2

التغييرات المرصودة والمسقطة في المناخ من حيث صلتها بالماء

الجوي، المحيط المائي، الغلاف الجليدي، سطح الأرض، الغلاف الحيوي). ولهذا يؤثر تغير المناخ في الماء من خلال عدد من الآليات. ويناقش هذا الفرع إجراءات رصد التغيرات الحديثة في متغيرات لها صلة بالماء وإسقاطات التغيرات في المستقبل.

2.1 التغيرات المرصودة في المناخ من حيث صلتها بالماء

ترتبط الدورة الهيدرولوجية ارتباطاً أساسياً بالتغيرات في درجة حرارة الغلاف الجوي وتوازن الإشعاع. وقد بات احترار نظام المناخ في العقود الأخيرة أمراً لا لبس فيه، كما يتبدى الآن من رصدات الزيادات في متوسطات درجات حرارة الهواء والمحيطات على المستوى العالمي، وذوبان الثلوج والجليد على نطاق واسع وارتفاع مستوى سطح البحر على الصعيد العالمي. ويقدر صافي المؤثر الإشعاعي للمناخ البشري المنشأ بأنه إيجابي (تأثير الاحترار)، مع أفضل تقدير على أنه يبلغ $1.6Wm^{-2}$ فيما يتعلق بسنة 2005 (نسبة إلى قيم ما قبل الثورة الصناعية في عام 1750). وأفضل تقدير للاتجاه الخطي في درجة الحرارة السطحية على المستوى العالمي من سنة 1906 إلى سنة 2005 يبلغ احتراراً بمقدار 0.74° درجة مئوية (النطاق المرجّح يتراوح بين 0.56 و0.92° درجة مئوية) مع اتجاه أسرع للاحترار خلال الخمسين سنة الماضية. وتبيِّن التحليلات الجديدة معدلات احترار في المنطقتين الدنيا والوسطى من التروبوسفير مماثلة للمعدلات الموجودة على السطح. وتبيِّن دراسات العزو أن معظم الزيادة المرصودة في درجات الحرارة العالمية منذ منتصف القرن العشرين مرجّح جداً بسبب الزيادة المرصودة في تركيزات غازات الدفيئة البشرية المنشأ. وعلى النطاق القاري، من المرجّح أنه حدث احترار هام بشري المنشأ على مدى الخمسين سنة الماضية، موزعاً في المتوسط على كل قارة من القارات فيما عدا المنطقة القطبية الجنوبية. وفيما يتعلق بمناطق واسعة النطاق، أصبح حدوث أيام باردة، وليالٍ باردة وصقيع، أقل تواتراً، في حين أصبح حدوث أيام حارة وليالٍ حارة وموجات حرارية أكثر تواتراً خلال الخمسين سنة الماضية. [ملخص لصانعي السياسات WGI SPM]

ويرتبط احترار المناخ المرصود على مدى العقود العديدة الماضية بصفة مستمرة بتغيرات في عدد من مكونات الدورة الهيدرولوجية والنظم الهيدرولوجية مثل التالي: أنماط الهطول المتغيرة، وكثافته، والأحوال المتطرفة؛ ذوبان الثلوج والجليد على نطاق واسع؛ زيادة بخار الماء في الغلاف الجوي؛ زيادة التبخر؛ والتغيرات في رطوبة التربة والجريان. وتوجد تقلبية طبيعية هامة - على النطاقات الزمنية الممتدة من السنة إلى العقود، في جميع مكونات الدورة الهيدرولوجية، وهي غالباً ما تخفي اتجاهات طويلة الأجل. ولا تزال توجد درجة كبيرة من عدم اليقين في اتجاهات المتغيرات الهيدرولوجية بسبب الاختلافات الإقليمية الواسعة، وبسبب القيود المتعلقة بالتغطية المكانية والزمانية لشبكات المراقبة (Huntington، 2006). وفي الوقت الحاضر، لا يزال تسجيل المتغيرات والاتجاهات في الهطول فوق المحيطات يشكل أحد التحديات. [WGI 3.3]

ويمثّل فهم وعزو التغيرات المرصودة أيضاً أحد التحديات. ففيما يتعلق بالمتغيرات الهيدرولوجية مثل الجريان السطحي، تؤدي العوامل غير ذات الصلة بالمناخ دوراً هاماً على الصعيد المحلي (على سبيل المثال، التغيرات في الاستخراج). كما أن استجابة المناخ لعوامل التأثير تعتبر متشابكة. وعلى سبيل المثال يتمثل أثر امتصاص الأهباء (مثل الكربون الأسود) في اعتراض الحرارة في طبقة الأهباء التي لولا ذلك تصل إلى السطح، مما يدفع التبخر وما يلي ذلك من إطلاق الحرارة الكامنة فوق السطح. ومن ثم فإن امتصاص الأهباء قد يقلّل على الصعيد المحلي التبخر والهطول. وكثير من عمليات الأهباء تُحذف أو تدرج بطرق بسيطة نوعاً في نماذج المناخ. وفي بعض الحالات لا يكاد يُعرف حجم تأثيراتها على الهطول. ورغم جوانب عدم اليقين المشار إليها أعلاه، يمكن ذكر عدد من البيانات بشأن عزو تغيرات هيدرولوجية مرصودة، وهذه مشمولة في مناقشة فرادى المتغيرات في هذا الفرع، استناداً إلى التقييمات الواردة في تقرير التقييم الرابع. [الفريق العامل الثاني WGII ; 3.1, 3.2 WGI 3.3, 7.5.2, 8.2.1, 8.2.5, 9.5.4]

2.1.1 الهطول (بما في ذلك الهطول المتطرف وبخار الماء)

جرى تحليل الاتجاهات في الهطول على الأرض باستخدام عدد من مجموعات البيانات، وفي مقدمتها الشبكة العالمية للمناخات التاريخية (GHCN: Peterson and Vose, 1997) وكذلك تجربة إعادة إنشاء الهطول على الأرض (Chen وآخرون، 2002)، والمشروع العالمي لمناخيات الهطول (GPCP: Adler وآخرون، 2003) والمركز العالمي لمناخيات الهطول (GPCC) (Beck وآخرون، 2005) ووحدة البحوث المناخية (CRU GPCC: Mitchell and Jones، 2005). وقد ازداد هطول المطر على الأرض بوجه عام خلال القرن العشرين في المناطق الواقعة بين خط العرض 30° شمالاً و 85° شمالاً، بيد أنه حدثت انخفاضات ملحوظة في الماضي خلال فترة الـ 40-30 سنة الماضية في المناطق الواقعة بين خط العرض 10° جنوباً وخط العرض 30° شمالاً (الشكل 2.1). وتشير الانخفاضات في درجة الملوحة في شمال المحيط الأطلسي وجنوب خط العرض 25° جنوباً إلى وجود تغيرات مماثلة في الهطول فوق المحيط. وازداد هطول المطر في المنطقة الواقعة بين خط العرض 10° شمالاً وخط العرض 30° شمالاً بشكل ملحوظ في الفترة من 1900 إلى خمسينات القرن العشرين، بيد أنه انخفض بعد سنة 1970 تقريباً. وليست هناك اتجاهات قوية على نطاق نصف الكرة الأرضية فوق الكتل الأرضية خارج المناطق المدارية في نصف الكرة الجنوبي. وفي وقت كتابة هذا التقرير، يعتبر عزو التغيرات في هطول المطر على المستوى العالمي غير يقيني، نظراً لأن الهطول يتأثر تأثيراً قوياً بأنماط كبيرة النطاق من التقلبية الطبيعية. [WGI 3.3.2.1]

ويعتَبر الاتجاه الخطي فيما يتعلق بالمتوسط العالمي من الشبكة العالمية للمناخيات التاريخية (GHCN) خلال الفترة 1901-2005 غير هام من الناحية الإحصائية (الشكل 2.2). وليس لأي من تقديرات الاتجاهات فيما يتعلق بالفترة 1951-2005 أهمية تذكر حيث توجد تفاوتات كثيرة بين مجموعات البيانات مما يظهر صعوبة مراقبة أي كمية من كميات الهطول، التي تتسم بتقلبية كبيرة من حيث المكان والزمان. وليست التغيرات العالمية خطية من حيث الزمن، مما يبين تقلبية عقدية هامة، مع فترة مطيرة نسبياً في الفترة من الخمسينات إلى السبعينات في القرن العشرين، تلاها انخفاض في هطول المطر. ويغلب على المتوسطات العالمية هطول الأمطار في المناطق المدارية وشبه المدارية. [WGI 3.3.2.1]

وترد في الشكل 2.3 أنماط مكانية للاتجاهات في الهطول السنوي، باستخدام بيانات محطات الشبكة العالمية للمناخيات التاريخية (GHCN)

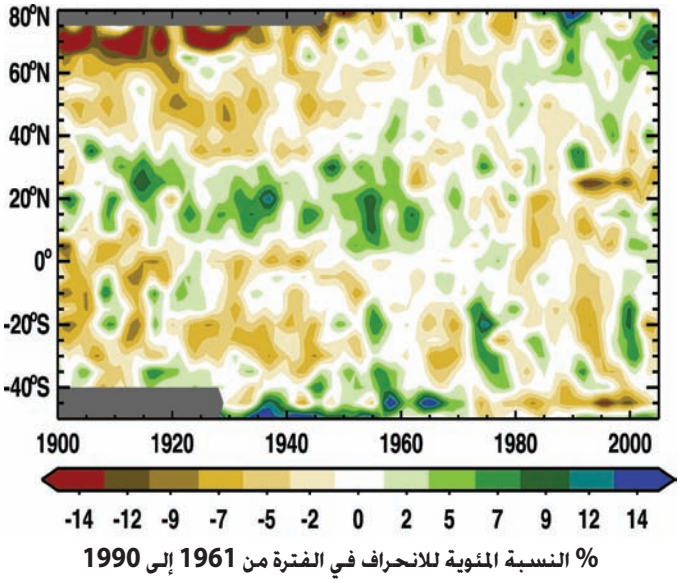
التي تُستنبَط في شكل شبكة 5x5 درجات في خط عرض/خط طول. وفوق مناطق كثيرة من أمريكا الشمالية وأوراسيا، ازداد الهطول السنوي خلال 105 سنوات ابتداء من عام 1901، وهذا يتوافق مع الشكل 2.1. وتبين الفترة منذ عام 1979 نمطاً أكثر تعقيداً، مع وجود منطقة جافة إقليمية (على سبيل المثال جنوب غرب أمريكا الشمالية). ويبين عدد الأطر الشبكية فوق معظم أوراسيا وجود زيادات في الهطول أكبر من العدد الذي يبين أوجه نقصان، فيما يتعلق بالفترتين معاً. وهناك اتجاه لتغيرات عكسية بين المنطقة الشمالية من أوروبا والبحر الأبيض المتوسط، ترتبط بتغييرات في الاتصال اللاسلكي الخاص بتذبذب شمال المحيط الأطلسي (انظر أيضا الفرع 2.1.7). [WGI 3.3.2.2]

وفي ربوع أمريكا الجنوبية رُصدت حالات مطيرة بشكل متزايد فوق حوض نهر الأمازون وجنوب شرق أمريكا الجنوبية، بما في ذلك باتاغونيا، في حين رُصدت اتجاهات سلبية في الهطول السنوي فوق شيلي وأجزاء من الساحل الغربي من القارة. وتشير التغيرات فوق منطقة الأمازون، في أمريكا الوسطى والمناطق الغربية من أمريكا الشمالية إلى حدوث تغييرات في معالم الموسميات في خطوط العرض. [WGI 3.3.2.2]

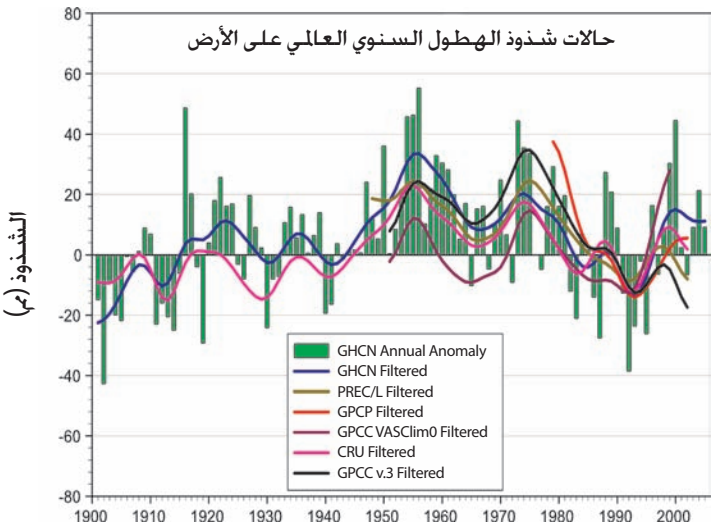
وتلاحَظ أكبر الاتجاهات السلبية منذ سنة 1901 في الهطول السنوي فوق المناطق الغربية من أفريقيا وفي منطقة الساحل (انظر أيضاً الفرع 5.1)، رغم أن هناك اتجاهات نزولية في كثير من البقاع الأخرى في أفريقيا وفي جنوب آسيا. ومنذ سنة 1979، ازداد هطول المطر في منطقة الساحل وفي بقاع أخرى من أفريقيا يتصل إلى حدٍ ما بتغيرات ترتبط بأنماط التوصيلات عن بعد (انظر أيضاً الفرع 2.1.7). وفوق كثير من المناطق شمال غرب الهند تبيِّن الفترة الممتدة من 1901 إلى 2005 زيادات تربو على 20%لكل قرن، بيد أن نفس المنطقة تظهر انخفاضاً كبيراً في الهطول السنوي منذ سنة 1979. وتظهر مناطق شمال غرب أستراليا مساحات تتسم بزيادات معتدلة إلى قوية في الهطول السنوي أو على مدى الفترتين. وقد أصبحت الأحوال أكثر رطوبة في شمال غرب أستراليا، بيد أن هناك اتجاهاً نزولياً ملحوظاً في المنطقة القصوى من جنوب شرق البلد، وهي تتسم بتحول نزولي حوالي سنة 1975. [WGI 3.3.2.2]

ويشير عدد من دراسات النماذج إلى أن التغييرات في التأثير الإشعاعي (من مصادر مشتركة بشرية المنشأ وبركانية وشمسية)، قد لعبت دوراً في الاتجاهات المرصودة فيما يتعلق بمتوسط هطول المطر. لكن يبدو أن نماذج المناخ تقلل من قيمة التغير في متوسط هطول المطر على الأرض بالمقارنة مع تقديرات الرصد. وليس من الواضح ما إذا كان هذا التفاوت ناجماً عن استجابة أقل مما يجب للتأثير بالموجات القصيرة، ونقص في تقدير التقلبية المناخية الداخلية، وأخطاء كامنة في الرصدات، أو بعض هذه العوامل مجتمعة. وتشير الاعتبارات النظرية إلى أنه قد يكون من الصعب اكتشاف تأثير غازات الدفيئة المتزايدة على متوسط هطول المطر. [WGI 9.5.4]

وقد لوحظت زيادات على نطاق واسع في ظواهر الهطول الغزير (على سبيل المثال فوق نسبة 95 مئين)، حتى في الأماكن التي تناقصت فيها المقادير الإجمالية. وهذه الزيادات مرتبطة بزيادة بخار الماء في الغلاف الجوي وهي تتوافق مع الاحترار المرصود (الشكل 2.4). ومع ذلك تسيطر

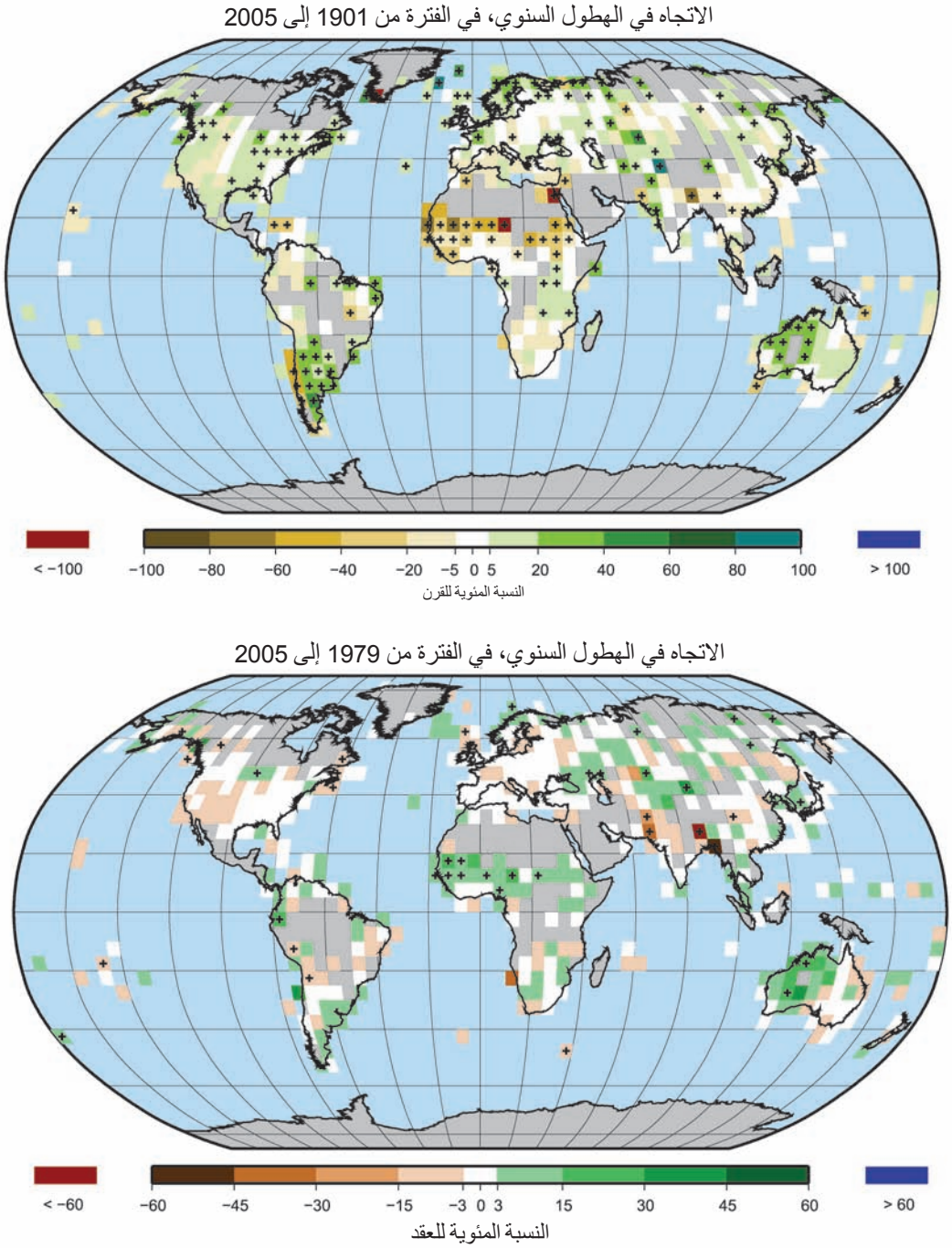


الشكل 2.1: *مقطع خط العرض - الزمن لمتوسط حالات الشذوذ السنوية فيما يتعلق بهطول المطر (%) على الأرض من سنة 1900 إلى سنة 2005، بالنسبة إلى متوسطاتها في الفترة 1961-1990. وقسِّمت القيم إلى متوسطات على جميع خطوط الطول وجرت تسويتها بمرشح لإزالة التقلبات التي تقل عن مدة 6 سنوات تقريباً. والمقياس اللوني غير خطي وتشير المناطق الرمادية إلى بيانات ناقصة. [WGI Figure 3.15]*



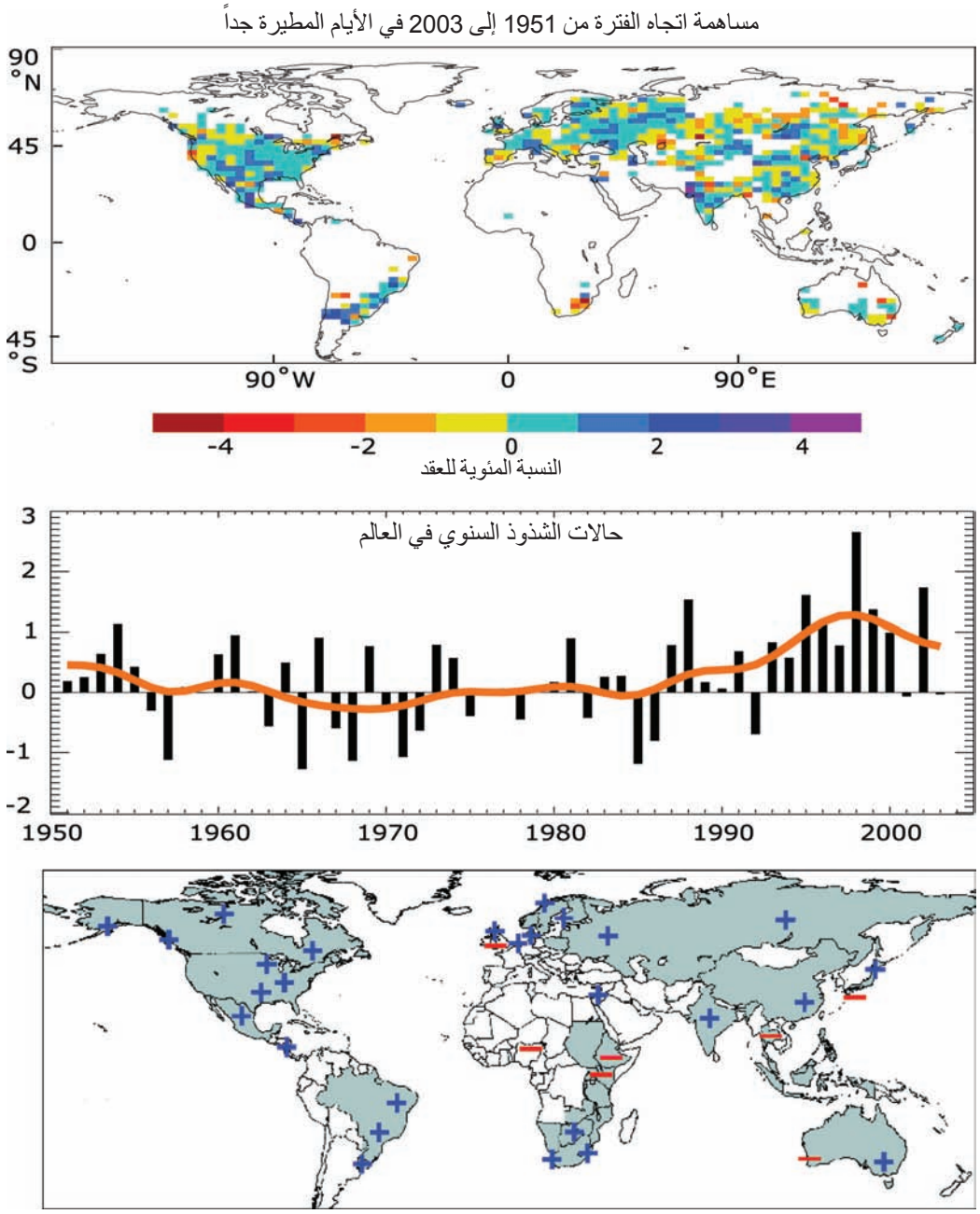
الشكل 2.2: *السلاسل الزمنية فيما يتعلق بالفترة من سنة 1900 إلى سنة 2005 الخاصة بحالات شذوذ الهطول السنوي العالمي على الأرض (مم) من الشبكة العالمية للمناخيات التاريخية (GHCN) فيما يتعلق بفترة الأساس 1981-2000. وترد قيم النطاقات العقدية التي جرت تسويتها أيضاً فيما يتعلق بمجموعات بيانات الشبكة العالمية للمناخيات التاريخية (CHCN) وتجربة إعادة إنشاء الهطول على الأرض (PREC/L) والمشروع العالمي لمناخيات الهطول (GPCP) والمركز العالمي لمناخيات الهطول (GPCC) ووحدة البحوث المناخية (CRU). [WGI Figure 3.12]*

على إحصاءات سقوط الأمطار تغيرات على نطاقات ما بين السنوات إلى نطاقات العقود، وتتسم تقديرات الاتجاهات بأنها غير متماسكة مكانياً (على سبيل المثال Peterson وآخرون، 2002؛ Griffiths وآخرون، 2003؛ Herath وRatnayake، 2004). وزيادة على ذلك لا توجد سوى بضع مناطق بها سلاسل من البيانات تتسم بالنوعية والطول بما يكفي لتقييم الاتجاهات في الأحوال المتطرفة بشكل موثوق. ومن الناحية



الشكل 2.3: *اتجاه كميات الهطول السنوي، في الفترة من 1901 إلى 2005 (في الأعلى، النسبة المئوية للقرن) وفي الفترة من 1979 إلى 2005 (في الأسفل، النسبة المئوية للعقد)، كنسبة مئوية للمتوسط في الفترة 1961 - 1990، من بيانات محطة الشبكة العالمية للمناخيات التاريخية (GHCN). والمناطق الرمادية بها بيانات كافية لاستنتاج اتجاهات موثوقة. [WGI Figure 3.13]*

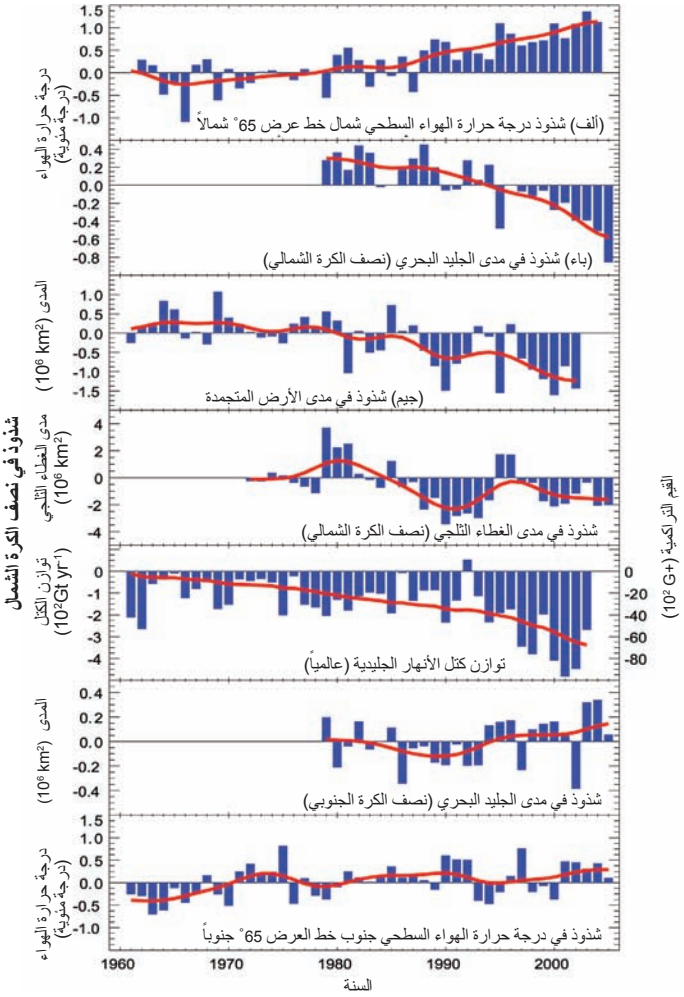
الإحصائية، لوحظ حدوث زيادات هامة في هطول غزير فوق أوروبا وأمريكا الشمالية (Klein Tank and Können، 2003؛ Kunkel وآخرون؛ 2003 Groisman وآخرون 2004؛ Haylock وGoodess، 2004). ويختلف الطابع الموسمي للتغيرات وفقاً للمكان: فالزيادات كانت في أقوى شكل لها في الفصل الدافئ في الولايات المتحدة الأمريكية، في حين كانت التغييرات في أوروبا ملحوظة للغاية في الفصل البارد (Groisman وآخرون، 2004؛ Haylock وGoodess، 2004). ويرد في الفرع 5 مزيد من بحث التغيرات الإقليمية. [WGI 3.8.2.2] وتشير دراسات النماذج النظرية والنماذج المناخية إلى أنه في حالة وجود مناخ آخذ في الاحترار بسبب زيادة غازات الدفيئة، من المتوقع حدوث زيادة أكبر في الهطول المتطرف، بالنسبة إلى المتوسط. ومن ثم، فإن التأثير البشري المنشأ قد يكون من الأيسر اكتشافه في حالة الهطول المتطرف أكثر مما هو في حالة الهطول المتوسط. ويرجع هذا إلى أن الهطول المتطرف يتحكم فيه توافر بخار الماء، في حين أن الهطول



الشكل 2.4: *تبين اللوحة الواردة أعلى الصفحة الاتجاهات المرصودة (النسبة المئوية للعقد) في الفترة 1951-2003 فيما يتعلق بالمساهمة في إجمالي الهطول السنوي للأيام المطيرة جداً (نسبة مئوية تبلغ 95 وأكثر). وتبين اللوحة الوسطى، المتعلقة بالهطول السنوي العالمي، التغير في مساهمة الأيام المطيرة جداً في الإجمالي (نسبة مئوية مقارنة بالمتوسط البالغ 22.5 في المائة في الفترة 1961 - 1990) (وفقاً لما ذكره Alexander وآخرون، 2006). وتبين اللوحة الواردة في الأسفل مناطق سجلت بها تغيرات مختلة التناسب في الهطول الغزير والغزير جداً إما كزيادة (+) أو نقصان (-) بالمقارنة مع التغير في الهطول السنوي و/أو الهطول الفصلي (معلومات محدّثة من Groisman وآخرون، 2005). [الشكل WGI 3.39]*

المتوسط تتحكم فيه قدرة الغلاف الجوي على إشعاع طاقة من الموجات الطويلة (تنطلق كحرارة كامنة بسبب التكيّف) إلى الفضاء، وهذه الأخيرة تتحكم فيها غازات الدفيئة المتزايدة. فإذا ما نُظر إلى هذه العوامل مجتمعة فإن الدراسات المتأتية من الرصدات ومن النمذجة تؤدي إلى نتيجة شاملة مفادها أن الزيادة في تواتر ظواهر الهطول الغزير (أو في نسبة إجمالي سقوط الأمطار من الهطول الغزير) من المرجّح أنها حدثت فوق معظم المساحات الأرضية خلال القرن العشرين الماضي، وهذا الاتجاه من المرجَّح جداً أن يشمل مساهمة بشرية المنشأ. ولا يمكن تقدير حجم هذه المساهمة في هذه المرحلة. [WGI SPM, 9.5.4, 10.3.6, FAQ10.1]

وقد رُصدت أدلة تشير إلى حدوث زيادة في نشاط الأعاصير المدارية الشديدة في شمال المحيط الأطلسي منذ حوالي 1970 ترتبط بزيادات في درجات حرارة سطح البحر في المناطق المدارية. وثمة إشارات أيضاً إلى حدوث نشاط متزايد من الأعاصير المدارية الشديدة في بعض المناطق الأخرى، بيد أنه تزداد الشواغل في هذه المناطق إزاء نوعية البيانات. وتعمل التقلبية خلال العقود المتعددة ونوعية السجلات الخاصة بالأعاصير المدارية قبل رصدات السواتل الروتينية حوالي سنة 1970 على تعقيد اكتشاف الاتجاهات



الشكل 2.5: *السلاسل الزمنية للشذوذ (الابتعاد عن المتوسط طويل الأجل) لدرجة حرارة الهواء السطحي في المنطقة القطبية (ألف وهاء)، مدى الأراضي المتجمدة فصلياً في نصف الكرة الشمالي (باء)، مدى الغطاء الثلجي في نصف الكرة الشمالي للفترة من آذار/مارس إلى نيسان/أبريل (جيم)، توازن كتل الأنهار الجليدية في العالم (دال). ويشير الخط الأحمر المتواصل في دال إلى توازن الكتل العالمي التراكمي للأنهار الجليدية؛ وخلافاً لذلك، فإنه يمثل السلاسل الزمنية المُسوَّاة [مواءمة من WGI FAQ 4.1]*

الطويلة الأجل في نشاط الأعاصير المدارية. ولا يوجد اتجاه واضح في الأعداد السنوية للأعاصير المدارية. وقد ساهمت العوامل البشرية المنشأ ذات أرجحية الوقوع أكبر من أرجحية عدمه في زيادات مرصودة في نشاط الأعاصير المدارية الشديدة. ومع ذلك، فإن الزيادة الظاهرة في نسبة العواصف الشديدة جداً منذ سنة 1970 في بعض المناطق تعتبر أكبر مما تحاكيه النماذج الحالية فيما يتعلق بتلك الفترة. [WGI SPM]

ورُصِد ازدياد محتوى بخار الماء في التروبوسفير في العقود الأخيرة، وهو مع ما رُصد من احترار ورطوبة نسبية شبه ثابتة. وازداد مجموع عامود بخار الماء فوق المحيطات العالمية بمقدار 0.3 ± 1.2 في المائة لكل عقد خلال الفترة من 1988 إلى 2004، وذلك في نمط يتوافق مع التغيرات الحادثة في درجة حرارة سطح البحر. وتبيِّن دراسات كثيرة حدوث زيادات في رطوبة الغلاف الجوي قرب سطح الأرض، بيد أن هناك في هذا الصدد اختلافات إقليمية، واختلافات بين النهار والليل. وكما هو الحال في عناصر أخرى من الدورة الهيدرولوجية، فإن الاختلافات في النطاقات فيما بين السنوات إلى النطاقات العقدية تعتبر كبيرة، بيد أنه لوحظ اتجاه صاعد هام فوق المحيطات العالمية وفوق بعض مناطق اليابسة في نصف الكرة الشمالي. ونظراً لأن الاحترار المرصود لحرارة سطح البحر من المرجّح أن يكون بشري المنشأ إلى حدٍ كبير، فإن هذا يشير إلى أن تأثير ما يفعله الإنسان قد ساهم فيما يُرصد من زيادة في بخار الماء في الغلاف الجوي فوق المحيطات. ومع ذلك، لا تتوافر حتى وقت كتابة تقرير التقييم الرابع دراسة رسمية تبيِّن أسباب ذلك. [WGI 3.4.2, 9.5.4]

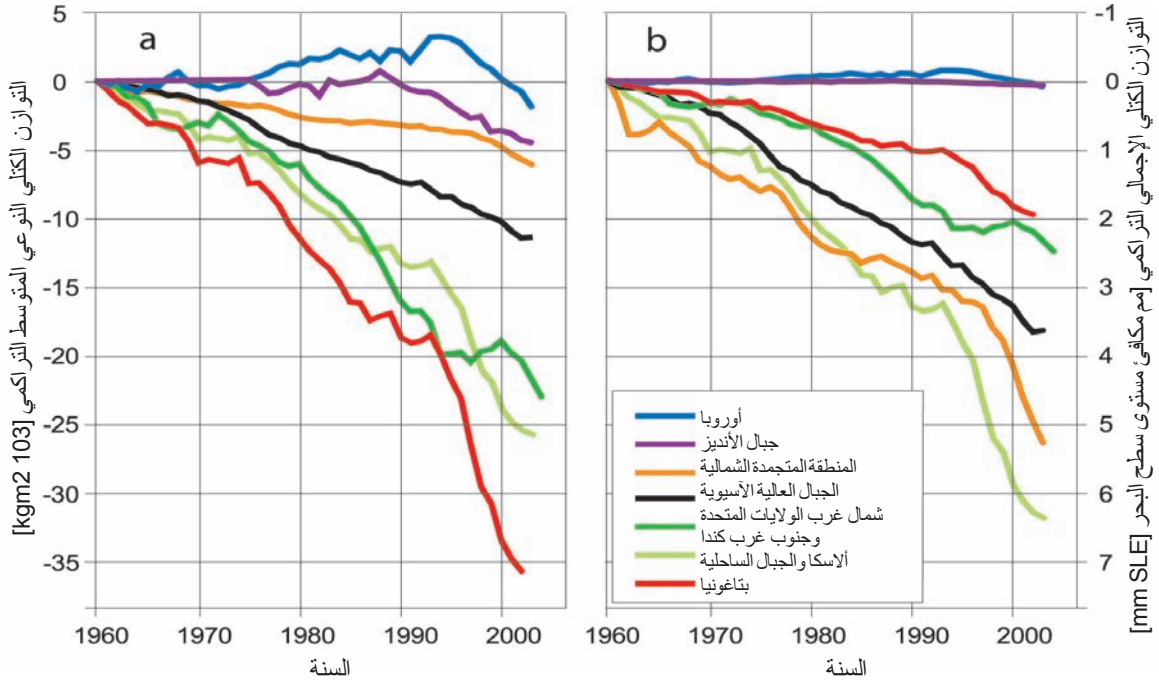
2.1.2 الثلوج والجليد الأرضي

يختزن الغلاف الجليدي (وهو يتألف من الثلوج والجليد والأرض المتجمدة) على سطح الأرض حوالي 75% من المياه العذبة في العالم. ويرتبط الغلاف الجليدي وتغيراته في نظام المناخ ارتباطاً دقيقاً بميزانية طاقة سطح الأرض، ودورة المياه والتغير في مستوى سطح البحر. ويعيش أكثر من سدس سكان العالم في أحواض الأنهار الجليدية أو أحواض أنهار تغذيها الثلوج الذائبة (شتيرن، 2007). [WGII 3.4.1] ويبيِّن الشكل 2.5 اتجاهات الغلاف الجليدي، ويظهر أوجه نقصان هامة في تخزين الجليد في كثير من المكوّنات. [WGI، الفصل 4]

2.1.2.1 الغطاء الثلجي، الأرض المتجمدة، جليد البحيرات والأنهار

تناقص الغطاء الثلجي في معظم المناطق، وخصوصاً في فصلي الربيع والصيف. ونقص الغطاء الثلجي الذي رصدته السواتل في نصف الكرة الشمالي شهرياً خلال الفترة 1966-2005 فيما عدا شهري تشرين الثاني/نوفمبر وكانون الأول/ديسمبر، مع انخفاض من حيث الدرجة بنسبة 5 في المائة في المتوسط السنوي في أواخر الثمانينات من القرن الماضي. أما الانخفاضات في الجبال الواقعة في غربي أمريكا الشمالية وفي جبال الألب السويسرية فقد كانت هي الأكبر في المرتفعات المنخفضة. ويبيّن معظم العدد القليل من السجلات الطويلة أو بدائلها المتاحة إما حدوث نقصانات أو لا تغيير خلال السنوات الأربعين أو يزيد الماضية في نصف الكرة الأرضية الجنوبي. [WGI 4.2.2]

ويؤدي تآكل التربة الصقيعية والأرض المتجمدة فصلياً إلى تغييرات في خصائص سطح الأرض ونُظم الصرف. وتشمل الأرض المتجمدة فصلياً نوباناً فصلياً للجليد على التربة في مناطق غير مغطاة بتربة صقيعية، وعلى الطبقة الناشطة فوق التربة الصقيعية التي تذوب في الصيف وتتجمد في الشتاء. وقد انخفض النطاق الأقصى المقدّر للأرض المتجمدة فصلياً في مناطق غير التربة الصقيعية بحوالي 7 في المائة في نصف الكرة الشمالي في الفترة من 1901 إلى 2002، مع نقصان بنسبة 15 في المائة في الربيع. وقد انخفض العمق الأقصى لذلك بحوالي 0.3 م في أوراسيا منذ منتصف القرن العشرين استجابة لاحترار في الشتاء وزيادات في عمق الثلوج. وخلال الفترة من 1956 إلى 1990، أظهرت الطبقة الناشطة التي جرى قياسها في 31 محطة في روسيا زيادة هامة في العمق من الناحية الإحصائية بحوالي 21 سنتيمتراً. كما أن السجلات من مناطق أخرى تعتبر قصيرة للغاية على نحو لا يتيح تحليل الاتجاهات. وقد ازدادت درجة الحرارة في قمة طبقة التربة الصقيعية بحوالي 3° درجات مئوية منذ الثمانينات في المنطقة المتجمدة الشمالية أركتيكا. ويبدو أن احترار التربة الصقيعية وتآكل الأرض المتجمدة هما نتيجة ازدياد درجات حرارة الهواء في الصيف والتغيرات في عمق الغطاء الثلجي ومدة بقائه. [WGI 4.7، الفصل 9]



الشكل 2.6: توازنات الكتل النوعية المتوسطة التراكمية (a) وتوازنات الكتل الإجمالية التراكمية (b) للأنهار الجليدية والقلنسوات الجليدية محسوبة بالنسبة لمناطق واسعة (Dyurgerov and Meier, 2005). وتوازن كتل النهر الجليدي هو حاصل جمع جميع مكاسب وخسائر الكتلة أثناء سنة هيدرولوجية. وتوازن الكتل النوعي المتوسط هو مجموع توازن الكتل مقسوماً على مجموع مساحة السطوح لجميع الأنهار الجليدية والقلنسوات الجليدية لمنطقة ما، ويبين هذا قوة التغيير في المنطقة المعنية. ويعرض توازن الكتل الإجمالي باعتباره الإسهام من كل منطقة في ارتفاع مستوى سطح البحر. [WGI 4.5.2، الشكل 4.15]

وتبيِّن مواعيد التجمد والتبدُّد فيما يتعلق بجليد الأنهار والبحيرات تقلبية مكانية كبيرة. فالبيانات المتاحة في المتوسط فيما يتعلق بنصف الكرة الشمالي على مدى السنوات الـ 150 الماضية، تشير إلى تأخر موعد التجمد بمعدل 5.8±1.6 يوماً لكل قرن، في حين حدث تاريخ تكسر الجليد في وقت أبكر بمعدل 6.5±1.2 يوماً في كل قرن. وهناك بيانات منشورة غير كافية بشأن سُمك جليد الأنهار والبحيرات بحيث لا تسمح بتقييم الاتجاهات. وتبيِّن دراسات النمذجة (على سبيل المثال Duguay وآخرون، 2003) أن كثيراً من التقلبية في السُمك الأقصى للجليد وتكسره تحركه اختلافات في سقوط الثلوج. [WGI 4.3]

2.1.2.2 *الأنهار الجليدية والقلنسوات الجليدية*

تبيِّن الأنهار الجليدية والقلنسوات الجليدية في نصف الكرة الشمالي وفي بتاغونيا في المتوسط زيادة معتدلة وبالأحرى ثابتة في تحوُّل الكتل خلال نصف القرن الماضي، وتزايد الذوبان بدرجة كبيرة. [WGI 4.5.2, 4.6.2.2.1] ونتيجة لذلك، حدث فقدان كبير في الكتلة في غالبية الأنهار الجليدية والقلنسوات الجليدية على نطاق العالم (الشكل 2.6) مع حدوث معدلات متزايدة وكان الفقدان: من الفترة 61/1960 إلى الفترة 90/1989 يبلغ 136±57 (0.37± Gt/yr 0.16mm/yr في تكافؤ سطح البحر. وبلغ بين الفترتين 1991/1990، 2004/2003 0.22 ±0.77) 79Gt/yr ±280 في تكافؤ مستوى سطح البحر). ويبدو أن التقلص الواسع النطاق في القرن العشرين ينطوي على احترار واسع النطاق باعتباره السبب الرئيسي، وإن كان يمكن للتغيرات في رطوبة الغلاف الجوي في المناطق المدارية أن تسهم في ذلك. وهناك دلائل تشير إلى أنه من المرجَّح جداً أن هذا الذوبان ساهم فيما رُصد من ارتفاع مستوى سطح البحر [الجدول WGI 4.5, 4.4, 9.5]

ويحدث تكوّن البحيرات عندما تتراجع ألسنة الأنهار الجليدية من الركام الجليدي للعصر الجليدي الصغير في كثير من السلاسل الجبلية المنحدرة، بما في ذلك جبال الهيمالايا وجبال الأنديز وجبال الألب. وتكمن في هذه البحيرات إمكانية عالية لحدوث فيضانات مفاجئة للبحيرات الجليدية. [WGII 1.3.1.1، الجدول 1.2]

2.1.3 مستوى سطح البحر

أخذ يرتفع مستوى سطح البحر في متوسطه العالمي وهناك ثقة عالية بأن معدل الارتفاع قد ازداد بين منتصف القرن التاسع عشر ومنتصف القرن العشرين. وكان المعدل المتوسط هو 1.7±0.5 مم/سنوياً فيما يتعلق بالقرن العشرين، و1.8±0.5 مم/سنوياً فيما يتعلق بالفترة 1961-2003، و 3.1±0.7 مم/سنوياً فيما يتعلق بالفترة 1993-2003. وليس من المعروف ما إذا كان المعدل الأكثر ارتفاعاً في الفترة 1993-2003 يرجع إلى تقلبية عقدية أو إلى زيادة في الاتجاه الأطول أجلاً. ومن الناحية المكانية، فإن التغير يعتَبر غير موحّد، على سبيل المثال، خلال الفترة من 1993 إلى 2003، زادت المعدلات في بعض المناطق إلى عدة أضعاف المتوسط العالمي للارتفاع في حين هبطت مستويات سطح البحر في مناطق أخرى. [WGI 5.ES]

وهناك أوجه عدم يقين في التقديرات الخاصة بالإسهامات في تغير

مستوى سطح البحر في الأجل الطويل. وفيما يتعلق بالفترة 1993-2003، كانت الإسهامات من التوسّع الحراري تبلغ (1.6±0.5 مم/سنوياً)، وفقدان الكتل من الأنهار الجليدية والقلنسوات الجليدية يبلغ (0.77±0.22 مم/سنوياً) وفقدان الكتل من غرينلاند يبلغ (0.21±0.07 مم/سنوياً)، والمنطقة المتجمدة الشمالية يبلغ (0.21±0.35 مم/سنوياً)، وبلغ مجمل الصفائح الجليدية ما مقداره (2.8±0.7مم/سنوياً)، وفيما يتعلق بهذه الفترة، يعتبر حاصل هذه الإسهامات المناخية متوافقاً مع ما يرصد بشكل مباشر من ارتفاع في مستوى سطح البحر الوارد أعلاه، في إطار أوجه عدم اليقين المرصودة. وفيما يتعلق بالفترة الأطول 1961-2003 يقدر حاصل جمع الإسهامات المناخية بأنه أصغر من مجموع الارتفاع المرصود في مستوى سطح البحر؛ بيد أن نظام الرصد كان أقل موثوقية قبل عام 1993. وفيما يتعلق بالفترتين، فإن الإسهامات المقدّرة من التوسّع الحراري ومن الأنهار الجليدية/القلنسوات الجليدية تعتبر أكبر بكثير من الإسهامات من الصفائح الجليدية في غرينلاند والمنطقة المتجمدة الجنوبية. والخطوط الكبيرة الدالة على الخطأ فيما يتعلق بالمنطقة المتجمدة الجنوبية تعني أنه من غير اليقيني ما إذا كانت المنطقة المتجمدة الجنوبية قد ساهمت إيجابياً أو سلبياً في مستوى سطح البحر، فالزيادات في مستوى سطح البحر تتفق مع الاحترار، وتشير دراسات النمذجة إلى أنه من المرجّح جداً بوجه عام أن الاستجابة لتأثير ما بشري المنشأ ساهم في ارتفاع مستوى سطح البحر أثناء النصف الثاني من القرن العشرين؛ ومع ذلك فإن أوجه عدم اليقين المرصودة مصحوبة بالافتقار إلى دراسات مناسبة، تعني أنه من الصعب وضع تحديد كمي للإسهام البشري المنشأ. [WGI SPM, 5.5, 9.5.2]

ومن المحتمل أن يؤثر ارتفاع مستوى سطح البحر في المناطق الساحلية، بيد أن أسباب ذلك ليست واضحة دائماً. فالزيادات العالمية في المستويات المت طرفة للمياه العالية منذ 1975 ترتبط بمتوسط ارتفاع مستوى سطح البحر وبتقلبية المناخ الواسعة النطاق فيما بين العقود (Woodworth و WGII 1.3.3] .(Blackman، 2004).

2.1.4 التبخر - النتح

توجد قياسات مباشرة محدودة جداً للتبخر - النتح الفعلي فوق المناطق البرية على نطاق العالم، في حين تعتبر نواتج التحليل[10] العالمي حساسة لنوع التحليل ويمكن أن تحتوي على أخطاء كبيرة، ومن ثم فهي ليست مناسبة لتحليل الاتجاهات. ولهذا، توجد مؤلفات قليلة بشأن الاتجاهات المرصودة في عملية التبخر - النتح سواء كانت فعلية أو محتملة. [WGI 3.3.3]

2.1.4.1 التبخر في حوض مسطّح

توجد اتجاهات متناقصة أثناء العقود الأخيرة في سجلات متناثرة عن التبخر في أحواض مسطحة (يقاس التبخر من سطح مائي مفتوح في حوض مسطح، أو بديل من أجل قياس التبخر - النتح المحتمل) فوق الولايات المتحدة الأمريكية (Peterson وآخرون، 1995؛ Golubev وآخرون، 2001؛ Hobbins وآخرون، 2004)، الهند (Chattopadhyay وHulme، 1997)، وأستراليا (Roderick و Farquhar ، 2004) نيوزيلندا (Roderick وFarquhar ، 2005)، الصين (Liu وآخرون، 2004؛ Qian وآخرون، 2006b) وتايلند (Tebakari وآخرون، 2005). ولا تمثّل القياسات من الأحواض المسطحة التبخر الفعلي (Brutsaert وParlange، 1998) ويمكن أن تتسبب الاتجاهات بإشعاع شمسي سطحي متناقص (فوق الولايات المتحدة الأمريكية وأجزاء من أوروبا وروسيا) وتناقص فترة إشعاع الشمس فوق الصين التي يمكن أن تتصل بزيادات في تلوث الهواء والأهباء في الغلاف الجوي وزيادات في غطاء السحب. [WGI 3.3.3، الشكل 3.2]

2.1.4.2 التبخر - النتح الفعلي

ذكر تقرير التقييم الثالث أن التبخر - النتح الفعلي ازداد أثناء النصف الثاني من القرن العشرين فوق معظم المناطق الجافة في الولايات المتحدة الأمريكية وروسيا (Golubev وآخرون، 2001)، ونتج هذا عن زيادة توافر الرطوبة السطحية بسبب تزايد هطول المطر وتزايد الطلب على رطوبة الغلاف الجوي بسبب ارتفاع درجة الحرارة. وباستخدام رصدات هطول المطر، ودرجة الحرارة، والإشعاع الشمسي السطحي المستند إلى درجة التغيم ونموذج شامل لسطح الأرض. ووجد Qian وآخرون (2006a) أن التبخر - النتح الأرضي العالمي يتبع بشكل دقيق التغيرات في هطول المطر على الأرض. وقد بلغت قيم الهطول العالمي الذروة في أوائل السبعينات من القرن الماضي ثم انخفضت نوعاً ما، بيد أن هذا يعكس القيم المدارية أساساً وقد ازداد هطول المطر بشكل أعم فوق الأرض في مناطق خطوط العرض العليا. وتتوقف التغيرات في عملية التبخر - النتح ليس فقط على ما يوجد من الرطوبة، بل تتوقف أيضاً على توافر الطاقة والرياح السطحية. [WGI 3.3.3]

وثمة عوامل أخرى تؤثر على التبخر - النتح الفعلي تشمل الآثار المباشرة لإخصاب ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي على فيزيولوجيا النباتات. أما المؤلفات الصادرة بشأن هذه الآثار المباشرة، فيما يتعلق بالاتجاهات المرصودة لعملية التبخر - النتح فلا وجود لها وإن كانت الآثار قد شوهدت على الجريان السطحي. [WGI 9.5.4]

وتتوقف المقادير السنوية لعملية التبخر - النتح، إلى حدٍ ما، على طول موسم النمو. ويعرض تقرير التقييم الرابع دلائل تشير إلى زيادات مرصودة في طول موسم النمو. وترتبط هذه الزيادات، بحدوث الصقيع في وقت أبكر من الربيع السابق وفي وقت متأخر عن مواعيد نشوء الصقيع في الخريف، وتبدو هذه الظاهرة واضحة في المناطق المعتدلة المناخ في أوراسيا (Moonen وآخرون، 2002؛ وMenzel وآخرون، 2003؛ Genovese وآخرون، 2005؛ Semenov وآخرون، 2006) وفي جزء كبير من أمريكا الشمالية (Robeson، 2002؛ Feng وHu، 2004). [WGII 1.3.6.1]

[10] تشير نواتج التحليل إلى تقديرات لتغيرات المناخ في الماضي ناجمة عن تمثل طائفة من الرصدات في نموذج للتنبؤ بالطقس أو المناخ، بنفس الطريقة التي يُضطلع بها روتينيا للبدء في تنبؤات الطقس اليومية. وبسبب تطور نظم التحليل/التنبؤ التطبيقي بالطقس بمرور الزمن، جرى الاضطلاع بعدد من تمرينات «إعادة التحليل» وفيها يجري تمثل الرصدات المتوافرة في نظام وحيد، بحيث تمنع أي قفزات أو اتجاهات كاذبة بسبب التغيرات في النظام الأساسي. وثمة ميزة لنظم التحليل وهي أنها تنتج مجالات عالمية تشمل كثيراً من الكميات التي لا تُرصد بشكل مباشر. ومن المساوئ المحتملة هو أن جميع المجالات تعتبر مزيجاً من الرصدات والنماذج، وفيما يتعلق بالمناطق/المتغيرات التي توجد لها بضع رصدات، فإن كثيراً منها يمثل إلى حدٍ كبير مناخيات النموذج الأساسي.

2.1.5 رطوبة التربة

لا تتوافر سجلات تاريخية للمحتوى من رطوبة التربة الذي جرى قياسه في الموقع سوى لمناطق قليلة وغالباً ما تكون مدتها قصيرة جداً. [WGII 3.3.4] ومن بين ما يزيد على 600 محطة من طائفة متنوعة كبيرة من المناخات، حدد Robock وآخرون (2000) اتجاهاً متزايداً طويل الأجل في المحتوى السطحي من رطوبة التربة (في الجزء العلوي 1م) في المحتوى من رطوبة التربة أثناء الصيف فيما يتعلق بالمحطات ذات السجلات الأطول، ومعظمها يقع في الاتحاد السوفياتي السابق، والصين والمناطق الوسطى من الولايات المتحدة الأمريكية. وتظهر السجلات الأطول المتوافرة من أوكرانيا زيادات إجمالية في رطوبة التربة السطحية، وإن كانت الزيادات أقل وضوحاً في العقود الأخيرة (Robock وآخرون، 2005). وكان النهج الأوّلي لتقدير رطوبة التربة يتمثل في احتساب قيم مؤشر بالمر لقياس شدة الجفاف (PDSI) من كميات الهطول ودرجات الحرارة المرصودة. وترد مناقشة للتغيرات في مؤشر بالمر (PDSI) في الفرع 3.1.2.4. [WGI الإطار 3.1، 3.3.4]

2.1.6 الجريان وتصريف الأنهار

بحث عدد كبير من الدراسات الاتجاهات المحتملة في قياسات تصريف الأنهار أثناء القرن العشرين، على نطاقات تتراوح بين مستجمعات المياه والنطاق العالمي. وقد اكتشف بعض الدراسات وجود اتجاهات هامة في بعض مؤشرات التدفق، وأظهر بعضها وجود صلات هامة من الناحية الإحصائية مع الاتجاهات في درجة الحرارة أو هطول المطر. بيد أن دراسات كثيرة لم تجد اتجاهات أو كانت غير قادرة على أن تفصل مسار التغيرات في درجة الحرارة والهطول من تأثيرات التدخلات البشرية في مستجمعات المياه. فالمنهجية المستخدمة للبحث عن اتجاهات يمكن أن تؤثّر أيضاً في النتائج. وعلى سبيل المثال، يمكن لاختبارات إحصائية مختلفة أن تعطي مؤشرات مختلفة ذات دلالة؛ فالفترات المختلفة للتسجيل (وخصوصاً تواريخ البداية والنهاية) يمكن أن تشير إلى معدلات مختلفة للتغيير؛ وعدم السماح بوجود علاقة متبادلة شاملة بين مستجمعات المياه يمكن أن تؤدي إلى الإفراط في تقدير أعداد مستجمعات المياه مما يبيّن حدوث تغيير كبير. وهناك قيد آخر في تحليل الاتجاهات يتمثل في توافر البيانات المتناسقة، والتي تخضع لعامل الجودة. ولا تغطي سجلات قياس تدفقات المجاري المائية سوى ثلثي المنطقة البرية التي جرى تصريف المياه منها بشكل ناشط على المستوى العالمي، وهي غالباً ما تتضمن ثغرات وتختلف في طول السجلات (Dai و Trenberth، 2002). وأخيراً فإن التدخلات البشرية أثّرت في نظم التدفقات في كثير من مستجمعات المياه. [WGI 3.3.4, 9.1, 9.5.1; WGII 1.3.2]

وعلى النطاق العالمي، هناك دليل يشير إلى وجود إطار متماسك بشكل عام للتغيير في الجريان السنوي، مع بعض المناطق التي تشهد زيادة في الجريان (على سبيل المثال مناطق خطوط العرض العليا وأجزاء كبيرة من الولايات المتحدة الأمريكية) ومناطق أخرى مثل (أجزاء من غرب أفريقيا، والمناطق الجنوبية من أوروبا، وأقصى الجنوب في أمريكا الجنوبية)، حيث تشهد نقصاناً في الجريان (Milly وآخرون، 2005، ودراسات كثيرة على نطاق المستجمعات). وهذه التغيرات في الجريان من سنة إلى أخرى تتأثر أيضاً في كثير من بقاع العالم بسبب أنماط مناخية كبيرة النطاق ترتبط على سبيل المثال بظاهرة النينيو/التذبذب الجنوبي، وتذبذب شمال المحيط الأطلسي ونمط شمال أمريكا - المحيط الهادئ . وادعت دراسة (اضطلع بها Labat وآخرون، 2004) حدوث زيادة بنسبة 4% في مجموع الجريان العالمي لكل ارتفاع في درجة الحرارة يبلغ درجة مئوية واحدة أثناء القرن العشرين.[11] مع تغيرات إقليمية حول هذا الاتجاه، بيد أن الجدل حول هذا الإستنتاج (Labat وآخرون، 2004؛ Legates وآخرون، 2005) ركّز على آثار الدوافع غير المناخية على الجريان، وأثر عدد صغير من نقاط البيانات على النتائج. وعزا Gedney وآخرون (2006) الزيادات واسعة النطاق في الجريان أثناء القرن العشرين إلى حد كبير إلى كبح عملية التبخر - النتح من خلال زيادة تركزات ثاني أكسيد الكربون (التي تؤثر على القدرة على توصيل التيار الكهربائي من خلال الفتحات الصغيرة)، على الرغم من صعوبة العثور على أدلة أخرى لمثل هذه العلاقة، ويعرض الفرع 2.1.4 أدلة تشير إلى حدوث زيادة في عملية التبخر - النتح [WGII 1.3.2]

وليست الاتجاهات في الجريان متوافقة دائماً مع التغيرات في هطول المطر. وهذا قد يرجع إلى قيود في البيانات (خصوصاً تغطية بيانات الهطول)، وأثر تدخلات الإنسان مثل حجز المياه في الخزانات (كما هو الحال في الأنهار الرئيسية في أوراسيا)، أو الآثار المنافسة للتغيرات في الهطول ودرجة الحرارة (كما هو الحال في السويد: انظر Lindstrom و Bergstrom، 2004).

وتوجد مع ذلك، أدلة أقوى وأوسع نطاقاً بكثير تشير إلى أن توقيت تدفقات الأنهار في كثير من المناطق حيث يتساقط الهطول في الشتاء على هيئة ثلوج قد تغير بدرجة كبيرة. فارتفاع درجات الحرارة يعني أن نسبة أكبر من كميات الأمطار الهاطلة أثناء الشتاء تهطل كمطر وليس كثلج، كما يبدأ فصل ذوبان الجليد في وقت أبكر. وموعد مياه الثلوج الذائبة في بقاع من نيوانغلند قد تقدم بمقدار أسبوع إلى أسبوعين في الفترة من 1936 و 2000 (Hodgkins وآخرون، 2003)، رغم أن هذا له تأثير لا يكاد يُذكر على تدفقات الصيف (Hodgkins وآخرون، 2005). [WGII 1.3.2]

2.1.7 أنماط التقلبية واسعة النطاق

ينطوي نظام المناخ على عدد من الأنماط المميزة للتقلبية التي لها تأثير مباشر على عناصر الدورة الهيدرولوجية. وقد تتباين المناخات الإقليمية خارج الطور، بسبب فعل هذه الروابط عن بُعد. فهذه الروابط غالباً ما تكون مرتبطة بحالات جفاف وفيضانات، وبتغيرات أخرى لها تأثيرات هامة على البشر. وترد أدناه استعراض موجز للأنماط الرئيسية للروابط عن بُعد. وترد مناقشة كاملة حول هذا الموضوع في الفرع 3.6 من تقرير التقييم الرابع الذي وضعه الفريق العامل الأول.

[11] على التوالي ENSO = النينيو - التذبذب الجنوبي، NAO = تذبذب شمال المحيط الأطلسي، PNA = نمط شمال أمريكا – المحيط الهادئ، انظر الفرع 2.1.7 والمسرد من أجل مزيد من التوضيح.

وأي رابطة عن بعد يحددها إطار مكاني وسلاسل زمنية تصف التغيرات في حجمها وطورها. ويمكن تحديد الأنماط المكانية على شبكة منقطة أو بمؤشرات استناداً إلى الرصدات التي تجريها المحطات. وعلى سبيل المثال، يستند مؤشر التذبذب الجنوبي (SOI) فحسب إلى اختلافات في متوسط حالات شذوذ الضغط عند سطح البحر بين تاهيتي (شرقي المحيط الهادئ) وداروين (غربي المحيط الهادئ)، بيد أنه يستحوذ على كثير من تقلبية دوران واسع النطاق في الغلاف الجوي في جميع أنحاء المناطق المدارية في المحيط الهادئ. وتميل أنماط الروابط عن بُعد إلى الظهور بشكل أبرز من غيره في فصل الشتاء (خصوصاً في نصف الكرة الشمالي)، عندما يكون متوسط الدوران في أقوى درجاته. وتختلف قوة الروابط عن بُعد، والطريقة التي تؤثر بها على مناخ السطح أيضاً على مدى نطاقات زمنية طويلة. [WGI 3.6.1]

ويبين مؤشر التذبذب الجنوبي (SOI) مكون الغلاف الجوي الخاص بظاهرة النينيو/التذبذب الجنوبي (ENSO)، وهو أهم أسلوب للتقلبية الدولية للغلاف العالمي. ولظاهرة النينيو/التذبذب الجنوبي تأثيرات عالمية على دوران الغلاف الجوي، وعلى هطول المطر ودرجة الحرارة (Trenberth و Caron، 2000). وترتبط ظاهرة النينيو/التذبذب الجنوبي بتحول من الشرق إلى الغرب في هطول المطر في المناطق المدارية في المحيط الهادئ، وترتبط بتغيير في مناطق التلاقي المدارية الأساسية. كما ترتبط ظاهرة النينيو/التذبذب الجنوبي باضطرابات تموجية في دوران الغلاف الجوي خارج المناطق المدارية، مثل نمط شمال أمريكا - المحيط الهادئ، ونمط المحيط الهادئ – أمريكا الجنوبية، الذي توجد به تأثيرات مناخية إقليمية رئيسية. وتتباين قوة وتواتر ظواهر النينيو/التذبذب الجنوبي على نطاق العقود، بالارتباط مع التذبذب العقدي في المحيط الهادئ، والمعروف أيضاً بأنه التذبذب ما بين العقود في المحيط الهادئ، والذي يغير متوسط حالة درجات الحرارة السطحية في المحيطات ودوران الغلاف الجوي في المناطق المدارية على نطاقات زمنية لعشرين سنة أو أطول من ذلك. وقد ارتبط تغير المناخ في الفترة 1977/1976 (Trenberth، 1990) مع التغيرات في تطور ظاهرة النينيو (Trenberth و Stepaniak، 2001) والميل نحو وجود هذه الظاهرة على فترات أطول وأقوى. وحتى الآن لا يوجد تغير قابل للكشف رسمياً في تقلبية التذبذب الجنوبي/النينيو في الرصدات. [WGI 3.6.2,3.6.3]

وفي خارج المناطق المدارية، تهيمن على التقلبية في الدوران في الغلاف الجوي على نطاقات زمنية تبلغ شهراً أو أطول، تغيرات في قوة وأماكن التيارات المتدفقة وما يرتبط بها من مسارات العواصف، التي تتسم بالنمط الحلقي الشمالي (NAM) والنمط الحلقي الجنوبي (SAM)، على التوالي: Quadrelli و Wallace، 2004؛ Trenberth وآخـرون، 2005). ويتصل النمط الحلقي الشمالي اتصالاً وثيقاً بالتذبذب في شمال المحيط الأطلسي (NAO)، رغم أن هذا الأخير يرتبط ارتباطاً شديداً في معظمه بمسار عواصف المحيط الأطلسي وبالتغيرات في المناخ فوق أوروبا. ويتسم التذبذب في شمال المحيط الأطلسي بحالات شذوذ في الضغط خارج الطور بين خطوط العرض المعتدلة وخطوط العرض العليا فوق قطاع المحيط الأطلسي. ويترك التذبذب في شمال المحيط الأطلسي أهم تأثير له في الشتاء عندما يظهر طوره الإيجابي (السلبي) أثراً معززاً (متناقصاً) في نظام ضغط أيسلندا المنخفض وفي قطاع ضغط جزر الأزور المرتفع (Hurrell وآخرون، 2003). وللنمط الحلقي الشمالي (NAM) المترابط بدقة، نسق مماثل فوق المحيط الأطلسي، بيد أنه متناسب من ناحية خطوط الطول. وللتذبذب في شمال المحيط الأطلسي (NAO) تأثير قوي على درجات الحرارة السطحية في وقت الشتاء فوق كثير من بقاع نصف الكرة الشمالي، وعلى شدة العصف وهطول المطر فوق أوروبا وشمال أفريقيا، مع تزحزح نحو القطب في هطول المطر في الطور الإيجابي، وتزحزح نحو خط الاستواء في الطور السلبي. وتوجد أدلة تشير إلى حدوث فترات أطول في الطور الإيجابي والسلبي للتذبذب في شمال المحيط الأطلسي (NAO) أثناء القرون القليلة الماضية (Cook وآخرون، 2002؛ Jones وآخرون، 2003a). وفي فصل الشتاء، حدث انعكاس من القيم الدنيا للمؤشر في أواخر الستينيات من القرن العشرين إلى قيم إيجابية بقوة بالنسبة لمؤشر التذبذب في شمال المحيط الأطلسي في منتصف التسعينات. ومنذ ذلك الحين، انخفضت قيم التذبذب في شمال المحيط الأطلسي إلى ما يقرب من متوسطها الطويل الأجل. وتشير دراسات العزو الخاصة بأسباب التغير إلى أن الاتجاه خلال العقود الأخيرة في النمط الحلقي الشمالي (NAM) من المرجح أن يرتبط في جزء منه بالنشاط البشري. ومع ذلك، فإن الاستجابة للتأثير الطبيعي والتأثير البشري المنشأ الذي تجري محاكاته بنماذج مناخية، تعتبر أصغر من الاتجاه المرصود. [WGI 3.6.4,9.ES].

ويرتبط النمط الحلقي الجنوبي (SAM) بتغيرات متزامنة في الضغط في علامة عكسية في خطوط العرض الوسطي والعليا، مما يعكس تغيرات في الحزام الأساسي للرياح الغربية في المنطقة شبه القطبية. وتحدث عواصف غربية معززة في المحيط الجنوبي في الطور الإيجابي من النمط الحلقي الجنوبي (SAM) الذي أصبح أكثر شيوعاً في العقود الأخيرة، مما أدى إلى حدوث مزيد من الأعاصير في المناطق المحيطة بالقطب (Sinclair وآخرون، 1997)، وزحزحة نحو القطب في هطول المطر، وإسهام أكبر في الهطول في المنطقة المتجمدة الجنوبية (Noone وSimmonds، 2002). ويؤثر النمط الحلقي الجنوبي أيضاً في الأنماط المكانية لتقلبية هطول المطر في المنطقة المتجمدة الجنوبية (Genthon وآخرون، 2003) والمناطق الجنوبية من أمريكا الجنوبية (Silvestri و Vera، 2003). وتشير نماذج المحاكاه إلى أن الاتجاه الأخير في النمط الحلقي الجنوبي تأثر بزيادة تركز غازات الدفيئة، ولا سيما بنضوب أوزون الستراتوسفير. [WGI 3.6.5,9.5.3.3]

وتُظهر درجات حرارة سطح البحر SSTs في شمال المحيط الأطلسي اختلافاً خلال سبعين سنة أثناء استخدام فترة الأدوات (وفي عمليات إعادة البناء غير المباشرة). المسماة التذبذب متعدد العقود في المحيط الأطلسي (AMO: Kerr، 2000). وحدثت مرحلة دافئة خلال الفترة 1930-1960 وفترات باردة فيما بين 1905 و1925 وفيما بين 1970 و1990) Schlesinger وRamankutty، 1994). ويبدو أن التذبذب المتعدد العقود في المحيط الأطلسي قد عاد إلى مرحلة دافئة ابتداءً من منتصف التسعينات. وقد يرتبط هذا التذبذب بتغيرات في قوة الـدوران الحراري الملحي (Delworth وMann، 2000؛ Latif، 2001؛ وSutton وHodson، 2003؛ Knight وآخرون، 2005). وقد ارتبط هذا التذبذب أيضاً بحالات

شذوذ متعددة السنوات في هطول المطر فوق أمريكا الشمالية ويبدو أنه يغيِّر في الصلات عن بُعد الخاصة بظاهرة النينيو/التذبذب الجنوبي (Enfield وآخرون، 2001؛ McCabe وآخرون، 2004؛ Shabbar و Skinner، 2004) ويؤدي أيضاً دوراً في تكون الأعاصير المدارية فوق المحيط الأطلسي (Goldenberg وآخرون، 2001). ويعتقد أن التذبذب متعدد العقود في المحيط الأطلسي (AMO) من دوافع التغيرات متعددة العقود فيما يتعلق بالجفاف في منطقة الساحل، والهطول في منطقة البحر الكاريبي، والمناخ الصيفي في كل من أمريكا الشمالية وأوروبا، وتركز الجليد البحري في بحر غرينلاند، وضغط مستوى سطح البحر فوق المناطق الجنوبية من الولايات المتحدة الأمريكية، وشمال المحيط الأطلسي والمناطق الجنوبية من أوروبا (على سبيل المثال، Venegas و Mysak، 2000؛ Goldenberg وآخرون، 2001؛ Sutton وHodson، 2005؛ Trenberth و Shea، 2006). [WGI 3.6.6]

2.2 التأثيرات والتأثيرات التفاعلية للتغيرات الهيدرولوجية على المناخ

رُصدت بعض العلاقات المترابطة القوية بين درجة الحرارة والهطول في كثير من المناطق. ويقدم هذا دليلاً على أن العمليات التي تتحكم في الدورة الهيدرولوجية ودرجة الحرارة متقارنة بشكل وثيق. وعلى نطاق عالمي، تعمل التغيرات في بخار الماء والسحب والجليد على تغير ميزان إشعاع الأرض ومن ثم تؤدي دوراً رئيساً في تحديد استجابة المناخ لتزايد غازات الدفيئة. والأثر العالمي لهذه العمليات على استجابة درجات الحرارة يناقش في الفرع 8.6 في تقرير التقييم الرابع الذي أعده الفريق العامل الأول. ونناقش في هذا الفرع، بعض العمليات التي من خلالها يمكن للتغيرات في المتغيرات الهيدرولوجية أن تنتج آثاراً تفاعلية على المناخ الإقليمي، أو في ميزانية الغلاف الجوي من غازات الدفيئة الرئيسية. والهدف من هذا الفرع ليس إجراء مناقشة شاملة لهذه العمليات، بل توضيح التقارن الدقيق للعمليات الهيدرولوجية مع بقية نظام المناخ. [WGI 3.3.5، الفصل 7، و8.6]

2.2.1 تأثيرات سطح الأرض

تعكس أرصدة المياه السطحية مدى توافر الماء والطاقة على السواء. وفي المناطق التي يرتفع فيها معدل توافر المياه، تتحكم في عملية التبخر – النتح خواص كل من طبقة حدود الغلاف الجوي والغطاء النباتي السطحي. ويمكن أن تحدث التغيرات في رصيد المياه السطحية تأثيراً تفاعلياً مع نظام المناخ بإعادة تدوير الماء في الطبقة الحدودية (بدلاً من السماح لها بأن تجري أو تخترق مستويات التربة العميقة). وتعتبر علامة وحجم هذه الآثار في كثير من الأحيان متغيرة جداً، ويتوقف ذلك على تفاصيل البيئة المحلية. ومن ثم فقد تصبح عمليات التأثير التفاعلي هذه في بعض الأحيان، رغم كونها صغيرة نسبياً على نطاق عالمي، هامة للغاية في نطاقات مكانية أو زمنية أصغر، بحيث تؤدي إلى تغيرات إقليمية/محلية في التقلبية أو الأحوال الجوية المتطرفة. [WGI 7.2]

وتصور هذا التعقيد تأثيرات إزالة الغابات على المناخ. وتشير بعض الدراسات إلى أن إزالة الغابات يمكن أن تؤدي إلى انخفاض درجات الحرارة وقت النهار وزيادات في سحب الطبقة الحدودية كنتيجة لازدياد البياض، وعملية التبخر- النتح، وفقدان الحرارة الكامنة. ومع ذلك، فإن هذه التأثيرات تتوقف على خصائص كل من استبدال الغطاء النباتي وسطح الارتكاز من التربة/الثلوج، وقد اقترحت في بعض الحالات تأثيرات مضادة. وتعتبر آثار إزالة الغابات على هطول المطر معقدة أيضاً حيث وجدت آثار سلبية وإيجابية أيضاً، ويتوقف ذلك على الصفات المميزة لسطح التربة والغطاء النباتي. [WGI 7.2, 7.5]

وأشار عدد من الدراسات إلى أن وجود الغطاء النباتي، في المناطق شبه القاحلة من مثل منطقة الساحل يمكن أن يُحسِّن الأحوال المتعلقة بنموه وذلك بإعادة تدوير مياه التربة في الغلاف الجوي، حيث يمكن أن تتكثف لتهطل مرة أخرى. ويمكن أن تنجم عن هذا إمكانية نشوء توازنات متعددة في هذه المناطق، إما بهطول المطر ووجود الغطاء النباتي أو بدونهما، كما أنه يشير إلى إمكانية حدوث فترات انتقال فجائية في النظام، كما حدث في التغير من الحقبة الهولوسينية إلى الظروف الحديثة. [WGI الفصل 6، 7.2]

وتعتبر رطوبة التربة مصدراً للكمون الحراري بسبب طاقتها الحرارية والحرارة الكامنة المطلوبة للتبخر. ولهذا السبب، أشير إلى رطوبة التربة باعتبارها عنصر تحكم هام، على سبيل المثال في درجة حرارة الصيف وهطول المطر. وتعتبر التأثيرات التفاعلية بين رطوبة التربة وهطول المطر ودرجات الحرارة هامة بصفة خاصة في مناطق الانتقال ما بين المناطق الجافة والرطبة، بيد أن قوة التقارن بين رطوبة التربة وهطول المطر تتباين بنسبة تقريبية عشرية بين مختلف نماذج المناخ، وليست التقييدات الخاصة بالرصد متاحة حالياً لتضييق فجوة عدم اليقين هذه. [WGI 7.2, 8.2]

وينشأ عنصر آخر للتحكم في هطول المطر من خلال إغلاق المسام الصغيرة استجابة لتزايد تركيزات ثاني أكسيد الكربون. وبالإضافة إلى اتجاه هذا التأثير إلى زيادة الجريان من خلال إحداث نقصان واسع النطاق في مجموع عملية التبخر/النتح (الفرع 2.3.4)، فإنه يمكن أن يؤدي إلى انخفاضات كبيرة في هطول المطر في بعض المناطق. [WGI 7.2]

وتترك التغيرات في الغطاء الثلجي نتيجة للاحترار على المستوى الإقليمي تأثيرها التفاعلي على درجة الحرارة من خلال التغيرات في البياض. وفي حين يختلف حجم هذا التأثير التفاعلي بدرجة كبيرة بين النماذج، تشير الدراسات الحديثة إلى أن معدل ذوبان الثلوج في الربيع قد يوفر تقديرات جيدة ملحوظة لقوة هذا التأثير التفاعلي، مما يتيح إمكانية خفض عدم اليقين في التنبؤات المستقبلية بالتغير في درجة الحرارة في المناطق التي تغطيها الثلوج. [WGI 8.6]

2.2.2 التأثيرات التفاعلية عن طريق التغيرات في دوران المحيطات

يعمل تزويد المحيطات بالمياه العذبة على تغيير الملوحة، ومن ثم كثافة ماء البحر. وبالتالي يمكن أن تعمل التغييرات الحادثة في الدورة الهيدرولوجية على تغيير دوران المحيطات المدفوع بفعل الكثافة («الدفع الحراري الملحي») وبعد ذلك يحدث التأثير التفاعلي على المناخ. وثمة مثال على ذلك وهو الدوران الانقلابي الجنوبي (MOC) في شمال المحيط الأطلسي. ولهذا الدوران تأثير هام على درجة

الحرارة السطحية، وعلى هطول المطر ومستوى البحر في المناطق حول شمال المحيط الأطلسي وما وراءها. ومن المقدَّر أن يضعف الدوران الانقلابي الجنوبي أثناء القرن الحادي والعشرين، ويعتبر هذا الضعف هاماً في تخفيف استجابة التغير الإجمالي للمناخ. وبوجه عام، من المتوقع أن يحدث ضعف في الدوران الانقلابي الجنوبي لتخفيف معدل الاحترار في خطوط العرض الوسطى الشمالية، بيد أن بعض الدراسات تشير إلى أن ذلك سوف يسفر عن معدل متزايد للاحترار في المنطقة المتجمدة الشمالية. وهذه الاستجابات سوف تؤثر تفاعلياً مرة أخرى على هطول المطر على نطاق واسع في مناطق خطوط العرض الاستوائية وخطوط العرض الوسطى في المحيط الأطلسي. وفي حين يكون الدافع الأكبر في ضعف الدوران الانقلابي الجنوبي هو احترار السطح (وليس عملية التجدد) في مناطق مصادر المياه العميقة، تلعب التغيرات الهيدرولوجية دوراً هاماً، ويعتبر عدم اليقين في التغذية بالمياه العذبة إسهاماً هاماً في الانتشار الواسع النطاق بين النماذج في الإسقاطات الخاصة باستجابة الدوران الانقلابي الجنوبي. وتشير التغيرات المرصودة في ملوحة المحيطات خلال العقود الأخيرة إلى حدوث تغييرات في التغذية بالمياه العذبة. وفي حين تبين عمليات إدماج جميع العناصر تقريباً في نموذج الدوران العام ما بين الغلاف الجوي والمحيطات نوعاً من الضعف في الدوران الانقلابي الجنوبي في القرن الحادي والعشرين، لا تبين أية عناصر نوعاً من الانتقال المفاجئ إلى حالة مختلفة. ويعتبر حدوث مثل هذه الظاهرة غير مرجح جداً في القرن الحادي والعشرين، بيد أنه من غير الممكن تقدير أرجحية هذه الظواهر في الأجل الأطول. [WGI 10.3.4]

وقد جرت بشكل واضح في الإسقاطات المناخية الراهنة نمذجة التغييرات في هطول المطر والتبخر والجريان وتأثيرها على الدوران الانقلابي الجنوبي. ومع ذلك، تشمل بضعة نماذج مناخية تمثيلاً مفصلاً للتغيرات في توازن كتل الصفائح الجليدية في غرينلاند والمنطقة المتجمدة الجنوبية، وهو ما يمثل مصدراً إضافياً ممكناً للمياه العذبة الموجهة إلى المحيط. وتشمل الدراسات القليلة المتاحة حتى الآن نمذجة تفصيلية للتغذية بالمياه العذبة من غرينلاند لا تشير إلى أن هذا المصدر الإضافي سوف يغيِّر الاستنتاجات العريضة المعروضة أعلاه. [WGI 5.2, 8.7, 10.3، الإطار 10.1]

2.2.3 الانبعاثات والبالوعات المتأثرة بالعمليات الهيدرولوجية أو التأثيرات التفاعلية الكيميائية الحيوية الأرضية

يمكن للتغييرات في الدورة الهيدرولوجية أن تؤدي إلى تغذية مرتدة للمناخ من خلال التغييرات في ميزانيات الغلاف الجوي من ثاني أكسيد الكربون، والميثان والأنواع الكيميائية الأخرى الناشطة إشعاعياً، والتي غالباً ما ينظمها الغلاف الحيوي. وتعتبر العمليات المشاركة في هذا معقدة؛ على سبيل المثال، فإن استجابة تنفس التربة متباين التغذية، وهو مصدر لثاني أكسيد الكربون الذي يؤدي إلى تزايد درجة الحرارة تعتمد بقوة على مقدار رطوبة التربة. وقد ساعد وجود جيل جديد من النماذج المناخية، تستجيب فيه دورة الغطاء النباتي والكربون لتغير المناخ، على تقصي بعض هذه العمليات لأول مرة. وتشير جميع النماذج إلى أن هناك تأثيرات تفاعلية إيجابية لتغير المناخ على دورة الكربون العالمية، مما يسفر عن نسبة أكبر من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون البشرية المنشأ الباقية في الغلاف الجوي في مناخ أدفأ. ومع ذلك، فإن حجم التغذية المرتدة الإجمالية يتباين بدرجة كبيرة بين النماذج؛ وتعتبر التغيرات في صافي الإنتاجية الرئيسية الأرضية غير يقينية بصفة خاصة، مما يعكس السبب وراء الانتشار في الإسقاطات المتعلقة بتغير هطول المطر على المستوى الإقليمي. [WGI 7.3]

ويوجد عدد من المصادر والبالوعات الخاصة بالميثان يعتبر حساساً للتغير الهيدرولوجي، على سبيل المثال، الأراضي الرطبة، والأرض الصقيعية، و(مصادر) زراعة الأرز، وتأكسد التربة (البالوعة). وهناك أنواع كيميائية ناشطة مثل الأوزون وقد تبيَّن أنها حساسة للمناخ، ومرة أخرى كما هو معهود من خلال آليات كيميائية حيوية أرضية معقدة. وتعتبر ميزانيات الأهباء في الغلاف الجوي حساسة بشكل مباشر لهطول المطر (على سبيل المثال من خلال إغراق مصادر التراب الأرضي، وأهمية الترسُّب السائل كبالوعة) والتأثير التفاعلي للأهباء على هطول المطر من خلال العمل كنويات للتكثُّف، وبالتالي التأثير على كفاءة السحب فيما يتعلق بهطول المطر. ويبقى حجم هذه التأثيرات التفاعلية غير يقيني، وهي مدرجة بشكل عام بطرق بسيطة فحسب في الجيل الحالي من النماذج المناخية. [WGI 7.4]

2.3 التغييرات المسقطة في المناخ من حيث صلتها بالماء

حدث تقدُّم كبير في الإسقاطات المتعلقة بتغير المناخ، بالمقارنة بتلك الإسقاطات التي كانت موضع النظر في إطار تقرير التقييم الثالث، وهي تتمثل في وجود عدد كبير من المحاكاة المتاحة من نطاق أعرض من نماذج المناخ، ويجرى استغلالها لمختلف أغراض سيناريوهات الانبعاثات. وتشير إسقاطات أفضل التقديرات من النماذج إلى أن المتوسط العقدي للاحترار على كل قارة مأهولة بحلول سنة 2030 غير حساس لاختيار سيناريو التقرير الخاص عن سيناريوهات الانبعاثات الصادر عن الهيئة، ومن المرجح جداً أن يكون على الأقل ضعف الرقم (حوالي درجتين مئويتين 0.2° س كل عقد) مثل التقلبية الطبيعية المقدَّرة في النموذج المناظر خلال القرن العشرين. وسوف يُحدث استمرار انبعاثات غازات الدفيئة عند معدلاتها الحالية أو فوق هذه المعدلات في إطار السيناريوهات الخاصة بعدم التخفيف والواردة في التقرير الخاص عن سيناريوهات الانبعاثات مزيداً من الاحترار وكثيراً من التغيرات في نظام المناخ العالمي خلال القرن الحادي والعشرين، ومن المرجح جداً أن تكون هذه التغييرات أكبر من تلك المرصودة خلال القرن العشرين. وأن المتوسط العالمي المسقط لتغير درجة الحرارة فيما يتعلق بالفترة 2090-2099 بالنسبة إلى الفترة (1980-1999، في إطار السيناريوهات الإرشادية الواردة في التقرير الخاص عن سيناريوهات الانبعاثات يتراوح بين 1.8° درجة مئوية (أفضل تقدير، من المرجح أن يتراوح بين 1.1° درجة مئوية و2.9° درجة مئوية) فيما يتعلق بالسيناريو B1، و4.0° درجات مئوية (أفضل تقدير، من المرجح أن يتراوح بين 2.4°درجة مئوية إلى 6.4°درجة مئوية) فيما يتعلق بالسيناريو A1F1. وتشير التقديرات المسقطة إلى أن الاحترار سيكون في أكبر معدل له فوق اليابسة وفي معظم مناطق خطوط العرض العليا الشمالية وفي أقل معدل له فوق المحيط الجنوبي ومناطق من شمال المحيط الأطلسي. ومن المرجح جداً أن الأحوال المتطرفة الساخنة وموجات الحرارة سوف تستمر لتصبح أكثر تواتراً. [WGI ملخص لصانعي السياسات (SPM)، الفصل 10]

عدم *اليقين في الإسقاطات الهيدرولوجية*
تنشأ جوانب عدم اليقين في التغيرات المسقطة في النظام الهيدرولوجي من التقلبية الداخلية لنظام المناخ، وعدم اليقين في الانبعاثات المستقبلية لغازات الدفيئة والأهباء، وتحول هذه الانبعاثات إلى تغير مناخ بفضل نماذج المناخ العالمية، وعدم اليقين في النماذج الهيدرولوجية. وبحلول القرن الحادي والعشرين وفي إطار السيناريو A1B، تعتبر الاختلافات بين إسقاطات هطول المطر في النموذج المناخي مصدراً لعدم اليقين أكبر من التقلبية الداخلية. وهذا يدل ضمناً أيضاً على أن التغيرات في المتوسط السنوي للهطول تتجاوز في حالات كثيرة التقلبية الداخلية (المنمذجة) هذه المرة. وتصبح الإسقاطات أقل اتساقاً بين النماذج حيث يتناقص النطاق المكاني. [WGI 10.5.4.3] وفي مناطق خطوط العرض العليا وفي أجزاء من المناطق المدارية، تعرض جميع النماذج أو جميعها تقريباً زيادة في هطول المطر، في حين يتناقص الهطول في بعض المناطق شبه المدارية والمناطق المتدنية في خطوط العرض الوسطى في جميع النماذج أو جميعها تقريباً. وبين مجالات الزيادة والنقصان القوية هذه، فإنه حتى علامة تغير الهطول تكون غير متسقة في الجيل الحالي من النماذج. [WGI 10.3.2.3, 10.5.4.3] وفيما يتعلق بجوانب أخرى من الدورة الهيدرولوجية، مثل التغيرات في عملية التبخر، ورطوبة التربة والجريان، يعتبر الانتشار النسبي في الإسقاطات مماثلاً، أو أكبر من التغيرات في هطول المطر. [WGI 10.3.2.3]

وتنشأ مصادر أخرى لعدم اليقين في الإسقاطات الهيدرولوجية من هيكل النماذج المناخية الراهنة. وترد في الفرع 2.2 بعض أمثلة العمليات التي على أحسن الفروض مجرد ممثلة في النماذج المناخية. وتستبعد النماذج الراهنة بوجه عام بعض التأثيرات التفاعلية من تغير الغطاء النباتي إلى التغير المناخي. كما أن معظم، إن لم تكن كل نماذج المحاكاة المستخدمة لاستنباط إسقاطات مناخية، تستبعد أيضاً التغيرات البشرية المنشأ في غطاء الأرض. وتعتبر معالجة تأثير الأهباء البشرية المنشأ بسيطة نسبياً في معظم نماذج المناخ. وفي حين يشمل بعض النماذج طائفة عريضة من أنواع الأهباء بشرية المنشأ، وإن كان من المحتمل أنها أنواع هامة، مثل الكربون الأسود، إلا أنها ناقصة في معظم أمثلة المحاكاة المستخدمة فيما يتعلق بتقرير التقييم الرابع (انظر المناقشة لعزو أسباب التغييرات المرصودة، في الفرع 2.1). ويستبعد أكثر من نصف نماذج تقرير التقييم الرابع التأثيرات غير المباشرة للأهباء على السُحب. كما أن تحليل النماذج المناخية الراهنة يحد أيضاً من التمثيل الصحيح للأعاصير المدارية والأمطار الغزيرة. [WGI 8.2.1, 8.2.2, 8.5.2, 8.5.3, 10.2.1]

وتنشأ جوانب عدم اليقين من إدراج نتائج النماذج المناخية في الدراسات المتعلقة بالمياه العذبة لسببين: النطاقات المكانية المختلفة لنماذج المناخ العالمي والنماذج الهيدرولوجية، والانحيازات في متوسط الهطول الطويل الأجل على النحو الذي تحتسبه نماذج المناخ العالمي فيما يتعلق بالمناخ الحالي. وقد استخدم عدد من الأساليب لمعالجة الاختلافات في النطاقات، حيث تتراوح من الاستنتاج البسيط لنتائج النماذج المناخية إلى أساليب دينامية أو إحصائية في تقليص النطاقات، بيد أن جميع هذه الأساليب تنطوي على جوانب عدم يقين في الإسقاطات، وغالباً ما تعالج التحيزات في عمليات محاكاة متوسط الهطول بإضافة جوانب شذوذ منمذجة إلى الهطول المرصود بغية الحصول على مجموعة البيانات الدافعة فيما يتعلق بالنماذج الهيدرولوجية. ولهذا، فإن التغيرات في التقلبية فيما بين السنوات أو من يوم ليوم في بارامترات المناخ لا تؤخذ في الحسبان في معظم دراسات الأثر الهيدرولوجي. ويؤدي هذا إلى تقدير منقوص لما يحدث في المستقبل من فيضانات ونوبات جفاف واحتياجات من مياه الري. [WGII 3.3.1]

وتنشأ جوانب عدم يقين فيما يتعلق بتأثيرات تغير المناخ على الموارد المائية ونوبات الجفاف والفيضانات من أسباب مختلفة مثل مختلف سيناريوهات التنمية الاقتصادية وانبعاثات غازات الدفيئة، ونمذجة المناخ والنمذجة الهيدرولوجية. ومع ذلك، ليست هناك حتى الآن دراسة تقيم كيف يكون رد فعل مختلف النماذج الهيدرولوجية لنفس الإشارة الخاصة بتغير المناخ. [WGII 3.3.1] ومنذ إجراء تقرير التقييم الثالث، يؤخذ عدم اليقين الخاص بإسقاطات النماذج المناخية المتعلقة بتقييمات المياه العذبة في الاعتبار باستخدام مجموعات النماذج المتعددة. وتعتبر التقييمات الاحتمالية الرسمية شيئاً نادراً. [WGII 3.3.1, 3.4]

ورغم جوانب عدم اليقين هذه، تتوافر بعض النتائج القوية. ففي الفروع التي يرد ذكرها تالياً، تناقش جوانب عدم اليقين في التغييرات المسقطة، استناداً إلى التقييمات الواردة في تقرير التقييم الرابع.

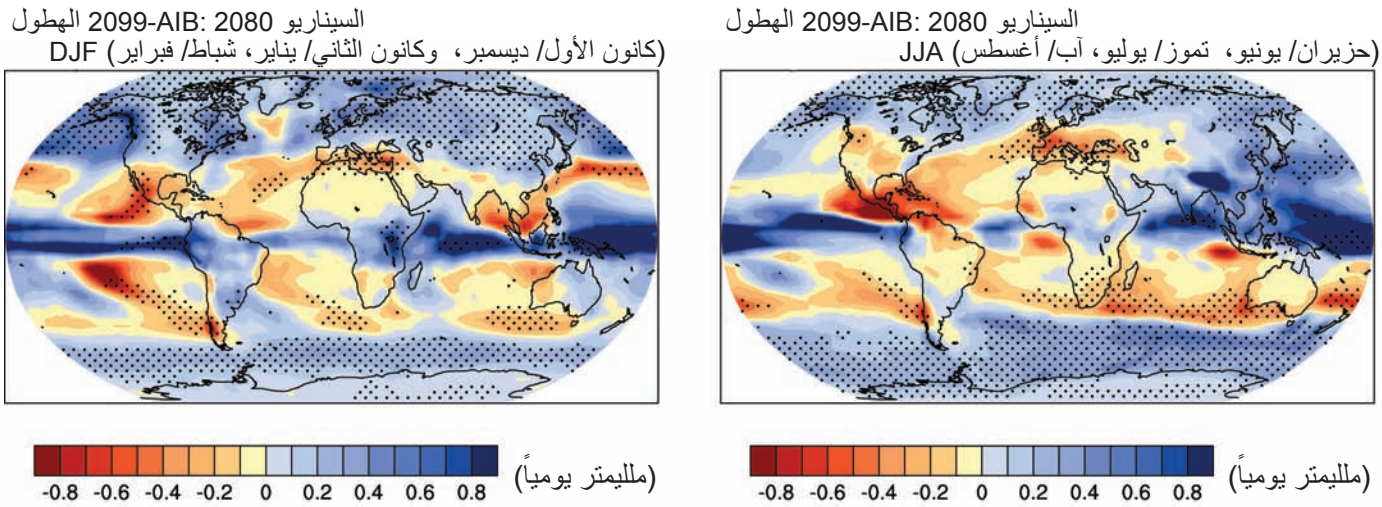
2.3.1 الهطول (بما في ذلك الأحوال الجوية المتطرفة) وبخار الماء

2.3.1.1 متوسط الهطول

تبين إسقاطات المناخ باستخدام المجموعات المتعددة النماذج زيادات في متوسط بخار الماء على الصعيد العالمي وكذلك في التبخر والهطول خلال القرن الحادي والعشرين. وتشير النماذج إلى أن الهطول يزداد بشكل عام في مناطق الهطول الأقصى الإقليمية المدارية (مثل نُظم الموسميات والمحيط الهادئ المداري بصفة خاصة) وفي مناطق خطوط العرض العليا، مع انخفاضات عامة في المناطق شبه المدارية. [WGI SPM, 10.ES,10.3.1, 10.3.2]

وتعتبر الزيادات في الهطول في مناطق خطوط العرض العليا في فصلي الشتاء والصيف متسقة بدرجة عالية عبر النماذج (انظر الشكل 2.7). وتعتبر زيادات الهطول فوق المناطق المدارية في المحيطات وفي بعض نُظم الموسميات، على سبيل المثال، الموسميات في جنوب آسيا في فصل الصيف (حزيران/يونيو إلى آب/أغسطس) والموسميات الأسترالية في الصيف (كانون الأول/ديسمبر إلى شباط/فبراير) ملحوظة، ولئن كانت غير متسقة محلياً، فإنه يتحقق اتفاق كبير على النطاق الأعرض في المناطق المدارية. وهناك انخفاضات واسعة النطاق في الهطول الصيفي في خطوط العرض الوسطى، باستثناء حدوث زيادات في شرقي آسيا. وتعتبر الانخفاضات في الهطول فوق كثير من المناطق شبه المدارية واضحة في متوسط المجموعات المتعددة النماذج، وغالباً ما يكون الاتساق في علامة التغير فيما بين النماذج عالياً – وخصوصاً في بعض المناطق مثل المناطق المدارية في أمريكا الوسطى – منطقة البحر الكاريبي ومنطقة البحر الأبيض المتوسط. [WGI 10.3.2] ويرد في الفرع 5 عرض لمزيد من مناقشة التغيرات الإقليمية.

ويعرض الشكل 2.8 التوزيع العالمي للتغير الحادث في الفترة 2080-2099 في متوسط الهطول السنوي فيما يتعلق بالسيناريو A1B الوارد في التقرير الخاص عن سيناريوهات الانبعاثات إلى جانب بعض الكميات الهيدرولوجية الأخرى المتأتية من مجموعة تضم 15 نموذجاً.



الشكل 2.7: *متوسط التغيرات في خمسة عشر نموذجاً للهطول (الوحدة مم/يومياً (mm/day) في كانون الأول/ ديسمبر وكانون الثاني/ يناير وشباط/ فبراير DJF (إلى اليسار) وفي حزيران/ يونيو وتموز/ يوليو وآب/ أغسطس JJA (إلى اليمين). وتعرض هنا التغييرات فيما يتعلق بالسيناريو AIB الوارد في التقرير الخاص عن سيناريوهات الانبعاثات (SRES)، فيما يتعلق بالفترة 2080-2099 بالنسبة إلى الفترة 1980-1999. ويشير النقش بالنقط إلى مناطق يتجاوز فيها حجم متوسط مجموعات النماذج المتعددة الانحراف المعياري فيما بين النماذج. [WGI الشكل 10.9]*

وتحدث زيادات في الهطول السنوي تتجاوز نسبة 20 في المائة في معظم خطوط العرض العليا، وكذلك في المنطقة الشرقية من أفريقيا، والجزء الشمالي من آسيا الوسطى والمنطقة الاستوائية في المحيط الهادئ. وتحدث انخفاضات هامة تبلغ 20 في المائة في منطقة البحر الأبيض المتوسط ومنطقة البحر الكاريبي وفي السواحل الغربية شبه المدارية في كل قارة. وعموماً، يبلغ الهطول فوق الأرض زيادات تصل إلى 5 في المائة في حين يزداد الهطول فوق المحيطات بنسبة 4 في المائة. ويمثل صافي التغير فوق الأرض نسبة 24 في المائة من متوسط الزيادة العالمية في الهطول. [WGI 10.3.2]

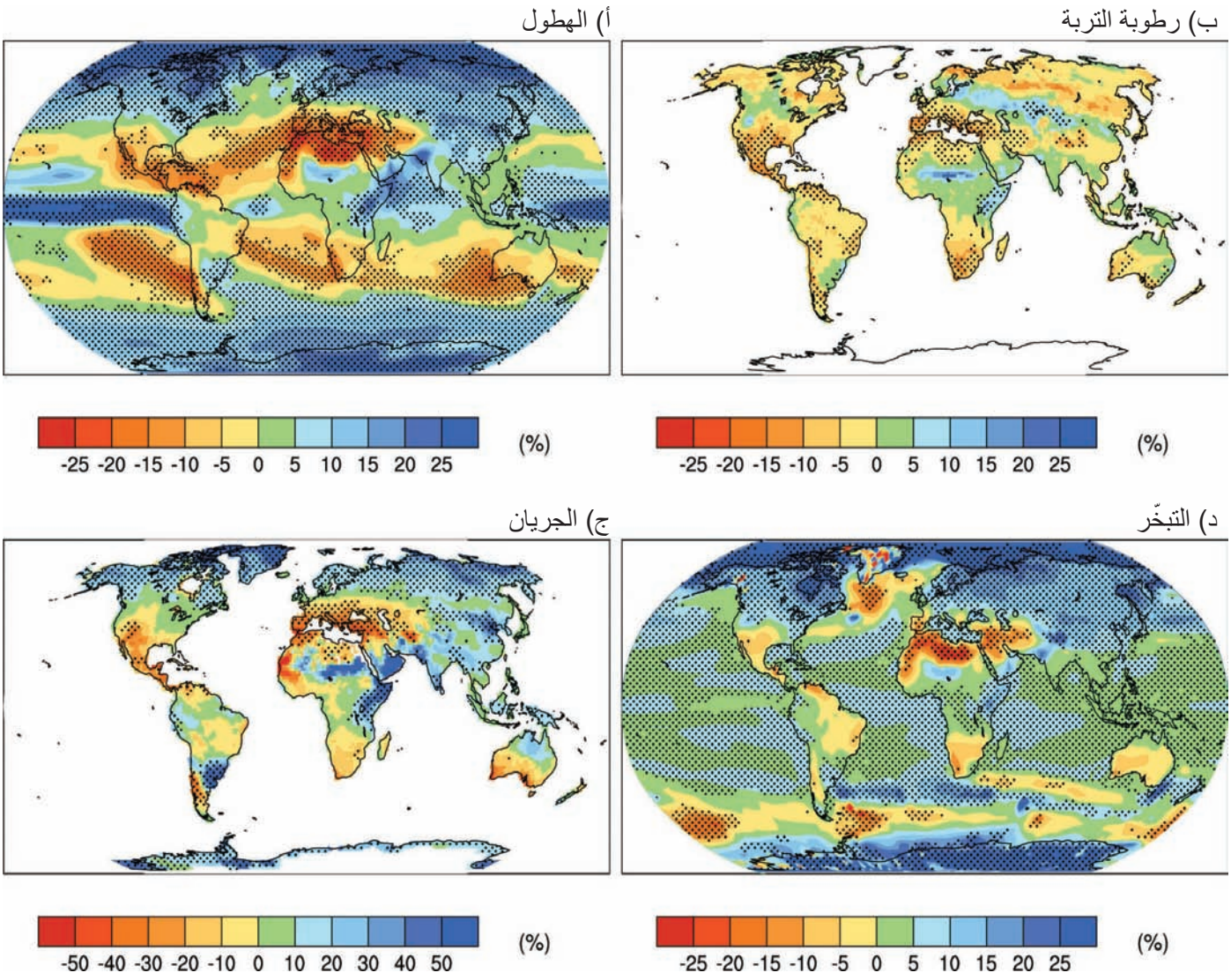
وفي إسقاطات النماذج المناخية المتعلقة بالقرن الحادي والعشرين، يتوازن المتوسط العالمي لتغيرات التبخر مع تغير الهطول على المستوى العالمي، بيد أن هذه العلاقة ليست واضحة على النطاق المحلي بسبب التغيرات في انتقال بخار الماء في الغلاف الجوي. ويزداد المتوسط السنوي للتبخر فوق كثير من أجزاء المحيط، مع تغيرات مكانية تميل إلى الارتباط بتغيرات في احترار السطح. ويتزايد تلاقي رطوبة الغلاف الجوي فوق المحيطات في المناطق الاستوائية وفوق خطوط العرض العليا. وتميل تغيرات سقوط الأمطار فوق الأرض إلى أن تتوازن بالتبخر والجريان. وعلى نطاقات عالمية، يقدَّر محتوى الغلاف الجوي من بخار الماء بأنه آخذ في الازدياد استجابة لدرجات الحرارة الأدفأ، مع بقاء الرطوبة النسبية ثابتة تقريباً. وهذه الزيادة في بخار الماء تحدث تأثيراً تفاعلياً إيجابياً على احترار المناخ، حيث إن بخار الماء هو غاز من غازات الدفيئة. ويرتبط بهذا تغيير في المقطع الرأسي لدرجة حرارة الغلاف الجوي («معدل التفاوت») الذي يعوض جزئياً التأثير التفاعلي الإيجابي. وتدعم الدلائل التي ظهرت أخيراً من النماذج ومن الرصدات بشكل قوي تأثيراً تفاعلياً مشتركاً لبخار الماء/ معدل التفاوت، على مناخ يتسم بقوة تقارن بتلك الموجودة في نماذج الدوران العام للمناخ. [WGI 8.6.10 ES.10.3.2]

2.3.1.2 ظواهر الهطول المتطرفة

من المرجح جداً أن تصبح ظواهر الهطول الغزير أكثر تواتراً. فمن المقدَّر أن تزداد كثافة ظواهر الهطول، وخصوصاً في المناطق المدارية ومناطق خطوط العرض العليا التي تشهد زيادات في متوسط الهطول. وهناك ميل لحدوث جفاف في المناطق القارية الوسطى أثناء الصيف، مما يدل على وجود مخاطر أكبر لحدوث نوبات جفاف في هذه المناطق. وفي معظم المناطق المدارية في خطوط العرض الوسطى والعليا، يتزايد الهطول المتطرف بأكثر من معدل الهطول المتوسط. [WGI 10.3.5, 10.3.6]

وتمثلت نتيجة من النتائج المعروفة منذ عهد طويل المتأتية من النماذج المتقارنة العالمية المشار إليها في تقرير التقييم الثالث، وفي أرجحية حدوث زيادة مسقطة في الجفاف في الصيف في المناطق الوسطى من خطوط العرض، مع ما يرتبط بذلك من خطر الجفاف (الشكل 2.8). وتظهر خمسة عشر تجربة حديثة للنموذج المتقارن للدوران العام بين الغلاف الجوي والمحيطات والجليد البحري (AOGCM) وأجريت من أجل مناخ أدفأ مستقبلاً، حدوث جفاف في الصيف في معظم أجزاء المناطق الشمالية شبه المدارية والمناطق الوسطى من خطوط العرض، بيد أن هناك مدى واسعاً لاتساع الجفاف في الصيف عبر النماذج. ويمكن لنوبات الجفاف المرتبطة بهذا النوع من الجفاف الصيفي أن تسفر عن ذبول الغطاء النباتي على المستوى الإقليمي وأن تسهم في زيادة في النسبة المئوية للمساحة الأرضية التي تشهد جفافاً في أي وقت بعينه؛ فعلى سبيل المثال يتزايد الجفاف المتطرف من نسبة 1 في المائة من المساحة الأرضية الحالية (بالتحديد) إلى نسبة 30 في المائة بحلول سنة 2100 في السيناريو A2. ويمكن أن يسهم المزيد من الجفاف في التربة أيضاً في مزيد من الموجات الحارة الشديدة. [WGI 10.3.6]

وترتبط بخطر الجفاف أيضاً زيادة مسقطة في مخاطر الهطول الغزير والفيضان. ورغم أن هذا عكس ما هو بدهي إلى حد ما، فإنه يعود إلى أن المُسقط هو أن يتركز الهطول في ظواهر أكثر شدة مع فترات أطول



الشكل 2.8: *متوسط التغييرات في خمسة عشر نموذجاً في (أ) الهطول (%) (ب) المحتوى من رطوبة التربة (%)، (ج) الجريان (%) و (د) التبخّر (%). ولتبيان الاتساق في علامة التغيير، نُقشت نقط على المناطق التي تتفق فيها نسبة 80 في المائة على الأقل من النماذج على علامة متوسط التغيير. والتغييرات هي متوسطات سنوية للسيناريو AIB الوارد في التقرير الخاص عن سيناريوهات الانبعاثات (SRES) فيما يتعلق بالفترة 2099-2080 بالنسبة إلى الفترة 1999-1980. وتظهر التغييرات في رطوبة التربة والجريان عند نقاط على اليابسة مع بيانات صحيحة من عشرة نماذج على الأقل. [استناداً إلى الفريق العامل الأول WGI، الشكل 10.12]*

لهطول أقل في الفترة البينية (انظر الفرع 2.1.1 من أجل الاطلاع على مزيد من التوضيح). ولهذا، تتناثر أحداث الهطول الشديد العَرَضية مع كميات كبيرة من الجريان مقترنة بفترات جفاف أطول نسبياً مع زيادة في عملية التبخر - النتح، وخصوصاً في المناطق شبه المدارية. ومع ذلك، ورهناً بالعتبة المستخدمة لتحديد هذه الظواهر، فإن أي زيادة في تواتر الأيام الجافة لا تعني بالضرورة نقصاناً في تواتر الظواهر المتطرفة لهطول الأمطار الغزيرة. وارتبط جانب آخر لهذه التغيرات بتغيرات في متوسط هطول المطر مع ظواهر متطرفة مطيرة تصبح أشد في كثير من المناطق حيث يتزايد متوسط الهطول، وكذلك ظواهر متطرفة من الجفاف تصبح أكثر شدة حيث يقل متوسط هطول المطر. [WGI 10.3.6]

وتبين الإسقاطات المناخية المتعددة النماذج فيما يتعلق بالقرن الحادي والعشرين حدوث زيادات في شدة هطول المطر وفي عدد الأيام الجافة المتتالية في مناطق كثيرة (الشكل 2.9). وتتزايد شدة هطول المطر تقريباً في كل مكان، بيد أنها تزداد في المناطق الوسطى والعالية من خطوط العرض حيث يتزايد متوسط هطول المطر. ومع ذلك توجد في الشكل 2.9 (في الجزء الأدنى) مناطق لتزايد مرور أيام جافة بين ظواهر هطول المطر في المناطق شبه المدارية والمناطق المنخفضة في خطوط العرض الوسطى، لكن مع حدوث تناقص في الأيام الجافة في المناطق العالية من خطوط العرض الوسطى وخطوط العرض العليا حيث يتزايد متوسط هطول المطر. [WGI 10.3.6.1]

ونظراً لوجود مناطق تتسم بحدوث زيادات ونقصان على السواء في الأيام الجافة المتتالية بين ظواهر هطول المطر في المتوسط المتعدد النماذج (الشكل 2.9)، تعتبر متوسطات الاتجاهات العالمية أصغر وأقل اتساقاً عبر النماذج. ولا تُظهر مجموعة ظواهر فيزيائية

مضطربة مع نموذج واحد سوى مناطق محدودة ذات تواتر متزايد ثابت في الأيام المطيرة في تموز/يوليو. وفي هذه المجموعة يوجد نطاق أوسع من التغيرات في ظواهر الهطول المتطرفة بالنسبة إلى متوسط مجموعة الاختبار (بالمقارنة مع الاستجابة الأكثر ثباتاً لدرجات الحرارة المتطرفة). ويشير هذا إلى استجابة أقل ثباتاً لظواهر الهطول المتطرفة، بوجه عام، مقارنة بدرجات الحرارة المتطرفة. [WGI 10.3.6 FAQ 10.1]

واستناداً إلى طائفة من النماذج، من المرجح أن تصبح الأعاصير المدارية في المستقبل أكثر شدة، مع سرعات رياح أكبر وتبلغ الذروة، ومزيد من هطول المطر الغزير مع زيادات مستمرة في درجات حرارة سطح البحر في المناطق المدارية. وتوجد ثقة أقل في الإسقاطات المتعلقة بانخفاض عالمي في أعداد الأعاصير المدارية. [WGI SPM]

2.3.2 الثلوج والجليد الأرضي

من المقدَّر مع احترار المناخ، أن ينكمش الغطاء الثلجي ويتناقص، وتفقد الأنهار الجليدية والقلنسوات الجليدية جزءاً من كتلتها نتيجة لأن زيادة في ذوبان الجليد في الصيف أكبر منها لدى سقوط الثلوج في الشتاء. ومن المقدَّر أن تحدث استجابة للاحترار، زيادات واسعة الانتشار في عمق الذوبان فوق كثير من مناطق التربة الصقيعية. [WGI SPM.10.3.3].

2.3.2.1 التغيرات في الغطاء الثلجي، والأرض المتجلدة وجليد البحيرات والأنهار

يشكل الغطاء الثلجي استجابة متكاملة لدرجة الحرارة وهطول المطر على السواء، وهو يظهر ارتباطاً سلبياً قوياً مع درجة حرارة الهواء في معظم المناطق مع الغطاء الثلجي الفصلي. وبسبب هذا الارتباط بدرجة الحرارة، تعرض عمليات المحاكاة انخفاضات واسعة النطاق في الغطاء الثلجي خلال القرن الحادي والعشرين، رغم وجود زيادات مسقطة في مناطق أعلى في خطوط العرض. وعلى سبيل المثال تعرض النماذج المناخية المستخدمة في تقييم تأثير المناخ في المنطقة المتجمدة الشمالية نسبة انخفاض قدرها من 9 إلى 17 في المائة في المتوسط السنوي للغطاء الثلجي في نصف الكرة الشمالي في إطار السيناريو B2 قبل حلول نهاية القرن. ومن المقدَّر بوجه عام، أن يبدأ فصل تراكم الثلوج في وقت متأخر، وأن يبدأ فصل ذوبان الثلوج في وقت أبكر، وأن يتناقص الغطاء الثلجي الجزئي أثناء فصل الثلوج. [WGI 10.3.3.2، الفصل 11]

وتشير النتائج المتأتية من النماذج المتأثرة بطائفة من سيناريوهات المناخ التي أعدتها الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ إلى أنه من المرجح بحلول منتصف القرن الحادي والعشرين، أن تتناقص منطقة التربة الصقيعية في نصف الكرة الشمالي بنسبة تتراوح بين 20 و35 في المائة. ولا تعتبر التغيرات المسقطة فيما يتعلق بعمق ذوبان الجليد الفصلي موحَّدة لا في المكان ولا في الزمان. ومن المرجح في العقود الثلاثة التالية أن تكون أعماق الطبقة الناشطة في حدود 10 إلى 15 في المائة من قيمها الحالية فوق معظم منطقة التربة الصقيعية؛ وبحلول منتصف القرن، قد يزيد عمق الذوبان الفصلي بمتوسط بتراوح بين 15 و25 في المائة وبنسبة 50 في المائة أو أكثر في الأماكن الواقعة في أقصى الشمال؛ وبحلول سنة 2080، من المرجح أن يزداد بنسبة تتراوح بين 30 و50 في المائة أو أكثر فوق جميع مناطق التربة الصقيعية. [WG11 15.3.4]

وتشير التنبؤات إلى أن الاحترار بسبب انخفاضات في الجليد النهري وجليد البحيرات. بيد أن المتوقع هو أن يتوازن هذا التأثير مع بعض الأنهار المتدفقة الكبيرة صوب الشمال بسبب انخفاض التناقضات الإقليمية في درجات الحرارة من الجنوب إلى الشمال وما يتصل بها من تدرجات هيدرولوجية وطبيعية. [WGII 15.4.1.2]

2.3.2.2 الأنهار الجليدية والقلنسوات الجليدية

مع احترار المناخ طوال القرن الحادي والعشرين، من المقدَّر أن تفقد الأنهار الجليدية والقمم الجليدية شيئاً من كتلتها بسبب سيطرة الذوبان الصيفي على زيادات هطول المطر في الشتاء. واستناداً إلى نماذج محاكاة لـ11 نهراً جليدياً في مختلف المناطق، تشير الإسقاطات إلى نقص كمية تصل نسبتها إلى 60 في المائة من هذه الأنهار الجليدية بحلول سنة 2050 (Schneeberger وآخرون، 2003). وتشير دراسة مقارنة تشمل سبعة نماذج محاكاة لنموذج الدوران العام (GCM) للمناخ في 2 x في ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى أن كثيراً من الأنهار الجليدية سوف يختفي بشكل كامل بسبب الزيادة في ارتفاع خط التوازن (Bradley وآخرون، 2004). ويعتبر اختفاء هذه الكتل الجليدية أسرع من عملية محتملة لإعادة تكون الأنهار الجليدية بعد عدة قرون من هذا الحين، وقد يكون ذلك غير قابل للانعكاس في كثير من المناطق. [WGI 10.7.4.2، الإطار 10.1] وتبين الإسقاطات العالمية للقرن الحادي والعشرين انكماشاً في الأنهار الجليدية والقلنسوات الجليدية بنسبة -0.17 0.07 م مما يعادل سطح البحر من الكتلة الحالية المقدَّرة للأنهار الجليدية والقمم الجليدية بما يتراوح بين 0.37-0.15 م من تكافؤ مستوى سطح البحر. [WGI الفصل 4.14 الجدول 10.7]

2.3.3 مستوى سطح البحر

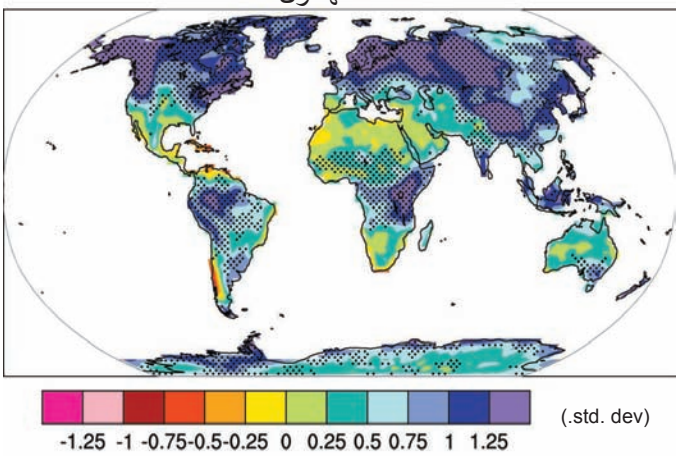
لأن فهمنا الحالي لبعض الدوافع الهامة وراء ارتفاع مستوى سطح البحر محدود للغاية، لا يقيّم تقرير التقييم الرابع مدى أرجحية ارتفاع مستوى سطح البحر، ولا ينص على أفضل تقدير لهذا الارتفاع ولا على الحد الأعلى له. ولا تشمل هذه الإسقاطات أياً من حالات عدم اليقين من التأثيرات التفاعلية بشأن دورة المناخ – الكربون أو الآثار الكاملة للتغييرات في تدفق صفائح الجليد؛ ولهذا ينبغي ألا تعتبر القيم العليا للنطاقات حدوداً أعلى فيما يتعلق بارتفاع مستوى سطح البحر. وتبلغ الإسقاطات المستندة إلى النماذج بخصوص المتوسط العالمي لارتفاع مستوى سطح البحر بين أواخر القرن العشرين (1980-1999) ونهاية هذا القرن (2090-2099) ما يتراوح بين 0.18 و0.59 م، استناداً إلى انتشار نتائج النموذج المتقارن للدوران العام بين الغلاف الجوي والمحيطات والجليد البحري ومختلف سيناريوهات التقرير الخاص عن سيناريوهات الانبعاثات (SRES)، ولكن مع استبعاد أوجه عدم اليقين المشار إليها أعلاه. وفي جميع السيناريوهات الملاحظة في التقرير الخاص عن سيناريوهات الانبعاثات، فيما عدا السيناريو B1، فإن المعدل المتوسط لارتفاع مستوى سطح البحر أثناء القرن الحادي والعشرين من المرجح جداً أن يتجاوز المعدل المتوسط للفترة 1961- 0.5 ± 1.8) 2003 مم/سنوياً). ويعتبر التوسع الحراري هو أكبر عنصر،

حيث يسهم بنسبة تتراوح بين 70-75 في المائة من التقدير الأساسي في هذه الإسقاطات بالنسبة لجميع السيناريوهات. ومن المقدَّر أن تسهم الأنهار الجليدية والقلنسوات الجليدية والصفيحة الجليدية في غرينلاند أيضاً بشكل إيجابي في مستوى سطح البحر. وتشير نماذج الدوران العام للمناخ إلى أن الصفيحة الجليدية للمنطقة المتجمدة الجنوبية سوف تتلقى مزيداً من سقوط الثلوج دون حدوث ذوبان سطحي هام، وبالتالي سوف تكتسب المزيد من الكتلة وتسهم بشكل سلبي في سطح البحر. وتشير الإسقاطات إلى أن ارتفاع مستوى سطح البحر خلال القرن الحادي والعشرين سوف يشهد تقلبية جغرافية كبيرة. [التقرير التجميعي 3.2.1؛ WGI ملخص لصانعي السياسات، 10.6.5، الملخص الفني 5.2] وقد يستلزم الفقدان الجزئي لصفائح الجليد في غرينلاند و/أو المنطقة المتجمدة الجنوبية ارتفاع عدة أمتار في مستوى سطح البحر، وتغيرات كبيرة في الخطوط الساحلية وغرق المناطق الواطئة، مع حدوث أكبر الآثار في دلتا الأنهار وفي الجزر الواطئة. وتشير النمذجة الحالية إلى أن هذه التغييرات ممكنة فيما يتعلق بغرينلاند خلال نطاقات زمنية ألفية السنوات، بيد أنها بسبب عمليات التدفق الجليدي الديناميي في صفائح الجليد تعتبر حالياً غير مفهومة بشكل جيد، ولا يمكن استبعاد ارتفاعات سريعة أكثر في مستوى سطح البحر على نطاقات زمنية على مستوى القرون. [WGI SPM، WGII 19.3]

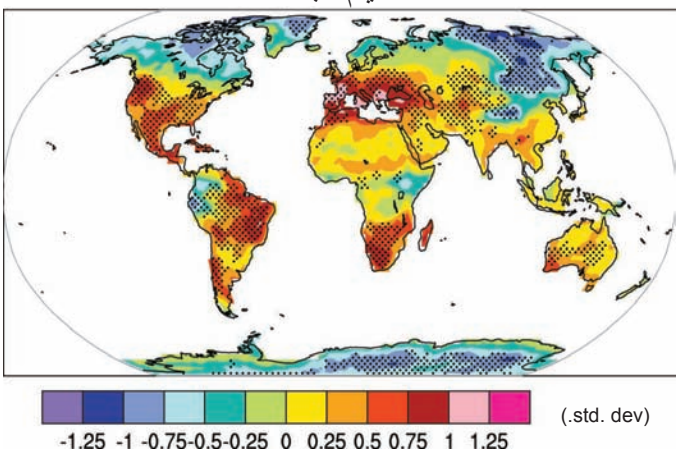
2.3.4 التبخُّر - النتح

من المقدَّر أن يزيد متطلب التبخر، أو 'التبخر المحتمل' في كل مكان تقريباً. ويرجع هذا إلى أن قدرة الغلاف الجوي على حمل الماء تتزايد مع تزايد ارتفاع درجات الحرارة، بيد أنه ليس من المقدَّر أن تتغير الرطوبة النسبية بشكل ملحوظ. ويتزايد العجز في بخار الماء في الغلاف الجوي نتيجة لذلك، كما يتزايد معدل التبخر (Trenberth وآخرون، 2003). [WGI الشكلان 10.9 و10.12؛ WGII 3.2، 3.3.1] ومن المقدَّر أن يزداد التبخر الفعلي فوق المياه المكشوفة، على سبيل المثال، فوق كثير من المحيطات [WGI الشكل 10.12] وفوق البحيرات، مع تغيرات مكانية تميل إلى الارتباط بالتغيرات المكانية في احترار السطح. [WGI 10.3.2.3، الشكل 10.8] والتغيرات في عملية التبخر - النتح فوق الأراضي تتحكم فيها تغيرات في الهطول وفي التأثير الإشعاعي، وهذه التغيرات سوف تؤثر بدورها على ميزانية الماء في الجريان، ورطوبة التربة، والماء في المستودعات، وفي مستوى المياه الجوفية وتملُّح المستودعات المائية الضحلة. [WGII 3.4.2]

شدة الهطول



الأيام الجافة



الشكل 2.9: *التغيرات في الظواهر المتطرفة استناداً إلى محاكاة متعددة النماذج من تسعة نماذج مناخية متقارنة عالمية في الفترة 2080-2099 بالنسبة إلى الفترة 1980-1999 فيما يتعلق بالسيناريو AIB. وتغييرات في الأنماط المكانية لكثافة الهطول (محددة بالهطول الإجمالي السنوي مقسوماً على عدد الأيام المطيرة) (الخريطة العليا)؛ وتغييرات في الأنماط المكانية للأيام الجافة (محددة بالعدد الأقصى السنوي للأيام الجافة المتوالية) (الخريطة السفلى). ويشير النقش بالنقط إلى مناطق تتوافق فيها خمسة نماذج من النماذج التسعة في تحديد مدى أهمية التغير من الناحية الإحصائية. أما مؤشرات الحالات المتطرفة فهي محسوبة فقط فوق الأرض اليابسة. وترد التغييرات في وحدات من الانحرافات المعيارية. [WGI الشكل 10.18]*

ويترتب على وجود نسبة كبيرة من ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي أثران متنافسان محتملان فيما يتعلق بعملية التبخر – النتح من الغطاء النباتي. فمن ناحية، يمكن للتركزات الأعلى من ثاني أكسيد الكربون أن تخفض عملية النتح لأن المسام الصغيرة الموجودة في الأوراق، والتي تتم منها عملية النتح من النبات، يتعين أن تتفتح بدرجة أقل بغية استيعاب نفس القدر من ثاني أكسيد الكربون من أجل عملية التمثيل الضوئي (انظر Gedney وآخرون، 2006، رغم أنه من الصعب وجود دلائل أخرى لإثبات هذه العلاقة). وعلى العكس من ذلك، فإن وجود تركزات أعلى من ثاني أكسيد الكربون يمكن أن يزيد من نمو النبات، مما ينتج عنه زيادة في حجم الأوراق، وبالتالي تزايد عملية النتح. وتتباين المقادير النسبية لهذين المؤثرين ما بين أنواع النباتات واستجابة لتأثيرات أخرى، مثل توافر المواد المغذية وتأثيرات التغيرات في درجة الحرارة وتوافر الماء. ولتعليل آثار زيادة تركزات ثاني أكسيد الكربون على عملية التبخر - النتح يتطلب الأمر إدراج نموذج ديناميي للغطاء النباتي. ويفعل هذا الآن عدد صغير من النماذج (Rosenberg وآخرون، 2003؛ Gerten وآخرون، 2004؛ Gordon وFamiglietti، 2004؛ Betts وآخرون، 2007)، ولكن عادة ما يكون على النطاق العالمي وليس على نطاق المستجمع المائي، مع أن الدراسات بشأن نماذج الغطاء النباتي في حالة التوازن تشير إلى أن زيادة المساحة الورقية قد تعادل انسداد المسام الصغيرة (Betts وآخرون، 1997؛ Kergoat وآخرون، 2002)، وتشير الدراسات الخاصة بالنماذج الدينامية للغطاء النباتي العالمي إلى أن تأثيرات انسداد المسام الصغيرة في الأوراق تتجاوز تلك الزيادة في مساحة الأوراق. وإذا أخذت في الاعتبار التغيرات التي يحدثها ثاني أكسيد الكربون في الغطاء النباتي، فإنه جرت محاكاة متوسط الجريان

العالمي في إطار مناخ 2 x ثاني أكسيد الكربون ($2XCO_2$) مع الزيادة بمقدار 5% تقريباً نتيجة لانخفاض عملية التبخر – النتح بسبب زيادة تركيزات ثاني أكسيد الكربون وحدها (Leipprand وGerten، 2006؛ Betts وآخرون، 2007). [WGII 3.4.1]

2.3.5 رطوبة التربة

تتوقف التغييرات في رطوبة التربة على التغيرات في حجم وتوقيت ليس فقط هطول المطر، بل أيضاً التبخر (الذي قد يتأثر بالتغيرات في الغطاء النباتي). ويختلف التوزيع الجغرافي للتغيرات في رطوبة التربة بالتالي بدرجة طفيفة عن توزيع التغيرات في هطول المطر؛ ويستطيع ارتفاع معدل التبخر أن يعادل وأكثر، الزيادات في هطول المطر. وتحاكي النماذج الرطوبة في بضعة أمتار أعلى من سطح الأرض بطرق مختلفة، ولا يزال من الصعب تقييم المحتوى من رطوبة التربة. وتبين الإسقاطات الخاصة بالمتوسط السنوي للمحتوى من رطوبة التربة (الشكل 2.8b) عادة انخفاضات في المناطق شبه المدارية ومنطقة البحر الأبيض المتوسط، بيد أن هناك زيادات في شرق أفريقيا وآسيا الوسطى وبعض المناطق الأخرى ذات الهطول الزائد. ويحدث نقصان في مناطق خطوط العرض العليا، حيث يتناقص الغطاء الثلجي (الفرع 2.3.2). وفي حين يكون حجم التغيرات في كثير من الأحيان غير يقيني، هناك ثبات في إشارة التغير في كثير من هذه المناطق، وتحدث أنماط مماثلة في التغيير في النتائج الفصلية. [WGI 10.3.2.3]

2.3.6 الجريان وتصريف الأنهار

تعتمد التغيرات في تدفقات الأنهار وفي مستويات البحيرات والأراضي الرطبة، بسبب تغير المناخ في المقام الأول على التغيرات في حجم وتوقيت الهطول، وتعتمد أساساً على ما إذا كان هطول المطر يسقط في شكل ثلوج أم أمطار. وتؤثر التغيرات في عملية التبخر أيضاً في تدفقات الأنهار. وقد نُشرت في المجلات العلمية عدة مئات من الدراسات عن التأثيرات الممكنة لتغير المناخ على تدفقات الأنهار، وعُرضت دراسات أخرى كثيرة في التقارير الداخلية. وتركز الدراسات بشدة على أوروبا وأمريكا الشمالية وأستراليا، مع عدد صغير من الدراسات من آسيا. وتستخدم جميع الدراسات بالفعل نموذجاً هيدرولوجياً لمستجمعات المياه مدفوعاً بسيناريوهات تستند إلى عمليات محاكاة نموذج المناخ، وجميعها تقريباً على نطاق مستجمعات المياه. أما الدراسات عالمية النطاق القليلة التي أجريت باستخدام الجريان الذي تمت محاكاته مباشرة بفعل تغير المناخ [WGI 10.3.2.3] والنماذج الهيدرولوجية المدارة بشكل غير مباشر [WGII 3.4] فتظهر أن الجريان يزداد في مناطق خطوط العرض العليا والمناطق الرطبة المدارية وينخفض في الأجزاء الوسطى من خطوط العرض وبعض أجزاء المناطق المدارية الجافة. ويبين الشكل 2.8c متوسط تغير الجريان في المجموعة في إطار السيناريو A1B. وينخفض الجريان بشكل ملحوظ في المناطق الجنوبية من أوروبا ويزداد في جنوب شرق آسيا وفي خطوط العرض العليا، حيث يوجد اتساق بين النماذج في إشارة التغير (وإن كان الاتساق أقل في حجم التغير). وتبلغ التغيرات الأكبر نسبة 20% أو أكثر من القيم المحاكاة في الفترة 1980-1999، مع نطاق يتراوح من 1 إلى 5 مم/يومياً في المناطق الأكثر رطوبة إلى أقل من 0.2 مم/يومياً في الصحارى. وتزداد التدفقات في أنهار مناطق خطوط العرض العليا، في حين تميل إلى الانخفاض تلك التدفقات من الأنهار الرئيسية في الشرق الأوسط وأوروبا وأمريكا الوسطى. [WGI 10.3.2.3] بيد أن مقدار التغير يتباين بين نماذج المناخ، وفي بعض المناطق مثل جنوبي آسيا، يمكن أن يزداد الجريان أو يتناقص. وكما هو مبيَّن في الفرع 2.2.1، فإن آثار زيادة تركيزات ثاني أكسيد الكربون قد تؤدي إلى انخفاض التبخر، ومن ثم تحدث زيادات أكبر أو انخفاضات أصغر في حجم الجريان. [WGI 7.2]

ويبين الشكل 2.10 التغير في الجريان السنوي فيما يتعلق بالفترة 2090-2099 بالمقارنة بالفترة 1980-1999. وتمثل القيم متوسط 12 نموذجاً للمناخ باستخدام السيناريو A1B الوارد في التقرير الخاص عن سيناريوهات الانبعاثات (SRES). وتستخدم طرائق التظليل والتبييض لوضع علامات على المناطق التي تتفق فيها النماذج أو تختلف، على التوالي بشأن علامة التغير: وتُلاحَظ المناطق الكبيرة حيث يعتبر اتجاه التغير غير يقيني. وتصور هذه الخريطة العالمية للجريان السنوي تغيرات واسعة النطاق، وليس المقصود منها أن تفسر على نطاقات زمنية (فصلية على سبيل المثال) ومكانية صغيرة. وفي المناطق التي تكون فيها كميات الأمطار والجريان منخفضة جداً (على سبيل المثال المناطق الصحراوية)، يمكن أن تؤدي تغيرات صغيرة في الجريان السطحي إلى نسبة مئوية كبيرة من التغيرات. وفي بعض المناطق، تختلف علامة التغيرات المسقطة في الجريان من اتجاهات مرصودة حديثاً (الفرع 2.1.6). وفي بعض المناطق ذات الزيادات المسقطة في الجريان، من المتوقع حدوث تأثيرات فصلية مختلفة، مثل زيادة الجريان في الفصل المطير وانخفاض الجريان في الفصل الجاف. [WGII 3.4.1]

وثمة اكتشاف قوي جداً وهو أن الاحترار يمكن أن يؤدي إلى تغييرات في الطابع الفصلي لتدفقات الأنهار حيث إن كثيراً من هطول أمطار الشتاء يسقط حالياً في شكل ثلوج، مع انخفاض تدفقات الربيع بسبب انخفاض الثلوج الذائبة أو الثلوج الذائبة قبل أوانها، وزيادة التدفقات الشتوية. وقد اكتشفت هذه الظاهرة في جبال الألب الأوروبية، وفي اسكندينافيا وحوالي منطقة بحر البلطيق، وروسيا، وجبال الهيمالايا والمناطق الغربية والوسطى والشرقية من أمريكا الشمالية. ويعتبر التأثير في أكبر معدل له في الهضاب المنخفضة، حيث يكون سقوط الثلوج هامشياً أكثر، وفي كثير من الحالات تكون تدفقات الذروة في منتصف القرن الحادي والعشرين حيث تحدث على الأقل قبل أوانها بشهر. وفي المناطق التي يقل أو ينعدم فيها سقوط المطر، تعتمد التغيرات في الجريان بدرجة أكثر على التغيرات في سقوط المطر أكثر من اعتمادها على التغيرات في درجة الحرارة. ويتضمن معظم الدراسات في هذه المناطق إسقاطات تشير إلى زيادة في الطابع الفصلي للتدفقات، في كثير من الأحيان مع تدفقات أعلى في فصل ذروة التدفق وتدفقات أقل أثناء فصل التدفق المنخفض أو فترات الجفاف الممتدة. [WGII 3.4.1]

وكثير من الأنهار التي تستجلب المياه من المناطق المغطاة بالجليد، وخصوصاً في السلاسل الآسيوية الجبلية العالية وجبال الأنديز في أمريكا الجنوبية إنما تبقى جارية بسبب ذوبان الأنهار الجليدية أثناء فترات الدفء والجفاف. وسيؤدي تراجع هذه الأنهار الجليدية بسبب الاحترار العالمي إلى زيادة تدفقات الأنهار في الأجل القصير، بيد أن إسهام المياه الذائبة من الأنهار الجليدية سوف يتناقص تدريجياً خلال العقود القليلة القادمة. [WGII 3.4.1]

وتعكس التغيرات في مستويات البحيرات تغيرات في التوزيع الفصلي لعمليات سيلان الأنهار وهطول المطر والتبخُّر، وفي بعض الأحيان، تندمج بمرور سنوات كثيرة. ولهذا قد تستجيب البحيرات بطريقة غير خطية جداً لتغير خطي في المدخلات. وتشير دراسات خاصة بالبحيرات العظمى في أمريكا الشمالية وبحر قزوين إلى حدوث تغيرات في مستويات المياه بحوالي عدة عشرات من السنتيمترات وفي بعض الأحيان بالأمتار بحلول نهاية القرن. [WGII 3.4.1]

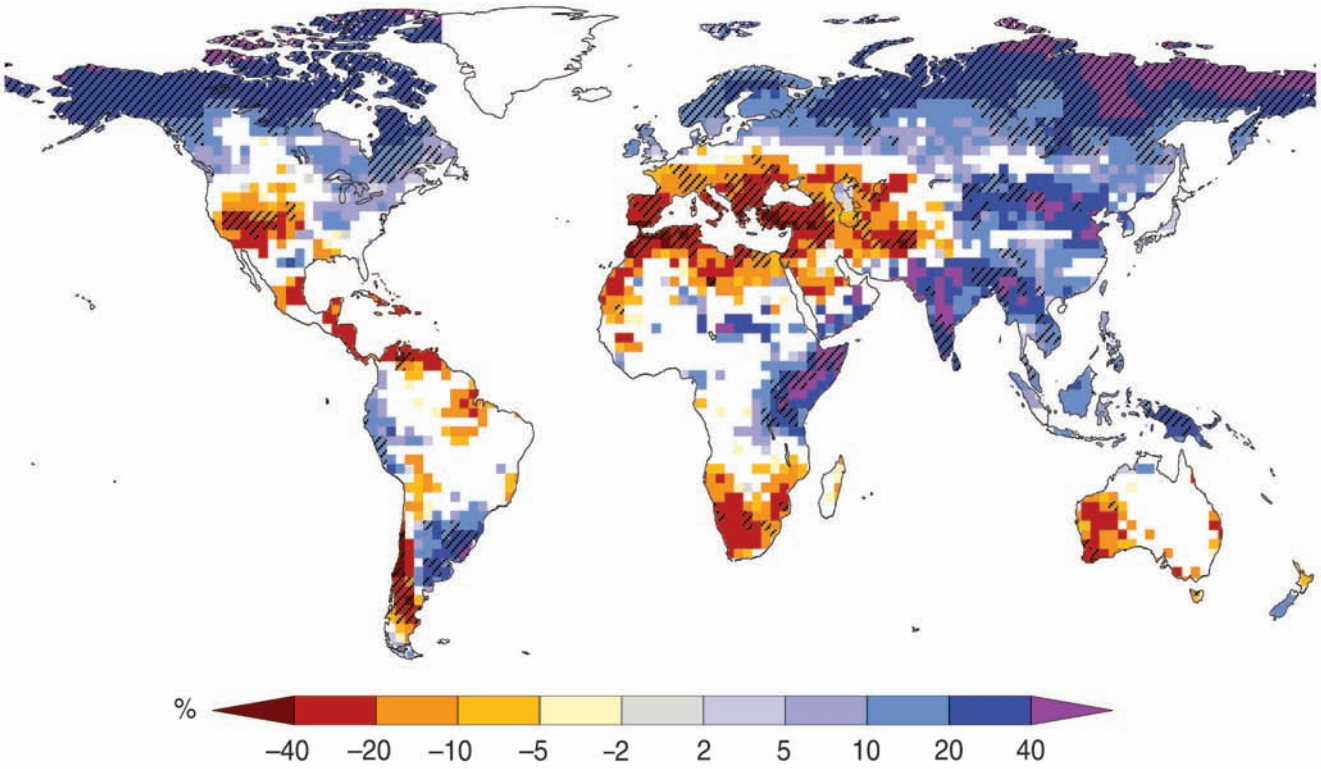
2.3.7 أنماط التقلبية واسعة النطاق

استناداً إلى النماذج المناخية العالمية الوارد تقييمها في تقرير التقييم الرابع، من المتوقع في الإسقاطات زيادة ضغط مستوى سطح البحر فوق المناطق شبه المدارية والمناطق الوسطى من خطوط العرض، وتناقصه فوق خطوط العرض العليا. وترتبط هذه التغيرات بتوسع في دوران هادلي واتجاهات إيجابية في النمط الحلقي الشمالي/التذبذب الشمال أطلسي (NAM/NAO) والنمط الحلقي الجنوبي (SAM). ونتيجة لهذه التغيرات، تشير التقديرات المسقطة إلى أن مسارات العواصف سوف تتحرك نحو القطب، مع حدوث تغيرات تالية في أنماط الرياح وهطول المطر ودرجات الحرارة خارج المناطق المدارية، واستمرار الإطار العريض للاتجاهات المرصودة على مدى نصف القرن الأخير. [WGI ملخص فني، 10.3.5.6, 10.3.6.4]

ومن المرجح أن تصبح الأعاصير المدارية في المستقبل أكثر شدة، مع حدوث سرعات رياح أكبر تبلغ الذروة، وهطول مطر أغزر يرتبطان بزيادات مستمرة في درجات الحرارة عند مستوى سطح البحر في المناطق المدارية [WGI SPM.10.3.6.3]

وتشير الإسقاطات إلى أن درجات حرارة سطح البحر في المناطق الوسطى والشرقية الاستوائية من المحيط الهادئ سوف تزيد في المتوسط، عن درجة الحرارة في المناطق الاستوائية الغربية من المحيط الهادئ ويقابل هذا في المتوسط انتقال هطول المطر نحو الشرق. وتبين جميع النماذج استمرار التقلبية ما بين السنوات في ظاهرة النينيو/التذبذب الجنوبي (ENSO) في المستقبل، بيد أن هناك اختلافات كبيرة بين النماذج في التغيرات المسقطة فيما يتعلق بمدى اتساع ظاهرة النينيو وما يصاحبها من تقلبية زمنية النطاق متعددة العقود في تلك الظاهرة في النماذج، وهو أمر يحول دون إسقاط قاطع للاتجاهات في تقلبية ظاهرة النينيو/التذبذب الجنوبي. [WGI TS.10.3.5.3, 10.3.5.4].

ومن المقدَّر أن التقلبية في متوسط درجة حرارة الهواء السطحي فيما بين السنوات سوف تنخفض أثناء الفصل البارد في المناطق الكائنة خارج الخطوط المدارية في نصف الكرة الشمالي، وسوف تزداد في خطوط العرض الاستوائية وفي المناطق الوسطى من خطوط العرض الشمالية أثناء الفصل الدافئ. و من المحتمل أن يكون الانخفاض في الأولى راجعاً إلى نقصان في الجليد البحري والثلوج مع تزايد في درجة الحرارة. ويسهم الانخفاض في رطوبة التربة في فصل الصيف فوق سطوح اليابسة في المناطق الوسطى من خطوط العرض في حدوث الزيادة. ومن المتوقع حدوث زيادة في تقلبية متوسط الهطول الشهري في معظم المناطق، بالقيم المطلقة (انحراف معياري) وبالقيم النسبية (معامل التغير). ومع ذلك، فإن مستوى أهمية هذه التغيرات المسقطة نتيجة للتقلبية يعتبر متدنياً. [WGI 0.3.5.1]



الشكل 2.10: *تغيرات نسبية واسعة النطاق في الجريان السنوي في الفترة 2090-2099، بالنسبة إلى الفترة 1980-1999. والمناطق البيضاء هي المناطق التي تتفق فيها نسبة تقل عن 66 في المائة من مجموعة النماذج الإثني عشر على علامة التغيير، ومناطق التظليل هي المناطق التي يتفق فيها ما يزيد على 90 في المائة من النماذج على علامة التغيير [Milly وآخرون، 2005]. [استناداً إلى الشكل 3.5 الوارد في التقرير التجميعي و WGIII الشكل 3.4]*