



## AÇIK ERIŞİM

TARAFINDAN DÜZENLENDİ

Phil Renforth,  
Heriot-Watt Üniversitesi, Birleşik Krallık

TARAFINDAN İNCELENDİ

Andreas Marc Fischer,  
Federal Meteoroloji ve Klimatoloji  
Dairesi, İsviçre Gerbrand Koren,  
Utrecht Üniversitesi, Hollanda

\*YAZIŞMA

Guy Brasseur  
✉ guy.brasseur@mpimet.mpg.de

ALINDI 02 Ocak 2025

KABUL EDİLDİ 07 Nisan 2025

YAYINLANDI 15 Mayıs 2025

ATIF

Brasseur G, Stammer D, Friedlingstein P, Hegerl  
G, Shaw T, Trenberth K, Richter J, Vera C,  
Berger A, Cleugh H, Easterbrook S, Edwards P,  
Jacob D, Mann M,  
Masson-Delmotte V, Schmidt G, Scholes M,  
Stocker T, Visbeck M ve Wu G (2025) 2050 için  
iklim bilimi.

Ön. Clim. 7:1554685.

doi: 10.3389/fclim.2025.1554685

TELİF HAKKI

© 2025 Brasseur, Stammer, Friedlingstein, Hegerl,  
Shaw, Trenberth, Richter, Vera, Berger, Cleugh,  
Easterbrook, Edwards, Jacob, Mann, Masson-  
Delmotte, Schmidt, Scholes, Stocker, Visbeck ve  
Wu. Bu, Creative Commons Attribution License  
.koşulları altında dağıtılan açık erişimli bir  
makaledir  
(CC BY). Orijinal yazar(lar) ve telif hakkı  
sahip(ler)ine atıfta bulunulması ve bu dergideki  
orijinal yayına atıfta bulunulması koşuluyla,  
kabul edilmiş akademik uygulamalara uygun  
olarak diğer forumlarda kullanımına, dağıtımına  
veya çoğaltılmasına izin verilir. Bu şartlara  
uymayan hiçbir kullanım, dağıtım veya  
çoğaltmaya izin verilmez.

## İklim bilimi 2050 için

Guy Brasseur<sup>(1,2)\*</sup>, Detlef Stammer<sup>3</sup>, Pierre Friedlingstein<sup>4,5</sup>,  
Gabriele Hegerl<sup>6</sup>, Tiffany Shaw<sup>7</sup>, Kevin Trenberth<sup>2,8</sup>,  
Jadwiga Richter<sup>2</sup>, Carolina Vera<sup>9</sup>, André Berger<sup>10</sup>,  
Helen Cleugh<sup>11</sup>, Steve Easterbrook<sup>12</sup>, Paul Edwards<sup>13</sup>,  
Daniela Jacob<sup>14</sup>, Michael Mann<sup>15</sup>, Valérie Masson-Delmotte<sup>16</sup>,  
Gavin Schmidt<sup>17</sup>, Mary Scholes<sup>18</sup>, Thomas Stocker<sup>19</sup>, Martin  
Visbeck<sup>20</sup> ve Guoxiong Wu<sup>21</sup><sup>1</sup>Max Planck Meteoroloji Enstitüsü, Hamburg, Almanya, <sup>2</sup>NSF Ulusal Atmosferik Araştırma Merkezi, Boulder, CO, Amerika Birleşik Devletleri, <sup>3</sup>Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit Merkezi, Hamburg Üniversitesi, Hamburg, Almanya, <sup>4</sup>Çevre, Bilim ve Ekonomi Fakültesi, Exeter Üniversitesi, Exeter, Birleşik Krallık, <sup>5</sup>Laboratoire de Météorologie Dynamique, Institut Pierre-Simon Laplace, CNRS, Ecole Normale Supérieure, Université PSL, Sorbonne Université, Ecole Polytechnique, Paris, Fransa, <sup>6</sup>School of GeoSciences, University of Edinburgh, Scotland, Birleşik Krallık,<sup>7</sup>Jeofizik Bilimleri Bölümü, Chicago Üniversitesi, Chicago, IL, Amerika Birleşik Devletleri,<sup>8</sup>Fizik Bölümü, Auckland Üniversitesi, Auckland, Yeni Zelanda, <sup>9</sup>Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA)/Universidad de Buenos Aires-CONICET, Buenos Aires, Arjantin,<sup>10</sup>Georges Lemaître Dünya ve İklim Araştırmaları Merkezi, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belçika, <sup>11</sup>İklim, Enerji ve Afet Çözümleri Enstitüsü, Avustralya Ulusal Üniversitesi, Canberra, ACT, Avustralya, <sup>12</sup>Bilgisayar Bilimleri Bölümü ve Çevre Okulu, Toronto Üniversitesi, Toronto, ON, Kanada, <sup>13</sup>Bilim, Teknoloji ve Toplum Programı, Uluslararası Güvenlik ve İşbirliği Merkezi, Stanford Üniversitesi, Stanford, CA, Amerika Birleşik Devletleri, <sup>14</sup>GERICS İklim Hizmet Merkezi Almanya, Helmholtz-Zentrum Hereon, Hamburg, Almanya, <sup>15</sup>Yer ve Çevre Bilimleri Bölümü, Pennsylvania Üniversitesi, Philadelphia, PA, Amerika Birleşik Devletleri, <sup>16</sup>Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (UMR CEA-CNRS- UVSQ 8212), Université Paris Saclay et Institut Pierre Simon Laplace, Paris, Fransa, <sup>17</sup>NASA Goddard Uzay Araştırmaları Enstitüsü, New York, NY, Amerika Birleşik Devletleri, <sup>18</sup>Hayvan, Bitki ve Çevre Bilimleri Okulu, Witwatersrand Üniversitesi, Johannesburg, Güney Afrika, <sup>19</sup>İklim ve Çevre Fiziği, Fizik Enstitüsü, Oeschger İklim Değişikliği Araştırma Merkezi, Bern Üniversitesi, Bern, İsviçre, <sup>20</sup>EOMAR Helmholtz Okyanus Araştırmaları Merkezi Kiel ve Kiel Üniversitesi, Kiel, Almanya, <sup>21</sup>Atmosferik Bilim ve Jeofiziksel Akışkanlar Dinamiği Laboratuvarı (<sup>IASG</sup>), Atmosferik Fizik Enstitüsü (IAP), Çin Bilimler Akademisi, Pekin, Çin

Antropojenik iklim zorlamasına yanıt olarak ortaya çıkması beklenen fiziksel, dinamik ve biyoekimyasal geri besleme süreçleri de dahil olmak üzere iklim sisteminin işleyişine ilişkin bilgiler son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Bugün iklim bilimi, toplumun gelecekteki iklim değişikliğiyle başa çıkma ihtiyaçlarından doğan yeni ve acil talepler ve iklim bilimi topluluğunun bu talepleri hızla karşılamak için stratejik hedeflerini iyileştirme ihtiyacı ile bir kavşak noktasındadır. 2050'de daha büyük bir küresel nüfus, daha yüksek sıcaklıklarla eşli benzeri görülmemiş iklim koşulları, daha sık aşırı hava olayları, deniz seviyesinin yükselmesi, bozulan ekosistemler, yaşanabilirlikteki değişiklikler ve iklim kaynaklı yer değiştirme ve göçün artması ve yeni jeopolitik gerilimlerin ortaya çıkmasıyla mümkün olan ancak şu anda bilinmeyen tüm dünyalar, hem daha fazla ısınmayı en aza indirecek azaltma önlemleri hem de yenilikçi adaptasyon girişimlerinin uygulanması yoluyla toplumun kırılganlığının sınırlandırılmasını gerektirecektir. Dünyanın dört bir yanındaki karar vericileri ve kamuoyunu iklim değişikliğinin yerel ve uzak etkileri hakkında bilgilendirmek ve uyum ve azaltım gündemlerini optimize etmelerinde onlara rehberlik etmek için en gelişmiş Yer sistemi bilimine dayanan becerikli bir iklim bilgi sisteminin geliştirilmesi gerekecektir. Bu bilgiler aynı zamanda daha sıcak bir dünyada yenilenebilir kaynakların yönetilmesine yardımcı olacak ve iklim değişikliğinin beklenen birbirine bağlı etkilerine karşı dayanıklılığı güçlendirecektir. Bu makalede, Dünya sisteminin çok ölçekli dinamiklerini anlamak için gereken başlıca gelişmeleri özetliyoruz. Dünyanın her yerindeki karar vericiler ve vatandaşlar için erişilebilir entegre bir bilgi sistemi geliştirme ihtiyacını vurguluyor ve azaltım ve adaptasyon kararlarını bilgilendirmek için ele alınması gereken bazı temel bilimsel soruları sunuyoruz. Son olarak, iklim biliminin değerleri ve etiği hakkında spekülasyonlarda bulunuyoruz

ve son on yıllardan çok farklı bir jeopolitik bağlamda küresel ısınmadan giderek daha fazla etkilenecek bir dünyada iklim araştırmalarının doğası.

#### ANAHTAR KELİMELELER

iklim, iklim değişikliği, iklim etkileri, dayanıklılık, zorlama ve geri bildirimler, bilgi

## 1 Giriş

İklim bilimi, başlangıçta atmosferi, kara yüzeyini, okyanusu ve kriyosferi gözlemleme ve anlama ve yıllararası döngülerden buzul döngülerine kadar bir dizi zaman ölçeğinde gözlemlenen doğal değişkenliği açıklama girişimleriyle geçtiğimiz yüzyıl boyunca istikrarlı bir şekilde gelişmiştir. Bu çabalar sayesinde Arrhenius (1896) 19. yüzyılın sonlarında atmosferdeki karbondioksit salınımının Dünya'nın yüzey sıcaklığında bir artışa yol açacağını keşfetmiştir. Dünya atmosferindeki sera etkisinin bir kısmını açıklamak için fiziksel kimya ilkelerini kullanan Arrhenius'un çalışmaları, modern iklim biliminin kurulmasında önemli bir rol oynamıştır. O zamandan bu yana, 1957'de başlayan atmosferik CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının titiz ölçümleri, fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan uzun vadeli bir artış ölçmüştür. Bu yükselen CO<sub>2</sub> seviyelerinin nihayetinde troposferin ısınmasına ve buna bağlı olarak stratosferin soğumasına yol açacağına dair temel öngörü, yakın zamanda 2021 Nobel Fizik Ödülü tarafından tanınan bir atılım olan ilk iklim modellerinin geliştirilmesiyle doğrulandı. Bu son tanınmadan önce, iklim bilimlerindeki gelişmeler, beklenen insan kaynaklı iklim değişikliğinde gözlemlenen karbondioksit artışlarının rolü hakkında kabaca nicel bir bilimsel fikir birliği oluşturmak için o zamanki en son bilimsel modelleri ve perspektifleri kullanan ilk bilimsel fikir birliği raporu olan ünlü "Charney Raporu"na (Charney vd., 1979) yol açmıştır. Rapor, teknolojinin geldiği noktayı özetlemiş, ancak aynı zamanda bilgi eksikliklerinin de altını çizmiştir. Bu sonuncusu, daha sonra BM düzeyinde bir dizi önemli uluslararası iklim konferansını ve politika etkileşimini tetikledi. Özellikle Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından düzenlenen ilk Dünya İklim Konferansı, 1980 yılında Dünya İklim Araştırma Programı'nın (WCRP) kurulmasına yol açmıştır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) ve Küresel İklim Gözlem Sistemi (GCOS) programı on yıl sonraki ikinci Dünya İklim Konferansı'nda kurulmuştur. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) 1992 yılında çalışmalarına başlamıştır. Son yıllarda iklimle ilgili etkilerin yoğunlaşması, bilginin ve eyleme geçirilebilir ve güvenilir iklim bilgilerinin birlikte inşa edilmesi ihtiyacını vurgulamış ve 2009 yılında WMO Üçüncü Dünya İklim Konferansı sırasında İklim Hizmetleri için Küresel Çerçeve'nin (GFCS) oluşturulmasına yol açmıştır.

WCRP, Dünya Meteoroloji Örgütü ve Uluslararası Bilimsel Birlikler Konseyi'nin (ICSU), şimdiki adıyla Uluslararası Bilim Konseyi'nin (ISC) ortak bir araştırma girişimi olarak ortaya çıkmıştır; 1990'larda UNESCO'nun Hükümetlerarası Oşinografi Komisyonu (IOC) üçüncü bir eş sponsor olarak katılmıştır. Kuruluş aşamasında

WCRP, iklim sistemi hakkındaki bilimsel bilgiyi iletirmek için uluslararası araştırmaları koordine etmek ve bu bilgiyi iklim değişikliğini ve öngörülebilirliğini ölçmek için kullanmak üzere kurulmuştur. Ayrıca, insanlığın refahını etkileyebilecek insan kaynaklı olası iklim değişikliklerini tespit etmek ve hafifletmek de amaçlanmıştır. O zamandan bu yana kuruluş, tek bir ülkenin destekleyemeyeceği kadar büyük uluslararası iklim araştırma projelerinin ve deneylerinin organize ve koordine edilmesinde merkezi bir rol oynamıştır.

Son yıllarda WCRP tarafından koordine ve teşvik edilen iklim araştırmaları topluluğu tarafından, Dünya sisteminin çok ölçekli dinamikleriyle ilişkili temel süreçlerin, özellikle de atmosfer, okyanus, hidroloji, kıtasal biyosfer ve kriyosfer arasındaki fiziksel ve biyojeokimyasal etkileşimlerin anlaşılmasında muazzam ilerlemeler kaydedilmiştir. İlk örnekler arasında doğal değişkenliği (yıllararası zaman ölçekleri) ve okyanusun rolüne odaklanan Tropikal Okyanus/Küresel Atmosfer Projesi (TOGA, 1985-1994) ve Dünya Okyanus Sirkülasyon Deneyi (WOCE, 1990-2002) yer almaktadır. Sonraki proje ve başarıların listesi uzundur ve atmosferden okyanusa, kriyosfere, kara yüzeyine ve bunların etkileşimlerine kadar tüm iklim sistemini kapsamaktadır. Gelişmiş gözlemlerin, simülasyonların ve projeksiyonların gelişmiş Dünya sistemi modelleri kullanılarak geliştirilmesi ve tespit ve atf yöntemlerinin uygulanması, doğal iklim değişikliği bağlamında iklim değişikliği sinyallerinin ortaya çıkışının belgelenmesini mümkün kılmıştır.

WCRP'nin başarısının temelinde, küresel iklim gözlem sistemi ve birleşik iklim ve Yer sistemi modelleri de dahil olmak üzere gerekli altyapının geliştirilmesi yatmaktadır. Özellikle, WCRP'nin İklim Modelleri Karşılaştırma Projesi (CMIP) kapsamında iklim modeli performansının değerlendirilmesi ve insan kaynaklı iklim değişikliği tahminleri, hesaplamalı bilimde önemli bir metodolojik yeniliktir. İklim ve Dünya sistemi modelleri, dinamik çekirdeklerinden model ızgaralarına ve alt modeller arasındaki veri alışverişine kadar birçok boyutta farklılık gösterir; tanım gereği hiçbir gerçek Dünya'nın mükemmel bir temsili değildir; hepsinin önyargıları vardır; ve karmaşıklıkları nedeniyle, bir model sonucunun yanlış nedenlerle doğru olup olmadığını ve ne zaman doğru olduğunu bilmek zordur. Bu nedenle, kapsamlı bir iklim modelleme sistemine ek olarak, model-gözlem karşılaştırma çalışmaları yoluyla modelleri test etmek, iklim süreçlerine ilişkin anlayışımızı geliştirmek, sağlam iklim dinamiklerini ve geri beslemeleri tanımlamak ve öngörülen emisyon senaryoları altında iklim sisteminin durumuna ilişkin sağlam tahminler ve projeksiyonlar sağlamak için bir dizi iklim gözlemine ihtiyaç vardır.

1992 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarının iklim sistemine tehlikeli insan kaynaklı müdahaleyi önleyecek bir seviyede sabitlenmesi çağrısında bulunmuştur. Uluslararası bilim camiası tarafından üretilen ve daha sonra IPCC tarafından değerlendirilen iklim bilgisi, 2013 yılında 196 ülke tarafından "iklim üzerindeki insan etkisinin" kabul edilmesine yol açmıştır.

1 <https://www.wcrp-climate.org>

2 <https://gfcs.wmo.int>

iklim sistemi açıktır" (IPCC, *Climate Change*, 2013). Doğal ve beşeri sistemlerin iklim değişikliğine karşı kırılganlığı ve gezegenin sürdürülebilir kalkınmasını sağlamaya yönelik acil ihtiyaç, uluslararası toplumu küresel ısınmanın 2° C veya daha düşük bir değerle sınırlandırılması gerektiğine ikna etmiştir (2015 Paris Anlaşması). Anlaşma, iklim araştırmalarının yönünde temel bir değişiklik yapılmasını gerektirmekte ve toplumun acil bilgi ve enformasyon ihtiyaçlarının karşılanması için bir değişim çağrısında bulunmaktadır. WCRP'nin en son WCRP Stratejik Planında (WCRP, 2019) ve yakın zamanda yayınlanan WCRP Bilim ve Uygulama Planında (WCRP, 2020, ) özetlenen yenilenmiş vizyonunu gelişen misyonu yansıtmaktadır. Geniş ve bütüncül bir bakış açısına dayanmakta ve topluma ilgili bilgileri sağlamak amacıyla Yer sistemi araştırmalarında yer alan gruplar arasında aktif ortaklıkların geliştirilmesi çağrısında bulunmaktadır. Yer sistemi bilimi, gezegeni atmosfer, hidrosfer (okyanus, göller, nehirler), kriyosfer (buz, donmuş toprak ve kar), litosfer (kara ve jeolojik süreçler) ve biyosfer (yaşam, ekosistemler, biyolojik çeşitlilik) arasındaki fiziksel, biyolojik ve kimyasal etkileşimlerle karmaşık ve etkileşimli bir sistem olarak görür.

Birleştirilmiş iklim sistemini ve küresel karbon döngüsünü temsil eden Dünya sistemi modellerinin (Flato, 2011) geliştirilmesi, sanayi öncesi dönemden bu yana kümülatif insan CO<sub>2</sub> emisyonları ile küresel yüzey sıcaklığı artışı arasındaki güçlü doğrusal ilişkiyi (Allen vd., 2009; Matthews Caldeira 2008ve , Matthews ve Caldeira 2008) ve CO<sub>2</sub> emisyonları durduktan sonra önemli bir ısınma veya soğuma olmadığını ortaya koymuştur (MacDougall vd., 2020; Solomon vd., 2009; ). CO<sub>2</sub> emisyonları ile küresel ısınma arasındaki ilişki, TCRE (Kümülatif CO<sub>2</sub> emisyonlarına Geçici İklim Tepkisi) adlı bir ölçüt ile karakterize edilmektedir ve IPCC AR6'da (IPCC, 2021) 1.000 Gt CO<sub>2</sub> başına 0,45° C olarak tahmin edilmiştir ve muhtemel aralık 0,27-0,63° C'dir (IPCC, 2021). Bu yeni bulgular, IPCC, *Climate Change*, 2013 ilk kez IPCC AR5'te ortaya konan "kalan karbon bütçesi" kavramına da yol açmıştır ( ). Kalan karbon bütçesinin en son tahmini, ısınmayı 1,5° C'nin altında sınırlama şansının %50 olması için yaklaşık 200 milyar ton CO<sub>2</sub>'dir (Forster vd., 2024), bu da yaklaşık 5 yıllık mevcut CO<sub>2</sub> emisyonuna eşdeğerdir (Friedlingstein vd., 2023). Bu durum, Paris Anlaşması ile belirlenen sıcaklık sınırlarına ulaşılabilmesi için iklim eyleminin aciliyetini ve azmini diğer iklim bilimi bulgularından daha fazla vurgulamaktadır.

Dünya sistemine ilişkin temel anlayışımızı geliştirmek kritik önemini korumaktadır, ancak iklim araştırmaları aynı zamanda azaltım ve uyum stratejilerini doğrudan destekleyen ve uyumsuzluk gibi yetersiz tepkileri önleyen, toplumsal olarak ilgili ve eyleme geçirilebilir bilgilerin üretilmesine de öncelik vermelidir. İklim bilimi artık sadece bilgi üretmenin ötesinde, topluma insanlık ve dünyadaki tüm yaşam için sürdürülebilir bir geleceği teşvik etmek için gereken araçları ve çerçeveleri sağlamalıdır. Bu, iklim zorlukları karşısında dayanıklılığı, ekosistem restorasyonunu ve insan refahını desteklemek için iklim bilgisini uygulamak ve iklim hizmetlerini şimdi ve gelecekte uygulamak anlamına gelir.

Bu makalenin amacı, önemli ilerlemeleri ve ortaya çıkan sınırları vurgulayarak mevcut iklim araştırma önceliklerine genel bir bakış sağlamaktır. Daha temel olarak bu çalışma, küresel toplumların küresel ısınmanın etkilerini etkin bir şekilde yönetebilmeleri, iklim değişikliğinin potansiyel etkilerinin artışı azaltabilmeleri ve nihayetinde küresel ısınmayı durdurabilmeleri için iklim araştırmalarının ilerlemesi gereken yönleri belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu sentez aynı zamanda

sıcaklık artışı 2° C'nin çok altında ve mümkün olduğunca 1,5° C'ye yakın bir seviyede sınırlandırmak için gereken eylemin aciliyetini göz önünde bulundurmaktadır; bu da önümüzdeki yirmi yıl içinde küresel karbondan arındırma ve azaltmanın hızlandırılmasını gerektirmektedir. Çalışma, mevcut bilimsel soruların ve bu soruların ele alınmasına yönelik mevcut yaklaşımların bir tartışmasını içermektedir (Bölüm 2). Önümüzdeki 1-2 on yıl için iklim araştırmalarının yönü Bölüm 3'te açıklanmaktadır. İklim bilgi hizmetlerinin geliştirilmesi ihtiyacı Bölüm 4'te vurgulanmaktadır. Sonuç olarak, 50 ila 100 yıl sonra karşımıza çıkabilecek bir dünyada iklim biliminin geleceğine ilişkin görüşler ve spekülasyonlar Bölüm 5'te yer almaktadır.

## 2 Güncel iklim araştırmaları

Dünya iklimindeki insan kaynaklı giderek artan hızlı değişiklikler atmosfer, okyanus, kriyosfer ve biyosferde derin ve yaygın değişikliklere yol açmıştır. Dünya çapında çeşitli bilimsel kurumlar tarafından üretilen ve genellikle WCRP tarafından koordine edilen son çalışmalar, atmosfer, okyanus ve kriyosfer içindeki ve arasındaki değişkenlik dinamikleri, geri bildirim mekanizmaları ve telekonneksiyonlar ve daha genel olarak iklim sistemindeki hızlı veya geri döndürülemez değişiklikler ve aşırı olaylar hakkındaki anlayışımızı büyük ölçüde geliştirmiştir (bkz. örneğin, Ghil ve Lucarini, 2020; Wunderling ve diğerleri, 2024 ve bilginin yayıldığı farklı IPCC raporları). Dünya'nın enerji bütçesindeki değişikliklerin ölçülmesinde, yağışlardaki, küresel karbon döngüsündeki ve değişen iklim altında biyojeokimyasal geri besleme döngülerindeki değişikliklerin itici güçlerinin anlaşılmasında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Son olarak, iklim sisteminin durumuna ilişkin bazı temel göstergeler artık daha iyi gözlemlenmekte ve öngörülmektedir.

Aşırı uçarların sıklığı ve yoğunluğundaki artış, son zamanlarda meydana gelen birçok hava ve iklim olayında (sıcak hava dalgaları, kuraklıklar, fırtınalar, aşırı yağışlar ve seller, yoğun tropikal siklonlar, seller, orman yangınları) daha önce görülmemiş büyüklüklere ulaşması ve 2023/2024'te kayda değer bir artış göstermesi (örn, Samset vd., 2024; Cheng ., 2024vd; Cattiaux vd., 2024Raghuraman vd., 2024; ) iklim sisteminin karmaşıklığını (doğrusal olmayışını) ve birbirine bağlılığını göstermektedir. Raghuraman ve diğerleri (2024) . kapsamlı bir sistemik anlayış çağrısında bulunmakta ve Dünya ikliminin entegre bir sistem olarak anlaşılmasına dayalı sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesine duyulan acil ihtiyacın altını çizmektedir. İklim değişikliğinin bugün halihazırda yaşanmakta olan kaçınılmaz etkilerinden ve gelecekte yaşanması kaçınılmaz olan etkilerinden kaynaklanan karmaşık risklere verilecek yanıtları bilgilendirmek için bilime ihtiyaç duyulduğu açıktır.

Antropojenik ısının Dünya sistemine, büyük ölçüde de küresel okyanusa alınması, okyanusun termal olarak genişlemesiyle sonuçlanmaktadır. Ayrıca, buzulların ve kutup buz tabakalarının erimesi nedeniyle okyanus kütlesi artmaktadır. Her iki etki de deniz seviyesindeki yükselişin 1990'larda yılda yaklaşık 2 mm'den son on yılda yılda 4 mm'nin üzerine çıkmasına yol açmıştır (Hamlington vd., 2024). Yüzyılın sonuna kadar deniz seviyesinin 80-100 cm'ye kadar yükseleceği tahmin edilmekte olup, esas olarak emisyon senaryolarından ve ilgili küresel ısınma seviyelerinden kaynaklanan büyük belirsizlikler söz konusudur. Buna ek olarak, kutup buz tabakalarındaki son derece belirsiz süreçler nedeniyle üst uçta daha büyük belirsizlikler vardır ve bu durum, artan küresel ısınma altında istikrarsızlık tetiklenirse, bu yüzyılda ve sonrasında hızlanan bir yükselme oranına ve sonraki yüzyıllarda birkaç metre daha fazla yükselmeye yol açabilir (Van der Wal vd., 2022).

İklim bilimine yönelik mevcut yaklaşım üç sütuna dayanmaktadır: (1) gözlemler (tarihsel kaynaklardan ve paleoiklim arşivlerinden elde edilen geriye dönük gözlemler dahil), (2) teori (anlayış) ve modelleme ve (3) örneğin iklim hizmetleri yoluyla ilgili bilgilerin üretilmesi. Bu üç sütun birlikte, iklim sistemindeki değişiklikleri tespit etmek, simüle etmek ve anlamak için tamamlayıcı yaklaşımlar geliştirmiştir. Gerekli bilgi sisteminin temelini oluştururlar.

## 2.1 Gözlemler

Şu anda, Küresel İklim Gözlem Sistemi (GCOS) veya Küresel Okyanus Gözlem Sistemi (GOOS) ve otonom ölçüm ağı (Argo) tarafından koordine edilen yer tabanlı, gemi tabanlı ve uydu tabanlı uzaktan algılama dahil olmak üzere çeşitli platformlardan zengin iklim gözlemleri elde edilmektedir. İklim süreçleri, iklim değişkenliği ve iklim eğilimleri açısından analiz edilen bu gözlemler, küresel ortalama ısınma, Arktik amplifikasyon, Arktik Deniz buzu kaybı ve deniz seviyesinin yükselmesi dahil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere iklim değişikliğinin sinyallerini ölçmek için temel oluşturmuştur. İnsan kaynaklı iklim değişikliği için en güçlü kanıtlardan birini sağlarlar.

Çok çeşitli gözlemler, değişen iklimin nicel tahminlerini üretmek için bir sentez adımı sayısal sirkülasyon modelleriyle de birleştirilir. Örnek olarak, gözlemleri sayısal atmosferik tahmin modelleriyle birleştirerek atmosferin ve yüzey alanlarının modern dönem boyunca (kabaca yaklaşık 1950'den beri) 4 boyutlu evrimini sağlayan atmosferik reanalizler verilebilir. Atmosferik reanalizler de geçmişe doğru genişletilmiştir, ancak daha az gözlemsel kısıtlamalarla, özellikle de yüzey basıncı alanlarıyla (örneğin, [Compo ve ark., 2005](#)). Benzer çalışmalar okyanusta da devam etmektedir ve şimdi birleşik Dünya sistemine genişletilmektedir. Atmosferik ve okyanus reanalizlerinin topluluk temelli değerlendirmeleri, özellikle uydu dönemindeki (1980'den günümüze) eğilimlerinde ve değişkenliklerinde farklılıklar ortaya koymuş ve deterministik reanalizlerden ziyade bir reanaliz topluluğunun kullanılmasını önermiştir (bkz. [Dee vd., Gelaro 2017.2011.; vd., vd., 2020; Kobayashi vd2015; Hersbach](#)).

## 2.2 Teori ve modelleme

2021 Nobel Fizik Ödülü kısmen Syukuro Manabe ve Klaus Hasselmann'a "Dünya ikliminin fiziksel modellemesi, değişkenliğinin ölçülmesi ve küresel ısınmanın güvenilir tahmini için" verildi. Manabe'nin küresel ortalama sıcaklığın ve atmosferdeki dikey sıcaklık dağılımının Arktik amplifikasyon, iklim değişkenliğinin ölçülmesi ve Hasselmann'ın bu değişkenliğin gözlemlerinde antropojenik zorlamanın etkilerinin parmak izini çıkarması da dahil olmak üzere antropojenik zorlamaya tepkisine ilişkin başarılı erken tahminleri, iklim sistemine ilişkin teorik anlayışımızın bir kanıtıdır. Fiziksel karmaşıklık hiyerarşisi boyunca modelleri kullanma mirası, bugün iklim değişikliğinin etkilerini anlamak için verimli bir yol olarak devam etmektedir. Bu durum, son teknoloji ürünü iklim modellerini kullanarak sadece iklim değişikliğine verilen tepkiyi simüle etmenin değil, aynı zamanda iklim değişikliğinin etkilerini anlamanın da önemini vurgulamaktadır ([Held, 2005](#)).

İklim modeli simülasyonları, iklim sisteminin farklı zorlamalara, özellikle de daha yüksek sera gazı konsantrasyonlarıyla ilişkili olanlara tepkisini incelememize olanak tanır ([IPCC, 2021; IPCCIPCC, , , 2007, Climate Change2013Climate ; ChangeChange, 2001; IPCCClimate](#) . İklim modeli çıktısı tarafından yönlendirilen etki modelleri ile birlikte, iklim değişikliğinin doğal ve insani sistemler üzerindeki riskini değerlendirirler ve geçmişte gözlemlenen ve yeniden inşa edilen iklimin simülasyonları yoluyla değerlendirilebilirler. Bu tür projeksiyonlar tipik olarak WCRP'nin CMIP protokolü kapsamında yapılmaktadır ([Durack vd., 2017; IPCC, 2018](#)). Karbon döngüsü modellemesi, [IPCC](#)kilit bir politika aracı olarak "kalan küresel karbon bütçesi" kavramının oluşturulmasında da etkili olmuştur ([Climate Change, 2013](#)). Konveksiyon ve ölçek etkileşimlerini simüle etmek için yüksek çözünürlüklü modellemede ilerlemeler kaydedilmekte ve bunun küresel-bölgesel ölçek etkileşimlerinin temsili ve yerel aşırı uçların oluşumu ve yoğunluğu üzerinde etkileri olmaktadır. Gelişmiş Yeryüzü Sistem Modellerinin (ESM'ler) geliştirilmesi yoluyla arazi yüzeyinde ve hidrolojik döngüde arazi kullanımı, su kullanımı ve kentleşmenin temsil edilmesinde de ilerleme kaydedilmektedir.

Paleoiklim kanıtlarını iklim modelleri veya diğer kanıtlarla birleştirmeye yönelik yeni tekniklerde bir patlama yaşanmış, bu da son yirmi yılda uzun vadeli iklim değişikliğine ilişkin nicel bilgilerde ve iklim duyarlılığının belirlenmesinde önemli ilerlemelere yol açmıştır ([Knutti vd., 2017](#)). Bazı bölgelerde aşırı sıcaklık ve kuraklıktaki değişikliklere olan güvenin artmasıyla birlikte, aşırı olayların özelliklerinin ve bu olaylardaki değişikliklerin anlaşılmasında ilerleme kaydedilmiştir. Aşırı yağışlardaki değişikliklerin anlaşılmasında da ilerleme kaydedilmiştir, ancak boşluklar devam etmektedir. Özellikle, iklim tahminlerini iyileştirmek için iklim gözlemleri ve iklim modellerinin kombinasyonu eksiktir. Devam eden çabalar, mevsimsel ve on yıllık tahminlerin başlatılmasına odaklanmaktadır. Bununla birlikte, mevcut gözlemlerin daha iyi kullanılması, parametre tahmini yoluyla iklim modellerinde iyileştirmelere yol açmalıdır.

## 2.3 İlgili bilgilerin üretilmesi

Etkili iklim değişikliği stratejileri ve politikaları geliştirmek için, karar vericilerin düzenli olarak iklim eylemlerine yönelik kaynakları planlamak ve önceliklendirmek için net, eyleme geçirilebilir bilgilere ihtiyacı vardır. Bu bilgiler iklim projeksiyonlarını (örneğin sıcaklık ve yağışlarda öngörülen değişiklikler, aşırı meteorolojik ve hidrolojik olayların sıklığı ve yoğunluğunda beklenen değişiklikler), bölgesel kırılma noktalara ilişkin içgörüler (örneğin sel ve kuraklık riskleri), beklenen ekonomik etkileri (örneğin azaltım ve uyum stratejilerine yapılan yatırımlarla ilişkili maliyetler), sektörel etkileri (örneğin iklim değişikliğinin ormanlar, tarım, sağlık üzerindeki etkisi), ekonominin farklı sektörlerinde sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik uygulanabilir seçenekleri ve toplumsal direnç oluşturmaya yönelik rehberliği içermelidir. Karar vericilerin ayrıca karbon fiyatlandırması ve yenilenebilir enerji teşvikleri gibi eyleme geçmek için mevcut araçlar hakkında yasal ve finansal bilgiye de ihtiyaçları vardır.

Son olarak, paleoiklim çalışmaları, özellikle de geçmiş iklim değişikliklerinin vekil kayıtlara dayalı olarak yeniden yapılandırılması, iklim sisteminin karmaşık davranışının anlaşılmasına yardımcı olmuş ve insan faaliyetlerinin yarının iklimi üzerindeki potansiyel etkilerine ilişkin bilimsel araştırmaları bir perspektife oturtmuştur ([Kaufman ve Masson-Delmotte, 2024](#)). Paleoklimatik çalışmalar, geçmişteki iklim değişikliklerinin nicel olarak anlaşılmasında ilerlemelere yol açmıştır (örn,

Dünya sisteminin doğal zorlamalara tepkisi, geniş bir iç değişkenlik yelpazesinin analizi, iklim sisteminin yavaş bileşenlerinin özellikleri; ani iklim değişiklikleri için ampirik kanıtlar, örneğin Berger ve Loutre, 2002; Yin vd., 2021). İklim modellerine duyulan güven, paleoiklim kanıtlarıyla yapılan sistematik karşılaştırmalar sayesinde artmıştır. Paleo-çevresel bilgiler, ekosistem adaptasyonlarının ve adaptasyon sınırlarının daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Paleoiklim kanıtlarının sürece dayalı anlayışla birleştirilmesi, gelecekteki iklim projeksiyonları ve özellikle iklim duyarlılığının ölçülmesi için kısıtlamalar sağlamıştır.

### 3 Önümüzdeki on yıllarda iklim araştırmaları

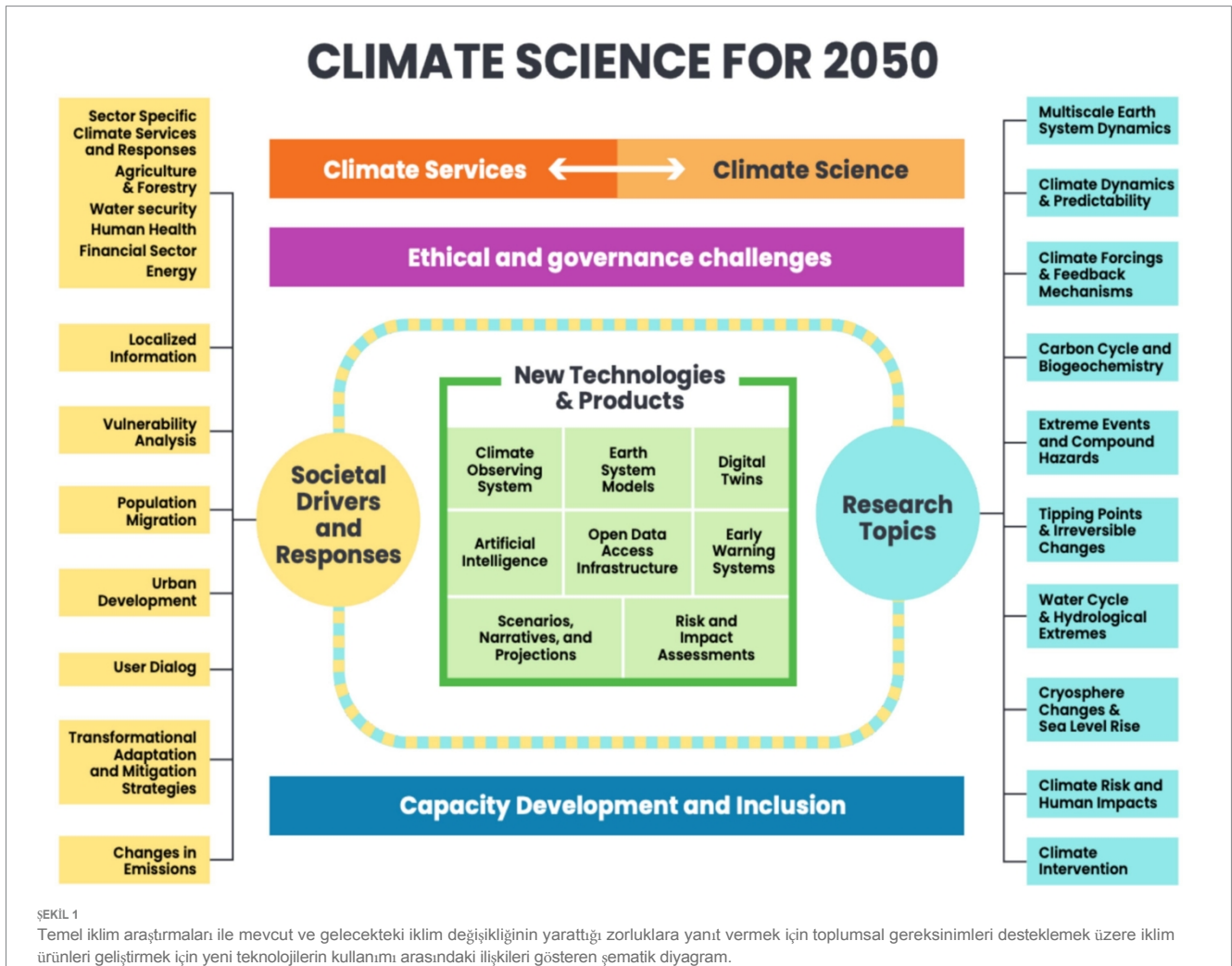
WCRP'nin bugüne kadar yaptığı çalışmaların insanların iklimi etkilediğini göstermedeki başarısı ve bunun sonucunda ortaya çıkan küresel ısınmayı azaltmaya yönelik siyasi irade, hem azaltım (azaltım yollarına ilişkin kararlar da dahil olmak üzere, örneğin CO<sub>2</sub>'ye karşı kısa ömürlü zorlayıcılar) hem de adaptasyon açısından iklim bilimi hakkında acilen ele alınması gereken yeni bilimsel sorular ortaya çıkarmıştır. Daha geniş anlamda, karmaşık ve doğrusal olmayan bir sistemle ve bu sistemin

yeni bir iklim durumuna adaptasyon. Bu da iklim araştırmalarına tamamen sistemik bir yaklaşımın benimsenmesini gerektirmektedir.

Örneğin Birleşmiş Milletler tarafından 2015 yılında kabul edilen Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini desteklemek üzere sağlam, ilgili, eyleme geçirilebilir ve doğru iklim bilgilerinin geliştirilmesi, temel nitelikteki birçok bilimsel sorunun ele alınmasını gerektirmektedir. İklim sistemine ilişkin anlayışımızın en temel yönlerinde ilerleme kaydedilmediği takdirde, sürdürülebilir bir gelecek için ihtiyaç duyulan bilime dayalı karar alma sürecine beklenen katkıların sağlanmasında sınırlı ilerleme kaydedilecektir. Yeni teknolojilerin (örneğin gözlem sistemleri, modelleme, yapay zeka, dijital ikizler) kullanımı ve ürünlerin (örneğin veriler, projeksiyonlar, risk değerlendirmeleri, erken uyarı sistemleri) geliştirilmesi ile birlikte temel araştırmalar, bilim camiasının toplumsal gereksinimleri karşılamak için sağlayacağı araçlardır (Şekil 1). Aşağıdaki paragraflarda geleceğe yönelik araştırma sorularına örnekler verilmektedir.

#### 3.1 İklim dinamikleri

Okyanus, atmosfer, kriyosfer ve su arasındaki karmaşık ve genellikle doğrusal olmayan ve çok ölçekli etkileşimleri anlamak



Her bir bileşen tarafından ve bunlar arasında ısı, su ve karbon taşınımı dahil olmak üzere kara yüzeyi.

Atmosferik ve okyanus dolaşımındaki gelecekteki değişikliklerin ve bölgesel iklim değişikliğinin kritik yönleri olan iç değişkenlik ve zorlamanın rolünün anlaşılması gerekmektedir. Buna ek olarak, Dünya sistemindeki biyojeokimyasal etkileşimlerin yüksek sıcaklıklarda iklim geri bildirimlerine yol açan karmaşık rolünün daha iyi anlaşılması gerekmektedir. İklim ve iklim riski projeksiyonları belirsizliğini korumaktadır. Bu nedenle, gelecekteki bir iklimde iklim risklerinin olasılıklı bir şekilde ele alınması genellikle mümkün değildir veya yanıltıcıdır ve yüksek çözünürlüklü modellerle aşırı uçların daha ayrıntılı simülasyonlarını gerektirir.

Okyanus ve karanın rolü ve bunların atmosferle etkileşimleri konusunda hala belirgin bir süreç anlayışı eksikliği bulunmaktadır. Bununla birlikte, odaklanmış saha kampanyaları ve izleme çabaları, belirli muson süreçlerinin anlaşılmasını ilerletmede çok yararlı olmuştur. İç değişkenlik, tropikal-ekstratropikal etkileşimler, okyanus-kara-atmosfer etkileşimleri, kıyı okyanus süreçleri, girdaplar, jetler, mevsim içi zaman ölçeklerinde aşırı uçların, fırtınaların ve muson sistemlerinin daha doğru lokalizasyonunun anlaşılmasını geliştirmek için acilen daha fazla koordineli çalışmaya ihtiyaç vardır. Gelecekte haftalardan yıllara uzanan zaman ölçeklerinde öngörülebilirlik konusunda daha fazla araştırmaya duyulan ihtiyaç artacağından, büyük ölçekli iklim değişikçe değişmesi muhtemel olan altta yatan doğal değişkenliğin daha iyi anlaşılmasına ihtiyaç vardır.

Kriyosferik değişiklikler, tatlı su girişi, kutupsal ısı salınımı, kutupsal ısı ve nem adveksiyonu ve derin su oluşumu yoluyla hem okyanus hem de atmosfer ile güçlü bir etkileşim içindedir. Permafrost çözülmesi de karbon ve metan döngüleri ile güçlü bir etkileşim içindedir. Bu etkileşimlerin, olası devrilme noktalarının ve geri döndürülemez değişikliklerin daha iyi değerlendirilmesi de dahil olmak üzere, daha kapsamlı uzun vadeli iklim projeksiyonları için daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu, dinamik buz tabakası süreçlerinin daha iyi anlaşılmasını, ısınan bir dünyada doğrusal olmayan sistem tepkileri için eşikleri ve özellikle sıcaklık eşikleri ve uzun vadeli kararlı değişikliklerle ilişkili buz tabakası istikrarsızlık süreçlerinin gelişmiş bir şekilde anlaşılmasını içerir. Bu ilerlemelerin sağlanması, okyanus-atmosfer-kriyosfer arayüzlerinde etkileşimlerini ölçmek için gerekli yerel gözlemlerin elde edilmesi zorluğunu ortaya çıkarmaktadır.

Kısacası, çok ölçekli iklim dinamiklerinin evrimini tam olarak karakterize etmek ve tahmin etmek için Dünya sisteminin farklı bileşenleri arasındaki fiziksel ve biyojeokimyasal bağlantıların ve etkileşimlerin daha iyi anlaşılması gerekmektedir.

### 3.2 İklim zorlaması ve geri besleme mekanizmaları

Geri besleme mekanizmalarının önemini anlamak ve ölçmek.

Son küresel sıcaklık değişiklikleri, iklim süreçlerinin tam bir sistem anlayışının eksikliğini ve özellikle doğrusal olmayanları, istenmeyen sonuçları ve geri bildirimleri hesaba katma ihtiyacını vurgulamıştır. Sera gazı (GHG) konsantrasyonları ve aerosol seviyelerini düşüren eylemler tarafından yönlendirilen etkili radyatif zorlama eğilimleri, Dünya'nın enerji değişimindeki artışların bir kısmını yönlendirmektedir.

Dünya sistemi projeksiyonlarını yönlendirmek için kullanılan senaryolar, 2040'ın ötesinde gelecekteki iklim özelliklerinde baskın belirsizlik kaynaklarından biridir. Bu senaryolar tipik olarak IPCC değerlendirme döngülerinin zaman ölçeğinde geliştirilir. Ancak, antropojenik zorlama gelişir

zaman içinde. Özellikle Covid-19 pandemisi CO<sub>2</sub> emisyonlarında %5,4'lük bir düşüşe yol açmıştır (Laughner vd., 2021) ve son tahminler şu anda RCP

4,5 senaryosunu takip ettiğimizi göstermektedir (Hausfather, 2023).

Metan ve nitroz oksit kaynaklı iklim zorlaması da yüksek emisyon senaryoları boyunca uzanmaktadır. Buna ek olarak, insan kaynaklı aerosoller, özellikle kuzey yarımkürede iyileştirilmiş hava kalitesi önlemlerinin bir sonucu olarak küresel olarak değişmiştir ve bölgesel iklim üzerinde önemli etkileri vardır. Son zamanlarda elde edilen önemli bilgilere rağmen, kara ve okyanus karbon yutakları konusunda da büyük belirsizlikler devam etmektedir. Zorlamanın değişen doğasını hesaba katmak için senaryoların güncellenmesi, projeksiyonların çeşitliliğini sağlamak için gerekli olacaktır. Antropojenik zorlamanın operasyonel hale getirilmesi, bu bilimsel boşluğu gidermek için umut verici bir stratejidir. CMIP7 için planlanan faaliyetler ve modeller arası karşılaştırmalar bu zorluğu ele almaya başlamıştır (CMIP7 Forces Görev Ekibi ve Bölgesel Aerosol Model Karşılaştırma Projesi).

Metan, florlu gazlar, ikincil organik aerosoller ve troposferik ozon dahil olmak üzere kısa ömürlü iklim zorlayıcılarının kaynaklarını, akıbetini ve etkilerini daha iyi anlamamız gerekiyor. Azot oksitler, kükürt dioksit, karbon monoksit ve uçucu organik bileşikler gibi antropojenik gazların emisyonları, ozon ve aerosol partikülleri de dahil olmak üzere olumsuz sağlık etkileri olan ikincil kirleticilerin kaynağı olduğundan, konu hava kalitesi açısından da önemlidir. Bulut geri bildirimleri belirsizliğini korumaktadır; bu belirsizliğin bir kısmı yüksek bulutların su içeriğindeki değişikliklerin yanı sıra faz değişikliklerinden kaynaklanmaktadır. İklim duyarlılığının bir miktar iklimle bağlı olmasını beklemek için güçlü nedenler vardır; örneğin buz-albedo geri beslemesi buz eridikçe değişir.

Bulutların doğrudan etkileri ve aerosollerden kaynaklanan sözde dolaylı etkiler, iklim modelleri için önemli bir sorun olmaya devam etmektedir. Gemi emisyonlarının azaltılmasının Kuzey Atlantik üzerindeki bulutluluğu azaltarak 2023'te gözlemlenen ısınmaya neden olabileceğini öne süren son çalışmalar, ancak bu etkinin ne kadar büyük olduğunu (örneğin, Hansen vd.2023., ; Hodnebrog vd2024, ; Schmidt, 2024Samset vd., 2024) veya gözlemlenen ısınmanın iç deniz yüzeyi değişkenliğini yansıtıp yansıtmadığını () belirlemek için yeterli veri eksikliği bulunmaktadır. Kuzey Pasifik'te, Çin'in 2010'dan 2020'ye kadar aerosol azaltımı bir rol oynamaktadır (Wang vd., 2024). AR6'da olumlu olarak değerlendirilen bulut geri bildirimleri mekansal olarak değişmekte, belirsizlikler büyük olmaya devam etmekte ve modeller arasında hala büyük farklılıklar bulunmaktadır. Gezegenel albedo ve düşük bulut geri beslemelerindeki değişiklikler son zamanlarda radyatif zorlamayı hızlandırmış olabilir.

### 3.3 Karbon döngüsü

Atmosfer, okyanus ve biyosferdeki karbon döngüsü süreçlerini ve değişen iklim koşullarına tepkilerini araştırmak için kapsamlı Dünya Sistemi modelleri geliştirmek.

Gelecekteki Dünya Sistemi Modeli (ESM) araştırmalarının, başlıca küresel biyojeokimyasal döngülerin ve bunların devam eden iklim değişikliğinden nasıl etkilendiklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlaması gerekecektir. Karada, azot döngüsünün daha iyi temsil edilmesine acilen ihtiyaç duyulmaktadır (Arora vd., 2020). Karasal ekosistemlerin güçlü bir karbon yutağı olarak hareket etmeye devam edebilmesi, toprak azot mineralizasyonunun evrimine ve bitki üretkenliği için kullanılabiliğine bağlı olacaktır. İklim değişikliği aynı zamanda şiddetli kuraklık riskini ve buna bağlı olarak artan orman yangınları riskini de artırmaktadır; bu da halihazırda ek CO<sub>2</sub> emisyonlarına, orman örtüsünün azalmasına ve bitki örtüsü dinamiklerinde potansiyel olarak uzun vadeli değişikliklere yol açmaktadır (Bowman vd., 2009;

Flannigan ve diğerleri, 2009). Bu bağlamda, yeniden büyümeyi dikkate alarak orman yangınlarının on yıllık etkilerini daha iyi anlamaya ihtiyaç vardır. Modellenen su döngüsündeki belirsizliklerin karbon döngüsündeki belirsizlikleri etkilediği ve bunlarla etkileşim içinde olduğu açıktır. Ekosistemler, ısınma koşulları altında istikrarsızlaşabilecek büyük toprak altı organik karbon stokları içerdiğinden, gelecekteki ESM'lerde permafrost ve ani çözülmenin daha iyi temsil edilmesi de gerekecektir (Koven vd.2011., Schuur vd, 2022; ). Yeni bir sınır, permafrost da dahil olmak üzere topraktaki ve okyanustaki mikropların rolünü haritalamaktır.

Okyanus tarafında, deniz biyolojisinin temsili ve fitoplanktonun ısınan sıcaklıklara uyum kapasitesinin sınırları da dahil olmak üzere iklim değişikliğine tepkisinin ESM'lerde iyileştirilmesi gerekecektir (Sauterey vd., 2023). İklim değişikliğinin tüm okyanus sirkülasyonunu etkilediğinin, okyanusun taşıma özellikleri için karmaşık sonuçlar doğurduğunun ve aynı zamanda okyanusun ısı ve karbon döngüsü için okyanusun atmosfere göre bir ısı ve karbon yutağı olarak rolünü etkilediğinin farkında olmamız gerekir. Buna ek olarak, aşırı deniz ısı dalgalarının okyanus asitlenmesi ve okyanustaki diğer aşırı olaylarla birleşmesi, deniz yaşamı üzerinde ciddi etkilere neden olabilir (örneğin, Romanou vd., 2024). Kıyı okyanuslarının bu karmaşık etkileşimdeki rolü henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Küçük ölçekli girdaplar ve fırtınalardan büyük ölçekli girdaplara ve meridyonel devrilme sirkülasyonu ve dikey tabakalaşmaya kadar okyanus dinamiklerindeki değişikliklerin yanı sıra bunların fitoplankton büyümesinin besin ve ışık sınırlamasındaki rolleri ve okyanusun karbon yutağı üzerindeki etkileri arasındaki etkileşimin öngörülmesi, ESM'lerde yeterince temsil edilmeli ve GOOS gibi uluslararası programlardan elde edilen mevcut gözlemlere göre değerlendirilmelidir.

### 3.4 Arazi kullanımı ve arazi bozulması

İklim değişikliğine bağlı olarak arazi kullanımı ve arazi örtüsündeki değişimi tanımlamak için gelişmiş modeller geliştirmek.

Arazi kullanımı ve arazi bozulmasının anlaşılması, su ve enerji akışları yoluyla iklim üzerindeki etkisi, önemli sosyo-ekonomik ve ekolojik sonuçları ve nihayetinde gıda ve su güvenliği nedeniyle önemlidir. Arazi kullanımı değişikliğini ve bunun karbon, nitrojen, enerji ve su akışları üzerindeki etkilerini değerlendirmeye yönelik araştırma çabalarına rağmen, özellikle karbon tutma ve sürdürülebilir tarımla ilgili olanlar da dahil olmak üzere sürdürülebilir arazi yönetimi uygulamalarının değiş tokuşlarını ve ortak faydalarını anlamada temel zorluklar devam etmektedir. Arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişimine ilişkin daha gelişmiş modellere duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Ele alınması gereken sorunlar arasında toprak karbonu ve mikrobiyal süreçlerin iklim ısınmasına tepkileri, toprak nemindeki değişiklikler, bitki organik madde girdilerindeki değişiklikler, fotosentez ve büyümenin sıcaklık ve atmosferik CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarındaki eş zamanlı değişikliklere uyum süreçleri ve orman yangını olaylarının olasılığı yer almaktadır. Toprak ekosistemi süreçlerinin niceliksel olarak daha iyi anlaşılması, arazi-iklim etkileşimlerinin ve geri bildirimlerinin gelecekteki tahminleri için kritik öneme sahip olacaktır.

Yerelden küresel ölçeklere kadar arazi kullanımı değişikliği konularında ve arazi temelli iklim çözümlerinde kaydedilecek ilerleme, etkili iklim azaltma ve uyum stratejileri konusunda bilgi sağlayacaktır. Hava koşullarıyla ilgili yenilenebilir su kaynakları ile bu kaynakların yönetilme şekli arasındaki bağlantı, ekonomik düşünceler ve süreçler tarafından yönlendirilmektedir. Suyun toplumlar tarafından nasıl değerlendirildiği (parasal veya düzenleyici değer) kritik önem taşımaktadır.

Artan küresel nüfus için gıda güvenliğinin sağlanması, sağlıklı toprak kaynakları ve gelişen ekosistemler gerektirmektedir. Ancak mevcut tarım uygulamalarımız, dünya genelinde toprakların, doğal süreçlerin onları yenilemesinden 100 kat daha hızlı aşınmasına neden olmaktadır. Buzsuz arazilerin en az %70'i değişime uğramış olup, bu durum 3,2 milyardan fazla insanı etkilemektedir. Mevcut oranlarla, 2050 yılına kadar arazinin %90'ı bizim izimizi taşıyacak. Arazi bozulmasının etkileri dünya nüfusunun çoğu tarafından hissedilecektir. Arazi bozunumu aynı zamanda yağış düzenini değiştirmekte ve bozmakta, kuraklık veya sel gibi aşırı hava koşullarını şiddetlendirmekte ve iklim değişikliğini daha da ileri götürmektedir. Sosyal ve siyasi istikrarsızlığa yol açarak yoksulluğu, çatışmayı ve göçü tetikler.

Arazi bozulumu nötrallitesi, geleceğin bu endişe verici tablosunu durdurabilir ve ardından tersine çevirebilir. Bu hedefe ulaşmak için şunlar önemlidir

(1) yeni arazi bozulmalarını önlemek, (2) biyoçeşitliliği, toprak sağlığını ve gıda üretimini artıracak sürdürülebilir arazi yönetimi uygulamalarını benimseyerek mevcut bozulmaları azaltmak ve (3) bozulmuş arazileri doğal veya daha üretken bir duruma geri getirme çabalarını hızlandırmak. Bu eylemler, büyük ölçekli dönüştürücü projeler ve programlar aracılığıyla iyi uygulamaları ve pilot faaliyetleri ölçeklendirerek sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunmak için önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu girişimler, insan refahında olumlu değişiklikler, yoksulluğun azaltılması ve karasal ekosistemlerin ve hizmetlerinin restorasyonu dahil olmak üzere birçok fayda sağlayabilir.

### 3.5 Aşırı olaylar

İklim değişikliğine yanıt olarak aşırı hava olaylarının (kasırgalar, fırtınalar, sıcak hava dalgaları, kuraklıklar, seller, aşırı deniz seviyesi olayları, deniz ısı dalgaları, bileşik basamaklı olaylar) sıklığını ve yoğunluğunu tahmin edin.

Sıcak hava dalgaları, seller ve kuraklıklar gibi aşırı hava ve iklim olayları, ölümlere ve parasal kayıplara yol açan ve bazen on yıllar boyunca bölgelerin sosyo-ekonomik istikrarını etkileyen yıkıcı çevresel, ekonomik ve sosyal etkilere sahiptir (örneğin, Young ve Hsiang, 2024). Bu olaylara ilişkin izleme ve bilgilerin iyileştirilmesine ek olarak, aşırı uçların ve bunların küresel iklim değişikliğindeki rolünün daha iyi anlaşılması gerekmektedir.

Aşırı uçlarda gözlemlenen ve öngörülen değişiklikler oldukça yereldir ve bölgeden bölgeye büyük farklılıklar göstermektedir. Antropojenik iklim değişikliği altında yağış ve sıcaklıkla ilgili aşırılıkların yoğunluğu artmaya devam edeceğinden, bunların tahmini önemlidir. Ancak, gözlemsel verilerin yetersiz kalitesi ve örneklemesinden kaynaklanan büyük belirsizlikler söz konusudur. Belirsizlikler aynı zamanda model simülasyonlarının yetersiz çözünürlüğünden de kaynaklanmaktadır. En gelişmiş modeller, kısmen çözünürlük sınırlamaları nedeniyle, son yıllarda Kuzey Yarımküre'deki kalıcı yaz hava durumu aşırılıklarının çoğunda yer alan Rossby dalga davranışını (örneğin, yarı rezonans amplifikasyonu) tam olarak yakalayamamaktadır. Bu fenomenin görülme sıklığı, insan kaynaklı ısınma nedeniyle muhtemelen artmaktadır (Guimaraes vd., 2024). Sınırlı model çözünürlüğü, iklim aşırılıklarını tahmin etmek için gelişmiş istatistiksel metodolojilerin uygulanmasını da zorlaştırmaktadır. Ayrıca, iklimdeki aşırı uçları tahmin etmek için yapay zeka da dahil olmak üzere gelişmiş istatistiksel metodolojilerden henüz tam anlamıyla yararlanılmamıştır ve bunların doğrulanması ve iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, gözlemsel nokta verilerinden elde edilen tahminler ile model ızgaralı çıktıları arasında etkili karşılaştırmalar ve aşırı uçların çapraz doğrulamasını yapmak çok zordur. Önemli çabalar

İklim risklerini, özellikle de karbon döngüsünün iklim değişikliğine tepkisi ve devrilme noktalarının potansiyel etkileri ile ilgili olanları karakterize etme yeteneğimizi geliştirmek için gereklidir, çünkü toprak-bitki örtüsü-karbon döngüsü etkileşimleri şu anda iklim modellerinde tam karmaşıklıklarıyla yakalanmamaktadır ve birçok süreç ve etkileşim eksiktir (Canadell ve Jackson, 2021).

İnsan bir iklimde yağış modellerinin ve aşırılıkların nasıl geliştiğini anlamak çok önemlidir. Artan ısınma, daha fazla evapotranspirasyona ve dolayısıyla yüzey kurumasına yol açarak kuraklığın yoğunluğunu ve süresini artırır. Bununla birlikte, havanın su tutma kapasitesi 1° C ısınma başına yaklaşık %7 artar, bu da atmosferdeki su buharının artmasına neden olur. Böylece, artan nemle beslenen fırtınalar, izole gök gürültülü fırtınalar, ekstremitropikal yağmur, dolu veya kar fırtınaları veya tropikal siklonlar ve kasırgalar, yıllık yağışın azaldığı yerlerde bile yaygın olarak gözlemlenen daha yoğun yağış olaylarını üretmektedir (Trenberth 2011, IPCC, 2022; ). Buna karşılık, şiddetli yağışlardaki artışın, doğal ve insan yapımı drenaj kapasitesi zorlandığında ve arazi kullanımındaki değişiklikler (kentleşme, tarımsal uygulamalar) yüzey akışını artırdığında sel riskini artırması beklenmektedir. Yağış ve buharlaşmadaki değişikliklere verilen hidrolojik tepkiler karmaşıktır ve bölgeler ve havza türleri arasında farklılık gösterir. Bazı koşullar altında hidrolojik sistem, itici iklim değişkenlerindeki (öncelikle yağış) değişiklikleri artırabilir. Örneğin, birçok dağlık bölgede, ısınmayla birlikte daha fazla yağış kar yerine yağmur olarak gerçekleştiğinden ve karlar daha erken eridiğinden, erken ilkbaharda akış ve sel riski artar, ancak özellikle iç kıta bölgelerinde, yazın derinlerinde düşük nehir akışları ve/veya kuraklık riski artar. Bununla birlikte, atmosferdeki yukarı doğru hareket birimi başına daha fazla yağışla, atmosferik dolaşım zayıflar ve musonların duraklamasına neden olur. Tropik ve subtropik bölgelerde, deniz yüzeyi sıcaklıkları değiştikçe güçlü yağış modelleri hakim olur; El Niño buna iyi bir örnektir. Deniz yüzeyi sıcaklıkları (SSTs) örüntülerindeki değişikliklerin ve bunların atmosferik dolaşımdaki değişikliklerle ilişkisinin daha iyi anlaşılması, aşırı yağış örüntülerine ilişkin gelişmiş tahminlerin ileriye taşınması açısından kritik önem taşımaktadır.

Taşkın riski yönetimi ve taşkın koruma sistemlerinin tasarımı, iyi anlaşılmalı iklim fiziği, mevcut ve gelecekteki olayların hem meydana gelme olasılığını hem de geri dönüş süresini ve yoğunluğunu etkileyen şiddetli yağışlarda bir artış olduğunu vurgulasa da, neredeyse yalnızca gözlemlenen tarihsel kayıtlara ve aşırı yağış ve taşkın olaylarının geri dönüş oranlarına dayanmaktadır. Bu alanda acilen rehberliğe ihtiyaç vardır; seller, büyük nüfus ve varlıkların risk altında olduğu, dünyanın en zarar verici ve tehlikeli doğal tehlikelerinden biridir. Benzer şekilde, 20<sup>inci</sup> yüzyılda dünyanın büyük şehirlerine güvenilir ve temiz su sağlamak için geliştirilen su sistemleri, bu su sistemlerini besleyen su kaynaklarının (öncelikle akarsu akışı) gözlemlerinden elde edilen mevsimler arası ve yıllar arası değişkenlik tahminlerine dayanmaktadır. Su kaynaklarındaki kısıtlamalar evapotranspirasyondan da etkilenmektedir.

Süreçler, çoklu on yıllık değişkenlikten bireysel kümülsü bulutu oluşumuyla ilişkili zaman ölçeklerine kadar değişen birçok zaman ölçeğinde meydana gelir. Örneğin El Niño değişimleri, Pasifik Okyanusu'nun geniş alanlarında 2-7 yıllık bir zaman döngüsünde meydana gelirken, yerel tropikal SST'lerin düzenlenmesi, buharlaşma, bulutlar ve güneş radyasyonu arasındaki geri bildirimlerle günler ile haftalar gibi çok daha küçük zaman ölçeklerinde ilişkili görünmektedir.

### 3.6 Devrilme noktaları

Olası ani ve geri döndürülemez değişiklikleri (örneğin Amazon, Antarktika) tanımlamak, devrilme unsurları olarak adlandırılan devrilme eğilimli kritik iklim sistemi bileşenlerini izlemek için metrikleri değerlendirmek ve fizik tabanlı erken uyarı sistemleri geliştirmek.

Dünya Sistemi, insan toplumu için önemli sonuçları olan farklı uzun vadeli durumlara geçiş yaparak antropojenik iklim değişikliğine doğrusal olmayan bir şekilde yanıt verebilir. Devrilme unsurları paleoiklimsel bir gerçektir (Lenton vd., 2008). Devrilme unsurları, iklim zorlamasına doğrusal olmayan şekilde yanıt verebilen Dünya Sistemi bileşenleridir ve devrilme noktaları kritik geçiş eşiklerini ifade eder. Olası devrilme unsurları arasında Atlantik Meridyenel Devrilen Dolaşımının (AMOC) yavaşlaması veya çökmesi, deniz metan hidrat yataklarının istikrarsızlaşması, büyük Grönland ve Antarktika buz tabakalarının kaybindan kaynaklanan birkaç metrelik deniz seviyesi yükselmesi, çözülün permafrosttan karbon salınımı, boreal orman ekosistemlerinde büyük ölçekli değişimler, tropikal mevsimsel musonların bozulması, hem kuraklık hem de ormansızlaşmadan etkilenen Amazon ormanlarının olası çöküşü yer almaktadır (Wang ve ark., 2023). Devrilme unsurları dinamik olarak birbirleriyle etkileşime girerek bileşik etkiler yaratabilir ve hatta Dünya'nın uzun vadeli iklim yörüngesini jeolojik zaman ölçeklerinde değiştirme potansiyeline sahip bir kaskadı tetikleyebilir (Lenton vd., 2019; Steffen vd., 2018). Bununla birlikte, bu kritik geçişlerin hangi koşullar altında gerçekleşebileceğine ilişkin model bilgisinde boşluklar bulunmaktadır. Muson sistemlerindeki kaymalar, okyanus kabarma sistemlerindeki değişiklikler veya Arktik ve Antarktika Deniz buzunun kaybolması, mercan kaybı, kutup dışı dağ buzullarının kaybı, bulut örtüsündeki değişiklikler vb. nedeniyle ekosistem bozuklukları/biyolojik çeşitlilik kaybı gibi bölgesel devrilme noktalarıyla ilgili yeni bir sorun ortaya çıkmaktadır. Bölgesel devrilme noktalarının mekanizmalarını anlamak ve risklerini değerlendirmek, çok daha yüksek çözünürlüğe, daha kapsamlı bağlantıya ve daha iyi çözümlenmiş süreçlere sahip yeni nesil iklim modellerini gerektirecektir. Devrilme noktaları sadece iklim olaylarıyla değil, aynı zamanda insan davranışlarındaki değişikliklerle de ilişkili olabilir.

### 3.7 Dünya sisteminde su ve su yönetimi

Suyun tüm evrelerdeki hayati rolü açıktır, ancak birçok açıdan, zaman içindeki değişkenlik ve değişiklikler bir yana, uzun vadeli ortalamayı yeterince belirlemek için gözlemler mevcut değildir. Bu durum özellikle bulutlar, yağış ve buharlaşma için geçerlidir.

Su döngüsünü atmosfer, okyanus, kriosfer ve biyosferin yanı sıra toprak/zemin üzerinden de araştırmak için gözlem ve modellere dayalı entegre hidrolojik çalışmaların geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Bu tür çalışmalar, iklim değişikliğinin su üzerindeki derin sonuçlarını anlamak için gereken yeni bilgileri sağlayabilir ve suyla ilgili model yetenekleri ve eksiklikleri su yöneticileri için özellikle önemlidir. Genel su döngüsünün bu genel değerlendirmesinde yeraltı suyu depolama ve akışının rolünü anlamak çok önemlidir ancak geçmişte büyük ölçüde ihmal edilmiştir.

Yeniden analizler ve toplu formüller kullanılarak yapılan yerinde analizler de dahil olmak üzere buharlaşmayı temsil eden çeşitli ürünler birbiriyle uyumamaktadır (Trenberth ve Fasullo, 2013; Cheng vd., 2020). Yağış veri setleri yetersiz kalmaya devam etmektedir. En azından saatlik yağış gözlemlerine sahip olma hedefine nominal olarak ulaşılmıştır, ancak yağış miktarı üzerindeki belirsizlikler

Okyanuslar ve bazı kara alanları, özellikle dağlık arazilerde, güvenilir kullanım için çok büyük kalmaktadır. Karada, topografyanın ve arazi örtüsünün karmaşıklığı, toprak nemi tahminlerini etkileyerek süzülme ve yüzey akışını doğru bir şekilde değerlendirme yeteneğini sınırlar.

Spektrumun kızılötesi kısmındaki güçlü emilim ile birlikte nispeten yüksek konsantrasyon, su buharının atmosferdeki en önemli sera gazı yapar. Karmaşık enerji dengesi, yüzeyde buharlaşarak soğuma ve ardından su buharının yoğunlaşmasıyla atmosferde ısınmayla yeniden sağlanır, ancak bulut oluşumuyla daha da karmaşık hale gelir.

Rezervuar sistemi tasarım ve işletme çalışmalarının çoğu, iklim sistemindeki nedensellik, değişkenlik ve eğilimleri çok az dikkate alarak veya hiç dikkate almadan, istatistiksel durağanlık deneyim ve varsayımlarına dayanmaktadır. İklim sistemindeki değişkenliği mevsimsel ile on yıllık zaman ölçeklerinde veya su kaynakları uygulamalarında tahmin etme yeteneğinin geliştirilmesine büyük ihtiyaç vardır. Bunun nedeni kısmen modellerin geçmişteki eğilimleri ikna edici bir şekilde yeniden yapılandırılmaması ve modelin mekansal çözünürlüğünün hidrolojik uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için genellikle yetersiz olmasıdır.

İklim modeli yağışları genellikle enerji kısıtlamalarını karşılamak için aylık miktarı kabaca doğru alacak şekilde ayarlanır, ancak sıklık, süre, büyüklük, yoğunluk, günün saati ve türü büyük zorluklar olmaya devam etmektedir (Trenberth ve ark., 2017). ITCZ ve muson yağmurları gibi temel özelliklerin yanı sıra yüzey sıcaklığı modellerini etkileyen okyanus sınır akıntıları, kabarma ve aşağı kuyu sistemleri bölgelerindeki iklim modeli hataları, özelliklerin yanlış konumda olması ve doğru yıllık döngüye sahip olmaması nedeniyle büyük olabilir. Çoğu modelde yağışlar çok erken, çok sık ve yetersiz yoğunlukta gerçekleşir, bu da çok büyük geri dönüşüm ve atmosferde çok kısa nem ömrü ile sonuçlanır. Bu sapmalar da yüzey akışını ve toprak nemini etkilemektedir. Yüksek çözünürlüklü bulut çözümleme modelleri bazı yağış özelliklerini iyileştirir ve ileriye dönük bir yol gösterebilir, ancak henüz iklim amaçları için gereken uzun süreler boyunca küresel olarak çalıştırılmazlar. Geliştirilmiş parametrelendirmelere de ihtiyaç vardır.

Birçok model su kütesini korumaz ve okyanus genellikle sonsuz bir su kaynağı olarak ele alınır. Yağışlardaki sıcaklık ve enerji genellikle uygun şekilde hesaba katılmaz ve yüzey akışını, akarsu ve nehir akışlarını ve taze ancak muhtemelen kirli suyun okyanusa girişini uygun şekilde temsil etmek hala bir zorluktur. Bu durum okyanus tuzluluğunu ve yoğunluğunu etkilemekte ve sirkülasyon sistemlerindeki pertürbasyonlar ve buna bağlı deniz yüzeyi sıcaklık modelleri atmosfere geri beslenmektedir.

Uygun iklim modeli çıktılarıyla birlikte uzay ve zamanda yüksek kaliteli, yüksek çözünürlüklü gözlemsel verilere odaklanmaya devam etmek, model eksikliklerini vurgulayacak ve hem daha yüksek model çözünürlükleri hem de iyileştirilmiş parametrisasyonlar açısından hangi gelişmelerin gerekli olduğuna işaret edecektir (örn. Gettelman vd., 2024).

### 3.8 Jeomühendislik/iklim müdahalesi üzerine araştırma

Jeomühendislik/iklim müdahalesinin potansiyel etkilerini, uzun vadeli risklerini, istenmeyen sonuçlarını ve etik yönlerini araştırmak.

Bazen "iklim müdahalesi" olarak da adlandırılan jeomühendislik araştırması, alternatif yaklaşımları keşfetmekle ilgili olarak çerçevelenmiştir

adaptasyon ve azaltımı tamamlamak ve sera gazı kaynaklı iklim değişikliğinin bazı sonuçlarını dengelemek için (Hurrell vd., 2024). Bununla birlikte, küresel ısınmanın etkilerine karşı koymak için Dünya ikliminin küresel ölçekte manipüle edilmesi önerisi, birçok etik, bilimsel, teknik ve yönetim sorununu gündeme getirmektedir. Özel çıkarların ilgili araştırmalara yatırım yaptığı bir bağlamda, önerilen fikirleri, bilimsel sağlamlıklarını, potansiyel etkinliklerini ve kullandığı sınırlamalarını ve olumsuz etkilerin doğrudan veya kasıtlı risklerini - Dünya'nın enerji dengesinin/güneş radyasyonunun kasıtlı olarak değiştirilmesi, iklim sisteminin bileşenlerinin (örneğin buz tabakaları, okyanus biyojeokimyası vb.) diğer büyük ölçekli kasıtlı değişiklikleri ve büyük ölçekli karbondioksit giderimi ile ilgili olarak - inceleyen bilimsel araştırmalarla kamuoyunu bilgilendirmeye ihtiyaç vardır. Ele alınması gereken konular arasında önerilen yöntemlerin etkinliği ve ölçeklenebilirliği, bölgesel iklim bozulması olasılığı, ekosistemlere, işlevlerine ve hizmetlerine zarar verme, biyolojik çeşitlilik kaybı, okyanus gübreleme veya karbon tutma gibi tekniklerin kullanılmasının ekolojik riskleri, üst atmosferdeki kimyasal süreçlerin dinamiklerine temelden müdahale etme riski, sonlandırma sorunu, beklenen konuşlandırma ve fark edilebilir etkilerin zaman ölçeği, ayrıca taahhüt edilen konuşlandırma süresi ve ilgili gereksinimler (enerji, kaynaklar, su, arazi.) ve bu yaklaşımların bütünsel maliyetleri. Bu sonuncusu, yetersiz ya da kazanılmış menfaatlerin neden olduğu kayıp ve hasar maliyetlerini ya da bunların kazanılmış menfaatlara hitap etmesini ve bunun sonuçlarını mutlaka dikkate almalıdır.

pervasız gecikmeler, sera gazı emisyonlarının azaltılmaması.

İklim müdahalesi çalışmaları etik zorlukları (Preston, 2013), sorunun uluslararası ve siyasi boyutlarını, güç ilişkileri ve yerleşik değerlerle ilgili yönleri, yeni çatışma risklerini, eşitlik ve adalet konularını ve son olarak insan kaynaklı iklim değişikliğinin temel sorununu, yani fosil yakıtların kullanımının ve ormansızlaşmanın devam etmesini ele almayı ve çözmeyi erteleme nesiller arası bağlılığını ve sonuçlarını ele almalıdır.

## 4 İklim teknolojileri, ürünleri ve bilgi hizmetlerinin geliştirilmesi

Son yıllarda teknoloji muazzam bir ilerleme kaydetmiş, Dünya sistemini gözleme ve gelişmiş iklim modelleri aracılığıyla evrimini modelleme/projelendirme becerimizi büyük ölçüde geliştirmiştir. İklim modelleri, gözlemlerle birlikte, bilime dayalı bir iklim bilgi sisteminin geliştirilmesi için temel araçlardır. Ölçümleri asimile etmek, veri analizi ve yorumlamayı kolaylaştırmak için tasarlanmışlardır ve iklim tahminleri yapmak için kullanılabilirler.

Teknoloji aynı zamanda karar vermeyi desteklemeye uygun kapsamlı bir bilgi sisteminin tasarımı ve geliştirilmesi için yeni ufuklar açmaktadır. Bilgiye erişim, toplumdaki farklı aktörler ve nihayetinde her dünya vatandaşı için kolaylıkla sağlanabilmelidir.

### 4.1 İklim gözlem sistemi

İklim sisteminin durumunun ve doğal ve insan kaynaklı zorlamalarının neredeyse gerçek zamanlı olarak izlenmesi, operasyonel

ortaya çıkan değişiklikleri atfetme ve tahmin etme yetenekleri ve küresel bir iklim bilgi sisteminin kurulması (Trenberth vd., 2016) ulaşılabilecek fırsatlardır. GCOS ve GOOS tarafından tanımlanan tüm temel iklim değişkenlerini kapsayan sürekli bir iklim gözlem sistemi, böyle bir yaklaşım için temel bir omurga olmaya devam edecektir. Bu, atmosfer, okyanus, kriosfer veya kara yüzeyi gibi tüm iklim bileşenleri için *yerinde* ve uzaktan algılama unsurlarını içerir. Toprak nemi ve yüzey altı su akışı da bu bağlamda ele alınması gereken temel değişkenlerdir. Gözlem boşluklarını doldurmak ve sürdürülebilir gözlem sistemleri oluşturmak için yeni fırsatlar değerlendirilmelidir. Örneğin, yeni uydu misyonları herkes için küresel verilere açık erişim sağlayacaktır. Geliştirilmiş okyanus ve karasal karbon tahminleri, kara yüzeyi modellerinde geliştirilmiş süreç temsilleri ve uydu gözlem kayıtları, Dünya sistemine ilişkin anlayışımızı büyük ölçüde geliştirmektedir. Anlayışı geliştirmek, değişimi izlemek ve iklim modellerini iyileştirmek için tüm gözlemleri bir araya getirmek, gelişmiş bilgi sağlanması yoluyla iklim hizmetlerini ilerletmek için ele alınması gereken zorluklardır. Veri kurtarma ve proxy bilgilerinin araştırılması da, Dünya sistemi yeniden analizleri yoluyla uzun vadeli iklim değişkenliğini daha iyi anlamak için enstrümantal öncesi iklim kayıtlarının paleo-yeniden yapılandırılmalarının kullanılması gibi kilit bir rol oynamak zorunda kalacaktır.

## 4.2 İklim ve yer sistemi modelleri

Mevcut nesil Dünya sistemi modelleri kaba bir çözünürlükte çalışmakta ve küçük ölçekli süreçleri yüksek doğrulukla simüle etmemektedir. Bu çözünürlük sınırlamasının çeşitli sonuçları vardır. İlk olarak, aşırı olayları doğru bir şekilde tahmin etme ve küçük ölçekli süreçleri içeren iklim sistemindeki potansiyel eşikleri belirleme yeteneğini etkiler. Buna ek olarak, karar vericilerin ilgilendiği ölçekte doğru ve uygulanabilir bilgi sağlamaz. Bu nedenle iklim modellerinin çözünürlüğünün 1 km veya daha iyi bir değere yükseltilmesi, bulut dinamikleri, hidrolojik ve karbon döngüleri ya da buzullar veya bitki örtüsü gibi kara yüzeyi süreçleri gibi süreçlerin daha iyi çözülmesi için gereklidir. Önemli okyanus süreçleri, biyojeokimya ve ekosistemlerin yanı sıra okyanus-kriosfer etkileşimleri de karada ve okyanusta bu küçük ölçeklerde işler ve tam bir Dünya sistemi yaklaşımıyla çözümleri gerekir. Kilometre ölçekli modeller simülasyonların gerçekliğini büyük ölçüde artıracak ve daha geniş uygulamalar için kullanılabilir hale gelecektir. Ayrıca erken uyarı sistemleri için de vazgeçilmez olacaklardır.

Toplum ve uygulayıcılar, şehir ve topluluk ölçeğinde, tipik olarak 1 ila 10 km arasında güvenilir gelecek iklim bilgisi aramaktadır, ancak kilometre ölçeğinde geleceğe yönelik bu tür simülasyonların büyük toplulukları, şu anda mevcut bilgi işlem platformları ile yasaklayıcı derecede pahalıdır. İlk olarak, ~25 km çözünürlükte bu tür simülasyonların büyük toplulukları mevcut hale gelmekte ve aşırı uçları daha doğru bir şekilde yakalamada artan çözünürlüğün faydalarını şimdiden göstermektedir. Gelecekteki tüm yüksek çözünürlüklü simülasyonlar herkese açık ve erişilebilir olmalıdır (Blanken vd., 2022; Stevens 2024; vd., Wilkinson vd., 2016; ). Ayrıca bu bilgilere sadece iklim zaman ölçeklerinde değil, 5 ila 20 yıllık zaman ölçeklerinde de ihtiyaç duyulmaktadır; bu da çok yıllık ve on yıllık tahminlerin geliştirilmesini ve bu zaman ölçeklerinde neyin öngörülebilir olup olmadığının anlaşılmasını gerektirmektedir. Bir diğer önemli zorluk ise birleşik bölgesel modellerin geliştirilmesidir. En ilgili süreçler ve etkileşimler bölgeye göre farklılık gösterecektir, örneğin kıyı ve iç kesimler

topluluklar ve kentsel ve kırsal ortamlar, birleşik sistem süreçlerinin farklı temsillerini gerektirir.

Model simülasyonlarının iyileştirilmesi ve buna bağlı olarak bir iklim bilgi sisteminin geliştirilmesi, mevcut modellerin rafine edilmesi ve yeni metodolojilerin dahil edilmesi için ortak bir çaba gerektirirken, aynı zamanda bu modellerin gözlemlerle zorlanmasını ve iklim modellerinin sağlam, ilgili ve toplumun acil ihtiyaçlarını karşılayabilecek durumda kalmasını sağlanmasını gerektirmektedir. Birçok konunun aynı anda ele alınması gerekmektedir: mekansal ve zamansal model çözünürlüğü, model karmaşıklığı, gözlemlerin asimilasyonu, geçmiş iklimin yeniden analizi ve paleoiklim değişkenliğinin daha iyi anlaşılması ve iklim değişkenliğini, aşırılıkları ve kalan model belirsizliklerini örneklemek için büyük topluluklara duyulan ihtiyaç. Bu ihtiyaçlar, sosyal ve ekonomik bilimlerde de dahil olmak üzere disiplinler arasında daha fazla entegrasyon ile hava, iklim ve su olaylarının etkilerine ve ilişkilendirilmesine daha fazla odaklanan hizmet girişimlerinin güçlendirilmesini gerektirmektedir. Gelecekteki bu güvenilirlik ve uygunluk taleplerini karşılamak için birkaç kilometre ölçeğinde küresel iklim toplulukları gerekecektir. Dijital devrim, artan veri miktarı, özel sektörün artan rolü ve sıfır karbon ekonomisine ve çevresel hizmetlere küresel geçiş önümüzdeki on yıllarda önemli faktörler olacaktır.

Kuantum bilişimin sunduğu fırsatlar gözlem altında tutulmalıdır. Makine öğrenimi ve yapay zeka, entegre modelleme için değer zincirini dönüştürmeye başlıyor ve bulut bilişime küresel erişim, büyük miktarda veriden yararlanmanın önündeki bazı engelleri potansiyel olarak ortadan kaldırıyor (Jain vd., 2022). Bununla birlikte, "kara kutu" yaklaşımlarından kaçınmak ve iklim tahminlerinde gerekli güven için kritik öneme sahip olan iklim süreçlerinin teorik, fiziksel temelli anlaşılmasına y ö n e l i k paralel çalışmaları sürdürmek önemlidir.

## 4.3 Dünya sisteminin dijital ikizleri

Dünya sisteminin dijital ikizlerini, Dünya'nın ikliminin ve ekosistemlerinin davranışını gerçek zamanlı olarak doğru bir şekilde simüle eden gelişmiş sanal modeller olarak görüyoruz. Bu dijital kopyalar, çok sayıda kaynaktan (örneğin uydular, sensörler, tarihsel kayıtlar) gelen büyük miktarda veriyi entegre eder ve iklim modellerinin, çevresel değişikliklerin ve gezegen üzerindeki insan etkilerinin ayrıntılı simülasyonlarını ve tahminlerini sağlamak için sofistike algoritmalar, yapay zeka ve makine öğrenimi kullanır.

İklim adaptasyonu bağlamında, bölgesel veya yerel dijital ikizler, adaptasyon stratejilerinin senaryo planlaması için özellikle yararlıdır (Stevens vd., 2024; Richter, 2025). Örneğin, taşkın koruması inşa etmeyi planlayan bir şehir, farklı iklim değişikliği senaryoları altında farklı altyapı projelerinin etkinliğini simüle etmek için bir dijital ikiz kullanabilir. Bu, karar vericilerin sağlam verilere ve projeksiyonlara dayanarak iklim adaptasyonu için en iyi eylem planını seçmelerine olanak tanır. Şehirler, iklim dirençli altyapı planlamak için dijital ikizleri giderek daha fazla kullanıyor. Örneğin, sıcak hava dalgalarının veya artan sıcaklıkların kentsel alanlar üzerindeki etkisini simüle ederek, planlamacıların yeşil çatılar veya ısıya maruz kalmayı azaltan yeni kentsel düzenler gibi soğutma stratejileri tasarlamalarına yardımcı olabilirler. Bu modeller aynı zamanda şehirlerin enerji ve su sistemlerini gelecekteki iklim koşullarına göre optimize etmelerine de olanak tanır. Dijital ikizler aynı zamanda iklim değişikliğinin ekosistemleri nasıl etkileyeceğini simüle ederek korumacıların nesli tükenmekte olan türleri ve habitatları izlemelerine yardımcı olabilir. Dijital ikizler, belirli bölgelerin nasıl etkileneceğini tahmin ederek şunları sağlar

Hangi alanların koruma çabalarına veya daha dirençli tarım uygulamalarına ihtiyaç duyabileceği konusunda fikir verebilir. Şehirlerin yeşillendirilmesi ve kentsel hava kirliliğinin azaltılması (örn. biyogenik organik bileşikler, alerjenler) ile ilgili konular da fiziksel, biyolojik ve kimyasal etkiler arasındaki arayüzleri hesaba katan bir çerçevede ele alınabilir. Fiziksel/biyojeokimyasal sistemler ile sosyal/insani sistemler arasındaki kilit etkileşimleri temsil etmek büyük bir zorluk olacaktır.

#### 4.4 Yapay zeka ve makine öğrenimi

Son birkaç on yılda sayısal hava tahmininde yaşanan sessiz devrim (Bauer vd., 2015) yerini küresel kilometre ölçeğinde makine öğrenimi araçları çağına bırakıyor. Yeni modelleme yaklaşımlarının geliştirilmesinde, dinamik ve istatistiksel ölçek küçültmenin birleştirilmesinde ve risk bileşenlerinin sistematik olarak ele alınmasında önemli bir yeni araç olan makine öğrenimi giderek yaygınlaşmaktadır. Atmosfer ve okyanus parametrelerini iyileştirmek ve yenilemek için makine öğrenimini kullanan önemli gelişmeler devam etmektedir. Diğer gelişmelerle birlikte bunlar, araştırmaya dayalı iklim tahmini, öngörü ve iklim aşırılıkları ve tehlikeleri için erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesinde ilerlemelere yol açmaktadır. Mevcut makine öğrenimi modelleri, deterministik skorlarda, bazı değişkenler için geleneksel fiziksel tabanlı hava tahmin modellerini geride bırakıyor, ancak diğerleri için değil ve fizik tabanlı modellerden birkaç büyüklük sırasına göre çok daha hızlı (Lam vd., 2023; Bi vd., 2023). Bununla birlikte, makine öğrenimi araçlarının mevcut bilgi ve dinamik içgörülerini kullanma ve geliştirme konusundaki uygulamalarında sınırlamalar görüyoruz. Dahası, örneklem dışı uygulamaları (örneğin, gelecekteki iklim veya rekor kıran olaylar için) bir zorluk olmaya devam etmektedir. Bu nedenle, topluluğun makine öğrenimi araçlarını her zaman sayısal modelleme ve teoriye tamamlayıcı yaklaşımlar olarak kullanması gerekecektir. Buna ek olarak, makine öğreniminin performansı her zaman yeterli gözlemlerin, yeniden analizlerin ve bunların kalitesinin mevcudiyetine bağlıdır.

#### 4.5 Uyum ve azaltım için etkili stratejileri destekleyen bilgiler

Hem azaltım kararları (azaltım yollarına ilişkin kararlar da dahil olmak üzere, örneğin CO<sub>2</sub> ve kısa ömürlü zorlayıcılara odaklanan azaltımın en iyi nasıl ifade edileceği) hem de uyum kararları için önemli iklim bilimi soruları ele alınmaya devam etmektedir. Bu, kaçınılan emisyonların tespiti ve atfedilmesini ve iklim sisteminin ataleti ve özellikle yıllararası zaman ölçeklerinde güçlü iklim değişkenliği nedeniyle karmaşık olan azaltmaya verilen tepkiyi içerir (örneğin, Tebaldi ve Friedlingstein, 2013). İklim değişikliğiyle ilişkili kayıplar ve zararlar hakkındaki sorular giderek daha fazla gündeme gelmektedir (bkz. örneğin, Newman Noy, 2023 ve Otto ve Fabian, 2024; Otto, 2023; . Bununla birlikte, riskler adaptasyon ve kırılganlıktan da etkilenmektedir ve atıf sonuçlarının dava açmaya ne ölçüde hazır olduğu konusunda bilimsel tartışmalar bulunmaktadır (King vd.2023., , 2024; ayrıca bkz. Coumou vd, 2024). Ayrıca, bitki örtüsü ölümleri ve geçişleri, biyosfer yangın tepkisi ve eşikleri ve iklimin toplumla etkileşimleri gibi birçok süreç mevcut modelleme yeteneklerimizde iyi temsil edilmediği için ölçülmesi zor olan iklim riski hakkında ortaya çıkan önemli sorular da vardır (Sherwood vd,

2024). Bitkilerde ve ekosistemlerde (mercanlar dahil) sıcaklık toleransının aşılması veya artan buharlaşma ile ilişkili tarımsal ve ekolojik kuraklık insidansının artmasıyla ilişkili sıcaklık eşikleri meydana gelir (bkz. IPCC, 2021). Kutuplardaki buz tabakalarının geri çekilmesi ve erimesi veya permafrostun çözülmesi gibi iklim fiziği süreçlerinin bile, çoklu ölçeklerde ve iklim sistemi bileşenleri arasındaki etkileşimleri modellemenin zorlukları nedeniyle ölçülmesi zordur. Dünya ve iklim sistemleri içindeki ve toplumla olan etkileşimlerle ilişkili iklim risklerinin, hızlı değişikliklere, doğrusal olmayan durumlara ve devrilme noktalarına yol açabileceğinden daha iyi tanımlanması gerekmektedir. Yüksek etkili olayların hepsi düşük olasılıklı olaylar değildir (Sherwood vd., 2024) ve hızlı geçişlerin veya yüksek etkili olay risklerinin erken uyarısı kritik öneme sahiptir. İklim riskini daha iyi tanımlamak için, aşağıdaki alt bölümlerde tartışıldığı gibi, yeni bilimsel araçların ve yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir.

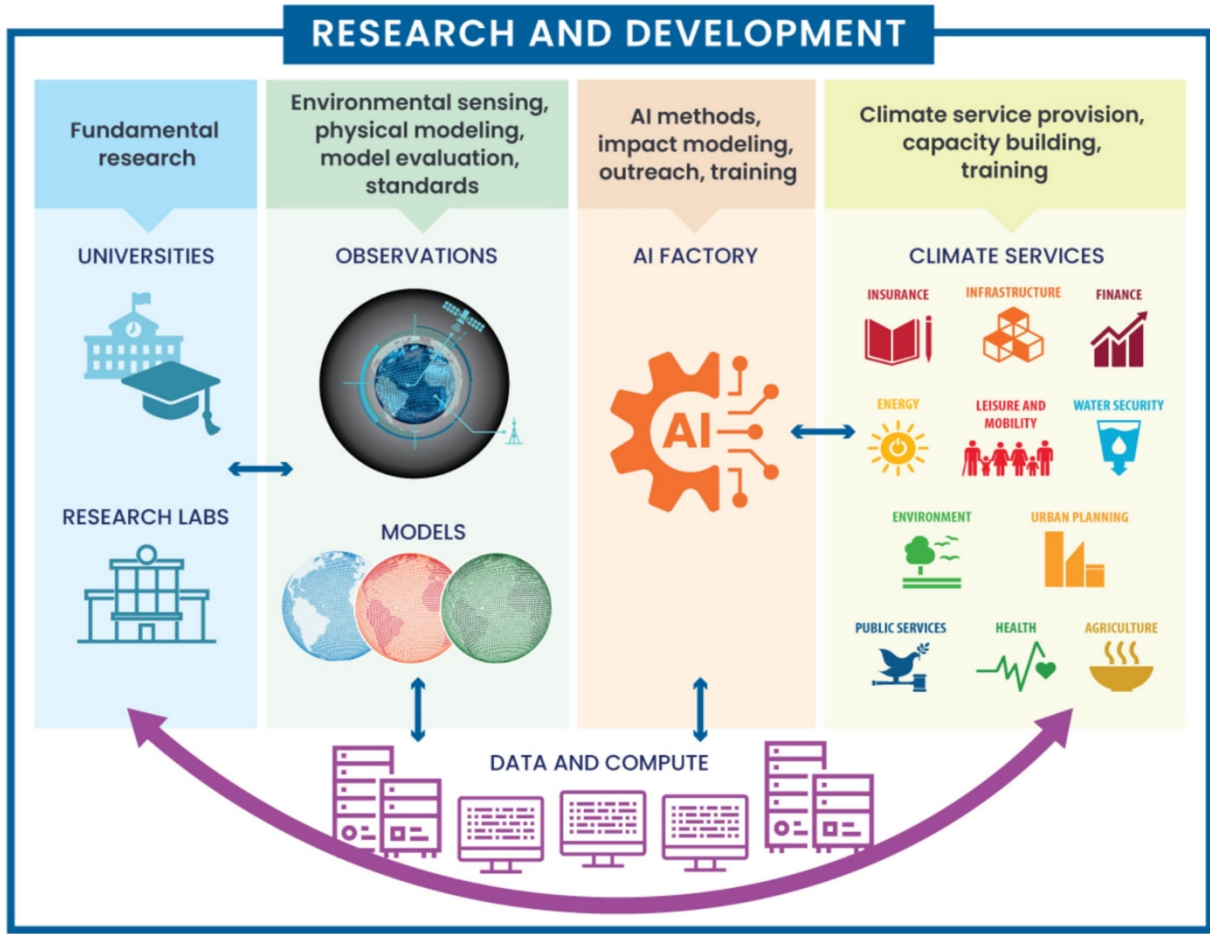
#### 4.6 Herkes için iklim bilgisi

Birleşmiş Milletler Genel Sekreteri 2022 yılında, 5 yıl içinde dünyadaki herkesin erken uyarı sistemleri tarafından korunmasını sağlamak için yeni bir çabaya öncülük edeceğini duyurmuş ve şimdi "Herkes için Erken Uyarılar" olarak adlandırılan bu faaliyete öncülük etmesi için Dünya Meteoroloji Örgütü'nü (WMO) davet etmiştir. Bu duyuru öncelikle hava koşullarıyla ilgili riskleri ele alsa da, iklimle ilgili etkiler için de gereklidir ve gıda, su ve sağlığı da kapsayacak şekilde genişletilmelidir. Bu da sadece hava durumu ve iklim değişikliğinin sorunsuz bir şekilde tahmin edilmesini değil, aynı zamanda bu bilgilerin yönetilen ve doğal sistemler ve toplumla etkileşimini de gerektirir.

İklim etkileri için herhangi bir erken uyarı sistemi, hepsi de aşırılıklar, afetler ve risklerle ilgili olan birkaç sütuna dayanacaktır: (1) ne olduğu, neden olduğu ve gelecek için ne anlama geldiği hakkında bilgi; (2) afet riski bilgisi; (3) tehlike tespiti, gözlem, izleme, analiz ve tahmin; (4) uyarı yayma ve iletişim; (5) hazırlık ve müdahale yetenekleri; ve (6) alınan önlemleri yansıtmak ve öğrenilen derslere dayanarak sistemi iyileştirmek için değerlendirme. Yine, bu sütunların her birini gerçeğe dönüştürmek için iklim araştırmalarına ihtiyaç vardır. İddialı kalkınma hedefleri doğrultusunda iklim değişkenliği ve değişikliğinin ele alınmasında gerçek bir değer vardır ve çevresel adalet temel bir hak olarak ele alınmalıdır.

#### 4.7 İklim hizmetleri

Kesişen fırsatlar arasında herkes için iklim hizmetlerinin birlikte tasarlanması ve iklim değişikliğine karşı sosyo-ekonomik kırılganlığın anlaşılması yer almaktadır (ayrıca iklim bilimi ve iklim hizmetleri arasındaki ilişkiyi vurgulayan Şekil 1, 2'ye bakınız). Verilere erişimi kolaylaştırmak için ortaklıklar çok önemlidir. Ayrıca, insan kaynaklı iklim değişikliğinin değiştirdiği doğal iklim değişkenliğinin olumsuz etkilerini azaltmak için sosyo-ekonomik sektörler için haftalardan yıllara uzanan zaman ölçeklerinde iklim bilgilerinin birlikte tasarlanması gereklidir ve gerekli olacaktır (Vera, 2024). Etki ilişkilendirmesi açısından, temel düzeyde başlasa bile ve bir afete birden fazla iklimsel ve iklimsel olmayan katkıda bulunanları dikkate almanın zorluğuna rağmen, operasyonel ilişkilendirmenin pilot uygulamasının değeri vardır. Paydaş odaklı çalışma ve birlikte üretim, üretilen bilginin eyleme geçirilebilir olmasını ve uyum planlamasında doğrudan kullanılabilmesini sağlar.



ŞEKİL 2

Gözlem ve model tahmin araçları ve "yapay zeka fabrikaları" dahil olmak üzere iklim hizmetleri için bilgi sağlanmasına yönelik temel araştırmaları yerel ve toplumsal ilgili bilgilere bağlayan akışın temsili. Bjorn Stevens, Max Planck Meteoroloji Enstitüsü'nden uyarlanmıştır.

Ajanslar, hükümetler ve özel sektör, eyleme geçirilebilir iklim bilgilerinin geliştirilmesi ve iklim bilimine dayalı iklim uyum seçenekleri ile kayıp ve hasar değerlendirmelerinin uygulanması için çok taraflı, erişilebilir ve eşitlikçi yatırımlarını önemli ölçüde artırmalıdır. Dünya Meteoroloji Örgütü tarafından kurulan İklim Hizmetleri Küresel Çerçevesi, dünya çapında iklim hizmetlerinin geliştirilmesini teşvik eden önemli bir aktördür (Hewitt vd., 2020). Bazı ülkeler ulusal çapta iklim hizmet merkezlerini uygulamaya başlamıştır (Golding vd., 2025 tarafından Avrupa'daki somut örnekler bakınız) ve Ulusal İklim Hizmetleri Çerçevesi (NFCs) bu gelişmenin önemli bir itici gücüdür.

İyileştirilmiş iklim değişikliği projeksiyonlarına (ve ilgili belirsizliklere), şehirler ve insan yerleşimleri de dahil olmak üzere bağlamsal bilgiler eşlik etmelidir. Bu verilerin herkes tarafından erişilebilir ve kullanılabilir hale getirilmesi için gerekli araçlar ve veri altyapısı ile bu verileri bilinçli bir şekilde kullanacak bağlamsal bilgi ve kapasitenin oluşturulması gerekmektedir. Bilgiyi ilgili yerel ölçeklere indirgemek için yapay zeka gibi yeni yöntemlerin kullanılması ve veri erişimini ve yorumlamayı kolaylaştırmak için gelişmiş görselleştirme tekniklerinin uygulanması gerekmektedir. Uzun vadeli, sürekli, yüksek kaliteli ve erişilebilir gözlemler ve paleoiklim rekonstrüksiyonları yapılmalı, hem uzaktan hem de uydudan iyi koordine edilmiş bir şekilde yararlanılmalıdır.

Mekansal ve zamansal kapsamı artırmak ve geçmişteki aşırı olayları ve bunların sonuçlarını örneklemek için algılanan ve yerinde gözlemler. Bunlar, insan davranışının iklim üzerindeki etkisini izlemek, iklim değerlendirmelerini ve projeksiyonlarını iyileştirmek ve bir dizi adaptasyon seçeneğini, azaltım yollarını ve model belirsizliklerini araştırarak iklimle ilgili karar alma süreçlerini desteklemek için gereklidir. Uyum ve afet riskini azaltma stratejileri için eyleme geçirilebilir bilgiler sağlamak üzere yerel ve bölgesel düzeylerde iyileştirilmiş iklim bilgileri ve erken uyarı hizmetleri oluşturulmalıdır. Buna ek olarak, özellikle gelişmekte olan bölgelerde gelişmiş risk yönetimi, kırılganlık ve maruz kalma koşullarını tanımlayan iklimsel olmayan faktörler hakkındaki bilgilerle entegre edilmiş, yerel ölçeklerde daha becerikli alt mevsimsel ve mevsimsel tahminler gerektirir (Vera, 2024).

#### 4.7.1 Su güvenliği

Su güvenliği gelecekte giderek daha gerçek ve acil bir mesele haline gelecektir: 2030 yılına kadar dünya nüfusunun %85'i su konusunda ciddi zorluklarla karşılaşan kurak bölgelerde yaşayacaktır: çok fazla, çok az, çok kirli, suyu yönetirken ve kaçınılmaz çok az zamanları için çok fazla zamanlarında fazla suyu tasarruf ederken. İklim değişikliğinin su güvenliği ve kullanılabilirliği üzerindeki etkisi dayanıklılık, kapasite ve politikaya bağlıdır (Trenberth, 2011; Trenberth ve Asrar, 2012; Hegerl vd., 2015; Trenberth vd., 2016). Yeni bir su kültürü

Isınan bir dünyada su değişiklikleri konusunda en son bilim tarafından bilgilendirilen ve her düzeyde eğitim ile gerekli. Kıyı erozyonu ve diğer erozyon riskleri, yeterli drenaj sistemlerinin geliştirilmesini bir öncelik haline getirmektedir.

#### 4.7.2 Tarım

Kilit sektörlerden biri olan tarım, iklim değişikliğinin etkilerinin ön saflarında yer almakla birlikte, aynı zamanda iklim değişikliğine katkıda bulunan bir sektördür ve tarımsal gıda sistemleri de dahil olmak üzere tüm sektörlerde emisyon azaltımına ve karbon tutulumunun artırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, özellikle gelişmekte olan ülkelerde ciddi gıda güvensizliğine yol açabilir ve azaltım, iklim değişikliğinin etkilerine karşı savunmasız olan diğer tüm sektörlerin/nüfusların yaşamlarını ve geçim kaynaklarını olumsuz etkilememelidir. Adil bir geçiş, tarım-gıda sektörüne diğer tüm sektörlerle eşit düzeyde uygulanmalıdır. Ayrıca, tarım sektöründeki uyum ve azaltım eylemlerini desteklemesi gereken iklim hizmetleri arasında ormancılık sektörü tarafından sağlananlar da yer almaktadır. Ormanlar gezegenin geniş alanlarını kaplamakta ve toprağın korunması, su ve karbon döngüsü de dahil olmak üzere çok çeşitli değerli ekosistem hizmetleri sağlamaktadır. Ancak bunların yönetimi son derece karmaşık kararlar içermeye devam etmektedir. Biyolojik çeşitliliği ve ekosistem sağlığını korurken ve sosyo-ekonomik olarak uygulanabilirken orman temelli iklim değişikliği azaltım faaliyetlerinin nasıl en üst düzeye çıkarılacağı gibi zorluklar devam etmektedir.

#### 4.7.3 İnsan sağlığı

İklim hizmetlerinin sağlıkla ilgili iklim göstergeleri hakkında bilgi sağlaması gerekecektir; örneğin (1) sıcak hava dalgalarının sıklığı ve yoğunluğunda beklenen değişiklikler ve buna bağlı olarak sıcaklıkla ilgili hastalık riskleri, (2) vektör kaynaklı hastalıkların (sıtma, dang, Lyme hastalığı vb.) yayılmasına elverişli koşullar, (3) kolera gibi hastalıkların yayılmasına elverişli yağış ve sel verileri ve (4) solunum yolu hastalıkları ve kalp yetmezliğinden sorumlu hava kalitesi (partikül madde, ozon, alerjenler) ile ilgili eğilimler ve uyarılar. İklim hizmetleri, hassas grupların ve iklimle ilgili risklerin sıcak noktalarının belirlenmesine katkıda bulunmalıdır. İklimle ilgili sağlık sistemlerinin geliştirilmesini desteklemeli ve önleyici tedbir planları önermelidirler.

Hava ve iklim olaylarına karşı kırılganlığın değerlendirilmesi önemli bir ilk adımdır, bunu kritik ve birbirine bağlı altyapıların (enerji, iletişim, su ve sağlık) planlanması ve dayanıklılığının oluşturulması takip eder. İnsan ve doğal sistemlerdeki etkileri tetikleyen iklim koşullarını ve eşiklerini belirlemek için kullanıcıların ve sektör uzmanlarının katılımını sağlamak, risklerin daha iyi belirlenmesine yardımcı olmak, geri döndürülemez değişikliklerin etkilerini değerlendirmek, eyleme geçirilebilir iklim bilgileri geliştirmek ve sunmak, uygun bir düzenleyici çerçeve sağlamak ve en iyi uyum seçeneklerine öncelik vermek temel eylemlerdir. İklim hizmetlerinin, su-enerji-tarım-biyolojik çeşitlilik-sağlık bağlantılarına vurgu yapan sistemik bir yaklaşım benimsemesi gerekmektedir.

### 4.8 Kapasite geliştirme ve kapsayıcılık

Disiplinler arası araştırma ve eylem için kapasite geliştirme, özellikle Küresel Güney'de beceri transferinin ötesine geçmektedir. Bilim insanları ve yayıncılar, fon sağlayıcılar ve bireyler olarak rollerimizi ve eşitsiz ortaklıkları, akran ve karşılıklı ortaklıklar lehine yeniden düşünmemiz gerekiyor. İklim okuryazarlığı, yerel uzmanlık ve verilerin sınırlılıkları ve daha fazla eğitim fırsatı/programı sağlamanın önemi (örneğin, WCRP Akademisi aracılığıyla) dikkat edilmesi gereken konulardır. Bağlılık

Yayın hizmetleri de dahil olmak üzere tüm düzeylerde ve tüm sektörlerde ilgili taraflarla karşılıklı öğrenme ilişkileri kurmayı zorunlu kılar. Bu diyalog için, paydaş bağlamıyla ilgili bilgiler, yerel ve yerli bilgiyi entegre eden ve paydaşın kültürel gerçekliklerine göre uyarlanmış iklim hizmetleri aracılığıyla sunulan kanıta dayalı ve eyleme geçirilebilir iklim bilgilerinin geliştirilmesi ve uyarlanması için kritik öneme sahiptir.<sup>(3)</sup> <sup>(4)</sup>

<sup>(4)</sup>Paydaşların iklim ve iklim dışı stres faktörleriyle ilgili iklim bilgilerini, yararlı ve eyleme geçirilebilir bilgileri özümseme yetkinliklerine ve kapasitelerine uygun şekillerde sağlamak ve aynı zamanda bilim camiasının paydaşların yaşadığı deneyimlerin heterojenliğine ilişkin anlayışını geliştirmek çok önemlidir.

Son olarak, iklim araştırmaları topluluğunun, özellikle yeterince temsil edilmeyen gruplardan ve Küresel Güney'den gelen erken ve orta kariyer araştırmacıların liderliğini hem ulusal hem de uluslararası düzeyde güçlendirmesi gerekmektedir. Bu, iklim değişikliği ve etkilerinin ele alınmasında genç nesillerin artan rolünün kabul edilmesini de içermektedir; zira bu nesiller, iklimle ilgili daha fazla aşırı olayın yaşandığı daha sıcak bir dünyayı miras alacak ve azaltımın en zorlu yönlerini ele almak zorunda kalacaklardır (Thierry vd., 2021). Uluslararası iklim araştırma gündeminin vatandaş bilimi, kentsel çalışmalar, aşırı hava olayları, yapay zeka/makine öğrenme teknikleri, iklim müdahalesi gibi yeni ortaya çıkan konuları içerecek şekilde genişletilmesi ve toplumsal tepkileri bilgilendirmek için eyleme geçirilebilir iklim bilgilerine bağlamanın entegre edilmesi de gereklidir.

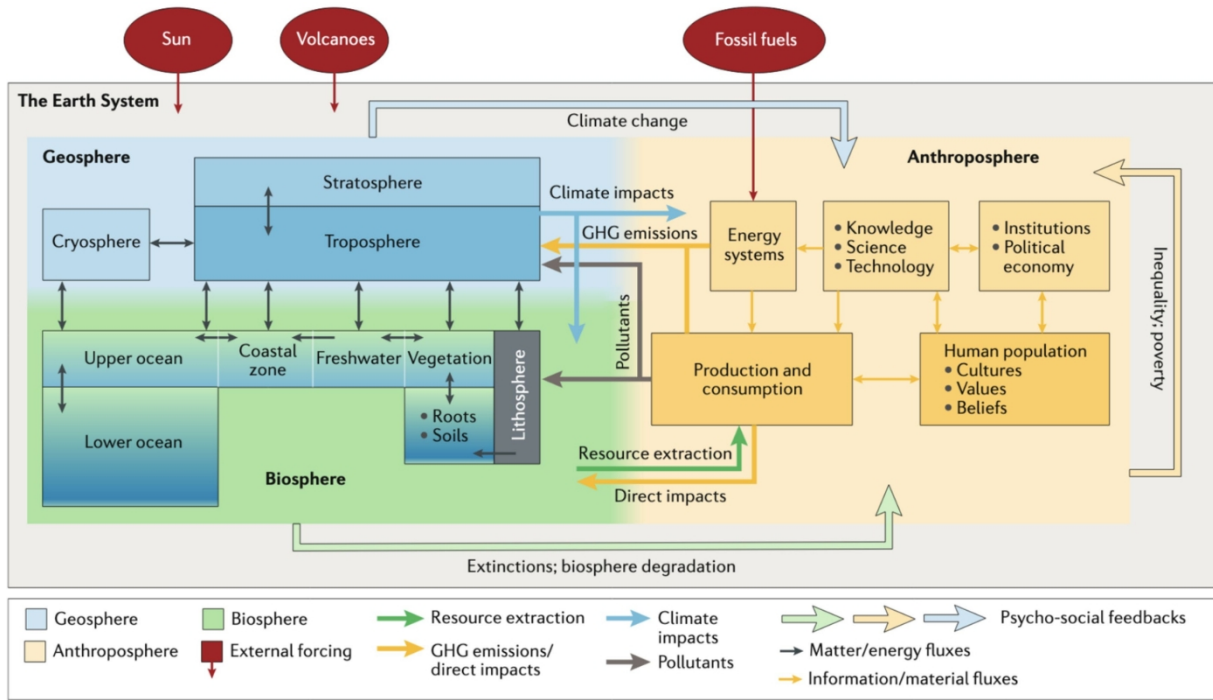
## 5 Gelecek

Son yıllarda yapılan araştırmalar, çok ölçekli iklim değişkenliğini ve değişimini yöneten süreçlerin birçoğu hakkında nicel bilgi sağlamada ve insan kaynaklı zorlamanın farklı senaryolarına yanıt olarak temel iklim değişkenlerinin projeksiyonlarını üretmede başarılı olmuştur. Şimdi karşılaşılan zorluk, bu sonuçların karar alma süreçlerinde (örneğin politika yapıcılar, hükümetler, sanayi, tarım, sigorta ve reasürans grupları gibi ekonomik sektörler tarafından) kullanılmak üzere güvenilir bilimsel bilgilere dönüştürülmesidir. Bu aynı zamanda gelecekteki toplumsal kırılganlığı azaltmak ve yeni iklimsel ve toplumsal koşullar altında dayanıklılığı en üst düzeye çıkarmak için gereken stratejilerin tasarımını bilimsel ve güvenilir bir şekilde bilgilendirmek için de gereklidir. Bu konuların ve bunların toplum üzerindeki etkilerinin, ekonomik eğilimler, jeopolitik gerilimler veya sadece kaynaklar üzerindeki çatışmalar gibi toplumu etkileyecek diğer zorluklar, değişiklikler ve baskılar bağlamında ele alınması gerekmektedir. Şekil 3 (Steffen vd., 2020'den) jeosfer ve biyosfer arasındaki etkileşimlerin (zorlama ve geri besleme mekanizmaları dahil) ve insan sisteminin bağlantısının basitleştirilmiş bir gösterimini sunmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, nihayetinde Dünya sisteminin evrimini belirleyecek olan farklı unsurları bütünleştiren bütünsel bir yaklaşım gerektirmektedir.

Roma Kulübü'nün on yıldan daha uzun bir süre önce belirttiği gibi (Randers, 2012), 2050'nin dünyası bugünkünden çok farklı olacaktır. Nüfus artmaya devam edecek ancak 2070 civarında zirve yapması beklenmektedir. Gayri safi yurtiçi hasıla (GSYH) büyümesinin yavaşlaması ve dünyanın farklı bölgeleri arasındaki büyük eşitsizliklerin devam etmesi beklenmektedir.

3 <https://www.frontiersin.org/journals/climate/articles/10.3389/fclim.2022.885494/full>

4 <https://www.frontiersin.org/journals/climate/articles/10.3389/fclim.2022.871987/full>



ŞEKİL 3

Dünya gezegenini etkileyen fiziksel ve biyojeokimyasal süreçlerin yanı sıra bir üretim ve tüketim sistemi tarafından tanımlanan insan sisteminin (antroposfer) iç dinamikleri de dahil olmak üzere Dünya sisteminin temsili. Bu sistem enerji sistemleri tarafından "zorlanır" ve insan toplumları tarafından modüle edilir; bu toplumlar da kültürleri, değerleri, kurumları ve eğitim düzeylerinden etkilenir. Dünya sistemi içindeki etkileşimler iki yönlüdür; sera gazlarının ve diğer kirlenmelerin insan kaynaklı emisyonları ve kaynakların çıkarılması jeosfer-biyosfer sistemi boyunca yankılanan etkilere yol açmaktadır. İklim değişikliği ve biyosferdeki bozulmanın doğrudan etkilerinin yanı sıra Dünya sisteminin geri kalanından ve antroposferden gelen psikososyal geri bildirimler de dahil olmak üzere antroposfere geri bildirimler de önemlidir. Kaynak: Steffen ve diğerleri (2020); <https://www.nature.com/articles/s43017-019-0005-6>. İzin alınarak çoğaltılmıştır.

siyasi ve sosyal gerilimlerin devam etmesine veya olası yoğunlaşmasına yol açabilir. Fossil CO<sub>2</sub> emisyonları geçmişte önemli ölçüde artmış, 1960'tan bu yana dört katına çıkmıştır (Friedlingstein vd., 2023). Mevcut enerji sistemini karbondan arındırılmış bir sisteme dönüştürmek için yeterli önlemler alınırsa, CO<sub>2</sub> emisyonları önümüzdeki yıllarda zirve yapabilir. Ancak, mevcut politika ve ekonomik/toplumsal gelişmeler bu yolun izleneceğini ve sera gazı emisyonlarında önemli ve sürekli küresel azalmaların yakın zamanda gerçekleşeceğini göstermemektedir. Bunun yerine, mevcut politikalar küresel ortalama sıcaklığın artmaya devam edeceğini, 2020'lerin sonunda 1850-1900'ün 1.5° C üzerine çıkacağını, 2050'de 2° C'ye ulaşacağını ve 2100'de 3° C'ye yaklaşacağını ima etmektedir. Bu büyüklükteki değişikliklerin ekosistemler ve hizmetleri, insan nüfusu ve ekonomik faaliyetler üzerinde olumsuz etkilerin artmasına yol açacağı bilinmektedir. Su ve gıda güvenliği, kamu sağlığı, bazı bölgelerin yaşanabilirliği ve biyoçeşitlilik üzerinde artan riskler oluşturacaktır. Adaptasyonu desteklemenin ve vatandaşları ve mülkleri afetlerden korumanın maliyetleri patlayacaktır. Bu nedenle sera gazı emisyonlarının azaltılmasını hızlandırmak hayati önem taşımaktadır, ancak bu toplumsal, ekonomik ve siyasi tercihlere bağlı olacaktır.

İklim değişikliğinin etkileri şimdiden, geçmişteki emisyonlara en az katkıda bulunan bölgelere orantısız bir şekilde düşmektedir. Şu anda 3,5 milyar insan hassas bölgelerde yaşamaktadır ve 1 milyar insan gelecekteki deniz seviyesi yükselmesinin sonuçlarına maruz kalacaktır. Dünyanın çeşitli bölgelerinde devam eden nüfus artışı ve buna bağlı enerji, gıda ve su talepleri gerilimleri daha da şiddetlendirecektir. Deniz seviyesinin yükselmesi ve iklim değişikliğinin devam eden etkileri, iklim değişikliğinin sıcak noktaları da dahil olmak üzere bölgelerin gelecekteki yaşanabilirliğini zorlayacaktır (Byers vd., 2018; Thiery vd.

2021; Werning vd., 2024). Sonuç olarak, iklim değişikliği zorunlu yerinden edilmeyi artıracak, diğer göç nedenlerine eklenecek ve birçok ülkede çevresel mültecilerin sayısını artıracaktır. Barış olmadan, toplumların azaltım ve uyum tedbirlerini uygulaması giderek zorlaşacaktır. Bu nedenle 2050 yılına yönelik iklim araştırmalarının, güvenlik ve barış konularının baskın bir rol oynayacağı jeopolitik bir bağlamda geliştirilmesi gerekecektir. Son zamanlarda yaşanan çatışmalar, özellikle daha sıcak bir dünyanın su kaynakları üzerindeki kısıtlamaları artırdığı bölgelerde, iklime dirençli barış inşasının zorluklarını vurgulamaktadır.

Bu bağlamda, iklim araştırmalarının önümüzdeki on yıllarda ele alması gereken temel bilimsel sorular nelerdir?

Her şeyden önce bilim camiası, nüfusların ve ekosistemlerin küresel ve bölgesel iklim değişikliğine karşı kırılganlığını değerlendirmeye devam etmeli ve beklenen yerel etkiler hakkında bilgi sağlamalıdır. Bilime dayalı bu bilgiler hükümetlere, ekonomik aktörlere ve tüm vatandaşlara yeryüzündeki yaşamı sürdürme ve ıddialı azaltım politikaları ve etkili çevre koruma önlemleri uygulama konusunda yardımcı olacaktır. Bu politikalar ekonomik ve sosyal eşitsizlikleri azaltmaya çalışmalı ve çevresel adaletin önemini kabul etmelidir. Araştırmacılar, emisyonları azaltmaya ve çevreyi korumaya yönelik politikaların etkinliğinin bilimsel temelde değerlendirilmesine yardımcı olmalıdır.

Uyum önlemleri de acil riskleri (örneğin aşırı hava olaylarının sonuçları) sınırlamak ve insan kaynaklı iklim değişikliğinin uzun vadeli etkileriyle başa çıkmak için tasarlanmalı ve uygulanmalıdır. İklim değişikliğinin tüm bölgelerdeki insanların günlük yaşamları üzerinde istenmeyen etkileri olacak, hatta bazıları coğrafi bölgeleri terk etmek ve daha misafirperver bölgelere sığınmak zorunda kalacaktır.

TABLO 1 İklim bilimindeki başlıca araştırma yönleri.

| Başlıca araştırma yönü                                   | Açıklama                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Çok ölçekli yeryüzü sistemi dinamiklerini anlamak        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Atmosfer, okyanus, kara, kriyosfer ve biyosferdeki doğrusal olmayan ve çok ölçekli etkileşimler hakkındaki bilgileri geliştirmek.</li> <li>İç değişkenlik ve antropojenik zorlamaya karşı uzun vadeli iklim tepkilerinin anlaşılmasını geliştirmek.</li> <li>Küreselden yerele etkileşimleri daha iyi yakalamak için yüksek çözünürlüklü birleşik Dünya sistemi modellerini geliştirmek.</li> </ul>                                                              |
| İklim dinamikleri ve öngörülebilirlik                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Okyanus-atmosfer-kriyosfer etkileşimlerini ve bunların iklim değişkenliğindeki rolünü daha iyi karakterize etmek.</li> <li>Muson sistemlerinin, aşırı fırtınaların ve hava-iklim bağlantılarının mevsimden on yıla kadar olan ölçeklerde temsiliyi iyileştirmek.</li> <li>Atmosferik dolaşım ve okyanus ısı taşınımındaki değişimler de dahil olmak üzere bölgesel iklim projeksiyonlarındaki belirsizliklerin ele alınması.</li> </ul>                          |
| İklim zorlama ve geri besleme mekanizmaları              | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bulut geri bildirimlerini, aerosol etkileşimlerini ve radyatif zorlama üzerindeki su buharı etkilerini ölçmek.</li> <li>Değişen arazi örtüsü, ormansızlaşma ve kentleşmenin iklim üzerindeki etkisini anlamak.</li> <li>Kısa ömürlü zorlayıcıların (örn. metan, aerosoller) ve sera gazlarının gelecekteki ısına senaryolarını nasıl şekillendirdiğini değerlendirmek.</li> </ul>                                                                                |
| Karbon döngüsü ve biyojeokimya                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kara, okyanus ve permafrost karbon yutaklarının ve geri bildirimlerinin temsiliyi iyileştirmek.</li> <li>İklim stresi altında karasal ve deniz ekosistemlerinin direncini değerlendirmek.</li> <li>Orman yangını emisyonlarını, toprak mikrobiyal süreçlerini ve biyojeokimyasal etkileşimleri yakalamak için modeller geliştirmek.</li> </ul>                                                                                                                 |
| Aşırı olaylar ve bileşik tehlikeler                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Isı dalgaları, kuraklık, sel, kasırga, deniz ısı dalgaları ve atmosferik nehirlerin öngörülebilirliğini artırmak.</li> <li>Aşırı olayların riskleri artırdığı çoklu tehlike basamaklı etkilerini inceleyin (örneğin, orman yangını kaynaklı hava kirliliği).</li> <li>Yerelleştirilmiş aşırı hava koşullarını ve risk projeksiyonlarını yakalamak için yüksek çözünürlüklü modellemenin iyileştirilmesi.</li> </ul>                                              |
| Devrilme noktaları ve geri döndürülemez değişiklikler    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Buz tabakasının çökmesi, okyanus sirkülasyonundaki değişimler (örn. AMOC) ve donmuş toprakların çözülmesi için eşik değerlerin belirlenmesi.</li> <li>Bir devrilme unsurunun diğerlerini tetiklediği potansiyel kademeli etkileri değerlendirin (örneğin, küresel karbon döngüsü değişimlerine yol açan Amazon geri dönüşü).</li> <li>Gelişmiş izleme ve modelleme kullanarak devrilme noktalarına yaklaşmak için erken uyarı sistemleri geliştirmek.</li> </ul> |
| Su döngüsü ve hidrolojik aşırılıklar                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Yağış değişkenliği, yeraltı sularının tükenmesi ve hidrolojik aşırılıkların modellenmesini iyileştirmek.</li> <li>İklim değişikliğinin musonları, atmosferik nehirleri ve kuraklık-sel döngülerini nasıl değiştirdiğini anlamak.</li> <li>Gelişmiş su kaynakları yönetimi için hidrolojik modellerin iklim projeksiyonları ile entegre edilmesi.</li> </ul>                                                                                                      |
| Kriyosfer değişiklikleri ve deniz seviyesinin yükselmesi | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kutup ve buzul erime dinamiklerinin ve bunların deniz seviyesinin yükselmesine katkılarının daha iyi anlaşılması.</li> <li>Buz tabakası kararsızlıkları ve ısınmaya verdikleri doğrusal olmayan tepkilerdeki belirsizliklerin ele alınması.</li> <li>Deniz seviyesinin yükselmesi ve kıyı taşkın risklerine ilişkin bölgesel projeksiyonların iyileştirilmesi.</li> </ul>                                                                                        |
| İklim riski ve insan etkileri                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Uyum ve dayanıklılık stratejilerini daha iyi bilgilendirmek için olasılıksal iklim riski değerlendirmeleri geliştirmek.</li> <li>İklim modellemesinin sosyo-ekonomik etkilerle (örn. gıda güvenliği, göç) entegrasyonunu iyileştirmek.</li> <li>Aşırı sıcaklık, deniz seviyesinin yükselmesi ve ekosistem bozulmasına maruz kalan bölgelerde uzun vadeli yaşanabilirlik risklerini değerlendirmek.</li> </ul>                                                    |
| İklim müdahalesi                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Önerilen iklim müdahalelerinin (örn. güneş radyasyonu modifikasyonu) risklerini, fizibilitesini ve etik sonuçlarını değerlendirmek.</li> <li>İklim müdahale araştırmaları için yönetim çerçevelerinin iyileştirilmesi.</li> <li>Büyük ölçekli müdahalelerin bölgesel iklim sistemleri üzerindeki potansiyel istenmeyen sonuçlarını değerlendirmek.</li> </ul>                                                                                                    |

Tarım, ulaşım, insani yardım ve turizm gibi ekonomik sektörler yeni iklim koşullarına uyum sağlamak zorunda kalacaktır. Bu nedenle bilim camiası, dünyanın her bir bölgesinde meydana gelecek değişikliklere uyarlanmış politikalar geliştirmek için gereken bilgileri sağlamalıdır. Karar vericilerin kolayca erişebileceği veri sistemleri, yerel düzeyde uygulanabilir ve su ve gıda gibi kaynakların mevcudiyeti de dahil olmak üzere etkileri dikkate alan bir dizi objektif bilgi sağlamalıdır.

Nihayetinde, sera gazı emisyonları iklim değişikliğini hafifletmek için yeterince azaltılmazsa, yani net sıfır emisyonlu bir küresel topluma geçiş çok yavaş olursa, toplumun yakalama ve tutma süreci yoluyla sera gazlarının atmosferden uzaklaştırılmasını içeren müdahalelere başvurusu gerekebilir. Şu anda bazı hükümetler ve sanayi şirketleri tarafından değerlendirilmekte olan bu tür girişimler, ciddi etik soruları ve uluslararası siyasi sorunları da beraberinde getirmektedir. Bilim camiası tarafından bu tür önlemlerin etkinliği ve olası sonuçları, akla yatkınlıkları ve sınırlamaları ve ciddi ödünleşme riskleri (örneğin arazi hakları, gıda güvenliği) üzerine yapılan araştırmalar, siyasi liderlerin bu konulardaki tartışmalarına eşlik etmelidir (*National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2021*). Bu tür önlemler etkin bir şekilde uygulanırsa, iklim sisteminin, iklim değişikliğinin etkilerini değerlendirmek için dikkatle izlenmesi gerekecektir.

Yeni bir iklim dengesine ulaşılabilir koşullar. Önerilen müdahalelerin yeni risk türleri yaratmamasını sağlamak için iklim biliminde ilerlemelere ihtiyaç vardır. "Avrupa Komisyonu Bilimsel Danışma Mekanizması (SAM)" tarafından 2024 yılında yayınlanan bir rapor, stratosferik aerosol enjeksiyonu ve bulut parlaklaştırma dahil olmak üzere güneş radyasyonu modifikasyonu başa çıkmak için önerilen teknolojilerin hiçbirinin olgunlaşmadığını belirtmektedir. Bu tür teknolojilerin kullanılması ekosistemler üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir, yağış düzenini değiştirebilir ve gıda üretimini engelleyebilir. Dahası, okyanus asitlenmesi veya bitki örtüsündeki değişiklikler gibi sera gazlarının doğrudan etkilerini ele almayacaklardır.

Entegre bilimsel yaklaşımlar atmosfer, okyanus, kriyosfer, biyosfer ve toplum arasındaki birleşik fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkileşimlerin daha iyi anlaşılmasına ve geri dönüşü olmayan iklim ve çevre değişikliği risklerinin daha iyi değerlendirilmesine yol açmalıdır. Amazon yağmur ormanları, kutuplardaki permafrost, okyanus veya atmosferik sirkülasyonlar (örneğin Atlantik Meridyonal Devrilen Sirkülasyon) veya kutsal buz tabakaları gibi hassas alanları etkileyebileceğinden, ötesinde büyük ölçekli değişikliklerin meydana gelebileceği eşiklerin (yani devrilme noktalarının) olası varlığı araştırılmalıdır. *Tablo 1*, iklim bilimi için önemli ve acil araştırma yönlerinin bir listesini sunmaktadır.

Son olarak, araştırmacılar, hükümetler, özel sektör ve vatandaşlar arasında daha etkili iletişim mekanizmalarının kurulması gerekmektedir. İklim hizmetlerinin rolünün genişletilmesi, güçlendirilmesi ve belki de yeniden tanımlanması gerekmektedir. Bu iklim hizmetlerinin, gözlemsel ve model verilerini, bilinçli karar alma ve dayanıklılık oluşturmaya olanak tanıyan, toplum girdisini kolaylaştıran ve şehirlerde ve gayri resmi yerleşimlerde, okyanuslarda ve veri açısından fakir bölgelerdeki kritik veri boşluklarını dolduran eyleme geçirilebilir iklim bilgilerine dönüştürmek için etkili yollar geliştirmesi gerekecektir. Dijital ikiz yaklaşımları, bilim ve mühendisliği adaptasyon sorununa bağlamanın yollarını sunmaktadır. İklim hizmetlerinin, açık bilim ve açık eğitim ilke ve uygulamalarını savunması ve Küresel Güney de dahil olmak üzere dünya genelinde etkin bir şekilde benimsenmesini desteklemek ve bölgesel bilginin görünürlüğünü ve değerini artırmak için küresel bilim fon sağlayıcılarıyla birlikte çalışması gerekecektir. İklim bilimi, daha fazla işbirliği, ortak ve adil liderlik ve iklim okuryazarlığı da dahil olmak üzere bilimsel zorlukların ve fırsatların yerel anlayışlarıyla uyumu teşvik etmek için önceliklerin belirlenmesinde ve kaynakların tahsis edilmesinde dünya çapında kolektif olarak yönetilmelidir. İklim hizmetleri tarafından önerilen çözümler, çevresel adalet ruhu içinde adil ve hakkaniyetli olmalıdır.

Toplumu iklim değişikliğine karşı dirençli hale getirmek için gereken büyük ölçekli ve benzeri görülmemiş toplumsal dönüşümü sağlama görevi, güvenilir doğal ve sosyal bilim bilgilerinin sağlanmasını gerektirir. Ayrıca, iklimle ilgili büyük aksaklıkların risklerini azaltan ve uyumu destekleyen politikaların tanımlanması ve uygulanması için siyasi kararlılık gerektirir. Bu da yeni ve güçlü etik kaygılar çerçevesinde liderlik, katılım, iletişim, eğitim ve vatandaş katılımını gerektirecektir. İklim biliminin 2025 ve sonrasındaki sorumluluğu, tüm bu zorlukların ele alınmasını ve desteklenmesini sağlamaktır.

## Yazar katkıları

GB: Kavramsallaştırma, Süpervizyon, Yazım - orijinal taslak, Yazım - gözden geçirme ve düzenleme. DS: Kavramsallaştırma, Yazma - orijinal taslak, Yazma - gözden geçirme ve düzenleme. PF: Yazma - orijinal taslak, Yazma - gözden geçirme ve düzenleme. GH: Yazma - gözden geçirme ve düzenleme, Yazma - orijinal taslak. TS: Yazma - orijinal taslak, Yazma - gözden geçirme ve düzenleme. KT: Yazma - orijinal taslak, Yazma - gözden geçirme ve düzenleme. JR: Yazma - gözden geçirme ve düzenleme, Yazma - orijinal taslak. CV: Yazım - gözden geçirme ve düzenleme, Yazım - orijinal taslak. AB: Yazım - gözden geçirme ve düzenleme, Yazım - orijinal taslak. HC: Yazma - gözden geçirme ve düzenleme, Yazma - orijinal taslak. SE: Yazma - gözden geçirme ve düzenleme, Yazma - orijinal taslak. PE: Yazma - gözden geçirme ve düzenleme, Yazma - orijinal taslak. DJ: Yazma - gözden geçirme ve düzenleme. MM: Yazma - gözden geçirme ve düzenleme, Yazma - orijinal taslak. VM-D: Yazma - orijinal taslak, Yazma - gözden geçirme ve düzenleme. GS: Yazma - gözden geçirme ve düzenleme, Yazma - orijinal taslak. MS: Yazma - gözden geçirme ve düzenleme, Yazma - orijinal taslak. TFS: Yazma - orijinal taslak, Yazma - gözden geçirme ve düzenleme. MV: Yazma - gözden geçirme ve düzenleme, Yazma - orijinal taslak. GW: Yazım - gözden geçirme ve düzenleme, Yazım - orijinal taslak.

## Referanslar

- A llen, M. R., Frame, D. J., Huntingford, C., Jones, C. D., Lowe, J. A., Meinshausen, M., ve diğerleri (2009). Trilyonuncu tona doğru kümülatif karbon emisyonlarının neden olduğu ısınma. *Nature* 458, 1163-1166. doi: 10.1038/nature08019
- A rhenius, S. (1896). Havadaki karbonik asidin yer sıcaklığı üzerindeki etkisi üzerine. *Philos. Mag.* 41, 237-276. doi: 10.1080/14786449608620846
- A rora, V. K., Katavouta, A., Williams, R. G., Jones, C. D., Brovkin, V., Friedlingstein, P., ve diğerleri (2020). CMIP6 modellerinde karbon konsantrasyonu ve karbon-iklim geri bildirimleri

## Finansman

Yazar(lar) bu makalenin araştırılması ve/veya yayınlanması için mali destek aldıklarını beyan ederler. GB ve JR kısmen NCAR tarafından desteklenmektedir; NSF-Ulusal Atmosferik Araştırma Merkezi ABD Ulusal Bilim Vakfı tarafından desteklenmektedir. DS, Hamburg Üniversitesi'nin DFG destekli Mükemmellik Kümesi CLICCS aracılığıyla kısmi destek almıştır. TS, NSF (AGS-2300037) ve Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi'nin (NA23OAR4310597) desteğine teşekkür eder.

## Teşekkür

Bu çalışma kısmen Ruanda Hükümeti adına Ruanda Çevre Yönetim Otoritesi (REMA) ev sahipliğinde Kigali, Ruanda'da düzenlenen Dünya İklim Araştırma Programı (WCRP) 2. Açık Bilim Konferansının sonuçlarına dayanmaktadır. Yazarlar, WCRP Açık Bilim Konferansı 2023'ün temel sonuçlarından biri olan ve <https://www.wcrp-climate.org/conferences/WCRP-OSC-2023/KD/WCRP-Kigali-Declaration-2024-c.pdf> adresinde yer alan Kigali Deklarasyonu'na teşekkür etmektedir. Konferans, <https://wcrp-osc2023.org/sponsors> altında listelenen çeşitli kurumlar tarafından desteklenmiştir.

## Çıkar çatışması

Yazarlar, araştırmanın potansiyel bir çıkar çatışması olarak yorumlanabilecek herhangi bir ticari veya finansal ilişki olmaksızın yürütüldüğünü beyan etmektedir.

Hakem GK, yazar GH ile geçmişte ortak yazarlık yaptığını işlem editörüne beyan etmiştir.

## Üretken Yapay Zeka beyanı

Yazar(lar), bu makalenin oluşturulmasında hiçbir Gen AI kullanılmadığını beyan eder.

## Yayıncının notu

Bu makalede ifade edilen tüm iddialar yalnızca yazarlara aittir ve bağlı oldukları kuruluşların veya yayıncının, editörlerin ve hakemlerin iddialarını temsil etmeyebilir. Bu makalede değerlendirilebilecek herhangi bir ürün veya üreticisi tarafından ileri sürülebilecek herhangi bir iddia, yayıncı tarafından garanti edilmemekte veya desteklenmemektedir.

ve CMIP5 modelleriyle karşılaştırılması, *Biogeosciences*, 17, 4173-4222. doi: 10.5194/bg-17-4173-2020

B auer, P., Thorpe, A., ve Brunet, G. (2015). Sayısal hava tahmininde sessiz devrim. *Nature* 525, 47-55. doi: 10.1038/nature14956

B erger, A., ve Loutre, M. F. (2002). Önümüzde olağanüstü uzun bir buzul arası dönem mi var? *Bilim* 297, 1287-1288. doi: 10.1126/science.1076120

- Bi, K., Xie, L., Zhang, H., Chen, X., Gu, X. ve Tian, Q. (2023). 3D sinir ağırları ile doğru orta menzilli küresel hava tahmini. *Nature* 619, 533-538. doi: 10.1038/s41586-023-06185-3
- B lanken, P. D., Brunet, D., Dominguez, C., Goursaud Oger, S., Hussain, S., Jain, M., ve diğerleri (2022). Bütünleşik koordineli, açık, yeni ağ bağlantılı (ICON) bilim, dünya ve uzay üzerine atmosferik perspektifler. *Science* 9:e2021EA002204. doi: 10.1029/2021EA002204
- B owman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cohrane, M. A., ve diğerleri (2009). Dünya sisteminde yangın. *Science* 30, 255-260. doi: 10.1016/j.tree.2015.03.005
- B yers, E. A., Gidden, M., Leclerc, D., Balkovic, J., Burek, P., Ebi, K. L., ve diğerleri (2018). Çok sektörlü kalkınma ve iklim değişikliği sıcak noktalarına küresel maruziyet ve kırılabilirlik. *Environ. Res. Lett.* 13:5. doi: 10.1088/1748-9326/aabf45
- C anadell, J. G., ve Jackson, R. B. (2021). Ekosistem Çöküşü ve İklim Değişikliği: Bir Giriş. İçinde: Canadell, J.G., Jackson, R.B. (eds) Ecosystem Collapse and Climate Change. Ekolojik Çalışmalar (Springer, Cham). 241.
- C attiaux, J., Ribes, A., ve Thompson, V. (2024). Yakın tarihte en aşırı sıcaklık olaylarının araştırılması. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 105, E239-E256. doi: 10.1175/BAMS-D-23-0095.1
- C harney, J. G., Arakawa, A., Baker, D. J., Bolin, B., Dickinson, R. E., Goody, R. M., ve diğerleri (1979). Karbondioksit ve iklim: Bilimsel bir değerlendirme. Washington, DC: Ulusal Bilimler Akademisi Yayınları.
- C heng, L., Abraham, J., Trenberth, K. E., Boyer, T., Mann, M. E., Zhu, J. ve diğerleri (2024). 2023'te yeni rekor okyanus sıcaklıkları ve ilgili iklim göstergeleri. *Adv. Atmosfer. Sci.* 41, 1068-1082. doi: 10.1007/s00376-024-3378-5
- C heng, L., Trenberth, K. E., Gruber, N., Abraham, J. P., Fasullo, J., Li, G. ve diğerleri (2020). Üst okyanus tuzluluğu ve hidrolojik döngüdeki değişikliklerin geliştirilmiş tahminleri. *J. Clim.* 33, 10357-10381. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0366.1
- C ompo, G. P., Whitaker, J. S., ve Sardeshmukh, P. D. (2005). Yalnızca yüzey basıncı verilerini kullanan 100 yıllık bir yeniden analizin fizibilitesi. *Bull. Amer. Soc.* 87:175-190.
- C oumou, D., Arias, P. A., Bastos, A., Gotangco Gonzales, C. K., Hegerl, G. C., ve diğerleri (2024). Olay atfı bilimi, kayıp ve hasara ilişkin finansal kararları nasıl destekleyebilir? *PNAS Nexus* 3:8. doi: 10.1093/pnasnexus/pgae277
- D ee, D. P., Uppala, S., ve Simmons, A. J. (2011). ERA-interim reanalizi: veri asimilasyon sisteminin yapılandırılması ve performansı. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 137, 553-597. doi: 10.1002/qj.828
- D urack, P. J., Taylor, K. E., Eyring, V., Ames, S. K., Doutriaux, C., ve diğerleri (2017). Teknik rapor: input4MIPs: CMIP model zorlamasını daha şeffaf hale getirmek. UD Enerji Bakanlığı, Bilimsel ve Teknik Bilgi Ofisi.
- Flannigan, M. D., Stocks, B. J., Turetsky, M. R. ve Wotton, B. M. (2009). İklim değişikliğinin çevre ormanlardaki yangın faaliyetleri ve yangın yönetimi üzerindeki etkisi. *Glob. Chang. Biol.* 15, 549-560. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01660.X
- Flato, G. M. (2011). Dünya sistemi modelleri: genel bir bakış. *WIREs* 2, 783-800. doi: 10.1002/wcc.148
- F orster, P. M., Smith, C., Walsh, T., Lamb, W. F. ve Lamboll, R. (2024). Küresel iklim değişikliği göstergeleri 2023: iklim sisteminin durumu ve insan etkisine ilişkin temel göstergelerin yıllık güncellemesi. *Dünya Sist. Sci. Data* 16, 2625-2658. doi: 10.5194/essd-16-2625-2024
- F riedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., ve diğerleri (2023). Küresel karbon bütçesi 2023. *Dünya Sist. Sci. Data* 15, 5301-5369. doi: 10.5194/essd-15-5301-2023
- G elaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J. ve Todling, R. (2017). Araştırma ve uygulamalar için modern dönem retrospektif analizi, sürüm 2 (MERRA-2). *J. Clim.* 30, 5419-5454. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1
- G ettelman, A., Eidhammer, T., Duffy, M. L., McCoy, D. T., Song, C. ve Watson-Parris, D. (2024). İklim zorlaması ve geri bildirimler arasındaki etkileşim. *J. Geophys. Res.* 129:e2024JD040857. doi: 10.1029/2024JD040857
- G hil, M., ve Lucarini, V. (2020). İklim değişkenliği ve iklim değişikliğinin fiziği. *Rev. Mod. Phys.* 92:035002. doi: 10.1103/RevModPhys.92.035002
- G olding, N., Lambkin, K., Wilson, L., De Troch, R., Fischer, A. M., Hygen, H. O. ve diğerleri (2025). İklim hizmetleri için ulusal çerçevelerin geliştirilmesi: Avrupa'nın dört bir yanından deneyimler, zorluklar ve öğrenilenler. *İklim Hizmetleri* 37:852.
- G uimaraes, S. O., Mann, M. E., Rahmstorf, S., Petri, S., Steinman, B. A., Brouillette, D. J., ve diğerleri (2024). En son çoklu model iklim projeksiyonlarında yarı rezonans amplifikasyonunda ve kalıcı yaz hava ekstremelerinde öngörülen değişikliklerin artması. *Sci. Rep.* 14:21991. doi: 10.1038/s41598-024-72787-0
- H amlington, B. D., Bellas-Manley, A., Willis, J. K., Fournier, S., Vinogradova, N., Nerem, R. S., ve diğerleri (2024). Küresel deniz seviyesinin yükselme hızı son otuz yılda iki katına çıktı. *Commun. Earth Environ.* 5:501. doi: 10.1038/s43247-024-01761-5
- H ansen, J., Sato, M., Simons, L., ve diğerleri (2023). Boru hattında küresel ısınma. *Oxford Open Clim. Change* 3. doi: 10.1093/oxfclm/kgad008
- H ausfather. (2023). Emisyonlar artık en kötü durum senaryosunu takip etmiyor. Çevrimiçi olarak şu adresten erişilebilir: <https://www.theclimatebrink.com/p/emissions-are-no-longer-following> (Erişim tarihi 24 Nisan 2025).
- Hegerl, G., Black, E., Allan, R. P., Ingram, W. J., Polson, D., Trenberth, K. ve diğerleri (2015). Küresel su döngüsündeki değişikliklerin ölçülmesindeki zorluklar. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 96, 1097-1115. doi: 10.1175/BAMS-D-13-00212.1
- Held, I. M. (2005). İklim modellemesinde simülasyon ve anlayış arasındaki boşluk. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 86, 1609-1614. doi: 10.1175/BAMS-86-11-1609
- Hersbach, H., Bell, B. ve Berrisford, P. (2020). ERA5 küresel reanalizi. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 146, 1999-2049. doi: 10.1002/qj.3803
- Hewitt, C. D., Allis, E., Mason, S. J., Muth, M. ve Pulwarty, R., (2020). Toplumu İklim Dirençli Hale Getirmek: İklim Hizmetleri Küresel Çerçevesi Kapsamında Uluslararası İlerleme. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 101. doi: 10.1175/BAMS-D-18-0211.1
- Hodnebrog, Ø., Myhre, G., Jouan, C., Andrews, T., Forster, P. M., Jia, H., ve diğerleri (2024). Aerosol emisyonlarındaki son azalmalar Dünya'nın enerji dengesizliğini artırmıştır. *Commun Earth Environ* 5:166. doi: 10.1038/s43247-024-01324-8
- Hurrell, J. W., Haywood, J. M., Lawrence, P. J., Lennard, C. J. ve Oshlies, A. (2024). Dünya iklim araştırma programında iklim müdahale araştırması: bir perspektif. *Ön. İklim.* 6:1505860. doi: 10.3389/fclim.2024.1505860
- IPCC (2018). "Politika yapıcılar için özet", Küresel ısınma 1,5° C. İklim değişikliği tehdidine karşı küresel tepkinin güçlendirilmesi, sürdürülebilir kalkınma ve yoksulluğun ortadan kaldırılması çabaları bağlamında, sanayi öncesi seviyelerin 1,5° C üzerinde küresel ısınmanın etkileri ve ilgili küresel sera gazı emisyon yolları hakkında bir IPCC özel raporu. eds. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner ve D. Roberts (Cambridge, Birleşik Krallık ve New York, NY, ABD: Cambridge University Press), 3-24.
- IPCC (2021). "İklim değişikliği 2021: fiziksel bilim temeli." *Hükümetler arası iklim değişikliği panelinin altıncı değerlendirme raporuna çalışma grubu II'nin katkısı* [V. P. Masson-Delmotte, A. Pirani Zhai, S.L. Connors, C. Péan ve S. Berger (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Birleşik Krallık ve New York, NY, ABD, 2391 s.
- IPCC (2022). "İklim değişikliği 2022: Etkiler, uyum ve kırılabilirlik." *Hükümetler arası iklim değişikliği panelinin altıncı değerlendirme raporuna çalışma grubu II'nin katkısı* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor ve E.S. Poloczanska, (eds.)]. Cambridge Üniversitesi Yayınları. Cambridge University Press, Cambridge, UK ve New York, NY, USA, 3056.
- IPCC, İklim Değişikliği (2001), Bilimsel temeller içinde. Hükümetler arası iklim değişikliği panelinin ikinci değerlendirme raporuna çalışma grubu I'nin katkısı. ed. J. T. Houghton (Cambridge: Cambridge University Press), 881.
- IPCC, İklim Değişikliği (2007) içinde Fiziksel bilim temeli. Hükümetler arası iklim değişikliği panelinin dördüncü değerlendirme raporuna çalışma grubu I'nin katkısı. ed. S. Solomon (Cambridge: Cambridge University Press), 996.
- IPCC, İklim Değişikliği (2013) içinde Fiziksel bilim temeli. Hükümetler arası iklim değişikliği panelinin beşinci değerlendirme raporuna çalışma grubu I'nin katkısı. ed. T. F. Stocker (Cambridge: Cambridge University Press), 1535.
- J ain, S., Mindlin, J., Koren, G., Gulizia, C., Steadman, C., Langendijk, G. S., ve diğerleri (2022). Mevcut nesil iklim araştırmacılarını veri bilimine kapırmaya riskiyle karşı karşıya mıyız? *AGU Advances* 3:e2022AV000676. doi: 10.1029/2022AV000676
- K aufman, D., ve Masson-Delmotte, V. (2024). Görüş: paleobilim bilgilerini bir sonraki hükümetler arası iklim değişikliği paneli raporlarına dağıtın. *İklim. Geçmiş* 20, 2587-2594. doi: 10.5194/cp-20-2587-2024
- K ing, A. D., Grose, M. R., Kimutai, J., Pinto, I. ve Harrington, L. J. (2023). Olay atıfları, kayıp ve hasarda önemli bir rol oynamaya hazır değil. *Nat. İklim. Chang.* 13, 415-417. doi: 10.1038/s41558-023-01651-2
- K ing, A. D., Ziehn, T., Chamberlain, M., Borowiak, A. R., Brown, J. R., Cassidy, L. ve diğerleri (2024). ACCESS-ESM-1.5'te farklı küresel ısınma seviyelerinde iklim stabilizasyonunun araştırılması. *Dünya Sist. Dinamik.* 15, 1353-1383. doi: 10.5194/esd-15-1353-2024
- K nutti, R., Rugenstein, M., ve Hegerl, G. (2017). Denge iklim duyarlılığının ötesinde. *Nat. Geosci.* 10, 727-736. doi: 10.1038/ngeo3017
- K obayashi, S., Ota, Y., ve Harada, Y. (2015). JRA-55 reanalizi: genel özellikler ve temel karakteristikler. *J. Meteor. Soc. Japan* 93, 5-48. doi: 10.2151/jmsj.2015-001
- K oven, C. D., Ringeval, B., Friedlingstein, P., Ciais, P., Cadule, P., Khvorostyanov, D., et al. (2011). Permafrost karbon-iklim geri beslemeleri küresel ısınmayı hızlandırıyor. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 108, 14769-14774. doi: 10.1073/pnas.1103910108
- L am (2023). Yetenekli orta menzilli küresel hava tahminini öğrenme, *Science*, 382, 1416-1421. doi: 10.1126/science.adi2336
- L aughner, J. L., Neu, J. L., Schimel, D., Wennberg, P. O., Barsanti, K., Bowman, K. W., ve diğerleri (2021). COVID-19'a bağlı toplumsal değişimler, atmosferik kimya ve iklim değişikliği arasındaki büyük ölçekli karmaşıklıklar ve geri bildirimleri ortaya koyuyor. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 118:46. doi: 10.1073/pnas.2109481118
- L enton, T. M., Held, H., Krieger, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., ve diğerleri (2008). Dünya'nın iklim sistemindeki devrilme unsurları. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105, 1786-1793. doi: 10.1073/pnas.0705414105
- L enton, T. M., Rockström, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W. ve diğerleri (2019). İklim devrilme noktaları - bahis oynamak için çok riskli. *Nature* 575, 592-595. doi: 10.1038/d41586-019-03595-0
- MacDougall, A. H., Frölicher, T. L., Jones, C. D. ve Rogelj, J. (2020). Boru hattında ısınma var mı? CO<sub>2</sub>'den sıfır emisyon taahhüdüne ilişkin çok modellen bir analiz. *Biogeosciences* 17, 2987-3016. doi: 10.5194/bg-17-2987-2020

- Matthews, H. D., ve Caldeira, K. (2008). İklimi dengelemek için sifıra yakın emisyon gerekir. *Jeofizik. Res. Lett.* 35:L04705. doi: 10.1029/2007GL032388
- N Ulusal Bilim, Mühendislik ve Tıp Akademileri (2021). Güneş ışığını yansıtmak: Güneş jeomühendisliği araştırmaları ve araştırma yönetimi için öneriler. Washington, D.C: Ulusal Akademiler Yayınları.
- Newman, R., ve Noy, I. (2023). İklim değişikliğine atfedilebilecek aşırı hava koşullarının küresel maliyeti. *Nat. Commun.* 14:6103. doi: 10.1038/s41467-023-41888-1
- Otto, F. E. L. (2023). Aşırı olayların iklim değişikliğine atfedilmesi. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 48, 813-828. doi: 10.1146/annurev-environ-112621-083538
- Otto, F. E. L., ve Fabian, F. (2024). Adaptasyon ve kayıp ve zararlar için kanıt tabanının genişletilmesi. *Global Pol.* 15, 64-74. doi: 10.1111/1758-5899.13269
- Preston, C. J. (2013). Etik ve jeomühendislik: Güneş radyasyonu yönetimi ve karbondioksit giderimi ile ortaya çıkan ahlaki konuların gözden geçirilmesi. *WIREs Clim Change* 4, 23-37. doi: 10.1002/wcc.198
- Raghruman, S. P., Soden, B., Clement, A., Vecchi, G., Menemenlis, S. ve Yang, W. (2024). 2023 küresel ısınma sıçraması El Niño-güney salınımı tarafından yönlendirildi. *Atmosfer. Chem. Phys.* 24, 11275-11283. doi: 10.5194/acp-24-11275-2024
- Randers, J. (2012). Önümüzdeki kırk yıl için küresel bir tahmin. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing, 397.
- Richter, J. H. (2025). Dirençli Bir Toplum İçin Zaman Ölçekleri Arasında Dünya Sistemi Öngörülebilirliği: Bir Araştırma Topluluğu Perspektifi (2025).
- Romanou, A., Hegerl, G. C., Seneviratne, S. I., Abis, B., Bastos, A., Conversi, A., ve diğerleri (2024). Devrilme unsurlarına ve devrilme noktalarına katkıda bulunan aşırı olaylar. *Surv. Geophys.* doi: 10.1007/s10712-024-09863-7
- Samsat, B. H., Lund, M. T., Fuglestedt, J. S. ve Wilcox, L. J. (2024). 2023 sıcaklıkları istikrarlı küresel ısınmayı ve iç deniz yüzeyi sıcaklık değişkenliğini yansıtmaktadır. *Nat. Commun.* 5:460. doi: 10.1038/s43247-024-01637-8
- Sauterey, B., Gland, G. L., Cermeño, P., Aumont, Q., Lévy, M. ve Vallina, S. M. (2023). Fitoplanktonun iklim değişikliğine adaptif direnci aşırı olaylar durumunda çöküyor - Bir modelleme çalışması. *Ecological Modelling*, 483, 110437. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2023.110437
- Schuur, E. A. G., Abbott, B. W., Commann, R. P., Ernakovich, J., Euskirchen, E., Hugelius, G., ve diğerleri (2022). Permafrost ve iklim değişikliği: Isınan Kuzey Kutbu'ndan karbon döngüsü geri bildirimleri. *Annual Review of Environment and Resources*. 47:343-371. doi: 10.1146/annurev-environ-012220-011847
- Schmidt, G. (2024). İklim modelleri 2023'ün büyük ısı anomalisini açıklayamıyor - keşfedilememiş bir bölgede olabiliriz. *Nature* 627:467. doi: 10.1038/d41586-024-00816-z
- Sherwood, S. C., Hegerl, G., Braconnot, P., Friedlingstein, P., Goelzer, H., Harris, N. R. P., ve diğerleri (2024). Gelecekte güvenli bir iklime giden belirsiz yollar. *Earth's Future* 12:e2023EF004297. doi: 10.1029/2023EF004297
- Solomon, S., Plattner, G., Knutti, R. ve Friedlingstein, P. (2009). Karbondioksit emisyonlarına bağlı geri döndürülemez iklim değişikliği. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 106, 1704-1709. doi: 10.1073/pnas.0812721106
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Schellnhuber, H. J., Dube, O. P., Dutreuil, S., ve diğerleri (2020). Yer sistemi biliminin ortaya çıkışı ve evrimi. *Nat Rev Earth Environ* 1, 54-63. doi: 10.1038/s43017-019-0005-6
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., ve diğerleri (2018). Antroposen'de dünya sisteminin yörüngeleri. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 115, 8252-8259. doi: 10.1073/pnas.1810141115
- Stevens, B., Adami, S., Ali, T., Anzt, H., Aslan, Z., Attinger, S., ve diğerleri (2024). Dünya sanallaştırma motorları (EVE). *Dünya Sist. Sci. Data* 16, 2113-2122. doi: 10.5194/essd-16-2113-2024
- Tebaldi, C. P., ve Friedlingstein, P. (2013). İklim ataleti ve değişkenliği nedeniyle iklim azaltım faydalarının gecikmeli tespiti. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 110, 17229-17234. doi: 10.1073/pnas.1300051110
- Thiery, W., Lange, S., Rogelj, J., Hanasaki, N., Hickler, T., Huber, V. ve diğerleri (2021). İklim aşırılarına maruz kalmada nesiller arası eşitsizlikler. *Science* 374, 158-160. doi: 10.1126/science.abi7339
- Trenberth, K. E. (2011). İklim değişikliği ile yağışlardaki değişimler. *İklim. Res.* 47, 123-138. doi: 10.3354/cr00953
- Trenberth, K. E., ve Asrar, G. R. (2012). Su döngüsü araştırmalarındaki zorluklar ve fırsatlar: WCRP katkıları. *Surv. Jeofizik.* 35, 515-532. doi: 10.1007/s10712-012-9214-y
- Trenberth, K. E., ve Fasullo, J. T. (2013). Bölgesel enerji ve su döngüleri okyanustan karaya taşınım. *J. Clim.* 26, 7837-7851. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00008.1
- Trenberth, K. E., Marquis, M. ve Zebiak, S. (2016). Bir iklim bilgi sistemine duyulan hayati ihtiyaç. *Nat. Clim. Chang.* 6, 1057-1059. doi: 10.1038/NCLIM-16101680
- Trenberth, K. E., Zhang, Y., ve Gehne, M. (2017). Yağışlarda aralıklılık: saatlik veriler kullanılarak süre, sıklık, yoğunluk ve miktarlar. *J. Hydrometeorol.* 18, 1393-1412. doi: 10.1175/JHM-D-16-0263.1
- Van der Wal, R. S. W., Nicholls, R. J., Behar, D., McInnes, K., Stammer, D. ve Lowe, J. A. (2022). Uygulayıcılar için üst düzey bir deniz seviyesi yükselmesi tahmini. *Earth's Future* 10:e2022EF002751. doi: 10.1029/2022EF002751
- Vera, C. (2024). Güney Amerika'da İklim Hizmetleri. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. doi: 10.1093/acrefore/9780190228620.013.963
- Wang, S., Foster, A., Lenz, E. A., Kessler, J. D., Stroeve, J. C., Anderson, L. O., ve diğerleri (2023). Yer sistemi mekanizmaları ve etkileri ve yer sistemi devrilme unsurlarının etkileri. *Rev. Geophys.* 61. doi: 10.1029/2021RG000757
- Wang, H., Zheng, X. T., Cai, W. ve Zhou, L. (2024). Çin aerosol emisyonlarının azaltılmasından kaynaklanan atmosfer telekonksiyonları Kuzeydoğu Pasifik sıcak blob olaylarını şiddetlendiriyor. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 121:e2313797121. doi: 10.1073/pnas.2313797121
- WCRP (2019). Dünya iklim araştırma programı stratejik planı 2019-2028: WCRP Yayını. Cenevre, İsviçre: Dünya Meteoroloji Örgütü.
- WCRP, Dünya iklim araştırma Programı stratejik planı, toplum için iklim bilimi (2020). Dünya Meteoroloji Örgütü.
- Werning, M., Hooke, D., Krey, V., Riahi, K. ve van Ruijven, B. (2024). İklim değişikliğinin küresel ısınma düzeyi göstergeleri ve maruz kalan sıcak noktalar. *Environ. Res. Climate* 3:e045015. doi: 10.1088/2752-5295/ad8300
- Wilkinson, M., Dumontier, M. ve Aalbersberg, I. (2016). Bilimsel veri yönetimi ve yönetimi için FAIR yol gösterici ilkeleri. *Sci Data* 3:160018. doi: 10.1038/sdata.2016.18
- Wunderling, N., von der Heydt, A. S., Aksenov, Y., Barker, S., Bastiaansen, R., Brovkin, V., ve diğerleri (2024). İklim devrilme noktası etkileşimleri ve basamakları: bir inceleme. *Dünya Sist. Dinamik.* 15, 41-74. doi: 10.5194/esd-15-41-2024
- Yin, Q. Z., Wu, Z. P., Berger, A., Goosse, H. ve Hodell, D. (2021). Güneşlenme, buzullar arası dönemin sonunda Atlantik dolaşımının aniden zayıflamasını tetikledi. *Science* 373, 1035-1040. doi: 10.1126/science.abg1737
- Yong, R., ve Hsiang, S. (2024). Amerika Birleşik Devletleri'nde tropikal siklonların neden olduğu ölümler. *Nature* 635, 121-128. doi: 10.1038/s41586-024-07945-5