Journal of Nature, Life and Applied Sciences (JNSLAS) • Vol 8, Issue 1 (2024) • P: 39 – 19
https://journals.ajsrp.com/index.php/jnslas
ISSN: 2522-3356 (Online) • ISSN: 2522-3356 (Print)

Environmental Impacts of Climate Change: A Comperehensive Review of Causes, Manifestations, and Solutions

Sleem Ali Kreba

Environmental Sciences Department | Faculty of Sciences | Alasmarya Islamic University | Libya

Received: 27/01/2024
Revised: 05/02/2024
Accepted: 06/03/2024
Published: 30/03/2024

* Corresponding author: sleem.kreba@gmail.com

Citation: Kreba, S. A. (2024). Environmental Impacts of Climate Change: A Comperehensive Review of Causes, Manifestations, and Solutions. *Journal of natural sciences, life and applied sciences, 8*(1), 19 – 39. https://doi.org/10.26389/AJSRP.S270124

2024 © AISRP • Arab Institute of Sciences & Research Publishing (AISRP), Palestine, all rights reserved.

• **Open Access**

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY-NC) license

Abstract: Climate change is a pressing global issue that has garnered significant attention in recent years. The primarily causes of this change are human activities such as burning fossil fuels and deforestation, and has far-reaching impacts on the environment, affecting various aspects of our planet's ecosystems and natural resources. This review study focuses on addressing the significance and causes of the phenomenon and its impacts on the main environmental aspects including biota, water resources, air, and soil. Rising global temperatures results in melting polar ice caps and glaciers, leading to sea-level rise and coastal flooding. Changes in precipitation patterns contribute to more frequent and intense droughts, heatwaves, and storms, affecting ecosystems, agriculture, and water resources. Additionally, climate change disrupts natural habitats, leading to the loss of biodiversity and endangering numerous species. The increased concentration of greenhouse gases in the atmosphere also contributes to ocean acidification, negatively impacting marine life and coral reefs. These aspects of the phenomenon have clear impacts on the environmental aspects including biota, water, air, and soil. Addressing climate change and mitigating its impacts is crucial for the preservation of our environment and the well-being of future generations.

Keywords: Global warming, Greenhouse gases, Biodiversity, Soil, Water, Air

الآثار البيئية لتغير المناخ: مراجعة شاملة للأسباب والمظاهر والحلول

سليم علي كربة

قسم علوم البيئة | كلية العلوم | الجامعة الأسمرية الإسلامية | ليبيا

المستخلص: يعد تغير المناخ قضية عالمية مهمة حظيت باهتمام كبير في السنوات الأخيرة. تحدث هذه الظاهرة بسبب الأنشطة البشرية مثل حرق الوقود الأحفوري وإزالة الغابات، ولها آثار بعيدة المدى على البيئة، حيث تؤثر على جوانب مختلفة من النظم البيئية والموارد الطبيعية لكوكب الأرض. تركز هذه الدراسة كمراجعة أدبية على أهمية وأسباب هذه الظاهرة وتأثيرها على الكائنات الحية والموارد المائية والهواء والتربة. حيث يؤدي ارتفاع درجات الحرارة العالمية إلى ذوبان القمم الجليدية والأنهار الجليدية القطبية، مما يؤدي إلى ارتفاع مستوى سطح البحر والفيضانات الساحلية. كذلك تؤثر هذه الظاهرة في أنماط هطول الأمطار وتساهم في زيادة تواتر وشدة حالات الجفاف وموجات الحر والعواصف، مما يؤثر على النظم البيئية والزراعة والموارد المائية. بالإضافة إلى ذلك، يؤدي تغير المناخ إلى تعطيل العوائل الطبيعية، التي تؤدي إلى فقدان التنوع الحيوي وتعرض العديد من أنواع الكائنات الحية للخطر. ويساهم التركيز المتزايد للغازات الدفيئة في الغلاف الجوي في تحمض المحيطات، مما يؤثر سلباً على الحياة البحرية والشعاب المرجانية. هذه المظاهر لها آثار سلبية على عناصر البيئة من كائنات حية وماء وهواء وتربة. إن التصدي لتغير المناخ والتخفيف من آثاره أمر بالغ الأهمية للحفاظ على بيئتنا ورفاهية الأجيال القادمة، وهذا يستوجب تكثيف الجهود الدولية والمحلية للالتزام بحزمة من التوصيات المهمة.

الكلمات المفتاحية: الاحتباس الحراري، الغازات الدفيئة، التنوع الحيوي، التربة، الماء، الهواء

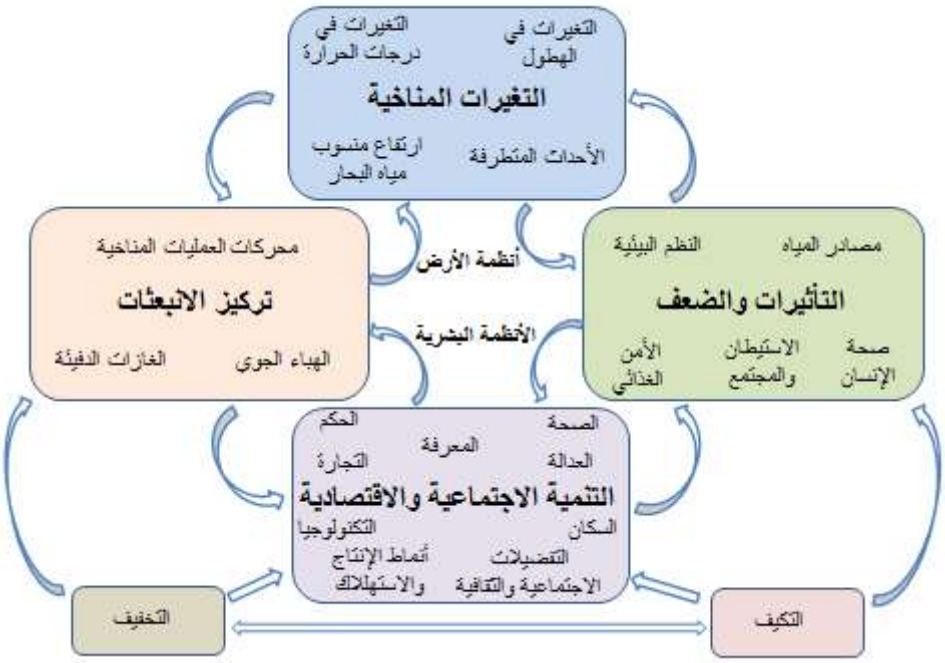
1. المقدمة

تغير المناخ هو ظاهرة عالمية مهمة لها عواقب بعيدة المدى على كوكب الأرض. المناخ غالباً ما يتم تعريفه على أنه متوسط الطقس (El-Ramady et al., 2012) ، وعادة ما يتم وصفه بأنه متوسط درجات الحرارة وهطول الأمطار والرياح على مدى فترة زمنية تتراوح من أشهر إلى ملايين السنوات (الفترة التقليدية هي 10-30 سنة) (IPCC, 2013). ويُعرّف المناخ كذلك بأنه متوسط الأحوال الجوية، الذي يتميز بإحصائيات طويلة المدى لعناصر الإرصاد الجوية في منطقة معينة (Muluneh, 2021). والنظام المناخي هو نظام معقد وتفاعلي يتكون من الغلاف الجوي وسطح الأرض والثلوج والجليد والمحيطات وغيرها من المسطحات المائية والكائنات الحية. حيث أن الغلاف الجوي من النظام المناخي هو الذي يميز المناخ بشكل واضح. ويتطور النظام المناخي مع مرور الوقت تحت تأثير ديناميكياته الداخلية وبسبب التغيرات في العوامل الخارجية التي تؤثر عليه. تشمل التأثيرات الخارجية الظواهر الطبيعية مثل الانفجارات البركانية والتغيرات الشمسية، وكذلك التي يسببها الإنسان مثل التغيرات في تكوين الغلاف الجوي. وتطور النظام المناخي مرتبطاً بالتوازن الإشعاعي للأرض. فالإشعاع الشمسي يدعم النظام المناخي، باعتبار أن الشمس هي المصدر الرئيسي للطاقة في الكون. وهناك ثلاث طرق أساسية لتغيير التوازن الإشعاعي للأرض هي: الطاقة الشمسية الواردة (مثل التغيرات في مدار الأرض أو في الشمس نفسها)، وتغيير جزء الإشعاع الشمسي المنعكس (مثل التغيرات في الغطاء السحابي، أو جزيئات الغلاف الجوي أو الغطاء النباتي)، وتغيير إشعاع الموجة الطويلة من الأرض نحو الفضاء (مثل تغيير تركيزات الغازات الدفيئة) (IPCC, 2007).

يمتد تاريخ تغير المناخ لملايين السنين مع حدوث تغيرات طبيعية عبر تاريخ الأرض. وفي القرون الأخيرة، ساهمت الأنشطة البشرية بشكل كبير في تسريع تغير المناخ. قبل الثورة الصناعية في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر، كان تغير المناخ مرتبطاً بالعوامل الطبيعية مثل الانفجارات البركانية، والتغيرات في الإشعاع الشمسي، والتغيرات في مدار الأرض. تسبب ذلك في تقلب في درجات الحرارة العالمية وأنماط المناخ على مدى فترات طويلة. فكانت الثورة الصناعية بمثابة نقطة تحول في تغير المناخ الناجم عن النشاط البشري.

ويظل تغير المناخ والتدهور البيئي، بما في ذلك فقدان التنوع الحيوي، من أكبر التحديات التي تواجهها الأجيال الحالية والمستقبلية (Nguyen et al., 2023). يوثق التقرير الصادر عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC, 2022) التأثيرات الواسعة النطاق والمنتشرة لتغير المناخ على البشر والأنظمة البيئية والاجتماعية ويشير إلى أننا على استعداد لتجاوز عتبة 1.5 م° بحلول عام 2040. وفي الوقت نفسه، تم الإبلاغ عن تدهور أو استنفاد الموارد الطبيعية مثل الأراضي والغابات والمياه بشكل متزايد، كما أن المزيد من أنواع الكائنات الحية مهددة بالانقراض العالمي أكثر من أي وقت مضى بسبب التغيرات المناخية (Feng et al., 2022). وللتخفيف من أثر تغير المناخ، يجب أن تعمل المزيد من الأراضي كمخزن للكربون عن طريق استخراج CO_2 من الغلاف الجوي، في حين يتطلب الحفاظ على التنوع البيولوجي حماية المزيد من الأراضي واستعادتها. تثير معضلة تغير المناخ والتدهور البيئي العديد من المخاوف الأمنية لأنها تزيد بشكل كبير من احتمالية انعدام الأمن الغذائي، والصراعات، والجرائم، والهجرة والنزوح القسري (Hermans and McLeman, 2021). وهذا يعرض الأمن الفردي والمجتمعي والوطني للخطر.

استطاعت المجتمعات البشرية على مر العصور أن تتأقلم مع التغيرات المناخية. ولكن التغيرات المتطرفة في المناخ هي التي أثرت على المجتمعات البشرية مما جعلها تهتم أكثر بالتغيرات المناخية لأن تأثيرها ليس على بيئة هذه المجتمعات فقط وإنما على النواحي الاقتصادية والاجتماعية لها. هذه التغيرات المتطرفة في المناخ أوضحت جوانب الضعف في النظم البيئية والمجتمعات البشرية. ذلك لأن التغيرات المناخية وأسبابها وآثارها مرتبطة بالتنمية الاقتصادية والاجتماعية للمجتمعات البشرية (شكل 1) (Houghton, 2009). فتلعب التنمية الاجتماعية والاقتصادية دورًا حاسمًا في تحديد مدى تعرض المجتمع لتغير المناخ. فغالبًا ما تفتقر البلدان ذات مستويات التنمية المنخفضة إلى الموارد والبنية التحتية اللازمة للتكيف مع مظاهر تغير المناخ والتخفيف من آثارها. بالإضافة إلى ذلك، تتأثر المجتمعات المهمشة داخل البلدان المتقدمة بشكل غير متناسب بتغير المناخ بسبب محدودية الوصول إلى الموارد وأنظمة الحماية الاجتماعية.



شكل 1: العلاقة بين التغيرات المناخية وأسبابها و آثارها والتنمية الاجتماعية والاقتصادية. الشكل مقتبس من هوقتون (Houghton، 2009).

تهدف هذه الدراسة كمراجعة أدبية (Review Article) إلى تسليط الضوء على مشكلة التغيرات المناخية وآثارها على عناصر البيئة الرئيسية: الكائنات الحية والماء والهواء والتربة. وتعتمد منهجية هذه الدراسة على جمع معلومات موثقة من مصادر علمية معتمدة وتوثيقها باللغة العربية لمساعدة الباحث العربي في مجالات المناخ والبيئة والزراعة. ويعتمد تسلسل المواضيع في هذه الورقة على إظهار أهمية دراسة ظاهرة التغيرات المناخية، وأسبابها، وأثرها على عناصر البيئة الرئيسية: الكائنات الحية والماء والهواء والتربة.

2. مظاهر تغير المناخ العالمي

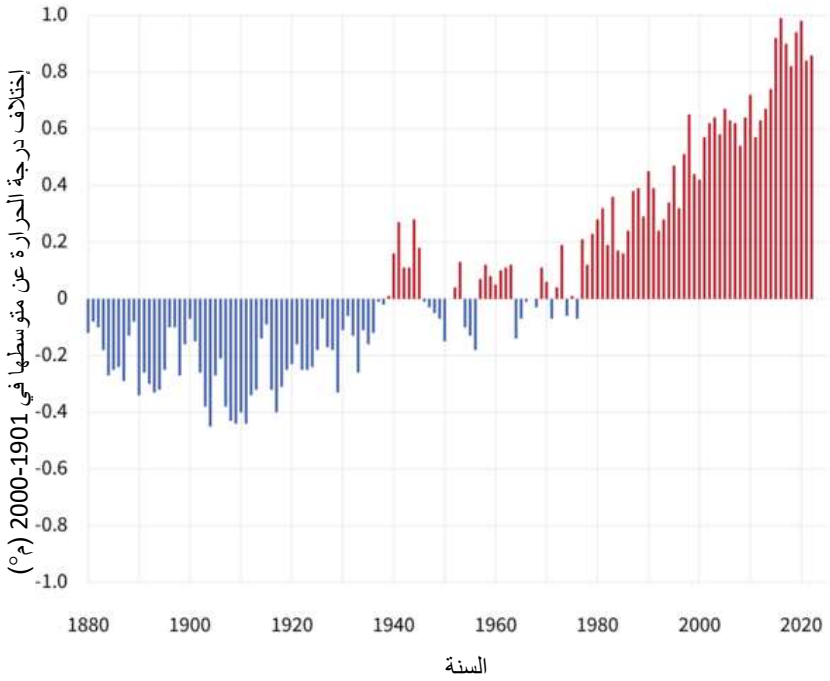
توجد مجموعة من المظاهر الدالة على التغيرات المناخية. هذه المظاهر تشمل ارتفاع درجات الحرارة (شكل 2) وموجات الحر والأحداث الجوية المتطرفة. فخلال القرن الماضي، ارتفع متوسط درجة حرارة الأرض بحوالي درجة مئوية واحد بحسب الأكاديمية الوطنية للعلوم (National Academy of Sciences, 2020). قد يبدو هذا غير مهم، ولكن التغيرات الصغيرة في درجات الحرارة يمكن أن يكون لها آثار عميقة على النظم البيئية. والسبب الأول في ارتفاع متوسط درجة حرارة الأرض هو الأنشطة البشرية مثل حرق الوقود الأحفوري وإزالة الغابات. ويرتبط هذا الارتفاع في درجات الحرارة بشكل مباشر بظاهرة الاحتباس الحراري، حيث تحبس بعض الغازات الحرارة في الغلاف الجوي. ويؤدي ارتفاع درجات الحرارة إلى ذوبان القمم الجليدية القطبية، مما يؤدي إلى ارتفاع مستوى سطح البحر (شكل 3). فيقدر ارتفاع منسوب سطح البحر ب 16 سم منذ سنة 1902 (National Academy of Sciences, 2020).

أصبحت موجات الحر، التي تُعرف بأنها فترات طويلة من الطقس الحار المفرط، أكثر تواتراً وشدة في السنوات الأخيرة. وقد أدى ارتفاع انبعاثات الغازات الدفيئة إلى تفاقم احتمال حدوث أحداث الحرارة الشديدة، مما يجعلها أكثر شدة وأطول. تشكل أحداث الحرارة الشديدة مخاطر كبيرة على صحة الإنسان والزراعة والنظم البيئية. فيمكن أن تؤدي درجات الحرارة المتزايدة إلى الإرهاق الحراري، وضربة الشمس، وتفاقم الظروف الصحية الحالية.

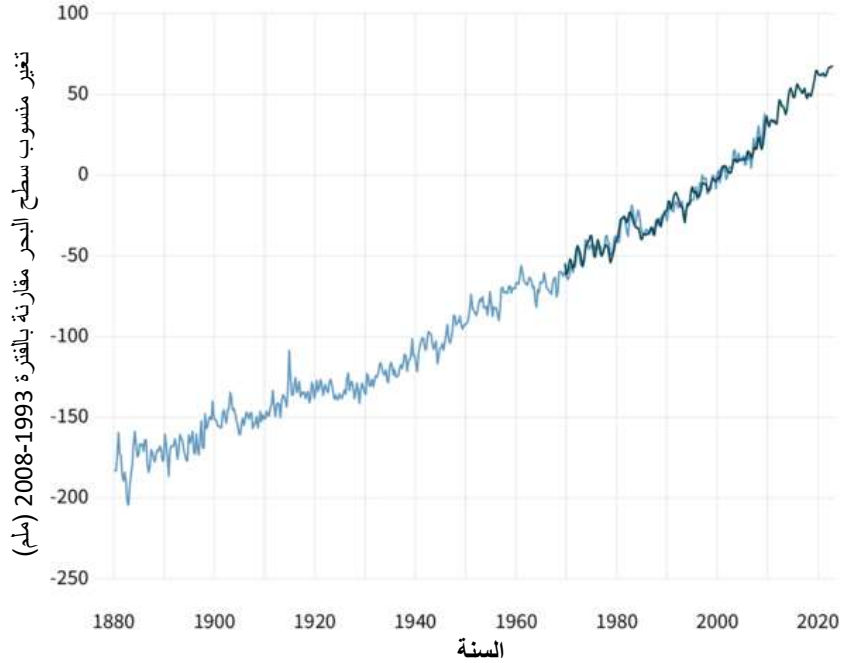
3. أسباب حدوث التغيرات المناخية

يحدث تغير المناخ بسبب الأنشطة البشرية التي تطلق الغازات الدفيئة في الغلاف الجوي. يعتبر حرق الوقود الأحفوري مثل الفحم والنفط والغاز الطبيعي لإنتاج الطاقة والنقل والعمليات الصناعية السبب الرئيسي في ارتفاع تركيز الغازات الدفيئة وتغير المناخ. الغازات الدفيئة هي غازات تحبس الحرارة في الغلاف الجوي للأرض، مما يساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري والتأثير على المناخ. وتشمل الغازات الدفيئة الرئيسية: ثاني أكسيد الكربون (CO_2) والميثان (CH_4) وأكسيد النيتروز (N_2O) والغازات المفلورة. فعندما يصل ضوء الشمس إلى

سطح الأرض، يتم امتصاص بعضاً منه مما يؤدي إلى تدفئة الكوكب. ثم تشع الأرض الحرارة مرة أخرى إلى الفضاء. ومع ذلك، فإن الغازات الدفيئة الموجودة في الغلاف الجوي تمتص وتعيد إطلاق بعض



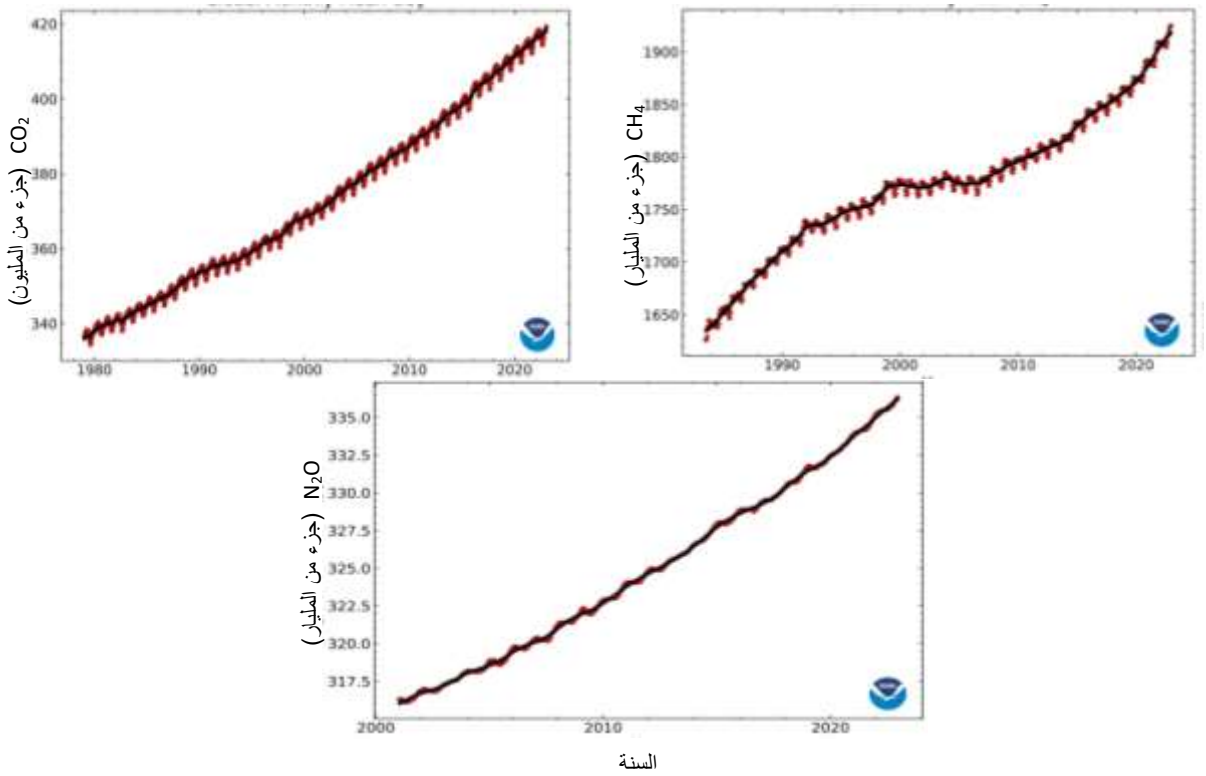
شكل 2: اختلاف درجة الحرارة السنوية العالمية لسطح الأرض عن متوسطها في الفترة 1901-2000. الاختلاف كان سلبياً في فترة بداية القرن العشرين ثم أصبح إيجابياً منذ 1980. الشكل مقتبس من موقع Climate.gov بتاريخ 2024/01/01. https://www.climate.gov



شكل 3: تغير منسوب سطح البحر السنوي مقارنة بمتوسط منسوبه في الفترة 1993-2008. الشكل مقتبس من موقع Climate.gov. بتاريخ 2024/01/01. https://www.climate.gov/

هذه الحرارة المنبعثة مما يؤدي إلى احتجازها في الغلاف الجوي والتسبب في ارتفاع درجة الحرارة. وهذا مشابه لكيفية حبس البيوت الزجاجية المستخدمة في الزراعة للحرارة والحفاظ على درجة حرارة عالية داخلها. يؤدي التركيز المتزايد للغازات الدفيئة (شكل 4)، والذي

يرجع سببه إلى الأنشطة البشرية، إلى تكثيف تأثير ظاهرة البيوت الزجاجية وهذا يؤدي إلى احتجاز أكبر للحرارة، مما يؤدي إلى ظاهرة الاحتباس الحراري وتغير المناخ (Mikhaylov et al., 2020).



شكل 4: تركيز غازات CO_2 و CH_4 و N_2O في الهواء الجوي. الشكل مقتبس من موقع Natinatl Oceanic and Atmospheric Adminstration بتاريخ 2024/01/01. https://www.noaa.gov/news-release/greenhouse-gases-continued-to-increase-rapidly-in- 2022

الشمس هي المصدر الرئيسي للطاقة في الكون. فحوالي 30% من ضوء الشمس الذي يصل إلى أعلى الغلاف الجوي ينعكس عائداً إلى الفضاء. وما يقرب من ثلثي هذا الانعكاس يرجع إلى السحب الصغيرة والجسيمات الموجودة في الغلاف الجوي المعروفة باسم الهباء الجوي. تعكس مناطق سطح الأرض، مثل الثلوج والجليد والصحاري، الثلث المتبقي من ضوء الشمس. ويتم امتصاص الطاقة التي لا تنعكس إلى الفضاء عن طريق سطح الأرض والغلاف الجوي. لتحقيق التوازن في الطاقة الواردة، يجب أن تشع الأرض بنفس الكمية من الطاقة إلى الفضاء. يحدث ذلك عن طريق انبعاث إشعاع الموجة الطويلة من جميع الأجسام على الكرة الأرضية بما فيها الغازات. فالسبب وراء دفء سطح الأرض هو وجود الغازات الدفيئة، والتي تعمل كغطاء جزئي للموجات الطويلة للإشعاع القادم من سطح الأرض. تُعرف هذه التغطية باسم تأثير الاحتباس الحراري الطبيعي. فالأنشطة البشرية تكثف تأثير التغطية من خلال إطلاق الغازات الدفيئة. على سبيل المثال يبلغ ارتفاع CO_2 في الغلاف الجوي بنسبة 35% في العصر الصناعي، ومن المعروف أن هذه الزيادة ترجع إلى أنشطة الإنسان، وخاصة حرق الوقود الأحفوري وإزالة الغابات. وهكذا، غيرت البشرية بشكل كبير التركيب الكيميائي للغلاف الجوي العالمي وساهمت في الآثار المترتبة على المناخ (Houghton, 2009).

يمكن أن تساهم إزالة الغابات في تغير المناخ بعدة طرق. حيث تعمل الغابات كمصارف للكربون، بمعنى أنها تمتص وتخزن CO_2 من الغلاف الجوي. عندما تتم إزالة الغابات أو حرقها، يتم إطلاق الكربون المخزن مرة أخرى إلى الغلاف الجوي على شكل CO_2، وهو أحد الغازات الدفيئة التي تساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري. بالإضافة إلى ذلك، تلعب الغابات دورًا حاسمًا في تنظيم المناخ المحلي والإقليمي من خلال التأثير على درجات الحرارة والرطوبة وأنماط هطول الأمطار. فتؤدي إزالة الغابات إلى تعطيل عمليات تنظيم المناخ، مما يؤدي إلى تغيرات في أنماط الطقس وربما يؤدي إلى تفاقم الظواهر المناخية المتطرفة. ومع أن إزالة الغابات تعد عاملاً مهمًا في تغير المناخ، إلا أنها مجرد قطعة واحدة من أحجية معقدة تتضمن أنشطة بشرية وعمليات طبيعية أخرى.

يمكن للأنشطة الزراعية أن تساهم في تغير المناخ بعدة طرق، منها إطلاق الغازات الدفيئة، مثل CO_2 وCH_4 وN_2O خلال الممارسات الزراعية المختلفة. على سبيل المثال، يمكن أن يؤدي استخدام الأسمدة النيتروجينية إلى انبعاث N_2O، وهو أحد الغازات الدفيئة القوية. بالإضافة إلى ذلك، يمكن لبعض الممارسات الزراعية، مثل زراعة الأرز وتربية الماشية، أن تنتج كميات كبيرة من غاز CH_4. تنتج الماشية

غاز CH_4 أثناء عملية الهضم وتحلل مخلفاتها. وأخيرا، يمكن للتغيرات في استخدام الأراضي لأغراض الزراعة أن تؤثر أيضا على تغير المناخ. إن تحويل الغابات أو الأراضي العشبية إلى أراضٍ زراعية يقلل من قدرة هذه النظم البيئية على امتصاص CO_2 من خلال عملية التمثيل الضوئي، مما يؤدي إلى زيادة مستويات CO_2 في الغلاف الجوي (Kreba et al., 2013). من الملاحظ أنه ليست كل الأنشطة الزراعية تساهم سلبًا في تغير المناخ. فيمكن للممارسات الزراعية المستدامة، مثل الزراعة العضوية والزراعة الدقيقة، أن تساعد في التخفيف من تغير المناخ عن طريق الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة وتعزيز حفظ الكربون.

4. أثر التغيرات المناخية على الكائنات الحية

أحد الدروس الأساسية المستفادة من علم البيئة هو أن أنماط المناخ تؤثر بقوة على توزيع ووفرة الكائنات الحية. إن تأثيرات تغير المناخ على الكائنات الحية واسعة ومتعددة الأوجه، وتشمل التأثير على النظم البيئية والتفاعلات بين الأنواع. في السنوات الأخيرة، سلط البحث العلمي الضوء على الآثار البيولوجية الكبيرة لتغير المناخ وعلى الحاجة الملحة إلى اتخاذ إجراءات للتخفيف من آثاره.

1.4. التنوع الحيوي

يقصد بالتغير في التنوع الحيوي هو التغير في أعداد وأنواع الكائنات الحية. فيمكن أن يؤدي ارتفاع درجات الحرارة وتركيز غاز CO_2 وتغير أنماط هطول الأمطار والآثار المترتبة عليه من فيضانات وجفاف إلى تغيرات في ملاءمة العوائل، مما يجبر أنواع الكائنات الحية على الهجرة إلى مناطق أكثر ملاءمة. وهذا يمكن أن يعطل التفاعلات البيئية، ويؤثر على العلاقات بين المفترس والفريسة، وربما يؤدي إلى انقراض أنواع معينة (Parmesan and Yohe, 2003). حيث أشار توماس وآخرون (Thomas et al., 2004) إلى أن تغير المناخ قد يؤدي إلى انقراض أكثر من مليون نوع من الكائنات الحية على الأرض خلال الخمسين عامًا القادمة. وأوضح مولونه (Muluneh, 2021) أنه سيحتاج أكبر عدد من الأنواع التي يزيد عمرها عن 50 إلى 100 عام إلى الهجرة بسرعة لمواكبة الظروف المتغيرة أو مواجهة الانقراض بسبب التغيرات المناخية. وتشير التقديرات إلى أن الأرض تفقد الأنواع بمعدل ثلاثة كل ساعة و 30 ألف نوع سنويًا (Wilson and Peter, 1988). ولذلك، فإن ما يقرب من 99.9% من الحياة التي كانت موجودة على الأرض قد انقرضت في الماضي بسبب عوامل طبيعية ومن صنع الإنسان (Parker et al., 2000). ومع ذلك، تشير التقديرات إلى أن معدلات الانقراض الحالية أسرع بـ 100 إلى 1000 مرة (Pimm et al., 1995) ويقدَّر أن 17-35% من الأنواع الموجودة على الأرض سوف تنقرض خلال المائة عام القادمة (Muluneh،2021). درس حبيب الله وآخرون (Habibullah et al.،2021) تأثير التغيرات المناخية على التنوع الحيوي في 115 دولة، ووجدوا أن تأثير التغيرات في الحرارة والأمطار على التنوع الحيوي أكبر من تأثير الكوارث الطبيعية. وأرجعوا الأثر السلبي للتغيرات المناخية على التنوع الحيوي إلى تطور التنمية الاقتصادية العالمية. كذلك أظهرت الدراسات أن تغير المناخ يمكن أن يؤثر على التنوع الحيوي عن طريق تغيير دورات الحياة وتطوير سمات فيزيائية وتغيير نطاقات العوائل وتوزيع الأنواع، والتغيرات في الوفرة وأنماط الهجرة وتواتر وشدة الآفات المسببة في انتشار الأمراض (Reed, 2012; Hui, 2013; Sintayehu, 2018).

إن أنواع التأثيرات التي سيحدثها تغير المناخ على الأنظمة الحية لها عواقب بعيدة المدى على النظم البيئية الطبيعية وعلى الأشخاص الذين يعتمدون على السلع والخدمات التي توفرها النظم البيئية (McCarty et al., 2009). ويمكن التنبؤ بتوزيع أنواع النباتات والحيوانات أو المناطق الأحيائية حول العالم من خلال الأنماط المناخية. إن المناخ الذي يعيش فيه الكائن الحي هو الذي يحدد تفاصيل تحدي البقاء، وقد طورت الكائنات الحية العديد من وسائل التكيف للتعامل مع البيئات المعادية. لا تتعرض الكائنات الحية لمتوسط درجات الحرارة وظروف الرطوبة فحسب، بل تتعرض أيضًا للتقلبات المرتبطة بالمواسم والأحداث المتطرفة. تتعامل النباتات والحيوانات مع تنوع البيئة بطرق عديدة. فتنتقل بعض الحيوانات إلى مناطق جغرافية مختلفة لتجنب الظروف القاسية. يمكن لكل من النباتات والحيوانات أن تقلل من النشاط عندما تكون الظروف شديدة للغاية مثل السبات في الحيوانات والشيخوخة في النباتات.

2.4. التحولات الفينولوجية

يمكن لتغير المناخ أن يؤثر على توقيت الأحداث البيولوجية، مثل الإزهار والهجرة والسبات. فتعتمد العديد من الأنواع على إشارات بيئية محددة لبدء هذه الأحداث، وأي تغيير في هذه الإشارات يمكن أن يكون له آثار ضارة على بقائها وتكاثرها (Thackeray et al., 2016). إن لارتفاع درجات الحرارة العالمية بسبب تغير المناخ تأثيراً مباشراً على هذه التحولات الفينولوجية. يمكن أن تؤدي درجات الحرارة الأكثر دفئًا إلى تسريع بداية فصل الربيع، مما يؤدي إلى الإزهار ونمو الأوراق في وقت مبكر في العديد من أنواع النباتات. وعلى العكس من ذلك، قد يؤدي تأخر الصقيع في الخريف إلى تمديد موسم النمو، مما يؤثر على توقيت شيخوخة الأوراق ونضج الثمار. يمكن لهذه التحولات أن تعطل التوازن الدقيق بين تفاعلات الأنواع، ويكون لها تأثيرات متتالية على النظم البيئية بأكملها (Parmesan, 2007). كما يؤثر تغير المناخ أيضًا على أنماط هطول الأمطار، والتي يمكن أن تؤثر بشكل كبير على الأحداث الفينولوجية. يمكن للتغيرات في أنماط هطول الأمطار، مثل زيادة تواتر حالات الجفاف أو هطول الأمطار الغزيرة- أن تعطل توفر الموارد المائية للنباتات والحيوانات. يؤدي هذا إلى تأخير أو تقليل الإزهار وإنبات

البذور وأنماط الهجرة، مما يؤثر في النهاية على التوقيت الفينولوجي العام (Thackeray et al., 2016). ويمكن للتحولات الفينولوجية الناجمة عن تغير المناخ أن تعطل التزامن بين الأنواع المتفاعلة. على سبيل المثال، إذا أزهرت النباتات في وقت مبكر من وصول الملقحات، فقد يؤدي ذلك إلى انخفاض نجاح التلقيح وانخفاض لاحق في أعداد النباتات. وبالمثل، فإن التغيرات في توقيت الهجرة يمكن أن تؤثر على العلاقات بين المفترس والفريسة، مما يؤثر على توفر الغذاء وديناميكيات السكان (Menzel et al., 2006). كما يمكن أن تؤدي التحولات الفينولوجية الناجمة عن تغير المناخ أيضًا إلى تغيرات في النطاق وانتشار الأنواع الغازية. فمع ارتفاع درجات الحرارة، قد تحول الأنواع توزيعها إلى خطوط العرض أو الارتفاعات الأعلى بحثًا عن الظروف المناخية المناسبة. وهذا يمكن أن يؤدي إلى تغييرات في تكوين المجتمع وتفاعلاته، مما قد يؤدي إلى تفضيل الأنواع الغازية التي تتكيف بشكل أفضل مع الظروف الجديدة (Cleland et al., 2007).

هذه التغيرات الفينولوجية والمتأثرة بالتغيرات المناخية تم رصدها في العديد من الكائنات الحية وفي أماكن متعددة. على سبيل المثال، درس أمانو وآخرون (Amano et al., 2010) تأثير التغيرات المناخية على التحولات الفينولوجية ل 405 صنف من النباتات لمدة 250 سنة في المملكة المتحدة. وجدوا أن الأحداث الفينولوجية أصبحت تحدث مبكرا بمقدار 2.2-12.7 يوماً في آخر 25 سنة. كذلك وجدوا أن موعد الإزهار أصبح أبكر بمعدل 5 أيام لكل ارتفاع درجة مئوية واحدة في درجة الحرارة. كذلك وجد فيزر وآخرون (Visser et al., 2005) أن بعض طيور الغابات تعتمد في تغذية فراخها على نوع معين من اليرقات الذي يتوافر في وقت قصير أثناء الربيع. بذلك يكون وقت تكاثر هذه الطيور يعتمد على وقت توافر اليرقات المغذية لصغارها. لوحظ أن هذه اليرقات قد تأثرت بالتغيرات المناخية، حيث أن كتلتها الحية أصبحت تتوافر بغزارة قبل موسمها المعتاد خلال آخر 39 سنة في المملكة المتحدة وهولندا. وبذلك أثر هذا التحول الفينولوجي على موسم تكاثر طيور الغابات. كذلك وجد تاكراي وآخرون (Thackeray et al., 2011) أن دورة حياة نوع من العوالق (Daphnia galeata) التي تعيش في المياه العذبة في المملكة المتحدة تأثرت بالتغيرات المناخية خلال الفترة من 1934 إلى 2009. حيث أن موسم تكاثر هذه العوالق أصبح أبكر في فصل الربيع. وقد أرجعوا سبب هذا التغير الفينولوجي في دورة حياة هذه العوالق إلى التغير في موسم ارتفاع درجة حرارة المياه.

3.4. تبييض المرجان

تعد الشعاب المرجانية من بين النظم البيئية الأكثر تنوعًا وإنتاجية على وجه الأرض، حيث توفر موطناً لعدد لا يحصى من الأنواع البحرية وتدعم سبل عيش ملايين الأشخاص (Hughes et al., 2018) ، وواحدة من أكثر العواقب وضوحا وتدميرا لتغير المناخ على الشعاب المرجانية هي ابيضاض المرجان. فقد تدهورت 27% من الشعاب المرجانية في العالم بسبب ارتفاع درجة حرارة المياه، وكان السبب الرئيسي هو تبييض المرجان المرتبط بالمناخ في عام 1998 (Sala et al., 2000). ويحدث تبييض المرجان عندما تقوم الشعاب المرجانية بطرد الطحالب التكافلية (*Zooxanthellae*) التي تعيش داخل أنسجتها، نتيجة لارتفاع درجة حرارة الماء مما يؤدي إلى تحولها إلى اللون الأبيض أو الشاحب. تزود هذه الطحالب الشعاب المرجانية بالعناصر الغذائية الأساسية من خلال عملية التمثيل الضوئي، وفقدانها يضعف الشعاب المرجانية، مما يجعلها أكثر عرضة للأمراض والموت (Hoegh-Guldberg et al., 2007).

ومن النتائج الأخرى لتغير المناخ هو زيادة حموضة المحيطات، فتعيق المياه الحمضية قدرة الشعاب المرجانية على بناء هياكلها العظمية من كربونات الكالسيوم، مما يجعلها أكثر عرضة للابيضاض وتثبيط قدرتها على التعافي. إن تبييض المرجان له عواقب بيئية بعيدة المدى. فعندما تموت الشعاب المرجانية، تتعطل النظم البيئية بأكملها التي تعتمد عليها في الغذاء والمأوى. فتنخفض أعداد الأسماك، مما يؤدي إلى فقدان التنوع البيولوجي وانخفاض إنتاجية مصايد الأسماك. بالإضافة إلى ذلك، تواجه المجتمعات الساحلية التي تعتمد على الشعاب المرجانية للسياحة وحماية السواحل تحديات اقتصادية واجتماعية.

4.4. توسيع نطاق نو اقل الأمراض

يمكن أن يؤثر تغير المناخ على توزيع ووفرة نواقل الأمراض، مثل البعوض والقراد. تخلق درجات الحرارة الأكثر دفئًا وأنماط هطول الأمطار المتغيرة ظروفاً مواتية لازدهار هذه النواقل وتوسيع نطاقها. وهذا يمكن أن يؤدي إلى زيادة تفشي الأمراض المنقولة بالنواقل، بما في ذلك الملاريا (Malaria) وحمى الضنك (Dengue Fever) ومرض لايم (Semenza and Menne, 2009). يمكن لدرجات الحرارة الأكثر دفئاً وزيادة الرطوبة أن تخلق ظروفًا أكثر ملاءمة لبقاء نواقل الأمراض وتكاثرها. ونتيجة لذلك، تعمل هذه الكائنات على توسيع نطاقاتها الجغرافية، وتنتقل إلى مناطق لم تكن متأثرة في السابق بأمراض معينة. يعد البعوض من أشهر نواقل الأمراض، فهو المسؤول عن نقل الأمراض مثل الملاريا وحمى الضنك وفيروس زيكا (Zika Virus)، وفيروس غرب النيل (West Nile Virus). يمكن أن يؤثر ارتفاع درجات الحرارة وتغير أنماط هطول الأمطار على موائل تكاثر البعوض، مما يسمح له بالازدهار في مناطق جديدة. ويزيد هذا التوسع من خطر انتقال المرض إلى السكان الذين لم يتأثروا من قبل. يمكن أن يؤثر تغير المناخ أيضًا على ناقلات الأمراض الأخرى، مثل القراد وذبابة الرمل والبراغيث والقوارض. هذه الكائنات هي المسؤولة عن نقل الأمراض مثل داء الليشمانيات (Leishmaniasis) والطاعون (Plague) وفيروس هانتا (Hanta

Virus). يمكن أن تؤدي التغيرات في درجات الحرارة وهطول الأمطار إلى تغيير موائلها وزيادة عددها، مما يؤدي إلى انتشار هذه الأمراض في مناطق جديدة.

5.4. الإنتاجية الزراعية

يفرض تغير المناخ تحديات كبيرة على الأمن الغذائي العالمي. يمكن أن تؤثر التغيرات في درجات الحرارة وهطول الأمطار والظواهر الجوية المتطرفة على غلات المحاصيل وإنتاج الماشية والنظم الزراعية بشكل عام. وهذا يمكن أن يؤدي إلى نقص الغذاء، وارتفاع أسعار المواد الغذائية، وعدم الاستقرار الاجتماعي والاقتصادي المحتمل (Lobell et al., 2013). فارتفاع درجات الحرارة يؤدي إلى تسريع نمو المحاصيل، مما يؤدي إلى مواسم نمو قصيرة وانخفاض الغلة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يؤثر الإجهاد الحراري المتزايد سلبًا على تلقيح المحاصيل، مما يؤدي إلى انخفاض مجموعة الثمار وانخفاض الجودة (Lobell et al., 2013). فمثلا، أوضح لوبل وآخرون (Lobell et al., 2007) أن الإنتاج العالمي من القمح والشعير والذرة تأثر سلبا بسبب ارتفاع درجات الحرارة العالمية. وأوضحوا أن الانخفاض في إنتاج هذه المحاصيل بلغ 40 مليون طن في العام وبما يعادل 5 مليار دولار في سنة 2002. ويمكن أن يؤدي هطول الأمطار المفرط إلى انجراف التربة، والتشبع بالمياه، ورشح المغذيات، مما يؤدي إلى انخفاض إنتاج المحاصيل. وعلى العكس من ذلك، يمكن أن يؤدي الجفاف إلى ندرة المياه، وفشل المحاصيل، وانخفاض الإنتاج الزراعي (FAO, 2015). ويمكن لتغير المناخ أن يخل بالتوازن الدقيق بين الآفات والأمراض والمحاصيل. ويؤدي ارتفاع درجات الحرارة وتغير أنماط هطول الأمطار إلى خلق ظروف مواتية لانتشار الآفات والأمراض، مما يؤدي إلى زيادة الإصابة وتلف المحاصيل. وهذا يتطلب استخدام المزيد من المبيدات الحشرية ومبيدات الفطريات، التي يمكن أن يكون لها آثار بيئية وصحية ضارة (Gregory et al., 2009).

ويؤثر تغير المناخ أيضا على الإنتاج الحيواني (Thornton et al., 2009). فأوضح هوتون وآخرون (Hounghton et al., 2001) أن التأثيرات المباشرة الناجمة عن درجة حرارة الهواء والرطوبة وسرعة الرياح والعوامل المناخية الأخرى تؤثر على أداء الحيوان من نمو وإنتاج الحليب وإنتاج الصوف والتكاثر. كذلك توصل روتر وفان دي جين (Rotter and van de Geijn, 1999) إلى أن أثر التغيرات المناخية على الإنتاج الحيواني يتمثل في توافر الأعلاف والحبوب، وإنتاج محاصيل المراعي والأعلاف وجودتها، والصحة والنمو والتكاثر، والأمراض وانتشارها. قد تتأثر صحة الحيوان بتغير المناخ بأربع طرق هي: الأمراض المرتبطة بالحرارة والإجهاد، والظواهر الجوية المتطرفة، وتكيف أنظمة الإنتاج الحيواني مع البيئات الجديدة، وظهور أو عودة ظهور الأمراض المعدية، وخاصة الأمراض المنقولة بالنواقل والتي تعتمد بشكل كبير على الظروف البيئية والمناخية (Singh et al., 2012).

5. أثر التغيرات المناخية على الموارد المائية

يعد تغير المناخ ظاهرة عالمية مهمة لها عواقب بعيدة المدى بما في ذلك على الموارد المائية. ومع ارتفاع درجات الحرارة وعدم القدرة على التنبؤ بأنماط الطقس، أصبحت التأثيرات على توفر المياه وجودتها وتوزيعها أكثر وضوحا.

1.5. تغيير أنماط الهطول

يؤثر تغير المناخ على أنماط هطول الأمطار، مما يؤدي إلى هطول الأمطار بشكل متكرر ومكثف في بعض المناطق، بينما تعاني مناطق أخرى من فترات جفاف طويلة الأمد. تؤثر هذه التغييرات في دورة المياه الطبيعية، مما يؤثر على تجديد المياه الجوفية، وتوفر المياه السطحية، وتوافر المياه بشكل عام للاستهلاك البشري والزراعة والنظم البيئية (IPCC, 2014). تشير أنماط هطول الأمطار إلى توزيع وتواتر وشدة الأمطار وتساقط الثلوج وأشكال أخرى من الهطول في منطقة معينة خلال فترة محددة. وتشهد بعض المناطق هطول أمطار أكثر تواترا وشدة، مما يؤدي إلى زيادة خطر الفيضانات وانجراف التربة. وعلى العكس من ذلك، تواجه مناطق أخرى فترات جفاف طويلة الأمد، مما يؤثر على الزراعة وتوفر المياه والنظم البيئية. لقد أثر تغير المناخ أيضًا على توقيت ومدة هطول الأمطار الموسمية. ففي العديد من المناطق، أصبحت أنماط هطول الأمطار أكثر تقلباً، مع تغير مواسم الرياح الموسمية وتوزيع الأمطار بشكل غير منتظم. وهذا يعطل الدورات الزراعية، ويؤثر على غلات المحاصيل، ويشكل تحديات أمام إدارة الموارد المائية. وقد ساهم ارتفاع درجة حرارة المناخ في زيادة الظواهر الجوية المتطرفة، مثل الأعاصير والعواصف الشديدة. وغالبًا ما تؤدي هذه الأحداث إلى هطول أمطار غزيرة، فتؤدي إلى فيضانات وانهيارات أرضية. ومن المتوقع أن يزداد تواتر وشدة مثل هذه الأحداث مع استمرار تغير المناخ، مما يشكل مخاطر كبيرة على حياة البشر والبنية التحتية. تختلف تأثيرات أنماط هطول الأمطار المتغيرة باختلاف المناطق. على سبيل المثال، من المتوقع أن تشهد المناطق المعرضة بالفعل للجفاف، مثل البحر الأبيض المتوسط، حالات جفاف أكثر تواترا وشدة. وفي المقابل، فإن المناطق التي تشهد هطول أمطار غزيرة، مثل أجزاء من جنوب شرق آسيا، قد تواجه مخاطر متزايدة من الفيضانات والكوارث المرتبطة بالمياه.

2.5. ذوبان الأنهار الجليدية و انخفاض كثافة الثلوج

ويتسبب ارتفاع درجات الحرارة نتيجة للتغيرات المناخية في تسارع ذوبان الأنهار الجليدية وانخفاض كثافة الثلوج في المناطق الجبلية. تهدد هذه الظاهرة إمدادات المياه على المدى الطويل لملايين الأشخاص الذين يعتمدون على المياه الجليدية الذائبة لمياه الشرب والري وتوليد الطاقة الكهرومائية (Barnett et al., 2005). فالأنهار الجليدية تعتبر بمثابة خزانات طبيعية، حيث تخزن المياه العذبة وتطلقها ببطء مع مرور الوقت. ومع ذلك، أدى ارتفاع درجات الحرارة العالمية بسبب تغير المناخ إلى زيادة معدل ذوبان الأنهار الجليدية في جميع أنحاء العالم. وأدى تغير المناخ إلى انخفاض تساقط الثلوج وبداية فصل الربيع في وقت مبكر، مما أدى إلى انخفاض كثافة الثلوج. وهذا له آثار خطيرة على الموارد المائية والنظم البيئية والأنشطة البشرية مثل الزراعة والطاقة الكهرومائية. إن ذوبان الأنهار الجليدية وانخفاض كتلة الثلوج لهما آثار كبيرة على الموارد المائية. فتساهم المياه الذائبة في الأنهار الجليدية في تدفق الأنهار وتحافظ على النظم الإيكولوجية في مجرى النهر والسكان. وتوفر الأنهار الجليدية والثلوج موائل أساسية لمختلف الأنواع النباتية والحيوانية، وخاصة في المناطق المرتفعة. إن فقدان هذه العوائل بسبب ذوبان الأنهار الجليدية وانخفاض كتلة الثلوج يؤدي إلى تعطيل النظم البيئية ويهدد التنوع البيولوجي. فقد تواجه الأنواع التي تعتمد على البيئات الباردة خطر الانقراض أو الهجرة القسرية إلى ارتفاعات أعلى، حيث تكون العوائل المناسبة محدودة (Hock, 2019).

3.5. ارتفاع مستوى سطح البحر وتسرب المياه المالحة

مع ارتفاع درجات الحرارة العالمية، ترتفع مستويات سطح البحر أيضًا بسبب ذوبان القمم الجليدية القطبية والتمدد الحراري لمياه البحر. ومن المتوقع أن ترتفع مستويات سطح البحر العالمية بمقدار 0.26 إلى 0.77 متراً بحلول نهاية القرن إذا استمرت انبعاثات الغازات الدفيئة (IPCC, 2019). يساهم ارتفاع مستويات سطح البحر في زيادة التآكل الساحلي، مما يؤدي إلى فقدان الأراضي والبنية التحتية. والمناطق المعرضة للخطر بشكل خاص هي الجزر المنخفضة ومناطق الدلتا. كما يؤدي ارتفاع مستويات سطح البحر إلى تكثيف وتيرة وشدة أحداث الفيضانات الساحلية. وهذا يعرض المجتمعات الساحلية، بما في ذلك المدن الكبرى، لخطر الفيضانات بشكل أكبر، مما يؤدي إلى تلف الممتلكات والنزوح وخسائر في الأرواح.

ومع ارتفاع مستوى سطح البحر، تتسرب المياه المالحة إلى مصادر المياه العذبة، مثل طبقات المياه الجوفية العذبة ومصبات الأنهار، مما يؤدي إلى تلوث إمدادات مياه الشرب والأراضي الزراعية (IPCC, 2019). يؤدي تسرب المياه المالحة كذلك إلى تعرض مصادر المياه العذبة للخطر، مما يجعلها غير صالحة للاستهلاك البشري. ويشكل هذا تهديدًا خطيرًا للمجتمعات الساحلية التي تعتمد على المياه الجوفية كمصدر أساسي لمياه الشرب. ويؤثر تسرب المياه المالحة على الإنتاج الزراعي، حيث يجعل التربة مالحة وغير صالحة للزراعة.

4.5. الإجهاد المائي

يؤدي تغير المناخ إلى تفاقم الإجهاد المائي وندرة المياه في العديد من المناطق، وخاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة. يؤدي ارتفاع درجات الحرارة وفترات الجفاف الطويلة إلى تقليل توفر المياه، مما يؤدي إلى صراعات على الموارد المحدودة للماء والإضرار بسبل عيش المجتمعات التي تعتمد على الزراعة والثروة الحيوانية (Wada et al., 2013). فمع استمرار ارتفاع درجات الحرارة العالمية، فإن زيادة معدلات التبخر لها تأثير مباشر على توفر المياه. يؤدي ارتفاع درجات الحرارة كذلك إلى زيادة معدلات التبخر من المسطحات المائية، مثل البحيرات والأنهار والخزانات، مما يؤدي إلى انخفاض في مستويات المياه وزيادة الإجهاد المائي. فمن المتوقع أن تزداد معدلات التبخر بنسبة 2-6٪ لكل درجة مئوية من ارتفاع الحرارة (IPCC, 2014).

تؤدي التغييرات المناخية إلى تعطيل دورة المياه الطبيعية، مما يجعل من الصعب إدارة الموارد المائية بشكل فعال. تشير تقديرات البنك الدولي إلى أنه بحلول عام 2050، سيعيش أكثر من 40% من سكان العالم في مناطق تعاني من نقص المياه (World Bank, 2016). ويؤثر انخفاض توفر المياه على غلات المحاصيل والإنتاج الحيواني. حيث تشير تقديرات منظمة الأغذية والزراعة إلى أنه بحلول عام 2050، سيزيد استهلاك المياه في الزراعة بنسبة 19%، مما سيؤدي إلى تفاقم الإجهاد المائي في المناطق الضعيفة بالفعل (FAO, 2015). ولزيادة الإجهاد المائي وندرة المياه عواقب اجتماعية واقتصادية وبيئية كبيرة. فيمكن أن تؤدي ندرة المياه إلى صراعات على موارد المياه، ونزوح السكان، وزيادة التعرض للأمراض المنقولة بالمياه. تؤثر معاناة النظم البيئية التي تعتمد على المياه، مثل الأراضي الرطبة وموائل المياه العذبة، على التنوع البيولوجي وخدمات النظم البيئية فيها.

5.5. نوعية المياه

قد يؤدي ارتفاع درجات الحرارة إلى تعزيز نمو وتكاثر الطحالب الضارة، مما يؤدي إلى تلوث مصادر مياه الشرب وتدهور النظم البيئية المائية. بالإضافة إلى ذلك، يمكن للتغيرات في أنماط هطول الأمطار أن تزيد من التآكل والترسيب وجريان الملوثات والمغذيات إلى

المسطحات المائية، مما يزيد من تعرض جودة المياه للخطر. مع استمرار ارتفاع درجات الحرارة العالمية، ترتفع درجات حرارة المياه أيضًا. تحتوي المياه الدافئة على كمية أقل من الأكسجين المذاب، مما يؤدي إلى انخفاض مستويات الأكسجين في النظم البيئية المائية. ويمكن أن يكون لذلك آثار ضارة على الأسماك والكائنات المائية الأخرى، مما يعطل دورات حياتها وصحتها العامة (IPCC, 2014). وعلى العكس من ذلك، يمكن أن يؤدي الجفاف إلى تركيز الملوثات في المسطحات المائية، مما يزيد من تعرض نوعية المياه للخطر (Vörösmarty et al., 2010). ومع ارتفاع مستوى سطح البحر بسبب التغيرات المناخية، يحدث تسرب المياه المالحة، مما يؤدي إلى تلوث مصادر المياه العذبة. ويتسبب تغير المناخ في زيادة تواتر وشدة الظواهر الجوية المتطرفة مثل الأعاصير والعواصف والفيضانات التي يمكن أن تؤدي إلى انتقال الملوثات إلى المسطحات المائية، بما في ذلك المواد الكيميائية من المنشآت الصناعية وأنظمة الصرف الصحي والجريان السطحي الزراعي (IPCC, 2012). ويؤدي تغير المناخ أيضًا إلى تحمض المحيطات الذي يؤثر سلباً على الحياة البحرية، بما في ذلك المحار والشعاب المرجانية والكائنات الحية الأخرى التي تعتمد على كربونات الكالسيوم في أصدافها وهياكلها العظمية (Doney et al., 2009).

6. أثر التغيرات المناخية على الهواء الجوي

الغلاف الجوي مهم لعدة أسباب أهمها أنه يزودنا بالهواء الذي نتنفسه، وهو يحتوي على غازات أساسية مثل الأكسجين والنيتروجين. كما أنه يعمل كطبقة واقية، تحمينا من الإشعاع الشمسي الضار والنيازك. كما أنه يؤثر على أنماط الطقس والمناخ، مما يؤثر على النظم البيئية والزراعة. بشكل عام، يعد الغلاف الجوي عنصرًا حيويًا لاستدامة الحياة والحفاظ على صلاحية الكوكب للسكن.

1.6. الخواص الكيميائية للهواء

يمكن لتغير المناخ أن يغير توزيع وتركيز الغازات الدفيئة، مثلاً CO_2 و CH_4، مما يؤدي إلى تعزيز تأثيرات هذه الغازات والاحتباس الحراري. ومع استمرار ارتفاع درجات الحرارة العالمية، فإنه يؤثر بشكل مباشر على التفاعلات الكيميائية التي تحدث في الغلاف الجوي. يمكن أن يؤدي ارتفاع درجات الحرارة إلى زيادة معدلات التفاعلات الكيميائية، فيؤدي إلى زيادة تركيزات بعض الملوثات مثل الأوزون (O_3) وأكاسيد النيتروجين (NO_x). ولهذه الملوثات آثار ضارة على صحة الإنسان وتساهم في تكوين الضباب الدخاني (IPCC, 2014). ويمكن أن تؤدي زيادة هطول الأمطار إلى إزالة الملوثات من الهواء، وتحسين جودة الهواء. وعلى العكس من ذلك، يمكن أن تؤدي ظروف الجفاف إلى تفاقم تلوث الهواء عن طريق تقليل تشتت الملوثات وزيادة تركيزها (Jacob and Winner, 2009). كذلك يؤثر تغير المناخ على أنماط حركة الغلاف الجوي، مثل أنماط الرياح وقوة التيارات الجوية. وهذه التغييرات تؤثر على نقل وانتشار الملوثات، مما يغير توزيعها وتركيزها في مناطق مختلفة. على سبيل المثال، يمكن أن تؤدي التغيرات في أنماط الرياح إلى انتقال الملوثات لمسافات طويلة، مما يؤثر على الجودة والتركيب الكيميائي للهواء في المناطق البعيدة عن مصادرها الأصلية (Fiore et al., 2015). تم ربط تغير المناخ بزيادة تواتر وشدة حرائق الغابات. فتطلق حرائق الغابات كميات كبيرة من الملوثات في الغلاف الجوي، مثل CO_2 وN_2O والجسيمات الدقيقة. يمكن أن يكون لهذه الملوثات تأثيرات كبيرة على جودة الهواء، فيؤدي إلى مشاكل في الجهاز التنفسي ومشاكل صحية أخرى (Liu et al., 2016).

2.6. الخواص الفيزيائية للهواء

يؤثر تغير المناخ على الخصائص الفيزيائية المختلفة للهواء، بما في ذلك درجة الحرارة والرطوبة وأنماط الرياح وهطول الأمطار. يؤدي ارتفاع درجات الحرارة العالمية إلى زيادة معدلات التبخر، مما يؤدي إلى ارتفاع محتوى بخار الماء في الغلاف الجوي. وهذا بدوره يؤدي إلى تكثيف دورة المياه، مما يؤدي إلى هطول الأمطار بشكل متكرر ومكثف. يمكن أن تؤثر التغيرات المناخية في أنماط الرياح وعلى انتشار ملوثات الهواء وانتشار المواد المسببة للحساسية والأمراض المنقولة بالهواء. مع ارتفاع درجات الحرارة، تكتسب جزيئات الهواء المزيد من الطاقة، مما يؤدي إلى زيادة الحركة الجزيئية وارتفاع متوسط الطاقة الحركية. ويؤدي ذلك إلى زيادة عامة في درجة حرارة الهواء، مما يؤثر على النظم البيئية وصحة الإنسان (IPCC, 2018). تؤثر الرطوبة المتزايدة على الخواص الفيزيائية للهواء عن طريق تغيير كثافته، والتوصيل الحراري، والسعة الحرارية. يمكن أن تؤثر هذه التغييرات على أنماط الطقس وهطول الأمطار والنظام المناخي العام (Held and Soden, 2006). ويمكن أن يؤثر تغير المناخ على أنماط ضغط الهواء، وذلك من خلال التغيرات في درجة الحرارة والرطوبة. يؤدي ارتفاع درجات الحرارة إلى تمدد جزيئات الهواء، مما يؤدي إلى انخفاض كثافة الهواء وما يتبع ذلك من تغيرات في ضغطه. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تؤثر التغيرات في مستويات الرطوبة على تدرجات ضغط الهواء، مما يؤثر على أنماط الرياح وحركة الغلاف الجوي (Seidel et al., 2008).

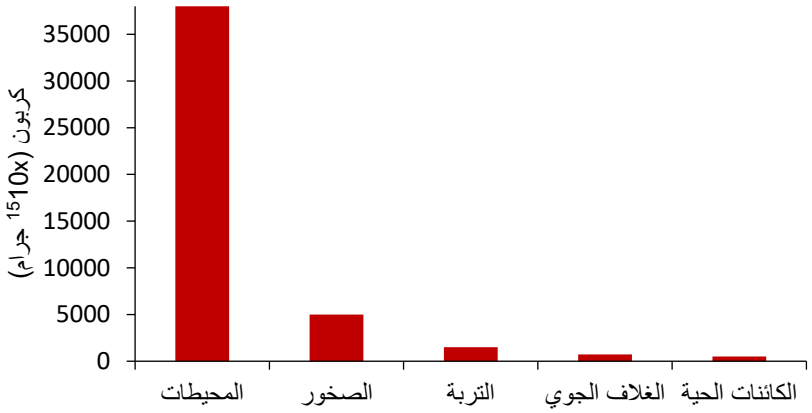
3.6. الخواص البيولوجية للهواء

يمكن أن تؤثر التغيرات في درجات الحرارة والرطوبة وأنماط هطول الأمطار على بقاء الكائنات الحية الدقيقة المسببة للأمراض وتكاثرها وانتشارها في الهواء الجوي، مما قد يؤدي إلى ظهور أو إعادة ظهور أمراض معينة (Altizer et al., 2013). ويمكن للتغيرات في درجات

الحرارة وأنماط هطول الأمطار أن تغير توزيع وسلوك النباتات والحشرات والكائنات الحية الأخرى، الذي بدوره يؤثر على تكوين المواد المسببة للحساسية المحمولة جواً، وانتشار الأمراض المنقولة بالنواقل، والتنوع البيولوجي الشامل للنظم البيئية. وقد تم ربط تغير المناخ بالتغيرات في أنماط التنوع البيولوجي، بما في ذلك التحولات في توزيع الأنواع والتغيرات في التوزيع السكاني. يمكن أن يكون لهذه التغيرات آثار مباشرة على تكوين الكيانات البيولوجية المحمولة جوا مثل حبوب اللقاح والجراثيم والكائنات الحية الدقيقة (IPCC, 2014). يمكن أن يؤثر ارتفاع درجات الحرارة وزيادة مستويات ثاني أكسيد الكربون على إنتاج وإطلاق المركبات المسببة للحساسية من النباتات. وهذا يمكن أن يؤدي إلى زيادة في انتشار وشدة الحساسية التنفسية والربو، مما يؤثر على صحة الإنسان (D'Amato et al., 2015).

7. أثر التغيرات المناخية على التربة

تلعب التربة- باعتبارها أحد عناصر البيئة الرئيسية وعنصراً حيوياً في المحيط الحيوي للأرض- دورًا حاسمًا في دعم نمو النبات، ودورة المغذيات، وصحة النظام البيئي بشكل عام. فتعتبر التربة مصدراً وحوضاً لتجميع الكربون في نفس الوقت، وهذا مايكسبها الأهمية في التغيرات المناخية. تحتوي التربة على مخزون كبير من الكربون (10^{15}x1500 جرام) في صورة مادة عضوية، ويعتبر هذا المخزون ضعف محتوى الغلاف الجوي (10^{15}x750 جرام) من CO_2 وثلاثة أضعاف ماهو موجود في النباتات (شكل 5). ولكن عبر التاريخ خسرت التربة جزءاً مهماً (10^{15}x90-40 جرام) من هذا المخزون لصالح الغلاف الجوي نتيجة لاستعمالاتها (Smith, 2012). إن ارتفاع تركيز CO_2 في الغلاف الجوي يؤدي إلى ارتفاع تركيز الكربون في التربة مما ينتج عنه ارتفاع نسبة الكربون إلى النيتروجين فيها، مما يؤدي إلى انخفاض معدل معدنة النيتروجين العضوي في التربة وهذا يؤثر على دورة النيتروجين بالإضافة إلى الكائنات الحية في التربة والنبات (Brevik, 2013).



شكل 5: التوزيع العالمي للكربون. الصخور تشمل الفحم الحجري وجميع صور الكربون الجيولوجية. الشكل مقتبس من شيلس وآخرون (Schils et al., 2008).

1.7. الخواص البيولوجية للتربة

لارتفاع درجات الحرارة المرتبطة بتغير المناخ تأثير مباشر على تنوع وتكوين ونشاط المجتمعات الميكروبية في التربة. ولهذه الميكروبات دور في أسباب التغيرات المناخية ودور في تخفيف أثرها. لميكروبات التربة مثل البكتيريا والفطريات قدرة على إنتاج واستهلاك جميع الغازات الدفيئة، NO و N_2O و CH_4 و CO_2. وبعبارة أخرى، فإن هذه الغازات هي ركائز أولية ومنتجات ثانوية لمسارات توليد الطاقة اللازمة للنمو الميكروبي وجزء لا يتجزأ من الدورات البيوجيوكيميائية الأساسية في النظام البيئي (Jansson et al., 2020). يمكن أن يؤدي ارتفاع درجات الحرارة بسبب التغيرات المناخية إلى زيادة معدلات التنفس الميكروبي، مما يؤدي إلى زيادة انبعاثات CO_2 من التربة. وهذا بدوره يمكن أن يساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري ويزيد من تفاقم تغير المناخ (Kreba et al., 2013). ويعد تنفس التربة ثاني أكبر تدفق للكربون في معظم النظم الإيكولوجية الأرضية بعد الإنتاج الأولي الإجمالي الذي يتم تثبيته عن طريق عملية التمثيل الضوئي للنبات، وقد يمثل حوالي 70٪ من إجمالي تنفس النظام البيئي في السنة. على الصعيد العالمي، يؤدي تنفس التربة إلى انبعاث حوالي 10^{15}x98 جرام من CO_2 سنويًا إلى الغلاف الجوي (Bond-Lamberty and Thomson, 2010). علاوة على ذلك، فإن تنفس التربة في الأراضي العشبية أكبر بحوالي 20% من الغابات، مما يدل على أن نوع الغطاء النباتي قد يعدل التأثيرات والضوابط اللاأحيائية والحيوية على تنفس التربة (Singh et al., 2011). من المعروف أن تنفس التربة هو أحد المقاييس المهمة لصحتها، لأنه يعكس قدرتها على دعم الحياة (الكائنات الحية وجذور النباتات) ويرتبط بشكل مباشر بوظائف أخرى، مثل تحلل المادة العضوية وتمعدن المغذيات والتثبيت والنشاط الميكروبي بشكل عام. تشير المعدلات السريعة لتنفس التربة إلى وجود نشاط بيولوجي مكثف فيها مع عواقب على نمو النبات والبيئة، من خلال زيادة معدل دورة المغذيات في التربة.

ويمكن للتغيرات في أنماط هطول الأمطار، بما في ذلك زيادة تواتر حالات الجفاف أو هطول الأمطار الغزيرة، أن تؤثر بشكل كبير على محتوى رطوبة التربة. حيث تلعب رطوبة التربة دورًا حاسمًا في دعم النشاط الميكروبي فيها، وتوفر العناصر الغذائية، وتحلل المواد العضوية. يمكن أن تؤدي ظروف الجفاف إلى انخفاض الكتلة الحيوية والنشاط الميكروبي في التربة، مما يؤثر على عمليات تدوير المغذيات وخصوبة التربة بشكل عام (Manzoni et al., 2012). ويمكن أن تتسبب الأحداث المتطرفة الناجمة عن تغير المناخ، مثل الفيضانات والعواصف، في انجراف التربة، مما يؤدي إلى فقدان التربة السطحية والمواد المغذية الأساسية، وبالتالي تعطيل التوازن الدقيق للمجتمعات الميكروبية في التربة، فيؤثر على بنيتها ووظيفتها. ويمكن أن يكون لذلك عواقب طويلة المدى على خصوبة التربة، ودورة المغذيات، واستقرار النظام البيئي بشكل عام (Brevik, 2013).

2.7. الخواص الكيميائية للتربة

يمكن لتغير المناخ أن يغير مستويات الرقم الهيدروجيني للتربة بسبب زيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. قد تؤدي مستويات ثاني أكسيد الكربون المرتفعة إلى عملية تسمى الكربنة، حيث يذوب CO_2 في الماء ويشكل حمض الكربونيك، حيث يؤدي هذا إلى خفض pH التربة، مما يؤثر على توفر العناصر الغذائية للنبات والنشاط الميكروبي. ويمكن أن يؤدي ارتفاع درجات الحرارة إلى زيادة معدلات تمعدن المغذيات في التربة، مما يؤدي إلى زيادة توفر المغذيات في بعض المناطق. وعلى العكس من ذلك، قد تتسبب أحداث هطول الأمطار الغزيرة في ترشيح المغذيات، مما يؤدي إلى استنفاذ المغذيات في مناطق أخرى (Schimel et al., 2015). ويمكن أن تؤدي درجات الحرارة الأكثر دفئًا إلى تعزيز النشاط الميكروبي، مما يؤدي إلى زيادة معدل تحلل المواد العضوية مما يؤثر على التركيب الكيميائي للتربة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تؤدي معدلات التحلل المتزايدة إلى استنفاذ المواد العضوية في التربة، مما يؤثر على بنائها ويقلل من قدرتها على الاحتفاظ بالماء والمواد المغذية (Conant et al., 2017). كذلك قد تؤدي الفيضانات الناجمة عن تغير المناخ إلى انتقال المعادن الثقيلة من التربة الملوثة إلى الأراضي الزراعية، مما يشكل مخاطر على صحة الإنسان وسلامة النظام البيئي (Kabata-Pendias and Raton, 2010). كذلك يمكن أن يؤدي ارتفاع مستويات سطح البحر، وهو نتيجة أخرى لتغير المناخ، إلى زيادة ملوحة التربة في المناطق الساحلية. عندما تتسرب مياه البحر إلى التربة، فإنها تزيد من تركيز الأملاح، مما يؤثر على خواص التربة الكيميائية وخصوبتها. يمكن أن يعيق التملح نمو النباتات، ويقلل من إنتاج المحاصيل، ويجعل الأرض غير صالحة للزراعة (Lowe et al., 2016; Kreba, 2019).

3.7. الخواص الفيزيائية للتربة

يمكن أن يؤثر ارتفاع درجات الحرارة المرتبطة بتغير المناخ بشكل كبير على بناء التربة، وبالتالي يؤثر على عملية تبادل الغازات بين التربة والهواء الجوي (Kreba et al., 2017). تعمل درجات الحرارة المرتفعة على زيادة معدل تحلل المواد العضوية، مما يؤدي إلى تقليل تكون تكتلات التربة وزيادة انجرافها. ويمكن أن يؤدي ذلك إلى انخفاض معدلات تبادل الغازات وتسرب المياه وزيادة الجريان السطحي، مما يؤثر في النهاية على خصوبة التربة وإنتاجيتها. ويمكن للتغيرات في أنماط هطول الأمطار، بما في ذلك زيادة تواتر وشدة هطول الأمطار، أن تؤدي إلى تفاقم ظاهرة انجراف التربة. ومع التغيرات المناخية المستقبلية، من المتوقع أن تتعرض التربة لبيئة أكثر جفافاً لفترة أطول من الزمن، ومن ناحية أخرى، من المرجح أن تتعرض لمعدل أكثر شدة من الرطوبة والفيضانات. بذلك تكون التربة أكثر عرضة للانهيار الهيكلي بسبب التآكل والتشتت، ويتفاقم هذا الأخير بسبب التأثير الميكانيكي لهطول الأمطار والذي من المتوقع أن يزداد مع زيادة شدته في العواصف الممطرة. علاوة على ذلك، ونتيجة لتغير المناخ، سيكون هناك ارتفاع في حالات حراثة التربة بمحتوى غير مناسب من الرطوبة، مما يؤدي إلى ضغطها وتلطيخها (عندما تكون رطبة جدًا) أو تفكيكها (عندما تكون جافة جدًا) (El-Ramady et al., 2012). يمكن أن يؤدي هطول الأمطار الغزيرة إلى رص التربة، مما يؤدي إلى انخفاض المسامية وزيادة الجريان السطحي. فيؤدي ذلك إلى فقدان التربة السطحية والمواد المغذية والمواد العضوية، مما يؤثر سلباً على الخصائص الفيزيائية للتربة (Lal, 2015).

8. التنبؤ بالتغيرات المناخية و أثرها على البيئة

مع استمرار مناخ الأرض في التطور، من المهم فهم التأثيرات المحتملة لتغير المناخ في المستقبل. توفر نمذجة هذه التأثيرات رؤى قيمة حول العواقب التي قد نواجهها وتساعد في اتخاذ القرار من أجل مستقبل مستدام وتلعب دورًا حاسمًا في توفير رؤى قيمة حول السيناريوهات المحتملة وتطوير استراتيجيات التكيف والتخفيف الفعالة. تسمح نمذجة تأثيرات تغير المناخ المستقبلية للعلماء بمحاكاة وإسقاط التغيرات المحتملة في جوانب مختلفة من نظام الأرض. تدمج هذه النماذج البيانات المتعلقة بانبعاثات الغازات الدفيئة، والظروف الجوية، وأنماط استخدام الأراضي لتوفير فهم شامل لكيفية تأثر كوكبنا بالتغيرات المناخية. ومن خلال قياس التأثيرات المحتملة، يستطيع صناع القرارات والمجتمعات والأفراد اتخاذ القرارات والسياسات المناسبة للتخفيف من هذه التغييرات والتكيف معها بشكل فعال. ومن خلال استخدام هذه النماذج، يستطيع العلماء توقع سيناريوهات مناخية مستقبلية وتقييم التأثيرات المحتملة على المناطق والقطاعات

المختلفة. ويساعد هذا الفهم صناع القرارات والشركات والمجتمعات على الاستعداد للتغيرات التي تنتظرنا والتكيف معها. وتتيح نمذجة تأثيرات تغير المناخ للباحثين تقييم التأثيرات على النظم البيئية والتنوع البيولوجي والموارد الطبيعية. ومن خلال دراسة التحولات المحتملة في درجات الحرارة، وأنماط هطول الأمطار، وارتفاع مستوى سطح البحر، يستطيع العلماء التنبؤ بالعواقب المترتبة على العوائل، وتوزيع الأنواع، وخدمات النظم البيئية. هذه المعلومات ضرورية لبرامج الحفاظ على البيئة، وتخطيط استخدام الأراضي، والإدارة المستدامة للموارد. وتساعد النمذجة كذلك في تقييم الخسائر الاقتصادية المحتملة، ومخاطر الأمن الغذائي، وندرة المياه، والآثار الصحية المرتبطة بتغير المناخ. ومن خلال فهم العواقب المحتملة لمختلف خيارات السياسات، تستطيع الحكومات وضع استراتيجيات فعالة للحد من انبعاثات الغازات الدفيئة، والتكيف مع الظروف المتغيرة، وحماية المجتمعات الضعيفة. تساعد النمذجة أيضًا في تقييم فعالية السياسات المقترحة وتحديد المجالات التي تتطلب اتخاذ إجراءات إضافية. وتساعد نمذجة تأثيرات تغير المناخ في التواصل الفعال حول مدى إلحاح المشكلة وخطورتها. يمكن للتصورات وعمليات المحاكاة المستمدة من النماذج المناخية أن تساعد في نقل المفاهيم العلمية المعقدة إلى عامة الناس وصانعي السياسات وأصحاب المصلحة. ويعزز هذا الفهم المشاركة العامة، ويشجع العمل المناخي، ويسهل المناقشات المستنيرة حول استراتيجيات التخفيف والتكيف.

1.8فهم التغيرات الفيزيائية

النماذج المناخية هي أدوات حاسوبية تحاكي النظام المناخي للأرض، وتتضمن عوامل مختلفة مثل الظروف الجوية، وتيارات المحيطات، وعمليات سطح الأرض. تساعدنا النماذج المناخية على فهم التغيرات الفيزيائية التي قد تحدث بسبب تغير المناخ. وهي تحاكي التغيرات في درجات الحرارة، وأنماط هطول الأمطار، وارتفاع مستوى سطح البحر، والأحداث الجوية المتطرفة. على سبيل المثال، تتوقع النماذج زيادة في متوسط درجة الحرارة العالمية، مما يؤدي إلى موجات حارة أكثر تكرارا وشدة، وتغيرات في أنماط هطول الأمطار، وزيادة خطر الجفاف والفيضانات. توفر هذه التوقعات معلومات قيمة لتخطيط البنية التحتية، وإدارة الموارد المائية، والتأهب للكوارث. وتسمح النمذجة للعلماء بمحاكاة سيناريوهات مناخية مستقبلية مختلفة عن طريق تغيير المتغيرات مثل انبعاثات الغازات الدفيئة، وأنماط استخدام الأراضي، وتركيزات الهباء الجوي. ومن خلال إجراء عمليات المحاكاة هذه، يمكن للباحثين تقييم التأثيرات المحتملة للسيناريوهات المختلفة على درجة الحرارة، وأنماط هطول الأمطار، وارتفاع مستوى سطح البحر، والظواهر الجوية المتطرفة. كما تساعد النمذجة أيضًا على فهم التغيرات المناخية الإقليمية. ومن خلال تطوير نماذج المناخ العالمي، يستطيع العلماء الحصول على معلومات أكثر تفصيلاً حول مناطق محددة، بما في ذلك التغيرات في درجات الحرارة المحلية، وأنماط هطول الأمطار، والتغيرات في الأحداث المتطرفة. تعتبر هذه المعلومات ضرورية لواضعي السياسات وأصحاب المصلحة لتطوير استراتيجيات التكيف والتخفيف الخاصة بكل منطقة.

2.8تقييم العو اقب البيئية

يعد تقييم العواقب البيئية للأنشطة البشرية أمرًا بالغ الأهمية للتنمية المستدامة وجهود الحفاظ على البيئة. ومع ذلك، ونظرًا لتعقيد النظم البيئية وترابطها، قد يكون من الصعب التنبؤ بالتأثيرات الطويلة المدى بدقة. وهنا يأتي دور النمذجة. فتوفر النمذجة أداة قيمة للعلماء وصانعي السياسات لمحاكاة وفهم العواقب المحتملة لمختلف الإجراءات على البيئة. إن نمذجة تأثيرات تغير المناخ المستقبلية تمكننا أيضًا من تقييم العواقب البيئية على التنوع البيولوجي والنظم البيئية وتوزيع الأنواع. تساعد هذه النماذج على التنبؤ بالتحولات في العوائل، والتغيرات في فينولوجية الأنواع، والخسارة المحتملة للتنوع البيولوجي. على سبيل المثال، أظهرت الدراسات أن ارتفاع درجات الحرارة قد يؤدي إلى فقدان الشعاب المرجانية، وتعطيل أنماط الهجرة، وزيادة تعرض بعض الأنواع للانقراض. تساعد مثل هذه الأفكار في برامج الحفظ وتوجه استراتيجيات الحفاظ على النظم البيئية وحماية الأنواع المعرضة للخطر.

تسمح النمذجة للعلماء بمحاكاة الديناميكيات المعقدة للنظم البيئية، بما في ذلك التفاعلات بين الأنواع والعوائل والعوامل البيئية. ومن خلال دمج البيانات المستعملة في الدراسات والتجارب الميدانية، يمكن للنماذج أن توفر رؤى حول كيفية تأثير التغييرات في أحد مكونات النظام البيئي على المكونات الأخرى. ومن خلال دمج البيانات المناخية والمعايير البيئية، يمكن للنماذج أن تتوقع السيناريوهات المستقبلية وتتنبأ بالتأثيرات المحتملة على التنوع البيولوجي، وتوزيع الأنواع، وخدمات النظام البيئي في المناطق الباردة، وتؤثر الأنشطة البشرية، مثل إزالة الغابات والتوسع الحضري، بشكل كبير على النظم البيئية.

وتساعد النمذجة في تقييم عواقب التغيرات في استخدام الأراضي على التنوع البيولوجي، وخدمات النظام البيئي، وصحته بشكل عام. على سبيل المثال، دراسة أجراها فيربورق وآخرون (Verburg et al., 2015) استخدم فيها نماذج استخدام الأراضي لتقييم العواقب البيئية للتوسع الزراعي في منطقة الأمازون البرازيلية، مع تسليط الضوء على الخسارة المحتملة للتنوع البيولوجي وتخزين الكربون. كما يمكن أن تساعد النمذجة في فهم العواقب البيئية للتلوث وأحداثه. ومن خلال محاكاة نقل ومصير الملوثات في النظم البيئية، يمكن للنماذج التنبؤ

بالتأثيرات المحتملة على الكائنات المائية والبرية. ومع ذلك، من المهم ملاحظة أن النماذج هي تبسيط للواقع ويجب استخدامها جنبًا إلى جنب مع الدراسات الميدانية والبيانات التجريبية لإجراء تقييمات دقيقة.

3.8تقييم الآثار الاجتماعية والاقتصادية

يمثل تغير المناخ تحديًا عالميًا يشكل تهديدات كبيرة للرفاهية الاجتماعية والاقتصادية للمجتمعات في جميع أنحاء العالم. إن فهم وتقييم الآثار المحتملة لتغير المناخ على المجتمع أمر بالغ الأهمية لفعالية صنع السياسات واستراتيجيات التكيف. تتيح لنا نمذجة التأثيرات المستقبلية تقييم العواقب المحتملة للتغيرات المناخية على المجتمعات البشرية والاقتصادات والصحة العامة. وتأخذ هذه النماذج بعين الاعتبار عوامل مثل التغيرات في الإنتاجية الزراعية، وتوافر المياه، والطلب على الطاقة، وانتشار الأمراض المنقولة بالنواقل. على سبيل المثال، تشير التوقعات إلى أن تغير المناخ قد يؤدي إلى انخفاض غلات المحاصيل، وتأثر الأمن الغذائي، وزيادة المخاطر على صحة الإنسان بسبب الإجهاد الحراري والأمراض المعدية. إن فهم هذه التأثيرات يساعد صناع السياسات على تطوير استراتيجيات التكيف والقدرة على الصمود والتنمية المستدامة.

من خلال دمج البيانات الاجتماعية والاقتصادية، مثل النمو السكاني، والتنمية الاقتصادية، وأنماط التحضر، يمكن للنماذج المناخية تقدير التأثيرات المحددة على المناطق والقطاعات المختلفة. كما تسمح تقنيات النمذجة بتقييم مدى الضعف والتعرض لتأثيرات تغير المناخ. تأخذ نماذج الضعف (Vulnerability Models) في الاعتبار بعض العوامل مثل: مستويات الفقر، والوصول إلى الموارد، وجودة البنية التحتية لتحديد المناطق والمجتمعات الأكثر عرضة للمخاطر المرتبطة بالمناخ. وتقوم نماذج التعرض (Exposure Models) بتحليل التوزيع المكاني للمخاطر المناخية، مثل الأحداث الجوية المتطرفة أو ارتفاع مستوى سطح البحر، لتحديد المناطق الأكثر عرضة للخطر. كما تلعب النماذج الاقتصادية دورًا حاسمًا في تقييم العواقب الاجتماعية والاقتصادية لتغير المناخ. وتجمع نماذج التقييم المتكاملة بين البيانات المناخية والاقتصادية والاجتماعية لتقدير تكاليف وفوائد السياسات المناخية المختلفة واستراتيجيات التكيف. ويمكن لهذه النماذج تقييم الآثار الاقتصادية للأحداث المتعلقة بالمناخ، مثل فشل المحاصيل، أو زيادة تكاليف الرعاية الصحية، أو تلف البنية التحتية على مختلف القطاعات والمناطق. إن فهم السلوك البشري والاستجابات المجتمعية لتغير المناخ أمر ضروري لصياغة السياسات الفعالة. تتضمن النماذج الاجتماعية والسلوكية عوامل مثل اتخاذ القرار الفردي، والمعايير الثقافية، والشبكات الاجتماعية للتنبؤ بكيفية استجابة المجتمعات للتحديات المرتبطة بالمناخ. ويمكن لهذه النماذج أن تساعد في تحديد العوائق التي تحول دون التكيف وتوجيه الاستراتيجيات لتعزيز السلوكيات المستدامة والقدرة على الصمود.

4.8 .أهم النماذج المستعملة في التنبؤ بالتغيرات المناخية

يتطلب التنبؤ بتغير المناخ نماذج متطورة تأخذ في الاعتبار العوامل والتفاعلات المختلفة داخل النظام المناخي للأرض. تعد نماذج الدوران العامة، ونماذج المناخ الإقليمي، ونماذج نظام الأرض، ونماذج التقييم المتكامل من بين النماذج الأكثر شيوعاً التي يستخدمها العلماء والباحثون.

- نماذج الدوران العامة (General Circulation Models): وتعرف أيضًا باسم نماذج المناخ العالمية، وتُستخدم على نطاق واسع لمحاكاة النظام المناخي للأرض. تشتمل هذه النماذج على معادلات رياضية معقدة لتمثيل التفاعلات بين الغلاف الجوي والمحيطات وسطح الأرض والجليد. تأخذ هذه النماذج بعين الاعتبار عوامل مثل الإشعاع الشمسي وتركيزات الغازات الدفيئة والهباء الجوي لتوقع سيناريوهات المناخ المستقبلية (IPCC, 2013).
- نماذج المناخ الإقليمية (Regional Climate Models): تعمل هذه النماذج على مناطق جغرافية أصغر، مما يوفر دقة أعلى وتوقعات مناخية أكثر تفصيلاً. تستخدم آليات التنسيق الإقليمية مخرجات نماذج المناخ العالمية كشروط حدودية وتقوم بتقليص حجمها إلى النطاقات الإقليمية. وهذا يمكّن الباحثين من دراسة الظواهر المناخية المحلية وتقييم التأثيرات الإقليمية لتغير المناخ (Giorgi and Mearns, 1999).
- نماذج نظام الأرض (Earth System Models): هي نماذج شاملة تدمج نماذج الدوران العامة مع مكونات إضافية، مثل الدورات البيوجيوكيميائية والتفاعلات بين الغلاف الجوي والمحيطات والأرض والمحيط الحيوي. توفر الإدارة السليمة بيئياً فهماً شاملاً للنظام المناخي واستجابته للمؤثرات الخارجية، بما في ذلك انبعاثات الغازات الدفيئة التي يسببها الإنسان (Collins et al., 2011).
- نماذج التقييم المتكاملة (Integrated Assessment Models): تجمع هذه النماذج بين النماذج المناخية والعوامل الاجتماعية والاقتصادية لتقييم الآثار المحتملة لتغير المناخ وتقييم استراتيجيات التخفيف والتكيف. تساعد هذه النماذج صناع السياسات على فهم المفاضلات بين خيارات السياسة المختلفة وآثارها على سيناريوهات المناخ المستقبلية (Röck et al., 2021).

5.8عدم اليقين في التنبؤ بتغيرات المناخ

من المهم أن نعترف بأن النماذج المناخية تنطوي على شكوك وقيود متأصلة. لا يمكن للنماذج أن تشمل جميع الجوانب بشكل مثالي لأن تغير المناخ يتأثر في المستقبل بتفاعلات معقدة بين عوامل مختلفة. ومع ذلك، فإن التقدم المستمر في تقنيات النمذجة، وتحسين طرق جمع البيانات، وتطوير تقنيات الحوسبة تعمل على تعزيز دقة وموثوقية التوقعات. فمن المهم الاعتراف بأوجه عدم اليقين المرتبطة بهذه النماذج.

إن الأنظمة المناخية معقدة بشكل كبير، وتتضمن العديد من المتغيرات المترابطة وحلقات التغذية الراجعة. تحاول نماذج تغير المناخ محاكاة هذه التعقيدات، لكنها غالباً ما تبالغ في تبسيط بعض العمليات بسبب القيود الحسابية. يمكن أن يؤدي هذا التبسيط إلى ظهور شكوك في قدرة النموذج على تمثيل ديناميكيات المناخ في العالم الحقيقي بدقة (IPCC, 2013). وتعتمد النماذج المناخية بشكل كبير على البيانات المناخية التاريخية لمعايرة عمليات المحاكاة والتحقق من صحتها. ومع ذلك، قد تكون البيانات التاريخية غير كاملة أو تحتوي على تحيزات، خاصة في المناطق التي بها محطات مراقبة محدودة. بالإضافة إلى ذلك، تعتمد التوقعات المناخية المستقبلية على افتراضات حول انبعاثات الغازات الدفيئة، وهي في حد ذاتها غير مؤكدة بشكل واضح. فيمكن أن تؤثر قيود البيانات هذه على دقة وموثوقية نماذج تغير المناخ (Knutti and Sedláček, 2013; Hawkins and Sutton, 2009).

تستخدم النماذج المناخية تقنيات تحديد العوامل (Parameterization Techniques) لتمثيل العمليات التي تحدث على مستويات أصغر من دقة النموذج. تثير هذه التقنيات أوجه عدم اليقين لأنها تعتمد على الافتراضات والتبسيطات. على سبيل المثال، يصعب تمثيل عمليات تكوين السحب وهطول الأمطار بدقة، مما يؤدي إلى عدم اليقين في تنبؤات النماذج (Bony et al., 2006; Hourdin et al., 2017).

وتتنبأ نماذج تغير المناخ بسيناريوهات مناخية مستقبلية بناءً على سيناريوهات مختلفة لانبعاثات الغازات الدفيئة. ومع ذلك، تنشأ حالات عدم اليقين من المسارات المستقبلية غير المعروفة للانبعاثات، لأنها تعتمد على العوامل الاجتماعية والاقتصادية، والتقدم التكنولوجي، والقرارات السياسية. وتجعل هذه الأوجه من الصعب التنبؤ بصورة دقيقة بحجم وتوقيت تأثيرات تغير المناخ في المستقبل (Moss et al., 2010; Van Vuuren et al., 2011).

9. التوصيات

التوصيات تعتبر نقطة انطلاق لمعالجة ظاهرة تغير المناخ وتأثيره على البيئة. ويمكن تكييف الاستراتيجيات وتحسينها استنادا إلى المعرفة العلمية المتطورة والسياقات المحلية. وأهم التوصيات التي يمكن استنباطها من هذه الدراسة هي:

1. التخفيف من انبعاثات الغازات الدفيئة، ويمكن ذلك باتباع مجموعة من الاستراتيجيات مثلاً:

- التحول إلى مصادر الطاقة المتجددة وذلك بتشجيع استخدام الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة المائية والطاقة الحرارية الأرضية لتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري.
- تحسين كفاءة الطاقة وذلك بتشجيع الممارسات والتقنيات الموفرة للطاقة في الصناعة والمباني والنقل.
- تنفيذ آليات تسعير الكربون وذلك بوضع سياسات تحدد سعراً لانبعاثات الكربون لتحفيز خفضها.

2. التكيف والمرونة وذلك باتباع الخطوات التالية:

- تعزيز مرونة البنية التحتية بالاستثمار في البنية التحتية القادرة على تحمل تأثيرات تغير المناخ، مثل ارتفاع مستوى سطح البحر، والظواهر الجوية المتطرفة، وتغير أنماط هطول الأمطار.
- تطوير الزراعة القادرة على التكيف مع المناخ وذلك بدعم المزارعين في تبني ممارسات ذكية مناخيا، مثل تنويع المحاصيل، والحفاظ على التربة، والإدارة الفعالة للمياه.
- تعزيز أنظمة الإنذار المبكر وذلك بتحسين أنظمة الرصد والتنبؤ بالأحداث الجوية القاسية لتمكين الاستجابة في الوقت المناسب وتفعيل خطط الإخلاء.

3. الحفظ والترميم وذلك بمراعاة الخطوات التالية:

- حماية واستعادة النظم البيئية بالحفاظ على الغابات والأراضي الرطبة والعوائل الطبيعية الأخرى التي تعمل كمصارف للكربون وتوفر الخدمات الأساسية للنظام البيئي واستعادتها.
- تعزيز ممارسات الاستخدام المستدام للأراضي بتشجيع الزراعة المستدامة والغابات المسؤولة وتقنيات إدارة الأراضي التي تعطي الأولوية للحفاظ على التنوع البيولوجي وعزل الكربون.

- تعزيز مصايد الأسماك المستدامة والحفاظ على البيئة البحرية بتنفيذ تدابير لمنع الصيد الجائر، وحماية العوائل البحرية، والحد من التلوث للحفاظ على النظم البيئية البحرية.

4. التعاون والسياسة الدولية التي يمكن الوصول إليها باتباع التدابير التالية:

- تعزيز الاتفاقيات العالمية للمناخ بتشجيع البلدان على الوفاء بالتزاماتها بموجب الاتفاقيات الدولية مثل اتفاق باريس والتعاون في تحقيق أهداف طموحة لخفض الانبعاثات.
- دعم الدول النامية بتقديم المساعدات المالية والفنية للتحول إلى اقتصاديات منخفضة الكربون والتكيف مع تأثيرات تغير المناخ.
- الاستثمار في البحث والتطوير في مجال التقنيات النظيفة، ونمذجة التغيرات المناخية، والممارسات المستدامة لدفع الابتكار وإيجاد حلول فعالة.

5. التثقيف والتوعية والذي يتمثل فيما يلي:

- تعزيز المعرفة المناخية بتثقيف الأفراد والمجتمعات والشركات حول أسباب تغير المناخ وتأثيراته، بالإضافة إلى الإجراءات التي يمكنهم اتخاذها لتقليل بصمتهم الكربونية.
- تشجيع أنماط الحياة المستدامة بالدعوة إلى الاستهلاك المستدام، والحد من النفايات، والاستخدام المسؤول للموارد.
- إشراك أصحاب المصلحة وذلك بتعزيز الحوار والتعاون بين الحكومات والشركات ومنظمات المجتمع المدني والأفراد للتصدي بشكل جماعي لتحديات تغير المناخ.

المراجع

- Altizer, S., Ostfeld, R., Johnson, P., Kutz, S., & Harvell, C. (2013). Climate Change and Infectious Diseases: From evidence to a predictive framework. *Science*, 341(6145), 514-519. doi:10.1126/science.1239401
- Amano, T., Smithers, R., Sparks, T., & Sutherland, W. (2010). 250-year index of first flowering dates and its response to temperature changes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1693), 2451–2457. doi:10.1098/rspb.2010.0291
- Barnett, T., Adam, J., & Lettenmaier, D. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303-309. doi:10.1038/nature04141
- Bond-Lamberty, B., & Thomson, A. (2010). A global database of soil respiration data. *Biogeosciences*, 7, 1915–1926. doi.org/10.5194/bg-7-1915-2010, 2010.
- Bony, S., Colman, R., Kattsov, V. M., Allan, R. P., Bretherton, C. S., Dufresne, J. L., Hall, A., Hallegatte, S., Holland, M., Ingram, W., Randall, D., Soden, B., Tselioudis, G., & Webb, M. J. (2006). How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *Journal of Climate*, 19(15), 3445–3482. doi:10.1175/jcli3819.1
- Brevik, E. C. (2013). The potential impact of climate change on soil properties and processes and corresponding influence on food security. *Agriculture*, 3, 398-417. doi:10.3390/agriculture3030398
- Cleland, E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H., & Schwartz, M. (2007). Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(7), 357-365. doi:10.1016/j.tree.2007.04.003
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., & Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 1051–1075. doi:10.5194/gmd-4-1051-2011
- Conant, R., Ryan, M., Ågren, G., Birge, H., Davidson, E., Eliasson, P., Evans, S., Frey, S., Giardina, C., Hopkins, F., Hyvönen, R., Kirschbaum, M., Lavallee, J., Leifeld, J., Parton, W., Steinweg, J., Wallenstein, M., Wetterstedt, J., & Bradford, M. (2017). Temperature and soil organic matter decomposition rates-synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 23(2), 811-826. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02496.x

- D'Amato, G., & Cecchi, L. (2015). Effects of climate change on environmental factors in respiratory allergic diseases. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(7), 7647-7666. doi:10.1111/j.1365-2222.2008.03033.x
- Doney, S., Fabry, V., Feely, R., & Kleypas, J. (2009). Ocean acidification: The other CO_2 problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169-192. doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834
- El-Ramady, H., Belal, A., El-Marsafawy, S., Shehata, S., Yehia, S., & Belal, E. (2012). *Contemporary Environmental Readings: Climate Change a Blessing or a Curse for Agriculture*. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, pp. 1-296.
- FAO. (2015). *Climate Change and Food Security: Risks and Responses*. Italy: FAO Publication.
- Feng, Y., Zeng, Z., Searchinger, T., Ziegler, A., Wu, J., Wang, D., He, X., Elsen, P., Ciais, P., Xu, R., & Guo, Z. (2022). Doubling of annual forest carbon loss over the tropics during the early twenty-first century. *Nature Sustainability*, 5, 444-451. doi.org/10.1038/s41893-022-00854-3
- Fiore, A., Naik, V., & Leibensperger, E. (2015). Air quality and climate connections. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 65(6), 645-685. doi.org/10.1080/10962247.2015.1040526
- Giorgi, F., & Mearns, L. O. (1999). Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D6), 6335-6352. doi:10.1029/98jd02072
- Gregory, P., Johnson, S., Newton, A., & Ingram, J. (2009). Integrating pests and pathogens into the climate change/food security debate. *Journal of Experimental Botany*, 60(10), 2827–2838. doi.org/10.1093/jxb/erp080
- Habibullah, M., Haji Din, B., Tan, S., & Zahid, H. (2021). Impact of climate change on biodiversity loss: Global evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 1073–1086. doi.org/10.1007/s11356-021-15702-8
- Hawkins, E., & Sutton, R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8), 1095-1107. doi:10.1175/2009bams2607.1
- Held, I., & Soden, B. (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate*, 19(21), 5686-5699. doi:10.1175/jcli3990.1
- Hermans, K., & McLeman, R. (2021). Climate change, drought, land degradation and migration: Exploring the linkages. *Current Opinion in Environnental Sustainability*, 50, 236-244. doi:10.1016/j.cosust.2021.04.013
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P., Hooten, A., Steneck, R., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C., Sale, P., Edwards, A., Caldeira, K., & Knowlton, N. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318(5857), 1737-1742. DOI:10.1126/science.1152509
- Hock, R. (2019). Glacier melt: A review of processes and their modelling. *Progress in Physical Geography*, 43(3), 1-25. doi:10.1191/0309133305pp453ra
- Houghton, J. (2009). *Global warming – The Complete Briefing*. (4th ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hounghton, J. T., Ding, Y, Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., & Johnson, C.A. (2001). *Climate change: The scientific basis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hourdin, F., Mauritsen, T., Gettelman, A., Golaz, J. C., Balaji, V., Duan, Q., Folini, D., Ji, D., Klocke, D., Qian, Y., Rauser, F., Rio, C., Tomassini, L., Watanabe, M., & Williamson, D. (2017). The art and science of climate model tuning. *Bulletin of the American Meteorological Society,* 98(3), 589–602. doi:10.1175/bams-d-15-00135.1
- Hughes, T., Anderson, K., Connolly, S., Heron, S., Kerry, J., Lough, J., Baird, A., Baum, J., Berumen, M., Bridge, T., & Claar, D. (2018). Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*, 359(6371), 80-83. doi:10.1126/science.aan8048
- Hui, D. (2013). Global climate change and biodiversity: Issues and future research. *Journal of Biodiversity & Endangered Species,* 1(2), 1-2. doi:10.4172/2332-2543.1000e105
- IPCC. (2007). Climate change: The physical science basis. In *Climate Change*, Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., & Miller, H.L. (eds.). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, pp. 996.

- IPCC. (2012). Changes in climate extreams and their impacts on the natural physical environment. In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, Field, C., Barros, V., Stocker, T., Qin, D., Dokken, D., Ebi, K., Mastrandrea, M., Mach, K., Plattner, G., Allen, S., Tignor, M., & Midgley, P. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 1-594. doi.org/10.1136/jech-2012-201045
- IPCC. (2013a). Annex III: Glossary. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Planton, S. (eds.). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- IPCC. (2013b) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis,* Stocker T. F., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (eds.). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, pp. 1535.
- IPCC. (2014). Natural and managed resources and systems, and their uses. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability,* Field, C., Barros, V., Dokken, D., Mach, K., Mastrandrea, M., Bilir, T., Chatterjee, M., Ebi, K., Estrada, Y., Genova, R., Girma, B., Kissel, E., Levy, A., MacCracken, S., Mastrandrea, P., & White, L. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 1-34.
- IPCC. (2018). Summary for policymakers. In *Global Warming of 1.5°C*, Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., & Waterfield, T. (eds.). Cambridge UK: Cambridge University Press, pp. 3-24, doi:10.1017/9781009157940.001
- IPCC. (2019). Climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. In *Climate Change and Land*, Shukla, P., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H., Roberts, D., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M., & Malley, J. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. pp. 1-874.
- IPCC. (2022). Climate change: Impacts, adaptation, and vulnerability. In *Summary for Policymakers.* Pörtner, H., Roberts, D., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V. & Okem, A. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 3-33. doi:10.1017/9781009325844.001
- Jacob, D., & Winner, D. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, 43(1), 51-63. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.051
- Jansson, J., & Hofmockel, K. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18(1), 35-46. doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7
- Kabata-Pendias, A., & Raton, B. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants*. FL, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, pp. 548.
- Knutti, R., & Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3(4), 369-373.
- Kreba, S., Coyne, M., McCulley, R., & Wendroth, O. (2013). Spatial and temporal patterns of carbon dioxide flux in crop and grass land-use systems. *Vadose Zone Journal*. 12(4), 1-16. doi:10.2136/vzj2013.01.0005
- Kreba, S. (2019). Soil salinity: Causes and impacts on agriculture and the environment. *Journal of Agricultural, Environmental, and Veterinary Sciences*, 3(4), 18-32. doi.org/10.26389/AJSRP.S070419
- Kreba, S., Wendroth, O., Coyne, M., & Walton, R. (2017). Soil gas diffusivity, air-filled porosity, and pore continuity: Land use and spatial patterns. *Soil Science Society of America Journal*, 81(3), 477–490. doi:10.2136/sssaj2016.10.0344
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895.
- doi:10.3390/su7055875

- Liu, J., Mickley, L., Sulprizio, M., Dominici, F., Yue, X., Ebisu, K., Anderson, G., Khan, R., Bravo, M., & Bell, M. (2016). Particulate air pollution from wildfires in the Western US under climate change. *Climatic Change*, 138(3-4), 655–666. doi:10.1007/s10584-016-1762-6
- Lobell, D. B., & Field, C. B. (2007). Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2(1), 014002. doi:10.1088/1748-9326/2/1/014002
- Lobell, D., Hammer, G., McLean, G., Messina, C., Roberts, M., & Schlenker, W. (2013). The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature Climate Change*, 3(5), 497-501. doi.org/10.1038/nclimate1832
- Lowe, R., Pivan, X., Falter, J., Symonds, G., & Gruber, R. (2016). Rising sea levels will reduce extreme temperature variations in tide-dominated reef habitats. *Science Advances*, 2(8), 1600825-1600837. doi:10.1126/sciadv.1600825
- Manzoni, S., Schimel, J. P., & Porporato, A. (2012). Responses of soil microbial communities to water stress: Results from a meta-analysis. *Ecology*, 93, 930-938. doi.org/10.1890/11-0026.1
- McCarty, J., Wolfenbarger, L., & Wilson, J. (2009). Biological impacts of climate change. In: *Encyclopedia of Life Sciences*. ON, Canada: John Wiley & Sons. DOI:10.1002/9780470015902.a0020480
- Menzel, A., Sparks, T., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., & Chmielewski, F. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12(10), 1969-1976. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x
- Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., & Burkhardt, T. (2020). Global climate change and greenhouse effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(4), 2897-2913. doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21)
- Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K., Manning, M., Rose, S., van Vuuren, D., Carter, T., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G., Mitchell, J., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S., Stouffer, R., Thomson, A., Weyant, J., & Wilbanks, T. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756. doi:10.1038/nature08823
- Muluneh, M. G. (2021). Impact of climate change on biodiversity and food security: A global perspective—a review article. *Agriculture and Food Security,* 10(36), 1-25. doi.org/10.1186/s40066-021-00318-5
- National Academy of Sciences. (2020). *Climate Change: Evidence and Causes*. Washington, DC: The National Academies Press. doi.org/10.17226/25733.
- Nguyen, T., Grote, U., Neubacher, F., Rahut, D., Do, M., & Paudel, G. (2023). Security risks from climate change and environmental degradation: Implications for sustainable land use transformation in the Global South. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 63, 101322-101333. doi.org/10.1016/j.cosust.2023.101322
- Parker, W. C., Courtillot, V., & McClinton, J. (2000). Evolutionary Catastrophes: The Science of Mass Extinction. *Palaios*, 15(6), 582-583. doi:10.2307/3515622
- Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37-42. doi:10.1038/nature01286
- Parmesan, C. (2007). Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Global Change Biology*, 13(9), 1860-1872. doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01404.x
- Pimm, S. L., Russell, G. J., Gittleman, J. L., & Brooks, T. M. (1995). The future of biodiversity. *Science*, 269, 347–350.
- Reed, D. H. (2012). Impact of climate change on biodiversity. In *Handbook of Climate Change Mitigation*, Chen, W.Y., Seiner, J., Suzuki, T., & Lackner, M. (eds.). New York: Springer, pp. 505-530.
- Röck, M., Baldereschi, E., Verellen, E., Passer, A., Sala, S., & Allacker, K. (2021). Environmental modelling of building stocks – An integrated review of life cycle-based assessment models to support EU policy making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111550-111570. doi:10.1016/j.rser.2021.111550
- Rotter, R., & van de Geijn, S. C. (1999). Climate change effects on plant growth, crop yield and livestock. *Climatic Change*, 43, 651–681.

- Sala, O. E., Chapin, F. S., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L., Jackson, R., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D., Mooney, H., Oesterheld, M., Poff, N., Sykes, M., Walker, B., Walker, M., & Wall, D. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287, 1770–1774.
- Schils, R., Kuikman, P., Liski, J., Van Oijen, M., Smith, P., Webb, J., Alm, J., Somogyi, Z., Van den Akker, J., Billett, M., & Emmett, B. (2008). *Review of Existing Information on the Interrelations between Soil and Climate Change*. UK: ClimSoil, Natural Environment Research Cuncel.
- Schimel, D., Pavlick, R., Fisher, J., Asner, G., Saatchi, S., Townsend, P., Miller, C., Frankenberg, C., Hibbard, K., & Cox, P. (2015). Observing terrestrial ecosystems and the carbon cycle from space. *Global Change Biology*, 21(5), 1762–1776. doi:10.1111/gcb.12822
- Seidel, D., Fu, Q., Randel, W., & Reichler, T. (2008). Widening of the tropical belt in a changing climate. *Nature Geoscience*, 1(1), 21-24. doi:10.1038/ngeo.2007.38
- Semenza, J., & Menne, B. (2009). Climate change and infectious diseases in Europe. *The Lancet Infectious Diseases*, 9(6), 365-375. doi:10.1016/s1473-3099(09)70104-5
- Singh, B., Cowie, A., & Chan, K. (2011). *Soil Health and Climate Change*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Singh, S. K., Meena, H. R., Kolekar, D. V., & Singh, Y. P. (2012). Climate change impacts on livestock and adaptation strategies to sustain livestock production. *Journal of Veterinary Advances*, 2(7), 407-412.
- Sintayehu, D. W. (2018). Impact of climate change on biodiversity and associated key ecosystem services in Africa: A systemic review. *Ecosyst Health Sustain*, 4(9), 225–239. doi.org/10.1080/20964129.2018.1530054
- Smith, P. (2012). Soils and climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability,* 4(5), 539-544. doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.005
- Thackeray, S., Henrys, P., Hemming, D., Bell, J., Botham, M., Burthe, S., Helaouet, P., Johns, D., Jones, I., Leech, D., Mackay, E., Massimino, D., Atkinson, S., Bacon, P., Brereton, T., Carvalho, L., Clutton-Brock, T., Duck, C., Edwards, M., Elliott, J., Hall, S., Harrington, R., Pearce-Higgins, J., Høye, T., Kruuk, L., Pemberton, J., Sparks, T., Thompson, P., White, I., Winfield, I., & Wanless, S. (2016). Phenological sensitivity to climate across taxa and trophic levels. *Nature*, 535(7611), 241-245. doi:10.1038/nature18608
- Thackeray, S. J., Henrys, P. A., Jones, I. D., & Feuchtmayr, H. (2011). Eight decades of phenological change for a freshwater cladoceran: What are the consequences of our definition of seasonal timing? *Freshwater Biology*, 57(2), 345–359. doi:10.1111/j.1365-2427.2011.02614.x
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B., De
- Siqueira, M. F., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., Jaarsveld, A., Midgley, G. F., Miles, L., Ortega-Huerta, M. A., Peterson, A. T., Phillips, O. L., & Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145–148. doi.org/10.1038/nature02121
- Thornton, P., van de Steeg, J., Notenbaert, A., & Herrero M. (2009). The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know. *Agricultural Systems,* 101(3), 113-127. doi.org/10.1016/j.agsy.2009.05.002
- van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S., & Rose, S. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5-31. doi:10.1007/s10584-011-0148-z
- Verburg, P. H., Crossman, N., Ellis, E., Heinimann, A., Hostert, P., Mertz, O., Nagendra, H., Sikor, T., Erb, K., Golubiewski, N., Grau, R., Grove, M., Konaté, S., Meyfroidt, P., Parker, D., Chowdhury, R., Shibata, H., Thomson, A., & Zhen, L. (2015). Land system science and sustainable development of the earth system: A global land project perspective. *Anthropocene*, 12, 29–41. doi:10.1016/j.ancene.2015.09.004

- Visser, M. E., & Both, C. (2005). Shifts in phenology due to global climate change: The need for a yardstick. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272(1581), 2561–2569. doi:10.1098/rspb.2005.3356
- Vörösmarty, C., McIntyre, P., Gessner, M., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S., Sullivan, C., & Liermann, C. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555–561. doi:10.1038/nature09440
- Wada, Y., Wisser, D., Eisner, S., Flörke, M., Gerten, D., Haddeland, I., Hanasaki, N., Masaki, Y., Portmann, F., Stacke, T., Tessler, Z., & Schewe, J. (2013). Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change. *Geophysical Research Letters*, 40(17), 4626-4632. doi:10.1002/grl.50686
- Wilson, E. O., & Peter, F. M. (1988). *Biodeversity*. Washington, DC: National Academy Press.
- World Bank. (2016). High and Dry: Climate Change, Water, and the Economy. Washington, DC, USA: International Bank for Reconstruction and Development.