



2023년도 기후과학 합동보고서

지속가능발전편

최신의 기상, 기후, 물 관련 지속가능한
발전을 위한 과학 및 서비스에 관한
다자기구 고품질 편집본



발 간 사

2023년은 전지구가 산업화 이래 가장 더웠던 해로 기록되었습니다. 그리고 2023년은 이상기후, 극한 현상의 해였다고 해도 과언이 아닙니다. 전 세계는 더 강력하고 빈번해진 홍수, 가뭄, 산불 등 여러 자연 재해로 고통받았으며, 이로 인해 각 국가에서는 큰 사회경제적 피해를 입었습니다. 인간에 의한 기후변화로 우리 지구는 나날이 뜨거워지고 있고, 우리는 앞으로 더 많은 사회경제적 피해를 입을 것입니다.

이런 상황 속에서 과학의 역할은 점점 더 중요해지고 있습니다. 세계기상기구(WMO)가 주도하고 여러 국제기구가 참여한 『2023년도 기후과학 합동보고서』에서는 날씨와 기후, 물과 관련된 과학과 서비스가 인류의 지속가능한 발전을 위해 어떠한 역할을 할 수 있는지 각 분야별로 자세히 기술하고 있습니다.

APEC기후센터는 이 보고서를 통해 기후 과학의 최신 과학적 데이터를 제공하고, 과학에 기반한 서비스의 중요성을 국내 주요 의사결정자들에게 전달하고자 하는 마음으로 국문 번역본을 발간하게 되었습니다. 이 보고서가 기후위기에 대응하고 탄소중립을 위해 노력하는 정부 관계자, 연구자, 그리고 다양한 분야의 의사결정자들에게 도움이 되기를 기대합니다.

감사합니다.

2024. 1.

APEC기후센터 원장 신도식



기후위기에 대응하기 위하여 온실가스 저감, 에너지 절약에 동참합시다!



이 보고서는 UN의 지휘하에 세계기상기구(WMO)에서 편찬한 것으로 주요 글로벌 파트너 기관의 최신 기후과학과 관련된 업데이트 사항, 특히 지속가능한 발전을 위한 날씨, 기후, 물과 관련된 과학과 서비스에 중점을 두고 정보를 취합하였다. 각 장의 내용은 해당 기관에 귀속된다.

이 보고서의 전자파일은 다음 링크에서 내려 받을 수 있다: <https://library.wmo.int/idurl/4/68235>

주 저자 및 기여 저자

WMO 총괄 편집: Lauren Stuart, Jürg Luterbacher, Roseline Devillier, Laura Paterson, Kate Solazzo, Isha Bhasin

그래픽 디자인: Xavi González

표지사진: Pexels - Pixabay

총괄 요약: Lauren Stuart (WMO), Rebecca Carman (United Nations Development Programme (UNDP)), Mark Tadross (UNDP), Yoona Jo (UNDP), Alexander Mejia (United Nations Institute for Training and Research (UNITAR)), Daniel Nazarov (UNITAR), Ginette Azcona (UN Women), Antra Bhatt (UN Women), Julia Brauchle (UN Women), Guillem Fortuny (UN Women), Barron Joseph Orr (United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD))

최신 과학 현황: Leon Hermanson (Met Office, UK), Adam Scaife (Met Office, UK; University of Exeter, UK), Melissa Seabrook (Met Office, UK), Doug Smith (Met Office, UK), Anne Olhoff (CONCITO - Denmark's Green Think Tank), John Christensen (United Nations Environment Programme (UNEP) Copenhagen Climate Centre), Maarten Kappelle (UNEP), Jian Liu (UNEP), Omar Baddour (WMO), Josep G. Canadell (Global Carbon Project (GCP), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia), Pierre Friedlingstein (GCP, University of Exeter, UK), Robbie Andrew (GCP, CICERO Center for International Climate Research (CICERO), Norway), Glen Peters (GCP, CICERO), Zhu Liu (GCP, Tsinghua University, China), Robert B. Jackson (GCP, Stanford University, USA), Hoesung Lee (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)), Valérie Masson-Delmotte (IPCC), Hans-Otto Pörtner (IPCC), Jim Skea (IPCC), Panmao Zhai (IPCC), Priyadarshi R. Shukla (IPCC), Debra Roberts (IPCC), John Kennedy (WMO), Oksana Tarasova (WMO), Alex Vermeulen (Integrated Carbon Observing System - European Research Infrastructure Consortium (ICOS ERIC), Finland), Yousuke Sawa (Japan Meteorological Agency, Japan), Joeri Rogelj (Grantham Institute, Imperial College London, UK; International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria)

SDG 2 - 기아종식: Jorge Alvar-Beltrán (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)), Arianna Gialletti (FAO), Alashiya Gordes (FAO), Lindis Norlund (FAO)

SDG 3 - 건강과 행복한 삶 보장: Rosa von Borries (WMO), Joy Shumake-Guillemot (WMO/World Health Organization (WHO)), Diarmid Campbell-Lendrum (WHO), Christian Schweizer (WHO)

SDG 6 - 깨끗한 물과 위생: Nicolas Franke (WMO), Sulagna Mishra (WMO) and Stefan Uhlenbrook (WMO) with input from UN-Water members and partners

SDG 7 - 적정가격의 깨끗한 에너지: Brian Dean (Sustainable Energy for All (SEforALL)), Ben Hartley (SEforALL), Alvin Jose (SEforALL), Emi Mizuno (SEforALL), Roberta Boscolo (WMO)

SDG 11 - 지속가능한 도시와 지역사회: Feng Liang (China Meteorological Administration, China), Lea Ranalder (UN Habitat), Chao Ren (University of Hong Kong, China), Lu Ren (China Meteorological Administration, China), Valéry Masson (Météo-France, France), Ranjeet S. Sokhi (University of Hertfordshire, UK), Xiaolin Wei (Meteorological Bureau of Shenzhen Municipality, China)

SDG 13 - 기후 행동: Kevin Horsburgh (Green Climate Fund (GCF)), John Hay (United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)), Danielle Magalhaes (UNFCCC), Tamaki Takao (UNFCCC), Amir Delju (WMO), Ilaria Gallo (WMO), Urvaksh D. Patel (GCF), Lars Peter Riishojgaard (WMO)

SDG 14 - 수생태계 보전: Kirsten Isensee (Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO)), Henrik Enevoldsen (IOC-UNESCO), Katherina Schoo (IOC-UNESCO), Michele Quesada da Silva (IOC-UNESCO)

SDG 17 - 목표 달성을 위한 파트너십: Lauren Stuart (WMO), Estelle De Coning (WMO), Daniela Cuellar Vargas (WMO)

© World Meteorological Organization, 2023

인쇄, 전자 및 기타 형식으로의 출판과 모든 언어로 출판할 수 있는 권리는 WMO가 보유한다. WMO 출판물의 짧은 발췌문은 출처가 명확하게 표시된 경우에 승인 없이도 복사가 가능하다. 이 출판물의 일부 또는 전체를 출판, 복사 또는 번역하기 위해서는 편집서신과 요청서를 다음 주소로 보내야 한다:

Chair, Publications Board
World Meteorological Organization (WMO)
7 bis, avenue de la Paix
P.O. Box 2300
CH-1211 Geneva 2, Switzerland

Tel.: +41 (0) 22 730 8403
Email: publications@wmo.int

참고: WMO 출판물에 사용된 명칭과 이 출판물에서 사용된 자료 제시는 국가, 영토, 도시 또는 지역, 또는 해당 당국의 법적 지위나 국경 또는 분계선의 한계에 관한 WMO 측의 의견 표현을 전혀 의미하지 않는다.

특정 회사 또는 상품에 관한 언급은 본문에서 언급되지 않았거나 광고되지 않은 다른 유사한 성격의 회사 또는 제품보다 우선하여 WMO에서 승인하거나 추천한다는 의미가 아니다.

저자의 이름이 적혀 있는 WMO 출판물에 나타난 결과, 해석, 결론은 저자의 단독 소유이며 WMO 또는 WMO 회원국의 해석 및 결론을 반드시 반영하지는 않는다.

UN 사무총장 António Guterres

2023년은 기후 변화가 도래했음을 너무 명확하게 보여주었습니다. 기록적인 온도는 땅을 태우고 바다를 데우고 있고, 극한 기상은 전세계에 걸쳐 혼란을 주고 있습니다. 이것이 이제 시작일 뿐임을 우리는 알고 있지만 전세계의 반응은 훨씬 부족합니다. 한편, 지속가능 목표(SDG)를 위한 2030년 시한의 중간에서 전세계는 비참하게도 궤도를 이탈하고 있습니다.

해결의 중심에는 과학이 있습니다.

날씨, 기후, 물 관련 과학은 기후행동의 기초를 제공한다는 것은 널리 알려져 있습니다. 그러나, 어떻게 이러한 과학이 전체적으로 SDG의 성과를 충전할 수 있는지에 대해서는 잘 알려져 있지 않습니다.

이 보고서는 날씨, 기후, 물 관련 과학이 식량 및 물 안보, 청정 에너지, 더 나은 건강, 지속 가능한 해양 및 회복력 있는 도시와 같은 목표를 어떻게 선도할 수 있는지 보여 주는 것을 목표로 하고 있습니다.

보고서에서 보여주는 것처럼, 예를 들어, 날씨 예측은 식량 생산성을 증가시키고 기아를 종식시키는데 도움을 줍니다. 유행병학과 기후 정보의 통합은 우리가 기후에 민감한 질병들을 이해하고 예측하는데 도움을 줍니다. 그리고 조기 경보 시스템은 사람들에게 극한 기상이 생계에 미치는 영향을 줄이고 준비할 수 있는 기회를 주어 빈곤을 줄이는데 도움이 됩니다.

증거는 명백합니다. 과학의 단결은 사람들과 지구의 전진에 불을 붙이는데 도움을 줍니다. 이 보고서의 교훈에 귀를 기울이고 과학의 힘을 이용하여 모두에게 더 깨끗하고 안전하며 지속가능한 미래를 건설하기를 바랍니다.



A. Guterres
UN 사무총장

세계기상기구 사무총장 Prof. Petteri Taalas

과학은 명확합니다. 지구는 전세계 기후 목표와 2030 아젠다에 이르는 궤도에서 멀리 떨어져 있습니다.

2023년 7월은 기록상 가장 뜨거운 해였고, 2023년이 기록상 가장 따뜻한 해들 중 하나가 될 가능성이 아주 높습니다. 올해는 이례적인 폭염, 불볕더위, 집중호우, 파괴적인 열대성 저기압으로 극한의 한 해였습니다.

2013-2022년 관측된 지구 표면 온도는 산업화 이전 수준(1850-1900)보다 1.15°C 높았지만, 온실가스 농도는 계속해서 증가하고 있습니다. 취약한 커뮤니티에 불균형적으로 영향을 더 미치고 지속가능한 발전 목표(SDG)의 달성을 위협하는 기후변화와 극한 기상 현상의 악영향에 적응하고 지구 온난화를 완화하기 위해서는 신속하고 야심 찬 행동이 필요합니다.

그러나, SDG 달성을 위한 진전을 가속화하는 데 도움이 될 날씨, 기후, 물 관련 과학과 서비스는 아직 충분히 활용되지 않고 있습니다. 고해상도 기후 모델링, 인공지능, 실시간 예측과 같은 획기적인 과학 기술 발전은 SDG를 지원하는 전환의 촉매제가 될 수 있습니다. 그리고 2027년까지 모든 사람을 위한 조기 경보를 달성하는 것은 생명과 생계를 구할 뿐 아니라 지속 가능한 발전을 보호하는데 도움이 될 것입니다.

SDG 달성의 중간 지점인 이 역사의 중요한 순간에 과학계는 사람들과 지구를 위한 번영을 이루기 위한 노력으로 하나가 되었습니다. 지속가능한 발전을 위한 날씨, 기후, 물 관련 과학과 서비스의 중요한 역할을 강조하는 이 보고서를 만드는데 참여해준 많은 다학제 전문가 팀들에게 감사사를 전합니다.



Prof. P. Taalas
WMO 사무총장

요약

우리는 지금 '지속가능 발전을 위한 2030 아젠다' 달성의 중간점이라는 역사의 기로에 서 있다. 지속가능발전목표(SDG)의 15%만 달성한 채, 전세계 기후 목표까지 절반의 시간을 지나왔지만 아직 갈 길이 멀다. 가장 최근 발표된 **2022년 지속가능 발전 목표 보고서**에 따르면, 기후 변화와 극한 기상의 영향이 증가되고, 상호 연결되어 있는 여러 글로벌 도전과제들로 인해 개발 이익이 멀어지고 2030년까지 SDG를 모두 달성하는 것도 힘들 것이라고 한다.

2030 아젠다 달성까지 중간 지점, 지구가 기후목표 달성 경로에서 멀리 떨어져 있음이 과학적으로 명백하다.

인간에 의한 기후변화는 대기, 해양, 빙권, 생물권에 광범위하고 급격한 변화를 일으켰고, 많은 극한 기상, 기후 현상들을 가져왔으며, 자연과 인간에게 손실과 피해 등 악영향을 가지고 왔다(IPCC, 2023). 2015년부터 2022년까지의 8년은 기록상 가장 따뜻한 8년이었고, 향후 5년안에 기록상 가장 따뜻한 해였던 2016년의 온도를 넘는 해가 적어도 한 번 이상 발생할 확률이 98%이다. 2023년의 시작이 따뜻하였고 엘니뇨도 발생하여, 2023년이 기록상 가장 따뜻한 해 중에 하나일 확률도 증가하였다. 게다가, 향후 5년중 한번은 연평균 전지구 표면온도가 산업화 이전 대비 1.5°C를 일시적으로라도 넘을 확률이 66%이고, 시간이 지남에 따라 그 확률은 더 증가하고 있다.

2023년까지 각국이 약속한 배출량 저감과 파리 협정 온도 목표를 달성하기 위해 필요한 배출량 저감 사이의 간극을 줄이는 데에는 거의 성과가 없었다. 2°C 보다 훨씬 낮게, 또는 1.5°C까지 온도를 낮추자는 파리 협정 목표를 달성하기 위해서, 그리고 2050년까지 탄소중립을 달성하기 위해서는, 전지구 온실가스 배출량이 현재 정책 예상치보다 2030년까지 30%에서 45%까지 줄어야 한다.

거대하고 긴급한 완화 및 적응 행동이 필요하다. 전지구 온난화를 제한하는 것은 인간에 의한 이산화탄소의 탄소중립 달성을 목표로 대규모의 빠르고 체계적인 전환이 필요하며, 기후변화의 악영향을 줄이고 손실과 피해를 막기 위해서 적응 행동이 필수적이다. 몇몇 미래 기후 현상의 변화는 피할 수가 없고, 잠재적으로 돌이킬 수 없을 것이나, 온도변화의 아주 일부, 이산화탄소의 1톤 차이도 지구 온난화를 제한하고 SDG를 달성하는 데 중요하게 작용할 것이다.

극한 기상 및 기후변화의 영향은 모든 SDG 달성 노력을 훼손시킨다.

전지구 기후시스템의 변화는 SDG 달성을 위한 노력에 영향을 미치며, 극한 기상 영향의 증가는 특히 취약한 커뮤니티에

불균형적으로 더 많은 영향을 미친다. 1970-2021년 사이에 날씨와 기후, 물 관련 극한 현상으로 인해 발생한 재난은 11,778건 보고되었고, 200만명이 넘는 사망과 미화 4.3조달러의 경제적 손실을 가지고 왔다. 여기서 보고된 사망자의 90% 이상, 경제적 손실의 60% 이상이 개발도상국에서 발생하였다. 이러한 극한 현상의 영향은 생명과 생계의 손실, 빈곤과 불평등 심화, 식량과 물의 불안정 증폭, 경제적 불안정 야기, 그리고 궁극적으로 지속가능한 발전을 훼손시킨다.

2023년에 벌써 기록적인 기상, 기후, 물 관련 극한 현상들이 전세계를 걸쳐 발생하였다. 기록상 가장 오래 지속된 태풍인 Freddy 싸이클론은 남아프리카 전역을 걸쳐 취약 커뮤니티에 영향을 미쳤고, 아시아에는 Doksuri 태풍이 발생하여 베이징에 140년 동안 기록한 이래 가장 많은 비가 내렸다. 유럽과 북미, 중국에서는 7월 기온이 치솟으면서 가장 뜨거운 달이 되었는데 인간에 의한 기후변화가 없었다면 거의 발생하지 않을 현상이다. 캐나다 동부에는 기후변화로 인해 극심한 산불 발생 확률이 두배 증가하였고, 기록적인 해양표면온도로 인해 지중해와 미국 해안가에 폭염을 가지고 왔다. 이러한 극한 현상은 인간의 건강과 생태계, 에너지, 농업, 수자원 공급에 크게 영향을 미치며 전세계적으로 지속가능한 발전을 위협한다.

날씨와 기후, 물 관련 과학의 발전은 SDG 달성을 위한 우리의 노력을 촉진시킬 수 있다.

세계는 현재 역사에 유례없는 과학, 기술 및 지식을 갖추고 있다. 특히, 날씨와 기후, 물과 관련된 과학과 서비스는 지난 몇 십년동안 혁신적인 진보를 보여왔다. 과학적 진보, 위성과 슈퍼컴퓨터, 그리고 관측자료의 증가로 수문기상학적 현상을 예측하고 미래 변화를 예측할 수 있는 우리의 능력이 더욱 낮은 불확실성으로 가능해졌다. 조기경보 시스템의 진전으로 사망률이 감소하였고, 현재 예보(초단기예보), 인공지능, 고해상도 모델링과 같은 신기술로 인해 우리가 고(high) 영향 기상 및 물 재해를 예측하는 방법이 크게 진보하고 있다. 종종 과소평가되기는 하지만, 날씨와 기후, 물과 관련된 과학과 서비스는 그림 1에서 강조되고 있는 것처럼 SDG를 달성하는데 핵심적인 역할을 한다.



그림1. 날씨, 기후, 물 관련 과학은 여러 SDG 목표 달성을 지원함

그러나, SDG 달성을 위해 날씨와 기후, 물 관련 과학을 지속가능한 발전에 효과적이고 공정하게 사용하는 것에는 여러 어려움이 존재한다. 세계 일부에서 불충분한 관측시설과 자료 교환이나 접근에 대한 제한으로 인해 전지구 표면 기반 자료에 대한 격차가 남아 있고, 이는 지역적 또는 전세계적 날씨와 기후, 물 관련 서비스의 품질에 현저하게 영향을 미친다. 특히 저소득 국가에서는 불충분한 자료로 인해 지식 격차가 발생하고 비효율적인 정책이 만들어지면서 SDG 목표 달성을 제한한다. 게다가, 이해 가능하고, 경제적이며, 적용가능한 실시간 날씨와 기후, 물 정보로 지역 커뮤니티에 다가가는 것과 상황에 맞는 지역적 토착 지식을 효율적으로 연계하는 것은 여전히 큰 과제로 남아 있다. 지역 이해관계자와 이들의 지식을 통합하지 않으면 과학의 효율성이 떨어진다. 그리고 마지막으로, 과학 역량의 부족은 많은 국가에서 날씨와 기후, 물 관련 과학을 효율적으로 사용하여 SDG를 달성하는 원대한 활동 지원을 방해한다.

최종 경적의 시기가 다가옴에 따라, 과학 커뮤니티에 대한 투자와 결집은 SDG 달성을 급속히 촉진할 수 있을 것이다.

2023년 8월, UN 총회는 2024년을 2033 지속가능 발전을 위한 국제적 과학의 십년으로 지정하는 결의문을 채택하였다. 향후

과학 커뮤니티는 인류의 과업이 중반부로 향해가면서 판도를 바꾸는 역할을 할 것이다. 날씨와 기후, 물 관련 과학과 서비스의 유례없는 발전은 아직 지속가능한 발전을 지원하는데 잘 활용되고 있지 않지만, SDG 달성을 위해서는 반드시 향상되어야 하고, 가속화되어야 하며, 더욱 규모가 커져야 한다. 우리는 2030년까지 SDG 달성을 위한 해결책을 가지고 있고, 이제 SDG 실행을 급속도로 촉진시킬 과학 커뮤니티를 결집시킬 때이다.

추천사항

- **날씨와 기후, 수문학적 관측과 데이터의 격차 감소**
체계적인 관측에 투자하고 자료의 제한 없는 무료 교환을 장려하는 것은 SDG 달성을 위해 지구 시스템을 이해하고 날씨, 기후, 물 관련 과학과 서비스를 강화하는데 필수적이다.
- **연구 고도화 및 과학기술혁신에 대한 접근성 확장**
통합 날씨, 기후, 물 관련 연구를 확대함으로써 기존에 존재하던 지식 공백을 메우고 고해상도 모델링, 인공지능, 실시간 예보(nowcasting)와 같은 신기술을 고도화하여, 이러한 기술에 접근할 수 있게 될 때 SDG를 지원할 수 있을 것이다.
- **교육 및 훈련을 통한 과학 역량 및 기술 강화**
특히 저소득 국가의 과학적 역량을 향상시키는 것은 날씨, 기후, 물 관련 과학의 사용을 향상시키고 혁신을 지원하여 국가 지속가능 정책, 계획, 활동이 최적의 과학에 기반하여 이루어질 수 있도록 할 것이다.
- **지역적, 맥락에 맞는, 그리고 토착 지식의 수용**
시민 과학, 공동 생산과 같은 참여적이고 사용자 주도적 접근법을 강화하면 지역적, 맥락에 맞는, 그리고 토착 지식의 통합 및 합법화를 지원하여 날씨, 기후 및 물 관련 과학을 SDG의 실질적 영향으로 전환할 수 있다.
- **과학의 영향력을 높이기 위해 다양한 이해관계자를 통합**
과학자, 민간부문, 시민사회, 청소년, 지역사회, 정부 등 다양한 이해관계자들과의 다학제간 협업을 동원하는 것은 사회 전반에 걸쳐 날씨 및 기후, 물 관련 과학의 효율성을 향상시키고 SDG 달성을 위한 진전을 가속화하는데 필수적이다.

날씨, 기후, 물 관련 과학 및 서비스와 지속가능 발전 목표의 연관성

SDG 달성을 위한 변화를 가속화하는 데 있어 과학의 중요성을 강조하고 있는 2023년 전세계 지속가능 발전 보고서(Global Sustainable Development Report 2023)에 더하여, 2023년 기후합동보고서는 지속가능한 발전을 위한 가장 최신의 날씨와 기후, 물 관련 과학과 서비스에 관한 높은 수준의 편집본을 제공한다. 이러한 과학과 서비스는 모든 SDG의 성과를 뒷받침하지만, 날씨, 기후, 물 관련 과학과 서비스가 지속가능한 발전을 지원하는 모든 방법에 대한 완전한 분석은 이 보고서의 범위를 벗어난다. 따라서 이 보고서에서는 해당 과학의 직접적인 연관성을 바탕으로 8가지 SDG를 선택하여 리뷰하였다. 8가지 SDG는 SDG 2(기아종식), SDG 3(건강과 행복한 삶 보장), SDG 6(깨끗한 물과 위생), SDG 7(적정 가격의 깨끗한 에너지), SDG 11(지속가능한 도시와 지역사회), SDG 13(기후행동), SDG 14(수생태계 보전), SDG 17(목표 달성을 위한 파트너십)이다.

다른 SDG도 중요하지 않은 것은 아니지만, 이들은 날씨, 기후, 물 관련 과학 및 서비스와의 연관성이 보다 간접적이고 또한 이 보고서에서 다루는 8개의 SDG와 종종 연관이 되어있다. 예를 들면, 기상예보 및 기후예측은 농업의 의사 결정과 생산을 지원하고, 따라서 식량 안보를 향상시키고(SDG 2. 기아종식), 이에 따라 생계를 향상시키고 빈곤을 감소시킨다(SDG 1. 빈곤퇴치). 또한, 이들 과학이 지속가능한 발전을 가능하게 하는 역할을 한다는 것에 대한 제한적인 지식과 이해가 특정 SDG를 보다 심층적으로 분석하는 데 장애물이 되는 경우도 있다. 이 장에서는 이 보고서에서 자세히 다루지 않은 SDG에 대해 간략히 설명하겠다.

SDG 1: 빈곤 퇴치

SDG 1은 모든 곳에서 어떠한 형태로의 빈곤도 몰아내고자 한다. 기후변화는 생계를 방해하고, 식량과 물의 부족을 증폭시키고, 경제적 불안정을 조장함으로써 빈곤을 심화하여 SDG 1 달성에 큰 어려움을 준다. 그러나, 날씨 및 기후, 물 관련 과학과 서비스, 특히 조기경보 시스템은 인간의 생계에 대한 기후변화의 영향을 감소시키고 인명 및 경제적 손실을 방지할 수 있도록 도와 줌으로써 빈곤 감소에 실질적인 이익을 가져온다. 예를 들어 계절 및 장기 예측으로 기후변화 영향에 대한 농부들의 노출을 줄이는데 도움을 주어 농업 생산성 향상과 생계 개선, 빈곤 저감에 기여한다(Griggs et al., 2021). 또한 기후 예측은 변화하는 기후 조건에서 취약계층의 사회경제적 복지를 촉진시킬 수 있는 미래 발전 및 적절한 적응 방법을 알 수 있게 한다.

SDG 4: 양질의 교육

극한 기상 현상 및 기후변화는 전 세계 커뮤니티에 영향을 미치며, 이러한 문제를 이해, 적응, 완화할 수 있는 지식과 기술을 갖추는 것이 필수적이다. 날씨, 기후, 물과 관련된 과학 교육을 교육과정에 포함시키면 학생들의 과학적 소양, 비판적 사고, 사회적 공감 및 증거 기반 문제 해결 능력이 향상된다. 또한 기상 및 기후 과학 중점 교육이 혁신 및 기술 발전의 촉매제가 될 수 있다. 기후변화에 의해 야기되는 복잡한 문제들을 해결하는 위해서는 기상학자, 수문학자, 기후과학자 및 정책 전문가와 같은 기존의 전문가들의 현재 역량을 향상시키거나 다시 숙련시키는 것이 필요하다. 또한 에너지 저장 전문가, 친환경 건축가, 스마트 시티 도시 계획가, 탈탄소 전략가와 같은 직업군을 위한 교육을 장려하는 것이 필요하다. 학생들에게 기상 및 기후 역학, 물 관리, 환경 과학에 대한 더 깊은 이해를 촉진시키면 능동적이고 지식을 갖춘 세계 시민이 될 수 있을 것이다. 그 결과, 이들은 현재와 미래의 도전과제를 해결하고, 해결책을 개발하고, 지속가능한 발전 노력에 기여할 준비가 잘 되게 될 것이다.



Photo: Ab Rashid, UNDP Climate

SDG 5: 성평등

날씨와 기후 영향은 성에 중립적이지 않다. 경제적 지위, 위치, 나이, 장애, 결혼 상태와 같은 여러 사회적 결정 요인이 교차하는 과정에서 여성과 남성이 다르게 경험한다(Azcona et al., 2023). 성차별은 식량 불안정, 빈곤, 성별에 따른 폭력, 조기 및 강제 결혼의 위험을 포함하면서 여성과 소녀들에게 기후와 관련된 위험을 높게 된다. 극한 기상 및 기후변화에 대한 취약성에도 불구하고, 여성들이 과학 과정에 효과적으로 통합될 경우 지역 문제를 해결하는데 획기적인 역할을 할 수 있는 지식을 가지고 있기도 한다. 예를 들어, FemLINKPacific's Women's Weather Watch 이니셔티브에서는 기상 정보가 멀리 떨어진 지역 사회에 도달할 수 있도록 여성을 참여시키고, 재난 대비, 관리 및 대응에 지역 여성들이 참여한다(Gendered Impacts of Weather and Climate: Evidence from Asia, Pacific and Africa). 여성의 지식을 통합하고 과학적 과정에 참여시키는 것이 날씨, 기후 및 물 관련 과학 및 서비스가 그들의 요구를 충족시키는데 더 적합할 수 있다.



SDG 8: 양질의 일자리와 경제성장



SDG 8은 지속적이고 포괄적이며 지속가능한 경제 성장과 완전하고 생산적인 고용 및 모드를 위한 양질의 일자리를 장려한다. 세계경제포럼(2023)에 따르면, 향후 10년 동안 세계 경제 발전에 있어 가장 큰 세 가지 위험은 기후변화 완화의 실패, 기후변화 적응의 실패, 자연 재난 및 극한 기상 현상이다. 그러나, 날씨 및 기후, 물 관련 과학 및 서비스는 생명 및 재산에 임박한 위험에 대한 조기 경고부터 적응활동에 필수적인 기후변화에 대한 장기 예측까지 다양한 시간 규모에 걸쳐 경제적, 환경적, 사회적 이점을 제공한다(Kull et al., 2021). 게다가, 조기 경보 시스템은 국가 및 지역 수준에서 근로자, 사용자, 그리고 당국의 사전 조치 및 대응을 가능하게 하여 직장의 인적 및 경제적 손실을 방지하는데 중요한 역할을 한다(ILO, 2022). 또한, 조기 경보 시스템은 직장 내 산업 보건 및 안전 표준의 일부로서 양질의 일자리를 장려한다.

SDG 9: 산업, 혁신, 사회기반 시설



SDG 9는 회복력 있는 인프라를 구축하고 포용적이고 지속가능한 산업화를 장려하며 혁신을 육성하는 것을 목표로 한다. 산업과 혁신은 기후변화와 극한 기상 현상의 영향에 크게 취약하다. 극한 기상 현상은 주요 인프라 시설을 파괴하거나 손상시키며 인적, 경제적 손실을 가지고 오고, 해수면 상승과 같은 기후변화 영향은 해안 산업과 인프라를 위협한다. 그러나, 날씨 및 기후, 물 관련 과학과 서비스는 SDG 9를 달성하기 위한 활동에 중요한 역할을 한다. 예를 들어, 기상 예보 및 조기 경보의 발전은 기반시설과 산업을 자연 재해로부터 보호하고, 기후변화 시나리오를 통해 해안지역 및 다른 취약한 지역의 구조물 배치와 기후검증에 대한 지침을 제공함으로써 기반시설의 회복력을 향상시킨다. 또한, SDG 9를 달성하기 위해서는 과학 연구의 향상이 필수적이며, 날씨 및 기후, 물 관련 연구는 특히 전 사회에 이익을 가져오는 혁신을 촉진시키고 모든 SDG 달성에 기여할 수 있다.

SDG 10: 불평등 감소



SDG 10은 국가 내 또는 국가 간의 불평등을 줄이기 위해 노력한다. 나이, 성별, 장애, 인종, 민족성, 출신지, 종교, 경제적 지위 또는 다른 지위와 관련된 기존의 불평등은 기후변화와 극한 기상 현상의 영향에 대한 취약성을 증가시킨다. 동시에 이러한 영향이 기존의 불평등을 악화시켜 악순환으로 이어진다(Islam and Winkle, 2017). 또한, SDG 10의 10.7 목표는 질서 있고, 안전하며, 규칙적이고 책임감 있는 이주와 사람들의 이동을 용이하게 하는 것이다. IPCC(2023)에 따르면, 극한 기상 및 기후로 인해 아프리카, 아시아, 미주, 카리브해와 남태평양 작은 도서국가에서의 이동이 점점 증가된다. 그러나, 날씨 및 기후, 물 관련 과학과 서비스는 기후와 관련된 강제 이동을 최소화할 수 있다. 예를 들면, 재해 재난에 대한 조기 경보는 인명과 생계를 구할 뿐만 아니라 강제 이주를 야기할 수 있는 손실과 피해를 줄일 수도 있다. 또한, 이러한 과학으로 적응 전략을 전달함으로써 사람들이 선택한다면 그들이 있는 곳에 머물 수 있도록 하거나, 날씨 및 기후, 물 관련 재해에 대한 위험이 증가하지 않는 지역으로 안전하고 품위 있게 이동할 수 있도록 하는 재배치를 계획할 수 있게 한다.

SDG 12: 지속가능한 생산과 소비



SDG 12는 지속 가능한 소비와 생산 패턴을 보장하는 것을 목표로 한다. 날씨 및 기후, 물 관련 과학과 서비스는 다른 SDG를 통해 SDG 12 달성을 지원하는 간접적인 역할을 한다. 예를 들어, 시기 적절하고 신뢰할 수 있으며 실행 가능한 자료와 정보에 대해 접근함으로써 농업 생산성이 향상되고, 이에 따라 극한 기상 및 기후변화에 따른 악영향으로 인해 발생하는 식량 손실이 줄어든다(SDG 2 - 기아 종식). 게다가, 날씨 및 기후, 물 관련 과학은 재생에너지 계획 및 개발, 에너지 시스템 관리를 포함하여 지속 가능한 에너지 소비 및 생산 지원에 필수적이다(SDG



Photo: Vladimir Tadić

7 - 적정 가격의 깨끗한 에너지). 기후 모델로 해양의 미래 사용과 보존에 대한 시나리오 개발을 지원할 수 있고(SDG 14 - 수생태계 보존), 육지, 날씨, 기후, 물에 관한 자료는 육지 천연 자원의 지속 가능한 관리를 지원하기 위해 가뭄, 홍수, 산불, 모래 먼지 폭풍에 대한 관측, 감시, 모델링, 예측, 조기경보를 하는데 중요하다(SDG 15 - 육상생태계 보호).



SDG 15: 육상생태계 보호

SDG 15는 육상생태계의 보호, 복원, 지속 가능한 사용과 산림의 지속 가능한 관리, 사막화 방지, 토양 황폐화 중단 및 복원, 생물 다양성 손실 중단을 추구한다. 가뭄, 홍수, 산불과 같은 극한 기상 현상과 기후변화의 영향은 토양과 SDG 15 영향 달성을 저해한다. 기후변화와 토양 황폐화, 삼림 벌채, 생물다양성 손실의 상호 작용으로 환경, 식량 및 물 안보, 보건이 큰 영향을 받게 되며 결과적으로 지속 가능한 발전에 영향을 미친다. 토양, 날씨, 기후, 물에 대한 자료는 사회 전반의 영향을 줄이기 위해 가뭄, 홍수, 산불, 모래 먼지 폭풍에 대한 관측, 감시, 모델링, 예측, 조기 경보를 지원하는데 중요하다. 가뭄, 홍수, 모래 먼지 폭풍에 대한 세계적 협력을 통해 이러한 현상들에 대한 대비를 위한 경고와 자문을 제공하고, 피해를 최소화하고 지속 가능한 발전을 지원하기 위해 회복력 구축과 적응 및 완화 활동을 촉진하는데 필요한 지침을 개발할 수 있다.



SDG 16: 정의, 평화, 효과적인 제도

SDG 16은 지속가능한 발전을 위해 평화롭고 포용적인 사회를 촉진하고, 모두가 정의에 접근할 수 있도록 하며, 모든 수준에서 효과적이고 책임감 있고 포용적인 제도를 구축하는 것을 목표로 한다. 전 세계에서 진행중인 갈등은 SDG 16 달성을 위협한다. 기후변화와 극한 기상 현상이 직접적으로 갈등을 야기시키지는 않지만, 그 영향은 갈등의 위험을 증가시키는 사회, 경제, 정치의 복합적인 압력과 교차된다(ICRC, 2020). 예를 들면, 기후변화와 극한 기상 현상은 이미 갈등과 취약함을 지속적으로 겪고 있는 지역의 식량, 물, 경제 안보를 위협한다. 그 결과, 사람들은 생계와 삶의 방식을 다양화하거나 더 많은 기회와 보호를 추구하기 위해 이주하게 되면서 자연 자원에 대한 압력을 증가시켜 지역 사회 간에 갈등을 야기할 수도 있게 된다. 기후변화와 갈등의 상호 연관성은 복잡한 문제이다. 하지만, 날씨 및 기후, 물 관련 과학과 서비스로 식량, 물, 에너지, 보건 안보를 달성하여 이들의 불안정으로 인해 야기되는 갈등의 위험을 줄일 수 있다.

최신 과학 현황

주요 메시지

- 화석 연료와 토지이용 변화로부터 발생된 총 이산화탄소 배출량은 2022년과 2023년 상반기에도 여전히 높았음. 화석 연료에 따른 이산화탄소는 2021년과 비교하여 2022년에 전세계적으로 1% 증가하였고, 전 세계 평균 농도도 2022년과 2023년 상반기까지 지속적으로 증가함
- 2015년부터 2022년까지 8년은 기록상 가장 따뜻한 8년임. 그리고 향후 5년안에 기록상 가장 따뜻한 해가 한번 이상 발생할 확률은 98%임
- 현재의 완화 정책으로는 이번 세기에 전지구 평균 온도가 산업화 이전 대비 2.8 °C 상승할 것으로 추정됨. 파리 협정 목표를 달성하기 위해서는 긴급하고 유례없는 온실가스 배출량 저감이 필요함

온실가스 배출량과 농도

온실가스 배출과 관련된 인간의 활동은 지구 온난화를 분명히 야기하였고, 2013-2022년 관측된 지구 표면 온도는 산업화 이전 수준(1850-1900)보다 1.15°C 높은 수준에 도달하였으며, 이 중 1.14°C는 인간의 영향에 기인한 것이다(IPCC, 2023, Forster et al., 2023에서 업데이트됨). 온실가스 배출량은 지역 간, 국가 간 및 국가 내, 개인 간의 화석 연료 사용, 토지 사용 및 토지 사용 변화, 생활양식, 소비와 생산의 패턴에 따라 역사적으로도 그리고 현재도 불평등하게 지속적으로 증가하고 있다.

전세계 탄소 프로젝트에 따르면, 인간 활동에 기인한 총 이산화탄소 배출량은 2022년에도 여전히 많아, 약 406억 톤의 이산화탄소가 배출되었다고 추정하고 있다.¹ 화석연료에 따른 이산화탄소 배출량은 2021년 대비 2022년에 1%(불확실성 범위: 0.1%~1.9%) 증가한 것으로 추정되는데, 이는 주로 코로나 팬데믹 이후 항공업계가 다시 반등하면서 석유 사용이 증가한

데 따른 것이다(Friedlingstein et al., 2022). 석탄에 따른 배출량은 전세계적으로 1% 증가하였고(불확실성 범위: 0.2%~1.8%), 천연가스 관련 배출량은 감소하였다.

지구온난화를 1.5°C로 제한할 가능성이 50%인 탄소 예산의 남은 부분은 계속해서 고갈되고 있으며, 최근 IPCC 추정치의 업데이트를 기반으로 약 250 GtCO₂로 감소했다(Forster et al., 2023). 총 이산화탄소 배출량이 현재 수준을 유지한다면, 이 남은 탄소 예산은 2030년이 되기 전에 소진되어, 불가피하게 지구 온난화가 1.5°C를 초과하게 될 것이다.

잠정 추정치에 따르면 2023년 1월부터 6월까지 전세계 화석 연료에 따른 이산화탄소 배출량은 2022년 같은 기간보다 0.3% 증가했으며(그림 1), 발전 및 국내 사용에 따른 배출량은 감소하였으나 산업 및 모든 운송부분(지상, 국내 및 국제 항공)으로부터 발생한 배출량은 전년 동일 기간 대비 증가하였다(Carbon Monitor).

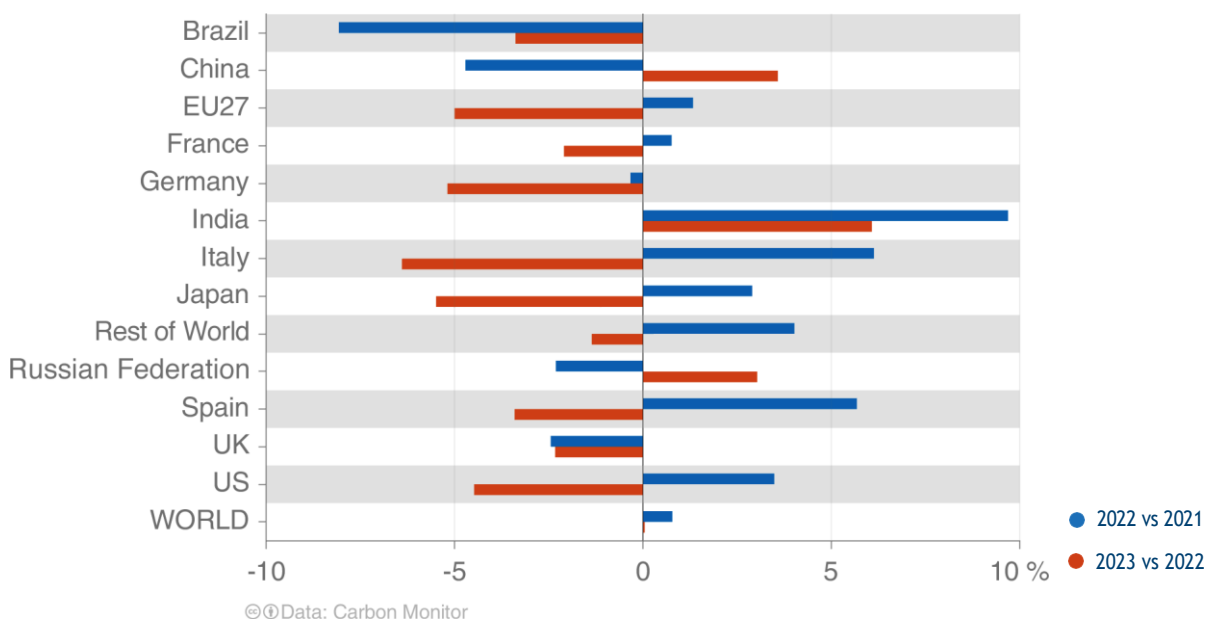


그림 1. 2022년 1월-6월 대비 2023년 동일기간 동안 화석 연료에 기인한 이산화탄소 배출량의 잠정 추정치의 확률 변화. 2021년과 2022년 동일 기간 대비 변화 (출처: Carbon Monitor)

1. 온실가스 배출량은 100년 이상 지구온난화 잠재량을 이용하여 이산화탄소 환산량(CO₂-equivalent)으로 산출됨

배출량이 계속 증가함에 따라, 이산화탄소, 메탄, 아산화질소를 포함한 대기중 온실가스 농도도 증가하고 있는데, 이들은 인간의 활동과 밀접하게 연결되어 있고 생물권 및 해양과 강하게 상호 작용한다(WMO *Greenhouse Gas Bulletin, No. 18*). 대기중 온실가스 농도의 변화를 예측하려면 원인과 흡수원, 화학적 변화에 대한 정량적 이해가 필요하다. WMO 지구 대기 감시(GAW) 상황 관측 네트워크의 최근 관측자료 분석에 따르면 이산화탄소, 메탄, 아산화질소에 대한 전 세계 평균 지표물분율²이 2021년에 최고치를 경신하여 이산화탄소는 $415.7 \pm 0.2 \text{ ppm}^3$, 메탄은 $1,908 \pm 2 \text{ ppb}$, 아산화질소는 $334.5 \pm 0.1 \text{ ppb}$ 이다. 이 값들은 각각 산업화 이전(1750년 이전) 수준의 149%, 262%, 124%이다. GAW 관측소 네트워크 관측을 통해 기록된 바와 같이 이산화탄소는 2022년과 2023년 초까지 계속 증가하였다⁴.

전세계 기후 지수

인간에 의한 기후변화는 대기, 해양, 빙권, 생물권에 광범위하고 빠르고 강력한 변화를 일으켜 많은 극한 날씨 및 기후에 영향을 미쳤다(IPCC(2023)에서 2020년까지 평가하였고, Forster et al.(2023)에서 2022년까지 업데이트함). WMO 전지구기후현황 보고서는 전지구 기온과 해양 열, 해빙 범위 및 빙하 질량과 같은 빙권 지수를 포함하여 전세계 기후 지수의 상태를 매년 요약하여 제공한다(Trewin et al., 2021).

전세계 평균 기온

2015년부터 2022년까지는 기록상 가장 따뜻한 8년이었다(그림 2). 2023년은 그 시작부터 따뜻하였고 엘니뇨도 발생하면서 2023년이 기록상 가장 따뜻한 해에 속할 가능성을 높였다. 지난

2013년부터 2022년까지 10년 동안의 전세계 평균 기온은 1850-1900년 평균보다 1.15°C 높았고(Forster et al., 2023), 2023년 6월까지의 잠정적 추정치로 $1.18 \pm 0.12^\circ\text{C}$ 까지 계속해서 높아졌다. 2013-2022년의 10년 동안 인간에 의해 유발된 온난화의 요소는 $1.14 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 로(Forster et al., 2023), 관측된 전체 온난화 정도와 유사하다.

라니냐 현상은 2020년 후반부터 2023년 초까지 지속되었고, 전지구 기온은 장기적 추세보다 아래로 떨어졌다. 2023년 초 라니냐가 중단되면서 전지구 기온은 기록적으로 증가하였다. 2019년부터 2023년 6월까지 전 세계의 대부분의 지역이 최근 평균(1991-2020)보다 따뜻했고, 북미 일부, 인도, 남대양, 호주 동부지역만 최근 평균기온보다 낮았다(그림 3).

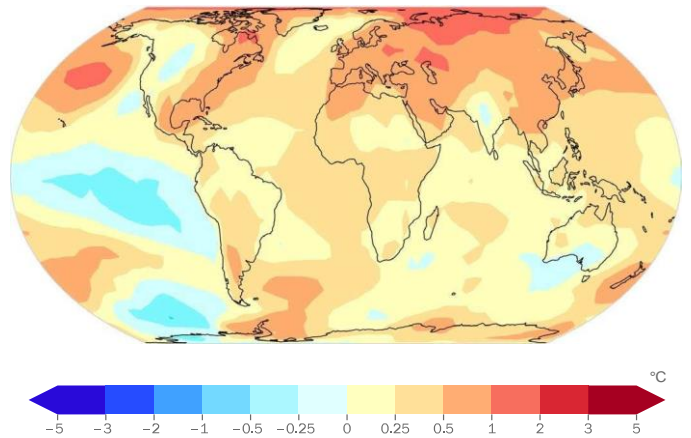


그림 3. 2019-2020년 평균과 2019-2023년(2023년 6월까지 자료)의 5년 평균 지표부근 기온 차이(°C). 지도의 각 격자 값은 5개 자료출처 (HadCRUT5, GISTEMP, NOAAGlobalTemp, JRA-55, ERA5)로부터 평균(median)하여 계산한 값.

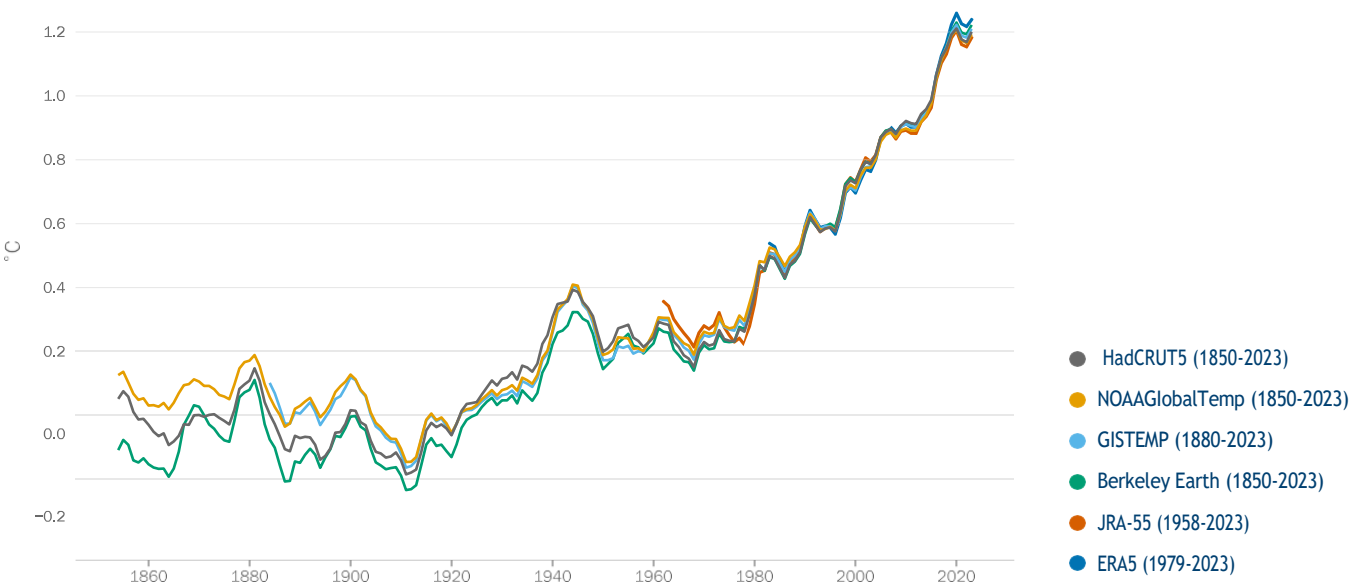


그림 2. 1800-1900년 평균값 대비 1850-1854년부터 2019-2023년(2023년 6월까지 자료) 전지구 기온 아노말리의 5년치 평균의 차이. 6개 자료 사용.

2. 물분율: 기체 또는 유체 혼합물의 농도에 대한 표현으로 대기 화학에서 물분율은 건조한 공기 1몰 당 화합물의 몰 수로 농도를 표현하는데 사용됨
 3. ppm: 건조한 공기 100만(10⁶)분의 1 분자당 기체의 분자 수
 4. 여기서 언급된 세 가지 기체에 대한 전지구 평균 물분율은 2023년 11월에 업데이트될 예정임

해양 열 함량

지구 시스템에서 온실가스 농도 증가로 인해 축적된 초과 에너지의 90% 정도는 바다가 가져간다. 이렇게 추가로 들어간 에너지는 바다를 따뜻하게 하고, 결과적으로 물의 열 팽창은 해수면 상승으로 이어지는데, 여기에 육지에서 녹고 있는 얼음도 함께 해수면 상승에 기여하게 된다. 바다의 표면층은 심해보다 더 빠르게 따뜻해져서 전세계 평균 해수면 온도 상승에 기여하게 되고 해양 폭염 발생률이 증가한다. 잠정 데이터에 따르면 2023년 5월과 6월 당시 전세계 해수면 온도는 기록상 최고치였으며, 특히 북대서양 온도는 유례없는 수치였다 (Preliminary Data Shows Hottest Week on Record – Unprecedented Sea Surface Temperatures and Antarctic Sea Ice Loss).

해양 열 함량은 바다로부터 축적된 열을 측정하는 것이다. 그림 4는 1960년부터 2022년까지 0~2,000m의 전세계 해양 열 함량을 보여준다. 해양 상부 2,000미터는 2022년에 계속해서 따뜻해져 기록상 가장 높은 열 함량에 도달했다. 열 함량은 앞으로도 계속해서 증가할 것이라 예상되며 이는 백년~천년의 시간규모 동안 되돌릴 수 없는 변화이다(Riser et al., 2016; Roemmich et al., 2019). 모든 자료에서 해양 온난화 정도가 지난 20년동안 특히 높았다고 나타났는데, 0-2,000미터의 해양 온난화는 1971~2022년에 $0.7 \pm 0.1 \text{ Wm}^{-2}$ 인 반면, 2006~2022년에는 $1.2 \pm 0.2 \text{ Wm}^{-2}$ 였다.

지구 에너지 불균형(EEI)에는 바다, 육지, 대기의 온난화, 얼음이 녹는 것과 관련된 에너지의 변화를 모두 포함한다. 가장 최근의 IPCC 보고서에 따르면 EEI는 2006-2018년 동안 0.79 Wm^{-2} 였다 (IPCC, 2021). 더 최근에 업데이트 된 EEI 수치는 2010~2022년 동안 0.89 Wm^{-2} 으로 추정된다(Forster et al., 2023).

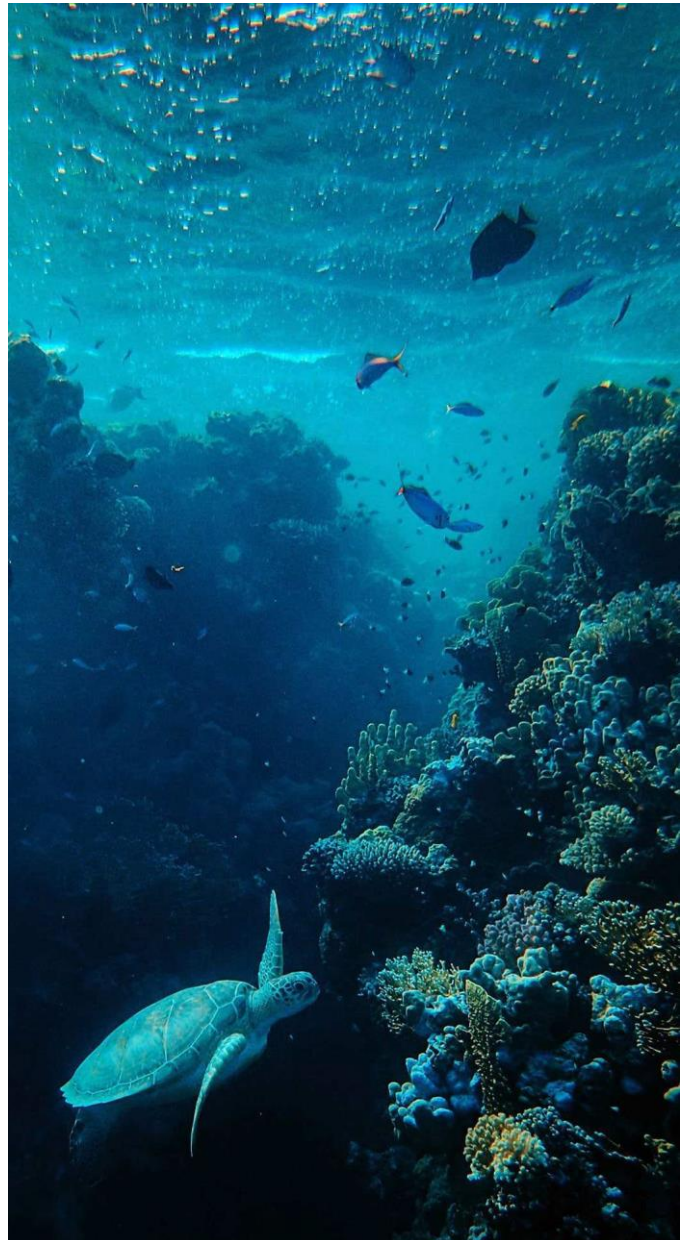


Photo: Francesco Ungaro - Pexels

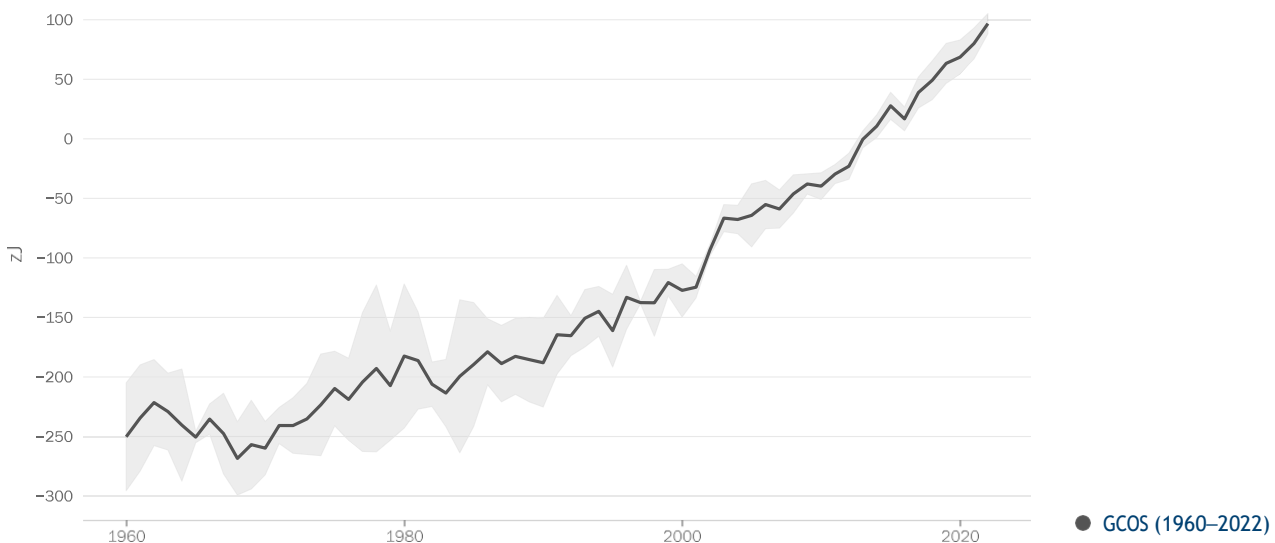


그림 4. 1960~2022년 동안 0~2,000미터 전세계 해양 열 함량. 자료는 여러 데이터 셋의 종합하여 사용 (Appendix 참조).

빙권

1979~1988년과 2010~2019년 사이에 북극 해빙 면적 감소의 주요 원인은 인간의 영향일 가능성이 매우 높다(IPCC, 2023). 현재 북극 해빙 면적(연간 및 늦여름 모두)은 1850년 이후 가장 낮은 수준이며, 북극은 2050년 이전에 여름에 얼음이 거의 없는 상태에 도달할 가능성이 높다. 2018~2022년 기간 동안 9월 북극 해빙의 범위는 1991~2020년 평균보다 거의 백만 km² 작아졌다(그림 5).

1979~2020년까지 남극 해빙 범위는 지역적으로 상반된 추세와 내부 변동성으로 인해 특별한 경향성은 없었다(IPCC, 2021). 남극 해빙의 범위는 위성의 시대가 시작된 2015년 즈음부터 천천히 증가하다가(그림 6), 2015~2017년 사이에 급격히 줄어들었다가, 2017~2021년 사이에 장기적 평균치로 회복한 뒤, 2022년 2월에 기록상 최저치에 도달하였고, 2023년 2월에 다시

최저치에 도달했다. 가을과 초겨울동안 빙하성장이 미미하여 6월과 7월의 일일 면적도 이전 기록인 최저치를 크게 밑도는 수준으로 나타났다. 잠정 자료에 따르면, 2023년 6월 남극 해빙은 위성 관측이 시작된 이래 6월 기준으로는 최저치를 기록하였으며, 이는 평균보다 17% 부족한 수준으로 이전 6월 기록과 상당한 차이가 난다(Preliminary Data Shows Hottest Week on Record – Unprecedented Sea Surface Temperatures and Antarctic Sea Ice Loss).

빙하는 또한 인간에 의한 기후변화에 아주 민감하다. 빙하연도 2021/2022년에 37개의 참조 빙하에서 나온 가용한 자료에 따르면 전세계 평균 질량이 -1.18 물 등가물(m w.e.)로 지난 10년 동안의 평균(2012~2021년 동안 -0.92m w.e.)보다 훨씬 큰 질량 손실이다(WGMS, 2021). 빙하 손실은 특히 유럽 알프스, 아시아 고산지대, 북아메리카 서부, 남아메리카, 북극 일부에서 심했다.

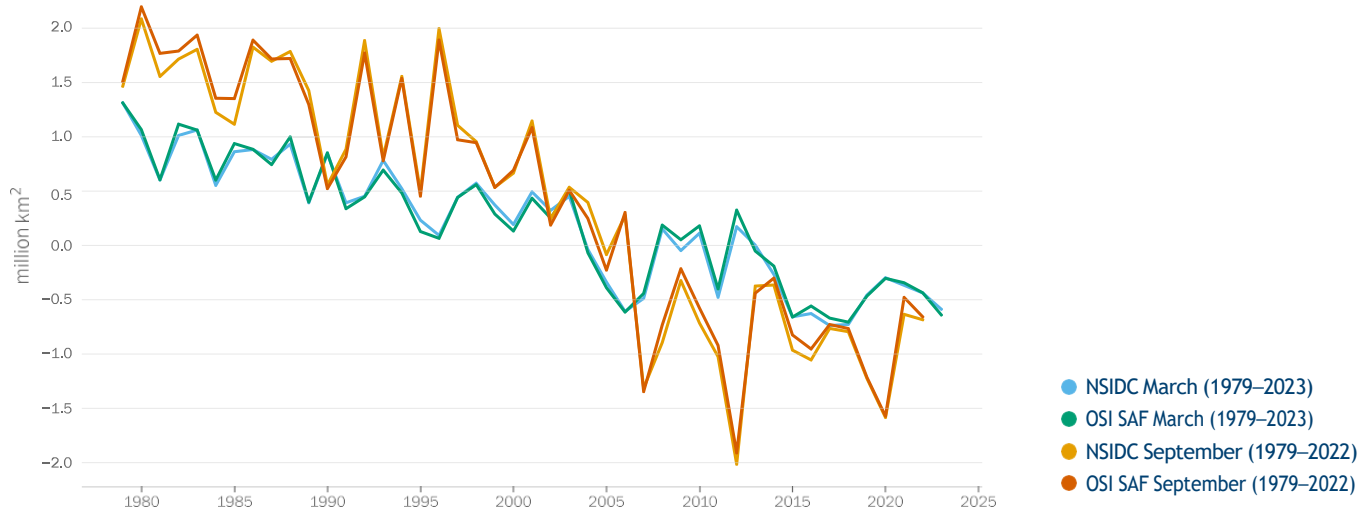


그림 5. 1979년부터 2023년 3월까지 남극의 최대 얼음 덮인 달(3월)과 최소 얼음 덮인 달(9월)에 대하여 1991~2020년 평균값에 대한 해빙 면적 차이. 출처: 미국 국립빙설데이터센터(NSIDC), 유럽 기상위성이용기구(EUMETSAT)의 해양빙하위성활용기구(OSI SAF)

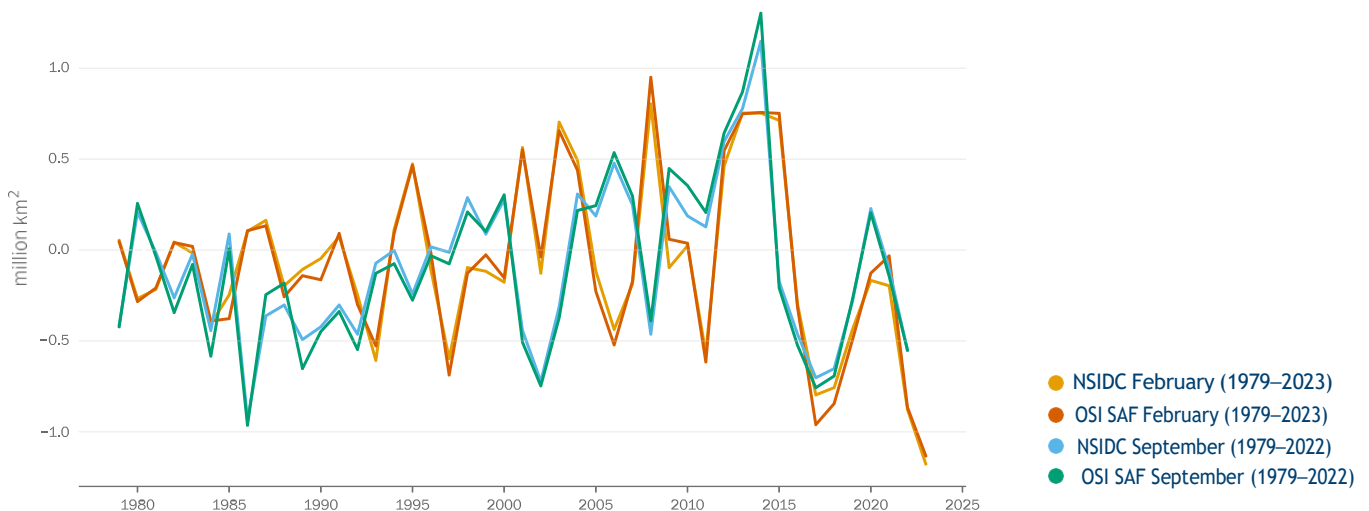


그림 6. 1979년부터 2023년 3월까지 북극의 최대 얼음 덮인 달(9월)과 최소 얼음 덮인 달(2월)에 대하여 1991~2020년 평균값에 대한 해빙 면적 차이. 출처: 미국 국립빙설데이터센터(NSIDC), 유럽 기상위성이용기구(EUMETSAT)의 해양빙하위성활용기구(OSI SAF)

2023년 극한 현상

극한 날씨는 지구가 따뜻해지면서 점점 더 빈번하게 일어나고 있고 처참한 사회경제적 결과를 초래하였다. 1970년부터 2021년 사이에 11,778건의 자연재해가 보고되었고, 극한 기상 및 기후 현상으로 인해 2,087,229명이 사망하고, 4.3조 달러의 경제적 손실이 발생하였다. 날씨 및 기후, 물과 관련된 자연재해로 인한 사망자의 90% 이상, 경제적 손실의 60% 이상이 개발도상국에서 보고되었다 (WMO Press release No. 22052023).

2023년은 극한의 해로 지칭되며 이미 전세계적으로 기록적인 날씨, 기후, 물 관련 사건들이 발생하였다. 2023년 3월 모잠비크에 상륙한 사이클론 Freddy는 기록상 가장 오랫동안 지속된 열대성 저기압으로 5주 이상 지속되며 모잠비크와 마다가스카르, 말라위 전역에 걸쳐 광범위한 파괴를 일으켰다(NASA Tracks Freddy, Longest-lived Tropical Cyclone on Record). 열대성 저기압은 아시아에도 영향을 끼쳤는데, 태풍 Doksuri로 인해 2023년 7월과 8월 중국 일부에 폭우가 발생하였다. 베이징에는 2023년 7월 29일 밤과 8월 2일 아침 사이에 비가 744.8mm 내려 140년 동안 관측된 이래 가장 많은 비로 기록되었다(Typhoons Trigger Destruction and Record-breaking Rainfall in China). 캐나다 동부의 일부에서는 기후변화로 인해 기록적으로 따뜻한 기온과 가뭄이 심각한 산불을 발생시킬 조건을 만드는 등 극심한 화재가 발생할 기상 조건의 확률이 두배 이상 증가하였다(Barnes et al., 2023).

2023년 7월에 미국 남서부와 멕시코, 남유럽과 북아프리카, 그리고 중국 일부에 기록적인 더위가 발생하여 영향을 미쳤으며 2023년 7월 16일, 중국 투르판시에서는 52.2°C가 측정되어 국가 기록의 최고치를 갱신하였다. 세계기상기여(World Weather Attribution) 네트워크에서 수행한 분석에 따르면 인간이 초래한 기후 변화가 없었다면 이렇게 극심한 더위(점점 더 일반적인 현상이 되고 있는)는 극히 드물었을 것이라고 결론지었다(Zachariah et al., 2023). 또한, 기록적인 해수면 온도로 인해 지중해와 미국 연안에서 해양 폭염이 발생하였으며, 이는 해양 생태계와 해안 지역에 영향을 주었다(Preliminary Data Shows Hottest Week on Record – Unprecedented Sea Surface Temperatures and Antarctic Sea Ice Loss).

미래 기후

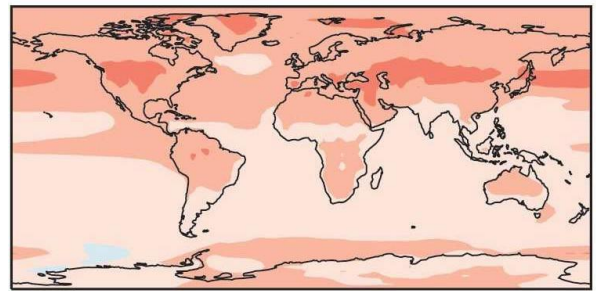
연간에서 십년 기후예측을 위한 WMO 선도센터(WMO Lead Centre for Annual to Decadal Climate Prediction)에 따르면, 전세계 평균 지표면 온도는 2023-2027년인 향후 5년동안 증가할 것으로 보이며 1991-2020년 평균값보다 훨씬 높을 것이라고 한다. 이 5년동안 매해의 연간 평균 전세계 지표면 온도는 1850-1900 기간 동안의 평균보다 1.1~1.8°C 정도 높을

것이라고 예측했다. 또한 지속적인 온실가스 배출로 인한 온난화와 엘니뇨의 출현으로 새로운 기록적 기온이 발생할 가능성이 높을 것이다. 향후 5년동안 기록상 가장 따뜻했던 2016년의 기록을 추월할 해가 한번 이상 발생할 확률은 98%이며 2023~2027년의 5년 평균이 지난 5년의 평균보다 높을 확률도 98%이다(Global Annual to Decadal Climate Update – Target Years: 2023 and 2023–2027).

온실가스가 지속적으로 배출되면 지구 온난화도 증가할 것이다. 시나리오 기반의 가장 최적의 추정치⁵는 장기간 온난화(20년 이상 평균)가 2030년대 초에 파리 협정에서 말한 1.5°C에 도달하는 것이다(IPCC, 2023). 자연적인 기후 변동성 때문에 이 시기 이전에 일시적으로 높아지는 때도 있을 것이고 전지구 온도가 이 수준에 도달함에 따라 그 빈도는 더 높아질 것이다(Trewin, 2022). 연평균 지표면 온도가 향후 5년 안에 적어도 한 해에 산업화 이전 수준보다 일시적으로 1.5°C를 초과할 확률은 66%이고 시간이 지남에 따라 증가하고 있다. 그러나 5년의 평균값이 이 수준을 초과할 가능성은 별로(32%) 없다(Global Annual to Decadal Climate Update – Target Years: 2023 and 2023–2027).

그림 7은 두 확장된 계절(5월~9월 및 11월~3월)에 대하여 1991~2020년 평균 대비 2023~2027년의 예측 기온 패턴을 보여주고 있다. 두 계절 모두 거의 모든 곳에서 1991~2020년 평균보다 높은 온도를 보여주고 있고, 육지의 온도는 해양 온도

Near-surface temperature MJJAS



Near-surface temperature NDJFM

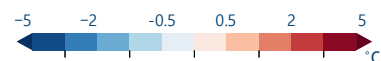
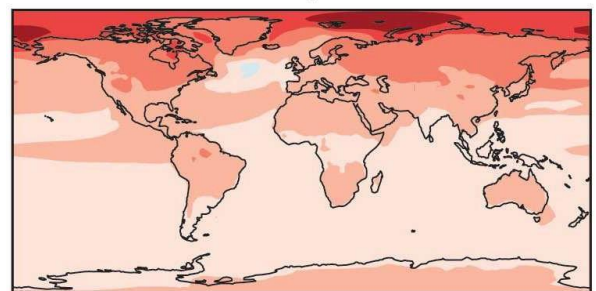


그림 7. 연간에서 십년 기후예측을 위한 WMO 선도센터의 향후 5년 확장된 계절에 대한 1991~2020년 대비 지표면 온도 아노말리의 다중 모델 예측 결과. 2023~2027년 5월에서 9월(MJJAS)동안 앙상블 평균 예측(위), 2023/2024~2027/2028년 11월에서 3월(NDJFM) 앙상블 평균 예측(아래)

5. 기후추정(projection)은 일반적으로 기후 모델을 사용하여 도출된 온실가스 및 에어로졸의 미래 배출 또는 농도 시나리오로 모의된 반응임. 기후추정은 사용된 배출/농도/방사능 강제 시나리오에 대한 의존성 때문에 기후 예측과는 구별되며, 이에 따라 향후 실현이 될 수도 있고 실현되지 않을 수도 있는 미래 사회경제 발전과 기술 발전 등과 같은 가정을 기반으로 함(IPCC, 2023)

보다 큰 아노말리를 보여준다. 11월에서 3월의 북극 온난화가 특히 두드러지고 지구 평균 아노말리보다 3배 크다. 북대서양의 대부분은 평균보다 따뜻하지만, 북대서양의 북쪽지역 일부에서는 11월-3월의 5년 평균값에서 음의 아노말리를 보이는데, 이는 기후변화로 인해 대서양의 북송 수송이 느려지는 것과 관련이 있는 것으로 보인다(Global Annual to Decadal Climate Update – Target Years: 2023 and 2023–2027). 그러나 미래 온난화는 미래 배출량에 의해 결정된다는 점에 주목해야 하며, 적극적인 기후 행동이 아주 중요하다.

기후 행동 과학

기후변화는 인류의 웰빙(행복한 삶)과 지구의 건강을 위협한다. 일부 기후의 미래 변화는 피할 수 없고 거의 바꿀 수 없겠지만, 신속하고 적극적인 완화와 적응 행동으로 손실과 피해를 줄일 수 있고, 특히 대기질과 보건과 같은 여러 공동의 이점을 가지고 올 수 있다(IPCC, 2023).

UN환경프로그램(UNEP) 배출 격차 보고서(UNEP, 2023)에 따르면, 세계는 파리협정 목표치 보다 훨씬 높은 지구 온난화를 향해 가고 있다. 2022년 9월까지, 전세계 온실가스 배출량의 90%에 해당하는 166개국이 국가온실감축목표(NDC)를 신규 또는 업데이트하여 제출하였다. 그러나, 각국이 감축하겠다고 약속한 배출량 감소치와 파리협정 목표 달성을 위해 필요한 배출 감축량 사이의 격차 즉, 2030년까지 배출량 격차를 줄이는 데는 매우 제한적인 진전만이 있었을 뿐이고, 지난 9개월 동안 각국에서 제출한 목표도 상황을 크게 바꾸지는 않았다. 추가적인 조치가 없다면 이번 세기 동안 지구 온난화는 2.8°C(불확실성 범위: 1.9~3.3°C, 확률 66%)에 이를 것으로 추정된다. 무조건적 및 조건적 국가온실가스감축목표(NDC) 시나리오가 완전히 이행된다면, 각각 2.6°C(불확실성 범위: 1.9~3.1°C) 및 2.4°C(불확실성 범위: 1.8~3.0°C)로 줄어들 것이다.

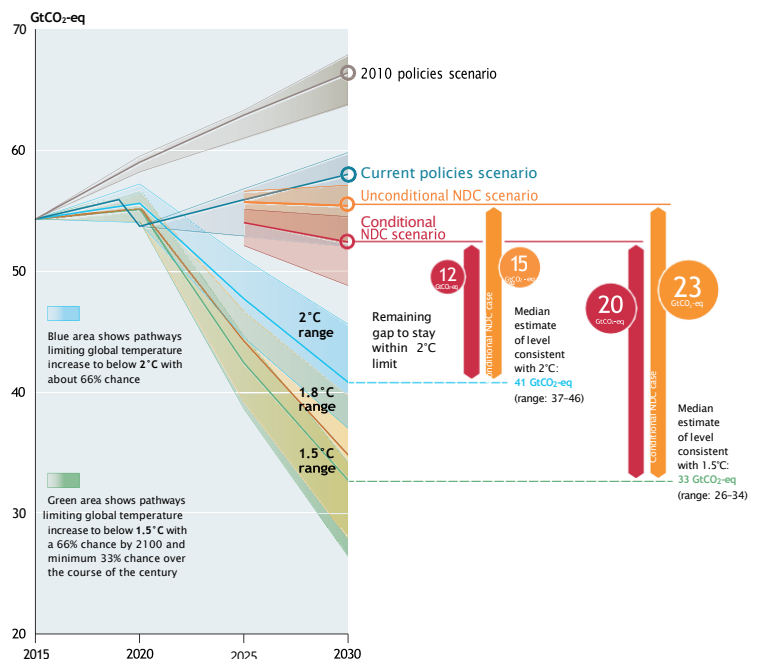
2030년 배출량 격차는 여전히 크다(그림 8). 2030년 무조건적 및 조건적 NDC로 각국에서 현재 제출한 목표치는 현재 정책과 비교하여, 물론 이들이 완전히 이행된다고 가정한다면, 각각 5% 및 10% 전세계 배출량을 감축시킬 것으로 추정된다. 파리협정 목표인 2°C보다 낮게, 또는 바람직하게는 1.5°C를 충족시키기 위해서는, 전세계 온실가스 배출량을 2030년까지 각각 30% 및 45%, 그리고 2050년까지는 65% 및 87%까지 감축해야 하며, 현재 정책과 비교하여 이산화탄소 배출량은 2050년까지 탄소 중립으로 해야 한다(UNEP 2022).

그림 8. 각각 다른 시나리오에 따른 전세계 온실가스 배출량과 2030 배출량 격차(중간값 및 10번째부터 90번째 확률 범위)
중요: GtCO₂-eq (이산화탄소 10억톤 당량). 출처: UNEP(2022)

향후, 지구 온난화를 제한하려면 인위적인 이산화탄소의 탄소 중립에 도달하기 위해 대규모의 신속하고 체계적인 전환이 필요하다(UNEP, 2022). 모든 NDC와 국가별 탄소중립 약속 이행을 1.8°C(불확실성 범위: 1.8~2.1°C, 확률 66%)로 가리킨다. 그러나, 현재 배출량과 단기 NDC 목표, 장기 탄소중립 목표간의 불일치로 인해 이 시나리오는 신뢰할 수가 없다(UNEP, 2022).

배출량을 완화하는 것에 더해, 기후변화의 악영향을 감소하고 손실과 피해를 막기 위해서는 적응이 필수적이다. 과거 기후변화에 가장 기여를 작게 한 취약한 커뮤니티들이 불균형적으로 더 많은 영향을 받게 된다. 모든 부문과 지역에 걸쳐 적응이 진행되어 왔지만, 아직 격차는 남아있으며, 오늘날의 적응 옵션은 지구 온난화 정도가 증가함에 따라 효과가 떨어지게 될 것이다. 인간과 자연 시스템은 적응 한계에 도달할 것이며, 특정 생태계와 지역은 이미 일부 한계에 도달했다. 그러나 완화와 특히 적응에 대한 현재의 전세계 재정 흐름은 기후변화에 적절하게 대응하기에는 충분하지 않다(IPCC, 2023).

기후행동은 모든 국가에서 필수적이며 SDG와 동시에 달성되어야 한다. 형평성, 사회정의, 포용 및 전환 과정에 우선순위를 두면 적응과 완화를 가능하게 하고 동시에 지속가능 발전에 기여할 수 있다. 규제 및 경제적 수단, 행동 및 생활방식의 변화는 배출량 감소에 도움을 줄 수 있고, 확장된 금융, 신기술, 혁신, 국제 협력 향상은 기후 행동을 가속화하는데 중요하게 작용할 것이다(IPCC, 2023). 아주 작은 온도 변화, 1톤의 이산화탄소, 아주 작은 선택도 중요하게 작용한다. 지구온난화 정도를 제한하고, SDG 달성과 같은 사회적, 환경적 이익을 이룰 수 있는 탄소 중립 미래로 가기 위해서는 전세계적 전환이 필요하다.





SDG 2 기아 종식



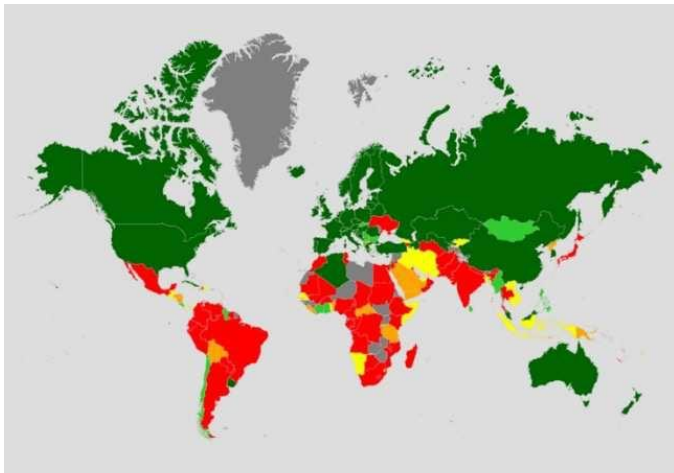
Food and Agriculture
Organization of the
United Nations

주요 메시지

- 예측에 따르면 6억7천만명의 사람들이 2030년에도 여전히 기아에 직면할 것으로 추정되는데, 이는 일부 더 빈번하고 심각하게 발생하는 극한 기상 현상 때문으로, 식량 안보의 각 요소(가용성, 접근성, 활용성 및 안정성)를 방해함
- 날씨 및 기후, 물 관련 과학은 농부들이 식량과 영양 안보 강화를 위해 기후정보에 기반한 결정을 내릴 수 있도록 하는 서비스를 지원함
- SDG 2의 효과적 달성을 위해, 농산물 가치 사슬에 따른 날씨 및 기후, 물 관련 과학과 서비스에 대한 전세계적 투자가 필요함

서론

SDG 2는 기아 종식, 식량안보 달성, 영양 개선, 지속가능한 농업 촉진을 목표로 한다. 그러나, *전세계 식량 안보 및 영양 현황* 보고서에 따르면, SDG 2 달성에 대한 격차가 매년 더 벌어지고 있다(Figure 1). 복합적인 불확실성과 장기적 도전에 직면하면서 전세계적 노력 및 국가적 노력 모두가 불충분하다는 것이 증명되었다. 예측에 따르면 거의 6억7천만명의 사람들이 2030년에도 여전히 기아에 직면할 것으로 추정된다(FAO et al., 2022).



- 영양실조 만연 $\leq 2.5\%$
- 개선 없음
- 정상
- 악화
- 점진적 향상
- 자료부족

그림 1. 전세계 기아 종식을 위한 진행상황 (2015-2020)⁶.

출처: FAO, 2022a

기후변화는 식량안보를 감소시키며 SDG 달성을 위한 노력을 방해하고 있다(IPCC, 2023). 특히, 더욱 빈번하고 심각한 극한 현상이 식량안보 각 요소(가용성, 접근성, 활용성, 안정성)를 방해하면서, SDG 2 달성을 위협하고 있다. 비록 전체적인 농업생산량은

증가하였으나, 기후변화는 지난 50년 동안 전세계적으로 이러한 증가를 둔화시켰다(IPCC, 2023). 또한, 기후변화는 전세계 식량 안보의 뼈대이자 지속가능한 농업 시스템으로의 전환에 중요한 역할을 하는 지역의 소규모 농작민들에게 점점 더 큰 위협이 되고 있다. 그러므로 SDG 2 달성은 가뭄과 해수면 상승, 해양 온난화 및 산성화와 같이 서서히 진행되는 변화와 극한 기상 현상에 크게 노출되고 취약해진 농산물 가치 사슬에 따른 기후 위기 관리와 크게 연관이 있다. 예를 들어, 해양 온난화와 해양 산성화는 일부 지역의 어업과 양식업에 의한 식량 생산에 악영향을 미쳤다(IPCC, 2023; FAO, 2022b). 또한, 열과 물 스트레스 조건은 식량의 생산 단계에서 손실을 가져올 수 있고, 과도한 강우량은 수확과 저장 단계에서 손실을 야기할 수 있다. 폭우로 인한 산사태와 같은 재해는 도로 기반시설에 영향을 미쳐 시장으로의 접근과 수송을 방해한다 이에 따른 식량의 부패와 폐기물은 식량의 안전성에 위험을 끼칠 수 있으며 결과적으로 식량 안보를 위협할 수 있다.

날씨, 기후, 물과 관련된 과학은 수많은 사회적, 경제적, 환경적 이점을 가지고 있으며 농부들이 식량과 영양 안보를 향상시킬 수 있도록 하는 기후에 기반한 결정을 내릴 수 있는 서비스를 뒷받침한다. 예를 들어, 농부들은 시기 적절하고 신뢰할 수 있으며 실행 가능한 데이터 및 정보에 접근함으로써 비료와 살충제 투입을 더 잘 관리하고, 작물 품종 선택과 심는 시기를 최적화하여 생산성을 향상시키고, 극한 기상 및 기후변화의 악영향과 관련된 식물 손실을 줄일 수 있다(FAO, 2022c). 그러므로, 날씨, 기후, 물 관련 과학은 농업 부문의 적응력을 강화시키고 회복력을 높이는데 크게 도움이 되고, 따라서 기후 리스크를 줄이고 농업 생계 및 자산을 지원하며, 궁극적으로 SDG 2와 연계된 식량 및 영양 안보를 향상시키게 된다

6. 지수 자체의 확률적 특성과 각 모델의 매개변수 추정치와 연관된 불확실성의 한계로 인해 FAO는 2.5% 미만의 영양실조 유병률(PoU) 추정치는 발표하지 않는다. 이는 국가가 이미 SDG 목표를 달성했는지의 여부를 평가하는 것을 방지한다. 점선은 인도와 파키스탄이 합의한 잠무(Jammu)와 카슈미르(Kashmir)의 대략적인 통제선을 나타낸다. 잠무와 카슈미르의 최종 상태는 아직 합의되지 않았다. 수단과 남수단의 최종 경계선도 아직 결정되지 않았다.

식량 안보를 위한 날씨, 기후, 물 관련 과학

기상 및 기후 서비스는 더 나은 계획을 통해 기후 위험을 관리할 수 있는 가축, 수산, 임업 및 작물에 중점을 둔 영향기반 예측과 같이 농업과 유관하고 시기 적절한 정보를 포함한다. 또한, 기상 기반 농업 자문으로 농경기 동안 극한 기상에 의한 영향을 줄일 수 있다(Kim et al., 2023). 이러한 기후 서비스의 개발에는 견고한 날씨, 기후, 물 관련 과학이 필요하다. 또한, 지역 커뮤니티의 회복력 강화와 농식품 가치 사슬의 적응력 구축을 위해 사용자들의 요구와 사회경제적 특성에 맞춰진 신뢰성 있고 시기 적절한 기상 및 기후 자료와 정보가 지속적으로 제공되어야 한다.

Box 1. 식량 안보를 위한 조기 경보

지역 사회와 국가 모두 홍수와 가뭄 같은 극한 기상 현상과 식량 안보를 방해하고 위협하는 기후 패턴의 변화에 미리 대응하기 위해 적절한 경보가 필요하다. 조기 경보 시스템은 효과적인 적응 조치로 농업 분야의 손실과 피해를 최소화하고 식량안보를 지키며 SDG 2 달성을 지원할 수 있다.

다중 위험 조기 경보는 지역사회와 정부, 기타 기관이 재해 상황이 발생하기 전에 미리 재난 위험을 감소시킬 수 있는 행동을 시기 적절하게 취할 수 있도록 하는 통합적인 시스템이다. 식량 안보의 관점에서, 조기 경보를 통해 농업 생계와 자산을 보호함과 동시에 긴급상황으로 연결될 수도 있는 잠재적 작물 실패 분야를 파악하기 위한 사전 조치를 취할 수 있다. 예를 들어, 가뭄 조기 경보는 정부와 인도주의 단체에 정보를 제공하여 기근으로 상황이 이어지기 전에 시기 적절한 조치를 취할 수 있도록 잠재적 식량 안보 위기를 알릴 수 있다(Agriculture and Food Security Exemplar to the User Interface Platform of the Global Framework for Climate Services).

그러나, 모든 국가의 사람들이 다중 위험 조기 경보 시스템에 접근할 수 있도록 보장하는 것에는 여전히 어려운 점이 많다. 모두를 위한 조기 경보 (Early Warnings for All) 이니셔티브는 이런 도전과제를 해결하기 위해 노력한다. 이 이니셔티브에서는 지역민 및 농부와 함께 시스템 공동 디자인, 피드백 메커니즘 적용, 지역 주도 적응 원칙 실행, 그리고 국가 및 지역 단위에서 기후 위험과 불확실성에 대한 이해도를 높이는 것을 권고한다(Early Warnings for All Executive Action Plan 2023–2027).

예를 들어, 실시간 날씨 정보는 비료 살포 및 관개를 포함한 일상적인 농장 관리 운영에 필수적이다. 또한, 이 정보는 Box 1에서 강조된 바와 같이, 극단적인 수문 기상 현상에 대비하여 농작물, 가축 및 생계를 보호하기 위한 조기 경보 및 기상 정보에 기반한 의사 결정을 지원한다. 기상 이변이 발생하면, 기후 관련 지수(강수, 기온, 풍속 등)에 따른 지수-기반 기상 보험으로 농가의 손실을 보상하기 위한 지급금이 즉시 발행된다. 이러한 종류의 보험에는 지역 단위로 기상 정보를 상세화하고 실시간 작물량 추정치를 산출하기 위한 우수한 과학과 고품질의 기상 자료, 효과적인 감시 도구와 방법이 필요하다. 따라서, 이는 식량 안보를 향상시킬 수 있는 효과적인 기상 및 기후 리스크 관리 도구가 될 수 있다.

계절내 및 계절의 시간 규모에서, 예측된 계절 지속기간과 수확 일정에 기반하여 토지 준비 날짜를 결정하고 작물 종류와 심는 시기를 결정하는 등의 농업 계획 및 의사결정에 예측자료를 사용한다. 예를 들어, 엘니뇨 남방진동(ENSO)과 같은 대규모 기후 현상을 기반으로 가뭄 발생 가능성을 구분하는데 재배 계절을 넘어선 예측정보가 도움이 된다. 또한, 기후 예측은 제도적 수준에서 장기 계획(예: 수자원 할당)에 도움이 되며, 잠재적인 기후 위기에 관한 중요한 날짜도 제공할 수 있다(FAO, 2021c). 일례로, 기후 및 작물 모델의 조합 또는 결합으로 기후 변화가 여러 작물의 생산성과 적합성에 미치는 영향을 이해하는데 크게 도움이 된다. 이러한 예측은 또한 기상 재해, 노출과 영향, 사회경제적 취약성 및 적응 개입의 실현 가능성을 포괄하는 위험 평가에 정보를 제공함으로써 농업 투자에 대한 장기적인 증거 기반 계획과 정책적 전략, 변화하는 기후에 직면하여 농업 기반시설의 회복력을 보장한다.

날씨 및 기후, 물 관련 과학은 신뢰할 수 있고 견고하며 적절히 사용할 수 있을 때 농업 의사 결정을 개선하여 식량 안보를 강화하는데 중요한 역할을 한다. 과학에서 참여 프로세스를 통합하여 사용한 것을 참고하면, 농업 분야에서 기후 서비스에 대한 신뢰와 활용성이 향상될 수 있는 잠재력이 있음을 알 수 있다. “농업을 위한 참여적 통합 기후 서비스(PICSA)” 방법론은 과학적으로 분석된 역사적 데이터를 간단한 방식으로 시각화하여, 참여적인 방법을 통해 토착 지식 및 지역 지식과 융합하여 농민들이 계절 및 장기적인 기간에 걸쳐 적절한 적응 조치를 식별하는데 참여하도록 하는 방법이다. 다른 예로는 UN 식량농업기구(FAO)의 농민현장학교(Box 2에서 강조)와 세계 기상기구(WMO)의 순회 세미나(Roving Seminar)가 있는데, 여기서 농민들은 날씨 및 기후 자문 서비스의 공동 생산, 공동 설계, 공동 개발의 과정에 참여하여 농민의 자체 소유권과 신뢰성이 높아지고, 따라서 날씨 및 기후 정보의 사용을 향상시키게 된다. 국가수문기상서비스(NHMS)와 농민 간의

양방향 커뮤니케이션을 통합함으로써 정보에 대한 접근성이 간소화 및 향상되고, 농부들은 정보를 수신하고 소통함과 동시에 정보를 감시하는 데 필수요소가 된다(FAO, 2015). 결과적으로 과학은 식량안보를 향상시키는 데 효과적인 방법으로 사용된다.

향후 도전과제 및 기회

현재 전 세계는 SDG 2 달성을 향해 가고 있지 않다. 자료 수집과 교환, 날씨 모니터링, 기후 및 농경학적 정보를 둘러싼 문제는 여전히 남아 있다. 예를 들어, 지상 자료를 수집하기 위한 기상 및 농기상 관측소가 불충분하고, 모니터링이 방해받고, 농업분야 데이터의 품질이 균일하지 않고, 농업적 의사 결정을 위한 장기 및 고품질의 기후 예측자료가 충분하지 않다 (*Guidelines for the Assessment of Competencies for Provision of Climate Services* (WMO-No. 1285)). 그러나, 강력한 날씨, 기후, 물 관련 과학에 의거한 기후 서비스는 이러한 문제점들을 해결하는 데 핵심적인 역할을 할 수 있다.

인프라 개발과 모니터링, NMHS와 농업 분야간의 제도적 합의 강화, 정보의 전달과 사용 향상을 위한 공공-민간 파트너십 구축으로 투자가 이루어져야 한다. 더 나아가, 지역 커뮤니티에 이해할 수 있고 경제적이며 활용 가능하고 실시간인 기상, 기후 물 정보가 도달하기까지의 격차는 여전히 크다. 기후 서비스는 사용자 주도형이어야 하며, 이는 참여적 접근 방식과 피드백 메커니즘이 중요함을 의미한다. 그러므로, 기후 서비스가 사용자의 요구와 선호도에 맞게 만들어질 수 있도록 기후 서비스를 공동으로 생산하는 것이 중요하다.

이러한 격차를 해소하기 위해서는 누구도 소외시키지 않고 공평한 이용과 제공을 보장하는 것이 매우 중요하다. 앞으로 농업 의사 결정을 지원하기 위한 기상 및 기후 예측을 개선하기 위해서는 특히 관측 격차가 여전히 남아있는 저소득 국가에서 지속적인 관측 운영이 시급하다(FAO, 2015). 또한 농업적 전환에 필수적 요소인 연구 개발에 대한 투자와 농업 혁신이 강화되어야 한다(Kim et al., 2023). 기상 및 기후 과학의 향상과 취약한 소규모 농민에게까지 도달하는 효과적인 기후 서비스 구축을 위해 노력을 확장하는 것은 2030년까지 SDG 2 달성과 전세계 식량안보 확보를 위해 필수적이다(FAO, 2021b).

Box 2. 농민현장학교 및 참여형 통합 농업기후서비스

농민현장학교(FFS)는 농부들이 기후 서비스의 효과에 대한 피드백을 제공하도록 함으로써 농업에서 기후 정보에 기반한 의사 결정에 농부의 참여도를 향상시킨다(그림 2). FFS에서의 기후변화 적응 주류화는 기후 위험에 대한 표적 농업 시스템의 노출과 취약성을 모니터링하고 식별된 위험을 변화시키기 위한 적응 및 상황별 전략을 파악하는데 아주 중요하다.

준비 단계 동안 FFS 진행자와 커뮤니티 구성원, 농부들은 기저 취약성 평가와 커뮤니티 자원 지도화(mapping) 활동들을 하게 된다. 여기에는 기후 및 기상 관련 재해에 대하여 주요 농업 시스템의 노출과 활동의 평가, 농부와 커뮤니티가 이미 실행하였으며 커뮤니티 기반 적응 계획 단계에서 확장할 수 있는 적응 전략과 선택사항 파악 등이 포함된다. FFS 활동의 일부로서 세부 기상 정보의 수집, 접근, 사용에 농민들의 참여를 보장하기 위해서는, 적응 활동과 기술의 실행성을 평가하는 것이 필수적이다. FFS 활동을 통해 얻은 정보는 체계적인 접근방식을 통해 추후 FFS 참가자가 지역 사회와 공유하게 된다(FAO, 2021a).



Photo: Jorge Alvar-Beltrán, FAO

그림 2. 파키스탄 농민 현장 학교에 여성의 참여



SDG 3 건강하고 행복한 삶 보장



주요 메시지

- 학제간 연구는 기후에 민감한 건강 리스크와 기후가 보건 분야에 미치는 영향을 분석하는데 중요
- 기후변화와 극한 현상은 건강 악화와 조기 사망을 크게 증가시키며, 폭염과 관련된 질병 및 사망에 노출되는 인구가 크게 증가할 것으로 예측
- SDG 3 달성을 위해 기후 회복력과 저탄소 보건 시스템에 대한 투자 확대, 보편적 의료 보장(UHC)으로의 행보가 필수적

서론

SDG 3은 모든 연령대의 모든 사람들에게 건강하고 행복한 삶 보장을 촉진하는 것을 목적으로 한다. SDG 3의 여러가지 목표를 달성하는 데는 다양한 기후 및 환경 조건이 영향을 미친다. 따라서, 기후변화가 건강에 미치는 영향을 충분히 해결하지 못한다면 SDG 3을 향한 전반적인 노력이 방해받을 수 있다. 여기에서는 기후 서비스와의 연계를 포함하여 기후 과학 렌즈를 통하여 SDG 3을 달성하기 위한 사항을 검토하고 이들이 SDG 3 목표를 달성하는 데 얼마나 중요한 역할을 하는지 설명한다.

기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC)은 기후 관련 질병, 조기 사망, 모든 형태의 영양실조, 정신 건강과 복지에 대한 위험성이 모두 증가하고 있다고 보고한다(Cissé et al., 2022). IPCC는 또한 기후 변화와 극한 현상들이 건강 악화와 조기 사망, 폭염 및 열 관련 질병과 사망에 대한 인구 노출을 크게 증가시킬 것으로 예상한다고 밝혔다. 게다가, 전세계의 급속한 도시화 추세는 기후 변화에 대한 기존의 취약성이 도시에서 악화될 수 있기 때문에 더 많은 사람들을 건강 악화의 위험에 놓이게 한다. 예로, 대기 오염은 도시에서 발생하는 건강을 위협하는 주요 현상이고 연간 거의 7백만 명의 조기 사망과 연관이 있다(Air Pollution). 또한, 기후변화는 건강 악화와 의료 시스템 붕괴로 전세계 보편적 건강 보장(UHC)을 더욱 어렵게 하고 있다(Salas and Jha, 2019; WHO, 2022). 건강을 보호하고 구조적 불평등을 해결하기 위해 UHC로의 노력이 중요함을 고려할 때, UHC와 기후 회복적 의료 시스템은 긴밀하게 연결되어 있다(Cissé et al., 2022).

건강 리스크를 이해하고, 모니터링하고, 더 나아가 예측할 수 있도록 하는 초학제간 연구와 자료, 도구는 전세계 건강 리스크에 대한 조기 경보 시스템 개선과 전염성 및 비전염성 질병 퇴치, 유해 화학 물질과 오염으로 인한 질병 감소와 같은 SDG 3 목표를 달성하는데 매우 중요하게 기여할 수 있다. UHC 달성과 의료 재정 지원 증가와 같은 다른 SDG 3 목표들 역시 기후 회복적 의료 시스템 개선에 중요하다.

건강과 웰빙을 위한 날씨 및 기상, 물 관련 과학

보건 및 역학(유행병학) 자료와 날씨, 기상, 물 관련 정보를 통합할 경우 보건 분야에 강력한 서비스를 제공할 수 있다. 이러한 서비스를 통해 보건 정책에 정보를 제공하고 기후에 민감한 전염성 질병(말라리아, 뎅기열 등)과 비전염성 질병(심혈관 질환 및 정신 건강 등)을 이해, 예상, 감시할 수 있어 해당 SDG 3 목표 달성이 가능하다.

계절 기후 전망과 극한 기상 예보를 활용하여 위험 평가 및 맞춤형 도구로 더 많이 위험한 커뮤니티를 파악하고 어디에 개입 대상을 설정해야 하는지 파악할 수 있다. 분석 진단으로 언제, 어디에, 어떻게 기후가 인간이 위험하거나 유익한 조건에 노출되는 것에 영향을 미치는지, 누가 가장 많이 영향을 받을 것인지, 노출과 취약성의 규모, 패턴, 지속기간이 얼마나 될 것인지에 대한 증거를 개선시킬 수 있다. 다양한 기후 조건에서 서비스 제공이 어떻게 수행될 수 있는지 연중 여러 시기에서 어떤 의료 개입이 가장 효과적일 가능성이 높은지 평가하는데 미래 기후 시나리오가 사용될 수 있다(Shumake-Guillemot and Fernandez-Montoya, 2019).

열 건강 경고 시스템(HHWS) 또한 날씨와 기후 과학에 기반한 중요한 기후 서비스이다(WHO-WMO Joint Office, 2022). 지구 온도가 계속해서 상승함에 따라, 폭염으로 인한 예방 가능한 사망 및 질병의 수가 심각하게 증가하고 있다. 일례로, 최근의 역학(유행병학) 모델링 연구에 따르면 2022년 여름 동안 유럽 전역에서 극심한 더위로 인해 60,000명이 추가로 사망했다(Ballester et al., 2023). HHWS는 기상 및 기후 예측과 미리 결정된 열 스트레스 유발 수준을 사용하여 공공 제언을 제공하고 공공 의료 개입을 시작한다. 이러한 조기 경보는 폭염 전후와 그 기간동안 건강 위험을 줄이고 모두의 건강과 행복한 삶을 보장하기 위한 목표를 달성하는데 기여한다.

또한, 보건 분야는 기후 변화의 영향에 더욱 취약해지고 있음과 동시에 전세계 온난화가스 배출의 주요 원인이기도 하다. 2022년, 보건 분야는 전세계 온실가스 배출의 5.2%에 책임이



Photo: Ali Karim Alsari

있으며, 이는 전년도에 비하여 5% 증가한 수치이다 (Romanello et al., 2022). 화석연료의 생산과 연소로 인한 온실가스배출은 특히 대기오염에 불균형적으로 더 많은 영향을 받는 취약한 커뮤니티의 건강을 위협한다. 따라서, 가용한 기후 과학과 서비스를 활용하여 보건 시스템의 전분야에 걸쳐 온실가스 배출을 줄이고 체계적으로 회복력을 구축할 필요가 있으며, 이는 전반적으로 보건 분야에 이점을 가지고 올 것이다 (Health Care Without Harm, 2023).

기후 과학과 서비스는 기후 회복 및 저탄소로의 전환과 보건 시스템에 대한 투자에 가장 효과적인 옵션을 파악할 수 있는 과거, 현재, 미래의 기후 리스크와 건강 취약성에 대한 증거를 제공한다. 예를 들어, 기후 변화의 관점에서 보건 시스템의 회복력을 증가시키는 핵심 도구는 취약성 및 적응 평가(VAA)이다. 이러한 연구는 과거 기후 정보를 통합 적용하여 건강 결과물과 연계 지어 기후 예측을 활용하여 잠재적 미래 건강 부담 정도를 모의한다. VAA는 국가 정책에 직접적으로 정보를 제공하고 다양한 시간규모에 걸쳐 기후 리스크를 파악하고 기후 변화와 변동성의 영향에 대하여 보건 시스템을 준비하는데 필요한 자원을 파악할 수 있도록 도움을 준다(WHO, 2021).

향후 도전과제 및 기회

날씨 및 기후, 물 관련 과학은 기후 서비스 개선과 기후 회복적 및 저탄소 배출 의료 시설을 지원함으로써 다른 SDG 목표 달성 뿐만 아니라 SDG 3도 달성하여 건강하고 행복한 삶을 보장하는데 중요한 역할을 한다. 하지만, WMO 회원국 74%가

보건 분야에 기후 자료를 제공하는 반면 국가기상수문 서비스(NMHS)의 오직 48%만이 보건 분야에 맞춤형 기후 정보와 서비스를 제공하고 있다.⁷ 맞춤형 기후 정보의 제공과 이용 사이의 이러한 격차는 SDG 3 달성과 보건 분야 지원을 위해 맞춤형 과학 정보 서비스로 더 잘 전환할 수 있는 기회를 의미한다.

이러한 격차 해소를 위해서는 보건 분야 기후 서비스 개발에 있어 날씨 및 기후, 물과 보건 과학 커뮤니티 사이의 초학제간 협력을 강화하는 것이 중요하다. 효과적인 기후 및 건강 적응과 완화 전략에는 강력한 증거가 뒷받침되어야 하고, 맞춤형 기후 정보 및 서비스로 기후 관련 건강 위험요소를 감지, 감시, 예측하고 관리하는데 가용한 증거와 정보를 개선시킬 수 있다. 따라서, 각국 정부는 날씨 및 기후, 물 변동성 및 변화가 공중 보건에 미치는 영향을 최소화하고 전 보건분야에 걸쳐 효과적인 완화 전략을 실행할 수 있는 정책 옵션을 계획할 수 있게 된다. 또한, 기후 변화와 낮은 수준의 UHC로 인해 가장 높은 수준의 건강 취약성을 경험하고 있는 지역에서 기후에 민감한 고려사항을 통합하는 UHC와 같은 통합 접근 방식을 통해 보건 시스템을 강화될 필요가 있다(Salas and Jha, 2019).

전반적으로 지속가능하고 건강한 미래 사이의 강력한 상호 의존성을 고려할 때, 건강과 행복한 삶을 보장하는 것은 다른 SDG 달성을 위한 노력에도 크게 의존하게 된다. 날씨 및 기후, 물 커뮤니티와 보건 및 다른 이해관계자 그룹 간의 파트너십을 통해 SDG 3 달성과 모두를 위한 건강하고 행복한 삶 보장이 이루어 질 수 있다.

7. WMO가 주도하는 수준 높은 보건 분야 기후 서비스 보고서에서는 보건 분야 맞춤형 기후 과학 및 서비스에 대한 심층적인 분석결과를 제공할 것이다. 이는 COP 28 이전, 2023년 하반기에 출판될 예정이다.



SDG 6 깨끗한 물과 위생



주요 메시지

- 기후변화는 물과 관련된 재해를 악화시키고 지구의 물 순환을 변화시켜 SDG 6 달성을 더 어렵게 함
- 60% 이상의 국가들이 수문학적 모니터링 역량이 부족하고 감소함으로 인해 어려움에 직면
- 더 많은 과학적 협업, 금융 투자, 자료와 정보의 교환은 정책 입자들이 SDG 6 이행을 가속화하기 위한 정보에 입각한 의사 결정을 내리는 데 핵심이 될 것

서론

2023년, UN은 한 세대 만에 처음으로 UN 물 컨퍼런스를 개최하였다. 이 컨퍼런스에서는 국제 사회에 물과 위생 관련 경험을 공유하고 모두를 위해 물과 위생의 공급 가능성과 지속 가능한 관리 보장을 목표로 하는 SDG 6을 달성하기 위한 획기적인 해결책을 제시하는 플랫폼이 제공되었다. SDG 6에는 안전하고 저렴한 식수에 대한 보편적이고 공평한 접근, 적절한 공공 및 개인 위생 활동 촉진, 수질 개선, 물 이용 효율성 향상, 통합 수자원 관리 이행, 물 관련 생태계 복원 및 보존과 같은 목표가 포함된다. 물과 위생에 대한 SDG 6 종합 보고서에서는 그림 1에 요약된 것처럼, 가장 최신의 진행 상황을 제시하고 있는데, 일부 지역과 국가에서는 심지어 후퇴하는 양상을 보이면서 목표 달성과는 많이 떨어진 현황을 제시하고 있다(UN-Water, 2023).

물 안보는 모든 SDG의 목표 달성과 기후 회복적인 발전에 필요한 시스템 전환에 있어 아주 중요하다(Caretta et al., 2022). 그러나, IPCC에 따르면 전세계 온난화는 물 관련 재해를 악화시키고, 수량과 수질에 위협적으로 작용하여 SDG 6 달성을

점점 더 어렵게 만든다고 한다(IPCC, 2022). 홍수는 물 공급 시스템을 방해하고, 위생 기반시설에 피해를 입히고, 수자원을 오염시킨다. 또한, 더욱 빈번히 발생하는 가뭄은 물 부족을 야기하고 사람과 생태계에 대한 물의 공급 가능성에 영향을 미친다. 가장 최신의 과학적 증거에 따르면 지구의 물 순환 또한 변화하고 있다(Van Dijk et al., 2022). 이에 따라 나타나는 강수 패턴과 증발률, 수량의 변화는 수자원을 지속 가능하게 관리하는데 큰 어려움을 내재하고 수량에 영향을 미치게 된다.

극한 기상 및 기후변화의 영향에 대한 이해는 SDG 6을 달성하는데 중요하다. 과학적 자료는 수량과 수질에 대한 가치 있는 통찰력을 제공하고 수자원과 수자원 관리에 대한 통합적 이해를 가질 수 있게 한다. 과학적 진보, 특히 기후 모델링과 수문학적 진행상황에 대한 이해를 통해 연구자들이 기후변화가 물의 가용 공급량과 수요에 미치는 영향, 기후변화가 극한 현상에 미치는 영향, 전세계적으로 그리고 지역적으로 수자원의 배분을 어떻게 바꾸는지에 대해 평가할 수 있다. 또한, 신기술의 실행으로 자료에 근거한 통합 수자원 관리 활동과 정책을 개발하여 지속가능한 발전을 지원할 수 있다. 과학적 연구, 자료, 혁신을 활용함으로써 의사결정자와 실무자는 SDG 6을 달성하고 물 관련 문제를 해결하는 효과적인 전략을 개발할 수 있다.

지속가능한 물 관리를 위한 날씨, 기후, 물 관련 과학과 서비스

날씨, 기후, 물 관련 과학과 서비스는 수문학적 조건에 대한 필수적인 통찰력을 제공하고 의사결정 과정에 정보를 제공하여 SDG 6을 달성하기 위한 진행을 촉진시킬 수 있다. 과학을 통해 우리는 강수 패턴과 하천의 흐름, 지하수 수위, 수질, 수생태계와 같이 다양한 수자원적 관점에서 자료를 수집하고 분석할 수 있다. 예를 들어 연구자들은 물 샘플을 분석하여 오염원을 파악하고, 오염도를 평가하고, 인간의 건강과 환경에 미치는 잠재적인 위험성을 파악할 수 있다. 이에 따라, 수자원을 보호하기 위해 보호 조치 및 복원 계획을 개발할 수 있다. 또한, 수문학적 자료는 물의 공급 가능성에 영향을 미치는 요인들을 파악할 수 있기 때문에 효과적인 수자원 관리에 필수적인 자료이다.

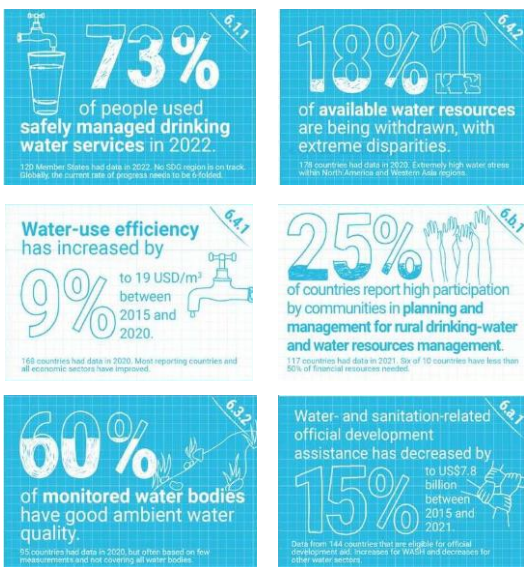


그림 1. 물과 위생에 관한 SDG 6 종합보고서에 따라 SDG 6 지표에 반하는 진행사항. 출처: UN-Water(2023)

2022년 연 평균 하천유량과 지난 30년 기준 연도의 유량을 비교하면 유역의 50% 이상이 비정상적인(일반적 상황보다 더 습하거나 더 건조한) 조건을 경험한 것으로 나타났다(WMO, 언론보도). 마찬가지로 다른 수문학적 순환의 요소들도 저수지 수위, 지하수 수위, 토양수분, 증발산량 수준과 같은 변수들을 분석함으로써 모니터링할 수 있다(WMO, 언론보도). Box 1에서는 파라과이의 예를 들어 지역/국가 규모에서 수문 데이터를 사용하여 수문 조건을 분석하는 방법을 설명하고 있다.

드론, 인공지능(AI), 위성 기술과 같은 과학 및 기술의 발전으로 데이터 기반 통합 물 관리 활동과 정책 개발이 가능하게 되었다(UNCTD, 2023). 전문 센서와 카메라를 갖춘 드론으로 효과적인 환경 모니터링과 기반시설 감시, 홍수 평가가 가능해졌다. 또한, 실시간 위성 자료를 통해 물 소비를 모니터링하고, AI 기반 자료 분석을 통해 방대한 양의 수문 데이터를 처리하여 정보에 입각한 의사 결정과 예측 개선을 위한 패턴과 이상성(아노말리)을 파악할 수 있다.

Box 1. 파라과이의 지속가능한 발전을 위한 하천 방류 및 유량 현황 분석

최근, 파라과이는 경제적인 성장을 이루었으나, 가뭄과 인플레이션, 코로나의 영향으로 심각한 빈곤이 증가하였다(*The World Bank in Paraguay*). 2021년에는 파라과이에 극심한 가뭄이 들었다(Naumann et al., 2021, 2023). 연간 초과 확률은 대부분의 과정에서 과거 자료 범위보다 떨어졌고 사상 최저 일일 방류량 기록을 갱다(과거 30년 자료와 비교).

파라과이 기상청과 전세계 유량 데이터 센터의 데이터베이스에서 제공한 모의 및 관측 방류 자료, 하천 유량 관측 자료가 수문 조건을 분석하는데 사용되었다.

그림 2는 파라과이 강(아순시온 역)의 과거 기간(1991-2020)과 비교하여 2021년 12월-1월-2월(DJF) 평균 방류량 순위를 보여준다. 평균 DJF 방류량은 과거 기간과 비교하여 정상으로 나타났지만, 6월-7월-8월(JJA) 방류량은 정상수준 이하로 나타났다. 글로벌 수문 모델(GHM) 모의 결과 JJA 방류량이 정상수준 이상이었고, DJF 방류량은 정상수준 이하로 나타났다.

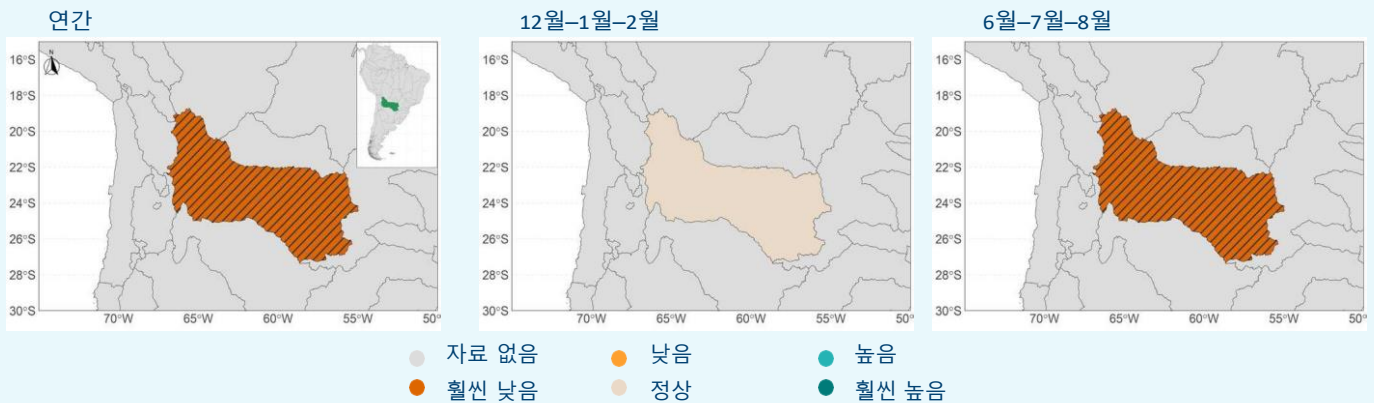


그림 2. 과거 기간(1991-2020) 대비 2021년의 파라과이 강 방류량 순위: (a) 평균 연간 정상상태; (b) 12월-1월-2월; (c) 6월-7월-8월. 빗금으로 표시된 부분은 관측 유량 자료와 온실가스 모의로부터 얻은 방출 특성이 일치함을 나타냄. 출처: WMO, 2022

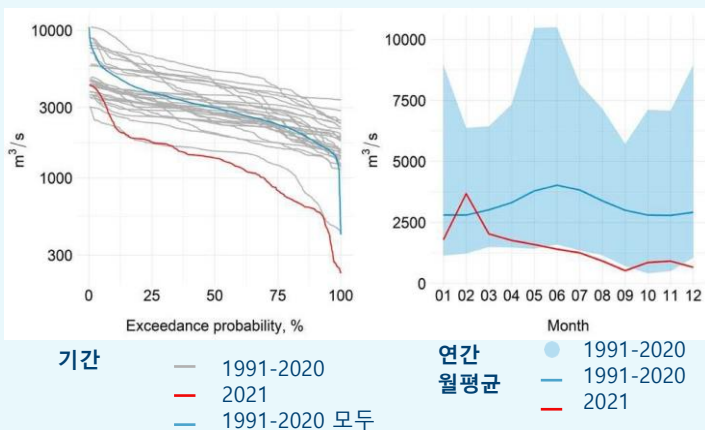


그림 3은 과거 기간과 2021년에 대한 관측치를 기반으로 한 초과 확률 곡선과 선택된 과거 기간에 대하여 2021년 방류량의 월평균을 보여준다. 이 수문학적 평가는 수자원 계획 수립과 의사 결정에서 활용되어 SDG 6 달성을 지원하고 농업, 환경, 에너지, 산업 분야와 관련된 SDG 달성에도 도움을 준다.

그림 3. 파라과이 강 대상 1991-2020 기간 대비 2021년 유량 관측자료 비교. (좌) 초과 확률, (우) 월 평균 방류량. 출처 WMO, 2022

SDG 6

깨끗한 물과 위생

드론과 AI는 관개와 비료 사용을 최적화함으로써 정밀 농업에 이익을 준다. AI 가능 드론 기술로 수질 평가, 오염 탐지, 누출 관리가 더 효과적으로 이루어진다. 이러한 발전으로 과학자들과 정책 입안자들은 추세를 감지하고 잠재적 어려움과 기회를 파악할 수 있어 더욱 지속가능한 수자원 사용에 기여하게 된다.

과학은 또한 기후 변화와 수자원 간의 연관성을 연구하는데 중요하다. 연구자들은 수문학적 조건 변화를 포함한 미래 기후변화를 예측하는 모델과 함께 과거 기후 정보를 분석한다. 이 정보는 이러한 변화들이 물 가용성과 이용에 어떻게 영향을 미치고, 홍수와 가뭄과 같은 극한 수문 현상의 발생 빈도를 증가시키고, 전 세계 및 지역적으로 수자원 분포를 바꾸는지 평가하는데 도움이 된다. 여러 시나리오 조건으로 다중 모의를 실시함으로써 연구자들은 실행 전 다양한 관리 전략들을 탐색하고 효과성을 평가한다. 의사 결정자는 이 정보를 사용하여 물 의존적 기후변화 적응 및 완화 조치를 이행하고 기후 회복적 물 관리 전략을 세우고 극한 기상 현상에 대비하며 물 부족 기간 동안 물 분배를 최적화할 수 있다. 그러나 이 과학적 증거는 Box 2에서 강조된 바와 같이 지역 기상 조건과 물 가용성, 문화와 같은 지역 및 전통 지식을 통합해야 하며, 이로서 수자원 관리를 향상시킬 수 있다.

향후 도전과제 및 기회

UN 2023 물 컨퍼런스에서는 물 분야를 강화하기 위해서 과학과 혁신의 중요성을 거듭 강조하였고 SDG 6 달성을 위해 더 많은 과학적 협력과 재정 투자, 제한 없는 데이터 및 정보 교환을 촉구하였다. 향후에는 날씨 및 기상, 물 관련 과학이 의사결정자에게 정보를 제공하고 효과적인 정책을 이행하는데 어떻게 사용될 수 있는지에 대한 간극 및 도전과제를 파악하는 것이 더 중요해 질 것이다. 예를 들어, 시기적절하고 접근 가능하며 이용가능하고 검증된 수문 자료의 부족은 국가의 60% 이상이 수문학적 모니터링 역량이 부적절하거나 감소하는 것을 볼 때 아주 큰 문제이다(2021 State of Climate Services: Water (WMO-No. 1278)). 이러한 자료의 부족은 지식 격차를 불러오고 SDG 6 달성에 제한이 된다. 지구 시스템 관측, 모니터링, 연구를 향상시키기 위한 노력은 극한 수문 현상을 더 잘 예측하는데 아주 중요하다. 신뢰할 수 있는 고해상도 날씨, 기후, 물 데이터를 수집하고 분석하며 전세계적으로 자유롭게 공유해야 한다. 수문 재해에 대한 조기 경보 시스템 개발 역시 기후 변화가 커뮤니티에 미치는 영향을 최소화하는데 아주 중요하다.

이러한 격차와 문제점을 해결하기 위해서는 정부, 국제기구, 학계, 연구기관, 민간 부문이 참여하는 통합 및 협력 노력이 필요

하다. 연구와 교육, 기술, 역량 강화에 대한 투자는 SDG 6 달성을 지원하기 위해 이러한 문제점을 극복할 수 있는 기회를 제공하게 된다. 긍정적인 결과물을 극대화하기 위해서는 과학-정책-사회 인터페이스 전반에 걸친 발전이 필요하다. 과학 뿐만 아니라 과학이 실행되는 지역의 관점을 모두 고려하는 통합적 접근법은 SDG 6을 달성하고 실질적 영향을 가져오게 하는 촉매가 될 수 있다.



Photo: Ab Rashid, UNDP Climate

Box 2. 물 안보를 위한 여성들의 전통지식 활용

변화하는 기후의 영향으로 SDG 6 달성이 지연되고 여성과 소녀들에게 불균형적으로 영향을 미친다. 26개국에서 약 3억 8천만명의 여성과 소녀들이 물 스트레스가 높거나 심각한 상태로 살고 있으며 2030년까지 그 수는 29개국 4억 7천1백만 명으로 증가할 것으로 예상된다. 지역 사회에 날씨와 기후 과학에 대한 최신 정보를 제공하는 노력은 여성 역량을 강화할 뿐만 아니라 SDG 6 달성에도 중요할 수 있으나, 이러한 과정에 여성이 완전히 포함된 경우에만 그럴 수 있다(Azcona et al., 2023).

특히 토착민과 농촌, 해안 지역의 여성들은 물 스트레스에 매우 취약하다. 예를 들어, 타지키스탄의 피안즈 강 유역에서는 기온 상승과 강수량 및 빙하 눈 감소로 인해 여성과 소녀들이 물을 모으는 것이 점점 더 어려워지고 있다. 그러나 여성의 지식은 물 위기와 식량 불안정 모두를 해결하는데 혁신적인 역할을 한다. 여러 토착민 커뮤니티에서, 여성은 지역 문화와 물의 공급 가능성, 날씨 조건 예측과 관련된 전통 지식을 가지고 있어 식수 공급, 식량 생산, 에너지 안보 관리를 개선하고 기후 회복력을 향상시키게 된다. 따라서, SDG 6 달성을 지원하기 위해 여성의 전통 지식과 과학적 증거를 통합하는 것이 중요하다(Azcona et al., 2023).



SDG 7 적정 가격의 깨끗한 에너지



주요 메시지

- 극한 기상 현상과 인간에 의한 기후변화는 에너지 공급 능력과 수요 프로파일을 변화시킴으로써 SDG 7 달성을 위협하여 청정 에너지로의 전환에 대한 예측을 더욱 어렵게 하며, 잠재적으로 비용이 높아지게 함
- 시기 적절하고 정확한 날씨, 기후, 물 관련 자료와 과학, 서비스로 에너지 계획과 운영을 개선하여 SDG 7 달성을 지원
- 데이터 품질, 데이터 종류와 도구의 제한된 가용성, 데이터의 제한적 접근, 데이터 및 서비스의 낮은 경제성 등, 여러 어려움 존재

서론

SDG 7은 모든 사람이 깨끗하고 저렴한 에너지에 접근할 수 있도록 하는 것을 목표로 하며, 이는 모두에게 저렴하고 신뢰할 수 있는 현대적인 에너지 서비스를 전기분야와 깨끗한 조리에 대해 보장하고, 전세계 에너지 혼합에서 재생에너지 비율을 높이고, 에너지 효율을 향상시키는 것을 포함한다(Ensure Access to Affordable, Reliable, Sustainable and Modern Energy). 청정 및 경제적인 에너지는 Box 1에서 나타나는 바와 같이 여러 SDG 달성에 직접적 또는 간접적으로 중요하게 작용한다.

SDG 7 달성은 경제적, 재생가능, 청정, 효율적인 에너지에 달려 있고, 이를 위해서는 정확하고 시기적절한 날씨, 기후, 물 자료가 더 합리적인 가격과 더 낮은 리스크에서 의사 결정자에게 제공되어야 한다. 기후 변화는 재생 에너지 결과물을 더욱 불확실하게 하여, 투자 계획과 에너지 시스템 관리/운영에 대한 리스크를 증가시킨다. 에너지 수요의 특성 또한 기온 패턴이 변하면 저렴하고 효율적인 냉방에 관한 요구가 가속화되는 등 날씨와 기후에 크게 영향을 받게 된다.

Box 1. SDG 달성에 있어 SDG 7의 역할

SDG 7은 여러 SDG를 달성하는데 필수적이다(그림 1). 깨끗하고 합리적 비용의 에너지는 생산적이고 지속가능한 농업 및 식량 생산을 가능하게 하고(SDG 2: 기아 종식), 의료, 교육, 물/위생 시설과 같은 사회적 기반시설에 전기를 공급하고(SDG 3: 건강하고 행복한 삶 보장, SDG 4: 양질의 교육, SDG 6: 깨끗한 물과 위생), 책임감 있는 산업 및 서비스 제품을 지원한다(SDG 12: 책임 있는 소비와 생산). SDG 7은 또한 다양한 경제 활동을 지원하여 경제 성장을 이끌며 청정 에너지 분야에서 양질의 일자리를 제공한다(SDG 8: 양질의 일자리와 경제 성장).

또한, 지속가능한 산업화에는 환경적 영향이 작고 믿을 수 있는 에너지 시스템이 필요하고(SDG 9: 산업, 혁신, 기반시설), 성장하는 도시에는 많은 양의 경제적이고 깨끗한 에너지가 필요하다(SDG 11: 지속가능한 도시와 지역사회). 청정 에너지 또한 온실가스 배출을 감소하는데 필요하고(SDG 13: 기후행동), 에너지와 관련된 환경 재해와 오염을 감소시키면서 지속가능한 환경적 이점을 제시한다(SDG 14: 수생태계 보전, SDG 15: 육상생태계 보전). 간접적으로 SDG 7는 특히 여성과 아동이 부담하게 되는 노동 집약적이고 시간이 소모되는 작업을 대체함으로써 빈곤 퇴치와 성평등을 지원한다(SDG 1: 빈곤 퇴치, SDG 5: 성평등).

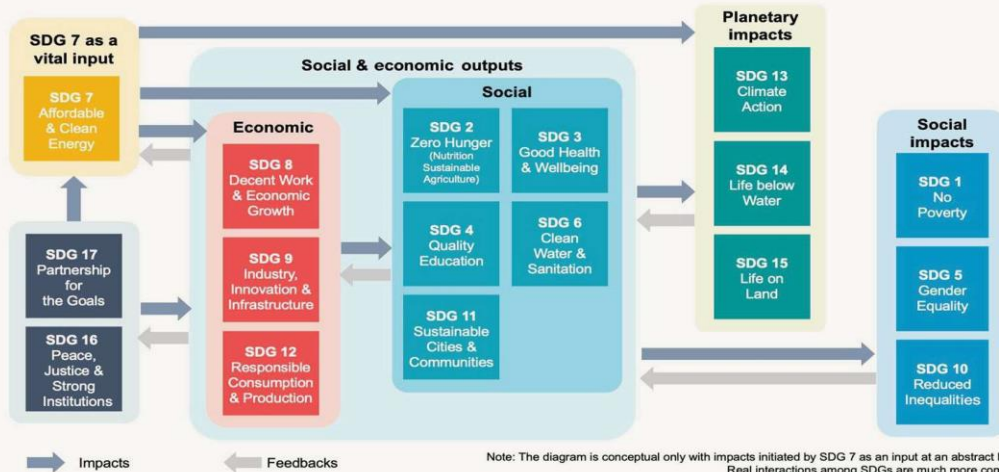


그림 1. SDG 7과 다른 SDG 간의 영향과 피드백에 관한 개념 다이어그램. 출처: SforALL

SDG 7

적정 가격의 깨끗한 에너지

지속가능한 에너지를 위한 날씨, 기후, 물 관련 과학

날씨, 기후, 물 관련 과학은 재생에너지 계획과 개발, 에너지 시스템의 운영과 관리와 같이 지속가능한 에너지를 지원하기 위해 필수적이다.

계획 및 개발

장기 풍속과 바람 패턴의 예측된 변화(IPCC, 2021) 및 파동 에너지의 예측된 변화(Reguero et al., 2019)와 같이 기후변화로 인한 기상, 기후, 물의 변화와 공급원료의 가용성은 재생 에너지원(태양, 바람, 해양, 수력, 지열, 바이오에너지 등)에 영향을 준다(Bloomfield et al., 2016). 따라서, 날씨, 기후, 물 자료는 재생 에너지 기반시설에 정보를 제공하고 계획과 개발을 추진하는데 중요한 자료이다. 태양광, 풍속, 바이오 연료와 같은 재생에너지 자원에 대한 정보는 국가 및 국제 지도 툴로 구축하여 재생에너지 발전소와 전력망 개발을 위한 전략적 위치를 파악함으로써 투자 결정을 지원할 수 있다(일부 사례 소개: [Global Atlas](#); [Technical Assessment Services](#); [IRENA and FAO's Collaboration Drives Better Decision-making for Sustainable Bioenergy Development](#); [Delivering a Low Carbon Future](#); [Round 4 Project Map](#); [ENTSO-E, 2010, 2020](#)). 더 많은 현장 특화된 지역 기상 및 기후 자료와 공간 매핑 도구가 프로젝트의 타당성과 투자 결정을 분석하는데 사용되었다([Bioenergy Simulator](#), [SolarCity Simulator](#)). 이러한 정보와 자료 툴은 독립적인 소규모 에너지 시스템(미니 그리드, 가정 태양광 시스템 등)을 위해 대형 시설이 도달하지 않는 곳에서 적절한

가격의 에너지에 접근할 수 있도록 하는데 필수적이다. 기상과 기후는 에너지 수요에도 영향을 미치면서 계획과 개발에도 영향을 미치게 된다(그림 2). 덥고 습한 기후와 날씨에서는 냉방을 위한 전기 사용이 증가하면서 여름철 에너지가 최고치에 도달하게 되고, 건조하고 온화한 대륙성 기후에서는 겨울철에 난방 수요가 급증하게 된다. 고해상도 기상 및 기후 자료와 예측자료는 예측된 수요에 기반하여 에너지 계획에 정보를 제공할 수 있다. 전세계 기온이 계속해서 증가함에 따라, 기온과 습도에 대한 정보는 냉방을 위한 에너지 수요에 대한 통찰력을 가지는데 아주 중요하며(SEforALL, 2020a, 2021), 이는 인간의 건강에도 중요한 영향을 미친다(IPCC, 2021, 2023a, 2023b).

지리적 자료를 사용한 야심차고 신뢰할 수 있는 데이터로 에너지 전환과 적응, 효과적인 자원 분배를 지원할 수 있다. 통합 에너지 계획은 공간적 툴을 사용하여 가장 비용이 적게 드는 기술로 에너지 접근에 대한 가장 우선되는 지리적 영역을 파악한다. 이해관계자가 모든 SDG 7 활동을 효율적인 비용으로 조정할 수 있는 국가적 중앙 프레임워크를 제공하기 위해서, 경제성과 같은 수요 측면의 요인과 다양한 공급 솔루션을 효율적으로 통합하는데 재생 에너지원 자료가 고려된다(SEforALL, 2020b; [Universal Integrated Energy Planning](#)). 이러한 계획 툴은 다른 SDG 활동을 SDG 7과 연관된 활동과 조율하기 위한 도구로 확장해서 사용할 수 있다. 에너지 시스템 전환과 기후변화 적응은 상충관계가 거의 없는 강력한 시너지 효과를 가지며(IPCC, 2023a, 2023b), 견고한 날씨, 기후, 물 관련 과학과 자료를 이용하여 계획을 수정하고 더 회복력 있는 에너지 시스템을 개발하고 더 나은 리스크 관리를 할 수 있다.

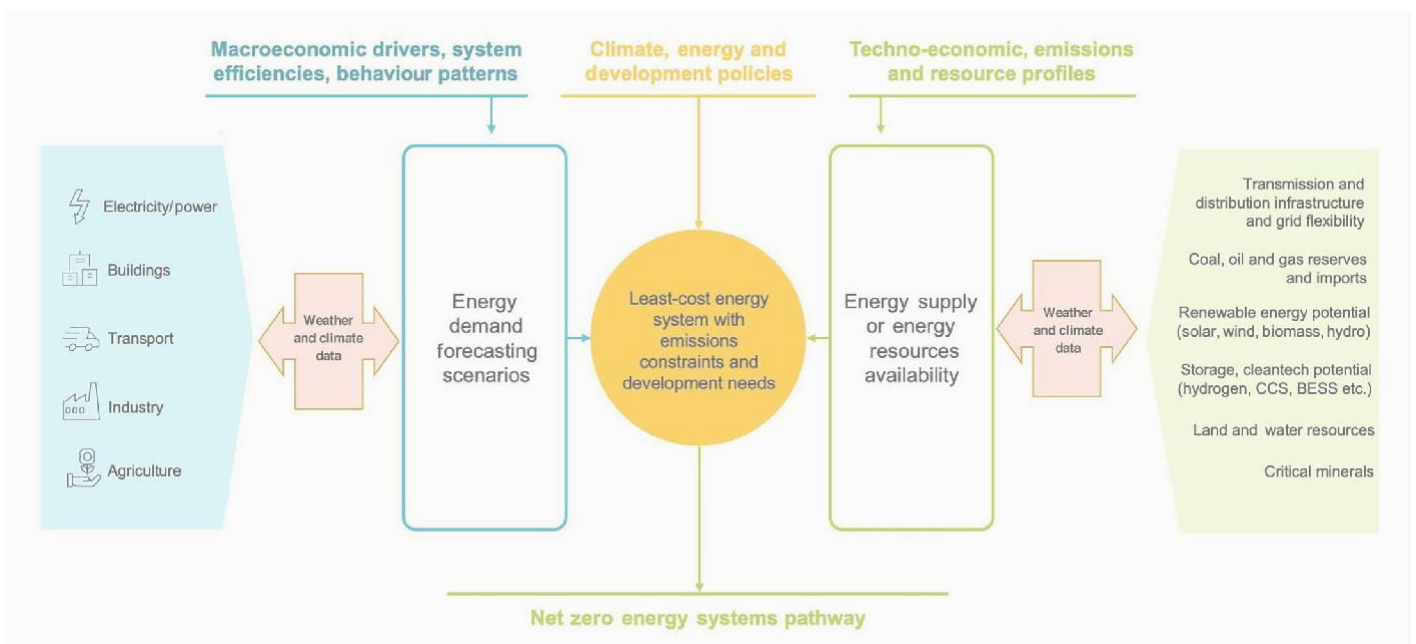


그림 2. 장기 에너지 전환 계획에 있어 기상/기후 자료의 역할. Note: BESS - 배터리 에너지 저장 시스템, CCS - 탄소 흡착 및 저장. 출처: SEforALL

운영 및 관리

에너지 시스템의 일상적인 운영은 수요와 공급을 관리하기 위해서 분 단위부터 시간 단위까지 전 시간 규모에 걸친 기상 및 기후 자료에 크게 의존한다. 특히 유동적인 재생에너지 (VRE), 즉 변동하는 기상 조건(풍력 및 태양광 등)으로 인해 유동적인 에너지 공급과 함께 높은 온도가 성능에 부정적인 영향을 미치는 화력 발전소에 특히 해당된다. 화력 발전소에는 또한 냉각이 필요한데, 이는 종종 많은 양의 물을 사용하게 되고, 물의 가용성은 기후변화에 크게 영향을 받는다. 에너지 수요와 운영의 최적화도 유사하게 기상과 기후 자료 및 정보에 의존한다. 예를 들어, 많은 산업 과정에서 변화하는 날씨 조건 속에서도 안정적인 온도와 습도가 필요하고, 따라서 이러한 변수를 제어하기 위해 에너지 수요가 변화되게 된다.

건물 점유율과 사용량, 에너지 가격, 소비자 패턴에 대하여 인공지능(AI)과 고해상도 기상 예측자료, 빅데이터를 사용하여(Box 2) 수요 측면 관리(DSM)의 잠재력을 최적화할 수 있다(IRENA, 2019). DSM은 일일 에너지 소비와 월별 에너지 요금, 장기적 에너지 투자 요구를 감소시켜 공급자에게는 지속가능한 에너지를, 소비자에게는 더욱 저렴한 에너지를 제공할 수 있게 한다.

정확한 수요-공급 예측은 공급의 과잉이나 부족을 줄여 운영과 관리를 강화시키고 전력 공급 사업의 수익성을 증가시키는 한편, 전력망(그리드) 운영자에게 유동적인 VRE 투입량을 보완하기 위해 유연성이 필요하다는 점을 정확하게 알려줌으로써 전력망 안정성에 기여한다. 그림 3은 기상 자료(발전 예측 1단계)와

재생 자원 자료(2단계)가 정확한 공급 예측과 시스템 운영에 얼마나 중요한지를 보여준다. 기상 예측력의 향상과 더욱 견고한 자료는 에너지 수요-공급 예측을 향상시켜 에너지 전 분야에 걸쳐 리스크와 비용을 줄이고 VRE 운영을 최적화시킬 것이다.

향후 도전과제 및 기회

날씨, 기후, 물 관련 과학은 2030년까지 SDG 7을 달성하는데 중요하며, 저소득층에 불균형적으로 더 많은 영향을 미치게 되는 극한 기상 현상이 심화되는 기후변화의 관점에서 볼 때 더욱 더 중요해질 것이다(IPCC, 2021, 2023a, 2023b; [World Weather & Climate Extremes Archive](#)). 그러나, 자료 품질, 접근성, 전송, 해상도, 경제성과 특히 관련해서는 아직 문제점이 많다. 예를 들어, 보다 세분화된 지리 공간 및 시간 데이터는 저소득지역과 지역단위에서 지속가능한 에너지 시스템에 대한 모델링과 분석을 가능하게 한다. 그러나, 고해상도 자료를 생성하고 사용하기 위한 분석 도구, 전문성, 대규모 처리 역량에는 여전히 많은 어려움이 존재한다 ([Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition](#) (WMO-No. 1312)). 또한, 데이터 품질 요구 사항(신뢰성, 투명성, 일관성, 세분화, 정확성, 활용성 등)은 계획 또는 모델링 활동시 의도하는 사용 목적에 따라 다르다. 저소득 지역에서는 데이터에 대한 접근에도 어려움이 남아있다. 개방형 데이터 소스가 존재하지는 않지만 더 높은 해상도와 원하는 범위의 자료는 종종 부족하며 상업적인 데이터셋에 대한 접근은 라이선스나 기밀 요구사항 등의 이유로 제한적이다.

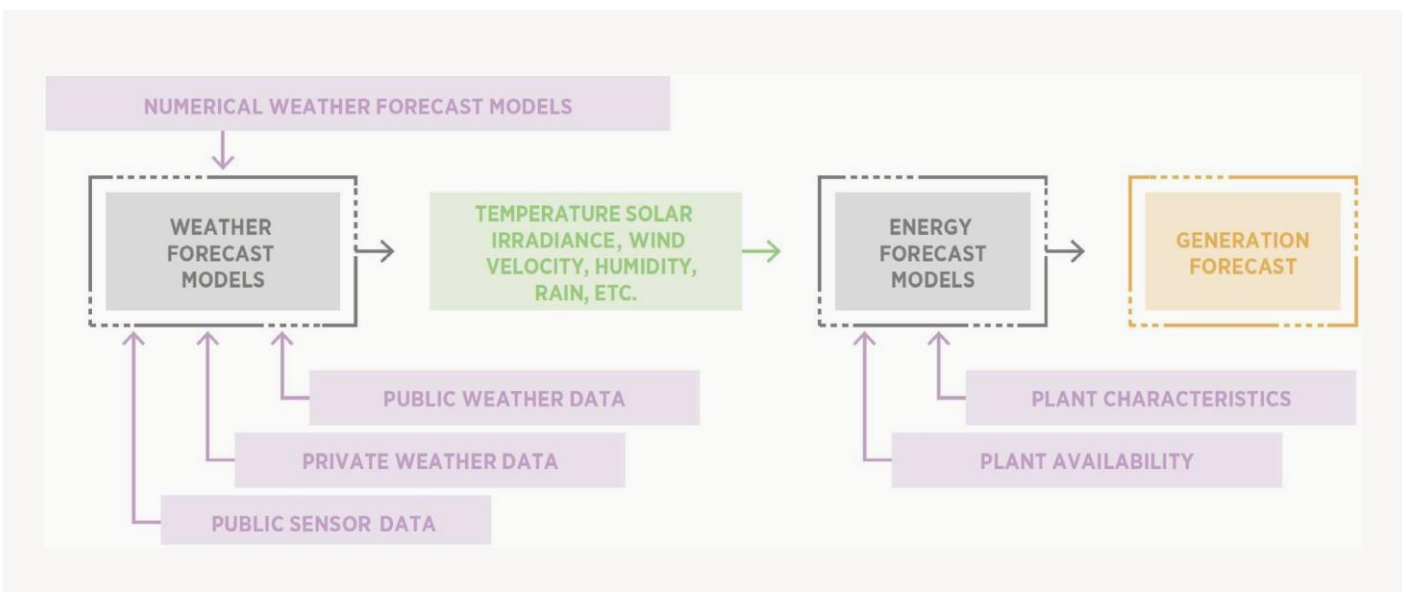


그림 3. 날씨부터 발전량 예측까지. 출처: IRENA, 2020

SDG 7

적정 가격의 깨끗한 에너지

이러한 문제점을 해결하기 위해서 청정 에너지로의 전환에 날씨, 기후, 물 전문가와 에너지 분야 이해관계자 사이에 정보 교환이 더욱 효과적으로 이루어지기 위해서 새로운 패러다임이 필요하기 때문에 협력이 필수적이다. 이러한 상호작용으로 보다 신뢰성 있고 목적에 적합한 데이터 및 정보를 보장할 수 있다(State of Climate Services Report). 또한, 개방형 데이터 소스를 강화하고, 특히 공공 계획의 목적과 같이 광범위한 지역사회에서 상업적 데이터를 보다 쉽게 접근하게 하는 시도가 중요하다(SEforALL, 2020b; *Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition* (WMO-No. 1312)). 재생 에너지를 위한 기상 예측에 AI를 활용하는 것과 같은(Box 2) 과학적 연구와 혁신을 발전시키는 것도 모두에게 깨끗하고 합리적인 가격에 에너지를 제공하는 데 중요할 것이다.

Box 2. 빅데이터와 인공지능을 사용한 에너지 시스템 운영 및 의사결정 강화

AI 활용에는 고도의 기상 예측과 예측 유지보수(문제를 예측하고 사전에 유지보수를 진행하여 예상하지 못한 고비용의 고장이나 다운타임 방지)가 있다. 이러한 AI 활용으로 슈퍼컴퓨터와 빅데이터(컴퓨터 분석을 통해 밝혀질 수 있는 패턴을 내재한 방대한 양의 데이터셋)를 사용하여 다양한 지역적, 실시간, 과거 기상 정보를 혼합하여 VRE 운영을 개선한다. 이러한 자료에는 고해상도 수치 기상 예측과 기상 관측에 기반한 실시간예측(상황 측정 및 원격 감지 데이터), 실시간 발전량 정보 통합이 포함된다(*Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition* (WMO-No. 1312)).

기상 및 기후 빅데이터와 AI를 결합시킴으로써 얻을 수 있는 운영적, 경제적, 사회적 이점은 분명하다. 새롭게 등장하는 사례에는 풍력 및 태양광 발전 개선, 수요 예측, DSM 예측이 있다(IRENA, 2020; *Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition* (WMO-No. 1312)). 전력망 안정성과 신뢰성을 유지하고 DSM과 효율성을 개선시키는 것 외에 에너지 저장과 시장 운영을 최적화 하고(예: 경제적 부하 분배의 최적화) 시장 설계를 개선시킬 수도 있다(IRENA, 2019).

기계학습과 같은 AI 지원 분석과 원격 감지의 발전으로 광범위한 지역에 걸쳐 상세화 수준을 증가시키면서 데이터를 개선하는데 기여하고 있다(SEforALL, 2020b). 더 많은 기술 발전으로 의사결정, 계획, 상황 모니터링, 감시, 인증, 공급망 최적화를 더욱 향상시키는데 AI와 빅데이터가 활용될 것으로 기대되며, 이는 일반적으로 에너지 시스템의 효율성을 증가시킬 것이다(IRENA, 2019).

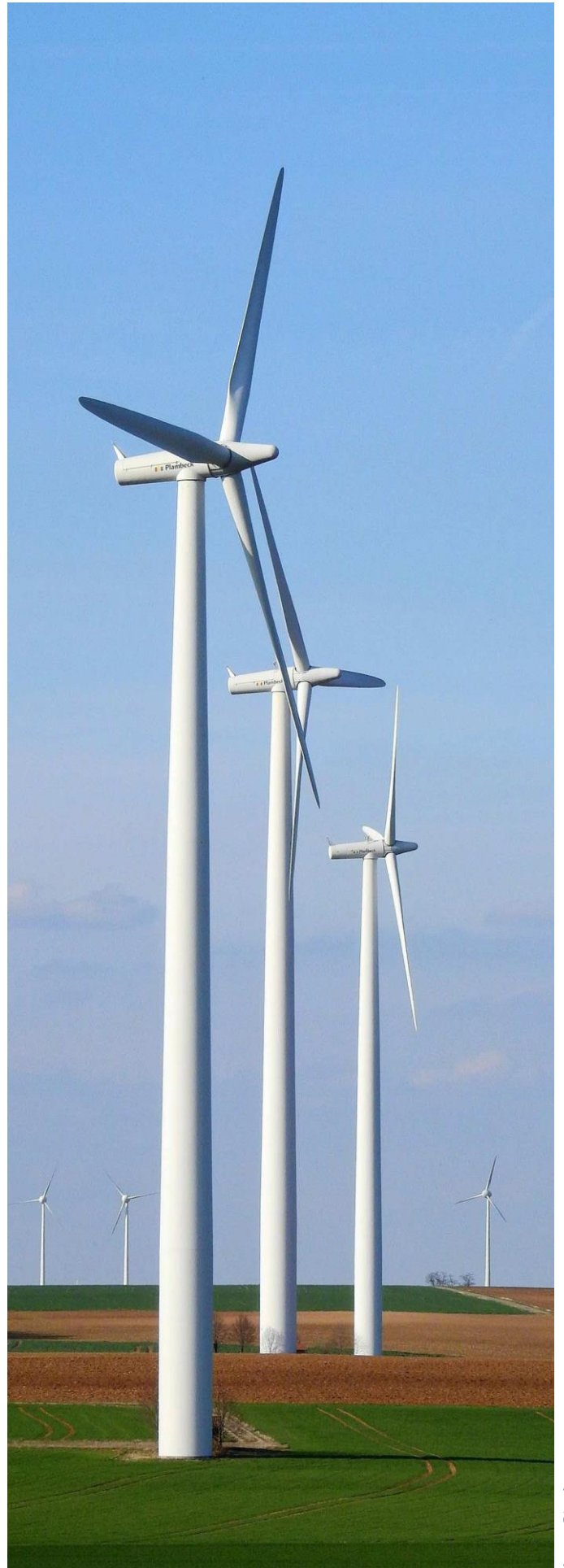


Photo: Pixabay



SDG 11 지속가능한 도시와 지역사회



WORLD
METEOROLOGICAL
ORGANIZATION



주요 메시지

- 도시는 전세계 온실가스 배출에서 높은 비중을 담당하고 있고 SDG 11 달성을 위협하는 기후변화와 극한 기상 현상의 영향에 크게 취약함
- 최고수준의 과학적 정보에 기반을 둔 도시 날씨, 기후, 물, 환경의 통합 서비스는 도시가 SDG 11을 달성하는데 도움을 줌
- 관측, 고해상도 예측 모델, 다중 위험 조기 경보 시스템은 통합 도시 서비스의 핵심 기반이 됨

서론

SDG 11은 포용적이고 안전하고 회복력 있고 지속가능한 도시와 인류 정착을 만들기 위해 노력한다. 오늘날, 전세계 인구의 절반 이상이 도시에 살고 있고, 2050년까지 이 수치는 22억명으로 증가하여 전세계 인구의 68%가 도시에 살게 될 것이다(UN Habitat, 2022). 도시는 혁신과 경제 성장의 허브로 전세계 국내 총생산의 80% 이상에 기여한다. 그러나 도시 기반 활동은 전세계 온실가스 배출량의 많은 부분에 관련이 있고, 2020년 전세계 온실가스 배출량의 70% 정도가 도시에서 발생되었다(IPCC, 2023a, 2023b). 또한, 도시는 사람과 기반시설이 고도로 집중되어 있어, 해수면 상승과 해일, 폭염, 폭우와 홍수, 가뭄과 물 부족, 대기 오염 등과 같은 기후변화와 극한 현상의 영향에 크게 취약하다(IPCC, 2023a, 2023b). 이러한 리스크는 비공식 정착지에 거주하고 필수 인프라와 서비스가 부족하며 극한 현상에 크게 위협한 약 10억명의 도시 거주자에게 증폭되어 영향을 미친다(UNSD, 2019).

SDG 11 달성과 새로운 도시 아젠다(New Urban Agenda), 재난 위험 저감을 위한 샌다이 프레임워크, 다른 여러 국제 협정들의 실행을 지원하기 위해서는 도시 날씨, 기후, 물, 환경의 통합적 과학과 서비스가 필수적이다. 통합 도시 서비스는 도시의 지속가능성과 회복력을 향상시키고 여러 사용자와 도시 이해관계자, 거주자에게 이익을 제공한다. 또한 통합 도시 서비스는 도시가 밀집된 관측 네트워크와 전 시간규모의 고해상도 예측, 다중 위험 조기 경보시스템, 위기 관리와 적응전략을 위한 기후 서비스를 잘 활용하고 SDG 11 달성을 장려하는 프레임워크 내 공공 인식에 대한 이해도를 높일 수 있도록 지원할 수 있다(WMO *Guidelines on Multi-hazard Impact-based Forecast and Warning Services* (WMO-No. 1150); *통합 도시 수문기상, 기후, 환경 서비스에 대한 지침, Volume I: Concept and Methodology* and *Volume II: Demonstration Cities* (WMO-No. 1234)).

도시 활동을 위한 날씨, 기후, 물 관련 과학

통합 도시 서비스의 핵심 원칙은 도시가 회복력 있고 지속가능할 수 있도록 과학적 지식의 활용을 극대화하는 것이다. 날씨, 기후, 물 관련 과학은 통합 도시 서비스에 기본 바탕이 되고, 도시가 극한 기상 현상에 대응하고, 기후변화에 대한 회복력을 높이며, 대기질과 같은 환경 조건을 모니터링하는 것을 지원한다.

극한의 날씨에 대응

도시지역은 강풍과 폭우, 해일과 강설과 같은 극한 기상 현상에 크게 취약하다. 소규모 및 중규모의 기상 시스템이 모델에서 파악하기 힘든 여러 요인들에 영향을 받기 때문에 이러한 고위험 기상 현상들은 정확하게 예측하기는 힘들다. 그러므로 위성, 레이더, 지상관측소, 저비용 센서와 시민들의 관측(커넥티드 카(인터넷 접속이 가능한 자동차), 핸드폰 등)을 통한 고해상도 관측과 통합 측정 도시 관측 네트워크가 필수적이다. 또한 지형학, 환경, 사회경제적 자료를 포함한 도시 자료 역시 고해상도 기상 및 수문 모델 같은 도시 분석과 모델 적용을 지원하는 데 중요하며 이는 도시 통합 서비스에도 중요하게 작용한다(*Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services, Volume I: Concept and Methodology* (WMO-No. 1234)). 이러한 모델들은 다양한 도시 어플리케이션에 고해상도 예측 정보를 제공하고 영향 기반 예측과 다중 위험 조기 경보 서비스를 개선시킬 수 있다(*Good Practices on High-resolution Modeling for Integrated Urban Services*).

기후 반응형 설계 및 계획

기후변화로 인해 도시빈민층에 불균형적으로 영향을 주고 공중 보건과 복지, 물과 에너지 공급을 위협하는 폭염과 가뭄이 더 빈번하고 강력하게 발생하고 있다. 그러나, 기후과학을 도시

SDG 11

지속가능한 도시와 지역사회

계획에 적절하게 통합시키고 기후변화가 도심 인프라에 미치는 영향을 평가하면 변화하는 환경에서도 도시가 더욱 회복력 있고 지속가능해 지는데 도움이 된다.

예를 들어, 급속히 개발되고 있는 수치 모델링과 원격 감지, 지리정보시스템(GIS)은 UCMaps(Ng, 2009a, 2009b; Ng and Ren, 2015; He et al., 2015; Liu et al., 2016)라고 알려진 도시

기후 지도를 개발하는데 활용된다. UCMAP은 세부 지역과 건물 부지 설계 규모 뿐만 아니라 도시 마스터 계획에서 지역 계획에 이르는 지역 도시 계획과 설계 활동을 가이드하기 위해서 다양한 규모로 개발되었다(Ren et al., 2010, 2018). 급속하게 성장하고 있는 도시, 특히 저소득 지역의 도시에서 도시 기후 서비스에 대한 수요가 많으므로, 도시를 더욱 회복력 있게 만들기 위한 기술과 지식의 신속한 이전이 필수적이다.

Box 1. 안전하고 회복력 있는 도시를 위한 조기 경보

중국 심천은 민관 참여가 메가시티의 조기경보 시스템을 어떻게 개선할 수 있는지를 보여주는 시범 사업을 시행하고 있다(Pilot Project on Public-Private Engagement for Smart Meteorological Service in Mega-Cities in Regional Association II). 저비용, 다기능 스마트 가로등으로 도시 지역에 기상 관측 밀도를 높이고, AI 기술을 적용한 고해상도 모델로 실시간예측(1Km 해상도, 6분마다

업데이트)을 제공한다. 도시 이해관계자들에게 극한 기상 현상에 대해 효과적인 조기 경보 및 긴급 대응을 제공하기 위해, "31631"이라 하는 점진적 기상 예측 메커니즘을 구축하였다(그림 1). 통신사와의 효과적인 공공-민간 파트너십을 통하여, 조기 경보 메시지를 대상자인 재난 피해 지역의 사람들에게 매우 빠르게 전송할 수 있다. 예를 들어, 재난이 발생한 지역의 휴대전화 사용자들에게 경고 메시지를 5~10분 안에 전달할 수 있다.

불확실성

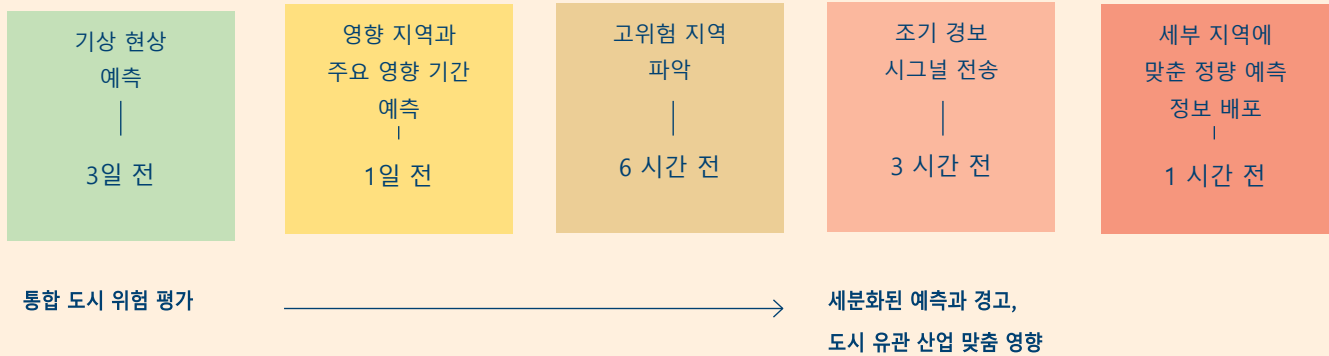


그림 1. 극한 기상 현상(태풍, 폭우 등)에 적용되는 "31631" 점진적 기상 예측과 기상 서비스 메커니즘. 출처: 중국기상청 심천시기상청 Xiaolin Wei

환경 모니터링

도시 규모 기상학과 대기 구성 및 대기질 감시에서의 과학적 발전은 환경과 인간의 건강에 중요하다. 그러나 대기질 모델링의 다양한 물리적 규모 연결, 지상 및 원격 감지 기기의 필요성, 도시 지역에 대한 대기 오염의 영향에 대처하기 위한 효과적인 완화 및 적응 전략의 부족, 확산원 및 입자상 물질 화학 성분의 배출 불확실성 등 아직 어려운 점이 많이 남아 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해, 최근 PROMOTE라고 하는

인도-영국 공동 프로젝트(영국 자연환경연구원과 인도 지구과학부 기금 사업)의 일환으로 인도 델리에 거리, 도시, 지역 규모의 대기질을 예측하기 위한 다중 규모 결합 모델링 시스템이 최근 개발되었다(그림 2). 이 고해상도 상세화 모델 예측은 미세먼지(PM2.5)와 같은 대기 오염물질에 대한 시민의 노출을 줄이기 위한 완화 전략을 개발하는데 도움을 준다. 이 프로젝트는 델리의 대기질 개선을 위한 보다 강력하고 효과적인 완화 옵션을 도출하기 위해 대기질에 대한 특정 지역 및 광범위한 지역적 기여를 모두 이해하고 양적으로 평가되어야 함을 강조했다.

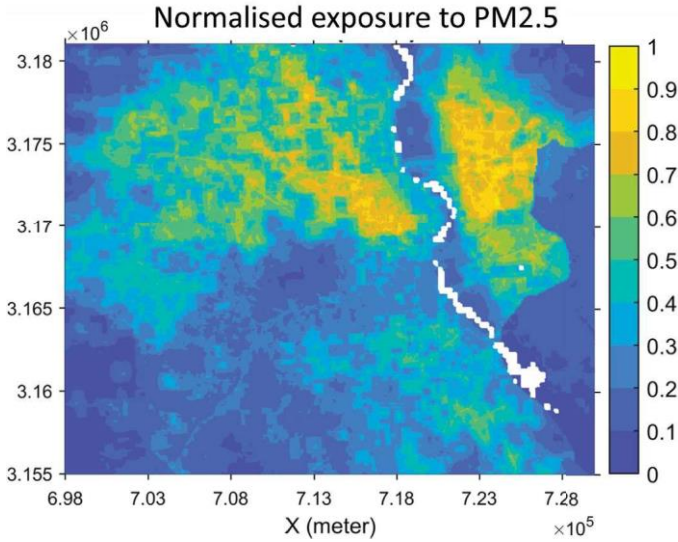


그림 2. 인도 델리의 WRF-Chem-OSCAR 결합 모델링 시스템으로 예측한 PM2.5에 대한 정규 인구 노출 예시. 출처: PROMOTE 프로젝트

향후 도전과제 및 기회

급격한 도시 확장, 도시화와 인구 성장, 극한 기상 현상, 기후변화, 환경 및 물 오염, 인간에 의한 요인들로 도시의 안전과 회복력, 지속 가능성은 계속해서 위협받을 것이다. 또한 데이터 격차와 효과적인 다중이해관계자(교통, 에너지, 보건, 관광 등) 파트너십 및 사용자 참여 부족은 도시를 더욱 취약하게 만든다.

날씨, 기후, 물 관련 과학과 기술, 지역 단위의 효과적인 거버넌스와 계획, 공공과 민간 분야 간의 보다 다양한 협업은 SDG 11 달성을 위해 이러한 문제점을 해결하는데 도움을 줄 수 있다. 도시의 복잡성과 다양성, 위험을 보다 잘 이해하기 위해서는 통합 도시 서비스의 과학 기반 방법을 장려하고 도시 데이터를 제한 없이 자유롭게 교환하며, 관측 네트워크를 확장하고 도시 규모에 대한 연구를 더 많이 수행하는 것이 중요하다. 영향 기반 환경 및 수문기상학적 예측과 기후 변화 예측도 중요하며, 도시 단위에서의 혁신적인 모델링 접근법도 필요하다(Box 2). 인프라 건설과 관리, 맞춤형 기상 서비스는 성과에 중점을 둔 계획방식과 함께 도시 회복력을 향상시키고 도시의 공중 보건과 안전, 복지를 개선하는 등 지속가능한 도시 개발을 위한 공동 이익도 함께 가져옴으로써 인간 정착을 향상시킬 수 있다.

Box 2. 파리의 도시 연관 기상 및 기후 연구

파리 지역은 신흥 기상 및 기후 연구의 관심 지역으로 선정되었다. 예를 들어, 세계 기상 연구 프로그램(WWRP)의 Paris 2024 Olympic Games Research Demonstration Project는 전세계 대기 감시 도시 연구 기상 및 환경 프로젝트(Global Atmosphere Watch Urban Research Meteorology and Environment)의 지원을 받아 도시계획과 의사결정을 향상시키기 위하여 100미터(혹은 더 상세한) 해상도로 도시지역의 기상 예측을 개선하는데 중점을 두었다. 실험 캠페인 PANAME(그림 3)에서 나온 관측 자료로 수치 대기 모형에서 나온 자료를 보완하여 대기의 물리 과정을 분석하고 뇌우와 같은 기상 현상이 도시에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이 정보는 기상 예보관이 올림픽 계획 담당자의 일정 및 계획 수립, 또한 도시 관리자의 기후변화 적응 계획 추진을 지원하는데 활용될 것이다.

또한, 세계 기후 연구 프로그램(WCRP)의 CORDEX Urban Environments and Regional Climate Change flagship pilot study는 도시에서 지역 기후변화가 미치는 영향과 지역 기후가 도시 지역에 미치는 영향을 이해하는 것을 목표로 한다. 도시는 열과 수분 플럭스와 지역 대기 화학 및 구성의 조정을 통해 지역 규모 기후에 중요한 역할을 한다. 킬로미터 단위에서 도시화된 지역 기후 모델을 이용한 수십년 실험을 조율하는 CORDEX의 작업은 파리와 같은 도시에 대한 기후변화 영향의 이해도를 높이고 적응 및 전략 행동에 정보를 제공할 것이다.

이 두개의 프로젝트는 기상 및 기후 연구를 위한 상호 보완적 접근 방식으로 도시 계획과 관리를 강화하는 이음새 없는 통합 도시 기상, 환경, 기후 서비스에 기여할 것이다.



그림 3. PANAME 실험 캠페인 동안 파리에서 기상 풍선 게시

Photo: Cyril Frésillon, French National Centre for Scientific Research (CNRS)



SDG 13 기후 행동



주요 메시지

- 인위적인 온실가스(GHG) 배출로 인한 기후 시스템의 열 축적은 대기, 해양, 빙권, 생물권의 광범위하고 급속한 변화를 초래하였고 모든 SDG 달성에 역효과를 가지고 올 수 있음
- 날씨, 기후 및 물 관련 과학은 특히 저소득 국가에서 야심 찬 기후 행동과 기후 금융 동원을 지원함
- 이해관계자 참여는 시민 과학과 같은 방법을 통해 날씨, 기후, 물 관련 과학이 SDG 13 달성으로 전진하는데 기회를 제공함

서론

SDG 13은 온실가스 배출 완화, 기후 영향에의 적응과 기후 금융 동원 등 기후변화와 기후변화 영향에 대처하기 위한 야심 찬 행동을 촉구한다. 기후변화는 대기, 해양, 빙권, 생물권에 광범위하고 급속한 변화를 야기하여 여러 극한 기상 및 기후 현상에 영향을 미치고 전세계에 악영향을 초래했다(IPCC, 2023a,

2023b). 이러한 영향은 모든 SDG 달성과 지속가능 발전을 점점 더 위협한다. 동시에, 지속가능하지 않은 개발 활동들은 온실가스 배출 증가를 가지고 올 수 있고, 이는 파리 협정 목표 달성을 위태롭게 할 수 있다.

파리 협정은 처음부터 과학의 중요성을 인지하면서 협정 당사국은 "최고수준의 과학적 지식에 기초하여 기후변화의 긴급한

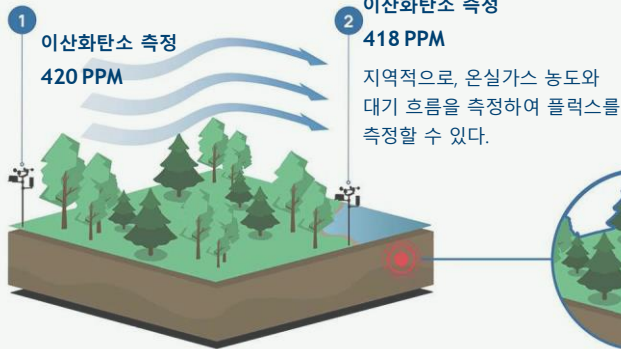
Box 1. 전세계 온실가스 감시(GGGW)를 통한 기후변화 저감 활동 지원

GGGW는 2023년 5월 19차 세계기상회의에서 승인된 새로운 이니셔티브로 기후변화 저감 활동을 지원하기 위해 전지구적 온실가스 플렉스의 거의 실시간 정보를 제공할 것이다(WMO *Global Greenhouse Gas Watch*). 이 이니셔티브는 지구 대기 감시의 일환으로 실행되는 WMO의 온실가스 모니터링에 관한 장기 활동에 기반하여 확장되었고, 전지구 통합 온실가스 정보 시스템을 통해 확장되었다. 공간적 해상도를 가진 플렉스 추정치는 지구 관측과 육지 생물권으로부터 플렉스에 관한 사전 정보, 해양 및 인위적 배출, 발전된 모델링을 결합하여 생성된다(그림 1).

GGGW는 네트워크 설계를 관찰하고, 그 결과 관측치의 획득, 국제 교류 및 활용을 위해 국제적으로 조율된 방식을 구축할 것이다. 과학 커뮤니티와 다른 UN 기구들, 국제 조정 기구들이 광범위하고 긴밀하게 참여하고 협력할 것이다. 이러한 체계적인 모니터링은 온실가스 예산에 대한 우리의 이해도를 향상시키고, 불확실성을 줄이며, 저감 활동의 설계와 평가를 향상시키는데 중요하다. 그 결과, 이 이니셔티브는 투명성과 책임감을 제고하고 파리 협정의 글로벌 현황에 대한 정보를 제공할 것이다.

상향식 모니터링을 위한 기술과 빌딩 블록은 쉽게 이용할 수 있지만, 현재 정책 지원의 목적으로 지속적인 방식으로는 아직 활용되고 있지 않다.

지역 규모



전지구

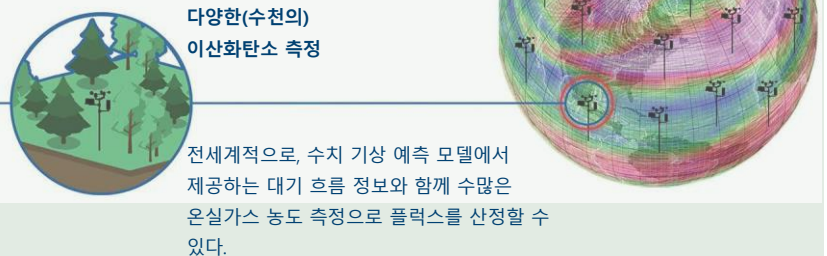


그림 1. 온실가스 농도의 모델 예측과 관측 사이의 체계적 비교를 통해 온실가스 농도 플렉스 추정. 플렉스 추정치의 품질은 대기 수송장과 관측 자료의 적용 범위에 따라 달라질 것이다.

Note: PPM – parts per million.

위험에 효과적이고 적극적으로 대응할 필요성”을 인정한다고 명시하고 있다. 기후변화가 지역, 분야, 지역사회에 어떻게 영향을 미치는지 이해하기 위해서는 과거, 현재, 예측된 미래의 기후 정보가 필요하다. 그러므로 온실가스 배출을 줄이고 취약 커뮤니티의 적응역량과 회복성을 높이며 손실과 피해를 해결하는 투자를 계획하고 설계할 때 이러한 정보가 고려되어야 한다. 어려움은 여전히 남아 있지만, 기후 과학이 계속해서 진보하고 있으므로 SDG 달성을 지원하는 기후 행동을 강화하기 위한 기회들도 존재하는 것이다.

기후 행동을 위한 날씨, 기후, 물 관련 과학

날씨, 기후, 물 과학은 전세계 온도를 산업화 이전 대비 2°C 보다 훨씬 낮게, 그리고 1.5°C까지 기온을 제한하고자 하는 노력을 위해 인간에 의한 온실가스 배출을 어떻게 줄일 수 있는지 이해하는데 중요한 역할을 한다. 파리 협정에 따라 국가들은 자발적으로 온실가스 감축목표(NDC)와 이에 따른 완화 활동을 제출하고 그 진행상황에 대해 정기적으로 보고해야 한다. 그러나, 전세계 이산화탄소 농도 증가는 지난 60년 동안 지속적으로 가속화 되었고, 2030년까지 배출 격차를 줄이는데는 진전이 거의 없다(WMO Global Greenhouse Gas Watch; UNEP, 2022). 그러나, 대기 온실가스 농도와 플렉스의 체계적인 감시의 발전(Box 1)으로 저감 활동을 향상시킬 수 있는 실행가능한 정보를 제공하고 파리 협정 목표를 달성하는 데 도움을 줄 수 있다.

날씨, 기후, 물 관련 과학은 또한 기후변화 적응에 기여하여 기후와 관련된 재해에 의한 손실과 피해, 영향을 최소화하거나 변화하는 기후 조건에서 발생하는 기회를 탐색하는데 기여한다. 파리 협정에서 당사국이 정의하는 과정에서 구축된 전세계 적응 목표(Global Goal on Adaptation)는 국가 적응 계획 실행을 통해 적응을 강화하고 최상의 과학에 기반한 지속가능한 발전에 기여하는 것을 목표로 한다. 그러나, 효과적인 적응이란 매우 국지적이어서 적응 의사결정을 지원하기 위해서는 신뢰할 수 있고 고해상도이며 시기적절한 날씨, 기후, 물 정보를 필요로 한다. 잠재적 기후 행동 옵션을 파악하기 위해서는 농업분야의 적응을 위한 토양 수분 자료와 같이 내용 세분화된 기후 자료와 가뭄, 홍수, 태풍, 폭염과 같은 고영향 수문기상현상에 대한 자료가 도움이 된다(Developing the Climate Science Information for Climate Action (WMO-No. 1287)). 또한, 지구 및 지역 기후 모델도 기후가 미래에 어떻게 변화하는지 이해하고 적절한 적응 활동을 정의하는데 중요한 도구이다.

Box 2. 기후 행동을 위한 기후 과학

녹색기후기금(GCF)과 세계기상기구(WMO)가 협력하여 최신의 기후 과학 자료를 해석할 수 있는 새로운 기후 정보와 도구를 국제 커뮤니티에 제공한다(그림2). 기후 행동을 위한 기후 과학 정보 이니셔티브에는 기술 가이드스, 사례 연구, 온라인 플랫폼 두 개(Climate Information Platform – 전세계 기후 예측에 대한 접근 제공; Climpact – 과거 일별 기온 및 강수와 같은 기후 영향과 연관된 지수 70개 이상 계산)를 지원하는 자원이 포함된다(Climate Science Information for Climate Action). 이러한 도구와 자원으로 과학을 기술 가이드스로 해석하여 특히 조기 경보와 같은 적응을 위한 정책결정과 기후 금융 투자 정보를 제공하는데 도움을 줄 수 있다.

예를 들어, 이 도구들이 제공하는 과학적 정보는 GCF 프로젝트가 뒷받침하고 명확한 기후 영향을 설명하는 강력한 이론적 근거를 개발하는데 중요하다. “티모르의 수문기상 재해에 대한 회복력 강화를 위한 조기 경보 시스템 향상” 프로젝트는 기온, 강수, 해수면 상승, 극한 현상에 대한 과거 기후 정보를 분석하고 기후 예측에 기반하여 이 변수들이 미래에 어떻게 변화될 지를 파악한다(GCF, 2021). 이 사업은 강력한 과학적 기반으로 티모르의 기후 정보 역량과 조기 경보 시스템을 전환시킬 것이다. 또한 과학 기반 적응 활동을 뒷받침하고 모두를 위한 조기 경보(Early Warnings for All) 달성에 필요한 핵심 고해상도 자료와 정보를 제공할 것이다.

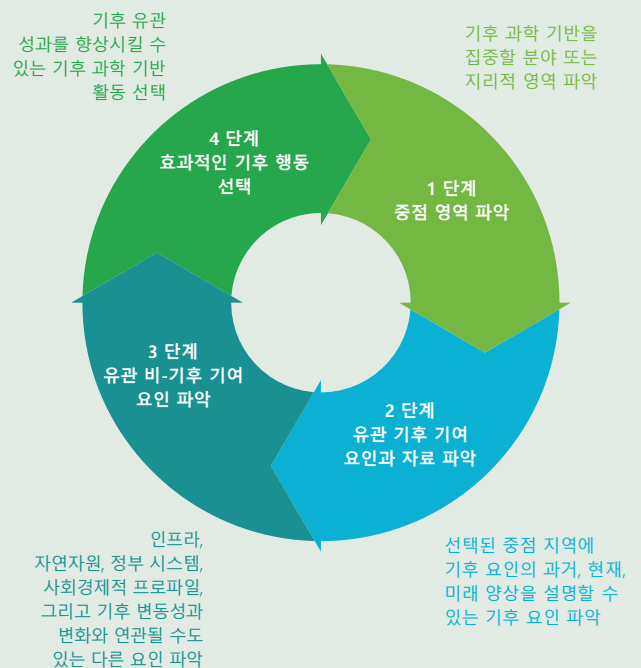


그림 2. 기후 행동을 위한 기후 과학 정보 개발에 대한 4단계 방법

날씨, 기후, 물 관련 과학은 또한 재정 자원이 부족한 저소득 국가에서 특히 야심 찬 기후 행동을 위한 금융을 동원하기 위해 증거 기반 접근법을 제시한다. 예를 들어, 기후 과학 자료와 정보는 확실성을 높이고, 계획을 강화하고, 잠재적 위험을 완화하는데 도움을 주어 적응과 완화 프로젝트가 비용 효율적이고 취약 계층에 이익을 제공하고 지속가능 발전에 기여할 수 있도록 한다(*Developing the Climate Science Information for Climate Action* (WMO-No. 1287)). 결과적으로, 이러한 투자는 녹색기후기금(GCF)과 같은 다자 금융 기구와 민간 분야 같은 재정 제공자에게 더 매력적으로 다가간다(Box 2). 기후 과학은 또한 기후 금융이 기후 대응을 지원하도록 보장함으로써 다른 비기후 관련 개발 필요나 우선순위와 대조된다. 그러나, 대부분의 기후 유관 프로젝트는 지속가능 발전, 재난 위험 완화, 그리고 다른 국가적 우선순위에 기여하는 공동의 이점도 가지고 있다(*Developing the Climate Science Information for Climate Action* (WMO-No. 1287)).

향후 도전과제 및 기회

과학은 명확하다 – SDG 13과 다른 SDG의 달성 노력을 훼손시키면서 우리는 파리 협정 목표 달성에서 멀어져 가고 있다. 온실가스 배출을 저감하고 기후변화 영향에 적응하는데 긴급하고 야심 찬 기후 행동이 필요하다. 날씨, 기후, 물 관련 과학은 저감 노력을 강화하고 적응을 가능하게 하며 기후 금융 동원을 지원하는 것을 포함하여 야심 찬 기후 행동을 뒷받침하는데 중요한 역할을 한다. 그러나, 기후 모델은 지역 단위의 의사결정에 필요한 만큼의 공간적 해상도를 가지고 있지 않으므로 지역 규모에서의 적응에는 적합하지 못하다. 또한, 저소득 국가에서는 종종 적절한 기후 정보와 이를 효과적으로 활용할 수 있는 과학적 역량이 부족하기 때문에 SDG 13 달성에 한계가 있다(*Developing the Climate Science Information for Climate Action* (WMO-No. 1287)).

과학적 연구 이니셔티브 덕분에 온난화가 사회에 미치는 영향에 대해 더 잘 이해하고 예측할 수 있는 전지구 및 지역 기후 모델링 발전에 많은 진전이 있었다. 그러나, 관측과 기후 과정에 대한 이해를 개선함으로써 강력하고 신뢰할 수 있으며 실행가능한 정보를 제공하는 기후 모델링을 개선하고자 하는 노력을 확대할 기회는 더 많이 남아 있다. 고해상도 기후 모델링의 발전은 특히 지역 규모에서의 미래 기후변화를 더 잘 예측할 수 있고, 야심 찬 적응 활동을 지원하고 부적응 위험을 줄임으로써 SDG 13 달성에 기여할 수 있다. 또한, 기후 과학이 발전하면서, 새로운 자료와 지식, 기술이 효과적으로 사용될 수 있도록 하는 교육, 훈련, 이해관계자 참여가 점점 더 중요해질 것이다. 이해관계자 참여를 강화하는 하나의 방법으로 시민 과학을 통해 과학

연구에 일반 대중을 포함시키는 것이 있는데(Box 3), 이는 지역의 관점에서 가장 관련 있는 자료를 선택하고, 지역, 토착민, 맥락적 정보를 통합하는데 사용된다. 결과적으로, 이러한 참여는 신뢰를 강화하고 지역 관점에서 날씨, 기후와 물 과학, 자료, 정보를 효과적으로 사용할 수 있는 역량을 강화하게 된다.

파리 협정 목표들이 달성 불가능한 상황에 놓일 위험에 있다. 따라서, 기후변화에 큰 영향을 받는 SDG 13뿐만 아니라 다른 모든 SDG 달성을 위해 시급하고 야심 찬 완화 활동이 필요하다. 날씨, 기후, 물 관련 과학은 기후 행동을 뒷받침하고 SDG 달성을 위해 경제와 인류 발전을 보호하는데 도움을 줄 수 있다.

Box 3. 시민 과학을 통해 가나의 지역 커뮤니티 참여

가나는 기상 관측소가 부족하여 관측자료가 제한적이어서 기상 예측이 정확하지 못하다. 더욱이, 언론 보도와 경보가 지연됨에 따라 해당 기관에 대한 대중의 신뢰도가 떨어져 상당한 커뮤니케이션 격차가 생겼다. 시민 과학 프로젝트는 세계기상연구프로그램(WWRP)의 HIWeather 플래그십 활동의 일환으로 시작되었고, 가나에서 기상 예측 평가에 사용자의 피드백이 미치는 영향을 파악하고자 했다(그림 3). 이 프로젝트는 날씨 예보와 검증에 관심있는 이들을 위한 “날씨에 대해 말해보자(Let’s Talk Weather)”라는 WhatsApp 플랫폼을 사용하였다(Let’s Talk Weather in Ghana). 기상 예측을 평가하고 검증하기 위해 시민 과학의 피드백 자료를 취합하였다. 참가자들은 강수의 발생과 분포, 강도에 관한 정보를 비교하기 위해 분석 후 플랫폼에 관측 사진을 보냈다. 이 프로젝트는 예보 평가와 검증을 향상시켰을 뿐만 아니라 플랫폼을 통한 대중의 배움 및 참여의 의지를 촉진시켰다. 그러므로, 참여와 교육을 통해 프로젝트가 과학자와 대중 사이의 간극을 연결하였으며, 기상청에 대한 사람들의 신뢰도 강화되었다.



그림 3. 시민 과학 활동에 참여하고 있는 가나 농부 그룹



주요 메시지

- 기후 및 인간이 초래한 영향은 우리의 해양을 위협하고 있으며, 해양생태계와 식량, 생계 보장을 위해 이에 의존하는 지역민들에게 영향을 미침
- 기후 관련 해양 과학은 기후변화가 해양에 미치는 영향에 대한 우리의 이해도를 강화시키고 해양 생태계의 지속가능한 관리와 보호를 위한 전략에 기여
- UN의 지속가능 발전을 위한 해양 과학의 십년은 과학계를 동원하고 해양 관련 과학을 가속화시킬 유례없는 기회를 제공

서론

SDG 14는 지속가능 발전을 위해 해양과 바다, 해양자원을 보전하고 지속 가능하게 사용할 것을 요구한다. 해양은 전세계의 가장 큰 생물군을 대표하고, 인간의 건강과 영양을 지원할 뿐만 아니라 자연과의 문화적, 영적 연결에 기여한다. 지속가능 발전을 위한 2030 아젠다에 SDG 14가 포함된 것은 인간의 웰빙에 해양이 미치는 중요한 역할과 모든 SDG 달성에 기여함을 인식한다는 것을 나타낸다.

다양한 생태계와 풍부한 해양 생물이 있는 해양, 그리고 해양이 제공하는 중요한 서비스는 기후변화의 영향을 포함하여 다양한 위협으로 인해 더 많은 압력을 받고 있다. 전세계 해양과 연안 해역에 일어나는 기후 관련 영향에는 해양 온난화, 산성화, 탈산소화, 해수면 상승, 해빙 손실, 용빙과 같이 오랜 기간 동안 점차적으로 발생하는 현상들과 해양 열파, 날씨로 인한 폭풍 해일과 파도와 같은 극한 현상들이 포함된다. 이러한 영향은 오염, 부영양화, 서식지 파괴, 침입종, 지속 가능하지 않는 해양 자원 사용들과 같은 인간이 유발하는 요인들에 의해 악화된다. 기후 및 인간이 초래한 영향은 해양 생태계와 식량, 생계 보장을 위해 이에 의존하는 지역민에게 막대한 영향을 끼친다. 따라서 이러한 영향으로 SDG 14 뿐만 아니라 다른 모든 SDG 달성이 위협받게 된다.

기후 관련 해양 과학은 기후가 해양에 미치는 영향에 대한 우리의 이해도를 높이고 해양 생태계의 지속 가능한 관리와 보호를 위한 전략에 기여한다. 제한된 자료 접근성과 교환, 저소득 국가의 불충분한 역량과 같은 어려움이 해양 관측과 지식에 있어 현저한 격차를 가져왔다. 그러나, 해양 십년(Ocean Decade)이라고 불리는 [United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development \(2021–2030\)](#) 이니셔티브로 다양한 이해관계자들이 협력하여 지속가능 발전을 위해 해양 과학 개발, 자금 조달·사용하는 방법을 변화시킴으로써 해양 과학의 발전을 가속화한다.

지속가능한 해양을 위한 기후 관련 과학

해양 산성화와 온난화 등의 기후변화 영향은 이미 관찰되고 있다. 해양은 대기에 인위적으로 배출되는 이산화탄소 연 배출량의 1/4 정도를 흡수하고 기후 시스템에 갇힌 에너지의 90% 정도를 흡수한다([State of the Global Climate 2022](#)(WMO-No. 1316)). 따라서, 해양은 기후변화가 지구에 대한 기후변화의 영향을 완화시키는데 도움을 준다(Friedlingstein et al., 2022). 그러나, 이산화탄소가 해수와 반응하면서 해양의 산성도를 변화시켜 해양 산성화를 가지고 온다. 또한, 기후 시스템의 에너지를 흡수하는 것은 해양 온난화를 초래하고, 이는 열 팽창으로 인해 해수면 상승을 악화시키고 더 빈번하고 강력한 해양 열파를 초래할 수 있다. IPCC(2023)에 따르면, 해양 산성화와 온난화는 미래 배출량에 의존하는 비율로 21세기에 계속해서 증가할 것이라고 한다.

해양 산성화

해양 산성화는 해양 생물과 생태계 서비스에 영향을 주고, 어업과 양식업을 위협하여 식량안보에 영향을 미친다. 또한 해안선을 보호하고, 식량과 영양을 공급하며 관광을 주도하여 해안 공동체가 생계를 의존하는 산호초를 악화시킨다. 따라서, 해양 산성화는 지속가능한 발전에 심각한 위협을 내재하고 있다

주요 전세계 기후 인자로서 해양 산성화를 모니터링하는 것은 우리의 기후 시스템에 대한 이해도를 강화하는데 중요하다. 해양 산성화를 감지하기 위해서는 탄산염 화학의 변동성과 추세, 그리고 이들이 해양 생명에게 미치는 영향을 파악할 수 있도록 적절한 빈도로 관측이 이루어져야 한다. 지난 10년 동안, 해수면 pH 모니터링은 많은 국제 과학 이니셔티브의 중점과제가 되었는데, 주로 전세계 해양 산성화 관측 네트워크(GOA-ON) 덕분이다(Newton et al., 2015). GOA-ON은 SDG 14.3.1 데이터 포털(Box 1)과 UN이 인준한 해양 십년 프로그램인 지속가능성을 위한 해양 산성화 연구 프로그램([Global Ocean Acidification Observing Network](#))을 포함하여 여러 이니셔티브를 통해 해양 산성화의 이해와 감시를 강화하는 국제 협력 네트워크이다

이러한 이니셔티브들의 결과로 적절한 품질의 해양 산성화 자료를 얻기 위한 인간과 기술 역량이 증가하고 있다.

Box 1. 해양 산성화 관측 실행을 위한 지침

과학 커뮤니티의 지원으로 다양한 종류의 기술을 이용할 수 있고, pH, 이산화탄소 부분 압력(pCO₂), 총 용해무기탄소 [CT/DIC], 총 알칼리성(AT/TA), 압력, 염도, 기온 등의 다양한 변수를 측정함으로써 해양 산성화를 관측하는 데 필요한 지침을 제시하는 방법과 데이터 포털이 개발되었다. 나아가, 어떤 종류의 데이터세트를 제출해야 하고 품질이 보장된 전세계, 그리고 가능하면 지역 자료의 생산을 보장하는지에 대한 지원을 제시한다.

2019년 12월 SDG 14.3.1 Data Portal을 게시한 이후, 더 많은 해양 산성화 관측이 UNESCO의 정부간해양지리위원회(IOC-UNESCO)에 보고되었고 14.3.1. 연간 평가보고서에 포함되었다(2022년에 35개국 308 관측소, 2023년에 41개국 593 관측소)(그림 1.). 그러나, 해양 산성화 모니터링의 현재 전세계 커버리지는 해양의 모든 지역에서의 관측과 자료의 격차로 인해 여전히 불충분하다. 해양 산성화의 변화율, 패턴, 규모는 지역마다 크게 변동적이고, 따라서 시공간적 고해상도 관측이 필요하다.

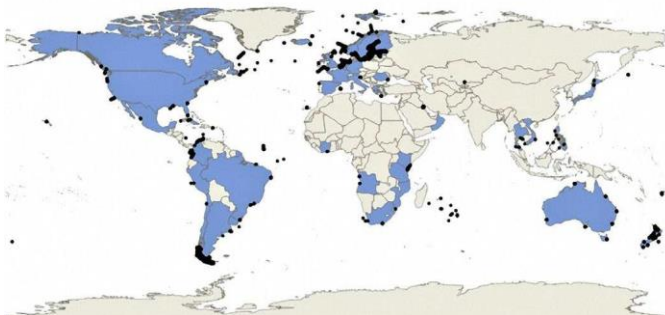


그림 1. SDG 지수 데이터 취합으로 2023년 41개국 539 관측소(검은색 원)에서 해양 산성화에 대한 자료를 제공한 지도. 출처: IOC-UNESCO

해양 열파

해양 열파는 수일에서 수개월 동안 지속적으로 해수면 온도가 극도로 따뜻하게 유지되는 기간으로 수천 킬로미터까지 확장될 수 있다(IPCC, 2019). 1980년대부터 해양 열파의 빈도는 약 두배 증가하였고 적어도 2006년 이후부터는 인간의 영향이 대부분을 차지했을 가능성이 높다(Cooley et al., 2022). 이러한 열파는 생물다양성 손실과 생태계 파괴, 해양 지역민의 식량 안보와 생계 위협을 포함하여 해양 생태계에 파괴적이고 장기간 지속되는 영향과 연관이 있다. 또한 해양 열파는 가뭄, 태풍과 같은 다른 극한 현상을 악화시킬 수 있고 순순 변동성에 영향을 줄 수도 있다(Rodrigues et al., 2019; Saranya et al. 2022; Mawren et al., 2022).

SDG 달성의 측면에서, 기후 과학은 해양 열파의 영향을 최소화하기 위해 이 현상의 특성과, 메커니즘, 미래 예측에 대한 이해를 강화하는데 중요한 역할을 할 수 있다. 예를 들어, 세계기후연구프로그램(WCRP)의 기후 및 해양 - 변동성, 예측성, 변화(CLIVAR)의 핵심 프로젝트에서는 전세계 해양의 해양 열파에 관한 연구 중점을 설정하였다(Marine Heatwaves in the Global Ocean). 이 이니셔티브의 목적은 감지, 지표 및 지표아래 특성, 메커니즘, 기후변화와의 연계성, 생물지구화학적 극한을 포함하여 전세계 해양 열파에 대한 이해를 강화하는 것이다. 과학이 계속해서 발전함에 따라 전세계 기후 예측과 계절 해수면 기온 예측으로 해양 열파를 지역과 계절, 엘니뇨와 같은 대규모 기후 인자의 상태에 따라 1~12개월 전에 예측할 수 있게 되었다(Jacox et al., 2022). 이러한 예측으로 적응 계획과 지속가능 발전을 위한 효과적인 정책 및 의사결정을 할 수 있다.

해양 생태계의 지속가능한 관리와 보호를 위한 전략

해양 공간 계획(MSP)은 생태계를 유지하는 동시에 다양한 용도를 위한 지역의 공간적, 시간적 분배를 통해 해양의 보전과 지속가능한 사용의 균형 잡힌 전략을 개발하는 방법을 제시한다. 최고수준의 과학적 정보, 자료, 지식에 기반한 방법은 특히 기후변화의 관점에서 MSP를 추가로 개발하고 실행하는데 중요하다. 기후 스마트 MSP는 해양 생태계의 회복력을 향상시키고 해안 커뮤니티의 기후변화에 대한 노출과 취약성을 줄이는 것을 목표로 해양 계획에 적응과 완화 조치를 통합하기 위해 기후 관련 해양 과학, 자료, 지식을 사용하는 것을 의미한다(IOC- UNESCO/European Commission, 2021). 예를 들어, 해양 지역의 미래 사용과 보전에 관한 시나리오를 개발하는데 기후변화 모델링을 통합하고 누적 영향을 분석하는 것은 MSP 과정에서 필요한 평가를 지원하는데



Photo: Muhammad Amdad Hossain

도움이 된다. 이러한 분석을 위해, 적절한 공간적 규모의 자료를 이용할 수 있고, 계획된 시나리오의 불확실성을 인지하고 충분히 설명하는 것이 중요하다(IOC-UNESCO, 2021).

전지구 차원에서 해양, 연안 서식지, 생태계 관리 및 보호의 필요성에 관한 인식이 점점 증가하고 있다. 지속가능한 해양과 해양생태계의 관리는 MSP 글로벌에 담겨 있으며, 이는 38개국에서 채택되었고 다른 여러 국가에서도 추가적으로 실행하고 있는 다분야 정책이다(IOC-UNESCO, 2022a).

향후 도전과제와 기회

기후변화에 따라 지속가능한 발전과 해양 보호의 필요성이 점점 시급해지고 있다. 기후 관련 해양 과학은 해양에 대한 기후의 영향을 더 잘 이해하고 해양 생태계의 지속가능한 관리와 보호를 위한 전략 수립에 있어 중요한 역할을 한다. 그러나 제한된 자료 접근과 교환, 특히 도서 개발도상국 및 최빈국과

같이 과학적 지원에 대한 요구를 충족하기에 역량이 부족한 전세계 많은 곳에서 인적, 기술적 역량이 불충분한 상황 등 많은 어려움이 남아 있다(IOC-UNESCO, 2020). 결과적으로, 남방 지역에서의 해양 관측과 연구에 상당한 격차가 있다. 또한 해양 관련 연구는 크게 부족한 실정이며, 이는 우리가 해양과 변화하는 기후가 해양에 어떠한 영향을 미치는지 이해하는데 어려움을 준다(IOC-UNESCO, 2022a). 또한 과학의 공동 설계를 촉진하고, 기존 지식 격차를 연결하며, SDG 14 달성을 위한 역량을 강화하기 위하여 학제간 과학 협력이 증가해야 하며, 해양 모델이 향상될 필요가 있다.

이러한 문제점을 해결하고자 UN 해양 십년이 시작되었고 해양 관련 과학을 가속화하도록 과학 커뮤니티가 동원되는 유례없는 기회가 제공되었다(IOC-UNESCO, 2022b). 다양한 이해관계자를 참여시키는 공통의 프레임워크를 통해 해양 십년은 모든 국가가 우리가 원하는 해양에 도달하기 위해 필요한 해양 과학을 개발하고 지원할 수 있다.



SDG 17 목표 달성을 위한 파트너십



주요 메시지

- 전세계 국가의 절반이 다중 위험 조기 경보 시스템(MHEWS)이 없다고 보고하고 있고, 존재하더라도 적용범위에 큰 격차가 있다고 보고함
- 날씨, 기후, 물 관련 과학은 재해에 대한 물리적 이해도를 강화하고, 관련 위험과 영향에 대한 이해도를 높이며, 재해 감지, 감시, 예측을 가능하게 함으로써 효과적인 MHEWS를 뒷받침함
- 날씨, 기후, 물 관련 과학 커뮤니티를 포함한 다양한 이해관계자들 간의 파트너십은 SDG 달성과 모두를 위한 조기 경보를 제공하는데 필수적임

서론

SDG 17은 목표 달성을 위한 협력을 강조하며, 이 중에는 SDG 달성을 지원하기 위해 과학, 기술, 혁신에 대한 국제 협력을 강화하는 것도 포함된다. 2030년까지 SDG 달성을 위해서는 날씨, 기후, 물 관련 과학 커뮤니티를 포함한 다양한 이해관계자와의 효과적인 파트너십이 중요하다. 파리 협정 및 재해 위험 감소를 위한 샌다이 프레임워크와 같은 기타 전세계 프레임워크의 목표 뿐만 아니라 SDG 목표 달성에 기여하고 있는 파트너십의 한 예로 UN 사무총장의 모두를 위한 조기 경보(Early Warnings for All, EW4All) 이니셔티브가 있다. 이 이니셔티브는 2027년 말까지 생명 보호 조기 경보 시스템을 통해 날씨, 기상, 물 관련 재해 상황으로부터 지구상의 모든 사람을 보호하는 것을 목표로 한다.

인간에 의한 기후변화로 인한 기상 현상이 더욱 심해짐에 따라, 다중 재해 조기 경보 시스템(MHEWS)의 필요성은 그 어느 때보다 중요해지고 있다. MHEWS의 발전으로 사망률이 감소하였고, 데이터에 따르면 임박한 재해 상황에 대하여 24시간 통지를 하는 것만으로도 피해를 30%나 줄일 수 있다고 한다(WMO Press release No. 22052023). 또한, MHEWS는

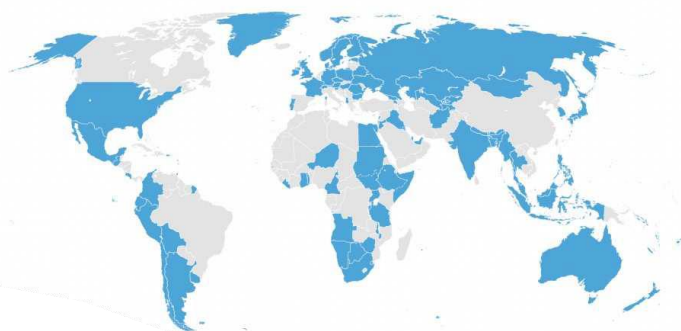
기후 변화 적응을 지원하고, 재난 위험 저감과 지속가능한 발전을 지원하며, 거의 모든 SDG에 대해 교차 이익을 제공한다(*Early Warnings for All Executive Action Plan 2023–2027*). 그러나, 특히 저소득 국가와 도서개발도상국처럼 극한 기상 현상과 기후변화의 영향이 가장 심각하게 발생하는 취약한 국가를 포함하여 전세계 절반의 국가가 MHEWS에 의해 보호받지 못하는 등 주요 격차가 존재한다(그림 1).

EW4All은 UN 회원국, 과학 커뮤니티, 민간 분야, 금융 기관, 정부, 학계, 그 외 다른 이해관계자를 통틀어 전세계적 협력과 파트너십이 필요한 SDG 17을 달성하기 위한 하나의 사례이다. 이 이니셔티브는 WMO와 UN 재해위험저감사무소(UNDRR)가 공동으로 주관하고, 국제통신협회(ITU)와 국제적십자(IFRC)가 협력한다. 다른 파트너들은 식량농업기구(FAO), 위험정보조기 행동파트너십(REAP), UN개발계획(UNDP), UN교육과학문화기구(UNESCO), 유엔환경계획(UNEP), 유엔인도주의업무조정사무소(UN OCHA), 세계식량계획(WFP) 등이 있다.

EW4All 지원을 위한 날씨, 기후, 물 관련 과학

MHEWS는 사람들에게 위험한 날씨나 기후 현상이 진행되고 있음을 알 수 있게 해주고 정부, 지역사회, 개인이 영향을 최소화하기 위해 어떤 행동을 할 수 있는지 알려주는 통합 시스템이다. End-to-end MHEWS는 사람을 중심으로 하며 Box 1에서 강조한 것처럼 4가지 주요 구성요소를 포함한다. EW4All 총괄 실행계획은 이 핵심 요소들을 중심으로 구성되어 재해로 위협받는 사람들이 충분한 시간과 적절한 방식으로 대응할 수 있도록 하는 포용적이고 사람 중심인 MHEWS를 제시한다(*Early Warnings for All Executive Action Plan 2023–2027*).

날씨, 기후, 물 관련 과학은 4개의 실행 요소를 모두 뒷받침한다. 예를 들어, 전세계 지표 및 우주 기반 관측 자료는 MHEWS의 기초이다. 이 정보는 재해 감지, 관측, 모니터링, 분석, 예측에 필수적이고, 신뢰할 수 있고 이해 가능하며 관련된 위험 정보를



- MHEWS를 가지고 있다고 보고
- MHEWS 보유를 보고하지 않거나, MHEWS 미보유

그림 1. 샌다이 프레임워크 모니터를 통해 조기 경보 시스템 커버리지를 보고한 국가. MHEWS 커버리지는 전세계적으로 증가하고 있으나, 2021년 95개국만 MHEWS를 적절히 보유하고 있다고 보고함(*Early Warnings for All Executive Action Plan 2023–2027*)

제공한다. 또한, 지구 시스템(기상, 수문, 해양, 빙권)의 물리적 상호작용을 복제하는 수치 기상 모델은 예측자료를 생성하기 위해 관측자료에 의존하고, 이는 국가기상수문서비스(NMHS)가 시민들에게 예측과 조기 경보를 제공할 수 있게 한다. 이러한 관측 자료는 조기 경보에 중요한 실시간예측(Box 2)이라고 알려진 최대 6시간의 시간 규모에 대해 고영향 날씨와 물 재해를 예측하는 데에도 중요하다(*Early Warnings for All Executive Action Plan 2023-2027*).

Box 1. EW4All의 4가지 구성요소

EW4All 이니셔티브는 아래에 설명된 4가지 구성요소로 이루어져 있고, UN 기관과 협력 기관이 각 요소를 주도한다.



재난 위기 지식 및 관리(UNDRR 주도, WMO 지원): 모든 국가가 믿을 수 있고, 이해할 수 있고, 관련된 위험 정보, 과학, 전문성에 접근하도록 보장



감지, 관측, 모니터링, 분석, 예측(WMO 주도, UNDP, UNESCO, UNEP 지원): 모든 국가가 강력한 예측, 관측 및 모니터링 시스템(소프트 인프라 및 물리적 인프라), 재해 모니터링과 조기 경보의 극대화 및 지속가능성 지원을 가능하게 하는 정책을 보유하도록 보장



경보 배포 및 커뮤니케이션(ITU 주도, IFRC, UNDP, REAP, WMO 지원): 조기 경보가 모든 사람, 특히 가장 위험에 처한 사람들에게 효과적이고 시기 적절하게 배포될 수 있도록 하는 사람 중심 방법 사용



준비 및 대응 역량(IFRC 주도, REAP, OCHA, FAO, WFP 지원): 지역 정부, 커뮤니티, 위험에 처한 개인이 경보를 받은 후 다가오는 재해를 준비하고 대응할 수 있는 선제적 행동을 취할 수 있도록 하는 지식과 방법을 보유하도록 보장

기상 예측 기술이 향상됨에 따라, NMHS가 시민들에게 조기 경보를 제공하는 방법이 “날씨가 어떻게 될까”에서 “날씨가 무엇을 하게 될까”에 대한 정보를 제공하는 방향으로 패러다임이 전환되고 있다. 영향 기반 예측이라고 알려진 이 방법으로 전통적인 수문기상 재해의 물리적 예측과 이러한 재해의 사회적 노출 및 취약성에 대한 이해를 통합하여 정책 결정자에게 정보를 제공하고 사회에 미치는 영향을 줄이는 조치를 취하여 지속가능 발전을 가능하게 한다(Golding, 2022). 물리 및 사회 과학과 지역 및 토착 지식 등 다양한 지식의 출처를 통합하여 영향 기반 조기 경보가 실행가능하고 시기 적절하며 효과적일 수 있도록 하는데 파트너십과 협업, 공동 설계가 필수적이다.

기후 모델링의 발전은 또한 기후 변동성과 변화로 인한 지구 시스템의 변화와 이 변화들이 재해에 어떤 영향을 미칠지에 대한 우리의 이해도를 높이고 있다. 프로세스 기반 감지와 원인 규명을 통해 관찰된 변화의 정량적인 설명은 기후 평가와 예측에 대한 신뢰를 강화한다. 또한, 기후 모델은 수년에서 십년 시간 규모의 기후 예측을 가능하게 하여 재해와 MHEWS가 미래에 진화할 수 있는 방법에 대한 우리의 지식을 강화한다. 최근 몇 년간 모델에 유례없는 발전이 있었음에도 불구하고, 여전히 우리의 관측과 모델링 역량, 특히 연간에서 십년 시간 규모에 대한 부분을 개선시킬 수 있는 연구가 많이 남아있다. 세계기후연구프로그램(WCRP)의 지구시스템 변화 설명 및 예측에 관한 등대 활동(Lighthouse Activity) 프로젝트는 EW4All을 지원하기 위해 지수 시스템에 대한 우리의 이해를 강화하는 연구의 일례이다. 이 활동은 잠재적 고영향 변화와 현상을 포함하여 지구 시스템의 수년에서 십년까지 변화를 이해, 원인 규명, 예측할 수 있는 능력을 발전시키고 있다(Findell et al., 2023).

자연 재해 모델링의 기술적 발전으로 극한 기상 현상에 대응하기 위한 더 나은 도구들도 개발되었다(Kuglitsch et al., 2022a, 2022b). 예를 들어, AI는 지리공간 자료를 사용하여 재해에 대한 우리의 이해를 높이고, 감지와 경고의 정확도와 적시성을 향상시키며, 효과적인 긴급대응 커뮤니케이션을 지원함으로써 MHEWS를 강화할 수 있다(Kuglitsch, et al., 2022b). 그러나 신기술을 MHEWS와 재난 관리에 효과적으로 통합하는 데는 아직 더 많은 연구가 필요하다. 자연재해 관리를 지원하기 위하여 AI 활용의 표준을 마련하는 데에는 다학제, 다이해관계자, 국제적인 과학 협력과 파트너십이 중요하며, 이것의 예로서 WMO, ITU, UNEP이 공동으로 참여하는 ‘자연재해 관리를 위한 인공지능’ 포커스 그룹이 있다(Kuglitsch et al., 2022b).

Box 2. 위성 기반 실시간예측 과학을 사용한 남아프리카 전역의 도시에서 발생하는 뇌우 위험 감소

심각한 뇌우는 특히 남아프리카 도시 지역에서 생명을 위협하고 재산과 생계에 심각한 피해를 입힌다.

실시간예측 기술의 발전으로 기상 예보관들은 뇌우가 형성될 때 이를 관찰하고 뇌우가 얼마나 심할지 평가할 수 있다. 따라서 예보관들은 조기 경보를 제공하여 대중이 영향을 최소화 할 수 있는 조기 조치를 취할 수 있다.

남아프리카의 날씨와 기후 정보 서비스(WISER) 조기 경보(EWSA) 프로젝트는 새로운 기상 정보 서비스와 조기 경보의 공동 생산을 통해 재난 위험을 줄이는 것을 목표로 한다. 이는 파트너십과 참여를 통해 이루어지며, 과학 기술이 지역 도시 공동체, 특히 여성 및 장애인을 포함한 취약 계층에게 유용하고 실행가능한 정보로 변환될 수 있도록 보장하는데 중요한 과정이다. WISER EWSA 프로젝트는 강력한 파트너십을 구축하여 기상학자, 경제학자, 사회과학자, 사용자 참여 전문가로 구성된 다학제 팀을 모아 재해 위험 관리 기관 및 지역 비정부 기관과 협력함으로써 지역 전체의 조기 경보를 개선할 것이다(Symonds, 2023).

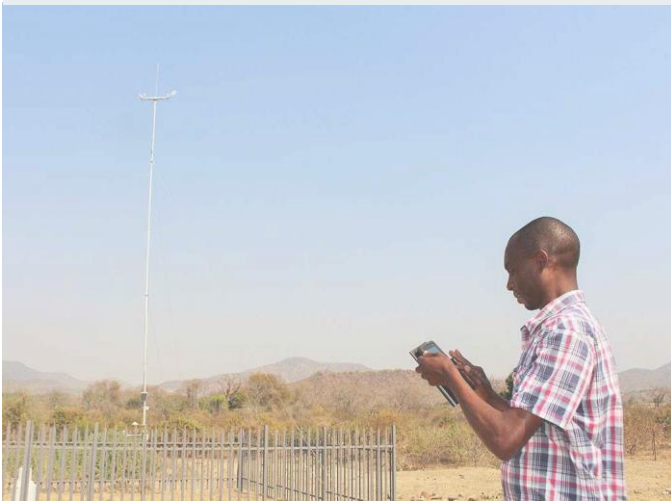


Photo: UNDP Zambia

향후 도전과제 및 기회

날씨, 기후, 물 관련 과학의 발전에도 불구하고, 극한 수문기상학적 현상 예측을 개선하고 정확하고 효과적인 조기 경보 제공을 확대하기 위해서는 여전히 해결해야 할 과학 기술적 과제들이 있다. 특히 수문 자료와 같은 전세계 지표 기반 자료의 격차는 날씨와 기후, 물 서비스와 조기 경보의 품질에 큰 영향을 미친다(*Early Warnings for All Executive Action Plan 2023-2027*). 기후 모델링의 한계, 특히 연간에서 십년 단위의 시간 규모에서는 재해가 기후 변화의 관점에서 어떻게 변하는지, 효과적인 MHEWS를 설계하는 방법은 무엇인지에 대한 어려움이 있다. 또한 물리와 사회과학 사이의 격차는 극한 현상 예측을 개선하고 영향 기반, 사람 중심 조기 경보로 확대하는데 장애물이 된다.

나아가, 재해를 감지, 감시, 예측하는 역량을 강화하는 것이 중요하다. 이는 관측 격차를 줄이고, 제한 없는 자료 교환을 촉진하고, 인적 역량과 경쟁력을 강화하고, 레이더, 실시간예측, 고해상도 모델링, AI를 포함한 첨단 기술과 위성 관측에 대한 접근을 보장함으로써 가능하다. 최신 과학과 기술의 발전이 현업단계에 적용되고 궁극적으로 의사 결정자에게 정보를 제공하도록 보장하기 위해 연구에서 현업까지(R2O) 프로세스를 강화하는 것이 아주 중요하다. 사용자의 인풋과 피드백도 과학 정보의 효율성을 강화하며, 영향 기반 조기 경보의 공동 개발을 통해 지역과 토착 지식을 통합하는데 더 큰 노력이 필요하다. 마지막으로, 효과적으로 의사 결정을 지원하고 궁극적으로 조기 행동을 장려하여 사회와 지속가능 발전에 미치는 영향을 최소화함에 있어 과학과 조기 경보의 의사소통 방법을 더 잘 이해하기 위해 물리 및 사회 과학 연구 커뮤니티와 기타 이해관계자 간의 파트너십이 강화되어야 한다(*Early Warnings for All Executive Action Plan 2023-2027*).

조기 경보 시스템은 모든 MHEWS 구성요소들이 모두 협력하여 전문분야 간의 격차를 해소할 경우에만 생명을 구하고 생계를 보호할 수 있다. EW4All은 SDG 17의 중요성과 UN 시스템, 국제 기구, 시민 사회, 과학자, 민간 분야, 금융 기관, 지역 커뮤니티, 정부, 학계, 기타 이해관계자들 간의 효과적인 파트너십을 강조한다. 이 모든 것으로 EW4All과 SDG를 달성할 수 있다.

부록

데이터 세트

전지구 온도 데이터 세트

Berkeley Earth: Rohde, R. A.; Hausfather, Z. The Berkeley Earth Land/Ocean Temperature Record. *Earth System Science Data* 2020, 12, 3469-3479. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3469-2020>.

ERA5: Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P. et al. ERA5 Monthly Averaged Data on Single Levels from 1940 to Present; Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023. <https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>.

GISTEMP: GISTEMP Team, 2022: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4. NASA Goddard Institute for Space Studies, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>. Lenssen, N.; Schmidt, G.; Hansen, J. et al. Improvements in the GISTEMP Uncertainty Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 2019, 124, 6307-6326. <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>.

HadCRUT5: Morice, C. P.; Kennedy, J. J.; Rayner, N. A. et al. An Updated Assessment of Near-surface Temperature Change From 1850: The HadCRUT5 Data Set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 2021, 126, e2019JD032361. <https://doi.org/10.1029/2019JD032361>. HadCRUT.5.0.1.0 data were obtained from <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/> hadcrut5 on 1 March 2023 and are © British Crown Copyright, Met Office 2023, provided under an Open Government Licence, <http://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/version/3/>.

JRA-55: Kobayashi, S.; Ota, Y.; Harada, Y. et al. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II 2015, 93, 5-48. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>.

NOAGlobalTemp v5.1: Vose, R. S.; Huang, B.; Yin, X. et al. Implementing Full Spatial Coverage in NOAA's Global Temperature Analysis. *Geophysical Research Letters* 2021, 48, e2020GL090873. <https://doi.org/10.1029/2020GL090873>.

해양 열용량 데이터 세트

Cheng, L.; Trenberth, K. E.; Fasullo, J. et al. Improved Estimates of Ocean Heat Content from 1960 to 2015. *Science Advances* 2017, 3, e1601545. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601545>.

Church, J. A.; White, N. J.; Konikow, L. F. et al. Revisiting the Earth's Sea-level and Energy Budgets from 1961 to 2008. *Geophysical Research Letters* 2011, 38. <https://doi.org/10.1029/2011GL048794>.

Desbruyères, D. G.; Purkey, S. G.; McDonagh, E. L. et al. Deep and Abyssal Ocean Warming from 35 Years of Repeat Hydrography. *Geophysical Research Letters* 2016, 43, 310-356. <https://doi.org/10.1002/2016GL070413>.

Desbruyères, D.; McDonagh, E. L.; King, B. A. et al. Global and Full-Depth Ocean Temperature Trends during the Early Twenty-First Century from Argo and Repeat Hydrography. *Journal of Climate* 2017, 30, 1985-1997. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0396.1>.

Domingues, C. M.; Church, J. A.; White, N. J. et al. Improved Estimates of Upper-ocean Warming and Multi-decadal Sea-level Rise. *Nature* 2008, 453, 1090-1093. <https://doi.org/10.1038/nature07080>.

Gaillard, F.; Reynaud, T.; Thierry, V. et al. In Situ-based Reanalysis of the Global Ocean Temperature and Salinity with ISAS: Variability of the Heat Content and Steric Height. *Journal of Climate* 2016, 29, 1305-1323. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0028.1>.

Good, S. A.; Martin, M. J.; Rayner, N. A. EN4: Quality Controlled Ocean Temperature and Salinity Profiles and Monthly Objective Analyses with Uncertainty Estimates. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 2013, 118, 6704-6716. <https://doi.org/10.1002/2013JC009067>.

Hosoda, S.; Ohira, T.; Nakamura, T. A Monthly Mean Dataset of Global Oceanic Temperature and Salinity Derived from Argo Float Observations. *JAMSTEC Report of Research and Development* 2008, 8, 47-59. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamstecr/8/0/8_47/_article.

Ishii, M.; Fukuda, Y.; Hirahara, S. et al. Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation Expected from Present Observational Data Sets. *SOLA* 2017, 13, 163-167. <https://doi.org/10.2151/sola.2017-030>.

Kuusela, M.; Stein, M. L. Locally Stationary Spatio-temporal Interpolation of Argo Profiling Float Data. *Proceedings of the Royal Society A* 2018, 474, 20180400. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2018.0400>.

Kuusela, M.; Giglio, D. Global Ocean Heat Content Anomalies based on Argo Data (2.0.0). *Zenodo* 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7562281>.

Levitus, S.; Antonov, J. I.; Boyer, T. P. et al. World Ocean Heat Content and Thermoclinic Sea Level Change (0-2 000 m) 1955-2010. *Geophysical Research Letters* 2012, 39, L10603. <https://doi.org/10.1029/2012GL051106>.

Li, H.; Xu, F.; Zhou, W. et al. Development of a Global Gridded Argo Data Set with Barnes Successive Corrections. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 2017, 122, 866-889. <https://doi.org/10.1002/2016JC012285>.

Li, Y.; Church, J. A.; McDougall, T. J. et al. Sensitivity of Observationally Based Estimates of Ocean Heat Content and Thermal Expansion to Vertical Interpolation Schemes. *Geophysical Research Letters* 2022, 49, e2022G. <https://doi.org/10.1029/2022GL101079>.

Lyman, J. M.; Johnson, G. C. Estimating Global Ocean Heat Content Changes in the Upper 1800 m since 1950 and the Influence of Climatology Choice. *Journal of Climate* 2014, 27, 1945-1957. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00752.1>.

Roemmich, D.; Gilson, J. The 2004-2008 Mean and Annual Cycle of Temperature, Salinity, and Steric Height in the Global Ocean from the Argo Program. *Progress in Oceanography* 2009, 82, 81-100. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.03.004>.

부록

데이터 세트

Roemmich, D.; Church, J.; Gilson, J. et al. Unabated Planetary Warming and its Ocean Structure Since 2006. *Nature Climate Change* 2015, 5, 240. <https://doi.org/10.1038/nclimate2513>.

von Schuckmann, K.; Le Traon, P.-Y. How Well Can We Derive Global Ocean Indicators from Argo Data? *Ocean Science* 2011, 7, 783-791. <https://doi.org/10.5194/os-7-783-2011>. Data available at: <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators>.

Wijffels, S.; Roemmich, D.; Monselesan, D., et al. Ocean Temperatures Chronicle the Ongoing Warming of Earth. *Nature Climate Change* 2016, 6, 116-118. <https://doi.org/10.1038/nclimate2924>.

Sea ice data sets

EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, Sea-ice Index 1979-Onwards (v2.1, 2020), OSI-420, Data Extracted from OSI SAF FTP Server: 1979-2020, Northern and Southern Hemisphere.

Fetterer, F.; Knowles, K.; Meier, W. N. et al., 2017, updated daily. Sea Ice Index, Version 3. Boulder, Colorado, USA. National Snow and Ice Data Center (NSIDC), <https://nsidc.org/data/G02135/versions/3>.

Lavergne, T. Sørensen, A. M.; Kern, S. et al. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI Sea Ice Concentration Climate Data Records. *The Cryosphere* 2019, 13 (1), 49-78. <https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019>.

참고문헌

총괄 요약

- Azcona, G.; Bhatt A.; Brauchle, J. et al. *From Commodity to Common Good: A Feminist Agenda to Tackle the World's Water Crisis*; UN Women: New York, USA, 2023. <https://www.unwomen.org/en/digital-library/publications/2023/07/from-commodity-to-common-good-a-feminist-agenda-to-tackle-the-worlds-water-crisis>.
- Griggs, D.; Stafford-Smith, M.; Warrilow, D. et al. Use of Weather and Climate Information Essential for SDG Implementation. *Nat Rev Earth Environ* 2021, 2 (1), 2-4. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00126-8>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf.
- International Committee of the Red Cross (ICRC). *When Rain Turns to Dust: Understanding and Responding to the Combined Impact of Armed Conflicts and the Climate and Environment Crisis on People's Lives*; ICRC: 2020. https://www.icrc.org/sites/default/files/topic/file_plus_list/rain_turns_to_dust_climate_change_conflict.pdf.
- International Labour Organization (ILO). *The Importance of Early Warning Systems in Disaster Risk Reduction*; ILO: Geneva, 2022. https://www.ilo.org/global/topics/employment-promotion/recovery-and-reconstruction/WCMS_858123/lang--en/index.htm.
- Islam, S.N.; Winkel, J. *Climate Change and Social Inequality*; United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2019. https://www.un.org/esa/desa/papers/2017/wp152_2017.pdf.
- Kull, D.; Riishojgaard, L. P.; Eyre, J. et al. *The Value of Surface-based Meteorological Observation Data*; World Bank, Washington, DC, 2021. <http://hdl.handle.net/10986/35178>.
- World Economic Forum. *The Global Risks Report 2023*, 18th Edition; WEF: Geneva, 2023. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2023.pdf.
- World Meteorological Organization (WMO). *Gendered Impacts of Weather and Climate: Evidence from Asia, Pacific and Africa*; WMO: Geneva, 2019.

과학 현황

- Barnes, C.; Boulanger, Y.; Keeping, T. et al. *Climate Change More than Doubled the Likelihood of Extreme Fire Weather Conditions in Eastern Canada*. World Weather Attribution, 2023. <https://www.worldweatherattribution.org/climate-change-more-than-doubled-the-likelihood-of-extreme-fire-weather-conditions-in-eastern-canada/>.
- Carbon Monitor. *Carbon Monitor*. <https://carbonmonitor.org/>.
- Forster, P. M.; Smith, C. J.; Walsh, T. et al. Indicators of Global Climate Change 2022: Annual Update of Large-scale Indicators of the State of the Climate System and Human Influence. *Earth System Science Data* 2023, 15 (6), 2295-2327. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>.
- Friedlingstein, P.; O'Sullivan, M.; Jones, M. W. et al. Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data* 2022, 14 (11), 4811-4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom, 2021. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). *NASA Tracks Freddy, Longest-lived Tropical Cyclone on Record*. <https://svs.gsfc.nasa.gov/14312>.
- Riser, S. C.; Freeland, H. J.; Roemmich, D. et al. Fifteen Years of Ocean Observations with the Global Argo Array. *Nature Clim Change* 2016, 6 (2), 145-153. <https://doi.org/10.1038/nclimate2872>.
- Roemmich, D.; Alford, M. H.; Claustre, H. et al. On the Future of Argo: A Global, Full-Depth, Multi-Disciplinary Array. *Frontiers in Marine Science* 2019, 6. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2019.00439>.
- Trewin, B.; Cazenave, A.; Howell, S. et al. Headline Indicators for Global Climate Monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2021, 102 (1), E20-E37. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0196.1>.
- Trewin, B. Assessing Internal Variability of Global Mean Surface Temperature from Observational Data and Implications for Reaching Key Thresholds. *JGR: Atmospheres* 2022, 127. <https://doi.org/10.1029/2022JD036747>.
- United Nations Environment Programme (UNEP). *Emissions Gap Report 2022: The Closing Window - Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies*; UNEP: Nairobi, 2022. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>.

참고문헌

- World Glacier Monitoring Service (WGMS). *Global Glacier Change Bulletin - No. 4 (2018-2019)*; Zemp, M.; Nussbaumer, S. U.; Gärtner-Roer, I. et al., Eds. (based on database version: doi:10.5904/wgms-fog-2022-09); WGMS: Zurich, Switzerland, 2021. https://wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_04.pdf.
- World Meteorological Organization (WMO). *WMO Greenhouse Gas Bulletin, No. 18: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2021*; WMO: Geneva, 2022.
- World Meteorological Organization (WMO). *Preliminary Data Shows Hottest Week on Record - Unprecedented Sea Surface Temperatures and Antarctic Sea Ice Loss*. <https://public.wmo.int/en/media/news/preliminary-data-shows-hottest-week-record-unprecedented-sea-surface-temperatures-and>.
- World Meteorological Organization (WMO). *Economic Costs of Weather-related Disasters Soars but Early Warnings Save Lives* [Press release No. 22052023]. 22 May 2023.
- World Meteorological Organization (WMO). *Typhoons Trigger Destruction and Record-breaking Rainfall in China*. <https://public.wmo.int/en/media/news/typhoons-trigger-destruction-and-record-breaking-rainfall-china>
- World Meteorological Organization (WMO). *Global Annual to Decadal Climate Update - Target Years: 2023 and 2023-2027*; WMO: Geneva, 2023.
- Zachariah, M; Philip, S; Pinto, I. et al. *Extreme Heat in North America, Europe and China in July 2023 Made Much More Likely by Climate Change*; Imperial College London: London, 2023. <https://doi.org/10.25561/105549>.
- SDG 2 – 기아 종식
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Climate Change and Food Security: Risks and Responses*; FAO: Rome, 2015. <https://www.fao.org/3/i5188e/i5188e.pdf>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Bringing Climate Change Adaptation into Farmer Field Schools*; FAO: Rome, 2021a. <https://www.fao.org/3/cb6410en/cb6410en.pdf>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Global Outlook on Climate Services in Agriculture - Investment Opportunities to Reach the Last Mile*; FAO: Rome, 2021b. <https://www.fao.org/3/cb6941en/cb6941en.pdf>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *The Impact of Disasters and Crises on Agriculture and Food Security: 2021*; FAO: Rome, 2021c. <https://doi.org/10.4060/cb3673en>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Tracking Progress on Food and Agriculture-related SDG Indicators 2022*; FAO: Rome, 2022a. <https://doi.org/10.4060/cc1403en>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation*; FAO: Rome, 2022b. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Managing Risks to Build Climate-smart and Resilient Agrifood Value Chains - The Role of Climate Services*; FAO: Rome, 2022c. <https://doi.org/10.4060/cb8297en>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); International Fund for Agricultural Development (IFAD); United Nations Children's Fund (UNICEF), et al. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2022 - Repurposing Food and Agricultural Policies to Make Healthy Diets More Affordable*. FAO: Rome, 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0639en>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Longer Report. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.
- Kim, K.-H.; Hewitt, C. D.; Kanamaru, H. et al. Prospects for Enhancing Climate Services in Agriculture. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2023, 104, E352-E358. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0123.1>.
- World Meteorological Organization (WMO). *Agriculture and Food Security Exemplar to the User Interface Platform of the Global Framework for Climate Services*; WMO: Geneva, 2014.
- World Meteorological Organization (WMO). *Early Warnings for All Executive Action Plan 2023-2027*; WMO: Geneva, 2022.
- World Meteorological Organization (WMO). *Guidelines for the Assessment of Competencies for Provision of Climate Services* (WMO-No. 1285). Geneva, 2022.

SDG 3 – 건강과 웰빙

- Ballester, J.; Quijal-Zamorano, M.; Méndez Turrubiates, R. F. et al. Heat-Related Mortality in Europe during the Summer of 2022. *Nat Med* 2023, 29 (7), 1857-1866. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>.
- Cissé, G.; McLeman, R.; Adams, H. et al. Health, Wellbeing, and the Changing Structure of Communities. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Pörtner, H.-O.; Roberts, D.C.; Tignor, M. et al., Eds.; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Chapter07.pdf.

Health Care Without Harm. *Global Road Map for Health Care Decarbonization: A Navigational Tool for Achieving Zero Emissions with Climate Resilience and Health Equity*; Health Care Without Harm, 2023. <https://healthcareclimateaction.org/roadmap>.

Romanello, M.; Di Napoli, C.; Drummond, P. et al. The 2022 Report of the Lancet Countdown on Health and Climate Change: Health at the Mercy of Fossil Fuels. *Lancet* 2022, 400 (10363), 1619-1654. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)01540-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01540-9).

Salas, R. N.; Jha, A. K. Climate Change Threatens the Achievement of Effective Universal Healthcare. *BMJ* 2019, 366, l5302. <https://doi.org/10.1136/bmj.l5302>.

Shumake-Guillemot, J.; Fernandez-Montoya, L., Eds. *Climate Services for Health: Improving Public Health Decision-making in a New Climate*; World Health Organization and World Meteorological Organization: Geneva, 2019.

World Health Organization (WHO). *Air Pollution*. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_2

World Health Organization (WHO). *Technical Brief: Environment, Climate Change and Health in Relation to Universal Health Coverage*; WHO, 2022. <https://www.who.int/publications/m/item/environment--climate-change-and-health-in-relation-to-universal-health-coverage>.

World Health Organization (WHO). *Climate Change and Health: Vulnerability and Adaptation Assessment*; WHO: Geneva, 2021. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240036383>.

WHO-WMO Joint Office for Climate and Health. *Final Report: From the G7 Health Communiqué to Action: Health and Climate - Heat Preparedness through Early Warning Systems*; Global Heat Health Information Network, 2022. <https://ghhin.org/resources/final-report-from-the-g7-health-communique-to-action-health-and-climate-heat-preparedness-through-early-warning-systems/>.

SDG 6 – 깨끗한 물과 위생

Azcona, G.; Bhatt A.; Brauchle, J. et al. *From Commodity to Common Good: A Feminist Agenda to Tackle the World's Water Crisis*; UN Women: New York, USA, 2023. <https://www.unwomen.org/en/digital-library/publications/2023/07/from-commodity-to-common-good-a-feminist-agenda-to-tackle-the-worlds-water-crisis>.

Caretta, M. A.; Mukherji, A.; Arfanuzzaman, M. et al. Water. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Pörtner, H.-O.; Roberts, D.C.; Tignor, M. et al., Eds.; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Chapter04.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Pörtner, H.-O.; Roberts, D.C.; Tignor, M. et al., Eds.; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf.

Naumann, G.; Podestà, G.; Marengo, J. et al. *The 2019-2021 Extreme Drought Episode in La Plata Basin*; EUR 30833 EN; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2021. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC126508>.

Naumann, G.; Podestà, G.; Marengo, J., et al. *Extreme and Long-term Drought in the La Plata Basin: Event Evolution and Impact Assessment until September 2022*; EUR 31381 EN; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2023. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC132245>.

United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). *Ensuring Safe Water and Sanitation for All: A Solution through Science, Technology and Innovation*; United Nations: Geneva, 2023. https://unctad.org/system/files/official-document/dtltkd2022d1_en.pdf.

UN-Water. *Blueprint for Acceleration: SDG 6 Synthesis Report on Water and Sanitation 2023*; United Nations: New York, USA, 2023. <https://www.unwater.org/publications/sdg-6-synthesis-report-2023>.

Van Dijk, A. I. J. M.; Beck, H. E.; de Jeu, R. A. M. et al. *Global Water Monitor: 2022 Summary Report*; Global Water Monitor, 2022. <https://www.globalwater.online/globalwater/2022report.html>.

World Bank. *The World Bank in Paraguay*. <https://www.worldbank.org/en/country/paraguay/overview>.

World Meteorological Organization (WMO). *2021 State of Climate Services: Water* (WMO-No. 1278). Geneva, 2021.

World Meteorological Organization (WMO). *State of Global Water Resources 2022*; Geneva, in press.

SDG 7 – 적정 가격의 깨끗한 에너지

Bloomfield, H. C.; Brayshaw, D. J.; Shaffrey, L. C. et al. Quantifying the Increasing Sensitivity of Power Systems to Climate Variability. *Environ Res Lett* 2016, 11 (12), 124025. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124025>.

The Crown Estate. *Offshore Wind Leasing Round 4: Delivering a Low Carbon Future*. <https://www.thecrownestate.co.uk/media/3921/guide-to-offshore-wind-leasing-round-4.pdf>.

The Crown Estate. *Round 4 Project Map*. <https://www.thecrownestate.co.uk/media/3721/the-crown-estate-offshore-wind-leasing-round-4-selected-projects.pdf>.

참고문헌

- European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). *Ten-year Network Development Plan 2010-2020*; ENTSO-E, 2010. <https://consultations.entsoe.eu/system-development/tyndp2020/>.
- European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). *ENTSO-E Position on Offshore Development*; ENTSO-E, 2020. <https://www.entsoe.eu/outlooks/offshore-development/>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *IRENA and FAO's Collaboration Drives Better Decision-making for Sustainable Bioenergy Development*. <https://www.irena.org/News/articles/2023/Mar/IRENA-and-FAOs-Collaboration-Drives-Better-Decision-making-for-Sustainable-Bioenergy-Development>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Potential Assessment: Global Atlas*. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Project-Facilitation/Renewable-potential-assessment/Global-Atlas>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Potential Assessment: Bioenergy Simulator*. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Project-Facilitation/Renewable-potential-assessment/Bioenergy-Simulator>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Potential Assessment: SolarCity Simulator*. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Project-Facilitation/Renewable-potential-assessment/SolarCity-Simulator>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Potential Assessment: Technical Assessment Services*. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Project-Facilitation/Renewable-potential-assessment/Technical-Assessment-Services>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *Innovation Landscape Brief: Artificial Intelligence and Big Data*; IRENA: Abu Dhabi, 2019. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_AI_Big_Data_2019.pdf.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *Innovation Landscape Brief: Advanced Forecasting of Variable Renewable Power Generation*; IRENA: Abu Dhabi, 2020. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Advanced_weather_forecasting_2020.pdf.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom, 2021. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Longer Report. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023a. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policy Makers. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023b. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf.
- Reguero, B. G.; Losada, I. J.; Méndez, F. J. A Recent Increase in Global Wave Power as a Consequence of Oceanic Warming. *Nat Commun* 2019, 10 (1), 205. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08066-0>.
- Sustainable Energy for All (SEforALL). *Universal Integrated Energy Planning*. <https://sdg7energyplanning.org/>.
- Sustainable Energy for All (SEforALL). *Chilling Prospects: Tracking Sustainable Cooling for All 2020*; SEforALL, 2020a. <https://www.seforall.org/system/files/2020-07/CP-2020-SEforALL.pdf>.
- Sustainable Energy for All (SEforALL). *Data Standards for Integrated Energy Planning*; SEforALL, 2020b. <https://www.seforall.org/system/files/2021-02/IEP-data-standards.pdf>.
- Sustainable Energy for All (SEforALL). *Chilling Prospects: Tracking Sustainable Cooling for All 2021*; SEforALL, 2021. <https://www.seforall.org/system/files/2021-05/Chilling-Prospects-21-SEforALL.pdf>.
- United Nations (UN). *Ensure Access to Affordable, Reliable, Sustainable and Modern Energy*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy>.
- World Meteorological Organization (WMO). *State of Climate Services Report*. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/state-of-climate-services-report>.
- World Meteorological Organization (WMO). *World Weather & Climate Extremes Archive*. <https://wmo.asu.edu/>.
- World Meteorological Organization (WMO). *Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition* (WMO-No. 1312). Geneva, 2023.

SDG 11 – 지속가능한 도시와 지역사회

He, X.; Shen, S.; Miao, S. et al. Quantitative Detection of Urban Climate Resources and the Establishment of an Urban Climate Map (UCMap) System in Beijing. *Building and Environment* 2015, 92, 668-678. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.044>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Longer Report. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023a. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policy Makers. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023b. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf.

Liu, Y.; Fang, X.; Cheng, C. et al. Research and Application of City Ventilation Assessments Based on Satellite Data and GIS Technology: A Case Study of the Yanqi Lake Eco-City in Huairou District, Beijing. *Meteorological Applications* 2016, 23 (2), 320-327. <https://doi.org/10.1002/met.1557>.

Ng, E. *Designing High-density Cities for Social and Environmental Sustainability*; Earthscan: London, 2009a.

Ng, E. Policies and Technical Guidelines for Urban Planning of High-Density Cities - Air Ventilation Assessment (AVA) of Hong Kong. *Building and Environment* 2009, 44 (7), 1478-1488. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.013>.

Ng, E.; Ren, C., Eds. *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning*; Routledge: London, 2015. <https://doi.org/10.4324/9781315717616>.

Ren, C.; Ng, E. Y.; Katzschner, L. *Urban Climatic Map Studies: A Review*. *International Journal of Climatology* 2010, 31 (15), 2213-2233. <https://doi.org/10.1002/joc.2237>.

Ren, C.; Yang, R.; Cheng, C. et al. Creating Breathing Cities by Adopting Urban Ventilation Assessment and Wind Corridor Plan - The Implementation in Chinese Cities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2018, 182, 170-188. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.09.023>.

United Nations Human Settlement Programme (UN-Habitat). *World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities*; UN-Habitat: Nairobi, 2022. https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf.

United Nations Statistics Division (UNSD). *Make Cities and Human Settlements Inclusive, Safe, Resilient and Sustainable*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/goal-11/>.

World Meteorological Organization (WMO). *Good Practices on High-resolution Modeling for Integrated Urban Services*. https://wmoomm.sharepoint.com/sites/wmocpdb/eve_activityarea/Forms/AllItems.aspx?id=%2Fsites%2Fwmoocpdb%2Feve%5Factivityarea%2FUrban%5F1b987500%2D0f38%2D11%2Da813%2D000d3a25bdee%2FPublications%2FGuidance%20launch%2FGood%20practices%20on%20high%2Dresolution%20modeling%20for%20Integrated%20Urban%20Services%2Epdf&parent=%2Fsites%2Fwmoocpdb%2Feve%5Factivityarea%2FUrban%5F1b987500%2D0f38%2D11%2Da813%2D000d3a25bdee%2FPublications%2FGuidance%20launch&p=true&ga=1.

World Meteorological Organization (WMO). *Pilot Project on Public-Private Engagement for Smart Meteorological Service in Mega-Cities in Regional Association II*. <https://public.wmo.int/en/pilot-project-public-private-engagement-smart-meteorological-service-mega-cities-regional>.

World Meteorological Organization (WMO). *WMO Guidelines on Multi-hazard Impact-based Forecast and Warning Services* (WMO-No. 1150). Geneva, 2015.

World Meteorological Organization (WMO). *Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services, Volume I: Concept and Methodology* (WMO-No. 1234). Geneva, 2019.

World Meteorological Organization (WMO). *Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environment Services, Volume II: Demonstration Cities* (WMO-No. 1234). Geneva, 2021.

SDG 13 – 기후 행동

Green Climate Fund (GCF). Funding Proposal FP171: *Enhancing Early Warning Systems to Build Greater Resilience to Hydro-meteorological Hazards in Timor-Leste*; GCF: 2021. <https://www.greenclimate.fund/sites/default/files/document/funding-proposal-fp171.pdf>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Longer Report. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023a. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policy Makers. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023b. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf.

참고문헌

- United Nations Environment Programme (UNEP). *Emissions Gap Report 2022: The Closing Window - Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies*. UNEP: Nairobi, 2022. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>.
- World Meteorological Organization (WMO). *Climate Science Information for Climate Action*. <https://public.wmo.int/en/media/news/climate-science-information-climate-action>.
- World Meteorological Organization (WMO). *WMO Global Greenhouse Gas Watch* [brochure]; WMO: Geneva, 2023. <https://filecloud.wmo.int/share/s/ZBHvamUTSb2VdJRaMwNBtQ>.
- World Meteorological Organization (WMO)/Green Climate Fund (GCF). *Developing the Climate Science Information for Climate Action* (WMO-No. 1287). Geneva, 2022.
- World Weather Research Programme (WWRP). *Let's Talk Weather in Ghana*. <http://hiweather.net/article/132/162.html>.
- SDG 14 – 수생태계 보전
- Climate and Ocean - Variability, Predictability, and Change (CLIVAR). *Marine Heatwaves in the Global Ocean*. <https://www.clivar.org/research-foci/marine-heatwaves>.
- Coolley, S.; Schoeman, D.; Bopp, L. et al. Oceans and Coastal Ecosystems and Their Services. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Pörtner, H.-O.; Roberts, D.C.; Tignor, M. et al., Eds.; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Chapter03.pdf.
- Friedlingstein, P.; O'Sullivan, M.; Jones, M. W. et al. Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data* 2022, 14 (11), 4811-4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
- Global Ocean Acidification Observing Network (GOA-ON). *Global Ocean Acidification Observing Network*. <http://www.goa-on.org/>.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO). *Global Ocean Science Report 2020 - Carrying Capacity for Ocean Sustainability*; Isensee, K., Ed.; UNESCO: Paris, 2020. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375147>.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO). *MSPglobal Policy Brief: Climate Change and Marine Spatial Planning*; IOC Policy Brief No. 3; UNESCO: Paris, 2021. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375721>.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO). *State of the Ocean Report 2022*, Pilot edition; IOC Technical Series 173; UNESCO: Paris, 2022a. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381921>.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO). *The Contribution of the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development to the Achievement of the 2030 Agenda*; The Ocean Decade Series, 34; UNESCO: Paris 2022b. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381919>.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO)/European Commission. *MSPglobal: International Guide on Marine/ Maritime Spatial Planning*; IOC Manuals and Guides No. 89; UNESCO: Paris, 2021. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379196>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Annex I: Glossary. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Pörtner, H.-O.; Roberts, D.C.; Masson-Delmotte V. et al., Eds.; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2019. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2022/03/10_SROCC_AnnexI-Glossary_FINAL.pdf.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf.
- Jacox, M. G.; Alexander, M. A.; Amaya, D. et al. Global Seasonal Forecasts of Marine Heatwaves. *Nature* 2022, 604 (7906), 486-490. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04573-9>.
- Mawren, D.; Hermes, J.; Reason, C. J. C. Marine Heatwaves in the Mozambique Channel. *Clim Dyn* 2022, 58 (1), 305-327. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05909-3>.
- Newton, J. A.; Feely, R. A.; Jewett, E. B. et al. *Global Ocean Acidification Observing Network: Requirements and Governance Plan*, Second Edition; Global Ocean Acidification Observing Network, 2015. http://www.goa-on.org/documents/general/GOA-ON_2nd_edition_final.pdf.
- Rodrigues, R. R.; Taschetto, A. S.; Sen Gupta, A. et al. Common Cause for Severe Droughts in South America and Marine Heatwaves in the South Atlantic. *Nat Geosci* 2019, 12 (8), 620-626. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0393-8>.
- Saranya, J. S.; Roxy, M. K.; Dasgupta, P. et al. Genesis and Trends in Marine Heatwaves Over the Tropical Indian Ocean and Their Interaction With the Indian Summer Monsoon. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 2022, 127 (2), e2021JC017427. <https://doi.org/10.1029/2021JC017427>.
- World Meteorological Organization (WMO). *State of the Global Climate 2022* (WMO-No. 1316). Geneva, 2023.

SDG 17 – 목표 달성을 위한 파트너십

Findell, K. L.; Sutton, R.; Caltabiano, N. et al. Explaining and Predicting Earth System Change: A World Climate Research Programme Call to Action. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2023, 104 (1), E325-E339. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0280.1>.

Golding, B., Ed. *Towards the “Perfect” Weather Warning: Bridging Disciplinary Gaps through Partnership and Communication*; Springer International Publishing: Cham, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98989-7>.

Kuglitsch, M.; Albayrak, A.; Aquino, R., et al. *Artificial Intelligence for Disaster Risk Reduction: Opportunities, Challenges and Prospects*. *WMO Bulletin* 2022a, 71 (1), 30-37.

Kuglitsch, M. M.; Pelivan, I.; Ceola, S. et al. Facilitating Adoption of AI in Natural Disaster Management through Collaboration. *Nature Communications* 2022b, 13 (1), 1579. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29285-6>.

Symonds, D. Protection for All: WISER-EWSA Aims to Transform Nowcasting and Early Warning Systems in Southern Africa, Particularly for the Most Vulnerable Communities. *Meteorological Technology International*, April 2023, 10-11. <https://www.ukimediaevents.com/publication/8cf6eceb/12>.

World Meteorological Organization (WMO). *Early Warnings for All Executive Action Plan 2023-2027*; WMO: Geneva, 2022.

World Meteorological Organization (WMO). *Economic Costs of Weather-related Disasters Soars but Early Warnings Save Lives* [Press release No. 22052023]. 22 May 2023.



United in Science 2023

SUSTAINABLE DEVELOPMENT EDITION

A multi-organization high-level compilation of the latest weather-, climate- and water-related sciences and services for sustainable development





This report was compiled by the World Meteorological Organization (WMO) under the direction of the United Nations Secretary-General to bring together the latest climate science-related updates from key global partner organizations with a focus on weather-, climate- and water-related sciences and services for sustainable development. The content of each chapter is attributable to each respective organization.

The report is available electronically at: <https://library.wmo.int/idurl/4/68235>

LEAD AUTHORS AND CONTRIBUTORS

Overall coordination and editing by WMO: Lauren Stuart, Jürg Luterbacher, Roseline Devillier, Laura Paterson, Kate Solazzo, Isha Bhasin

Graphic design: Xavi González

Cover photo: Pexels - Pixabay

Executive Summary: Lauren Stuart (WMO), Rebecca Carman (United Nations Development Programme (UNDP)), Mark Tadross (UNDP), Yoona Jo (UNDP), Alexander Mejia (United Nations Institute for Training and Research (UNITAR)), Daniel Nazarov (UNITAR), Ginette Azcona (UN Women), Antra Bhatt (UN Women), Julia Brauchle (UN Women), Guillem Fortuny (UN Women), Barron Joseph Orr (United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD))

State of the Science: Leon Hermanson (Met Office, UK), Adam Scaife (Met Office, UK; University of Exeter, UK), Melissa Seabrook (Met Office, UK), Doug Smith (Met Office, UK), Anne Olhoff (CONCITO – Denmark's Green Think Tank), John Christensen (United Nations Environment Programme (UNEP) Copenhagen Climate Centre), Maarten Kappelle (UNEP), Jian Liu (UNEP), Omar Baddour (WMO), Josep G. Canadell (Global Carbon Project (GCP), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia), Pierre Friedlingstein (GCP, University of Exeter, UK), Robbie Andrew (GCP, CICERO Center for International Climate Research (CICERO), Norway), Glen Peters (GCP, CICERO), Zhu Liu (GCP, Tsinghua University, China), Robert B. Jackson (GCP, Stanford University, USA), Hoesung Lee (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)), Valérie Masson-Delmotte (IPCC), Hans-Otto Pörtner (IPCC), Jim Skea (IPCC), Panmao Zhai (IPCC), Priyadarshi R. Shukla (IPCC), Debra Roberts (IPCC), John Kennedy (WMO), Oksana Tarasova (WMO), Alex Vermeulen (Integrated Carbon Observing System – European Research Infrastructure Consortium (ICOS ERIC), Finland), Yousuke Sawa (Japan Meteorological Agency, Japan), Joeri Rogelj (Grantham Institute, Imperial College London, UK; International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria)

SDG 2 - Zero Hunger: Jorge Alvar-Beltrán (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)), Arianna Gialletti (FAO), Alashiya Gordes (FAO), Lindis Norlund (FAO)

SDG 3 - Good Health and Well-being: Rosa von Borries (WMO), Joy Shumake-Guillemot (WMO/World Health Organization (WHO)), Diarmid Campbell-Lendrum (WHO), Christian Schweizer (WHO)

SDG 6 - Clean Water and Sanitation: Nicolas Franke (WMO), Sulagna Mishra (WMO) and Stefan Uhlenbrook (WMO) with input from UN-Water members and partners

SDG 7 - Affordable and Clean Energy: Brian Dean (Sustainable Energy for All (SEforALL)), Ben Hartley (SEforALL), Alvin Jose (SEforALL), Emi Mizuno (SEforALL), Roberta Boscolo (WMO)

SDG 11 - Sustainable Cities and Communities: Feng Liang (China Meteorological Administration, China), Lea Ranalder (UN Habitat), Chao Ren (University of Hong Kong, China), Lu Ren (China Meteorological Administration, China), Valéry Masson (Météo-France, France), Ranjeet S. Sokhi (University of Hertfordshire, UK), Xiaolin Wei (Meteorological Bureau of Shenzhen Municipality, China)

SDG 13 - Climate Action: Kevin Horsburgh (Green Climate Fund (GCF)), John Hay (United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)), Danielle Magalhaes (UNFCCC), Tamaki Takao (UNFCCC), Amir Delju (WMO), Ilaria Gallo (WMO), Urvaksh D. Patel (GCF), Lars Peter Riishojgaard (WMO)

SDG 14 - Life Below Water: Kirsten Isensee (Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO)), Henrik Enevoldsen (IOC-UNESCO), Katherina Schoo (IOC-UNESCO), Michele Quesada da Silva (IOC-UNESCO)

SDG 17 - Partnerships for the Goals: Lauren Stuart (WMO), Estelle De Coning (WMO), Daniela Cuellar Vargas (WMO)

© World Meteorological Organization, 2023

The right of publication in print, electronic and any other form and in any language is reserved by WMO. Short extracts from WMO publications may be reproduced without authorization, provided that the complete source is clearly indicated. Editorial correspondence and requests to publish, reproduce or translate this publication in part or in whole should be addressed to:

Chair, Publications Board

World Meteorological Organization (WMO)

7 bis, avenue de la Paix

P.O. Box 2300

CH-1211 Geneva 2, Switzerland

Tel.: +41 (0) 22 730 8403

Email: publications@wmo.int

NOTE: The designations employed in WMO publications and the presentation of material in this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of WMO concerning the legal status of any country, territory, city or area, or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. The mention of specific companies or products does not imply that they are endorsed or recommended by WMO in preference to others of a similar nature which are not mentioned or advertised.

The findings, interpretations and conclusions expressed in WMO publications with named authors are those of the authors alone and do not necessarily reflect those of WMO or its Members.

Foreword by António Guterres, Secretary-General of the United Nations

2023 has shown all too clearly that climate change is here. Record temperatures are scorching the land and heating the sea, as extreme weather causes havoc around the globe. While we know this is just the beginning, the global response is falling far short. Meanwhile, halfway to the 2030 deadline for the Sustainable Development Goals (SDGs), the world is woefully off track.

Science is central to solutions.

It is widely understood that weather-, climate- and water-related sciences provide the underpinnings for climate action. But it is less recognized how these sciences can supercharge progress on the SDGs across the board.

This report aims to change that – illustrating how weather-, climate- and water-related sciences can advance aims such as food and water security, clean energy, better health, sustainable oceans and resilient cities.

As the report shows, for example, weather predictions help boost food production and move us closer to zero hunger. Integrating epidemiology and climate information helps us to understand and anticipate those diseases sensitive to climate. And early warning systems help to reduce poverty by giving people the chance to prepare and limit the impact of extreme weather on their livelihoods.

The evidence is clear: uniting in science helps ignite progress for people and planet. Let us heed the lessons of this report and harness the power of science to build a cleaner, safer, more sustainable future for us all.



A. Guterres
Secretary-General,
United Nations

Foreword by Prof. Petteri Taalas, Secretary-General of the World Meteorological Organization

The science is clear – the planet is far off track from reaching global climate goals and the 2030 Agenda.

July 2023 was the hottest month ever recorded, and it is likely 2023 will be one of the warmest years on record. This has been a year of extremes with exceptional heatwaves, scorching wildfires, torrential rains and devastating tropical cyclones.

Observed global surface temperature in 2013–2022 reached 1.15 °C above pre-industrial levels (1850–1900), yet greenhouse gas emissions continue to rise. Urgent and ambitious action is needed to mitigate global warming and adapt to the adverse impacts of climate change and extreme weather events, which disproportionately impact vulnerable communities and threaten achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs).

However, weather-, climate- and water-related sciences and services are an underutilized tool that can help accelerate progress towards achieving the SDGs. Groundbreaking scientific and technological advances, such as high-resolution climate modelling, artificial intelligence and nowcasting, can catalyse transformation in support of the SDGs. And achieving Early Warnings for All by 2027 will not only save lives and livelihoods but also help safeguard sustainable development.

At this pivotal moment in history, the halfway mark to achieving the SDGs, the science community stands united in the effort to achieve prosperity for people and the planet. I thank the many multidisciplinary expert teams involved in creating this report to highlight the crucial role of weather-, climate- and water-related science and services for sustainable development.



Prof. P. Taalas
Secretary-General, WMO

EXECUTIVE SUMMARY

We stand at a pivotal point in history – the halfway mark for achieving the 2030 Agenda for Sustainable Development. With only 15% of the Sustainable Development Goals (SDGs) on track, we are down at half-time and far from meeting global climate goals. The most recent *Sustainable Development Goals Report 2022* highlights the increasing impacts of climate change and extreme weather events, along with other interlinking global challenges, which are setting back development gains and threatening the full achievement of the SDGs by 2030.

At the half-time point of the 2030 Agenda, the science is clear – the planet is far off track from meeting its climate goals

Anthropogenic climate change has resulted in widespread and rapid changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere, affecting many weather and climate extremes, with adverse impacts and related losses and damages to nature and people (IPCC, 2023). The years from 2015 to 2022 were the eight warmest years on record, and the chance of at least one year exceeding the warmest year on record (2016) in the next five years is 98%. With a warm start to 2023 and the emergence of the El Niño phenomenon, there is an increased likelihood that 2023 will be among the warmest years on record. In addition, the chance of the annual mean global near-surface temperature temporarily exceeding 1.5 °C above pre-industrial levels for at least one of the next five years is 66% and is increasing with time.

There has been very limited progress in reducing the emissions gap for 2030 – the gap between the emissions reductions promised by countries and the emissions reductions needed to achieve the temperature goal of the Paris Agreement. To get on track to meet the Paris Agreement goals of limiting warming to well below 2 °C and preferably 1.5 °C, global greenhouse gas emissions must be reduced by 30% and 45%, respectively, by 2030, with carbon dioxide (CO₂) emissions getting close to net zero by 2050, compared with current policy projections.

Urgent and ambitious mitigation and adaptation action is needed. Limiting global warming will require large-scale, rapid and systemic transformations to reach net zero anthropogenic CO₂ emissions, and adaptation is crucial to reduce the adverse impacts of climate change and prevent loss and damage. Some future changes in climate are unavoidable, and potentially irreversible, but every fraction of a degree and ton of CO₂ matters to limit global warming and achieve the SDGs.

The impacts of extreme weather and climate change are undermining progress towards achieving all of the SDGs

Changes in the global climate system affect efforts to achieve the SDGs, and the increasing impacts of extreme events, in particular, are disproportionately affecting vulnerable

communities. Between 1970 and 2021, there were 11 778 reported disasters attributed to weather, climate and water extremes, causing over 2 million deaths and US\$ 4.3 trillion in economic losses. Over 90% of these reported deaths and 60% of economic losses occurred in developing economies. The impacts of these extreme events lead to losses of lives and livelihoods, exacerbate poverty and inequality, amplify food and water insecurity, trigger economic instability and, ultimately, undermine sustainable development.

2023 has already seen record-breaking extreme weather-, climate- and water-related events across the world. Cyclone *Freddy*, the longest-lived tropical cyclone in recorded history, impacted vulnerable communities across southern Africa. In Asia, Typhoon *Doksuri* triggered record-breaking rainfall in Beijing – the heaviest rainfall recorded since records began 140 years ago. July was the hottest month on record, with scorching temperatures across Europe, North America and China that have become increasingly common but would have been extremely rare without human-induced climate change. In eastern Canada, climate change more than doubled the likelihood of extreme fire weather conditions, and record-breaking sea-surface temperatures led to serious marine heatwaves in the Mediterranean and off the coast of the United States of America. These extreme events had significant impacts on human health, ecosystems, economies, energy, agriculture and water supplies, threatening sustainable development globally.

Advances in weather-, climate- and water-related sciences can boost our game to achieve the SDGs

The world is equipped with science, technology and knowledge that are unprecedented in history. Weather-, climate- and water-related sciences and services, in particular, have undergone revolutionary advancements over the past few decades. Scientific advancements, satellites and supercomputers, as well as an increase in observational data, have improved our ability to forecast hydrometeorological events with remarkable accuracy and project future changes in climate with reduced uncertainty. Advances in early warning systems have decreased mortality rates, and new technologies, such as nowcasting, artificial intelligence and high-resolution modelling, are revolutionizing the way we predict high-impact weather and water hazards. Although often under-recognized,



Figure 1. Weather-, climate- and water-related sciences support the achievement of many of the SDGs

weather-, climate- and water-related sciences and services play a crucial role in achieving the SDGs, as highlighted in Figure 1.

However, barriers prevent the full, effective and equitable use of weather-, climate- and water-related sciences for sustainable development, which limits progress towards achieving the SDGs. Gaps in global surface-based data remain due to insufficient observations in parts of the world and restricted data exchange and access, which significantly impact the quality of weather-, climate- and water-related services locally, regionally and globally. Insufficient data, particularly in lower-income countries, results in knowledge gaps and ineffective policymaking, limiting progress towards achieving the SDGs. Additionally, reaching local communities with understandable, affordable, applicable and real-time weather, climate and water information remains a significant challenge, as does effectively integrating local, contextual and Indigenous knowledge. Failure to fully engage local stakeholders and integrate their knowledge limits the effectiveness of science. And finally, a lack of scientific capacity has prevented many countries from using weather-, climate- and water-related sciences effectively in support of ambitious action to achieve the SDGs.

As the final whistle draws near, investing in and mobilizing the scientific community will super-charge the achievement of the SDGs

In August 2023, the United Nations General Assembly adopted a resolution that designates 2024 to 2033 the International

Decade of Sciences for Sustainable Development. Moving forward, the scientific community will be a game-changing player as we enter the second half of the game. Unprecedented advances in weather-, climate- and water-related sciences and services remain underutilized in support of sustainable development but must be enhanced, accelerated and scaled up to support achievement of the SDGs. We have the solutions to achieve the SDGs by 2030 – now is the time to mobilize the scientific community to supercharge SDG implementation.

Recommendations

- **Close the gaps in weather, climate and hydrological observations and data.** Investing in systematic observations and promoting the free and unrestricted exchange of data is crucial to enhancing our understanding of the Earth system and strengthening weather-, climate- and water-related sciences and services in support of achieving the SDGs.
- **Advance research and expand access to science, technology and innovation.** Scaling up integrated weather-, climate- and water-related research will close existing knowledge gaps and advance emerging technologies, such as high-resolution modelling, artificial intelligence and nowcasting, that can support the SDGs when made accessible.
- **Strengthen scientific capacity and skills through education and training.** Enhancing scientific capacity, especially in lower-income countries, will support innovation and improve the use of weather-, climate- and water-related sciences to ensure national sustainable development policies, plans and actions are grounded in best-available science.
- **Embrace local, contextual and Indigenous knowledge.** Enhancing participatory, user-driven approaches, such as citizen science and co-production, supports integration and legitimization of local, contextual and Indigenous knowledge to translate weather-, climate- and water-related sciences into on-the-ground impact for the SDGs.
- **Unite diverse stakeholders to boost the impact of science.** Mobilizing multidisciplinary collaboration with diverse stakeholders – including scientists, the private sector, civil society, youth, local communities, governments and others – is essential to improve the effectiveness of weather-, climate- and water-related science across society and accelerate progress towards achieving the SDGs.



Links between weather-, climate- and water-related sciences and services and the Sustainable Development Goals

Building on the **Global Sustainable Development Report 2023**, which emphasizes the role of science in accelerating transformation to achieve the SDGs, *United in Science 2023* provides a high-level compilation of the latest weather-, climate- and water-related sciences and services for sustainable development. These sciences and services underpin the achievement of all the SDGs; however, a complete analysis of all the ways in which weather-, climate- and water-related sciences and services support sustainable development is beyond the scope of this report. As a result, eight SDGs were selected to review in this report based on their direct linkages to these sciences: SDG 2 – Zero Hunger, SDG 3 – Good Health and Well-being, SDG 6 – Clean Water and Sanitation, SDG 7 – Affordable and Clean Energy, SDG 11 – Sustainable Cities and Communities, SDG 13 – Climate Action, SDG 14 – Life Below Water, and SDG 17 – Partnerships for the Goals.

While the remaining SDGs are no less important, their links to weather-, climate- and water-related sciences and services are more indirect and often linked to one of the eight SDGs covered in this report. For example, weather forecasting and climate projections support agricultural decision-making and production, thereby improving food security outcomes (SDG 2 – Zero Hunger), which in turn, improves livelihoods and reduces poverty (SDG 1 – No Poverty). Additionally, in some cases, limited knowledge and understanding of the role these sciences play in enabling sustainable development presented barriers to more in-depth analysis of particular SDGs. The SDGs that are not covered in depth in this report are briefly highlighted in this section.



SDG 1: No Poverty

SDG 1 aims to end poverty in all its forms everywhere. Climate change intensifies poverty by disrupting livelihoods, amplifying food and water scarcity, and fostering economic instability, presenting a significant challenge to achieving SDG 1. However, weather-, climate- and water-related sciences and services, particularly early warning systems, provide tangible benefits in poverty reduction by reducing the impacts of climate change on people's livelihoods and helping them to avoid damaging events and economic losses. For example, seasonal and long-term forecasts can assist farmers in reducing their exposure to climate-related impacts, which increases agricultural productivity, improves livelihoods and reduces poverty (Griggs et al., 2021). Additionally, climate projections help us understand future development and appropriate adaptation measures under changing climatic conditions that promote socioeconomic well-being in vulnerable populations.

SDG 4: Quality Education

Extreme weather events and climate change impact communities worldwide, making it imperative to equip learners with the knowledge and skills to understand, adapt to and mitigate these challenges. Integrating weather-, climate- and water-related science education into curricula enhances students' scientific literacy, critical thinking, social empathy and evidence-based problem-solving abilities. Additionally, a robust weather and climate science education may also serve as a catalyst for innovation and technological advances. Addressing the complex challenges posed by climate change will require upskilling and re-skilling existing professionals, such as meteorologists, hydrologists, climate scientists and policy experts. It will also require promoting education to prepare people for professions such as energy storage specialists, green building architects, smart city planners and decarbonization strategists. Fostering a deeper understanding of weather and climate dynamics, water management and environmental sciences helps students become informed and proactive global citizens. As a result, they will be well prepared to address current and future challenges, develop solutions and contribute to sustainable development efforts.



Photo: Ab Rashid, UNDP Climate



SDG 5: Gender Equality

Weather and climate impacts are not gender neutral – they are experienced differently by women and men at the intersection of other social determinants, such as economic status, location, age, disability and marital status (Azcona et al., 2023). Gender discrimination heightens climate-associated risks for women and girls, including the risk of food insecurity, poverty, gender-based violence, and early and forced marriage. Despite their vulnerability to the impacts of extreme weather and climate change, women also hold knowledge that can play a transformative role in addressing local challenges when effectively integrated into the scientific process. For example, FemLINKPacific's Women's Weather Watch initiative engages women to ensure weather information reaches communities in remote areas and that disaster preparedness, management and response involves local women (*Gendered Impacts of Weather and Climate: Evidence from Asia, Pacific and Africa*). Integrating the knowledge of women and engaging them in the scientific process ensures that weather-, climate- and water-related sciences and services are better suited to meet their needs.



SDG 8: Decent Work and Economic Growth



SDG 8 promotes sustained, inclusive and sustainable economic growth, full and productive employment and decent work for all. According to the World Economic Forum (2023), the top three risks to global economic development over the next 10 years are the failure to mitigate climate change, the failure to adapt to climate change, and natural disasters and extreme weather events. However, weather-, climate- and water-related sciences and services deliver economic, environmental and social benefits across a range of timescales, from early warnings regarding imminent danger to life and property to long-term projections of climate change that are essential for adaptation activities (Kull et al., 2021). Additionally, early warning systems play an important role in enabling anticipatory action and response from workers, employers and authorities at the national and local levels, thereby preventing human and economic losses in the workplace (ILO, 2022). Early warning systems also promote decent work as part of occupational health and safety standards in the workplace.

SDG 9: Industry, Innovation and Infrastructure



SDG 9 aims to build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation. Industry and innovation are highly vulnerable to the impacts of climate change and extreme weather events. Extreme weather events can damage or destroy critical infrastructure, resulting in human and economic losses, and climate change impacts, such as rising sea-levels, threaten coastal industries and infrastructure. However, weather-climate- and water-related sciences and services play an important role in enabling action to achieve SDG 9. For example, advances in weather forecasting and early warnings protect infrastructure and industry from natural hazards, while climate change scenarios enhance the resilience of infrastructure by providing guidance on the placement and climate-proofing of structures in coastal and other vulnerable areas. Additionally, enhancing scientific research is central to achieving SDG 9, and weather-, climate- and water-related research in particular can foster innovation that will deliver benefits across society and contribute to the achievement of all SDGs.

SDG 10: Reduced Inequalities



SDG 10 strives to reduce inequality within and among countries. Existing inequalities related to age, sex, disability, race, ethnicity, origin, religion, and economic or other status increase vulnerability to the impacts of climate change and extreme weather events. At the same time, these impacts also exacerbate existing inequalities – leading to a vicious cycle (Islam and Winkle, 2017). Additionally, SDG 10, target 10.7 aims to facilitate orderly, safe, regular and responsible migration and mobility of people. According to IPCC (2023), climate and weather extremes are increasingly driving displacement in Africa, Asia, the Americas and small island States in the Caribbean and South Pacific. However, weather-, climate- and water-related sciences and services can help minimize forced climate-related displacement. For example, early warning of hazardous events not only saves lives and livelihoods but can also reduce losses and damages that may trigger forced displacement. These sciences can also inform adaptation strategies, allowing people to stay where they are if they choose to do so, or informing planned relocation to ensure they can move safely and with dignity to areas that do not put them at an increased risk to weather-, climate- and water-related hazards.

SDG 12: Responsible Consumption and Production



SDG 12 aims to ensure sustainable consumption and production patterns. Weather-, climate- and water-related sciences and services play an indirect role in supporting the achievement of SDG 12 through other SDGs. For example, access to timely, reliable and actionable data and information enhances agricultural productivity, thereby reducing food losses related to the adverse effects of extreme weather and climate change (SDG 2 – Zero Hunger). Additionally, weather-, climate- and water-related sciences are essential for supporting sustainable energy consumption and production, including planning and development of renewable energy and operation and management of energy systems



Photo: Vladimir Tadić

(SDG 7 – Affordable and Clean Energy). Climate models support the development of scenarios about the future use and conservation of marine areas (SDG 14 – Life Below Water), and data on land, weather, climate and water are crucial to support the observation, monitoring, modelling, forecasting and early warning of droughts, floods, wildfires and sand and dust storms to support the sustainable management of natural resources on land (SDG 15 – Life on Land).



SDG 15: Life on Land

SDG 15 seeks to protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests, combat desertification, halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss. Extreme weather-related events, such as droughts, floods and wildfires, and the impacts of climate change degrade land and impact achievement of SDG 15. The interaction of climate change and land degradation, deforestation and biodiversity loss lead to significant impacts on the environment, food and water security and human health, and consequently impact sustainable development. Data on land, weather, climate and water are crucial to support the observation, monitoring, modelling, forecasting and early warning of droughts, floods, wildfires and sand and dust storms to reduce impacts across society. Global cooperation on drought, floods, and sand and dust storms leads to the provision of warnings and advisories to guide preparedness, and the development of guidance for building resilience and accelerating adaptation and mitigation action to minimize impacts and support sustainable development.



SDG 16: Peace, Justice and Strong Institutions

SDG 16 aims to promote peaceful and inclusive societies for sustainable development, provide access to justice for all and build effective, accountable and inclusive institutions at all levels. Ongoing conflicts across the world threaten the achievement of SDG 16. While climate change and extreme weather events do not directly cause conflict, their impacts intersect with compounding social, economic and political pressures that increase the risk of conflict (ICRC, 2020). For example, the impacts of climate change and extreme weather events threaten the food, water and economic security of vulnerable communities, particularly in areas already enduring protracted conflict and fragility. As a result, people may diversify their livelihoods and ways of life or move to seek greater opportunities and protection, which may increase pressure on natural resources, leading to tensions between communities. The intersection between climate change and conflict is complex; however, weather-, climate- and water-related sciences and services support the achievement of food, water, energy and health security, reducing the risk of conflict triggered by insecurity.

STATE OF THE SCIENCE

Key messages

- Total carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels and land use change remained high in 2022 and the first half of 2023. Fossil fuel CO₂ emissions increased 1% globally in 2022 compared to 2021, and global average concentrations continued rising through 2022 and the first half of 2023.
- The years from 2015 to 2022 were the eight warmest on record, and the chance of at least one year exceeding the warmest year on record in the next five years is 98%.
- It is estimated that current mitigation policies will lead to global warming of around 2.8 °C over this century compared to pre-industrial levels. Immediate and unprecedented reductions in greenhouse gas (GHG) emissions are needed to achieve the goals of the Paris Agreement.

Greenhouse gas (GHG) emissions and concentrations

Human activities associated with the emissions of GHGs have unequivocally caused global warming, with observed global surface temperature in 2013–2022 reaching 1.15 °C above pre-industrial levels (1850–1900), of which 1.14 °C can be attributed to human influence (IPCC, 2023, updated in Forster et al., 2023). GHG emissions have continued to increase, with unequal historical and ongoing contributions arising from the use of fossil fuels, land use and land-use change, lifestyles and patterns of consumption and production across regions, between and within countries, and among individuals.

According to the Global Carbon Project, total CO₂ emissions from human activities remained high in 2022, with an estimated 40.6 billion tons of carbon dioxide (GtCO₂) emitted.¹ Fossil CO₂ emissions are estimated to have risen 1% (uncertainty range 0.1% to 1.9%) in 2022 relative to 2021, primarily driven by growth in oil use as the aviation sector rebounded following the

COVID-19 pandemic (Friedlingstein et al., 2022). Coal emissions increased globally by about 1% (uncertainty range 0.2% to 1.8%) in 2022, while emissions from natural gas declined.

The remaining carbon budget compatible with a 50% of chance of limiting global warming to 1.5 °C continues to be depleted and has now been reduced to around 250 GtCO₂ based on a recent update of the IPCC estimate (Forster et al., 2023). If total CO₂ emissions stay at current levels, then this remaining budget would be exhausted before 2030, inexorably leading to overshoot of 1.5 °C global warming.

Preliminary estimates shows that global fossil CO₂ emissions in January to June 2023 were 0.3% above the same period in 2022 (Figure 1), with declines in emissions from power generation and domestic use but increased emissions from industry and all transport modes (ground, domestic and international aviation) compared the same period last year (Carbon Monitor).

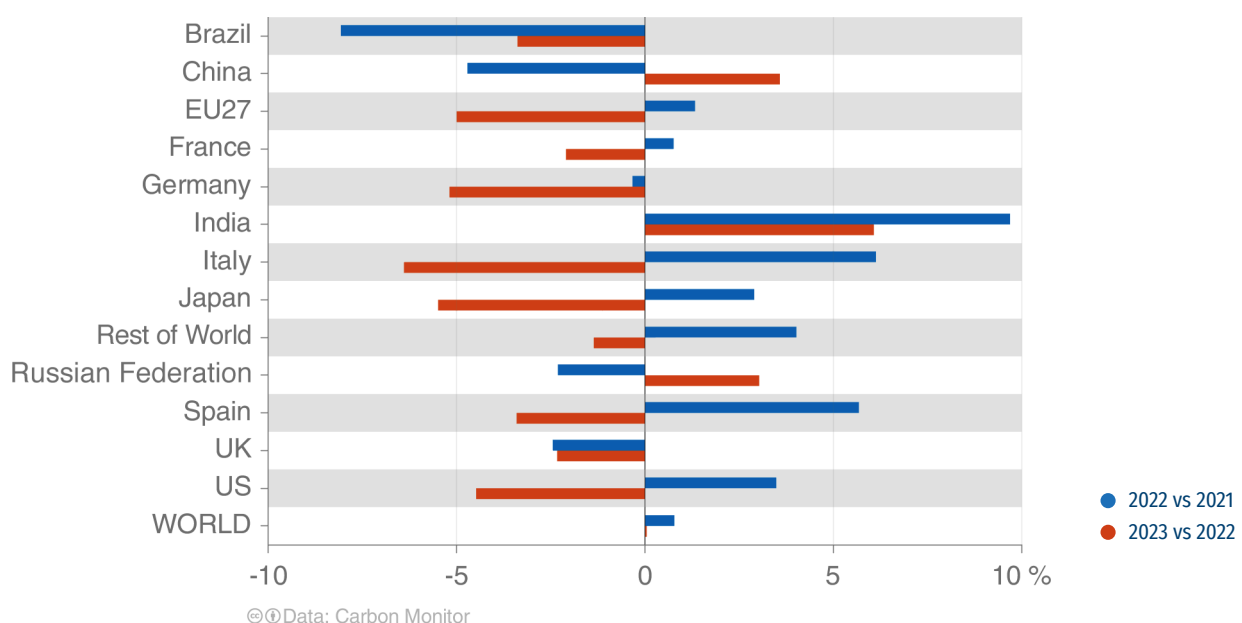


Figure 1. Preliminary estimates of the percentage change in fossil CO₂ emissions for January to June of 2023 compared with the same period for 2022, and the same comparison for 2022 versus 2021. Source: Data from Carbon Monitor

1. GHG emissions calculated as CO₂-equivalent using the global warming potential over 100 years.

As emissions continue to rise, so do atmospheric concentrations of GHGs, including CO₂, methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O), which are closely linked to anthropogenic activities and interact strongly with the biosphere and oceans (*WMO Greenhouse Gas Bulletin, No. 18*). To predict the evolution of atmospheric GHG concentrations, a quantitative understanding of sources, sinks and chemical transformations is required. The latest analysis of observations from the WMO Global Atmosphere Watch (GAW) in situ observational network shows that globally averaged surface mole fractions² for CO₂, CH₄ and N₂O reached new highs in 2021, with CO₂ at 415.7 ± 0.2 parts per million (ppm),³ CH₄ at 1 908 ± 2 parts per billion (ppb) and N₂O at 334.5 ± 0.1 ppb. These values constitute, respectively, 149%, 262% and 124% of pre-industrial (before 1750) levels. CO₂ levels continued increasing through 2022 and the beginning of 2023 as documented through the observations at the GAW network of stations.⁴

Global climate indicators

Anthropogenic climate change has resulted in widespread, rapid and intensifying changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere, affecting many weather and climate extremes (assessed up to 2020 in IPCC, 2023, some updated to 2022 in Forster et al., 2023). The WMO State of the Global Climate reports provide an annual summary of the state of global climate indicators, including global temperature, ocean heat and cryosphere indicators, such as sea-ice extent and glacier mass, among others (Trewin et al., 2021).

Global mean temperature

The years from 2015 to 2022 were the eight warmest years on record (Figure 2). A warm start to 2023 and the emergence of the El Niño phenomenon increase the likelihood that 2023 will be

among the warmest years on record. Global mean temperature for the last decade, 2013–2022, was 1.15 °C above the 1850–1900 average (Forster et al., 2023), with preliminary estimates for 2023 (to June) indicating a continued increase to 1.18 ± 0.12 °C. The human-induced component of the warming for the decade 2013–2022 has been estimated to be 1.14 ± 0.1 °C (Forster et al., 2023), very similar to the total observed warming.

La Niña conditions were persistent from late 2020 to early 2023, with global temperatures falling below the long-term trend. With the cessation of La Niña in early 2023, global temperatures have risen to record levels. For the period 2019 to June 2023, most areas of the world were warmer than the recent average (1991–2020), with only a few regions – parts of North America, India, the Southern Ocean and an area of eastern Australia – cooler than the recent average (Figure 3).

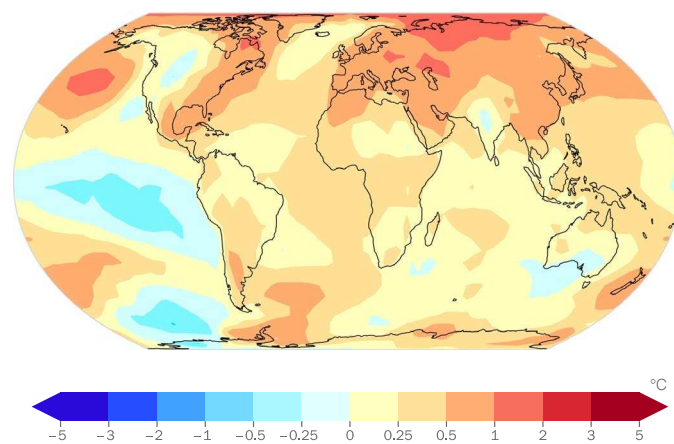


Figure 3. Five-year mean near-surface temperature difference (°C) from the 1991–2020 average for the period 2019–2023 (data to June 2023). Each map grid cell value is the median calculated from five data sets: HadCRUT5, GISTEMP, NOAA GlobalTemp, JRA-55 and ERA5.

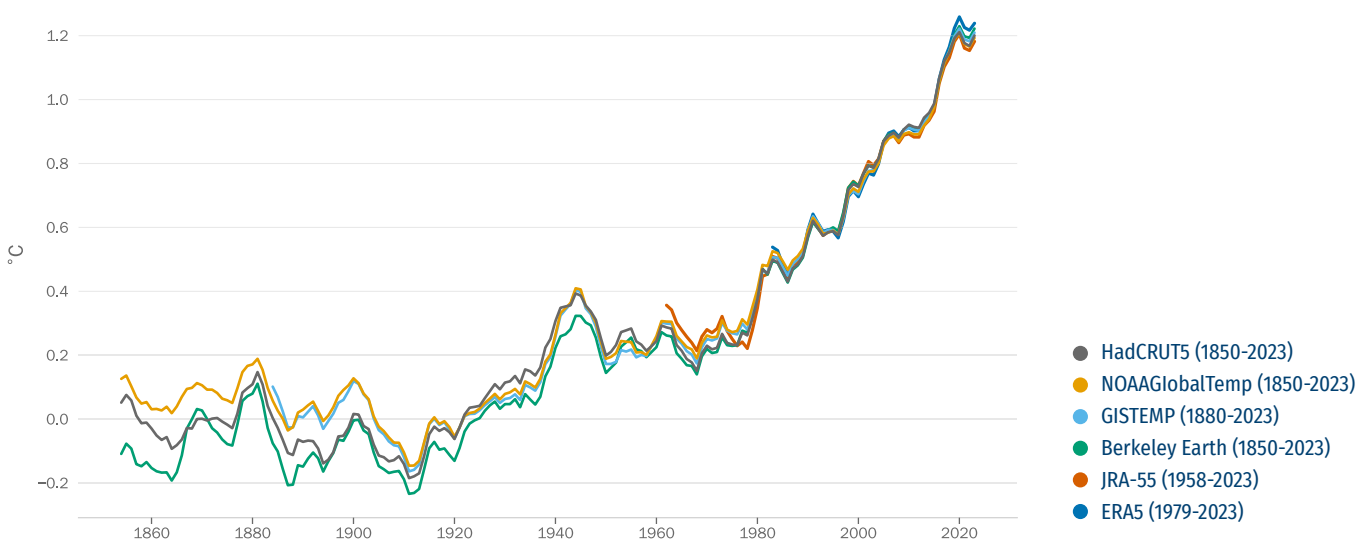


Figure 2. Five-year running average of global temperature anomalies (°C relative to 1850–1900) from 1850–1854 to 2019–2023 (data to June 2023) shown as a difference from the 1850–1900 average. Six data sets are shown as indicated in the legend.

2. Mole fraction = The preferred expression for the abundance (concentration) of a mixture of gases or fluids. In atmospheric chemistry, the mole fraction is used to express the concentration as the number of moles of a compound per mole of dry air.

3. ppm = The number of molecules of a gas per million (10⁶) molecules of dry air.

4. Updated globally averaged mole fractions for three mentioned gases will be made available in November 2023.

Ocean heat content

Around 90% of the excess energy that accumulates in the Earth system due to increasing concentrations of GHGs is taken up by oceans. This added energy warms the ocean, and the consequent thermal expansion of the water leads to sea-level rise – to which melting land ice also contributes. The surface layers of the ocean have warmed more rapidly than the deeper waters, resulting in a rise in the global mean sea-surface temperature and an increase in the incidences of marine heatwaves. Preliminary data show global sea-surface temperatures were at record highs for the time of the year in May and June 2023, and temperatures in the North Atlantic in particular have been unprecedented ([Preliminary Data Shows Hottest Week on Record – Unprecedented Sea Surface Temperatures and Antarctic Sea Ice Loss](#)).

Ocean heat content is a measure of the heat that has accumulated in the ocean. Figure 4 shows the global ocean heat content 0–2 000 m from 1960 to 2022. The upper 2 000 m depth of the ocean continued to warm in 2022 and reached the highest heat content on record. It is expected that it will continue to rise – a change which is irreversible on centennial to millennial timescales (Riser et al., 2016; Roemmich et al., 2019). All data sets agree that ocean warming rates were particularly high in the past two decades: the rate of ocean warming for 0–2 000 m was $0.7 \pm 0.1 \text{ W m}^{-2}$ from 1971 to 2022, but $1.2 \pm 0.2 \text{ W m}^{-2}$ from 2006 to 2022.

The Earth energy imbalance (EEI) includes changes in energy associated with warming not just of the ocean but of the land and air, as well as melting of ice. The most recent IPCC report estimated that the EEI was 0.79 W m^{-2} for the period 2006–2018 (IPCC, 2021). A more recent update estimates the EEI to be 0.89 W m^{-2} for the period 2010–2022 (Forster et al., 2023).

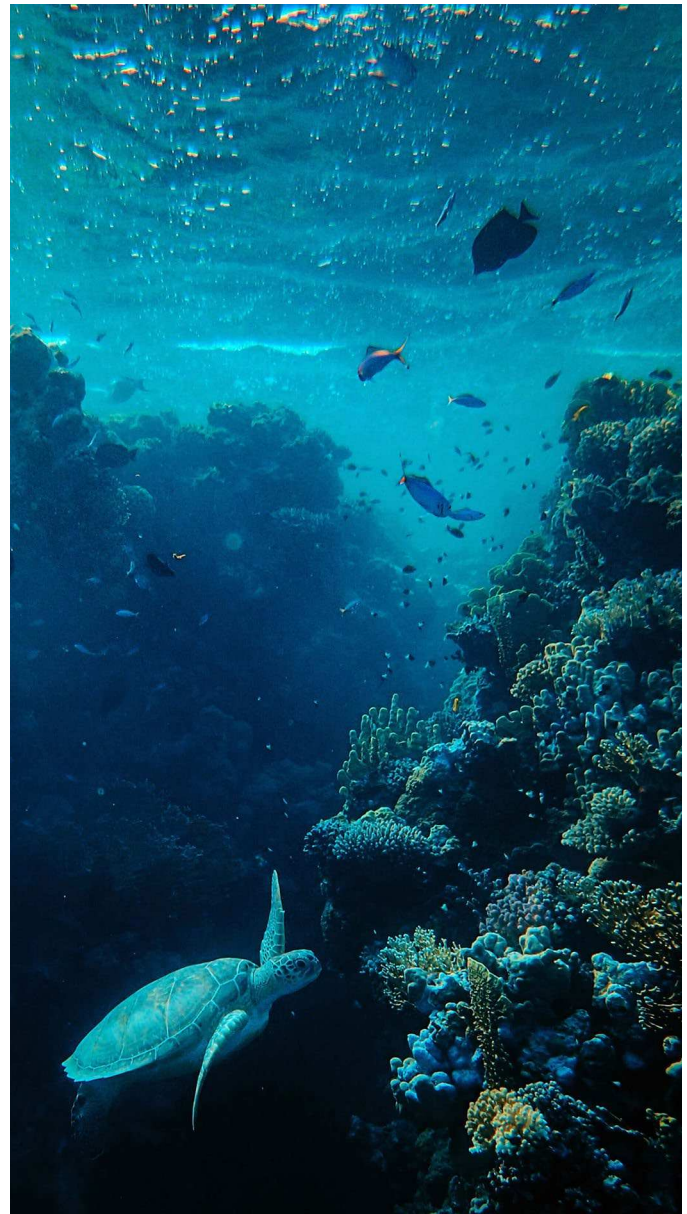


Photo: Francesco Ungaro - Pexels

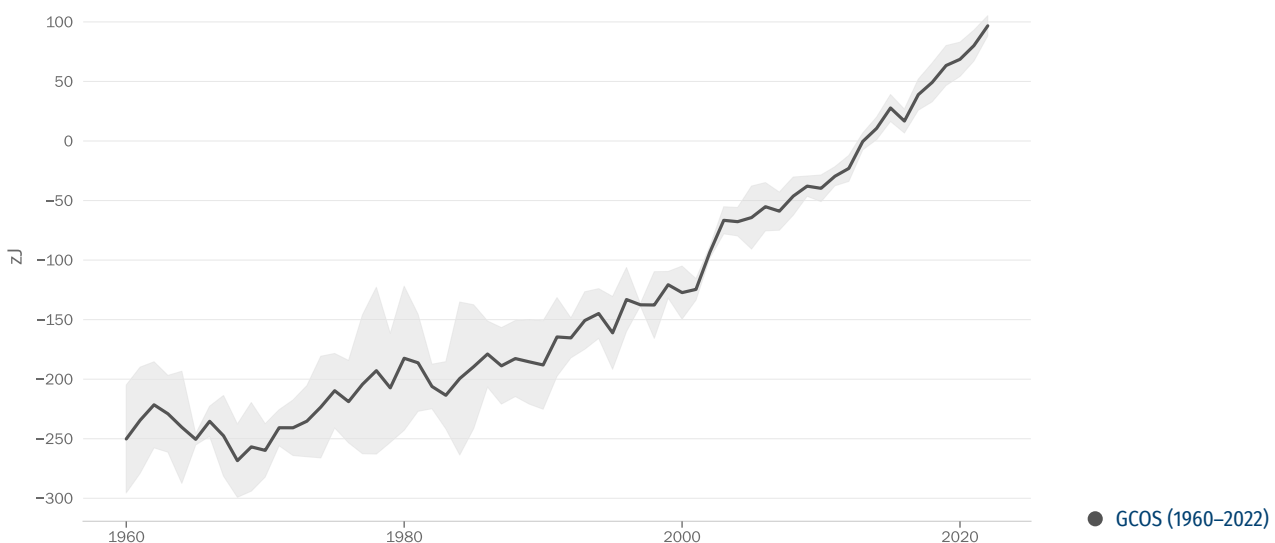


Figure 4. Global ocean heat content 0–2 000 m from 1960 to 2022. Data are based on a combination of data sets (see Appendix).

Cryosphere

Human influence is very likely the main driver of the decrease in Arctic sea-ice area between 1979–1988 and 2010–2019 (IPCC, 2023). The current Arctic sea-ice cover (both annual and late summer) is at its lowest level since at least 1850, and the Arctic is likely to reach practically ice-free conditions at its summer minimum at least once before 2050. During the period 2018–2022, September Arctic sea-ice extent was on average nearly 1 million km² below the 1991–2020 average (Figure 5).

There has been no significant trend in Antarctic sea-ice extent from 1979 to 2020 due to regionally opposing trends and large internal variability (IPCC, 2021). Antarctic sea-ice extent increased slowly from the start of the satellite era to around 2015 (Figure 6), dropped rapidly between 2015 and 2017, and returned to close to the long-term average between 2017 and 2021, before reaching its lowest minimum on record in

February 2022 and then again in February 2023. Low growth of the ice through the autumn and early winter led to daily extents that were far below the previous record lows in June and July. According to preliminary data, in June 2023, Antarctic sea ice reached its lowest extent for June since satellite observations began, at 17% below average, breaking the previous June record by a substantial margin ([Preliminary Data Shows Hottest Week on Record – Unprecedented Sea Surface Temperatures and Antarctic Sea Ice Loss](#)).

Glaciers are also highly sensitive to anthropogenic climate change. For the glaciological year 2021/2022, data available for 37 reference glaciers indicate an average global mass balance of –1.18 m water equivalent (m w.e.), which is a larger mass loss than the average for the last decade (–0.92 m w.e. from 2012 to 2021) (WGMS, 2021). Glacier losses were particularly extreme in the European Alps, high-mountain Asia, western North America, South America and parts of the Arctic.

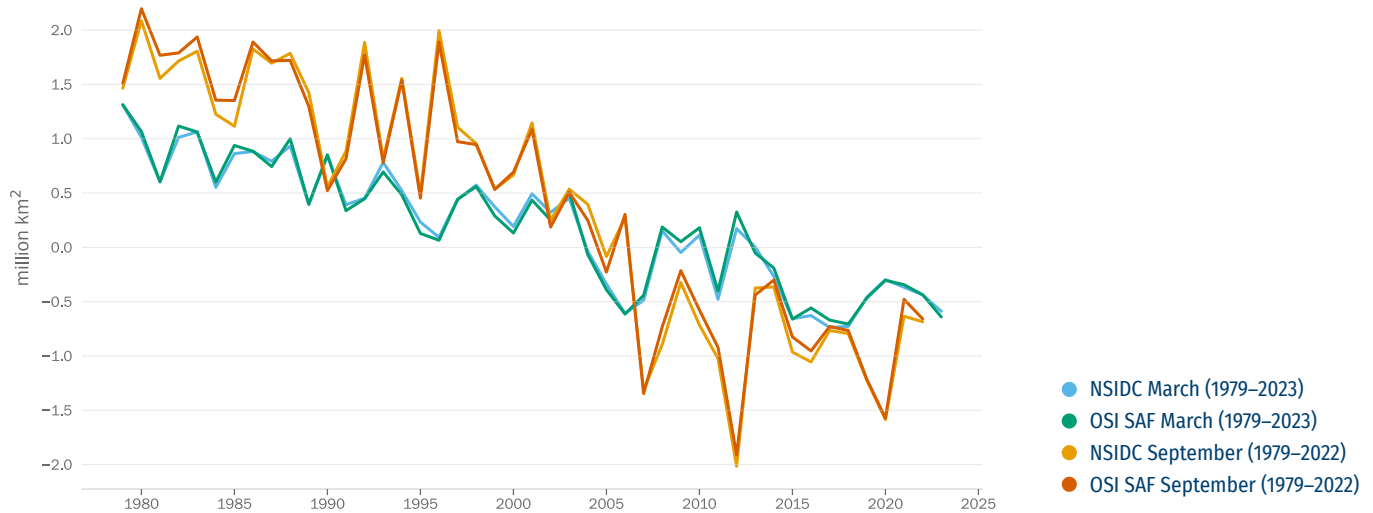


Figure 5. Sea-ice extent differences from the 1991–2020 average in the Arctic for the months with maximum ice cover (March) and minimum ice cover (September) from 1979 to March 2023. Source: United States National Snow and Ice Data Center (NSIDC) and European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI SAF)

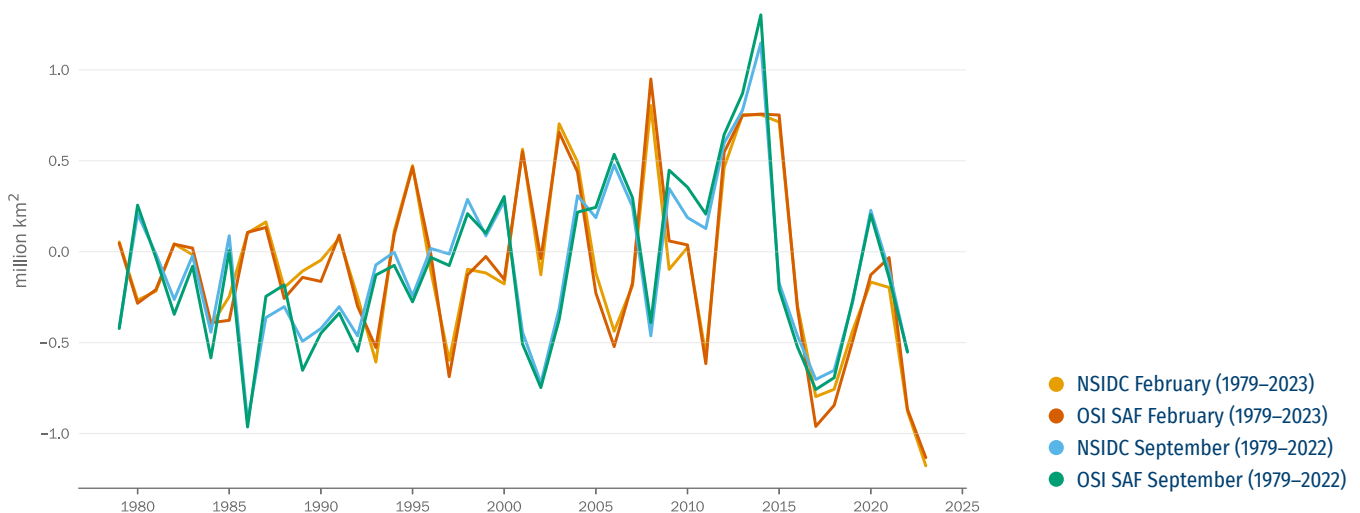


Figure 6. Sea-ice extent differences from the 1991–2020 average in the Antarctic for the months with maximum ice cover (September) and minimum ice cover (February) from 1979 to March 2023. Source: NSIDC and EUMETSAT OSI SAF

2023 extreme events

Extreme weather has become an increasingly frequent occurrence in our warming climate and has had devastating socioeconomic consequences. Between 1970 and 2021, 11 778 reported disasters attributed to weather, climate and water extremes caused 2 087 229 deaths and US\$ 4.3 trillion in economic losses. Over 90% of reported deaths and 60% of economic losses due to weather-, climate- and water-related disasters worldwide were reported in developing economies ([WMO Press release No. 22052023](#)).

A year of extremes, 2023 has already seen record-breaking extreme weather-, climate- and water-related events across the world. Cyclone *Freddy*, which made landfall in Mozambique in March 2023, was the longest-lived tropical cyclone in recorded history, lasting over five weeks and causing widespread destruction across Mozambique, Madagascar and Malawi ([NASA Tracks Freddy, Longest-lived Tropical Cyclone on Record](#)). Tropical cyclones also impacted parts of Asia, including Typhoon *Doksuri*, which brought extreme rainfall to parts of China in July and August 2023. Beijing recorded 744.8 mm of rain between the night of 29 July and the morning of 2 August 2023 – the heaviest rainfall recorded since records began 140 years ago ([Typhoons Trigger Destruction and Record-breaking Rainfall in China](#)). In parts of eastern Canada, climate change more than doubled the likelihood of extreme fire weather conditions, including record warm temperatures and drought, that fuelled intense and extensive wildfires (Barnes et al., 2023).

July 2023 saw record heat affecting the south-west United States and Mexico, southern Europe and North Africa, and parts of China, which reported breaking the national record, with 52.2 °C measured on 16 July 2023 at Turpan City. An analysis by the World Weather Attribution network concluded that, without human-induced climate change, this intense heat (which has become increasingly common) would have been extremely rare (Zachariah et al., 2023). Additionally, record-breaking sea-surface temperatures led to marine heatwaves in the Mediterranean and off the coast of the United States, impacting marine ecosystems and coastal communities ([Preliminary Data Shows Hottest Week on Record – Unprecedented Sea Surface Temperatures and Antarctic Sea Ice Loss](#)).

Looking ahead: future climate

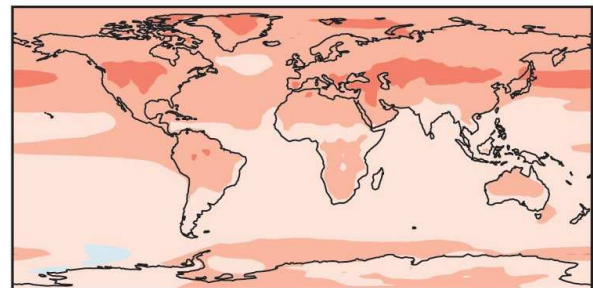
According to the WMO Lead Centre for Annual to Decadal Climate Prediction, global mean near-surface temperatures are likely to increase in the five-year period 2023–2027 and stay well above the 1991–2020 reference. Annual mean global near-surface temperature for each year in this five-year period is predicted to be between 1.1 °C and 1.8 °C higher than the average over the period 1850–1900. Additionally, warming from continued GHG emissions and the emergence of the El Niño phenomenon will lead to a high chance of new temperature records. The chance of

at least one year exceeding the warmest year on record, 2016, in the next five years is 98%, and the chance of the five-year mean for 2023–2027 being higher than the mean for the previous five years is also 98% ([Global Annual to Decadal Climate Update – Target Years: 2023 and 2023–2027](#)).

Continued emissions of greenhouse gases will lead to increased global warming. The best estimate from scenario-based projections⁵ has the long-term warming (averaged over 20 years) reaching the Paris Agreement level of 1.5 °C in the early 2030s (IPCC, 2023). Temporary exceedances are expected to occur before this date due to natural climate variability, and with increasing frequency as global temperatures approach this level (Trewin, 2022). The chance of the annual mean global near-surface temperature temporarily exceeding 1.5 °C above pre-industrial levels for at least one of the next five years is 66% and is increasing with time. However, it is unlikely (32%) that the five-year mean exceeds this level ([Global Annual to Decadal Climate Update – Target Years: 2023 and 2023–2027](#)).

The predicted temperature patterns for 2023–2027 relative to the 1991–2020 average are presented in Figure 7 for two extended seasons: May to September and November to March. For both extended seasons, temperatures are predicted to be above the 1991–2020 average almost everywhere, with land temperatures

Near-surface temperature MJJAS



Near-surface temperature NDJFM

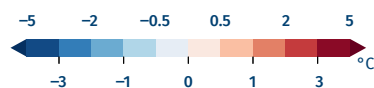
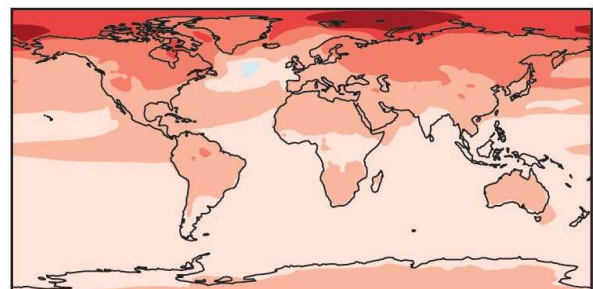


Figure 7. The WMO Lead Centre for Annual to Decadal Climate Prediction's multi-model forecast for the next five extended seasons of near-surface temperature anomalies relative to 1991–2020. Ensemble mean prediction for May to September (MJJAS) 2023–2027 (top) and ensemble mean prediction for November to March (NDJFM) 2023/2024–2027/2028 (bottom).

5. A climate projection is the simulated response of the climate system to a scenario of future emission or concentration of GHGs and aerosols, generally derived using climate models. Climate projections are distinguished from climate predictions by their dependence on the emission/concentration/radiative forcing scenario used, which is in turn based on assumptions concerning, for example, future socioeconomic and technological developments that may or may not be realized (IPCC, 2023).

showing larger anomalies than those over the oceans. The warming over the Arctic in November–March is particularly pronounced and is three times larger than the global mean anomaly. Most of the North Atlantic is predicted to be warmer than average, but a small region in the northern North Atlantic shows negative anomalies in November–March averaged over the five years, which is likely related to a slow-down of northward transport in the Atlantic due to climate change (*Global Annual to Decadal Climate Update – Target Years: 2023 and 2023–2027*). However, it is important to note that future warming will depend on future emissions, emphasizing the importance of ambitious climate action.

Science for climate action

Climate change is a threat to human well-being and planetary health. While some future changes in climate are unavoidable, and potentially irreversible, urgent and ambitious mitigation and adaptation action will reduce losses and damages and deliver many co-benefits, especially for air quality and health (IPCC, 2023).

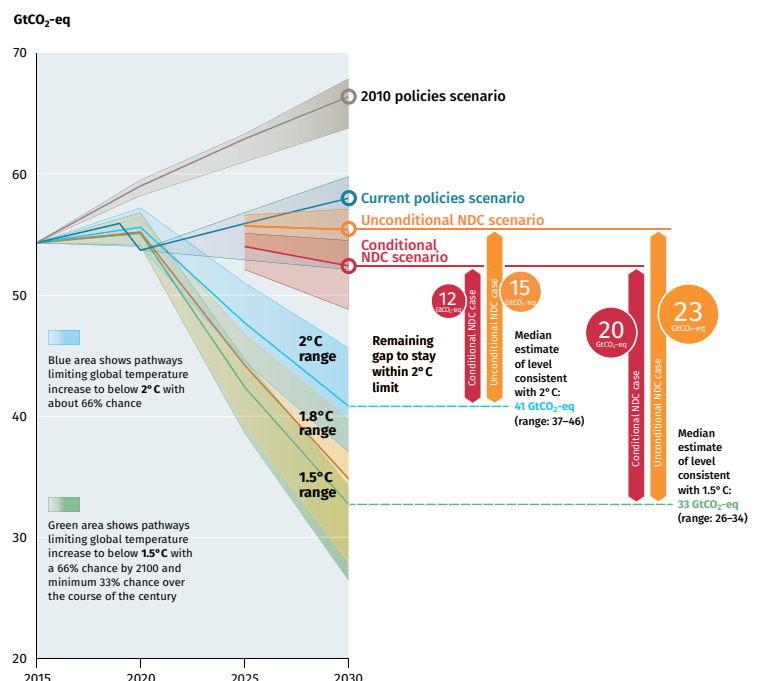
According to the United Nations Environment Programme’s Emissions Gap Report (UNEP, 2022), the world is on a path towards global warming far above the Paris Agreement goal. As of September 2022, 166 countries, representing more than 90% of global GHG emissions, submitted new or updated mitigation pledges, known as nationally determined contributions (NDCs). However, there has been very limited progress in reducing the emissions gap for 2030 – the gap between the emissions reductions promised by countries and the emissions reductions needed to achieve the temperature goal of the Paris Agreement, and new submissions by countries in the last nine months have not changed the situation visibly. Without additional action, current policies are estimated to result in global warming of 2.8 °C (uncertainty range: 1.9–3.3 °C, 66% chance) over this century. Full implementation of unconditional and conditional NDC scenarios reduces this to 2.6 °C (uncertainty range: 1.9–3.1 °C) and 2.4 °C (uncertainty range: 1.8–3.0 °C), respectively.

The emissions gap in 2030 remains immense (Figure 8). Current commitments by countries as expressed in their unconditional and conditional NDCs for 2030 are estimated to reduce global emissions by 5% and 10%, respectively, compared with current policies and assuming that they are fully implemented. To get on track to meet the Paris agreement goals of well below 2 °C and preferably 1.5 °C, global GHG emissions must be reduced by 30% and 45%, respectively, by 2030 and approximately 65% and 87% by 2050, with CO₂ emissions getting close to net zero by 2050, compared with current policy projections (UNEP, 2022).

Moving forward, limiting global warming will require large-scale, rapid and systemic transformation to reach net zero anthropogenic CO₂ emissions (UNEP, 2022). Implementation of all NDCs plus net-zero commitments made by countries points to a 1.8 °C (range: 1.8–2.1 °C, 66% chance) increase. However, currently this scenario is not credible, based on the discrepancy between current emissions, near-term NDC targets and long-term net-zero targets (UNEP, 2022).

In addition to mitigating emissions, adaptation is crucial to reducing the adverse impacts of climate change and preventing loss and damage. Vulnerable communities that have historically contributed the least to climate change are disproportionately affected. While adaptation has progressed across all sectors and regions, gaps remain, and today’s adaptation options will become less effective with increasing global warming. Human and natural systems will reach adaptation limits, with some limits already reached in some ecosystems and regions. However, current global financial flows for mitigation, and particularly adaptation, are insufficient to adequately respond to climate change (IPCC, 2023).

Climate action is imperative in all countries and must be achieved simultaneously with the SDGs. Prioritizing equity, social justice, inclusion and transition processes can enable adaptation and mitigation while also contributing to sustainable development. Regulatory and economic instruments, and behavioural and lifestyle changes can support emissions reductions, while scaled-up finance, new technologies and innovations, and enhanced international cooperation are critical enablers for accelerated climate action (IPCC, 2023). Every fraction of a degree, ton of CO₂ and choice matters. A global transformation is necessary to move towards a carbon-neutral future that will allow us to limit global warming and deliver other social and environmental benefits, including achievement of the SDGs.





SDG 2 ZERO HUNGER



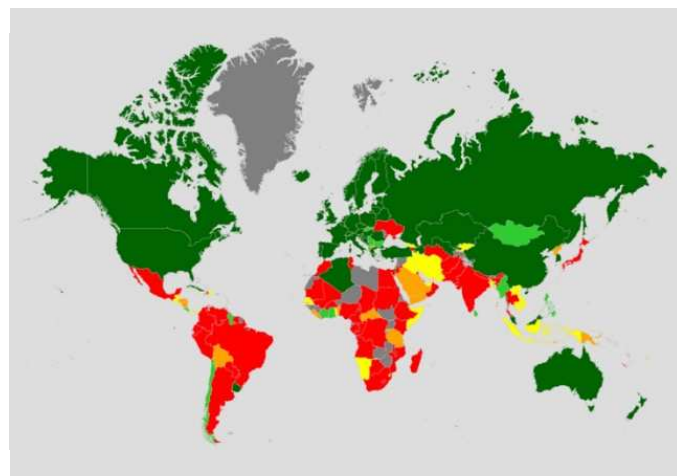
Food and Agriculture
Organization of the
United Nations

Key messages

- Projections estimate that nearly 670 million people may still face hunger in 2030, in part due to more frequent and intense extreme weather events that are disrupting each pillar of food security (availability, access, utilization and stability).
- Weather-, climate- and water-related sciences underpin services that enable farmers to make climate-informed decisions that enhance food and nutrition security.
- To effectively support the achievement of SDG 2, global investments are needed in weather-, climate- and water-related sciences and services along agrifood value chains.

Introduction

SDG 2 seeks to end hunger, achieve food security, improve nutrition and promote sustainable agriculture. However, according to the latest report on *The State of Food Security and Nutrition in the World*, the gap to achieving SDG 2 is growing wider every year (Figure 1). Both global and national efforts are proving insufficient in the face of compounded uncertainties and protracted challenges. Projections estimate that nearly 670 million people may still face hunger in 2030 (FAO et al., 2022).



● Prevalence of undernourishment $\leq 2.5\%$ ● No improvement
● On track ● Deterioration
● On path but too slow ● Insufficient data

Figure 1. Progress towards eradicating hunger across the world (2015–2020)⁶. Source: FAO, 2022a

Climate change has reduced food security, hindering efforts to meet the SDGs (IPCC, 2023). In particular, more frequent and intense extreme weather events are disrupting each pillar of food security (availability, access, utilization and stability),

threatening the achievement of SDG 2. Although overall agricultural productivity has increased, climate change has slowed this growth over the past 50 years globally (IPCC, 2023). Additionally, climate change poses an increasingly significant threat to rural small-scale producers, who are the backbone of global food security and key actors in the transformation to sustainable food systems. Therefore, the achievement of SDG 2 is strongly connected to climate risk management, particularly along the agrifood value chain, which is highly exposed and vulnerable to extreme weather events as well as slow-onset changes, such as droughts, rising sea levels, ocean warming and ocean acidification. For example, ocean warming and ocean acidification have adversely affected food production from fisheries and aquaculture in some regions (IPCC, 2023; FAO, 2022b). Additionally, heat and water stress conditions may result in food losses at the production stage, while excess rainfall may cause losses during the harvest and storage stages. Other hazards such as landslides caused by heavy rainfall may affect road infrastructure, hindering transportation and access to markets. As a result, food spoilage and waste may pose risks to food safety and consequently threaten food security.

Weather-, climate- and water-related sciences underpin robust services that have numerous social, economic and environmental benefits and enable farmers to make climate-informed decisions to improve food and nutrition security. For example, access to timely, reliable and actionable data and information allows farmers to better manage agricultural inputs like fertilizer and pesticides, enhance productivity by optimizing crop variety selection and timing of planting, and reduce food losses related to the adverse effects of extreme weather and climate change (FAO, 2022c). Therefore, weather-, climate- and water-related sciences help to significantly strengthen adaptive capacity and increase resilience in the agriculture sector, thereby reducing climate risks, supporting agricultural livelihoods and assets and, ultimately, improving food and nutrition security in line with SDG 2.

6. Due to the probabilistic nature of the indicator and the margins of uncertainty associated with the estimates of each parameter in the model, FAO does not publish estimates of the prevalence of undernourishment (PoU) lower than 2.5%. This prevents assessing whether a country has or has not already met the SDG target. Dotted line represents approximately the Line of Control in Jammu and Kashmir agreed upon by India and Pakistan. The final status of Jammu and Kashmir has not yet been agreed upon by the parties. Final boundary between Sudan and South Sudan has not yet been determined.

Weather-, climate- and water-related sciences for food security

Weather and climate services include relevant and timely information for agriculture, such as impact-based forecasts focusing on livestock, fisheries, forestry and crops to manage climate risks through better planning. Additionally, weather-informed agricultural advisories help reduce the impacts of weather extremes during the agricultural season (Kim et al., 2023). The development of these climate services relies on robust weather-, climate- and water-related sciences. It also requires a consistent flow of timely and reliable climate and weather data and information tailored to users' needs and socioeconomic characteristics to enhance the resilience of local communities and build the adaptive capacity of agrifood value chains.

Box 1. Early warnings for food security

Communities and countries alike need adequate warning to respond ahead of extreme weather events, such as floods and droughts, and to changes in climate patterns, which disrupt and threaten food security. Early warning systems are an effective adaptation measure that can minimize losses and damages in the agriculture sector, safeguard food security and support the achievement of SDG 2.

Multi-hazard early warning systems are integrated systems that enable communities, governments and others to take timely action to reduce disaster risk before a hazardous event occurs. In the context of food security, early warning is crucial to enabling anticipatory action to protect agricultural livelihoods and assets as well as identify potential areas of crop failure that may lead to emergencies. For example, drought early warning systems can inform governments and humanitarian organizations of potential food security crises to support timely action before the situation develops into famine (*Agriculture and Food Security Exemplar to the User Interface Platform of the Global Framework for Climate Services*).

However, major challenges remain to ensure all countries and people have access to multi-hazard early warning systems. The Early Warnings for All initiative seeks to address these challenges. It recommends co-designing these systems with farmers and local communities, incorporating feedback mechanisms, implementing the Principles for Locally Led Adaptation and building a robust understanding of climate risk and uncertainty at both national and local levels (*Early Warnings for All Executive Action Plan 2023–2027*).

For example, real-time weather information is essential for day-to-day farm management operations, including fertilizer application and irrigation. Additionally, this information supports early warning and weather-informed decision-making to protect crops, livestock and livelihoods ahead of extreme hydrometeorological events, as highlighted in Box 1. When extreme weather strikes, index-based weather insurance based on climate-related indices (such as rainfall, temperature and wind speed) issues instant payments to farmers to compensate them for losses. This type of insurance requires robust science, high-quality weather data and effective monitoring instruments and methods to downscale weather information and produce real-time crop yield estimates at local scales. As a result, it can be an effective weather and climate risk management tool to improve food security outcomes.

On sub-seasonal to seasonal timescales, forecasts are utilized for agricultural planning and decision-making, such as determining dates for land preparation, timing of planting and selection of crops based on the predicted duration of season and harvesting time. Forecasts that extend beyond a planting season help to identify the likelihood of drought, for example, based on large-scale climate phenomena such as El Niño Southern Oscillation (ENSO). Additionally, climate projections support long-term planning (for example, allocation of water resources) at the institutional level, and can provide important data about potential climate risks (FAO, 2021c). For example, the combination, or coupling, of climate and crop models is important for understanding the impacts of climate change on the suitability and the production of different crops. These projections also inform risk assessments that encompass weather hazards, exposure and impacts, socioeconomic vulnerability and the feasibility of adaptation interventions to inform long-term evidence-based planning for agricultural investments, policy strategies and the climate-proofing of agricultural infrastructure to ensure it is resilient in the face of a changing climate.

Weather-, climate- and water-related sciences play an important role in improving agricultural decision-making to enhance food security when they are trusted, robust and used appropriately. The integration of science with participatory processes has also shown a huge potential to enhance trust in and the use of climate services in the agriculture sector. The Participatory Integrated Climate Services for Agriculture (PICSA) methodology mixes scientifically analysed historical data visualized in a simple manner with Indigenous and local knowledge through participatory approaches to engage farmers in identifying appropriate adaptation actions on a seasonal and longer-term basis. Another example is the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Farmer Field Schools (highlighted in Box 2) and WMO Roving Seminars, where farmers are engaged in the co-production, co-design and co-development of weather and climate advisory services, which increases ownership and trust and, thus, enhances the

use of weather and climate information. By integrating two-way communication between National Meteorological and Hydrological Services (NMHSs) and farmers, such approaches enhance and simplify access to information, allowing farmers to be an integral part of surveillance, while also communicating and receiving information (FAO, 2015). As a result, science is used in an effective way to enhance food security.

Looking ahead: challenges and opportunities

The world is currently not on track to achieve SDG 2. Challenges around data collection and exchange, and monitoring of weather, climate and agronomic information remain. Examples include insufficient weather and agrometeorological stations to collect ground data, interrupted monitoring, variable quality of data from agricultural fields, and insufficient long-term and high-quality climate forecasts for agricultural decision-making (*Guidelines for the Assessment of Competencies for Provision of Climate Services* (WMO-No. 1285)). However, climate services, underpinned by robust weather-, climate- and water-related sciences, can play a key role in addressing these challenges.

Investments should be directed towards infrastructure development and monitoring, strengthening institutional arrangements between NMHSs and agricultural extension, as well as creating public-private partnerships to enhance delivery and uptake of information. Further, gaps around reaching local communities with understandable, affordable, applicable and real-time weather, climate and water information remain large. Climate services need to be user-driven, which means participatory approaches and feedback mechanisms are paramount. Therefore, co-production of climate services is crucial to ensuring they are tailored to users' needs and preferences.

Closing these gaps is vital to ensuring equitable use and provision, leaving no one behind. Moving forward, continued operational observations, particularly in lower-income countries where observational gaps remain, are urgently needed to improve weather forecasting and climate projections to support agricultural decision-making (FAO, 2015). Additionally, investment in research and development as well as agro-innovation need to be strengthened, as they are essential drivers for agricultural transformation (Kim et al., 2023). Enhancing weather and climate science as well as scaling up efforts to build effective climate services that reach vulnerable smallholder farmers is essential to achieving SDG 2 and ensuring global food security by 2030 (FAO, 2021b).

Box 2. Farmer Field Schools and Participatory Integrated Climate Services for Agriculture

Farmer Field Schools (FFSs) enhance farmer engagement in climate-informed decision-making for agriculture by ensuring that farmers provide feedback on the effectiveness of climate services (Figure 2). Mainstreaming climate change adaptation into FFSs is fundamental to monitor the exposure and vulnerability of targeted agricultural systems to climate hazards and identify adaptive and context-specific strategies to modulate the identified risks.

During the preparatory stage, exercises, including a baseline vulnerability assessment and a community resource mapping exercise, are carried out by FFS facilitators, community members and farmers. These involve the assessment of the exposure of key farming systems and activities to climate- and weather-related hazards, as well as the identification of adaptation strategies and options that farmers and the community have already implemented and which could be scaled up through community-based adaptation plans. In order to ensure farmers' participation in the collection, access to and use of detailed weather information as part of the FFS activities, it is essential to evaluate the performance of the adaptation practices and technologies. Information gained from FFS activities is subsequently shared by FFS participants with the community through systematic approaches (FAO, 2021a).



Photo: Jorge Alvar-Beltrán, FAO

Figure 2. Women participate at a Farmer Field School in Pakistan.



Key messages

- **Transdisciplinary research is fundamental to analysing, monitoring and addressing climate-sensitive health risks and climate impacts on the health sector.**
- **Climate change and extreme events are projected to significantly increase ill health and premature deaths, as well as population exposure to heatwaves and heat-related morbidity and mortality.**
- **Scaling up investments in climate-resilient and low-carbon health systems, and progress towards universal health coverage (UHC) are critical for the achievement of SDG 3.**

Introduction

SDG 3 seeks to ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages. The pathway to achieving many of the SDG 3 targets is influenced by various climatic and environmental conditions. As a result, overall progress towards SDG 3 might be hindered if health impacts from climate change are not sufficiently addressed. This section reviews progress towards achieving SDG 3 through a climate science lens, including the connection to climate services, and articulates how these play a critical role in achieving the SDG 3 targets.

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) reports that climate-related illnesses, premature deaths, malnutrition in all its forms, and threats to mental health and well-being are increasing (Cissé et al., 2022). The IPCC further states that climate change and extreme events are projected to significantly increase ill health and premature deaths, as well as population exposure to heatwaves and heat-related morbidity and mortality. In addition, the global trend of rapid urbanization puts more people at risk of adverse health outcomes, as existing vulnerabilities to climate change may be aggravated in urban contexts. For example, air pollution is a major urban threat to health and is associated with nearly seven million premature deaths annually ([Air Pollution](#)). Additionally, climate change is further threatening progress towards global universal health coverage (UHC) through adverse health outcomes and healthcare system disruptions (Salas and Jha, 2019; WHO, 2022). Progress towards UHC and climate-resilient health systems are strongly linked, highlighting the importance of striving for UHC to safeguard health and address structural inequalities (Cissé et al., 2022).

Transdisciplinary research, data and tools that can help us to understand, monitor and even predict health risks can be critical contributions to achieving SDG 3 targets such as improving early warning systems for global health risks, fighting communicable and non-communicable diseases, and reducing illnesses from hazardous chemicals and pollution. Other SDG 3 targets, including achieving UHC and increasing health financing, are also fundamental to improving the climate resilience of health systems.

Weather-, climate- and water-related sciences for health and well-being

The integration of health and epidemiological data with weather-, climate- and water-related information underpins robust services for the health sector. These services can inform health policy and prevention to understand, anticipate and monitor climate-sensitive communicable diseases (such as malaria and dengue) and non-communicable diseases (such as cardiovascular diseases and mental health), supporting the corresponding SDG 3 targets.

Using seasonal climate outlooks and extreme weather forecasts, risk assessments and customized tools can help to identify communities at greatest risk, and where interventions can be targeted. Analytical diagnostics can improve evidence about how, when and where climate can affect human exposure to hazardous or beneficial conditions, who is likely to be affected, and what the magnitude, pattern and duration of the exposure and vulnerability are likely to be. Future climate scenarios can be explored to hypothesize how service delivery may perform under diverse climatic conditions and evaluate which health interventions are most likely to be effective at different times of the year (Shumake-Guillemot and Fernandez-Montoya, 2019).

Heat health warning systems (HHWSs) are also an important climate service grounded in weather and climate science (WHO-WMO Joint Office, 2022). An alarming number of preventable deaths and illnesses from extreme heat are occurring as global temperatures continue to rise. For example, a recent epidemiological modelling study found that an additional 60 000 people died across Europe due to extreme heat during the summer of 2022 (Ballester et al., 2023). HHWSs use weather and climate forecasts and predetermined trigger levels of heat stress to provide public advisories and initiate public health interventions. These early warnings reduce health risks before, during and after periods of extreme heat, and contribute to achieving progress towards ensuring healthy lives and well-being for all.

Additionally, while the health sector is increasingly vulnerable to the impacts of climate change, it is also a major contributor to global GHG emissions. In 2022, the health sector was responsible



Photo: Ali Karim AlSari

for 5.2% of global GHG emissions – a 5% increase compared to the previous year (Romanello et al., 2022). GHG emissions from the production and burning of fossil fuels threaten health, particularly among vulnerable communities which are disproportionately affected by air pollution. Hence, there is a clear need to systematically build resilience as well as to reduce GHG emissions across the health system using the best available climate science and services, which will contribute to wider health co-benefits (Health Care Without Harm, 2023).

Climate science and services provide evidence on past, present and future climate risks and health vulnerabilities to identify the most effective options for climate-resilient and low-carbon transitions and investments in health systems. For example, a key tool for increasing the resilience of health systems in the context of climate change is vulnerability and adaptation assessments (VAAs). These studies incorporate historical climate information to establish links with health outcomes and model potential future health burdens using climate projections. The VAAs directly inform national policy and help health authorities to identify climate risks across timescales and the resources needed to prepare their health systems for the impacts of climate change and variability (WHO, 2021).

Looking ahead: challenges and opportunities

Weather-, climate- and water-related sciences play a crucial role in supporting good health and well-being and achieving SDG 3, as well as other SDGs, through enhancing climate services and supporting climate-resilient and low-emission health facilities. However, while 74% of WMO Members provide climate data to

the health sector, only 48% of National Meteorological and Hydrological Services provided tailored climate products and services to the health sector.⁷ This gap between the provision and use of tailored services indicates an opportunity to better translate science into tailored services to support the health sector and achieve SDG 3.

To close this gap, enhancing transdisciplinary collaboration between the weather, climate, water and health science communities will be crucial in development of climate services for the health sector. Effective climate and health adaptation and mitigation strategies require a strong evidence base and tailored climate products and services can enhance the evidence and information available to detect, monitor, predict and manage climate-related health risks. As a result, governments can devise policy options that minimize the effects of weather, climate and water variability and change on public health as well as implement effective mitigation strategies across the health sector. Additionally, health systems need to be strengthened through integrated approaches, including UHC planning that incorporates climate-sensitive considerations, particularly in regions of the world that experience the highest levels of vulnerability to the health impacts of climate change and low levels of UHC (Salas and Jha, 2019).

Overall, safeguarding health and well-being will also depend on the progress towards achieving other SDGs given the strong interdependence between a sustainable and healthy future. The weather, climate and water communities, in partnership with the health community and other stakeholders, can contribute to achieving SDG 3 and achieving good health and well-being for all.

7. The WMO-led high-level State of Climate Services for Health Report will reveal a more in-depth analysis of the global state of health-tailored climate science and services. It will be published in late 2023, ahead of COP 28.



Key messages

- Climate change is exacerbating water-related hazards and altering the Earth’s water cycle, making it increasingly difficult to achieve SDG 6.
- More than 60% of countries face challenges due to inadequate and declining hydrological monitoring capabilities.
- More scientific collaboration, financial investments and data and information exchange will be key for policymakers to make informed decisions to accelerate implementation of SDG 6.

Introduction

In 2023 the United Nations (UN) convened the first UN Water Conference in a generation. This conference provided the international community with a platform to share experiences related to water and sanitation and present game-changing solutions to achieve SDG 6, which aims to ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all. SDG 6 encompasses targets such as achieving universal and equitable access to safe and affordable drinking water, promoting adequate sanitation and hygiene practices, improving water quality, enhancing water-use efficiency, implementing integrated water resources management, and protecting and restoring water-related ecosystems. The SDG 6 Synthesis Report on Water and Sanitation provides the most recent information on progress, summarized in Figure 1, which remains alarmingly off track and, in some regions and countries, is even backsliding (UN-Water, 2023).

Water security is critical for meeting all SDGs and for the systems transitions needed for climate-resilient development (Caretta et al., 2022). However, according to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), global warming will exacerbate water-related hazards and threats to water availability and quality,

making it increasingly difficult to achieve SDG 6 (IPCC, 2022). Floods can disrupt water supply systems, cause damage to sanitation infrastructure, and lead to the contamination of water sources. In addition, more frequent droughts can lead to water scarcity, affecting water availability for people and ecosystems. The latest scientific evidence also indicates that the Earth’s water cycle is changing (Van Dijk et al., 2022). As a result, changes in precipitation patterns, evaporation rates and water storage pose significant challenges for managing water resources sustainably and impact water availability.

Understanding the effects of extreme weather and climate change is crucial to achieving SDG 6. Scientific data provide valuable insights into water availability and quality, making it possible to obtain a comprehensive understanding of water resources and their management. Scientific advancements, particularly related to climate modelling and the understanding of hydrological processes, allow researchers to assess how climate change affects water availability and demand, influences extreme events and alters the distribution of water resources globally and regionally. Additionally, the implementation of new technologies enables the development of data-driven integrated water management practices and policies to support sustainable development. By leveraging scientific research, data and innovation, decision makers and practitioners can develop effective strategies to address water-related issues and achieve SDG 6.

Weather-, climate- and water-related sciences and services for sustainable water management

Weather-, climate- and water-related sciences and services provide essential insights into hydrological conditions and inform decision-making processes to advance progress towards achieving SDG 6. Science allows us to collect and analyse data on various aspects of water resources, including rainfall patterns, river flow, groundwater levels, water quality and aquatic ecosystems. For example, researchers analyse water samples to identify pollutants, assess contamination levels and determine potential risks to human health and the environment. As a result, protective measures and restoration plans can be developed to safeguard water resources. Additionally, hydrological data are fundamental for effective water resources management, as they allow us to identify factors influencing water availability.

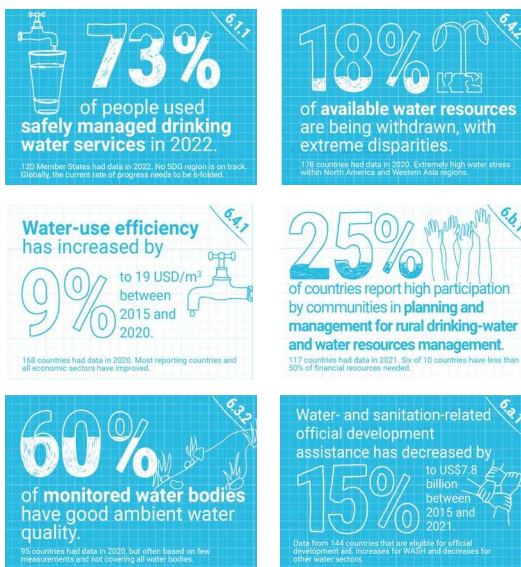


Figure 1. Progress against SDG 6 indicators according to the SDG 6 Synthesis Report on Water and Sanitation. Source: Adapted from UN-Water (2023)

A comparison of average annual streamflows in 2022 with those of the previous 30 reference years shows that more than 50% of basins experienced anomalous (either wetter- or dryer-than-normal) conditions (WMO, in press). Similarly, other components of the hydrological cycle can be monitored by analysing variables such as reservoir levels, groundwater levels, soil moisture and evapotranspiration levels (WMO, in press). Box 1 highlights how hydrological data were used to analyse hydrological conditions at local/national scale with an example from Paraguay.

Scientific and technological advances, such as drones, artificial intelligence (AI) and satellite technology, provide opportunities to enable the development of data-driven integrated water management practices and policies (UNCTAD, 2023). Drones equipped with specialized sensors and cameras enable efficient environmental monitoring, infrastructure inspections and flood assessments. Additionally, real-time satellite data support the monitoring of water consumption, and AI-driven data analytics process vast amounts of hydrological data, identifying patterns

Box 1. Analysing river discharge status and streamflow conditions in Paraguay to support sustainable development

In recent years, Paraguay has experienced economic growth; however, drought, combined with high inflation and the impacts of the COVID-19 pandemic, has led to an increase in extreme poverty (*The World Bank in Paraguay*). In 2021, the Paraguay River experienced an extremely dry year (Naumann et al., 2021, 2023). Its annual exceedance curve dropped below the range of historical data for most of its course and broke the record for the all-time lowest daily discharge value (compared to values in the last 30 years). Modelled and

observed discharge data provided by the Paraguay Dirección de Meteorología e Hidrología and Global Runoff Data Centre database, as well as streamflow observation data were used to analyse hydrological conditions.

Figure 2 presents the mean December–January–February (DJF) 2021 discharge ranking with reference to the historical period (1991–2020) for the Paraguay River (Asunción station). The mean DJF discharge was ranked as normal with reference to the historical period, whereas the June–July–August (JJA) discharge was well below normal. Simulations obtained from global hydrological models (GHMs) also rank JJA discharge as well below normal and DJF discharge as below normal.

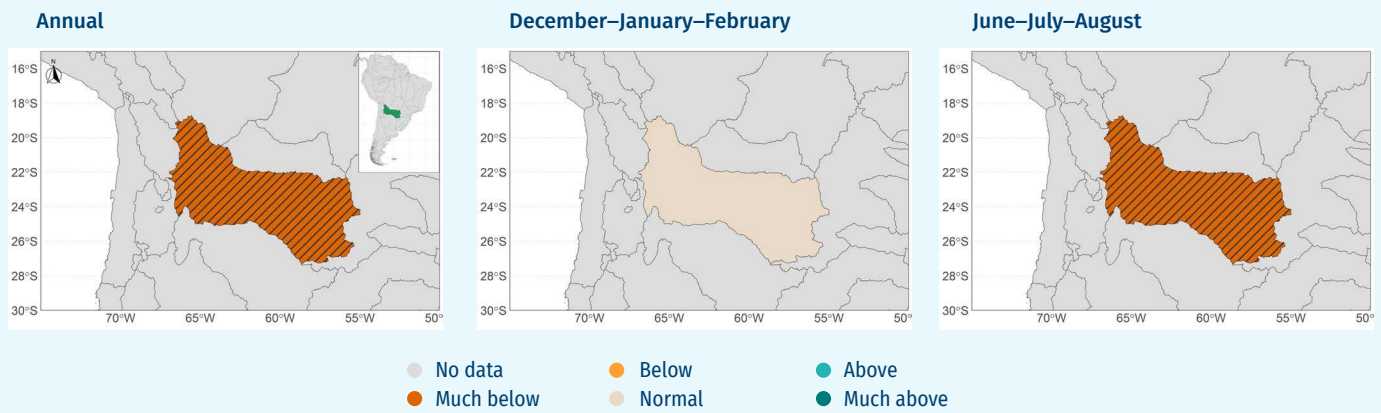


Figure 2. Discharge ranking for 2021 with reference to the historical period (1991–2020) for Paraguay River: (a) mean annual normal; (b) December–January–February; (c) June–July–August. Hatching indicates agreement between the discharge characteristics obtained from observed flow data and GHM simulations. Source: WMO, 2022

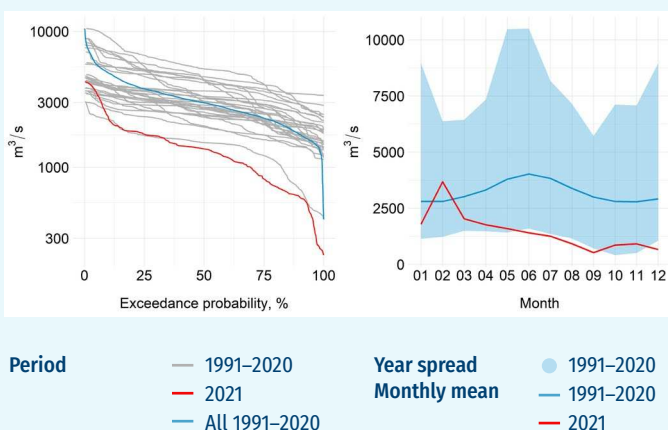


Figure 3 presents exceedance probability curves based on observations for historical years and the year 2021 and mean monthly discharge in 2021 against years of the selected historical period. This hydrological assessment is used by water resource planners and decision makers to support progress towards achieving SDG 6 as well as other SDGs related to the agricultural, environmental, energy and industrial sectors.

Figure 3. Comparison of 2021 streamflow observation data with respect to the reference period 1991–2020 for the Paraguay River, Paraguay: exceedance probability (left); mean monthly discharge (right). Source: WMO, 2022

SDG 6

CLEAN WATER AND SANITATION

and anomalies for informed decision-making and improved forecasting. Precision agriculture benefits from drones and AI by optimizing irrigation and fertilizer application. Water quality assessment, pollution detection and leakage management are made more effective with AI-enabled drone technologies. These advancements empower scientists and policymakers to detect trends and identify potential challenges and opportunities, contributing to a more sustainable use of water resources.

Science is also instrumental in studying the links between climate change and water resources. Researchers analyse historical climate information in tandem with models to project future climate change, including changes in the hydrological conditions. This information helps assess how these changes might affect water availability and uses, increase the frequency of extreme hydrological events, such as floods and droughts, and alter the distribution of water resources globally and regionally. By running multiple simulations under different scenarios, researchers explore different management strategies and assess their effectiveness before implementation. Decision makers can use this information to implement water-dependent climate change adaptation and mitigation measures, develop climate-resilient water management strategies, prepare for extreme weather events and optimize water allocation during periods of water scarcity. However, this scientific evidence must also integrate local and traditional knowledge, including local weather conditions, water availability and culture, which improve water resources management, as highlighted in Box 2.

Looking ahead: challenges and opportunities

The UN 2023 Water Conference reiterated the importance of science and innovation for strengthening the water sector and called for more scientific collaboration and financial investments, and unrestricted data and information exchange to achieve SDG 6. Moving forward, it will be crucial to address the gaps and challenges in how weather-, climate- and water-related sciences support informed decision-making and the implementation of effective policies. For example, the lack of timely, accessible, available and verified hydrological data is a significant challenge, with more than 60% of countries facing inadequate and declining hydrological monitoring capabilities (2021 *State of Climate Services: Water* (WMO-No. 1278)). This lack of data results in knowledge gaps and ineffective policymaking, and limits progress towards achieving SDG 6. Efforts to enhance Earth system observations, monitoring and research efforts are vital for better forecasting of extreme hydrological events. Reliable and high-resolution weather, climate and water data must be collected, analysed and freely shared globally. Developing early warning systems for hydrological hazards will also be crucial for minimizing the impact of climate change on communities.

Addressing these gaps and challenges will require a holistic and collaborative effort involving governments, international

organizations, academia, research institutions and the private sector. Investing in research, education, technology and capacity-building presents an opportunity to overcome these challenges in support of achieving SDG 6. Advancements across the science-policy-society interface are needed to maximize positive outcomes. Taking a holistic approach that considers not only science but also the local context in which it is implemented could be catalytic in delivering on-the-ground impact and achieving SDG 6.



Photo: Ab Rashid, UNDP Climate

Box 2. Harnessing the traditional knowledge of women for water security

The impacts of a changing climate set back progress towards achieving SDG 6 and disproportionately impact women and girls. An estimated 380 million women and girls in 26 countries are living with high or critical water stress, and by 2030 the number is projected to rise to 471 million in 29 countries. Efforts to provide communities with the latest information on weather and climate science can be crucial in supporting achievement of SDG 6 as well as women's empowerment, but only if women are fully included in such processes (Azcona et al., 2023).

Indigenous, rural and coastal women, in particular, are highly vulnerable to water stress. In the Pyanj river basin of Tajikistan, for example, women and girls find it increasingly difficult to collect water due to higher temperatures and reduced rainfall and glacier snow. However, the knowledge of women also plays a transformative role in addressing both the water crisis and food insecurity. In many Indigenous communities, women hold traditional knowledge related to local culture, water availability and forecasting weather conditions, which improves management of drinking water supplies, food production and energy security and enhances climate resilience. Therefore, it is crucial for the scientific evidence to integrate the traditional knowledge of women to support achievement of SDG 6 (Azcona et al., 2023).



SDG 7 AFFORDABLE AND CLEAN ENERGY



Key messages

- Extreme weather events and anthropogenic climate change threaten the achievement of SDG 7 by changing energy supply capability and demand profiles, making the clean energy transition more unpredictable and potentially more expensive.
- More timely and accurate weather-, climate- and water-related data, science and services support SDG 7 achievement by improving energy planning and operations.
- Challenges remain in data quality, limited availability of data types and tools, restricted data access, and low affordability of data and services.

Introduction

SDG 7 aims to provide access to clean and affordable energy to all, ensuring universal access to affordable, reliable and modern energy services in electricity and clean cooking, increasing the share of renewable energy in the global energy mix, and improving energy efficiency (**Ensure Access to Affordable, Reliable, Sustainable and Modern Energy**). Clean and affordable energy is vital for the achievement of many SDGs, both directly and indirectly, as shown in Box 1.

Achieving SDG 7 relies on affordable, renewable, clean and efficient energy, which requires accurate and timely weather, climate and water data to lower costs and risks for decision makers. Climate change makes renewable energy outputs more unpredictable, increasing risks for investment decisions and energy system management/operation. Energy demand characteristics are also significantly impacted by weather and climate through, for example, changing temperature patterns which can accelerate the needs for affordable and efficient cooling.

Box 1. Role of SDG 7 in achieving the SDGs

SDG 7 is crucial for the achievement of many SDGs (Figure 1). Clean and affordable energy enables productive and sustainable agriculture and food production (SDG 2: Zero Hunger), provides electricity to social infrastructure such as healthcare, educational and water/sanitation facilities (SDG 3: Good Health and Well-being, SDG 4: Quality Education, SDG 6: Clean Water and Sanitation) and supports responsible industrial and service production (SDG 12: Responsible Consumption and Production). SDG 7 also supports diverse economic activities, leading to economic growth, and provides decent jobs in the clean energy sector (SDG 8: Decent Work and Economic Growth).

Additionally, sustainable industrialization requires reliable energy systems with limited environmental impacts (SDG 9: Industry, Innovation and Infrastructure) and growing cities need large amounts of affordable and clean energy (SDG 11: Sustainable Cities and Communities). Clean energy is also essential for reducing GHG emissions (SDG 13: Climate Action) and provides substantial environmental benefits by reducing energy-related environmental hazards and pollution (SDG 14: Life Below Water, SDG 15: Life on Land). Indirectly, SDG 7 also supports the reduction of poverty and gender equality (SDG 1: No Poverty, SDG 5: Gender Equality) by increasing productivity and substituting for labour-intensive, time-consuming tasks, especially those borne by women and children.

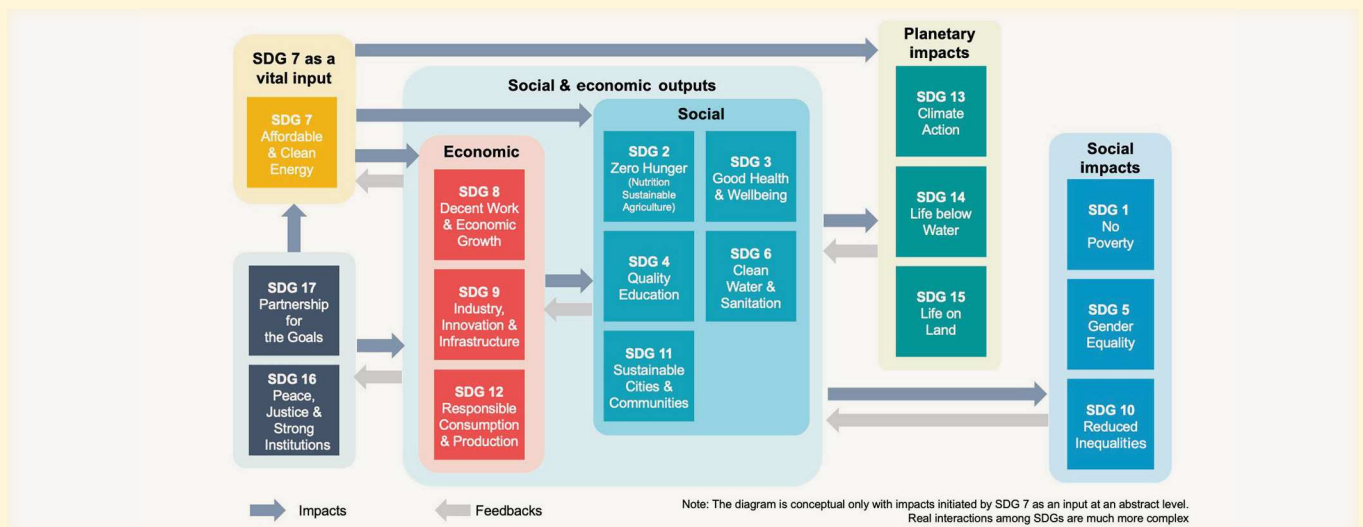


Figure 1. A conceptual diagram of impacts and feedbacks between SDG 7 and other SDGs. Source: SEforALL

Weather-, climate- and water-related sciences for sustainable energy

Weather-, climate- and water-related sciences are essential for supporting sustainable energy, including planning and development of renewable energy and operation and management of energy systems.

Planning and development

Climate change-induced changes in weather, climate, water and feedstock availability, including predicted changes in long-term wind speeds and patterns (IPCC, 2021) and wave energy outputs (Reguero et al., 2019), impact energy generation by renewable resources (solar, wind, marine, hydroelectric, geothermal and bioenergy) (Bloomfield et al., 2016). Therefore, weather, climate and water data are essential to inform renewable energy infrastructure and project planning and development. Information on renewable energy resources, such as solar radiation, wind speed and biofuel resources, can be built into national and international atlas tools and support investment decisions by identifying strategic locations for renewable power and grid development (some examples can be found in [Global Atlas](#); [Technical Assessment Services](#); [IRENA and FAO's Collaboration Drives Better Decision-making for Sustainable Bioenergy Development](#); [Delivering a Low Carbon Future](#); [Round 4 Project Map](#); ENTSO-E, 2010, 2020). More site-specific local weather and climate data and geospatial mapping tools have been used to analyse project feasibility and investment decisions ([Bioenergy Simulator](#) and [SolarCity Simulator](#)). Such information and data tools are also vital for independent small-scale energy systems (such as mini-grids

and solar home systems) to provide affordable energy access where large infrastructure cannot reach.

Weather and climate also impact energy demand, which influences planning and development (Figure 2). Hot/humid climate and weather lead to summer energy peaks as demand for cooling increases, while dry and temperate/continental climates experience peak heating demand in winter. High-resolution weather and climate data and forecasts can help inform energy planning based on projected demand. As global temperatures continue to rise, information on temperature and humidity is crucial to provide insights into energy demand for cooling (SEforALL, 2020a, 2021), which has significant implications for human health (IPCC, 2021, 2023a, 2023b).

Ambitious and credible energy planning, using geographical data, supports energy transitions and adaptation, and effective allocation of resources. Integrated Energy Planning identifies priority geographic areas for energy access with the least-cost technology by using geospatial tools. Renewable energy resource data are considered for efficient integration of diverse supply solutions, together with demand-side factors like affordability, in order to provide a national central framework for stakeholders to coordinate all SDG 7 activities cost effectively (SEforALL, 2020b; [Universal Integrated Energy Planning](#)). Such a planning tool can be expanded to coordinate other SDG activities with those relating to SDG 7. Energy system transition and climate change adaptation have strong synergies with few trade-offs (IPCC, 2023a, 2023b), and robust weather-, climate- and water-related sciences and data can support these synergies by enabling adjustment of plans, more resilient energy system development and better risk management.

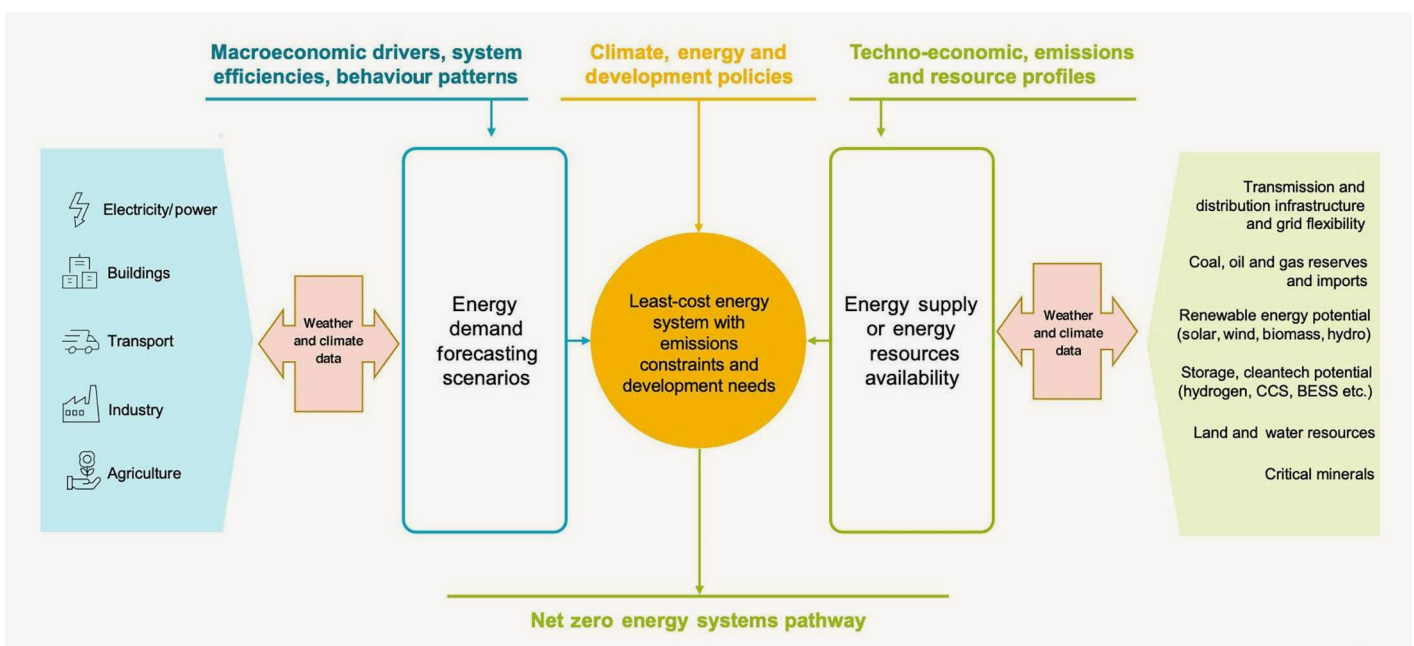


Figure 2. Role of weather/climate data in long-term energy transition planning. Note: BESS – battery energy storage systems, CCS – carbon capture and storage. Source: SEforALL

Operations and management

The day-to-day operation of energy systems is heavily dependent on weather and climate data across timescales, from minutes to years, to manage supply and demand. This is particularly true for variable renewable energy (VRE), or energy supply that is variable due to fluctuating weather conditions (for example, wind and solar energy), as well as thermal power plants, performance of which can be negatively impacted by high temperatures. Thermal power plants also require cooling, which often uses large amounts of water, the availability of which is strongly affected by climate change. Energy demand and operational optimization are similarly dependent on weather and climate data and information. For example, many industrial processes require stable temperatures and humidities under varying weather conditions, and therefore there are alterations in the energy demand to regulate these variables.

The potential of demand-side management (DSM) can be optimized by artificial intelligence (AI) with higher-resolution weather forecasts and big data (see Box 2) on building occupancy, usage, energy prices and consumer patterns (IRENA, 2019). DSM reduces daily energy consumption, monthly energy bills and long-term energy investment needs, making sustainable energy more viable for suppliers and more affordable for consumers.

Precise supply–demand forecasts enhance the operations and management and increase the profitability of electricity supply businesses by reducing excess or shortage of supply, while contributing to grid stability by informing grid operators accurately about flexibility needs to compensate for fluctuating

VRE inputs. Figure 3 shows how weather data (the first stage of power generation forecast) and renewable resource data (the second stage) are crucial for accurate supply forecast and system operation. Improved weather forecasting abilities and more robust data will lead to enhanced energy supply–demand forecasts, reducing risks and costs across the energy sector and optimizing the operation of VRE.

Looking ahead: challenges and opportunities

Weather-, climate- and water-related sciences are crucial to achieving SDG 7 by 2030 and will become increasingly important in the context of climate change with intensifying extreme weather and compound events, which disproportionately impact low-income populations (IPCC, 2021, 2023a, 2023b; [World Weather & Climate Extremes Archive](#)). However, challenges remain, particularly related to data quality, accessibility, transmission, resolution and affordability. For example, more granular geospatial and temporal data enable enhanced modelling and analysis for sustainable energy systems in low-income regions and at subnational levels. However, the availability of analytical tools, expertise and large processing capabilities for generating and using higher-resolution data remains a significant challenge (*Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition* (WMO-No. 1312)). Additionally, data quality needs (for example, reliability, transparency, consistency, granularity, accuracy and usability) vary based on the intended use of the planning or modelling exercises. Access to data also remains a challenge, particularly in lower-income regions. Where open data sources do exist, they often lack higher resolutions and desired coverage, and commercial dataset access is frequently limited due to licensing and confidentiality requirements.

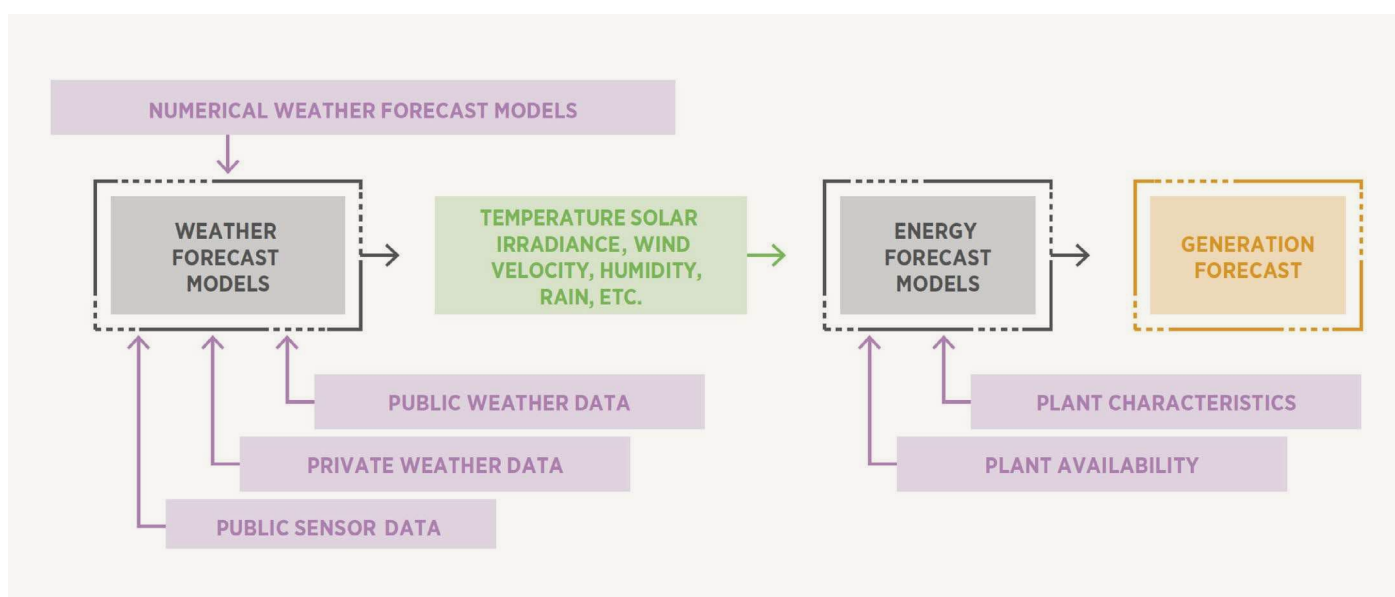


Figure 3. From weather to power generation forecast. Source: IRENA, 2020

SDG 7

AFFORDABLE AND CLEAN ENERGY

To address these challenges, collaboration is essential, as clean energy transition requires a new paradigm for more effective information exchange between weather, climate and water specialists and energy-sector stakeholders. Such interaction can ensure more reliable and fit-for-purpose data and information ([State of Climate Services Report](#)). Additionally, fortifying open data sources and attempting to make commercial data more accessible to a broader community, especially for public planning purposes, are important (SEforALL, 2020b; [Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition](#) (WMO-No. 1312)). Advancing scientific research and innovation, such as the application of AI to support weather forecasting for renewable energy (Box 2), will also be crucial to achieving clean and affordable energy for all.

Box 2. Enhanced energy system operation and decision-making with big data and artificial intelligence

Advanced weather forecasting and predictive maintenance (averting unexpected costly failure or downtime by predicting problems and implementing maintenance in advance) are examples of AI applications. These applications improve VRE operation by utilizing supercomputers and big data (very large data sets containing patterns that can be revealed through computer analysis) to blend multiple sources of local, real-time and/or historical weather information. Such data include high-resolution numerical weather prediction, nowcasting based on meteorological observations (in situ measurements and remotely sensed data) and integration of real-time generation information ([Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition](#) (WMO-No. 1312)).

The operational, economic and social benefits of combining weather and climate big data with AI are clear. Emerging examples (IRENA, 2020; [Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition](#) (WMO-No. 1312)) include improved wind and solar generation, demand forecast and DSM forecast. Besides maintaining grid stability/reliability and improving DSM and efficiency, this approach supports optimizing energy storage and market operation (for example, optimizing economic load dispatch) and market design improvement (IRENA, 2019).

Advancements in remote sensing and AI-supported analytics such as machine learning are increasingly contributing to enhancement of data, increasing the levels of granularity across a wider set of geographies (SEforALL, 2020b). With more technological advancement, AI and big data are expected to further enhance decision-making, planning, condition monitoring, inspections, certifications and supply chain optimization, which will generally increase the efficiency of energy systems (IRENA, 2019).



Photo: Pixabay



Key messages

- Cities are responsible for a high proportion of global greenhouse gas (GHG) emissions and are highly vulnerable to the impacts of climate change and extreme weather events, which threaten the achievement of SDG 11.
- Integrated urban weather, climate, water and environmental services, grounded in best-available science, are helping cities to achieve SDG 11.
- Observations, high-resolution forecasting models and multi-hazard early warning systems are the fundamental basis for integrated urban services.

Introduction

SDG 11 strives to make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable. Today, more than half of the global population lives in cities, and by 2050, this number is expected to grow by 2.2 billion people, raising the urban share to 68% of the global population (UN Habitat, 2022). Cities are hubs of innovation and economic growth, contributing more than 80% of global gross domestic product. However, urban-based activities also generate a high proportion of global GHG emissions, with cities responsible for around 70% of global emissions in 2020 (IPCC, 2023a, 2023b). In addition, due to their high concentration of people and infrastructure, cities are highly vulnerable to the impacts of climate change and extreme weather events, including, for example, rising sea levels and storm surges, heat waves, extreme precipitation and flooding, drought and water scarcity, and air pollution (IPCC, 2023a, 2023b). These risks are amplified for the approximately one billion urban dwellers who live in informal settlements, lack essential infrastructure and services, and are at high risk from extreme weather events (UNSD, 2019).

To achieve SDG 11 and support the implementation of the New Urban Agenda, the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction and other international agreements, it is crucial to integrate urban weather, climate, water and environmental sciences and services. Integrated urban services improve the sustainability and resiliency of cities and provide benefits to multiple users, city stakeholders and inhabitants. They can also assist cities in making good use of dense observation networks, high-resolution forecasts across timescales, multi-hazard early warning systems and climate services for risk management and adaptation strategies as well as improve understanding of public perception within a framework that promotes achievement of SDG 11 (*WMO Guidelines on Multi-hazard Impact-based Forecast and Warning Services* (WMO-No. 1150); *Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services, Volume I: Concept and Methodology* and *Volume II: Demonstration Cities* (WMO-No. 1234)).

Weather-, climate- and water-related sciences for urban activities

The core principle of integrated urban services is to maximize the value of scientific knowledge for cities to become resilient and sustainable. Weather-, climate- and water-related sciences are the fundamental basis for integrated urban services, which support cities in responding to extreme weather events, increasing resilience to climate change and monitoring environmental conditions, such as air quality.

Responding to extreme weather

Urban areas are highly vulnerable to extreme weather events, such as strong wind and heavy rainfall, hail and snowfall. These high-impact weather events are difficult to predict accurately because small- and medium-scale weather systems are influenced by many factors that are difficult to resolve in models. Therefore, integrated urban observation networks designed with high-resolution observations and measurements from satellites, radars, ground stations, low-cost sensors and citizen observations (connected cars, mobile phones and other sources) are essential. In addition, urban data, including geomorphological, environmental and socioeconomic data, are also vital to support urban analyses and model applications, such as high-resolution meteorological and hydrological models, which are crucial for integrated urban services (*Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services, Volume I: Concept and Methodology* (WMO-No. 1234)). These models can produce high-resolution forecasting products for various urban applications and significantly enhance impact-based forecasting and multi-hazard early warning services (Box 1) (*Good Practices on High-resolution Modeling for Integrated Urban Services*).

Climate responsive design and planning

Climate change has led to increasing heatwaves and more frequent and intense droughts and floods that disproportionately impact the urban poor and threaten public health and well-being as well as the supply of water and energy. However, properly integrating climate science into

SDG 11
SUSTAINABLE CITIES AND COMMUNITIES

urban planning and evaluating the impact of climate change on cities' infrastructures helps cities become more resilient and sustainable in a changing environment.

For example, rapidly developing numerical modelling, remote sensing and geographical information system (GIS) technologies have been applied to develop urban climate maps, known as UCMaps (Ng, 2009a, 2009b; Ng and Ren, 2015; He et al., 2015;

Liu et al., 2016). UCMaps are developed at various scales to guide local urban planning and design practices ranging from urban master planning to regional planning, as well as at the scale of detailed district and building site design (Ren et al., 2010, 2018). The urban climate services from the rapidly growing cities, especially in lower-income regions, are in great demand, so the rapid transfer of technology and knowledge to make these cities more resilient is imperative.

Box 1. Early warnings for safe and resilient cities

Shenzhen, China is implementing a pilot project that demonstrates how public-private engagement can improve early warning services in megacities (**Pilot Project on Public-Private Engagement for Smart Meteorological Service in Mega-Cities in Regional Association II**). Low-cost, multifunctional smart poles increase the density of weather observations in urban built-up areas, and high-resolution models, combined with artificial intelligence (AI) technologies,

provide rainfall nowcasting (resolution 1 km, updated every 6 minutes). To offer effective early warnings and emergency responses to urban stakeholders throughout extreme weather events, a progressive meteorological forecasting mechanism called "31631" was established (Figure 1). Through an effective public-private partnership with telecommunication companies, targeted early warning messages can be sent to people in warning-affected areas very quickly. For example, warning messages can be delivered to mobile phone users in a disaster-stricken area in 5-10 minutes.

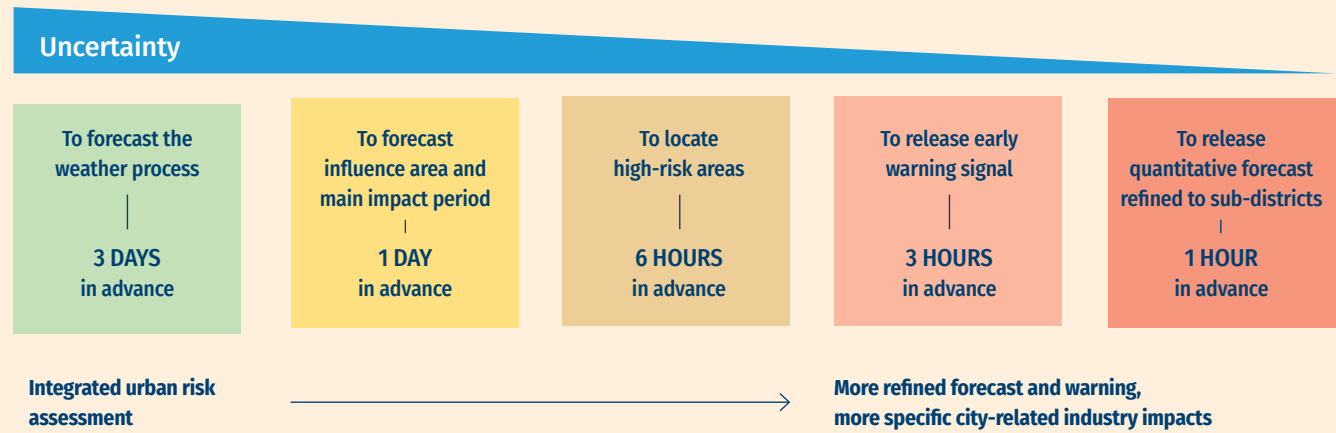


Figure 1. "31631" progressive meteorological forecasting and meteorological service mechanism applied to extreme weather events (typhoon, heavy rainstorm, etc.). Source: Xiaolin Wei, Meteorological Bureau of Shenzhen Municipality, China Meteorological Administration (CMA)

Environmental monitoring

Scientific advances in meteorology and in monitoring atmospheric composition and air quality on an urban scale are important for the environment and human health. However, challenges remain, including connecting various physical scales in air quality modelling, the need for ground-based and remote sensing instruments, the lack of effective mitigation and adaptation strategies to cope with the impacts of air pollution on urban areas, and uncertainties in emissions from diffuse sources and particulate matter chemical components.

To address these challenges, a multiscale coupled modelling system has recently been developed to predict street-, urban- and regional-scale air quality across Delhi, India (Figure 2) as part of a joint India-United Kingdom project called PROMOTE (funded by the UK Natural Environment Research Council and Ministry of Earth Sciences, India). These detailed high-resolution model predictions aid the development of mitigation strategies for reducing population exposure to air pollutants such as fine particulate matter (PM2.5). The project has emphasized that both local and regional contributions to air quality need to be understood and quantified to arrive at more robust and effective mitigation options to improve air quality in Delhi.

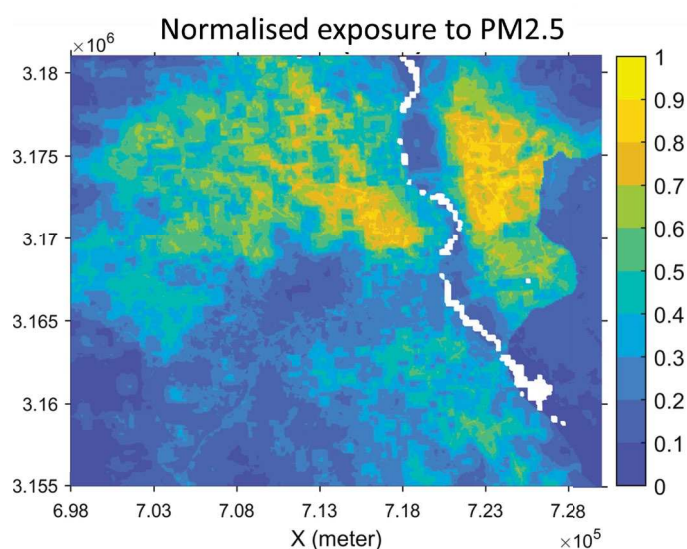


Figure 2. Example of normalized population exposure to PM2.5 predicted with the coupled WRF-Chem-OSCAR modelling system for Delhi, India. Source: PROMOTE project

Looking ahead: challenges and opportunities

Rapid urban sprawl, urbanization and population growth, extreme weather events, climate change, environmental and water pollution, and anthropogenic factors will continue to threaten urban safety, resilience and sustainability. Additionally, data gaps and a lack of effective multi-stakeholder (transport, energy, health, tourism, etc.) partnership and user engagement render cities vulnerable.

Weather-, climate- and water-related sciences and technology, as well as effective governance and planning at the local level and more cross-discipline collaborations between public and private sectors, can help address these challenges to achieve SDG 11. To better understand the complexity, diversity and risks in cities, it is important to promote the science-based methodologies of integrated urban services, exchange urban data freely and without restriction, expand observation networks and conduct further research on an urban scale. Impact-based environmental and hydrometeorological forecasting and climate change projections are crucial and there is a need for innovative modelling approaches at the urban level (Box 2). Combined with results-based city planning, infrastructure construction and management, tailor-made weather services can enhance human settlements by improving cities' resilience and delivering co-benefits for sustainable urban development, including improved public health, safety and well-being in cities.

Box 2. Emerging urban-related weather and climate research in Paris

The Paris region has been chosen as an area of interest for emerging weather and climate research. For example, the **Paris 2024 Olympic Games Research Demonstration Project** of the World Weather Research Programme, supported by the Global Atmosphere Watch Urban Research Meteorology and Environment project, focuses on improving weather forecasting at a 100-metre (or finer) resolution in urban areas to enhance urban planning and decision-making. Observational data from the experimental campaign PANAME (Figure 3) are complemented by data from numerical atmospheric models to analyse physical processes in the atmosphere and assess the impacts of weather events, such as thunderstorms, on cities. This information will be used by weather forecasters to help Olympic planners for scheduling and planning purposes and by city administrators to facilitate climate change adaptation planning.

Additionally, the World Climate Research Programme's **CORDEX Urban Environments and Regional Climate Change flagship pilot study** aims to understand the effects of urban areas on the regional climate and the impact of regional climate change on cities. Cities play a fundamental role in climate at local scales through modification of heat and moisture fluxes and local atmospheric chemistry and composition. CORDEX's work coordinating multidecadal experiments with urbanized regional climate models at kilometric scale will improve our understanding of climate change impacts on cities such as Paris and inform adaptation and mitigation action.

These two projects open complementary approaches for weather and climate studies, contributing to seamless and integrated urban weather, environmental and climate services that strengthen city planning and management.



Figure 3. Launch of meteorological balloon in Paris during PANAME experimental campaign.



Key messages

- The accumulation of heat in the climate system resulting from human emissions of greenhouse gases (GHGs) has caused widespread and rapid changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere, which threaten to reverse progress towards achieving all the SDGs.
- Weather-, climate- and water-related science underpin ambitious climate action and the mobilization of climate finance, particularly in lower-income countries.
- Stakeholder engagement, through means such as citizen science, provides an opportunity to strengthen weather-, climate- and water-related sciences to advance progress towards achieving SDG 13.

Introduction

SDG 13 urges ambitious action to combat climate change and its impacts, including mitigating GHG emissions, adapting to climate impacts and mobilizing climate finance. Climate change has resulted in widespread and rapid changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere, affecting many weather and climate extremes and leading to adverse impacts across the

world (IPCC, 2023a, 2023b). These impacts increasingly threaten sustainable development and achievement of all the SDGs. At the same time, development activities that are not sustainable may contribute to an increase in GHG emissions, jeopardizing progress towards achieving the goals of the Paris Agreement.

From the outset, the Paris Agreement recognizes the crucial role of science, stating that Parties to the Agreement recognize “the

Box 1. Supporting mitigation action through the Global Greenhouse Gas Watch (GGGW)

The GGGW is a new initiative endorsed by the Nineteenth World Meteorological Congress in May 2023 that will provide near-real-time information about greenhouse gas fluxes over the entire globe in support of climate change mitigation action (*WMO Global Greenhouse Gas Watch*). This initiative builds on and expands WMO’s long-standing activities in GHG monitoring, implemented as part of the Global Atmosphere Watch, and via its Integrated Global Greenhouse Gas Information System. The spatially-resolved flux estimates are generated by combining Earth observations, prior information about the fluxes from the

terrestrial biosphere, oceans and anthropogenic emissions, and advanced modelling (Figure 1). The GGGW will establish an internationally coordinated approach to observing network design, and to acquisition, international exchange and use of the resulting observations. It will engage and closely collaborate with both the broader scientific community and other United Nations agencies and international coordination entities. This systematic monitoring is crucial to improving our understanding of GHG budgets, reducing uncertainties, and enhancing the design and assessment of mitigation action. As a result, this initiative will contribute to enhanced transparency and accountability and provide input to the Paris Agreement’s global stocktake.

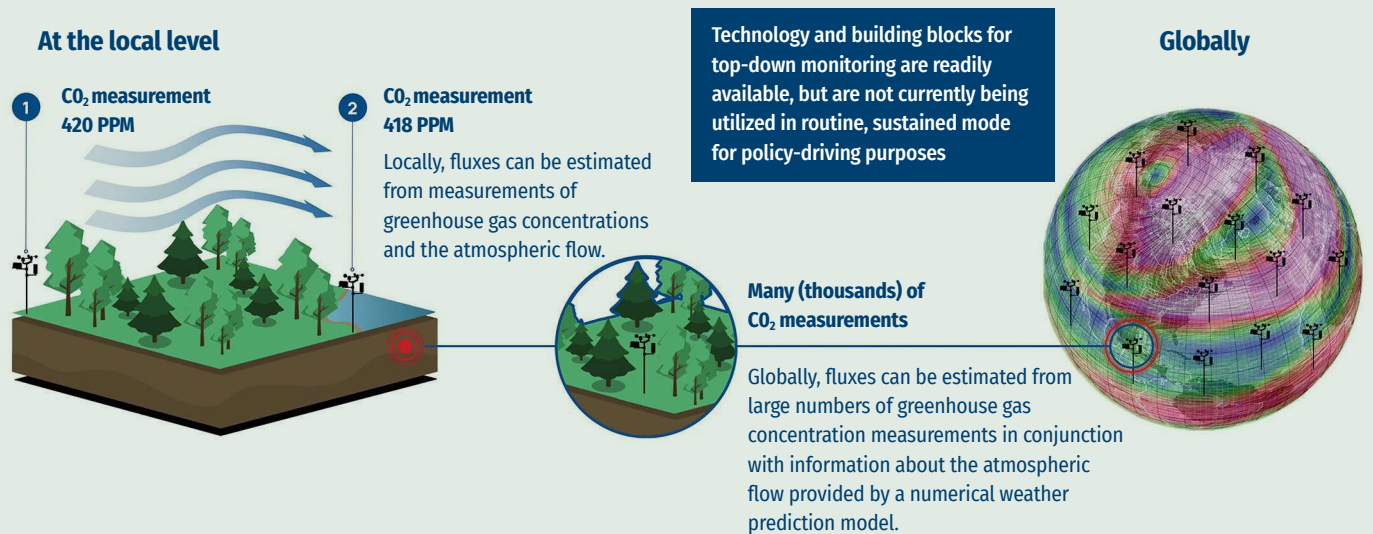


Figure 1. Estimation of greenhouse gas fluxes via the systematic comparison between model-predicted and observed GHG concentrations. The quality of the flux estimates will depend on the quality of the atmospheric transport fields and the observational data coverage.

Note: PPM – parts per million.

need for an effective and progressive response to the urgent threat of climate change on the basis of the best available scientific knowledge". Past, present and projected future climate information is necessary to understand how climate change affects a region, sector or community. Therefore, this information must be taken into consideration when planning and designing investments that reduce GHG emissions, increase adaptive capacity and resilience of vulnerable communities and address losses and damages. While challenges remain, as climate science continues to advance, there are opportunities to enhance climate action in support of achieving the SDGs.

Weather-, climate- and water-related sciences for climate action

Weather, climate and water science is fundamental in understanding how to reduce anthropogenic emissions of GHGs to limit global temperature rise to well below 2 °C above preindustrial levels and to pursue efforts to limit temperature rise to 1.5 °C. Under the Paris Agreement, countries are required to submit nationally determined contributions that outline mitigation action in line with this goal and regularly report on progress. Yet, the rise in global CO₂ concentrations has been steadily accelerating over the last 60 years, and there has been very limited progress in reducing the emissions gap for 2030 (WMO Global Greenhouse Gas Watch; UNEP, 2022). However, advances in systematic monitoring of atmospheric GHG concentrations and fluxes (Box 1) can provide actionable information to enhance mitigation action and help us get on track to meet the Paris Agreement's goals.

Weather-, climate- and water-related sciences also contribute to climate change adaptation, helping to minimize impacts, losses and damages associated with climate-related hazards or exploit opportunities arising from changing climate conditions. The Global Goal on Adaptation, established under the Paris Agreement and in the process of being defined by the Parties, aims to enhance adaptation and contribute to sustainable development based on the best available science through the implementation of national adaptation plans. However, effective adaptation is highly localized, which requires reliable, high-resolution and timely weather, climate and water information to support adaptation decision-making. Context-specific climate data, such as soil moisture data for adaptation in the agricultural sector, as well as data on high-impact hydrometeorological events, such as droughts, floods, tropical cyclones and heatwaves, help identify potential climate action options (*Developing the Climate Science Information for Climate Action* (WMO-No. 1287)). Additionally, global and regional climate models are important tools that help us understand how the climate may change in the future and identify appropriate adaptation actions.

Weather-, climate- and water-related sciences also provide an evidence-based approach to mobilize finance for ambitious

Box 2. Climate science information for climate action

The Green Climate Fund (GCF) and WMO have joined together to provide the international community with new climate information and tools for interpreting the latest climate science data (Figure 2). The Climate Science Information for Climate Action initiative includes resources that provide technical guidance, case studies and two online platforms: the **Climate Information Platform**, which provides access to global climate projections, and **Climpact**, which calculates over 70 indices associated with climate impacts, such as historical daily temperature and precipitation (*Climate Science Information for Climate Action*). These tools and resources help translate science into technical guidance to inform policymaking and climate finance investments, particularly for adaptation, including early warning.

For example, the scientific information these tools provide is crucial for developing a robust climate rationale that underpins GCF projects and demonstrates clear climate impact. A project titled "Enhancing Early Warning Systems to Build Greater Resilience to Hydro-Meteorological Hazards in Timor-Leste" is analysing historical climate information on temperature, rainfall, sea-level rise and extreme events and considering how these variables may change in the future based on climate projections (GCF, 2021). With a strong scientific foundation, this project will transform Timor-Leste's climate information capabilities and early warning systems. Additionally, it will provide essential high-resolution data and information needed to underpin science-based adaptation action and contribute to achieving Early Warnings for All.

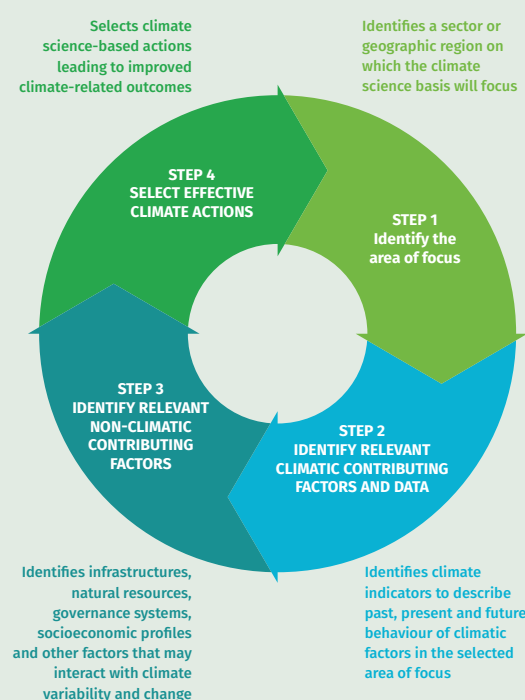


Figure 2. A four-step methodology for developing climate science information for climate action

SDG 13 CLIMATE ACTION

climate action, particularly in lower-income countries that lack financial resources. For example, climate science data and information help increase certainty, enhance planning, and mitigate potential risks to ensure adaptation and mitigation projects are cost-effective, generate benefits for vulnerable populations and contribute to sustainable development (*Developing the Climate Science Information for Climate Action* (WMO-No. 1287)). As a result, these investments are more attractive to funders, including multilateral financing institutions such as the Green Climate Fund (GCF), and the private sector (Box 2). Climate science also ensures that climate finance supports climate action as opposed to other non-climate-related development needs or priorities. However, most climate-related projects have co-benefits that contribute to sustainable development, disaster risk reduction and other national priorities (*Developing the Climate Science Information for Climate Action* (WMO-No. 1287)).

Looking ahead: challenges and opportunities

The science is clear – we are far off track from meeting the goals of the Paris Agreement, undermining progress towards achieving SDG 13 and all the other SDGs. Urgent and ambitious climate action is needed to mitigate GHG emissions and adapt to the impacts of climate change. Weather-, climate- and water-related sciences play an important role in underpinning ambitious climate action, including enhancing mitigation efforts, enabling adaptation and supporting the mobilization of climate finance. However, adaptation at local scales is hindered by insufficient climate models that lack the spatial resolution necessary for local-level decision-making. Additionally, lower-income countries often lack adequate climate information and the scientific capacity to use it effectively, limiting progress towards achieving SDG 13 (*Developing the Climate Science Information for Climate Action* (WMO-No. 1287)).

Thanks to scientific research initiatives, enormous progress has been made in advancing global and regional climate modelling to better understand and predict how a warming world will affect society. However, there is an opportunity to scale up efforts to improve climate modelling to deliver robust, reliable and actionable information through enhanced observations and understanding of climate processes. Advances in high-resolution climate modelling, in particular, can better predict future climate changes at the local level and contribute to achieving SDG 13 by supporting ambitious adaptation action and reducing the risk of maladaptation. Additionally, as climate science advances, training, education and stakeholder engagement will be increasingly important to ensure new data, knowledge and technologies can be used effectively. One way to enhance stakeholder engagement is to involve the general public in scientific research through citizen science (Box 3), which is used to select the most relevant data for local contexts and integrates local, Indigenous and contextual information. In turn, this engagement enhances trust and builds capacity

to effectively use weather, climate and water science, data and information in a local context.

The Paris Agreement goals are in danger of slipping out of reach. As a result, urgent and ambitious mitigation action is essential to achieve not only SDG 13 but all SDGs, which are greatly impacted by climate change. When acted upon, weather-, climate- and water-related sciences can underpin climate action and help to safeguard economic and human development in support of achieving the SDGs.

Box 3. Engaging local communities in Ghana through citizen science

A lack of weather stations in Ghana limits data observations, resulting in inaccurate weather forecasts. Furthermore, delays in media reports and warnings have degraded public faith in designated organizations, creating a significant communication gap. A citizen science project was launched by the World Weather Research Programme, through its HIWeather flagship activity, to explore the impact of users' feedback on weather forecast evaluation in Ghana (Figure 3). This project used a WhatsApp platform called "Let's Talk Weather", open to those interested in weather forecasting and verification (*Let's Talk Weather in Ghana*). Citizen scientists' feedback data were collected to evaluate and verify the weather forecasts. People sent their observations with photos to this platform, after which they were analysed to compare information regarding the occurrence, distribution and intensity of the rainfall. The project not only improved forecast evaluation and verification but also encouraged the public's willingness to learn and engage with the platform. Therefore, through engagement and education, the project bridged the gap between scientists and the public, strengthening people's trust in meteorological agencies.



Figure 3. A group of farmers participating in a citizen science activity in Ghana.

Photo: WMO



Key messages

- Climate- and human-related impacts are threatening our oceans, affecting marine ecosystems and the communities that rely on them for food and livelihood security.
- Climate-related ocean science enhances our understanding of climate impacts on the ocean and contributes to strategies for sustainably managing and protecting marine ecosystems.
- The United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development provides an unprecedented opportunity to mobilize the scientific community and accelerate ocean-related science.

Introduction

SDG 14 calls for the conservation and sustainable use of the ocean, seas and marine resources for sustainable development. The ocean represents the largest biome on the globe, contributing essential resources and services in support of human health and nutrition as well as cultural and spiritual connection to nature. Inclusion of SDG 14 in the 2030 Agenda for Sustainable Development demonstrates recognition of the ocean's critical role in human well-being and its contribution to achievement of all the SDGs.

The ocean, with its diverse ecosystems and prosperous marine life, and the key services it provides are under heightened pressure from diverse threats, including the impacts of climate change. Climate-related impacts on the global ocean and its coastal waters include events that occur incrementally over a long duration, such as ocean warming, acidification, deoxygenation, sea-level rise, loss of sea ice and glacial retreat as well as extreme events, such as marine heatwaves and weather-driven storm surges and waves. These impacts are exacerbated by human-induced stressors, such as pollution, eutrophication, habitat destruction, invasive species and unsustainable use of marine resources. Climate- and human-related impacts profoundly affect marine ecosystems and the communities that rely on them for food and livelihood security. Therefore these impacts threaten progress towards achieving not only SDG 14, but also other SDGs.

Climate-related ocean science enhances our understanding of climate impacts on the ocean and contributes to strategies for sustainably managing and protecting marine ecosystems. Challenges, such as limited data access and exchange and insufficient capacity in lower-income countries, have resulted in significant gaps in ocean observation and knowledge. However, initiatives such as the **United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development** (2021–2030), known as the Ocean Decade, is accelerating ocean science by transforming how diverse stakeholders collaborate to generate, finance and use ocean science in support of sustainable development.

Climate-related science for a sustainable ocean

The impacts of climate change, including ocean acidification and warming, are already being observed. The ocean absorbs around one quarter of the annual emissions of anthropogenic CO₂ to the atmosphere and around 90% of the energy trapped in the climate system (*State of the Global Climate 2022* (WMO-No. 1316)). As a result, the ocean helps alleviate the impacts of climate change on the planet (Friedlingstein et al., 2022). However, as the CO₂ reacts with seawater, it changes the acidity of the ocean, leading to ocean acidification. Additionally, the uptake of energy in the climate system leads to ocean warming, which can exacerbate sea level rise due to thermal expansion and lead to more frequent and intense marine heatwaves. According to IPCC (2023), ocean acidification and warming will continue to increase in the twenty-first century, at rates dependent on future emissions.

Ocean acidification

Ocean acidification impacts marine organisms and ecosystem services, endangering fisheries and aquaculture, which impacts food security. It also weakens the coral reefs that protect the coastline, provide food and nutrition and also drive tourism, which many coastal communities rely on for their livelihood. As a result, ocean acidification poses a serious threat to sustainable development.

As a key global climate indicator, monitoring of ocean acidification is crucial to enhancing understanding of our climate system. To detect ocean acidification, observations must be made with a frequency that is adequate for describing variability and trends in carbonate chemistry, as well as its impacts on marine life. Over the past ten years, monitoring of surface ocean pH has become a focus of many international science initiatives, mainly thanks to the Global Ocean Acidification Observing Network (GOA-ON) (Newton et al., 2015). GOA-ON is a collaborative international network that enhances the detection and understanding of ocean acidification through several initiatives, including the SDG 14.3.1 Data Portal (Box 1) and the Ocean Acidification Research for Sustainability programme, a United Nations-endorsed Ocean Decade programme (**Global Ocean Acidification Observing Network**).

SDG 14 LIFE BELOW WATER

As a result of these initiatives, human and technological capabilities to obtain ocean acidification data of sufficient quality are increasing.

Box 1. Guidance on conducting ocean acidification observations

With the support of the scientific community, a methodology and data portal were developed to deliver the necessary guidance on how to conduct ocean acidification observations, using different types of technology and measuring different variables, including pH, carbon dioxide partial pressure [$p\text{CO}_2$], total dissolved inorganic carbon [CT/DIC], and total alkalinity [AT/TA], as well as pressure, salinity and temperature. The methodology further provides assistance on what kinds of data sets to submit, and how to ensure the production of quality-controlled global and possibly regional products.

Since the launch of the **SDG 14.3.1 Data Portal** in December 2019, an increasing number of ocean acidification observations have been reported to the Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO) and are included in the annual 14.3.1 assessment (rising from 308 stations in 35 countries reported in 2022 to 539 stations in 41 countries in 2023) (Figure 1). However, the current global coverage of ocean acidification monitoring remains inadequate, with gaps in observations and data in all areas of the ocean. The rate of change in ocean acidification, its pattern and its scale show great regional variability and therefore require observations with high spatial and temporal resolution.

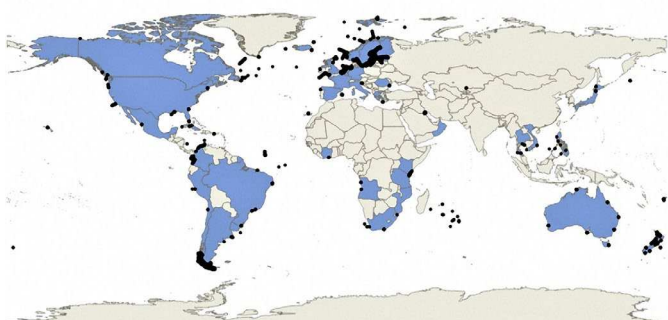


Figure 1. Map of 539 stations (black circles) for which data on ocean acidification were provided in 2023 by 41 countries towards the SDG indicator data collection. Source: IOC-UNESCO

Marine heatwaves

Marine heatwaves are periods of extreme warm sea-surface temperatures that persist for days to months and can extend up to thousands of kilometres (IPCC, 2019). Since the 1980s, marine heatwaves have approximately doubled in frequency, and human influence has very likely contributed to most of them since at least 2006 (Cooley et al., 2022). These heatwaves are associated with devastating and long-lasting impacts on marine ecosystems, including biodiversity loss and ecosystem degradation, threatening the food security and livelihoods of coastal communities. Additionally, marine heatwaves can exacerbate other extreme events, such as droughts and tropical cyclones, and may influence monsoon variations (Rodrigues et al., 2019; Saranya et al. 2022; Mawren et al., 2022).

To minimize the impacts of marine heatwaves on achievement of the SDGs, climate science can play a crucial role in enhancing our understanding of the characteristics, mechanisms and future projections of these events. For example, the World Climate Research Programme's Climate and Ocean – Variability, Predictability and Change (CLIVAR) core project has established a Research Focus on Marine Heatwaves in the Global Ocean (**Marine Heatwaves in the Global Ocean**). The aim of this initiative is to enhance understanding of marine heatwaves globally, including detection, surface and subsurface characteristics, mechanisms, connection with climate change and biogeochemical extremes. As the science continues to advance, global climate forecasts and seasonal sea-surface temperature forecasts are enabling prediction of marine heatwaves from 1 to 12 months in advance, depending on the region, season and state of large-scale climate drivers, such as El Niño (Jacox et al., 2022). These predictions support effective policy- and decision-making for adaptation planning and sustainable development.

Strategies to sustainably manage and protect marine ecosystems

Marine spatial planning (MSP) presents a way of developing strategies to balance conservation and sustainable use of the ocean through spatial and temporal allocation of areas for various uses, while ensuring they retain their ecosystems. A data-driven and knowledge-based approach grounded in best available science is crucial to the further development and implementation of MSP, particularly in the context of climate change. Climate-smart MSP refers to the use of climate-related ocean science, data and knowledge to integrate adaptation and mitigation measures in ocean planning with a goal of increasing resilience of marine ecosystems and reducing exposure and vulnerability of coastal communities to climate change (IOC-UNESCO/European Commission, 2021). For example, analysis of cumulative impacts and incorporation of climate change modelling in the development of scenarios about the future use



Photo: Muhammad Amdad Hossain

and conservation of marine areas helps support assessments needed during the MSP process. For such analyses, it is crucial that data be available at appropriate spatial scales and that uncertainties in the planning scenarios be recognized and properly addressed (IOC-UNESCO, 2021).

At the global level there is an increased awareness of the need to manage and protect marine and coastal habitats and ecosystems. Sustainable management of marine and coastal ecosystems is enshrined in MSP Global, which is a multi-sectoral policy that has been adopted by 38 countries and is being implemented in several additional countries (IOC-UNESCO, 2022a).

Looking ahead: challenges and opportunities

Sustainable development and the need to protect the ocean are becoming even more urgent with climate change. Climate-related ocean science plays an important role in enhancing our understanding of climate impacts on the ocean and contributes to strategies for sustainably managing and protecting marine ecosystems. However, challenges remain, such as limited data

access and exchange and insufficient human and technological capacity in many parts of the world, particularly small island developing States and least developed countries, which often have limited capacity to meet the demand for scientific support (IOC-UNESCO, 2020). As a result, there are significant gaps in ocean observations and research in the Global South. Additionally, ocean-related research remains significantly underfunded, limiting our understanding of the ocean and how it may be impacted by a changing climate (IOC-UNESCO, 2022a). There is also a need for improved ocean models and an increase in cross-disciplinary scientific collaboration to facilitate the co-design of science, bridge existing knowledge gaps and enhance capacity to achieve SDG 14.

The United Nations Ocean Decade was launched to address these challenges, and provides an unprecedented opportunity to mobilize the scientific community to accelerate ocean-related science (IOC-UNESCO, 2022b). Through a common framework that engages a wide range of stakeholders, the Ocean Decade aims to ensure all countries can generate and support the ocean science needed to achieve the ocean we want.



Key messages

- Half of countries report not having multi-hazard early warning systems (MHEWSs) in place and, where they do exist, there are significant gaps in coverage.
- Weather-, climate- and water-related sciences underpin effective MHEWSs by enhancing the physical understanding of hazards, growing the understanding of the associated risks and impacts, and enabling the detection, monitoring and forecasting of hazards.
- Partnerships across diverse stakeholders, including the weather-, climate- and water-related science communities, are essential to deliver Early Warnings for All and achieve the SDGs.

Introduction

SDG 17 focuses on partnerships for the goals, including enhancing international cooperation on access to science, technology and innovation to support the achievement of the SDGs. Effective partnerships across diverse stakeholders, including the weather-, climate- and water-related science communities, are crucial for achieving the SDGs by 2030. One example of a partnership that is contributing to achieving the SDGs, as well as the targets of other global frameworks such as the Paris Agreement and Sendai Framework for Disaster Risk Reduction, is the United Nations Secretary-General's Early Warnings for All (EW4All) Initiative. This initiative aims to ensure that everyone on Earth is protected from hazardous weather, climate and hydrological events through life-saving early warning systems by the end of 2027.

With human-induced climate change leading to more extreme weather conditions, the need for multi-hazard early warning systems (MHEWSs) is more crucial than ever. Advances in MHEWSs have decreased mortality rates, and data show that just 24 hours' notice of an impending hazardous event can reduce damage by 30% (WMO Press release No. 22052023). Additionally, MHEWSs

support climate change adaptation, disaster risk reduction and sustainable development, providing cross-cutting benefits towards nearly all of the SDGs (*Early Warnings for All Executive Action Plan 2023–2027*). However, major gaps exist, with half of countries not protected by MHEWSs, especially lower-income countries and small island developing States, where vulnerable communities are hit hardest by extreme weather events and the impacts of climate change (Figure 1).

EW4All is an example of SDG 17 in action, requiring global collaboration and partnerships across United Nations entities, the scientific community, the private sector, financing institutions, governments, academia and others. The initiative is co-led by WMO and the United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), in partnership with the International Telecommunication Union (ITU) and the International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC). Other partners include the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Risk-Informed Early Action Partnership (REAP), United Nations Development Programme (UNDP), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), United Nations Environment Programme (UNEP), United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA) and World Food Programme (WFP), among others.

Weather-, climate- and water-related sciences in support of EW4All

A MHEWS is an integrated system which allows people to know that hazardous weather or climate events are on their way and informs how governments, communities and individuals can act to minimize impacts. An end-to-end MHEWS is people-centred and includes four key components as highlighted in Box 1. The EW4All Executive Action Plan is structured around these core components, known as pillars, to deliver inclusive and people-centred MHEWSs that empower those threatened by hazards to act in sufficient time and in an appropriate manner (*Early Warnings for All Executive Action Plan 2023–2027*).

Weather-, climate- and water-related sciences underpin all four pillars of action. For example, global surface and space-based observation data are the foundation of a MHEWS. This information is essential for the detection,

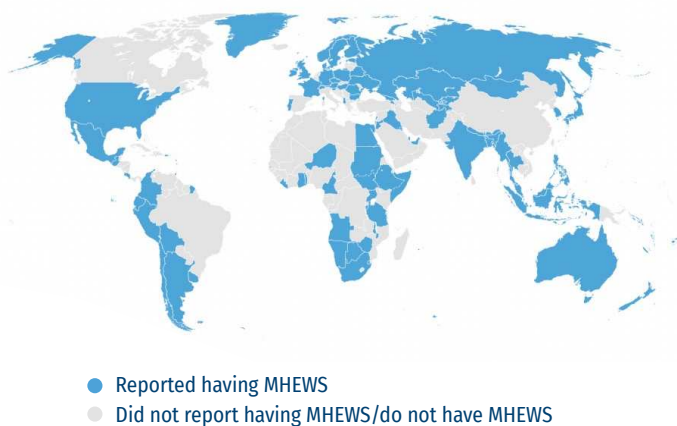


Figure 1. Countries reporting early warning system coverage through the Sendai Framework Monitor. MHEWS coverage is increasing globally; only 95 countries reported having MHEWSs in place in 2021 (Early Warnings for All Executive Action Plan 2023–2027)

observation, monitoring, analysis and forecasting of hazards as well as providing reliable, understandable and relevant risk information. Additionally, numerical weather models, which replicate the physical interactions of the Earth system (weather, hydrology, ocean and cryosphere) depend on observational data to create predictions, enabling National Meteorological and Hydrological Services (NMHSs) to provide forecasts and early warnings to citizens. These observational data are also important for the prediction of high-impact weather and water hazards on timescales up to six hours, known as nowcasting (Box 2), which is crucial for early warning (*Early Warnings for All Executive Action Plan 2023–2027*).

Box 1. The four pillars of EW4All

The EW4All Initiative is structured around four pillars described below, each led by a United Nations agency with support from partner organizations.



Disaster risk knowledge and management (led by UNDRR with support from WMO):

ensuring all countries have access to reliable, understandable and relevant risk information, science and expertise.



Detection, observation, monitoring, analysis and forecasting (led by WMO with support from UNDP, UNESCO and UNEP):

ensuring all countries have robust forecasting, observation and monitoring systems (both soft and hardware infrastructure) and enabling policies to support optimization and sustainability of hazard monitoring and early warning.



Warning dissemination and communication (led by ITU with support from IFRC, UNDP, REAP and WMO):

using a people-centred approach to ensure that early warnings are disseminated effectively and in a timely manner to reach everyone, especially those most at risk.



Preparedness and response capabilities (led by IFRC with support from REAP, OCHA, FAO and WFP):

ensuring local governments, communities and individuals at risk have the knowledge and means to take pre-emptive early actions to prepare for and respond to incoming disasters upon receiving warnings.

As weather forecasting skill improves, a paradigm shift from providing information on “what the weather will be” to “what the weather will do” is transforming how NMHSs provide early warnings to citizens. Known as impact-based forecasting, this approach integrates traditional forecasting of physical hydrometeorological hazards and understanding of societal exposure and vulnerability to those hazards to inform decision-making and enable action to reduce impacts to society and ensure sustainable development (Golding, 2022). Partnership, collaboration and co-design are essential to integrate diverse sources of knowledge, including physical and social science and local and indigenous knowledge, to ensure impact-based early warnings are actionable, timely and effective.

Advances in climate modelling are also improving our understanding of changes in the Earth system due to climate variability and change and how those changes may influence hazards. Quantitative explanation of observed changes, through process-based detection and attribution, enhances confidence in climate assessments, predictions and projections. Additionally, climate models enable climate predictions on multi-annual to decadal timescales, which improves our knowledge of hazards and how MHEWSs may need to evolve in the future. While models have undergone unprecedented advances in recent years, there is still much research to be done to improve our observational and modelling capabilities, particularly for annual to decadal timescales. The World Climate Research Programme’s Lighthouse Activity on Explaining and Predicting Earth System Change is one example of research that is advancing our understanding of the Earth system in support of EW4All. This activity is advancing the ability to understand, attribute and predict multi-annual to decadal changes in the Earth system, including for early warning of potential high-impact changes and events (Findell et al., 2023).

Technological advances in the modelling of natural hazards have led to better tools to respond to extreme weather events (Kuglitsch et al., 2022a, 2022b). For example, artificial intelligence (AI) can enhance MHEWSs by using geospatial data to strengthen our understanding of hazards, improve the accuracy and timeliness of detection and warnings, and support effective emergency communications (Kuglitsch, et al., 2022b). However, more research is still needed to effectively integrate this emerging technology into MHEWSs and disaster management. Interdisciplinary, multi-stakeholder and international scientific collaboration and partnership, such as the joint WMO, ITU and UNEP Focus Group on Artificial Intelligence for Natural Disaster Management, are crucial for laying the groundwork for standards in the use of AI to support natural disaster management (Kuglitsch et al., 2022b).

Box 2. Reducing risk from thunderstorm events in cities across southern Africa using satellite-based nowcasting science

Severe thunderstorms threaten lives and cause significant damage to property and livelihoods, particularly in urban areas in southern Africa. Advances in nowcasting technology allow weather forecasters to observe thunderstorms as they form and assess how severe they will be. As a result, forecasters can provide early warnings that enable members of the public to take early action to minimize impacts.

The Weather and Climate Information Services (WISER) Early Warnings for Southern Africa (EWSA) project aims to reduce disaster risk through the co-production of new weather information services and early warnings. This is done through partnership and engagement, which is essential to ensure that the science and technology translates into useful and actionable information for local urban communities, particularly disadvantaged groups, including women and those with disabilities. By fostering strong partnerships and bringing together a multidisciplinary team of meteorologists, economists, social scientists and user engagement specialists to work with disaster risk management agencies and local non-governmental agencies, the WISER EWSA project will improve early warnings across the region (Symonds, 2023).

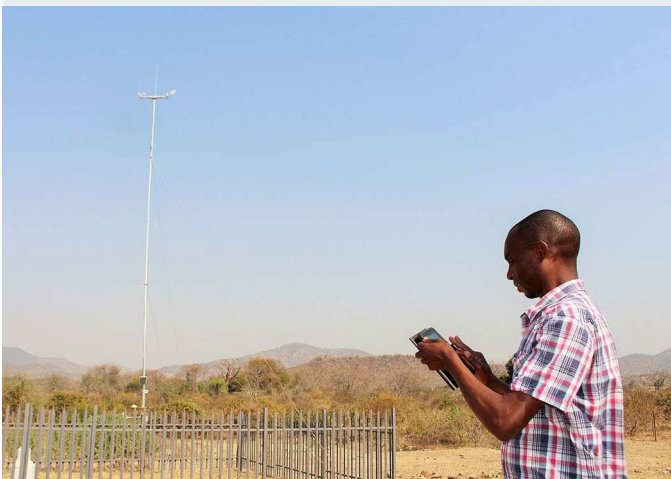


Photo: UNDP Zambia

Looking ahead: challenges and opportunities

Despite advances in weather-, climate- and water-related science, there are still scientific and technological challenges that must be addressed to improve the prediction and forecasting of extreme hydrometeorological events and expand the provision of accurate and effective early warnings. Gaps in global surface-based data, particularly hydrological data, significantly impact the quality of weather, climate and water services and early warnings (*Early Warnings for All Executive Action Plan 2023–2027*). Limitations in climate modelling, especially at annual to decadal timescales, present challenges in understanding how hazards may change in the context of climate change and how to design effective MHEWSs. Additionally, gaps between the physical and social sciences are a barrier to improving forecasting of extreme events and expanding impact-based, people-centred early warnings.

Moving forward, it is crucial to enhance capacity to detect, monitor and forecast hazards. This can be done by closing the observations gaps, promoting the unrestricted exchange of data, enhancing human capacities and competencies, and ensuring access to satellite observations and advanced technologies, including radar, nowcasting, high-resolution modelling and AI. It is also important to enhance the research-to-operations process to ensure the latest scientific and technological advances are being applied in operational settings and, ultimately, inform decision makers. Input and feedback from users also enhance the effectiveness of scientific information, and greater efforts are needed to integrate local and Indigenous knowledge through the co-development of impact-based early warnings. And finally, partnerships between the physical and social science research communities and other stakeholders must be strengthened to better understand how to communicate science and early warnings effectively to support decision-making and ultimately encourage early action to minimize impacts on society and sustainable development (*Early Warnings for All Executive Action Plan 2023–2027*).

Early warning systems can only save lives and protect livelihoods if all the MHEWS components work together, bridging the gaps between areas of expertise. EW4All emphasizes the importance of SDG 17 and effective partnerships across the United Nations system, international organizations, civil society, scientists, the private sector, financial institutions, local communities, governments, academia and other stakeholders. Together we can deliver EW4All and the SDGs.

APPENDIX

DATA SETS

Global temperature data sets

Berkeley Earth: Rohde, R. A.; Hausfather, Z. The Berkeley Earth Land/Ocean Temperature Record. *Earth System Science Data* **2020**, *12*, 3469–3479. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3469-2020>.

ERA5: Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P. et al. ERA5 Monthly Averaged Data on Single Levels from 1940 to Present; Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023. <https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>.

GISTEMP: GISTEMP Team, 2022: *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4*. NASA Goddard Institute for Space Studies, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>. Lenssen, N.; Schmidt, G.; Hansen, J. et al. Improvements in the GISTEMP Uncertainty Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2019**, *124*, 6307–6326. <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>.

HadCRUT5: Morice, C. P.; Kennedy, J. J.; Rayner, N. A. et al. An Updated Assessment of Near-surface Temperature Change From 1850: The HadCRUT5 Data Set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2021**, *126*, e2019JD032361. <https://doi.org/10.1029/2019JD032361>. HadCRUT5.0.1.0 data were obtained from <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5> on 1 March 2023 and are © British Crown Copyright, Met Office 2023, provided under an Open Government Licence, <http://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/version/3/>.

JRA-55: Kobayashi, S.; Ota, Y.; Harada, Y. et al. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II **2015**, *93*, 5–48. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>.

NOAAGlobalTemp v5.1: Vose, R. S.; Huang, B.; Yin, X. et al. Implementing Full Spatial Coverage in NOAA's Global Temperature Analysis. *Geophysical Research Letters* **2021**, *48*, e2020GL090873. <https://doi.org/10.1029/2020GL090873>.

Ocean heat content data sets

Cheng, L.; Trenberth, K. E.; Fasullo, J. et al. Improved Estimates of Ocean Heat Content from 1960 to 2015. *Science Advances* **2017**, *3*, e1601545. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601545>.

Church, J. A.; White, N. J.; Konikow, L. F. et al. Revisiting the Earth's Sea-level and Energy Budgets from 1961 to 2008. *Geophysical Research Letters* **2011**, *38*. <https://doi.org/10.1029/2011GL048794>.

Desbruyères, D. G.; Purkey, S. G.; McDonagh, E. L. et al. Deep and Abyssal Ocean Warming from 35 Years of Repeat Hydrography. *Geophysical Research Letters* **2016**, *43*, 310–356. <https://doi.org/10.1002/2016GL070413>.

Desbruyères, D.; McDonagh, E. L.; King, B. A. et al. Global and Full-Depth Ocean Temperature Trends during the Early Twenty-First Century from Argo and Repeat Hydrography. *Journal of Climate* **2017**, *30*, 1985–1997. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0396.1>.

Domingues, C. M.; Church, J. A.; White, N. J. et al. Improved Estimates of Upper-ocean Warming and Multi-decadal Sea-level Rise. *Nature* **2008**, *453*, 1090–1093. <https://doi.org/10.1038/nature07080>.

Gaillard, F.; Reynaud, T.; Thierry, V. et al. In Situ-based Reanalysis of the Global Ocean Temperature and Salinity with ISAS: Variability of the Heat Content and Steric Height. *Journal of Climate* **2016**, *29*, 1305–1323. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0028.1>.

Good, S. A.; Martin, M. J.; Rayner, N. A. EN4: Quality Controlled Ocean Temperature and Salinity Profiles and Monthly Objective Analyses with Uncertainty Estimates. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **2013**, *118*, 6704–6716. <https://doi.org/10.1002/2013JC009067>.

Hosoda, S.; Ohira, T.; Nakamura, T. A Monthly Mean Dataset of Global Oceanic Temperature and Salinity Derived from Argo Float Observations. *JAMSTEC Report of Research and Development* **2008**, *8*, 47–59. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamstecr/8/0/8_0_47/_article.

Ishii, M.; Fukuda, Y.; Hirahara, S. et al. Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation Expected from Present Observational Data Sets. *SOLA* **2017**, *13*, 163–167. <https://doi.org/10.2151/sola.2017-030>.

Kuusela, M.; Stein, M. L. Locally Stationary Spatio-temporal Interpolation of Argo Profiling Float Data. *Proceedings of the Royal Society A* **2018**, *474*, 20180400. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2018.0400>.

Kuusela, M.; Giglio, D. Global Ocean Heat Content Anomalies based on Argo Data (2.0.0). *Zenodo* **2023**. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7562281>.

Levitus, S.; Antonov, J. I.; Boyer, T. P. et al. World Ocean Heat Content and Thermoclinic Sea Level Change (0–2 000 m) 1955–2010. *Geophysical Research Letters* **2012**, *39*, L10603. <https://doi.org/10.1029/2012GL051106>.

Li, H.; Xu, F.; Zhou, W. et al. Development of a Global Gridded Argo Data Set with Barnes Successive Corrections. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **2017**, *122*, 866–889. <https://doi.org/10.1002/2016JC012285>.

Li, Y.; Church, J. A.; McDougall, T. J. et al. Sensitivity of Observationally Based Estimates of Ocean Heat Content and Thermal Expansion to Vertical Interpolation Schemes. *Geophysical Research Letters* **2022**, *49*, e2022G. <https://doi.org/10.1029/2022GL101079>.

Lyman, J. M.; Johnson, G. C. Estimating Global Ocean Heat Content Changes in the Upper 1800 m since 1950 and the Influence of Climatology Choice. *Journal of Climate* **2014**, *27*, 1945–1957. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00752.1>.

Roemmich, D.; Gilson, J. The 2004–2008 Mean and Annual Cycle of Temperature, Salinity, and Steric Height in the Global Ocean from the Argo Program. *Progress in Oceanography* **2009**, *82*, 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.03.004>.

APPENDIX DATA SETS

Roemmich, D.; Church, J.; Gilson, J. et al. Unabated Planetary Warming and its Ocean Structure Since 2006. *Nature Climate Change* **2015**, 5, 240. <https://doi.org/10.1038/nclimate2513>.

von Schuckmann, K.; Le Traon, P.-Y. How Well Can We Derive Global Ocean Indicators from Argo Data? *Ocean Science* **2011**, 7, 783–791. <https://doi.org/10.5194/os-7-783-2011>. Data available at: <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators>.

Wijffels, S.; Roemmich, D.; Monselesan, D., et al. Ocean Temperatures Chronicle the Ongoing Warming of Earth. *Nature Climate Change* **2016**, 6, 116–118. <https://doi.org/10.1038/nclimate2924>.

Sea ice data sets

EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, Sea-ice Index 1979-Onwards (v2.1, 2020), OSI-420, Data Extracted from OSI SAF FTP Server: 1979–2020, Northern and Southern Hemisphere.

Fetterer, F.; Knowles, K.; Meier, W. N. et al., 2017, updated daily. Sea Ice Index, Version 3. Boulder, Colorado, USA. National Snow and Ice Data Center (NSIDC), <https://nsidc.org/data/G02135/versions/3>.

Lavergne, T. Sørensen, A. M.; Kern, S. et al. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI Sea Ice Concentration Climate Data Records. *The Cryosphere* **2019**, 13 (1), 49–78. <https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019>.

REFERENCES

Executive Summary

- Azcona, G.; Bhatt A.; Brauchle, J. et al. *From Commodity to Common Good: A Feminist Agenda to Tackle the World's Water Crisis*; UN Women: New York, USA, 2023. <https://www.unwomen.org/en/digital-library/publications/2023/07/from-commodity-to-common-good-a-feminist-agenda-to-tackle-the-worlds-water-crisis>.
- Griggs, D.; Stafford-Smith, M.; Warrilow, D. et al. Use of Weather and Climate Information Essential for SDG Implementation. *Nat Rev Earth Environ* **2021**, 2 (1), 2–4. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00126-8>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf.
- International Committee of the Red Cross (ICRC). *When Rain Turns to Dust: Understanding and Responding to the Combined Impact of Armed Conflicts and the Climate and Environment Crisis on People's Lives*; ICRC: 2020. https://www.icrc.org/sites/default/files/topic/file_plus_list/rain_turns_to_dust_climate_change_conflict.pdf.
- International Labour Organization (ILO). *The Importance of Early Warning Systems in Disaster Risk Reduction*; ILO: Geneva, 2022. https://www.ilo.org/global/topics/employment-promotion/recovery-and-reconstruction/WCMS_858123/lang--en/index.htm.
- Islam, S.N.; Winkel, J. *Climate Change and Social Inequality*; United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2019. https://www.un.org/esa/desa/papers/2017/wp152_2017.pdf.
- Kull, D.; Riishojgaard, L. P.; Eyre, J. et al. *The Value of Surface-based Meteorological Observation Data*; World Bank, Washington, DC, 2021. <http://hdl.handle.net/10986/35178>.
- World Economic Forum. *The Global Risks Report 2023*, 18th Edition; WEF: Geneva, 2023. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2023.pdf.
- World Meteorological Organization (WMO). *Gendered Impacts of Weather and Climate: Evidence from Asia, Pacific and Africa*; WMO: Geneva, 2019.

State of the Science

- Barnes, C.; Boulanger, Y.; Keeping, T. et al. *Climate Change More than Doubled the Likelihood of Extreme Fire Weather Conditions in Eastern Canada*. World Weather Attribution, 2023. <https://www.worldweatherattribution.org/climate-change-more-than-doubled-the-likelihood-of-extreme-fire-weather-conditions-in-eastern-canada/>.
- Carbon Monitor. *Carbon Monitor*. <https://carbonmonitor.org/>.
- Forster, P. M.; Smith, C. J.; Walsh, T. et al. Indicators of Global Climate Change 2022: Annual Update of Large-scale Indicators of the State of the Climate System and Human Influence. *Earth System Science Data* **2023**, 15 (6), 2295–2327. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>.
- Friedlingstein, P.; O'Sullivan, M.; Jones, M. W. et al. Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data* **2022**, 14 (11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom, 2021. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). *NASA Tracks Freddy, Longest-lived Tropical Cyclone on Record*. <https://svs.gsfc.nasa.gov/14312>.
- Riser, S. C.; Freeland, H. J.; Roemmich, D. et al. Fifteen Years of Ocean Observations with the Global Argo Array. *Nature Clim Change* **2016**, 6 (2), 145–153. <https://doi.org/10.1038/nclimate2872>.
- Roemmich, D.; Alford, M. H.; Claustre, H. et al. On the Future of Argo: A Global, Full-Depth, Multi-Disciplinary Array. *Frontiers in Marine Science* **2019**, 6. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2019.00439>.
- Trewin, B.; Cazenave, A.; Howell, S. et al. Headline Indicators for Global Climate Monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2021**, 102 (1), E20–E37. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0196.1>.
- Trewin, B. Assessing Internal Variability of Global Mean Surface Temperature from Observational Data and Implications for Reaching Key Thresholds. *JGR: Atmospheres* **2022**, 127. <https://doi.org/10.1029/2022JD036747>.
- United Nations Environment Programme (UNEP). *Emissions Gap Report 2022: The Closing Window – Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies*; UNEP: Nairobi, 2022. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>.

REFERENCES

- World Glacier Monitoring Service (WGMS). *Global Glacier Change Bulletin – No. 4 (2018–2019)*; Zemp, M.; Nussbaumer, S. U.; Gärtner-Roer, I. et al., Eds. (based on database version: doi:10.5904/wgms-fog-2022-09); WGMS: Zurich, Switzerland, 2021. https://wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_04.pdf.
- World Meteorological Organization (WMO). *WMO Greenhouse Gas Bulletin, No. 18: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2021*; WMO: Geneva, 2022.
- World Meteorological Organization (WMO). *Preliminary Data Shows Hottest Week on Record – Unprecedented Sea Surface Temperatures and Antarctic Sea Ice Loss*. <https://public.wmo.int/en/media/news/preliminary-data-shows-hottest-week-record-unprecedented-sea-surface-temperatures-and>.
- World Meteorological Organization (WMO). *Economic Costs of Weather-related Disasters Soars but Early Warnings Save Lives* [Press release No. 22052023]. 22 May 2023.
- World Meteorological Organization (WMO). *Typhoons Trigger Destruction and Record-breaking Rainfall in China*. <https://public.wmo.int/en/media/news/typhoons-trigger-destruction-and-record-breaking-rainfall-china>
- World Meteorological Organization (WMO). *Global Annual to Decadal Climate Update – Target Years: 2023 and 2023–2027*; WMO: Geneva, 2023.
- Zachariah, M; Philip, S; Pinto, I. et al. *Extreme Heat in North America, Europe and China in July 2023 Made Much More Likely by Climate Change*; Imperial College London: London, 2023. <https://doi.org/10.25561/105549>.
- ### SDG 2 – Zero Hunger
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Climate Change and Food Security: Risks and Responses*; FAO: Rome, 2015. <https://www.fao.org/3/i5188e/i5188e.pdf>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Bringing Climate Change Adaption into Farmer Field Schools*; FAO: Rome, 2021a. <https://www.fao.org/3/cb6410en/cb6410en.pdf>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Global Outlook on Climate Services in Agriculture – Investment Opportunities to Reach the Last Mile*; FAO: Rome, 2021b. <https://www.fao.org/3/cb6941en/cb6941en.pdf>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *The Impact of Disasters and Crises on Agriculture and Food Security: 2021*; FAO: Rome, 2021c. <https://doi.org/10.4060/cb3673en>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Tracking Progress on Food and Agriculture-related SDG Indicators 2022*; FAO: Rome, 2022a. <https://doi.org/10.4060/cc1403en>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation*; FAO: Rome, 2022b. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Managing Risks to Build Climate-smart and Resilient Agrifood Value Chains – The Role of Climate Services*; FAO: Rome, 2022c. <https://doi.org/10.4060/cb8297en>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); International Fund for Agricultural Development (IFAD); United Nations Children’s Fund (UNICEF), et al. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2022 – Repurposing Food and Agricultural Policies to Make Healthy Diets More Affordable*. FAO: Rome, 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0639en>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Longer Report. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.
- Kim, K.-H.; Hewitt, C. D.; Kanamaru, H. et al. Prospects for Enhancing Climate Services in Agriculture. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2023**, *104*, E352–E358. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0123.1>.
- World Meteorological Organization (WMO). *Agriculture and Food Security Exemplar to the User Interface Platform of the Global Framework for Climate Services*; WMO: Geneva, 2014.
- World Meteorological Organization (WMO). *Early Warnings for All Executive Action Plan 2023–2027*; WMO: Geneva, 2022.
- World Meteorological Organization (WMO). *Guidelines for the Assessment of Competencies for Provision of Climate Services* (WMO-No. 1285). Geneva, 2022.

SDG 3 – Good Health and Well-Being

- Ballester, J.; Quijal-Zamorano, M.; Méndez Turrubiates, R. F. et al. Heat-Related Mortality in Europe during the Summer of 2022. *Nat Med* **2023**, *29* (7), 1857–1866. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>.
- Cissé, G.; McLeman, R.; Adams, H. et al. Health, Wellbeing, and the Changing Structure of Communities. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Pörtner, H.-O.; Roberts, D.C.; Tignor, M. et al., Eds.; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Chapter07.pdf.

Health Care Without Harm. *Global Road Map for Health Care Decarbonization: A Navigational Tool for Achieving Zero Emissions with Climate Resilience and Health Equity*; Health Care Without Harm, 2023. <https://healthclimateaction.org/roadmap>.

Romanello, M.; Di Napoli, C.; Drummond, P. et al. The 2022 Report of the Lancet Countdown on Health and Climate Change: Health at the Mercy of Fossil Fuels. *Lancet* **2022**, 400 (10363), 1619–1654. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)01540-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01540-9).

Salas, R. N.; Jha, A. K. Climate Change Threatens the Achievement of Effective Universal Healthcare. *BMJ* **2019**, 366, l5302. <https://doi.org/10.1136/bmj.l5302>.

Shumake-Guillemot, J.; Fernandez-Montoya, L., Eds. *Climate Services for Health: Improving Public Health Decision-making in a New Climate*; World Health Organization and World Meteorological Organization: Geneva, 2019.

World Health Organization (WHO). *Air Pollution*. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_2

World Health Organization (WHO). *Technical Brief: Environment, Climate Change and Health in Relation to Universal Health Coverage*; WHO, 2022. <https://www.who.int/publications/m/item/environment--climate-change-and-health-in-relation-to-universal-health-coverage>.

World Health Organization (WHO). *Climate Change and Health: Vulnerability and Adaptation Assessment*; WHO: Geneva, 2021. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240036383>.

WHO–WMO Joint Office for Climate and Health. *Final Report: From the G7 Health Communiqué to Action: Health and Climate – Heat Preparedness through Early Warning Systems*; Global Heat Health Information Network, 2022. <https://ghhin.org/resources/final-report-from-the-g7-health-communicue-to-action-health-and-climate-heat-preparedness-through-early-warning-systems/>.

SDG 6 – Clean Water and Sanitation

Azcona, G.; Bhatt A.; Brauchle, J. et al. *From Commodity to Common Good: A Feminist Agenda to Tackle the World's Water Crisis*; UN Women: New York, USA, 2023. <https://www.unwomen.org/en/digital-library/publications/2023/07/from-commodity-to-common-good-a-feminist-agenda-to-tackle-the-worlds-water-crisis>.

Caretta, M. A.; Mukherji, A.; Arfanuzzaman, M. et al. Water. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Pörtner, H.-O.; Roberts, D.C.; Tignor, M. et al., Eds.; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Chapter04.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Pörtner, H.-O.; Roberts, D.C.; Tignor, M. et al., Eds.; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf.

Naumann, G.; Podestá, G.; Marengo, J. et al. *The 2019–2021 Extreme Drought Episode in La Plata Basin*; EUR 30833 EN; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2021. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC126508>.

Naumann, G.; Podestá, G.; Marengo, J., et al. *Extreme and Long-term Drought in the La Plata Basin: Event Evolution and Impact Assessment until September 2022*; EUR 31381 EN; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2023. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC132245>.

United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). *Ensuring Safe Water and Sanitation for All: A Solution through Science, Technology and Innovation*; United Nations: Geneva, 2023. https://unctad.org/system/files/official-document/dltikd2022d1_en.pdf.

UN-Water. *Blueprint for Acceleration: SDG 6 Synthesis Report on Water and Sanitation 2023*; United Nations: New York, USA, 2023. <https://www.unwater.org/publications/sdg-6-synthesis-report-2023>.

Van Dijk, A. I. J. M.; Beck, H. E.; de Jeu, R. A. M. et al. *Global Water Monitor: 2022 Summary Report*; Global Water Monitor, 2022. <https://www.globalwater.online/globalwater/2022report.html>.

World Bank. *The World Bank in Paraguay*. <https://www.worldbank.org/en/country/paraguay/overview>.

World Meteorological Organization (WMO). *2021 State of Climate Services: Water* (WMO-No. 1278). Geneva, 2021.

World Meteorological Organization (WMO). *State of Global Water Resources 2022*; Geneva, in press.

SDG 7 – Affordable and Clean Energy

Bloomfield, H. C.; Brayshaw, D. J.; Shaffrey, L. C. et al. Quantifying the Increasing Sensitivity of Power Systems to Climate Variability. *Environ Res Lett* **2016**, 11 (12), 124025. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124025>.

The Crown Estate. *Offshore Wind Leasing Round 4: Delivering a Low Carbon Future*. <https://www.thecrownestate.co.uk/media/3921/guide-to-offshore-wind-leasing-round-4.pdf>.

The Crown Estate. *Round 4 Project Map*. <https://www.thecrownestate.co.uk/media/3721/the-crown-estate-offshore-wind-leasing-round-4-selected-projects.pdf>.

REFERENCES

- European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). *Ten-year Network Development Plan 2010–2020*; ENTSO-E, 2010. <https://consultations.entsoe.eu/system-development/tyndp2020/>.
- European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). *ENTSO-E Position on Offshore Development*; ENTSO-E, 2020. <https://www.entsoe.eu/outlooks/offshore-development/>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *IRENA and FAO's Collaboration Drives Better Decision-making for Sustainable Bioenergy Development*. <https://www.irena.org/News/articles/2023/Mar/IRENA-and-FAOs-Collaboration-Drives-Better-Decision-making-for-Sustainable-Bioenergy-Development>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Potential Assessment: Global Atlas*. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Project-Facilitation/Renewable-potential-assessment/Global-Atlas>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Potential Assessment: Bioenergy Simulator*. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Project-Facilitation/Renewable-potential-assessment/Bioenergy-Simulator>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Potential Assessment: SolarCity Simulator*. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Project-Facilitation/Renewable-potential-assessment/SolarCity-Simulator>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Potential Assessment: Technical Assessment Services*. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Project-Facilitation/Renewable-potential-assessment/Technical-Assessment-Services>.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *Innovation Landscape Brief: Artificial Intelligence and Big Data*; IRENA: Abu Dhabi, 2019. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_AI_Big_Data_2019.pdf.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). *Innovation Landscape Brief: Advanced Forecasting of Variable Renewable Power Generation*; IRENA: Abu Dhabi, 2020. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Advanced_weather_forecasting_2020.pdf.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom, 2021. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Longer Report. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023a. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policy Makers. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023b. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf.
- Reguero, B. G.; Losada, I. J.; Méndez, F. J. A Recent Increase in Global Wave Power as a Consequence of Oceanic Warming. *Nat Commun* **2019**, 10 (1), 205. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08066-0>.
- Sustainable Energy for All (SEforALL). *Universal Integrated Energy Planning*. <https://sdg7energyplanning.org/>.
- Sustainable Energy for All (SEforALL). *Chilling Prospects: Tracking Sustainable Cooling for All 2020*; SEforAll, 2020a. <https://www.seforall.org/system/files/2020-07/CP-2020-SEforALL.pdf>.
- Sustainable Energy for All (SEforALL). *Data Standards for Integrated Energy Planning*; SEforAll, 2020b. <https://www.seforall.org/system/files/2021-02/IEP-data-standards.pdf>.
- Sustainable Energy for All (SEforALL). *Chilling Prospects: Tracking Sustainable Cooling for All 2021*; SEforAll, 2021. <https://www.seforall.org/system/files/2021-05/Chilling-Prospects-21-SEforALL.pdf>.
- United Nations (UN). *Ensure Access to Affordable, Reliable, Sustainable and Modern Energy*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy>.
- World Meteorological Organization (WMO). *State of Climate Services Report*. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/state-of-climate-services-report>.
- World Meteorological Organization (WMO). *World Weather & Climate Extremes Archive*. <https://wmo.asu.edu/>.
- World Meteorological Organization (WMO). *Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition* (WMO-No. 1312). Geneva, 2023.

SDG 11 – Sustainable Cities and Communities

He, X.; Shen, S.; Miao, S. et al. Quantitative Detection of Urban Climate Resources and the Establishment of an Urban Climate Map (UCMap) System in Beijing. *Building and Environment* **2015**, *92*, 668–678. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.044>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Longer Report. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023a. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policy Makers. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023b. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf.

Liu, Y.; Fang, X.; Cheng, C. et al. Research and Application of City Ventilation Assessments Based on Satellite Data and GIS Technology: A Case Study of the Yanqi Lake Eco-City in Huairou District, Beijing. *Meteorological Applications* **2016**, *23* (2), 320–327. <https://doi.org/10.1002/met.1557>.

Ng, E. *Designing High-density Cities for Social and Environmental Sustainability*; Earthscan: London, 2009a.

Ng, E. Policies and Technical Guidelines for Urban Planning of High-Density Cities – Air Ventilation Assessment (AVA) of Hong Kong. *Building and Environment* **2009**, *44* (7), 1478–1488. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.013>.

Ng, E.; Ren, C., Eds. *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning*; Routledge: London, 2015. <https://doi.org/10.4324/9781315717616>.

Ren, C.; Ng, E. Y.; Katzschner, L. *Urban Climatic Map Studies: A Review*. *International Journal of Climatology* **2010**, *31* (15), 2213–2233. <https://doi.org/10.1002/joc.2237>.

Ren, C.; Yang, R.; Cheng, C. et al. Creating Breathing Cities by Adopting Urban Ventilation Assessment and Wind Corridor Plan – The Implementation in Chinese Cities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **2018**, *182*, 170–188. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.09.023>.

United Nations Human Settlement Programme (UN-Habitat). *World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities*; UN-Habitat: Nairobi, 2022. https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf.

United Nations Statistics Division (UNSD). *Make Cities and Human Settlements Inclusive, Safe, Resilient and Sustainable*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/goal-11/>.

World Meteorological Organization (WMO). *Good Practices on High-resolution Modeling for Integrated Urban Services*. https://wmoomm.sharepoint.com/sites/wmocpdb/eve_activityarea/Forms/AllItems.aspx?id=%2Fsites%2Fwmoocpdb%2Ffeve%5Factivityarea%2FUrban%5F1b987500%2D0f38%2Deb11%2Da813%2D000d3a25bdee%2FPublications%2FGuidance%20launch%2FGood%20practices%20on%20high%2Dresolution%20modeling%20for%20Integrated%20Urban%20Services%2Epdf&parent=%2Fsites%2Fwmoocpdb%2Ffeve%5Factivityarea%2FUrban%5F1b987500%2D0f38%2Deb11%2Da813%2D000d3a25bdee%2FPublications%2FGuidance%20launch&p=true&ga=1.

World Meteorological Organization (WMO). *Pilot Project on Public-Private Engagement for Smart Meteorological Service in Mega-Cities in Regional Association II*. <https://public.wmo.int/en/pilot-project-public-private-engagement-smart-meteorological-service-mega-cities-regional>.

World Meteorological Organization (WMO). *WMO Guidelines on Multi-hazard Impact-based Forecast and Warning Services* (WMO-No. 1150). Geneva, 2015.

World Meteorological Organization (WMO). *Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services, Volume I: Concept and Methodology* (WMO-No. 1234). Geneva, 2019.

World Meteorological Organization (WMO). *Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environment Services, Volume II: Demonstration Cities* (WMO-No. 1234). Geneva, 2021.

SDG 13 – Climate Action

Green Climate Fund (GCF). Funding Proposal FP171: *Enhancing Early Warning Systems to Build Greater Resilience to Hydro-meteorological Hazards in Timor-Leste*; GCF: 2021. <https://www.greenclimate.fund/sites/default/files/document/funding-proposal-fp171.pdf>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Longer Report. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023a. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policy Makers. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023b. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf.

REFERENCES

- United Nations Environment Programme (UNEP). *Emissions Gap Report 2022: The Closing Window – Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies*. UNEP: Nairobi, 2022. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>.
- World Meteorological Organization (WMO). *Climate Science Information for Climate Action*. <https://public.wmo.int/en/media/news/climate-science-information-climate-action>.
- World Meteorological Organization (WMO). *WMO Global Greenhouse Gas Watch* [brochure]; WMO: Geneva, 2023. <https://filecloud.wmo.int/share/s/ZBHvamUTSb2VdJRaMwNBtQ>.
- World Meteorological Organization (WMO)/Green Climate Fund (GCF). *Developing the Climate Science Information for Climate Action* (WMO-No. 1287). Geneva, 2022.
- World Weather Research Programme (WWRP). *Let's Talk Weather in Ghana*. <http://hiweather.net/article/132/162.html>.
- ### SDG 14 – Life Below Water
- Climate and Ocean – Variability, Predictability, and Change (CLIVAR). *Marine Heatwaves in the Global Ocean*. <https://www.clivar.org/research-foci/marine-heatwaves>.
- Cooley, S.; Schoeman, D.; Bopp, L. et al. Oceans and Coastal Ecosystems and Their Services. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Pörtner, H.-O.; Roberts, D.C.; Tignor, M. et al., Eds.; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Chapter03.pdf.
- Friedlingstein, P.; O'Sullivan, M.; Jones, M. W. et al. Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data* **2022**, 14 (11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
- Global Ocean Acidification Observing Network (GOA-ON). *Global Ocean Acidification Observing Network*. <http://www.goa-on.org/>.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO). *Global Ocean Science Report 2020 – Carrying Capacity for Ocean Sustainability*; Isensee, K., Ed.; UNESCO: Paris, 2020. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375147>.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO). *MSPglobal Policy Brief: Climate Change and Marine Spatial Planning*; IOC Policy Brief No. 3; UNESCO: Paris, 2021. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375721>.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO). *State of the Ocean Report 2022*, Pilot edition; IOC Technical Series 173; UNESCO: Paris, 2022a. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381921>.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO). *The Contribution of the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development to the Achievement of the 2030 Agenda*; The Ocean Decade Series, 34; UNESCO: Paris 2022b. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381919>.
- Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO)/European Commission. *MSPglobal: International Guide on Marine/Maritime Spatial Planning*; IOC Manuals and Guides No. 89; UNESCO: Paris, 2021. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379196>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Annex I: Glossary. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Pörtner, H.-O.; Roberts, D.C.; Masson-Delmotte V. et al., Eds.; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2019. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2022/03/10_SROCC_AnnexI-Glossary_FINAL.pdf.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team; Lee, H.; Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, 2023. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf.
- Jacox, M. G.; Alexander, M. A.; Amaya, D. et al. Global Seasonal Forecasts of Marine Heatwaves. *Nature* **2022**, 604 (7906), 486–490. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04573-9>.
- Mawren, D.; Hermes, J.; Reason, C. J. C. Marine Heatwaves in the Mozambique Channel. *Clim Dyn* **2022**, 58 (1), 305–327. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05909-3>.
- Newton, J. A.; Feely, R. A.; Jewett, E. B. et al. *Global Ocean Acidification Observing Network: Requirements and Governance Plan*, Second Edition; Global Ocean Acidification Observing Network, 2015. http://www.goa-on.org/documents/general/GOA-ON_2nd_edition_final.pdf.
- Rodrigues, R. R.; Taschetto, A. S.; Sen Gupta, A. et al. Common Cause for Severe Droughts in South America and Marine Heatwaves in the South Atlantic. *Nat Geosci* **2019**, 12 (8), 620–626. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0393-8>.
- Saranya, J. S.; Roxy, M. K.; Dasgupta, P. et al. Genesis and Trends in Marine Heatwaves Over the Tropical Indian Ocean and Their Interaction With the Indian Summer Monsoon. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **2022**, 127 (2), e2021JC017427. <https://doi.org/10.1029/2021JC017427>.
- World Meteorological Organization (WMO). *State of the Global Climate 2022* (WMO-No. 1316). Geneva, 2023.

SDG 17 – Partnerships for the Goals

Findell, K. L.; Sutton, R.; Caltabiano, N. et al. Explaining and Predicting Earth System Change: A World Climate Research Programme Call to Action. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2023**, 104 (1), E325–E339. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0280.1>.

Golding, B., Ed. *Towards the “Perfect” Weather Warning: Bridging Disciplinary Gaps through Partnership and Communication*; Springer International Publishing: Cham, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98989-7>.

Kuglitsch, M.; Albayrak, A.; Aquino, R., et al. *Artificial Intelligence for Disaster Risk Reduction: Opportunities, Challenges and Prospects*. *WMO Bulletin* **2022a**, 71 (1), 30–37.

Kuglitsch, M. M.; Pelivan, I.; Ceola, S. et al. Facilitating Adoption of AI in Natural Disaster Management through Collaboration. *Nature Communications* **2022b**, 13 (1), 1579. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29285-6>.

Symonds, D. Protection for All: WISER-EWSA Aims to Transform Nowcasting and Early Warning Systems in Southern Africa, Particularly for the Most Vulnerable Communities. *Meteorological Technology International*, April 2023, 10–11. <https://www.ukimediaevents.com/publication/8cf6eceb/12>.

World Meteorological Organization (WMO). *Early Warnings for All Executive Action Plan 2023–2027*; WMO: Geneva, 2022.

World Meteorological Organization (WMO). *Economic Costs of Weather-related Disasters Soars but Early Warnings Save Lives* [Press release No. 22052023]. 22 May 2023.

APEC기후센터는 WMO의 승인하에 영어로 작성된 보고서 원문을 국문으로 번역하였습니다. 국문 번역 내용에 대한 책임은 APEC기후센터에 있으며, WMO는 번역된 내용에 대해서는 책임이 없습니다.

This publication is a translation undertaken by the APEC Climate Center with permission from WMO, the publisher of the original text in English. WMO does not guarantee the accuracy of the translation for which the APEC Climate Center takes sole responsibility.



For more information please visit:
public.wmo.int/en/resources/united_in_science

