تقرير حاز على قبول الفريق العامل الأول التابع للهيئة الحكومية الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ من دون الموافقة عليه بالتفصيل.

يعني «القبول» بتقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ خلال دورة الفريق العامل أو الهيئة أن الوثيقة لم تكن موضوع نقاش مفصّل ولم تحظ بالموافقة، لكنها تقدم وجهة نظر شاملة وموضوعية ومتوازنة حول الموضوع.

الملخّص الفني

المؤلفون الرئيسيون المنسقون:
سوزان سولومون (الولايات المتحدة الأمريكية)، داهيه كين (الصين)، مارتن مانينغ (الولايات المتحدة الأمريكية، نيوزيلندا)

المؤلفون الرئيسيون:
ريشارد ب. أللي (الولايات المتحدة الأمريكية)، تاري برنستن (النروج)، ناتانييل ل. بيندوف (أستراليا)، جانلين شان (الصين)، أمنات شيدتايسنغ (تايلندا)، جوناثان م. غريغوري (المملكة المتحدة)، غابرييل ك. هيغيرل (الولايات المتحدة الأمريكية، ألمانيا)، مارتن هايمان (ألمانيا، سويسرا)، بروس هويتسن (جنوب أفريقيا)، برايان ج. هوسكينز (المملكة المتحدة)، فورتونات جووس (سويسرا)، جان جوزال (فرنسا)، فلاديمير كاتسوف (روسيا)، أولريك لومان (سويسرا)، تارو ماتسونو (اليابان)، ماريو مولينا (الولايات المتحدة الأمريكية، المكسيك)، نافيل نيكولز (أستراليا)، جوناثان أوفربيك (الولايات المتحدة الأمريكية)، غراسييلا راغا (المكسيك، الأرجنتين)، فينكاتاشالام راماسوامي (الولايات المتحدة الأمريكية)، جياوين ران (الصين)، ماتيلد روستيكوشي (الأرجنتين)، ريشارد سوميرفيل (الولايات المتحدة الأمريكية)، توماس ف. ستوكر (سويسرا)، رونالد ج. ستوفر (الولايات المتحدة الأمريكية)، بيني واتين (أستراليا)، ريشارد أ. وود (المملكة المتحدة)، دايفيد رات (نيوزيلندا).

المؤلفون المشاركون:
ج. أربلاستر (الولايات المتحدة الأمريكية، أستراليا)، ج. براسور (الولايات المتحدة الأمريكية، ألمانيا)،ج.ه. كريستنسن (الدانمارك)، ك.ل. دانمان (كندا)،د.و. فاهيه (الولايات المتحدة الأمريكية)، ب. فورستر (المملكة المتحدة)، ج. هايوود (المملكة المتحدة)، إ. جانسن (النروج)، ب.د. جونس (المملكة المتحدة)، ر. نوتي (سويسرا)، ه. لوترو (فرنسا)، ب. لامكي (ألمانيا)، ج. ميل (الولايات المتحدة الأمريكية)، د. راندال (الولايات المتحدة الأمريكية)، د.أ. ستون (المملكة المتحدة، كندا)، ك.إ. ترانبيرث (الولايات المتحدة الأمريكية)، ج. ويلبراند (ألمانيا)، ف. زوبار (كندا).

المحررون المراجعون:
كانسري بونبراغوب (تايلندا)، فيليبو جيورجي (إيطاليا)، بوبو باتيه جالو (غامبيا).

يجب ذكر هذا التقرير على الشكل التالي:
سولومون، س. د. كين، م. مانينغ، ر.ب. أللي، ت. برنستن، ن.ل. بيندوف، ج. شان، أ. شيدتايسنغ، ج.م. غريغوري، غ.ك. هيغيرل، م. هايمان، ب. هويتسن، ب.ج. هوسكينز، ف. جووس، ج. جوزال، ف. كاتسوف، أ. لومان، ت. ماتسونو، م. مولينا، ن. نيكولز، ج. أوفربيك، غ. راغا، ف. راماسوامي، ج. ران، م. روستيكوشي، ر. سوميرفيل، ت. ف. ستوكر، ب. واتين، ر. أ. وود، د. رات، ٢٠٠ : الملخّص الفني. في: التغيّر المناخي في العام ٢٠٠٧: الأساس العلمي. مساهمة الفريق العامل الأول في تقرير التقييم الرابع للهيئة الحكومية الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ [سولومون، س. د. كين، م. مانينغ،ج. شان، م. ماركي، ك.ب. أفيريت، م.تينيور، ه.ل. ميلر (محررون)]. مطبعة جامعة كامبريدج، كامبريدج، المملكة المتحدة ونيويورك، الولايات المتحدة الأمريكية.

المحتويات

الملخّص الفني ١: المقدمة

الملخّص الفني ٢: التغيّرات في المؤثرات البشرية والطبيعية في تغيّر المناخ

الإطار١: معالجة أوجه عدم اليقين في تقييم الفريق العامل الأول

الملخّص الفني ٢,١: غازات الدفيئة

الملخّص الفني ٢,٢: الأهباء

الملخّص الفني ٢,٣: دخان الطائرات والسحب البيضاء الذوابات وإستخدام الأراضي وتأثيرات أخرى

الملخّص الفني ٢,٤: التأثير الإشعاعي الناتج من النشاط الشمسي والثورات البركانية

الملخّص الفني ٢,٥: إجمالي التأثير الإشعاعي الصافي، إحتمالات الإحترار العالمي وأنماط التأثير

الملخّص الفني ٢,٥: الدورة الهيدرولوجية

الملخّص الفني ٣: مشاهدات التغيّر في المناخ

الملخّص الفني ٣,١: التغيّرات في الغلاف الجوي: السجلّات الآلية

الملخّص الفني ٣,٢: تغيّرات في الغلاف الجليدي: السجلّات الآلية

الإطار ٣: ديناميّة الصفائح الجليدية واستقرارها

الملخّص الفني ٣,٣: تغيّرات في المحيط: السجلّات الآلية

الإطار ٤: مستوى البحر

الملخّص الفني ٣,٤: التناسق في المشاهدات

الإطار ٥: ظاهرة مناخية متطرفة

الملخّص الفني ٣,٥: وجهة النظر في مناخ العصور القديمة

الإطار ٥: التأثير المداري

الملخّص الفني ٤: تفهم التغيّر المناخي وعزوه

الملخّص الفني ٤,١: تطور عزو تغيّر درجات الحرارة العالمية في فترة إستعمال المقاييس: الغلاف الجوي والمحيطات والجليد

الإطار ٧: تقييم نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات

الملخّص الفني ٤,٢: عزو التغيّرات الزمنية والمكانية لجهة درجات الحرارة

الملخّص الفني ٤,٣: عزو التغيّرات في الدوران والمطار وغيرهما من المتقلبات المناخية

الملخّص الفني ٤,٤: دراسات مناخ عصر ما قبل التاريخ للعزو

الملخّص الفني ٤,٥: إستجابة المناخ للتأثير الإشعاعي

الملخّص الفني ٥: الإسقاطات حول التغيّرات المستقبلية في المناخ

الإطار ٨: هرمية النماذج المناخية في العالم

الملخّص الفني ٥,١: فهم تغيّر المناخ على المدى القريب

الإطار ٩: التغيّر المناخي الملتزم

الملخّص الفني ٥,٢:التنبؤات الواسعة النطاق في القرن الحادي والعشرين

الملخّص الفني ٥,٣: التنبؤات الإقليمية النطاق

الإطار١٠: الإنخفاض النطاقي

الملخّص الفني ٥,٤: الإقتران بين تغيّر المناخ والتغيّرات في الدورات الكيميائية الأرضية الحيوية

الملخّص الفني ٥,٥: تداعيات العمليات المناخية ونطاقاتها الزمنية بالنسبة إلى التنبؤات الطويلة المدى

الملخّص الفني ٦: الإكتشافات الكبرى وأهم الشكوك

الملخّص الفني ٦,١: تغيّر في العناصر الدافعة البشرية والطبيعية الخاصة بالمناخ

الملخّص الفني ٦,٢: مراقبة التغيّرات المناخية

الملخّص الفني ٦,٣: فهم تغيّر المناخ وعزوه

الملخّص الفني ٦,٤: التنبؤات الخاصة بالتغيّرات المستقبلية في المناخ

الملخّص الفني ١: المقدمة

خلال السنوات الست التي تلت صدور تقرير التقييم الثالث عن الهيئة الحكومية الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ، أحرز تقدم جدي في مجال فهم التغيّر المناخي الماضي والحالي وتوقع التغيّرات في المستقبل. تحقق هذا التقدم بفضل كميات البيانات الجديدة الكبيرة، وتحليلها بدقة أكبر، وتحسين فهم العمليات الفيزيائية في النماذج المناخية ومحاكاتها، واستكشاف أوسع لمجموعات أوجه عدم اليقين في نتائج النماذج. تتضح الثقة المتزايدة بعلم المناخ المستندة إلى هذا التقدم في مساهمة الفريق العامل الأول في تقرير التقييم الرابع الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ.

يقدم هذا التقرير معلومات جديدة وهامة تفيد السياسات في الفهم العلمي للتغيّر المناخي، لكن النظام المناخي المعقّد والتفاعلات العديدة التي تحدده تحدّ من قدرتنا على فهم مسار مناخ الأرض في المستقبل بشكل كامل. لم يكتمل حتى اليوم الفهم الفيزيائي لعدة عناصر في النظام المناخي ودورها في التغيّر المناخي. من بين نقاط عدم اليقين الهامة: أوجه دور السحاب، والغلاف الجليدي، والمحيطات، وإستخدام الأراضي والعلاقات ما بين المناخ والدورات الإحيائية الجيولوجية الكيميائية. ما زالت ميادين العلم الواردة في هذا التقرير تشهد تقدّماً سريعاً، ولا بد من الإعتراف بأن التقييم الحالي يعكس فهماً علمياً يعتمد على كتابات الزملاء المراجعة والمتوفرة في منتصف العام ٢٠٠٦.

يحتوي الملخّص لواضعي السياسات الإستنتاجات الأساسية لتقييم الفريق العامل الأول التابع للهيئة الحكومية الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ. يقدم الملخّص الفني هذا نظرة أكثر تفصيلية على الأساس العلمي لهذه الإستنتاجات، ويوفر خريطة طريق لفصول التقرير. يركز على الإستنتاجات الأساسية، ويلقي الضوء على المستجدات الطارئة منذ تقرير التقييم الثالث. يتوزّع الملخّص الفني على الأقسام التالية:

- القسم الثاني: نظرة إلى الفهم العلمي الحالي للعوامل الطبيعية والعوامل البشرية المنشأ المؤثرة على تغيّر المناخ.
- القسم الثالث: نظرة إلى التغيّرات الملحوظة في النظام المناخي (ومن ضمنها الغلاف الجوي، والمحيطات، والغلاف الجليدي) وعلاقاتها بالعمليات الفيزيائية.
- القسم الرابع: نظرة إلى تفسيرات التغيّرات المناخية الملحوظة بناءً على نماذج المناخات والفهم الفيزيائي، والنظر إلى أي مدى يمكن عزو تغيّر المناخ إلى أسباب محددة، وإجراء تقييم جديد لتأثر المناخ بإزدياد غازات الدفيئة.
- القسم الخامس: نظرة إلى التوقعات بتغيّر المناخ على المدى المتوسط والطويل ومن بينها نطاقات الإستجابات الزمنية في التأثير ومعلومات إحتمالية على توقعات تغيّر المناخ في المستقبل.
- القسم السادس: ملخّص لأكثر الإستنتاجات ثباتاً لجهة عدم اليقين الأساسية في الفهم الحالي لعلم تغيّر المناخ الفيزيائي.

يتبع كل فقرة في النتائج الهامة لتقرير الملخّص الفني مرجع يرد بين هلالين يفيد بالقسم المناسب من فصول التقرير حيث يتوفر تقييم مفصل للكتابات العلمية بالإضافة إلى معلومات إضافية.

الملخّص الفني ٢: التغيّرات في المؤثرات البشرية والطبيعية في تغيّر المناخ

تحدد الطاقة المنبعثة من الشمس وخصائص الأرض والغلاف الجوي، لا سيما إنعكاس الطاقة وامتصاصها وإصدارها ضمن الغلاف الجوي وعلى سطح الأرض، مناخ الأرض العام. على الرغم من أن التغيّرات في الطاقة الشمسية الواردة (الناتجة عن تغيّرات في دوران الأرض حول الشمس مثلاً) تؤثر حتماً على رصيد الأرض من الطاقة، تعتبر خصائص الغلاف الجوي وسطح الأرض هامة أيضاً، وقد تتأثر بالإستجابات المناخية. لقد اتضحت أهمية الإستجابات المناخية نظراً للتغيّرات المناخية الماضية كما سجّلت في عينات الجليد الأسطوانية التي بلغ عمرها ٦٥٠،٠٠٠ سنة.

طرأت التغيّرات على عدة أوجه من الغلاف الجوي وسطح الأرض بشكل يؤدي إلى تغيّر رصيد الأرض من الطاقة وبالتالي إلى تغيّر المناخ. من بين هذه التغيّرات: إزدياد في تركيزات غازات الدفيئة التي تزيد أولاً من إمتصاص الغلاف الجوي للإشعاعات المنبعثة من الأرض، وإزدياد الأهباء الجوية (الجزئيات الدقيقة التي يحملها الهواء أو القطيرات) التي تعكس إشعاعات الشمس الواردة وتمتصها وتغيّر خصائص السحاب الإشعاعية. تؤدي هذه التغيّرات إلى التأثير الإشعاعي في النظام المناخي[١]. يمكن أن تختلف عوامل التأثير عن بعضها البعض لجهة وطأتها، والخصائص الزمنية والمكانية. تساهم التأثيرات الإيجابية

[١] إن «التأثير الإشعاعي» هو قياس لقدرة العامل على التأثير في ميزان الطاقة الواردة والصادرة ضمن نظام الغلاف الجوي وهو مؤشرلأهمية العامل كآلية تغيير مناخية مرجّحة. إن التأثيرات الإيجابية تزيد من دفء سطح الأرض فيما تخفضه التأثيرات السلبية. في هذا التقرير، تشير أرقام التأثير الإشعاعي إلى التغيّرات المرتبطة بخلفية ما قبل الثورة الصناعية في العام ١٧٥٠، ووحدة قياسها هي واط في المتر المربع، وإذا لم يُذكر خلاف ذلك، فهي تشير إلى معدّل سنوي عالمي. راجع معجم المصطلحات لمزيد من التفاصيل.

الإطار ١: معالجة أوجه عدم اليقين في تقييم الفريق العامل الأول

تعترف الهيئة الحكومية الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ بأهمية معالجة أوجه عدم اليقين بشكل متسق وشفاف، في إعداد تقييمها حول تغيّر المناخ. يتناول القسم ١,٦ الإنتباه المتزايد المكرّس لمعالجة أوجه عدم اليقين رسمياً في التقارير السابقة. بهدف تعزيز التناسق في المعالجة العامة لأوجه عدم اليقين بين الفرق العاملة الثلاثة، طلب من كتّاب تقرير التقييم الرابع إتّباع مجموعة مقتضبة من المذكرات التوجيهية حول تحديد أوجه عدم اليقين في إطار التقييم ووصفها[٢]. يلخّص هذا الإطار طريقة تطبيق هذه التوجيهات ضمن الفريق العامل الأول ويغطي بعضاً من أوجه معالجة عدم اليقين المرتبطة بالمادة الخاضعة للتقييم هنا.

يمكن تقسيم أوجه عدم اليقين إلى أشكال عديدة ومختلفة وفقاً لمصادرها. إن النوعين الأوليين هما «عدم اليقين المرتبط بالأرقام» و«عدم اليقين الهيكلي». يتأتى عدم اليقين المرتبط بالأرقام من التحديد غير المكتمل لأرقام أو نتائج معيّنة، عندما تكون البيانات غير دقيقة مثلاً أو لا تمثل بشكل كامل الحدث المتناول. يتأتى عدم اليقين الهيكلي من فهم غير مكتمل للعمليات التي تتحكم ببعض الأرقام أو النتائج، عندما لا يتضمن الإطار المفهومي أو النموذج المستخدم في التحليل جميع العمليات أو العلاقات الملائمة. يقدّر عدم اليقين المرتبط بالأرقام عادةً من خلال إستخدام تقنيات إحصائية ويعبّر عنه على شكل إحتمالات. يوصف عدم اليقين الهيكلي عادةً من خلال إعطاء الكتّاب حكمهم الجماعي في ثقتهم بصواب النتيجة. في الحالتين، يقضي تقدير عدم اليقين بوصف حدود المعرفة ولذلك يتضمن حكم خبير حول حالة المعرفة. ينشأ نوع مختلف من عدم اليقين في النظم التي تكون فوضوية أو غير محدودة بطبيعتها ما يحدّ أيضاً من إمكانيتنا في توقّع جميع أوجه التغيّر المناخي.

تلجأ الكتابات العلمية في موضوع التقييم إلى مجموعة من الطرق العامة من أجل تقسيم أوجه عدم اليقين إلى فئات. تتّسم أوجه عدم اليقين المرتبطة «بالأخطاء الإعتباطية» بالتراجع مع تراكم القياسات الإضافية، على خلاف أوجه عدم اليقين المرتبطة «بالأخطاء النظامية». في مجال معالجة البيانات المناخية، أولي إهتمام فائق للتعرف إلى الأخطاء النظامية أو التحيّز غير المقصود الوارد في مسائل أخذ عينات البيانات ومنهجيات تحليل البيانات ودمجها. كما تم تطوير منهجيات إحصائية متخصصة تعتمد على التحليل الكمي لرصد التغيّر المناخي وتحديده ولوضع توقعات إحتمالية حول معايير المناخ في المستقبل. تلخّص هذه في الفصول المناسبة.

تميّز التوجيهات حول أوجه عدم اليقين في تقرير التقييم الرابع للمرة الأولى وبحذر، بين مستويات الثقة في الفهم العلمي وإحتمالات النتائج المحددة. هذا ما يخول المؤلفين التعبير عن ثقة عالية بأن إحتمالات حصول حدث ما ضئيلة جداً (رمي النرد والحصول على الرقم ستة في رميتين على سبيل المثال) بالإضافة إلى ثقة عالية بإحتمال حصول أو عدم حصول الحدث بنسب متساوية (عند رمي قطعة نقدية مثلاً). إن مفهوم الثقة ومفهوم الإحتمال مثلما يتم إستخدامهما هنا هما مفهومان منفصلان لكن غالباً ما يتم الربط بينهما في الممارسة.

إن المصطلحات المستخدمة لتحديد مستويات الثقة في هذا التقرير هي نفسها تلك الواردة في مذكرة توجيهات عدم اليقين الصادرة عن الهيئة الحكومية الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ، لا سيما:

درجة الثقة في الصواب	مصطلحات الثقة
٩ فرص على الأقل من ١٠	ثقة عالية جداً
حوالي ٨ فرص من ١٠	ثقة عالية
حوالي ٥ فرص من ١٠	ثقة متوسطة
حوالي فرصتين من ١٠	ثقة متدنّية
أقل من فرصة واحدة من ١٠	ثقة متدنّية جداً

ملاحظة: تستخدم «ثقة متدنّية» و«ثقة متدنّية جداً» فقط في مجالات الإهتمام القصوى وحيث تكون وجهة نظر تعتمد على المخاطر مبررة.

يستخدم الفصل الثاني من هذا التقرير مصطلحاً هو «مستوى الفهم العلمي» عند وصف أوجه عدم اليقين في مساهمات مختلفة في التأثير الإشعاعي. تستخدم هذه المصطلحات للتناسق مع تقرير التقييم الثالث، وتعتمد القاعدة التي انطلق منها المؤلفين في تحديد مستويات معيّنة من الفهم العلمي على مجموعة من المقاربات تتوافق مع مذكرة التوجيهات حول عدم اليقين كما ورد بالتفصيل في القسم ٢,٩,٢ والجدول ٢,١١

[٢] تتوفر مذكرة التوجيهات حول أوجه عدم اليقين لدى الهيئة الحكومية الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ كوثيقة إضافية مع هذا التقرير.

المصطلحات المستخدمة في هذا التقرير من أجل تحديد أرجحية حصول حدث أو نتيجة لجهة تقدير الإحتمال هي:

مصطلحات الأرجحية	أرجحية الحدوث / النتيجة
مؤكد إفتراضياً	إحتمال >٩٩٪
فائق الأرجحية	إحتمال >٩٥٪
مرجّح جداً	إحتمال >٩٠٪
مرجّح	إحتمال >٦٦٪
أكثر أرجحية منه استبعاداً	إحتمال >٥٠٪
الأرجحية متساوية مع الإستبعاد	إحتمال من ٣٣ إلى ٦٦٪
مستبعد	إحتمال <٣٣٪
مستبعد جداً	إحتمال <١٠٪
فائق الإستبعاد	إحتمال<٥٪
غير مرجّح على نحو استثنائي	إحتمال <١٪

أضيفت المصطلحات «فائق الأرجحية» و«فائق الإستبعاد» و«أكثر أرجحية منه استبعاداً» كما حددت أعلاه إلى المصطلحات الواردة في مذكرة التوجيهات حول عدم اليقين الصادرة عن الهيئة الحكومية الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ وذلك بهدف توفير تقييم أكثر تحديداً للأوجه التي تتضمن النسبة والتأثير الإشعاعي.

إذا لم يذكر خلاف ذلك، تقيّم الأرقام الواردة في التقرير بأفضل التقديرات وتبلغ نسبة عدم اليقين درجة ثقة بمقدار ٩٠٪ (أي أنه هناك إحتمال ٥٪ أن يكون الرقم تحت الحد الأدنى من النطاق أو فوق الحد الأعلى من النطاق). ملاحظة: في بعض الحالات، قد تشير طبيعة الحواجز في رقم ما، في أي معلومات متوفرة، إلى توزيع غير متوازن لنطاق عدم اليقين حول التقدير الأفضل. في هذه الحالات، يذكر نطاق عدم اليقين بين مزدوجين بعد أفضل تقدير.

في إزدياد متوسط حرارة سطح الأرض العامة والتأثيرات السلبية في إنخفاضها. يحدّث هذا القسم فهم التأثيرات الإشعاعية الطبيعية والبشرية المنشأ.

إن إستجابة المناخ العالمي الإجمالية للتأثيرات الإشعاعية معقّدة نظراً لعدد من ردود الأفعال الإيجابية والسلبية التي يمكن أن يكون تأثيرها شديداً على النظام المناخي (انظر المثال، قسم ٤,٥ و٥,٤). على الرغم من أن بخار المياه هو غاز دفيئة قوي، فإن تركيزه يتغيّر في الغلاف الجوي وفقاً لتغيّرات مناخ سطح الأرض وتجدر معالجة هذه النقطة على أنها مفعول إستجابة وليس تأثيراً إشعاعياً. يلخّص هذا القسم أيضاً التغيّرات في رصيد السطح من الطاقة وإرتباطاته بدورة المياه. تذكر أيضاً ملاحظات حول تأثير بعض العوامل كالأهباء الجوية على التهطال.

٢,١. غازات الدفيئة

إن العامل المسيطر في التأثير الإشعاعي في العصر الصناعي هو إزدياد تركيز مختلف غازات الدفيئة في الغلاف الجوي. يُنتَج عدد من غازات الدفيئة الأساسية طبيعياً لكن الإزدياد في تركيزاتها في الغلاف الجوي خلال السنوات المئتين والخمسين الماضية يعود بمعظمه إلى النشاطات البشرية، فيما تكون غازات الدفيئة الأخرى ناتجة كلياً عن الأنشطة البشرية. يحدد التغيّر في تركيز كل غاز دفيئة في الغلاف الجوي خلال فترة وفاعلية الغاز في إحداث خلل في الميزان الإشعاعي، مساهمة هذا الغاز في التأثير الإشعاعي خلال الفترة المحددة. تتغيّر تركيزات غازات الدفيئة المختلفة في الغلاف الجوي الواردة في هذا التقرير بأكثر من ٨ درجات وطأة ($\times 10^{-8}$) وتتغيّر فاعليتها الإشعاعية بأكثر من ٤ درجات وطأة ($\times 10^{-4}$)،ما يعكس التنوّع الكبير في خصائصها ومصادرها.

إن التركيز الحالي لغاز دفيئة في الغلاف الجوي هو النتيجة الصافية لتاريخ إنبعاثاته الماضية وزولانه من الغلاف الجوي. إن الغازات والأهباء الجوية المذكورة هنا هي نتيجة إنبعاثات الأنشطة البشرية في الغلاف الجوي أو نتيجة إنبعاثات أنواع الغازات الأسلاف في الغلاف الجوي. تزول هذه الإنبعاثات بفعل عمليات زولان كيميائية وفيزيائية. باستثناء ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، تزيل هذه العمليات عادةً نسبة محددة من كمية الغاز في الغلاف الجوي في كل سنة، ويحدد إنعكاس نسبة الإزالة هذه متوسط فترة حياة الغاز. في بعض الحالات، قد يتغيّر

معدّل الإزالة مع تغيّر تركّز الغاز أو خصائص الغلاف الجوي (الحرارة أو ظروف الخلفية الكيميائية على سبيل المثال).

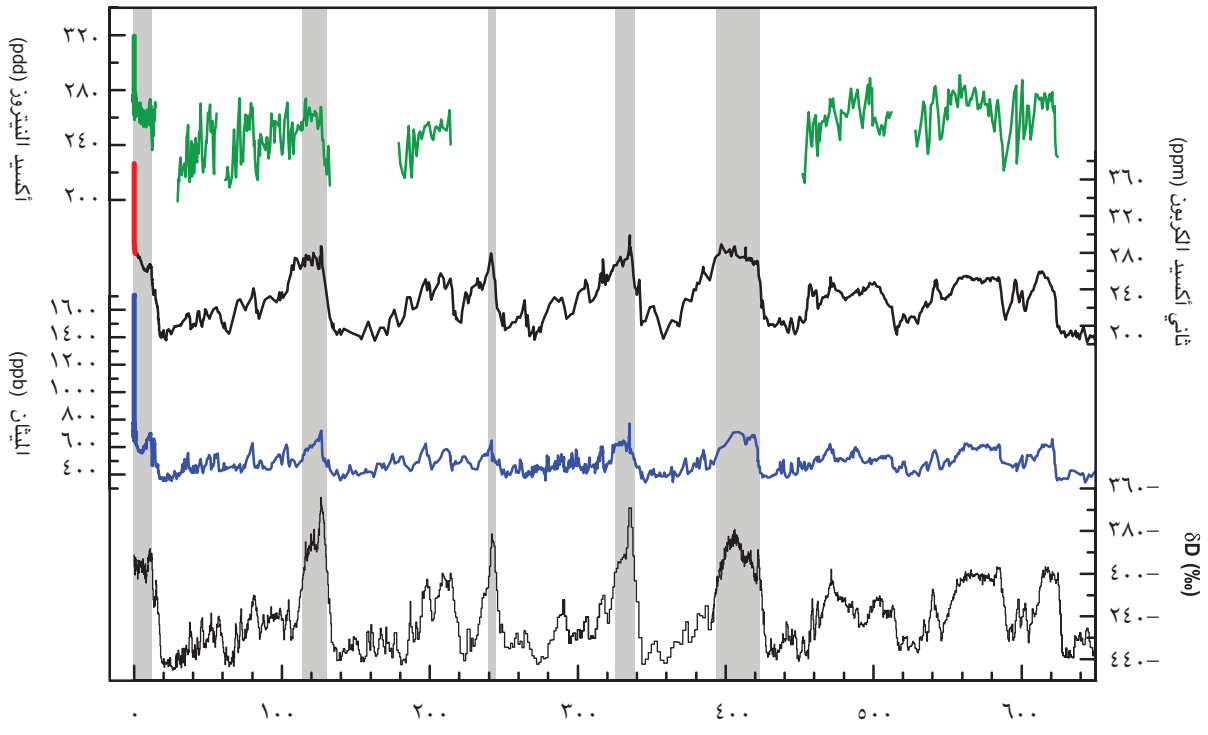
تستقر غازات الدفيئة الطويلة العمر كثاني أكسيد الكربون (CO_2) والميثان (CH_4) وأكسيد النيتروز (N_2O) كيميائياً وتبقى في الغلاف الجوي لفترة زمنية تتراوح بين العقد والقرون أو أكثر، فيكون لإنبعاثها تأثير طويل الأمد على المناخ. بما أن عمر هذه الغازات طويل، فهي تمتزج جيداً في الغلاف الجوي بسرعة أكبر من سرعة إزالتها ويمكن تقدير تركيزاتها العالمية بدقة البيانات في مواقع قليلة. ما من عمر محدد لثاني أكسيد الكربون إذ أنه يدور بإستمرار بين الغلاف الجوي والمحيطات ومحيط الأرض الحيوي وتتضمن إزالته الصافية من الغلاف الجوي مجموعة من العمليات في نطاقات زمنية مختلفة.

إن الغازات القصيرة العمر (على غرار ثاني أكسيد الكبريت وثاني أكسيد الكربون) هي غازات متفاعلة كيميائياً وتزيلها عادةً عمليات الأكسدة الطبيعية في الغلاف الجوي أو تزول عن السطح أو في التهطال، لذلك تختلف تركيزاتها كثيراً. إن الأوزون هو غاز دفيئة هام يتشكل ويدمّر من خلال تفاعلات كيميائية تتضمن أنواعاً أخرى ضمن الغلاف الجوي. في التروبوسفير، يؤدي التأثير البشري على الأوزون أولاً إلى تغيّر في الغازات الأسلاف التي تؤدي إلى إنتاجه، فيما في الستراتوسفير، يؤدي التأثير البشري أولاً إلى تغيّرات في معدّلات إزالة الأوزون بسبب المركبات الكربونية الفلورية الكلورية ومواد أخرى مستنفِدة للأوزون.

٢,١,١ تغيّرات في ثاني أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروز الموجودة في الغلاف الجوي

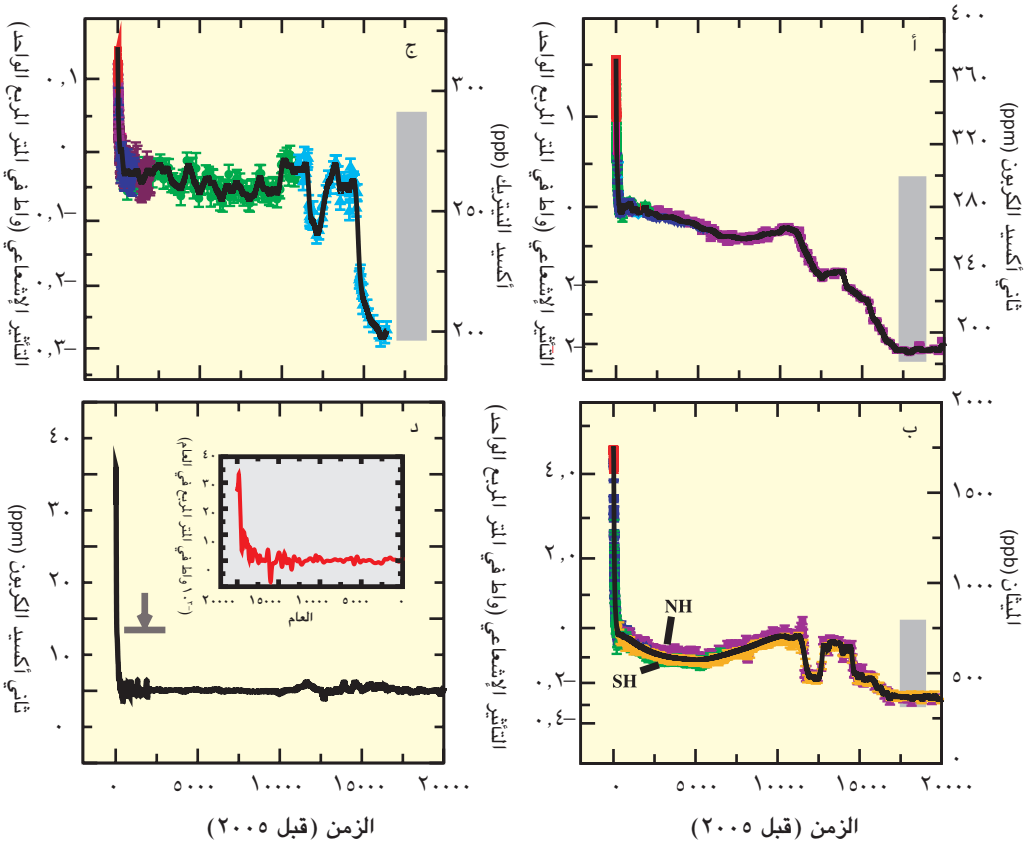
تتخطى التركيزات الحالية لثاني أكسيد الكربون والميثان في الغلاف الجوي كثيراً أرقام المرحلة ما قبل الثورة الصناعية التي حُفظت في سجلّات مستقاة من باطن الجليد القطبي حول تركيبة الغلاف الجوي منذ ٦٥٠٠٠٠ عاماً. تؤكد براهين عديدة أن إزدياد هذه الغازات في المرحلة ما بعد الثورة الصناعية لا يتأتى عن آليات طبيعية (انظر الرسم ١ والرسم ٢). {٢,٣، ٦,٣–٦,٥، الأسئلة ٧,١}

بيانات العيّنة المأخوذة من باطن الجليد القطبي للمراحل الجليدية والمراحل ما بين عصرين جليديين



الرسم ١. التغيّرات في الدوتيريوم في الجليد الأنتاركتيكي وهو الوكيل للحرارة المحلية، وتركيزات غازات الدفيئة في الغلاف الجوي أي ثاني أكسيد الكربون والميثان و أكسيد النتروز في الهواء المحتبس داخل العيّنة الجليدية ومن القياسات الحديثة في الغلاف الجوي. تغطي البيانات ٦٥٠٠٠٠ عاماً وتشير الخطوط المظللة إلى المراحل الدافئة الحالية والسابقة بين عنصرين جليديين. {تم أقلمتها من الرسم ٦,٣}

تغيّرات في غازات الدفيئة الدفيئة المسجلة في بيانات العيّنة الجليدية وفي البيانات الحديثة



الرسم ٢. التركيزات والتأثير الإشعاعي بفعل (أ) ثاني أكسيد الكربون (ب) الميثان (ج) أكسيد النتروز (د) معدّل تغيّر إجمالي تأثيرها الإشعاعي خلال العشرين ألف سنة الماضية من إعادة بناء بيانات الجليد والحبيبات من انتاركتيكا وغرينلاند (الرموز) وقياسات مباشرة في الغلاف الجوي (الخطوط الحمر، اللوح أ، ب، ج). تظهر الخطوط العريضة الرمادية نطاقات التغيّر الطبيعي التي أعيد بناؤها للأعوام ال ٦٥٠٠٠٠ الماضية. تم إحتساب معدّل تغيّر التأثير الإشعاعي (اللوح د، الخط الأسود) من شرائح الخدة لبيانات التركيز. يتراوح عرض نطاق العمر في البيانات الجليدية من ٢٠ عاماً تقريباً في المواقع التي تشهد تراكمات ثلجية عالية على غرار اللو دوم Law Dome وانتاركتيكا حتى حوالي ٢٠٠ سنة في المواقع التي تشهد تراكمات ثلجية متدنيّة على غرار Dome C وأنتاركتيكا يظهر السهم أ وج في معدّل تغيّر التأثير الإشعاعي الناتج إذا ما خففت إشارات ثاني أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النتروز البشرية المنشأ المناسبة للظروف في موقع التراكم المتدني Dome C. ينتج المعدّل السلبي للتغيّر في التأثير حول ١٦٠٠ الظاهر في نتائج اللوح (د) الأعلى وضوحاً من تدنّ في ثاني أكسيد الكربون بمقدار ١٠أجزاء في المليون في سجلّات Law Dome. {رسم ٦,٤}

إن إجمالي التأثير الإشعاعي لمناخ الأرض بسبب الإزدياد في تركيزات غازات الدفيئة الطويلة العمر كثاني أكسيد الكربون (CO_2) والميثان (CH_4) و أكسيد النيتروز، ومعدّل الإزدياد المرجّح جداً في إجمالي التأثير بسبب هذه الغازات منذ العام ١٧٥٠ لا سابق لهما خلال أكثر من ١٠٠٠٠ عاماً (انظر الملخّص الفني، الرسم ٢). ومن المرجّح جداً أن معدّل الإزدياد الدائم في التأثير الإشعاعي المندمج من غازات الدفيئة الذي بلغ +١ واط للمتر المربع الواحد خلال العقود الأربعة الماضية أسرع من أي وقت مضى خلال الألفيتين قبل الثورة الصناعية بست مرات، وهي المرحلة التي عكستها بيانات العيّنة الجليدية الأسطوانية. بلغ التأثير الإشعاعي بسبب غازات الدفيئة الطويلة العمر هذه أعلى مستوى ثقة من أي عامل تأثير آخر. {٢,٣، ٦,٤}

ارتفع تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من ٢٨٠ جزءاً في المليون قبل الثورة الصناعية إلى ٣٧٩ جزءاً في المليون في العام ٢٠٠٥. ارتفع تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بمقدار ٢٠جزءاً في المليون فقط خلال ٨٠٠٠ سنة قبل الثورة الصناعية، تغيّرت بين العقود والقرون بأقل من ١٠ أجزاء في المليون ومن المرجّح أن تكون ناتجة عن العمليات الطبيعية. لكن، منذ العام ١٧٥٠، ارتفع تركيز ثاني أكسيد الكربون بمقدار ١٠٠ جزء في المليون. أما خلال السنوات العشرة الماضية فقد ارتفع تركيز ثاني أكسيد الكربون (معدّل عقد ١٩٩٥–٢٠٠٥: ١,٩ جزءاً في المليون في العام) أكثر مما كان عليه منذ بدأت القياسات المباشرة المستمرة (١٩٦٠–٢٠٠٥: ١,٤جزءاً في المليون في العام). {٢,٣، ٦,٤، ٦,٥}

إن الإرتفاع في ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي منذ العصور ما قبل الثورة الصناعية مسؤول عن تأثير إشعاعي بلغ +١,٦٦ ± ٠,١٧ واط للمتر المربع الواحد، وهي مساهمة تسيطر على جميع عوامل التأثير الإشعاعي الأخرى الواردة في هذا التقرير. خلال العقد ١٩٩٥–٢٠٠٥، أدّى إرتفاع ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى إرتفاع ٢٠٪ في تأثيره الإشعاعي. {٢,٣، ٦,٤، ٦,٥}

إن إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون من إستخدام الوقود الأحفوري، ومن تأثيرات التغيير في إستخدام الأراضي على الكربون في النبات والتربة، هي المصادر الأولية لإزدياد ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. منذ العام ١٧٥٠، من المقدر أن حوالي ٢ / ٣ من إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون البشرية المنشأ كانت نتيجة إحراق الوقود الأحفوري وحوالي ١ / ٣ كانت نتيجة تغيير إستخدام الأراضي. النسبة المتبقية حوالي ٤٥٪ من ثاني أكسيد الكربون هذا في الغلاف الجوي، فيما امتصت المحيطات ٣٠٪ وامتص المحيط الحيوي الأرضي النسبة المتبقية. تتم إزالة حوالي نصف إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي خلال ٣٠ عاماً، ٣٠٪ خلال بضعة قرون و٢٠٪ المتبقية تبقى في الغلاف الجوي لآلاف السنين. {٧,٣}

في العقود الأخيرة، ارتفعت إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون باستمرار (انظر الرسم ٣). إرتفعت إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون[٣] الأحفورية السنوية الإجمالية من معدّل ٦,٤ ± ٠,٤ جيغا طن من الكربون في السنة في التسعينيات[٤] إلى ٧,٢ ± ٠,٣ جيغا طن من الكربون في السنة بين العامين ٢٠٠٠ و٢٠٠٥. بلغت إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بتغيير إستخدام الأراضي خلال التسعينيات معدّل ٠,٥ إلى ٢,٧ جيغا طن من الكربون في العام، بتقدير مركزي بلغ ١,٦ جيغا طن من الكربون في العام. يظهر الجدول ١ مستويات ثاني أكسيد الكربون المقدرة خلال العقود الأخيرة. {٢,٣، ٦,٤، الأسئلة ٧,١}

منذ الثمانينيات، أزالت العمليات الطبيعية لإمتصاص ثاني أكسيد الكربون من محيط الأرض الحيوي (أي الترسب في بالوعة الأرض في الجدول ١) ومن المحيطات حوالي ٥٠٪ من الإنبعاثات البشرية المنشأ (أي إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون الأحفورية وتغيير إستخدام الأراضي في الجدول ١). تتأثر عمليات الإزالة هذه بتركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي وبالتغيّرات المناخية. كان امتصاص المحيطات ومحيط الأرض الحيوي مشابهاً في الكم إلا أن امتصاص محيط الأرض الحيوي كان أكثر تغيّراً وأكثر

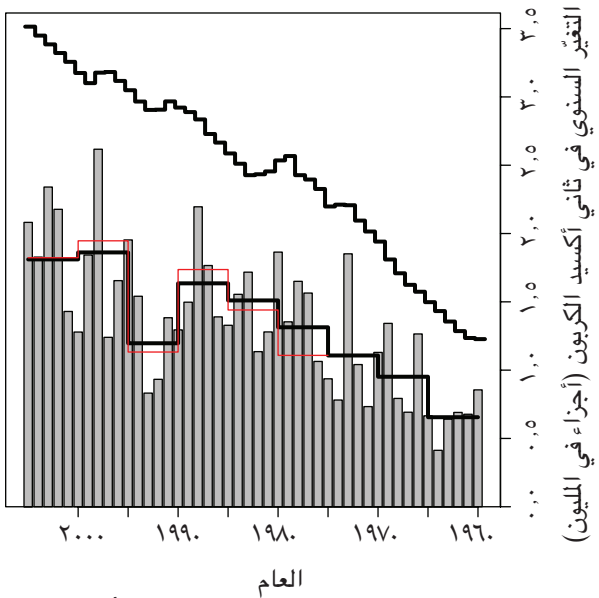
الجدول ١. إجمالي رصيد الكربون. كما هو معروف، إن الأرقام الإيجابية هي تدفقات ثاني أكسيد الكربون (جيغا طن من الكربون في العام الواحد) في الغلاف الجوي، وتمثل الأرقام السلبية الإمتصاص من الغلاف الجوي. تعتمد إنبعاثات ثاني اكسيد الكربون الأحفوري للعامين ٢٠٠٤ و٢٠٠٥ على تقديرات إنتقالية. نظراً لعدد الدراسات المتوفرة المحدود حول صافي التدفقات من الأرض نحو الغلاف الجوي وعناصرها، تُقدَّم نطاقات عدم اليقين على شكل نطاقات ثقة تبلغ ٦٥٪ ولا تتضمن التغيّرات ما بين السنوات. (انظر القسم ٧,٣) تشير NA إلى عدم توفر البيانات.

	الثمانينيات	التسعينيات	٢٠٠٠–٢٠٠٥
الإزدياد في الغلاف الجوي	٣,٣ ± ٠,١	٣,٢ ± ٠,١	٤,١ ± ٠,١
إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون الأحفوري	٥,٤ ± ٠,٣	٦,٤ ± ٠,٤	٧,٢ ± ٠,٣
صافي التدفقات من المحيط نحو الغلاف الجوي	–١,٨ ± ٠,٨	–٢,٢ ± ٠,٤	–٢,٢ ± ٠,٥
صافي التدفقات من الأرض نحو الغلاف الجوي	–٠,٣ ± ٠,٩	–١,٠ ± ٠,٦	–٠,٩ ± ٠,٦
مقسّم كما يلي			
تدفقات في تغيّر إستخدام الأراضي	١,٤ (٠,٤ إلى ٢,٣)	١,٦ (٠,٥ إلى ٢,٧)	NA
بالوعة الترسبات الأرضية	–٢,٦ (–٤,٣ إلى –٠,٩)	–١,٧ (–٣,٤ إلى ٠,٢)	NA

[٣] تتضمن إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون الأحفوري تلك، الناتجة عن إنتاج الوقود الأحفوري وتوزيعه واستهلاكه وإنتاج الإسمنت. يتناسب إنبعاث **1** جيغا طن من الكربون إلى ٣,٦٧ **Gt** من ثاني أكسيد الكربون.

[٤] وفقاً للقسم ٧,٣، تعطى نطاقات عدم اليقين لإنبعاثات التغيّر في إستخدام الأراضي، ولإجمالي رصيد دورة الكربون، على أنها تبلغ نطاقات ٦٥٪.

إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون وإزديادها



الرسم ٣. التغيّرات السنوية في متوسط إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون (الخطوط العريضة الرمادية) ومعدّلاتها على مدى ٥ سنوات من شبكتي قياس مختلفتين (الخطوط الحمراء والسوداء الشبيهة بالدرجات). تدلّ معدّلات الخمس سنوات على إختلالات قصيرة الأمد مرتبطة بأحداث النينيو القوية في ١٩٧٢، و١٩٨٢، و١٩٨٧ و١٩٩٧. يشير الفرق بين الخطوط الحمراء والخطوط السوداء الدُنيا إلى أوجه عدم اليقين في معدّلات الخمس سنوات وتبلغ ٠,١٥ جزءاً في المليون. تظهر الخطوط العليا الشبيهة بالدرجات الإرتفاع السنوي المرجّح إذا ما بقيت جميع إنبعاثات الوقود الأحفوري في الغلاف الجوي ولم تكن هناك أي إنبعاثات أخرى. {الرسم ٧,٤}

نشاطاً في التسعينيات منه في الثمانينيات بحوالي ١ جيغا طن من الكربون في العام. تظهر المشاهدات أن تركيزات ثاني أكسيد الكربون المذوب في المحيطات (pCO_2) ترتفع في معظم المناطق، وذلك مع إرتفاع ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي لكن مع تغييرات إقليمية وزمنية كبيرة. {٧,٣، ٥,٤}

ينتج إمتصاص الكربون وتخزينه في محيط الأرض الحيوي من الفارق الصافي بين الإمتصاص لنمو النبات، والتغيّرات في إعادة التحريج والتنحية، والإنبعاثات الناتجة عن التنفس النباتي، والحصاد وإزالة الغابات والحرائق والضرر بسبب التلوث وعوامل خلل أخرى تؤثر على الكتلة الحيوية والتربة. أثّر الإرتفاع والإنخفاض في وتيرة الحرائق في مناطق مختلفة على صافي إمتصاص الكربون، ويبدو أن الإنبعاثات الناتجة عن حرائق إزدادت خلال العقود الأخيرة في المناطق الشمالية. تظهر تقديرات صافي تقلّبات ثاني أكسيد الكربون على السطح المستقاة من دراسات عكسية تستخدم شبكات من بيانات الغلاف الجوي، معدّلات هامة لإمتصاص الأرض ثاني أكسيد الكربون في منطقة خطوط العرض الوسطى في نصف الكرة الشمالي، وتقلّبات بين الأرض والغلاف الجوي شبه معدومة في المناطق المدارية، ما يشير إلى أن إزالة الغابات المدارية توازنه تقريباً إعادة نموها. {٧,٣}

تتحكم التغيّرات في تدفق ثاني أكسيد الكربون بين الغلاف الجوي ومحيط الأرض الحيوي بشكل أساسي بالتغيّرات القصيرة الأمد (بين السنوات) في إزدياد معدّل ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، مع جزء أصغر لكن هام يرتبط بتغيّر تدفق المحيطات (انظر الملخّص الفني، الرسم ٣). ترتبط التغيّرات في تقلّبات محيط الأرض الحيوي بالتذبذبات المناخية التي تؤثر على امتصاص ثاني أكسيد الكربون في نمو النبات وعودته إلى الغلاف الجوي من خلال إنحلال المواد العضوية في التنفس النباتي والحرائق. إن التذبذب الجنوبي / النينيو هو مصدر أساسي للتغيّر بين السنوات في معدّلات نمو ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، بسبب تأثيره على التقلّبات من خلال درجات حرارة سطح الأرض وسطح المحيطات والتهطال ونشوب الحرائق. {٧,٣}

لا يمكن قياس كمية التأثيرات المباشرة لإزدياد ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي على امتصاص الكربون في الأرض على نطاق واسع في الوقت الحالي بشكل موثوق. يمكن أن تحفز زيادة تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي وترسّب المغذيات (تأثيرات التخصيب) نمو النبات. لكن معظم التجارب والدراسات تظهر أن ردود أفعال شبيهة لا تدوم طويلاً وترتبط عن قرب بتأثيرات أخرى كتوفّر المياه والمغذيات. كما أن التجارب والدراسات حول تأثيرات المناخ (الحرارة والرطوبة) على التنفس النباتي للنفايات والتربة غير أكيدة. ملاحظة: يتم تناول تأثير تغيّر المناخ على إمتصاص الكربون على حدى في القسم ٥,٤. {٧,٣}

بلغ معدّل وفرة الميثان (CH_4) ١٧٧٤ جزءاً في المليار في العام ٢٠٠٥ أي ضعف معدّل المرحلة ما قبل الصناعية. تغيّرت تركيزات الميثان في الغلاف الجوي ببطء بين ٥٨٠ و٧٣٠ جزءاً في المليار خلال العشرة آلاف سنة الماضية، لكنها ارتفعت بحوالي ١٠٠٠ جزء في المليار خلال القرنين الماضيين، ما يمثل أسرع تغيّر في هذا الغاز خلال الثمانين ألف عام الماضية. في أواخر السبعينيات وبداية الثمانينيات، بلغت معدّلات نمو الميثان ١٪ في العام كحد أقصى، لكنها إنخفضت بحدة منذ بداية التسعينيات وأصبحت قريبة من الصفر خلال فترة الست سنوات الممتدة من ١٩٩٩ إلى ٢٠٠٥. تزداد وفرة الميثان عندما تتخطى الإنبعاثات كمية الإزالة. يشير التراجع الأخير في معدّلات الإزدياد أن الإنبعاثات تتطابق اليوم تقريباً مع الإزالة، وهي نتيجة الأكسدة بفعل

شق الهيدروكسيل (OH). منذ تقرير التقييم الثالث، وجدت دراسات جديدة استخدمت عنصرين استشفافيين جديدين (ثلاثي كلورو الإيثان و^{14}CO) أنه ما من تغيّر هام على المدى الطويل في الوفرة العالمية لشق الهيدروكسيل (OH). لذلك، من المرجّح أن يكون التباطؤ في إرتفاع معدّل الميثان في الغلاف الجوي منذ حوالي العام ١٩٩٣ ناتجاً عن إقتراب الغلاف الجوي من التوازن خلال فترة إنبعاثات كاملة شبه مستمرة. {٢,٣، ٧,٤، الأسئلة ٧,١}

ساهم الإزدياد في تركيزات الميثان في الغلاف الجوي منذ مرحلة ما قبل الثورة الصناعية في تأثير إشعاعي بلغ +٠,٤٨ ± ٠,٠٠٥ واط للمتر المربع الواحد. من بين غازات الدفيئة، يعتبر هذا التأثير ثانياً بعد ثاني أكسيد الكربون من ناحية الكم. {٢,٣}

نتجت مستويات الميثان الحالية في الغلاف الجوي من الإنبعاثات البشرية المنشأ للميثان وهي تتخطى الإنبعاثات الطبيعية. يمكن تحديد إجمالي إنبعاثات الميثان انطلاقاً من التركيزات الملحوظة والتقديرات المستقلة لمعدّلات الإزالة. لا تقاس الإنبعاثات من مصادر الميثان الفردية بالدقة ذاتها التي تقاس بها الإنبعاثات الإجمالية، لكنها في معظمها من أصل بيولوجي، وتتضمن الإنبعاثات من الأراضي الرطبة، والحيوانات المجترة، وزراعة الأرز، وإحراق الكتلة الحيوية، بالإضافة إلى مساهمات أصغر من مصادر صناعية تتضمن الإنبعاثات المرتبطة بالوقود الأحفوري. ومن المرجّح جداً أن تشير معرفة مصادر الميثان هذه، بالإضافة إلى المجموعة الطبيعية الصغيرة لتركيزات الميثان خلال الأعوام الـ ٦٥٠٠٠٠ الماضية (انظر الملخّص الفني، الرسم ١) وإزديادها الحاد منذ العام ١٧٥٠ (انظر الملخّص الفني، الرسم ٢) إلى أن التغيّرات الملحوظة على المدى الطويل في الميثان ناتجة عن نشاط بشري المنشأ. {٢,٣، ٦,٤، ٧,٤}

بالإضافة إلى تباطؤ معدّل إزدياد الميثان في الغلاف الجوي خلال الأعوام الخمسة عشر الماضية، أظهر المعدّل تغيّراً هاماً خلال العام الواحد، ولم يتوفر تفسير كامل لذلك. يبدو أن أكبر المساهمات في التغيّر خلال العام الواحد بين العامين ١٩٩٦ و٢٠٠١ هو التغيّر في إنبعاثات الأراضي الرطبة وإحراق الكتلة الحيوية. تشير عدة دراسات إلى أن إنبعاثات الميثان من الأراضي الرطبة حساس جداً تجاه الحرارة ويتأثر بالتغيّرات الهيدرولوجية. تشير تقديرات النماذج المتوفرة جميعها إلى إزدياد في إنبعاثات الأراضي الرطبة نظراً لتغيّر المناخ في المستقبل لكنها تختلف لجهة حجم تأثير الإستجابة الإيجابي هذا. {٧,٤}

بلغ تركيز أكسيد النيتروز ٣١٩ جزءاً في المليار في العام ٢٠٠٥، أي أعلى بمقدار بنسبة ١٨٪ من معدّل المرحلة ما قبل الثورة الصناعية. إزداد أكسيد النيتروز خطياً تقريباً بمقدار ٠,٨ جزءاً في المليار في العام الواحد خلال العقود القليلة الماضية. تظهر بيانات العيّنة الجليدية أن تركيز أكسيد النيتروز في الغلاف الجوي تغيّر بأقل من ١٠ أجزاء في المليار خلال ١١٥٠٠ عاماً قبل بداية المرحلة الصناعية. {٢,٣، ٦,٤، ٧,٤}

يساهم الإزدياد في أكسيد النيتروز منذ المرحلة ما قبل الثورة الصناعية اليوم بتأثير إشعاعي مقداره +٠,١٦ ± ٠,٠٢ واط للمتر المربع الواحد، وهو بشكل أساسي نتيجة النشاطات البشرية، خاصة الزراعة وتغيّر إستخدام الأراضي. تشير التقديرات الحالية إلى أن حوالي ٤٠٪ من إجمالي إنبعاثات أكسيد النيتروز بشرية المنشأ، لكن تقديرات المصادر الفردية تبقى غير أكيدة. {٢,٣، ٧,٤}

٢,١,٣ تغيّرات في هالوكربون الغلاف الجوي وأوزون الستراتوسفير وأوزون التروبوسفير وغازات أخرى

إن المركبات الكربونية الفلورية الكلورية (CFC) والمركبات الكربونية الفلورية الهيدرولوجية (HCFC) هي غازات دفيئة من منشأ بشري بحت، وتستخدم في مجموعة واسعة من التطبيقات. تراجعت إنبعاثات هذه الغازات بسبب حظرها وفقاً لبروتوكول مونتريال، وتتراجع تركيزات CFC-11 وCFC-113 حالياً نتيجة عمليات الإزالة الطبيعية. مددت المشاهدات في عينات الجليد الحبيبي القطبي منذ تقرير التقييم الثالث المعلومات المتوفرة حول التسلسل الزمني لبعض غازات الدفيئة هذه. تؤكد العينات الجليدية والبيانات في الموقع أن المصادر الصناعية هي سبب الإزدياد الملحوظ في المركبات الكربونية الفلورية الكلورية والمركبات الكربونية الفلورية الهيدرولوجية في الغلاف الجوي. {٢,٣}

ساهمت غازات بروتوكول مونتريال في التأثير الإشعاعي المباشر بمقدار +٠,٣٢ ± ٠,٠٣ واط للمتر المربع الواحد في ٢٠٠٥، وما زال غاز CFC-12 عامل التأثير الإشعاعي الطويل الأمد الثالث لجهة الأهمية. تساهم هذه الغازات مجتمعةً بحوالي ١٢٪ من التأثير الإجمالي بسبب غازات الدفيئة الطويلة العمر. {٢,٣}

إن تركيزات الغازات الصناعية مع فليور التي يغطيها بروتوكول كيوتو (مركبات كربونية فلورية هيدروجينة (HFCs)، ومركبات كربونية فلورية مشبعة (PFCs) وسادس فلوريد الكبريت (SF_6)) متدنّية نسبياً لكنها تزداد بسرعة. بلغ

تأثيرها الإشعاعي الإجمالي +٠,٠١٧ واط للمتر المربع في ٢٠٠٥. {٢,٣}

إن أوزون التروبوسفير هو غاز دفيئة عمره قصير تنتجه التفاعلات الكيميائية بين أنواع أسلاف في الغلاف الجوي وبتغيّرات مكانية وزمنية كبيرة. لقد أدّت القياسات المطوّرة ووضع النماذج إلى تطوير فهم الأسلاف الكيميائية التي تؤدي إلى تشكّل الأوزون في التروبوسفير، أي أكسيد الكربون وأكاسيد النيتروجين (من بينها المصادر والتوجهات المرجّحة الطويلة الأمد في البرق) والفورمالديهايد. تنجح النماذج الحالية في وصف الخصائص الأساسية لتوزّع الأوزون الحالي في التروبوسفير وفقاً للعمليات الكامنة. توفّر القياسات الساتلية والقياسات على الموقع الجديدة قيوداً عالمية جديدة لهذه النماذج. إلا أن الثقة ضئيلة في إمكانيتها نسخ التغيّرات في الأوزون المرتبطة بالتغيّرات الهامة في الإنبعاثات أو المناخ، وفي محاكاة التوجهات على المدى الطويل في تركيزات الأوزون خلال القرن العشرين. {٧,٤}

تقدّر مساهمة الأوزون في التروبوسفير في التأثير الإشعاعي قد بلغت +٠,٣٥[+٠,٢٥ إلى +٠,٦٥] واط للمتر المربع الواحد مع مستوى متوسط للفهم العلمي. لم تتغيّر أفضل التقديرات لهذا التأثير الإشعاعي منذ تقرير التقييم الثالث. تشير الملاحظات إلى أن التوجهات في أوزون التروبوسفير خلال العقود الماضية تغيّرت لجهة المؤشر والكم في عدة مواقع، لكن هناك إشارات بتوجه تصاعدي هام على خطوط العرض الإستوائية. إزدادت الدراسات النموذج للتأثير الإشعاعي الناتج عن إزدياد الأوزون في التروبوسفير منذ المراحل ما قبل الصناعية تعقيداً وشمولاً بالمقارنة مع النماذج المستخدمة في تقرير التقييم الثالث. {٢,٣، ٧,٤}

ترتبط التغيّرات في أوزون التروبوسفير بنوعية الهواء وتغيّر المناخ. أظهر عدد من الدراسات أن تركيزات الأوزون خلال النهار في فصل الصيف ترتبط إرتباطاً وثيقاً بالحرارة. يبدو أن هذا الإرتباط يعكس مساهمات إنبعاثات الكربون العضوية المتطايرة من نشوء إحيائي والمرتبطة بالحرارة، والإنحلال الحراري للبيروكسي أسيتيل نيترات وهو مخزن لأكاسيد النيتروجين، والعلاقة بين الحرارة العالية والركود الإقليمي. كانت الظروف المناخية الحارة والراكدة بشكل غير طبيعي خلال صيف ١٩٩٨ مسؤولة عن أعلى معدّل أوزون على سطح الأرض في السنة في شمال شرق الولايات المتحدة الأميركية. إرتبطت موجة الحر في أوروبا صيف ٢٠٠٣ بمعدّل أوزون مرتفع إستثنائياً على سطح الأرض. {الإطار ٧,٤}

تؤدي الغازات المذكورة في بروتوكول مونتريال إلى التأثير الإشعاعي الناتج عن تدمير أوزون الستراتوسفير وأعيد تقييمه بمقدار – ٠,٠٥ ± ٠,١٠ واط للمتر المربع الواحد، أي أقل مما ورد في تقرير التقييم الثالث، بمستوى متوسط من الفهم العلمي. لم يعد الإتجاه إلى تدمير متزايد لأوزون الستراتوسفير سائداً اليوم كما في الثمانينيات والتسعينيات. لكن إجمالي أوزون الستراتوسفير ما زال دون ٤٪ من أرقام ما قبل الثمانينيات ومن غير الواضح ما إذا بدأت إعادة تشكيل الأوزون. إضافة إلى التدمير الكيميائي للأوزون، قد تكون التغيّرات الدينامية قد ساهمت في تخفيض الأوزون في الخطوط العريضة المتوسطة في النصف الشمالي من الأرض. {٢,٣}

تساهم إنبعاثات بخار المياه المباشرة الناتجة عن النشاطات البشرية مساهمة ضئيلة في التأثير الإشعاعي. لكن، يزداد معدّل الحرارة العالمية، فتزداد تركيزات بخار المياه وهذا ما يمثل إستجابة أساسية، لكن ليس عاملاً مؤثراً على التغيّر المناخي. إن إنبعاث الماء مباشرة في الغلاف الجوي بفعل النشاطات البشرية المنشأ، لا سيما الريّ، هو عامل مؤثر مرجّح لكن لا يشكّل إلا أقل من ١٪ من المصادر الطبيعية لبخار المياه في الغلاف الجوي. كما أن إنبعاث بخار المياه المباشر في الغلاف الجوي من إحراق الوقود الأحفوري أقل بكثير من الإنبعاث الناتج من النشاط الزراعي. {٢,٥}

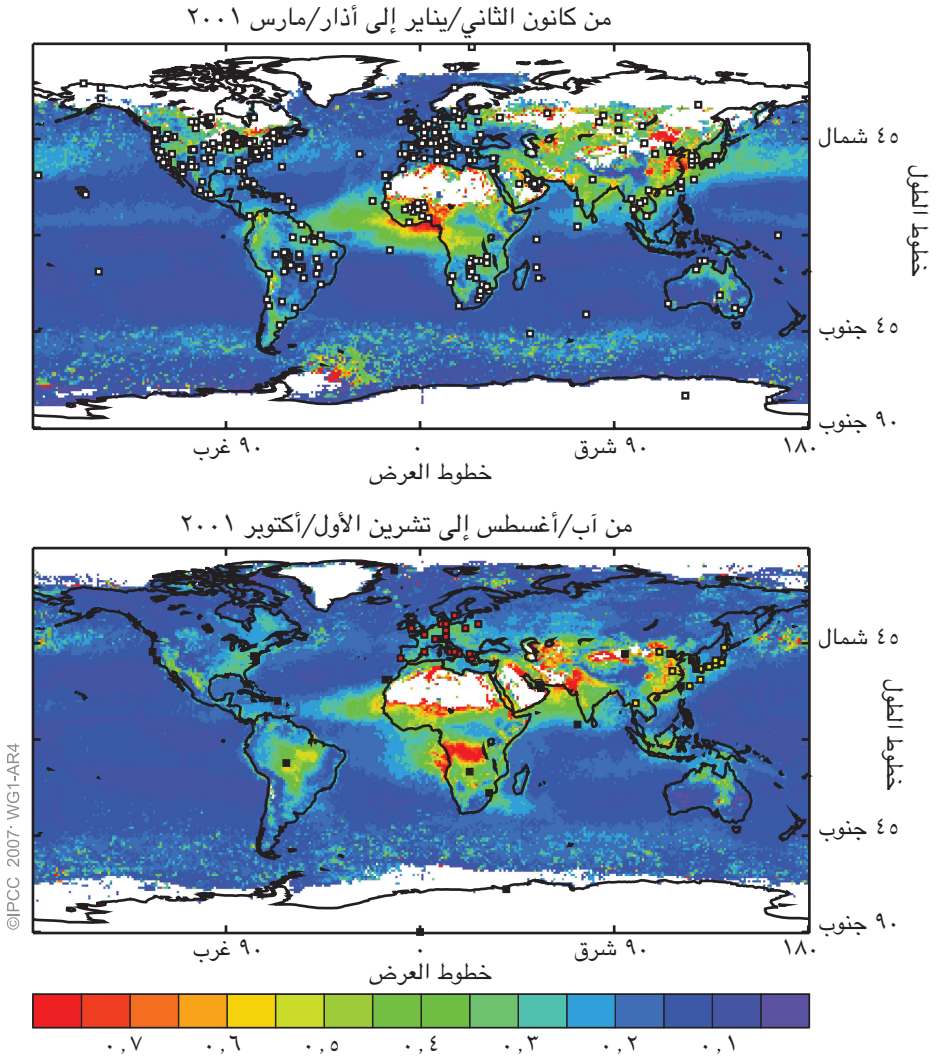
بناءً على دراسات نماذج التنقل الكيميائي، قُدّر التأثير الإشعاعي الناتج عن إزدياد بخار المياه في الستراتوسفير بسبب أكسدة الميثان +٠,٠٧ ± ٠,٠٥ واط للمتر المربع الواحد . إن مستوى الفهم العلمي متدنٍّ إذ أن مساهمة الميثان في الهيكلية العمودية الملائمة لتغيّر بخار المياه قرب التروبوبوز غير مؤكد. كما لا يزال فهم الأسباب البشرية الأخرى لإزدياد بخار المياه في الستراتوسفير الذي قد يساهم في التأثير الإشعاعي غير مكتملاً. {٢,٣}

٢,٢ الأهباء الجوية

يقاس اليوم تأثير الهباء الجوي الإشعاعي المباشر أفضل من ذي قبل، ما يشكّل تقدماً هاماً في الفهم منذ تقرير التقييم الثالث، حيث كان لعدة عناصر مستوى متدنٍّ جداً من الفهم العلمي. يمكن اليوم إعطاء إجمالي قيمة التأثير الإشعاعي المباشر للأهباء الجوية على جميع أنواعه للمرة الأولى –٠,٥ ± ٠,٤ واط للمتر المربع الواحد، مع مستوى متوسط– متدنٍّ من الفهم العلمي. لقد تحسنت نماذج الغلاف الجوي، ويحوي العديد منها جميع عناصر الأهباء الجوية الهامة. إن ما بين أنواع الأهباء الجوية عدة إختلافات على

مستوى خصائصها التي تؤثر على امتصاصها الإشعاع أو تبديدها إياه. لذلك، يمكن أن يكون لأنواع الهباء الجوي المختلفة تأثير تدفئة أو تبريد. يمكن ملاحظة الأهباء الصناعي الذي يتألف من مزيج من الكبريتات والكربون العضوي والأسود والنيترات والغبار الصناعي فوق عدة مناطق قارية في النصف الشمالي من الكرة الأرضية. أصبح اليوم ممكناً التأكد من محاكاة نماذج الهباء الجوي في العالم بفضل القياسات المطورة على المواقع وقياسات الأقمار الصناعية وتلك المعتمدة على السطح (انظر الملخّص الفني، الرسم ٤). تسمح هذه التحسينات بقياس إجمالي تأثير الأهباء الإشعاعي المباشر للمرة الأولى، وهو تقدّم هام منذ تقرير التقييم الثالث. يبقى التأثير الإشعاعي المباشر للأنواع الفردية أقل توكيداً ومن المقدر من النماذج أن يبلغ – ٠,٤ ± ٠,٢ واط للمتر المربع الواحد للكبريتات، – ٠,٠٥ ± ٠,٠٥ واط للمتر المربع الواحد للكربون العضوي من الوقود الأحفوري، + ٠,٢ ± ٠,١٥ واط للمتر المربع الواحد لكربون الوقود الأحفوري الأسود، + ٠,٠٣ ± ٠,١٢ واط للمتر المربع الواحد لإحراق الكتلة الحيوية، – ٠,١ ± ٠,١ واط للمتر المربع الواحد للنترات، و – ٠,١ ± ٠,٢ واط للمتر المربع الواحد للغبار المعدني. تؤكد دراستان حديثتان تتناولان حصيلة الإنبعاثات على بيانات العيّنات الجليدية وتشيران إلى أن إنبعاثات

إجمالي العمق البصري للأهباء



الرسم ٤. (أعلى) إجمالي العمق البشري للأهباء الجوية (بسبب الأهباء الطبيعية والبشرية المنشأ) على طول موجة شبه منظورة تحدده قياسات الأقمار الصناعية من كانون الأول / يناير إلى أذار / مارس ٢٠٠١ و(أدناه) من آب / أغسطس إلى تشرين الأول / أكتوبر، تعبيراً عن التغيّرات الموسمية في الأهباء الصناعية وتلك الناتجة عن إحراق الكتلة الإحيائية. إن البيانات مستقاة من قياسات الأقمار الصناعية، بالإضافة إلى نوعين من القياسات من الأرض في مواقع ظاهرة في الرسمين. (انظر القسم ٢,٤,٢ للتفاصيل) {الرسم ٢,١١}

الكبريتات البشرية المنشأ في العالم تراجعت بين العامين ١٩٨٠ و٢٠٠٠ وأن التوزيع الجغرافي لتأثير الكبريتات قد تغيّر أيضاً. {٢,٤، ٦,٦}

حدثت تغيّرات هامة في تقديرات التأثير الإشعاعي المباشر الناتج عن إحراق الكتلة الحيوية، والنترات، وأهباء الغبار المعدني منذ تقرير التقييم الثالث. في ما يخص أهباء الجوية إحراق الكتلة الحيوية، يخضع التأثير الإشعاعي المباشر المقدّر للمراجعة بعدما كان سلبياً وأصبح اليوم قريباً من الصفر، إذ أن التقدير خاضع لتأثير وجود الأهباء الجوية فوق السحاب. للمرة الأولى، يعطى التأثير الإشعاعي الناتج عن أهباء النيترات. في ما يخص الغبار المعدني، إنخفض نطاق التأثير الإشعاعي المباشر بسبب تخفيض في تقدير النسبة البشرية المنشأ. {٢,٤}

تؤدي تأثيرات الهباء الجوي البشري المنشأ على سحاب الماء إلى تأثير بياض السحاب غير المباشر (الذي سُمّي بالتأثير غير المباشر الأول في تقرير التقييم الثالث)، وللمرة الأولى أُعطي أفضل تقدير وهو–٠,٧ [من –٠,٣ إلى –١,٨] واط للمتر المربع الواحد. إزداد عدد التقديرات النموذجية العالمية لتأثير البياض في سحاب الماء السائل بشكل كبير منذ تقرير التقييم الثالث، وتم تقييم التقديرات بدقة أكبر. يتأتى تقدير التأثير الإشعاعي هذا من عدة دراسات نموذجية تتضمن عدداً أكبر من أنواع الهباء وتصف عمليات التفاعل ما بين الهباء والسحاب بتفاصيل أكثر. إن الدراسات النموذجية التي تتضمن أنواع هباء الجوي إضافية أو التي تقيّدها مشاهدات الأقمار الصناعية تجد تأثير بياض السحاب أضعف نسبياً. على الرغم من التطورات والتقدّم منذ تقرير التقييم الثالث والإنخفاض في إنتشار تقدير التأثير الإشعاعي، تبقى عدة أوجه عدم يقين كبيرة في قياسات العينات ووضع نماذجها، ما يؤدي إلى مستوى متدنٍّ من الفهم العلمي، وهو تقدّم بعدما كان المستوى متدنٍّ جداً في تقرير التقييم الثالث. {٢,٤، ٧,٥، ٩,٢}

من التأثيرات الأخرى للهباء الجوي، تأثير عمر السحاب وتأثير شبه مباشر وتفاعلات ما بين الهباء الجوي والسحب الجليدية. تعتبر هذه جزءاً من إستجابة المناخ وليس تأثيرات إشعاعية. {٢,٤، ٧,٥}

٢,٣ دخان الطائرات والسحب البيضاء الذوابات وإستخدام الأراضي وتأثيرات أخرى

تساهم خطوط الدخان الأبيض المستمرة الناتجة عن الطيران بتأثير إشعاعي ضئيل يبلغ [+ ٠,٠١ +٠,٠٠٣ إلى +٠,٠٣] واط في المتر المربع مع مستوى متدنٍّ من الفهم العلمي. إن هذا التقدير أدنى من التقدير الوارد في تقرير التقييم الثالث. ينتج هذا الفرق عن مشاهدات جديدة لغطاء الدخان الأبيض وتقديرات محدودة للعمق البصري للدخان. لا تتوفر تقديرات أفضل لصافي التأثير من الدخان المنتشر. تبقى آثاره على السحاب الأبيض الذوابة وإجمالي تأثير هباء الطيران على السحاب في الخلفية غير معروفة. {٢,٦}

لقد أدّت التغيّرات البشرية في غطاء اليابسة إلى زيادة إجمالي الهباء الجوي على سطح الأرض، ما أدّى إلى تأثير إشعاعي بلغ –٠,٢ ± ٠,٢ وط في المتر المربع الواحد، وهو الرقم ذاته الذي ورد في تقرير التقييم الثالث، مع معدّل متوسط– متدنٍّ من الفهم العلمي. تؤدي أهباء الكربون الأسود على الثلج إلى إخفاض بياض السطح ومن المقدّر أنها تؤدي إلى تأثير إشعاعي بمقدار +٠,١ ± ٠,١ واط في المتر المربع الواحد، مع مستوى متدنٍّ من الفهم العلمي. منذ تقرير التقييم الثالث، وضعت عدة تقديرات حول التأثير الناجم عن إستخدام الأراضي، بواسطة تقنيات أفضل نوعية، وإقصاء الإستجابات في التقييم ودمج تحسيني للمشاهدات على النطاق الواسع. من بين أوجه عدم اليقين في التقديرات، وضع الخرائط وتحديد خصائص النبات في عصرنا الحالي وفي الماضي، ووضع معايير عمليات إشعاع السطح وتحيّزها في متغيّرات النماذج المناخية. يؤدي وجود جزئيات الغبار في الثلج إلى تدنٍّ في بياضها وإلى تأثير إشعاعي، وقد يؤثر على ذوبان الثلج. تبقى أوجه عدم اليقين عديدة لجهة إنخراط الغبار في الثلج والخصائص البصرية الناتجة عنه. {٢,٥}

من المتوقع أن تكون تأثيرات تغيّر إستخدام الأراضي على المناخ هاماً محلياً في بعض المناطق، لكنها تبقى متدنيّة على المستوى العالمي مقارنة بإحترار غازات الدفيئة. تؤثر التغيّرات فوق سطح الأرض (النبات، التربة، المياه) الناتجة عن الأنشطة البشرية على المناخ المحلي من خلال التغيّرات في الإشعاع، وفي السحاب وخشونة السطح ودرجات حرارة السطح. كما يمكن أن يكون للتغيّرات في الغطاء النباتي أثراً هاماً على طاقة السطح وتوازن المياه على النطاق الإقليمي. تشمل هذه التأثيرات العمليات غير الإشعاعية (أي أنه لا يمكن قياسها بالتأثير الإشعاعي) ولها مستوى متدنٍّ جداً من الفهم العلمي. {٢,٥، ٧,٢، ٩,٣، الإطار ١١,٤}

يمكن أن يكون إنبعاث الحرارة عن إنتاج الطاقة البشري المنشأ هاماً فوق المناطق الحضرية لكنه لا يعتبر هاماً على المستوى العالمي. {٢,٥}

٢,٤ التأثير الإشعاعي الناتج عن النشاط الشمسي والثورات البركانية

تغطي المراقبة المستمرة لإجمالي الإشعاع الشمسي الأعوام الـ ٢٨ الماضية. تظهر البيانات دورة إشعاع ثابتة تدوم ١١ سنة وتتغيّر بمعدّل ٠,٠٨٪ من أدنى الدورة الشمسية إلى أقصاها، مع غياب إتجاه هام على المدى الطويل. لقد قاست البيانات الجديدة بدقة أكبر التغيّرات في تقلّبات الإشعاعات الشمسية على نطاق واسع من طول الموجات المرتبطة بالنشاط الشمسي المتغيّر. وساهمت أيضاً المعايير المحسَّنة التي تستخدم قياسات متداخلة عالية النوعية في تحسين الفهم. يشير الفهم الحالي لفيزياء الشمس ومصادر تغيّر الإشعاع المعروفة إلى مستويات إشعاع قابلة للمقارنة خلال الدورتين الشمسيتين الماضيتين، ومن بينها مستويات دُنيا. إن السبب الأول المعروف لتغيّر الإشعاع الحديث هو وجود بقع شمسية (ميزات مضغوطة وداكنة حيث يدمر الإشعاع محلياً) و صياخد الشمس (ميزات عريضة وفاتحة حيث يتعزز الإشعاع محلياً) على القرص الشمسي. {٢,٧}

بلغ التأثير الإشعاعي المباشر الناتج عن التغيّر في الواردات الشمسية منذ العام ١٧٥٠، +٠,١٢[+٠,٠٦ إلى +٠,٣] واط للمتر المربع الواحد، أي أقل من نصف التقدير الوارد في تقرير التقييم الثالث، مع مستوى متدنٍّ من الفهم العلمي. يعود هذا التراجع في تقدير التأثير الإشعاعي إلى إعادة تقييم التغيّر الطويل الأمد في الإشعاع الشمسي منذ العام ١٦١٠ (the Maunder Minimum) بناءً على: إعادة بناء جديدة تستخدم نموذج تغيّرات في التقلّبات المغناطيسية الشمسية لا يتضمن الجهات الوكيلة الساتلية أو الجيومغنطيسية أو المولودة في الفلك، فهم محسّن للتغيّرات الشمسية الحديثة وعلاقتها بالعمليات الفيزيائية، وإعادة تقييم تغيّرات النجوم الشبيهة بالشمس. يؤدي هذا إلى إرتفاع في مستوى الفهم العلمي من «متدنٍّ جداً» في تقرير التقييم الثالث إلى «متدنٍّ» في هذا التقييم، إذ تبقى نقاط عدم اليقين كثيرة بسبب النقص في المشاهدات المباشرة، والفهم غير المكتمل لآليات التغيّر الشمسي على فترات زمنية طويلة. {٢,٧، ٦,٦}

تم الإفادة عن ارتباطات واقعية بين أيونات الإشعاع الفلكي بسبب الشمس في الغلاف الجوي ومعدّل عالمي متدنٍّ من غطاء السحاب، لكن البراهين حول تأثير شمسي نظامي غير مباشر لا تزال غير واضحة. لقد وردت الفكرة القائلة بأن الإشعاعات الفلكية المجرية التي تحمل طاقة كافية للوصول إلى التروبوسفير قد تغيّر عدد النوات في تركيز السحاب وبالتالي خصائص السحاب الميكروفيزيائية (عدد القطيران وتركيزها)، ما يؤدي إلى تغيّرات في عمليات السحب مشابهة بتأثير البياض غير المباشر للأهباء في التروبوسفير، وبالتالي يؤدي إلى تأثير شمسي غير مباشر في المناخ. أظهرت الدراسات علاقات مختلفة مع السحب في بعض المناطق أو من خلال إستخدام أنواع سحاب محدودة أو نطاقات زمنية محدودة، لكن السلسلة الزمنية للإشعاعات الفلكية لا يبدو أنها تناسب إجمالي غطاء السحاب بعد العام ١٩٩١ أو إجمالي غطاء السحاب المتدني المستوى بعد ١٩٩٤. تكون إذاً الروابط بين التغيّرات بفعل الأشعة المجرية الفلكية في الهباء الجوي وتشكيل السحاب مثيرة للجدل بالإضافة إلى الإفتقار إلى آلية فيزيائية مبرهنة ومصداقية عوامل سببية أخرى تؤثر على التغيّرات في غطاء السحاب. {٢,٧}

تزيد الثورات البركانية المتفجرة كثيراً تركيز الهباء الجوي الكبريتي في الستراتوسفير. يمكن إذاً أن تؤدي ثورة واحدة إلى تبريد إجمالي المناخ العالمي لبضعة سنوات. تخلّ الأهباء البركانية برصيد الستراتوسفير وبرصيد السطح / التروبوسفير من الطاقة الإشعاعية كما تخلّ بالمناخ بشكل عابر، وتتضح أحداث بركانية ماضية في مشاهدات العينات الجليدية للكبريتات بالإضافة إلى سجلّات درجة الحرارة. لم تحدث أي ثورات بركانية متفجرة قادرة على بعث مواد هامة في الغلاف الجوي منذ ثورة جبل بيناتوبو في العام ١٩٩١. إلا أن إحتمال حدوث ثورات بركانية أكبر من ثورة جبل بيتانوبو في العام ١٩٩١ تبقى واردة، وقد تؤدي إلى تأثير إشعاعي أهم وتبريد على المدى الأطول للنظام المناخي. {٢,٧، ٦,٤، ٦,٦، ٩,٢}

٢,٥ إجمالي التأثير الإشعاعي الصافي، إحتمالات الإحترار العالمي وأنماط التأثير

لقد تحسّن فهم الإحترار البشري المنشأ وتأثيرات التبريد على المناخ منذ تقرير التقييم الثالث، ما يؤدي إلى ثقة عالية جداً بأن للنشاطات البشرية منذ العام ١٧٥٠ تأثيراً إيجابياً صافياً بمقدار + ١,٦ [+٠,٦ إلى +٢,٤] واط في المتر المربع الواحد.

بفضل الفهم المحسَّن والقياس الأفضل لآليات التأثير منذ تقرير التقييم الثالث، بات ممكناً إستنتاج تأثير إشعاعي صافي ممتزج للمرة الأولى. يؤدي مزج أرقام العناصر الخاصة بكل عامل تأثير وأوجه عدم يقين إلى توزّع إحتمالات تقديرات التأثير الإشعاعي البشرية المنشأ الواضحة في الرسم ٥، وتكون القيمة الأكثر إحتمالاً أكبر بدرجة واحدة

معدّل التأثيرات الإشعاعية العالمية

أ)

عناصر التأثير الإشعاعي		قيم التأثير الإشعاعي (واط للمتر المربّع الواحد)	نطاق خاص	المستوى المقيَّم للفهم العلمي
غازات دفيئة طويلة العمر		١,٦٦ [١,٤٩ إلى ١,٨٣]	عالمي	عالٍ
		٠,٤٨ [٠,٤٣ إلى ٠,٥٣]	عالمي	عالٍ
		٠,١٦ [٠,١٤ إلى ٠,١٨]		
		٠,٣٤ [٠,٣١ إلى ٠,٣٧]		
الأوزون		−٠,٠٥ [−٠,١٥ إلى ٠,٠٥]	قاري إلى عالمي	متوسط
		٠,٣٥ [٠,٢٥ إلى ٠,٦٥]		
بخار مائي ستراتوسفيري CH_4		٠,٠٧ [٠,٠٢ إلى ٠,١٢]	عالمي	متدنٍ
بياض سطحي		−٠,٢ [−٠,٩ إلى −٠,١]	محلي إلى قاري	متوسط إلى متدنٍ
		٠,١ [٠,٠ إلى ٠,٢]		
إجمالي الأهباء الجوية	التأثير المباشر	−٠,٥ [−٠,٩ إلى −٠,١]	قاري إلى عالمي	متوسط إلى متدنٍ
	تأثير بياض السحب	−٠,٧ [−١,٨ إلى −٠,٣]	قاري إلى عالمي	متدنٍ
معوقات خطية		٠,٠١ [٠,٠٠٣ إلى ٠,٠٣]	قاري	متدنٍ
الإشعاع الشمسي		٠,١٢ [٠,٠٦ إلى ٠,٣٠]	عالمي	متدنٍ
صافي تأثير النشاط البشري		١,٦ [٠,٦ إلى ٢,٤]		

من صنع الإنسان

طبيعي

ثاني أكسيد الكربون (CO_2)

أكسيد النيتروز (N_2O)

كربون هالوجيني

ميثان (CH_4)

ستراتوسفيري

تروبوسفيري

إستخدام الأرض

الكربون الأسود على الثلج

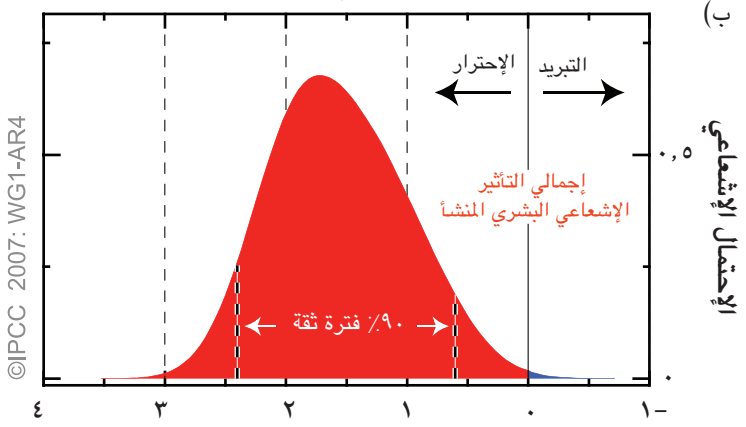
٢ ١ ٠ −١ −٢

التأثير الإشعاعي (واط للمتر المربّع الواحد)

©IPCC 2007: WG1-AR4

توزيع الإحتمالات

ب)



التأثير الإشعاعي (واط للمتر المربّع الواحد)

الرسم ٥. (أ) متوسط التأثير الإشعاعي العالمي ونطاقات الثقة التي بلغت ٩٠٪ في العام ٢٠٠٥ لعدة عوامل وآليات، تحدد الأعمدة إلى اليمين أفضل التقديرات ونطاقات الثقة (أرقام التأثير الإشعاعي)، الإمتداد الجغرافي المثالي للتأثير (النطاق المكاني)، ومستوى الفهم العلمي ما يشير إلى مستوى الثقة العلمي، كما ورد في القسم ٢,٩. تم مزج الأخطاء للميثان وأكسيد النتروز والهالوكاربون، كما يظهر صافي التأثير الإشعاعي البشري المنشأ. لا يمكن الحصول على أفضل التقديرات ونطاقات عدم اليقين من خلال إضافة الشروط الفردية بسبب عدم تناسق نطاقات عدم اليقين الخاصة ببعض العوامل، تم الحصول على الأرقام الواردة هنا من تقنية مونت كارلو كما ورد في القسم ٢,٩. تعتبر عوامل التأثير غير المذكورة هنا ذات مستوى متدنٍ جداً من الفهم العلمي. تساهم الأهباء البركانية في نوع إضافي من التأثير الإشعاعي لكنها غير مذكورة بسبب طبيعتها العرضية. لا يتضمن نطاق دخان الطيران الأبيض تأثيرات الطيران الأخرى على السحاب. (ب) توزيع الإحتمالات للتأثير الإشعاعي العام الكليّ من جميع العوامل البشرية المنشأ الواردة في (أ). يتم إحتساب التوزيع بجمع أفضل التقديرات وأوجه عدم اليقين في كل عنصر. يزداد إمتداد التوزيع بسبب شروط التأثير السلبية، ولها أوجه عدم يقين أكثر من الشروط الإيجابية. {٢,٩١، ٢,٩,٢، الرسم ٢,٢٠}

التسمية الصناعية أو الإسم المعروف (سنوات)	التركيبة الكيميائية	الحياة (السنوات)	الفاعلية الإشعاعية (W m^{-2} ppb^{-1})	‡SAR (100-yr)	إحتمال الإحترار العالمي للفترة المحددة		
					٢٠ سنة	١٠٠ سنة	٥٠٠ سنة
ثاني أكسيد الكربون	CO_2	أنظر أدناه[أ]	١,٤×١٠$^{-٥}$ [ب]	١	١	١	١
الميثان	CH_4	١٢[ج]	٣,٧×١٠$^{-٤}$	٢١	٧٢	٢٥	٧,٦
أكسيد النتروز	N_2O	١١٤	٣,٠٣×١٠$^{-٣}$	٣١٠	٢٨٩	٢٨٩	١٥٣
المواد الخاضعة لبروتوكول مونتريال							
CFC-11	CCl3F	٤٥	٠,٢٥	٣,٨٠٠	٦,٧٥٠	٤,٧٥٠	١,٦٢٠
CFC-12	CCl2F2	١٠٠	٠,٣٢	٨,١٠٠	١١,٠٠٠	١٠,٩٠٠	٥,٢٠٠
CFC-13	CClF3	٦٤٠	٠,٢٥		١٠,٨٠٠	١٤,٤٠٠	١٦,٤٠٠
CFC-113	CCl2FCClF2	٨٥	٠,٣	٤,٨٠٠	٦,٥٤٠	٦,١٣٠	٢,٧٠٠
CFC-114	CClF2CClF2	٣٠٠	٠,٣١		٨,٠٤٠	١٠,٠٠٠	٨,٧٣٠
CFC-115	CClF2CF3	١,٧٠٠	٠,١٨		٥,٣١٠	٧,٣٧٠	٩,٩٩٠
١٣٠١ هالون	CBrF$_3$	٦٥	٠,٣٢	٥,٤٠٠	٨,٤٨٠	٧,١٤٠	٢,٧٦٠
١٢١١ هالون	CBrClF2	١٦	٠,٣		٤,٧٥٠	١,٨٩٠	٥٧٥
٢٤٠٢ هالون	CBrF2CBrF2	٢٠	٠,٣٣		٣,٦٨٠	١,٦٤٠	٥٠٣
رباعي كلوريد الكربون	CCl4	٢٦	٠,١٣	١,٤٠٠	٢,٧٠٠	١,٤٠٠	٤٣٥
بروميد الميثيل	CH3Br	٠,٧	٠,٠١		١٧	٥	١
ثلاثي كلورو الإيثان	CH3CCl3	٥	٠,٠٦		٥٠٦	١٤٦	٤٥
HCFC-22	CHClF2	١٢	٠,٢	١,٥٠٠	٥,١٦٠	١,٨١٠	٥٤٩
HCFC-123	CHCl2CF3	١,٣	٠,١٤	٩٠	٢٧٣	٧٧	٢٤
HCFC-124	CHClFCF3	٥,٨	٠,٢٢	٤٧٠	٢,٠٧٠	٦٠٩	١٨٥
HCFC-141b	CH3CCl2F	٩,٣	٠,١٤		٢,٢٥٠	٧٢٥	٢٢٠
HCFC-142b	CH3CClF2	١٧,٩	٠,٢	١,٨٠٠	٥,٤٩٠	٢,٣١٠	٧٠٥
HCFC-225ca	CHCl2CF2CF3	١,٩	٠,٢		٤٢٩	١٢٢	٣٧
HCFC-225cb	CHClFCF2CClF2	٥,٨	٠,٣٢		٢,٠٣٠	٥٩٥	١٨١
هيدرو فلورو كربون							
HFC-23	CHF3	٢٧٠	٠,١٩	١١,٧٠٠	١٢,٠٠٠	١٤,٨٠٠	١٢,٢٠٠
HFC-32	CH2F2	٤,٩	٠,١١	٦٥٠	٢,٣٣٠	٦٧٥	٢٠٥
HFC-125	CHF2CF3	٢٩	٠,٢٣	٢,٨٠٠	٦,٣٥٠	٣,٥٠٠	١,١٠٠
HFC-134a	CH2FCF3	١٤	٠,١٦	١,٣٠٠	٣,٨٣٠	١,٤٣٠	٤٣٥
HFC-143a	CH3CF3	٥٢	٠,١٣	٣,٨٠٠	٥,٨٩٠	٤,٤٧٠	١,٥٩٠
HFC-152a	CH3CHF2	١,٤	٠,٠٩	١٤٠	٤٣٧	١٢٤	٣٨
HFC-227ea	CF3CHFCF3	٣٤,٢	٠,٢٦	٢,٩٠٠	٥,٣١٠	٣,٢٢٠	١,٠٤٠
HFC-236fa	CF3CH2CF3	٢٤٠	٠,٢٨	٦,٣٠٠	٨,١٠٠	٩,٨١٠	٧,٦٦٠
HFC-245fa	CHF2CH2CF3	٧,٦	٠,٢٨		٣,٣٨٠	١,٠٣٠	٣١٤
HFC-365mfc	CH3CF2CH2CF3	٨,٦	٠,٢١		٢,٥٢٠	٧٩٤	٢٤١
HFC-43-10-mee	CF3CHFCHFCF2CF3	١٥,٩	٠,٤	١,٣٠٠	٤,١٤٠	١,٦٤٠	٥٠٠
المكونات المشبعة بالفلور							
Sulphur hexafluoride	SF$_6$	٣,٢٠٠	٠,٥٢	٢٣,٩٠٠	١٦,٣٠٠	٢٢,٨٠٠	٣٢,٦٠٠
Nitrogen trifluoride	NF$_3$	٧٤٠	٠,٢١		١٢,٣٠٠	١٧,٢٠٠	٢٠,٧٠٠
PFC-14	CF$_4$	٥٠,٠٠٠	٠,١٠	٦,٥٠٠	٥,٢١٠	٧,٣٩٠	١١,٢٠٠
PFC-116	C$_2$F$_6$	١٠,٠٠٠	٠,٢٦	٩,٢٠٠	٨,٦٣٠	١٢,٢٠٠	١٨,٢٠٠

التسمية الصناعية أو الإسم المعروف (سنوات)	التركيبة الكيميائية	الحياة (السنوات)	الفاعلية الإشعاعية ($W\ m^{-2}\ ppb^{-1}$)	إحتمال الإحترار العالمي للفترة المحددة			
				‡SAR (100-yr)	٢٠ سنة	١٠٠ سنة	٥٠٠ سنة
المكونات المشبعة بالفلور (يتبع)							
PFC-218	C_3F_8	٢،٦٠٠	٠,٢٦	٧،٠٠٠	٦،٣١٠	٨،٨٣٠	١٢،٥٠٠
PFC-318	c-C_4F_8	٣،٢٠٠	٠,٣٢	٨،٧٠٠	٧،٣١٠	١٠،٣٠٠	١٤،٧٠٠
PFC-3-1-10	C_4F_{10}	٢،٦٠٠	٠,٣٣	٧،٠٠٠	٦،٣٣٠	٨،٨٦٠	١٢،٥٠٠
PFC-4-1-12	C_5F_{12}	٤،١٠٠	٠,٤١		٦،٥١٠	٩،١٦٠	١٣،٣٠٠
PFC-5-1-14	C_6F_{14}	٣،٢٠٠	٠,٤٩	٧،٤٠٠	٦،٦٠٠	٩،٣٠٠	١٣،٣٠٠
PFC-9-1-18	$C_{10}F_{18}$	>١٠٠٠[د]	٠,٥٦		٥،٥٠٠>	٧،٥٠٠>	٩،٥٠٠>
Trifluoromethyl Sulphur pentafluoride	SF_5CF_3	٨٠٠	٠,٥٧		١٣،٢٠٠	١٧،٧٠٠	٢١،٢٠٠
اثير مشبع بالفليور							
HFE-125	CHF_2OCF_3	١٣٦	٠,٤٤		١٣،٨٠٠	١٤،٩٠٠	٨،٤٩٠
HFE-134	CHF_2OCHF_2	٢٦	٠,٤٥		١٢،٢٠٠	٦،٣٢٠	١،٩٦٠
HFE-143a	CH_3OCF_3	٤،٣	٠,٢٧		٢،٦٣٠	٧٥٦	٢٣٠
HCFE-235da2	$CHF_2OCHClCF_3$	٢،٦	٠,٣٨		١،٢٣٠	٣٥٠	١٠٦
HFE-245cb2	$CH_3OCF_2CHF_2$	٥،١	٠,٣٢		٢،٤٤٠	٧٠٨	٢١٥
HFE-245fa2	$CHF_2OCH_2CF_3$	٤،٩	٠,٣١		٢،٢٨٠	٦٥٩	٢٠٠
HFE-254cb2	$CH_3OCF_2CHF_2$	٢،٦	٠,٢٨		١،٢٦٠	٣٥٩	١٠٩
HFE-347mcc3	$CH_3OCF_2CF_2CF_3$	٥،٢	٠,٣٤		١،٩٨٠	٥٧٥	١٧٥
HFE-347pcf2	$CHF_2CF_2OCH_2CF_3$	٧،١	٠,٢٥		١،٩٠٠	٥٨٠	١٧٥
HFE-356pcc3	$CH_3OCF_2CF_2CHF_2$	٠,٣٣	٠,٩٣		٣٨٦	١١٠	٣٣
HFE-449sl (HFE-7100)	$C_4F_9OCH_3$	٣،٨	٠,٣١		١،٠٤٠	٢٩٧	٩٠
HFE-569sf2 (HFE-7200)	$C_4F_9OC_2H_5$	٠,٧٧	٠,٣		٢٠٧	٥٩	١٨
HFE-43-1 0pccc124 (H-Galden 1040x)	$CHF_2OCF_2OC_2F_4OCHF_2$	٦،٣	١,٣٧		٦،٣٢٠	١،٨٧٠	٥٦٩
HFE-236ca12 (HG-10)	$CHF_2OCF_2OCHF_2$	١٢،١	٠,٦٦		٨،٠٠٠	٢،٨٠٠	٨٦٠
HFE-338pcc13 (HG-01)	$CHF_2OCF_2CF_2OCHF_2$	٦،٢	٠,٨٧		٥،١٠٠	١،٥٠٠	٤٦٠
بولي اثير مشبع بالفليور							
PFPMIE	$CF_3OCF(CF_3)CF_2OCF_2OCF_3$	٨٠٠	٠,٦٥		٧،٦٢٠	١٠،٣٠٠	١٢،٤٠٠
الهيدروكربونات والعناصر الأخرى – التأثيرات المباشرة							
Dimethylether	CH_3OCH_3	٠،٠١٥	٠,٠٢		١	١	<<١
كلوريد الميثيلين	CH_2Cl_2	٠،٣٨	٠,٠٣		٣١	٨،٧	٢،٧
كلوريد الميثيل	CH_3Cl	١،٠	٠,٠١		٤٥	١٣	٤

ملاحظات:

تشير ‡SAR إلى تقرير التقييم الثاني (١٩٩٥) المستخدم لرفع التقارير بموجب إتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيّر المناخ.

[أ] تعتمد وظيفة إستجابة ثاني أكسيد الكربون في هذا التقرير مع النسخة المراجعة لدورة برن للكربون المستخدمة في الفصل ١٠ من التقرير (Bern2.5CC; Joos et al. 2001) مع إستخدام تركيز ثاني أكسيد الكربون في: الخلفية بمقدار ٣٧٨ جزءاً في المليون. تعطي التركيبة التالية إنحلال هذا الغاز مع الوقت:

$a_0 = 0.217$, $a_1 = 0.259$, $a_2 = 0.338$, $a_3 = 0.186$, $\tau_1 = 172.9$ years, $\tau_2 = 18.51$ years, and $\tau_3 = 1.186$ years, for $t < 1{,}000$ years.

[ب] تحتسب الفاعلية الإشعاعية لثاني أكسيد الكربون بإستخدام التعبير المبسّط (١٩٩٠) للهيئة الحكومية الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ كما ورد في تقرير التقييم الثالث مع تركيز محدث بلغ ٣٧٨ جزءاً في المليون وإختلال بلغ +١ جزء في المليون (أنظر القسم ٢,١٠,٢)

[ج] يبلغ عمر إختلال الميثان ١٢ عاماً كما ورد في تقرير التقييم الثالث (انظر أيضاً القسم ٧,٤). يتضمن إحتمال الإحترار العالمي التأثيرات غير المباشرة من زيادة الأوزون وبخار المياه في الستراتوسفير. (انظر القسم ٢,١٠)

[د] إن العمر المفترض المحدد بألف عام هو الحد الأدنى.

من التأثير الإشعاعي المقدّر من التغيّر في الإشعاع الشمسي. بما أن النطاق في التقدير بلغ من + ٠,٦ إلى + ٢,٤ واط للمتر المربع الواحد، فإن هناك ثقة عالية جداً في التأثير الإشعاعي الصافي للنظام المناخي بسبب الأنشطة البشرية. تساهم غازات الدفيئة الطويلة العمر في +٢,٦٣ ± ٠,٢٦ واط للمتر المربع الواحد، وهو عامل التأثير الإشعاعي المسيطر وصاحب أعلى مستوى من الفهم العلمي. في المقابل، إن إجمالي تأثيرات الهباء الجوي المباشر، وبياض السحب وبياض السطح التي تساهم بالتأثيرات السلبية لها أوجه عدم يقين أكبر. يزداد نطاق صافي التقديرات بسبب شروط التأثير السلبية، ولها أوجه عدم يقين أكثر من التأثيرات الإيجابية. تُظهر طبيعة عدم اليقين في تأثير بياض السحاب المقدّر عدم تناسق ملحوظ في التوزيع. تتضمن أوجه عدم اليقين في التوزيع أوجه هيكلية (على مثال تمثيل الأرقام القصوى في العناصر، غياب أي قياس للوزن في آليات التأثير الإشعاعي، إحتمال تأثيرات إشعاعية غير محتسبة وغير مقاسة) وأوجه إحصائية (على مثال الإفتراضات حول أنواع التوزيع التي تصف عدم يقين حول العناصر) {٢,٧، ٢,٩}

إن إحتمال الإحترار العالمي هو قياس مفيد لمقارنة التأثير المرجّح لإنبعاثات غازات الدفيئة الطويلة العمر على المناخ. (انظر الجدول ٢) تقارن إحتمالات الإحترار العالمي التأثير الإشعاعي المدمج خلال فترة محددة (١٠٠ سنة مثلاً) من إنبعاث وحدة كميّة وهي طريقة لمقارنة التغيّر المناخي المرجّح المرتبط بإنبعاث غازات دفيئة مختلفة. لكن الوثائق تظهر أن هذا المفهوم يفشل في عدة مراحل، خاصة عند إستخدامه لتقييم تأثير الغازات القصيرة العمر. {٢,١٠}

في ما يخص قوة التأثيرات الواقعية المدروسة ونطاقها، تقترح البراهين علاقة شبه خطيّة بين متوسط التأثير الإشعاعي العالمي ومتوسط إستجابة حرارة السطح. تختلف الأنماط المكانية للتأثير الإشعاعي بين عوامل التأثير المختلفة. إلا أنه من غير المتوقع أن يناسب رد الفعل المكانيّ التأثير. تتحكم العمليات المناخية والإستجابات إلى حد بعيد بالأنماط المكانية لإستجابة المناخ. على سبيل المثال، تميل استجابات بياض جليد المحيطات إلى زيادة الإستجابة في خطوط العرض العليا. كما تتأثر الأنماط المكانية بالفروقات في الركود الحراري بين اليابسة والبحر. {٢,٨، ٩,٢}

يمكن أن يتغيّر نمط الإستجابة للتأثير الإشعاعي إذا ما كانت هيكليته ملائمة للتأثير على وجه معين من الهيكلية في الغلاف الجوي أو دورانه. تشير دراسات النماذج وبيانات المقارنة إلى أن أنماط الدوران في خطوط العرض الوسطى والعالية من المرجّح أن تتأثر ببعض التأثيرات مثل الثورات البركانية التي ارتبطت بالتغيّرات في النمط الحلقي الشمالي (NAM) وتذبذب شمالي الأطلسي (NAO). (انظر القسم ٣,١ والإطار ٢). تشير المحاكاة إلى أن امتصاص الأهباء خاصة الكربون الأسود يمكن أن يخفض الإشعاعات الشمسية الوافدة على السطح وأن يدفئ الغلاف الجوي على مستويات إقليمية، ما يؤثر على ملامح درجات الحرارة العمودية والدوران الواسع النطاق في الغلاف الجوي. {٢,٨، ٧,٥، ٩,٢}

في الأنماط المكانية للتأثيرات الإشعاعية للأوزون وتأثيرات الهباء الجوي المباشرة والتفاعلات بين الهباء الجوي والسحاب وإستخدام الأراضي، أوجه عدم يقين عديدة. هذا بالتناقض مع الثقة العالية نسبياً في النمط المكاني للتأثير الإشعاعي للغازات الطويلة العمر. من المرجّح جداً أن يتخطى صافي التأثير الإشعاعي الإيجابي في النصف الجنوبي من الكرة الأرضية المعدّل في النصف الآخر بسبب تركيزات أدنى للهباء الجوي في النصف الجنوبي. {٢,٩}

٢,٦ التأثير السطحي والدورة الهيدرولوجية

تشير المشاهدات والنماذج إلى أن التغيّرات في التقلّبات الإشعاعية على سطح الأرض تؤثر على حرارة السطح والرطوبة، وبالتالي على الدورة الهيدرولوجية. تشير الدراسات الحالية إلى أن بعض العوامل يمكن أن تؤثر على الدورة الهيدرولوجية بشكل مختلف عن الأخرى من خلال تفاعلها مع السحاب. بشكل خاص، قد تكون التغيّرات في الهباء الجوي قد أثرت على التهطال وأوجه أخرى من الدورة الهيدرولوجية أكثر من عوامل التأثير البشرية المنشأ. تؤثر الطاقة الموضوعة على السطح مباشرة في التبخر ونقل الحرارة الحساس. إن التغيّر في التقلّبات الإشعاعية الفوري على السطح (التأثير السطحي) هو أداة تشخيص فاعلة لفهم التغيّرات في الحرارة ورطوبة السطح. لكن على خلاف التأثير الإشعاعي لا يمكن إستخدامه للقيام بمقارنة كمية لتأثيرات العوامل المختلفة على متوسط تغيّر حرارة السطح الإجمالي. لصافي التأثير الإشعاعي والتأثير السطحي مقاييس مختلفة بالنسبة إلى خط الإستواء نحو القطب في النصف الشمالي من الأرض وتختلف بين النصفين. {٢,٩، ٧,٢، ٧,٥، ٩,٥}

الملخّص الفني ٣: مشاهدات التغيّرات في المناخ

يقيّم هذا التقرير التغيّرات في نظام الأرض المناخي، ولا يكتفي بدراسة الغلاف الجوي بل يتناول المحيطات والغلاف الجليدي والظواهر كالتغيّرات في التنقل في الغلاف الجوي، بهدف تعزيز فهم توجهات التغيّر المناخي، وتغيّراته وعملياته على المستويين العالمي والإقليمي. يختلف طول سجلّات المشاهدات التي تستخدم منهجيات مباشرة كما يرد أدناه، بالإضافة إلى ذكر تقديرات الحرارة العالمية بدءاً من العام ١٨٥٠. كما تخضع حالات الطقس والمناخ القصوى للنقاش، ويتم وصف التغيّرات المشاهدة في الحالات المتطرّفة. كما يتم وصف تناسق التغيّرات المشاهدة بين متغيّرات مناخية مختلفة لرسم صورة أشمل. أخيراً، يتم تقييم المعلومات المناخية الماضية التي تستخدم عادةً وبشكل غير مباشر، الوكلاء لنقل المعلومات حول التغيّر المناخي على فترات الزمنية أطول (تصل إلى ملايين السنوات).

٣,١ التغيّرات في الغلاف الجوي: السجلّات الآلية

يتضمن هذا التقييم تحليلاً للمعدّلات العالمية ولكل نصف من الكرة الأرضية، والتغيّرات على اليابسة وفي المحيطات، وتوزيع التوجهات في خطوط العرض وخطوط الطول والإرتفاع. منذ تقرير التقييم الثالث، تسمح التطورات في المشاهدات وقياسها، والتحليل الأكثر تفصيلاً للمنهجيات والمهل الزمنية الممتدة، بالقيام بتحليلات أعمق للتغيّرات، ومن بينها حرارة الغلاف الجوي، والتهطال، الرطوبة، والهواء، والدوران. إن حالات المناخ القصوى هي تعبير أساسي عن تغيّر المناخ، ويتضمن هذا التقييم بيانات جديدة تسمح بمشاهدات محسّنة للتغيّرات في عدة أنواع من الأحداث القصوى ومن بينها موجات الحر والجفاف والتهطال الغزير والأعاصير المدارية (تشمل الأعاصير والتيفونات). {٣,٢–٣,٤، ٣,٨}

بالإضافة إلى ذلك، لقد تحقق تقدّم منذ تقرير التقييم الثالث في فهم كيف يمكن وصف عدد من نقاط الخلل الموسمية والطويلة الأمد من خلال أنماط تغيّر المناخ. تتأتى هذه الأنماط من التفاعلات الداخلية ومن التأثيرات اليابسة والمحيط والجبال والتغيّرات الكبيرة في التدفئة على الغلاف الجوي. فلإستجابة هذه العناصر تأثيراتٌ في مناطق بعيدة عن مصدرها الفيزيائي من خلال الروابط عن بعد في الغلاف الجوي مرتبطة بموجات واسعة النطاق في الغلاف الجوي. يعتبر فهم الخلل في الحرارة والتهطال المرتبط بأنماط تغيّر المناخ السائدة، أساسياً من أجل فهم عدد من نقاط الخلل المناخية الإقليمية وأسباب إختلافها عن التغيّرات العالمية. قد تطرأ التغيّرات في مسار العواصف، والتيارات البحرية، ومناطق ضد الأعاصير التفضيلية والتغيّرات في الأمطار الموسمية، مع أنماط التغيّر الأفضلية هذه. {٣,٥–٣,٧}

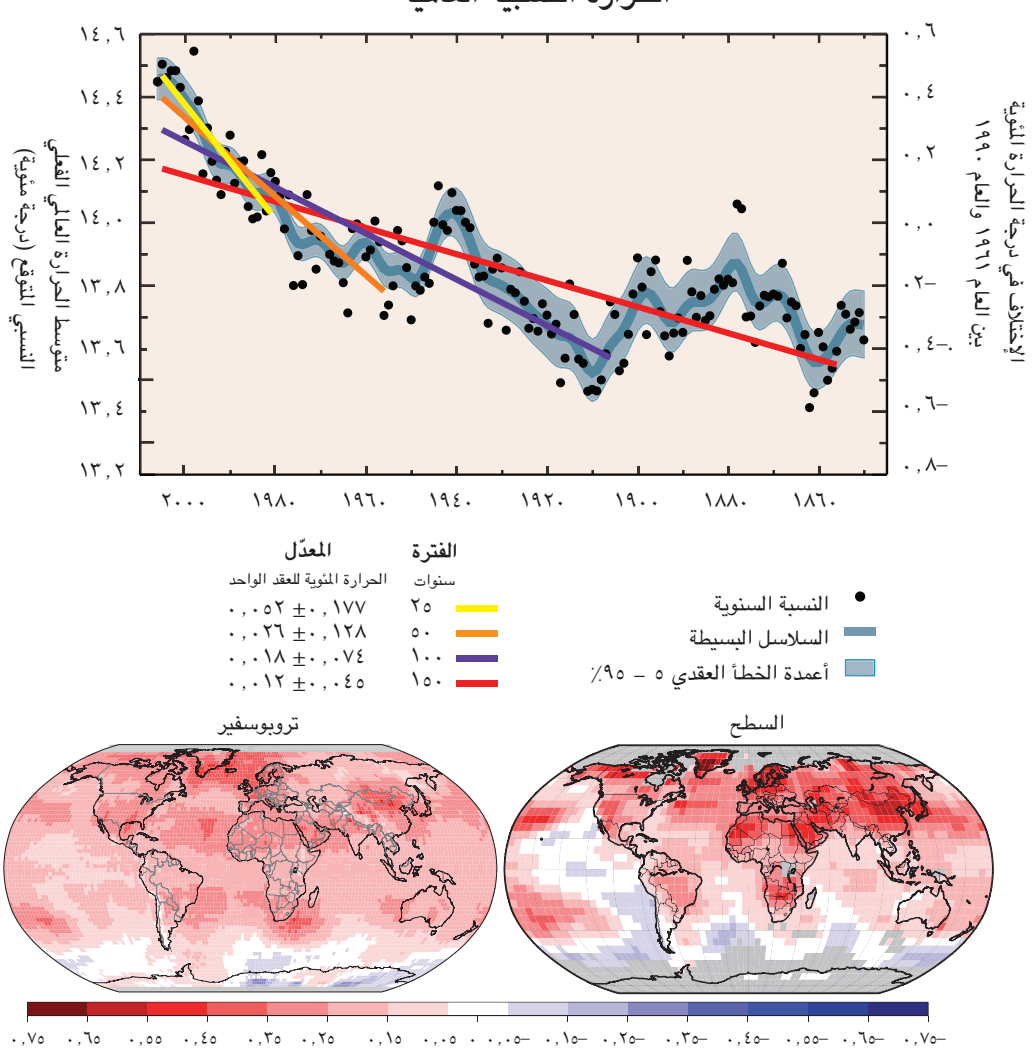
٣,١,١ معدّل درجات الحرارة العالمية

كان العام ٢٠٠٥ والعام ١٩٩٨ العامين الأكثر دفئاً في سجلّات حرارة الهواء على سطح الأرض العالمية الآلية منذ العام ١٨٥٠. إرتفعت حرارات السطح في العام ١٩٩٨ بسبب النينيو في ١٩٩٧–١٩٩٨ لكن لم يطرأ خلل على هذه القوة في العام ٢٠٠٥. كانت ١١ سنة من الـ١٢ سنة الماضية (من ١٩٩٥ إلى ٢٠٠٦) – بإستثناء ١٩٩٦ – الأكثر دفئاً منذ العام ١٨٥٠. {٣,٢}

إرتفع معدّل حرارة السطح العالمية خاصة منذ العام ١٩٥٠. إن التوجه المحدث لفترة ١٠٠ سنة (١٩٠٦– ٢٠٠٥) الذي قدر ب ٠,٧٤ درجة مئوية ± ٠,١٨ درجة مئوية أعلى من التوجه الإحترار لفترة ١٠٠ سنة عند صدور تقرير التقييم الثالث (١٩٠١– ٢٠٠٠) الذي قدر بـ ٠,٦ درجة مئوية ± ٠,٢ درجة مئوية بسبب أعوام دافئة إضافية. بلغ إرتفاع الحرارة الإجمالي من فترة ١٨٥٠–١٨٩٩ إلى فترة ٢٠٠١–٢٠٠٥، ٠,٧٦ درجة مئوية ± ٠,١٩ درجة مئوية. كما بلغ معدّل الإحترار خلال الأعوام الخمسين الماضية ٠,١٣ درجة مئوية ±٠,٠٣ درجة مئوية أي حوالي ضعفي معدّل المئة سنة الماضية. تظهر ثلاثة تقديرات عالمية مختلفة توجهات إحترار متناغمة. كما أن مجموعات البيانات في كل من مجال اليابسة والمحيط تتناسق مع درجة حرارة سطح البحر ودرجة حرارة هواء البحر خلال الليل (انظر الملخّص الفني، الرسم ٦). {٣,٢}

تؤكد الدراسات الحديثة أن تأثيرات التحضّر وتغيّر إستخدام الأراضي على سجلّات الحرارة العالمية ضئيلة (أقل من ٠,٠٠٦ درجة مئوية في العقد الواحد على اليابسة ومعدومة فوق المحيط) في ما يخص المعدّلات القارية والمرتبطة بأحد نصفي القارة. تخضع المشاهدات كلها للتحقق من نوعية البيانات وتناسقها لتصحيح التحيّز المرجّح. يتم إحتساب التأثيرات الحقيقية لكن المحلية للمناطق الحضرية في بيانات درجة حرارة اليابسة المستخدمة. لا ترتبط تأثيرات التحضّر وإستخدام الأراضي بإحترار المحيطات المنتشر الملاحظ. تشير البراهين إلى أن تأثيرات الجزيرة الحرارية الحضرية تؤثر أيضاً على التهطال والسحاب ونطاق الحرارة خلال النهار. {٣,٢}

توجهات الحرارة العالمية



الرسم ٦. (أعلى) أنماط توجهات درجات الحرارة العالمية الخطية بين العامين ١٩٧٩ و٢٠٠٥ المقدرة على سطح الأرض (يسار)، وللتروبوسفير من سجلّات الأقمار الصناعية (يمين). يشير الرمادي إلى المناطق التي لم تكتمل البيانات حولها. (أسفل) متوسط درجات الحرارة السنوية العالمية (النقاط السوداء) مع قياسات خطية في البيانات. يظهر المحور لجهة اليسار إختلالات في الحرارة مرتبطة بمعدّل ١٩٦١–١٩٩٠ ويظهر المحور على اليمين درجات الحرارة المقدرة الحالية، بالدرجة المئوية. تظهر الإتجاهات الخطية للألوان الـ ٢٥ (أصفر) ١٠٠ (برتقالي) ١٥٠ (أحمر) سنة الماضية. تظهر التموجات الزرقاء المتساوية التغيّرات العقدية (انظر الوثيقة المضافة A.3) مع نطاق خطأ عقدي يبلغ ٩٠٪ ظاهر على شكل خط عريض بالأزرق الفاتح. بلغ إجمالي إرتفاع درجة الحرارة في فترة ١٨٥٠– ١٨٩٩ وحتى فترة ٢٠٠١–٢٠٠٥ مقدار ٠,٧٦ ± ٠,١٩ درجة مئوية. {الرسم ١، الأسئلة ١, ٣}

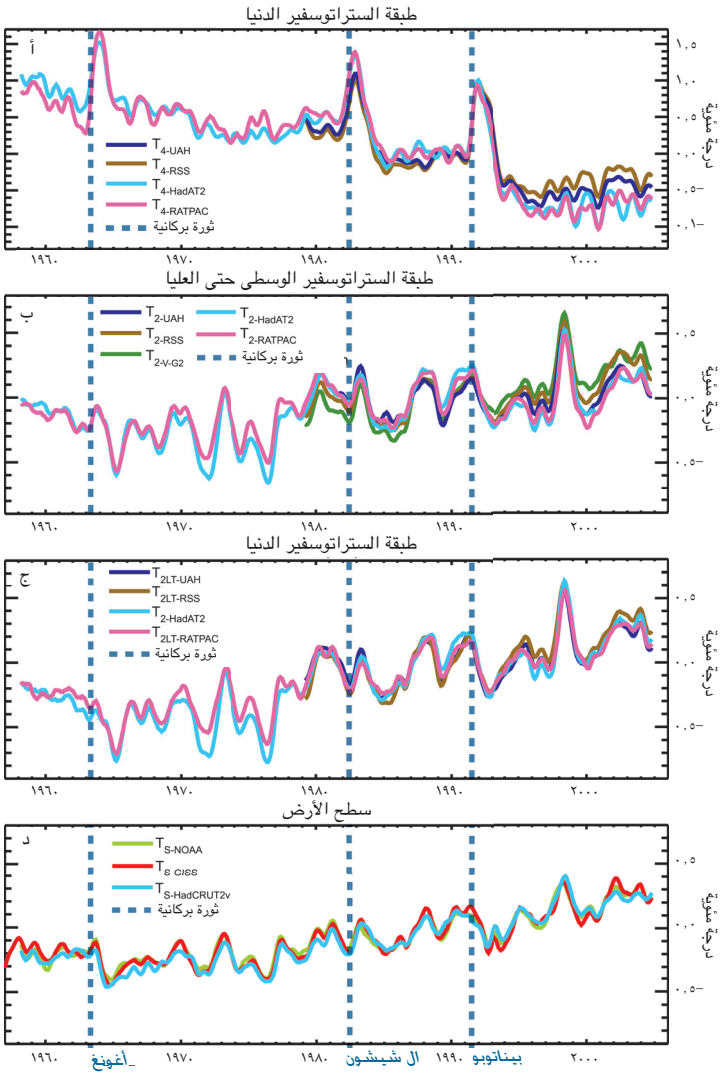
توقف متوسّط نطاق الحرارة خلال النهار عن التراجع. أفاد تقرير التقييم الثالث عن تراجع في مدى الحرارة خلال النهار بلغ حوالي ٠,١ درجة مئوية في العقد الواحد بين ١٩٥٠ و١٩٩٤. تظهر المشاهدات المحدثة أن متوسّط نطاق الحرارة خلال النهار لم يتغيّر من عام ١٩٧٩ إلى عام ٢٠٠٤ فيما ارتفعت درجات الحرارة خلال الليل ودرجات الحرارة خلال النهار بالمعدّل ذاته. تتغيّر التوجهات كثيراً من منطقة إلى أخرى. {٣,٢}

تشير التحليلات الجديدة لقياسات المسبار اللاسلكي والأقمار الصناعية لدرجة الحرارة في أدنى التروبوسفير ووسطه إلى أن معدّلات الإحترار متناسقة في ما بينها ومع معدّلات درجة حرارة سطح الأرض مع نقاط عدم اليقين لفترة ١٩٥٨ – ٢٠٠٥ وفترة ١٩٧٩ – ٢٠٠٥. يشكّل ذلك حلاً لخلل ذكره تقرير التقييم الثالث (انظر الملخّص الفني، الرسم ٧). إن سجل المسبار اللاسلكي أقل إكتمالاً من ناحية الإتساع من سجل سطح الأرض، وتشير البراهين إلى

أن عدداً من مجموعات البيانات المسبار اللاسلكي تبقى غير موثوقة خاصة في المناطق المدارية. وتبقى عدة إختلافات بين توجهات درجات حرارة التروبوسفير المختلفة المقدرة من وحدة سبر بالموجات المتناهية القصر، وما زالت قياسات الوحدة المتقدمة منذ العام ١٩٧٩ وغيرها تحتوي على أخطاء متبقية. لكن تقديرات التوجهات خضعت لتحسينات هامة وتم تخفيض الإختلافات في مجموعات البيانات منذ تقرير التقييم الثالث، من خلال تصحيح في الأقمار الصناعية المتغيّرة، والتهاوي المداري والإنحراف في وقت التجاوز المحلي (تأثيرات الدورة النهارية). يبدو أن سجلّات درجات حرارة التروبوسفير التي أخذتها الأقمار الصناعية متناسقة إلى حد بعيد مع توجهات حرارة سطح الأرض إذا ما تم إحتساب تأثير الستراتوسفير على القناة ٢ من وحدة سبر بالموجات المتناهية القصر. يتراوح نطاق إحترار سطح الأرض العالمي في مجموعات البيانات المختلفة منذ العام ١٩٧٩، بين ٠,١٦ درجة مئوية و٠,١٨ درجة مئوية في العقد الواحد، مقارنة بالتقديرات المستقاة من وحدة سبر بالموجات المتناهية القصر لحرارات التروبوسفير التي تراوحت بين ٠,١٢ درجة مئوية و٠,١٠ درجة مئوية. من المرجّح أن يزداد الإحترار مع إزدياد الإرتفاع عن سطح الأرض في معظم التروبوسفير في المناطق المدارية، وأن تنخفض الحرارة في الستراتوسفير، بالإضافة إلى توجّه نحو تروبوبوز أعلى. {٣,٤}

تتوافق تقديرات حرارة الستراتوسفير من المسبار اللاسلكي المصححة ومن الأقمار الصناعية ومن إعادة التحليل جميعها لجهة النوعية مع تبريد تراوح بين ٠,٣ درجة مئوية و٠,٦ درجة مئوية للعقد الواحد منذ العام ١٩٧٩ (انظر الملخّص الفني، رسم ٧). تشير سجلّات المسبار اللاسلكي الأطول (منذ ١٩٥٨) إلى تبريد في الستراتوسفير، لكنها خاضعة لنقاط عدم يقين آلية هامة، إرتفع معدّل التبريد بعد العام ١٩٧٩ لكنه تباطأ خلال العقد الماضي. من المرجّح أن تكون سجلّات المسبار اللاسلكي مفرطة في تقدير التبريد في الستراتوسفير بسبب التغيّرات في السبر التي لم تؤخذ بعين الإعتبار بعد. التوجهات ليست متشابهة بسبب مراحل الإحترار في الستراتوسفير بعد الثورات البركانية الكبيرة. {٣,٤}

درجات حرارة الهواء الملحوظة



الرسم ٧. درجات حرارة السطح والهواء العالي في التروبوسفير العليا والستراتوسفير الدُنيا، تظهر كإختلالات شهرية مرتبطة بمرحلة ١٩٧٩–١٩٩٧ مع فترة فلتر لسبع سنوات. تشير الخطوط المخرطة إلى أوقات الثورات البركانية الهامة. {الرسم ٣,١٧}

٣,١,٢ التوزيع المكاني لتغيّرات الحرارة والدوران والمتغيّرات ذات الصلة

إرتفعت حرارة سطح الأرض فوق مناطق اليابسة بوتيرة أسرع من فوق المحيطات في النصفين من الكرة الأرضية. تظهر سجلّات أطول تتوفر اليوم معدّلات إحترار أسرع فوق اليابسة منها فوق المحيطات خلال العقدين الماضيين (حوالي ٠,٢٧ درجة مئوية مقابل ٠,١٣ درجة مئوية في العقد الواحد). {٣,٢}

الإطار ٢: توجّهات (أنماط) تقلبيّة المناخ

أظهر تحليل تقلبيّة الغلاف الجوي والمناخ أن عنصراً هاماً يمكن أن يكون موضوع وصفٍ من خلال التدفقات في نطاق ومؤشرات الخاصة بعدد محدود نسبياً من أنماط التغيّر التفضيلية. من الأنماط الأكثر شهرة:

- التذبذب الجنوبي/النينيو، وهو تذبذب مزدوج (ENSO) في الغلاف الجوي وفي المحيط الهادئ الإستوائي، مع فترات زمنية تفضيلية تتراوح بين سنتين و٧ سنوات. غالباً ما يتم قياس التذبذب الجنوبي/النينيو من خلال الفرق في شذوذ ضغط السطح بين تاهيتي وداروين و درجات حرارة سطح البحر في منطقة الهادئ الإستوائي الشرقي والمتوسط. والتذبذب الجنوبي/النينيو عالمي النطاق.
- التذبذب الشمال أطلسي (NAO)، وهو قياس قوة متدنٍّ في أيسلندا ومرتفع الأزوريس والرياح الغربية بينها بشكل أساسي في الشتاء. كما يرتبط بتدفقات في مسار العواصف والحرارة والتهطال من شمال الأطلسي نحو المنطقة الأوروبية الأسيوية. (الإطار ٢، الرسم ١)
- النمط الحلقي الشمالي (NAM)، وهو تقلبية شتائية في نطاق نمطٍ يتميز بضغط سطحٍ متدنٍّ في القطب الشمالي ورياح غربية قوية عند خطوط العرض الوسطى. يرتبط بالدوامة القطبية الشمالية وبالتالي بالستراتوسفير.
- النمط الحلقي الجنوبي (SAM)، وهو تقلبية نمطٍ يتميز بضغط سطحٍ متدنٍّ في القطب الجنوبي ورياح غربية قوية في خطوط العرض الوسطى، وهو شبيه بالنمط الحلقي الشمالي لكنه موجود على مدار السنة.
- نمط الهادئ – أميركا الشمالية (PNA)، نمط موجةٍ واسعة النطاق في الغلاف الجوي، تتميز بسلسلة من الخلل العالي والمتدني الضغط يمتد من غربي الهادئ شبه المداري إلى الشاطئ الشرقي لأميركا الشمالية.
- التذبذب العقدي في الهادئ (PDO)، وهو قياس درجات حرارة سطح البحر في شمال الهادئ، ذو إرتباط شديد بقياس مؤشر شمال الهادئ لعمق منخفض الجزر الألوية Aleutian Low. لكنه يمتلك تأثيراً في معظم أرجاء الهادئ.

الإطار ٢. الرسم ١. رسم للتغيّرات المرتبطة بالمرحلة الإيجابية من التذبذب الشمال الأطلسي والنمط الحلقي الشمالي. تظهر التغيّرات في الضغط الجوي والهواء، بالإضافة إلى التغيّرات في التهطال. تشير الألوان الدافئة إلى المناطق الأكثر دفئاً من العادة والأزرق إلى المناطق الأكثر برداً من العادة.

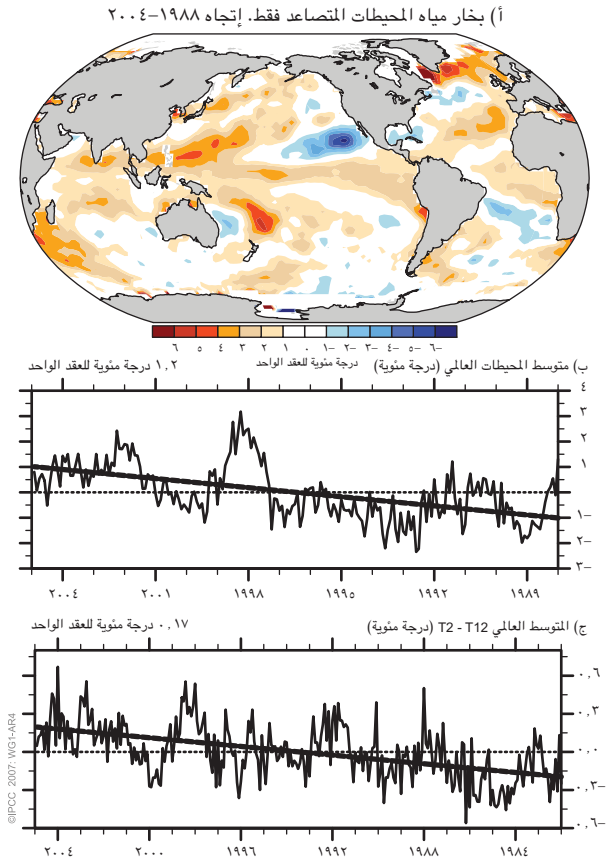
يسعى بحث اليوم إلى تحديد إلى أي مدى يمكن اعتبار التقلبية توجّهات التفضيلية هذه كأنماط حقيقية في النظام المناخي. لكن تظهر براهين أن وجودها يمكن أن يؤدي إلى إستجابات إقليمية أوسع نطاقاً لتأثير يفوق التوقعات. يمكن النظر إلى عدد من التغيّرات المناخية الملحوظة في القرن العشرين بالتحديد من خلال التغيّرات في هذه الأنماط. من الهام إذاً إختبار قدرة النماذج المناخية لمحاكاتها (القسم ٤، الإطار ٧) والنظر في مدى ارتباط التغيّرات الملحوظة المرتبطة بهذه الأنماط بالتقلبية الداخلية أو بتغيّر المناخ البشري المنشأ. {٣,٦، ٨,٤}

انتشر الإحترار خلال الأعوام الثلاثين الماضية في الكرة الأرضية كلها وبلغ أعلى المستويات في خطوط العرض الشمالية. حدث أهم إحترار في شتاء النصف الشمالي من الكرة الأرضية (DJF) والربيع (MAM). إرتفع معدّل درجات الحرارة في القطب الشمالي بضعف وتيرة إرتفاعه في بقية أنحاء الكرة الأرضية خلال المئة سنة الماضية. لكن درجات الحرارة في القطب الشمالي تتغيّر كثيراً. شهد القطب الشمالي فترة إحترار أطول من العادة بشكل ضئيل مشابهة للإحترار الحالي بين العامين ١٩٢٥ و١٩٤٥، لكن يبدو أن توزيعها الجغرافي يختلف منذ الإحترار الأخير بما أنها لم تكن عالمية الإتساع. {٣,٢}

تشير البراهين إلى تغيّرات على المدى الطويل في الدوران الواسع النطاق في الغلاف الجوي على غرار الإنتقال نحو القطب وإزدياد قوة الرياح الغربية. يمكن أن تختلف التوجهات المناخية الإقليمية كثيراً عن المعدّل العالمي، ما يعكس التغيّرات في حركات الدوران والتفاعلات للغلاف الجوي والمحيطات وعناصر النظام المناخي الأخرى. بلغت قوة الرياح الغربية في منطقة خطوط العرض الوسطى ذروتها في النصفين من الكرة الأرضية في معظم المواسم بدءاً من العام ١٩٧٩ على أقل تقدير وصولاً حتى نهاية التسعينيات، وتم توثيق إنتقالات نحو القطب للتيارات البحرية الأطلسية والقطبية الجنوبية الأمامية. إزدادت الرياح الغربية في النصف الشمالي من الكرة الأرضية بين الستينيات والتسعينيات، لكنها عادت وبلغت مستويات قريبة من المعدّل الطويل الأمد. تغيّر قوة الرياح الغربية المتزايدة في النصف الشمالي للكرة الأرضية التدفق من المحيطات نحو القارات، وهي عامل أساسي في التغيّرات الملحوظة في مسارات العواصف في الشتاء وأنماط توجهات التهطال والحرارة ذات الصلة في خطوط العرض الوسطى والعليا. تؤكد تحليلات الهواء ومعدّلات الحر المرتفعة الهامة البراهين التي تعتمد على إعادة التقييم للتغيّرات في العواصف خارج المدارية في النصف الشمالي للكرة الأرضية بدءاً من سجلّات إعادة التقييم في أواخر السبعينيات حتى نهاية التسعينيات. يصاحب هذه التغيّرات توجه نحو دوامات شتوية قطبية أقوى في التروبوسفير والستراتوسفير الدُنيا. {٣,٢، ٣,٥}

يمكن وصف عدد من التغيّرات المناخية الإقليمية من خلال أنماط أفضلية لتقلّبية المناخ، أي على أنها تغيّرات في ورود المؤشرات التي تميز قوة هذه الأنماط ومراحلها. غالباً ما تم رصد أهمية التقلّبات في الرياح الغربية ومسارات العواصف في الشمالي الأطلسي على مر الفترات الزمنية، ويتم وصف تلك التقلّبات من خلال

بخار المياه في الغلاف الجوي



الرسم ٨. (أ) التوجهات الخطيّة في مياه التهطال (إجمالي بخار المياه العمودي) بين العامين ١٩٨٨ و٢٠٠٤ (في٪ في العقد) و (ب) السلسلة الزمنية الشهرية للإختلالات المرتبطة بالفترة الظاهرة، على المحيط العالمي مع توجه خطي. (ج) يعطى متوسط الإشعاع العالمي (من خط 80°N إلى 80°S) للرطوبة في أعلى التروبوسفير من خلال سلسلات زمنية شهرية لمجموعات من إختلالات الحرارة مأخوذة من سطوع الأقمار الصناعية (بالدرجة المئوية) لفترة ١٩٨٢–٢٠٠٤، وتظهر الخطوط المرقطة الإتجاه الخطي لحرارات السطوع الأساسية بالدرجة المئوية في العقد. {٣,٤، الرسم ٣,٢٠ والرسم ٣,٢١}

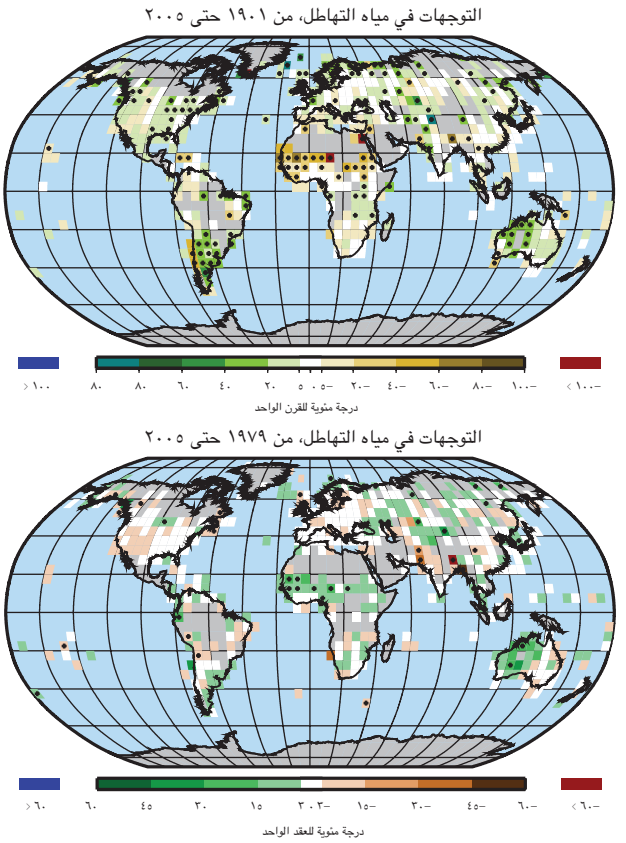
التذبذب الشمال أطلسي (انظر الإطار ٢ لمزيد من الشرح حول هذا الموضوع والأنماط الأفضلية الأخرى). وُصفت خصائص التقلّبات في الرياح الغربية المتوسطة في النصفين من الكرة الأرضية مؤخراً من خلال «أنماطها الحلقية»، النمط الحلقي الشمالي (NAM) والنمط الحلقي الجنوبي (SAM). يمكن اعتبار التغيّرات الملحوظة على أنها نقلة الدوران نحو الهيكلية المرتبطة بمؤشر واحد من هذه الأنماط التفضيلية. يمكن الإعتبار أنّ إلى الرياح الغربية المتزايدة عند خطوط العرض المتوسطة في شمال الأطلسي تعكس تغيّرات التذبذب الشمال الأطلسي (NAO) أو النمط الحلقي الشمالي. كما تتضح التقلبية خلال العقود العديدة في

الأطلسي وفي الغلاف الجوي وفي المحيط على حد سواء. أما في النصف الجنوبي للكرة الأرضية فترتبط التغيّرات في الدوران المتعلقة بزيادة النمط الحلقي الجنوبي من الستينيات حتى اليوم بإحترار قوي فوق شبه الجزيرة الأطلسية، وإلى مدى محدود، بالتبريد فوق مناطق من أنتاركتيكا القارية. شوهدت تغيّرات أيضاً في التفاعلات ما بين المحيط والغلاف الجوي في الهادئ. إن التذبذب الجنوبي / النينيو هو النمط الطاغي بين أنماط التقلبية العالمية النطاق، وذلك على نطاقات زمنية سنوية بينية، على الرغم من أنه لم يظهر في بعض الأوقات. حدثت نقلة في المناخ في العام ١٩٧٦–١٩٧٧ مرتبطة بتغيّر المراحل في تذبذب الهادئ العقدي (PDO) نحو مزيد من أحداث النينيو وتغيّرات في تطور التذبذب الجنوبي / النينيو، وأثرت على عدة مناطق، ومن بينها معظم الرياح الموسمية المدارية. على سبيل المثال، يبدو أن تغيّرات التذبذب الجنوبي / النينيو والتغيّرات في الهادئ – أميركا الشمالية المرتبطة بالعلاقات عن بعد قد أدّت إلى تغيّرات متناقضة فوق أميركا الشمالية، فيما شهد الجزء الغربي إحتراراً أعلى من الجزء الشرقي الذي أصبح أكثر رطوبة وأكثر سحاباً. هناك تغيّر هام بوتيرة متدنيّة في الغلاف الجوي في قطاع الهادئ خلال القرن العشرين، مع فترات مطوّلة من الدوران الضعيف (١٩٠٠–١٩٢٤، ١٩٤٧– ١٩٧٦) والقوي (١٩٢٥–١٩٤٦، ١٩٧٧–٢٠٠٣). {٣,٢، ٣,٥، ٣,٦}

تتماشى التغيّرات في أقصى درجات الحرارة مع الإحترار. تُظهر المشاهدات إنخفاضاً منتشراً لعدد أيام الجليد في مناطق خطوط العرض الوسطى، وإرتفاعاً في عدد درجات الحر القصوى (١٠٪ الأكثر حراً من الأيام والليالي)، وتراجعاً في عدد درجات البرد القصوى خلال النهار (١٠٪ الأكثر برداً من الأيام والليالي) (انظر الإطار ٥). طرأت أكثر التغيّرات اللافتة في تراجع عدد الليالي الباردة بين العامين ١٩٥١ و٢٠٠٣ لكل المناطق التي تتوفر عنها البيانات (٧٦٪ من اليابسة). {٣,٨}

إزدادت فترة موجات الحر بدءاً من النصف الثاني للقرن العشرين. إن موجة الحر القياسية فوق غرب أوروبا وأوروبا الوسطى خلال صيف ٢٠٠٣ هي مثال عن حالة قصوى إستثنائية حديثة. كان ذلك الصيف (JJA) الأكثر حراً منذ بدء التسجيلات الآلية للمقارنة في حوالي العام ١٧٨٠ (١,٤ درجة مئوية فوق أقصى درجة حر سجلت في ١٨٠٧). كان جفاف سطح الأرض خلال الربيع في أوروبا عاملاً هاماً في إحداث الدرجات القصوى في العام ٢٠٠٣. تشير البراهين إلى إزدياد وتيرة موجات الحر أيضاً وطول مدتها في أمكنة أخرى. تؤكد العلاقة الوثيقة جداً بين الجفاف الملحوظ ودرجات الحرارة المرتفعة فوق اليابسة في

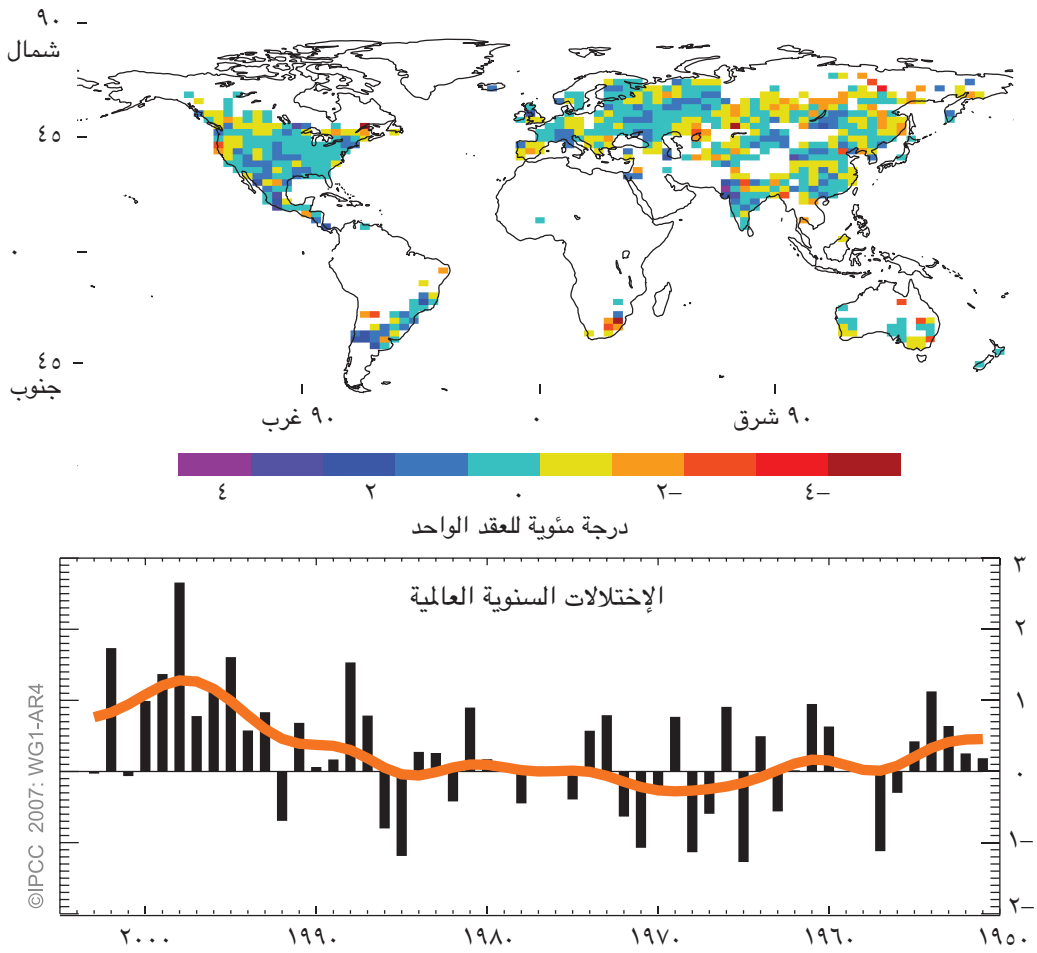
معدّل التهطال العالمي



الرسم ٩. (أعلى) توزيع التوجهات الخطية في كميات التهطال السنوية على اليابسة خلال فترة ١٩٠١–٢٠٠٥ (٪ في القرن). ما من بيانات كافية للمناطق الرمادية لتحديد الإتجاهات الملائمة. تعتمد النسبة المئوية على فترة ١٩٦١–١٩٩٠. (أسفل) السلسلات الزمنية للإختلالات في معدّلات التهطال السنوية على اليابسة للفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٦١–١٩٩٠ القاعدة من ١٩٠٠ حتى ٢٠٠٥. تظهر التموجات التقلبية العقدية البسيطة (انظر الوثيقة الإضافية A.3) لمجموعات بيانات مختلفة. {٣,٣، الرسم ٣,١٢ و٣,١٣}

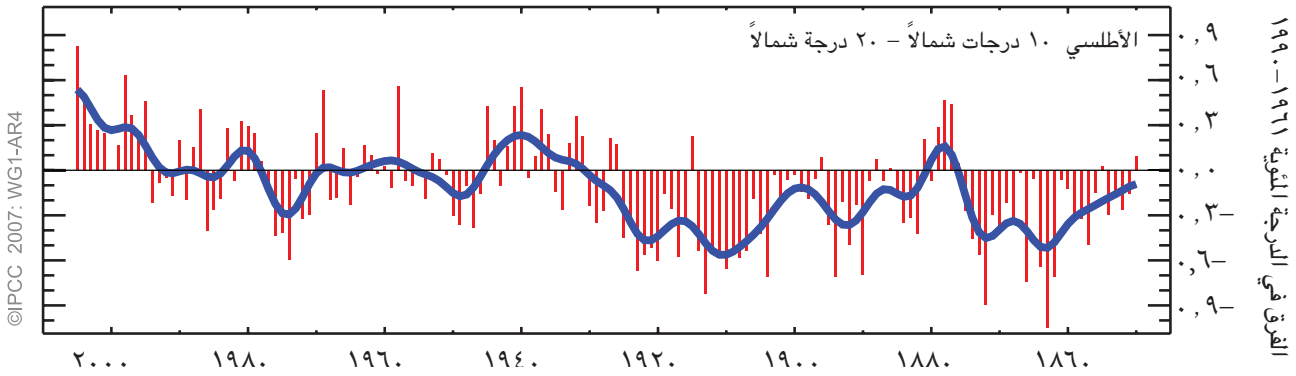
توجهات التهطال السنوية

نسبة التوجّه المئوية للعقد الواحد بين العامين ١٩٥١ و٢٠٠٣ لمساهمة الأيام الرطبة جداً



الرسم ١٠. (أعلى) التوجهات الملحوظة (٪ للعقد) خلال فترة ١٩٥١–٢٠٠٣ في المساهمة في التهطال السنوي الإجمالي خلال الأيام الرطبة جداً (أي ٩٥٪ وما فوق). ما من بيانات كافية حول المناطق البيضاء من اليابسة لتحديد التوجهات. (أسفل) الإختلالات (٪) للسلسلات الزمنية السنوية العالمية (المناطق التي تظهر بياناتها في اللوح الأعلى) للأيام الرطبة جداً (الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٦١–٢٠٠٣) تحدد كالتغيّر المئوي من متوسط الفترة القاعدة (٢٢,٥٪). تظهر التموّجات البرتقالية البسيطة التقلبية العقدية (انظر الوثيقة الإضافية A.3). {الرسم ٣,٣٩}

الخلل السنوي في درجات حرارة سطح البحر



الرسم ١١. الإختلالات السنوية في درجات حرارة سطح البحر الأطلسية المدارية (10°N–20°N) بالدرجة المئوية في منطقة تَشَكُّل الأعاصير الأطلسية المرتبطة بمتوسط ١٩٦١–١٩٩٠. {الرسم ٣,٣}

المناطق المدارية خلال الصيف دور الرطوبة الهام في تعديل المناخ. {٣,٨، ٣,٩}

ما من براهين كافية لتحديد ما إذا كانت التوجهات موجودة في أحداث كالأعاصير والبرد والبرق وعواصف الغبار التي تحدث على نطاق مكاني صغير. {٣,٨}

٣,١,٣: تغيّرات في دورة المياه: بخار المياه والسحاب والتهطال والعواصف المدارية

يزداد بخار المياه في التروبوسفير (انظر الملخّص الفني، الرسم ٨). إزدادت رطوبة السطح بشكل عام منذ العام ١٩٧٦ بسبب الإرتباط الوثيق بين درجات الحرارة المرتفعة فوق اليابسة والمحيط. إزداد إجمالي بخار المياه العمودي فوق المحيطات العالمية بمقدار ١,٢ ± ٠,٣ ٪ في العقد الواحد (٩٥٪ حدود الثقة) بين العامين ١٩٨٨ و٢٠٠٤. تتماشى التغيّرات الإقليمية الملحوظة من ناحية النمط والكم مع التغيّرات في درجة حرارة سطح البحر ومع الإفتراض بإزدياد الرطوبة نسبياً بشكل شبه مستمر في نسبة إختلاط بخار المياه. يؤدي بخار المياه المتزايد في الغلاف الجوي إلى مزيد من توفر الرطوبة للتهطال. {٣,٤}

يزداد أيضاً بخار المياه في أعلى التروبوسفير. من الصعب اليوم تقييم التغيّرات على المدى الطويل في بخار المياه في أعلى التروبوسفير، حيث تمتلك أهمية إشعاعية وذلك بسبب محدودية الآليات المتوفّرة. لكن البيانات المتوفرة اليوم تقدّم براهين على الإزدياد العالمي في الرطوبة الخاصة بأعلى التروبوسفير خلال العقدين الماضيين (انظر الملخّص الفني، الرسم ٨). تتماشى هذه المشاهدات مع الإرتفاع الملحوظ في درجات الحرارة وتمثل تقدماً هاماً منذ تقرير التقييم الثالث. {٣,٤}

يتحكم التذبذب الجنوبي/النينيو بالتغيّرات في السحاب. صادف التراجع المنتشر (لكن غير موجود في كل مكان) في DTR القاري مع إزدياد كمية السحاب. لا تتفق المشاهدات على السطح مع مشاهدات الأقمار الصناعية حول التغيّرات بشكل عام وحول تغيّرات السحاب المتدنيّة المستوى فوق المحيط. لكن يبدو أن تغيّرات الإشعاع في أعلى الغلاف الجوي منذ الثمانينيات وحتى التسعينيات (من المرجّح أن تكون مرتبطة جزئياً بظاهرة النينيو) ترتبط بتراجع غطاء السحاب المداري الأعلى مستوى، وتتماشى مع التغيّرات في رصيد الطاقة في محتوى المحيط الحراري. {٣,٤}

إن «الإظلام العالمي» ليس عالمياً في اتساعه ولم يستمر بعد العام ١٩٩٠. للإنخفاض المذكور في الإشعاع الشمسي على سطح الأرض بين العامين ١٩٧٠ و١٩٩٠ تحيّز حضري. بالعكس تماماً، فقد شهدت إزدياداً منذ العام ١٩٩٠، تقريباً. يؤدي حمل الهباء الجوي المتزايد بسبب الأنشطة البشرية إلى تراجع نوعية الهواء الإقليمي وكميّة الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض. في بعض المناطق مثل أوروبا الشرقية، يقيم الرصد الأخير للعملية العكسية لمؤشر هذا التأثير رابطاً ما بين التغيّرات في الإشعاع الشمسي وبين تحسين نوعية الهواء بالتوازي. {٣,٤}

شوهدت توجهات طويلة الأمد في كميات التهطال بين العامين ١٩٠٠ و٢٠٠٥ في عدة مناطق كبيرة (انظر الملخّص الفني، الرسم ٩). كما شوهد إزدياد هام في التهطال في المناطق الشرقية من أميركا الشمالية والجنوبية، وأوروبا الشمالية، وآسيا الشمالية والوسطى. وشوهد الجفاف في الساحل، ومنطقة المتوسط، وأفريقيا الجنوبية وفي مناطق من آسيا الجنوبية. يتغيّر التهطال لجهة الزمان والمكان، ولم تُلحظ توجهات صلبة على المدى الطويل لمناطق كبرى أخرى[٥]. {٣,٣}

شوهد إرتفاع هام في أحداث التهطال العنيفة. ومن المرجّح أن تكون أحداث التهطال العنيفة قد ازدادت (فوق ٩٥٪ على سبيل المثال) في عدة مناطق من اليابسة منذ العام ١٩٥٠ تقريباً، حتى في تلك المناطق التي شهدت إنخفاضاً في إجمالي كم التهطال. أفيد أيضاً عن إزدياد في أحداث التهطال النادرة (١ كل ٥٠ عاماً)، لكن البيانات المتوفرة لا تضم إلا مناطق معدودة فلا تكفي لتقييم هذه التوجهات على نحو موثّق (انظر الملخّص الفني، الرسم ١٠). {٣,٨}

تتوفر براهين بعد المشاهدة على إزدياد في نشاط الأعاصير المداري الكثيف في شمال الأطلسي منذ العام ١٩٧٠ تقريباً، ترتبط بإزدياد في درجات حرارة سطح البحر المدارية. وتشير البراهين أيضاً إلى إزدياد في نشاط الأعاصير المداري الكثيف في مناطق أخرى حيث تولى أهمية أكبر لنوعية البيانات. إن التغيّر خلال عدة عقود ونوعية سجلّات الاعاصير المدارية قبل رصد الأقمار الصناعية الروتينية منذ العام ١٩٧٠ تقريباً تعقّد رصد التوجهات الطويلة الأمد في نشاط الأعاصير المداري، وما من توجه واضح في الأعداد السنوية للأعاصير المدارية. تشير تقديرات قوة التدمير المرجّحة الأعاصير المدارية إلى توجه تصاعدي مرجّح منذ منتصف السبعينيات، مع اتجاه نحو تمديد حياتها وإزدياد قوتها. كما تظهر التوجهات في درجات حرارة سطح المياه، وهي متغيّرة هامة تؤثر على تطور الأعاصير المدارية (انظر الملخّص الفني، الرسم ١١). تنتج التغيّرات في عدد للأعاصير

[٥] إن المناطق الخاضعة للتقييم هي تلك الواردة في فصل التوقعات الإقليمية من تقرير التقييم الثالث وفي الفصل ١١ من هذا التقرير.

الإطار ٣: دينامية الصفائح الجليدية وإستقرارها

إن الصفائح الجليدية هي كتل جليد سميكة وواسعة تتألف بشكل أساسي من الثلج المضغوط. تنتشر بفعل ثقلها وتنقل الثقل نحو هوامشها، حيث تزول بشكل أساسي بفعل ذوبان سطحها أو بتحول الجبال الجليدية إلى بحار أو بحيرات هامشية. تطوف الصفائح الجليدية بفعل التحوّل في داخل الجليد أو بفعل إنزلاقها على المياه الذائبة تحتها. تتطلب حركة القاعدة السريعة إرتفاع حرارة القاعدة إلى نقطة الذوبان بفعل الحرارة من داخل الأرض، تنقلها المياه الذائبة، أو بفعل الإحتكاك في حركة الجليد. يمكن أن تختلف سرعات الإنزلاق بفعل ضغط الدوران على عدة درجات من القوة، بناء على وجود أو غياب الترسبات القابلة للتحويل، خشونة المادة التحتية، وتوفر المياه وتوزيعها. يتم وصف شروط القاعدة بشكل غير كامل عادةً، ما يؤدي إلى نقاط عدم يقين هامة في فهم إستقرار الصفائح الجليدية. {٤,٦}

غالباً ما يتم توجيه تدفق الجليد في تيارات جليدية سريعة التحرّك (تتدفق بين جدران جليدية أبطأ) أو في الأنهر جليدية الخارجة (مع جدران صخرية). يتأتى التدفق المحسّن في شكل تيارات جليدية من ضغط الدوران الأعلى المرتبط بجليد أسمك في أغوار صخر الأساس أو من إنزلاق أكبر عند القاعدة. {٤,٦}

يبقى الجليد الخارج عن الشاطئ معلقاً بالصفيحة الجليدية فيصبح رفاً جليدياً عائماً. يتحرك الرف الجليدي نحو الأمام ويترقق بفعل وزنه، وهطول الثلوج على سطحه، وورود الجليد من الصفيحة الجليدية. يؤدي الإحتكاك على جوانب الرف الجليدي وحول المرتفعات المغمورة إلى تباطؤ تدفق الرف الجليدي وخروجه عن الصفيحة الجليدية. يخسر الرف الجليدي من وزنه من خلال إخراج الجبال الجليدية وذوبان القاعدة في المحيط تحتها. تظهر الدراسات أن إحترار المحيط بمقدار ١ درجة مئوية قد يزيد من ذوبان القاعدة الجليدية بمقدار ١٠ أمتار في السنة، لكن المعرفة غير الملائمة لتجويفات الرف الثلجي غير المنفوذ إليها تحدّ من دقة هذه التقديرات. {٤,٦}

تشير السجلّات الماضية المحفوظة عن العصور السابقة إلى أن الصفائح الجليدية تتقلص رداً على الإحترار ويزداد حجمها رداً على التبريد، ويمكن أن تكون وتيرة التقلص أسرع من إزدياد الحجم. يبلغ حجم صفيحة غرينلاند الجليدية ٧ أمتار وصفيحة أنتاركتيكا ٥٧ متراً تقريباً من إرتفاع مستوى البحر. تشير البيانات عن العصور القديمة إلى أن ذوبان إحدى الصفيحتين أو الإثنتين معاً بشكل هام من المرجّح أن يكون قد حدث في الماضي. إلا أن بيانات المأخوذة من العيّنات الجليدية تشير إلى أن أي من الصفائح الجليدية لم يختف كلياً خلال الفترات الدافئة في السنوات المليون الماضية. يمكن أن تستجيب الصفائح الجليدية إلى التأثير البيئي على فترات زمنية طويلة جداً، أي أن الإلتزامات بالتغيّرات في المستقبل قد تكون ناتجة عن الإحترار الحالي. على سبيل المثال، قد تمضي أكثر من ١٠ آلاف سنة لكي يدخل إحترار السطح إلى داخل الأرض ويحوّل الحرارات فيه. تتغيّر سرعة الجليد فوق معظم الصفيحة الجليدية رداً على التغيّرات في شكل الصفيحة الجليدية أو حرارة السطح، لكن قد تطرأ تغيّرات السرعة الكبيرة بسرعة في التيارات الجليدية والأنهر جليدية رداً على ظروف القاعدة المتغيّرة، دخول المياه الذائبة على السطح إلى داخل الأرض أو تغيّرات في الرفوف الجليدية التي تتدفق فيها. {٤,٦، ٤,٦}

تبقى النماذج الموضوعة حالياً للإندماجات الطويلة أكثر موثوقية في معالجتها لتراكم السطح وانتزاعه، كما في تقرير التقييم الثالث، لكنها لا تتضمن معالجة لديناميات الجليد، لذلك قد تقوم تحليلات التغيّرات السابقة أو التوقعات المستقبلية بإستخدام هذه النماذج بسوء تقدير مساهمات التدفقات الجليدية في إرتفاع مستوى البحر لكن وطأة هذا الحدث غير معروفة. {٨,٢}

المدارية من النينيو ومن التغيّرات على مر العقود، التي تؤدي أيضاً إلى إعادة توزيع عدد العواصف المدارية ومساراتها. لقد تخطى عدد الأعاصير في شمال الأطلسي المعدّل (في فترة ما بين العامين ١٩٨١–٢٠٠٠) خلال تسع سنوات من العام ١٩٩٥ إلى العام ٢٠٠٥. {٣,٨}

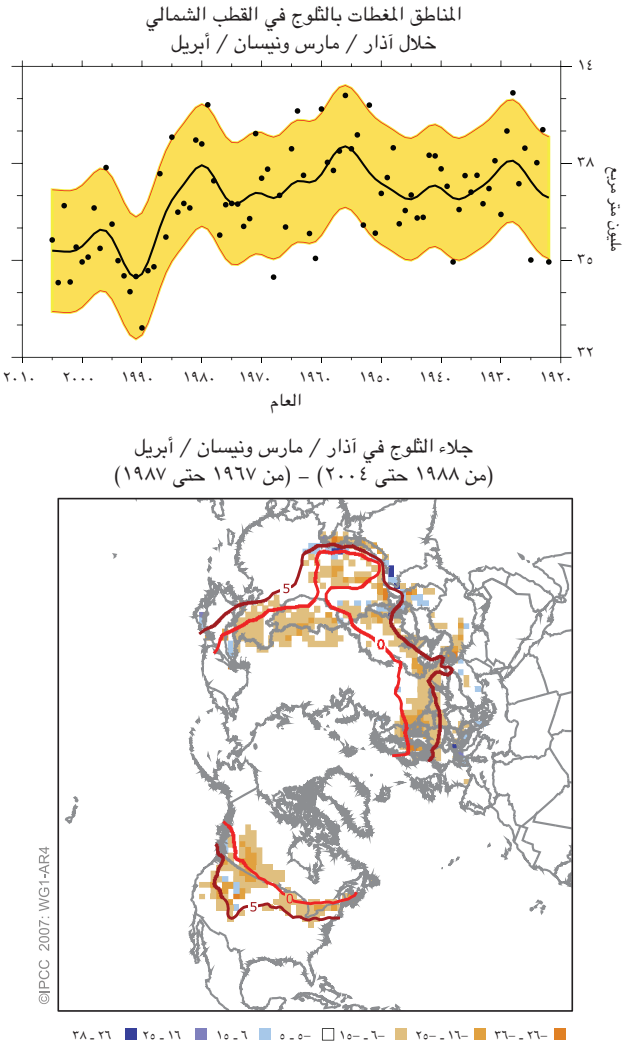
شوهدت حالات جفاف أشد وأطول في مناطق أوسع، خاصة في المناطق المدارية وشبه المدارية منذ السبعينيات. فيما تتعدد القياسات المختلفة للجفاف، تستخدم عدة دراسات تغيّرات التهطال بالإضافة إلى الحرارة.[٦] ساهم في هذه التغيّرات جفاف متزايد بسبب درجات الحرارة المرتفعة وتهطال متراجع على اليابسة. {٣,٣}

[٦] تجمع الحرارة والتهطال في مؤشر بالمر لشدة الجفاف ويعتبر في هذا التقرير قياساً للجفاف. لا يتضمن هذا المؤشر متغيّرات كسرعة الرياح والإشعاع الشمسي والسحاب وبخار المياه لكنه قياس هام للتهطال وحده.

٣,٢ التغيّرات في الغلاف الجليدي: السجلّات الآلية

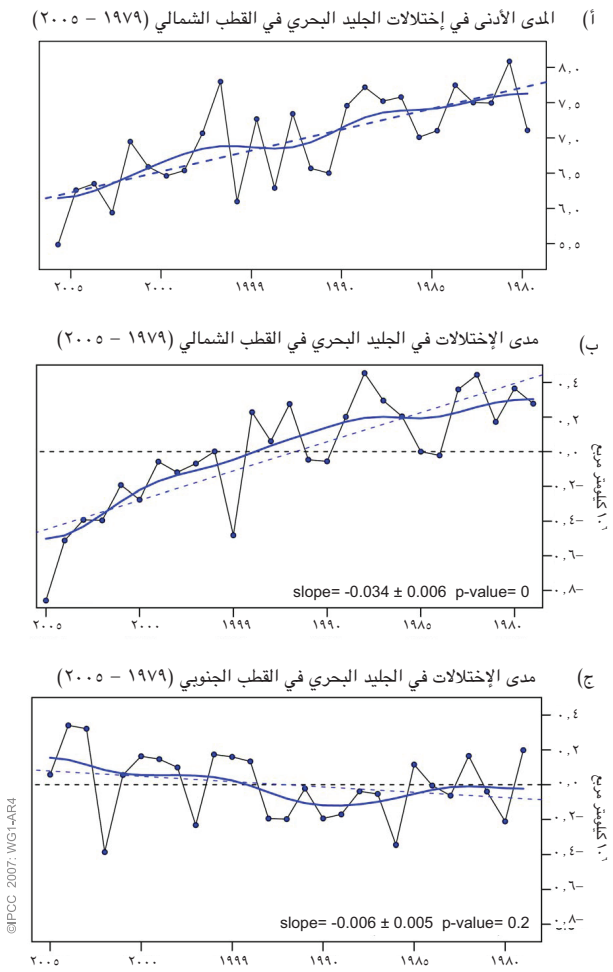
يغطي الجليد حالياً ١٠٪ من مساحة اليابسة، منه جزء ضئيل جداً خارج أنتاركتيكا وغرينلاند. كما يغطي ٧٪ تقريباً من المحيطات في المعدّل السنوي. في منتصف الشتاء، تغطي الثلوج ٤٩٪ تقريباً من مساحة اليابسة في النصف الشمالي من الكرة الأرضية. من ميزات الثلج والجليد المهمة بياض سطحها. بما أن سطوح الثلوج والجليد تعكس ٩٠٪ من إشعاع الشمس الوافد، فيما يعكس المحيط المفتوح أو الأراضي الحرجية حوالي ١٠٪ فحسب منها، تكون التغيّرات في غطاء الثلج والجليد آليات إستجابة هامة في التغيّر المناخي. بالإضافة إلى ذلك، إن الثلج والجليد

التغيّرات في الغطاء الثلجي



الرسم ١٢. (أعلى) المنطقة المغطاة بالثلج في النصف الشمالي لآذار / مارس – نيسان / أبريل من مؤشر غطاء الثلج (قبل ١٩٧٢) من المواقع وبيانات الأقمار الصناعية (خلال العام ١٩٧٢ وبعده). تظهر التموجات تغيّرات عقدية (انظر الوثيقة A.3) مع نطاق البيانات بين ٥ و٩٥٪ بالأصفر. (أسفل) التغيّرات في توزيع الغطاء الثلجي في آذار / مارس – نيسان / أبريل بين فترات ماضية (١٩٦٧– ١٩٨٧) ولاحقة (١٩٨٨–٢٠٠٤) من قياسات الأقمار الصناعية (في نسبة التغطية). تظهر الألوان الداكنة المناطق حيث تراجع الغطاء الثلجي. تظهر التموجات الحالية خطوط تساوي درجة الحرارة لآذار / مارس – نيسان / أبريل بلغت ٠ و٥ درجة مئوية من العام ١٩٦٧ إلى العام ٢٠٠٤، من بيانات وحدة الأبحاث المناخية. يرصد التدني الأكبر خطوط تساوي درجات الحرارة البالغة ٠ و٥ درجة، ما يعكس الإستجابة القوية بين الثلوج والحرارة. {الرسم ٢,٤، ٣,٤}

التغيّرات في إمتداد البحر



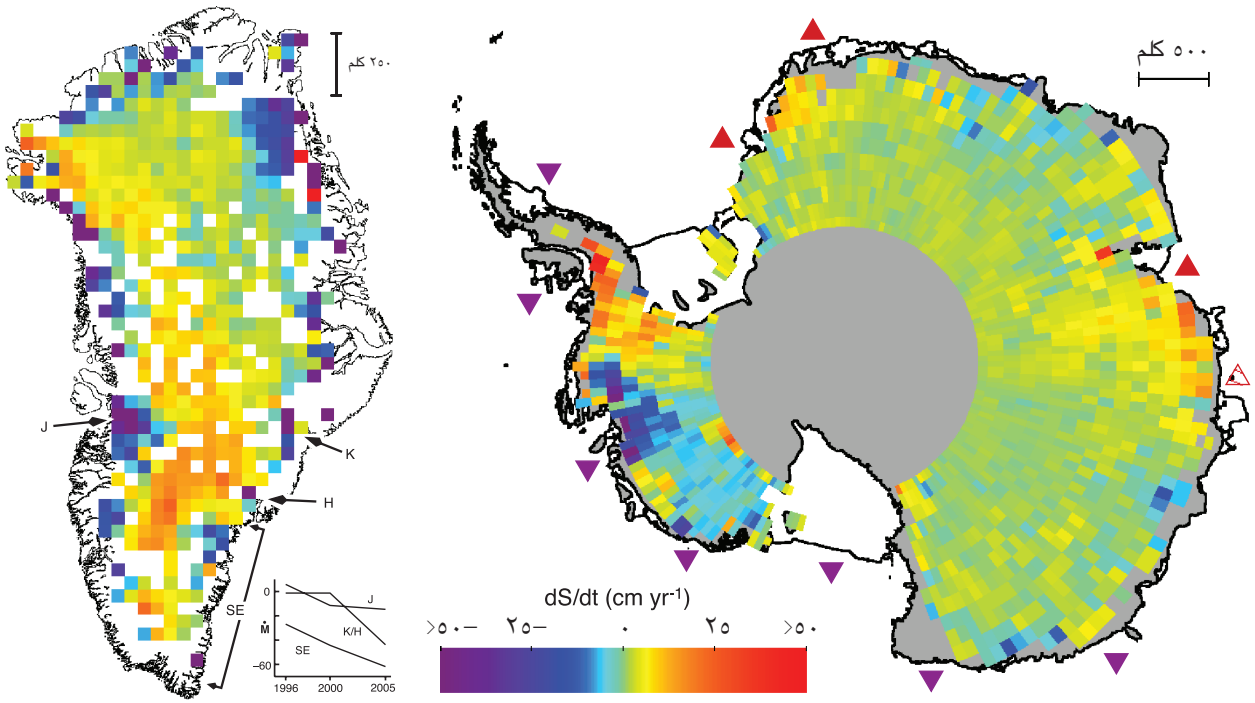
الرسم ١٣. (أ) مدّ الجليد البحري الأدنى في القطب الشمالي (ب) الإختلالات في مد الجليد البحري الأدنى في القطب الشمالي (ج) الإختلالات في مدّ الجليد البحري الأدنى في أنتاركتيكا خلال الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٧٩–٢٠٠٥. تشير الرموز إلى الأرقام السنوية فيما تظهر التموجات الزرقاء التغيّرات العقدية (انظر الوثيقة A.3) تشير الخطوط المخرطة إلى إتّجاه خطّي. (أ) تظهر النتائج إتجاهاً خطيّاً بلغ –٦٠ ± ٢٠ x ١٠٣ كيلومتراً مربعاً في السنة، أو حوالي –٧,٤٪ للعقد. (ب) بلغ التوجه الخطي –٣٣ ± ٧,٤ x ١٠٣ كيلومتراً مربعاً في العام (موازية لحوالي – ٢,٧٪ في العقد) وهو هام في نطاق الثقة ب ٩٥٪. (ج) تظهر النتائج في أنتاركتيكا توجهاً إيجابياً صغيراً بلغ ٥,٦ ± ٩,٢ x ١٠٣ كيلومتراً مربعاً في العام وهو غير هام إحصائياً. {الرسم ٨,٤، ٩,٤}

عازلان فاعلان. تكون الأرض المجمدة موسمياً أكثر توسعاً من غطاء الثلج، يعتبر وجودها هاماً لتقلّبات الطاقة والرطوبة. لذلك تؤدي السطوح المجلدة أدواراً هامة في آليات الطاقة والمناخ. {٤,١}

يخزن الغلاف الجليدي حوالي ٧٥٪ من المياه العذبة في العالم. على المستوى الإقليمي، تؤدي التغيّرات في الكتلة الجليدية الجبلية، والأنهر جليدية والقلنسوات الجليدية الصغيرة دوراً أساسياً في توفر المياه العذبة. بما أن الجليد يتحول إلى ماء سائل في درجات حرارة معيّنة، يكون الجليد عنصراً من النظام المناخي يمكن أن يخضع لتغيّر حاد بعد إحترارٍ كافٍ. توسعت مشاهدات التغيّر في الجليد وتحليلاته وتحسنت منذ تقرير التقييم الثالث، ومن بينها تقلّص حجم الأنهر جليدية، وتراجع الغطاء الثلجي، والتغيّرات في التربة الصقيعية، والتراجع في اتساع الجليد في بحر القطب الشمالي، وترقق صفيحة غرينلاند الجليدية في أطرافها بشكل يتخطى سماكتها الداخلية من تساقط الثلوج المتزايد، وتراجع الأراضي المتجلّدة موسمياً وغطاء البحيرات والأنهار. وباتت تسمح هذه بتحسين فهم كيفية تغيّر الغلاف الجليدي، ومن بينها مساهمته بالتغيّرات الحالية في مستوى البحر. يركز هذا التقرير على المرحلة الممتدة من العام ١٩٦١ حتى اليوم ومن العام ١٩٩٣ حتى اليوم، نظراً لتوفر بيانات قياس حجم الجبال الجليدية المأخوذة على نحو مباشر، ومشاهدات قياس إرتفاع الصفائح الجليدية. {٤,١}

تراجع الغطاء الثلجي في معظم المناطق خاصةً في الشتاء. تراجع الغطاء الثلجي في النصف الشمالي من الكرة الأرضية الخاضع لمراقبة الأقمار الصناعية بين العامين ١٩٦٦ و٢٠٠٥ كل شهر باستثناء تشرين الثاني / نوفمبر وكانون الأول / ديسمبر، مع تراجع في ٥٪ من المعدّل السنوي في نهاية الثمانينيات. (انظر الملخّص الفني، الرسم ١٢) في النصف الجنوبي من الكرة الأرضية، تظهر البيانات الطويلة القليلة أو الوكلاء في معظم الحالات تراجعاً أو عدم تغيّر في الأعوام الأربعين

معدّلات تغيّر إرتفاع السطح الملحوظة



الرسم ١٤. معدّلات التغيّر في إرتفاع سطح الأرض الحديث في غرينلاند (اليسار، ١٩٨٩–٢٠٠٥) وأنتاركتيكا (اليمين، ١٩٩٢– ٢٠٠٥). تشير المناطق الحمراء إلى إرتفاع في السطح والزرقاء إلى تدنٍ في السطح، الذي يشير إلى إزدياد الكتلة الجليدية أو فقدانها في الموقع، على الرغم من أن التغيّرات على مر الوقت في إرتفاع القاعدة الصخرية والكثافة القريبة من السطح هامة جداً. في غرينلاند، تظهر الأنهر جليدية السريعة الترقق وهي كتل Jakobshavn (J), Helheim (H) Kangerdlugssuaq (K) والمناطق على الشاطئ الشرقي الجنوبي، مع توازن الكتلة المقدر مقابل الوقت (مع الجمع بين K و H، في Gt في العام الواحد، مع أرقام سلبية تشير إلى فقدان الكتلة من الصفيحة الجليدية إلى المحيط). بالنسبة إلى أنتاركتيكا، تظهر الرفوف الجليدية المقدر أنها تسمك او تترقق بأكثر من ٣٠ سنتيمتراً في العام الواحد من خلال المثلثات الأرجوانية (الترقق) والمثلثات الحمراء (السماكة) متوجهة نحو البحر من الرفوف الجليدية الملائمة. {الرسم ٤,١٧، ٤,١٩}

الماضية أو أكثر. يرتبط إتساع الغطاء الثلجي في النصف الشمالي من الكرة الأرضية خلال نسيان / أبريل بدرجات الحرارة في الشهر نفسه التي تتراوح ما بين 40°N و60°N ما يعكس الإستجابة بين الثلج ودرجات الحرارة. {٤,٢}

تم توثيق تراجع في الكتلة الثلجية في عدة مناطق في العالم بناءً على سلسلات زمنية سنوية من مقابل المياه من الثلج الجبلي وعمق الثلوج. يمكن أن تكون الثلوج الجبلية حساسة تجاه التغيّرات البسيطة في الحرارة خاصة في مناطق المناخ المعتدل، حيث يرتبط الإنتقال من المطر إلى الثلج عامة وعن كثب بإرتفاع مستوى التجليد. يزداد التراجع في الكتلة الثلجية الجبلية في غرب أميركا الشمالية وفي جبال الألب السويسرية في الإرتفاعات الأدنى والأكثر دفئاً. تراجع مقابل الثلوج الجبلية من المياه منذ العام ١٩٥٠ في ٧٥٪ من محطات الرصد في غرب شمال أميركا. كما تراجع عمق الثلوج الجبلية في الألب وجنوب شرق أستراليا. لكن المشاهدات المباشرة لعمق الثلج تبقى محدودة جداً لتحديد التغيّرات في الأنديز، إلا أن قياسات درجات الحرارة تشير إلى أن إرتفاع تساقط الثلوج (فوق خط الثلوج) قد إزداد في المناطق الجبلية في أميركا الجنوبية. {٤,٢}

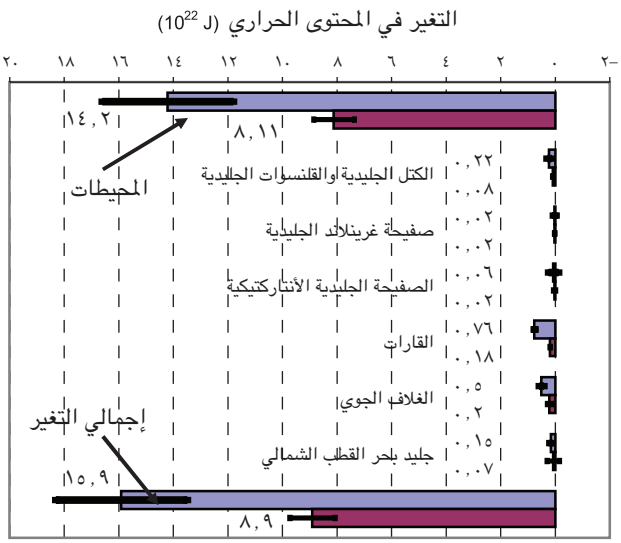
تظهر التربة الصقيعية والأرض المجلدة موسمياً في معظم الأراضي تغيّرات كثيرة في العقود الماضية. يمكن أن تؤثر التغيّرات في ظروف التربة الصقيعية في سيلان الأنهار، ووفرة المياه، وتبادل الكربون وإستقرار المناظر الطبيعية، وأن تسبب ضرراً للبنى التحتية. تم الإفادة عن إرتفاع في درجات الحرارة على أعلى طبقة التربة الصقيعية بمقدار ٣ درجات مئوية منذ الثمانينيات. كما تمت مشاهدة إحترار التربة الصقيعية مع نطاق متغيّر في المحيط القطب الشمالي، وسيبيريا، وهضبة التيبيت، وأوروبا. تتراجع قاعدة التربة الصقيعية بمعدّل يتراوح بين ٠,٠٤ متراً في العام الواحد في ألاسكا إلى ٠,٠٢ متراً في العام في هضبة التيبيت. {٤,٧}

تراجعت المنطقة القصوى التي تغطيها الأرض المتجلّدة موسمياً بمقدار ٧٪ تقريباً في النصف الشمالي من الكرة الأرضية خلال النصف الثاني من القرن العشرين، مع تراجع بلغ ١٥٪ في الربيع. تراجع عمقها الأقصى بحوالي ٠,٣ متراً في منطقة أوروبا وآسيا منذ منتصف القرن العشرين. بالإضافة إلى ذلك، إزداد عمق الأتربة الموسمية القصوى بحوالي ٠,٢ متراً في القطب الشمالي الروسي بين العامين ١٩٥٦ و١٩٩٠. {٤,٧}

يشير التوجه العام في جليد الأنهار والبحيرات في النصف الشمالي من الكرة الأرضية خلال الأعوام المئة والخمسين الماضية كمعدّل، إلى أن تاريخ التجليد بلغ لاحقاً معدّل ٥,٨ ± ١,٩ يوماً في القرن الواحد، فيما حدث تاريخ الإنفصال في وقت سابق بمعدّل ٦,٥ ± ١,٤ يوماً في القرن الواحد. وقد تم رصد تغيّر مكاني هام أيضاً، وأظهرت بعض المناطق توجهاً معاكساً. {٤,٣}

تقلّص معدّل إمتداد جليد بحر القطب الشمالي السنوي بحوالي ٢,٧ ± ٠,٦٪ في العقد الواحد منذ العام ١٩٧٨ بناءً على مشاهدات القمر الصناعي (انظر الملخّص الفني، الرسم ١٣). يكون تراجع الإمتداد في الصيف أكبر منه في الشتاء. يبلغ التراجع في الصيف معدّلاً أدنى وقدره ٧,٤ ± ٢,٤٪ في العقد الواحد. تشير البيانات الأخرى إلى أن التراجع في الصيف بدأ في العام ١٩٧٠ تقريباً. تشير مشاهدات مشابهة في أنتاركتيكا إلى تغيّر أكبر خلال السنة الواحدة، لكن لا تلحظ توجهات متناسقة خلال فترة المشاهدات الساتلية. على عكس التغيّرات في الجليد القاري كالصفائح الجليدية والأنهر جليدية، لا تساهم التغيّرات في الجليد البحري مباشرةً في تغيّر مستوى البحر (بما أن هذا الجليد يطوف أصلاً)، لكن يمكنه أن يساهم في التغيّرات في الملوحة من خلال توفير المياه العذبة. {٤,٤}

محتوى الطاقة في النظام المناخي



الرسم ١٥. تغيّر في محتوى الطاقة في عدة عناصر من نظام الأرض خلال فترتين (١٩٦١– ٢٠٠٣ و١٩٩٣ – ٢٠٠٣). تشير الخطوط الزرقاء إلى الفترة الممتدة بين العام ١٩٦١ والعام ٢٠٠٣ والخطوط الأخرى إلى الفترة الممتدة بين العامين ١٩٩٣ و٢٠٠٣. يعني التغيّر الإيجابي في الطاقة إزدياداً في الطاقة المخزنة (أي محتوى الحرارة في المحيطات، والحرارة الكامنة من حجم الجليد والبحر المتراجع، والمحتوى الحراري في المحيطات باستثناء المحتوى الكامن من تغيّرات التربة الصقيعية والحرارة الكامنة والطاقة المرجّحة في الغلاف الجوي). كل تقديرات الخطأ هي نطاقات الثقة ب ٩٠٪. لا تتوفر تقديرات للثقة لجهة ربح الحرارة القارية. لقد قيست بعض النتائج من النتائج المنشورة عن الفترتين. {الرسم ٥,٤}

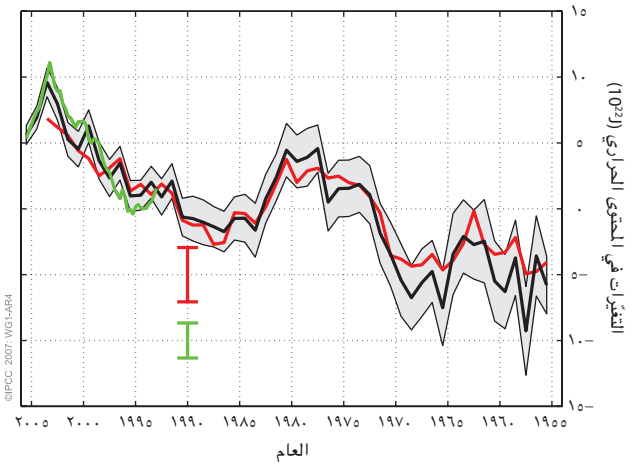
خلال القرن العشرين، عرفت الأنهر جليدية والقلنسوات الجليدية خسارات واسعة النطاق في كتلتها وساهمت في إرتفاع مستوى البحر. قدّرت خسارة الأنهر جليدية والقلنسوات الجليدية (باستثناء تلك الموجودة حول صفائح غرينلاند وأنتاركتيكا الجليدية) ب ٠,٥٠ ± ٠,١٨ ملم في العام الواحد في مقابل مستوى البحر بين العامين ١٩٦١ و٢٠٠٣، و٠,٧٧ ± ٠,٢٢ ملم في العام الواحد في مقابل مستوى البحر بين العامين ١٩٩١ و٢٠٠٣. ومن المرجّح أن تكون خسارة الأنهر جليدية في أواخر القرن العشرين إستجابة لإحترار ما بعد العام ١٩٧٠. {٤,٥}

تظهر المشاهدات الأخيرة تغيّرات سريعة في تدفق الجليد في بعض المناطق، ما يساهم في إرتفاع مستوى البحر ويشير إلى أن دينامية حركة الجليد قد تكون عاملاً أساسياً في إستجابات الرفوف الثلجية، والأنهر جليدية الشاطئية والصفائح الجليدية للتغيّرات المناخية. إرتبط ترقق الرفوف الجليدية أو فقدانها في بعض المناطق القريبة من الشاطئ في غرينلاند وشبه الجزيرة الأنتاركتيكية وغرب أنتاركتيكا بالتدفق المتسارع للأنهر جليدية القريبة والتيارات الجليدية ما يشير إلى أن الرفوف الجليدية (ومن بينها الرفوف الجليدية القصيرة البالغة مساحتها كيلومترات أو عشرات الكيلومترات) قد تؤدي أدواراً أكبر في تحقيق إستقرار الحركة الجليدية والحدّ منها. كما يبدو أن درجات الحرارة في الغلاف الجوي والمحيطات تساهم في التغيّرات الملحوظة. من المرجّح جداً أن يكون للإحترار الصيفي الواسع في منطقة شبه جزيرة أنتاركتيكا دوراً في إنفصال رف لارسن الجليدي the Larsen B Ice Shelf السريع المتأتي في العام ٢٠٠٢ بسبب الذوبان المتسارع في الصيف الذي حفر أثلاماً. لا تلتقط النماذج بدقة كل العمليات الفيزيائية التي يبدو أنها مرتبطة بإنشقاق الجبال الجليدية (كما في حالة إنشقاق لارسن ب). {٤,٦}

٣,٣ تغيّرات في المحيط: السجلّات الآلية

يضطلع المحيط بدور هام في المناخ والتغيّر المناخي. يتأثر المحيط بتبادلات الكتلة والطاقة والزخم مع الغلاف الجوي. تبلغ قدرته الحرارية ١٠٠٠ مرة قدرة الغلاف الجوي، لذلك يكون امتصاص المحيط الصافي للحرارة أكبر بعدة أضعاف من الغلاف الجوي (انظر الملخّص الفني، الرسم ١٥). يمكن إعتماد المشاهدات العالمية للحرارة التي تمتصها المحيطات على أنها إختبار نهائي للتغيّرات في رصيد الطاقة العالمي. للتغيّرات في رصيد الطاقة التي تمتصها الطبقات العليا للمحيط دور هام

محتوى المحيطات الحراري العالمي (٠– ٧٠٠ م)



الرسم ١٦. سلسلات زمنية للمحتوى الحراري في المحيطات (10^{22} J) لطبقة ٠ حتى ٧٠٠ متر. إن الخطوط المختلفة الألوان هي تحليلات مستقلة للبيانات المحيطية. تشير التموجات السوداء والحمراء إلى التحوّل من معدّل ١٩٦١–١٩٩٠ وتشير التموجات الخضراء الأصغر إلى تحوّل عن معدّل التموجات السوداء للفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٩٣–٢٠٠٣. تشير الظلال الرمادية إلى نطاق عدم اليقين ب ٩٠٪ للتموج الأسود وتشير خطوط الخطأ إلى االتموّجين الأخيرين. {الرسم ٥,١}

أيضاً في التغيّرات المناخية في الفترات الموسمية وبين السنين، على غرار النينيو. كما للتغيّرات في إنتقال الحرارة ودرجات حرارة سطح البحر تأثيرات هامة في عدد من المناخات الإقليمية في العالم. تعتمد الحياة في البحر على الحالة الحيوية الجيولوجية الكيميائية للمحيط وتؤثر عليه التغيّرات في حالته الفيزيائية ودورانه. كما يمكن أن تؤثر التغيّرات في كيمياء المحيط الجيولوجية الحيوية على النظام المناخي، على سبيل المثال، من خلال التغيّرات في امتصاص الغازات النشطة إشعاعياً كثاني أكسيد الكربون أو إنبعاثها. {٥,١، ٧,٣}

تحدث التغيّرات في معدّل مستوى البحر العالمي جزئياً بسبب التغيّرات في الكثافة، من خلال التوسّع الحراري أو التقلّص الحراري لحجم المحيط. كما للتغيّرات المحلية في مستوى البحر عنصر مرتبط بالكثافة بسبب تغيّرات الحرارة والملوحة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يقوم تبادل المياه بين المحيطات والخزانات الأخرى (على مثال الصفائح الجليدية، والأنهر جليدية الجبلية، وخزانات المياه الجوفية والغلاف الجوي) بتغيير كتلة المحيط وتساهم بالتالي في تغيّرات مستوى المحيط. لا تحدث التغيّرات في مستوى البحر بشكل متناغم جغرافياً إذ أن العمليات على غرار التغيّرات في دوران المحيط غير متناسقة على الكرة الأرضية (انظر الملخّص الفني، الرسم ٤). {٥,٥}

يمكن أن تكون المتغيّرات المحيطية مفيدة لرصد التغيّر المناخي،

لا سيما تغيّرات الحرارة والملوحة تحت طبقة السطح حيث تكون المتغيّرات أصغر ونسبة الضجة – الدليل أعلى. قدمت المشاهدات المحللة منذ تقرير التقييم الثالث براهين جديدة للتغيّرات في محتوى المحيط الحراري العالمي والملوحة، ومستوى البحر، ومساهمات التوسع الحراري في إرتفاع مستوى البحر، وتطور الكتلة المائية والدورات الحيوية الجيولوجية الكيميائية. {٥,٥}

٣,٣,١ التغيّرات في محتوى المحيط الحراري والدوران

يشهد المحيط إحتراراً في العالم منذ العام ١٩٥٥، وشكّل خلال هذه المرحلة أكثر من ٨٠٪ من التغيّرات في محتوى الطاقة لنظام الأرض المناخي. يسمح إجمالي ٧,٩ مليون أسلوب عمودي ببناء سلسلات زمنية عالمية محسّنة (انظر الملخّص الفني، الرسم ١٦). قام عدد من المحللين المستقلين بمحاكاة تحليلات رصيد المحيطات الحراري العالمي وهي تتماشى مع المنهجية المستخدمة، وتتطلب تحديدات تغطية البيانات .

إلا أن عدم ملاءمة توزيع البيانات (خاصة التغطية في المحيط الجنوبي وجنوب الهادئ) قد تساهم في التغيّرات الواضحة بين العقود في المحتوى الحراري. بين العامين ١٩٦١ و٢٠٠٣، إمتصت طبقة المحيط التي تتراوح بين ٠ و ٣٠٠٠ م حوالي ١٤,١ ×١٠٢٢ جول، ما يوازي معدّل إحترار يبلغ ٠,٢ واط في المتر المربع الواحد (لكل وحدة مساحة من سطح الأرض). بين العامين ١٩٩٣ و٢٠٠٣، كان معدّل الإحترار المناسب في طبقة المحيط الأعلى أي بين ٠ و ٧٠٠ م أعلى وبلغ حوالي ٠,٥ ± ٠,١٨ واط للمتر المربع الواحد. مقارنة بالفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٦١ – ٢٠٠٣، شهدت الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٩٣– ٢٠٠٣ معدّلات إحترار عالية، لكن في فترة ٢٠٠٤ و٢٠٠٥، شهدت تبريداً مقارنة بالعام ٢٠٠٣. {٥,١– ٥,٣}

ينتشر الإحترار فوق الطبقة ال٧٠٠ م من المحيط في العالم. يشهد المحيط الأطلسي إحتراراً جنوب خط 45°N. ويزداد الإحترار في حوض المحيط الأطلسي أكثر منه في المحيط الهادئ والمحيط الهندي والمحيطات الجنوبية، بسبب خلية الدوران العميقة في شمال الأطلسي. لم يُظهر الدوران العميق في النصف الجنوبي إشارات على التغيّر بناءً على البيانات المتوفرة. إلا أن الطبقات العليا للمحيط الجنوبي تساهم كثيراً في الإحترار العالمي. يشهد بحران على الأقل في خطوط العرض شبه المدارية (المتوسط وبحر اليابان / شرق الصين) إحتراراً. فيما يتوجه العالم نحو الإحترار، شوهدت تغيّرات هامة بين العقود في التسلسلات الزمنية العالمية، وتشهد مناطق كبيرة تبريداً في المحيطات. بردت أجزاء من شمال الأطلسي وشمال الهادئ والهادئ الإستوائي خلال الأعوام الخمسين الماضية. تظهر التغيّرات في المحيط الهادئ أنماطاً مكانية مشابهة للنينو مرتبطة جزئياً بالتذبذب العقدي في الهادئ. {٥,٢، ٥,٣}

تظهر أجزاء من التقلبي الأطلسي الطولي تغيّرات عقدية هامة، لكن البيانات لا تدعم توجهاً متناسقاً في الدوران. {٥,٣}

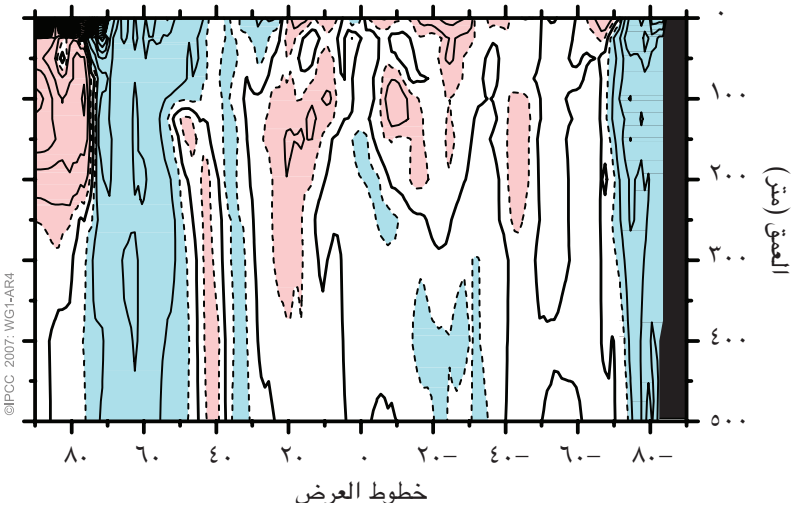
٣,٣,٢ التغيّرات في ملوحة المحيطات وكيميائها الجيولوجية الإحيائية

أدّى امتصاص الكربون البشري المنشأ منذ العام ١٧٥٠ إلى إزدياد حموضة المحيط، وتدني في درجة حموضة سطحه بلغ ٠,١ وحدة[٧]. يغير إمتصاص المحيط لثاني أكسيد الكربون من توازنه الكيميائي. يشكّل ثاني أكسيد الكربون المذوّب حمضاً ضعيفاً، فتنخفض درجة الحموضة فيما يرتفع ثاني أكسيد الكربون المذوّب (أي أن المحيط يصبح أكثر حموضةً). يتم إحتساب إجمالي درجة الحموضة من تقديرات إمتصاص الكربون البشري المنشأ ونماذج بسيطة للمحيطات. تظهر المشاهدات المباشرة لدرجة الحموضة في المحطات المتوفرة خلال الأعوام العشرين الماضية توجهات في تدني مستوى الحموضة، بمعدّل ٠,٠٢ وحدة في العقد الواحد. يؤدي إنخفاض درجة حموضة المحيطات إلى إنخفاض العمق الذي يذوب فيه كربونات الكاسليوم وإلى إرتفاع حجم المحيط غير المشبع بشكل كافٍ في ما يخص معدن الأراغونيت (وهو نوع شبه مستقر من كاربونات الكالسيوم) والكالسيت، وتستخدمها المخلوقات البحرية لتكوين صفدها. كما يؤدي إنخفاض درجة حموضة سطح المحيط وإرتفاع حرارة السطح إلى تخفيض قدرة المحيط على عزل ثاني أكسيد الكربون ومعدّل امتصاص المحيطات فائض ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي. {٥,٤، ٧,٣}

إنخفض تركيز الأكسيجين في الثيرموكلاين الخاضع للتهوئة (بين ١٠٠ و١٠٠٠م) في معظم أحواض المحيطات بين العامين ١٩٧٠ و١٩٩٥. قد تعكس هذه التغيّرات معدّلاً محدوداً من التهوئة مرتبط بإحترار الطبقات العليا و/أو التغيّرات في النشاط الإحيائي. {٥,٤}

[٧] الملوحة هي قياس تركيز أيونات الهيدروجين ووحدتها pH حيث $pH = -\log(H^+)$ يساوي إنخفاض درجة واحدة في pH (درجة الحموضة) إرتفاعاً بعشرة أضعاف في تركيز الهيدروجين أو الحموضة.

التوجهات الخطيّة لمتوسط الملوحة وفقاً للمناطق (١٩٥٥ – ١٩٩٨)



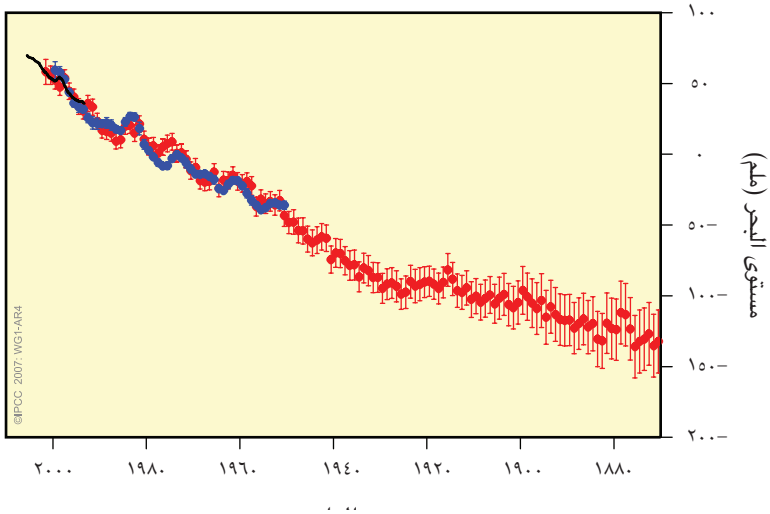
الرسم ١٧. توجهات خطيّة (١٩٥٥–١٩٩٨) للملوحة المتوسطة (مقياس الملوحة العملي) للمحيط العالمي. إن نطاق الحدود السوداء هو ٠,٠١ للعقد والخطوط المخرطة ± ٠,٠٠٥ في العقد. إن الخط الداكن والسميك هو حدود الصفر. تشير الظلال الحمراء إلى أرقام تساوي أو تتخطى ٠,٠٠٥ في العمق والظلال الزرقاء إلى أرقام تتساوى مع أو تكون أدنى من – ٠,٠٠٥ في العقد. {الرسم ٥,٥}

وتنتشر البراهين على التغيّرات في ملوحة المحيطات على مستوى الحركات الحلزونية والحوض خلال نصف القرن الماضي (انظر الملخّص الفني، الرسم ١٧)، بالإضافة إلى إزدياد ملوحة المياه القريبة من السطح في المناطق الأكثر عرضةً للتبخر في جميع الأحواض المحيطية. تؤدي هذه التغيّرات في الملوحة إلى تغيّرات في دورة المياه في المحيطات. في مناطق خطوط العرض العليا في كل من نصفي الكرة الأرضية، تظهر مياه السطح إنتعاشاً إجمالياً يتماشى مع بلوغ التهطال في هذه المناطق معدّلاً أعلى، على الرغم من إمكانية مساهمة أكبر في الجريان، وذوبان الجليد، والتدفّق والتغيّرات في الدوران الجنوبي. تتميز خطوط العرض شبه المدارية في النصفين من الكرة الأرضية بإزدياد في ملوحة طبقة الـ ٥٠٠ م العليا. كما تتناسق الأنماط مع تغيّر في دورة المياه على الأرض، خاصة تغيّرات التهطال وانتقال أكبر للمياه في الغلاف الجوي من خطوط العرض الدُنيا نحو خطوط العرض العليا ومن الأطلسي نحو الهادئ. {٥,٢}

٣,٣,٣ تغيّرات في مستوى البحر

بين العامين ١٩٦١ و٢٠٠٣، قدّر معدّل إرتفاع مستوى البحر العالمي من بيانات مقياس المد والجزر بمقدار ١,٨ ± ٠,٥ ملم في العام الواحد (انظر الملخّص الفني، الرسم ١٨). بهدف النظر في رصيد مستوى البحر، تتوفر أفضل التقديرات ويتراوح نطاق الثقة ما بين ٥ و٩٥٪ لجميع مساهمات جليد اليابسة. بلغ معدّل مساهمة التوسع الحراري في إرتفاع مستوى البحر خلال هذه المرحلة ٠,٤٢ ± ٠,١٢ ملم في العام الواحد، مع تغيّرات عقدية هامة، فيما تقدر مساهمة الأنهر جليدية والقلنسوات الجليدية والصفائح الجليدية بمقدار ٠,٧ ± ٠,٥ ملم في العام الواحد (انظر الملخّص الفني، الجدول ٣). تبلغ إذاً القيمة الإجمالية لهذه المساهمات المقدرة المرتبطة بالمناخ خلال العقود الأربعة الماضية ١,١ ± ٠,٥ ملم في العام الواحد، أي أقل من أفضل تقدير من مشاهدات مقياس المد

متوسط مستوى البحر العالمي



الرسم ١٨. المعدّلات السنوية لمتوسط مستوى البحر العالمي بناءً على إعادة بناء مستوى البحر منذ العام ١٨٧٠ (الأحمر)، وقياسات المد والجزر منذ العام ١٩٥٠ (الأزرق) وقياس الإرتفاع بالأقمار الصناعية منذ العام ١٩٩٢ (الأسود). تذكر الوحدات بالميليمتر نسبة لمتوسط ١٩٦١ حتى ١٩٩٠. تعطى خطوط الأخطاء على شكل نطاق ثقة بمقدار ٩٠٪. {الرسم ٥,١٣}

الجدول ٣. مساهمات في إرتفاع مستوى البحر بناءً على مشاهدات (الأعمدة لجهة اليسار) مقارنة بالنماذج المستخدمة في هذا التقييم (الأعمدة لجهة اليمين) (انظر القسم ٩,٥ والمرفقات ١٠,١ لمزيد من التفاصيل). تمثل الأرقام الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٩٣ و٢٠٠٣ والعقود الأربعة الماضية، ومن بينها الإجمالي الملحوظ.

	إرتفاع مستوى مشروع البحر ($mm\ yr^{-1}$)			
	١٩٦١–٢٠٠٣		١٩٩٣–٢٠٠٣	
مصادر إرتفاع مستوى البحر	المشاهدات	النماذج	المشاهدات	النماذج
التوسع الحراري	٠,٤٢ ± ٠,١٢	٠,٥ ± ٠,٢	١,٦ ± ٠,٥	١,٥ ± ٠,٧
الأنهر جليدية والقلنسوات الجليدية	٠,٥٠ ± ٠,١٨	٠,٥ ± ٠,٢	٠,٧٧ ± ٠,٢٢	٠,٧ ± ٠,٣
صفيحة غرينلاند الجليدية	٠,٠٥ ± ٠,١٢[أ]		٠,٢١ ± ٠,٠٧[أ]	
صفيحة أنتاركتيكا الجليدية	٠,١٤ ± ٠,٤١[أ]		٠,٢١ ± ٠,٣٥[أ]	
مجموع المساهمات المناخية الفردية في إرتفاع مستوى البحر	١,١ ± ٠,٥	١,٢ ± ٠,٥	٢,٨ ± ٠,٧	٢,٦ ± ٠,٨
إرتفاع مستوى البحر الملحوظ	١,٨ ± ٠,٥ (مقياس المد والجزر)		٣,١ ± ٠,٧ (قياس الإرتفاع بالأقمار الصناعية)	
تزايد نشاط الأعاصير المدارية القوية	٠,٧ ± ٠,٧	٠,٣ ± ١,٠	٠,٣ ± ١,٠	
إرتفاع وتيرة مستويات مياه البحر العالية جداً (باستثناء أمواج المدّ العملاقة) (ج)	٤,٠	٢,٤ – ٦,٤	٠,٢٦ – ٠,٥٩	

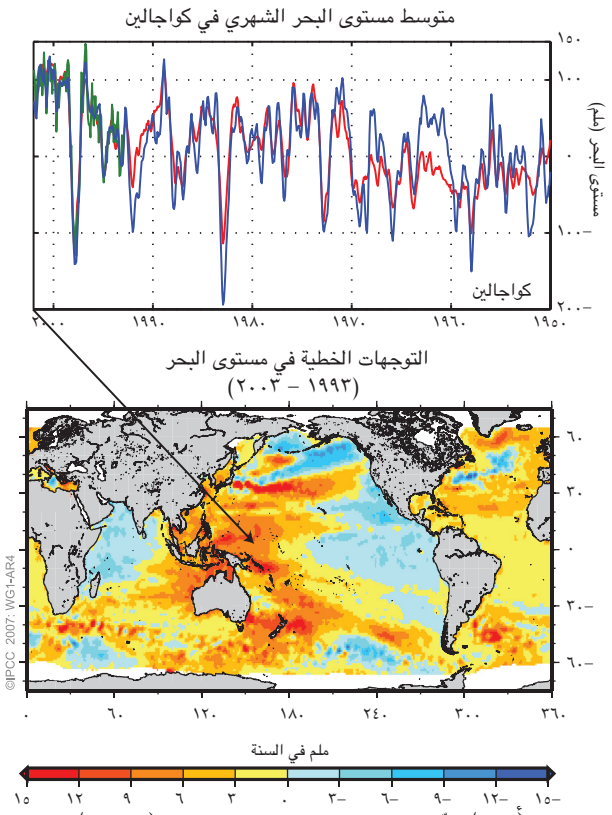
ملاحظات:
تعتمد على الملاحظات (انظر القسم ٩,٥)

والجزر (شبيهة بالإختلافات المذكورة في تقرير التقييم الثالث). لذلك لم يحسم رصيد مستوى البحر بين العامين ١٩٦١ و٢٠٠٣ بشكل مرضٍ. {٤,٨، ٥,٥}

بلغ المعدّل العالمي لإرتفاع مستوى البحر وفقاً لقياس الإرتفاع بالقمر الصناعي TOPEX/Poseidon بين العامين ١٩٩٣ و٢٠٠٣ مقدار ٣,١ ± ٠,٧ ملم في العام الواحد. إن هذا المعدّل الملحوظ للفترة الحديثة يقترب من الإجمالي المقدّر البالغ ٢,٨ ± ٠,٧ ملم في العام الواحد لمساهمات المرتبطة بالمناخ بسبب التوسع الحراري (١,٦ ± ٠,٥ ملم في العام الواحد) والتغيّرات في جليد اليابسة (١,٢ ± ٠,٤ ملم في العام الواحد). لذلك، تحسّن فهم الرصيد بشكل ملحوظ خلال هذه الفترة، وتشكل مساهمات المناخ العوامل الأهم في رصيد مستوى البحر (الذي حسم ضمن الأخطاء المعروفة). ما زال غير واضحٍ إذا ما كان المعدّل المتسارع بين العامين ١٩٩٣ و٢٠٠٣ مقارنة بما بين العامين ١٩٦١ و٢٠٠٣ يعكس التغيّرات العقدية أو إرتفاعاً في التوجه على المدى الأطول. تشير سجلّات قياس المدّ والجزر إلى معدّلات أسرع شبيهة بتلك الملحوظة بين العامين ١٩٩٣ و٢٠٠٣ قد حدثت في عقود أخرى منذ العام ١٩٥٠. {٥,٥، ٩,٥}

ومن الثقة العالية أن معدّل إرتفاع مستوى البحر أصبح أسرع بين منتصف القرن التاسع عشر ومنتصف القرن العشرين وفقاً لبيانات قياس المد والجزر والبيانات الجيولوجية. توفر إعادة

أنماط تغيّر مستوى البحر



الرسم ١٩. (أعلى) تموّج متوسط مستوى البحر الشهري (ميليمتر) من العام ١٩٥٠ حتى العام ٢٠٠٠ في كواجالين (N, 167°44′E′8°44). يظهر مستوى البحر الملحوظ (من قياسات المد والجزر) بالأزرق، مستوى البحر بعد إعادة البناء بالأحمر، وقياسات الإرتفاع بالأقمار الصناعية بالأخضر. لقد أزيلت المؤشرات السنوية وشبه السنوية من كل نطاق زمني وتمت مساواة قياسات المد والجزر. (أسفل) التوزيع الجغرافي للتوجهات الخطية القصيرة الأمد في متوسط مستوى البحر من العام ١٩٩٣ حتى العام ٢٠٠٣ (ميليمتر في السنة الواحدة) بناءً على قياس الإرتفاع TOPEX/Poseidon. {الرسم ٥,١٥، ٥,١٨}

الإطار ٤: مستوى البحر

تحدّد عدة عناصر تعمل على نطاق واسع من الفترات الزمنية مستوى البحر على الشاطئ: الساعات والأيام (المدّ والطقس)، الأعوام والألفيات (المناخ) وأطول. يمكن لليابسة أن ترتفع وتنخفض ويجدر أخذ حركات اليابسة الإقليمية هذه بعين الإعتبار عند إستخدام قياسات المد والجزر لتقييم تأثير تغيّر مناخ المحيطات على مستوى البحر على الشاطئ. تشير قياسات المد والجزر على الشاطئ إلى إرتفاع معدّل مستوى البحر العالمي خلال القرن العشرين. منذ بداية التسعينيات، راقبت الأقمار الصناعية بإستمرار وبتغطية شبه عالمية مستوى البحر. تتلاقي بيانات الأقمار الصناعية وبيانات المد والجزر على نطاق واسع من الأمكنة وتظهر أن معدّل مستوى البحر إرتفع بإستمرار خلال هذه الفترة. تظهر تغيّرات في مستوى المحيط فروقات جغرافية بسبب عدة عوامل، ومنها توزع التغيّرات في حرارة المحيطات، والملوحة، ودوران الرياح والمحيطات. يتأثر مستوى البحر الإقليمي بفروقات المناخية على فترات زمنية أقصر ومرتبطة مثلاً بالنينيو والتذبذب الشمال الأطلسي، ما يؤدي إلى تغيّرات إقليمية سنوية قد تفوق التوجه العالمي وقد يفوقها.

بناءً على مشاهدات درجات حرارة المحيطات، ساهم التوسع الحراري لمياه البحر في إرتفاع مستوى البحر خلال العقود الأخيرة بشكل هام. تتماشى النماذج المناخية مع مشاهدات المحيطات وتشير إلى أن التوسع الحراري من المفترض أن يستمر في المساهمة في إرتفاع مستوى البحر خلال الأعوام المئة المقبلة. بما أن درجات حرارة المحيطات العميقة تتغيّر ببطء، سوف يستمر التوسع الحراري لقرون عدة حتى ولو تم التوصل إلى إستقرار تركيزات غازات الدفيئة في الغلاف الجوي.

كما يرتفع معدّل مستوى البحر العالمي وينخفض عندما تنتقل المياه من اليابسة إلى المحيط أو من المحيط إلى اليابسة. قد تساهم بعض الأنشطة البشرية بتغيّر في مستوى البحر، خاصة من خلال إستخراج المياه الجوفية وبناء الخزانات. إلا أن خزان المياه العذبة الأهم على اليابسة هو المياه المخزنة في الجبال الجليدية والقلنسوات الجليدية والصفائح الجليدية. إنخفض مستوى البحر أكثر من ١٠٠م خلال الفترات الجليدية إذ أن الصفائح الجليدية غطت أجزاء كبيرة من قارات النصف الشمالي من الكرة الأرضية. يساهم التراجع الحالي في الجبال الجليدية والقلنسوات الجليدية مساهمة هامة في إرتفاع مستوى البحر. ومن المتوقع أن يستمر خلال الأعوام المئة المقبلة. ومن المتوقع أن تتراجع مساهمتها في القرون التالية فيما يتقلص حجمها كخزّان مياه عذبة.

تحتوي صفيحة غرينلاند الجليدية وصفيحة أنتاركتيكا الجليدية على كمية أكبر من الجليد، وقد تساهم مساهمات كثيرة خلال قرون عديدة. خلال السنوات الماضية، شهدت صفيحة غرينلاند الجليدية ذوباناً أكبر، ومن المتوقع أن يستمر. في المناخ الأكثر دفئاً، تشير النماذج إلى أن الصفائح الجليدية قد تجمع ثلوجاً أكثر، ما يؤدي إلى مستوى بحر أكثر إنخفاضاً. لكن، في الأعوام الأخيرة، تفوّق على هذا الإتجاه تدفق الجليد المتسارع الملحوظ في بعض المناطق الهامشية من الصفائح الجليدية. ما زالت عمليات تدفّق الجليد المتسارع غير مفهومة كلياً، لكن قد تؤدي إلى إرتفاع إجمالي لمستوى البحر من الصفائح الجليدية في المستقبل.

تعود أهم تأثيرات مستوى البحر المرتبطة بالمناخ وبالطقس إلى حالات قصوى على فترات زمنية تتراوح بين الأيام والساعات، مرتبطة بالأعاصير المدارية وعواصف خطوط العرض الوسطى. يؤدي الضغط الجوي المتدنّي والرياح العالية إلى إرتفاع المد بسبب العواصف، أو المد العاصفي، وهي خطيرة عندما تصادف المد العالي. تتأثر التغيّرات في وتيرة حدوث مستويات البحر القصوى هذه بالتغيّرات في معدّل مستوى البحر وبالظواهر المناخية التي تسبب الحالات المتطرّفة. {٥,٥}

تركيب حديثة لتغيّر مستوى البحر في العام ١٨٧٠ بإستخدام أفضل سجلّات المد المتوفرة، ثقة عالية بأن معدّل إرتفاع مستوى البحر أصبح أسرع بين العامين ١٨٧٠ و٢٠٠٠. تشير المشاهدات الجيولوجية إلى أن مستوى البحر لم يتغيّر كثيراً خلال السنوات الألفين الماضية، بمعدّلات تراوحت بين ٠,٠ و ٠,٢ ملم في العام الواحد. يروج إستخدام البيانات غير المباشرة والمستندة إلى مصادر لدراسة مستوى البحر في المتوسط ويشير إلى أن التذبذبات في مستوى البحر من السنة ١ إلى السنة ١٩٠٠ قبل المسيح لم تتخط $\pm$ ٠,٢٥ ملم. تشير البراهين المتوفرة إلى أن إرتفاع مستوى البحر الحديث بدأ بين منتصف القرن التاسع عشر ومنتصف القرن العشرين. {٥,٥}

توفّر قياسات الأقمار الصناعية الدقيقة منذ العام ١٩٩٣ براهين قاطعة على التغيّر الإقليمي في تغيّر مستوى البحر. في بعض

المناطق، بلغ معدّل إرتفاع مستوى البحر في هذه الفترة ٧ أضعاف المعدّل العالمي، فيما تراجع في مناطق أخرى. حدث أكبر إرتفاع في مستوى البحر منذ العام ١٩٩٢ في غربي المحيط الهادئ وشرق المحيط الهندي (انظر الملخّص الفني، الرسم ١٩). شهد كل المحيط الأطلسي تقريباً إرتفاعاً في مستوى البحر خلال العقد الماضي، فيما إنخفض مستوى البحر في شرق المحيط الهادئ وغرب المحيط الهندي. تتأثر هذه التغيّرات المكانية والزمنية في إرتفاع مستوى البحر الإقليمي جزئياً بأنماط تغيّر المحيط والغلاف الجوي ومن بينها النينو والتذبذب الشمال الأطلسي. إن نمط تغيّر مستوى البحر الملحوظ منذ العام ١٩٩٢ يشابه التوسّع الحراري المحتسب من تغيّر درجات حرارة المحيط، لكنه يختلف عن نمط التوسّع الحراري للسنوات الخمسين الماضية، ما يشير إلى أهمية التغيّر الإقليمي بحسب العقود. {٥,٥}

تشير المشاهدات إلى إرتفاع في المياه العالية القصوى على نطاق واسع منذ العام ١٩٧٥. إن السجلّات الأطول محدودة في المكان وعيّناتها غير كافية في الزمان، لذلك من غير الممكن إجراء تحليل شامل لكامل القرن العشرين. في عدة مواقع، كانت التغيّرات في الحالات

الجدول ٤. التوجهات الحديثة، تقييم التأثير البشري على التوجهات، وإسقاطات لأحداث المناخ وحالات الطقس المتطرّفة التي يظهر فيها توجّه ما من توجّهات القرن العشرين الملحوظة. تشير النجمة في عنوان العمود D إلى إستخدام دراسات رصد وبنسبة رسمية، مع حكم الخبراء لتقييم إحتمال تأثير بشري واضح. عندما لا تتوفر هذه، تعتمد تقييمات إحتمال التأثير البشري على نتائج النسبة للتغيّرات في متوسط المتغيّرات أو التغيّرات في المتغيّرات المرتبطة فيزيائياً و/ أو على التشابه النوعي للتغيّرات الملحوظة والمحاكاة، مع حكم خبير. {٣,٨، ٥,٥، ٩,٧، ١١,٢–١,٩١: الجدول ٣,٧، ٣,٨، ٣,٤، ٩,٤}

الظاهرة[أ] وتوجه النزعة	إحتمال حدوث هذا التوجه في أواخر القرن العشرين (خاصة بعد ١٩٦٠)	إحتمال المساهمة البشرية في هذا التوجه	D	إحتمال التوجه في المستقبل بناءً على ظهور التوقعات للقرن العشرين بإستخدام التقرير الخاص عن سيناريوهات الإنبعاثات [ب]
أيام وليالي أكثر دفئاً وعدد الأيام والليالي الحارة يرتفع فوق معظم مناطق اليابسة	مرجّح جداً[ج]	مرجّح [د]	*	مؤكد إفتراضياً [ه]
موجات حرّ. وتيرة مرتفعة في معظم الأراضي	مرجّح جداً[د]	مرجّح (الليالي) [ه]	*	مؤكد إفتراضياً [ه]
موجات الحرّ: إزدياد فوق معظم مناطق اليابسة	مرجّح	أكثر أرجحية منه إستبعاداً		مرجّح جداً
أحداث تهطال غزير. إزدیادها (أو نسبتها من إجمالي التهطال من الهطول الغزير) فوق معظم المناطق	مرجّح	أكثر أرجحية منه إستبعاداً		مرجّح جداً
إزدياد عدد المناطق التي يصيبها الجفاف	مرجّح في معظم المناطق منذ السبعينيات	أكثر أرجحية منه إستبعاداً	*	مرجّح
إزدياد في نشاط الأعاصير المدارية العنيفة	محتمل في معظم المناطق منذ السبعينيات	أكثر أرجحية منه إستبعاداً		مرجّح
إزدياد إرتفاع مستوى البحر الأقصى (باستثناء التسونامي) [و]	مرجّح	أكثر أرجحية منه إستبعاداً[ز]		مرجّح [ح]

الملاحظات:

[أ] راجع الجدول ٣,٧ للتفاصيل حول التحديد.

[ب] إن التقرير الخاص عن سيناريوهات الإنبعاثات ملخّص في إطار في نهاية الملخّص لواضعي السياسات.

[ج] إنخفاض في عدد الأيام والليالي الباردة (١٠٪ الأكثر برداً).

[د] إزدياد في عدد الأيام والليالي الحارة (١٠٪ الأكثر حراً).

[ه] إحترار الليالي/ الأيام الأقصى في كل سنة.

[و] يعتمد مستوى البحر المرتفع إلى حد أقصى على مستوى البحر المتوسط والأنظمة المناخية الإقليمية، ويحدد هنا على أنه ١٪ من الأرقام في كل ساعة من مستوى البحر في موقع لفترة مرجعية.

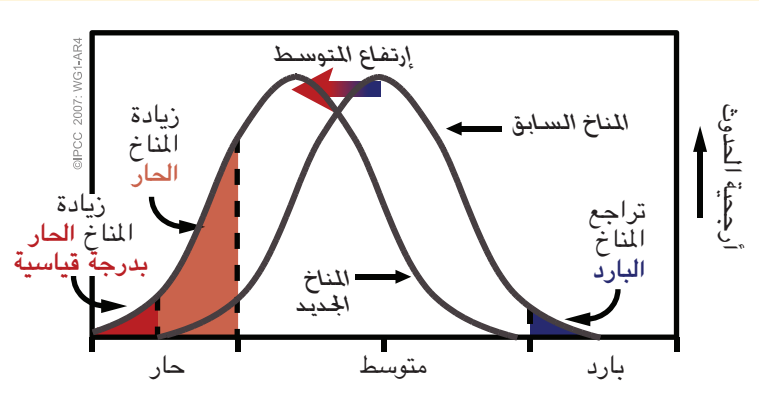
[ز] تتبع التغيّرات في أقصى إرتفاع مستوى البحر التغيّرات في متوسط مستوى البحر {٥,٥,٢,٦}. من المرجّح جداً أن تكون الأنشطة البشرية قد ساهمت في إرتفاع مستوى البحر. {٩,٥,٢}

[ح] في كل السيناريوهات، يكون متوسط مستوى البحر العالمي المتوقع أكثر ب ٢١١ من الفترة المرجع. {١ ٠,٦}. لم يتم تقييم تأثير التغيّرات في الأنظمة المناخية الأقليمية على مستويات البحر القصوى.

الإطار ٥: ظاهرة مناخية متطرفة

غالباً ما يسأل الأفراد المتأثرون بظاهرة مناخية متطرفة (على غرار الصيف الحار في أوروبا في ٢٠٠٣ أو هطول الأمطار الغزيرة في مومباي الهند في تموز / يوليو ٢٠٠٥) ما إذا كانت التأثيرات البشرية مسؤولة عن الحدث. من المتوقع حصول مجموعة واسعة من الظواهر المناخية المتطرفة في معظم المناطق حتى ولو لم يتغيّر المناخ، لذلك يصعب نسب أي حدث فردي لتغيّر مناخي. في معظم المناطق، لا تغطي سجلّات التغيّر الآلية إلا حوالي ١٥٠ عاماً، فلا تكفي المعلومات لتحديد خصائص الأحداث المناخية القصوى النادرة. إضافة إلى ذلك، يجب أن تجتمع عدة عناصر عادةً لإنتاج حدث متطرّف، لذلك من الخطأ ربط حدث متطرّف معين بسبب وحيد ومحدد. في بعض الحالات، قد يكون مرجّحاً تقدير المساهمة البشرية المنشأ في هذه التغيّرات في إحتمال حدوث حالات متطرّفة.

لكن المنطق الإحصائي البسيط يشير إلى أن التغيّرات الهامة في تكرار هذه الأحداث القصوى (وفي الحالة القصوى الممكنة، أي إحتمال هطول الأمطار خلال ٢٤ ساعة فوق موقع معين على سبيل المثال) يمكن أن تكون نتيجة تغيّر صغير نسبياً في توزّع الطقس أو متغيّرة مناخية.



الإطار ٥ الرسم ١. رسم يظهر التأثير على درجات الحرارة القصوى عندما ترتفع معدّلات الحرارة لتوزيع حراري عادي.

إن الحالات المتطرّفة هي الأحداث غير المتكررة في أعلى وأدنى نطاق الأرقام التي تعود لمتغيّرة معيّنة. يسمى إحتمال حدوث الأرقام في هذا النطاق وظيفة توزيع الإحتمال، وشكلها شبيه بمنحنى عادي أو قوسي لبعض المتغيّرات (منحنى الجرس المألوف). يظهر الرسم ١ في الإطار ٥ رسماً لهذه الوظيفة ويبيّن تأثير نقلة صغيرة (تغيّر صغير في متوسط أو مركز التوزيع) على تواتر الحالات المتطرّفة في كل من طرفي التوزيع. غالباً ما يترافق إزدياد في تواتر إحدى الحالات المتطرّفة (مثلاً عدد الأيام الحارة) بتراجع في الحالة القصوى المعاكسة (في هذه الحالة عدد الأيام الباردة كأيام الجليد). يمكن أن تعقد التغيّرات في المتغيّرات أو شكل التوزيع هذه الفكرة.

ذكر تقرير التقييم الثاني أن بيانات وتحليلات الحالات المتطرّفة المرتبطة بالمناخ كانت متباعدة. عند تقرير التقييم الثالث، توفّرت المراقبة المحسَّنة وبيانات التغيّرات في الحالات المتطرّفة وتم تحليل النماذج المناخية لتحديد توقعات الحالات المتطرّفة. منذ تقرير التقييم الثالث، إزدادت قاعدة الملاحظات لتحليلات الحالات المتطرّفة، ولقد تم النظر في بعض الحلات القصوى فوق معظم مناطق اليابسة (مثلاً أقصى درجات الحرارة اليومية والتهطال). استخدمت نماذج إضافية في محاكاة وتوقع الحالات المتطرّفة وتوفر حالات دمج عديدة لنماذج ذات نقاط بداية مختلفة معلومات أكثر موثوقية حول الوظائف والحالات المتطرّفة. منذ تقرير التقييم الثالث، أصبحت بعض الدراسات حول رصد التغيّر المناخي والنسبة التي تركز على التغيّرات في الإحصائيات العالمية للحالات القصوى متوفرة (الجدول ٤). في بعض الحالات المتطرّفة (قوة الأعاصير المدارية مثلاً)، هناك مشاكل في البيانات و/أو نماذج غير مناسبة. ما زالت بعض التقييمات تعتمد على المنطق البسيط في توقعات بتغيّر الحالات المتطرّفة مع الإحترار العالمي (من المتوقع أن يؤدي إلى مزيد من موجات الحر). تعتمد دراسات أخرى على التشابه النوعي بين التغيّرات الملحوظة والمحاكاة. إن الإحتمال المقيَّم للمساهمات البشرية في التوجهات أدنى للمتغيّرات حيث يعتمد التقييم على براهين غير مباشرة.

القصوى شبيهة بتغيّرات معدّل مستوى البحر. في مواقع أخرى، كانت للتغيّرات في ظروف الغلاف الجوي على غرار العواصف أهمية أكبر في تحديد التوجهات الطويلة المدى. ارتبط التغيّر السنوي ما بين السنوات بالمياه العالية القصوى بشكل ايجابي بمعدّل مستوى البحر الإقليمي، بالإضافة إلى مؤشرات المناخ الإقليمي على غرار النينيو في المحيط الهادئ والتذبذب الشمال الأطلسي في المحيط الاطلسي. {٥,٥}

٣,٤ التناسق في المشاهدات

في هذا القسم، تتم دراسة التغيّرات والتوجهات ضمن الفروقات المناخية المختلفة وعبرها، ومن بينها الغلاف الجوي والغلاف الجليدي والمحيطات بهدف التناسق بناءً على فهم مفهومي العلاقات الفيزيائية بين الفروقات. على سبيل المثال، سيحسّن الإرتفاع في درجات الحرارة قدرة الغلاف الجوي على الإحتفاظ بالرطوبة. من المفترض أن تكون التغيّرات في درجة الحرارة و/أو التهطال متناسقة مع التغيّرات في الأنهر جليدية. يشكّل التناسق بين المشاهدات المستقلة التي تستخدم عدة تقنيات والمتغيّرات إختباراً أساسياً للفهم، وبالتالي تعزز الثقة. {٣,٩}

تشير التغيّرات في الغلاف الجوّي والغلاف الجليدي والمحيطات بطريقة لا تحتمل الشك، إلى إحترار العالم. {٣,٢، ٣,٩، ٤,٢، ٤,٤–٤,٨، ٥,٢، ٥,٥}

تظهر درجات حرارة سطح الأرض ودرجة حرارة سطح البحر أدلة إحترار. لقد عرفت مناطق اليابسة في النصفين من الكرة الأرضية إحتراراً بوتيرة أسرع من وتيرة إحترار المحيطات في العقود القليلة الماضية، ما يتماشى مع الجمود الحراري الأكبر في المحيطات. {٣,٢}

يتماشى إحترار المناخ مع الإرتفاع الملحوظ في عدد أيام درجات الحرارة المرتفعة القصوى، والإنخفاض في عدد أيام درجات الحرارة المتدنّية القصوى والإنخفاض في عدد أيام الجليد في خطوط العرض الوسطى. {٣,٢، ٣,٨}

أصبحت توجهات درجات حرارة الهواء على سطح الأرض منذ العام ١٩٧٩ متناسقة مع درجات الحرارة في المرتفعات الأعلى. ومن المرجّح أن يكون الإحترار أعلى بنسبة ضئيلة في التروبوسفير منه على سطح الأرض، وتروبوبوز أعلى، ما يتماشى مع توقعات من عمليات فيزيائية أساسية وإزدياد ملحوظ في غازات الدفيئة مع إنحلال أوزون الستراتوسفير. {٣,٤، ٩,٤}

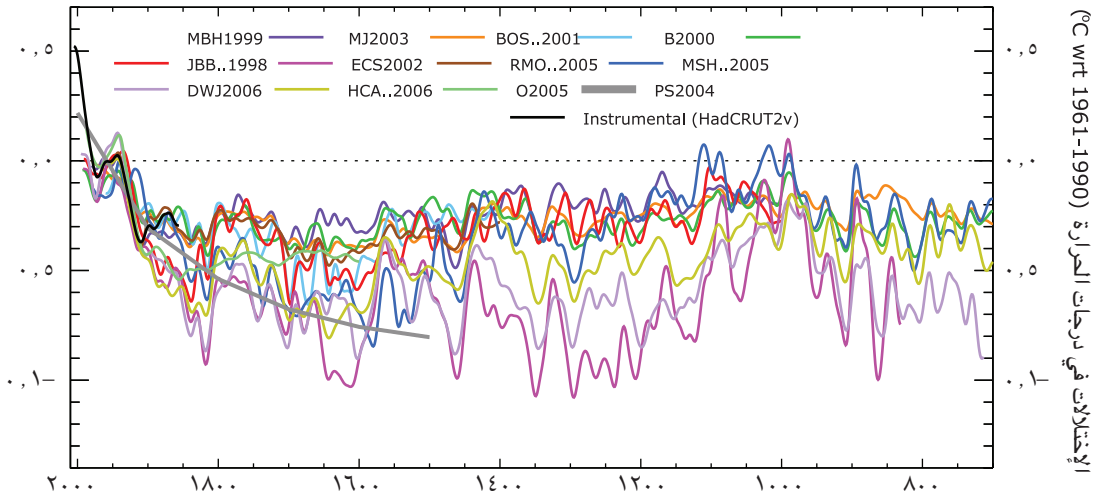
تتماشى التغيّرات في الحرارة إلى حد بعيد مع التقلص شبه العالمي الملحوظ للغلاف الجليدي. وكان التراجع في النهر الجليدي الجبلي وإتساعه منتشراً. كما يشير التراجع في الغطاء الثلجي، وعمق الثلج واتساع جليد بحر القطب الشمالي، وسماكة التربة الصقيعية حرارتها، واتساع اليابسة المجمدة موسمياً، وطول موسم تجلد الأنهار والبحيرات إلى أن التغيّرات المناخية متناسقة مع الإحترار. {٣,٢، ٣,٩، ٤,٢–٤,٥، ٤,٧}

إن مشاهدات إرتفاع مستوى البحر منذ العام ٢٠٠٣ متناسقة مع التغيّرات الملحوظة في محتوى المحيطات الحراري والغلاف الجليدي. إرتفع مستوى البحر بمقدار ٣,١ ± ٠,٧ ملم في العام الواحد بين العامين ١٩٩٣ و٢٠٠٣، وهي فترة توفر قياسات الإرتفاع العالمية. خلال هذه الفترة، لوحظ شبه توازن بين إرتفاع مستوى البحر الإجمالي ومساهمات تقلّص الأنهر جليدية والقلنسوات الجليدية والصفائح الجليدية مع إرتفاع محتوى المحيطات الحراري وتوسع المحيطات ذو الصلة. يؤدي هذا التوازن إلى إزدياد الثقة بأن إرتفاع مستوى البحر الملحوظ هو خير مؤشر على الإحترار. لكن رصيد مستوى البحر غير متوازن خلال فترة ١٩٦١–٢٠٠٣. {٥,٥، ٣,٩}

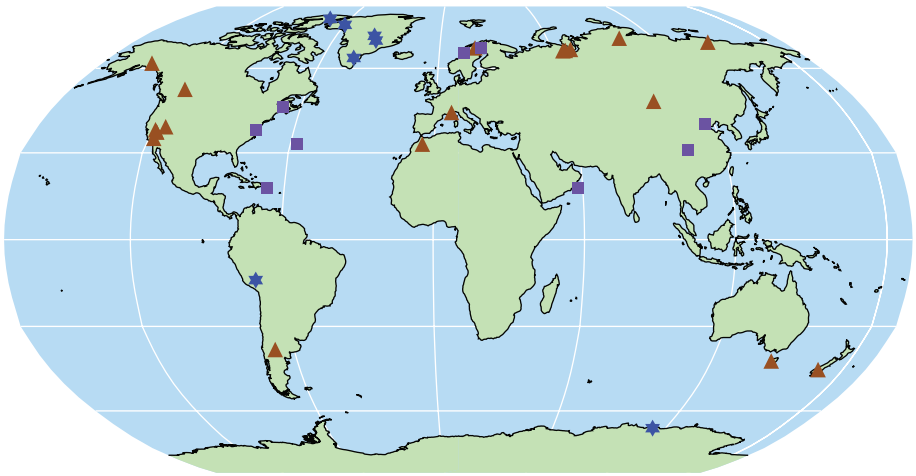
تتماشى المشاهدات مع فهم فيزيائي لجهة الرابط المتوقع بين بخار المياه والحرارة، ومع إشتداد أحداث التهطال في عالم أكثر دفئاً. إزداد بخار المياه العمودي في الطبقة العليا من التروبوسفير، ما يشكّل دعماً هاماً لفرضية النماذج الفيزيائية البسيطة التي تحدد الرطوبة المتزايدة في عالم يعرف إحتراراً وتشكّل مصدر معلومات إيجابي وهام للتغيّر المناخي. تماشياً مع إزدياد كميات بخار المياه في الغلاف الجوي، ينتشر أيضاً الإزدياد في عدد أحداث التهطال الشديد وإحتمال متزايد بحدوث فياضانات في عدة مناطق من اليابسة، حتى في المناطق التي شهدت إنخفاضاً في اجمالي التهطال. تدعم التغيّرات الملحوظة في ملوحة المحيطات بشكل مستقل النظرية بأن دورة المياه قد تغيّرت، بشكل يتماشى مع المشاهدات التي تظهر إزدياد في التهطال وهدر الأنهار خارج المناطق المدارية وشبه المدارية، وإزدياد في إنتقال المياه العذبة من المحيط إلى الغلاف الجوي في خطوط العرض الدُنيا. {٣,٣، ٣,٤، ٣,٩، ٥,٢}

على الرغم من أن التهطال قد إزداد في عدة مناطق من الكرة الأرضية، إزدادت المناطق الخاضعة للجفاف. كما إزدادت مدة الجفاف وشدّته. وبينما شهدت المناطق في الماضي جفافاً، فإن الإتساع المكاني المنتشر للجفاف الحالي يتماشى مع التغيّرات المتوقعة في دورة الماء الخاضعة للإحترار. إذ يزداد بخار المياه مع إرتفاع درجات الحرارة العالمية، بسبب إزدياد التبخر حيث تتوفر رطوبة السطح، ما يزيد من

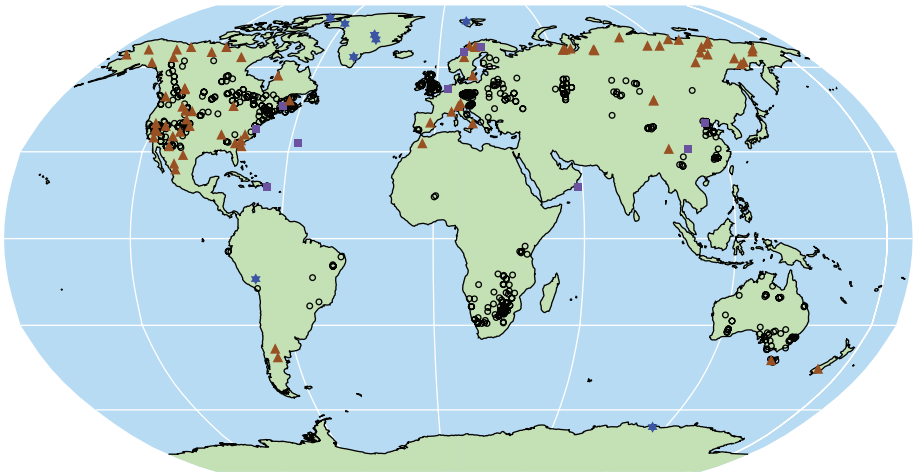
إعادة بناء درجات الحرارة في النصف الشمالي من الكرة الأرضية



مواقع السجلّات الوكيلة: عام ١٠٠٠ قبل المسيح



مواقع السجلّات الوكيلة: عام ١٥٠٠ قبل المسيح



©IPCC 2007: WG1-AR4

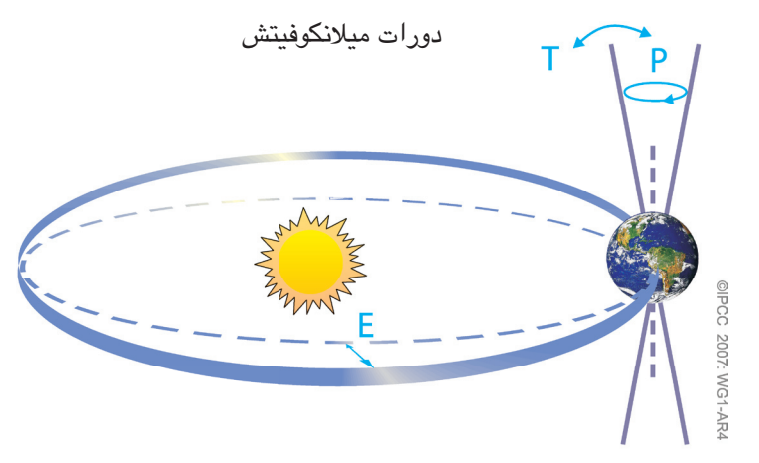
الرسم ٢٠. (أعلى) سجلّات تغيّرات درجة الحرارة في النصف الشمالي من الكرة الأرضية خلال السنوات الـ ١٣٠٠ الماضي، مع ١٢ عملية إعادة بناء لإستخدام عدد من السجلّات المناخية غير المباشرة ظاهرة بالألوان والسجلّات الآلية الظاهرة بالأسود. (الوسط والأسفل) مواقع السجلّات الوكيلة الحساسة تجاه الحرارة مع بيانات تعود إلى عام ١٠٠٠ وعام ١٥٠٠ قبل المسيح (حلقات الشجر: المثلثلات البنيّة، مواقع السبر: الدوائر السوداء، باطن الجليد/ أثقاب الإستطلاع، النجوم الزرقاء، سجلّات أخرى تتضمن سجلّات متدنّية التحديد: مربعات أرجوانية). تعطى مصادر البيانات في الجدول ٦,١، الرسم ٦,١٠ وتناقش في الفصل ٦. {الرسم ٦,١٠ و٦,١١}

الإطار ٦: التأثير المداري

وتبين الحسابات الفلكية بوضوح تام أن التغيّرات الدورية في شكل مدار الأرض حول الشمس تتحكم بتوزيع إشعاعات الشمس الوافدة في أعلى الغلاف الجوي عبر الفصول وخطوط العرض (وتسمى من الآن فصاعداً الإشماس). ويمكن إحصاء التغيّرات الماضية والمستقبلية لجهة الإشماس على مدى ملايين السنين، والحصول على نتائج موثوقة إلى أعلى درجة. {٦,٤}

ويدل مصطلح الحركة المدارية على التغيرات الطارئة على تلك الفترة من السنة عندما تكون الأرض أقرب ما يمكن من الشمس، ضمن شبه فترات زمنية تتراوح بين ١٩٠٠٠ و ٢٣٠٠٠ سنة. ونتيجةً لذلك، تؤدي التغيّرات لجهة موقع الفصول ومدتها على المدار إلى تعديل توزيع الإشماس على الفصول وخطوط العرض تغييراً شديداً. وتعد التغيرات الفصلية الطارئة على الإشماس أكبر بكثير من وسطي التغيرات السنوية، وقد تصل إلى ٦٠ واط في المتر المكعب الواحد (انظر الملخّص الفني، الإطار ٦ الرسم ١).

ويتراوح ميل (إنحدار) محور الأرض بين ٢٢ درجة و٢٤,٥ درجة ضمن شبه دوريات تمتد على ما يقارب ٤١٠٠٠ سنة. وتؤدي التغيّرات التي تطرأ على ميل الأرض إلى تعديل التناقضات الفصلية، كما يتغيّر الإشماس السنوي النسبي ذو الآثار المضادة لجهة خطوط العرض المنخفضة مقابل خطوط العرض المرتفعة (وبالتالي، ما من أثرٍ على معدّل الإشماس العالمي). {٦,٤}



الإطار ٦ الرسم ١. رسم التغيّرات المدارية للأرض (أو دورات ميلانكوفيتش) التي تؤدي إلى دورات الفترات الجليدية. يشير الحرف T إلى التغيّرات التي حصلت على مستوى الميل أو الإنحدار لجهة محور الأرض، ويشير الحرف E إلى إختلاف المدار المركزي، أما الحرف P فيشير إلى التنبؤات، بمعنى آخر، التغيّرات باتجاه إنحدار المحور في نقطة معيّنة من المدار. {الأسئلة ٦,١ – الرسم ١}

ويتميز الإختلاف المركزي لمدار الأرض حول الشمس بدوريات أطول تصل إلى ٤٠٠٠٠٠ سنة وتمتد على ١٠٠٠٠٠ سنة. أما التغيّرات في الإختلاف المركزي وحدها فلا تترك سوى أثر محدود على الإشماس، إذ تؤدي إلى تغيّرات بسيطة في المسافة بين الأرض والشمس. ولكن التغيّرات على مستوى الإختلاف المركزي تتفاعل مع الآثار الفصلية الناتجة عن الميل وعن الإعتدال الربيعي أو الخريفي. وخلال فترات الإختلاف المركزي المنخفض، على غرار ما حصل منذ ٤٠٠٠٠٠ سنة وما سيحصل في الـ١٠٠٠٠٠ سنة المقبلة، لا تكون التغيّرات الفصلية المتوقعة للإشماس بالحجم الذي تكون عليه خلال فترات الإختلاف المركزي الكبير. (انظر الملخّص الفني، الإطار ٦ الرسم ١). {٦,٤}

وصلت نظرية ميلانكوفيتش أو «النظرية المدارية» المتصلة بالعصور الجليدية إلى مراحل متطورة للغاية الآن. فغالباً ما تنجم العصور الجليدية عن الحدود الدُنيا للإشماس الصيفي على خط العرض المرتفع للقطب الشمالي، ما يسمح بإستمرار تساقط الثلوج على مدار السنة وبالتالي تراكم الثلوج حتى تشكل صفائح جليدية في نصف الكرة الشمالي. ويُقال أيضاً إن الفترات التي تتسم بإشماس صيفي قوي يقع على المناطق المرتفعة من خطوط العرض في نصف الكرة الشمالي، والتي تتميز في الوقت نفسه بتغيّرات مدارية واضحة، تؤدي إلى ذوبان سريع للجليد، بالإضافة إلى التغيرات المناخية وإرتفاع مستوى سطح البحر. وتحدد هذه التغيّرات المدارية وتيرة التغيّرات المناخية، فيما يبدو أن عمليات التأثير التفاعلي القوي التي تضخم التغيّرات المدارية وتسمح بحدوث إجابات شاملة. وتؤثر التغيرات المدارية أيضاً على مر آلاف السنين بشكلٍ كبير على الأنظمة المناخية الأساسية مثل أهم الرياح الموسمية في الأرض ودوران المحيطات العالمي ومحتوى الغلاف الجوي من غازات الدفيئة. {٦,٤}

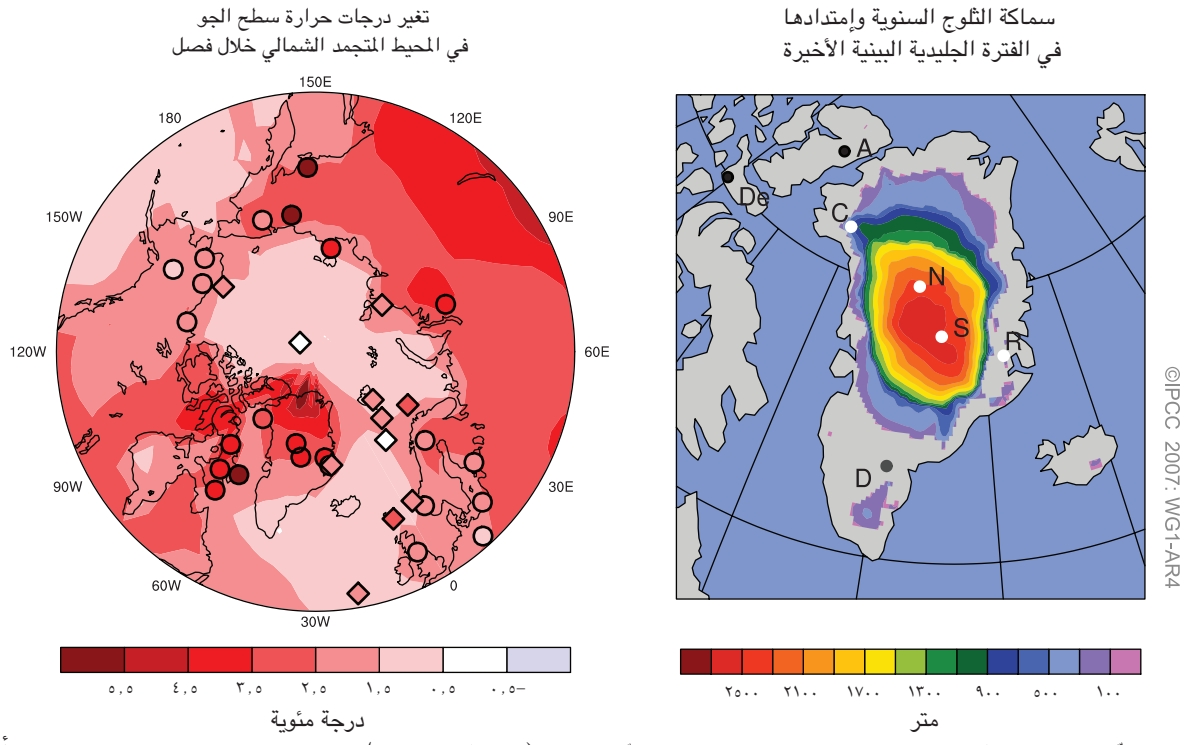
وتبين الدلائل المتوفرة أن نزعة التبريد الطبيعية الآيلة إلى التجلّد لن تخفف من التسخين الراهن. ويشير فهم تجاوب الأرض مع التغيّرات المدارية إلى أن كوكبنا لن يدخل من تلقاء نفسه في عصر جليدي جديد يمتد على ما لا يقل عن ٣٠٠٠٠ سنة. {٦,٤ – الأسئلة ٦,١}

التهطال. لكن من المتوقع أن تؤدي درجات الحرارة القارية المرتفعة إلى مزيد من التبخر والجفاف، ويكون هاماً في المناطق الجافة حيث تكون رطوبة السطح محدودة. كما يمكن أن تؤدي التغيّرات في الكتلة الثلجية والغطاء الثلجي وأنماط الدوران في الغلاف الجوي ومسارات العواصف إلى تخفيض الرطوبة الموسمية، ما يساهم بدوره في زيادة الجفاف. ساهمت التغيّرات في درجات حرارة سطح البحر والتغيّرات ذات الصلة في دوران الغلاف الجوي والتهطال في إحداث تغيّرات في الجفاف خاصة عند خطوط العرض الدُنيا. نتيجةً لذلك، أصبح الجفاف أكثر شيوعاً، خاصة في المناطق المدارية وشبه المدارية منذ السبعينيات. في أستراليا وأوروبا، تم إستنتاج العلاقات المباشرة للإحترار العالمي من خلال بلوغ درجات الحرارة العالية حدّاً أقصى وموجات الحر المرافقة للجفاف الحديث. {٣,٣، ٣,٨، ٩,٥}

٣,٥ من منظار مناخ عصر ما قبل التاريخ

تستخدم دراسات مناخ عصر ما قبل التاريخ قياسات التغيّرات الماضية المستقاة من درجات حرارة السبر، والتغيّر في ترسبات المحيطات، والتغيّرات في إتساع الأنهر جليدية إضافة إلى قياسات غير مباشرة تتضمن التغيّرات في الخصائص الكيميائية والفيزيائية والإحيائية التي تعكس التغيّرات الماضية في بيئة تواجدت فيها البيانات غير المباشرة أو نمت. تعتمد هذه الدراسات على عدد من الوكلاء للتحقق من النتائج المختلفة وتحسين فهم نقاط عدم اليقين. أصبح اليوم مقبولاً ومبرراً أن عدد من المخلوقات الإحيائية (على مثال الأشجار، والمرجان والعوالق، والحيوانات) تغيّر نموها و / أو ديناميكياتها إستجابة للمناخ المتغيّر، وأن هذه التغيّرات بسبب المناخ سجّلت نمواً جيداً مقارنة بالمستوى السابق

المحيط المتجمّد الشمالي والفترات الجليدية البينية



الرسم ٢١: تتغيّر حرارة سطح الجو في الصيف بحسب حرارة المحيط المتجمّد الشمالي (الرسم لجهة اليسار) وسماكة الثلوج وإمتداد جزيرة غرينلاند والأغطية الجليدية الموجودة في المحيط المتجمد الشمالي (الرسم لجهة اليمين). وتشير دراسة محلية متعددة النماذج ومتعلّقة بإرتفاع درجات الحرارة في فصل الصيف خلال الفترات الجليدية البينية، إلى أن أعلى درجات الحرارة مصدرها المواقع الأرضية (الدوائر) والبحرية (المعينات) (الرسم لجهة اليمين). إن امتداد وسماكة الغطاء الجليدي في غرينلاند والأنهر جليدية في غربي كندا وآيسلاند، لم يتعدّ الحد الأدنى من إمتدادها خلال الفترة الجليدية البينية الأخيرة، ظاهرةً بشكل نموذج متعدد الأشكال يتألف من ٣ نماذج جليدية. وتشير دراسة معمقة إلى تكوّن نماذج جليدية في مواقع (البقع البيضاء اللون) عدة خلال الفترة الجليدية البينية، مثل رينلاند R ومشروع شمالي غرينلاند حول القلنسوة الجليدية N وموقع القمة (Summit S) بالإضافة إلى مشروع القلنسوة الجليدية في غرينلاند GRIP ومشروع الغطاء الجليدي في غرينلاند GISP2 2، ومن الممكن في كامب سنتري C، كما تشير إلى عدم وجود ثلوج في المواقع التالية (المُشار إليها بالبقع السوداء اللون): ديفون De وأغاسيس A. وتبقى الدلائل حول إمكانية تجمّع الثلوج من الفترة الجليدية البينية الأخيرة LIG في القلنسوة الجليدية Dye-3 (البقعة الرمادية اللون، D) غير مؤكدة. {الرسم ٦,٦}

في الأنواع الحية والميتة (الأحافير) أو في مجموعات من المخلوقات الحية. تستخدم شبكات من عرض حلقات الشجر وكثافتها لإكتشاف التغيّرات في درجات الحرارة في الماضي بناءً على القياسات مع بيانات آلية متداخلة في الزمن. فيما تستخدم هذه المنهجيات بشكل مكثف، هناك قلق لجهة توزع القياسات، وإلى أي مدى تمثل الكرة الأرضية، ومسائل مشابهة، كمعرفة مثلاً إلى أي درجة تمتلك هذه المنهجيات تحيزات موسمية ومكانية أو تحديد الإختلاف الواضح في العلاقة مع التغيّر المناخي الحديث. {٦,٢}

ومن المرجّح جداً أن معدّل درجات الحرارة في النصف الشمالي من الكرة الأرضية خلال النصف الثاني من القرن العشرين كان أكثر دفئاً من أي فترة خمسين سنة خلال السنوات الخمسمائة الماضية ومن المرجّح أن تكون الأكثر دفئاً في السنوات الألف وثلاثمائة الماضية. تغطي البيانات الداعمة لهذه الإستنتاجات مناطق اليابسة خارج المنطقة المدارية في الصيف (خاصة للفترات الزمنية الأطول، راجع الرسم ٢٠). تعتمد هذه الإستنتاجات على البيانات غير المباشرة مثل عرض حلقة شجرة وكثافتها، التركيب النظائري لعناصر عديدة في الجليد أو التركيبة الكيميائية لنطاق نمو المرجان، ما يتطلب تحليلاً لإستقاء معلومات عن درجات الحرارة ونقاط عدم اليقين المرتبطة بها. من بين نقاط عدم اليقين الأساسية، صعوبة الفصل ما بين درجة الحرارة والتهطال في بعض الحالات، وما إذا كانت تمثل موسماً معيناً بدلاً من أعوام كاملة. تحسنت البيانات وتوسعت منذ تقرير التقييم الثالث، ومن بينها على سبيل المثال قياسات في عدد أكبر من المواقع، تحليل محسّن لبيانات درجات حرارة السبر، وتحليلات موسعة للترسبات في الأنهر جليدية والمرجان. إلا أن البيانات المناخية القديمة محدودة أكثر من السجلّات الآلية منذ العام ١٨٥٠ لجهة المكان والزمان، وتستخدم المنهجيات الإحصائية لبناء معدّلات عالمية، وهي خاضعة لنقاط عدم يقين أيضاً. إن البيانات الحالية محدودة جداً فلا تسمح بإجراء تقييم مشابه لدرجات الحرارة في النصف الجنوبي من الكرة الأرضية قبل مرحلة البيانات الآلية. {٦,٦، ٦,٧}

تشير بعض الدراسات بعد تقرير التقييم الثالث إلى تغيّر في النصف الشمالي من الكرة الأرضية أكبر على مرّ القرون مما ذكره تقرير التقييم الثالث، بسبب البيانات غير المباشرة المستخدمة، ومنهجيات الإحصاء المحدّدة للمعالجة أو/و القياس لتمثل درجات الحرارة الماضية. يشير التغيّر الإضافي إلى ظروف أبرد خاصة من القرن الثاني عشر حتى الرابع عشر، والقرن السابع عشر والقرن التاسع عشر، ومن المرجّح أن تكون مرتبطة بالتأثيرات الطبيعية بسبب الثورات البركانية و/أو النشاط الشمسي. على سبيل المثال، تشير إعادات البناء إلى تراجع في النشاط الشمسي وتزايد في النشاط البركاني في القرن السابع عشر مقارنةً بالظروف الحالية. وتشير إعادة بناء واحدة إلى ظروف مناخية أكثر دفئاً بقليل في القرن الحادي عشر من تلك الواردة في تقرير التقييم الثالث، لكن مع أوجه عدم يقين واردة في تقرير التقييم الثالث. {٦,٦}

توفّر سجلّات ثاني أكسيد الكربون من العيّنة الجليدية خلال الألفية الماضية حدوداً إضافية حول التغيّرات الطبيعية للمناخ. تتماشى قيمة تغيّرات درجات الحرارة في مرحلة ما قبل الثورة الصناعية وعلى نطاق عقدي في النصف الشمالي من الكرة الأرضية من إعادات البناء التي تعتمد على بيانات غير مباشرة (< 1°C) إلى حد بعيد مع سجلّات ثاني أكسيد الكربون من العيّنة الجليدية وفهم إستجابة المناخ ودورة الكربون. تغيّرت نسبة ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بالتزامن مع تغيّر الحرارة في القطب الجنوبي خلال الـ ٦٥٠٠٠٠ سنة الماضية. وتشير البيانات المتوفّرة إلى قيام ثاني أكسيد الكربون بدور المحفّز. {٦,٤، ٦,٦}

تظهر بيانات الهولوسين تغيّرات واضحة في الأنهر جليدية، إلاّ أن هذه التغيّرات أتت كنتيجة لعمليات متعددة، إلى جانب الإرتداد الذي حصل أواخر القرن العشرين. وقد عرفت الأنهر جليدية الموجودة في مناطق جبلية عدة من القطب الشمالي إرتداداً من جراء التأثير المداري على درجات الحرارة الإقليمية منذ ١١٠٠٠ إلى ٥٠٠٠ سنة، ومنذ ٥٠٠٠ سنة وأكثر، كانت هذه الأنهر جليدية أصغر من تلك التي تكوّنت في نهاية القرن العشرين (أو حتى غائبة بالمقارنة معها). ولا يمكن أن يُعزى الإرتداد الحالي شبه العالمي للأنهر جليدية في الجبال للأسباب عينها، ذلك أن إنخفاض الإشماس الصيفي الذي شهده القطب الشمالي خلال الألفية الماضية قد يكون مؤاتٍ لتنامي الأنهر جليدية. {٦,٥}

وتظهر البيانات المتعلقة بالمناخ البدائي مدى تغيّر المناخات الإقليمية على إختلافها. وفي المناخات القديمة، اختلفت قوة ظواهر النينيو ووتيرتها. ومن الواضح أن قوة الرياح الموسمية الآسيوية وبالتالي كمية الأمطار، قد تتغيّر بسرعة. وتشير سجلّات مناخ عصر ما قبل التاريخ في شمال وشرق أفريقيا من جهة وشمالي أميركا من جهة أخرى، إلى أن فترات الجفاف التي تمتد لعقود وقرون تشكل نمطاً مناخياً يتكرر في هذه المناطق، وبالتالي فإن فترات الجفاف الحديثة ليست سابقةً في شمال أميركا وشمال أفريقيا. وتعزز مجموعة البيانات المناخية القديمة العقدية الفردية وجود تقلبية مناخية إقليمية

شبه دورية، ولكن من المستبعد أن تكون هذه البوادر الإقليمية متناسقة على النطاق العالمي. {٦,٥، ٦,٦}

تشير معلومات موثوقة تستند إلى رواسب المحيط والنمذجة، إلى وجود علاقة بين التغيّرات المناخية السريعة التي حصلت في الفترة الجليدية الأخيرة والفترة الإنتقالية الجليدية – الجليدية البينية، والتغيّرات التي حصلت على مستوى دوران المحيط الأطلسي. ويشير الفهم الحالي إلى أن الدوران المحيطي قد يصبح غير مستقر ويتغيّر بسرعة عند مواجهة عتبات خطيرة. وقد أثّرت هذه الظواهر على درجات الحرارة التي وصلت إلى ١٦ درجة مئوية في غرينلاند، وأثّرت على أنماط تساقط الأمطار الإستوائية. والأرجح، هي تتعلق بإعادة توزيع الحرارة بين القطبَين الشمالي والجنوبي، وليس بالتغيّرات الكبيرة لجهة درجات الحرارة النسبية في العالم. ولم تُلحظ مثل هذه الظواهر منذ ما يقارب ٨٠٠٠ سنة. {٦,٤}

تعزز القدرة المطوّرة للنماذج الحالية لمحاكاة ظروف عصر ما قبل التاريخ، الثقة في فهم تغيّر مناخ عصر ما قبل التاريخ والتغيّرات على مستوى التأثير المداري. ويختلف الحد الأقصى للغمر الجليدي الأخير (حصلت الفترة الجليدية الأخيرة منذ ما يُقارب ٢١٠٠٠ سنة) ومنتصف الهولوسين (منذ ٦٠٠٠ سنة) عن المناخ الحالي، ليس بسبب التقلبية العشوائية، وإنما بسبب التأثير العالمي والموسمي المختلف والمتصل بفروقات معروفة على مستوى مدار الأرض (انظر الملخّص الفني، الإطار ٦). وقد عزز التأثير التفاعلي الكيميائي الأرضي الإحيائي والفيزيائي الإستجابة إلى التأثيرات المدارية. وتظهر المقارنات بين الظروف التي خضعت للمحاكاة ولإعادة التوليد في الحد الأقصى للغمر الجليدي الأخير أن النماذج تلتقط الأنماط الواسعة للتغيّرات المستنتجة في أنماط درجات الحرارة والأمطار. وبالنسبة إلى منتصف الهولوسين، إن نماذج المناخ المقرونة قادرة على محاكاة الإحترار في مناطق خطوط العرض الوسطى والرياح الموسمية القوية، مع تغيّر بسيط في درجات الحرارة النسبية في العالم (< ٠,٤ درجة مئوية)، ما يتماشى مع فهمنا للتأثير المداري. {٦,٢ ، ٦,٤، ٦,٥، ٩,٣}

كان المعدّل العالمي لإرتفاع مستوى سطح البحر يتراوح بين ٤ و٦ أمتار خلال الفترة الجليدية البينية الأخيرة، منذ ما يقارب ١٢٥٠٠٠ ألف سنة، أي أعلى من معدّل القرن العشرين، لا سيما بسبب إرتداد الجليد القطبي (انظر الملخّص الفني، الرسم ٢١). وتشير البيانات المرتبطة بالقلنسوة الجليدية إلى أن الثلوج غطت منطقة قمة غرينلاند في تلك الفترة، إلاّ أن بعض المناطق في جنوب غرينلاند تشهد إنخفاضاً في مد الغلاف الجليدي. كما تشير البيانات المتعلقة بالقلنسوة الجليدية إلى أن معدّل درجات الحرارة القطبية في تلك الفترة كانت أعلى بـ٣ إلى ٥ درجات مئوية بالمقارنة مع القرن العشرين، بسبب التفاوتات لجهة مدار الأرض. وعلى الأرجح، لم يساهم الغلاف الجليدي في غرينلاند وغيره من المناطق الثلجية في المحيط المتجمد الشمالي، في إرتفاع مستوى البحر بأكثر من ٤ أمتار، ما يعني أيضاً أن إمكانية مساهمة أنتاركتيكا قائمة. {٦,٤}

الملخّص الفني ٤: فهم تغيّر المناخ وعزوه

يسمح العزو بتقييم ما إذا كانت التغيّرات الملحوظة تتناسب مع الإستجابات النوعية لمختلف التأثيرات، وقد تمّ التوصل إليها بعد إختبار نماذج متعددة، وليست لها تفسيرات فيزيائية ممكنة أخرى. وقد أشار تقرير التقييم الأول للهيئة الدولية المعنيّة بتغيير المناخ إلى وجود بعض الإثباتات الملحوظة حول تأثير بشري المنشأ على المناخ. وبعد ٦ سنوات، خلص تقرير التقييم الثاني للهيئة الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ إلى أن توازن البراهين يشير إلى تأثير بشري المنشأ واضح على المناخ في القرن العشرين. أمّا تقرير التقييم الثالث فقد خلص إلى قول إن «معظم الإحترار الملحوظ في السنوات الخمسين الفائتة قد يكون نتيجة زيادة تركيز غازات الدفيئة». وبعد تقرير التقييم الثالث، بات التأكد من تقييم تورّط الإنسان في التغيّرات المناخية الحديثة أقوى، وأحد الأسباب هو الحصول على إشارات أقوى من سجلّات أطول، بالإضافة إلى سلسلة واسعة ومتطورة من الملاحظات التي سمحت بعزو الإحترار، وأنواع أخرى من التغيّرات التي طرأت على النظام المناخي وأوجدت حلول. وتم إيجاد حلول ملموسة لبعض التناقضات الواضحة في سجل الملاحظات (مثلاً، في ما يتعلق بالشكل العمودي لتغيّر درجات الحرارة). وحصلت تطورات على مستوى محاكاة نواحٍ متعددة من المناخ النسبي الحالي وتقلبيته بحسب جداول زمنية عقدية بينية أو جداول زمنية موسمية، على الرغم من بعض الشكوك التي لا تزال قائمة (انظر الملخّص الفني، الإطار٧). واليوم، تستخدم النماذج أمثلة مفصّلة عن عمليات تتعلق بالأهباء الجوية وغيرها من التأثيرات. واعتمدت محاكاة تغيّر المناخ في القرن العشرين نماذج إضافية وتأثيرات طبيعية وبشرية المنشأ كاملة، لم تكن جميعها متوفرة عند صدور تقرير التقييم الثالث. وتسمح المجموعات المتعددة النماذج المتوفرة بتعزيز الثقة في عزو النتائج، من خلال تأمين مثال مطوّر عن شكوك النماذج. والآن، تبلورت إحدى الإشارات والبشرية المنشأ في دراسات العزو الرسمية الخاصة بنواحٍ في النظام المناخي، إلى جانب درجات الحرارة الجوية العالمية النطاق،

الإطار ٧: تقييم نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات

تشكل نماذج الدوران العام في الغلاف الجوي–المحيطات الأداة الأوّلية المستخدمة في فهم تقلبات المناخ الماضية وعزوها، ولفهم الإسقاطات المستقبلية. وبما أن التاثير الإشعاعي لم يواجه إضطرابات في الماضي مشابهة تماماً لتلك التي من المتوقع أن يتسبب بها الإنسان خلال القرن الحادي والعشرين، فإنه ينبغي بناء الثقة بالنماذج من خلال إستخدام عددٍ من الطرق غير المباشرة والوارد وصفها فيما يلي. وفي كلٍ من تلك المجالات، وقد تحققت إنجازات كبيرة منذ تقرير التقييم الثالث، مما يزيد الثقة بكافة النماذج بشكلٍ عام. {٨,١}

وبات التدقيق والتحليل المحسن لسلوك النماذج أكثر سهولةً بفضل الجهود المنسقة دولياً بغية تجميع ونشر نتائج تجارب النماذج التي أجريت في ظل أوضاع مشتركة. الأمر الذي شجّع على وضع تقييم أكثر انفتاحاً وشموليةً للنماذج، بطريقةٍ تتضمن سلسلة من الآفاق المتنوّعة. {٨,١}

تطرّقت الإسقاطات المتعلقة بنطاقات مختلفة وفترات زمنية مختلفة من خلال إستخدام نماذج مناخية عالمية: وتُظهر النماذج المناخية المناخ المستقبلي على مدى عقودٍ وبما أنه لا يجري تتبع تفاصيل نظم الأحوال الجوية الإفرادية ولا التنبؤ بها، فإن الظروف الجوية الأولية تصبح أقل أهميةً بكثير بالنسبة إلى نماذج التنبؤ بالطقس. وتزداد أهمية الإسقاطات المناخية ازدياداً كبيراً. وتتضمن التأثيرات كمية الطاقة الشمسية التي تصل إلى الأرض، وكمية الجسيمات الناتجة عن الثوران البركاني في الغلاف الجوي، وتركيز الغازات والجزيئات البشرية المنشأ في الغلاف الجوي. وفيما يتحول مجال الاهتمام من النطاق العالمي إلى الإقليمي إلى المحلي، أو يقصر النطاق الزمني موضع الاهتمام، يزداد حجم التقلبية المتعلقة بالطقس نسبةً إلى إشارة تغيّر المناخ على المدى الطويل. فيصعب الكشف عن إشارة تغيّر المناخ على نطاقات أصغر. كما تشكل الأحوال في المحيطات نقطةً هامة، لا سيما بالنسبة إلى النطاقات الزمنية السنوية البينية أوالعقدية. {الأسئلة ١,٢، ٩,٤، ١١,١}

إعداد النموذج. تطور إعداد نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات من خلال تحسين الاستبانة المكانية وإستخدام المخططات العددية وتعيين البارامترات (مثل الجليد البحري والطبقة المتاخمة للغلاف الجوي والمياه السطحية في المحيطات). وأُدرجت عمليات إضافية في نماذج عدة، بما في ذلك عمليات ضرورية بالنسبة إلى التأثير (مثلاً: باتت الأهباء الجوية منمذجة بطريقة تفاعلية في نماذج عدة). واليوم، باتت معظم النماذج تحافظ على مناخ مستقر من دون إستخدام عمليات تكييف التدفقات، على الرغم من أن بعض الاتجاهات الطويلة الأمد لا تزال ضمن نطاق مراقبة نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات، مثلاً، نظراً إلى بطء العمليات التي تجري في المحيطات. {٨,٢، ٨,٣}

محاكاة المناخ الحالي. تمّ نتيجة تحسين صيغة النماذج تحسين محاكاة نواحي عديدة من المناخ الحالي العادي. وبشكلٍ عام، تحسنت محاكاة التهطال وضغط مستوى سطح البحر وحرارة السطح بصورة إجمالية، لكن الثغرات لا تزال موجودة لا سيما في المناطق المدارية. وفي ظل وجود ثغرات هامة على مستوى محاكاة السحب (والتأثير التفاعلي المناظر الذي يؤثّر على حساسية المناخ)، أظهرت بعض النماذج حدوث تحسينات لجهة محاكاة بعض أنظمة السحاب (وخاصةً السحاب الركامي الطباقي البحري). وتحسنت محاكاة الظواهر المتطرفة (وخاصةً درجات الحرارة المتطرفة)، ولكن غالباً ما تظهر النماذج في إطار الظواهر الأكثر تطرفاً. كما تحسنت محاكاة الأعاصير خارج المنطقة المدارية. وتستطيع بعض النماذج المستخدمة للتنبؤ بالتغيرات على مستوى الأعاصير المدارية، أن تقوم بمحاكاة الوتيرة والتوزيع الملحوظَين للأعاصير المدارية. وقد أُنجزت محاكاة تركيبة حجم مياه المحيطات والدوران التقلبي الجنوبي ونقل حرارة المحيطات. غير أن معظم النماذج تظهر بعض الانحرافات في محاكاتها للمحيط الجنوبي، مما يؤدي إلى عدم اليقين إزاء امتصاص حرارة المحيطات المنمذج عندما يتغيّر المناخ. {٨,٣، ٨,٥، ٨,٦}

محاكاة نماذج تقلبية المناخ. تقوم النماذج بمحاكاة أهم أنماط تقلبية المناخ خارج المنطقة المدارية، وهي تشبه تلك الملحوظة (النمط الحلقي الشمالي/ النمط الحلقي الجنوبي ونمط المحيط الهادئ – أميركا الشمالية والتذبذب العقدي في المحيط الهادئ)، إلا أنها لا تزال تواجه المشاكل في عرض بعض نواحيها. وباتت الآن بعض النماذج قادرة على محاكاة نواحي هامة من التذبذب الجنوبي، فيما يبقى تذبذب مادن–جوليان غير مرضٍ بصورة عامة. {٨,٤}

محاكاة تقلبات مناخ عصر ما قبل التاريخ. حصلت بعض التطورات على مستوى محاكاة تقلبات المناخ في الماضي. وبعيداً عن أي عزوٍ لتلك التغيّرات، فإن قدرة النماذج المناخية إمكانية تقديم تفسيرٍ متماسك على الصعيد الفيزيائي حول التقلبات

المناخية الملحوظة على نطاقات زمنية مختلفة، تعزيز الثقة في أن النماذج تستقطب عمليات أساسية لجهة تطور المناخ في القرن الحادي والعشرين. وتتضمن أوجه التقدم المحرز مؤخراً نمذجة ناجحة للتغيّرات المرصودة في نطاقات أوسع من المتغيّرات المناخية خلال القرن العشرين (مثل درجات الحرارة والظواهر المتطرفة القارية النطاق ومدى الجليد البحري واتجاهات محتوى حرارة المحيطات والأمطار الأرضية). كما حصل تقدم في القدرة على نمذجة عدة ملامح عامة من الماضي، وحالات مناخية مختلفة للغاية كمنتصف الحقبة الهالوسينية والحد الأقصى للغمر الجليدي الأخير من خلال إستخدام نماذج شبيهة أو على علاقة بتلك المستخدمة لدراسة المناخ الحالي. وتتضمن المعلومات حول العوامل المطروحة كالأوضاع الحدودية في الحسابات الخاصة بمناخ عصر ما قبل التاريخ مختلف أحوال الصفائح الجليدية في تلك الفترات. وأيّدت الملاحظات ما سبقها من تنبؤات واسعة حول النماذج المناخية السابقة، مثل إزدياد درجات الحرارة في العالم إستجابةً لإزدياد غازات الدفيئة. ما يعزز الثقة بتنبؤ المناخ على المدى القصير وفهم التزامات تغيّر المناخ ذات الصلة. {٦,٤، ٦,٥، ٨,١، ٩,٣–٩,٥}

التنبؤ بحالة الطقس والتنبؤات الفصلية بإستخدام نماذج المناخ. اختُبرت بعض النماذج المناخية وأُثبتت من حيث قدرتهاعلى التنبؤ بالقيم الأولية، على نطاقات زمنية تتراوح ما بين التنبؤات بالأحوال الجوية (بضعة أيام قليلة) وتقلبات المناخ الفصلية، عندما بدأ العمل بها مشفوعة بالرصدات المناسبة. وبينما لا تعني على التنبؤ بالنماذج في أسلوب العمل هذا أنها ستظهر بالضرورة الإستجابة الصحيحة للتغيّرات في عوامل التأثير المناخي كغازات الدفيئة، فإنها تعزز الثقة بأن تمثل هذه النماذج بعض العمليات الأساسية والالتزامات ذات الصلة بتغير المناخ. {٨,٤}

التدابير المرتبطة بدقة الإسقاطات المتعلقة بالنماذج. تم للمرة الأولى، تم إستخدام مجموعات النماذج لاكتشاف إمكانية تطوير مقاييس قدرة النماذج («القياس»)، إستناداً إلى أساليب التقييم المذكورة آنفاً، والتي يمكن إستخدامها لتضييق نطاق حالة عدم اليقين من خلال وضع قيود كميّة على نموذج الإسقاطات المناخية. على الرغم من أن هذه الأساليب تبدو وكأنها تبشر بالخير، إلاّ أنه لا يزال من الضروري إرساء سلسلة من التدابير على الإسقاطات المناخية الموثوقة لهذا الغرض. {٨,١، ٩,٦، ١٠,٥}

نواحٍ تتضمن تغيّرات المحتوى الحراري العالمي للمحيطات والميول القارية النطاق لدرجات الحرارة والظواهر الحرارية المتطرفة والدوران وامتداد الثلوج البحرية في المنطقة القطبية الشمالية. {٩,١}

٤,١. تطورات في عزو تغيّر درجات الحرارة في العالم خلال حقبة إستعمال القياسات: الغلاف الجوي والمحيط والجليد

يعرف الإحترار البشري المنشأ للنظام المناخي إنتشاراً واسعاً ويمكن كشفه من خلال مراقبة درجات الحرارة على السطح والغلاف الجوي الحر والمحيطات. {٣,٢، ٣,٤، ٩,٤}

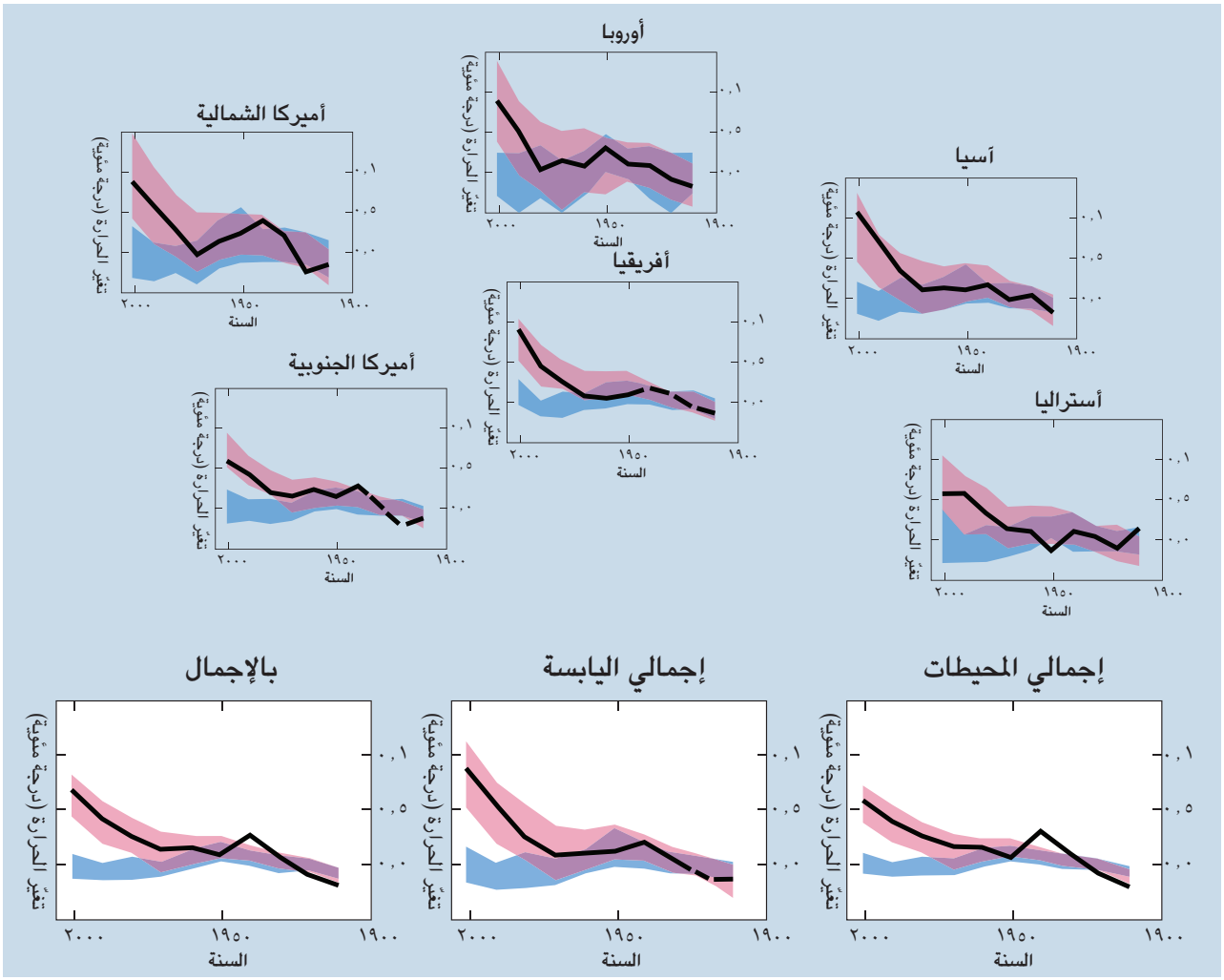
ولم تتوقف الدلائل المرتبطة بتأثير عوامل خارجية، بشرية المنشأ وطبيعية، على النظام المناخي، عن الإزدياد منذ صدور تقرير التقييم الثالث. وأدّى تطوير النماذج والبيانات، والمحاكاة وتمثيل الهباء الجوي وغازات مفعول الدفيئة وغيرها من التأثيرات، إلى تعزيز الثقة بأن معظم النماذج الحالية تعيد توليد تقلبية الغلاف الجوي الواسعة النطاق والخاضعة للتأثير، على جداول زمنية عقدية وعقدية بينية. وتؤكد هذه التطورات أن تقلبية مناخ عصر ما قبل التاريخ على نطاقات مكانية واسعة قد خضعت بقوة للتأثيرات الخارجية. لكن، لا تزال الشكوك قائمة في ما يتعلق بالحجم والتطور الزمني للتقديرات المتعلقة بمساهمة التأثيرات الفردية المتعددة، غير غازات الدفيئة المختلطة، وذلك بسبب الشك في إستجابة النماذج للتأثير، على سبيل المثال. وحتى الآن، لم تدخل بعض التأثيرات الهامة كأهباء الكربون الأسود في معظم دراسات الكشف والعزو الرسمية. ولا تزال التقديرات حول تقلبية المناخ الداخلية الطبيعية غير مؤكدة. مثلاً، هناك تضارب بين النماذج والمراقبة لجهة التقديرات المتعلقة بتقلبية المحتوى الحراري للمحيطات، على الرغم من أن المعاينة الضعيفة لأجزاء من محيطات العالم تفسّر هذا التضارب. بالإضافة إلى ذلك، يصعب تقدير التقلبية الداخلية بواسطة سجلّات المراقبة المتوفرة، فهذه السجلّات تخضع للتأثير الخارجي، ولأن السجلّات المتوفرة ليست مفصلة بما فيه الكفاية في ما يتعلق بالبيانات التي تعود إلى فترة إستعمال القياسات، أو دقيقة بما فيه الكفاية في ما يتعلق بإعادة التوليد غير المباشرة، كي تتقدم بوصفٍ شاملٍ للتقلبية بحسب جداول زمنية عقدية أو أكثر (انظر الملخّص الفني، الرسم ٢٢ والإطار ٧). {٨,٢، ٨,٤، ٨,٦، ٩,٢، ٩,٤}

من المستبعد للغاية (<٥٪) أن يُفسّرالنمط العالمي للإحترار الملحوظ في النصف الثاني من القرن الماضي، من دون

ذكر التأثير الخارجي. وقد حصلت هذه التغيّرات في وقتٍ كان من المرجّح فيه أن تولد عوامل التأثير غير البشري المنشأ (مثل كمية التأثير البركاني والشمسي) التبريد، وليس الإحترار (انظر الملخّص الفني، الرسم ٢٣). وتشير دراسات العزو إلى أنه من المرجّح جداً أن عوامل التأثير الطبيعية هذه ليست وحدها وراء الإحترار الملحوظ (انظر الملخّص الفني، الرسم ٢٣). وتمّ التأكد من أن التقلبية الداخلية الطبيعية لا يمكن أن تكون السبب وراء التغيّرات الملحوظة، نظراً إلى الدراسات المطورة التي تبين أن الإحترار حصل على مستوى المحيطات والغلاف الجوي معاً، إلى جانب خسارة الأنهر الجليدية من حجمها الأساسي. {٢,٩، ٣,٢، ٥,٢، ٩,٤، ٩,٥، ٩,٧}

ومن المرجّح جداً أن يكون إزدياد غازات الدفيئة البشرية المنشأ هو الكامن وراء معظم حالات إرتفاع معدّل درجات الحرارة

التغيّر الحراري القاري والعالمي



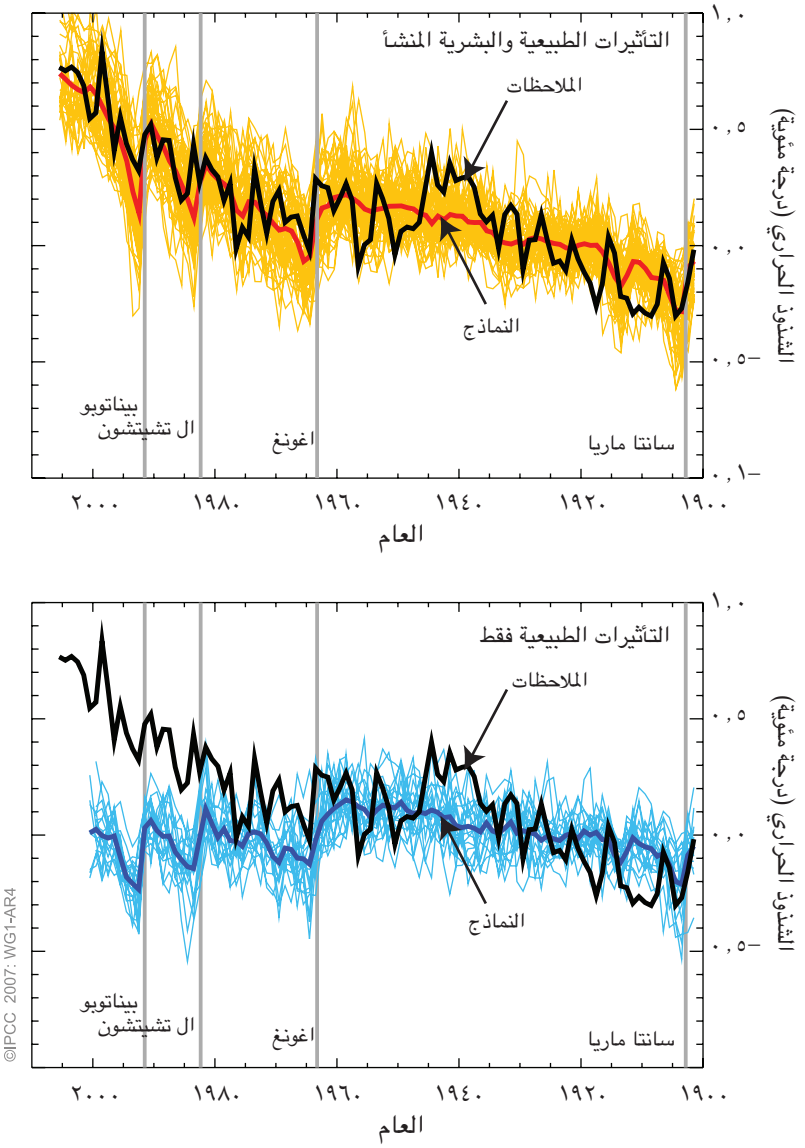
©IPCC 2007: WG1-AR4

الرسم ٢٢: مقارنة التغيّرات القارية والعالمية النطاق لجهة درجات حرارة السطح مع النتائج التي خضعت لمحاكاة النماذج المناخية عبر إستخدام التأثيرات الطبيعية والبشرية المنشأ. وفي الرسم، تبدو المعدّلات العقدية للملاحظات بالنسبة إلى الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٠٦ – ٢٠٠٥ (الخط الأسود)، ضد وسط العقد ونسبة للمعدّل المناسب لها في الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٠١ – ١٩٥٠. تكون الخطوط متقطعة عندما تقل التغطية المكانية عن ٥٠٪. وتظهر الأشرطة الزرقاء اللون النسب المتراوحة بين ٥٪ و٩٥٪ الخاصة بـ١٩ حالة محاكاة من أصل ٥ نماذج مناخية تستخدم التأثيرات الطبيعية فقط نظراً إلى النشاط الشمسي والبراكين. أما الأشرطة الحمراء اللون فتظهر النسب المتراوحة بين ٥٪ و٩٥٪ الخاصة بـ ٥٨ حالة محاكاة من أصل ١٤ نموذجاً مناخياً يستخدم التأثيرات الطبيعية والبشرية المنشأ معاً. ويفصل القسم ٩,٤ والنقطة ٩,٢ من الأسئلة والجدول ٨,١ والمعلومات الإضافية من الفصل التاسع مصادر البيانات والنماذج المستخدمة. {الأسئلة ٩,٢، الرسم ١}

الملحوظ في العالم منذ منتصف القرن العشرين. ومن دون التبريد الناتج عن الأهباء الجوية، من المرجّح أن تكون غازات الدفيئة وحدها التي تسبب إرتفاعاً نسبياً في درجات الحرارة في العالم، يفوق ذلك الذي شهدناه خلال السنوات الخمسين الأخيرة. ويشكّل تغيّر درجات الحرارة عبر الزمن (انظر الملخّص الفني، الرسم ٢٣)، بالإضافة إلى تناقد وجود إحترار في نصف الكرة الغربي، عنصراً حيوياً في تحديد بصمة الأهباء الجوية، وبالتالي كمية التبريد المضاد للإحترار الذي تسببه غازات الدفيئة. واستنتاج فكرة تقول بأن تأثير غاز الدفيئة كان طاغياً، يأخذ بعين الإعتبار بعض الشكوك حول التأثيرات والمراقبة، ويشكّل نقطة قوة لإستخدام نماذج مناخية مختلفة، وسبل متعددة لتقدير الإستجابة للتأثير الخارجي وتقنيات تحليلية متعددة. كما يسمح بإمكانية تعزيز الإستجابة للتأثير الشمسي. {٢,٩، ٦,٦، ٩,١، ٩,٢، ٩,٤}

تمّ الكشف عن إحترار واسع الإنتشار في حرارة مياه المحيطات. وبحسب دراسات العزو الرسمية، من المرجّح أن يكون التأثير البشري المنشأ قد شارك في الإحترار الملحوظ على مستوى مئات الأمتار السطحية من المحيط العالمي، خلال النصف الأخير من القرن العشرين. {٥,٢، ٥,٥، ٩,٥}

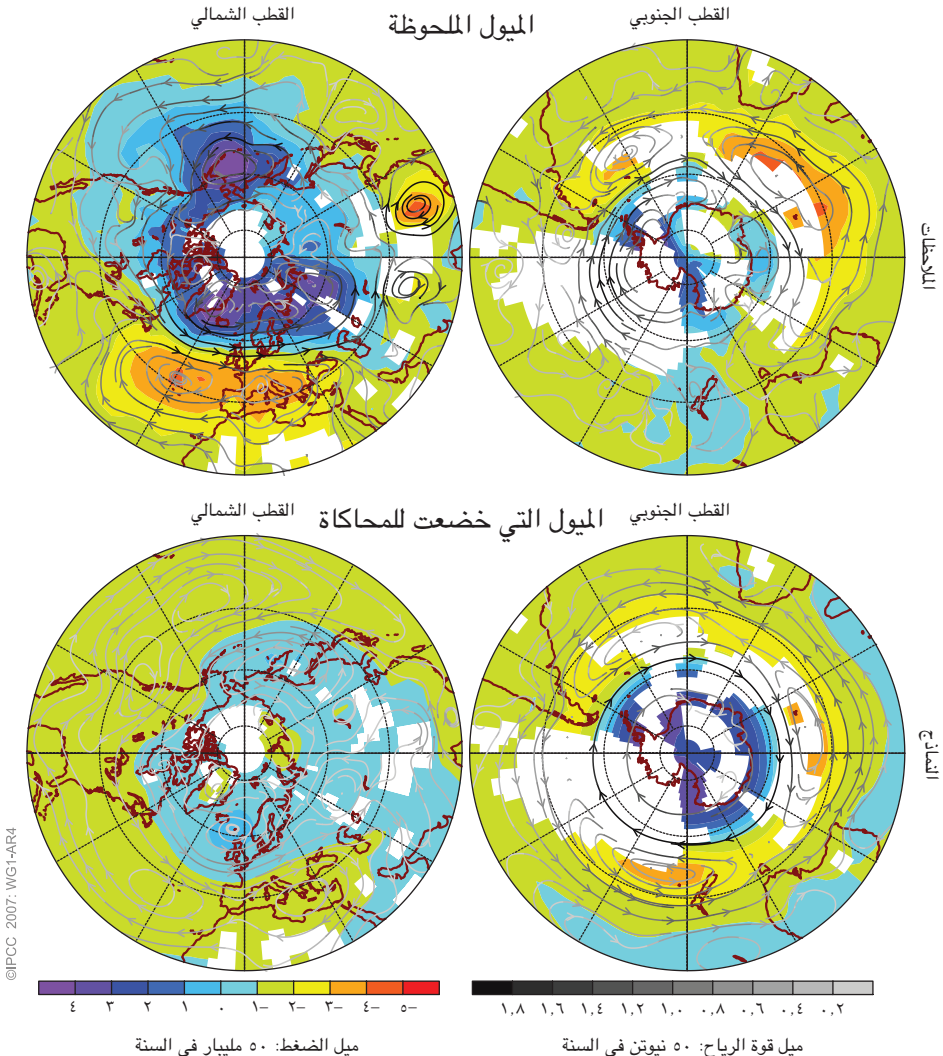
ومن المرجّح أن يكون التأثير البشري المنشأ قد ساهم في الإنخفاض الحديث لنسبة مد الجليد البحري في المنطقة القطبية الشمالية. ومن المتوقع حدوث بعض التغيّرات في الجليد البحري للمنطقة القطبية الشمالية، نظراً إلى تزايد الإحترار في القطب الشمالي. وتعزز دراسات العزو وتطوّر التمثيل المنمذج للجليد البحري ونقل حرارة مياه المحيطات، الاقتناع بهذه الخلاصة. {٣,٣، ٤,٤، ٨,٢، ٨,٣، ٩,٥}



الرسم ٢٣:
[أ] شذوذ درجات حرارة السطح النسبية في العالم، خلال الفترة المتراوحة بين العامين ١٩٠١ و١٩٥٠، كما يبيّن الرسم (الخط الأسود) وكما تشير حالات المحاكاة لجهة التأثيرات الطبيعية والبشرية المنشأ. يشير المنحنى السميك الأحمر اللون إلى المجموعة المتعددة النماذج، فيما تشير المنحنيات الرفيعة الحمراء اللون إلى حالات المحاكاة الفردية. وترمز الخطوط العمودية الرمادية اللون إلى توقيت أهم الأحداث البركانية.
[ب] الأمر سيان بالنسبة إلى هذا الرسم البياني الثاني، باستثناء انّ شذوذ درجات الحرارة النسبية العالمية التي خضعت للمحاكاة تتعلق بالتأثيرات الطبيعية فقط. يرمز المنحنى السميك الأزرق اللون إلى المجموعة المتعددة النماذج، بينما ترمز المنحنيات الرفيعة الزرقاء اللون إلى حالات المحاكاة الفردية. واختُبرت كل محاكاة بطريقة تجعل التغطية تتناسب مع تغطية الملاحظات. {الرسم ٩,٥}

من المرجّح جداً أن تكون الإستجابة للتأثير البشري المنشأ قد ساهمت في إرتفاع مستوى سطح البحر خلال النصف الثاني من القرن العشرين، غير أن التقلبية العقدية التي عرفها إرتفاع مستوى سطح البحر لا تزال مبهمة. وتلتقي التقديرات المنمذجة لمساهمة المد الحراري في إرتفاع مستوى سطح البحر مع تقديرات أخرى تستند إلى ملاحظات تعود إلى الفترة الممتدة بين العامين ١٩٦١ و٢٠٠٣، على الرغم من أن الميزانية المخصصة لهذا الشأن لم تكن كافية في تلك الفترة. ويتناسب الإرتفاع الملحوظ في حجم الكتل التي تخسرها الأنهار والأغطية الجليدية، مع المعدّل العالمي لإرتفاع درجات الحرارة، حسبما أشارت التوقعات الفيزيائية (انظر الملخّص الفني، الجدول ٣). وقد يكون لتفوق نسبة إرتفاع مستوى سطح البحر في الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٩٣ و٢٠٠٣ على نسبة إرتفاعه الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٦١ و٢٠٠٣، علاقة مع التأثير البشري المنشأ المتزايد، الذي ساهم على الأرجح في إحترار سطح المحيط وإرتداد الأنهر جليدية المنتشر. من جهة اخرى، يكشف سجل مقاييس المد والجزر لمستوى سطح البحر النسبي في العالم أن نسباً مرتفعة أيضاً قد تحققت في فترات عقدية سابقة بدءاً من العام ١٩٥٠، ما يعني أن التقلبية الداخلية الطبيعية قد تكون إحدى العوامل التي ساهمت في إحداث نسبٍ مرتفعة في الفترة

ميول ضغط مستوى سطح البحر من كانون الأول / ديسمبر إلى شباط/فبراير



الرسم ٢٤: ميول ضغط مستوى سطح البحر من كانون الأول / ديسمبر إلى شباط / فبراير إستناداً إلى معدّلات عقدية خاصة بالفترة المتراوحة ما بين ١٩٥٥ و٢٠٠٥. (في الأعلى) الميول المقدرة بحسب سلسلة من البيانات الملحوظة والمعروضة في مناطق تحظى بتغطية للمراقبة. (في الأسفل) الميول النسبية التي خضعت للمحاكاة إستجابة لتغيّرات التأثير الطبيعي والتأثير البشري المنشأ في ٨ نماذج مقرونة. ولا تُنشر الميول الخاضعة لمحاكاة النماذج إلا حيث تُنشر الميول المستندة إلى المراقبة. إن الخطوط الإنسيابية غير المقنعة تظهر وجهة الميول في قوة الرياح الآتية من الميول الخاصة ضغط مستوى سطح البحر. أما تظليل الخطوط الإنسيابية فيشير إلى حجم التغيّر، فيما تشير الخطوط الداكنة اللون إلى تغيّرات أكبر لجهة قوة الرياح. ترد مصادر البيانات والنماذج مفصلة في الفصل التاسع ومواده الإضافية ويعطي الجدول ٨,١ تفاصيل أكثر عن النماذج. {الرسم ٩,١٦}

المتدة ما بين العامين ١٩٩٣ و٢٠٠٣. وتفوق التقلبية العقدية الملحوظة على مستوى سجل مقاييس المد والجزر تفسيرات التقلبية المأخوذة عن تقديرات تغيّر المد الحراري والجليد القاري، المستخلصة من حالات المراقبة. أضف إلى ذلك أن التقلبية العقدية الملحوظة في المد الحراري تتعدى نماذج المحاكاة الخاصة بالقرن العشرين. وبالتالي، فإن الأسباب الفيزيائية للتقلبية الملحوظة على مستوى سجل مقاييس المد والجزر غير مؤكدة. ولا تساهم تلك المسائل العالقة الخاصة بتغيّر مستوى سطح البحر وتقلبيته العقدية الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٦١ و٢٠٠٣، في تحديد كمٍّ من الأسباب التي أدّت إلى إرتفاع مستوى سطح البحر (من العام ١٩٩٣ إلى العام ٢٠٠٣) تعود إلى التقلبية الداخلية الطبيعية، وكمٍّ آخر منها يعود إلى التغيّر المناخي البشري المنشأ. {٥,٥، ٩,٥}

٤,٢. عزو التغيّر المكاني والزماني في درجات الحرارة

من المرجّح جداً أن الأنماط الملحوظة لإحترار التروبوسفير وتبريد الستراتوسفير هي إحدى نتائج التأثير البشري المنشأ، لا سيما في ما يتعلق بإزدياد غاز الدفيئة وإستنفاد الأوزون الستراتوسفيري. وتشير التحاليل الجديدة التي تلت تقرير التقييم الثالث إلى أن هذا النمط يتماشى مع إرتفاع التروبوبوز الناتج على الأرجح عن تعديل غاز الدفيئة وأوزون الغلاف الزمهريري. ولا تزال تقديرات هامة حول تقدير أنماط درجات الحرارة في التروبوسفير، وخاصةً من قبل سجل المسبار اللاسلكي. {٣,٢، ٣,٤، ٩,٤}

ومن المرجّح أن منتصف القرن العشرين شهد مساهمة بشرية المنشأ وحيوية في زيادة معدّلات درجات الحرارة على سطح كل قارة بإستثناء أنتاركتيكا. ولا تملك أنتاركتيكا ما يكفي من التغطية والرصد للإدلاء بأي تقييم. كما لُمست بوادر عن الإحترار البشري المنشأ في بعض المناطق الأرضية شبه القارية. وتمنح قدرة النماذج المناخية المقرونة على محاكاة تطور درجات الحرارة في كلٍ من القارات الست، دلائل أقوى على دور الإنسان في تغيّر المناخ، وأكثر من تلك التي كانت متوفرة في تقرير التقييم الثالث. ما من نموذج مناخي عالمي مقرون استخدم التأثير الطبيعي فقط تمكّن من اعادة توليد نمط الإحترار النسبي الملحوظ في العالم، أو ميول الإحترار النسبية القارية في كل قارة على حدى (بإستثناء أنتاركتيكا) خلال النصف الثاني من القرن العشرين. {٩,٤}

ولا تزال الصعوبات قائمة في عزو التغيّرات الحرارية على نطاقات أضيق من القارات وعلى فترات زمنية لا تتعدى الخمسين سنة. ولم تحدد نتائج العزو على هذه النطاقات، بإستثناء بعض النتائج المحدودة. ويقلل تنبؤ المعدّلات على مستويات إقليمية أصغر التقلبية الطبيعية، أكثر من التنبؤ على مساحات واسعة، ممّا يصعب التمييز بين التغيّرات المتوقعة من التأثير الخارجي والتقلبية. أضف إلى ذلك أن التغيّرات الحرارية بالإضافة إلى بعض أنماط التقلبية لا تلقى المحاكاة المناسبة من قبل النماذج في بعض المناطق والفصول. كما أن تفاصيل التأثير الخارجي الصغيرة النطاق ومحاكاة النماذج للإستجابة لا تتمتع بالمصداقية التي تعكسها الخصائص الواسعة النطاق. {٨,٣، ٩,٤}

من المرجّح أن التأثير البشري المنشأ أثّر على الظواهر المتطرفة لدرجات حرارة السطح. يبيّن العديد من المؤشرات المتعلقة بالظواهر المتطرفة ، بما في ذلك الأرقام السنوية والقيم المتطرفة للأيام والليالي الحارة والباردة، بالإضافة إلى أرقام تتعلق بأيام الصقيع، التغيّرات التي تترافق مع الإحترار. وقد تمّ الكشف عن التأثير البشري المنشأ في بعض هذه المؤشرات، وتبين أن التأثير البشري المنشأ قد ساهم بشكلٍ كبير في زيادة خطر حصول إرتفاع شديد لدرجات الحرارة الصيفية في بعض المناطق، على غرار موجة الحر التي ألهبت أوروبا في صيف العام ٢٠٠٣. {٩,٤}

٤,٣. عزو التغيّرات في الدوران وتساقط الأمطار وغيرها من المتغيّرات المناخية

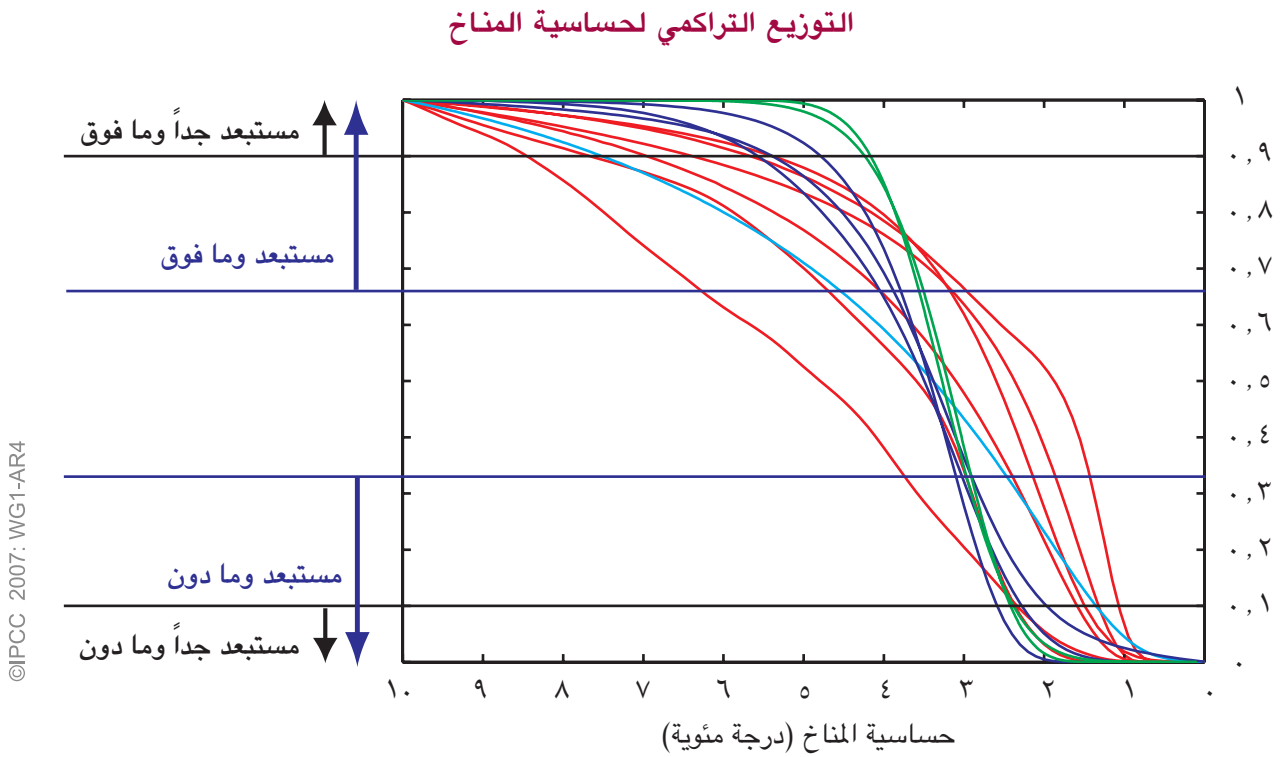
من المرجّح أن بعض الميول في الأنماط الحلقية الشمالية والجنوبية التي شهدتها العقود الأخيرة، والتي تتناسب مع إنخفاض ضغط مستوى سطح البحر في القطبين والتغيّرات ذات الصلة في الدوران الجوي، ترتبط جزئياً بنشاطات الإنسان (انظر الملخّص الفني، الرسم ٢٤). تعيد النماذج توليد إشارة ميل النمط الحلقي الشمالي، إلا أن الإجابة التي خضعت للمحاكاة كانت أصغر مما شوهد. وتقوم النماذج التي تتضمن تغيّرات تتعلق بغاز الدفيئة وأوزون الغلاف الزمهريري بمحاكاة ميل فعلي في النمط الحلقي الجنوبي، ما يؤدي إلى تأثير الإنسان على ضغط مستوى سطح البحر في العالم الذي يتناسب بدوره مع نزعة التبريد الملحوظة على مستوى المناخ السطحي في بعض الأجزاء من أنتاركتيكا. وتؤدي تغيّرات الدوران في نصف الكرة الغربي وعزوها للنشاط إلى ما يلي: من المرجّح أن التأثير البشري المنشأ ساهم في تغيّر أنماط الدوران ودرجات الحرارة في

منطقتي خطوط العرض الوسطى والعليا، بالإضافة إلى التغيّرات التي طرأت على الرياح ومسار العواصف. لكن، تبقى الآثار الكمية غير أكيدة، لأن الإجابات الخاضعة للمحاكاة على التأثير الذي أدّى إلى تغيّر القطب الشمالي في القرن العشرين، تتناسب مع ملاحظات تلك التقلبات من الناحية النوعية فقط وليس من الناحية الكمية. {٣,٦، ٩,٥، ١٠,٣}

ظهرت بعض الدلائل حول تأثير العوامل الخارجية على الدورة الهيدرولوجية. ويتناسب النمط النطاقي الواسع الملحوظ للتغيّرات المتعلقة بتساقط الأمطار القاريّة في القرن العشرين، مع نماذج المحاكاة من الناحية النوعية، التي تشير إلى دورٍ بشري. وتمت نمذجة ميل عالمي ملحوظ نحو إزدياد نسبة الجفاف خلال النصف الثاني من القرن العشرين، وأُخذت التأثيرات البشرية المنشأ والطبيعية بعين الإعتبار. بحسب بعض الدراسات، من المستبعد أن تكون التغيّرات في إستخدام الأراضي، نتيجة الري المفرط وتحويل الأحراج إلى أراضٍ زراعية على سبيل المثال، من أسباب الجفاف الأولى على الساحل وفي أستراليا. وتبيّن المقارنة بين الملاحظات والنماذج أن التغيّرات التي حصلت على مستوى الرياح الموسمية وقوة العواصف وتساقط الامطار في الساحل، ترتبط، ولو جزئياً، بالتغيّرات الملحوظة على مستوى درجات حرارة سطح البحر. ومن المتوقع أن تتأثر تغيّرات درجات الحرارة على سطح البحر في العالم بالعوامل البشرية المنشأ إلا أنه لم يتم تحديد الرابط بين تغيّر درجات حرارة سطح البحر على الصعيد الإقليمي والتأثير حتى الآن. ولا يتوقف تغيّر تساقط الأمطار على درجات حرارة سطح البحر وحدها، بل يتوقف أيضاً على التغيّرات الإقليمية للدوران الجوي، ما يصعب عزو الأمر إلى التأثير البشري المنشأ. {٣,٣، ٩,٥، ١٠,٣، ١١,٢}

٤,٤. دراسة العزو في مناخ عصر ما قبل التاريخ

من المرجّح جداً ألا تكون التغيّرات المناخية التي تعود إلى ٧ قرون سبقت العام ١٩٥٠ غير مرتبطة بالتقلبية التي لا تخضع للتأثير فقط. وتشير دراسات العزو والكشف إلى أنه من المرجّح جداً أن يكون جزء هام من تقلبية درجات الحرارة العقدية البينية في منطقة القطب الشمالي التي تعود إلى فترة ما قبل التصنيع والتي تدخل في حالات إعادة التوليد الخاصة بهذه الفترة، ناتجةً عن



الرسم ٢٥: التوزيع التراكمي لحساسية المناخ بحسب الإحترار (باللون الأحمر) الملحوظ في القرن العشرين ونموذج علم المناخ (باللون الأزرق) والدلائل غير المباشرة (باللون الازرق الداكن) وحساسية المناخ في نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات (باللون الاخضر). وتدل الخطوط الأفقية والأسهم على حدود التقديرات المرجّحة والمحددة في المذكرة التوجيهية الرابعة من أجل التقييم الصادرة عن الهيئة الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ (انظر الملخّص الفني، الإطار ١). {الإطار ١٠,٢– الرسم ١ و٢}

التأثير الخارجي الطبيعي. ويتضمن مثل هذا التأثير موجات تبريد مرحلية تُعزى إلى حالات معروفة من الثوران البركاني، كان عددٌ منها أهم من تلك التي حصلت في القرن العشرين (وذلك بالاستناد إلى دلائل عدة كالقلنسوات الجليدية)، وإلى تقلبات طويلة الأمد في الإشعاعات الشمسية، مثل الإشعاعات المنخفضة خلال الحد الأدنى من حقبة «موندر». أضف إلى ذلك أنه من المرجّح أن التأثير البشري المنشأ شارك في الإحترار الذي حصل في بدايات القرن العشرين، والذي يبدو واضحاً في السجلّات. ومن المستبعد أن تؤدي الشكوك إلى اتفاقٍ زائفٍ بين إعادة توليد درجات الحرارة وإعادة توليد التأثيرات، كما ورد في بيانات غير مباشرة. ولا تكفي البيانات المتوفرة لإجراء تقييم مماثل حول القطب الجنوبي. {٦,٦، ٩,٣}

٤,٥. إستجابة المناخ للتأثير الإشعاعي

يمثل تحديد هذا التقرير لنطاق محتمل وقيمة أكثر إحتمالاً لجهة الحساسية المناخية[٨] المتوازنة ، خطوةً معنوية هامة في تحديد كمية إستجابة النظام المناخي للتأثير الإشعاعي منذ صدور تقرير التقييم الثالث، كما يُعتبر تطوراً على مستوى التحديات المطروحة لفهم الأمور والتي استمرت على مدى ٣٠ سنة وأكثر.

وأشار تقرير التقييم الثالث إلى نطاق حساسية المناخ المتوازنة – أي معدّل الإحترار العالمي المتوازن والمتوقع إذا تمّت مضاعفة تركيزات ثاني أكسيد الكربون التي كانت موجودة في فترة ما قبل الثورة الصناعية (حوالي ٥٥٠ جزءاً بالمليون) – وحدده بين ١,٥ و٤,٥ درجة مئوية. في السابق، لم يكن ممكناً التوصل إلى تقدير أفضل أو التنبؤ بإحتمال خروج حساسية المناخ عن النطاق المذكور. ويعتمد هذا التقييم مقاربات مختلفة لتقييد حساسية المناخ، مثل إستخدام نماذج الدوران العام للغلاف الجوي– المحيطات ودراسة تطور درجات الحرارة المؤقت (السطح والغلاف الجوي العلوي والمحيطات) خلال السنوات الـ١٥٠ الماضية، ودراسة إستجابة النظام المناخي العالمي السريعة لتغيّرات التأثير الناتجة عن الثوران البركاني (انظر الملخّص الفني، الرسم ٢٥). إلى ذلك، تُضاف تقديرات تستند إلى دراسات عن مناخ عصر ما قبل التاريخ كإعادة توليد درجات الحرارة في القطب الشمالي للألفية الماضية والحد الأقصى للغمر الجليدي الأخير. وأظهرت مجموعات كبرى من حالات محاكاة النماذج المناخية أن قدرة النماذج على محاكاة المناخ الحالي تكتسي قيمةً أكبر عند تقييد حساسية المناخ. {٨,١، ٨,٦، ٩,٦ – الإطار ١٠,٢}

يشير تحليل النماذج، بالإضافة إلى القيود التي تتبع الملاحظات، إلى أن حساسية المناخ المتوازنة ستتراوح على الأرجح بين درجتين مئويتين إثنتين و٤,٥ درجات مئوية، وتساوي ٣ درجات مئوية بالتحديد. ومن المستبعد جداً أن تقل عن معدّل ١,٥ درجة مئوية. ولا يمكن تهميش القيم التي تتعدى الـ ٤,٥ درجات، إلا أنها لن تتناسب مع الملاحظات. وغالباً ما تميل وظائف الكثافة المستخلصة من عدة مقاربات ومعلومات إلى الإقتراب من قيم مرتفعة تتعدى الـ ٤,٥ درجة مئوية. ولا تصف تحليلات تطوّر المناخ والتأثيرات الخاصة بالقرون السابقة ودراسات مجموعة النماذج، حساسية المناخ بأنها تساوي ٦ درجات مئوية وما فوق. وتشكل فاعلية التأثير الإشعاعي على نطاقات صغيرة خلال القرن العشرين، في حال بلغت قدرات التبريد غير المباشرة للأهباء الجوية الحد الأقصى من تراوح شكوكها، أحد العناصر في هذا الإطار، ما يلغي معظم التأثير الإيجابي الناتج عن غازات الدفيئة. لكن، ما من طريقة معيّنة لوظيفة توزيع ممكنة وصادرة عن نتائج فردية، تأخذ الفرضيات المختلفة لكل دراسة بعين الاعتبار. ويمنع الإفتقار إلى قيود قوية تحد حساسيات المناخ العالية، تحديد حساسية المناخ عند حد المئين الخامس والتسعين أو ما يقاربه. {الإطار ١٠,٢}

اليوم، بات من الأسهل تفهّم العمليات المناخية الأساسية والهامة بالنسبة إلى حساسية المناخ، وذلك بسبب تطوّر تحاليل ومقارنات النماذج في ما بينها ومع الملاحظات. وتسيطر تغيّرات

الجدول ٥. أفضل تقدير، نطاقات مرجّحة والحدود الأدنى المرجّحة جداً لزيادة المتوسط العالمي لدرجات الحرارة السطحية (درجة مئوية)، لدرجات الحرارة من المرحلة ما قبل الصناعية، ولمستويات مختلفة من ثاني أكسيد الكربون والتأثير الإشعاعي المكافئ، الناتجة عن حساسية المناخ.

التوازن	زيادة في درجات الحرارة (درجة مئوية)		
ثاني أكسيد الكربون (جزء في المليون)	أفضل تقدير	مرجّح جداً فوق النطاق	مرجّح ضمن النطاق
٣٥٠	١,٠	٠,٥	١,٤–٠,٦
٤٥٠	٢,١	١,٠	٣,١–١,٤
٥٥٠	٢,٩	١,٥	٤,٤–١,٩
٦٥٠	٣,٦	١,٨	٥,٥–٢,٤
٧٥٠	٤,٣	٢,١	٦,٤–٢,٨
١٠٠٠	٥,٥	٢,٨	٨,٣–٣,٧
١٢٠٠	٦,٣	٣,١	٩,٤–٤,٢

[٨] لتحديد الحساسية للمناخ على نحو مفصّل، راجع معجم المصطلحات.

بخار الماء على التأثير التفاعلي الذي يؤثر على حساسية المناخ، وباتت اليوم مفهومة بشكل أفضل. وتؤيد الأدلة المرتبطة بالملاحظات والنمذجة، التأثير التفاعلي لمعدّل بخار الماء – التفاوت الحراري[٩] المشترك والذي يتساوى مع قوة نماذج الدوران العام، أي إزدياد درجات الحرارة بحوالي ١ واط بالمتر المكعب لكل درجة إرتفاع من درجات الحرارة في العالم، ما يتناسب مع إحترار نسبي عالمي يصل إلى ٥٠٪. وبرهنت نماذج الدوران العام هذه قدرتها على محاكاة تقلبات الرطوبة الموسمية والعقدية البينية، في الطبقة العليا من التروبوسفير الموجودة فوق الأرض والمحيط، كما نجحت في محاكاة التغيّرات الملحوظة لجهة الرطوبة وحرارة السطح، إلى جانب الثوران البركاني. ويبقى التأثير التفاعلي في السحب (وخاصةً السحب المتدنّية الإرتفاع) مصدر الشك الأكبر. واظهر التأثير التفاعلي في الغلاف، كالتغيّر في الغطاء الجليدي، أنه لم يساهم في إنتشار تقديرات النماذج حول حساسية المناخ، بقدر التأثير التفاعلي للسحب وبخار الماء، على الرغم من أهميته بالنسبة إلى تجاوب المناخ الإقليمي في مناطق خطوط العرض الوسطى والعليا. وتشير مقارنة جديدة بين النماذج إلى أن فوارق في أعداد النقل الإشعاعي تساهم أيضاً في تحديد النطاق. {٣,٤، ٨,٦، ٩,٣، ٩,٤، ٩,٦، ١٠,٢ – الإطار ١٠,٢}

الإطار ٨: هرمية نماذج المناخ العالمية

يمكن القيام بتقديرات حول تغيّر درجات الحرارة النسبية في العالم وإرتفاع مستوى سطح البحر الناتج عن المد الحراري، من خلال إستخدام نماذج المناخ البسيطة التي تمثل نظام الغلاف الجوي – المحيطات من خلال مجموعة من الإطارات حول العالم أو نصف الكرة الغربي، وتتنبأ بدرجات حرارة السطح في العالم من خلال إستخدام معادلة لتوازن الطاقة وقيمة محددة لحساسية المناخ وتمثيل أساسي لإمتصاص حرارة المحيطات. ويمكن أيضاً أن تقترن هذه النماذج بنماذج مبسطة للدورات الكيميائية الأرضية الأحيائية وتسمح بتقدير سريع لإستجابة المناخ إلى سلسلة واسعة من سيناريوهات الإنبعاثات. {٨,٨ ، ١٠,٥}

تتضمن نماذج نظام الأرض المتوسطة الصعوبة بعض الديناميات الخاصة بالدوران المحيطي والجوي أو تعيين البارامترات، وغالباً ما تتضمن تمثيلاً للدورات الكيميائية الأرضية الأحيائية، إلا أن كافة تلك النماذج تملك قدرة ضئيلة على الاستبانة المكانية. ويمكن إستخدام هذه النماذج للتحقيق في تغيّر المناخ القاري النطاق والآثار الطويلة المدى والواسعة النطاق للإقتران بين مكونات نظام الأرض من خلال إستخدام مجموعات واسعة من تشغيل / تطبيق النماذج أو التطبيق على مدى عقود. وبالنسبة إلى نماذج المناخ البسيطة ونماذج نظام الأرض المتوسطة الصعوبة، يمكن إحتساب تعيين أماكن البارامترات بكل سهولة، مع الأخذ بعدم اليقين حول البارامتر الناتج عن الإهتمام بنماذج مناخية أكثر شموليةً والملاحظات المناسبة واللجوء إلى حكم الخبراء. وبالتالي، يوائم نوعا النموذج القيام بتنبؤات محتملة عن المناخ المستقبلي، ويسمحان بالقيام بمقارنة بين «الإستجابة غير الأكيدة» الناتجة عن الشك في بارامترات نموذج المناخ من جهة، و«نطاق السيناريو» الناتج عن بعض سيناريوهات الإنبعاثات التي أُخذت بعين الإعتبار. وقد تمّ تقييم نماذج نظام الأرض المتوسطة الصعوبة بعمقٍ أكبر من ذي قبل وأظهرت المقارنات البينية أنها مفيدة لدراسة المسائل التي تمتد على نطاقات زمنية طويلة وتتطلب مجموعات واسعة من المحاكاة. {٨,٨، ١٠,٥، ١٠,٧}

تشكل نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات نماذج المناخ الأكثر شمولية. فهي تتضمن مكونات دينامية تصف العمليات الجوية والمحيطية والخاصة بسطح الأرض، كما الجليد البحري ومكوّنات أخرى. أُحرز تقدمٌ كبير منذ تقرير التقييم الثالث (انظر الملخّص الفني، الإطار ٧)، وهناك أكثر من ٢٠ نموذجاً متوفراً حول محاكاة المناخ صادراً عن مراكز مختلفة. على الرغم من أن الديناميات الواسعة النطاق لهذه النماذج شاملة، لا يزال تعيين البارامترات مستخدماً للإشارة إلى العمليات الفيزيائية غير المحلولة مثل تكوّن السحب والأمطار والإختلاط المحيطي الناتج عن عمليات الأمواج وتكون الكتل المائية وغيرها... يشكّل عدم اليقين لجهة تعيين البارامترات السبب الأول لتباين التنبؤات المناخية بين مختلف نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات. وفيما تتطور دراسة هذه النماذج، لا تزال غير كافية للإحاطة ببنية المتغيّرات المناخية الضيقة النطاق في مناطق مختلفة. وفي مثل هذه الحالات، يمكن إستخدام النتائج التي توصلت إليها نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات لإرشاد نماذج محدودة النطاق (أو مناخات إقليمية) تجمع ما بين شمولية تمثيل العمليات الشبيهة نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات، ودراسة مكانية على نطاقات أوسع بكثير. {٨,٢}

[٩] معدّل تدنّي درجة حرارة الهواء مع الارتفاع.

يسمح تطور تقدير حساسية المناخ بتحديد أفضل التوقعات لجهة درجات الحرارة المتوازنة، والتنبؤ بالتراوح المحتمل في حال ثبت تركيز ثاني أكسيد الكربون على مستويات مختلفة، استناداً إلى تقديرات عالمية حول توازن الطاقة (الجدول ٥). وكما في تقدير حساسية المناخ، لا يمكن تحديد المستوى الفعلي للطبقة العليا. ومن الضروري الأخذ بحدود مفهوم التأثير الإشعاعي وحساسية المناخ. ولم تقم سوى قلة قليلة من نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات بتناول مسألة التوازن بحسب تركيز قوي لثاني اكسيد الكربون، وأظهرت بعض النتائج أن التأثير التفاعلي في المناخ قد يتغيّر مع مرور الوقت، ما يؤدي إلى انحراف واضح عن تقدير الإحترار المستند إلى حساسية المناخ المتوازنة، الناتجة عن نماذج طبقة المحيطات المختلطة وتغيّر مناخ عصر ما قبل التاريخ. {١٠,٧}

تطور إتفاق النماذج بخصوص تغيّرات المناخ المؤقتة المتوقعة منذ تقرير التقييم الثالث. ويتعدى تراوح حساسية المناخ المتوازنة نطاق تجاوب المناخ المؤقت (المحدَّد كالمعدّل العالمي لحرارة سطح الجو المحتسب على مدى عقدين من الزمن وبالاستناد إلى الفترة التي شهدت إزدياد كمية ثاني أكسيد الكربون بضعفين، وذلك بنسبة ١٪ في السنة الواحدة حسبما برهنت التجربة) المعروض بين النماذج. واليوم، باتت المجموعات المتعددة النماذج والمقارنات مع الملاحظات تقيد ذلك المعيار بطريقة أفضل. ومن المرجّح جداً أن يتعدى الدرجة المئوية الواحدة ومن المستبعد جداً أن يتخطى الثلاث درجات مئوية. وتتعلق إستجابة المناخ المؤقتة بالحساسية على نحو لا خطيّ، فتلك الحساسيات لا تترجم مباشرةً في الإستجابة القصيرة الأمد. وتتأثر إستجابة المناخ المؤقتة كثيراً بنسبة امتصاص حرارة المحيطات. وعلى الرغم من تطور نماذج المحيطات، يؤثر انحراف النماذج المنتظم والبيانات المحدودة المستخدمة لتقييم امتصاص حرارة المحيطات المؤقت، على دقة التقديرات الحالية. {٨,٣، ٨,٦، ٩,٤، ٩,٦، ١٠,٥}

الملخّص الفني ٥: التنبؤ بالتغيّرات المستقبلية في المناخ

منذ تقرير التقييم الثالث، حصلت تطورات هامة في علم تنبؤ تغيّر المناخ. وقد بُذلت جهود فريدة من نوعها من أجل توفير نماذج جديدة ودقيقة ووضعها في خدمة الباحثين الموجودين خارج مراكز النمذجة. وقد طوّر فريق يتألف من ١٤ مجموعة متخصصة في وضع نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات من ١٠ بلدان مختلفة، مستخدماً ٢٣ نموذجاً، سلسلة من التجارب المعيارية المنسقة. وتشكّل قاعدة البيانات المتعددة النماذج التي تم التوصل إليها، والتي خضعت لتحليل مئات الباحثين من كافة أنحاء العالم، قاعدة أساسية لتقييم نتائج هذا النموذج. وقد تم التوصل إلى تطورات عديدة من جراء إستخدام نماذج فردية ومجموعات متعددة النماذج للمجموعات المتعددة الأعضاء (مثلاً: لاختبار حساسية الإستجابة للشروط الأساسية). ويسمح هذان النوعان من المجموعات القيام بدراسات أكثر متانةً عن تراوح نتائج النموذج والقيام بتقييم عددٍ أكبر من النماذج بدلاً من الملاحظات، كما يؤمنان معلومات جديدة حول التقلبية الاحصائية الخاضعة للمحاكاة. {٨,١، ٨,٣، ٩,٤، ٩,٥، ١٠,١}

يركز هذا التقرير على عددٍ من الطرق الهادفة إلى تقديم إسقاطات محتملة حول تغيّر المناخ، لجهة المعدّلات العالمية والصور الجغرافية المفصّلة التي برزت منذ تقرير التقييم الثالث. وهي تتضمن طرقاً تستند إلى نتائج مجموعات نموذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات، من دون تطبيق القيود الملحوظة بشكل رسمي، كما تتضمن طرقاً تستند إلى الكشف بالطرق الحسابية، وإلى مجموعات كبرى من النماذج توفر إسقاطات تتماشى مع الملاحظات المتعلقة بتغيّر المناخ والشكوك ذات الصلة. وباتت بعض الطرق تُعتبر مصادر غير موثوقة على الإطلاق، ومنها التأثير التفاعلي للمناخ وامتصاص حرارة المحيطات والتأثير الإشعاعي ودورة الكربون. وتعيق ميولٌ حديثة لوحظت بالمراقبة بعض الإسقاطات القصيرة الأمد. وطرحت بعض الدراسات إحتمالات إضافية، مثل أرجحية التغيّرات المستقبلية في الظواهر المتطرفة كموجات الحرّ التي يمكن أن تحصل نتيجة التأثيرات البشرية. وحصلت أيضاً بعض التطورات منذ تقرير التقييم الثالث، وذلك من خلال دراسات أكثر شمولية تناولت التغيّرات المناخية الملتزمة والتأثير التفاعلي في الكربون على المناخ. {٨,٦، ٩,٦، ١٠,١، ١٠,٣، ١٠,٥}

توفّر التطورات التي شهدها علم نمذجة تغيّر المناخ قاعدةَ إحتمالات تمييز الإسقاطات المتعلقة بتغيّر المناخ، بالنسبة إلى عدة سيناريوهات من التقرير الخاص عن سيناريوهات الإنبعاثات. ويتعارض ذلك مع تقرير التقييم الثالث. عجزت سيناريوهات دليلية مختلفة عن تحديد تراوحات للإحتمالات. وبالنتيجة، يحدد هذا التقييم ويعدد إختلاف الطباع بين الشكوك التي تحيط بنمذجة المناخ، وتلك التي تتعلق بالافتقار إلى المعرفة المسبقة بالقرارات التي ستؤثر على إنبعاثات غاز الدفيئة. وقد يُعزى نقص المعلومات ذات الصلة بالسياسات إلى جمع الإسقاطات المحتملة.

ولهذه الأسباب، لم تُدرج الإسقاطات المتعلقة بمختلف سيناريوهات الإنبعاث في هذا التقرير.

وتعتبر محاكاة النماذج المستخدمة هنا إستجابة النظام المناخي الفيزيائي لسلسلة من الشروط المستقبلية المحتملة، عبر إستخدام فرضيات مثالية حول الإنبعاثات أو التركيز. وهي تتضمن تجارب تظهر غازات الدفيئة والأهباء الجوية مستقرة على مستويات العام ٢٠٠٠، وتجارب تتعلق بإزدياد كميات ثاني أكسيد الكربون بضعفين وأربعة أضعاف، والسيناريوهات الدليلية المضمونة في التقرير الخاص بالفترة المتراوحة بين العامين ٢٠٠٠ و٢١٠٠، بالإضافة إلى تجارب خاصة بغازات الدفيئة والأهباء الجوية التي حافظت على استقرارها بعد العام ٢١٠٠، مضيفةً معلومات جديدة عن النواحي الفيزيائية للتغيّر والاستقرار المناخي الطويل المدى. ولم تتضمن سيناريوهات التقرير الخاص مبادرات مناخية. فهذا التقييم الذي تقدم به الفريق العامل الأول لا يدرس إمكانية أو أرجحية سيناريو معين من سيناريوهات الإنبعاثات. {١٠,١، ١٠,٣}

وتكمل سلسلة جديدة من البيانات المتعددة النماذج، التي تستخدم نماذج نظام الأرض المتوسطة التعقيد، تجارب نموذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات بهدف تمديد أفق الوقت لقرونٍ إضافية في المستقبل. ما يقدم سلسلة أشمل من بالفترة النماذج في هذا التقييم، بالإضافة إلى معلومات جديدة حول تغيّر المناخ على فترات طويلة من الزمن يكون فيها تركيز غاز الدفيئة والأهباء الجوي مستقراً. وتتضمن بعض نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات ونماذج نظام الأرض المتوسطة التعقيد، مكونات محتملة من دورة الكربون، ما سمح بتقدير الآثار المتوقعة والشكوك ذات الصلة لجهة التغذية المرتدة في دورة الكربون. {١٠,١}

١,٥. فهم التغيّر المناخي القريب الأمد

تؤكد معرفة النظام المناخي ومحاكاة النماذج أن التغيّرات الماضية التي طرأت على تركيز غاز الدفيئة ستؤدي إلى حصول إحترار ملتزم (انظر الإطار ٩، لمعرفة التعريف) وتغيّر المناخ في المستقبل. وتقدّم نتائج النموذج الجديد للتجارب التي حافظت فيها كافة عوامل التأثير على ثباتها، تقديرات أفضل حول التغيّرات الملتزمة على مستوى التقلبات الجوية التي قد تتبعها جراء تجاوب النظام المناخي البعيد الأمد، ولا سيما المحيطات. {١٠,٣، ١٠,٧}

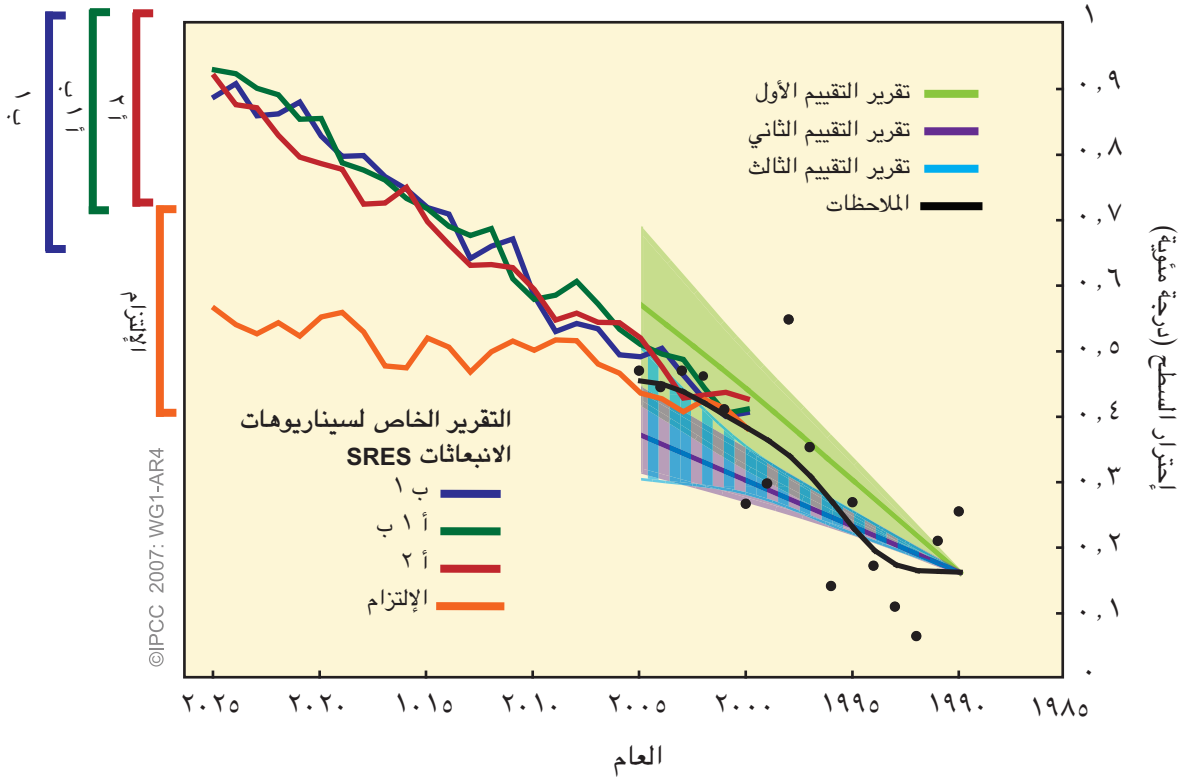
وبات من الممكن اليوم مقارنة الإسقاطات السابقة للهيئة الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ حول التغيّرات المناخية المستقبلية، بالملاحظات الحديثة، ما يعزز الثقة في الإسقاطات القصيرة الأمد وما تتضمنه من فهم فيزيائي لتغيّر المناخ الملتزم على مدى عقودٍ قليلة من الزمن. وبحسب إسقاطات تقريري التقييم الأول والثاني، فإن خلال الفترة الممتدة بين العامين ١٩٩٠ و٢٠٠٥، عرفت درجات الحرارة في العالم إرتفاعاً يساوي ٠,٣ درجة مئوية (بالنسبة إلى التقرير

الإطار ٩: تغيّر المناخ الملتزم

إذا بقي تركيز غازات الدفيئة والأهباء الجوية ثابتاً بعد فترةٍ من التغيّر، سيستمر النظام المناخي بالإستجابة، نظراً إلى القصور الذاتي الحراري للمحيطات والصفائح الجليدية والوقت الطويل الذي تستغرقه للتكيّف. هنا، يمكن تحديد الإحترار الملتزم بالتغيّر الإضافي الذي يطرأ على درجات الحرارة النسبية في العالم بعد بقاء التكوّن الجوي، وبالتالي التأثير الإشعاعي، مستقراً. كما يتضمن التغيّر الملتزم نواحٍ أخرى من النظام المناخي، ولا سيما مستوى سطح البحر. وتجدر الاشارة إلى أن المحافظة على استقرار تركيز الأنواع الفاعلة شعاعياً قد تؤدي إلى لقاء الإنبعاثات الجارية بنسب غسل طبيعية، ما يعني حدوث إنخفاضٍ قوي في الإنبعاثات بالنسبة إلى معظم الأنواع، على الرغم من أن تجارب النموذج المناسبة لم توضع كأحد سيناريوهات الإنبعاثات. {الأسئلة ١٠,٣}

إن التروبوسفير يتكيف مع التغيّرات التي تطرأ على حدوده خلال نطاقات زمنية لا تتعدى الشهر الواحد. وتستجيب الطبقة السطحية للبحار ضمن نطاقات زمنية تتراوح بين السنين والعقود، فيما تمتد إستجابة المحيط العميق والغلاف الجوي على مئات وآلاف السنين، عندما يتغيّر التأثير الشعاعي، تميل خصائص الغلاف الجوي الداخلية إلى التكيف معه بسرعة. لكن، بسبب الإقتران الوثيق بين الغلاف الجوي وطبقة المياه المحيطية السطحية، المقرونة بدورها بالطبقة العميقة من المحيط، تستغرق المتغيّرات الجوية وقتاً طويلاً قبل التوصل إلى التوازن. وخلال الفترات الطويلة التي يتغيّر فيها مناخ السطح ببطءٍ شديد، يمكن للمرء أن يلاحظ أن الغلاف الجوي في حالة شبه توازنٍ وأن المحيط يستوعب معظم الطاقة. لذا، يشكّل إمتصاص حرارة المحيط مفتاحاً أساسياً في تغيّر المناخ. {١٠,٧}

الإحترار النسبي العالمي: مقارنة تنبؤات النماذج مع الملاحظات



الرسم ٢٦: مقارنة بين إسقاطات النموذج حول الإحترار النسبي العالمي والإحترار الملحوظ. وتبدو شذوذ درجات الحرارة الملحوظة، كما في الرسم ٦ من الملخّص الفني، كمعدّلات سنوية (النقاط السوداء) وعقدية (الخطوط السوداء). وتشير الخطوط المتينة / السميكة الأرجوانية والخضراء إلى الميول المتوقعة وتراوحاتها منذ إصدار الهيئة الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ تقرير التقييم الأول وتقرير التقييم الثاني، أما الخطوط العمودية الزرقاء فهي ترمز إلى التراوح المتوقع بعد تقرير التقييم الثالث. وقد تمّ تكييف هذه التنبؤات للبدء عند قيمة المعدّل العقدي الملحوظة في العام ١٩٩٠. وتتعلق التنبؤات النسبية المتعددة النماذج في هذا التقرير والخاصة بسيناريوهات التقرير ب ١ وأ ١ ب وأ ٢، كما في الرسم ٣٢ من الملخّص الفني، بالفترة المتراوحة بين العامين ٢٠٠٠ و٢٠٢٥، مثلما تظهر المنحنيات الزرقاء والخضراء والحمراء اللون، فيما يرمز المحور الموجود من الناحية اليمينية إلى تراوحات عدم اليقين. ويبين المنحنى البرتقالي تنبؤات نموذج الإحترار في حال بقي تركيز غاز الدفيئة والهباء الجوي مستقراً، بدءاً من العام ٢٠٠٠ – هذا هو الإحترار الملتزم. (الرسم ١,١ و١٠,٤).

الأول) و٠,١٥ درجة مئوية (بالنسبة إلى التقرير الثاني)[١٠]. ويعود الفرق بين التقريرين في الدرجة الأولى إلى إدراج آثار تبريد الأهباء الجوية في تقرير التقييم الثاني، فيما خلا تقرير التقييم الأول من قاعدة كميّة حول هذه المسألة. والتقى تقرير التقييم الثاني وتقرير التقييم الثالث عند الإسقاطات. وتمكن مقارنة تلك النتائج بالملاحظات المذكورة، أي ٠,٢ درجة مئوية في كل عقد كما يبدو في الرسم ٢٦ من الملخّص الفني، ما يعزز الثقة في تلك الإسقاطات القصيرة الأمد. وإحدى نتائج هذا الإحترار هو الأثر الملتزم لهذه التغيّرات التي حصلت على مستوى تركيز غازات الدفيئة في وقت يسبق هذه التقييمات. {١,٢، ٣,٢}

إن تغيّر المناخ الملتزم (انظر الملخّص الفني، الإطار ٩) الناتج عن التركيبة الجوية في العام ٢٠٠٠، يتناسب مع ميل إلى الإحترار يساوي ٠,١ درجة مئوية في كل ١٠ سنين، وهو إحترار سيحصل خلال العقدين المقبلين، من دون حصول تغيّرات جوهرية في التأثير البركاني والشمسي. ومن المتوقع أن يزداد هذا الإحترار بضعفين (٠,٢ درجة مئوية في العقد الواحد) في حال كانت الإنبعاثات تتراوح ضمن نطاق السيناريوهات الدليلية المدرجة في التقرير الخاص عن سيناريوهات الإنبعاثات. ولا يأخذ هذا التجاوب أحد السيناريوهات الدليلية المضمونة في التقرير الخاص عن سيناريوهات الإنبعاثات التي لم تتطرق إلى المبادرات المناخية. وبحلول العام ٢٠٥٠، يظهر تراوح الإحترار المتوقع حساسية محدودة لاختيار أحد سيناريوهات التقرير الخاص (من ١,٣ إلى ١,٧ درجة مئوية بالنسبة إلى الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٨٠ – ١٩٩٩). وفي هذا الإطار، تعود نسبة ٢٥٪ من الإحترار إلى تغيّر المناخ الملتزم في حال استقرت

[١٠] راجع تقرير التقييم الأول الذي قدمته الهيئة الدولية المعنيّة بتغيّر المناخ، وملخّص صانعي السياسات وتقرير التقييم الثاني والملخّص الفني والرسم ١٠.

الجدول ٦: معدّل إحترار السطح وإرتفاع مستوى سطح البحر المتوقع في العالم. {٥,١٠ – ٦,١٠ – الجدول ٧,١٠}

الحالة	تغيّر درجات الحرارة (درجة مئوية خلال ٢٠٩٠– ٢٠٩٩ نسبةً إلى ١٩٨٠ – ١٩٩٩)[أ]		إرتفاع مستوى سطح البحر (متر خلال ٢٠٩٠ – ٢٠٩٩ نسبةً إلى ١٩٨٠ – ١٩٩٩)
	أفضل توقّع	التراوح المرجّح	التراوح المستند إلى النموذج باستثناء التغيّرات الدينامية السريعة المستقبلية في التدفق الثلجي
التركيز الثابت للعام ٢٠٠٠[ب]	٠,٦	٠,٣– ٠,٩	–
السيناريو ب ١	١,٨	١,١ – ٢,٩	٠,١٨ – ٠,٣٨
السناريو A1T	٢,٤	١,٤ – ٣,٨	٠,٢٠ – ٠,٤٥
السيناريو ب ٢	٢,٤	١,٤ – ٣,٨	٠,٢٠ – ٠,٤٣
السيناريو أ ١ ب	٢,٨	١,٧ – ٤,٤	٠,٢١ – ٠,٤٨
السيناريو أ ٢	٣,٤	٢,٠ – ٥,٤	٠,٢٣ – ٠,٥١
السيناريو A1FI	٤	٢,٤ – ٦,٤	٠,٢٦ – ٠,٥٩

الملاحظات:

[أ] خضعت هذه التقديرات لتقييم هرمي من النماذج التي تتخطى مجرد النموذج المناخي ونماذج الأرض المتوسطة التعقيد وعدداً كبيراً من نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات.

[ب] إن المصدر الوحيد للتركيبة المستقرة في العام ٢٠٠٠ هي نماذج الدوران العام للغلاف الجوي –المحيطات.

كافة عناصر التأثير الإشعاعي. {١٠,٣، ١٠,٥، ١٠,٧}

ومن المتوقع أن يستمر مستوى سطح البحر في الإرتفاع خلال العقود المقبلة. وخلال العامين ٢٠٠٠ و٢٠٢٠، وبموجب السيناريو أ١ب من التقرير الخاص عن سيناريوهات الإنبعاثات في إطار مجموعة نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات، من المتوقع أن يصل معدّل المد الحراري إلى ١,٣ ± ٠,٧ ميليمتراً سنوياً. والأمر لا يختلف كثيراً في السيناريوهين أ ٢ وب ١. أن هذه النسب المتوقعة تدخل في إطار الشكوك حول مساهمة المد الحراري الملحوظة ما بين العامين ١٩٩٣ و٢٠٠٣، هذا المد الذي يساوي ١,٦ ± ٠,٦ ميليمتراً سنوياً. إن نسبة المد الحراري الملتزم من جراء التركيبة الجوية المستقرة بحسب أرقام العام ٢٠٠٠ بالنسبة إلى إجمالي المد الحراري (وهي نسبة المد الذي جرى بعد العام ٢٠٠٠، بالنسبة إلى المد الذي جرى قبل / بعد هذا العام)، تتعدى النسبة الموائمة لجهة معدّل درجات حرارة السطح في العالم.

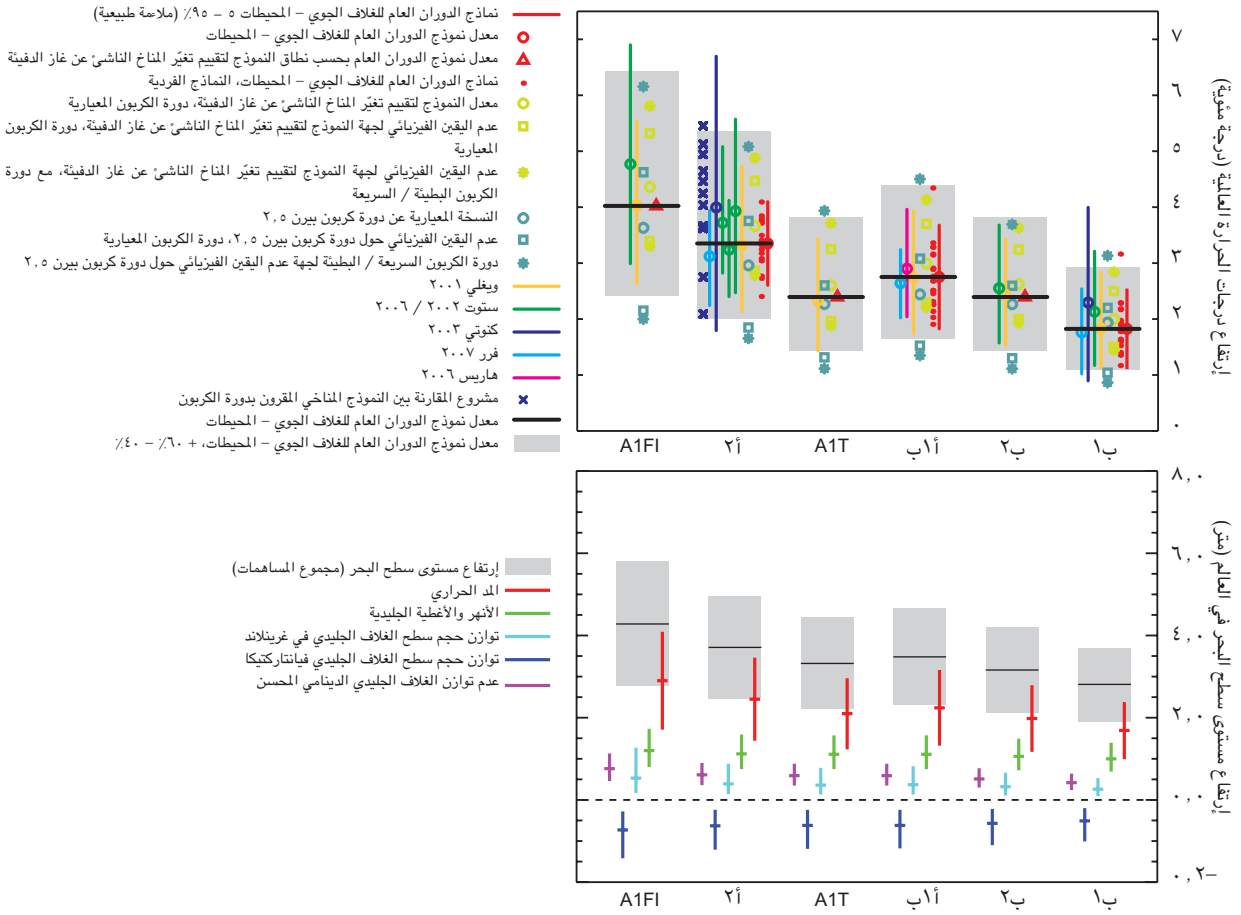
٥,٢. إسقاطات واسعة النطاق بخصوص القرن الحادي والعشرين

يغطي هذا القسم التطورات المتعلقة بفهم الإسقاطات المناخية العالمية والعمليات التي ستؤثر على أنماطها الواسعة النطاق في القرن الحادي والعشرين. وسيتطرّق القسم التالي، أي الملخّص الفني ٥,٣، إلى تفاصيل التغيّرات على المستوى الإقليمي.

يرتبط معدّل إحترار السطح العالمي المتوقع في نهاية القرن الحادي والعشرين (٢٠٩٠ – ٢٠٩٩) بالسيناريوهات، وستؤثر الإنبعاثات الحالية على الإحترار بشكلٍ كبير. وترد حالات الإحترار، بالمقارنة مع الحالات المذكورة في ٦ من سيناريوهات التقرير الخاص للفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٨٠ – ١٩٩٩، ومع معدّل التركيز المستقر للعام ٢٠٠٠، وما يتعلق بحالات الإحترار هذه من تقديرات ونطاقات يُرجح أنها تناسبها، في الجدول ٦ من الملخّص الفني. وتستند هذه النتائج إلى نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات والقيود الملحوظة وغيرها من السبل المعتمدة لتحديد تراوح إستجابة النموذج (انظر الملخّص الفني، الرسم ٢٧). ويسمح تداخل خيوط الإثباتات المتعددة بنسب الترجيحات إلى النطاقات المستخلصة، ما يشكّل تطوراً هاماً منذ تقرير التقييم الثالث. {١٠,٥}

تفوق نطاقات الشكوك التي تمّ تقييمها النطاقات التي ترد في تقرير التقييم الثالث، لأنها تأخذ سلسلة أشمل من النماذج والتأثير

الإحترار المتوقع بين ٢٠٩٠ – ٢٠٩٩



الرسم ٢٧: (في الأعلى) تغيّر درجات الحرارة النسبي المتوقع في العالم خلال الفترة الممتدة ما بين العامين ٢٠٩٠ – ٢٠٩٩ نسبةً إلى ما بين العامين ١٩٨٠ – ١٩٩٩، بخصوص ٦ سيناريوهات دليلية من التقرير الخاص، إستناداً إلى نتائج نماذج مستقلة ومختلفة. ترمز الخطوط الصلبة الأفقية السوداء إلى معدّل نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات المتعدد النماذج، فيما ترمز القضبان الرمادية اللون إلى تراوح المعدّل ناقص ٤٠٪ وزائد ٦٠٪. تقدّر الشكوك حول دورة الكربون في السيناريو أ ٢ المستند إلى نماذج مشروع المقارنة بين النموذج المناخي المقرون بدورة الكربون (الصلبان باللون الزرق الداكن)، وفي كافة السيناريوهات الدليلية التي تستخدم نماذج نظام الأرض المتوسطة الصعوبة (الرموز باللون الأزرق الفاتح). وتمثل الرموز الأخرى الدراسات الفردية (لمزيد من التفاصيل حول نموذج معين، راجع الرسم ١٠,٢٩). (في الأسفل) معدّل إرتفاع مستوى سطح البحر المتوقع على الصعيد العالمي ومكوناته للفترة الممتدة ما بين العامين ٢٠٩٠ – ٢٠٩٩ (نسبة إلى ١٩٨٠ – ١٩٩٩) بالنسبة إلى ٦ سيناريوهات دليلية من التقرير الخاص. وتبرز الشكوك تراوحات من ٥ إلى ٩٥٪، استناداً إلى نتائج النموذج المنشورة التي تخلو من الشكوك المرتبطة بدورة الكربون. وتأتي المساهمات من نتائج نموذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات النطاقية، وتغيّرات الجليد الأرضي المتوقعة من تغيّر درجات الحرارة (لمزيد من التفاصيل، راجع المرفق ١.١٠). تُضاف المساهمات الفردية من أجل الإدلاء بمجمل إرتفاع مستوى سطح البحر الذي لا يتضمن مساهمة عدم توازن الغلاف الجوي الدينامي المطروحة، الذي يساعد تفهم مستواه الحالي على القيام بتقديرات أفضل. {الرسم ١٠,٢٩ و١٠,٣٣}

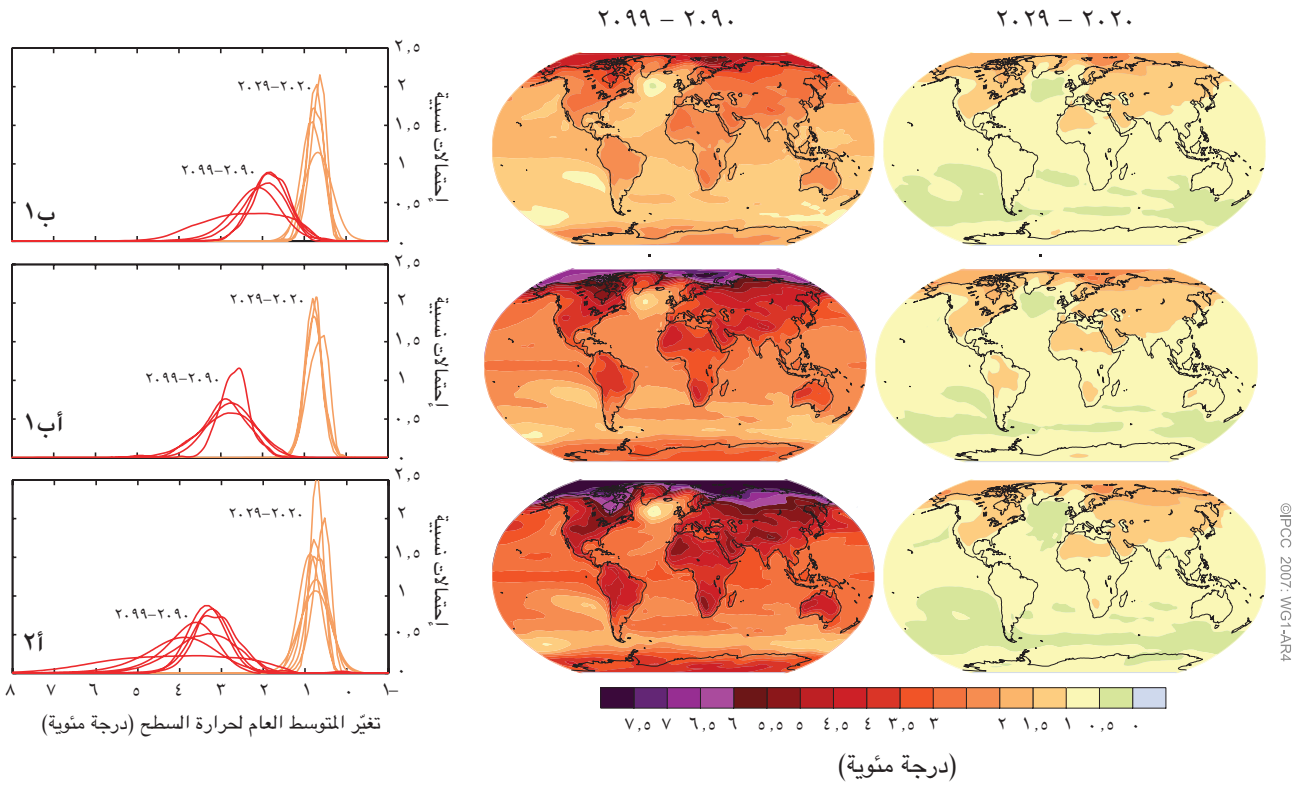
التفاعلي لدورة الكربون في المناخ، في عين الاعتبار. ويميل الإحترار إلى تقليص امتصاص الأرض والمحيطات لثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي، ما يزيد نسبة الإنبعاثات البشرية المنشأ التي تبقى في الجو. فبالنسبة إلى السيناريو أ ٢ مثلاً، تزيد التأثير التفاعلي في ثاني أكسيد الكربون من معدّل الإحترار العالمي المناسب لها بأكثر من درجة مئوية واحدة، بحلول العام ٢١٠٠. {٧,٣، ١٠,٥}

إن معدّل إرتفاع مستوى سطح البحر في العالم في نهاية القرن الحادي والعشرين (٢٠٩٠ – ٢٠٩٩)، نسبةً إلى الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٨٠ – ١٩٩٩، بحسب ٦ سيناريوهات دليلية من التقرير الخاص، يتراوح بين نسبتيّ ٥٠٪ و٩٥٪، وهو نطاق يستند إلى إنتشار نتائج النماذج ويرد في الجدول السادس من الملخّص الفني. ويساهم المد الحراري بنسبة ٧٠ إلى ٧٥٪ في أفضل التقديرات لكل سيناريو. ويُعتبر إستخدام نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات بغية تقييم امتصاص حرارة المحيطات والمد الحراري خطوةً أمامية

منذ صدور تقرير التقييم الثالث. وقد أدّى ذلك أيضاً إلى التقليل من الإسقاطات مقارنةً مع النموذج البسيط الذي استُخدم في تقرير التقييم الثالث. وبحسب جميع السيناريوهات الدليلية التابعة للتقرير الخاص، باستثناء السيناريو ب١، من المرجّح جداً أن يتخطى معدّل إرتفاع مستوى سطح البحر في القرن الحادي والعشرين المعدّل الخاص بالفترة المتراوحة بين العامين ١٩٦١ – ٢٠٠٣ (١,٨ ± ٠,٥ ميليمتراً سنوياً). وللحصول على معدّل نموذجي، يشير السيناريو إلى أن إرتفاع مستوى سطح البحر يساوي ٠,٠٢ متراً بحلول منتصف القرن، مقابل ٠,١٥ متراً بحلول نهاية القرن. ولا تتضمن هذه التراوحات أية شكوك لجهة التأثير التفاعلي لدورة الكربون أو عمليات الدفق الجليد، لأن المنشورات تفتقر إلى جزءٍ أساسي. {١٠,٦، ١٠,٧}

وبالنسبة إلى كل سيناريو، لا يتعدى معدّل التراوح المذكور هنا المعدّل النموذجي للفترة الممتدة ما بين العامين ٢٠٩٠ – ٢٠٩٩ المذكور في تقرير التقييم الثالث، والذي يساوي ٤٠٪. وتجدر الاشارة إلى أن إسقاطات تقرير التقييم الثالث تخص العام ٢١٠٠، فيما تتعلق الإسقاطات الواردة في هذا التقرير بالفترة الممتدة ما بين العامين ٢٠٩٠ و٢٠٩٩. ولا توحي إسقاطات تقرير التقييم الثالث بالثقة التي تعكسها هذه الإسقاطات، وذلك لأسباب عديدة: ليس للشكوك الخاصة بنماذج الجليد الأرضي علاقة بالشكوك الخاصة بإسقاطات درجات الحرارة والمد، وتشكل الملاحظات المطورة حول فقدان الأنهار الجليدية كتلاً من حجمها، قيداً أفضل، ويشكك التقرير الحالي في التراوح النسبي الذي يمتد بين ٥٪ و٩٥٪، أي ١,٦٥± بحسب معيار الانحرافات، فيما يعتقد تقرير التقييم الثالث أن نسبة الشك تصل إلى ٢± بحسب معيار الإنحرافات. وكان تقرير التقييم الثالث ليملك النسب عينها التي يملكها

تنبؤ درجات حرارة السطح



الرسم ٢٨: تغيّر درجات حرارة السطح المتوقعة في بداية القرن الحادي والعشرين ونهايته نسبةً إلى الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٨٠ و١٩٩٩. تشير المجموعتان الوسطى المائلة إلى اليمين إلى تنبؤ معدّلات نموذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات المتعدد النماذج بالنسبة إلى سيناريوهات التقرير الخاص ب ١ (في الأعلى) والسيناريو ١ ب (في الوسط) والسيناريو ٢ أ (في الأسفل)، والتي تمّ التوصل إلى معدّلاتها في العقدين ٢٠٢٠ – ٢٠٢٩ (في الوسط) و٢٠٩٠ – ٢٠٩٩ (إلى اليمين). تظهر المجموعة الموجودة إلى اليسار الشكوك ذات الصلة، بالإضافة إلى الإحتمالات النسبية لمعدّل الإحترار العالمي المقدر إستناداً إلى مختلف نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات ودراسات عن نماذج نظام الأرض المتوسطة التعقيد، للفترات الزمنية عينها. وتقدم بعض الدراسات نتائج محصورة بمجموعة فرعية من سيناريوهات التقرير الخاص أو بنسخ مختلفة عن النموذج. وبالتالي، فإن الفرق لجهة عدد المنحنيات، الواردة في المجموعات الموجودة إلى اليمين يُعزى إلى الفوارق الموجودة على مستوى توفّر النتائج فقط. (معلومات مأخوذة عن الرسمين ١٠,٨ و١٠,٢٨).

هذا التقرير لجهة الإسقاطات الخاصة بمستوى سطح البحر لو عالج الشكوك بالطريقة نفسها. {١٠,٦– ١٠,٧}

وسيستمر تغيّر الغلاف الجليدي في التأثير على إرتفاع مستوى سطح البحر في القرن الحادي والعشرين. ومن المتوقع أن تخسر الأنهر جليدية والأغطية الجليدية والغلاف الجليدي في غرينلاند جزءاً من حجمها في القرن الحادي والعشرين، لأن نسبة الذوبان المتزايدة ستتعدى نسبة تساقط الثلوج المتزايدة. وتشير النماذج الحالية إلى أن الغلاف الجليدي في أنتاركتيكا سيحافظ على درجة عالية من البرودة تمنع إنتشار الذوبان، وقد يزداد حجماً في المستقبل، نظراً إلى تزايد نسبة تساقط الثلوج، ما يساهم في تخفيض مستوى سطح البحر. لكن، قد تزيد التغيّرات في الدينامية الجليدية من مشاركة غرينلاند وأنتاركتيكا معاً في إرتفاع مستوى سطح البحر خلال القرن الحادي والعشرين. وتشكل الملاحظات الحديثة حول مخارج الأنهر جليدية في غرينلاند دليلاً قوياً على التدفق المتزايد عند إزالة الرفوف الجليدية. وتشير الملاحظات الخاصة بالمنطقة الشرق أوسطية من غرينلاند، حول التقلبات الموسمية لمعدّل التدفق الجليدي والعلاقة مع تقلبية درجات الحرارة في الصيف، إلى أن المياه السطحية الذائبة قد تشكل جزءاً من نظام صرف شبه جليدي يجعل التدفق الجليدي زلقاً. ومن خلال هاتين الآليتين، قد يتسبب إزدياد الذوبان السطحي في القرن الحادي والعشرين بتسريع الدفق والتصريف الجليدي ويعزز نسبة المشاركة في رفع مستوى سطح البحر. ومؤخراً، شهدت بعض المناطق في غرب أنتاركتيكا تسريعاً ملحوظاً للدفق الثلجي، من المحتمل أن يكون قد نتج عن انتقاص حجم الغلاف الجليدي بسبب إحترار المحيطات. وعلى الرغم من أن الدراسة لم تحدد فعلياً وقوف الإنسان وراء تغيّر المناخ نتيجة غازات الدفيئة، إلا أنها تشير إلى إمكانية أن يكون الإحترار السبب في تسريع انتقاص الأنهر جليدية من حجمها وإرتفاع مستوى سطح البحر. ولا يمكن الإدلاء بإسقاطات كميّة وموثوقة حول هذا التأثير. وإذا كانت الإرتفاعات الملحوظة مؤخراً لجهة نسب تصريف الثلوج من الأغطية الجليدية في غرينلاند وأنتاركتيكا ستزداد خطياً مع تغيّر المعدّلات الحرارية في العالم، فإن ذلك سيؤدي إلى زيادة ٠,١ إلى ٠,٢ متراً على طبقة البحر السطحية. إن فهم هذه الآثار محدود لدرجة تمنع تقييم أرجحيتها أو إعطاء أفضل التقديرات. {٤,٦، ١٠,٦}

ويبقى جزء كبير من الأنماط العالمية والإقليمية لدرجات الحرارة والأمطار، المذكورة في إسقاطات تقرير التقييم الثالث، مصنفاً في خانة النماذج والنتائج الحديثة العهد (انظر الملخّص الفني، الرسم ٢٨). وبصورة عامة، بقيت هذه الأنماط على حالها في الوقت الذي تطورت فيه محاكاة النماذج كافة، ما عزز الثقة في متانتها (انظر الملخّص الفني، الإطار ٧)، وأكد أن هذه الأنماط تعكس القيود الفيزيائية الأساسية المفروضة على النظام المناخي حين يزداد إحتراراً. {٨,٣–٨,٥، ١٠,٣، ١١,٢–١١,٩}

إن تغيّر درجات الحرارة المتوقع للقرن الحادي والعشرين إيجابي في كافة أرجاء العالم. وهو يزداد فوق الأراضي، ولا سيما في مناطق خطوط العرض العليا من القطب الشمالي خلال فصل الشتاء، ويزداد أيضاً بدءاً من الشواطئ وتوجهاً نحو الداخل القاري. أما في المناطق الأخرى الشبيهة من الناحية الجغرافية فيتعدى إحترار المناطق القاحلة الإحترار الذي تشهده المناطق الرطبة. {١٠,٣، ١١,٢–١١,٩}

في المقابل، تتدنى نسبة الإحترار في المحيطات الجنوبية وأجزاء من شمال المحيط الأطلسي. ومن المتوقع أن تزداد درجات الحرارة في مناطق مختلفة، ومنها شمال الأطلسي وأوروبا، على الرغم من تباطؤ متوقع الدوران التقلبي الجنوبي في معظم النماذج، بسبب تأثير تزايد غازات الدفيئة الكبير. ويكشف النمط المتوقع للتغيّر درجات الحرارة النسبي المناطقي في الغلاف الجوي عن وصول الإحترار إلى حده الأقصى في الطبقة الإستوائية العليا من التروبوسفير، وعن تبريد في الستراتوسفير. ومن المتوقع أن تشهد المحيطات مزيداً من الإحترار النسبي المناطقي، بالقرب من السطح وفي المناطق الشمالية من خطوط العرض الوسطى، قبل وصول الإحترار تدريجياً إلى عمق المحيطات، وبروزه في مناطق خطوط العرض العليا حيث الاختلاط العمودي أكثر أهمية. إن نمط التغيّر المتوقع شبه مشترك بين الحالات التي جرت في نهاية القرن، بصرف النظر عن السيناريو. كما أن نطاقات المعدّلات المناطقية، متشابهة جداً في نظر السيناريوهات المدروسة (انظر الملخّص الفني، الرسم ٢٨). {١٠,٣}

ومن المرجّح جداً أن يتباطأ الدوران التقلبي الجنوبي في الأطلسي خلال القرن الحادي والعشرين. وسينخفض المعدّل المتعدد النماذج بنسبة ٢٥٪ بحلول العام ٢١٠٠ (التراوح يبدأ من الصفر وينتهي عند ٥٠٪ تقريباً) بالنسبة إلى سيناريو الإنبعاث أ ١ ب المضمّن في التقرير الخاص. ومن المتوقع أن تزداد درجات الحرارة في منطقة الأطلسي على الرغم من أن مثل هذه التغيّرات تعود إلى الإحترار الحاصل على نطاق أوسع، بالاضافة إلى الإزدياد المتوقع في غازات الدفيئة. ويُعزى الإنخفاض المتوقع للدوران التقلبي الجنوبي في الأطلسي إلى كافة آثار إرتفاع الأمطار ودرجات الحرارة في مناطق خطوط العرض العليا، ما يقلّص كثافة المياه السطحية في شمالي الأطلسي. وقد

يؤدي ذلك إلى إنخفاضٍ خطيرٍ في تكوّن مياه بحر لابرادور. وتضمن عدد لا يُذكر من دراسات نموذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات أثر الماء العذبة الناتجة عن ذوبان الغلاف الجليدي في غرينلاند. لكن الدراسات التي تحدثت عن هذا الأثر لا تذكر أنه سيؤدي إلى توقف كلي للدوران التقلبي الجنوبي. ومن المرجّح جداً أن ينخفض الدوران التقلبي الجنوبي، ومن المستبعد جداً أن يمر الدوران التقلبي الجنوبي بفترة إنتقالية طويلة ومفاجئة خلال القرن الحادي والعشرين. ولا يمكن تقييم التغيّرات الطويلة الأمد التي طرأت على الدوران التقلبي الجنوبي مثلما ينبغي. {٨,٧، ١٠,٣}

تشير النماذج إلى أن إرتفاع مستوى سطح البحر في القرن الحادي والعشرين لن يكون موحداً من الناحية الجغرافية. وبحسب السيناريو أ ١ ب للفترة الممتدة ما بين العامين ٢٠٧٠ و٢٠٩٩، تشير نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات إلى أن معدّل معيار الإنحراف المكاني وصل إلى ٠,٠٨ متراً، أي حوالى ٢٥٪ من التقديرات المركزية لمعدّل إرتفاع مستوى سطح البحر في العالم. وفي معظم الأحيان، تنتج الأنماط الجغرافية لتغيّر مستوى سطح البحر في المستقبل عن تغيّرات في توزيع الحرارة والملوحة في المحيط وما يتبعه من تغيّرات في الدوران المحيطي. وتكشف الأنماط المتوقعة تشابهاً أكبر بين النماذج يفوق التشابه الذي يحلّله تقرير التقييم الثالث. إن الأنماط المشتركة أدنى من معدّل إرتفاع مستوى سطح البحر في المحيط الجنوبي، وأعلى من معدّل إرتفاع مستوى سطح البحر في القطب الشمالي وفي جزءٍ محددٍ من المحيط، يشهد إرتفاعاً ملحوظاً لمستوى سطح البحر، ويمتد من جنوب الأطلسي إلى المحيط الهندي. {١٠,٦}

وتُعدّد التوقعات التغيّرات في الظواهر المتطرفة، مثل وتيرة موجات الحر، بدقة أكبر من تقرير التقييم الثالث، وذلك بفضل تطوّر النماذج وتحسّن تقييم إنتشار النموذج إستناداً إلى مجموعات متعددة النماذج. وخلص تقرير التقييم الثالث إلى الإشارة إلى خطر تزايد الظواهر المتطرفة لجهة درجات الحرارة، مع حدوث مزيدٍ من حلقات الحر المتطرف في المناخ المستقبلي. وقد أكدت دراسات حديثة هذه النتائج وساهمت في إنتشارها. ومن المتوقع أن يتبع إرتفاع الظواهر الحرارية المتطرفة في المستقبل إرتفاع درجات الحرارة النسبية في معظم أرجاء العالم باستثناء الأماكن التي تتغيّر فيها الخصائص السطحية (كالغطاء الثلجي أو رطوبة التربة). ودرس تحليل متعدد النماذج يستند إلى محاكاة ١٤ نموذجاً لثلاثة سيناريوهات، تغيّر درجات الحرارة خلال المواسم المتطرفة (من كانون الأول / ديسمبر إلى شباط / فبراير، ومن حزيران / يونيو إلى آب / أغسطس)، حيث يمكن تحديد كلمة «متطرّف» كظاهرة تتعدى نسبة ٩٥ المئوية من توزيع درجات الحرارة الذي خضع للمحاكاة في القرن العشرين. ومع انتهاء القرن الحادي والعشرين، يتعدى إحتمال مواسم الحر المتطرفة نسبة ٩٠٪ في العديد من المناطق الإستوائية، مقابل ٤٠٪ في المناطق الأخرى. وأثارت دراسات حديثة إمكانية حدوث تغيّرات مستقبلية في موجات الحر، ورأت أنه من المتوقع أن تزداد هذه الموجات كثافةً وطولاً وتكرراً في المناخات المستقبلية. واستناداً إلى مجموعة متعددة النماذج تتألف من ٨ أعضاء، خضعت موجات الحر للمحاكاة وإزدادت خلال النصف الثاني من القرن العشرين، ومن المتوقع أن تستمر في الإزدياد على صعيد العالم ومعظم المناطق. {٨,٥، ١٠,٣}

لمناخ مستقبلي أكثر إحتراراً، تتوقع النماذج إنخفاضاً يتراوح بين ٥٠ و١٠٠٪ لجهة وتيرة إنتشار الهواء البارد حالياً خلال مواسم الشتاء في معظم مناطق القطب الشمالي. وتظهر نتائج مجموعة متعددة النماذج تتألف من ٩ أعضاء تراجعاً خضع للمحاكاة في أيام درجة التبريد، بدأ في القرن العشرين واستمر في القرن الحادي والعشرين على مستوى العالم ومعظم المناطق. وترتبط إطالة المواسم المتزايدة بأيام درجة التبريد، ومن المتوقع أن تتكاثر في المناخات المستقبلية. {١٠,٣ – الأسئلة ١٠,١}

يتوقع أن يتدنى الغطاء الثلجي وأن تشهد مناطق التربة الصقيعية ذوباناً متزايداً للثلوج غير السطحية، الموجودة في الأعماق. {٣,١٠}

وبحسب سيناريوهات مختلفة من التقرير الخاص (أ ١ ب وأ ٢ وب ١)، لن تحظى أجزاء كبيرة من المحيط المتجمد الشمالي بغطاء ثلجي على مدار السنة بدءاً من نهاية القرن الحادي والعشرين. فحساسية جليد المحيط المتجمد الشمالي للإحترار عالية جداً. وفيما تتسم التغيّرات المتوقعة على مستوى إمتداد الجليد البحري في فصل الشتاء بالإعتدال، يحتمل أن يختفي الجليد البحري الذي يتكون في أواخر الصيف بشكل شبه كلي مع الإقتراب من نهاية القرن الحادي والعشرين، وذلك بموجب بعض النماذج الواردة في السيناريو أ ٢. ويساهم عدد من حالات التأثير التفاعلي الإيجابية في النظام المناخي في تسريع هذا التراجع. وتسمح التأثير التفاعلي للثلوج – ألبيدو للمياه المفتوحة بإستقبال المزيد من حرارة الشمس خلال فصل الصيف، كما يخف أثر الجليد البحري العازل وتعزز زيادة نقل حرارة المحيط نحو المحيط المتجمد الشمالي، في التقليل من حجم الغطاء الثلجي. وتشير محاكاة النماذج إلى أن الغطاء الجليدي البحري الذي يتكون في أواخر الصيف يفقد نسبة هامة من حجمه، وغالباً ما يتطور بالتزامن مع

الإحترار العالمي. كما يتوقع أن يتراجع مد الجليد البحري في أنتاركتيكا خلال القرن الحادي والعشرين. {٨,٦، ١٠,٣ – الإطار ١٠,١}

ويحتمل أن يزداد ضغط مستوى سطح البحر فوق المناطق شبه الإستوائية ومناطق خطوط العرض الوسطى، وأن ينخفض في مناطق خطوط العرض العليا، بالتزامن مع إنتشار دوران هادلي وتغيّر النمط الحلقية (النمط الحلقي الشمالي / التذبذب الأطلنطي الشمالي والنمط الحلقي الجنوبي، راجع الملخّص الفني، الإطار ٢). وتتنبأ نماذج عدة بحدوث ميل إيجابي لجهة الأنماط الحلقية الشمالية / التذبذب الأطلسي الشمالي ومؤشر الأنماط الحلقية الجنوبية. وغالباً ما يكون حجم الإزدياد المتوقع أكبر بالنسبة إلى الأنماط الحلقية الجنوبية. ويستعمل المؤشر في العديد من النماذج. وبنتيجة لتلك التغيّرات، من المتوقع أن تتجه العواصف نحو الأقطاب، ملحقةً تغيّراً في أنماط الهواء والأمطار ودرجات الحرارة خارج المناطق الإستوائية، ومكملةً النمط الواسع للميول الملحوظة في النصف الثاني من القرن الماضي. وتشير بعض الدراسات إلى هبوب عدد أقل من العواصف في مناطق خطوط العرض الوسطى، كما تظهر بعض المؤشرات بوادر تغيّرات في إرتفاع حاد للأمواج، ترافقها تغيّرات في وجهة العواصف ودورانها. {٣,٦، ١٠,٣}

في معظم النماذج، تزداد درجات حرارة سطح البحر في الجزء الأوسط والشرقي من الناحية الإستوائية للهادئ أكثر مما تزداد في الجزء الغربي الإستوائي منه، ويترافق هذا الإرتفاع مع ميل شرقي نسبي للأمطار. ومن المتوقع أن تستمر تقلبية النينيو السنوية البنية على مستوى كافة النماذج، على الرغم من أن التغيّرات تختلف من نموذج إلى أخر. وتسبق إختلافات نموذجية بينية كبرى لجهة التغيّرات المتوقعة بخصوص حجم النينيو، بالإضافة إلى تقلبية النينيو المئوية من الناحية الزمنية، أي تقدير نهائي بشأن ميول تقلبية النينيو. {١٠,٣}

إن الدراسات الحديثة التي أجريت بواسطة نماذج عالمية متطورة، والتي تتراوح بين ١٠٠ و٢٠ كيلومتراً، تتنبأ بتغيّر مستقبلي في عدد الأعاصير وقوتها (إعصار حلزوني وإعصار مصحوب بالأمطار وتيفون).

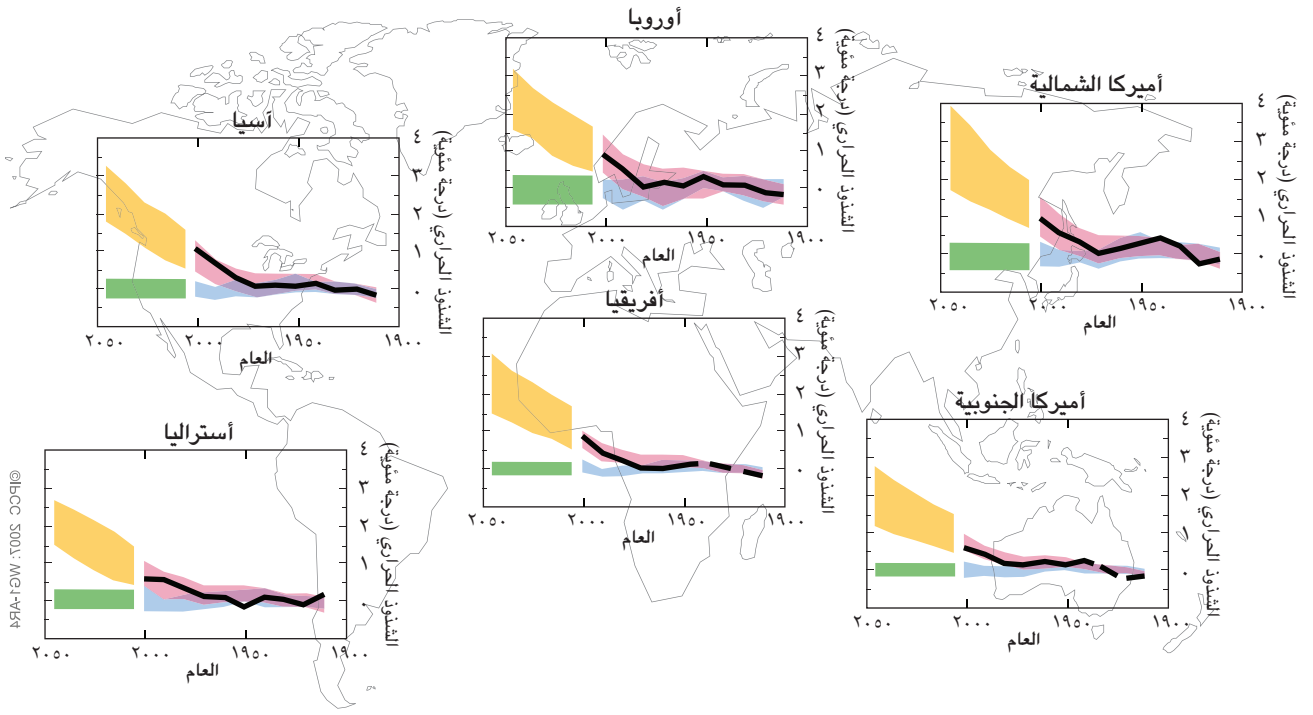
وتشير خلاصة نتائج النماذج التي تم التوصل إليها حتى الساعة في ما يتعلق بمناخ مستقبلي أكثر إحتراراً، إلى إزدياد قوة الرياح القصوى وقوة الأمطار القصوى والنسبية في إطار الأعاصير الإستوائية المستقبلية، بالإضافة إلى إمكانية تراجع

الإطار ١٠: الإنخفاض النطاقي الإقليمي

تطورت محاكاة المناخات الإقليمية في نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات، وبالتالي تحسّنت النماذج المناخية الإقليمية المتمركزة وتقنيات الإنخفاض النطاقي التجريبي. وتشير منهجيات الإنخفاض النطاقي التجريبي والدينامي معاً إلى مهارة مطورة في محاكاة النماط المحلية داخل المناخات الحالية عندما يُستخدم وضع الغلاف الجوي المدروس على نطاقات حلتها نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات، على شكل مدخلات. إن توفّر الإنخفاض النطاقي وغيره من الدراسات الإقليمية يبقى غير عادلٍ من الناحية الجغرافية، ما يتسبب بتفاوت التقييمات التي يمكن تقديمها، ولاسيما لجهة ظواهر الطقس المتطرفة. وتبرهن دراسات الإنخفاض النطاقي أن تغيّرات الأمطار المحلية قد تختلف كثيراً عن تلك المتوقعة من نمط الإستجابة الهيدرولوجي الواسع النطاق، خاصةً في مناطق الطوبوغرافيا المعقدة. {١١,١٠}

وهنا، يبقى عددٌ من مصادر الشك الهامة التي تحدّ من القدرة على التنبؤ بالتغيّر المناخي الإقليمي. وفيما تأتي الإجابات الهيدرولوجية متينةً نسبياً في بعض المناطق شبه الإستوائية وشبه القارية، لا يزال الشك قائماً حول الموقع الفعلي لهذه الحدود بين الأمطار المتزايدة والمتراجعة. وهناك بعض العمليات المناخية الهامة التي تؤثر حقاً على المناخ الإقليمي على الرغم من أنها تلقى إجابات ضعيفة من قبل إستجابة تغيّر المناخ. ومن بين هذه العمليات، التذبذب الجنوبي والتذبذب الطلسي الشمالي والتكتل والدوران المدفوع بالتباين الحراري والملحي في المحيط وتغيّر توزيع الأعاصير الإستوائية. بالنسبة إلى المناطق التي تتمتع بسيطرة طوبوغرافية قوية على أنماطها المناخية، غالباً ما تكون المعلومات حول المناخ غير كافية لجهة الحل المكاني الدقيق للطوبوغرافيا. ولم تحظَ بعض المناطق إلا بأبحاث محدودة للغاية حول ظواهر الطقس المتطرفة. بالإضافة إلى ذلك، تصبح إشارة التغيّر المناخي المتوقع قابلة للمقارنة مع تقلبية داخلية أوسع على نطاقات زمنية ومكانية أصغر، ما يصعّب إستعمال الميول الحديثة لتقييم أداء النموذج. {الإطار ١١,١، ١١,٢–١١,٩}

شذوذ درجات حرارة السطح القارية: الملاحظات والإسقاطات



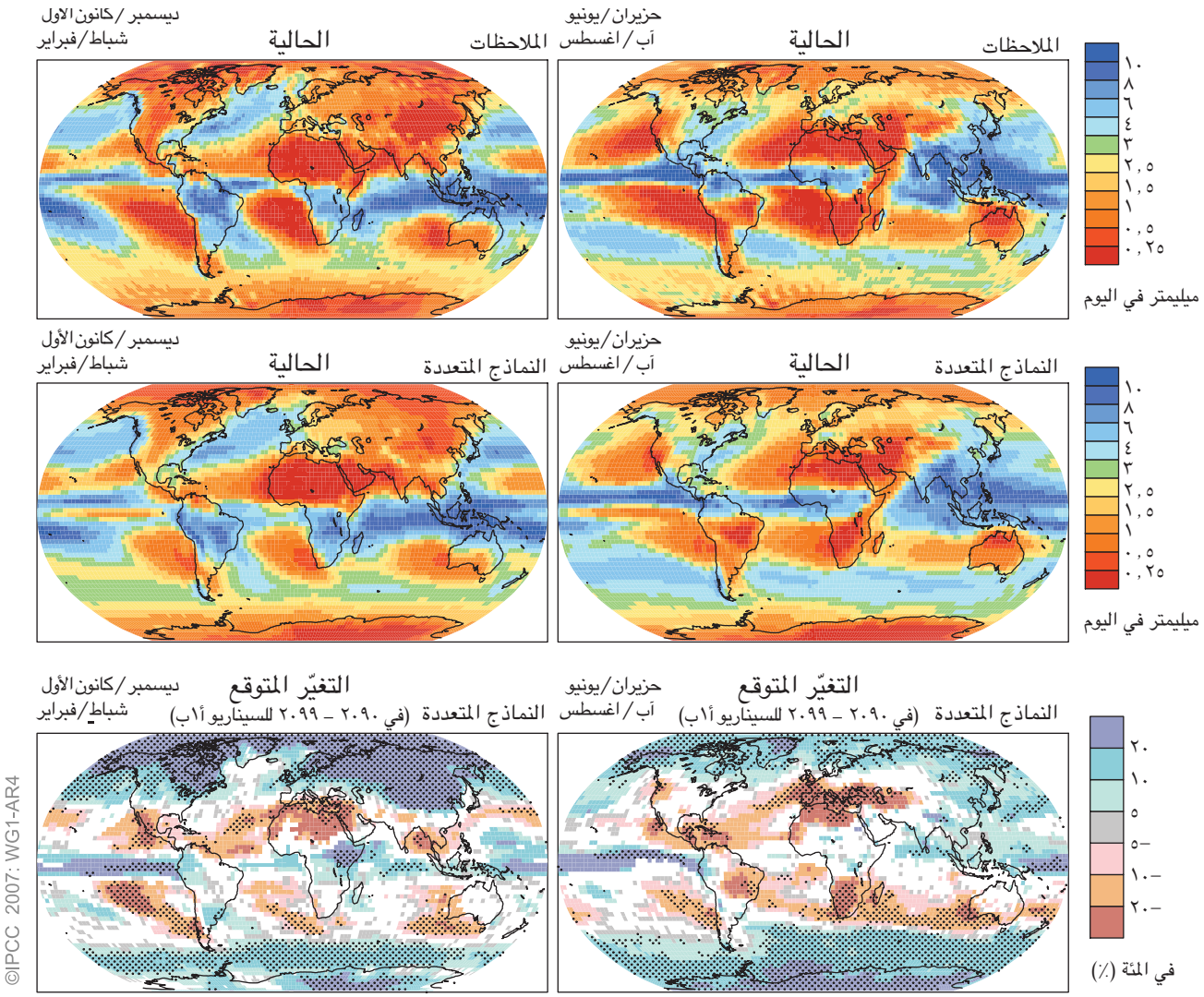
النماذج التي تستخدم التأثير الطبيعي فقط
النماذج التي تستخدم التأثير الطبيعي والتاثير البشري المنشأ معاً
التغيرات المتوقعة (السيناريو أ ١ب)
تراوح الشذوذ لجهة التأثير الكبيعي فقط في اطار المحاكاة الخاصة بالقرن العشرين
الملاحظات

الرسم ٢٩: شذوذ درجات حرارة السطح القارية النسبية العقدية (درجة مئوية) في الملاحظات والمحاكاة الخاصة بالفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٠٦ و٢٠٠٥، والتنبؤات الخاصة بالفترة الممتدة ما بين العامين ٢٠٠١ و٢٠٥٠. ويُحتسب الشذوذ إستناداً إلى المعدّل الخاص بالفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٠١ – ١٩٥٠. وترمز الخطوط السوداء إلى الملاحظات، والشريطان الأزرق والزهري إلى معدّل شذوذ درجات الحرارة التي خضعت للمحاكاة كما رأينا في الرسم ٢٢ من الملخّص الفني للقرن العشرين (مثلاً: يتضمن الشريط الزهري التأثيرات الطبيعية والبشرية المنشأ، والأزرق التأثيرات الطبيعية). ويرمز الشريط الأصفر إلى تراوح النسبة المئوية (٥ – ٩٥) الخاصة بالتغيّرات المتوقعة بحسب سيناريو الإنبعاثات ١١ب من التقرير الخاص. ويشير الخط العمودي الأخضر إلى التراوح من ٥ إلى ٩٥ نسبة مئوية الخاص بالشذوذ العقدية النسبية بحسب محاكاة القرن العشرين بالتأثيرات الطبيعية فقط (مثل قياس التقلبية الطبيعية العقدية). وبالنسبة إلى الجزء الملحوظ من الرسوم البيانية، تركز المعدّلات العقدية على حدود زمنية عقدية (مثلاً: في الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٩٦ و٢٠٠٥، يشكّل العام ٢٠٠٠ النقطة الأخيرة)، فيما تستند هذه المعدّلات في المستقبل إلى فترات زمنية نصف عقدية (مثلاً: من ٢٠٠١ إلى ٢٠١٠، يشكّل العام ٢٠٠٥ النقطة الأولى). ومن أجل بناء التراوحات، تمّ النظر في محاكاة مجموعة النماذج المعنيّة كل واحدة على حدى، واعتُبرت إنجازاً مستقلاً لتطور المناخ الممكن نظراً إلى التأثيرات الملحوظة. ما أدّى إلى القيام بـ٥٨ حلة محاكاة من ١٤ نموذجاً حول المنحنى الأحمر و١٩ حالة محاكاة من ٥ نماذج (مجموعة فرعية من النماذج الـ١٤) بالنسبة إلى المنحنى الأزرق والشريط الأفقي الأخضر، بالإضافة إلى ٤٧ حالة محاكاة لـ١٨ نموذجاً في ما يتعلق بالمنحنى الأصفر. {الأسئلة ٩,٢,١ – الرسم ١، الإطار ١١,١– الرسم ١}

عدد الأعاصير الضعيفة نسبياً وإرتفاع عدد الأعاصير القوية. لكن، يتوقع أن ينخفض العدد الإجمالي للأعاصير الحلزونية الإستوائية على صعيد العالم. ولا تزال نسبة الأعاصير المصحوبة بالأمطار القوية للغاية تزداد منذ العام ١٩٧٠ في بعض المناطق، لكن بوتيرة تفوق توقعات النماذج النظرية. {٣,٣، ٨,٥، ٣,٨}

منذ تقرير التقييم الثالث، هناك تفهم ملحوظ لأنماط الأمطار المتوقعة. فمن المرجّح جداً أن تزداد كمية الأمطار في المنطقة القطبية العرض المرتفعة، بينما من المرجّح أن تنخفض في معظم المناطق القارية شبه الإستوائية (بنسبة ٢٠٪ تقريباً للعام ٢١٠٠، بحسب السيناريو أ ١ ب). وهي تتجه نحو الأقطاب بمعدّل ٥٠ درجة، ويحتمل أن تزداد الأمطار النسبية بسبب تكاثر بخار الماء في الغلاف الجوي وما يتبعه من إزدياد نقل البخار من خطوط العرض الإستوائية. أما في اتجاه خط الإستواء فتمر نسبة الأمطار المتراجعة في غالبيتها بمرحلة إنتقالية في المناطق شبه الإستوائية (٢٠–٤٠ درجة على خط العرض). ونظراً إلى

نسب الأمطار النسبية الموسمية



الرسم ٣٠: الأنماط المكانية لنسب الأمطار النسبية (ميليمتر في اليوم الواحد) الموسمية النسبية المتعددة النماذج (الصف المتوسط) الملحوظة (الصف الأول)، خلال الفترة المتراوحة ما بين العامين ١٩٧٩ و١٩٩٣. والمعدّل المتعدد النماذج حول التغيّرات ضمن الفترة المتراوحة ما بين العامين ٢٠٩٠ و٢٠٩٩ نسبةً إلى الفترة المتراوحة ما بين العامين ١٩٨٠ و١٩٩٩ (٪)، إستناداً إلى السيناريو أ١ ب الوارد في التقرير الخاص (الصف الأسفل). إن معدّلات الفترة المتراوحة بين ديسمبر / كانون الأول وشباط / فبراير مدرجة في العمود إلى اليسار. ومعدّلات الفترة المتراوحة بين حزيران / يونيو وآب / أغسطس مدرجة في العمود إلى اليمين. وفي المجموعة الموجودة في الأسفل، تتواجد التغيّرات فقط حيث توافق أكثر من ٦٦ ٪ من النماذج على إشارة التغيّر. وتشير المساحات المنقطة إلى المناطق التي تشهد بوادر تغيّرات توافق عليها ٩٠ ٪ من النماذج. {بالإستناد إلى البيانات نفسها التي اعتُمدت في الرسمين ٨,٥ و١٠,٩}

إرتفاع نسبة نقل بخار الماء خارج المناطق شبه الإستوائية، وإنتشار الأنظمة التي تقع في مناطق الضغط المرتفع شبه الإستوائية، تكشف أطراف المناطق شبه الإستوائية التي تقع على خطوط العرض العليا، عن ميل واضح نحو الجفاف (انظر الملخّص الفني، الرسم ٣٠). {٨,٣، ١١,٩}

تشير النماذج إلى أن التغيّرات في كمية الأمطار النسبية، على الرغم من غزارتها، ستتعدى التقلبية الطبيعية ببطء أكبر من إشارة درجات الحرارة. {١٠,٣،١١,٢}

تنبئ الأبحاث المتوفرة بميلٍ لإرتفاع ظواهر تساقط الأمطار اليومية الغزيرة في بعض المناطق، بما فيها تلك التي يتوقع أن تشهد تراجعاً لتساقط الأمطار النسبية. وفي الحالة الأخيرة، غالباً ما يعزى تراجع تساقط الأمطار إلى إنخفاض عدد الأيام الماطرة بدلاً من تراجع قوة الأمطار. {١١,٢، ١١,٩}

٥,٣ الإسقاطات الإقليمية

في كلٍ من المناطق القارية، تتوقع نتائج سيناريوهات الإنبعاثات المدرجة في التقرير الخاص للفترة الممتدة ما بين العامين ٢٠٠٠–٢٠٥٠ أن يتعدى الإحترار المعدّل العالمي والإحترار الملحوظ في القرن الماضي. وقد يتعدى الإحترار المتوقع للعقود الأولى من القرن الحادي والعشرين، بعد إحتساب معدّلاته في كل قارة على حدى، توقعات القرن العشرين لجهة التقلبية الخاضعة للتأثير الطبيعي والتقلبية غير الخاضعة له في كافة الحالات بإستثناء أنتاركتيكا (انظر الملخّص الفني، الرسم ٢٩). وتشير تقديرات النماذج الأحسن إلى أنه من المرجّح جداً أن يساوي معدّل الإحترار العقدي لكل قارة بإستثناء أنتاركتيكا، بحلول العام ٢٠٣٠، ضعفي التقلبية الطبيعية المتوقعة من قبل النماذج والتي تناسبه في القرن العشرين. إن الإحترار الخاضع للمحاكاة في الفترة نفسها ليس حساساً جداً لخيارات سيناريوهات التقرير الخاص، كما يظهر الرسم ٣٢ من الملخّص الفني. ويشير الرسم ٢٨ من الملخّص الفني إلى أن خيار السيناريو يكون أكثر أهمية على نطاقات زمنية أطول. ويتخطى الإحترار المتوقع في التقرير الخاص لسيناريوهات الإنبعاثات للفترة الممتدة ما بين العامين ٢٠٠٠–٢٠٠٥ التقديرات المتعلقة بالتقلبية الطبيعية ومعدّلاتها في معظم المناطق شبه القارية. {١١،١}

في القطب الشمالي، يسيطر نمط قوي لإرتفاع نسبة تساقط الأمطار شبه القطبية وإنخفاض نسبة تساقط الأمطار شبه الإستوائية على نمط الأمطار المتوقع للقرن الحادي والعشرين في شمال أميركا وأوروبا، فيما ليس من المؤكد بعد أن تمر آسيا بمرحلة من الجفاف شبه الإستوائي (انظر الملخّص الفني، الرسم ٣٠). وتتنبأ كافة النماذج تقريباً بتزايد الأمطار فوق معظم المناطق الشمالية من شمال أميركا وإنخفاض الأمطار فوق أميركا الوسطى، مع مرور معظم المناطق في الولايات المتحدة وشمالي المكسيك في نطاق إنتقالي غير مؤكد تتنقل شمالاً وجنوباً بحسب المواسم. من المحتمل جداً أن تنخفض الأمطار في جنوبي أوروبا والمنطقة المتوسطية من أفريقيا، تزامناً مع نقلة نحو تزايد الأمطار شمالي أوروبا. وسيشمل الجفاف الصيفي كلتي القارتين، نظراً إلى سلك هذا النطاق الإنتقالي وجهة قطبية في الصيف، وإلى زيادة التبخر. ويحتمل أن ترتفع كمية الأمطار شبه القطبية فوق معظم شمال آسيا وأن تترافق في الوقت نفسه مع انتقال الجفاف شبه الإستوائي من المتوسط، جراء بوادر واضحة تنبئ برياح موسمية، انطلاقاً من آسيا الوسطى باتجاه الشرق. {١١,٢، ١١,٥}

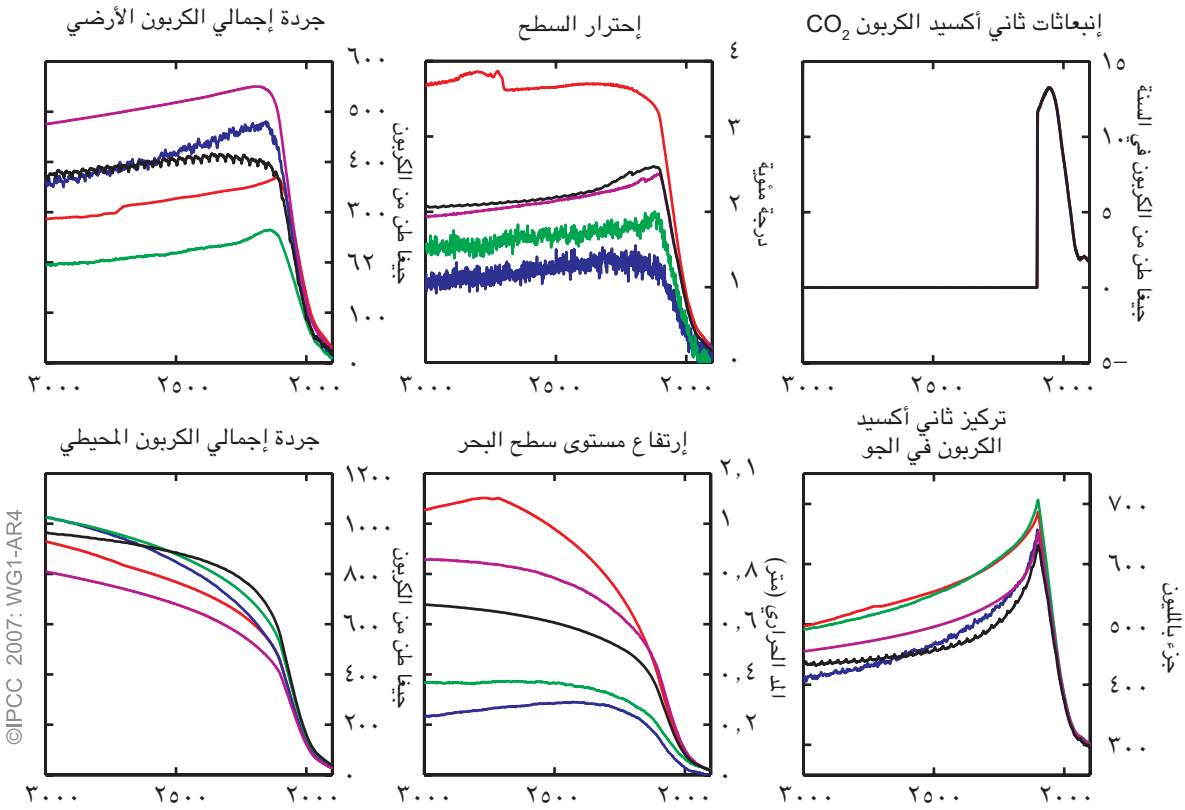
في القطب الجنوبي، نجد عدداً من الأراضي داخل نطاق الرطوبة شبه القارية المتوقعة للقرن الحادي والعشرين، التي تترافق مع إحتمال واضح للجفاف شبه الإستوائي (الملخّص الفني، الرسم ٣٠). وتقع جزيرة نيوزيلندا الجنوبية وتيارا ديل فويغو ضمن نطاق إزدياد الأمطار شبه القطبية، الذي يضم جزءاً كبيراً من جنوب أفريقيا وجنوب الآند في أميركا الجنوبية وجنوب أستراليا، ويملك ميلاً نحو الجفاف الخاص بالمناطق شبه الإستوائية. {١١,٢، ١١,٦، ١١,٧}

إن توقّع تساقط الأمطار في المناطق القارية الإستوائية أكبر من توقّع تساقط الأمطار في مناطق خطوط العرض العليا. ولكن، على الرغم من وجود تفاوتات بارزة لجهة نمذجة الحمل الحراري الإستوائي والتفاعلات الجوية المحيطية، بالإضافة إلى الشك المرتبط بالأعاصير الإستوائية، تبرز بعض الميزات القوية في النماذج. ويزداد تساقط الأمطار في موسم الرياح الصيفية الخاص بجنوبي وجنوب شرق آسيا، في معظم النماذج، على غرار تساقط الأمطار في شرق أفريقيا. وليست إشارة إستجابة الأمطار أكيدة في الأمازون والساحل الأفريقي، بما فيه الكفاية. فهذه المناطق تشكل مصدر شكٍ إضافي، نظراً إلى إحتمال وجود روابط بين النباتات والمناخ. كما أن النماذج تعتبر قوةً أقل في ما بينها، حتى في ظل غياب التأثير التفاعلي للنباتات. {٨,٣، ١١,٢، ١١,٤، ١١,٦}

٥,٤ إقتران تغيّر المناخ بتغيّر الدورات الكيميائية الأرضية الحيوية

إن كافة النماذج التي تعالج اقتران دورة الكربون بتغيّر المناخ تشير إلى أثر إيجابي للتأثير التفاعلي، مع الإحترار الذي يعمل على القضاء على إمتصاص الأرض والمحيط لثاني أكسيد الكربون، ما يؤدي إلى إزدياد نسبة ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي وتعزيز تغيّر المناخ نسبة إلى أحد سيناريوهات الإنبعاثات، إلا أن قوة أثر التأثير التفاعلي هذا يختلف كلياً بين النماذج. ومنذ تقرير التقييم الثالث، تم تطوير ومقارنة العديد من الإسقاطات الجديدة التي تستند إلى نماذج إرتباط تام بين دورة الكربون والمناخ. وبالنسبة إلى السيناريو أ٢ من التقرير الخاص لسيناريوهات الإنبعاثات، واستناداً إلى سلسلة من نتائج النموذج، من المرجّح أن يتعدى الإرتفاع المتوقع لجهة تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي في القرن الحادي والعشرين، الإسقاطات من دون التأثير التفاعلي ذلك بنسب تتراوح بين ١٠ و٢٥٪، مضيفاً أكثر من

إلتزام تغيّر المناخ



الرسم ٣١: إن إحتساب إلتزام تغيّر المناخ الناتج عن الإنبعاثات الماضية الخاصة بخمسة نماذج متوسطة الصعوبة من نظام الأرض، بالإضافة إلى سيناريو مثالي حيث تلي الإنبعاثات خطّاً يؤدي إلى إستقرار ثاني أكسيد الكربون في الجو على مستوى ٧٥٠ جزءاً بالمليون. لكن، قبل الوصول إلى هذا الهدف، تُخفض الإنبعاثات إلى الصفر تلقائياً في العام ٢١٠٠. (إلى اليسار) إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون وتركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. (في الوسط) إحترار السطح وإرتفاع مستوى سطح البحر بسبب المد الحراري. (إلى اليمين) تغيّر في جردة إجمالي الكربون الأرضي والمحيطي منذ فترة ما قبل التصنيع. {الرسم ١٠,٣٥}

درجة مئوية واحدة إلى الإحترار النسبي المتوقع بحلول العام ٢١٠٠، بالنسبة إلى سيناريوهات الإنبعاثات الواردة في التقرير الخاص. وعلى النحو ذاته، يقلل إمتصاص ثاني أكسيد الكربون المنخفض والناتج عن هذا الأثر، من إنبعاث ثاني أكسيد الكربون الذي يتناسب مع مستوى الإستقرار الهدف. لكن، لا تزال الشكوك قائمة لأسباب عديدة، منها الفهم المحدود لدينامية الأنظمة الإيكولوجية الخاصة بالأرض والتربة. {٧,٣، ١٠,٤}

إن إرتفاع تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي يؤدي مباشرة إلى زيادة تحمّض سطح المحيط. وتشير إسقاطات سيناريوهات الإنبعاثات التابعة للتقرير الخاص إلى تراجع الرقم الهيدروجيني من ٠,١٤ إلى ٠,٣٥ وحدة في القرن الحادي والعشرين (بحسب السيناريو)، معززةً الإنخفاض الحالي (١,٠ وحدة) الموروث عن فترة ما قبل التصنيع. وقد يؤدي تحمّض المحيط إلى حل رواسب الكاربونات الموجودة في المياه السطحية. ويتوقع أن تُظهر المياه السطحية جنوبي المحيط حالة عدم تشبّع نظراً إلى كمية كربونات الكالسيوم مقابل تركيز ثاني أكسيد الكربون، أي أكثر من ٦٠٠ جزء بالمليون، وهو مستوى تم تخطيه خلال النصف الثاني من القرن الحادي والعشرين في معظم سيناريوهات التقرير الخاص. كما ستتأثر مناطق خطوط العرض المتدنيّة وأعماق المحيط. وقد تؤثر هذه التغيّرات على الكائنات البحرية التي تتغذى من كربونات الكالسيوم لتنمّي هيكلها الخارجي، غير أن الأثر الفعلي الذي سينعكس على دورة الكربون البيولوجية في المحيطات لم يتبلور بعد. {الإطار ٧,٣، ١٠,٤}

يتفاوت تغيّر المناخ الملتزم بسبب الإنبعاثات الماضية بشكل واضح بحسب مختلف عوامل التأثير، وذلك بسبب تفاوت الأعمار في الغلاف الجوي للأرض (انظر الملخّص الفني، الإطار ٩). ويأخذ تغيّر المناخ الملتزم الحاصل من جراء الإنبعاثات الماضية، (أولاً) بالوقت

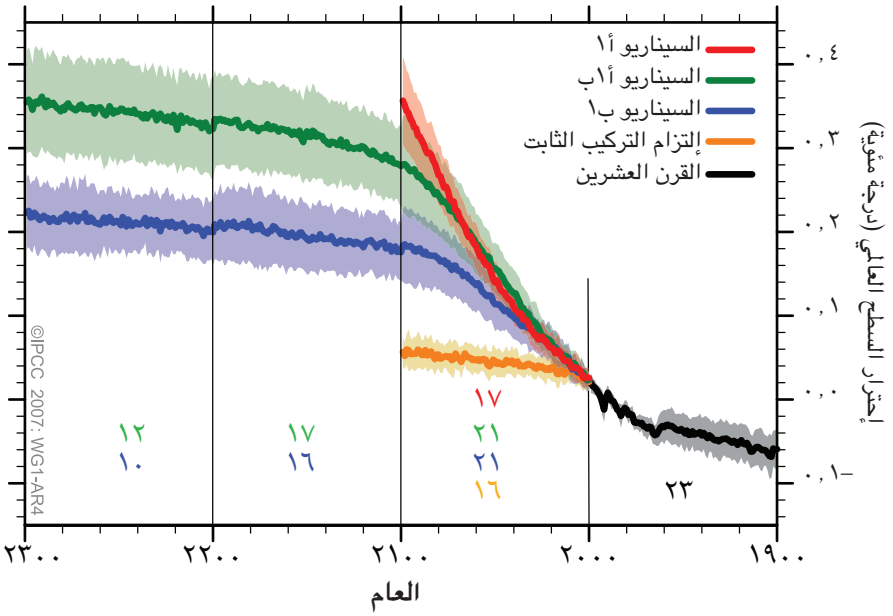
الذي يستغرقه النظام المناخي قبل الإستجابة للتغيّرات في التأثير الإشعاعي، و(ثانياً) بالنطاقات الزمنية التي تستمر فيها عوامل التأثير المختلفة في الغلاف الجوي بعد إنبعاثها، نظراً إلى تفاوت أعمارها. وعلى النحو ذاته، يتضمن التغيّر المناخي الملتزم الحاصل نتيجة الإنبعاثات الماضية فترةً أساسيةً من الإرتفاع الإضافي في درجات الحرارة، وذلك للأسباب المذكورة أعلاه، يتبعها تراجع طويل الأمد يترافق مع إنخفاض التأثير الإشعاعي. وتتمتع بعض غازات الدفيئة بأعمار جوية قصيرة نسبياً (عقود على الأكثر)، نذكر منها الميثان وأول أكسيد الكربون، فيما تتمتع غازات أخرى كأكسيد النيتروز بأعمار أطول تصل إلى مئة سنة، وأحياناً آلاف السنين، كسادس فلوريد الكبريت والمركبات الكربونية الفلورية المشبعة. ولا ينحل تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بفترة زمنية في حال توقفت الإنبعاثات. ويتطلب زوال ثاني أكسيد الكربون المنبعث في الغلاف الجوي جداول زمنية متعددة، كما أنه قد يحافظ على بقائه لآلاف السنين، ما يؤدي إلى إلتزام الإنبعاثات بتغيّر المناخ على الأمد الطويل. إن صدّ المحيط عملية طويلة الأمد وبطيئة، يتضمن التأثير التفاعلي لرواسب كربونات الكالسيوم، وتستغرق من ٣٠،٠٠٠ إلى ٣٥،٠٠٠ سنة كي يتوصل تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى التوازن. ومع إستخدام مكوّنات مقرونة من دورة الكربون، تُظهر نماذج نظام الأرض المتوسطة التعقيد أن التغيّر المناخي الملتزم الناتج عن إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون الماضية، بقي قائماً لأكثر من ١٠٠٠ سنة، ولم تعد درجات الحرارة ومستوى سطح البحر إلى القيم التي كانت عليها في فترة ما قبل التصنيع، حتى بعد إنقضاء هذه الفترات الزمنية الطويلة. ويمكن الحصول على النطاقات الزمنية الطويلة لتغيّر المناخ الملتزم من خلال وصف إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون البشرية المنشأ التي تلت خطوة فترة الإستقرار عند ٧٥٠ جزءاً بالمليون، بالإضافة إلى تثبيت الإنبعاثات عشوائياً عند الصفر في العام ٢١٠٠. في هذا الوضع الإختباري، يتطلب تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من قرن إلى ٤ قرون في مختلف النماذج، كي ينتقل المستوى من حده الأقصى (تراوح بين ٦٥٠ و٧٥٠ جزءاً بالمليون) إلى ما دون مستوى تركيز ثاني أكسيد الكربون في فترة ما قبل التصنيع بضعفين (حوالي ٥٦٠ جزءاً بالمليون)، نظراً إلى إنتقال مستمر ولكن بطيء للكربون من الغلاف الجوي والخزانات الأرضية إلى المحيط (انظر الملخّص الفني، الرسم ٣١). {٧،٣– ١٠،٧}

إن التركيز المستقبلي لعدد من غازات الدفيئة غير ثاني أكسيد الكربون وسلائفها قد يكون مقروناً بتغيّر المناخ في المستقبل. ويشير عدم الفهم الكافي لأسباب التقلبات الحديثة التي طرأت على نسبة نمو الميثان إلى حالات شاسعة من عدم اليقين في الإسقاطات المستقبلية الخاصة بهذا الغاز بالتحديد. ومن المرجّح أن يزيد الميثان المنبعث من الأراضي الرطبة، ضمن مناخ أكثر إحتراراً ورطوبة، وأن ينخفض ضمن مناخ أكثر إحتراراً وجفافاً. وتشير الملاحظات أيضاً إلى إزدياد الميثان المنبعث من أراضي الخث الشمالية التي تعيش تربتها الصقيعية ذوباناً في الوقت الراهن، على الرغم من أن حجم هذا الأثر الكبير لم يحدد بعد. وقد تؤثر تغيّرات درجة الحرارة والرطوبة والسحب على الإنبعاثات البيولوجية المنشأ لسلائف الأوزون، مثل المركبات العضوية المتطايرة. كما يتوقع أن يؤثر تغيّر المناخ على الأوزون التروبوسفيري عبر تغيّرات تطرأ على الكيمياء والنقل. وقد يؤدي تغيّر المناخ إلى تغيّرات لجهة الهيدروجين والأكسيجين، عبر تغيّرات في الرطوبة، وقد يحدث تقلّباً على مستوى تركيز الأوزون في الستراتوسفير وبالتالي على مستوى الإشعاع فوق البنفسجي في التروبوسفير {٤،٧،٧،٤}

من المتوقع أن يؤثر تغيّر المناخ على الإنبعاثات المستقبلية للعديد من الأهباء الجوية وسلائفها. وتشير التقديرات حول التغيّرات المستقبلية لجهة إنبعاثات الغبار في إطار سيناريوهات متعددة حول المناخ وإستخدام الأراضي، إلى أن آثار تغيّر المناخ في السيطرة على إنبعاثات الغبار المستقبلية تفوق آثار تغيّره في إستخدام الأراضي أهميةً. وتشير نتائج إحدى الدراسات إلى أن علميّ الأرصاد الجوية والمناخ يؤثران على الإنبعاثات الآسيوية المستقبلية للغبار وعواصف الغبار، أكثر ممّا يؤثران على التصحّر. ومن المعروف عن الإنبعاثات الحيوية المنشأ للمركّبات العضوية المتطايرة، وهي مصدر هام للأهباء العضوية الثانوية، أنها حساسة للغاية لدرجات الحرارة (وتزداد معها). لكن، تتراجع مردودات الأهباء الجوية مع درجات الحرارة، وتبقى آثار الأمطار المتغيّرة والتكييف الفيزيولوجي غير أكيدة. وبالتالي، قد يكون تغيّر توليد الهباء العضوي الثانوي الحيوي المنشأ في إطار مناخ أكثر إحتراراً، أدنى بكثير من إستجابة إنبعاثات الكربون العضوي المتطاير الحيوي المنشأ. وقد يؤثر تغيّر المناخ على تقلّبات كبريتيد ثنائي المثيل (وهو من سلائف بعض الأهباء الكبريتية) والأهباء الملحية البحرية من المحيط، غير أن تأثير ذلك على درجات الحرارة والأمطار يبقى غير مؤكد على الإطلاق. {٧،٥}

وبينما بقي الأثر الإحتراري لثاني أكسيد الكربون إلتزاماً على مدى قرون عدة، أُزيلت الأهباء الجوية من الغلاف الجوي في ظرف أيام، وبالتالي، سرعان ما تغيّر التأثير الإشعاعي السلبي الناتج عن الأهباء الجوية، إستجابة لأي تغيّرات تطرأ على إنبعاثات

تنبوّات التقرير الخاص عن سيناريوهات الإنبعاثات حول إحترار السطح النسبي



الرسم ٣٢: معدّلات إحترار السطح المتعدد النماذج (مقارنةً مع الفترة المتراوحة بين العامين ١٩٨٠ و١٩٩٩) بحسب سيناريوهات التقرير الخاص أ١ (أحمر) وأ١ ب (أخضر) وب ١ (أزرق)، التي تظهر كتتمة لمحاكاة القرن العشرين. ويستمر السيناريوهان الأخيران بعد إنتهاء العام ٢١٠٠ مع إستقرار التأثير (تغيّر المناخ الملتزم كما حدده الملخّص التنفيذي في الإطار ٩). كما تبدو تجربة إضافية حيث حافظ التأثير على مستوى العام ٢٠٠٠ (البرتقالي). أزيلت الميول الخطية الخاصة بالمعلومات المناسبة حول المراقبة من هذه الجداول الزمنية. وتشير الخطوط إلى المعدّلات المتعددة النماذج، فيما ترمز المساحات الملوّنة إلى المعيار ± ١ من نطاق الإنحراف. ليس لحالات التقاطع بين الفترات المختلفة أي معنى فيزيائي، وهي ناتجة عن إعتماد عدد من النماذج لسيناريو معيّن، ما يختلف بين الفترات والسيناريوهات (الأرقام مذكورة في الرسم). وللسبب ذاته، لا ينبغي تفسير حالة عدم اليقين بين السيناريوهات إستناداً إلى هذه الرسم (لمزيد من المعلومات حول التقديرات المرتبطة بالشكوك، راجع الفقرة ١٠,٥). {الرسم ١٠,٤}

الأهباء الجوية أو سلائفها. ونظراً إلى أنه من المرجّح جداً أن تعكس الأهباء الكبريتية تأثيراً إشعاعياً سلبياً حيوياً في الوقت الراهن، فإن صافي التأثير المستقبلي يمتاز بحساسية كبيرة على تغيّرات إنبعاثات الكبريت. وتشير إحدى الدراسات إلى أن الإزالة المحتملة لمجمل العبء الحالي الذي تشكله جزئيات الأهباء الكبريتية البشرية المنشأ من الغلاف الجوي، قد تولّد إرتفاعاً سريعاً في درجات الحرارة النسبية في العالم، قد يصل إلى ٠,٨ درجة مئوية في غضون عقد أو عقدين. ومن المرجّح أن تؤثر التغيّرات في الأهباء الجوية على تساقط الأمطار. وبالتالي، فإن أثر الإستراتيجيات البيئية الآيلة إلى تلطيف التغيّرات المناخية يستوجب الأخذ بإعتبار التغيّرات في إنبعاثات غازات الدفيئة والأهباء الجوية. وقد تنتج تغيّرات إنبعاثات الأهباء الجوية عن تدابير مطبقة لتحسين نوعية الهواء، ما قد يؤثر على تغيّر المناخ. {الإطار ٧,٤ – ٧,٦ – ١٠,٧}

قد يعدل تغيّر المناخ عدداً من العمليات الكيميائية والفيزيائية التي يسيطر على جودة الهواء، ومن المرجّح أن يختلف صافي الآثار بين منطقة وأخرى. ويمكن أن يؤثر تغيّر المناخ على جودة الهواء من خلال تعديل نسب توزيع الملوثات ونسبة إزالة الأهباء الجوية والأنواع القابلة للحل من الغلاف الجوي، والبيئة الكيميائية العامة لجيل الملوثات، بالإضافة إلى البيئة الكيميائية العامة للجيل الملوث وقوة الإنبعاثات من المحيط الحيوي والحرائق والغبار. كما يُتوقع أن يساهم تغيّر المناخ في تخفيض الأوزون الطبيعي في العالم. وبشكل عام، تحيط نسبة عالية من عدم اليقين بصافي أثر تغيّر المناخ على نوعية الهواء. {الإطار ٧,٤}

٥,٥ تداعيات العمليات المناخية ونطاقاتها الزمنية بالنسبة إلى التنبوّات الطويلة المدى

يتوقع أن تتراوح الإلتزامات حيال تغيّر المناخ، بعد إستقرار التأثير الإشعاعي ما بين ٠,٥ و٦,٠ درجة مئوية، في القرن التالي لمعظمها. ويساوي المعدّل المتعدد النماذج، عند استقرار تركيز غازات

الدفيئة والأهباء الجوية بحسب أرقام العام ٢٠٠٠ بعد محاكاة مناخ القرن العشرين، وعند مضي فترة إضافية تتألف من ١٠٠ سنة، حوالي ٠,٦ درجة مئوية من الإحترار (بالنسبة إلى ١٩٨٠– ١٩٩٩) في العام ٢١٠٠ (انظر الملخّص الفني، الرسم ٣٢). وإذا كان السيناريوهان ب ١ وأ١ ب يشكّلان سمة إنبعاثات القرن الحادي والعشرين، يليهما الإستقرار على هذه المستويات، فإن الإحترار الإضافي يبقى هو نفسه بعد الإستقرار، حوالي ٠,٥ درجة مئوية، في القرن التالي على الأرجح. {١٠,٣– ١٠,٧}

إن حجم التأثير التفاعلي الإيجابي بين تغيّر المناخ ودورة الكربون غير مؤكد. ما يؤدي إلى شكوك في مسار إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون الضرورية لتحقيق مستوى إستقرار معيّن لجهة تركيز ثاني أكسيد الكربون في الجو. وإستناداً إلى التفهم الراهن للتأثير التفاعلي لدورة الكربون – المناخ، تشير دراسات النماذج إلى أن الإنبعاثات المتراكمة في القرن الحادي والعشرين، والهادفة إلى تثبيت ثاني أكسيد الكربون على مستوى ٤٥٠ جزءاً بالمليون، قد تتقلص وتنتقل من معدّل نموذج يتراوح بين ٦٧٠ تقريباً [٦٣٠ – ٧١٠] جيغا طن من الكربون و٤٩٠ [٣٧٥– ٦٠٠] جيغا طن من الكربون. وعلى النحو ذاته، يمكن تقليص الإنبعاثات المتراكمة عبر هذا التأثير التفاعلي من معدّل نموذج يتراوح بين ١٤١٥ [١٣٤٠ – ١٤٩٠] جيغا طن من الكربون و١١٠٠ [٩٨٠ – ١٢٥٠] جيغا طن من الكربون. {٧,٣ – ١٠,٤}

في حال كان التأثير الإشعاعي سيستقر في العام ٢١٠٠ على مستوى تركيز السيناريو أ ١ ب، فإن الإمتداد الحراري وحده قد يؤدي إلى إرتفاع مستوى سطح البحر ٠,٣ إلى ٠,٨ متراً بحلول العام ٢٣٠٠ (نسبةً إلى الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٨٠ و١٩٩٩)، وقد يستمر بالتراجع على مدى قرونٍ من الزمن، نظراً إلى العمليات البطيئة التي تخلط الحرارة داخل عمق المحيطات. {١٠,٧}

من المتوقع أن يستمر الغلاف الجليدي في غرينلاند بالتقلّص، مساهماً في إرتفاع مستوى سطح البحر بعد العام ٢١٠٠. ومن أجل تثبيت مستوى التركيز الوارد في السيناريو أ ١ ب للعام ٢١٠٠، من المتوقع أن تتراوح نسبة الإرتفاع بين ٠,٠٣ و٠,٢١ متراً في كل قرنٍ، بسبب الإمتداد الحراري. وإذا تمّ الحفاظ على معدّل إحترار عالمي يتراوح بين ١,٩ درجة مئوية و٤,٦ درجة مئوية نسبةً إلى درجات الحرارة الخاصة بفترة ما قبل التصنيع على مدى آلاف السنين، فإن الغلاف الجليدي في غرينلاند قد يزول بشكلٍ كلي، بإستثناء بقايا الأنهر الجليدية الموجودة في الجبال. وقد يؤدي ذلك إلى إرتفاع مستوى سطح البحر بحوالي ٧ أمتار، وهو أمرٌ سيستحيل الرجوع عنه. إن درجات الحرارة هذه تشبه تلك التي ذُكرت في ما يتعلق بالفترة الجليدية البينية الأخيرة، أي منذ ١٢٥٠٠٠ ألف سنة، حيث تشير المعلومات حول مناخ عصر ما قبل التاريخ إلى تقلّص الإمتداد الجليدي القطبي وإلى إرتفاع مستوى سطح البحر من ٤ إلى ٦ أمتار. {٤,٦، ٧,١٠}

قد تزيد العمليات الدينامية غير المدرجة في النماذج الحالية إنما المذكورة في الملاحظات الحديثة، من هشاشة الغلاف الجليدي أمام الإحترار، ما يضاعف خطر إرتفاع مستوى سطح البحر في المستقبل. إن فهم هذه العمليات محدودٌ وما من تقديرات مشتركة حول حجمها. {٤,٦، ٧,١٠}

تنبئ دراسات النموذج العالمية الحالية بأن الغلاف الجليدي في أنتاركتيكا سيبقى بارداً لدرجة تمنع إنتشار الثلوج الذائبة على السطح، وسيزداد حجماً بسبب تزايد تساقط الثلوج. لكن، قد يخسر الجليد من حجمه الصافي في حال سيطر تصريف الجليد الديناميكي على توازن حجم الغلاف الجليدي {١٠,٧}

وبينما لا ينطبق أي نموذج على هذا التقييم، ما ينبئ بتوقف مفاجئ للدوران التقلبي الجنوبي (خلال القرن الحادي والعشرين)، تصف بعض النماذج المنخفضة التعقيد توقف الدوران التقلبي الجنوبي كإستجابة ممكنة على المدى الطويل في وجه الإحترار القوي. لكن، لا يمكن التأكد من أرجحية هذه الحادثة. كما أن الحالات القليلة المتوفرة لمحاكاة نماذج مختلفة التعقيد تنبئ بتباطؤ مئوي النطاق. ومن المرجّح أن يشهد الدوران التقلبي الجنوبي إنتعاشاً إذا ما استقر التأثير الإشعاعي، إلا أن المسألة ستستغرق قروناً. وقد ساعدت الدراسات المنتظمة لمقارنة النماذج على وضع بعض العمليات الحيوية المسؤولة عن التفاوت بين النماذج في إطار إستجابة المحيط لتغيّر المناخ (خاصة إمتصاص حرارة المحيط). {٨,٧، الأسئلة ١٠,٢، ١٠,٣}

الملخّص الفني ٦: الإكتشافات الكبرى وأهم الشكوك

الملخّص الفني ٦,١: تغيّر في العوامل البشرية والطبيعية الدافعة الخاصة بالمناخ

الإكتشافات الكبرى:

يتعدى التركيز الحالي لثاني أكسيد الكربون والميثان في الغلاف الجوي وما يرفقهما من تأثير إشعاعي إيجابي التركيز الذي حُدّد تبعاً لمقاييس القلنسوات الجليدية الموجودة في الـ ٦٥٠٠٠٠ سنة الماضية. {٦,٤}

شكّل إستخدام الوقود الأحفوري والزراعة وإستخدام الأراضي الأسباب الأساسية وراء إرتفاع نسبة غازات الدفيئة في الـ٢٥٠ سنة الماضية. {٢,٣، ٧,٣ ، ٧,٤}

إزدادت إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون السنوية نتيجة إحتراق الوقود الأحفوري وإنتاج الأسمنت وإشتعال الغازات، لتنتقل من معدّل ٦,٤ ± ٠,٤ جيغا طن من الكربون سنوياً في التسعينيات إلى ٧,٢ ± ٠,٣ جيغا طن من الكربون سنوياً للفترة الممتدة ما بين العامين ٢٠٠٠ و٢٠٠٥. {٧,٣}

إن النسبة المستدامة لإزدياد التأثير الإشعاعي من ثاني أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروز في الأربعين سنة الماضية تتعدى كافة النسب الممكنة، أو على الأقل تلك التي كانت سائدة في الألفيتين الاخيرتين. {٦,٤}

إن العمليات الطبيعية لإمتصاص المحيطات والمحيط الحيوي الأرضي لثاني أكسيد الكربون يزيل ٥٠ إلى ٦٠٪ من الإنبعاثات البشرية المنشأ (مثلاً، إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون الأحفوري وتدفق تغيّر إستخدام الأراضي). كما أن إمتصاص المحيطات وإمتصاص المحيط الحيوي الأرضي يتشابهان في الحجم خلال العقود الأخيرة، على الرغم من أن المحيط الحيوي الأرضي يملك قدرة أكبر على التغيّر. {٧,٣}

يعتبر من شبه مؤكد أن أهباء بشرية المنشأ تولّد تأثيراً إشعاعياً سلبياً صافياً (أثر التبريد) يتميز بحجم أكبر في القطب الشمالي مقارنةً مع القطب الجنوبي. {٢,٩، ٩,٢}

نظراً إلى التقديرات الجديدة حول التأثير البشري المنشأ الناتج عن تغيّر في غازات الدفيئة والأهباء الجوية وسطح الأرض، من فائق المرجّح أن تكون نشاطات الإنسان هي التي أدّت إلى تأثير صافي الإحترار الفعلي على المناخ منذ العام ١٧٥٠. {٢,٩}

إن مساهمات الإشعاع الشمسي في المعدّل العالمي للتأثير الإشعاعي أقل من مساهمة إرتفاع غازات الدفيئة خلال الفترة الصناعية. {٢,٥، ٢,٧}

شكوك أساسية:

السلسلة الكاملة من العمليات التي تؤدي إلى تعديل الأهباء الجوية لخصائص السحب، ليست مفهومة جيداً، بالإضافة إلى أن أحجام الآثار الإشعاعية غير المباشرة ذات الصلة ليست محددة كما ينبغي. {٢,٤، ٧,٥}

وأسباب التأثير الإشعاعي الناتج عن تغيّرات بخار الماء في الستراتوسفير ليست معددة كما يجب. {٢,٣}

والتوزيع الجغرافي والتطور الزمني للتأثير الإشعاعي الناتج عن تغيّر الأهباء الجوية خلال القرن العشرين ليسا محددَين بما فيه الكفاية. {٢,٤}

أسباب التغيّرات الحديثة التي طرأت على نسبة نمو الميثان في الغلاف الجوي غير مفهومة بما فيه الكفاية. {٧,٤}

أدوار العوامل المختلفة التي تساهم في زيادة تركيز الأوزون في التروبوسفير منذ فترة ما قبل التصنيع غير مفصّلة كما يجب. {٢,٣}

خصائص سطح الأرض والتفاعلات بين الأرض والمحيط الجوي التي تؤدي إلى التأثير الإشعاعي غير معدودة كما يجب. {٢,٥}

معرفة مساهمة التغيّرات الشمسية الماضية في التأثير الإشعاعي على مر العصور لا تستند إلى مقاييس مباشرة وترتبط إرتباطاً وثيقاً بالتفهم الفيزيائي. {٢,٧}

الملخّص الفني ٦,٢: مراقبة التغيّرات المناخية

الملخّص الفني ٦,٢,١: الغلاف الجوي والسطح

الإكتشافات الكبرى:

لا تزال درجات الحرارة السطحية النسبية في العالم ترتفع. وخلال الـ١٢ سنة الماضية، مرّت ١١ سنة تحتل ١١ مرتبة من بين أكثر السنوات إحتراراً منذ العام ١٨٥٠. {٣,٢}

ارتفعت نسبة الإحترار السطحي في منتصف السبعينيات، كما وصلت نسبة إحترار سطح الأرض في العالم إلى حوالي ضعفي نسبة إحترار سطح المحيط منذ ذلك الحين. {٣,٢}

يتماشى تغيّر درجات الحرارة السطحية في المواسم المتطرفة مع إحترار المناخ. {٣,٨}

تحسنت التقديرات الخاصة بميول درجات الحرارة في المنطقة المتوسطة والمنطقة المتدنيّة من التروبوسفير. أمّا درجات الحرارة في المنطقة السفلى من التروبوسفير فقد عرفت إحتراراً بسيطاً يفوق الإحترار الحاصل على مستوى السطح بين العامين ١٩٥٨ – ٢٠٠٥. {٣,٤}

لوحظت ميول طويلة الأمد بين العامين ١٩٠٠ و٢٠٠٥، في ما يتعلق بكمية الأمطار في عددٍ من المناطق الواسعة. {٣,٣}

عرف عدد من ظواهر الأمطار الغزيرة تزايداً. {٣,٨}

بات الجفاف أكثر إنتشاراً منذ السبعينيات وخاصةً في المناطق الإستوائية وشبه الإستوائية. {٣,٣}

إرتفع البخار المائي التروبوسفيري، على الأقل منذ الثمانينيات. {٣,٤}

الشكوك الأساسية:

سجلّات المسبار اللاسلكي ليست كاملة من الناحية المكانية، بقدر سجلّات المساحة. وتشير الوقائع إلى أن عدداً من سجلّات المسبار اللاسلكي ليس موضع ثقة، لاسيما في المناطق الإستوائية. ويبدو أن كافة سجلّات ميول درجات الحرارة في التروبوسفير لا تزال تحتوي على أخطاء قديمة. {٣,٤}

وفي حين تبدو التغيّرات الخاصة بالدوران الجوي الواسع النطاق واضحة، لم تتحسن جودة التحاليل قبل العام ١٩٧٩، ما يصعّب تحليل مفهومي التغيّر والتقلبية، ويجعل التمييز بينهما مهمةً بعيدة كل البعد عن السهولة. {٣,٥، ٣,٦}

تختلف المراقبة (السطحية وعبر الأقمار الصناعية) لتغيّر السحب الكلي والمتوسط المستوى فوق المحيط. {٣,٤}

التغيّرات المتعددة العقود لجهة معدّل درجات الحرارة اليومي غير واضحة لأسباب عدة، منها محدودية الملاحظات حول التغيّر المرتبط بالتغييم والأهباء الجوية. {٣,٢}

تبقى الصعوبات التي تعيق قياس الأمطار مصدرَ قلقٍ يمنع تحديد نسبة الأمطار العالمية والإقليمية. {٣,٣}

غالباً ما تكون السجلّات حول رطوبة التربة وتدفق الأنهار محدودة للغاية، وليست متوفرة سوى عن بعض المناطق فقط، ما يعيق تحاليل شاملة حول تغيّر الجفاف. {٣,٣}

تحدّ وفرة البيانات الناتجة عن الملاحظات من أنواع الظواهر المتطرفة التي يمكن تحليلها. وكلما ندرت الظاهرة، كلما صعب تحديد التغيّرات الطويلة الأمد بسبب ندرة الحالات المعنيّة. {٣,٨}

تعود المعلومات حول وتيرة الأعاصير المصحوبة بالأمطار وقوّتها إلى ما قبل عهد القمر الصناعي. وهناك أسئلة حول تفسير سجل الأقمار الصناعية. {٣,٨}

لا تكفي الدلائل لتحديد إذا ما كانت ميول الترناد / الإعصار القمعي والبرد والبرق وأعاصير الغبار، موجودة على نطاقات مساحية صغيرة. {٣,٨}

الملخّص الفني ٦,٢,٢: الثلوج والجليد والتربة الصقيعية

الإكتشافات الكبرى:

إن كمية الثلوج الموجودة على اليابسة تنخفض بشكل متواصل. فبدءاً من نهاية القرن التاسع عشر، شهدت الأرض إرتداداً واسعاً للأنهر الجليدية الموجودة في الجبال. كما تزداد نسبة خسارة الأنهر الجليدية من حجمها. {٤,٥ – ٤,٦}

عرفت شبه جزيرة أنتاركتيكا وأمندسين ذوباناً لرفوفهما الجليدية بدأ في التسعينيات. وقد ساهمت الأنهر جليدية الموجودة هناك في تسريع عملية إنفصال الرف الجليدي «لارسن ب» وإكمالها في العام ٢٠٠٢. {٤,٦}

إنخفض إمتداد الغطاء الجليدي الموجود في القطب الشمالي. وتراجع عمر الأنهار والبحيرات الجليدية الموسمي خلال الـ١٥٠ سنة الماضية. {٤,٢ – ٤,٣}

إزدادت درجة الحرارة في الطبقة العليا من التربة الصقيعية في المنطقة القطبية الشمالية بثلاث درجات، منذ الثمانينيات. وتراجع الحد الأقصى من الصقيع الموسمي على الأرض بحوالي ٧٪ في القطب الشمالي منذ العام ١٩٠٠. كما إنخفض الحد الأقصى من عمقه بحوالي ٠,٣ متراً في أوراسيا منذ منتصف القرن العشرين. {٤,٧}

منذ العام ١٩٧٨، تراجع إمتداد الجليد البحري النسبي السنوي في المحيط المتجمد الشمالي وتقلّص الحد الأدنى من إمتداد الجليد الصيفي في المحيط المتجمد الشمالي. {٤,٤}

الشكوك الأساسية:

ما من بيانات تمّ جمعها من موقع الثلوج قبل العام ١٩٦٠، ولا بيانات موثوقة حول المياه الثلجية، متوفرة في عهد الأقمار الصناعية. {٤,٢}

تحدّ معايرة التغيّرات والتحقق منها عبر قياس الإرتفاع والجاذبية بالسواتل من تقديرات التوازن الكتلي لجهة الرفوف والصفائح الجليدية، خاصةً في أنتاركتيكا. {٤,٦}

لا تكفي البيانات المتوفرة للخروج بأية إستنتاجات حول الميول في سماكة الجليد البحري في أنتاركتيكا. {٤,٤}

تؤدي معرفة العمليات الأساسية وديناميات الرفوف الجليدية المحدودة إلى شكوكٍ كبيرة في فهم عمليات الدفق الجليدي وإستقرار الغلاف الجليدي. {٤,٦}

يأتي عدم اليقين في التقديرات المتعلقة بإزدياد خسارة الأنهر جليدية لحجمها، من بيانات عالية ومحدودة للجرد، وروابط غير مكتملة بين المنطقة والحجم، بالإضافة إلى عدم توازن في التغطية الجغرافية. {٤,٥}

الملخّص الفني ٦,٢,٣: المحيطات ومستوى سطح البحر

الإكتشافات الكبرى:

إرتفعت درجة حرارة المحيطات (أو حرارة العمق) في العالم منذ العام ١٩٥٥. {٥,٢}

لوحظت ميول إقليمية متناسقة وواسعة النطاق لجهة الملوحة، في العقود الأخيرة، مع تحول المياه إلى عذبة في المناطق شبه القطبية، بالإضافة إلى إرتفاع نسبة الملوحة في أعماق المناطق الإستوائية وشبه الإستوائية. وتترافق هذه الميول مع تغيّرات لجهة الأمطار وإمكانية إنتقال كميّات كبيرة في الماء في الغلاف الجوي من خطوط العرض المتدنيّة إلى خطوط العرض العليا، ومن المحيط الأطلسي إلى المحيط الهادئ. {٥,٢}

شهد القرن العشرين إرتفاعاً عاماً في معدّل سطح البحر. وهناك شبه تأكيد أن نسبة إرتفاع مستوى سطح البحر تزايدت بين منتصف القرن التاسع عشر ومنتصف القرن العشرين. وخلال العامين ١٩٩٣ و٢٠٠٣، كان إرتفاع مستوى سطح البحر أسرع مما كان عليه خلال العامين ١٩٦١ و٢٠٠٣. {٥,٥}

ساهم إمتداد المحيط الحراري وخسارة الكتل والأغطية الجليدية جزءاً من حجمها بفاعلية في إرتفاع مستوى سطح البحر الملحوظ. {٥,٥}

ترتبط نسبة إرتفاع مستوى سطح البحر الملحوظة في الفترة الممتدة ما بني العامين ١٩٩٣ و٢٠٠٣ بعدد المساهمات الملحوظة للامتداد الحراري وفقدان الأنهر جليدية، في ذلك. {٥,٥}

لم تكن نسبة تغيّر مستوى سطح البحر في العقود الأخيرة موحدة من الناحية الجغرافية. {٥,٥}

منذ العام ١٧٥٠، ونتيجة إمتصاص ثاني أكسيد الكربون البشري المنشأ، إزدادت ملوحة سطح المحيط. {٥,٤، ٧,٣}

الشكوك الأساسية:

إن الحد في التغيير المحيطي يفترض أن التقلبية العقدية في التغيّرات التي طرأت على المحتوى الحراري والملوحة ومستوى سطح البحر ليست موثّقة كما يجب. {٥,٢، ٥,٥}

إن مراقبة الميول في الدوران التقلبي الجنوبي لا توحي كثيراً بالثقة. {الإطار ٥,١}

يبدو أن المعدّل العالمي لإرتفاع مستوى سطح البحر في الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٦١ و٢٠٠٣، يُعزى لأسباب مختلفة منها الإرتداد الحراري وذوبان الجليد القارّي. {٥,٥}

الملخّص الفني ٦,٢,٤: مناخ عصر ما قبل التاريخ

الإكتشافات الكبرى:

خلال الفترة الجليدية البينية الأخيرة، أي منذ حوالي ١٢٥٠٠٠ سنة، من المرجّح أن مستوى سطح الجليد كان أعلى بـ ٣ إلى ٦ أمتار ممّا هو عليه اليوم، والسبب الأول هو إرتداد القطب الجليدي. {٦,٤}

من المرجّح جداً أن عدداً من التغيّرات المناخية السريعة الماضية يتصل بتغيّرات دوران المحيط الأطلسي ويتأثر بالمناخ العام في القطب الشمالي. {٦,٤}

من المستبعد جداً أن تدخل الأرض في فترة جليدية جديدة تمتد على ٣٠٠٠٠ سنة على الأقل. {٦,٤}

عزز التأثير التفاعلي الكيميائي الأرضية الأحيائية والفيزيائية الأرضية الأحيائية التغيّرات المناخية في الماضي. {٦,٤}

في النصف الثاني من القرن العشرين، كان من المرجّح جداً أن تتعدى المعدّلات الحرارية في القطب الشمالي المعدّلات التي كانت سائدة على مدى خمسة عقود متتالية من القرون الخمسة الماضية، وحتى في فترة الـ١٣٠٠ سنة السابقة. {٦,٦}

تؤكد سجلّات مناخ عصر ما قبل التاريخ أن فترات الجفاف التي تمتد على عقودٍ أو أكثر من الزمن كانت تشكّل نمطاً متكرراً من أنماط التاريخ في عدة مناطق، خلال الألفيتين الماضيتين. {٦,٦}

الشكوك الأساسية:

لا تزال الآليات المرتبطة ببدايات تغيّرات مناخ عصر ما قبل التاريخ السريعة وتطورها، بالإضافة إلى العتبات المناخية، غير مفهومة كما يجب. الأمر الذي يحد من الثقة في قدرة النماذج المناخية على محاكاة التغيّر الواقعي السريع. {٦,٤}

إن درجة إرتداد الغطاء الجليدي في الماضي ونسب ذلك التغيّر والعمليات المعنيّة به هي أمور لا تزال غير واضحة. {٦,٤}
يحد النقص على مستوى السجلّات الخاصة بمناخ عصر ما قبل التاريخ معرفة تقلبية المناخ على مدى أكثر من السنوات المئة الأخيرة في القطب الجنوبي والمناطق الإستوائية . {٦,٤}

يعيد نقص السجلّات الخاصة بمناخ عصر ما قبل التاريخ معرفة تقلبية المناخ في القطب الجنوبي والمناطق الإستوائية لفترة تتعدى المئة سنة. {٦,٦}

إن التمييز بين الأحجام والتقلبية الملحوظة لجهة إعادة تنظيم درجات الحرارة في القطب الجنوبي، كما علاقة تلك الإختلافات بخيار البيانات غير المباشرة وطرق المعايرة الإحصائية، لا يزال يحتاج إلى مزيدٍ من الحل. {٦,٦}

يحد النقص الذي تعاني منه الشبكات الشاملة للبيانات غير المباشرة المرتبطة بمعدّلات درجات الحرارة في العقدين الماضيين، من تفهم مدى إستجابة تلك البيانات للإحترار العالمي السريع وغيرها من التغيّرات البيئية. {٦,٦}

الملخّص الفني ٦,٣: فهم تغيّر المناخ وعزوه

الإكتشافات الكبرى:

من المرجّح جداً أن يكون تأثير غاز الدفيئة قد ساهم بشكلٍ كبير في الإحترار العالمي الملحوظ خلال السنوات الخمسين الماضية. ويُقال أن تأثيره وحده كان ليزيد من الإحترار الراهن، في حال غياب أثر التبريد المقابل الصادر عن الأهباء الجوية والتأثيرات الأخرى. {٩,٤}

من فائق الإستبعاد (دون ٥٪) أن يُفسّر النمط العالمي للإحترار خلال النصف الثاني من القرن الماضي، من دون ذكر التأثيرات الخارجية. ومن المستبعد جداً أن يُعزى السبب في هذه الحالة إلى أسباب طبيعية خارجية فقط. فالإحترار حصل على مستوى المحيط والغلاف الجوي معاً، عندما كان يمكن لعوامل التأثير الطبيعية الخارجية أن تحدث بعض التبريد. {٩,٤، ٩,٧}

من المرجّح أن يكون التأثير البشري المنشأ قد ساهم في الإحترار العام الملحوظ في مئات الأمتار العليا من المحيط، خلال النصف الثاني من القرن العشرين. ومن المرجّح جداً أن يكون التأثير البشري المنشأ، الذي يؤدي إلى الإمتداد الحراري الناتج عن إحترار المحيط وخسارة الأنهر جليدية من حجمها، قد ساهم في إرتفاع مستوى سطح البحر خلال النصف الثاني من القرن العشرين. {٩,٥}

ومن المرجّح جداً أن يُعزى الجزء الأكبر من التقلبية العقدية البينية لدرجات الحرارة التي أُعيد توليدها في القطب الجنوبي، وذلك خلال العقود السبعة الماضية، إلى التأثير الخارجي الطبيعي (الثوران البركاني والتقلبية الشمسية). {٩,٣}

الشكوك الأساسية:

في الوقت الراهن، تعيق بعض الشكوك حول التأثير الإشعاعي، وحول التأثير التفاعلي والملاحظات، الثقة بعزو بعض ظواهر تغيّر المناخ للتأثيرات البشرية المنشأ. {٩,٤، ٩,٥}

العزو على نطاقات أصغر من القارات ونطاقات زمنية لا تتعدى الخمسين سنة تحدّه تقلبية مناخية أشمل على نطاقات أضيق، وشكوك حول التفاصيل الصغيرة النطاق المتعلقة بالتأثير الخارجي والإستجابة التي خضعت لمحاكاة النماذج، بالإضافة إلى شكوك حول محاكاة التقلبية الداخلية على نطاقات صغرى، حتى في ما يتعلق بأنماط التقلبية. {٩,٤}

من غير المؤكد أن تُفهم التغيّرات الناتجة عن إستعجال التغيّرات المناخية على مستوى الأمطار والضغط السطحي، بقدر ما هي مفهومة على مستوى درجات الحرارة. {٩,٥}

يحد غياب دراسات العزو والكشف الرسمية حول ظواهر معيّنة (مثلاً: بعض أنواع الظواهر المتطرفة)، أو ندرتها، إمكانيات الإعلان عن العزو. {٩,٥}

لا يزال عدم إكتمال البيانات العالمية الخاصة بتحليل الظواهر المتطرفة وعدم اليقين بالنماذج، يعيق المناطق وبعض دراسات الكشف عن الظواهر المتطرفة التي يمكن تطويرها. {٩,٤، ٩,٥}

على الرغم من تحسّن مستوى الفهم، تحد حالات عدم اليقين لجهة تقلبية المناخ الداخلية الخاضعة لمحاكاة النماذج، بعض النواحي من دراسات العزو. مثلاً، هناك تناقضات واضحة بين التقديرات الخاصة بتقلبية المحتوى الحراري للمحيطات بين النماذج والملاحظات. {٥,٢، ٩,٥}

على صعيد الميزانية للفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٦١ و٢٠٠٣، تشكّل ندرة الدراسات الهادفة إلى إحتساب مساهمات التأثير البشري المنشأ على إرتفاع المحتوى الحراري للمحيطات، أو ذوبان الأنهر جليدية في الجزء المكشوف من مستوى سطح البحر، أحد نقاط عدم اليقين في تحديد المساهمات البشرية المنشأ في إرتفاع مستوى سطح البحر. {٩,٥}

الملخّص الفني ٦,٤: التنبؤات الخاصة بالتغيّرات المستقبلية في المناخ

الملخّص الفني ٦,٤,١: تقييم النموذج

الإكتشافات الكبرى:

تستند نماذج المناخ إلى مبادئ فيزيائية متينة وأظهرت قدرتها على إعادة توليد الأنماط الملحوظة للتغيّرات المناخية الحديثة والقديمة. تقدم نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات تقديرات كمية موثوقة حول تغيّر المناخ في المستقبل، خاصةً على النطاق القاري وما فوق. وتعطي هذه التقديرات معلومات أصدق لجهة بعض المتغيّرات المناخية (مثل درجات الحرارة)، ومعلومات أقل صدقاً لجهة متغيّرات أخرى (مثل الأمطار). {الأسئلة ٨,١}

إزدادت هذه النماذج مصداقيةً لأسباب عدة، هي:

- تحسين محاكاة نواحي عديدة من المناخ الحالي، بما في ذلك أساليب هامة من تقلبية المناخ وفترات البرد والحر المتطرفة.
- تحسين حلول النموذج وأساليب الإحتساب، بالإضافة إلى إدراج عمليات إضافية.
- إختبارات تشخيصية أكثر شمولية، بما في ذلك إختبارات لقدرة النموذج على التنبؤ بحسب جداول زمنية تُعد بالأيام كما بالسنين عندما توضع بحسب شروطٍ مدروسة.
- تعزيز تدقيق النماذج وتحاليل تشخيصية موسّعة لسلوك النموذج، بتسهيل من الجهود المنسقة دولياً بهدف جمع نتائج تجارب النماذج المتطورة ونشرها بموجب شروطٍ مشتركة. {٨,٤}

الشكوك الأساسية:

لا تتمتع مجموعة من نماذج القياس التي تقارن بين المحاكاة والمراقبة، والتي قد تُستعمل لتضييق نطاق الإسقاطات المناخية الممكنة، بالقدر اللازم من التطور. {٨,٢}

بقيت المشاكل عالقة على صعيد محاكاة بعض أساليب التقلبية ولا سيما تذبذب مادن – جوليان، والإنسداد الجوي المتكرر والأمطار المتطرفة. {٨,٤}

لا تزال معظم النماذج تواجه صعوبات في السيطرة على إنحراف المناخ، وخاصةً في عمق المحيط. وقد يكون هذا الإنحراف مفيداً عند تقييم العديد من المتغيّرات المحيطية. {٨,٢}

تتكرر الإنحرافات بإنتظام في معظم نماذج محاكاة المحيط الجنوبي، التي ترتبط بعدم اليقين لجهة إستجابة المناخ العابرة. {٨,٣}

تختلف النماذج كلياً في تقديرها لقوة مختلف حالات التأثير التفاعلي في النظام المناخي. {٨,٦}

تبقى النماذج المناخية محدودة بسبب الاستبانة المكانية الذي يمكن تحقيقه بمساعدة الموارد الحسابية الحالية، وبسبب الحاجة إلى مزيدٍ من المجموعات الشاملة وبحسب الحاجة إلى إعتماد بعض العمليات الإضافية. {٨,١ – ٨,٥}

الملخّص الفني ٢,٤,٦: حساسية المناخ المتوازنة وحساسية المناخ المؤقتة

الإكتشافات الكبرى:

من المرجّح أن حساسية المناخ المتوازنة تتراوح بين درجتي ٤ و٥ مئوية، وغالباً ما تساوي ٣ درجات مئوية، بحسب قيود تتعلق بالمراقبة والنمذجة. ومن المرجّح جداً أن تكون هذه الحساسية أدنى من ١,٥ درجة مئوية. {٨,٦، ٩,٦ – الإطار ١٠,٢}

إن تقيّد إستجابة المناخ المؤقتة أفضل من تقيّد حساسيته المتوازنة. فمن المرجّح جداً أن تتعدى الدرجة الواحدة ومن المستبعد جداً أن تتعدى الثلاث درجات. {١٠,٥}

إن أصول توازن حساسية المناخ في مختلف النماذج مفهومة. يشكل التأثير التفاعلي للسحب مصدر الإختلافات الأول بين النماذج في إطار حساسية المناخ المتوازنة، خاصةً مع السحب المتدنيّة الإرتفاع. {٨,٦}

تدعم دلائل جديدة حول المراقبة والنمذجة التأثير التفاعلي لمعدّل بخار الماء – التفاوت الحراري المشترك لجهة قوة شبيهة بتلك التي ترد في نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات. {٨,٦}

الشكوك الأساسية:

لا تزال كيفية إستجابة السحب للتغيّر المناخي العالمي موضع شك كبير. {٨,٦}

الملخّص الفني ٣,٤,٦: التنبؤات العالمية

الإكتشافات الكبرى:

في حال ثبت تركيز عوامل التأثير الإشعاعي، يبقى إحتمال حصول إحترار ملتزم وتغيّرات مناخية مرتبطة وارداً، وذلك بسبب عامل الوقت وما يليه من عمليات في المحيط. {١٠,٧}

تتأثر الإسقاطات القريبة المدى حول الإحترار ولو قليلاً بسيناريو الإفتراضات المختلفة أو بنماذج الحساسيات المختلفة، وتلتقي مع الظواهر الملحوظة خلال العقود الماضية. ويتراوح الإحترار النسبي المتعدد النماذج بين ٠,٦٤ و٠,٦٩ درجة مئوية بالنسبة إلى ثلاثة من سيناريوهات الإنبعاثات التي ترد في التقرير الخاص بسيناريوهات الإنبعاثات وهي: ب ١ وأ ١ ب وأ ٢. وتجدر الإشارة إلى أن الإحترار النسبي المتعدد النماذج الذي احتُسب للفترة الممتدة ما بين العامين ٢٠١١ – ٢٠٣٠، يتناسب مع الفترة الممتدة ما بين العامين ١٩٨٠ و١٩٩٩ بالنسبة إلى كافة نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات. تشير الأنماط الجغرافية للإحترار المتوقع إلى الإرتفاع الكبير في درجات الحرارة على خطوط العرض القطبية وفوق الأرض، مع إحترار أقل فوق المحيطات الجنوبية وشمال الأطلسي. {١٠,٣}

تشير التغيّرات في الأمطار إلى أنماط كبرى واسعة النطاق: غالباً ما تزداد الأمطار في مناطق الإستوائية التي يصل فيها تساقط المطار إلى أقصى درجاته، فيما تنخفض نسبة الأمطار في المنطقة شبه الإستوائية وتزداد في المناطق القطبية نتيجة تعزيز الدورة الهيدرولوجية العالمية. {١٠,٣}

وبينما يزداد المناخ إحتراراً، ينخفض الغطاء الثلجي والمد الجليدي في البحار. كما تخسر الأنهر جليدية والقلنسوات الجليدية من حجمها مساهمةً بالتالي في إرتفاع مستوى سطح البحر. ويشهد القرن الحادي والعشرين تراجعاً للمد الجليدي في البحار على مستوى المنطقة القطبية الشمالية وأنتاركتيكا. ويساهم التأثير التفاعلي الإيجابية وإزدياد ذوبان الثلج في الطبقة العميقة من التربة الجليدية في تسريع إنخفاض الغطاء الجليدي. {١٠,٣}

إستناداً إلى المحاكاة الحالية، من المحتمل جداً أن يتباطأ الدوران التقلبي الجنوبي في المحيط الأطلسي بحلول العام ٢١٠٠. لكن، من المستبعد جداً أن يمر الدوران التقلبي الجنوبي بإنتقال واسع وسريع خلال القرن الحادي والعشرين. {١٠,٣}

مع إحترار المناخ في المستقبل، تتكرر موجات الحر وتمتد على فترات زمنية أكثر طولاً. ومن المتوقع أن ينخفض عدد أيام درجة التبريد في معظم أنحاء القطب الشمالي ومناطق خطوط العرض الوسطى، مع تزايد إطالة المواسم. وتميل فترات الصيف إلى المرور بفترات جفاف في المناطق شبه القارية، ما ينبئ بتزايد خطر حصول الجفاف في هذه المناطق. {١٠,٣ – الأسئلة ١٠,١}

وقد يميل الإحترار المستقبلي إلى تقليص قدرة المنظومة الأرض (الأرضية والبحرية) على إستيعاب ثاني أكسيد الكربون البشري المنشأ. وبنتيجة ذلك، ستبقى حصة كبيرة ومتزايدة من ثاني أكسيد الكربون البشري المنشأ في الغلاف الجوي، ضمن مناخ متزايد الإحترار. ويتطلب التأثير التفاعلي إخفاض الإنبعاثات المتراكمة، ما يتناسب مع تثبيت ثاني أكسيد الكربون في مستوى معيّن من الغلاف الجوي، مقارنةً مع فرضية عدم وجود مثل هذا التأثير التفاعلي. وكلما ارتفع سيناريو التثبيت، يرتفع التغيّر المناخي والتقلصات الضرورية. {٧,٣، ١٠,٤}

الشكوك الأساسية:

لا يمكن تقييم ترجيح حصول تغيّر سريع وواسع في الدوران التقلبي العام بعد إنتهاء القرن الحادي والعشرين. وبالنسبة إلى سيناريوهات الإنبعاثات المتوسطة والمنخفضة المترافقة مع تثبيت غازات الدفيئة في الغلاف الجوي بعد العام ٢١٠٠، يستعيد الدوران التقلبي الجنوبي نشاطه بعد فترة من التراجع، خلال قرنٍ واحد أو أكثر. ولا يمكن استبعاد حصول إنخفاض دائم لجهة الدوران التقلبي العام، إذا كان التأثير قوياً وطويلاً بما يكفي. {١٠,٧}

في ما يتعلق بظواهر الأمطار المتطرفة، تظهر تنبؤات النماذج نطاقات أوسع لجهة حجم الأمطار وأماكن تساقطها، على عكس التنبؤات الخاصة بدرجات الحرارة. {١٠,٣، ١١,١}

إن حجم التأثير التفاعلي لدورة الكربون المستقبلية لا تزال مقرونة بتغيّرات في التمثيل المكاني والزماني للظروف الحالية. {١٠,٣}

إن متانة إستجابة الأعاصير الإستوائية المذكورة في النماذج لتغيّر المناخ لا يزال محدوداً بحل نماذج المناخ. {١٠,٣}

مازال تحديد حجم التغذيات المستقبلية المرتدّة لدورة الكربون محدوداً. {٧,٣، ١٠,٤}

لا توجد معلومات كثيرة حول التغيّرات على مستوى العمليات الأساسية التي تدير بعض التغيّرات المناخية الإقليمية والعالمية (مثل النينيو والتذبذب الشمال أطلسي والحجب والتأثير التفاعلي من سطح الأرض وتوزيع الإعصار الإستوائي). {١١,٢ – ١١,٩}

الملخّص الفني ٦,٤,٤: مستوى سطح البحر

الإكتشافات الكبرى:

سيستمر مستوى سطح البحر بالإرتفاع خلال القرن الحادي والعشرين بسبب الإمتداد الحراري وخسارة الثلوج القارية من حجمها. لم يكن إرتفاع مستوى البحر موحداً من الناحية الجغرافية في الماضي ولن يكون كذلك في المستقبل. {١٠,٦}

سيستمر الإحترار الناتج عن إنبعاث غازات الدفيئة خلال القرن الحادي والعشرين بالمساهمة في إرتفاع مستوى سطح البحر على مدى قرونٍ عديدة. {١٠,٧}

سيستمر مستوى سطح البحر بالإرتفاع نتيجة خسارة الصفائح الجليدية من حجمها، وذلك على مدى مئات بل آلاف السنين، حتى إذا ثبت التأثير الإشعاعي. {١٠,٧}

الشكوك الأساسية:

حتى الآن، ما من نماذج تطرح العمليات الأساسية التي يمكن أن تساهم في التغيّرات الدينامية السريعة والواسعة النطاق في أنتاركتيكا والأغطية الجليدية في غرينلاند، ما قد يزيد من تصريف الجليد داخل المحيط. {١٠,٦}

إن حساسية توازن حجم سطح الغلاف الجليدي (الذوبان والأمطار) للتغيّر المناخي العالمي ليست مقيّدة بالملاحظات، وتعرف إنتشاراً واسعاً بين النماذج. وبالتالي، هناك حالة كبيرة من عدم اليقين حول حجم الإحترار العالمي، ما قد يؤدي إلى زوال الغلاف الجليدي في غرينلاند إذا بقي على حاله. {١٠,٧}

الملخّص الفني ٦,٤,٥: الإسقاطات الإقليمية

الإكتشافات الكبرى:

من المرجّح جداً أن ترتفع معدّلات درجات الحرارة في جميع القارات القابلة للسكن والمناطق الأرضية شبه القارية، وأن تتعدى المعدّل العالمي في الخمسين سنة الآتية، وذلك بنسبةٍ تتعدى التقلبية الطبيعية. {١٠,٣، ١١,٢ – ١١,٩}

من المرجّح أن تزداد الأمطار في معظم المناطق القطبية وشبه القطبية. ويُعتبر هذا الإزدياد قوياً للغاية. وبالنسبة إلى الأمطار السنوية، من المرجّح جداً أن يحصل الإزدياد في معظم أرجاء شمالي أوروبا وكندا وشمال شرق الولايات المتحدة والمحيط المتجمد الشمالي. أمّا بالنسبة إلى أمطار الشتاء فمن المرجّح أن يحصل الإزدياد في شمال آسيا وهضبة التيبت. {١١,٢ – ١١,٩}

من المرجّح أن تنخفض الأمطار في عددٍ من المناطق شبه الإستوائية، خاصةً في الحدود القطبية منها. ويُعتبر هذا التراجع متيناً للغاية، ومن المرجّح جداً أن يتحول إلى واقعٍ، لجهة الأمطار السنوية التي ستقلّ في المناطق الأوروبية والأفريقية التي تقع على المتوسط، ولجهة تساقط المطار في فصل الشتاء التي ستقل في جنوبي غرب أستراليا. {١١,٢ – ١١,٩}

من المرجّح أن تزداد الأمطار اليومية المتطرفة في مناطق عدة. ومن المرجّح جداً أن يعرف شمال أوروبا وجنوب آسيا وشرق آسيا وأستراليا ونيوزيلندا هذا الإزدياد. يُذكر أن هذه اللائحة تعكس التغطية الجغرافية المتفاوتة والمتوفرة في البحث. {١١,٢ – ١١,٩}

الشكوك الأساسية:

حظيت بعض المناطق بدراسة محدودة للغاية حول النواحي الأساسية من تغيّر المناخ الإقليمي، ولاسيما نظراً إلى الظواهر المتطرفة. {١١,٢– ١١,٩}

لا تظهر نماذج الدوران العام للغلاف الجوي – المحيطات أي متانة في تغيّر درجات الحرارة الإقليمي الذي خضع للمحاكاة داخل بعض المناطق الأساسية (مثل شمالي جنوب أميركا وشمال أستراليا ومنطقة الساحل). {١٠,٣ – ١١,٢ – ١١,٩}

في مناطق عدة حيث تؤدي الطبوغرافية إلى تحديد نطاقات مكانية في المناخ، هناك معلومات غير كافية عن إنعكاس تغيّر المناخ على هذه النطاقات. {١١,٢ – ١١,٩}