم حار في مناطق خطوط العرض المتوسطة — أبرزت الجهود الدولية لمراقبة الظواهر المتطرفة بعض التغييرات العالمية الكبيرة.



السؤال 2.2، الشكل 1 | توزيع كل من (أ) الشذوذ في درجات الحرارة الدنيا اليومية و(ب) درجات الحرارة القصوى اليومية بالمقارنة بدراسات علم المناخ للفترة 1981-1990 للفترتين: من 1951 إلى 1980 (باللون الأزرق) ومن 1981 إلى 2010 (باللون الأحمر) باستخدام مجموعة بيانات HadGHCND. وتمثل المنطقة الزرقاء المظللة والمنطقة الحمراء المظللة أبرد عشرة في المائة وأحر عشرة في المائة على التوالي في (أ) الليالي و(ب) النهار خلال الفترة 1951-1980 وتشير المناطق المظللة الداكنة إلى عدد أبرد الأيام (اللون الأزرق الداكن)، والكمية التي زاد بها عدد الأيام وأحر الليالي (اللون الأحمر الداكن) خلال الفترة 1981-2010 بالمقارنة بالفترة 1951-1980.

إذ تستخدم التعاريف المتساوقة، مثلاً، عن الأيام والليالي الباردة (أقل من عشر المئين)، والحارة (أكثر من تسعين المئين)، لبيينا أن الأيام والليالي الحارة قد زادت وأن الأيام والليالي الباردة قد انخفضت في معظم أقاليم العالم وإن كانت هناك بعض الاستثناءات القليلة في وسط وشرق أمريكا الشمالية وجنوبي أمريكا الجنوبية إلا أنها لا تتعلق في معظمها إلا بدرجات الحرارة في وقت النهار. وهذه التغييرات أكثر وضوحاً بصفة عامة في درجات الحرارة الدنيا المتطرفة مثل الليالي الحارة. ونتيجة لقصور البيانات يتعذر وضع صلة سببية للزيادات في متوسط درجات الحرارة إلا أن السؤال 2.2، الشكل 1 يبين أن متوسط درجات الحرارة المتطرفة قد تغير بالفعل. وما زالت المناقشات جارية عما إذا كانت هذه التغييرات ترتبط ببساطة بمتوسط الزيادة في درجات الحرارة (الخطوط المتقطعة في السؤال 2.2، الشكل 1) أو أن هذه التغييرات في توزيع درجات حرارة النهار والليل قد حدثت.

وجرى أيضاً تقييم نوبات الحرارة وموجات الحرارة بين الفترات التي تتضمن أياماً أو ليالي متتابعة شديدة الحرارة، إلا أنه لا يتوافر سوى عدد قليل من الدراسات عن خصائص موجات الحرارة غير تلك التي تعقد المقارنات بين الأيام أو الليالي الحارة فقط. وقد تعرضت معظم المناطق الأرضية العالمية التي يتوافر لديها بيانات لمزيد من موجات حرارة منذ منتصف القرن العشرين. وأحد الاستثناءات لذلك جنوب شرق الولايات المتحدة الأمريكية، حيث أظهر تواتر موجات الحرارة ومددها انخفاضاً بصفة عامة. ويرتبط ذلك بما يسمى «ثقب الاحترار» في هذه المنطقة التي تزيد فيها أيضاً كميات الأمطار، وقد يتعلق هذا بالتفاعلات بين اليابسة والغلاف الجوي، والتغيرات الطويلة الأجل في المحيطين الأطلسي والهادئ. وعلاوة على ذلك، فإن المعلومات محدودة عن موجات الحرارة في المناطق الشاسعة وخاصة في أفريقيا وأمريكا الجنوبية.

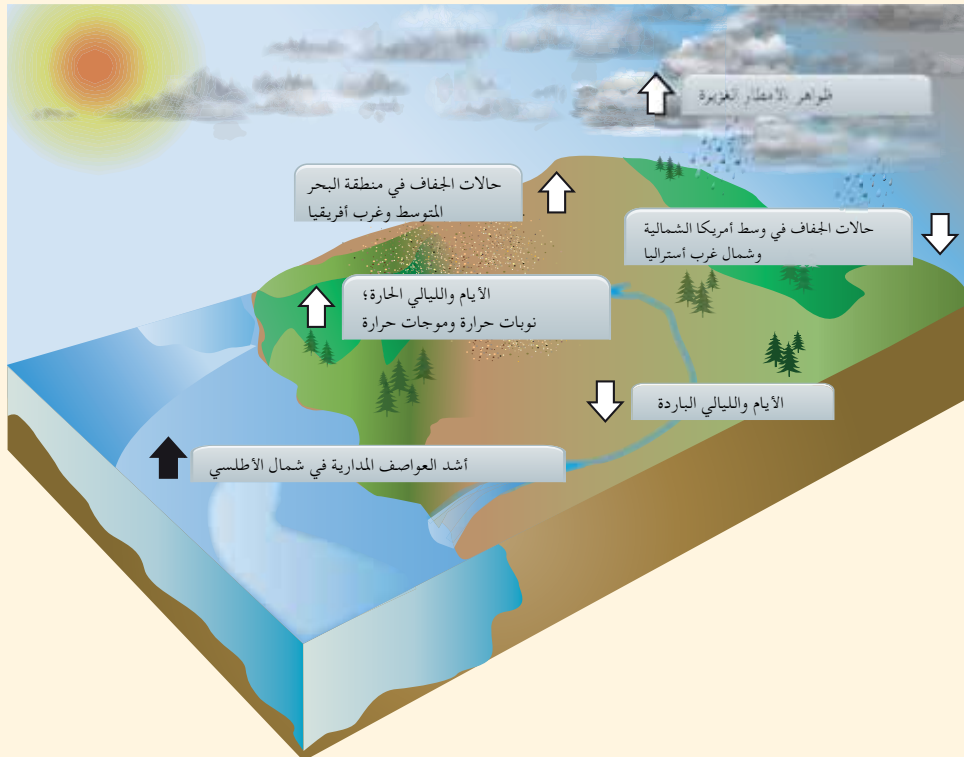
وبالنسبة لبعض الأقاليم مثل أوروبا حيث تتوافر تشكيلات تاريخية لدرجات الحرارة المتصورة تعود إلى عدة مئات من السنين، تبين المؤشرات أن بعض المناطق قد تعرضت لعدد غير متناسب من موجات الحرارة المتطرفة في العقود الأخيرة.

ويقل إتساق التغيرات في الظواهر المتطرفة في المتغيرات المناخية الأخرى بصفة عامة عن تلك التي رصدت بالنسبة لدرجات الحرارة وذلك نتيجة لقصور البيانات وحالات عدم الاتساق بين الدراسات، والأقاليم و/أو الفصول. غير أن الزيادات في الظواهر المتطرفة المتعلقة بكميات الأمطار، مثلاً، تتسق مع مناخ أكثر احتراراً. وتشير التحليلات التي أجريت في المناطق الأرضية التي تتوفر عنها بيانات كافية إلى زيادة تواتر وكثافة كميات الأمطار المتطرفة في العقود الأخيرة، إلا أن النتائج تتباين بشدة فيما بين الأقاليم والفصول. وعلى سبيل المثال، فإن الأدلة أشد وضوحاً في الزيادات في الأمطار الغزيرة في أمريكا الشمالية، وأمريكا الوسطى وأوروبا إلا أنه تتوفر أدلة في بعض الأقاليم الأخرى مثل جنوبي أستراليا وغربي آسيا على حدوث انخفاضات. وبالمثل، فإن الدراسات المتعلقة بالجفاف لا تتفق على دلالة اتجاه التغير العالمي، مع اعتماد حالات عدم الاتساق في اتجاهات التغير على المستوى الإقليمي أيضاً تعتمد على كيفية تعريف الجفاف. غير أنه تتوفر مؤشرات على أن حالات الجفاف قد تزايدت في بعض الأقاليم (مثل البحر المتوسط) وانخفضت في أقاليم أخرى (مثل وسط أمريكا الشمالية) منذ منتصف القرن العشرين.

ولدى النظر إلى الظواهر المتطرفة الأخرى، مثل العواصف المدارية، تبين عمليات التقييم الأخيرة أن من المتعذر، بالنظر إلى المشكلات المتعلقة بقدرات الرصد السابقة، إصدار بيانات قاطعة عن اتجاهات التغير الطويلة الأجل. غير أنه تتوفر أدلة قوية على ازدياد نشاط العواصف في شمال المحيط الأطلسي منذ سبعينات القرن الماضي.

وتشير الأدلة، على امتداد فترات زمنية تصل إلى قرن أو أكثر، إلى حدوث انخفاضات طفيفة في تواتر العواصف المدارية التي تلحق أضراراً باليابسة في شمال الأطلسي وجنوب المحيط الهادئ بمجرد مراعاة أوجه عدم اليقين في طرائق الرصد. ولا تتوفر إلا أدلة طفيفة على أي اتجاهات طويلة الأجل في الأحواض المحيطية الأخرى. وبالنسبة للعواصف خارج المناطق المدارية، يتضح حدوث تحول صوب القطبين في نصفي الكرة الأرضية كليهما خلال الخمسين سنة الماضية، مع وجود أدلة أخرى، وإن كانت محدودة، على حدوث انخفاض في تواتر الرياح العاتية في مناطق خطوط العرض الوسطى. ويشير العديد من الدراسات إلى حدوث زيادة في الحدة إلا أن المسائل المتعلقة بأخذ عينات البيانات تعرقل عمليات التقييم هذه.

السؤال 2.2، الشكل 2 | يوجز الشكل بعض التغيرات التي رصدت في ما يتعلق بالظواهر المناخية المتطرفة. وبصفة عامة فإن أكثر التغيرات العالمية قوة في الظواهر المناخية المتطرفة تتجلى في قياسات درجات الحرارة اليومية، بما في ذلك الموجات الحارة إلى حد ما. ويبدو أيضاً أن الظواهر المتطرفة المتعلقة بكميات الأمطار آخذة في الزيادة إلا أن هناك تبايناً شاسعاً بين الأماكن، ومازالت اتجاهات التغير المرصودة لحالات الجفاف غير مؤكدة باستثناء عدد قليل من الأقاليم. وفي حين شوهدت زيادات قوية في تواتر العواصف المدارية وأنشطتها في شمال الأطلسي منذ سبعينيات القرن الماضي، مازالت أسباب ذلك قيد البحث. وتتوافر أدلة محدودة على التغيرات في الظواهر المتطرفة المرتبطة بالمتغيرات المناخية الأخرى منذ منتصف القرن العشرين.



السؤال 2.2، الشكل 2 | اتجاهات التغير في تواتر (أو شدة) مختلف الظواهر المناخية المتطرفة (يشير اتجاه السهم إلى علامة التغير) منذ منتصف القرن العشرين (باستثناء عواصف شمال الأطلسي حيث تبدأ الفترة المشمولة من سبعينيات القرن الماضي).

السؤال 3.1 | هل يحدث احترار للمحيطات؟

نعم. المحيطات تتعرض للاحتار في كثير من المناطق ونطاقات العمق والفترات الزمنية على الرغم من أن ذلك لا يحدث في كل مكان ولا بصورة مستمرة. وتظهر علامات الاحترار بأكبر قدر من الوضوح لدى النظر إلى المتوسطات العالمية بل وحتى أحواض المحيطات على مدى فترات زمنية تصل لعقد أو أكثر.

وقد تتباين درجة حرارة المحيطات في موقع معين تبانياً شاسعاً مع فصول السنة. وقد تتباين بدرجة كبيرة أيضاً من عام لآخر — أو حتى من عقد لآخر — نتيجة للتغيرات في التيارات المحيطية، وتبادل الحرارة فيما بين المحيطات والغلاف الجوي.

تسجل درجات حرارة المحيطات منذ قرون، إلا أنه لم يحدث حتى نحو عام 1971 أن أصبحت القياسات شاملة بما يكفي لتقدير متوسط درجة حرارة العالم لعدة مئات من الأمتار من الطبقات العليا للمحيطات بصورة تتسم بالثقة في أي سنة بعينها. والواقع أنه قبل المحطات الطافية لرسم المقاطع الجانبية لدرجات الحرارة والملوحة لصفيفة الأوقيانوغرافيا الجيوسروفية الطافية في الوقت الحقيقي Argo التي تحققت أول مرة في التغطية العالمية في عام 2005، كان المتوسط العالمي لدرجات حرارة الطبقات العليا للمحيطات، في أي سنة معينة، يخضع للمنهجية المستخدمة في تقديرها.

وقد زاد المتوسط العالمي لدرجات حرارة الطبقات العليا من المحيطات خلال مستويات زمنية عقدية من 1071 إلى 2010. وعلى الرغم من عدم اليقين البالغ في معظم الوسائل السنوية، كان هذا الاحترار نتيجة مؤكدة. ففي الخمسة والسبعين متراً العليا من المحيطات، كان المتوسط العالمي لتغير الاحترار يبلغ 0.11 [من 0.09 إلى 0.13] درجة مئوية للعقد خلال هذه الفترة الزمنية. ويقل هذا التغير عموماً من السطح إلى متوسط العمق حيث ينخفض إلى نحو 0.04 درجة مئوية للعقد عند 200 متر، وإلى أقل من 0.02 درجة مئوية للعقد عند 500 متر.

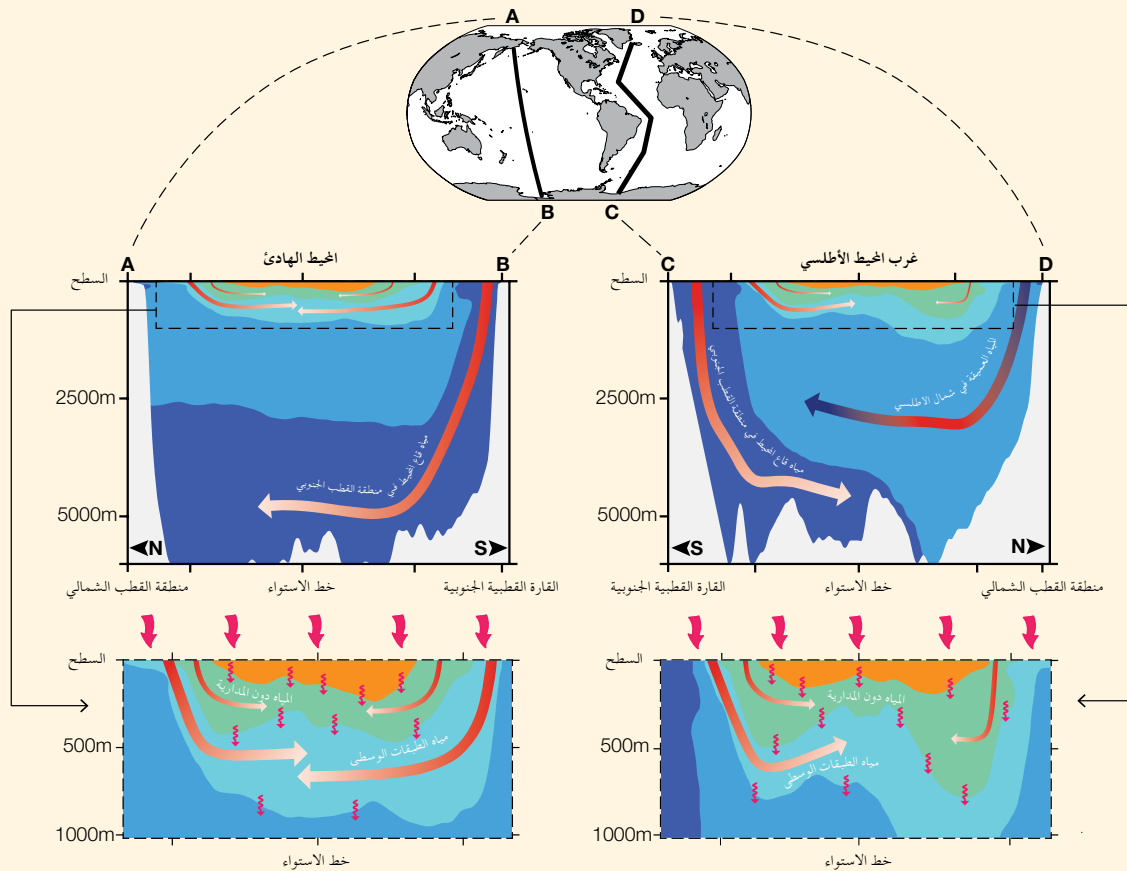
وتدخل حالات الشذوذ في درجات الحرارة إلى تحت سطح المحيطات من خلال ممرات بالإضافة إلى المزج من أعلى (السؤال 3.1، الشكل 1). إذ يمكن أن تهبط المياه الباردة — ومن ثم الأكثر كثافة — من خطوط العرض المرتفعة من السطح ثم تنتشر صوب مياه خط الاستواء الأكثر حرارة والأخف عند خطوط العرض المنخفضة. وفي بعض المواقع — في الجزء الشمالي من شمال المحيط الأطلسي والمحيط الجنوبي حول القطب الجنوبي — تبرد مياه المحيط بدرجة كبيرة لدرجة أنها تهبط إلى أعماق بعيدة حتى تصل إلى القاع. وتنتشر هذه المياه بعد ذلك لتشغل جزءاً كبيراً من بقية الطبقات العميقة من المحيط. وعندما تحترق المياه السطحية للمحيط، تزداد درجة حرارة المياه الهابطة أيضاً مع مرور الوقت مما يزيد من درجات الحرارة الداخلية للمحيط بسرعة أكبر مما يحدث عندما تختلط حرارة السطح الهابطة بمفردها.

وفي شمال الأطلسي، تتباين درجات حرارة هذه المياه العميقة من عقد لآخر — فترتفع درجة حرارتها في بعض الأحيان. وتنخفض في البعض الآخر — بحسب الأنماط السائدة في الغلاف الجوي في الشتاء. وفي المناطق المحيطية بالقارة القطبية الجنوبية، ارتفعت درجة حرارة مياه القاع بصورة ملموسة ابتداء من الفترة 1992-2005 تقريباً، ربما بسبب زيادة قوة الرياح الغربية وتحولها صوب الجنوب في المناطق المحيطية بالمحيط الجنوبي خلال العقود العديدة الماضية. وعلامات الاحترار هذه في مياه القاع الأكثر عمقاً والأشد برودة في المحيطات العالمية ملموسة، وإن كانت تضعف صوب الشمال في المحيطات الهندي والأطلسي والهادئ. وتقل معدلات الاحترار في المياه العميقة، بصفة عامة، عن معدلات المياه السطحية للمحيطات (نحو 0.03 درجة مئوية لكل عقد منذ تسعينيات القرن الماضي في المياه العميقة والقاعية في المناطق المحيطية بالمنطقة القطبية الجنوبية، وتكون أقل وضوحاً في الكثير من المواقع الأخرى). غير أنها تحدث على امتداد مساحة كبيرة ومن ثم فإن احترار الطبقات العميقة للمحيطات يسهم بدرجة كبيرة في الزيادة الفعلية في حرارة المحيط.

وقد أصبحت تقديرات التغيرات التاريخية في المتوسط العالمي لدرجات حرارة المحيطات أكثر دقة خلال السنوات العديدة الماضية، ويعود الفضل في ذلك إلى حد كبير إلى الوعي بالأخطاء في القياسات المنهجية وخفضها. وقد خفض العلماء من خلال إجراء مقارنة دقيقة للقياسات الأقل دقة بالقياسات المتفرقة الأقل عدداً والأكثر دقة في المناطق المجاورة وفي أوقات مماثلة، من بعض أخطاء الأدوات غير الحقيقية. وكشفت هذه التحسينات عن أن المتوسط العالمي لدرجات حرارة المحيطات قد زاد باطراد بالغ من عام لآخر عما كان قد أبلغ قبل عام 2008. على إن المتوسط العالمي لمعدل الاحترار قد لا يكون موحداً من حيث الوقت. ففي بعض السنوات، يبدو أن المحيطات تحت بمعدل أسرع من المتوسط وفي سنوات أخرى يبدو معدل الاحترار بطيئاً.

وتؤدي كتلة المحيطات الكبيرة وسعتها الحرارية المرتفعة إلى تمكينها من تخزين كميات هائلة من الطاقة — تزيد بأكثر من ألف مرة عن تلك المتوفرة في الغلاف الجوي لتحقيق زيادة مساوية في درجات الحرارة. وتمتص الأرض كميات حرارة تزيد عن تلك التي تعيد إطلاقها في الفضاء، وتدخل جميع هذه الحرارة الزائدة إلى المحيطات حيث تخزن هناك. وقد امتصت المحيطات نحو 93 في المائة من الحرارة المجمعة المخزنة بواسطة الهواء والبحار والأراضي الأكثر دفئاً، وقد صهرت الجليد فيما بين 1971 و2010.

وتتسبب السعة الحرارية الضخمة للمحيطات وبطء دورانها في حدوث قصور حراري كبير. فهي تحتاج إلى نحو عقد من الزمن لتكييف درجات الحرارة قرب سطحها استجابة لضغط المناخ (القسم 12.5)، مثل التغيرات في تركيزات غازات الاحتباس الحراري. وعلى ذلك فإنه إذا أمكن الإبقاء على المستويات الراهنة لتركيزات الغازات الحابسة للحرارة في المستقبل، فسوف تبدأ درجات حرارة سطح الأرض في التباطؤ في غضون نحو عقد من الزمن. غير أن درجات حرارة الطبقات العميقة للمحيطات سوف تستمر في الاحترار لمئات إلى آلاف السنين (القسم 12.5)، ومن ثم سوف تستمر مستويات سطح البحر كذلك في الارتفاع لمئات إلى آلاف السنين (القسم 13.5).



السؤال 3.1، الشكل 1 | مسارات امتصاص المحيطات للحرارة — فالمحيطات مكونة من طبقات توجد أبرد وأعلى كثافة في أعماق المحيطات (اللوحات العلويتان: تستخدم الخارطة العلوية للتوجيه). وتهبط مياه قاع المنطقة القطبية الجنوبية الباردة (اللون الأزرق الداكن) حول المنطقة القطبية الجنوبية ثم تنتشر في اتجاه الشمال عبر قاع المحيط إلى وسط المحيط الهادئ (اللوحة العليا إلى اليسار: تشير الأسهم الحمراء التي تتحول إلى اللون الأبيض إلى الاحترار الأشد الذي حدث مؤخراً في مياه القاع بالاتصال مع سطح المحيطات) ومحيطات غرب الأطلسي (اللوحة العليا إلى اليمين) فضلاً عن المحيط الهندي (لا يظهر في الشكل). وتهبط المياه العميقة لشمال الأطلسي الأقل برودة ومن ثم الأخف (الممثلة باللون الأزرق الفاتح) في المنطقة الشمالية من شمال الأطلسي (اللوحة العليا إلى اليمين: يشير السهم الأحمر والأزرق في المياه العميقة إلى الاحترار والبرودة في العقد) ثم تنتشر جنوباً فوق مياه قاع المنطقة القطبية الجنوبية. وبالمثل، تهبط المياه الوسطية الباردة في الطبقات الأعلى من المحيط (تبين اللوحة السفلى إلى اليسار تفاصيل المحيط الهادئ). وتبين اللوحة السفلى إلى اليمين المحيط الأطلسي) في المناطق دون القطبية (الأسهم الحمراء التي تتحول إلى اللون الأبيض تشير إلى احترار مع مرور الوقت) قبل أن تنتشر صوب خط الاستواء تحت المياه دون المدارية الحارة (اللون الأخضر) التي تهبط بدورها (الأسهم الحمراء التي تتحول إلى الأبيض تشير إلى الاحترار الأشد للمياه الوسطية ودون المدارية في الفترة الأخيرة بالاتصال مع السطح) وتنتشر صوب خط الاستواء تحت المياه المدارية، وهي المياه الأكثر احتراراً والأخف (اللون البرتقالي) من بين جميع المحيطات الثلاثة. لذلك تقيم الحرارة أو البرودة الزائدة التي تدخل سطح المحيطات (الأسهم الحمراء المنحنية) خلافاً تهبط ببطء إلى أسفل (الأسهم الحمراء المتموجة تحت السطح).

السؤال 3.2 | هل تتوافر أدلة على حدوث تغييرات في دورة مياه الأرض؟

تشمل الدورة المائية للأرض البحر وسقوط الرطوبة عند سطح الأرض. وتوفر التغيرات في كمية بخار الماء في الغلاف الجوي أدلة قوية على أن الدورة المائية تستجيب بالفعل للمناخ الذي تعرض للاحتراق. وتأتي أدلة أخرى من التغيرات في توزيع ملوحة المحيطات التي أصبحت، نتيجة لنقص الرصدات الطويلة الأجل للأمطار والبحر فوق المحيطات العالمية، مقياساً مهماً غير مباشر للأمطار.

ويتوقع أن تشتد الدورة المائية في المناخ الأكثر احتراراً بالنظر إلى أن الهواء الحار يمكن أن يصبح أكثر رطوبة: فبوسع الغلاف الجوي أن يحتفظ بما يزيد بنحو 7 في المائة من بخار الماء بالنسبة لكل درجة مئوية من الاحترار. وتبين الرصدات منذ سبعينيات القرن الماضي حدوث زيادات في بخار الماء عند السطح وفي الطبقات السفلى للغلاف الجوي (السؤال 3.2، الشكل 1 أ) بمعدل يتسق والاحترار المرصود. وعلاوة على ذلك، يتوقع أن يشتد البحر وتساقط الأمطار في المناخ الأكثر احتراراً.

وتؤيد التغيرات المسجلة في ملوحة المحيطات خلال الخمسين عاماً الماضية هذه الإسقاطات. فمياه البحار تحتوي على كل من المياه المالحة والعذبة وتعد ملوحتها دالة لوزن ما تحتويه من أملاح ذائبة. ونظراً لأن الكمية الإجمالية للأملاح، التي تأتي من تجوية الصخور، لا تتغير على امتداد المستويات الزمنية البشرية؛ فإن ملوحة مياه البحار لا يمكن أن تتغير، خلال أيام أو قرون إلا بإضافة أو إزالة المياه العذبة.

ويربط الغلاف الجوي مناطق فقدان الصافي للمياه العذبة في المحيطات بتلك التي تزداد فيها المياه العذبة من خلال نقل بخار الماء المتبخر من مكان لآخر. ويجسد توزيع الملوحة على سطح المحيطات بدرجة كبيرة النمط المكاني للبحر ناقصاً كميات الأمطار، وجريان وعمليات المياه من الأراضي والجليد البحري. وثمة بعض التحول في الأنماط ذات الصلة ببعضها الآخر نتيجة للتغيرات المحيطية.

والمياه دون المدارية شديدة الملوحة، لأن البحر يتجاوز كميات الأمطار في حين أن مياه البحر في مناطق خطوط العرض العالية وفي المناطق المدارية - حيث تسقط الأمطار بكميات تزيد عن عن البحر - تكون أقل ملوحة (السؤال 3.2، الشكل 1 ب و د). ويفقد المحيط الأطلسي، الذي يمثل أكثر أحواض المحيطات ملوحة، قدرًا من المياه العذبة من خلال البحر يزيد عما يحصل عليه من تساقط الأمطار، في حين يتعادل المحيط الهادئ تقريباً. (أي أن المكاسب من تساقط الأمطار تتوازن تقريباً مع الفقد من البحر)، ويغلب تساقط الأمطار على المحيط الجنوبي (المنطقة المحيطة بالقطب الجنوبي).

وتعزز التغيرات في الملوحة السطحية، وفي الطبقة الأعلى من المحيط نمط الملوحة المتوسط. وقد أصبحت المناطق دون المدارية التي يسودها البحر أكثر ملوحة في حين أصبحت المناطق دون القطبية والمدارية التي يسودها سقوط الأمطار أكثر عذوبة. ولدى دراسة التغيرات في الخمسمئة متر العليا، يتبين أن المحيط الأطلسي الذي يغلب عليه البحر أصبح أكثر ملوحة في حين أصبح المحيط الهادئ المتعادل تقريباً، والمحيط الجنوبي الذي يغلب عليه سقوط الأمطار أكثر عذوبة (السؤال 3.2، الشكل 1 ج).

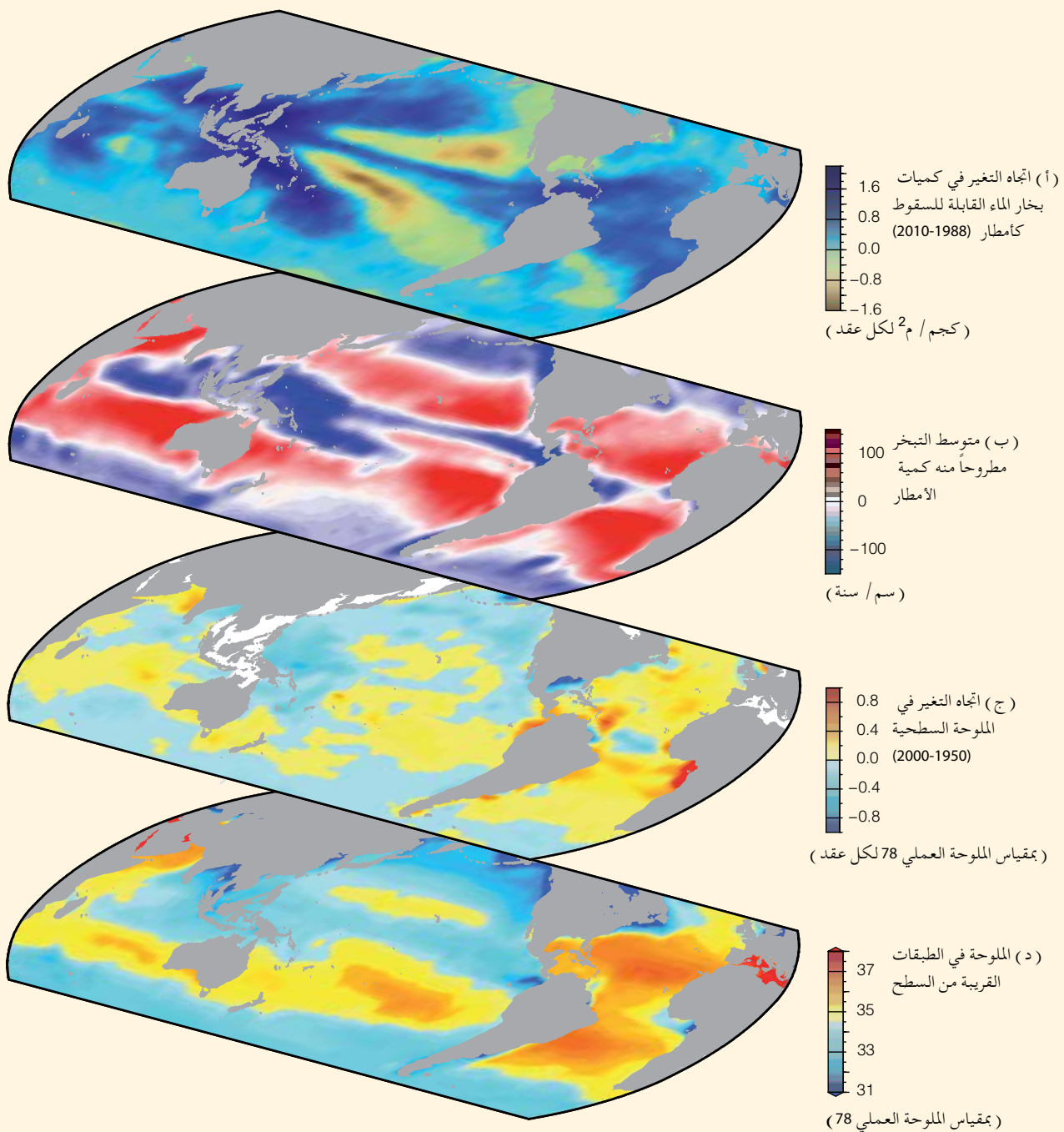
ومن الصعب رصد التغيرات في كميات الأمطار والبحر بصورة مباشرة وعلى النطاق العالمي بالنظر إلى أن معظم مبادلات المياه العذبة فيما بين الغلاف الجوي والسطح تحدث في نسبة السبعين في المائة من سطح الأرض الذي تغطيه المحيطات. ولا تتوافر سجلات طويلة الأجل عن سقوط الأمطار إلا من اليابسة فقط، ولا توجد قياسات طويلة الأجل للبحر.

وتبين الرصدات من اليابسة زيادة في كميات الأمطار في بعض المناطق وانخفاضات في مناطق أخرى مما يزيد من صعوبة استنباط صورة متكاملة عالمياً. وقد أظهرت الرصدات المأخوذة من اليابسة حدوث مزيد من ظواهر سقوط الأمطار الأكثر تطرفاً، ومزيد من الفيضانات المرتفعة بانصهار الثلوج السابق في مناطق خطوط العرض الشمالية العالية إلا أن هناك أوضاعاً إقليمية في هذه التغيرات. غير أن الرصدات المأخوذة من اليابسة لا تكفي حتى الآن لتوفير أدلة على حدوث تغييرات في حالات الجفاف.

ومن ناحية أخرى، تعمل ملوحة المحيطات كمقياس حساس وفعال لسقوط الأمطار فوق المحيطات. وتجسد بصورة طبيعية وتبرز الفرق بين المياه التي تحصل عليها المحيطات من الأمطار والمياه التي تفقدها عن طريق البحر حيث يتسم كلاهما بشدة بالتجزئة والتفرق. وتتأثر ملوحة المحيطات أيضاً بجريان المياه من القارات ومن انصهار وتجمد الجليد البحري أو الكتل الجليدية الطافية. وسوف تغير المياه المضافة من انصهار الجليد على الأرض من الملوحة التي يتحدد متوسطها عالمياً إلا أن التغيرات حتى الآن طفيفة بصورة يتعذر رصدها.

وتظهر البيانات المتعلقة بالخمسين عاماً الماضية حدوث تغييرات واسعة النطاق في الملوحة في الطبقات العليا للمحيطات، مما يشير إلى حدوث تغييرات منتظمة في سقوط الأمطار وجريان المياه ناقصاً البحر على النحو المبين في السؤال 3.2، الشكل 1.

ويستند السؤال 3.2 إلى الرصدات الواردة في الفصلين 2 و3 وإلى تحليل النماذج في الفصلين 9 و12.



السؤال 3.2، الشكل 1 | تتعلق التغيرات في ملوحة سطح البحر بأنماط البحر ناقصاً كمية الأمطار في الغلاف الجوي (البخر - كمية الأمطار) والتغيرات في مجموع كمية المياه الناشئة عن الأمطار (أ) التغير الخطي (2010-1988) في مجموع كمية المياه القابلة للسقوط (بمقياس الملوحة العملي 78) (بخار الماء المنبعث من سطح الأرض من خلال كامل الغلاف الجوي) (كيلوغرام لكل متر مربع للعقد) من رصدات السواتل (المسبار الخاص بجهاز التصوير بالموجات القصيرة) (نقلاً عن Wentz وآخرون، 2007) (الألوان الزرقاء: تشير إلى الرطوبة؛ الألوان الصفراء: تشير إلى الجفاف). (ب) شبكة المتوسط الصافي من علم المناخ للفترة 2005-1979 البحر - كمية الأمطار (سم في السنة) من تحليلات الأرصاد الجوية (المراكز الوطنية للإسقاطات البيئية / مركز بحوث الغلاف الجوي، وفقاً لـ Kalnay وآخرون، 1996) (الألوان الحمراء، البخر الصافي، الألوان الزرقاء: كمية الأمطار الصافية). (ج) التغير (2000-1950) في ملوحة السطح (لكل 50 عاماً) (وفقاً لـ Wjiffels و Durack، 2010) (تجديد الألوان الزرقاء، الألوان الصفراء - الحمراء (الأكثر ملوحة)). (د) متوسط ملوحة السطح من علم المناخ (بمقياس الملوحة العملي) (الألوان الزرقاء أقل من 35، الألوان الصفراء والحمراء أكثر من 35).

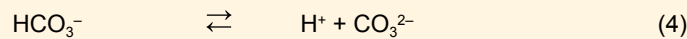
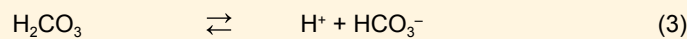
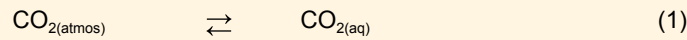
السؤال 3.3 | ما هي صلة تحمض المحيطات البشرية المنشأ بتغير المناخ؟

ينشأ كل من تغير المناخ البشري المنشأ وتحمض المحيطات البشري المنشأ عن زيادة تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. فارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون (CO_2) بالإضافة إلى غازات الاحتباس الحراري الأخرى يغير بصورة غير مباشرة من النظام المناخي لكونها تمتص الحرارة عندما تنعكس عائدة من سطح الأرض. وتحمض المحيطات البشري المنشأ يمثل نتيجة مباشرة لزيادة تركيزات ثاني أكسيد الكربون حيث إن المياه البحرية تمتص حالياً نحو 30 في المائة من ثاني أكسيد الكربون البشري المنشأ من الغلاف الجوي.

ويشير تحمض المحيطات إلى حدوث انخفاض في درجة الحموضة pH خلال فترة ممتدة تكون عادة عقوداً أو أطول من ذلك، ويرجع ذلك بالدرجة الأولى إلى امتصاص ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي. ودرجة الحموضة مقياس لا تمييز له للحموضة. ويصف تحمض المحيطات اتجاه التغيير في درجة الحموضة وليس نقطة التعادل لذلك بمعنى أن قيمة درجة حموضة المحيطات آخذة في الانخفاض إلا أن من غير المتوقع أن تصبح المحيطات حمضية (قيمة درجة حموضة أقل من 7). وقد تحدث حموضة المحيطات نتيجة لإضافات كيميائية أخرى أو مستخلصات من المحيطات تكون عديمة التأثير (مثل إطلاق مركبات النيتروجين والكبريت في الغلاف الجوي). ويشير تحمض المحيطات البشري المنشأ إلي عنصر انخفاض درجة الحموضة نتيجة لنشاط بشري.

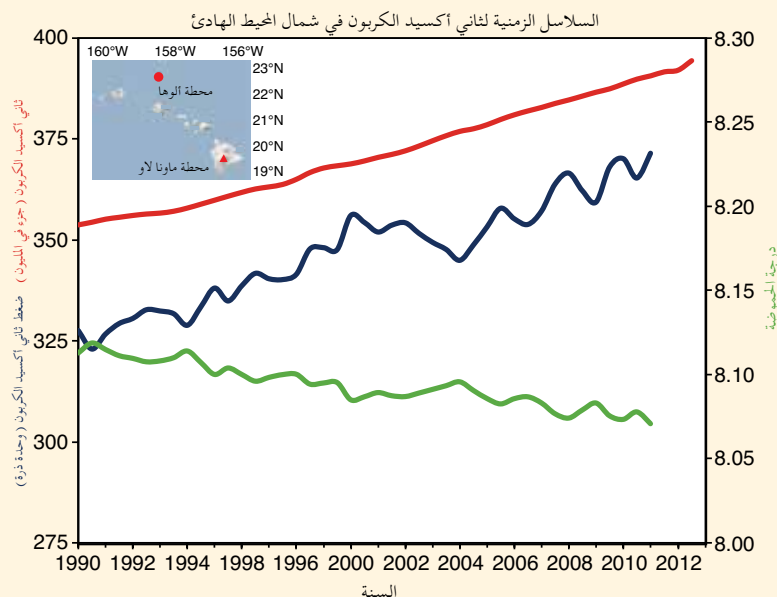
ومنذ نحو عام 1750، أسفر إطلاق ثاني أكسيد الكربون من الأنشطة الصناعية والزراعية عن زيادة في المتوسط العالمي لتركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من 278 إلى 390.5 جزء في المليون في 2011. وقد زاد الآن تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي عما تعرضت له الأرض على مدى فترة الـ 800000 سنة الأخيرة، ويتوقع أن يستمر في الارتفاع بسبب اعتمادنا على الوقود الأحفوري للحصول على الطاقة. وحتى الآن، امتصت المحيطات ما يقرب من 155 ± 30 ببتاغرام كربون من الغلاف الجوي، وهو ما يعادل تقريباً ربع مجموع كمية ثاني أكسيد الكربون المنبعثة (555 ± 85 ببتاغرام كربون) من الأنشطة البشرية منذ عصر ما قبل الصناعة. وقد أدت عملية الامتصاص الطبيعية هذه إلى إحداث خفض كبير في مستويات غازات الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي، وقللت من بعض تأثيرات الاحترار العالمي. غير أن لامتصاص المحيطات لثاني أكسيد الكربون تأثيراً كبيراً على كيمياء مياه البحر. فقد انخفض متوسط درجة الحموضة في المياه السطحية للمحيطات بالفعل بنحو 0.1 وحدة من نحو 8.2 إلى 8.1 منذ بداية الثورة الصناعية. وتشير تقديرات تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي والمحيطات المتوقعة في المستقبل إلى أن متوسط درجة حموضة المحيطات، بحلول نهاية هذا القرن، قد يقل بمقدار 0.2 إلى 0.4 في المائة عما هو عليه الآن. ومستوى درجة الحموضة لوغاريتمي ومن ثم فإن تغيير وحدة واحدة يقابله تغيير في تركيزات أيون الهيدروجين بعشرة أمثالها.

وعندما تحدث مبادلات لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي عبر السطح المشترك بين الهواء والبحار، فإنه يتفاعل مع المياه البحرية من خلال سلسلة من أربعة تفاعلات كيميائية تزيد من تركيزات أنواع الكربون: ثاني أكسيد الكربون المذاب ($\text{CO}_{2(aq)}$) وحمض الكربونيك (H_2CO_3) والبيكربونات (HCO_3^-):



وتنتج أيونات الهيدروجين (H^+) من خلال هذه التفاعلات. ويقابل هذه الزيادة في تركيزات أيونات الهيدروجين المحيطية انخفاض في درجة الحموضة أو زيادة في الحموضة ذاتها. وفي الظروف العادية للمياه البحرية، سوف يلتحم أكثر من 99.99 في المائة من أيونات الهيدروجين الناتج من تحليل أيون الكربونات (CO_3^{2-}) لإنتاج بيكربونات إضافية (HCO_3^-). وعلى ذلك فإن إضافة ثاني أكسيد الكربون البشري المنشأ في المحيطات يخفض من درجة الحموضة ويستهلك أيونات الكربونات. ويمكن استرجاع التفاعلات بالكامل، وأصبحت الدينامية الحرارية الأساسية لهذه التفاعلات في المياه البحرية معروفة تماماً لدرجة أنه عند وصول قيمة درجة الحموضة إلى نحو ما يقرب من 8.1 يكون ما يقرب من 90 في المائة من الكربون في شكل أيونات بيكربونات، و9 في المائة في شكل أيونات كربونات، وما لا يتجاوز نحو 1 في المائة من الكربون في شكل ثاني أكسيد كربون ذائب. والنتائج من المختبرات والميدان، ودراسات النماذج فضلاً عن الأدلة المتوافرة من السجلات الجيولوجية، تبين بوضوح، أن النظم الإيكولوجية البحرية معرضة بدرجة كبيرة لزيادات في ثاني أكسيد كربون المحيطات وانخفاضات مقابلة في قيمة درجة الحموضة وأيونات الكربونات.

ولا يتفاعل تغير المناخ وتحمض المحيطات البشري المنشأ بصورة منفصلة. ففي حين أن ثاني أكسيد الكربون الذي تمتصه المحيطات لا يسهم في الاحترار بفعل الاحتباس الحراري، فإن احترار المحيطات يقلل من ذوبان ثاني أكسيد الكربون في المياه البحرية ومن ثم يخفض من كمية ثاني أكسيد الكربون التي يمكن أن تمتصها المحيطات من الغلاف الجوي. وعلى سبيل المثال فإنه في ظل تركيزات ثاني أكسيد الكربون المضاعفة من عصر ما قبل الصناعة، وزيادة درجتين مئويتين في درجات الحرارة، تمتص المياه البحرية نسبة تقل بنحو 10 في المائة من مجموع كمية الكربون (CT) عما كان يحدث دون زيادة في درجات الحرارة (قارن العمودين 4 و6 في الجدول 1)، إلا أن درجة الحموضة pH تظل دون تغيير. وعلى ذلك تقل قدرة المحيطات الأكثر احتراراً على إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي ومع ذلك تظل تتعرض لتحمض المحيطات. ويتمثل السبب في ذلك في أن البيكربونات تتحول إلى كربونات في المحيطات الأكثر احتراراً مما يؤدي إلى إطلاق أيونات الهيدروجين ومن ثم ثبات درجة الحموضة.



السؤال 3.3، الشكل 1 | سلاسل زمنية مبسطة للكسر الجزئي لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي في مرصد مونا لوا للغلاف الجوي (الخط الأحمر العلوي)، والضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون لسطح المحيط (pCO_2 ، الخط الأزرق الأوسط) ودرجة حموضة سطح المحيط (الخط الأخضر السفلي) في محطة ألوهة في شمال هاواي في شمال المحيط الهادئ شبه المداري للفترة من 1990 إلى 2011 (نقلا عن Doney وآخرين، 2009، وبيانات من Dore وآخرين، 2009). وتشير النتائج إلى أن تغير الضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون pCO_2 في سطح المحيط يتفق بصورة عامة مع الزيادة في الغلاف الجوي إلا أنه أكثر تغيراً بالنظر إلى المستوى الواسع النطاق للتقلبية فيما بين السنوات للعمليات المحيطية.

السؤال 3.3، الجدول 1 | درجة حموضة المحيطات والتغيرات في بارامترات نظام الكربون في مياه السطح لتضاعف ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي قبل عصر الصناعة مع درجتين مئويتين من الاحترار.

البارامترات	عصر ما قبل الصناعة (280 جزءاً في المليون من الحجم) 20 درجة مئوية	2 x عصر ما قبل الصناعة (560 جزءاً في المليون من الحجم) 20 درجة مئوية	(نسبة التغير مقابل عصر ما قبل الصناعة)	2 x عصر ما قبل الصناعة (560 جزءاً في المليون من الحجم) 22 درجة مئوية	(نسبة التغير مقابل عصر ما قبل الصناعة)
درجة الحموضة (pH)	8.1714	7.9202	–	7.9207	–
أيونات الهيدروجين (واحد من مليون جزئ جرامي لكل كجم)	6.739×10^{-9}	1.202×10^{-8}	(78.4)	1.200×10^{-8}	(78.1)
ثاني أكسيد الكربون (الذائب) (واحد من مليون الجزئ الجرامي لكل كجم)	9.10	18.10	(98.9)	17.2	(89.0)
أيون البيكربونات (واحد من مليون جزئ جرامي لكل كجم)	1723.4	1932.8	(12.15)	1910.4	(10.9)
أيون الكربونات (واحد من مليون من الجزئ الجرامي لكل كجم)	228.3	143.6	(37.1–)	152.9	(33.0–)
مجموع الكربون (واحد من مليون من الجزئ الجرامي لكل كجم)	1960.8	2094.5	(6.82)	2080.5	(6.10)

ملاحظات:

أ $CO_{2(aq)} =$ ثاني أكسيد الكربون الذائب، $H_2CO_3 =$ حمض الكربونيك، $HCO_3^- =$ أيون بيكربونات، $CO_3^{2-} =$ أيون كربونات، $G_T =$ مجموع كمية الكربون، $CO_3^{2-} + HCO_3^- + CO_{2(aq)}$

السؤال 4.1 | كيف يتغير الجليد البحري في منطقتي القطب الشمالي والقطب الجنوبي؟

للغطاء الجليدي البحري على محيط القطب الشمالي والمحيط الجنوبي حول القارة القطبية الجنوبية خواص مختلفة، ويظهران تغيرات مختلفة بمرور الوقت. وكان هناك خلال السنوات الأربع والثلاثين الماضية (1979-2012) اتجاه تغير هبوطي يبلغ 3.8 في المائة في العقد في المتوسط السنوي لحجم الجليد البحري في القطب الشمالي. وقد انخفض متوسط السمك الشتوي للجليد البحري للمحيط المتجمد الشمالي بما يقرب من 1.8 متر فيما بين 1978 و2008، وتقلص الحجم الكلي (الكتلة) للجليد البحري في القطب الشمالي في جميع أوقات السنة. ويعزى الانخفاض الأكثر سرعة في رقعة الجليد البحري في الحد الأدنى الصيفي إلى هذه التغيرات. وعلى العكس من ذلك، أظهرت الرقعة الإجمالية للجليد البحري للقطب الجنوبي، خلال فترة الأربعة والثلاثين عاما نفسها، زيادة طفيفة بلغت 1.5 في المائة في العقد، إلا أن هناك اختلافات إقليمية شديدة في التغيرات حول القطب الجنوبي. ونظرا إلى أن قياسات سمك الجليد البحري في منطقة القطب الجنوبي قليلة لدرجة يتعذر معها تقدير ما إذا كان حجمها الكامل (كتلتها الكاملة) ينخفض باطراد أم أنه يتزايد.

ويقع جزء كبير من مجموع غطاء الجليد البحري في القطب الشمالي فوق خط عرض 60 درجة شمالاً (السؤال 4.1، الشكل 1)، وتحيط به الأرض من الجنوب مع فتحات إلى أرخبيل القطب الشمالي الكندي وبحار بيرنغ وبارينتس وغرينلاند. ويظل بعض الجليد في حوض القطب الشمالي قائماً لعدة فصول، ويتزايد سمكه نتيجة لتجمد المياه البحرية عند القاعدة والتشوهات (الارتفاعات المتفاوتة والطوافات). ولا يزداد سمك الجليد البحري الموسمي إلا بمقدار مترين، إلا أن الجليد البحري الذي يزيد عمره عن عام واحد (الجليد الدائم) يمكن أن يزداد سمكه إلى عدة أمتار. وينجرف الجليد البحري في القطب الشمالي داخل الحوض مدفوعاً بالرياح والتيارات المحيطية. يغلب على متوسط نمط الانجراف نمط الدوران في اتجاه حسب حركة عقارب الساعة في غربي منطقة القطب الشمالي وتيار الانجراف القطبي الذي ينقل الجليد البحري السيبيري عبر القطب الشمالي ويصدره من الحوض عن طريق مضيق فرام.

وقد تمت السواتل ذات القدرة على التمييز بين الجليد والمياه المفتوحة صورة عن التغيرات في غطاء الجليد البحري. ومنذ عام 1979، انخفض المتوسط السنوي لرقعة الجليد في القطب الشمالي بنسبة 3.8 في المائة للعقد. وكان الانخفاض في الرقعة في نهاية الصيف (أواخر أيلول / سبتمبر) أكبر من ذلك بنسبة 11 في المائة للعقد، ووصل إلى انخفاض قياسي في 2012. وقد انخفض متوسط العقد لرقعة الحد الأدنى للغطاء الجليدي في القطب الشمالي في أيلول / سبتمبر في كل عقد منذ أن بدأت سجلات السواتل. وتشير سجلات الغوصات والسواتل إلى أن سمك جليد القطب الشمالي ومن ثم الحجم الكلي آخذ في التناقص أيضاً. وتسهم التغيرات في الكميات النسبية للجليد الدائم والموسمي في إحداث خفض في حجم الجليد. وعبر سجل الأربعة والثلاثين عاماً، فقد ما يقرب من 17 في المائة من هذا النوع من الجليد البحري بفعل الأنصهار والانتقال إلى خارج الحوض منذ 1979، و40 في المائة منذ 1999. وفي حين أن رقعة غطاء الجليد البحري للقطب الشمالي قد تتباين من عام لآخر نتيجة لتغير الإنتاج الموسمي، فإن نسبة الجليد الدائم الكثيف ومجموع حجم الجليد البحري لا يمكن أن تنتعش إلا ببطء.

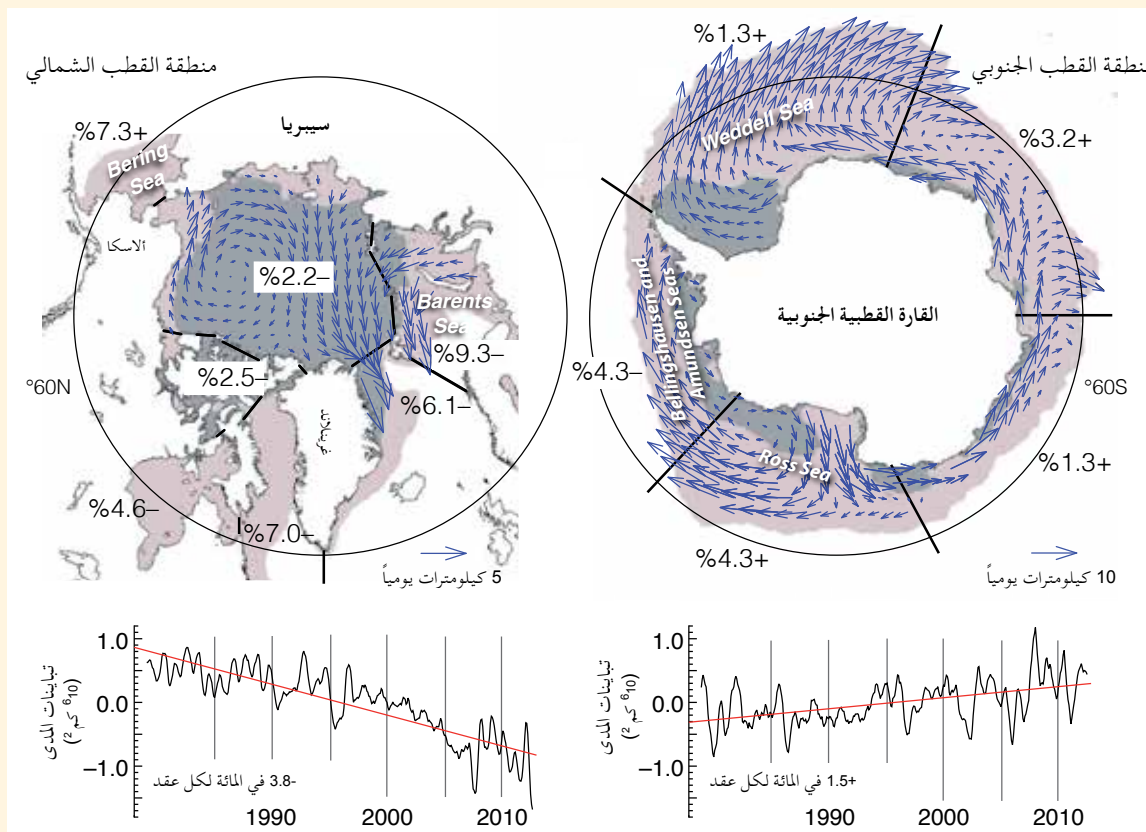
وخلافاً للقطب الشمالي، فإن غطاء الجليد البحري حول القطب الجنوبي مقيد بخطوط العرض شمال خط عرض 78 درجة جنوباً بسبب وجود الكتلة الأرضية القارية. ورقعة الجليد البحري بمنطقة القطب الجنوبي موسمية إلى حد كبير حيث لا يزيد متوسط السمك عن متر واحد واحد في وقت وصول الجليد إلى أقصى رقعة في أيلول / سبتمبر. ولا يتبقى سوى جزء صغير من الغطاء الجليدي في الحد الأدنى الصيفي في شباط / فبراير، ولا يتجاوز عمر الجليد البحري للقطب الجنوبي أكثر من عامين إلا بالنسبة لكميات ضئيلة للغاية. وتعرض حافة الجليد للمحيطات المفتوحة، ويزيد معدل سقوط الثلوج على الجليد البحري للقطب الشمالي عن ذلك الذي يهبط في القطب الجنوبي. وعندما تكفي حمولة الثلج الناتجة عن سقوط الثلوج لضغط سطح الجليد إلى ما دون مستوى سطح البحر، تغلغل المياه البحرية في قاعدة تراكم الثلوج، ويتشكل الثلج - الجليد عندما تتجمد الثلوج الذائبة. وعلى ذلك يسهم تحول الثلوج إلى جليد (فضلاً عن التجميد القاعدي من قبيل ذلك الذي يحدث في القطب الشمالي) في الزيادة الموسمية في سمك الجليد والحجم الكلي للجليد في القطب الجنوبي. وتكون الثلوج - الجليد عرضة للتغيرات في التساقط ومن ثم التغيرات في المناخ الإقليمي. وتظل نتائج التغيرات في معدل التساقط على سمك الجليد البحري للقطب الجنوبي مجالاً تتركز عليه البحوث.

ومساحة الغطاء الجليدي البحري للقطب الجنوبي عبر خطوط العرض شديدة التغير، لكونها غير مقيدة بحدود برية. ففي غرب ساحل القطب الجنوبي، يسود انجراف الجليد البحري من الشرق إلى الغرب، أما في الشمال، فيتم الانجراف من الغرب إلى الشرق، وهو شديد التباين، إذ يمكن مشاهدة أنماط دوران مختلفة باتجاه حركة عقارب الساعة في بحري ويديل وروس في حين أن الدوران يكون أكثر تغيراً حول شرق القارة القطبية الجنوبية. ويتحكم الانجراف المتباين جزئياً في الامتداد الشمالي للغطاء الجليدي البحري الذي يؤدي في أشهر الشتاء إلى تكوين جليد جديد في مناطق المياه المفتوحة بصفة دائمة (الفجوات الساحلية) على طول الخطوط الساحلية، وتسفر هذه المناطق الخاصة بتكوين الجليد عن مياه محيطية أكثر ملوحة وكثافة، وتصبح أحد المصادر الرئيسية لأكثر المياه عمقاً في محيطات العالم.

وخلال نفس فترة الأربعة والثلاثين عاماً من سجل السواتل، زادت المساحة السنوية للجليد البحري في منطقة القطب الجنوبي بنحو 1.5 في المائة في كل عقد. غير أن هناك اختلافات في اتجاهات التغير فيما بين الأقاليم، إذ تنحسر الرقعة في بحري بلينجشاوسن وأمنسن وتزيد بدرجة كبيرة في بحر روس الذي يسيطر على الاتجاهات الشامل. على أن من غير المؤكد ما إذا كانت الزيادة الشاملة الطفيفة في رقعة الجليد

البحري في القطب الجنوبي يمكن أن تستخدم كمؤشر معقول على المناخ لأنها تختلف من عام لآخر ومن مكان لآخر حول القارة. وتشير نتائج من إحدى الدراسات التي أجريت مؤخراً إلى أن هذه الاتجاهات المتعارضة في رقعة الغطاء الجليدي قد تكون ناتجة عن التغير في سرعات الرياح الإقليمية وأنماطها. ومن المتعذر، دون توافر تقديرات أفضل عن سمك الجليد وحجمه، تحديد كيفية استجابة الغطاء الجليدي البحري في القطب الجنوبي للمناخ المتغير أو تحديد البارامترات المناخية الأكثر تأثيراً.

وهناك اختلافات كبيرة في البيئة والعمليات الفيزيائية التي تؤثر في حالة الغطاء الجليدي البحري في كل من القطب الشمالي والمنطقة القطبية الجنوبية، وتسهم في استجاباتها غير المتماثلة لتغير المناخ. وقد قدم السجل الطويل والمستمر دون انقطاع للرصدات المأخوذة من السواحل صورة واضحة للانحسار في الغطاء الجليدي البحري في القطب الشمالي إلا أن الأدلة المتوافرة تمنعنا من إصدار بيانات مؤكدة عن التغيرات الشاملة في الجليد البحري في منطقة القطب الجنوبي وأسبابها.



السؤال 4.1، الشكل 1 | متوسط نمط الدوران في الجليد البحري والتغيرات العقدية (كنسبة مئوية) للتباينات السنوية في مساحة الجليد (أي بعد إزالة الدورة الفصلية) في مختلف قطاعات منطقة القطب الشمالي والقارة القطبية الجنوبية. وتبين الأسهم الاتجاه المتوسط لانجراف الجليد وحجمه. ويظهر متوسط الغطاء الجليدي البحري للفترة من 1979 حتى 2012، من رصدات السواحل برقعته القصوى (والدنيا) في التظليل البرتقالي (الرمادي).

السؤال 4.2 | هل الأنهار الجليدية آخذة في الاختفاء في المناطق الجبلية؟

تختفي الأنهار الجليدية، في الكثير من السلاسل الجبلية حول العالم، استجابة للزيادات في درجات حرارة الغلاف الجوي خلال العقود السابقة. وقد أبلغ عن اختفاء الأنهار الجليدية في الجبال الكندية وجبال الروكي في المنطقة القطبية الشمالية، وفي جبال الأنديز، وباتاجونيا، وجبال الألب الأوروبية، وتين شان، والجبال المدارية في أمريكا الجنوبية، وأفريقيا وآسيا وفي مناطق أخرى. فقد اختفى من هذه المناطق أكثر من 600 نهر جليدي خلال العقود الماضية. وسوف يختفي الكثير من الأنهار الجليدية الأخرى حتى وإن لم يحدث المزيد من الاحترار. كما أن من المحتمل أن تفقد بعض السلاسل الجبلية معظم، إن لم يكن جميع، أنهارها الجليدية.

وفي جميع المناطق الجبلية التي يوجد بها أنهار جليدية حالياً، تقلص حجم الأنهار الجليدية بدرجة كبيرة خلال المائة والخمسين عاماً الماضية. وخلال تلك الفترة، اختفى الكثير من الأنهار الجليدية الصغيرة. ومع بعض الاستثناءات المحلية القليلة، انتشر بالفعل تقلص الأنهار الجليدية (انخفضت في المساحة والحجم) على الصعيد العالمي، وكان الانخفاض شديداً على وجه الخصوص خلال أربعينيات القرن الماضي، ومنذ ثمانينياته. غير أن هناك أيضاً بعض المراحل التي اتسمت بالاستقرار النسبي خلال تسعينات القرن قبل الماضي، وعشرينيات القرن الماضي، وسبعينيات القرن الماضي على النحو الذي تبينه القياسات الطويلة الأجل للتغيرات في الطول، ونمذجة التوازن الكتلي. وتوفر القياسات التقليدية في المواقع الطبيعية، وبصورة مطردة القياسات المحملة جواً والسواحل - أدلة مؤكدة في معظم المناطق الحافلة بالأنهار الجليدية على أن معدل الانخفاض في مساحة الأنهار الجليدية كان أعلى في العقدين الماضيين مما كان عليه في السابق، وأن الأنهار الجليدية مستمرة في التقلص. غير أن الأنهار الجليدية، في بعض المناطق، تتصرف بطريقة مختلفة، فإزدادت رغم أن معظم الأنهار الجليدية الأخرى كانت تنحسر (مثل تلك الواقعة على سواحل نيوزيلندا، والنرويج وجنوبي باتاجونيا (شيلي) أو سلسلة جبال كاراكورام في آسيا). وبصفة عامة فإن حالات الزيادة هذه كانت نتيجة لظروف تضاريسية و/أو مناخية خاصة (مثل زيادة كميات الأمطار).

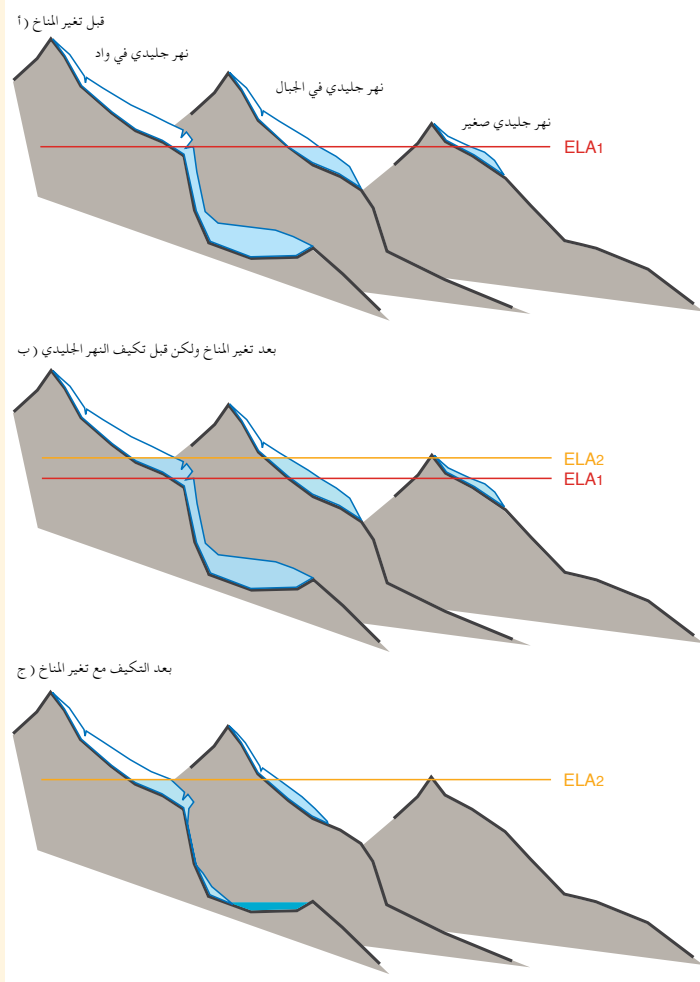
وقد يستغرق نهر جليدي عدة عقود لكي يعدل رقبته وفقاً للتغير الآني في المناخ، وعلى ذلك فإن معظم الأنهار الجليدية أكبر في الوقت الحاضر مما قد تكون عليه عندما يتحقق التوازن مع المناخ الجاري. ونظراً لأن الوقت اللازم للتعديل يتزايد مع زيادة حجم النهر الجليدي، فإن الأنهار الجليدية الكبيرة سوف تواصل التقلص خلال العقود القليلة القادمة حتى إذا استقرت درجات الحرارة. وستواصل الأنهار الجليدية الصغيرة أيضاً تقلصها إلا أنها سوف تعدل رقبته وانحدارها بصورة أسرع، وسوف يختفي الكثير منها نهائياً في نهاية المطاف.

ويؤثر الكثير من العوامل في تطوير كل نهر جليدي في المستقبل وما إذا كان سيختفي: مثل حجمه ونطاق ارتفاعه، وتوزيع المساحة مع الارتفاع، وخواص سطحه (مثل كمية الحطام الصخري التي تغطيه). وتباين هذه العوامل تبايناً شاسعاً من منطقة لأخرى، وفيما بين الأنهار الجليدية المتجاورة كذلك. كما أن العوامل الخارجية، مثل الطبوغرافيا المحيطة والنظام المناخي، مهمة أيضاً لتطور النهر الجليدي في المستقبل. ويستجيب كل نهر جليدي خلال نطاقات زمنية قصيرة (عقد أو عقدان) لتغير المناخ بصورة منفردة وبشكل مختلف في التفاصيل.

وخلال الفترات الأطول من نحو 50 عاماً، تكون الاستجابة أكثر اتساقاً، وأقل اعتماداً على التفاصيل البيئية مما يعني أن بالإمكان نمذجة الاتجاهات الطويلة الأجل في تطور النهر الجليدي بصورة جيدة. وتقام هذه النماذج على أساس فهم المبادئ الفيزيائية الأساسية. وعلى سبيل المثال، فإن حدوث زيادة في المتوسط المحلي لدرجة حرارة الهواء دون تغيير في كميات الأمطار سوف يتسبب في تحول إلى أعلى في ارتفاع خط التوازن (ELA) (انظر المسرد) بنحو 150 متراً عن كل درجة مئوية في احترار الغلاف الجوي. ويبين السؤال 4.2، الشكل 1 هذا التحول إلى أعلى ونتائجه بالنسبة للأنهار الجليدية ذات نطاقات أحجام وارتفاعات مختلفة.

وفي البداية، يكون جميع الأنهار الجليدية منطقة تراكم (اللون الأبيض) فوق ارتفاع خط التوازن، ومنطقة ذوبان حراري (أزرق فاتح) تحت هذا الارتفاع (السؤال 4.2، الشكل 1 أ). ومع تحول ارتفاع خط التوازن (ELA) إلى أعلى، تتقلص مساحة التراكم وتوسع مساحة الذوبان الحراري، ومن ثم تزيد المساحة التي يفقد فيها الجليد من خلال الانصهار (السؤال 4.2، الشكل 1 ب). ويسفر هذا الخلل في الاتزان عن فقد شامل للجليد. وبعد عدة سنوات تتراجع مقدمة النهر الجليدي وتتقلص مساحة الذوبان الحراري إلى أن يعدل النهر الجليدي من رقبته وفقاً للمناخ الجديد (السؤال 4.2، الشكل 1 ج). وحيثما يكون تغير المناخ قوياً بدرجة تكفي لرفع مستوى خط التوازن بصورة دائمة فوق أعلى نقطة في مجرى النهر الجليدي (السؤال 4.2، الشكل 1 ب إلى اليمين) يختفي النهر الجليدي نهائياً في نهاية المطاف (السؤال 4.2، الشكل 1 ج إلى اليمين). وسوف تتقلص الأنهار الجليدية المرتفعة، التي تحتفظ بمناطق التراكم الخاصة بها، إلا أنها لن تختفي (السؤال 4.2، الشكل 1 ج إلى اليسار والوسط). وقد تفقد الأنهار الجليدية للوديان الشاسعة الكثير من ألسنتها حيث تترك على الأرجح بحيرة في مكانها (السؤال 4.2، الشكل 1 ج إلى اليسار). وبجانب درجة حرارة الهواء، تؤثر التغيرات في كمية وموسمية الأمطار كذلك في التحول في خط التوازن. وتضطلع ديناميكية النهر الجليدي (مثل سرعة التدفق) بدور إلا أنه لم يعالج في هذا المخطط المبسط.

وقد أكد الكثير من الرصدات أن الأنواع المختلفة من الأنهار الجليدية تستجيب بشكل مختلف لتغير المناخ الأخير. فعلى سبيل المثال، فإن الألسنة السطحية المنخفضة في الأنهار الجليدية للوديان الشاسعة (كما في ألاسكا وكندا أو الألب) تظهر حالياً أشد الخسائر في الكتلة بصورة مستقلة إلى حد كبير عن أي جانب أو التظليل أو الغطاء الركامي. ويتباطأ هذا النوع من الأنهار الجليدية في تعديل نطاقه وفقاً للظروف المناخية الجديدة، ويتصرف بالدرجة الأولى بتقليل السمك دون حدوث تراجع كبير في نهايته. وعلى العكس من ذلك، فإن الأنهار الجليدية الصغيرة في الجبال، التي لها انحدارات ثابتة تقريباً، تتعدل بسرعة أكبر وفقاً للمناخ الجديد عن طريق تغيير حجم منطقة الذوبان الحراري بقدر أكبر من السرعة (السؤال 4.2، الشكل 1 ج في الوسط).



السؤال 4.2، الشكل 1 | رسم تخطيطي لثلاثة أنواع من الأنهار الجليدية موجودة على ارتفاعات مختلفة واستجابتها للتحويل إلى أعلى في ارتفاع خط التوازن (ELA). (أ) بالنسبة لمناخ معين، يكون لخط التوازن ارتفاع محدد (ELA1)، وجميع الأنهار الجليدية حجم محدد. (ب) نتيجة لارتفاع درجة الحرارة، يتحول ارتفاع خط التوازن إلى أعلى لاتخاذ ارتفاع جديد (ELA2). ويسفر ذلك في البداية عن انخفاض في منطقة التراكم وزيادة في مناطق الذوبان الحراري لجميع الأنهار الجليدية. (ج) بعد أن تكيف حجم النهر الجليدي وفقاً لارتفاع خط الاتزان الجديد، يفقد النهر الجليدي للوادي لسانه، (إلى اليسار)، وتختفي الأنهار الجليدية الصغيرة كلية (إلى اليمين).

وباختصار، فإن مصير الأنهار الجليدية سيكون متبائناً بحسب كل من الخواص النوعية، والظروف المناخية في المستقبل. وسوف يختفي المزيد من الأنهار الجليدية، وتفتقد أنهار جليدية أخرى معظم أجزائها السفلية، وقد لا تتغير أنهار أخرى بصورة كبيرة. وحيثما يكون ارتفاع خط التوازن في أعلى ارتفاع بالفعل على نهر جليدي معين، من المحتم أن يختفي هذا النهر بالكامل ما لم يبرد المناخ. كما أن جميع الأنهار الجليدية سوف تختفي في الأقاليم التي يزيد فيها ارتفاع خط التوازن عن أعلى ارتفاع في المستقبل.

وقد أكد الكثير من الرصدات أن الأنواع المختلفة من الأنهار الجليدية تستجيب بشكل مختلف لتغير المناخ الأخير. فعلى سبيل المثال، فإن الألسنة السطحية المنخفضة في الأنهار الجليدية للوديان الشاسعة (كما في ألاسكا وكندا أو الألب) تظهر حالياً أشد الخسائر في الكتلة بصورة مستقلة إلى حد كبير عن أي جانب أو التظليل أو الغطاء الركامي. ويتباطأ هذا النوع من الأنهار الجليدية في تعديل نطاقه وفقاً للظروف المناخية الجديدة، ويتصرف بالدرجة الأولى بتقليل السمك دون حدوث تراجع كبير في نهايته. وعلى العكس من ذلك، فإن الأنهار الجليدية الصغيرة في الجبال، التي لها انحدارات ثابتة تقريباً، تتعدل بسرعة أكبر وفقاً للمناخ الجديد عن طريق تغيير حجم منطقة الذوبان الحراري بقدر أكبر من السرعة (السؤال 4.2، الشكل 1 ج في الوسط).

ويمكن أن تتحدد الاستجابة الطويلة الأجل لمعظم أنواع الأنهار الجليدية بصورة جيدة للغاية بالأسلوب المبين في السؤال 4.2، الشكل 1. غير أن نمذجة استجابة الأنهار الجليدية في المدى القصير أو الاستجابة الطويلة الأجل للأنواع الأكثر تعقيداً من الأنهار الجليدية (مثل تلك التي يغطيها ركام كثيف، وتغذيها ثلوج الانهيارات ولها مساحات تراكم غير مترابطة، ومن النمط العرامي أو تنفصل منها كتل جليدية إلى المياه) فهي أمر صعب. وتتطلب هذه الحالات معارف مفصلة عن خواص الأنهار الجليدية الأخرى مثل التوازن الكتلي، وتوزيع سمك الجليد والهيدرولوجية الداخلية. ولا تتوافر هذه البيانات بالنسبة لمعظم الأنهار الجليدية في أنحاء العالم، ومن ثم يمكن وضع تقدير تقريبي فقط لاستجابتها لتغير المناخ من خلال المخطط المبين في السؤال 4.2، الشكل 1.

وتتضمن سلسلة جبال كاراكورام والهمالايا، مثلاً، طائفة عريضة من أنواع الأنهار الجليدية والظروف المناخية، وما زالت خصائص هذه الأنهار غير معروفة على نحو جيد. ويؤدي ذلك إلى أن يسود عدم اليقين بصورة خاصة تطور هذه الأنهار في المستقبل. غير أن من المتوقع أن تضيق الثغرات في المعرفة بدرجة كبيرة خلال السنوات القادمة وذلك بفضل زيادة استخدام البيانات الساتلية (مثل تجميع عمليات حصر الأنهار الجليدية أو استخلاص سرعات التدفق)، وتوسع شبكات القياس الأرضية القاعدة.

السؤال 5.1 | هل تمثل الشمس قوة محرك رئيسية للتغيرات الحديثة في المناخ؟

يمثل مجموع الأشعة الشمسية (TSI) (الفصل 8) مقياساً لمجموع الطاقة التي تصل من الشمس عند قمة الغلاف الجوي. وتباين هذه الطاقة تبايناً شاسعاً من مستويات زمنية من بلايين السنين حتى بضعة أيام قليلة وإن كانت التباينات صغيرة نسبياً خلال المائة والأربعين عاماً الماضية. وتعد التغيرات في الأشعة الشمسية محركاً مهماً للتقلبية المناخية (الفصل الأول: الشكل 1.1) ومنها الإنبعاثات البركانية والعوامل البشرية المنشأ. وعلى ذلك، فهي تساعد في تفسير التغير المرصود في درجات الحرارة السطحية العالمية خلال فترة استخدام الأجهزة (السؤال 5.1، الشكل 1؛ الفصل العاشر)، وخلال الألفية الأخيرة. وفي حين أنه قد يكون للتقلبية الشمسية إسهام ملموس في التغيرات في درجات الحرارة السطحية العالمية في أوائل القرن العشرين، فإنه لا يمكن أن تفسر الزيادة المرصودة منذ أن بدأ قياس مجموع الأشعة الشمسية بصورة مباشرة عن طريق السواتل في أواخر سبعينيات القرن الماضي (الفصلان 8 و 10).

وقلب الشمس عبارة عن مفاعل انشطار نووي ضخم يحول الهيدروجين إلى هليوم. وتنتج هذه العملية طاقة تُشع في أنحاء النظام الشمسي في شكل إشعاع كهرومغناطيسي. وتباين كمية الطاقة التي تصيب قمة الغلاف الجوي للأرض بحسب توليد الطاقة الكهرومغناطيسية وانبعاثها بواسطة الشمس وعلى المسار المداري للأرض حول الشمس.

وقد قامت الأجهزة المعتمدة على السواتل بإجراء قياس مباشر لمجموع الأشعة الشمسية منذ 1978، وأشارت إلى أن نحو 1361 واط/م² تصل إلى أعلى الغلاف الجوي للأرض. ويعمل سطح الأرض وتلوث الهواء والسحب في الغلاف الجوي كمرآة وتُعكس نحو 30 في المائة من هذه الطاقة إلى الفضاء. وتسجل مستويات عالمية من مجموع الأشعة الشمسية عندما تكون الشمس أكثر نشاطاً. وتتبع التباينات في إشعاع دورة البقع الشمسية البالغة نحو 11 عاماً: وخلال الدورات الأخيرة، تباين مجموع الأشعة الشمسية (TSI) بمتوسط يبلغ نحو 0.1 في المائة.

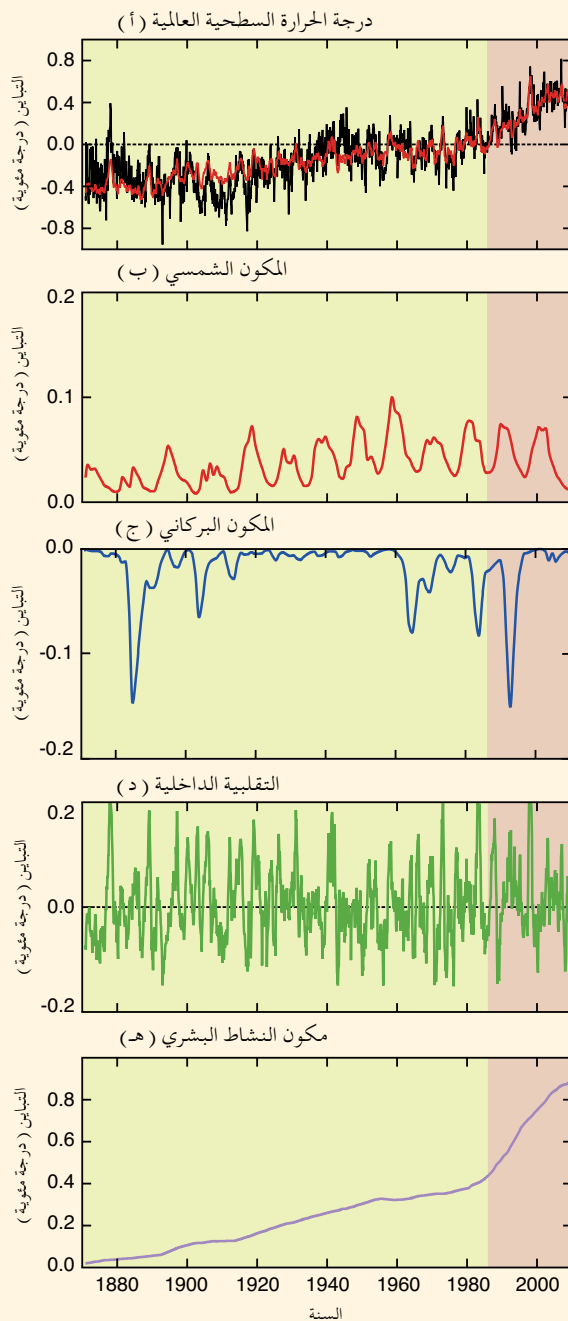
ويتعين وضع تقديرات لمجموع الأشعة الشمسية، لفترة ما قبل السواتل، من خلال أعداد البقع الشمسية (إلى عام 1610) أو من النظائر المشعة التي تتكون في الغلاف الجوي وتحفظ في الجليد القطبي وحلقات النمو الشجري. ويشار عادة إلى فترات السنوات الخمسين إلى المائة التي يحدث فيها انخفاض شديد في النشاط الشمسي مثل الحد الأدنى لماوندر فيما بين 1715 و1945 — باعتبارها الحد الأدنى الشمسي الكبير. وتكون معظم تقديرات التغيرات في مجموع الأشعة الشمسية فيما بين الحد الأدنى لماوندر والوقت الحالي في حدود 0.1 في المائة مثل قدرة تقلبية السنوات الإحدى عشرة.

كيف يمكن إذاً أن تساعد التقلبية الشمسية في تفسير سجل درجات الحرارة السطحية العالمية التي تعود إلى عام 1870؟ من المهم للإجابة عن هذا السؤال أن يكون مفهوماً أن هناك أيضاً محركات مناخية أخرى مشاركة وينتج كل منها أنماطاً مميزة للاستجابات المناخية الإقليمية. غير أن مجموع هذه المحركات كلها هو الذي يسبب تغير المناخ الملاحظ. والتقلبية الشمسية والثورات البركانية من العوامل الطبيعية. وتتضمن العوامل البشرية المنشأ (الناجمة عن الأنشطة البشرية)، من ناحية أخرى، التغيرات في تركيزات غازات الاحتباس الحراري، وانبعاثات تلوث الهواء المشاهدة (الهباء الجوي) وغير ذلك من المواد الناشئة عن الأنشطة البشرية. وتشير «التقلبية الداخلية» إلى التقلبات داخل النظام المناخي الناشئة من قبيل تقلبية الطقس أو بعض الظواهر الأخرى مثل التذبذب الجنوبي — النينيو.

وتتغير الإسهامات النسبية للعوامل الطبيعية والعوامل البشرية المنشأ بمرور الوقت. وبين السؤال 5.1، الشكل 1 تلك الإسهامات استناداً إلى حساب بسيط بدرجة كبيرة حيث تمثل تباينات متوسط درجات الحرارة السطحية العالمية كمية المكونات الأربعة التي تتصل خطياً بالقوى الشمسية والبركانية والقوى البشرية المنشأ وبالتقلبية الداخلية. وقد زادت درجة الحرارة السطحية العالمية بما يقرب من 0.8 درجة مئوية من 1870 إلى 2010 (السؤال 5.1، الشكل 1 أ). غير أن هذه الزيادة لم تكن متجانسة في بعض الأوقات، فالعوامل التي تبرد من سطح الأرض — الثورات البركانية، وانخفاض النشاط الشمسي، ومعظم انبعاثات الهباء الجوي البشرية المنشأ — خاصة التي يزيد تأثيرها عن تأثير العوامل التي تصيبه بالاحتراق، مثل غازات الاحتباس الحراري، وتسبب التقلبية الناشئة داخل النظام المناخي في إحداث المزيد من التباينات غير المتصلة بالتأثيرات الخارجية.

وتسيطر على المساهمة الشمسية في سجل التغير في درجات الحرارة السطحية العالمية الدورة الشمسية التي تحدث كل 11 عاماً والتي يمكن أن تفسر التقلبات في درجة الحرارة العالمية حتى ما يقرب من 0.1 درجة مئوية فيما بين الدرجات الدنيا والقصوى (السؤال 5.1، الشكل 1 ب). وقد يكون اتجاه التغير المتزايد الطويل الأجل للنشاط الشمسي في أوائل القرن العشرين قد عزز الاحتراق الذي سجل خلال تلك الفترة، بجانب التقلبية الداخلية والزيادات في غازات الاحتباس الحراري، والفجوات في النشاط البركاني. غير أن هذا لا يمكن أن يفسر الزيادة المرصودة منذ أواخر سبعينيات القرن الماضي، ولا حتى حدوث انخفاض طفيف في تغير مجموع الأشعة الشمسية من 1986 إلى 2008 (الفصلان 8 و 10).

وتسهم الثورات البركانية في التغير في درجات الحرارة السطحية العالمية باطلاق الهباء الجوي من وقت لآخر في الغلاف الجوي، مما يؤدي إلى تبريد سطح الأرض (السؤال 5.1، الشكل 1 ج). إذ إن الثورات البركانية الكبيرة مثل ثورة جبل بيناتوبو في 1991 يمكن أن تبرد سطح الأرض بنحو 0.1 إلى 0.3 درجة مئوية لفترة تصل إلى ثلاث سنوات.



ويتمثل أهم مكون في تقلبية المناخ الداخلية في التذبذب الجنوبي - النينيو الذي له تأثير كبير على التقلبات من عام لآخر في درجة الحرارة المدارية ومتوسط الحرارة العالمية (السؤال 5.1، الشكل 1 د). وقد وجهت درجات حرارة سنوية مرتفعة نسبياً خلال ظواهر النينيو مثل تلك التي حدثت خلال الفترة 1997-1998.

وتجسد تقلبية درجات الحرارة السطحية العالمية المرصودة من 1870 إلى 2010 (الشكل 1 أ) التأثيرات المجتمعة للعوامل الطبيعية (الشمسية والبركانية والداخلية، السؤال 5.1، الشكل 1 ب - د)، التي تضاف إلى اتجاه التغير نحو الاحترار متعدد العقود نتيجة للعوامل البشرية المنشأ (السؤال 5.1، الشكل 1 هـ).

وقبل عام 1870، عندما كانت الانبعاثات البشرية المنشأ من غازات الاحتباس الحراري والهباء الجوي أصغر حجماً، وكانت التغيرات في النشاط الشمسي والبركاني والتقلبية الداخلية تضطلع بدور أكثر أهمية وإن كانت الإسهامات المحددة لهذه العوامل الفردية في درجات الحرارة السطحية العالمية أقل يقينية. وكانت القيم الشمسية الدنيا التي تستمر عدة عقود ترتبط في كثير من الأحيان بالأحوال الباردة. غير أن هذه الفترات تتأثر أيضاً في كثير من الأحيان بالثورات البركانية مما يتعذر معه وضع تقدير كمي للإسهام الشمسي.

وعلى النطاق الإقليمي، كانت التغيرات في النشاط الشمسي ترتبط بالتغيرات في المناخ السطحي ودوران الغلاف الجوي في مناطق المحيط الهندي - الهادي، وشمال آسيا، وشمال الأطلسي. وتشمل الآليات التي تضخم من التأثيرات الإقليمية للتقلبات الصغيرة نسبياً في مجموع الانبعاثات الشمسية في الدورة الشمسية التي تستغرق 11 عاماً تقريباً، التفاعلات الدينامية بين الغلاف الجوي العلوي والسفلي أو بين درجات حرارة سطح المحيطات والغلاف الجوي، ولها تأثير طفيف على متوسط درجات الحرارة العالمية (انظر الإطار 10.2).

وأخيراً فإن انخفاض النشاط الشمسي خلال الحد الأدنى للنشاط الشمسي السابق منذ بضع سنوات (السؤال 5.1، الشكل 1 ب) يطرح سؤالاً بشأن تأثيره على المناخ في المستقبل. وعلى الرغم من أوجه عدم اليقين بشأن النشاط الشمسي في المستقبل، تسود ثقة عالية بأن تأثيرات النشاط الشمسي في نطاق الحدود القصوى والدنيا الشمسية الكبيرة ستكون أقل بكثير من التغيرات الناشئة عن التأثيرات البشرية المنشأ.

وأخيراً فإن انخفاض النشاط الشمسي خلال الحد الأدنى للنشاط الشمسي السابق منذ بضع سنوات (السؤال 5.1، الشكل 1 ب) يطرح سؤالاً بشأن تأثيره على المناخ في المستقبل. وعلى الرغم من أوجه عدم اليقين بشأن النشاط الشمسي في المستقبل، تسود ثقة عالية بأن تأثيرات النشاط الشمسي في نطاق الحدود القصوى والدنيا الشمسية الكبيرة ستكون أقل بكثير من التغيرات الناشئة عن التأثيرات البشرية المنشأ.

السؤال 5.2 | لماذا معدل التغير الحالي في مستوى سطح البحر غير معتاد؟

يعد معدل التغير العالمي في متوسط مستوى سطح البحر - الذي يبلغ متوسطه 1.7 ± 0.2 مم سنوياً للقرن العشرين بأكمله وما بين 2.8 و3.6 مم سنوياً منذ عام 1993 (الفصل 13) - أمراً غير معتاد في بيان التقلبات على مستوى القرن خلال الألفيتين الأخيرتين. غير أنه حدثت معدلات أسرع بكثير في التغيرات في مستوى سطح البحر خلال الفترات الأخيرة من التفكك السريع في الصفائح الجليدية مثل التحولات بين الفترات الجليدية وبين الجليدية. كما أن التأثيرات التكتونية الاستثنائية يمكن أن تحرك التغيرات المحلية البالغة السرعة في مستوى سطح البحر حيث تجاوزت المعدلات المحلية المعدلات العالمية الحالية للتغير.

ومن الشائع الاعتقاد بأن «مستوى سطح البحر» هو النقطة التي يلتقي فيها المحيط بالأرض. ويعرف علماء الأرض مستوى سطح البحر بأنه مقياس لوضع سطح البحر بالنسبة للأرض، وكلاهما قد يتحرك بالنسبة لمركز الأرض. ولذا فإن مقياس مستوى سطح البحر يجسد توليفة من العوامل الجيوفيزيائية والمناخية. فالعوامل الجيوفيزيائية التي تؤثر في مستوى سطح البحر تشمل هبوط اليابسة أو ارتفاعها وتعديلات التضاريس الجليدية - استجابة نظام الأرض - المحيطات للتغيرات في توزيع الكتلة على الأرض وخاصة مياه المحيطات والجليد الأرضي.

وتشمل التأثيرات المناخية التقلبات في درجات حرارة المحيطات التي تتسبب في تمدد أو تقلص مياه البحر، والتغيرات في حجم الأنهار الجليدية والصفائح الجليدية، والتحولات في التيارات المحيطية. وتنتج التغيرات المحلية والإقليمية في هذه العوامل المناخية والجيوفيزيائية انحرافات كبيرة في التقدير العالمي للمعدل المتوسط لتغير مستوى سطح البحر. وعلى سبيل المثال فإن مستوى البحر المحلي ينخفض بمعدل يقترب من 19 مم سنوياً على طول الساحل الشمالي للسويد (خليج بوتنيا) نتيجة للارتفاع الجاري الناجم عن الجليد القاري الذي انصهر بعد الفترة الجليدية الأخيرة. وعلى العكس من ذلك، ارتفع مستوى سطح البحار المحلية بمعدل يبلغ ~20 مم سنوياً من 1960 إلى 2005 في جنوب بانكوك وذلك بالدرجة الأولى استجابة للانخفاض الناجم عن إستخراج المياه الجوفية.

وبالنسبة لفترة المائة والخمسين عاماً الماضية، سجل التغير في مستوى سطح البحر في محطات قياس المد والجزر، وخلال العشرين عاماً الماضية بواسطة مقاييس الارتفاع الساتلية. وتتساق نتائج هاتين المجموعتين من البيانات بالنسبة للفترة المتداخلة. وقد يبدو المعدل المتوسط العالمي لارتفاع مستوى سطح البحر البالغ 1.7 ± 0.2 مم سنوياً خلال القرن العشرين خلال العقد الماضي - قد يكون صغيراً بالمقارنة برصدات تذبذبات الأمواج والمد والجزر حول العالم والتي قد تصل إلى أضعاف كثيرة لتلك القيمة في حدود حجم أكبر. غير أنه إذا استمرت هذه المعدلات لفترات زمنية طويلة، فإن الحجم ينطوي على نتائج مهمة بالنسبة للمناطق الساحلية المنخفضة الكثيفة السكان حيث يمكن أن تؤدي حتى زيادات صغيرة في مستوى سطح البحر إلى غمر مناطق أرضية شاسعة.

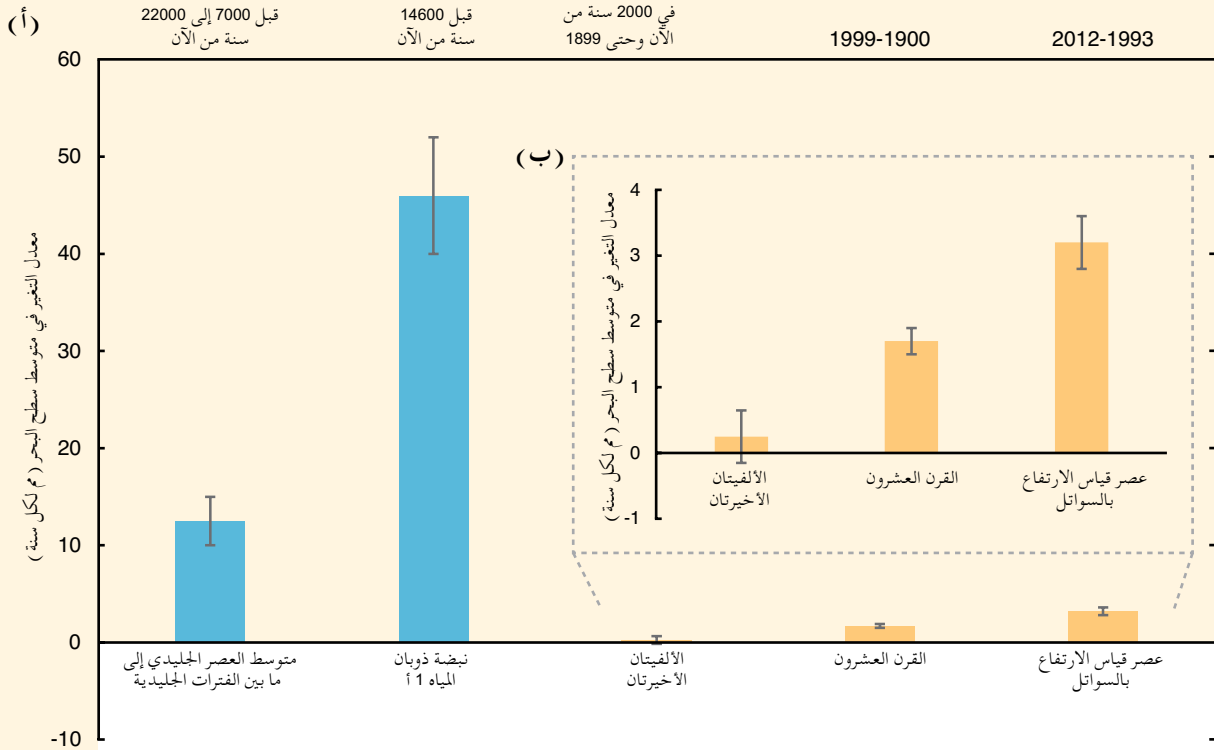
وقبل فترة استخدام الأجهزة، كانت المعدلات المحلية لتغير مستوى سطح البحر تقدر من القياسات غير المباشرة المسجلة في المحفوظات المتعلقة بالترسبات والصخور الأحفورية والمناطق الأثرية. وهذه السجلات غير المباشرة محدودة مكانياً وتجسد كلا من الظروف المحلية والعالمية. وتتعزز عملية استنباط الإشارات العالمية وإن كانت تلتحم في إشارة مشتركة عندما تتوافر السجلات غير المباشرة الفردية من مختلف الأوضاع البيئية. ومن الجدير بالملاحظة أن المحفوظات الجيولوجية - وخاصة تلك التي تعود إلى ما قبل نحو 20000 سنة - لا ترصد في معظم الظروف سوى تغير مستوى سطح البحر على مستوى آلاف السنين. ولذا فإن تقديرات معدلات التغير في مستوى سطح البحر على مستوى القرن تعتمد على المعلومات على مستوى الألفية، إلا أنه ينبغي أن يكون مفهوماً أن هذه البيانات لا تستبعد بالضرورة المعدلات الأسرع للتغيرات في مستوى سطح البحر على نطاق القرن.

وتتيح عمليات استنباط مستوى سطح البحر للألفيتين الأخيرتين فرصة لاستخدام السجلات غير المباشرة للتدخل مع فترة استخدام الأجهزة بل والامتداد لما بعدها. ويأتي مثال حدث مؤخراً من رواسب مستنقعات الملح على ساحل الأطلسي في الولايات المتحدة مقترنة باستنباط مستوى سطح البحر استناداً إلى بيانات مقياس المد والجزر وتنبؤات النماذج لتوثيق المعدل المتوسط للتغير في مستوى سطح البحر منذ أواخر القرن التاسع عشر البالغ 2.1 ± 0.2 مم سنوياً. ويتجاوز هذا الارتفاع على طول القرن أي معدل تغير آخر على مستوى القرن في السجل الكامل لعام 2000 لنفس هذا الجزء من الساحل.

وقد ووجهت، في بعض الأحيان، خلال الأطر الزمنية الأطول مدى، معدلات وقدرات أطول بكثير للتغيرات في مستوى سطح البحر. وأسفرت الدورات المناخية الجليدية، فيما بين الفترات الجليدية خلال السنوات البالغة 500000 الماضية عن تغييرات في مستويات سطح البحر العالمية تصل إلى نحو 120 إلى 140 متراً. وحدث قدر كبير من هذه التغيرات في مستوى سطح البحر خلال 10000 إلى 15000 سنة عند الانتقال من العصر الجليدي الكامل إلى عصر ما بين الفترات الجليدية بمعدلات متوسطة تتراوح بين 10 و15 مم سنوياً. ولم تستمر هذه المعدلات العالية إلا عندما كانت الأرض تخرج من فترات التجلد المتطرف عندما اتصلت صفائح الجليد الكبيرة بالمحيطات. وعلى سبيل المثال، فإنه خلال فترة الانتقال من الحدود القصوى الجليدية الأخيرة (منذ نحو 21000 سنة) إلى الفترات بين الجليدية الحالية (Holocene)، خلال فترة 11650 إلى 11650 سنة الأخيرة، أشارت رواسب الشعاب المرجانية الأحفورية إلى أن مستوى سطح البحر قد ارتفع فجأة بنحو 14 إلى 18 مم في أقل من 500 عام. ويعرف هذا الحدث بنهب ذوبان المياه 1 ألف حيث وصل معدل ارتفاع مستوى سطح البحر إلى أكثر من 40 مم سنوياً.

وتشير هذه الأمثلة من الأطر الزمنية الأطول مدى إلى أن معدلات التغير في مستوى سطح البحر كانت أكبر مما يرصد هذه الأيام إلا أنه يجب ألا يغيب عن البال أنها حدثت كلها في ظروف خاصة في أوقات التحول من عصر جليدي كامل إلى ظروف الفترات بين الجليدية؛ في أماكن مازالت تحدث فيها التأثيرات اللاحقة طويلة الأجل لهذه الفترات الانتقالية؛ في مواقع الاضطرابات التكتونية الرئيسية أو الدلتات الكبرى حيث يسيطر الهبوط الناشئ عن تراص الرواسب الذي يتعظم في بعض الأحيان نتيجة لإستخراج السوائل من الأرض.

ويؤيد السجل المستند إلى الأجهزة والمعلومات الجيولوجية النتيجة التي مفادها أن المعدل الحالي لمتوسط التغير العالمي في مستوى سطح البحر غير معتاد بالمقارنة بذلك الذي رصد و/أو بالتقديرات المتعلقة بالآلفي عام الماضيين. وقد رصدت المعدلات العالية في السجل الجيولوجي وخاصة خلال أوقات الانتقال بين عصريين جليديين وفيما بين الفترات الجليدية.

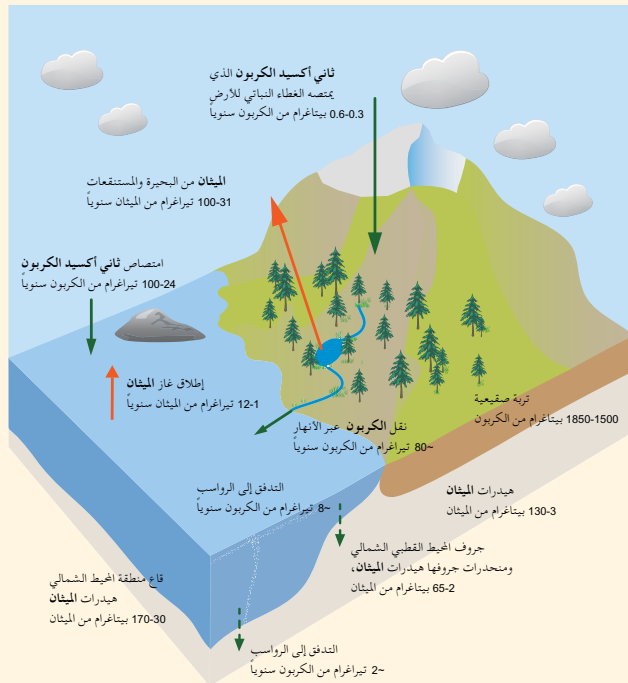


السؤال 5.2، الشكل 1 | (أ) تقديرات المعدل المتوسط للتغير في مستوى سطح البحر (بالمم سنوياً) لخمس فترات زمنية مختارة: الانتقال الأخير من العصر الجليدي إلى ما بين الفترات الجليدية، ونبضة الماء الناتج عن الانصهار 1 ألف، والآلفا عام الأخيرين، والقرن العشرين، وفترة قياس الارتفاع بالسواتل (1993-2012). وتشير الأعمدة الزرقاء إلى الفترات الزمنية للانتقال من عصر جليدي إلى فترة بين جليدية حيث تشير الأعمدة البرتقالية إلى الفترة بين الجليدية الحالية. وتشير الأعمدة السوداء إلى نطاق القيم المحتملة للمعدل المتوسط للتغير في مستوى سطح البحر العالمي. وتلاحظ المعدلات المرتفعة الشاملة لخصائص التغير في مستوى سطح البحر في أوقات الانتقال من العصر الجليدي إلى ما بين الفترات الجليدية (ب) المنظر الموسع لمعدل التغير في المتوسط العالمي لمستوى سطح البحر خلال ثلاث فترات زمنية في ما بين الفترات الجليدية الحالية.

السؤال 6.1 | هل يمكن أن يؤدي إطلاق الميثان أو ثاني أكسيد الكربون بسرعة من انصهار التربة الصقيعية أو احتراق المحيطات إلى إحداث زيادة كبيرة في الاحترار؟

التربة الصقيعية عبارة عن أرض متجمدة بصورة دائمة، توجد أساساً عند خطوط العرض المرتفعة في منطقة القطب الشمالي. وتحتوي التربة الصقيعية بما في ذلك تلك الواقعة تحت الماء على الجروف الضحلة للمحيط المتجمد الشمالي وتحتوي على رواسب قديمة للكربون العضوي. وبعض هذه الرواسب من المواد المتبقية من العصر الجليدي الأخير وتحتفظ بما لا يقل عن ضعف كمية الكربون الموجودة حالياً في الغلاف الجوي في شكل ثاني أكسيد كربون (CO_2). وفي حالة انطلاق جزء كبير من هذا الكربون في شكل ميثان وثاني أكسيد كربون، فإنه يزيد من التركيزات في الغلاف الجوي مما يؤدي إلى ارتفاع كميات الميثان وثاني أكسيد الكربون المطلقة، ويؤدي إلى تأثيرات تفاعلية تزيد من الاحترار العالمي.

ويمثل مجال القطب الشمالي حالياً مغيضاً صافياً لثاني أكسيد الكربون - حيث يمتص نحو 0.4 ± 0.4 بيتاغرام كربون سنوياً في الغطاء النباتي النامي الذي يمثل نحو 10 في المائة من المغيض الأرضي في العالم. كما أنه يمثل مصدراً متواضعاً للميثان (CH_4)، إذ ينبعث ما بين 15 و50 تيراغرام من الميثان سنوياً معظمها من الأراضي الرطبة غير المتجمدة موسمياً تعادل نحو 10 في المائة من المصدر العالمي لميثان الأراضي الرطبة. ولا تتوافر أدلة واضحة بعد على أن الانصهار يسهم بدرجة كبيرة في الميزانيات العالمية الهائلة لهذين الغازين من غازات الاحتباس الحراري. غير أن دراسات النمذجة وتقديرات الخبراء تشير باتفاق متوسط أنه في ظل الاحترار الدائم للقطب الشمالي، يمكن أن يحدث إطلاق مجمع يصل في مجموعه إلى 350 تيراغرام كربون من مكافئ ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2100.



وتحتوي التربة الصقيعية على اليابسة وفي جروف المحيطات على تجمعات كبيرة من الكربون العضوي الذي يزول تجمده ويتحلل بالميكروبات قبل أن يطلق - معظمها في شكل ثاني أكسيد الكربون. فحينئذ يكون الأوكسجين محدوداً مثلما في التربة المشبعة بالماء، تنتج بعض الميكروبات أيضاً الميثان.

وعلى اليابسة تملو التربة الصقيعية طبقة نشطة، سطحية يزول تجمدها خلال الصيف وتشكل جزءاً من النظام الإيكولوجي للتندرا. وإذا زاد متوسط درجات حرارة الربيع والصيف، تزداد كثافة قوام الطبقة النشطة وتتيح المزيد من الكربون العضوي الذي يتحلل بفعل الميكروبات. غير أن فصول الصيف الأكثر حرارة سوف تسفر أيضاً عن زيادة امتصاص ثاني أكسيد الكربون بواسطة الغطاء النباتي في القطب الشمالي من خلال التمثيل الضوئي ويعني ذلك أن موازنة كربون القطب الشمالي تتسم بحساسية بالغة وتقع بين الامتصاص المعزز والإطلاق المعزز للكربون.

وتتسم الظروف الهيدرولوجية خلال زوال التجمد في الصيف أيضاً بالأهمية. إذ إن انصهار كتل الجليد الأرضي الزائدة قد تؤدي إلى تكوين ظروف مياه راكدة في شكل برك وبحيرات حيث يؤدي نقص الأكسجين إلى استحداث إنتاج الميثان. ويعني تعقيد المناظر الطبيعية للقطب الشمالي في ظل احترار المناخ، أن ضعف ثقتنا بشأن أي من هذه العمليات المختلفة سوف يسيطر على المستوى الإقليمي. فانتشار الحرارة وانصهار التربة الصقيعية يستغرق وقتاً، والواقع أنه يمكن

السؤال 6.1، الشكل 1 | شكل مبسط لتجمعات الكربون الرئيسية الحالية في مجال القطب الشمالي بما في ذلك التربة الصقيعية على الأرض والجروف القارية (مأخوذة بتصرف من McGuire وآخرين، 2009 وTarnocai وآخرين، 2009) $\text{PgC} = 10^{12} \text{ gC}$ و $\text{TgC} = 10^{15} \text{ gC}$

النظر إلى التربة الصقيعية الأعمق في القطب الشمالي على أنها من بقايا العصر الجليدي الأخير الآخذة في التلاشي - وعلى ذلك فإن الكثير من الخسائر الكبيرة في كربون التربة الصقيعية سوف تستمر على مدى نطاقات زمنية طويلة.

وإذا ما توافر أكسجين كاف، فإن تحلل المادة العضوية في التربة سوف يصاحبه إطلاق للحرارة بواسطة الميكروبات (مماثلة للكومبوست) والذي يمكن أن يحفز خلال الصيف المزيد من زوال تجمد التربة الصقيعية. وحسب محتوى التربة الصقيعية من الكربون والجليد، والنظام الهيدرولوجي، يمكن لهذه الآلية أن تطلق، في ظل الاحترار، تلاحشاً سريعاً نسبياً للتربة الصقيعية المحلية.

تشير دراسات النمذجة لدينامية التربة الصقيعية وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري إلى حدوث تباطؤ نسبي في التأثير التفاعلي الإيجابي على نطاقات زمنية قدرها مئات السنين. ويمكن أن تنطلق حتى عام 2100 كمية تصل إلى 250 بيتاغرام من الكربون في شكل ثاني أكسيد الكربون وحتى 5 بيتاغرام في شكل ميثان. ونظراً لأن للميثان قدرة أكبر على إحداث الاحترار من خلال عملية الاحتباس الحراري، فإن ذلك يكافئ 100 بيتاغرام أخرى من مكافئ ثاني أكسيد الكربون تنطلق حتى عام 2100. وتماثل هذه الكميات في حجمها التأثير التفاعلي البيوجيوكيميائي لكميات ثاني أكسيد الكربون الأخرى التي تنطلق نتيجة للاحتباس الحراري العالمي للتربة الأرضية. غير أن النماذج الحالية لا تتضمن كامل التعقيدات التي تنطوي عليها العمليات التي تحدث عند زوال تجمد التربة الصقيعية مثل تكون البحيرات والبرك.

وهيدرات الميثان هي شكل آخر من الكربون المتجمد الذي يتكون في أعماق التربة الصقيعية والجروف المحيطية ومنحدرات الجروف ورواسب أعماق المحيطات. وتتألف هذه المادة من الميثان ومجموعات من جزيئات الماء التي لا تستقر إلا في نافذة نوعية من انخفاض درجات الحرارة وارتفاع الضغط. وفي الأراضي وفي المحيطات، تنشأ معظم هذه الهيدرات من الكربون البيولوجي البحري أو الأرضي الذي يتحلل في عدم وجود الأكسجين، ويظل محتجزاً في بيئة مائية في ظل ظروف درجات حرارة وضغط مناسبين.

ويمكن لأي احترار للتربة الصقيعية والمياه والرواسب المحيطية و/أو التغيرات في الضغط أن يؤدي إلى اضطراب استقرار هذه الهيدرات، وإطلاق الميثان (CH_4) الكامن فيها في المحيطات. وخلال عمليات الإطلاق الأكبر والأكثر توزعاً، قد ينطلق جزء من هذا الميثان (CH_4) في شكل غازات في الغلاف الجوي. ويمثل ذلك تجمعا كبيراً لهذه الهيدرات: ففي القطب الشمالي وحده، قد تكون كمية الميثان المخزنة في شكل هيدرات أكبر عشر مرات من الميثان الموجود حالياً في الغلاف الجوي العالمي.

وقد يكون إطلاق الهيدرات، مثل زوال تجمد التربة الصقيعية، عملية بطيئة تستغرق عقوداً إلى قرون. وقد تستغرق مناطق المحيطات العميقة، والرواسب القاعية فترة أطول — بين مئات وآلاف السنين لكي تحت بصورة تكفي لبث الاضطراب في الهيدرات داخلها. وعلاوة على ذلك، ينبغي أن يصل الميثان المتحرر في المياه العميقة إلى السطح والغلاف الجوي قبل أن يصبح نشطاً من الناحية المناخية إلا أن من المتوقع أن تستهلك الكائنات الدقيقة معظمه قبل أن يصل إلى هناك. ولن يصل إلى الغلاف الجوي إلا الميثان المنطلق من الهيدرات في الجروف الضحلة كما في المحيط المتجمد الشمالي في شمال شرق سيبيريا لكي يحدث تأثيراً مناخياً.

وقد وثق العديد من الدراسات التي أجريت مؤخراً انبعاثات محلية كبيرة من الميثان (CH_4) فوق الجرف السيبيري ومن البحيرات السيبيرية للقطب الشمالي. غير أن كمية الميثان التي تنشأ من تحلل الكربون العضوي وذلك الناجم عن اضطراب الهيدرات لا تزال غير معروفة. كما لا تتوافر أدلة لتحديد ما إذا كانت هذه المصادر قد تحركت بفعل الاحترار الإقليمي الأخير أو ما إذا كانت قائمة هناك دائماً — وقد تكون تسربات هذه الكميات من الميثان موجودة منذ عملية انصهار الجليد الأخيرة. وعلى أي حال فإن هذه المصادر لا تسهم إلا بقدر ضئيل للغاية في موازنة الميثان العالمية — وهي أقل من 5 في المائة. ويؤكد ذلك أيضاً رصدات تركيزات الميثان في الغلاف الجوي التي لم تُظهر أي زيادات كبيرة في القطب الشمالي.

غير أن دراسات النمذجة وتقديرات الخبراء تشير إلى أن انبعاثات الميثان وثاني أكسيد الكربون CO_2 سوف تزيد في حالة احترار منطقة القطب الشمالي، وإنها سوف توفر تأثيرات تفاعلية مناخية إيجابية. وسوف يكون هذه التأثير التفاعلي معتدلاً مع مرور القرون: إذ أنه سيكون بحجم مماثل للتأثير التفاعلي للنظم الإيكولوجية المناخية — الأرضية الأخرى. غير أن الكميات المنطلقة من ثاني أكسيد الكربون والميثان، خلال آلاف السنين بل وأطول، من التربة الصقيعية والجروف والمنحدرات الجوفية ستكون أكثر أهمية لمشاركة التجمعات الكبيرة من الكربون وهيدرات الميثان في العملية.

السؤال 6.2 | ماذا يحدث لثاني أكسيد الكربون عقب انبعاثه في الغلاف الجوي؟

بعد أن ينبعث ثاني أكسيد الكربون (CO_2) في الغلاف الجوي يتوزع بسرعة بين الغلاف الجوي، والجزء العلوي من المحيطات والغطاء النباتي. وبعد ذلك، يواصل الكربون تحركه فيما بين مختلف مستودعات دورة الكربون العالمية مثل التربة، وأعماق المحيطات والصخور. وتحدث بعض هذه المبادلات ببطء شديد. وبحسب كمية ثاني أكسيد الكربون المنبعثة، سيظل ما بين 15 في المائة و40 في المائة في الغلاف الجوي لفترة تصل إلى 2000 عام، وبعدها تتحدد موازنة جديدة بين الغلاف الجوي، والغلاف الحيوي لليابسة والمحيطات. وسوف تستغرق العمليات الجيولوجية في أي مكان ما بين عشرات إلى مئات الآلاف من السنين — وربما أطول من ذلك — لزيادة توزيع الكربون فيما بين المستودعات الجيولوجية. ولذا فإن تركيزات ثاني أكسيد الكربون المرتفعة وما يرتبط بها من تأثيرات مناخية من الانبعاثات الحالية سوف تستمر لفترة طويلة بدرجة كبيرة في المستقبل.

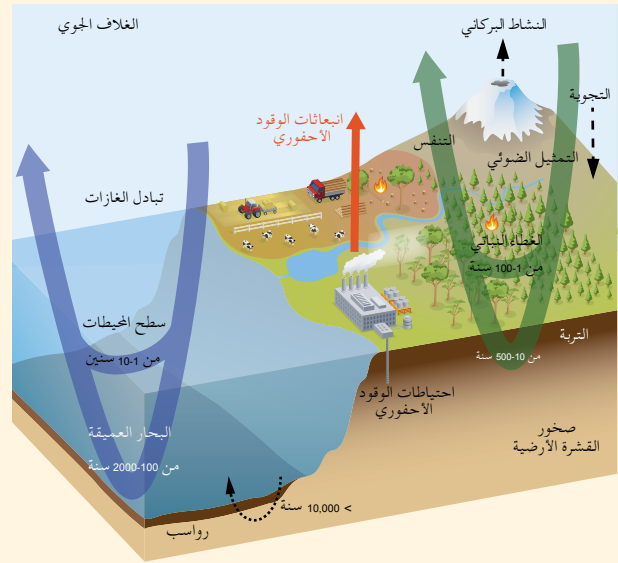
وثاني أكسيد الكربون من الغازات غير النشطة كيميائياً بدرجة كبيرة والذي يمتزج بسرعة خلال كامل التروبوسفير في أقل من عام. وخلافاً للمركبات النشطة كيميائياً في الغلاف الجوي والتي تُزال وتحلل بفعل عمليات المغيض مثل الميثان، يتوزع الكربون من جديد بدلاً من ذلك فيما بين مختلف مستودعات دورة الكربون العالمية. ويعرض السؤال 6.2، الشكل 1 شكلاً مبسطاً لدورة الكربون العالمية. وتشير الأسهم المفتوحة إلى النطاقات الزمنية المعتادة لذرات الكربون التي تنتقل من خلال المستودعات المختلفة.

قبل عصر الصناعة، كانت دورة الكربون العالمية متوازنة تقريباً. ويمكن أن يستنتج ذلك من القياسات التي تجرى على عينات الجليد التي تبين تركيزات شبه مستقرة لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي خلال آلاف السنوات العديدة الأخيرة عصر ما قبل الصناعة. غير أن الانبعاثات البشرية المنشأ لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي أحدثت اضطراباً في هذا التوازن. ومع ارتفاع تركيزات ثاني أكسيد الكربون العالمية، تتغير عمليات المبادلة بين ثاني أكسيد الكربون وسطح المحيطات والغطاء النباتي كما هو الحال بالنسبة للمبادلات اللاحقة داخل مستودعات الكربون وفيما بينها على اليابسة وفي المحيطات وعلى القشرة الأرضية في نهاية المطاف. وبهذه الطريقة، يعاد توزيع الكربون المضاف نتيجة لدورة الكربون العالمية إلى أن تصل عمليات مبادلة الكربون بين مختلف مستودعات الكربون إلى توازن تقريبي جديد.

وتمر جزئيات ثاني أكسيد الكربون فوق المحيطات من خلال السطح المشترك بين الهواء والبحر نتيجة لمبادلة الغاز. وفي مياه البحر، يتفاعل ثاني أكسيد الكربون مع جزيئات الماء ليكون حمض الكربونيك الذي يتفاعل بسرعة مع المستودع الكبير للكربون غير العضوي الذائب — أيونات البيكربونات والكربونات — في المحيطات. وتنقل التيارات وتكون المياه الكثيفة الهابطة الكربون فيما بين الطبقات السطحية والطبقات العميقة من المحيطات.

وتقوم الكائنات البحرية الحية أيضاً بإعادة توزيع الكربون، فهذه الكائنات تبني أنسجة عضوية وصدفات جيرية في المياه السطحية التي تهبط، بعد نفوق الكائنات، إلى المياه العميقة حيث تعاد إلى مستودع الكربون غير العضوي الذائب، نتيجة للتحلل والتحلل الميكروبي. ويصل جزء ضئيل إلى قاع البحر ويندمج في الرواسب.

ويؤدي الكربون الإضافي من الانبعاثات البشرية المنشأ إلى زيادة الضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي الذي يؤدي بدوره إلى زيادة تبادل جزيئات ثاني أكسيد الكربون بين الهواء والبحر. وعلى سطح المحيطات، تستوعب كيمياء الكربونات بسرعة ثاني أكسيد الكربون الإضافي. ونتيجة لذلك، تصل مياه سطح المحيط الضحلة إلى توازن مع الغلاف الجوي في غضون عام أو عامين. وتستغرق حركة الكربون من المياه السطحية إلى منتصف الأعماق وإلى الأعماق الكبيرة فترة أطول — بين عقود وعدة قرون. وخلال النطاقات الزمنية الأطول، يؤدي التحمض نتيجة لغزو ثاني أكسيد الكربون إلى إذابة رواسب الكربونات في قاع البحار مما يزيد من تعزيز امتصاص المحيطات. غير أن الفهم الحالي يشير إلى أنه ما لم تحدث تغيرات كبيرة في دوران المحيطات، فإن نمو العوالق (Planktons) يظل دون تغيير تقريباً بالنظر إلى أنه يتوقف في الغالب على عوامل بيئية مثل توفر العناصر الغذائية والضوء وليس على توافر الكربون غير العضوي، ولا تسهم بدرجة كبيرة في امتصاص المحيطات لثاني أكسيد الكربون البشري المنشأ.



السؤال 6.2، الشكل 1 | شكل تخطيطي مبسط لدورة الكربون العالمية تبين الدوران المعتاد للنطاقات الزمنية لانتقال الكربون خلال المستودعات الرئيسية.

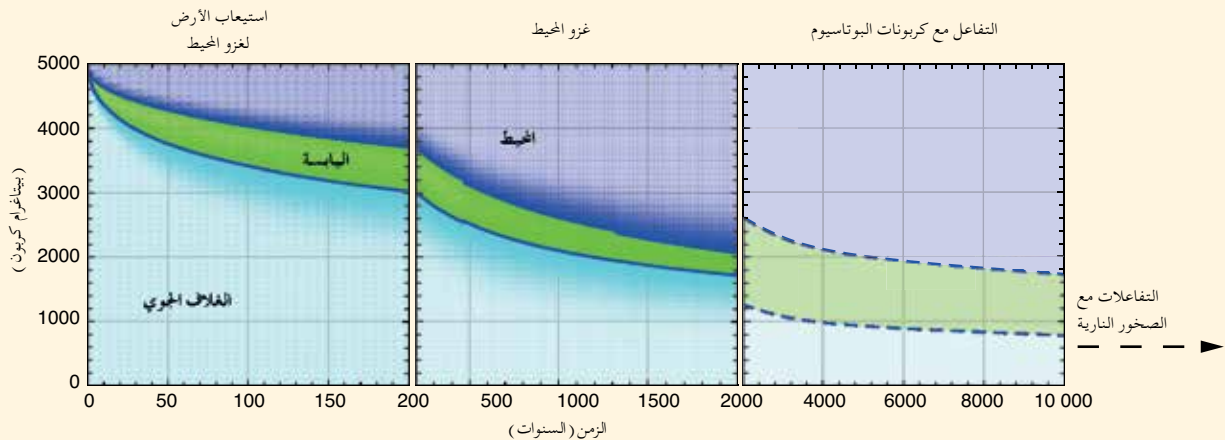
وعلى اليابسة، يمتص الغطاء النباتي ثاني أكسيد الكربون بالتمثيل الضوئي ويحوله إلى مادة عضوية. ويعاد جزء من هذا الكربون على الفور كثاني أكسيد كربون إلى الغلاف الجوي في عملية تنفس النبات. وتستخدم النباتات الجزء الباقي في النمو. وتندمج المواد النباتية الميتة في التربة وتتحلل في نهاية المطاف بواسطة الكائنات المجهرية ثم تعود مرة أخرى من خلال التنفس إلى الغلاف الجوي في شكل ثاني أكسيد كربون. وعلاوة على ذلك، يتحول الكربون في الغطاء النباتي والتربة إلى ثاني أكسيد الكربون من خلال الحرائق والحشرات وآكلات العشب وكذلك من خلال حصاد النباتات ثم استهلاكها بواسطة الحيوانات أو البشر. ويحمل بعض الكربون العضوي أيضاً إلى المحيطات بواسطة المجاري المائية والأنهار.

وتؤدي الزيادة في تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى تحفيز التمثيل الضوئي، ومن ثم امتصاص الكربون. وعلاوة على ذلك، فإن زيادة تركيزات ثاني أكسيد الكربون تساعد النباتات في المناطق الجافة على استخدام المياه الجوفية بقدر أكبر من الكفاءة. ويزيد ذلك بدوره من الكتلة الحيوية في الغطاء النباتي والتربة ومن ثم يدعم مغيض الكربون على اليابسة. غير أن حجم هذا المغيض يعتمد اعتماداً حاسماً على عوامل أخرى مثل توافر المياه والعناصر الغذائية.

وتشير نماذج المناخ ودورة الكربون المتقارنة إلى أن امتصاص المحيطات واليابسة لكميات أقل من الكربون مع احترار المناخ يشكل تأثيراً تفاعلياً مناخياً إيجابياً. إذ يسهم الكثير من العوامل المختلفة في هذا التأثير: فالمياه البحرية الحارة تتسم بانخفاض قدرة ثاني أكسيد الكربون على الذوبان ومن ثم فإن تغيير تفاعلات الكربون الكيميائية يسفر عن انخفاض امتصاص المحيطات لثاني أكسيد الكربون الزائد في الغلاف الجوي. وعلى اليابسة، تعزز درجات الحرارة المرتفعة من فترات النمو الموسمية الطويلة على خطوط العرض المتوسطة والمرتفعة، إلا أنها تزيد أيضاً من تنفس كربون التربة.

ويعتمد الوقت الذي ينقضي للوصول إلى توازن جديد لتوزيع الكربون على فترات إنتقال الكربون عبر مختلف المستودعات وتستغرق نطاقات زمنية متعددة. ويجري أولاً تبادل الكربون فيما بين مستودعات الكربون «السريعة» مثل الغلاف الجوي، وسطح المحيطات والغطاء النباتي والتربة، على مدى نطاقات زمنية تصل إلى بضعة آلاف من السنين. وخلال النطاقات الزمنية الأطول، تتضح أهمية العمليات الجيولوجية الثانوية بالغة البطء – تحلل رواسب الكربونات ودفن الرواسب في القشرة الأرضية.

ويبين الشكل 2 في السؤال 6.2 تحليل كمية زائدة كبيرة من ثاني أكسيد الكربون (5000 بيتاغرام من الكربون أو ما يعادل عشرة أمثال ثاني أكسيد الكربون المتراكم المنبعث منذ بداية عصر الصناعة) منبعثة في الغلاف الجوي، وأعيد توزيعها الآن بين اليابسة والمحيطات مع مرور الزمن. وخلال المائتي عام الأولى، تمتص المحيطات واليابسة كميات متماثلة من الكربون. وعلى النطاقات الزمنية الأطول، تسيطر الكميات التي تمتصها المحيطات بالدرجة الأولى بسبب ضخامة حجم مستودعها (~38000 بيتاغرام كربون) مقارنة باليابسة (~4000 بيتاغرام كربون)، والغلاف الجوي (589 بيتاغرام كربون قبل عصر الصناعة). وبالنظر إلى كيمياء المحيطات، فإن حجم المدخلات الأولية يكتسي أهمية: فزيادة الانبعاثات تعني أن جزءاً كبيراً من ثاني أكسيد الكربون سيظل في الغلاف الجوي. وبعد 2000 عام، سيظل الغلاف الجوي يحتوي على ما بين 5 في المائة و40 في المائة من تلك الانبعاثات الأولية من ثاني أكسيد الكربون. وسوف يستغرق المزيد من الانخفاض بفعل ذوبان رواسب الكربونات والتفاعلات مع الصخور النارية مثل تجوية السيليكات، ودفن الرواسب، من عشرات إلى مئات الآلاف من السنين أو ربما أطول.



السؤال 6.2، الشكل 2 | تحليل كمية ثاني أكسيد الكربون زائدة تبلغ 5000 بيتاغرام كربون انبثقت في وقت صفر في الغلاف الجوي، وإعادة توزيعها اللاحق في اليابسة والمحيطات كدالة للزمن محسوبة بواسطة النماذج المناخية المتقارنة لدورة الكربون. وتشير أحجام النطاقات الملونة إلى امتصاص الكربون بواسطة المستودعات المعنية. وتبين اللوحتان الأولى والثانية متوسط نموذج مشروع المقارنات بين النماذج المتقارنة (Joos وآخرون، 2013). وتبين اللوحة الأخيرة إعادة التوزيع الأطول مدى بما في ذلك تحليل المحيطات للرواسب الكربونية بالطريقة المحسوبة بها بنموذج لنظام الأرض المتوسط التعقيد (نقلا عن Archer وآخرون، 2009 ب).

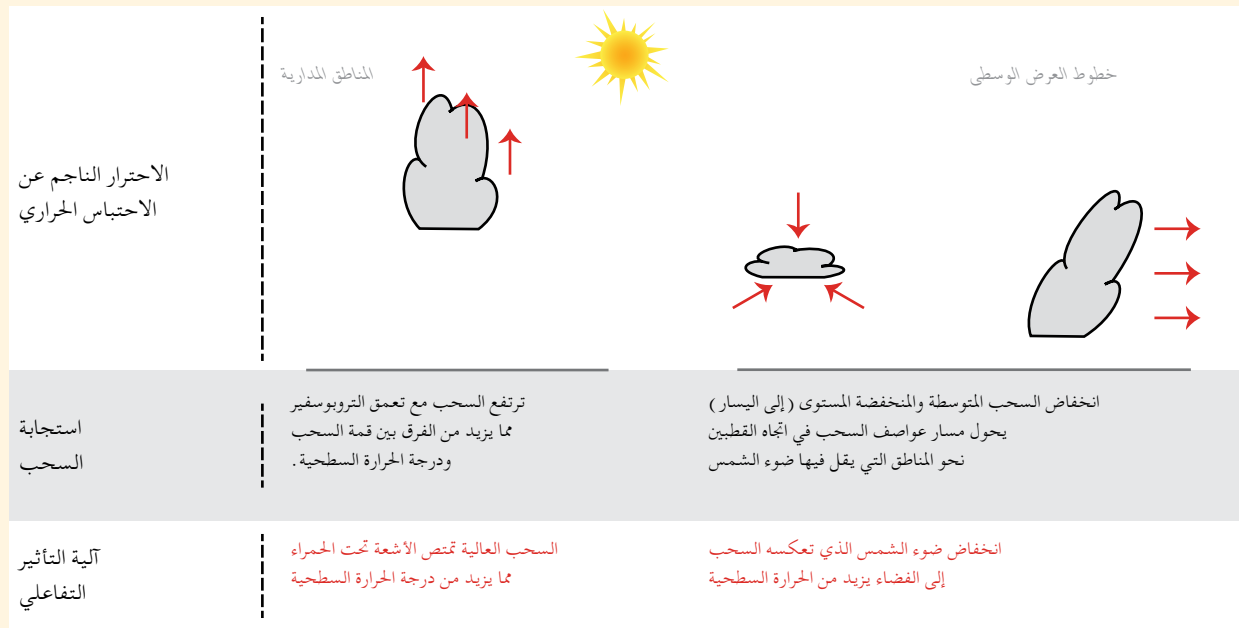
السؤال 7.1 | كيف تؤثر السحب في المناخ وتغير المناخ؟

تؤثر السحب تأثيراً شديداً في المناخ الراهن، إلا أنه لا يمكن للرصدات بمفردها أن تدلنا حتى الآن على الطريقة التي ستؤثر بها في احترار المناخ في المستقبل. فالتنبؤات الشاملة بالتغيرات في التغير تتطلب نموذجاً للمناخ العالمي. وتحاكي هذه النماذج حقول السحب التي تماثل تقريباً تلك التي رصدت، إلا أن أخطاء مهمة وأوجه عدم يقين تظل ماثلة. فنماذج المناخ المختلفة تنتج إسقاطات متباينة عن الطريقة التي سوف تتغير بها السحب في مناخ أكثر احتراراً. واستناداً إلى جميع الأدلة المتوافرة يبدو محتملاً أن يؤدي التأثير التفاعلي لصافي السحب - المناخ إلى تفاقم الاحترار العالمي. وإذا كان الأمر كذلك تظل قوة التفاعم محاطة بعدم اليقين.

وقد أدرك العلماء، منذ سبعينيات القرن الماضي، الأهمية البالغة للسحب للنظام المناخي، ولتغير المناخ. وتؤثر السحب في النظام المناخي بوسائل شتى. فهي تنتج الأمطار والثلوج الضرورية لمعظم أشكال الحياة على الأرض. والسحب تسبب احترار الغلاف الجوي نتيجة تكثف بخار الماء. وفي حين أن بعض المياه المتكثفة تتحول مرة أخرى إلى بخار، فإن الأمطار التي تصل إلى السطح تمثل احتراراً صافياً للهواء. وتؤثر السحب بقوة في تدفقات كل من ضوء الشمس (الذي يدفئ الكوكب) وضوء الأشعة تحت الحمراء (التي تبرد الكوكب عند بث إشعاعها إلى الفضاء) من خلال الغلاف الجوي. وأخيراً فإن السحب تحتوي على قوة رفع قوية يمكن أن تحمل الهواء بسرعة من المناطق القريبة من سطح الأرض إلى ارتفاعات كبيرة. وتحمل قوة الرفع الطاقة والرطوبة وقوة الدفع والغازات النزرة وجزيئات الهباء الجوي. ويستخدم العلماء منذ عقود كلاً من الرصدات والنماذج لدراسة كيفية تغير السحب مع الطقس اليومي، ومع الدورة الموسمية، ومع التغيرات من عام لآخر، مثل تلك المرتبطة بظاهرة النينو.

وتنطوي جميع عمليات السحب على التغير مع تغير حالة المناخ. وينطوي التأثير التفاعلي للسحب على أهمية بالغة في سياق تغير المناخ. فأي تغيير في عمليات السحب تنشأ عن تغير المناخ - وتؤثر بدورها على المناخ - تمثل تأثيراً تفاعلياً للسحب - المناخ. ونظراً لتفاعل السحب بهذه القوة مع كل من ضوء الشمس وضوء الأشعة تحت الحمراء، فإن التغيرات الصغيرة في نظام السحب تنطوي على تأثير كبير على النظام المناخي.

وقد أشير إلى الكثير من الأنواع المحتملة للتأثير التفاعلي للسحب - المناخ التي تشتمل على تغيرات في كمية السحب، وارتفاع قمم السحب و/أو انعكاسية السحب (انظر السؤال 7.1، الشكل 1). وتبين الدراسات السابقة بصورة متساقطة أن السحب المرتفعة تقوي من الاحترار العالمي نتيجة تفاعلها مع الضوء تحت الأحمر الذي ينبعث من الغلاف الجوي والسطح. غير أن هناك الكثير من عدم اليقين بشأن التأثير التفاعلي المرتبط بسحب المرتفعات المنخفضة، والتأثير التفاعلي المرتبط بالكمية والانعكاسية بصفة عامة.



السؤال 7.1، الشكل 1 | شكل تخطيطي لآليات التأثير التفاعلي المهمة للسحب.

وتعكس السحب العالية الكثيفة بكفاءة ضوء الشمس، وتقلل السحب العالية الكثيفة والخفيفة بشدة كمية الضوء تحت الأحمر الذي ينبعث من الغلاف الجوي وسطح الأرض إلى الفضاء. وتؤدي المعاوضة بين هذين التأثيرين إلى أن تصبح درجة حرارة سطح الأرض أقل حساسية للتغيرات في كمية السحب المرتفعة عنها بالنسبة للتغيرات في كمية السحب المنخفضة. ويمكن أن تختل هذه المعاوضة عند وجود تحول منظم من السحب المرتفعة الكثيفة إلى السحب السميحية الخفيفة أو العكس، وفي حين أنه لا يمكن استبعاد هذا الاحتمال، لا تتوافر حالياً أي أدلة تدعم ذلك. ومن ناحية أخرى، فإن التغيرات في ارتفاع السحب العالية (بالنسبة لكمية معينة منها) يمكن أن تؤثر بقوة في درجة حرارة سطح الأرض. ويقلل التحول الصعودي في السحب العالية من الضوء تحت الأحمر الذي ينبعث من سطح الأرض والغلاف الجوي إلى الفضاء، إلا أن تأثيره طفيف فيما يتعلق بضوء الشمس المنعكس. وثمة أدلة قوية على حدوث هذا التحول في المناخ الأكثر احتراراً. ويؤدي ذلك إلى تفاقم الاحترار العالمي من خلال منع بعض الضوء تحت الأحمر الإضافي الذي ينبعث من الغلاف الجوي وسطح الأرض من مغادرة النظام المناخي.

وتعكس السحب المنخفضة قدرًا كبيراً من ضوء الشمس إلى الفضاء مرة أخرى إلا أن تأثيرها يكون ضعيفاً، بالنسبة لحالة معينة للغلاف الجوي وسطح الأرض، على الضوء تحت الأحمر الذي ينبعث إلى الفضاء من الأرض. ولذا فإن لها تأثيراً مبرداً صافياً على المناخ الحالي؛ ينطبق نفس الوضع إلى حد أقل على السحب المتوسطة المستوى. غير أن معظم النماذج المناخية التي قامت بتقييمها الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ تحاكي انخفاضاً في كمية السحب على المستويين المنخفض والمتوسط مما يزيد من امتصاص ضوء الشمس ومن ثم ينحو إلى زيادة الاحترار. غير أن مدى هذا الانخفاض يعتمد تماماً على النماذج.

وهناك أيضاً وسائل أخرى قد تتغير بها السحب في المناخ الأكثر احتراراً. فالتغيرات في أنماط الرياح ومسارات العواصف يمكن أن تؤثر في الأنماط الإقليمية والموسمية للسحب والأمطار. وتشير بعض الدراسات إلى أن إشارة أحد التغيرات المشاهدة في النماذج المناخية — تحرك السحب صوب القطبين المرتبط بمسارات العواصف في خطوط العرض المتوسطة — قد لوحظ بالفعل في سجل الرصدات. ويمكن أن يضخم تحول السحب إلى المناطق التي تتلقى قدرًا أقل من ضوء الشمس من الاحترار العالمي. إذ يمكن تشكل الكثير من السحب من القطرات السائلة التي تكون صغيرة ولكنها كثيرة العدد وتعكس قدرًا من ضوء الشمس إلى الفضاء يزيد عن السحب التي تتكون من كتلة مماثلة من البلورات الجليدية. ويمكن للسحب السميحية الخفيفة، التي تمارس تأثيرات احترارية صافية والتي يصعب على النماذج المناخية محاكاتها، أن تتغير بوسائل لا تحاكيها النماذج، وإن كانت لا تتوافر أي أدلة على ذلك. وهناك عمليات أخرى قد تكون مهمة إقليمياً، فالتفاعلات بين السحب وسطح الأرض، مثلاً، يمكن أن تتغير فوق المحيطات حيث ينصهر الجليد البحري وفوق اليابسة حيث ينخفض نتح النباتات.

غير أنه لا تتوافر حتى الآن أي وسيلة مقبولة على نطاق واسع لاستخلاص التأثير التفاعلي للسحب العالمية من رصدات اتجاهات التغير الطويلة الأجل الخاصة بالسحب أو التقليدية في النطاق الزمني الأقصر مدى. ومع ذلك، فإن جميع النماذج المستخدمة في التقييم الحالي (والتقييم السابق) اللذان أجرتهما الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ) تحقق تأثيرات تفاعلية للسحب الصافية تزيد من الاحترار الناجم عن الاحتباس الحراري البشري المنشأ أو لا تنطوي على تأثيرات شاملة كبيرة. ولا تدرج التأثيرات التفاعلية في النماذج إلا أنها تنشأ من عمل السحب في عمليات محاكاة الغلاف الجوي وتأثيراتها على تدفقات الطاقة وتحولاتها في النظام المناخي. وتعزى الاختلافات في قوة التأثيرات التفاعلية للسحب الناتجة عن مختلف النماذج بدرجة كبيرة إلى تباين حساسية النماذج للتغيرات في تركيزات غازات الاحتباس الحراري.

السؤال 7.2 | كيف يؤثر الهباء الجوي في المناخ وتغير المناخ؟

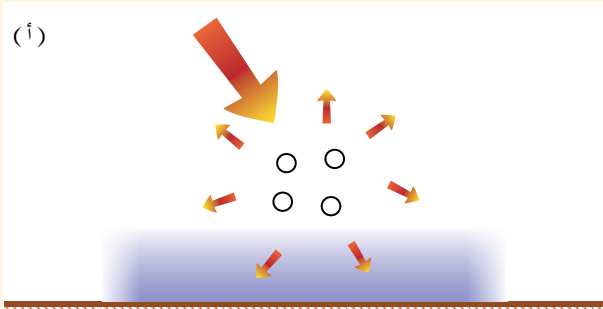
يتألف هباء الغلاف الجوي من جسيمات سائلة أو صلبة صغيرة عالقة في الغلاف الجوي تختلف عن الجسيمات الأكبر الأخرى للسحب والأمطار. ويأتي الهباء من مصادر طبيعية وبشرية المنشأ، ويمكن أن يؤثر في المناخ بطرائق متعددة ومعقدة من خلال تفاعله مع الأشعة والسحب. وبصفة عامة تشير النماذج والرصدات إلى أن الهباء البشري المنشأ قد مارس تأثيرات مبردة على الأرض منذ عصور ما قبل الصناعة، مما أدى إلى إخفاء بعض الاحترار العالمي المتوسط من غازات الاحتباس الحراري والذي كان يمكن أن يحدث في عدم وجوده. وسوف يؤدي هذا الانخفاض المتوقع في انبعاثات الهباء البشرية المنشأ في المستقبل، استجابة لسياسات نوعية الهواء، إلى إزاحة القناع عن الاحترار في نهاية المطاف.

وللهباء في الغلاف الجوي فترة بقاء معتادة تتراوح بين يوم واحد وأسبوعين في التروبوسفير، ونحو عام واحد في الستراتوسفير. ويتباين الهباء تبانياً شاسعاً من حيث الحجم والتركيب الكيميائي والشكل، وبعض أنواع الهباء مثل الأتربة ورذاذ البحر من أصل طبيعي في معظمها أو كلها في حين تأتي أنواع الهباء الأخرى مثل الكبريتات والدخان من كل من المصادر الطبيعية والبشرية المنشأ على السواء.

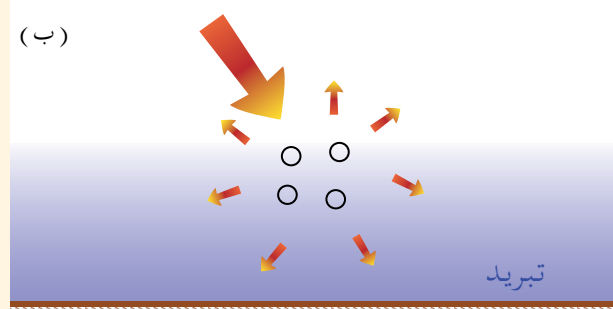
ويؤثر الهباء في المناخ بطرائق عديدة. فأولاً فإنه يشتم ويمتص ضوء الشمس مما يعدل من التوازن الإشعاعي للأرض (انظر السؤال 7.2، الشكل 1). ويؤدي تشتت الهباء عموماً إلى زيادة انعكاسية الأرض وينحو إلى تبريد المناخ، في حين أن لامتصاص الهباء تأثيراً معاكساً وينحو إلى إحداث احترار في النظام المناخي. ويتوقف التوازن بين التبريد والاحترار على جسيمات الهباء والظروف البيئية. وقد حدد الكثير من دراسات رصد تقييم كميًا للتأثيرات الإشعاعية المحلية الناشئة عن الأهباء الطبيعية والبشرية المنشأ إلا أنها ترى أن تأثيره العالمي يحتاج إلى بيانات ساتلية ونماذج. ويأتي أحد أوجه عدم اليقين المتبقية من الكربون الأسود، وهو هباء ماص لا يتعذر فقط قياسه بشكل أكبر من الهباء المشتت بل إنه يحفز أيضاً الاستجابة المعقدة للسحب. غير أن معظم الدراسات تتفق على أن التأثير الإشعاعي الشامل للهباء البشري المنشأ هو تبريد لكوكب الأرض.

التفاعلات بين الهباء والأشعة

الأهباء المشتتة

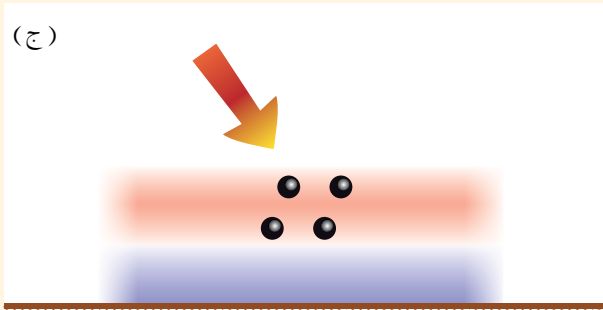


تشتت الأهباء الأشعة الشمسية، فتصل كميات أقل من الأشعة إلى سطح اليابسة مما يؤدي إلى تبريد محلي.

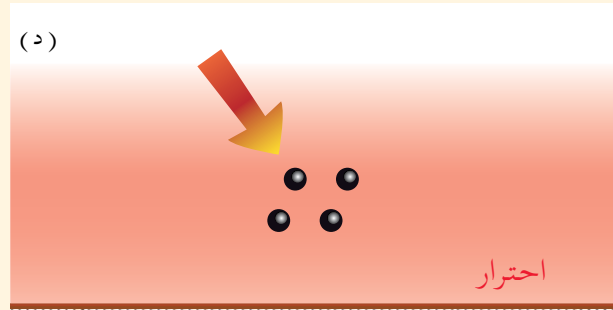


تتسبب عمليات الدوران والامتزاج في الغلاف الجوي التبريد في المستويين الإقليمي والرأسي.

الأهباء الماصة



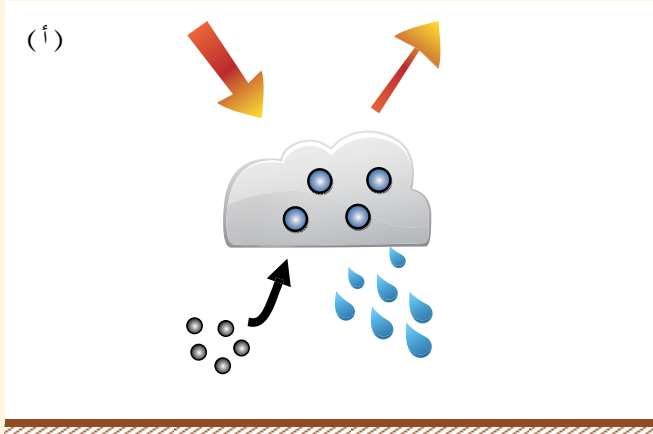
تمتص الأهباء الأشعة الشمسية. ويؤدي هذا إلى تسخين طبقة الهباء، ولكن السطح الذي يتلقى كميات أقل من الأشعة الشمسية يمكن أن يبرد محلياً.



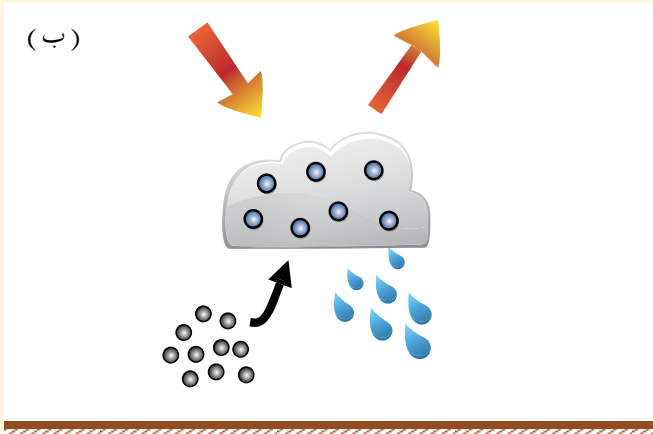
على النطاق الأكبر يحدث احترار صافٍ للسطح والغلاف الجوي لأن الدوران الأستراتوسفيري وعمليات المزج تعيدان توزيع الطاقة الحرارية.

السؤال 7.2، الشكل 1 | عرض عام للتفاعلات بين الأهباء والأشعة الشمسية وتأثيرهما على المناخ. وتبين اللوحتان إلى اليسار التأثيرات الإشعاعية الفورية للهباء في حين تبين اللوحتان إلى اليمين تأثيرهما الشامل بعد استجابة النظام المناخي لتأثيراتهما الإشعاعية.

التفاعلات بين الأهباء الجوية والسحب



تعمل الأهباء كنوى لتكثيف السحب يمكن أن تتشكل عليها القطرات السائلة .



تؤدي زيادة الأهباء الجوية إلى زيادة تركيز القطرات الصغيرة مما يؤدي إلى سحب أنصع. غير أن هناك الكثير من العمليات المحتملة للهباء والسحب وكميات الأمطار مما قد يبسط أو يشبط من هذا التأثير.

السؤال 7.2، الشكل 2 | عرض عام للتفاعلات بين الهباء والسحب وتأثيرها على المناخ. وتمثل اللوحان (أ) و (ب) سحباً منخفضاً المستوى نظيفاً وملوناً على التوالي.

ويعمل الهباء أيضاً كمواقع للتكثيف وتنوية الجليد، التي يمكن أن تتكون عليها قطرات السحب والجسيمات الجليدية (انظر السؤال 7.2، الشكل 2). وعندما تتأثر السحب المكونة من قطرات المياه السائلة بمزيد من جسيمات الهباء، تنحو إلى أن تكون أعداد أكبر من القطرات وإن كانت أصغر مما يتسبب في أن تعكس هذه السحب قدرًا أكبر من الأشعة الشمسية. غير أن هناك الكثير من المسارات الأخرى للتفاعلات بين الأهباء والسحب، وخاصة الجليد - أو خليط السحب السائلة والجليد، حيث تكون التغيرات في الأطوار بين المياه السائلة والجليد حساسة لتركيزات الهباء وخواصه. وقد أثرت اعتراضات على وجهة النظر الأولية التي ترى أن الزيادة في تركيز الهباء ستؤدي أيضاً إلى زيادة في كمية السحب المنخفضة، لأن عدداً من العمليات ذات التأثيرات المتعارضة تبدأ في التأثير. ومن المفهوم أنه من الصعوبة بمكان وضع تقييم كمي للتأثير الشامل للهباء على كميات السحب وخواصها. وتشير الدراسات المتوافرة المعتمدة على النماذج المناخية والرصدات الساتلية بصفة عامة إلى أن التأثير الصافي للأهباء البشرية المنشأ على السحب يتمثل في تبريد النظام المناخي.

ونظراً لأن هذه الأهباء تكون موزعة بصورة غير منتظمة في الغلاف الجوي، فإنها يمكن أن تحدث تسخيناً وتبريداً للنظام المناخي بأنماط يمكن أن تسبب تغيرات في الطقس. ومع أن هذه التأثيرات معقدة، ويصعب محاكاتها بالنماذج الحالية، فإن العديد من الدراسات تشير إلى حدوث تأثيرات كبيرة على كميات الأمطار في بعض الأقاليم.

ونظراً لقصر فترة بقاء الأهباء الجوية في الغلاف الجوي - فإن تركيزاتها وتأثيراتها المناخية - قد تنوعت مع مرور الوقت في تناسق تقريبي مع الانبعاثات البشرية المنشأ، هي وسلائفها في الطور الغازي مثل ثاني أكسيد الكبريت (SO_2)، وبعض المركبات العضوية المتطايرة. ونظراً لأن انبعاثات الهباء البشري المنشأ قد ازدادت بدرجة كبيرة خلال الفترة الصناعية، فإن ذلك حال دون بعض الاحترار الذي كان يمكن أن يحدث لولا ذلك بفعل التركيزات المتزايدة لغازات الاحتباس الحراري الجيدة الامتزاج. كما تسبب الهباء الناشئ عن الثورات البركانية الكبيرة التي دخلت إلى الستراتوسفير، مثل بركاني الشيشون وبيناتوبو، اللذين تسببا أيضاً في فترات برودة استمرت عادة لعام أو عامين.

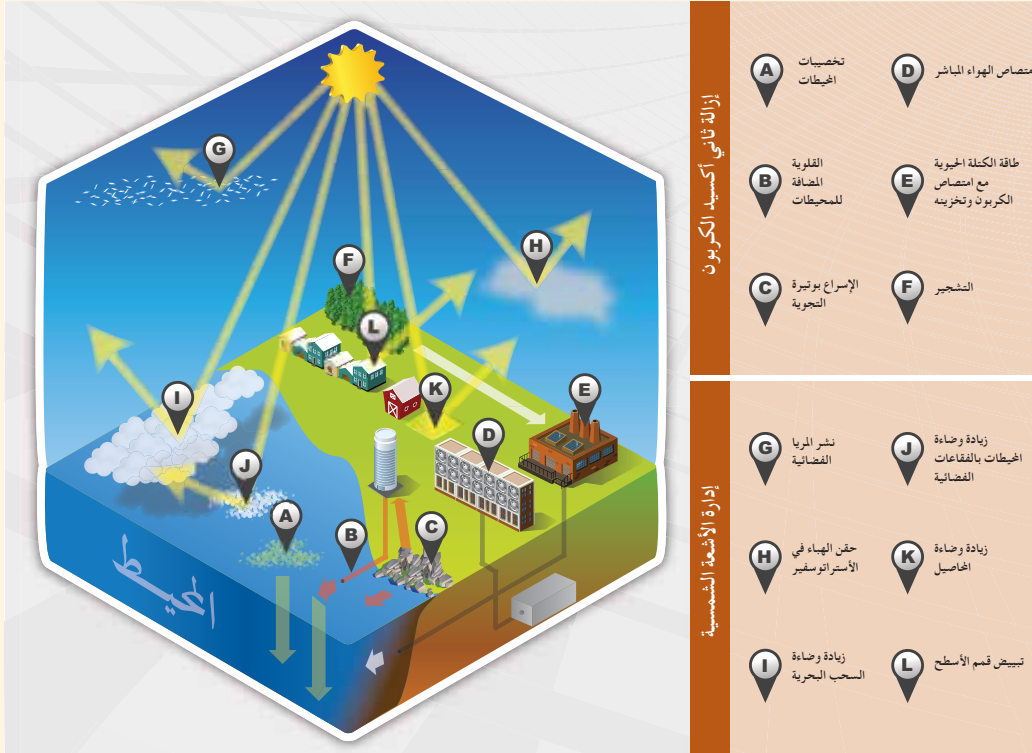
وخلال العقدين الأخيرين، انخفضت انبعاثات الهباء البشرية المنشأ في بعض البلدان المتقدمة ولكنها زادت في الكثير من البلدان النامية. ولذا يعتقد أن تأثير الهباء على المتوسط العالمي لدرجة حرارة سطح الأرض هو تأثير ضئيل. غير أنه يتوقع أن تنخفض انبعاثات الهباء البشرية المنشأ في نهاية المطاف استجابة للسياسات الخاصة بجودة الهواء، التي سوف تكبح تأثيراتها المبردة على سطح الأرض مما سيؤدي إلى زيادة الاحترار.

السؤال 7.3 | هل يمكن للهندسة الجيولوجية إبطال تغير المناخ، وما هي الآثار الجانبية التي قد تحدث؟

تعرف الهندسة الجيولوجية - والتي تسمى أيضاً بالهندسة المناخية - بأنها مجموعة عريضة من الطرائق والتكنولوجيات التي تهدف إلى أن تغير عن عمد النظام المناخي للتخفيف من آثار تغير المناخ. وهناك فئتان متميزتان من طرائق الهندسة الجيولوجية تؤخذان في الاعتبار دائماً: إدارة الأشعة الشمسية (SRM) التي يرد تقييم لها في القسم 7.7) والتي تهدف إلى التعويض عن الاحترار الناجم عن غازات الاحتباس الحراري البشرية المنشأ بزيادة انعكاسية الأرض مع إزالة ثاني أكسيد الكربون (CDR) التي جرى تقديمها في القسم 6.5) والتي تهدف إلى خفض تركيزات ثاني أكسيد الكربون CO_2 في الغلاف الجوي. وتعمل الفئتان على أساس مبادئ فيزيائية مختلفة وعلى مختلف النطاقات الزمنية. وتشير النماذج إلى أنه إذا كانت طرائق SRM قابلة للتحقيق، فإن فعاليتها ستكون في التصدي لارتفاع درجات الحرارة، إلا أنها ستكون أقل فعالية ولكنها ستستمر في التصدي لبعض التغيرات المناخية الأخرى. ولن تنصدي SRM لجميع تأثيرات تغير المناخ، كما أن جميع طرائق الهندسة الجيولوجية المقترحة تنطوي أيضاً على مخاطر وآثار جانبية. ولا يمكن توقع النتائج الإضافية بالنظر إلى أن مستوى الفهم العلمي لكل من SRM و CDR منخفض. كما أن هناك الكثير من القضايا (السياسية والأخلاقية والعملية) المتصلة بالهندسة الجيولوجية والتي تتجاوز نطاق هذا التقرير.

طرائق إزالة ثاني أكسيد الكربون

تهدف طرائق إزالة ثاني أكسيد الكربون CDR إلى إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي من خلال عمليات تعديل متعمدة في دورة الكربون أو بأساليب صناعية (مثل النهج الكيميائية). ويجري بعد ذلك تخزين الكربون المسحوب من الغلاف الجوي في اليابسة والمحيطات أو في مستودعات جيولوجية. وتعتمد بعض طرائق CDR على العمليات البيولوجية مثل التوسع في عمليات التشجير وإعادة التشجير، وامتصاص الكربون في التربة من خلال الفحم الأحياي، والطاقة الحيوية مع احتجاز الكربون وتخزينه (BECCS) وتخصيب



السؤال 7.3، الشكل 1 | عرض عام لبعض طرائق الهندسة الجيولوجية المقترحة بالصورة التي طرحت بها طرائق إزالة ثاني أكسيد الكربون (انظر القسم 6.5 للاطلاع على التفاصيل): (ألف) إضافة عناصر غذائية للمحيطات (تخصيب المحيطات) مما يزيد من إنتاجية المحيط عند سطحه، ونقل جزء من الكربون البيولوجي إلى أسفل؛ (باء) تضاف قلوية من معادن صلبة إلى المحيطات لزيادة ذوبان ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي في المحيطات؛ (ج) زيادة معدل تجوية الصخور السيليكاتية، وانتقال المعادن الكربوناته الذائبة إلى المحيطات؛ (دال) احتجاز ثاني أكسيد كربون الغلاف الجوي كيميائياً وتخزينه تحت اليابسة أو في المحيطات؛ (هاء) حرق الكتلة الحيوية في محطة للطاقة الكهربائية مع الكربون المحتجز، تخزين ثاني أكسيد الكربون المحتجز تحت اليابسة أو في المحيطات؛ (واو) احتجاز ثاني أكسيد الكربون من خلال التشجير وإعادة التشجير وتخزينه في النظم الإيكولوجية للأرض. طرائق إدارة الأشعة الشمسية (لمزيد من التفاصيل، انظر القسم 7.7)؛ (زاي) وضع أجهزة عاكسة في الفضاء لتعكس الأشعة الشمسية؛ (حاء) حقن الهباء في الستراتوسفير؛ (طاء) تخصيب السحب البحرية لزيادة عاكسيتها؛ (ياء) فقاقيع صغيرة على سطح المحيطات لزيادة عاكسيتها؛ (كاف) زيادة زراعة المزيد من المحاصيل العاكسة؛ (لام) تبييض الأسطح والهياكل المبنية الأخرى.

المحيطات. وسوف تعتمد الطرائق الأخرى على العمليات الجيولوجية مثل التجوية المعجلة لصخور السيليكات والكربونات - على الأرض أو في المحيطات (انظر السؤال 7.3، الشكل 1). ويجري بعد ذلك تخزين ثاني أكسيد الكربون المزال من الغلاف الجوي في شكل عضوي في المستودعات الأرضية أو في شكل غير عضوي في المستودعات المحيطية والجيولوجية حيث يتعين تخزينه مئات السنين على الأقل لكي تحقق CDR فعاليتها.

وتقلل طرائق إزالة ثاني أكسيد الكربون (CDR) القسر الإشعاعي لثاني أكسيد الكربون بنفس القدر الذي تحقق به فعاليتها في إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي وإبعاد ثاني أكسيد الكربون المزال من الغلاف الجوي. وقد تقلل بعض الطرائق من تحمض المحيطات (انظر السؤال 3.2) في حين أن بعض الطرائق الأخرى التي تشمل التخزين المحيطي قد تزيد بدلاً من ذلك من تحمض المحيطات إذا كان الكربون الممتص في شكل ثاني أكسيد كربون ذائب. ويتمثل أحد أوجه عدم اليقين الرئيسية المتصلة بفعالية طرائق CDR في القدرة على التخزين، واستدامة الكربون المخزن. فإزالة الكربون المستدامة وتخزينها بواسطة CDR تؤدي إلى خفض احترار المناخ في المدى الطويل. غير أن إستراتيجيات التخزين غير المستدام تتيح عودة ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي حيث يسهم مرة أخرى في الاحترار. وسوف تعوض الإزالة المتعمدة لثاني أكسيد الكربون بواسطة طرائق CDR جزئياً باستجابة مستودعات الكربون الأرضية والمحيطية في حالة انخفاض تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. ويعزى ذلك إلى أن بعض هذه المستودعات سوف يطلق إلى الغلاف الجوي ثاني أكسيد الكربون البشري المنشأ الذي كان قد خزن في السابق. ولذا فإن القضاء تماماً على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون البشري المنشأ يتطلب أن لا تقتصر تقنيات CDR على مجرد إزالة ثاني أكسيد الكربون الذي تراكم في الغلاف الجوي منذ عصور ما قبل الصناعة بل وأن يشمل الكربون البشري المنشأ الذي سبق أن امتصه الغلاف الحيوي لليابسة والمحيطات.

ولا يمكن زيادة حجم الطرائق البيولوجية ومعظم طرائق CDR التجوية الكيميائية إلى ما لا نهاية، فهي محدودة بالضرورة بالقيود الفيزيائية أو البيئية المختلفة، مثل الطلبات التنافسية على الأراضي. ولدى افتراض معدل أقصى للإحتجاز عن طريق CDR قدره 200 بيتاغرام كربون للقرن من توليفة من طرائق CDR، فإن ذلك سوف يستغرق نحو قرن ونصف القرن لإزالة ثاني أكسيد الكربون المنبعث خلال الخمسين عاماً الماضية مما يؤدي إلى تعذر التخفيف من تغير المناخ بسرعة حتى بالنسبة لمجموعة من طرائق CDR المضافة. ويمكن من حيث المبدأ أن تعمل طرائق امتصاص الهواء المباشرة بصورة أسرع إلا أنه قد يحدها التنفيذ الواسع النطاق بما في ذلك استخدام الطاقة والقيود البيئية.

ويمكن أن ينطوي CDR على آثار جانبية مناخية وبيئية. فالإنتاجية النباتية المعززة، مثلاً، قد تزيد من انبعاثات أكسيد النيتروز N_2O ، وهو من الغازات التي لها قدرة تفوق قدرة ثاني أكسيد الكربون CO_2 على إحداث الاحترار. ويمكن أن تغير زيادة واسعة النطاق في الغطاء النباتي - من خلال التشجير أو زراعة محاصيل الطاقة من خواص سطح الأرض مثل انعكاسية السطح والتدفقات المثيرة للاضطراب. وقد أظهرت بعض دراسات النمذجة أن زراعة الغابات في المناطق الشمالية التي تغطيها الثلوج موسمياً يمكن في الواقع أن يسرع الاحترار العالمي في حين أن زراعة الغابات في المناطق المدارية قد يكون أكثر فعالية في إبطاء الاحترار العالمي. وسيكون لطرائق CDR المرتكزة على المحيطات والتي تعتمد على الإنتاج البيولوجي (مثل تخصيب المحيطات) العديد من الآثار الجانبية على النظم الإيكولوجية للمحيطات، وحمضية المحيطات، وقد تنتج انبعاثات من غازات الاحتباس الحراري غير ثاني أكسيد الكربون.

طرائق إدارة الأشعة الشمسية

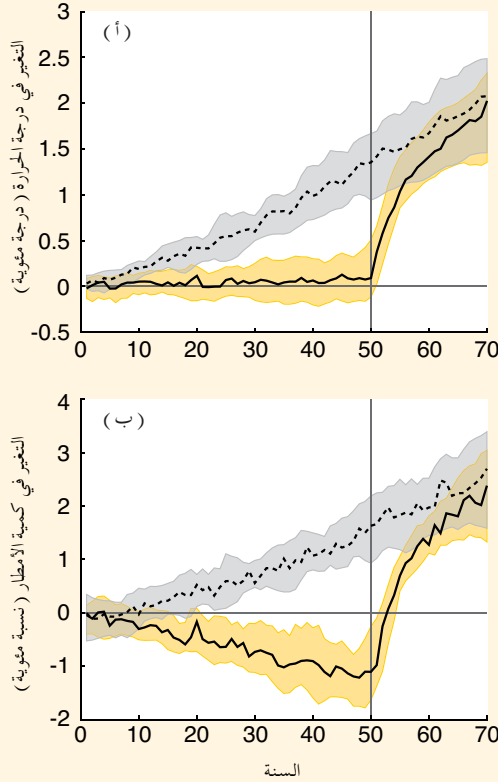
يتأثر المتوسط العالمي لدرجة الحرارة السطحية لكوكب الأرض بدرجة كبيرة بكمية ضوء الشمس التي يمتصها الغلاف الجوي للأرض وسطحها مما يؤدي إلى احترار الأرض، ونتيجة لوجود تأثير الاحتباس الحراري، وهو العملية التي تؤثر بها غازات الاحتباس الحراري والسحب في الطريقة التي تنبعث بها الطاقة في نهاية المطاف إلى الفضاء. وتؤدي الزيادة في تأثير الاحتباس الحراري إلى ارتفاع درجة حرارة سطح الأرض لحين تكون توازن جديد. وفي حالة امتصاص قدر أقل من ضوء الشمس القادم نتيجة لزيادة عاكسية الأرض أو في حالة إمكانية انبعاث الطاقة إلى الفضاء بقدر أكبر من الفعالية نتيجة لانخفاض تأثير الاحتباس الحراري، سينخفض المتوسط العالمي لدرجة الحرارة السطحية.

وتعتمد طرائق الهندسة الجيولوجية المقترحة التي تهدف إلى إدارة تدفقات طاقة الأرض القادمة والخارجة على هذا المبدأ الفيزيائي الأساسي. وتقترح معظم هذه الطرائق إما خفض ضوء الشمس الذي يصل إلى الأرض أو زيادة عاكسية الكوكب من خلال زيادة وضاءة الغلاف الجوي والسحب أو سطح الأرض (انظر السؤال 7.3، الشكل 1). وتقترح تقنية أخرى كبح السحب المرتفعة المعروفة باسم السحب السمحاقية حيث أن لهذه السحب تأثير احتباس حراري قوي. وتفيد الفيزياء الأساسية أنه إذا غير أي من هذه الطرائق تدفقات الطاقة كما هو متوقع، سوف تبرد الأرض عندئذ. غير أن الصورة معقدة بالنظر إلى العمليات الفيزيائية الكثيرة والمعقدة التي تحكم التفاعلات بين تدفق الطاقة، ودوران الغلاف الجوي والطقس والمناخ الناتج.

وفي حين أن المتوسط العالمي لدرجة حرارة سطح الكوكب سوف تستجيب للتغير في كمية ضوء الشمس التي تصل إلى سطح الأرض أو التغير في تأثير الاحتباس الحراري، فإن درجة الحرارة في أي مكان أو زمان معين سوف تتأثر بالكثير من العوامل الأخرى كما أن كمية التبريد الصادرة عن SRM لن تعادل عموماً كمية الاحترار الناشئة عن غازات الاحتباس الحراري. إذ أن SRM، مثلاً، لن تغير من معدلات الاحترار إلا خلال وقت النهار أما زيادة غازات الاحتباس الحراري فقد تغير درجات الحرارة خلال كل من النهار والليل. ويمكن أن يؤثر ذلك التعويض غير الدقيق في الدورة النهارية لدرجة حرارة سطح الأرض حتى لو لم يتغير متوسط درجة الحرارة السطحية. وثمة مثال آخر يتمثل في أن حسابات النماذج تشير إلى أن انخفاضاً موحداً في ضوء الشمس الذي يصل إلى السطح قد يبرد المتوسط العالمي للاحتباس الحراري المستحث من ثاني أكسيد الكربون إلا أن بعض المناطق سوف تنخفض بدرجة أقل من مناطق أخرى. وتشير النماذج إلى أنه في حالة تعويض الاحتباس الحراري عن الاحتباس الحراري البشري المنشأ بصورة كاملة بواسطة الهباء الموجود في الستراتوسفير، فإن المناطق القطبية سوف يقل فيها الاحترار المتبقي في حين تصبح المناطق المدارية أقل برودة بقليل مما كانت عليه في عصر ما قبل الصناعة.

ويمكن لإدارة الأشعة الشمسية SRM أن تتصدى من الناحية النظرية للتغير المناخي البشري المنشأ بسرعة، وخفض درجة حرارة الأرض إلى مستويات عصر ما قبل الصناعة في غضون عقد أو عقدين. وهذا معروف من النماذج المناخية بل ومن السجلات المناخية للثورات البركانية الكبيرة. وقد تسبب انفجار بركان جبل بيناتوبو الذي رصد رسداً جيداً في عام 1991 في إحداث زيادة مؤقتة في أهواء الستراتوسفير، وانخفاض سريع في درجة حرارة سطح الأرض بنحو 0.5 درجة مئوية.

ويتألف المناخ من كثير من العوامل بالإضافة إلى درجة حرارة سطح الأرض. ولذا فإن النتائج بالنسبة لجوانب المناخ الأخرى مثل سقوط الأمطار، ورطوبة التربة، وتدفقات الأنهار، وتراكم الثلوج، والجليد البحري، والنظم الإيكولوجية قد تكون مهمة أيضاً. وتبين النماذج النظرية أن تعويض الزيادة في تأثير الاحتباس الحراري من خلال إدارة SRM لتثبيت درجة الحرارة السطحية سيقطع بعض الشيء من المتوسط العالمي لسقوط الأمطار (للاطلاع على نتائج مثالية لنموذج، انظر السؤال 7.3، الشكل 2) ويمكن أن تحدث أيضاً تغييرات إقليمية. ويؤدي التعويض غير الدقيق في الأنماط المناخية الإقليمية والعالمية إلى أن يكون غير المرجح أن تحقق SRM مناخاً عالمياً في المستقبل يكون مماثلاً تقريباً لذلك الذي نتعرض له اليوم أو الذي تعرضنا له في السابق. غير أن النماذج المناخية المتوافرة تشير إلى أن المناخ الذي يخضع للهندسة الجيولوجية من خلال SRM، وارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي سيكون عمومًا أقرب لمناخ القرن العشرين من مناخ المستقبل الذي يتسم بارتفاع تركيزات ثاني أكسيد الكربون وبدون SRM.



السؤال 7.3، الشكل 2 | التغير في المتوسط العالمي (أ) لدرجة الحرارة السطحية (درجة مئوية) و(ب) كمية الأمطار (نسبة مئوية) في تجربتين متماثلتين في الظروف. والخطوط المتصلة لحالات المحاكاة باستخدام إدارة الأشعة الشمسية (SRM) لتحقيق توازن بالزيادة بنسبة 1 في المائة سنوياً في تركيزات ثاني أكسيد الكربون حتى العام 50 وبعده تتوقف SRM. وتمثل الخطوط المتقطعة حالات المحاكاة لإحداث توازن بالزيادة بنسبة 1 في المائة سنوياً في تركيزات ثاني أكسيد الكربون في عدم وجود SRM. ويبين المخططان الأصفر والرمادي المئينين الخامسة والعشرين والخامسة والسبعين من ثمانية نماذج مختلفة.

وقد يكون لتقنيات SRM آثار جانبية أخرى. إذ تشير الدراسات النظرية والرصدات والنماذج، مثلاً، إلى أن أهواء الكبريتات في الستراتوسفير الناشئ عن الانفجارات البركانية والانبعاثات الطبيعية تستنزف طبقة الأوزون الستراتوسفيري وخاصة في وجود الكلور الناشئ عن انبعاثات الكلوروفلوروكربون في الغلاف الجوي. ويتوقع أن يكون لهواء الستراتوسفير المستخدم لأغراض SRM نفس التأثير. وسوف يزيد استنفاد طبقة الأوزون من كمية الضوء فوق البنفسجي الذي يصل إلى سطح الأرض ويدمر النظم الإيكولوجية الأرضية والبحرية. كما يزيد الهباء الستراتوسفيري أيضاً من نسبة ضوء الشمس المباشر إلى الضوء المنتشر الذي يصل إلى سطح الأرض والذي يزيد عموماً من إنتاجية النباتات. كما أعرب عن بعض الشواغل من أن يؤدي هباء الكبريتات المستخدم في SRM إلى زيادة الأمطار الحمضية إلا أن دراسات النماذج تشير إلى أن الأمطار الحمضية ليست على الأرجح من الشواغل الرئيسية بالنظر إلى أن معدل الأمطار الحمضية الذي ينتج من أهواء الستراتوسفير المستخدمة لإدارة SRM سيكون أقل كثيراً من القيم التي تنتج حالياً من مصادر التلوث. ولن تتناول SRM كذلك تمض المحيطات المرتبط بزيادة تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي وتأثيراته على النظم الإيكولوجية البحرية.

وبدون جهود التخفيف التقليدية أو طرائق CDR المحتملة، سوف تستمر تركيزات ثاني أكسيد الكربون المرتفعة الناتجة من الانبعاثات البشرية المنشأ في الغلاف الجوي لفترات طويلة تصل إلى آلاف السنين. وسوف تستمر SRM مادامت تركيزات ثاني أكسيد الكربون مرتفعة. وسوف يؤدي وقف SRM في الوقت الذي تظل فيه تركيزات ثاني أكسيد الكربون مرتفعة إلى إحداث احترار بالغ السرعة خلال عقد أو عقدين (انظر السؤال 7.3، الشكل 3) مما سيحدث إجهاداً شديداً للنظم الإيكولوجية والتكيف البشري.

وإذا استخدمت SRM لتجنب بعض نتائج زيادة التركيزات في ثاني أكسيد الكربون، فإن المخاطر، والآثار الجانبية وجوانب القصور سوف تزداد مع تزايد مستوى SRM. وقد اقترحت أساليب لاستخدام قدر محدود من SRM لفترة محدودة بالاقتران مع إستراتيجيات قوية لخفض تركيزات ثاني أكسيد الكربون للمساعدة في تجنب التحولات عبر الحدود القصوى المناخية أو نقاط الانقلاب التي لا يمكن تجنبها بدون ذلك. وسوف يتطلب تقييم هذه الأساليب تحليلاً دقيقاً للمخاطر مقابل المنافع مما يتجاوز بكثير نطاق هذا التقرير.

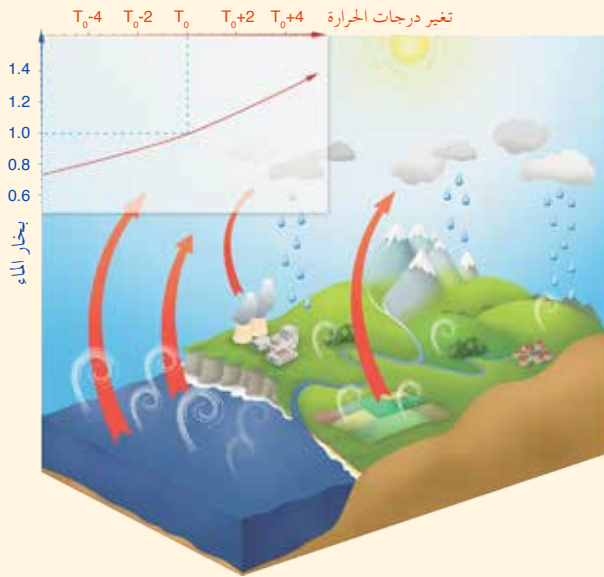
السؤال 8.1 | ما مدى أهمية بخار الماء لتغير المناخ؟

يُضطلع بخار الماء، بوصفه أكبر مساهم في تأثير الاحتباس الحراري الطبيعي، بدور أساسي في تغير مناخ الأرض. غير أن كمية بخار الماء في الغلاف الجوي يحكمها في الغالب درجة حرارة الهواء وليس الانبعاثات. ولهذا السبب، يعتبره العلماء عاملاً من عوامل التأثير التفاعلي وليس قوة قسرة لتحقيق تغير المناخ. وليس للانبعاثات البشرية المنشأ لبخار الماء، من خلال الري وتبريد محطات القوى، تأثير يذكر على تغير المناخ.

وبخار الماء هو غاز الاحتباس الحراري الرئيسي في الغلاف الجوي للأرض. وتعتمد مساهمة بخار الماء في التأثير الطبيعي للاحتباس الحراري مقابل مساهمة ثاني أكسيد الكربون (CO_2) على طريقة الحساب، إلا أنه يمكن اعتباره أكبر بمقدار ضعفين إلى ثلاثة أضعاف تقريباً. ويحقق معظم بخار الماء الإضافي في الغلاف الجوي من الأنشطة البشرية المنشأ، من خلال زيادة البخر من المحاصيل المروية ومن خلال تبريد محطات القوى، وبصورة طفيفة من احتراق الوقود الأحفوري. ولذا يمكن للمرء أن يتساءل عن السبب في هذا التركيز الكبير على ثاني أكسيد الكربون CO_2 وليس على بخار الماء باعتباره تأثيراً قسرياً في تغير المناخ.

ويعمل بخار الماء بطريقة مختلفة عن ثاني أكسيد الكربون بأحد الطرق الجوهرية: فإن بوسعه التكثف والتساقط. فعندما يبرد الهواء المحمل بالرطوبة العالية، يتكثف جزء من بخار الماء ويتحول إلى قطرات ماء أو جزيئات جليد، وتسقط أمطاراً. وتبلغ فترة البقاء العادية لبخار الماء في الغلاف الجوي عشرة أيام. ويقل تدفق بخار الماء في الغلاف الجوي من المصادر البشرية المنشأ بدرجة كبيرة عن البخر «الطبيعي» ولذا فإن تأثيره لا يذكر على التركيزات الشاملة، ولا يسهم إسهاماً كبيراً في تأثير الاحتباس الحراري الطويل الأجل. وهذا هو السبب الرئيسي في أن بخار الماء التروبوسفيري (الذي يوجد عادة عند ارتفاع يقل عن 10 كيلومترات) لا يعد غازاً من غازات الاحتباس الحراري التي تسهم في القسرة الإشعاعي.

وللانبعاثات البشرية المنشأ تأثير كبير على بخار الماء في الستراتوسفير الذي يشكل جزءاً من الغلاف الجوي فوق نحو 10 كيلومترات. وتؤدي زيادة تركيزات الميثان (CH_4) بسبب الأنشطة البشرية إلى مصدر إضافي للماء من خلال الأكسدة مما يفسر جزئياً التغيرات المرصودة في تلك الطبقة من الغلاف الجوي. ولهذا التغيير في الماء الستراتوسفيري تأثير مشع، ويعد تأثيراً قسرياً ويمكن تقييمه. وقد تباينت تركيزات الماء في الستراتوسفير تبايناً شاسعاً خلال العقود الماضية. ولم يفهم المدى الكامل لهذه التباينات على نحو جيد، ولا يمثل على الأرجح تأثيراً قسرياً قدر ما يمثل عملية تأثير تفاعلي يضاف إلى التقلبية الطبيعية. ومساهمة بخار الماء الستراتوسفيري في الاحترار، سواء كتأثير قسري أو تأثير تفاعلي أصغر بكثير من تأثير الميثان (CH_4) وثاني أكسيد الكربون (CO_2).



السؤال 8.1، الشكل 1 | رسم توضيحي للدورة المائية وتفاعلها مع ظاهرة تأثير الاحتباس الحراري. ويشير الرسم المدرج إلى أعلى يسار الشكل إلى الزيادة النسبية في التركيز المحتمل لبخار الماء في الهواء مع الزيادة في درجة الحرارة (نحو 7 في المائة لكل درجة). وتبين الجدائل البيضاء البخر الذي يعوضه سقوط الإمطار لإغلاق موازنة المياه. وتبين الأسهم الحمراء الأشعة تحت الحمراء الخارجة التي يمتصها بخار الماء والغازات الأخرى جزئياً، وهي عملية تشكل أحد مكونات تأثير الاحتباس الحراري. ولا تظهر العمليات الستراتوسفيرية في هذا الشكل.

وتتحكم درجة الحرارة في الكمية القصوى من بخار الماء في الهواء. فقد يحتوي العمود المعتاد من الهواء الممتد من سطح الأرض إلى الستراتوسفير في المناطق القطبية ما لا يتجاوز بضعة كيلوغرامات من بخار الماء لكل متر مربع، في حين قد يحتوي عمود مماثل من الهواء في المناطق المدارية على ما يصل إلى 70 كيلوغراماً. ومع كل زيادة في درجة الحرارة بمقدار درجة واحدة، يمكن أن يحتفظ الغلاف الجوي بكمية من بخار الماء تزيد بنسبة 7 في المائة (انظر الرسم المدرج إلى اليسار أعلى الشكل 1 في السؤال 8.1). وتؤدي هذه الزيادة في التركيز إلى تفاقم تأثير الاحتباس الحراري ومن ثم تؤدي إلى زيادة الاحترار. وهذه العملية التي يشار إليها على أنها التأثير التفاعلي لبخار الماء، تحظى بفهم جيد ويجري تقييمها كمياً. وتحدث في جميع النماذج المستخدمة لتقدير تغير المناخ حيث تتسق قوتها مع الرصدات. وفي حين أنه قد رصدت زيادة في بخار ماء الغلاف الجوي، جرى التسليم بأن هذا التغير عبارة عن تأثير تفاعلي (من الزيادة في درجة حرارة الغلاف الجوي) وينبغي عدم تفسيره على أنه تأثير قسري إشعاعي من الانبعاثات البشرية المنشأ.

ولبخار الماء في الوقت الراهن التأثير الأكبر على الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي للأرض. غير أن غازات الاحتباس الحراري الأخرى، ثاني أكسيد الكربون CO_2 بالدرجة الأولى، ضرورية لدعم وجود بخار الماء في الغلاف الجوي. والواقع أنه في حالة إزالة هذه الغازات من الغلاف الجوي، تهبط درجة حرارته بما يكفي لإحداث انخفاض في بخار الماء، مما يؤدي إلى حدوث هبوط مفاجئ في تأثير الاحتباس الحراري الأمر الذي يقحم الأرض في حالة تجمد. وعلى ذلك فإن غازات الاحتباس الحراري غير بخار الماء توفر هيكل درجات الحرارة الذي يدعم المستويات الحالية لبخار الماء في الغلاف الجوي. ففي حين أن ثاني أكسيد الكربون يمثل عنصر التحكم الرئيسي البشري المنشأ في المناخ، فإن بخار الماء يمثل التأثير التفاعلي القوي السريع الذي يقوي من أي تأثير قسري أولي بعامل معتاد يتراوح بين ضعفين وثلاثة أضعاف. وبخار الماء ليس تأثيراً قسرياً أولياً كبيراً إلا أنه مع ذلك عامل جوهري في المناخ.

السؤال 8.2 | هل للتحسينات في جودة الهواء تأثير على تغير المناخ؟

نعم تؤثر التحسينات في جودة الهواء على المناخ، إلا أن ذلك يعتمد على نوع الملوث أو الملوثات التي تحد منها، وبوسعها إما أن تبرد المناخ أو تسببه بالاحترار. ففي حين أن خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت (SO_2)، مثلاً، يؤدي إلى زيادة الاحترار، فإن التحكم في انبعاثات أكسيد النيتروز (NOx) له تأثير مبرد (من خلال خفض الأوزون التروبوسفيري) وله أيضاً تأثير احتراري (نتيجة لتأثيره على فترة بقاء الميثان في الغلاف الجوي وإنتاج الهباء). كما يمكن أن يؤثر تلوث الهواء في أنماط سقوط الأمطار.

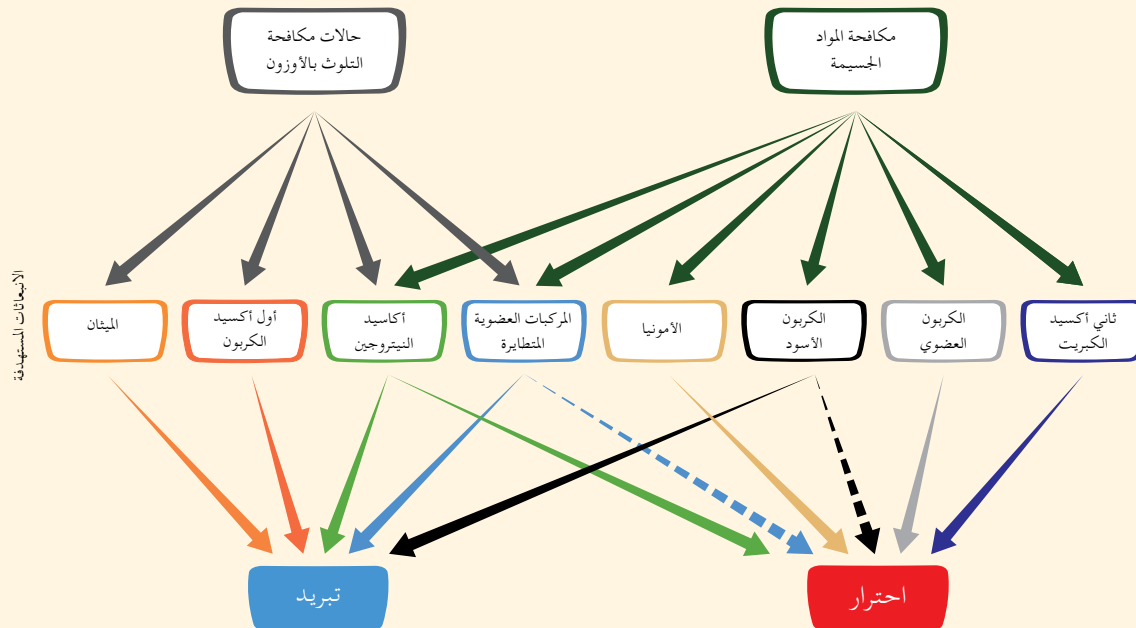
وتمثل جودة الهواء عادة مقياساً للملوثات السطحية التي يحملها الهواء مثل الأوزون، وأول أكسيد الكربون، وأكاسيد النيتروجين، والهباء الجوي (الجسيمات الصلبة أو السائلة). ويؤدي التعرض لهذه الملوثات إلى تفاقم أمراض الجهاز التنفسي والأوعية القلبية، ويضر بالنبات ويدمر المباني. ولهذه الأسباب، فإن معظم المراكز الحضرية الرئيسية تعمل على مكافحة إطلاق الملوثات التي يحملها الهواء.

وخلالاً لثاني أكسيد الكربون (CO_2) وغيره من غازات الاحتباس الحراري الجيدة الامتزاج، قد يستمر أوزون الهباء الجوي في التروبوسفير في الغلاف الجوي لفترة لا تتجاوز بضعة أيام إلى بضعة أسابيع، غير أن الاقترانات غير المباشرة داخل نظام الأرض قد تطيل أمد تأثيراتها. وهذه الملوثات تكون عادة أكثر قوة بالقرب من منطقة انبعاثاتها أو تكونها، حيث يمكن أن تحدث اضطرابات محلية أو إقليمية في المناخ حتى ولو كان متوسط تأثيراتها عالمياً ضعيفاً.

وتؤثر الملوثات الهوائية في المناخ بطرق مختلفة بحسب خواصها الفيزيائية والكيميائية. وسوف تؤثر غازات الاحتباس الحراري الناشئة من التلوث في المناخ وذلك بالدرجة الأولى من خلال الأشعة ذات الموجة القصيرة والموجة الطويلة، في حين يمكن للهباء أن يؤثر بالإضافة إلى ذلك في المناخ من خلال التفاعلات بين السحب والهباء.

وقد جرى تحديد جوانب الرقابة على انبعاثات الميثان البشرية المنشأ (السؤال 8.2، الشكل 1) لخفض الأوزون السطحي على أنه يمثل أوضاعاً مفيدة في جميع الأحوال. غير أن نتائج الرقابة على سلائف الأوزون الأخرى لا تكون واضحة دائماً. فمثلاً، قد يتوقع أن يكون لحالات الرقابة على انبعاثات أكاسيد النيتروجين تأثير مبرد بالنظر إلى أنها تخفض من الأوزون الستراتوسفيري، إلا أن تأثير فترة بقاء الميثان CH_4 ، وتكون الهباء قد يتسبب على الأرجح، بدلاً من ذلك، في تحقيق احترار شامل.

وقد حددت الرصدات الساتلية زيادة في تركيزات ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) (السلف الرئيسي لأهباء الكبريتات المشتتة) من محطات الطاقة العاملة بحرق الفحم في شرقي آسيا خلال العقود القليلة الأخيرة. وتستخدم أحدث محطات الطاقة أجهزة غسل الغازات للحد من هذه الانبعاثات (دون أن يشمل ذلك انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المتزامنة وما يرتبط بها من احترار طويل الأجل للمناخ). ويحسن ذلك من جودة الهواء إلا أنه يقلل أيضاً من التأثير المبرد لأهباء الكبريتات ومن ثم يؤدي إلى تفاقم الاحترار. وتحدث الأهباء المبردة من خلال التفاعلات بين الهباء والأشعة، وبين الهباء والسحب، ويقدر بنحو 0.9 واط/2م (جميع الأهباء مجتمعة، القسم 8.3.4.3) منذ عصر ما قبل الصناعة ونموها على وجه الخصوص خلال النصف الثاني من القرن العشرين لدى زيادة الانبعاثات البشرية المنشأ بدرجة شديدة.



السؤال 8.2، الشكل 1 | رسم تخطيطي لتأثير الرقابة على التلوث على الانبعاثات النوعية والتأثير المناخي. ويشير الخط الأسود المتصل إلى التأثير المعروف، ويشير الخط المتقطع إلى التأثيرات التي يكتنفها عدم اليقين.

ومن ناحية أخرى فإن الكربون الأسود أو السناج يمتص الحرارة من الغلاف الجوي (مما يؤدي إلى تأثير قصري إشعاعي قدره 0.4 واط/م² من انبعاثات الوقود الأحفوري أو الأحيائي البشرية المنشأ) وعندما يترسب على الثلج فإنه يقلل من الألبيدو أو القدرة على عكس ضوء الشمس. ولذا قد يكون للانخفاضات في انبعاثات الكربون الأسود تأثير مبرد إلا أن التفاعلات الإضافية للكربون الأسود مع السحب تتسم بعدم اليقين وقد تؤدي إلى بعض التصدي للاحترار.

كذلك فإن حالات الرقابة على جودة الهواء تستهدف أيضاً قطاع نشاط محدد بشري المصدر مثل النقل أو إنتاج الطاقة. وفي تلك الحالة، تؤدي الأنواع المشتركة الانبعاث في القطاع المستهدف إلى مزيج معقد من الكيمياء والاضطرابات المناخية. فمثلاً، يحتوي الدخان الناتج من احتراق الوقود الحيوي على خليط من كل من جسيمات اضطراب ماصة ومشتتة فضلاً عن سلائف الأوزون، وهي الجوانب التي يصعب التيقن من تأثيراتها المناخية المتقارنة.

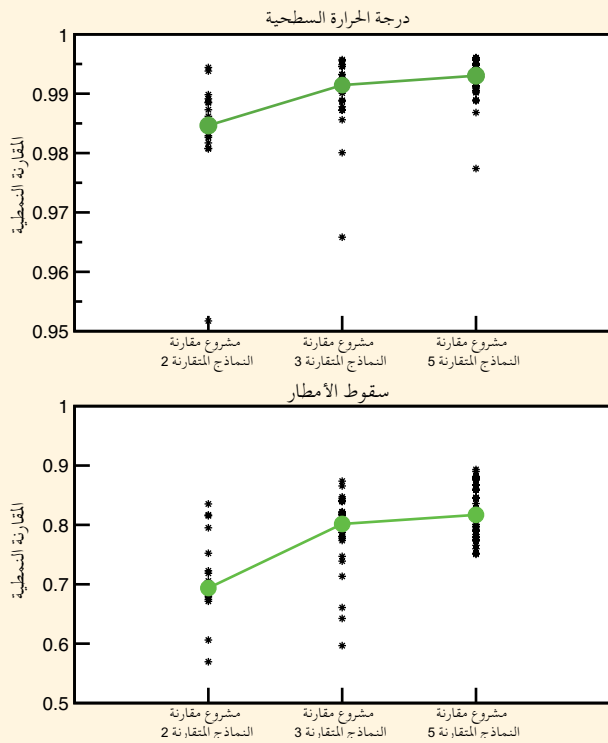
وعلى ذلك، فإن الرقابة على جودة الهواء السطحي سوف تنطوي على بعض النتائج المتعلقة بالمناخ. غير أن بعض الاقتراعات بين الانبعاثات المستهدفة والمناخ مازال يفهم أو يحدد بطريقة سيئة، بما في ذلك تأثيرات ملوثات الهواء على أنماط تساقط الأمطار مما يتعذر معه وضع تقييم كمي كامل لهذه النتائج. وثمة منعطف مهم أيضاً في التأثير المحتمل لتغير المناخ على جودة الهواء. فعلى وجه الخصوص، يشير الارتباط المرصود بين الأوزون السطحي ودرجة الحرارة في المناطق الملوثة إلى أن ارتفاع درجات الحرارة من تغير المناخ يمكن بمفرده أن يحدث تفاقماً في التلوث في بعض الأحيان مما يشير إلى «العقوبة المناخية». وتعني هذه العقوبة أن الأمر سيتطلب زيادة التشدد في الرقابة على الأوزون السطحي لتحقيق هدف محدد. وعلاوة على ذلك، فإن التغيرات المسقطية في تواتر وطول فترات الركود يمكن أن تؤثر في ظروف جودة الهواء. وسوف تكون هذه الجوانب متقلبة إقليمياً ويتعذر تقييمها، إلا أن تحسن فهم هذه العمليات وتقييمها كيمياً ونمذجتها سوف يوضح التفاعل الشامل بين ملوثات الهواء والمناخ.

السؤال 9.1 | هل تتحسن النماذج المناخية، وكيف سنعرف ذلك؟

النماذج المناخية عبارة عن برامج حاسوبية شديدة التعقيد تجسد فهمنا للنظام المناخي، وتحاكي، بكل الوسائل الحديثة الممكنة في الوقت الحاضر، التفاعلات المعقدة بين الغلاف الجوي، والمحيطات، وسطح اليابسة، والثلوج، والجليد، والنظام الإيكولوجي العالمي، وطائفة من العمليات الكيميائية والبيولوجية.

وقد زاد تعقيد النماذج المناخية — تمثيل العمليات الفيزيائية مثل التفاعلات بين السحب وسطح اليابسة وتمثيل دورتي الكربون والكبريت على الصعيد العالمي في الكثير من النماذج — التي زادت زيادة كبيرة منذ أول تقرير تقييم يصدر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ عام 1990، وبهذا المعنى فإن النماذج الحالية لنظام الأرض «أحسن» بكثير مما كانت عليه نماذج ذلك العصر. وقد استمر هذا التطور منذ التقييم الرابع، في حين أسهمت عوامل أخرى أيضاً في تحسين النماذج. وتتيح الحواسيب الفائقة الأكثر قوة للنماذج الحالية حل التفاصيل المكانية الأدق. كما تجسد النماذج الحالية تحسن فهم كيفية إجراء العمليات المناخية — وهو الفهم الذي تمخضت عنه البحوث والتحليلات الجارية بالإضافة إلى الرصدات الجديدة والمحسنّة.

والنماذج المناخية الحالية أفضل، من حيث المبدأ، من النماذج السابقة غير أن كل جزء صغير في التعقيد المضاف، والذي يرمي إلى تحسين بعض جوانب المناخ الخاضعة للمحاكاة، يضيف أيضاً مصادر جديدة للخطأ المحتمل (عن طريق بارامترات عدم اليقين، مثلاً)، والتفاعلات الجديدة بين مكونات النموذج التي قد تؤدي، ولو مؤقتاً، إلى تدهور محاكاة النموذج لجوانب أخرى من النظام المناخي. وعلاوة على ذلك فإنه على الرغم من التقدم الذي أحرز، مازال عدم اليقين العلمي قائماً بشأن تفاصيل الكثير من العمليات.



السؤال 9.1، الشكل 1 | قدرة النموذج على محاكاة المتوسط السنوي لدرجات الحرارة وأنماط سقوط الأمطار على النحو المبين من نتائج ثلاث مراحل أخيرة من مشروع مقارنة النماذج المتقارنة (CMIP2)، نماذج من نحو عام 2000، CMIP3، نماذج من نحو عام 2005، CMIP5، الجيل الحالي من النماذج). وبين الشكل الارتباط (وهو قياس لتمثيل الأنماط) بين درجات الحرارة المرصودة وتلك النمذجة (اللوحة العليا) وسقوط الأمطار (اللوحة السفلى). وتشير القيم الكبيرة إلى تحسن التواصل بين الأنماط النمذجة والمرصودة والمكانية. وتشير الرموز السوداء إلى معامل الارتباط لفرايد النماذج، بينما تشير الرموز الخضراء الكبيرة إلى القيم الوسطية (أي نصف نتائج النموذج أعلاه والنصف الآخر أقل من هذه القيم). ويتضح التحسن في أداء النماذج من الزيادة في الارتباط بين أجيال النماذج المتعاقبة).

وثمة اعتبار مهم يتمثل في أنه لا يمكن تقييم أداء بعض النماذج إلا بمقارنتها بالرصدات السابقة مع مراعاة التقلبية الداخلية الطبيعية. وينبغي لضمان الثقة في الإسقاطات المستقبلية لهذه النماذج، محاكاة المناخ التاريخي، وتقلباته وتغيره على نحو جيد. وقد وفر نطاق تقييم النماذج من حيث نوع وكمية الرصدات المتاحة، وتوافر تجارب النمذجة المنسقة والاستخدام الموسع لمختلف مصفوفات الأداء — المعلومات التي يجري تقييمها كمياً بدرجة كبيرة عن أداء النماذج. غير أن ذلك قد لا يكفي بمفرده. ففي حين أنه يمكن التحقق بانتظام من إسقاطات الطقس، والمناخ الموسمي، لا يمكن أن يتحقق ذلك بالنسبة للإسقاطات المناخية التي تغطي قرناً أو أكثر. وهذا هو الوضع على وجه الخصوص في حالة دفع التأثير القسري البشري المنشأ النظام المناخي صوب ظروف لم ترصد من قبل في السجلات القائمة على الأجهزة، وسيمثل ذلك قصوراً في كثير من الأحوال.

وعملية التقييم الكمي لأداء النماذج موضوع ظهر في جميع التقارير السابقة للفريق العامل الأول التابع للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ. ويوفر الاطلاع على عمليات التقييم السابقة هذه إحساساً عاماً بالتحسينات التي تحققت. فقد قدمت التقارير السابقة كالعادة مسحاُ واسعاً لأداء النماذج يبين الفروق بين النسخ المحسوبة بالنماذج لمختلف الكميات المناخية والتقديرات الرصدية المقابلة.

بعض النماذج تقدم حتماً أداءً أفضل من غيرها بالنسبة لبعض المتغيرات المناخية، إلا أنه لا يظهر أي نموذج بمفرده بوضوح على أنه «الأفضل» بصورة شاملة. وقد أحرز مؤخراً تقدم في حساب مختلف مقاييس الأداء التي تحلل أداء النماذج بالمقارنة بطائفة من الرصدات المختلفة وفقاً لتصنيف عددي بسيط. ومن البديهي أن تعريف هذا التصنيف، وطريقة حسابه، والرصدات المستخدمة (والتي تنطوي على أوجه عدم اليقين الخاصة بها)، والطريقة التي تجمع بها مختلف علامات التقييم تتسم كلها بالأهمية، وسوف تؤثر في النتائج النهائية.

ومع ذلك، إذا حسبت المقاييس بصورة متساوقة، يمكن للمرء أن يقارن بين مختلف أجيال النماذج. وتبين نتائج هذه المقارنات عموماً أنه على الرغم من أن كل جبل يعرض نطاقاً من الأداء، فإن متوسط مؤشر أداء النموذج تحسن باطراد من جبل إلى جبل. ويرد أحد الأمثلة على التغيرات في أداء النماذج بمرور الوقت في السؤال 9.1، الشكل 1، الذي يبين التحسينات الجارية وإن كانت متواضعة. ومن الجدير بالملاحظة أن كلاً من أسوأ وأحسن نموذج أداء يبين حدوث تحسن، وأن هذا التحسن يأتي بالتوازي مع الزيادة في تعقيد النماذج، والتخلص من التعديلات الاصطناعية في تجمع الغلاف الجوي والمحيطات (ما يسمى «بتعديلات التدفق»). وتشمل بعض أسباب هذا التحسن زيادة فهم مختلف العمليات المناخية والتمثيل الأفضل لهذه العمليات في النماذج المناخية. كما أن زيادة رصدات الأرض الشاملة تعتبر محركاً أيضاً لهذه التحسينات.

الإجابة عن السؤال المطروح إذا هي نعم، يتزايد تحسن النماذج المناخية، ويمكن أن نوضح ذلك بمقاييس أداء كمية تستند إلى رصدات تاريخية. وعلى الرغم من أنه لا يمكن تقييم الإسقاطات المناخية المستقبلية بصورة مباشرة، فإن النماذج المناخية تستند، إلى حد كبير، لمبادئ فيزيائية قابلة للتحقق، وقادرة على أن تنتج الكثير من الجوانب المهمة عن الاستجابة السابقة للتأثير القسري الخارجي. وبهذه الطريقة، فإنها توفر استعراضاً سليماً من الناحية العلمية لاستجابة المناخ لمختلف سيناريوهات التأثير القسري البشري المنشأ.

السؤال 10.1 | المناخ يتغير دائماً. كيف نحدد أسباب التغيرات المرصودة؟

تقيم أسباب التغيرات الطويلة الأجل المرصودة في المناخ (على نطاقات زمنية أطول من عقد) من خلال تحديد ما إذا كانت «البصمة» المتوقعة لمختلف أسباب تغير المناخ موجودة في السجل التاريخي. وتستمد هذه البصمات من عمليات المحاكاة المنهجية المعتمدة على الحاسوب لمختلف أنماط تغير المناخ الناشئة عن التأثيرات القسرية المناخية المختلفة. وتشمل هذه التأثيرات القسرية، على نطاقات زمنية من عدة عقود، بعض العمليات مثل الزيادات في غازات الاحتباس الحراري أو التغيرات في السطوح الشمسي. ويمكن أن تحدد، من خلال مقارنة أنماط البصمات الخاضعة للمحاكاة بالأنماط المناخية المرصودة، ما إذا كانت التغيرات المرصودة قد فسرت، على أفضل وجه، من خلال أنماط تلك البصمات أو بواسطة التقلبية الطبيعية التي تحدث دون أي تأثير قسري.

وتتضح بصمات الزيادات في غازات الاحتباس الحراري البشرية المنشأ بجلاء في نمط تغير المناخ المرصود في القرن العشرين. ولا يمكن تفسير التغير المرصود إلا عن طريق بصمات التأثيرات القسرية الطبيعية أو التقلبية الطبيعية التي تحاكيها النماذج المناخية. ولذا فإن دراسات العزو قد تؤيد النتيجة التي تفيد بأنه من المحتمل بدرجة كبيرة أن تكون الأنشطة البشرية قد تسببت بأكثر من نصف الزيادة المرصودة في المتوسط العالمي لدرجات الحرارة السطحية من 1951 إلى 2010.

ومناخ الأرض في حالة تغير دائم، ويمكن أن يحدث ذلك لعدة أسباب. ويتعين علينا أولاً أن نتيقن، لكي نحدد الأسباب الرئيسية للتغيرات المرصودة، مما إذا كان التغير المرصود في المناخ يختلف عن التقلبات الأخرى التي تحدث دون أي تأثير بشري على الإطلاق. وتعتبر تقلبية المناخ دون تأثير قسري - وتسمى التقلبية الداخلية - نتيجة لعمليات داخل النظام المناخي. فالتقلبية المحيطية الواسعة النطاق مثل تقلبات التذبذب الجنوبي - النينيو (ENSO) في المحيط الهادئ، هي المصدر الغالب في تقلبية المناخ الداخلية على النطاقات الزمنية لعقود إلى قرون.

ويمكن أن ينتج تغير المناخ أيضاً عن التأثيرات القسرية الطبيعية الخارجة عن النظام المناخي مثل الانفجارات البركانية أو التغيرات في سطوح الشمس. وتعد التأثيرات القسرية من هذا القبيل مسؤولة عن التغيرات الضخمة في المناخ والتي جرى توثيقها بوضوح في السجل الجيولوجي. وتشمل التأثيرات القسرية البشرية التأثيرات انبعاثات غازات الاحتباس الحراري أو التلوث الجسيم في الغلاف الجوي. ويمكن أن يؤثر أي من هذه التأثيرات القسرية، الطبيعية أو البشرية المنشأ، في التقلبية الداخلية فضلاً عما تسببه في إحداث تغير في المناخ المتوسط. وتسعى دراسات العزو إلى تحديد أسباب التغير الملحوظ في المناخ المرصود - فنحن على دراية بأن المتوسط العالمي لدرجة الحرارة قد زاد خلال القرن الماضي، وعلى ذلك إذا كان التغير المرصود قد حدث قسراً فإن التأثير القسري الرئيسي يجب أن يتسبب في حدوث احترار، لا تبريد.

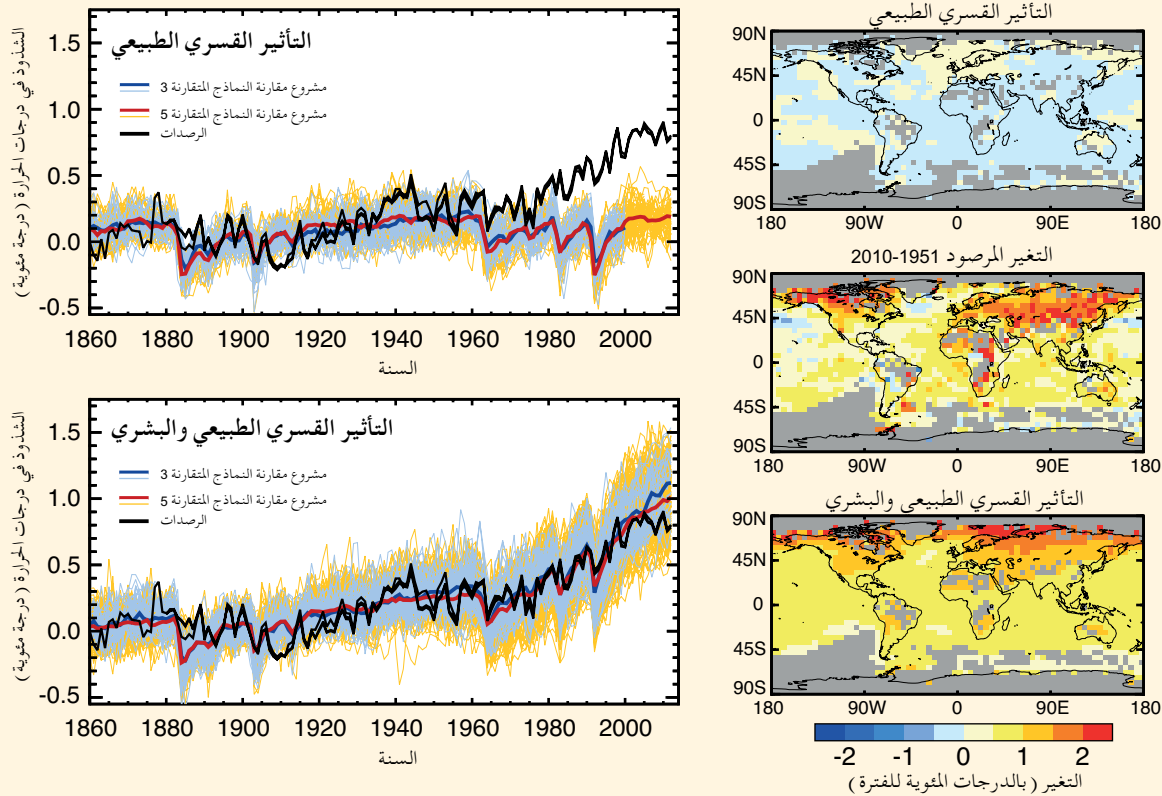
وقد درست أسباب تغير المناخ الرسمية باستخدام تجارب محكمة بنماذج مناخية. وتسمى الاستجابات التي تتم محاكاتها بالنماذج للتأثيرات القسرية المناخية المحددة في كثير من الأحيان بصمات تلك التأثيرات القسرية. ويتعين على النموذج المناخي أن يحاكي بصورة يعتمد عليها أنماط البصمات المرتبطة بالتأثيرات القسرية المختلفة فضلاً عن أنماط التقلبية الداخلية دون قسر لتحقيق تقييم معقول لأسباب تغير المناخ. ولا يوجد نموذج يستطيع أن يحاكي بأكتمال جميع جوانب المناخ إلا أن الكثير من الدراسات المفصلة تشير إلى أن عمليات المحاكاة باستخدام النماذج الحالية يُعتمد عليها فعلاً بما يكفي لإجراء عمليات تقييم الأسباب.

وبين السؤال 10.1، الشكل 1 جزءاً من تقييم بصمة التغير في درجة حرارة العالم على السطح خلال أو آخر القرن العشرين. ويعتبر التغير المرصود في النصف الأخير من القرن العشرين المبين بواسطة السلاسل الزمنية السوداء في اللوحات إلى اليسار أكبر من القيم المسقط من مجرد التقلبية الداخلية. وتخفق عمليات المحاكاة الناشئة عن التأثيرات القسرية الطبيعية (الخطوط الصفراء والزرقاء، في اللوحة العليا إلى اليسار) في محاكاة الاحترار العالمي في أواخر القرن العشرين على السطح مع نمط مكافئ للتغير (اللوحة العليا إلى اليمين) يختلف تماماً عن نمط التغير المرصود (الوسط إلى اليمين). وتوفر عمليات المحاكاة التي تتضمن التأثيرات القسرية الطبيعية والبشرية المنشأ تمثيلاً أفضل بكثير لمعدل التغير الزمني (اللوحة السفلى إلى اليسار) والنمط المكافئ (اللوحة السفلى إلى اليمين) للتغير المرصود في درجات حرارة السطح.

وبين كل من اللوحتين إلى اليسار أن النماذج الحاسوبية تحاكي تبرد السطح الناشئ عن تأثير القسر الطبيعي الذي رصد لمدة عام أو اثنين بعد الانفجارات البركانية الكبرى مثل تلك التي وقعت في 1982 و 1991. وتظهر عمليات محاكاة التأثير القسري الطبيعي التغيرات في درجات الحرارة قصيرة العمر عقب الانفجارات إلا أن عمليات المحاكاة الطبيعية والبشرية المنشأ هي التي تحاكي اتجاه الاحترار الأطول مدى.

وسوف تفحص عملية تقييم الأسباب الأكثر اكتمالاً درجات الحرارة فوق السطح وربما في وجود متغيرات مناخية أخرى بالإضافة إلى نتائج درجات الحرارة السطحية المبينة في السؤال 10.1، الشكل 1. وقد أصبح من الأسر تمييز أنماط البصمات المرتبطة بالتأثيرات القسرية المفردة عندما يؤخذ المزيد من التقلبيات في الاعتبار في التقييم.

وعموماً، يبين السؤال 10.1، الشكل 1 أن نمط التغير المرصود في درجة الحرارة يختلف بدرجة كبيرة عن نمط الاستجابة للتأثير القسري الطبيعي بمفرده. وتوفر الاستجابة الخاضعة للمحاكاة لجميع التأثيرات القسرية بما في ذلك التأثيرات القسرية البشرية المنشأ مقارنة جيدة للتغيرات المرصودة في السطح. ولا يمكننا إجراء محاكاة صحيحة لتغير المناخ المرصود في الآونة الأخيرة دون إدراج الاستجابة للتأثيرات القسرية البشرية المنشأ بما في ذلك غازات الاحتباس الحراري، والأوزون الستراتوسفيري والهباء الجوي. وما زالت الأسباب الطبيعية للتغير تؤثر في النظام المناخي إلا أن التغيرات الأخيرة في درجات الحرارة تعزى إلى حد كبير إلى التأثيرات القسرية التي هي من صنع البشر.



السؤال 10.1، الشكل 1 | (إلى اليسار) السلاسل الزمنية للتغير في المتوسط العالمي والسنوي لدرجات الحرارة السطحية من 1860 إلى 2010. وتبين اللوحة العليا إلى اليسار النتائج من مجموعتين من النماذج المناخية مدفوعة بالتأثيرات القسرية الطبيعية فقط (الخطوط الزرقاء والصفراء)، ومجموعة التغيرات، ومتوسط درجات الحرارة (الخطوط الزرقاء والحمراء الكثيفة). وتظهر ثلاثة تقديرات مرصودة مختلفة في الخطوط السوداء. وتبين اللوحة السفلى إلى اليسار عمليات المحاكاة بواسطة نفس النماذج إلا أنها مدفوعة بكل من التأثير القسري الطبيعي والتغيرات البشرية المنشأ في غازات الاحتباس الحراري والهباء الجوي. وتبين إلى اليمين الأنماط المكانية لاتجاهات درجات الحرارة السطحية المحلية من 1951 إلى 2010. وتبين اللوحة العليا نمط الاتجاهات من مجموعة كبيرة من عمليات المحاكاة في إطار المرحلة 5 من مشروع مقارنة النماذج المتقارنة (CMIP5) المدفوعة بالتأثيرات القسرية الطبيعية فقط. وتبين اللوحة السفلى التغيرات عن المجموعة المقابلة من عمليات المحاكاة المدفوعة بالتأثيرات القسرية الطبيعية والبشرية المنشأ. وتبين اللوحة في الوسط نمط الاتجاهات المرصودة من مجموعة بيانات درجات حرارة السطح رقم 4 من وحدة البحوث المناخية في مركز هادلي (HadCRUT4) خلال تلك الفترة.

السؤال 10.2 | متى تصبح التأثيرات البشرية على المناخ واضحة على النطاقات المحلية؟

أصبح الاحترار الناشئ عن الأنشطة البشرية واضحاً بالفعل محلياً على اليابسة في بعض المناطق المدارية، وخاصة خلال الجزء الحار من العام. ويصبح الاحترار واضحاً في خطوط العرض الوسطى، خلال فصل الصيف أولاً - في غضون العقود العديدة القادمة. ويتوقع أن يظهر التغير بقدر أكبر من البطء هناك، وخاصة خلال فصل الشتاء بالنظر إلى أن تقلبية المناخ الطبيعية تزيد مع زيادة البعد عن خط الاستواء وخلال الفصل البارد. وقد عزيت التغيرات في درجة الحرارة التي رصدت بالفعل في الكثير من المناطق إلى التأثير البشري. كذلك تظهر التغيرات المناخية الحساسة لدرجات الحرارة، مثل الجليد البحري للقطب الشمالي اتجاهات مرصودة تعزى إلى التأثير البشري.

وتتجلى الاتجاهات نحو الاحترار المرتبطة بالتغير العالمي بوضوح أكثر عموماً في متوسطات درجات الحرارة العالمية عنها في السلاسل الزمنية لدرجات الحرارة المحلية (وتشير كلمة «المحلية» هنا عموماً إلى مواقع فردية أو متوسطات إقليمية صغيرة). ويرجع ذلك إلى أن متوسط معظم التقلبية المحلية للمناخ المحلي يحسب بعيداً عن المتوسط العالمي. وينظر إلى اتجاهات التغير نحو الاحترار المتعددة العقود التي رصدت في الكثير من الأقاليم على أنها تقع خارج نطاق التغيرات التي يمكن توقعها من التقلبية الداخلية الطبيعية للنظام المناخي، إلا أن هذه التغيرات لا تصبح واضحة إلا عندما يظهر متوسط المناخ المحلي من «ضوضاء» التقلبية من عام لآخر. وتتوقف سرعة حدوث ذلك على كل من معدل التغير نحو الاحترار وكمية التقلبية المحلية. ولا يمكن التنبؤ باتجاهات الاحترار في المستقبل بصورة دقيقة وخاصة في النطاقات المحلية، ولذا لا يمكن وضع تقديرات دقيقة عن وقت ظهور الاحترار في المستقبل.

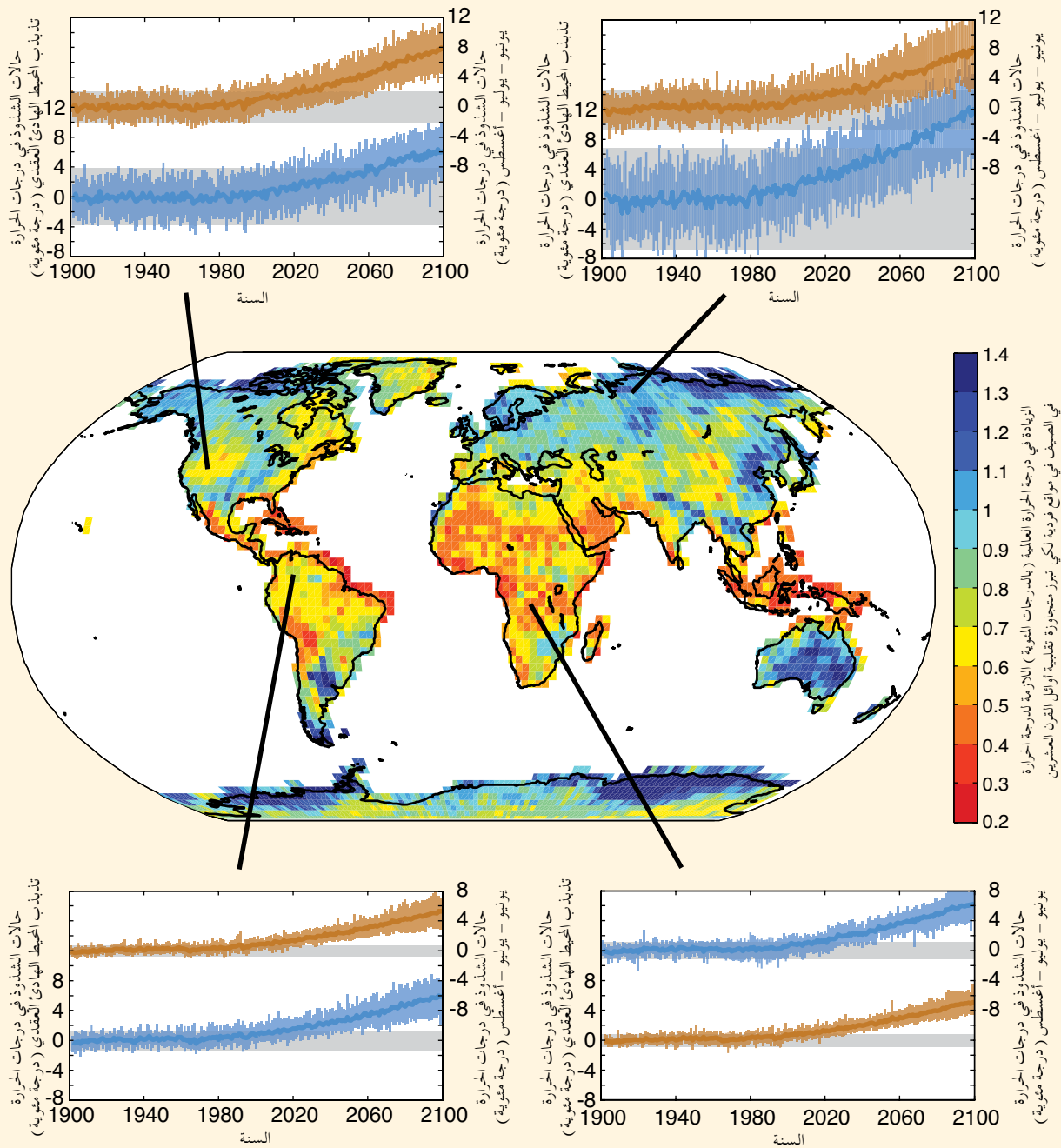
وفي بعض المناطق المدارية، ظهر التغير نحو الاحترار بالفعل من التقلبية المحلية (السؤال 10.2، الشكل 1). ويحدث ذلك بسرعة أكبر في المناطق المدارية بالنظر إلى أن التقلبية في درجات الحرارة تقل عما هي عليه في المناطق الأخرى من العالم. وقد لا يظهر الاحترار المسقط في خطوط العرض الوسطى حتى منتصف القرن الحادي والعشرين. حتى على الرغم من أن اتجاهات الاحترار هناك تكون أكبر - بالنظر إلى أن تقلبية درجة الحرارة المحلية أكبر بكثير هناك عما هي عليه في المناطق المدارية. وتنبؤ تقلبية درجات الحرارة المحلية، على أساس موسمي، إلى أن تظهر أولاً في الأجزاء الحارة من العام حتى في المناطق التي يكون فيها اتجاه الاحترار أكبر في الشتاء كما يظهر في وسط أوراسيا في السؤال 10.2، الشكل 1.

وتظهر التغيرات غير تلك الخاصة بدرجات حرارة سطح الأرض، بما في ذلك بعض المناطق المحيطية، معدلات تغير طويلة المدى تختلف عن التقلبية الطبيعية. وعلى سبيل المثال، فإن نطاق الجليد البحري للقطب الشمالي أخذ في الانحسار بسرعة بالغة، ويظهر بالفعل تأثيراً بشرياً. ومن ناحية أخرى، فإن من الصعوبة بمكان رصد التغير في كميات الأمطار بالنظر إلى أن تقلبية كميات الأمطار في معظم المواقع كبيرة للغاية. وقد زادت احتمالات وصول درجات حرارة فصل الصيف الحار إلى أرقام قياسية في أجزاء كبيرة من نصف الكرة الأرضية الشمالي. ومن المتوقع أن تصبح درجات الحرارة المرتفعة التي تعتبر متطرفة حالياً قريبة من المعدل خلال العقود القادمة. وانخفضت احتمالية وقوع أحداث متطرفة أخرى بما في ذلك بعض النوبات الباردة.

ولا يمكن في إطار المناخ الحالي إرجاع فرادى ظواهر الطقس المتطرفة دون لبس إلى تغير المناخ بالنظر إلى أن هذه الظواهر قد تكون قد وقعت في مناخ غير متغير. غير أن احتمالية حدوث هذه الظواهر ربما تكون قد تغيرت بدرجة كبيرة في موقع معين. وتشير التقديرات إلى أن الزيادات المستحقة بشرياً في غازات الاحتباس الحراري قد أسهمت إسهاماً كبيراً في احتمالية حدوث بعض موجات الحرارة. وبالمثل، فإن دراسات نماذج المناخ تشير إلى أن زيادة غازات الاحتباس الحراري قد أسهمت في التكتيف المرصود في ظواهر سقوط الأمطار الغزيرة التي شهدتها بعض أجزاء نصف الكرة الأرضية الشمالي. غير أن احتمالية حدوث الكثير من ظواهر الطقس المتطرفة الأخرى ربما لا تكون قد تغيرت كثيراً. ولذا، فإن من غير المستصوب إرجاع كل سجل جديد للطقس إلى تغير المناخ.

ويعتمد تاريخ ظهور اتجاهات الاحترار المسقط في المستقبل أيضاً على تقلبية المناخ المحلي الذي يمكن أن يزيد أو يخفض درجات الحرارة بصورة مؤقتة. وعلاوة على ذلك، تستند منحنيات درجات الحرارة المحلية المسقط في السؤال 10.2، الشكل 1 إلى عمليات محاكاة متعددة لنموذج مناخي مدفوعة بالتأثير القسري نتيجة لنفس سيناريو الانبعاثات المفترضة في المستقبل. وسوف يتسبب معدل مختلف لتراكم غازات الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي في إحداث تغير مختلف من الاحترار، وعلى ذلك فإن نشر إسقاطات انبعاثات غازات الاحتباس الحراري (الجزء المظلل الملون في السؤال 10.2، الشكل 1) سيكون أوسع في حالة أن يتضمن الشكل انتشار السيناريوهات انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. وقد وضعت الزيادة اللازمة لتغير درجات حرارة الصيف للخروج من التقلبية المناخية للقرن العشرين (بصرف النظر عن معدل التغير) على الخارطة الوسطى في السؤال 10.2، الشكل 1.

وتعتمد الإجابة الكاملة على السؤال المتعلق بالوقت الذي يصبح فيه التأثير البشري على المناخ المحلي واضحاً على قوة الأدلة التي يعتبرها المرء كافية لتحويل شيء إلى «واضح». وتأتي معظم الأدلة العلمية المقنعة لتأثير تغير المناخ على النطاقات المحلية من تحليل الصورة العالمية ومن وفرة الأدلة المستقاة من النظام المناخي التي تربط الكثير من التغيرات المرصودة بالتأثير البشري.



السؤال 10.2، الشكل 1 | سلاسل زمنية للتغير المسقط في درجات الحرارة المبين في المواقع التمثيلية الأربعة في فصل الصيف (المنحنيات الحمراء تمثل حزيران / يونيو، وتموز / يوليو، وآب / أغسطس في مواقع في المناطق المدارية، في نصف الكرة الشمالي أو كانون الأول / ديسمبر، وكانون الثاني / يناير، وشباط / فبراير في نصف الكرة الجنوبي)، والشتاء (المنحنيات الزرقاء). وتحاط كل سلسلة زمنية بمغلف من التغيرات المسقطة (اللون الأحمر الفاتح للفصل الحار المحلي، والأزرق للفصل البارد المحلي) الناتج عن 24 عملية محاكاة مختلفة تنشأ عن المغلف الرمادي للتقلبية المحلية الطبيعية التي تمت محاكاتها من خلال نماذج تستخدم الظروف السائدة في أوائل القرن العشرين. وتظهر علامات الاحترار أولاً في المناطق المدارية خلال فصل الصيف. وتبين الخارطة الوسطى الزيادة في درجات الحرارة (بالدرجات المئوية) اللازمة لدرجات الحرارة في فصل الصيف في مواقع مختلفة للخروج من المغلف الخاص بتقلبية القرن العشرين. وتجدر الملاحظة بأن الألوان الحارة تشير إلى أصغر زيادة لازمة في درجات الحرارة ومن ثم أبكر وقت للخروج. وتستند جميع الحسابات إلى المرحلة 5 من مشروع مقارنة النماذج المتقارنة (CMIP5) لعمليات محاكاة النماذج المناخية العالمية التي يحركها مسار التركيز النموذجي 8.5 (RCP8.5) في سيناريو الانبعاثات. وتحدد مغلفات التغير المتوقع والتقلبية الطبيعية باعتبارها انحرافات معيارية $2\pm$ (مقتبس ومحدث من Mahlstein وآخرين، 2011).

السؤال 11.1 | إذا لم تكن قادراً على التنبؤ بالطقس في الشهر القادم، فكيف تستطيع أن تتنبأ بالمناخ في العقد القادم؟

على الرغم من الترابط بين الطقس والمناخ، فإنهما في الواقع شيئان مختلفان. فالطقس يعرف بأنه حالة الغلاف الجوي في وقت ومكان معينين، ويمكن أن يتغير من ساعة لأخرى، ومن يوم لآخر. أما المناخ، من ناحية أخرى، فيشير، بصفة عامة، إلى إحصاءات أحوال الطقس خلال عقد أو أكثر.

والقدرة على التنبؤ بالمناخ في المستقبل دون حاجة إلى التنبؤ على نحو دقيق بالطقس من الأمور الشائعة لدرجة أنه قد يبدو الأمر كذلك في أول الأمر. فعلى سبيل المثال، يمكن في نهاية الربيع التنبؤ على نحو دقيق بأن متوسط درجة حرارة الهواء خلال الصيف القادم في ملبورن (مثلاً) سيكون على الأرجح أعلى من متوسط درجة الحرارة خلال آخر فصل ربيع حتى على الرغم من أنه لا يمكن التنبؤ اليومي خلال الصيف القادم على نحو دقيق لما يتجاوز أسبوعاً أو نحو ذلك. ويبين هذا المثال البسيط أنه تتوافر عوامل — في هذه الحالة للدورة الموسمية للأشعة الشمسية التي تصل إلى نصف الكرة الأرضية الجنوبي — والتي يمكن أن تدعم مهارة التنبؤ بالتغيرات في المناخ خلال الفترة القادمة التي لا تعتمد على نحو دقيق على التنبؤ بالطقس خلال نفس الفترة.

وتشمل الإحصاءات الخاصة بأحوال الطقس والتي تستخدم في تحديد المناخ متوسطات درجات الحرارة وكميات الأمطار في المدى البعيد، فضلاً عن إحصاءات تقلباتها مثل الانحراف المعياري لتقلبية كميات الأمطار من عام لآخر عن المتوسط الطويل الأجل أو وتيرة الأيام التي تقل عن 5 درجات مئوية. ويطلق على متوسطات تقلبية المناخ على فترات طويلة اسم التقلبات المناخية. ويمكن أن تنطبق على الأشهر والفصول المختلفة أو السنة بأكملها. وسوف تتناول عملية التنبؤ بالمناخ أسئلة مثل «ما هو احتمال أن يكون متوسط درجة الحرارة خلال الصيف القادم أعلى من المتوسط الطويل الأجل لفصول الصيف السابقة؟ أو ما هو احتمال أن يكون العقد القادم أكثر احتراراً من العقود السابقة؟» وبتحديد أدق، فإن التنبؤ بالمناخ قد يوفر إجابة عن السؤال «ما هي احتمالية أن يتجاوز متوسط درجة حرارة (الصين، مثلاً) خلال السنوات العشرة القادمة متوسط درجة الحرارة في الصين خلال الثلاثين عاماً الماضية؟ ولا توفر التنبؤات المناخية أي إسقاطات للتطور المفصل اليومي للطقس في المستقبل. وبدلاً من ذلك، توفر احتمالات بتغيرات طويلة الأجل في إحصاءات التقلبية المناخية في المستقبل.

ومن ناحية أخرى فإن إسقاطات الطقس توفر تنبؤات عن الطقس اليومي في أوقات معينة في المستقبل وهي تساعد في معالجة أسئلة مثل «هل ستسقط أمطار غدا؟» وفي بعض الأحيان، فإن إسقاطات المناخ قد تشير إلى أن «احتمالية سقوط الأمطار في ألبا غدا تبلغ 75 في المائة».

ويحتاج المتنبؤون لوضع تنبؤات طقس دقيقة إلى معلومات بالغة التفصيل عن الحالة الجارية للغلاف الجوي. ويعني الإختلال الكلي الكامن في طابع الغلاف الجوي أنه حتى أدق خطأ في التنبؤ «بالظروف الأولية» تؤدي عادة إلى عدم دقة الإسقاطات فيما يتجاوز الأسبوع أو نحو ذلك. وهذا هو ما يسمى تأثير الفراشة.

ولا يحاول علماء المناخ أو يدعوا أنهم يتنبأون بالتطور الفصلي للطقس في المستقبل خلال الفصول، أو السنوات أو العقود القادمة. فهناك، من ناحية أخرى، أساس علمي سليم يدعم إمكانية التنبؤ ببعض جوانب المناخ وإن بصورة غير دقيقة على الرغم من تأثير الفراشة. فالزيادات في تراكيز غازات الاحتباس الحراري الطويلة الأجل في الغلاف الجوي، مثلاً، تنحو إلى زيادة درجات حرارة السطح في العقود المقبلة. وعلى ذلك، فإن المعلومات المستقاة من الماضي يمكن أن تساعد في التنبؤ بمناخ المستقبل بل وهي تساعد فعلاً في ذلك.

ويمكن لبعض أنواع ما يسمى بالتقلبية «الداخلية، الطبيعية» أن تحدث توسعاً — نظرياً على الأقل — في القدرة على التنبؤ بالمناخ في المستقبل. وتنشأ التقلبية المناخية الداخلية من حالات عدم الاستقرار الطبيعية في النظام المناخي. فإذا كانت هذه التقلبية تشمل أو تسبب تباينات واسعة النطاق وطويلة الأجل في درجة حرارة الأجزاء العليا من المحيطات، فإن ذلك سوف يتسبب في إحداث تغيرات في الغلاف الجوي الأعلى سواء محلياً أو على مسافة بعيدة. ومن الأرجح أن تكون ظاهرة التذبذب الجنوبي — النينو أشهر مثال على هذا النوع من التقلبية المناخية. وتتكشف التقلبية المرتبطة بالتذبذب الجنوبي — النينو بطريقة يمكن التنبؤ بها جزئياً. وتأثير الفراشة موجود إلا أنه يستغرق وقتاً أطول للتأثير بشدة على بعض التقلبات المرتبطة بالتذبذب الجنوبي — النينو.

وقد استغلت إدارات الأرصاد الجوية والوكالات الأخرى ذلك ووضعت نظاماً للتنبؤات تتراوح بين الموسمية وفترات ما بين السنوات تمكنهم من التنبؤ بصورة روتينية بحالات الشذوذ المناخية الموسمية بمهارات تنبؤ بارزة. وتباين المهارات بصورة ملحوظة من مكان لآخر ومن تقلبية لأخرى. وتنحو المهارات إلى تقليص أخطاء التنبؤ مرة أخرى في المستقبل وفي بعض المواقع حيث لا تتوافر أي مهارات. و«المهارات» المستخدمة هنا بمعناها الفني: هي مقياس مدى دقة التنبؤ مقابل دقة بعض طرائق التنبؤ البسيطة عادة مثل افتراض أن حالات الشذوذ الأخيرة سوف تستمر خلال الفترة قيد التنبؤ.

ويعتبر الطقس ونظم التنبؤات التي تتراوح بين الموسمية وما بين السنوات والعقود في أوجه كثيرة (فكلها مثلاً تتضمن نفس المعادلات الرياضية للغلاف الجوي، وكلها تحتاج إلى تحديد الظروف الأولية لبدء عملية التنبؤ، وكلها تخضع لحدود قصوى لدقة الإسقاطات التي

يفرضها تأثير الفراشة). غير أن تنبؤات العقود، على العكس من الطقس والتنبؤات الموسمية وفيما بين السنوات مازالت في مهدها. فنظم التنبؤات للعقود تظهر، رغم ذلك، درجة المهارة في التنبؤ المستبق لدرجة الحرارة بالقرب من السطح فوق جزء كبير من العالم حتى فترة تسع سنوات على الأقل. ويعني 'التنبؤ المستبق' التنبؤ بحدث سابق لم تدرجه سوى الرصدات قبل الحدث في نظام التنبؤ المستخدم في إجراء التنبؤ. ويعتقد أن الجزء الأكبر من هذه المهارات ينشأ من التأثير القسري الخارجي. فهذا «التأثير القسري الخارجي» مصطلح يستخدمه علماء المناخ للإشارة إلى عامل قسر خارج النظام المناخي يتسبب في حدوث تغير في النظام المناخي. ويشمل ذلك الزيادات في تركيز غازات الاحتباس الحراري طويلة العمر.

وتشير النظرية إلى أنه ينبغي أن تقل مهارات التنبؤ بسقوط الأمطار خلال عقد من الزمن عن مهارات التنبؤ بدرجة حرارة سطح الأرض في العقد. ويتسق أداء التنبؤ المستبق مع هذا التوقع.

وتهدف البحوث الجارية إلى تحسين نظم التنبؤ العقدي وزيادة فهم أسباب أي مهارات ظاهرة. ويمثل التيقن من الدرجة التي تصل إليها المعلومات الإضافية من التقليدية الداخلية للتحويل فعلاً إلى زيادة في المهارات قضية رئيسية. ففي حين أن من المتوقع أن تتحسن نظم التنبؤ خلال العقود القادمة، فإن الطابع غير المنتظم للنظام المناخي وما ينشأ عن ذلك من تأثير الفراشة سوف يفرض دائماً قيوداً لا يمكن تجنبها على مهارات التنبؤ. وتوجد مصادر أخرى لعدم اليقين. فالثورات البركانية، مثلاً، يمكن أن تؤثر في المناخ، غير أنه حين يتعذر التنبؤ بتوقيتها وحجمها، فإن الثورات البركانية توفر مصدراً من عدد من مصادر عدم اليقين. وعلاوة على ذلك فإن قصر الفترة التي تتوافر عنها بيانات محيطية كافية لبدء وتقييم التنبؤات العقدية تشكل أيضاً تحدياً رئيسياً.

وأخيراً تجدر الملاحظة بأن نظم التنبؤات العقدية تصمم للاستفادة من كل من مصادر القدرة على التنبؤ التي تخضع للتأثير القسري الخارجي وتلك المولدة داخلياً. ويميز علماء المناخ بين التنبؤات العقدية والإسقاطات العقدية. فالإسقاطات لا تستفيد إلا من القدرة التنبؤية الناشئة عن التأثير القسري الخارجي. وفي حين أن تقارير التقييم السابقة للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ ركزت بصورة مطلقة على الإسقاطات، فإن هذا التقرير يقيم أيضاً بحوث التنبؤات العقدية وأساسها العلمي.

ولأغراض التنبؤ بالمناخ، يمكن توقع انفجار بركاني يحدث تبريداً سطحياً كبيراً على الصعيد العالمي واحتراراً في الجزء العلوي من الغلاف الجوي خلال العام القادم أو نحو ذلك. وتتمثل المشكلة في أنه في حين أنه يمكن رصد تزايد نشاط أحد البراكين، لا يمكن التنبؤ بالتوقيت الدقيق للانفجار أو بكمية ثاني أكسيد الكبريت التي تحقن في الجزء العلوي من الغلاف الجوي والطريقة التي قد تنتشر بها. وهذا مصدر لعدم اليقين في التنبؤات المناخية.

وتنتج البراكين المدارية ودون المدارية قدراً أكبر من التبريد السطحي العالمي أو في التروبوسفير. ويعزى ذلك إلى أن سحب حمض الكبريتيك الناشئة عن ذلك في الطبقات العليا من الغلاف الجوي تستمر ما بين عام وعامين، ويمكن أن تغطي جزءاً كبيراً من الكرة الأرضية. غير أن من الصعب التنبؤ بتأثيراتها المناخية الإقليمية، بالنظر إلى أن انتشار هباء الكبريتات في الستراتوسفير يعتمد بشدة على ظروف الرياح في الغلاف الجوي وقت انفجار البركان. وعلاوة على ذلك، فإن تأثير التبريد السطحي المعتاد لا يتم على نسق واحد: ونظراً لأن القارات تبرد أكثر من المحيطات، فإن الرياح الموسمية الصيفية يمكن أن تضعف مما يقلل من كمية الأمطار التي تسقط على آسيا وأفريقيا. وتتسم الاستجابة المناخية بمزيد من التعقيد نتيجة لأن سحب الطبقات العلوية من الغلاف الجوي من الانفجارات المدارية تمتص أيضاً ضوء الشمس والحرارة من الأرض مما يسفر عن زيادة احترار هذه الطبقات في المناطق المدارية بما يتجاوز ذلك الواقع على خطوط العرض العليا.

السؤال 11.2، الشكل 1 | رسم تخطيطي عن حجم تأثير الثورات البركانية المدارية ودون المدارية الكبيرة على درجات الحرارة في الطبقات العلوية للغلاف الجوي (الستراتوسفير)، والطبقات السفلية للغلاف الجوي (التروبوسفير).



وأدى انفجار بركاني كبير حدث منذ أكثر من 50 عاماً، وهو انفجار بركان أغونغ في عام 1963 إلى إجراء الكثير من الدراسات الحديثة بما في ذلك الرصدات وحسابات النموذج المناخي. وحفز الانفجاران الكبيران اللاحقان في الشيشون في 1982 وبيناتوبو في 1991 البحوث التي أدت إلى فهمنا الحالي لتأثيرات الانفجارات البركانية على المناخ.

ولا تبقى السحب البركانية في الستراتوسفير إلا لعامين، ومن ثم فإن تأثيراتها على المناخ قصيرة بالمقابل. غير أن تأثيرات الانفجارات الكبيرة المتعاقبة قد تستمر فترة أطول، مثل ما حدث في نهاية القرن الثالث عشر من أربع انفجارات كبيرة – انفجار كل عشر سنوات. وكان الانفجار الأول الذي حدث في عام 1258 والأكبر خلال ألف عام. وأدت هذه السلسلة من الانفجارات إلى تبريد محيط شمال الأطلسي والجليد البحري في القطب الشمالي. وثمة فترة أخرى ماثرة اهتمام تتضمن الأحداث البركانية الثلاثة الكبيرة، والعديد من الانفجارات الأصغر منها، خلال الفترة 1963–1991 (انظر الفصل 8 للاطلاع على الكيفية التي تؤثر بها هذه الانفجارات في تشكيل الغلاف الجوي وتقلل من الإشعاعات القصيرة الموجة على الأرض).

ويمكن لعلماء البراكين رصد الوقت الذي يصبح فيه البركان أكثر نشاطاً إلا أنهم لا يستطيعون التنبؤ بما إذا كان بركان ما سوف يثور أو بحدوث ذلك، أو بكمية الكبريت التي ستتحقق في الستراتوسفير. ومع ذلك فإن البراكين تؤثر في القدرة على التنبؤ بالمناخ بثلاث طرق مختلفة. فأولاً فإنه في حالة حقن ثورة عنيفة أحجاماً كبيرة من ثاني أكسيد الكبريت في الستراتوسفير، يمكن إدراج هذا التأثير في التنبؤات بالمناخ. وينطوي ذلك على تحديات كبيرة ومصادر لعدم اليقين مثل جمع الرصدات الكبيرة للسحب البركانية وحساب الكيفية التي ستتحرك بها وما يقع لها من تغير خلال فترة بقاءها. غير أنه استناداً إلى الرصدات، والنمذجة الناجمة للثورات التي حدثت مؤخراً، يمكن إدراج بعض تأثيرات الثورات الكبيرة في التنبؤات.

ويتمثل التأثير الثاني في أن الثورات البركانية تشكل مصدراً كبيراً محتملاً لعدم اليقين في تنبؤاتنا. إذ أنه لا يمكن التنبؤ بالثورات بصورة مسبقة إلا أنها سوف تقع وتتسبب في تأثيرات مناخية قصيرة الأجل على كل من النطاقين المحلي والعالمي، ويمكن من حيث المبدأ، أخذ احتمال عدم اليقين هذا في الاعتبار من خلال إدراج ثورات عشوائية أو ثورات تستند إلى بعض السيناريوهات في مجموعة التنبؤات المناخية للمستقبل القريب. ويحتاج هذا المجال من مجالات البحوث إلى مزيد من الاستكشاف. ولا تتضمن إسقاطات المستقبل الواردة في هذا التقرير الثورات البركانية في المستقبل.

ثالثاً، يمكن استخدام السجل المناخي التاريخي، بالإضافة إلى تقديرات هباء الكبريتات المرصود، لاختبار مدى صدق ما نقوم به من محاكاة مناخية. وفي حين أن الاستجابة المناخية للثورات البركانية المدمرة تمثل نموذجاً مفيداً لبعض التأثيرات القسرية المناخية الأخرى، فإن هناك حدوداً لذلك. فمحاكاة تأثيرات الثورات يمكن أن تساعد، مثلاً، في التحقق من النماذج المستخدمة في التنبؤات الموسمية وتنبؤات ما بين السنوات. غير أنه لا يمكن بهذه الطريقة التحقق من جميع الآليات المشاركة في احترار العالم خلال القرن القادم لأن هذه تنطوي على التأثيرات التفاعلية المحيطية في الأجل الطويل، التي لها نطاقات زمنية أطول من الاستجابة لفرادى الثورات البركانية.

السؤال 12.1 | لماذا يستخدم هذا العدد الكبير من النماذج والسيناريوهات لوضع إسقاطات تغير المناخ؟

يتحدد مناخ المستقبل بصورة جزئية من خلال حجم انبعاثات غازات الاحتباس الحراري والهباء الجوي وغير ذلك من التأثيرات القسرية الطبيعية والبشرية المنشأ. وهذه التأثيرات القسرية تقع خارج النظام المناخي إلا أنها تعدل الطريقة التي يعمل بها. ويتشكل مناخ المستقبل من خلال استجابة الأرض لتلك التأثيرات القسرية بالإضافة إلى التقلبية الداخلية الكامنة في النظام المناخي. وتساعد طائفة من الافتراضات بشأن حجم ووتيرة انبعاثات المستقبل العلماء في وضع مختلف سيناريوهات الانبعاثات التي تستند إليها إسقاطات النماذج المناخية. وفي نفس الوقت، توفر مختلف النماذج المناخية حالات تمثيل بديلة لاستجابة الأرض لتلك التأثيرات القسرية ولتقلبية المناخ الطبيعية. وتعمل مجموعات النماذج معاً لمحاكاة الاستجابة لطائفة من مختلف السيناريوهات وترسم طائفة من حالات المستقبل المحتملة وتساعدنا في فهم ما تنطوي عليه من أوجه عدم اليقين.

ويعتبر التنبؤ بالتطورات الاجتماعية الاقتصادية أكثر صعوبة من التنبؤ بتطور نظام فيزيائي. فهي تنطوي على التنبؤ بالسلوك البشري، والاختيارات السياسية، وأوجه التقدم التكنولوجي، والتنافس والتعاون على المستوى الدولي. ويتمثل الأسلوب الشائع في هذا الصدد في استخدام السيناريوهات الخاصة بالتنمية الاجتماعية الاقتصادية المعقولة في المستقبل، والتي تستخلص من خلالها انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وغيرها من عوامل التأثيرات القسرية في المستقبل. ولم يكن من المتيسر عموماً إسناد احتمالات لسيناريوهات التأثير القسري الفردية. وبدلاً من ذلك تستخدم مجموعة من البدائل لغغطية طائفة من الاحتمالات. وتزود النتائج المستخلصة من مختلف سيناريوهات التأثيرات القسرية راسمي السياسات ببدائل وطائفة من أوضاع المستقبل المحتملة للنظر.

وتنشأ التقلبات الداخلية في المناخ بصورة تلقائية من التفاعلات بين مكونات مثل الغلاف الجوي والمحيطات. وقد تخفي في حالة تغير المناخ في المدى القريب تأثير الاضطرابات الخارجية مثل الزيادات في غازات الاحتباس الحراري (انظر الفصل 11). غير أنه من المتوقع على المدى الطويل أن يسيطر تأثير التأثيرات القسرية بدلاً من ذلك. وتتوقع محاكاة النموذج المناخي أن سيناريوهات مختلفة عن غازات الاحتباس الحراري البشرية المنشأ وغير ذلك من عوامل التأثيرات القسرية، واستجابة النظام المناخي لها سوف تؤثر بطريقة مختلفة، بعد بضعة عقود، في التغير في متوسط درجة حرارة العالم (السؤال 12.2، الشكل 1، اللوحة اليسرى). ولذا فإن تقييم نتائج تلك السيناريوهات والاستجابات المختلفة ينطوي على أهمية بالغة وخاصة لدى النظر في القرارات المتعلقة بالسياسات.

وتبنى النماذج المناخية على أساس المبادئ الفيزيائية التي تحكم نظامنا المناخي، والفهم العملي، وتمثل العمليات المعقدة والمتشابكة اللازمة لمحاكاة المناخ وتغير المناخ سواء في الماضي أو في المستقبل. وتمثل النظائر المستمدة من الرصدات السابقة أو الاستنباط من اتجاهات التغير الأخيرة استراتيجيات غير كافية لإنتاج إسقاطات بالنظر إلى أن المستقبل لن يكون بالضرورة استمراراً بسيطاً لما شاهدناه حتى الآن.

ومع أنه يمكن وضع المعادلات المتعلقة بحركة الموائع والتي تحدد سلوك الغلاف الجوي والمحيطات، فإن من المستحيل حلها دون استخدام لوغاريتميات عددية من خلال المحاكاة بنماذج حاسوبية تماثل كيفية اعتماد هندسة الطائرات على المحاكاة العددية لأنماط المعادلات المماثلة. لذلك فإنه لا يمكن وصف الكثير من العمليات الفيزيائية والبيولوجية والكيميائية الصغيرة النطاق مثل عمليات السحب عن طريق هذه المعادلات، إما لأننا نفتقر إلى القدرة الحاسوبية لوصف النظام باستنارة دقيقة كافية لمحاكاة هذه العمليات بصورة مباشرة أو لأن فهمنا العلمي بشأن الآليات التي تحرك هذه العمليات لم يكتمل بعد. ويتعين وضع تقديرات تقريبية لهذه العمليات من خلال ما يسمى بعملية وضع المعايير داخل النماذج المناخية والتي يمكن من خلالها إقامة علاقة رياضية بين الكميات التي تتم محاكاتها بصورة مباشرة وتلك التي يتم تقريبها وذلك في كثير من الأحيان على أساس من السلوك المرصود.

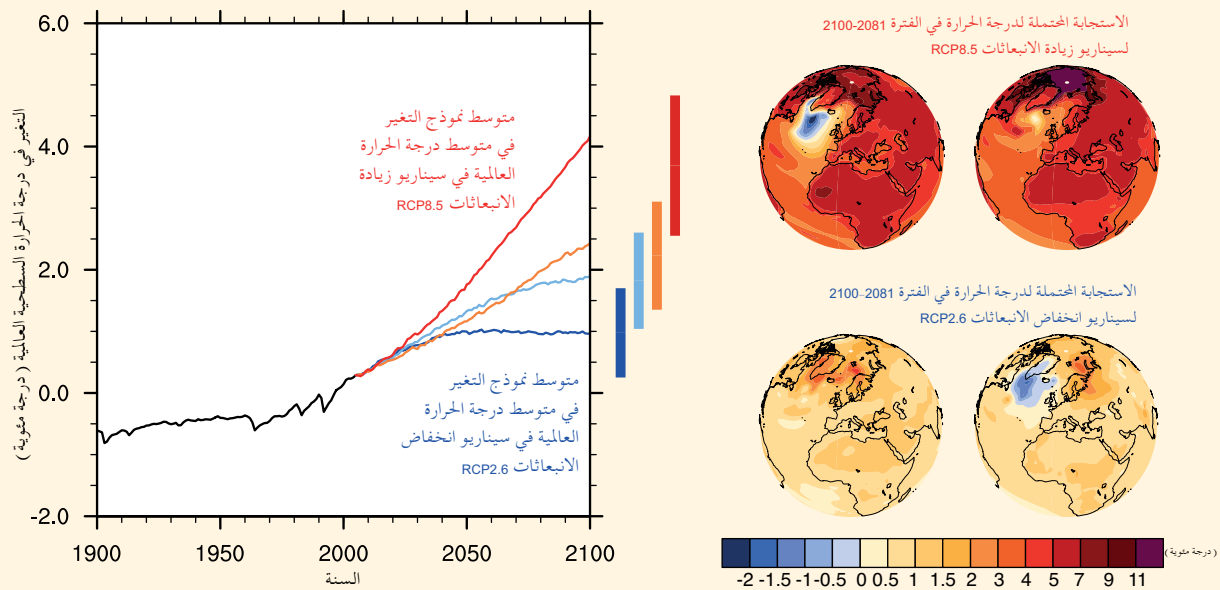
وتتوافر بدائل مختلفة وعمليات التمثيل العددي المعقولة بنفس القدر وحلول وعمليات تقريب لنمذجة النظام المناخي بالنظر إلى قصور الحسابات والرصدات. ويعتبر هذا التنوع جانباً سليماً لمجتمع النمذجة المناخية، والنتائج في طائفة من الإسقاطات المعقولة لتغير المناخ على النطاقات العالمية والإقليمية. ويوفر هذا النطاق أساساً لوضع تقييم كمي لعدم اليقين في الإسقاطات غير أنه نظراً لأن عدد النماذج صغير نسبياً، ومساهمة نواتج النموذج في المحفوظات العامة طوعية، فإن أخذ عينات الأوضاع المحتملة في المستقبل لا تمثل عملية منتظمة أو شاملة. كما تستمر بعض جوانب القصور الشائعة في جميع النماذج، فالنماذج المختلفة تنطوي على جوانب قوة ومواطن ضعف مختلفة، ولم تتضح بعد ماهية الجوانب المتعلقة بنوعية المحاكاة التي يمكن تقييمها من خلال الرصدات، والتي ينبغي أن توجه تقييمنا لعمليات محاكاة عن طريق النماذج في المستقبل.

وتستخدم نماذج متباينة التعقيد عادة في مختلف مشكلات الإسقاطات. إذ يمكن استخدام نموذج سريع ذي استبانة منخفضة أو وصف مبسط لبعض العمليات المناخية، في الحالات التي تتطلب محاكاة طويلة متعددة القرون أو حينما يتعين توفير إنجازات متعددة. ويمكن أن تمثل النماذج المبسطة، بصورة كافية، متوسط الكميات الكبيرة مثل المتوسط العالمي لدرجات الحرارة، إلا أنه لا يمكن محاكاة التفاصيل الأكثر دقة مثل سقوط الأمطار على الصعيد الإقليمي إلا بواسطة نماذج معقدة.

وقد شهدت عمليات تنسيق تجارب النماذج ونواتجها بواسطة بعض المجموعات مثل مشروع مقارنة النماذج المتقارنة (CMIP)، والبرنامج العالمي للبحوث المناخية وفريقه العامل المعني بالنماذج المناخية تصعيد دوائر العلم من جهودها لتقييم قدرة النماذج على محاكاة المناخ الماضي والحالي، ومقارنة إسقاطات تغير المناخ في المستقبل. وقد أصبح نهج «النموذج المتعدد» الآن تقنية معيارية تستخدمها دوائر علم المناخ لتقييم الإسقاطات ذات التقلبية المناخية النوعية.

السؤال 12.1، الشكل 1، اللوحات إلى اليمين تبين استجابة درجات الحرارة في نهاية القرن الحادي والعشرين بواسطة نموذجين موضحين، وأعلى سيناريوهات مسار التركيزات النموذجية (RCP) وأدناها. وتتفق النماذج على أنماط واسعة النطاق للاحترار عند السطح، مثل تعرض الأرض للاحترار بأسرع من المحيطات، وتعرض القطب الشمالي للاحترار بأسرع من المناطق المدارية. غير أن هذه النماذج تختلف من حيث كل من حجم الاستجابة العالمية لنفس السيناريو، وفي النطاق الصغير للجوانب الإقليمية للاستجابة. وعلى سبيل المثال فإن حجم الزيادة في القطب الشمالي يتباين فيما بين النماذج المختلفة، وتبين مجموعة فرعية من النماذج احتاراً أكثر ضعفاً أو تبريداً طفيفاً في شمال الأطلسي نتيجة للانخفاض في تكوين المياه العميقة والتحول في التيارات المحيطية.

وتسود أوجه عدم يقين حتمية في التأثيرات القسرية الخارجية في المستقبل، وفي استجابة النظام المناخي لها والتي يزداد تفاقمها بالتقلبية المولدة داخلياً. وقد أصبح استخدام السيناريوهات والنماذج المتعددة اختباراً معيارياً لتقييمها وتوصيفها، مما يتيح لنا وصف طائفة عريضة من التطورات المحتملة في مناخ الأرض في المستقبل.



السؤال 12.1، الشكل 1 | يتغير المتوسط العالمي لدرجات الحرارة التي يتحدد متوسطها عبر جميع نماذج المرحلة 5 لمشروع مقارنة النماذج المتقارنة (CMIP5) (بالمقارنة بالفترة 1986–2005) للمسارات الأربعة للتركيزات النموذجية (RCP2.6) (اللون الأزرق الداكن) و RCP4.5 (اللون الأزرق الفاتح) و RCP6.0 (اللون البرتقالي) و RCP8.5 (اللون الأحمر)؛ وقد استخدمت النماذج 32 و 25 و 39 على التوالي لهذه السيناريوهات الأربعة. وتشير الأعمدة الرأسية إلى النطاقات المحتملة لتغير درجة الحرارة العالمية في نهاية القرن الحادي والعشرين على النحو المبين بالأعمدة الرأسية. وتجدر الملاحظة بأن هذه النطاقات تسري على الفرق بين متوسطين لفترةين من عشرين عاماً 2100–2081 مقابل 1986–2005 التي تمثل الأعمدة التي تتوسط القيمة الأصغر من نقطة نهاية الإسقاطات السنوية. وبالنسبة للسيناريو الأعلى (RCP8.5) والأدنى (RCP2.6)، تبين الخرائط التوضيحية الخاصة بتغير درجة الحرارة السطحية في نهاية القرن 21 (2081–2100) مقابل (1986–2005) بالنسبة لنموذجين في المشروع CMIP5. وقد اختبرت هذه النماذج لبيان نطاق عريض من الاستجابات إلا أن هذه المجموعة المعينة غير تمثيلية لأي قدر من عدم اليقين في استجابة النموذج.

السؤال 12.2 | كيف ستتغير الدورة المائية للأرض؟

يتسم تدفق الماء وتخزينه في النظام المناخي للأرض بالتقلبية الشديدة، إلا أنه من المتوقع أن تحدث التغيرات فيما يتجاوز تلك المتعلقة بالتقلبية الطبيعية في نهاية القرن الحالي. ففي عالم تتزايد درجة حرارته، ستحدث زيادات صافية في كميات الأمطار والتبخر السطحي ونتح النباتات. غير أنه ستحدث اختلافات كبيرة في التغيرات فيما بين الأماكن. وسوف تتعرض بعض الأماكن لمزيد من الأمطار وتراكم الماء على اليابسة. وفي أماكن أخرى، سوف تنخفض كمية الماء نتيجة للجفاف الإقليمي، وفقدان الغطاء الثلجي والجليدي.

وتتألف الدورة المائية من الماء المخزن على الأرض في جميع أطواره بالإضافة إلى حركة الماء من خلال النظام المناخي للأرض. ويوجد الماء في الغلاف الجوي أساساً على هيئة غاز - بخار الماء - إلا أنه يوجد أيضاً على هيئة جليد وماء سائل في السحب. ومن البديهي أن المحيطات عبارة عن ماء سائل أساساً، إلا أن المحيطات مغطاة أيضاً جزئياً بالجليد في المناطق القطبية. ويبدو الماء الأرضي في طوره السائل في شكل ماء سطحي - مثل البحيرات والأنهار - ورطوبة التربة والمياه الجوفية. ويحدث الماء الأرضي الصلب في الصفائح الجليدية والأنهار الجليدية والثلوج والجليد السطحي وفي التربة الصقيعية، والتربة التي تتجمد موسمياً.

وتشير البيانات عن مناخ المستقبل في بعض الأحيان إلى أن الدورة المائية سوف تتسارع إلا أن ذلك قد يكون من البيانات المضللة لأنها تعني، على نحو دقيق، أن دوران الماء سوف يحدث بسرعة مطردة مع الوقت وفي جميع الأماكن. والواقع أن أجزاء من العالم سوف تتعرض لاستنفاد كبير للماء ومن ثم انخفاض حركة الماء. كما أن بعض مستودعات الماء سوف تختفي.

ومع احترار الأرض، سوف تحدث بعض الجوانب العامة للتغير وذلك ببساطة استجابة للمناخ الحار. وسوف تحكم هذه التغيرات كمية الطاقة التي يضيفها الاحترار العالمي للنظام المناخي. وسوف ينصهر الجليد في جميع أشكاله بسرعة أكبر وأقل انتشاراً. فالجليد البحري الصيفي للقطب الشمالي، مثلاً، سوف يختفي قبل منتصف هذا القرن وذلك وفقاً لبعض أشكال المحاكاة التي جرى تقييمها في هذا التقرير. وسيحتوي الغلاف الجوي على قدر أكبر من بخار الماء، وتشير الرصدات ونتائج النماذج إلى أنه يفعل ذلك بالفعل. وقد يزيد متوسط كمية بخار الماء في الغلاف الجوي بنهاية القرن الحادي والعشرين بما يتراوح بين 5 و25 في المائة، بحسب كمية انبعاثات غازات الاحتباس الحراري البشرية المنشأ، والجسيمات النشطة إشعاعياً مثل الدخان. وسوف يتبخّر الماء بسرعة أكبر من السطح. وسوف يرتفع مستوى سطح البحر نتيجة اتساع رقعة الاحترار في مياه المحيطات وانصهار جليد اليابسة وتدفقه إلى المحيطات (انظر السؤال 13.2).

وتتعرض هذه التغيرات العامة للتعديل نتيجة لتعقيد النظام المناخي مما يحول دون حدوثه بصورة منتظمة في جميع الأماكن وفي نفس الوقت. فدوران الماء في الغلاف الجوي، وعلى اليابسة، وفي المحيطات يمكن أن يتغير بتغير المناخ، حيث يركز الماء في بعض الأماكن، ويستنفدها من أماكن أخرى. كما أن التغيرات قد تتباين خلال العام: فبعض الفصول تنحوي إلى أن تكون أكثر أمطاراً من فصول أخرى. فمثلاً، تبين عمليات المحاكاة النمذجة المقومة في هذا التقرير أن سقوط الأمطار في شمال آسيا قد يزيد بأكثر من 50 في المائة في حين يتوقع أن لا يحدث تغير يذكر في كمية الأمطار الصيفية. ويتدخل البشر أيضاً بصورة مباشرة في الدورة المائية من خلال إدارة الماء والتغيرات في استخدام الأراضي. ويمكن أيضاً أن تؤدي توزيعات السكان وممارسات استخدام الماء إلى إحداث المزيد من التغيرات في الدورة المائية.

ويمكن أن تحدث عمليات الدورة المائية خلال دقائق أو ساعات أو أيام، أو أطول من ذلك، وعلى مسافات من أمتار إلى كيلومترات وأكبر من ذلك. والتقلبية على هذه النطاقات أكثر عادة من تقلبية درجات الحرارة ومن ثم يتعذر تقدير التغيرات المناخية في كمية الأمطار. وعلى الرغم من هذا التعقيد، تبين الإسقاطات الخاصة بمناخ المستقبل أن التغيرات مسألة شائعة عبر كثير من النماذج، وسيناريوهات التأثير القسري للمناخ. وقد أبلغ عن تغيرات مماثلة في تقرير التقييم الرابع (AR4). وتشير هذه النتائج مجتمعة إلى أن آليات التغيير قد أصبحت مفهومة على نحو جيدة حتى وإن كانت الأحجام تتباين مع تباين النماذج والتأثير القسري. ونحن نركز هنا على التغيرات على الأرض حيث تنطوي هذه التغيرات في الدورة المائية على أكبر قدر من التأثير على النظم البشرية والطبيعية.

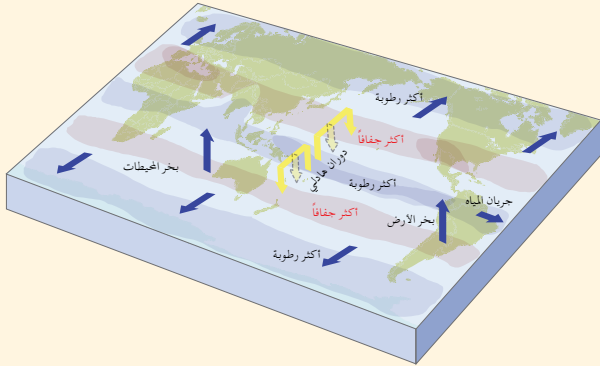
وتبين التغيرات المناخية المسقط من عمليات المحاكاة المقيمة في هذا التقرير (المبينة بصورة تخطيطية في السؤال 12.2، الشكل 1)، بصورة عامة حدوث زيادة في كميات الأمطار في أجزاء من الطبقات العميقة في المناطق المدارية والمرتفعات القطبية التي يمكن أن تتجاوز 50 في المائة في نهاية القرن الحادي والعشرين في إطار أكثر سيناريوهات الانبعاثات تطرفاً. وعلى العكس من ذلك، قد تنخفض بعض المساحات الشاسعة في المناطق دون المدارية بنسبة 30 في المائة أو أكثر. وفي المناطق المدارية، يبدو أن بعض هذه التغيرات تحكمها الزيادات في بخار الماء في الغلاف الجوي والتغيرات في دوران الغلاف الجوي التي تزيد من تركيز بخار الماء في المناطق المدارية ومن ثم سقوط المزيد من الأمطار المدارية. وفي المناطق دون المدارية، تتسبب هذه التغيرات في الدوران بصورة آمنة في انخفاض كمية الأمطار على الرغم من الاحترار في هذه المناطق. ونظراً لأن المناطق دون المدارية موطن معظم صحارى العالم، فإن هذه التغيرات تنطوي على زيادة سريعة في المناطق الجافة بالفعل وربما تؤدي إلى توسع الصحارى.

وتحكم الارتفاع في درجات الحرارة الزيادات عند خطوط العرض العليا، مما يتيح زيادة الماء في الغلاف الجوي، ومن ثم زيادة الماء الذي يتساقط مطراً. ويتيح المناخ الحار أيضاً لتنظيم العواصف في المناطق خارج المناطق المدارية نقل المزيد من بخار الماء إلى خطوط العرض العليا دون أن يتطلب ذلك تغيرات كبيرة في قوة الرياح المعتادة. وكما أشير أعلاه، فإن التغيرات في خطوط العرض العالية تكون أكثر وضوحاً خلال الفصول الباردة.

وسوف يعتمد تحول الأرض إلى أن تصبح أكثر جفافاً أو أكثر رطوبة جزئياً على التغيرات في كمية الأمطار إلا أنه يعتمد كذلك على التغيرات في البحر السطحي والنتج من النباتات (بالاقتران مع ما يسمى البحر - النتج). ونظراً لأن الغلاف الجوي الحار يمكن أن يحمل كمية أكبر من بخار الماء، فقد يستحث زيادة في البحر - النتج مما يعطي كميات كافية من الماء الأرضي. غير أن زيادة ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي تقلل من اتجاه النباتات إلى النتج في الغلاف الجوي والتصدي جزئياً لظاهرة الاحترار.

وتنحو زيادة البحر - النتج في المناطق المدارية إلى معادلة تأثيرات الزيادة في كميات الأمطار على رطوبة التربة، في حين لا يحقق الانخفاض الفعلي في كميات رطوبة التربة في المناطق دون المدارية سوى تغير طفيف في البحر - النتج. وفي خطوط العرض العالية، تتجاوز الزيادة في كميات الأمطار عموماً الزيادة في البحر - النتج في أنواع المناخ المتوقعة مما يسفر عن زيادة في المتوسط السنوي لجريان الماء، إلا أن ذلك سوف يشهد تغيرات مختلطة في رطوبة التربة. وكما تشير التغيرات في الدوران في السؤال 12.2، الشكل 1 قد تتغير أيضاً الحدود بين المناطق المرتفعة الرطوبة والمناطق المنخفضة الرطوبة.

وثمة عامل معقد آخر يتمثل في طبيعة سقوط الأمطار. إذ تبين إسقاطات النماذج أن الأمطار ستصبح أكثر كثافة وذلك جزئياً لزيادة الرطوبة في الغلاف الجوي. وعلى ذلك فإن عمليات المحاكاة المقومة في هذا التقرير تشير إلى أن يوماً واحداً من أيام سقوط الأمطار التي تقع على أجزاء كبيرة من الأرض حالياً كل 20 عاماً في المتوسط قد يحدث كل 10 سنوات أو حتى بوتيرة أسرع في نهاية القرن 21. وفي نفس الوقت، تبين الإسقاطات أيضاً أن ظواهر سقوط الأمطار عموماً سوف تنحو إلى أن تقع بوتيرة أقل. وتسفر هذه التغيرات عن تأثيرين متناقضين في الظاهر: انهيار الأمطار الأكثر غزارة مما يؤدي إلى المزيد من الفيضانات، وحدوث فترات جفاف أطول فيما بين أحداث الأمطار مما يؤدي إلى المزيد من الجفاف.



السؤال 12.2، الشكل 1 | رسم تخطيطي للتغيرات المسقطة في المكونات الرئيسية للدورة المائية. وتشير الأسهم الزرقاء إلى الأنماط الرئيسية من التغيرات في حركة الماء من خلال النظام المناخي للأرض. انتقال الماء صوب القطبين بواسطة الرياح خارج المناطق المدارية، والبحر من السطح وجريان المياه من اليابسة إلى المحيطات. وتبين المساحات المظللة المناطق التي يرجح أن تصبح أكثر جفافاً أو مطراً. وتشير الأسهم الصفراء إلى تغير مهم في دوران الغلاف الجوي بواسطة دوران هادلي الذي تزيد حركته المساعدة من الأمطار المدارية مع كبح الأمطار دون المدارية. وتشير إسقاطات النماذج إلى أن دوران هادلي سوف يحول فرعه الهبوطي صوب القطبين في كل من نصف الكرة الأرضية الشمالي ونصف الكرة الأرضية الجنوبي مع ما يرتبط بذلك من جفاف. ويتوقع حدوث ظروف رطبة على خطوط العرض العليا بالنظر إلى أن الغلاف الجوي الحار سوف يتيح زيادة كميات الأمطار مع زيادة حركة الماء في هذه المناطق.

ويحدث عند خطوط العرض العالية والمرتفعات العالية المزيد من التغيرات نتيجة لفقدان المياه المتجمدة. ويسوى بعض هذه التغيرات بواسطة الجيل الحالي من النماذج المناخية العالمية (GCMs)، ولا يمكن الاستدلال إلا على بعضها بالنظر إلى أنها تشتمل على عناصر مثل الأنهار الجليدية التي لا يتم تسويتها عادة أو إدراجها في النماذج. ويعني المناخ الحار أن الثلوج تنحو إلى أن تبدأ في التراكم في أواخر الخريف والانصهار في وقت مبكر في الربيع. وتبين عمليات المحاكاة المقومة في هذا التقرير أن من المتوقع أن ينخفض الغطاء الثلجي في الفترة من آذار / مارس إلى نيسان / أبريل في نصف الكرة الأرضية الشمالي بنسبة تقرب من 10 إلى 30 في المائة في المتوسط بحلول نهاية هذا القرن بحسب سيناريو غازات الاحتباس الحراري. ويغير الانصهار المبكر في أوائل الربيع من توقيت ذروة التدفق الربيعي في الأنهار التي تحصل على المياه الناتجة من الانصهار. ويؤدي ذلك إلى انخفاض معدلات التدفق اللاحق، مما يؤثر في إدارة موارد المياه. وتظهر هذه الجوانب في محاكاة النماذج المناخية العالمية (GCMs).

وسوف يتيح فقدان التربة الصقيعية تسرب الرطوبة إلى أعماق أكبر في التربة إلا أنه سوف يتيح أيضاً زيادة احتراق التربة مما يزيد من البحر - النتج. غير أن معظم النماذج المناخية العالمية الحالية لا تتضمن جميع العمليات اللازمة لمحاكاة التغيرات في التربة الصقيعية على نحو جيد. وتشير الدراسات التي تحلل تجمد التربة

أو تستخدم نواتج النماذج المناخية العالمية لاستخلاص المزيد من نماذج الأراضي الأكثر تفصيلاً إلى فقدان مساحات كبيرة من التربة الصقيعية في نهاية هذا القرن. وعلاوة على ذلك فإنه على الرغم من أن النماذج المناخية العالمية الحالية لا تتضمن بصورة واضحة تطور الأنهار الجليدية، يمكننا أن نتوقع استمرار انحسار الأنهار الجليدية، وقد يتقلص حجم الماء الذي توفره للأنهار في الصيف في بعض الأماكن مع اختفائها. وسوف يسهم فقدان الأنهار الجليدية في خفض تدفقات الأنهار في وقت الربيع. غير أنه إذا زاد المتوسط السنوي لسقوط الأمطار - سواء في شكل ثلوج أو أمطار - فإن هذه النتائج لا تعني بالضرورة أن المتوسط السنوي لتدفقات الأنهار سوف ينخفض.

السؤال 12.3 | ماذا سيحدث لمناخ المستقبل إذا أوقفنا الانبعاثات اليوم؟

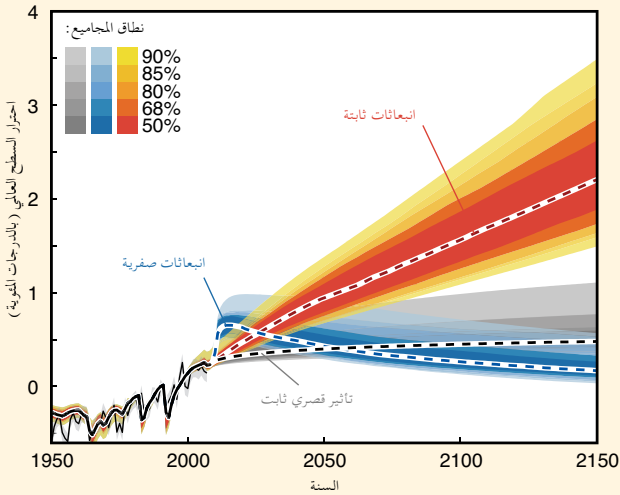
يمثل وقف الانبعاثات اليوم سيناريو غير معقول، إلا أنه واحد من حالات مثلى عديدة توفر فكراً متعمقاً عن استجابة النظام المناخي ودورة الكربون. ونتيجة للنطاقات الزمنية المتعددة في النظام المناخي، فإن العلاقة بين التغيير في الانبعاثات واستجابة المناخ مسألة شديدة التعقيد، مع حدوث بعض التغيرات بعد فترة طويلة من توقف الانبعاثات. وتبين النماذج، وفهم العملية أنه نتيجة لحالة القصور الكبيرة للمحيطات وفترة الحياة الطويلة للكثير من غازات الاحتباس الحراري ولاسيما ثاني أكسيد الكربون، سوف يستمر الكثير من الاحترار لقرون بعد توقف انبعاثات غازات الاحتباس الحراري.

فعندما تنبعث غازات الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي، تزال من خلال تفاعلات كيميائية مع المكونات النشطة الأخرى أو يتم تبادلها مع المحيطات واليابسة كما في حالة ثاني أكسيد الكربون (CO_2). وتحدد هذه العمليات خصائص فترة بقاء الغاز في الغلاف الجوي المعروف بأنه الوقت الذي يستغرقه انخفاض نبضة التركيز بواسطة المعامل e (2.71). وتتباين فترة بقاء غازات الاحتباس الحراري والهباء الجوي في الغلاف الجوي خلال نطاق عريض يتراوح بين أيام وآلاف السنين. ففترة بقاء الهباء، مثلاً، تبلغ أسابيع، والميثان (CH_4) نحو 10 سنوات، وأكسيد النيتروز (N_2O) نحو 100 عام. وسداسي فلوريد الايثان (C_2F_6) نحو 10000 عام. أما ثاني أكسيد الكربون (CO_2) فهو أكثر تعقيداً حيث إنه يزال من الغلاف الجوي من خلال عمليات فيزيائية وجيوكيميائية حيوية متعددة في المحيطات واليابسة حيث يعمل جميعها وفقاً لنطاقات زمنية مختلفة. وبالنسبة لنبضة انبعاثات تبلغ نحو 1000 بيتاغرام كربون، يزال نحو نصفه في غضون بضعة عقود إلا أن الجزء المتبقي يظل في الغلاف الجوي لفترة أطول بكثير. ومازال هناك ما يتراوح بين 15 و40 في المائة عن نبضة ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بعد 1000 عام.

ونتيجة لطول فترات بقاء غازات الاحتباس الحراري البشرية المنشأ الرئيسية، سوف تستمر الزيادة في التركيز في الغلاف الجوي نتيجة للانبعاثات السابقة لفترة أطول بعد توقف الانبعاثات. ولا يعود تركيز غازات الاحتباس الحراري فوراً إلى مستوياته قبل عصر الصناعة في

حالة وقف الانبعاثات. فتركيز الميثان يعود إلى القيم القريبة من مستوى ما قبل الصناعة في غضون نحو 50 عاماً. وتحتاج تركيزات أكسيد النيتروز (N_2O) إلى عدة قرون ولا يعود ثاني أكسيد الكربون إطلاقاً إلى مستواه قبل عصر الصناعة في نطاقات زمنية تتعلق بمجتمعنا. ومن ناحية أخرى فإن التغيرات في انبعاثات الأنواع قصيرة العمر مثل الهباء لن تسفر إلا عن تغيرات آتية تقريباً في تركيزاتها.

وتتسم استجابة النظام المناخي للتأثير القسري لغازات الاحتباس الحراري والهباء بجوانب قصور تسببها المحيطات بالدرجة الأولى. فللمحيطات قدرات بالغة للغاية على امتصاص الحرارة ويحدث المزج بين السطح وعمق المحيطات ببطء شديد. ويعني ذلك أن الأمر يحتاج إلى عدة قرون لكي تحتل المحيطات بأكملها وللوصول إلى توازن مع التأثير القسري الإشعاعي المتغير. وسوف يواصل سطح المحيطات (ومن ثم القارات) الاحترار إلى أن تستقر درجة الحرارة السطحية في توازن مع التأثير القسري الإشعاعي الجديد. ويبين تقرير التقييم الرابع (AR4) أنه في حالة الإبقاء على تركيز غازات الاحتباس الحراري ثابتة عند مستواها الحالي، سيواصل سطح الأرض الاحترار بنحو 0.6 درجة مئوية خلال القرن الحادي والعشرين بالنسبة لعام 2000. وهذا هو الالتزام المناخي إزاء التركيزات الجارية (أو التزام التشكيل الثابت) المبين باللون الرمادي في السؤال 12.3، الشكل 1. وستؤدي الانبعاثات الثابتة بالمستويات الحالية إلى مزيد من تركيز الغلاف الجوي وإلى قدر من الاحترار يزيد بكثير عن ذلك المرصود حتى الآن (السؤال 12.3، الشكل 1 والخطوط الحمراء).



السؤال 12.3، الشكل 1 | إسقاطات مستندة إلى نموذج دورة الكربون لتوازن الطاقة ونموذج تقييم تغير المناخ المستحث بغازات الاحتباس الحراري (MAGICC) بشأن تكوين الغلاف الجوي الثابت (التأثير القسري الثابت، اللون الرمادي)، والانبعاثات الثابتة (اللون الأحمر) والانبعاثات الصفرية في المستقبل (اللون الأزرق) بدءاً من عام 2010 مع تقديرات لعدم اليقين. وتستند الأرقام المأخوذة بتصرف من هار وماينشاوسن (2006) إلى معيارية النموذج المناخي لدورة الكربون البسيطة لجميع نماذج المرحلة الثالثة من مشروع مقارنة النماذج المتقارنة (CMIP3). ومشروع مقارنة نموذج دورة الكربون المناخ المتقارنة (C4MIP) (ماينشاوسن وآخرون، 2011 أ)، وماينشاوسن وآخرون، 2011 ب). وتستند النتائج إلى محاكاة عابرة تبدأ من عصر ما قبل الصناعة باستخدام جميع مكونات التأثير القسري. ويبين الخطان الأسود الرفيع والمظلل الاحترار المرصود وعدم اليقين.

وحتى في حالة وقف انبعاثات غازات الاحتباس الحراري البشرية المنشأ الآن، فإن التأثير القسري الإشعاعي الناشئ عن تركيزات غازات الاحتباس الحراري ذات فترات البقاء الطويلة هذه لن يؤدي إلا إلى انخفاض بطيء في المستقبل بمعدل تحدده فترة بقاء الغاز (انظر أعلاه). وعلاوة على ذلك، فإن الاستجابة المناخية لنظام الأرض لذلك التأثير القسري الإشعاعي سوف تكون أكثر بطئاً. ولن تستجيب درجة حرارة العالم بسرعة للتغيرات في تركيزات غازات الاحتباس الحراري. وسوف يؤدي التخلص من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون فقط إلى درجة حرارة شبه ثابتة لعدة قرون. وسوف يتسبب التخلص من التأثيرات القسرية السالبة القصيرة العمر من الهباء الكبريتي في نفس الوقت (مثل تدابير خفض تلوث الهواء) في حدوث احتراق مؤقت لبضعة أعشار الدرجة على النحو المبين باللون الأزرق في السؤال 12.3، الشكل 1. ولذا فإن وضع جميع الانبعاثات عند النقطة صفر في المستقبل، سيؤدي بعد فترة احتراق قصيرة إلى حالة شبيهة باستقرار المناخ لعدة قرون. ويسمى ذلك التزام من الانبعاثات السابقة (الالتزام بالانبعاثات صفرياً في المستقبل). وسوف تنخفض تركيزات غازات الاحتباس الحراري ومن ثم التأثير القسري كذلك، إلا أن جوانب القصور في النظام المناخي سوف تؤخر استجابة درجات الحرارة.

ونظراً للقصور الكبير في المناخ ودورة الكربون، تخضع درجة الحرارة العالمية الطويلة الأجل إلى حد كبير لتحكم مجموع انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الذي تراكم بمرور الوقت، بصرف النظر عن الوقت الذي انبعثت فيه. ولذا فإن قصر الاحتراق العالمي دون مستوى معين (مثل 2 درجة مئوية عن عصر ما قبل الصناعة) يعني ميزانية معينة لثاني أكسيد الكربون أي أن الزيادة في الانبعاثات في وقت سابق يعني انخفاضات قوية في وقت لاحق. ويتيح زيادة الهدف المناخي لذروة التركيزات المرتفعة لثاني أكسيد الكربون ومن ثم زيادة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون التراكمية (أي ما يتيح التأخير في خفض الانبعاثات الضرورية).

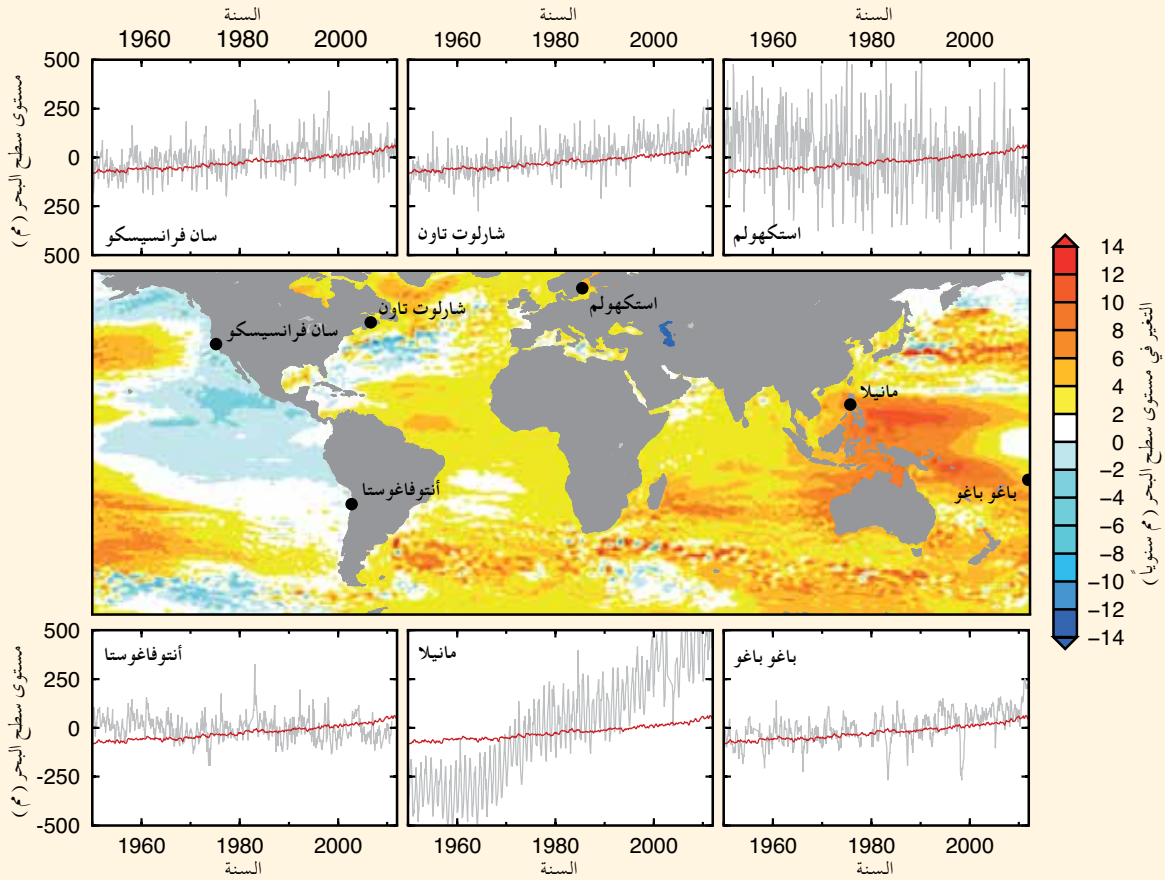
وتعد درجة الحرارة العالمية رقماً تجميعياً مفيداً لوصف شدة تغير المناخ وليس جميع التغيرات التي تقيس درجة الحرارة العالمية. فالتغيرات في الدورة المائية، مثلاً، تعتمد أيضاً على نوع التأثير القسري (مثل غازات الاحتباس الحراري والهباء والتغيرات في استخدام الأراضي)، وتباطؤ مكونات نظام الأرض مثل ارتفاع مستوى سطح البحر، وسوف تستغرق الصفائح الجليدية فترة أطول بكثير للاستجابة، وقد تكون هناك عتبات حرجية أو تغييرات مفاجئة أو غير عكوسة في النظام المناخي.

السؤال 13.1 | لماذا يختلف التغير في مستوى سطح البحار الإقليمية عن المتوسط العالمي؟

يمكن أن تغير الرياح السطحية المتحولة، وتمدد مياه المحيطات الحارة، وإضافة الجليد المنصهر التيارات المحيطية التي تؤدي بدورها إلى تغييرات في مستوى سطح البحر تتباين من مكان لآخر. وتؤثر التقلبات السابقة والحالية في توزيع جليد اليابسة في شكل الأرض ومجال الجاذبية الأرضية، التي تتسبب أيضا في حدوث تذبذبات إقليمية في مستوى سطح البحر. وتنتج التقلبات الإضافية في مستوى سطح البحر عن تأثير العمليات الأكثر محلية مثل تراكم الرواسب والحركات الأرضية.

وعبر أي ساحل يمكن أن تتسبب الحركة الرأسية لسطح البحر أو سطح اليابسة في إحداث تغييرات في مستوى سطح البحر بالنسبة للأرض (المعروفة بمستوى سطح البحر النسبي). فعلى سبيل المثال، يمكن أن يتسبب تغير محلي في زيادة ارتفاع مستوى سطح البحر أو في انخفاض ارتفاع اليابسة. وخلال فترات قصيرة نسبيا (ساعات إلى سنوات)، يسيطر تأثير المد والجزر والعواصف والتقلبية المناخية — مثل ظاهرة النينو — على تقلبات مستوى سطح البحر. كما يمكن للزلازل والانهياريات الأرضية أن تؤثر من خلال إحداث تغييرات في ارتفاع اليابسة وفي بعض الأحيان التسونامي. ويشكل تأثير تغير المناخ في الفترات الأطول مدى (العقود إلى القرون) مع التغيرات اللاحقة في حجم مياه المحيطات والجليد الأرضي — الفاعل الرئيسي في التغير في مستوى سطح البحر في معظم المناطق. وقد تتسبب العمليات المختلفة أيضا، خلال هذه النطاقات الزمنية الأطول مدى، في حدوث حركة رأسية لسطح اليابسة مما قد يتسبب في تغييرات كبيرة في المستوى النسبي لسطح البحر.

ومنذ أواخر القرن العشرين، أظهرت القياسات الساتلية لارتفاع مستوى سطح المحيطات بالمقارنة بمركز الأرض (المعروف بمستوى سطح البحر المقيس من مركز الأرض) معدلات مختلفة من التغير في مستوى سطح البحر بالمقارنة بمركز الأرض في مختلف أنحاء العالم (انظر السؤال 13.1، الشكل 1). ففي الأجزاء الغربية من المحيط الهادئ، مثلا، كانت المعدلات تزيد بنحو ثلاث مرات عن قيمة المتوسط العالمي البالغ نحو



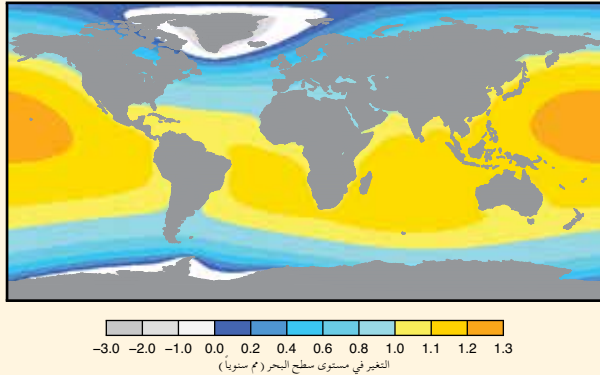
السؤال 13.1، الشكل 1 | خارطة لمعدلات التغير في ارتفاع مستوى سطح البحر (مستوى سطح البحر بالنسبة لمركز الأرض) للفترة 1993–2012 من مقياس الارتفاع الساتلي. كما تبين الخارطة التغيرات النسبية في مستوى سطح البحر (الخطوط الرمادية) من محطات مختارة لقياس المد والجزر للفترة 1950–2012. وللمقارنة، يرد أيضا تقدير للمتوسط العالمي للتغير في مستوى سطح البحر (الخطوط الحمراء) مع السلسلة الزمنية لكل مقياس للمد والجزر. وتعزى التذبذبات الكبيرة نسبيا والقصيرة الأجل في مستوى سطح البحار المحلية (الخطوط الرمادية) إلى التقلبية المناخية الطبيعية التي يرد وصف لها في النص الرئيسي. فمثلا، ترتبط الانحرافات المنتظمة الكبيرة في باغو باغو بالتذبذب الجنوبي — النينو.

3 م سنوياً من 1993 إلى 2012. وعلى العكس من ذلك، فإن المعدلات الواقعة في الأجزاء الشرقية من المحيط الهادئ تقل عن قيمة المتوسط العالمي، مع تعرض جزء كبير من الساحل الغربي للأمريكتين لانخفاض في ارتفاع مستوى سطح البحر خلال نفس الفترة.

ويعزى الكثير من التقلبية المكانية المبينة في السؤال 13.1، الشكل 1 إلى التقلبية المناخية الطبيعية مثل النينيو، وتذبذب المحيط الهادئ العقدي - على نطاقات زمنية من نحو عام إلى عدة عقود. وتُغير هذه التقلبات المناخية من الرياح السطحية والتيارات المحيطية، ودرجة الحرارة، والملوحة، ومن ثم تؤثر في مستوى سطح البحر. وسوف يستمر تأثير هذه العمليات خلال القرن الحادي والعشرين. وسوف تعلق هذه التقلبات النمط المكاني للتغير في مستوى سطح البحر المرتبط بتغير المناخ في المدى الطويل والذي ينشأ أيضاً من خلال التغيرات في الرياح السطحية، والتيارات المحيطية، ودرجة الحرارة والملوحة فضلاً عن حجم المحيط. ومع ذلك، وخلافاً للتقلبية الطبيعية، فإن الاتجاهات الطويلة الأجل تتراكم بمرور الوقت، ومن ثم يتوقع أن تسيطر على القرن الحادي والعشرين. ولذا فإن معدلات التغيرات الناشئة في مستوى سطح البحر بالنسبة لمركز الأرض خلال هذه الفترة الطويلة قد تظهر نمطاً بالغ الاختلاف عن ذلك المبين في السؤال 13.1، الشكل 1.

وتحدد مقاييس المد والجزر مستوى سطح البحر النسبي، ومن ثم فهي تتضمن التغيرات الناشئة عن الحركة الرأسية لكل من سطح اليابسة والبحار. والحركة الرأسية لليابسة صغيرة في الكثير من المناطق الساحلية، ومن ثم فإن المعدل الطويل الأجل للتغيرات في مستوى سطح البحر الذي تسجله مقاييس المد والجزر الساحلية والجزرية يماثل قيمة المتوسط العالمي (انظر السجلات في سان فرانسيسكو وباغو باغو في السؤال 13.1، الشكل 1). وفي بعض المناطق، كان للحركة الرأسية لليابسة تأثير مهم. فالانخفاض المطرد في مستوى سطح البحر المسجل في ستكهولم، مثلاً، (السؤال 13.1، الشكل 1) ناتج عن الارتفاع في هذه المنطقة بعد انصهار صفحة جليدية قارية (يزيد سمكها عن 1 كيلومتر) كبيرة في نهاية العصر الجليدي الأخير منذ ما بين 20000 و9000 عام مضت. ويمثل التشويه الجاري لليابسة استجابة لانصهار صفائح الجليد القديمة عاملاً مساهماً كبيراً في التغيرات في مستوى سطح البحر الإقليمية في أمريكا الشمالية وشمال غرب أوراسيا التي كانت مغطاة بصفائح جليدية قارية ضخمة خلال ذروة العصر الجليدي الأخير.

وفي المناطق الأخرى، يمكن أن تؤدي هذه العملية أيضاً إلى هبوط سطح اليابسة مما يرفع من مستويات سطح البحر النسبية كما حدث في شارلوت تاون حيث رصدت زيادة كبيرة نسبياً بالمقارنة بمعدل المتوسط العالمي (السؤال 13.1، الشكل 1). ويمكن للحركة الرأسية لليابسة الناتجة عن حركة الصفائح التكتونية للأرض أن تتسبب أيضاً في انحرافات عن المتوسط العالمي لتغير مستوى سطح البحر في بعض المناطق، ومن الأمور الأكثر أهمية أن تلك تقع بالقرب من مناطق التلاحم النشطة حيث تنحدر إحدى الصفائح التكتونية تحت الأخرى. ففي حالة أونتوفاغوستا (السؤال 13.2، الشكل 1)، يبدو أن ذلك يسفر عن ارتفاع مطرد في اليابسة ومن ثم إلى انخفاض في المستوى النسبي لسطح البحر.



السؤال 13.1، الشكل 2 | نواتج نمذجة تبين التغير النسبي في مستوى سطح البحر نتيجة لانصهار صفائح جليد غرينلاند، والصفائح الجليدية في غرب منطقة القطب الجنوبي بمعدلات تبلغ 0.5 م سنوياً لكل منها (مما يعطي قيمة المتوسط العالمي للارتفاع في مستوى سطح البحر قدرها 1 م سنوياً). وتقل التغيرات المنمذجة لمستوى سطح البحر عن قيمة المتوسط العالمي في المناطق القريبة من انصهار الجليد، إلا أنها تزيد في المناطق الأبعد (مأخوذة بتصرف من ميلن وآخرين، 2009).

وباختصار فإن طائفة من العمليات تحدث تغيرات في الارتفاع في مستوى سطح المحيطات وقيعان المحيطات مما يؤدي إلى أنماط مكانية متميزة للتغيرات في مستوى سطح البحر على الأصعدة المحلية إلى الإقليمية. وتنتج توليفة من هذه العمليات نمطاً معقداً من التغير في مستوى سطح البحر يتباين بمرور الوقت بوصفه مساهمة نسبية في تغيرات كل عملية. ويعتبر تغيير المتوسط العالمي قيمة مفيدة بمفردها تجسد مساهمة العمليات المناخية (مثل انصهار جليد اليابسة واحترار المحيطات). وتمثل تقديراً جيداً لتغير مستوى سطح البحر في كثير من الأماكن الساحلية. غير أنه حينما تسفر مختلف العمليات الإقليمية، في نفس الوقت، عن دليل قوي، قد تكون هناك انحرافات كبيرة عن قيمة المتوسط العالمي.

السؤال 13.2 | هل ستساهم الصفائح الجليدية لغرينلاند والقطب الجنوبي في تغيير مستوى سطح البحر خلال الفترة المتبقية من القرن؟

تمثل الصفائح الجليدية لغرينلاند ومنطقة القطب الجنوبي أكبر مستودع للمياه العذبة على كوكب الأرض. ولذا فقد أسهمت في تغيير مستوى سطح البحر خلال العصور الجيولوجية والأخيرة. وتحصل هذه الصفائح على كتلتها من تراكم الثلوج وتفقدتها من خلال التلاشي السطحي (في شكل انصهار الجليد أساساً) وتدفقاته عند حدودهما البحرية سواء إلى جرف جليدي عائم أو بصورة مباشرة في المحيطات من خلال انفصال الجبال الجليدية. وتتسبب الزيادة في التراكم في انخفاض المتوسط العالمي لارتفاع مستوى سطح البحر، في حين تتسبب الزيادات في التلاشي السطحي والتدفقات الخارجة في ارتفاعه. وتتوقف التقلبات في هذه التدفقات في الكتل على طائفة من العمليات داخل الصفائح الجليدية أو بدونها في الغلاف الجوي والمحيطات. غير أنه يبدو أن مصادر فقد الكتلة، خلال هذا القرن، تتجه إلى تجاوز مصادر اكتسابها، ومن ثم يمكن توقع حدوث مساهمة إيجابية مستمرة في مستوى سطح البحر على الصعيد العالمي. ويوجز هذا السؤال البحوث الجارية عن الموضوع ويوفر الحجم الإرشادي للتقييم الكامل في نهاية القرن (2081-2100 بالمقارنة بالفترة 1986-2005) للمساهمات في مستوى سطح البحر، والتي أبلغت في شكل مستوى احتمالية اثنين من ثلاثة عبر جميع سيناريوهات الانبعاثات.

وبمرور الألفيات، يحمل التدفق الأفقي البطيء للصفائح الجليدية الكتلة من مناطق التراكم الصافي (في المناطق الداخلية المرتفعة عموماً) إلى مناطق الفقد الصافي (في المناطق المحيطية المنخفضة الارتفاع والمجاورة للسواحل عموماً). وفي الوقت الحالي، تفقد غرينلاند نحو نصف جليدها المتراكم من خلال التلاشي السطحي، وتفقد النصف الآخر عن طريق الانفصال. ومن ناحية أخرى، تفقد منطقة القطب الجنوبي جميع التراكم فيها تقريباً نتيجة للانفصال والانصهار تحت السطح من جروفها الجليدية الإضافية. وتطفو الجروف الجليدية، ومن ثم فإن فقدانها لا ينطوي إلا على تأثيرات مباشرة طفيفة على مستوى سطح البحر، إلا أنها يمكن أن تحدث تأثيراً غير مباشر على مستوى سطح البحر من خلال تغيير ميزانية كتلة الصفائح الجليدية الأصلية (انظر أدناه).

وفي شرق القارة القطبية الجنوبية، تشير بعض الدراسات التي تستخدم مقاييس الارتفاع الرادارية الساتلية إلى تزايد سقوط الثلوج، إلا أن النمذجة الأخيرة للغلاف الجوي والمقاييس الساتلية للتغيرات في الجاذبية لا تظهر أي زيادة كبيرة. وقد يعزى السبب في هذا الاختلاف الواضح إلى أن الصغر النسبي للتغيرات الطويلة الأجل يخفي تقلبية شديدة فيما بين السنوات فيما يتعلق بسقوط الثلوج. وتشير الإسقاطات إلى حدوث زيادة كبيرة في القرن الحادي والعشرين في سقوط الثلوج في القطب الجنوبي، وذلك بالدرجة الأولى لأن الغلاف الجوي الحار سيكون قادراً على حمل المزيد من الرطوبة إلى المناطق القطبية. والأرجح أن التغيرات الإقليمية في دوران الغلاف الجوي تضطلع بدور ثانوي في هذا المجال. وبالنسبة للصفائح الجليدية للمنطقة القطبية الجنوبية بأكملها، فيتوقع أن تسهم هذه العملية بما يتراوح بين صفر و70 مم في انخفاض مستوى سطح البحر.

وفي الوقت الحاضر، تعد درجات حرارة الهواء حول القارة القطبية الجنوبية بالغة البرودة لحدوث تلاش سطحي كبير. غير أن الرصدات الميدانية والساتلية تشير إلى زيادة التدفقات الخارجية - التي تظهر في شكل انخفاض في مستوى السطح - الجليد - في عدد قليل من المناطق الساحلية المحلية. فهذه المناطق (جزيرة بين وأنهار ثويتس الجليدية في غرب منطقة القطب الجنوبي، والأنهار الجليدية لتوتن وكوك في شرق القارة القطبية الجنوبية) تقع كلها في حدود منخفضات أساسية يصل عمقها إلى كيلومتر صوب حافة الجرف القاري للقطب الجنوبي. ويعتقد أن الزيادة في التدفق الخارجي قد انطلقت نتيجة للتغيرات الإقليمية في دوران المحيطات مما وصل بالمياه الحارة إلى ملامسة جروف الجليد الطافية.

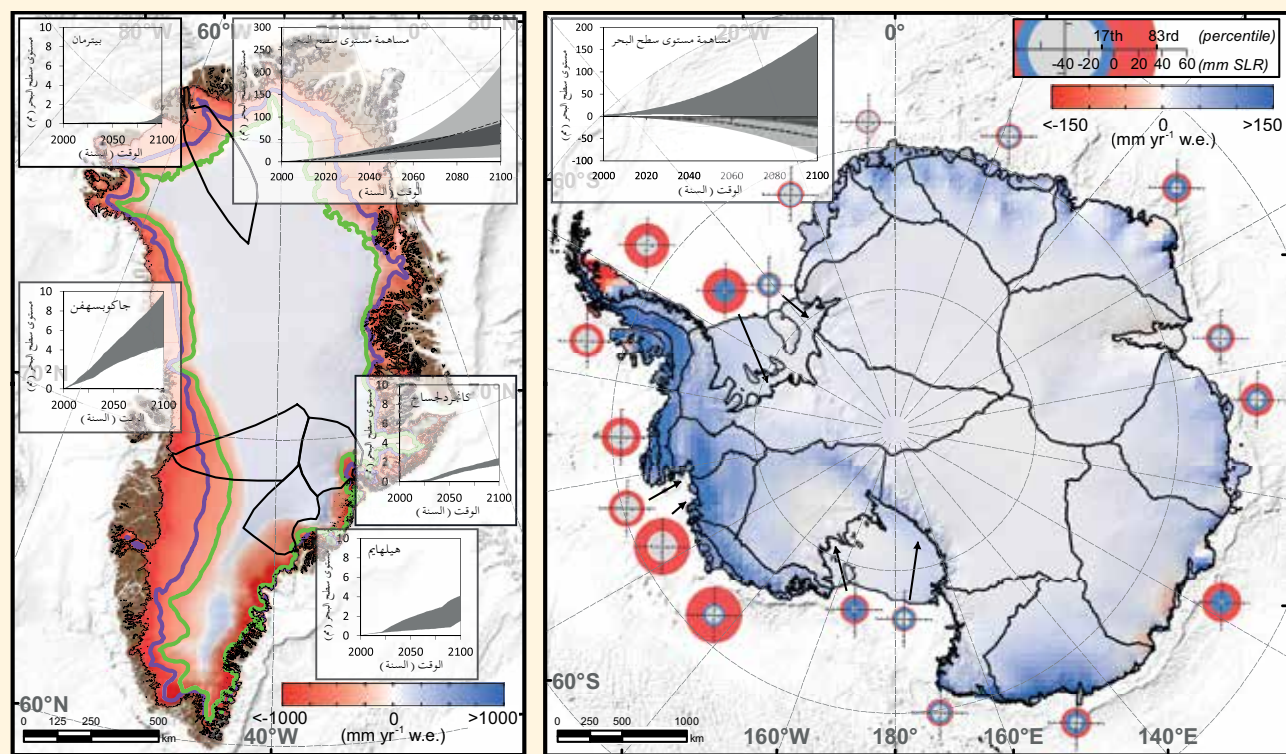
ويوجد في المناطق الشمالية من شبه الجزيرة القطبية الجنوبية، سجل حسن التوثيق عن أنهيار جرف جليدي يبدو أنه مرتبط بزيادة الانصهار السطحي الناشئ عن احترار الغلاف الجوي خلال العقود الأخيرة. وقد كان للتخفيف اللاحق لسمك الأنهار الجليدية المنصرفة في هذه الجروف الجليدية تأثير إيجابي، وإن كان طفيفاً، على مستوى سطح البحر مثلما تحققه أي أحداث مماثلة أخرى على شبه الجزيرة. وتشير الإسقاطات الإقليمية لتغير درجات حرارة الغلاف الجوي في القرن الحادي والعشرين إلى أن هذه العملية لن تؤثر على الأرجح في استقرار الجروف الجليدية الكبيرة في كل من غرب وشرق منطقة القطب الجنوبي وإن كانت هذه الجروف قد تتعرض للخطر من جراء التغير المحيطي في المستقبل (انظر أدناه).

وتتباين تقديرات مساهمة الصفائح الجليدية للمنطقة القطبية الجنوبية في مستوى سطح البحر خلال العقود القليلة الماضية تبايناً شاسعاً، إلا أنه قطعت مؤخراً خطوات كبيرة لإحداث توافق مع الرصدات. وثمة أدلة قوية على أن التدفق الخارجي المعزز (في غرب المنطقة القطبية الجنوبية بالدرجة الأولى) يتجاوز حالياً أي زيادة في تراكم الثلوج (في شرق المنطقة القطبية الجنوبية بالدرجة الأولى) مما ينطوي على اتجاه صوب ارتفاع مستوى سطح البحر. وقبيل وضع إسقاطات يعتمد عليها للتدفقات الخارجة خلال القرن الحادي والعشرين بقدر أكبر من الثقة، يتعين تحسين النماذج التي تستخدم في محاكاة تدفق الجليد وخاصة فيما يتعلق بأي تغيرات في خط التلاقى الذي يفصل الجليد الطافي القائم على صخور القاع، والتفاعلات بين الجروف الجليدية والمحيطات. ويستند مفهوم «عدم استقرار الصفائح الجليدية البحرية» إلى فكرة أن التدفق إلى الخارج من الصفائح الجليدية المرتكزة على صخور القاع دون زيادات في مستوى سطح البحر عندما يكون الجليد عند

خط التلاقي أكثر سمكاً، ومن ثم أسرع في الصخور القاعية التي تنحدر هبوطاً صوب داخل الصفائح الجليدية مما يؤدي إلى إحداث حلقة مفرغة من الزيادة في التدفقات الخارجة الأمر الذي يتسبب في أن تقليل سمك الجليد عند خط التلاقي ويأخذ في الطفو. ويتراجع خط التلاقي بعد ذلك إلى أسفل المنحدرات حيث طبقة الجليد الأكثر كثافة ثم يدفع بدوره المزيد من الزيادات في التدفق الخارج. ويمكن أن يسفر هذا التأثير التفاعلي عن حدوث فقدان سريع لأجزاء من الصفائح الجليدية، مع تراجع خط التلاقي على طول الأحواض المنخفضة والأحواض التي تتعمق نحو داخل الصفائح الجليدية.

ويمكن أن تطلق التأثيرات القسرية لمناخ المستقبل انهياراً غير مستقر قد يستمر عندئذ بصورة مستقلة عن المناخ. وقد يتكشف هذا الانهيار المحتمل على مدى قرون ليكون مناطق منخفضة من طبقات صخرية منفردة في غرب المنطقة القطبية الجنوبية وقطاعات من شرق المنطقة القطبية الجنوبية. ويتركز الكثير من البحوث على فهم مدى أهمية هذا المفهوم النظري لهذه الصفائح الجليدية. وقد يرتفع مستوى سطح البحر عندما تصبح تأثيرات عدم الاستقرار البحري مهمة، إلا أنه لا تتوافر أدلة كافية في الوقت الحاضر لتحديد سليفة هذا التراجع غير المستقر بصورة لا غموض فيها. ويتوقع أن يسهم التدفق الخارج بين -20 (أي الانخفاض) و185 مم في ارتفاع مستوى سطح البحر بحلول العام 2100، على الرغم من أن تأثير عدم استقرار الصفائح الجليدية البحرية الذي يكتنفه عدم اليقين قد يزيد هذا الرقم ببضعة أعشار من المتر. وعموماً، يبدو أن الزيادة في سقوط الثلوج سوف تعوض جزئياً فقط الارتفاع في مستوى سطح البحر نتيجة لزيادة التدفق الخارج.

وفي غرينلاند، يغلب فقدان الكتلة من خلال زيادة التلاشي السطحي والتدفق الخارج على اتجاه التغير الأخير المحتمل صوب زيادة التراكم في الداخل. فقد تضاعفت تقديرات فقدان الكتلة نتيجة التلاشي السطحي منذ أوائل تسعينيات القرن الماضي. ويتوقع أن يستمر هذا الاتجاه خلال القرن القادم مع تعرض المزيد من الصفائح الجليدية للتلاشي السطحي لفترات أطول. والواقع أن الإسقاطات المتعلقة بالقرن الحادي والعشرين تشير إلى أن زيادة فقدان الكتلة سوف تسيطر على التراكم المتزايد أسبوعياً. وتوفر عملية إعادة تجمد الماء المنصهر التي تبرز على الصفائح الجليدية تأثيرات مخففة هامة (وإن كانت ربما مؤقتة) على العلاقة بين احترار الغلاف الجوي وفقدان الكتلة.



السؤال 13.2، الشكل 1 | تجميع توضيحي للتغيرات المتوقعة في SMB. والتدفق الخارجي بحلول عام 2100 بالنسبة لما يلي (أ) الصفائح الجليدية لغرينلاند و(ب) الصفائح الجليدية لمنطقة القطب الجنوبي. وتشير الألوان المبينة على الخرائط إلى تغير SMB المتوقع فيما بين بداية ونهاية القرن الحادي والعشرين باستخدام النموذج المناخي للغلاف الجوي الإقليمي (RACMO2) في إطار سيناريوهات الاحترار في المستقبل AIB (المنطقة القطبية الجنوبية) وRCP4.5 (غرينلاند). فبالنسبة لغرينلاند، ترد مواقع متوسط خط التوازن خلال كل من هذه الفترات الزمنية باللونين الأرجواني والأخضر على التوالي. وتبين حدود الصفائح الجليدية وخطوط التلاقي بالخطوط السوداء مثلما هو الحال بالنسبة لقطاعات الصفائح الجليدية. وبالنسبة لغرينلاند، ترد نتائج نمذجة خط التدفق لأربعة منافذ أنهار جليدية رئيسية في شكل إضافات في حين تجسد الحلقات الملونة في المنطقة القطبية الجنوبية التغير المتوقع في التدفق الخارج استناداً إلى الاستنتاج الاحتمالي للاتجاهات المرصودة. ويشير نصف القطر الخارجي والداخلي لكل حلقة إلى الحدود العليا والسفلى لثلاثي النطاق المرجح للمساهمة على التوالي (المستوى العلوي إلى اليمين)، ويشير اللون الأحمر إلى فقدان الكتلة (ارتفاع مستوى سطح البحر) في حين يشير اللون الأزرق إلى الزيادة في الكتلة (انخفاض مستوى سطح البحر). وأخيراً، تبين المساهمة في مستوى سطح البحر لكل صفحة من الصفائح الجليدية (الإضافة توجد في الخرائط أعلاه) مع إشارة اللون الرمادي الفاتح إلى SMB (ترد التجربة النمذجية المستخدمة لإنتاج خريطة SMB في شكل خط متقطع) والرمادي الداكن إلى التدفق الخارج. وتشير الإسقاطات إلى نطاق احتمالية إثنان في ثلاثة عبر جميع السيناريوهات.

وعلى الرغم من أن الاستجابة المرصودة لمنافذ الأنهار الجليدية معقدة وشديدة التقلبية، زاد إنفصال الجبال الجليدية من الكثير من منافذ الأنهار الجليدية الرئيسية في غرينلاند زيادة كبيرة خلال العقد الأخير، ويشكل فقداناً إضافياً كبيراً للكتلة. ويبدو أن ذلك يتعلق بولوج الماء الحار في البحار الساحلية حول غرينلاند إلا أن من غير الواضح ما إذا كانت هذه الظاهرة تتعلق بالتقلبية فيما بين العقود مثل تذبذبات شمال الأطلسي أو الاتجاه الأطول مدى المرتبط بالاحتراق المستحث من غازات الاحتباس الحراري. ولذا فإن توقع تأثيره على التدفق الخارج في القرن الحادي والعشرين أمر صعب، إلا أنه يبرز الحساسية للتدفق الخارج بالنسبة لاحتراق المحيطات. وقد تؤدي تأثيرات زيادة الماء السطحي الناتجة عن الانصهار على قاع الصفائح الجليدية وقدرة الجليد الأكثر احتراقاً على التشويه بصورة أيسر إلى زيادة معدلات التدفق، إلا أن الصلة بالزيادات الأخيرة في التدفق الخارج غير واضحة. ويتوقع أن يسهم التغير في الفروق الصافية بين التلاشي السطحي والتراكم بما يتراوح بين 10 و160 مم في الارتفاع في مستوى سطح البحر في الفترة 2081-2100 (مقابل الفترة 1986-2005) في حين أنه يتوقع أن تسهم الزيادة في التدفق الخارج بمعدل آخر يتراوح بين 10 و70 مم (الجدول 13.5).

وقد أسهمت الصفائح الجليدية لغرينلاند في ارتفاع المتوسط العالمي لمستوى سطح البحر خلال العقود القليلة الأخيرة، ويتوقع أن يزداد هذا الاتجاه خلال هذا القرن. وخلافاً للقطب الشمالي، لا يوجد في غرينلاند أي وجه من أوجه عدم الاستقرار الواسعة النطاق المعروفة قد تؤدي إلى تحقيق زيادة مفاجئة في ارتفاع مستوى سطح البحر خلال القرن الحادي والعشرين. غير أنه قد يوجد حد أقصى ومن ثم فإن استمرار التقلص قد يصبح أمراً لا رجعة فيه خلال النطاقات الزمنية المتعددة القرون، حتى إذا ما عاد المناخ إلى حالته قبل عصر الصناعة خلال النطاقات الزمنية للقرون. وعلى الرغم من أن فقدان الكتلة من خلال إنفصال الجبال الجليدية قد يتزايد في العقود القادمة، فإن هذه العملية سوف تنتهي في نهاية المطاف عندما تتراجع حدود الجليد إلى الصخور القاعية فوق مستوى سطح البحر حيث يوجد الجزء الأكبر من الصفائح الجليدية.

السؤال 14.1 | كيف يؤثر تغير المناخ في الرياح الموسمية؟

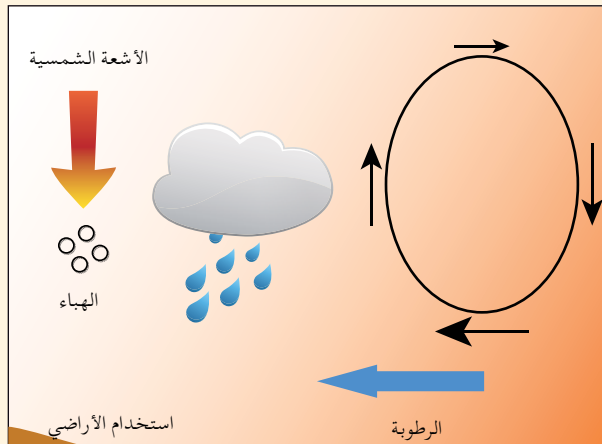
تعد الرياح الموسمية أهم طريقة للتقلبية المناخية الموسمية في المناطق المدارية، وهي مسؤولة عن جزء كبير من كميات الأمطار السنوية التي تسقط في الكثير من المناطق. وتتعلق قوة هذه الرياح وتوقيتها بمقدار الرطوبة في الغلاف الجوي، والفرق في درجات الحرارة بين اليابسة والبحار، والغطاء الأرضي واستخدامات الأراضي، وحمولات الغلاف الجوي من الهباء، وغير ذلك من العوامل. وعموماً من المسقط أن تصبح الأمطار الموسمية أكثر غزارة في المستقبل، وأن تؤثر في مناطق شاسعة بالنظر إلى أن نسبة الرطوبة في الغلاف الجوي تزداد مع ارتفاع درجات الحرارة. غير أن التأثيرات المحلية لتغير المناخ على قوة الرياح الموسمية الإقليمية وتوقيتها مسألة معقدة ومحاطة بقدر كبير من عدم اليقين.

وتسقط الأمطار الموسمية على جميع القارات المدارية: آسيا وأستراليا والأمريكتين وأفريقيا. وينتج دوران الرياح الموسمية عن الفرق في درجات الحرارة بين اليابسة والبحار، وهي الدرجات التي تتباين موسمياً مع توزع حرارة الشمس. وتعتمد مدة سقوط الأمطار وكميتها على نسبة الرطوبة في الهواء وعلى تشكيل وقوة دوران الغلاف الجوي. كما يضطلع التوزيع الإقليمي للأراضي والمحيطات والتضاريس بدور في ذلك، فهضبة التبت، مثلاً، عدلت من جراء تقلبات غطاءها الثلجي وحرارة سطحها، قوة نظم الرياح الموسمية الآسيوية المعقدة. وحيثما ترتفع رطوبة الرياح أمام الساحل عن الجبال، كما يحدث في جنوب غرب الهند، تزداد كثافة الأمطار الموسمية. وتقل على الجانب الآخر من هذه السلسلة من الجبال.

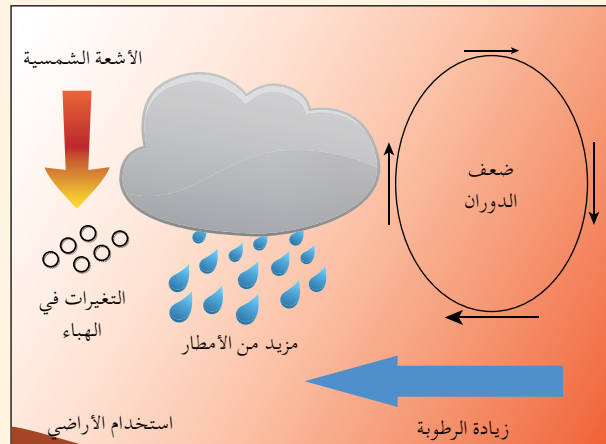
ومنذ أواخر سبعينيات القرن الماضي، أخذت الرياح الموسمية الصيفية في شرق آسيا في الضعف، ولا تصل إلى الشمال كما كانت تفعل في الأزمنة السابقة وذلك نتيجة للتغيرات في دوران الغلاف الجوي. وقد أدى ذلك بدوره إلى زيادة الجفاف في شمال الصين إلا أنها تسببت في فيضانات في وادي نهر يانغتسي الواقع إلى الجنوب. وعلى العكس من ذلك، لم تظهر نظم الرياح الموسمية الهندية - الأسترالية الواقعة غرب المحيط الهادئ أي اتجاهات تغير متساوفاً منذ منتصف القرن العشرين إلا أنها تعدلت كثيراً من جراء التذبذب الجنوبي - النينيو (ENSO). كما ارتبطت التغيرات المرصودة في نظام الرياح الموسمية في أمريكا الجنوبية خلال العقود القليلة الماضية بشدة بتقلبية التذبذب الجنوبي - النينيو. والأدلة محدودة عن اتجاهات التغير في نظام الرياح الموسمية في أمريكا الشمالية وإن كان قد رصد اتجاه صوب زيادة غزارة الأمطار في الجزء الشمالي من منطقة الرياح الموسمية الرئيسية. ولم ترصد أي تغيرات منتظمة طويلة الأجل في سلوك الرياح الموسمية الهندية أو الأفريقية.

ويحتر سطح اليابسة بأسرع مما يحدث بالنسبة لسطح المحيطات مما يزيد من التناقص في درجات الحرارة السطحية في معظم الأقاليم. غير أن الدوران الانقلابي للغلاف الجوي المداري يتباطأ في المتوسط مع احترار المناخ نتيجة لقيود توازن الطاقة في الغلاف الجوي المداري. وتؤدي هذه التغيرات في دوران الغلاف الجوي إلى تغيرات إقليمية في شدة الرياح الموسمية، ومنطقتها وتوقيتها. وثمة عدد من التأثيرات الأخرى بشأن الكيفية التي يؤثر بها تغير المناخ في الرياح الموسمية. وتتباين حرارة السطح مع كثافة امتصاص الأشعة الشمسية، التي تتأثر بدورها

(أ) الوقت الحاضر



(ب) المستقبل



السؤال 14.1، الشكل 1 | شكل تخطيطي يوضح الطرائق الرئيسية التي تؤثر بها الأنشطة البشرية على الأمطار الموسمية. فعندما يحتر المناخ، يتزايد انتقال بخار الماء من المحيطات إلى اليابسة بالنظر إلى أن الهواء الأكثر احتراراً يحتوي على قدر أكبر من بخار الماء. ويزيد ذلك أيضاً من احتمالات سقوط الأمطار الغزيرة. وتؤثر التغيرات المتصلة بالاحترار في الدوران الواسع النطاق في قوة ومدى الدوران الشامل للأمطار الموسمية. كما يمكن أن يؤثر تغير استخدام الأراضي وحمولة الهباء في الغلاف الجوي في كمية الأشعة الشمسية التي يمتصها الغلاف الجوي والأرض، ويمكن أن يخفف من الفروق في درجات الحرارة بين اليابسة والبحار.

بأي تغيرات في استخدام الأراضي في عاكسية (البيدو) سطح اليابسة. كما أن تغير حمولة الغلاف الجوي من الهباء مثل تلوث الهواء تؤثر في كمية الأشعة الشمسية التي تصل إلى الأرض مما يمكن أن يغير دوران الرياح الموسمية بتغيير الحرارة الشمسية الصيفية لسطح اليابسة. ومن ناحية أخرى، فإن امتصاص الأشعة الشمسية بواسطة الهباء الجوي يؤدي إلى احتراق الغلاف الجوي مما يغير من توزيع الحرارة فيه.

ويتمثل أقوى تأثير لتغير المناخ على الرياح الموسمية في زيادة رطوبة الغلاف الجوي المرتبطة بزيادة درجة حرارته، مما يؤدي إلى زيادة في إجمالي سقوط الأمطار الموسمية حتى إذا ضعفت قوة دوران الرياح الموسمية، أو بقيت دون تغيير.

وتوضح إسقاطات النموذج المناخي لإجمالي سقوط الأمطار الموسمية خلال القرن الحادي والعشرين زيادة في مجموع كميات الأمطار الموسمية وذلك إلى حد كبير بسبب الزيادة في نسبة الرطوبة في الغلاف الجوي. ويتوقع أن تزداد مساحة السطح الكلية المتأثرة بالرياح الموسمية جنباً إلى جنب مع توسع عام في المناطق المدارية صوب القطبين. وتشير إسقاطات النماذج المناخية إلى زيادة تتراوح بين 5 في المائة وما يقرب من 15 في المائة في كمية الأمطار الموسمية العالمية بحسب السيناريوهات. وفي حين أن مجموع الأمطار الموسمية المدارية سيزداد، سوف تتلقى بعض المناطق كميات أقل من الأمطار الموسمية نتيجة لضعف دوران الرياح المدارية. ومن المرجح أن تكون تواريخ بداية الرياح الموسمية مبكرة أو دون تغير كبير، ومن المرجح أن يتأخر تراجع تواريخ الرياح الموسمية مما يؤدي إلى إطالة فصل الأمطار الموسمية.

وتظل اتجاهات التغير الإقليمية للمستقبل في شدة الرياح الموسمية وتوقيتها مسألة غير مؤكدة في الكثير من أنحاء العالم. فالتقلبات من سنة لأخرى في الرياح الموسمية في كثير من المناطق المدارية تتأثر بالتذبذب الجنوبي ENSO. كيف إذا ستتغير هذه الظاهرة ENSO في المستقبل — وكيف سيتغير تأثيرها على الرياح الموسمية في المستقبل — هذه مسائل مازال يحيط بها عدم اليقين. غير أن الزيادة الشاملة المتوقعة في الأمطار الموسمية تشير إلى زيادة مقابلة في مخاطر أحداث الأمطار المتطرفة في معظم المناطق.

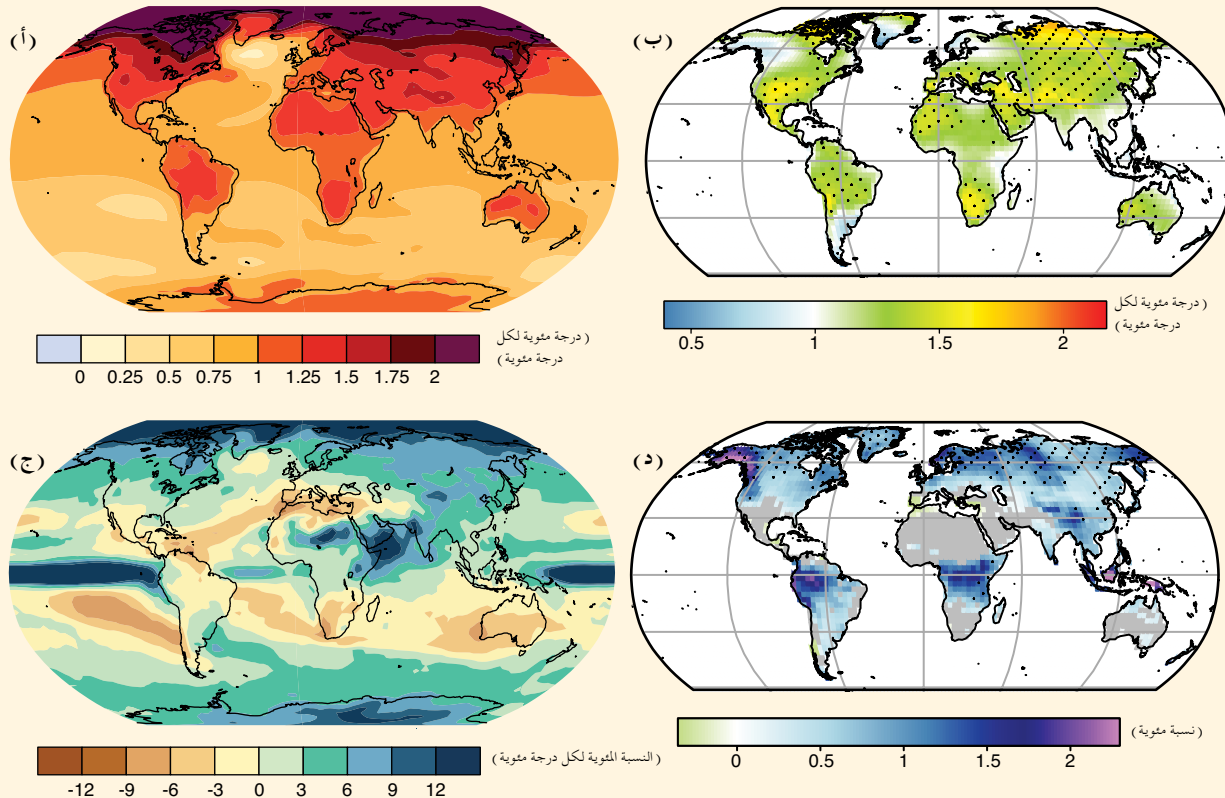
السؤال 14.2 | كيف ترتبط إسقاطات المستقبل للمناخ الإقليمي بإسقاطات المتوسطات العالمية؟

العلاقة بين تغير المناخ الإقليمي وتغير المتوسط العالمي علاقة معقدة. فأنواع المناخ الإقليمية تتباين تبايناً كبيراً مع تغير المكان ومن ثم تستجيب بصور مختلفة للتغيرات في التأثيرات على المستوى العالمي. ولذا فإن تغير المتوسط العالمي عبارة عن ملخص مبسط للكثير من الاستجابات المناخية الإقليمية المتنوعة.

والحرارة والرطوبة، والتغيرات فيهما غير موزعين بالتساوي فيما بين أقاليم العالم وذلك لعدة أسباب:

- التأثيرات القسرية الخارجية تتباين مكانياً (مثل اعتماد الأشعة الشمسية على خطوط العرض، وعلى انبعاثات الهباء من المصادر المحلية، والتغيرات الإقليمية في استخدام الأراضي وغير ذلك).
- الظروف السطحية تتغير بتغير المكان، مثل الاختلاف بين اليابسة والبحار، والتضاريس، ودرجات حرارة سطح البحر، ونسبة الرطوبة في التربة.
- تعيد نظم الطقس والتيارات المحيطية توزيع الحرارة والرطوبة من منطقة لأخرى.

وترتبط نظم الطقس بالظواهر المناخية المهمة إقليمياً، مثل الرياح الموسمية، ومناطق الالتقاء المدارية، ومسارات العواصف والظواهر المهمة للتقلبية المناخية (مثل التذبذب الجنوبي - النينو (ENSO)، وتذبذب شمال الأطلسي (NAO) والنمط الحلقي الجنوبي (SAM) وغير ذلك). وعلاوة على تعديل الاحترار الإقليمي، تشير الإسقاطات أيضاً إلى أن بعض الظواهر المناخية ستتغير في المستقبل مما قد يؤدي إلى المزيد من التأثيرات على أنواع المناخ الإقليمية (انظر الجدول 14.3).



السؤال 14.2، الشكل 1 | التغيرات المسقطة في القرن الحادي والعشرين في المتوسط السنوي والظواهر المتطرفة السنوية (على اليابسة) لدرجة حرارة الهواء وكميات الأمطار السطحية: (أ) متوسط درجة الحرارة السطحية لكل درجة مئوية من تغير المتوسط العالمي، (ب) المئين التسعين للحد الأقصى لدرجة الحرارة اليومية لكل درجة مئوية من المتوسط العالمي للحد الأقصى لدرجة الحرارة، (ج) متوسط كميات الأمطار (النسبة لكل درجة مئوية من المتوسط العالمي لتغير درجة الحرارة)، و(د) جزء من الأيام التي تتجاوز فيها كميات الأمطار المئين الخامس والتسعين. المصدر: اللوحان (أ) و(ج) التغيرات المسقطة للمتوسطات بين 2005-1986 و2010-2081 من محاكاة المرحلة 5 من المشروع CMi4.5 بموجب السيناريو RCP4.5 (انظر الفصل 12، الشكل 12.41). اللوحان (ب) و(د) التغيرات المتوقعة في الظواهر المتطرفة على اليابسة فيما بين 1980-1999 و2010-2081 (مقتبسة بتصرف من الشكلين 7 و12، أورلوسكي وسينيفيراتن، 2012).

وتظهر إسقاطات درجة الحرارة وسقوط الأمطار السطحيين تباينات إقليمية شاسعة (السؤال 14.2، الشكل 1). ومن المسقط أن تحدث زيادة في احترار السطح في الأقاليم القارية على خطوط العرض المرتفعة ومحيط القطب الشمالي في حين ستكون التغيرات فوق المحيطات الأخرى وخطوط العرض المنخفضة قريبة من المتوسط العالمي (السؤال 14.2، الشكل 1 أ). وتشير الإسقاطات، مثلاً، إلى أن الاحترار بالقرب من منطقة البحيرات الكبرى في أمريكا الشمالية سوف يزيد بنحو 50 في المائة من الانخفاض في المتوسط العالمي للاحترار — كذلك تشاهد التقلبات الإقليمية الكبيرة في التغيرات المسقط لدرجات الحرارة الأكثر تطرفاً (السؤال 14.2، الشكل 1 ب). وتتسم التغيرات المسقط لكميات الأمطار بتقلبات إقليمية أكثر من التغيرات في درجات الحرارة (السؤال 14.2، الشكل 1 ج و د) نتيجة للتعديلات الناجمة عن الظواهر المناخية مثل الرياح الموسمية ومناطق الالتقاء المدارية. ومن المسقط أن يزيد متوسط كميات الأمطار عند خطوط العرض القريبة من خط الاستواء في حين أن من المسقط أن ينخفض متوسط كمية الأمطار في المناطق الواقعة على حدود المناطق دون المدارية المتجهة صوب القطبين. ومن المسقط أن يزيد متوسط كميات الأمطار في مناطق خطوط العرض المرتفعة، وعلى وجه الخصوص كميات الأمطار الأكثر تطرفاً من العواصف خارج المناطق المدارية.

وتبين المناطق القطبية التعقيدات التي تنطوي عليها العمليات المشتركة في تغيير المناخ الإقليمي. إذ يتوقع أن يزيد احترار القطب الشمالي بأكثر من المتوسط العالمي. ويرجع معظمه إلى أن انصهار الجليد والثلوج ينتج تأثيرات تفاعلية إقليمية من خلال إتاحة امتصاص المزيد من الحرارة من الشمس. ويؤدي ذلك إلى زيادة الاحترار مما يحفز المزيد من انصهار الجليد والثلوج. غير أن الاحترار المسقط فوق القارة القطبية الجنوبية والمحيطات المحيطة فهو أقل وضوحاً ويرجع ذلك جزئياً نتيجة لاتجاه التغير الإيجابي القوي في الطريقة السنوية الجنوبية. وقد زادت الرياح الغربية فوق المحيطات الجنوبية في خطوط العرض المتوسطة خلال العقود الأخيرة مدفوعة بالتأثيرات المجتمعة لفقدان الأوزون الستراتوسفيري فوق القطب الجنوبي والتغيرات في هيكل درجة حرارة الغلاف الجوي ذات الصلة بزيادة تركيزات غازات الاحتباس الحراري. وقد أدركت النماذج المناخية التغير في الطريقة السنوية الجنوبية، وأثرت بخفض انتقال حرارة الغلاف الجوي إلى القارة القطبية الجنوبية ومع ذلك فإن شبه جزيرة القطب الجنوبي مازالت تحت بسرعة بالنظر إلى أنها تمتد شمالاً بدرجة لا تتأثر فيها بالكتل الهوائية الحارة لحزام الرياح الغربية.