

Geophysical Research Letters

ARAŞTIRMA MEKTUBU

10.1029/2019GL085378

Önemli Noktalar:

- Başlatılmamış çok yıllık iklim modelinin gelecek projeksiyon performansının değerlendirilmesi, model becerisinin somut bir testini sağlar
- Model/gözlemlenen zorlamalar ve sıcaklık değişimi arasındaki yarı doğrusal ilişki, öngörülen zorlamalardaki hataları kontrol etmek için kullanılır
- 1970-2007 yılları arasında yayınlanan model simülasyonları, gelecekteki küresel ortalama yüzey ısınmasını öngörmeye becerikliydik

Destekleyici Bilgi:

- Destekleyici Bilgi S1

Yazışmalar için:

Z. Hausfatherhausfath@gmail.com

Alıntı: Hausfather, Z., Drake, H. F., Abbott, T., & Schmidt, G. A. (2020). Geçmiş iklim modeli projeksiyonlarının performansının değerlendirilmesi. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL085378. <https://doi.org/10.1029/2019GL085378>

Alındı 16 Eylül 2019
Kabul edildi 26 KASIM 2019
Kabul edilen makale çevrimiçi 4 ARALIK 2019

Geçmiş İklim Modeli Projeksiyonlarının Performansının Değerlendirilmesi

Zeke Hausfather¹ , Henri F. Drake^{2,3} , Tristan Abbott³ , ve Gavin A. Schmidt⁴ 

¹Energy and Resources Group, University of California, Berkeley, CA, USA, ²Massachusetts Institute of Technology/Woods Hole Oceanographic Institution Joint Program in Oceanography, Woods Hole, MA, USA, ³Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, ⁴NASA Goddard Institute for Space Studies, Broadway, NY, USA

Özet Gelecekteki model projeksiyonlarının gözlemlerle geriye dönük olarak karşılaştırılması, model becerisinin sağlam bağımsız bir şekilde test edilmesini sağlar. Burada, 1970 ve 2007 yılları arasında yayınlanan iklim modellerinin gelecekteki küresel ortalama yüzey sıcaklığı (GMST) değişikliklerini öngörmedeki performansını analiz ediyoruz. Modeller, hem GMST'nin zaman içindeki değişimine hem de GMST'nin dış zorlamadaki değişime göre değişimine dayalı olarak gözlemlerle karşılaştırılmaktadır. İkinci yaklaşım, model fiziğinin doğruluğundan bağımsız olarak model projeksiyonlarında potansiyel bir hata kaynağı model uyumsuzlukları hesaba katmaktadır. Son elli yılda yayınlanan iklim modellerinin sonraki GMST değişikliklerini tahmin etmede becerikli olduğunu, incelenen çoğu modelin, özellikle tarafından öngörülen ve gözlemsel olarak tahmin edilen zorlamalar arasındaki uyumsuzluklar dikkate alındığında, gözlemlerle tutarlı bir ısınma gösterdiğini bulduk.

Düz Dil Özeti İklim modelleri, Dünya ikliminde gelecekte meydana gelebilecek değişiklikleri anlamak için önemli bir yol sağlamaktadır. Bu makalede, 1970'lerin başından 2000'lerin sonuna kadar yayınlanan çeşitli iklim modellerinin performansının kapsamlı bir değerlendirmesini. Özellikle, modellerin yayınlandıktan sonraki yıllarda küresel ısınmayı ne kadar iyi tahmin ettiklerini, gözlemlenen sıcaklık değişimleriyle karşılaştırarak inceliyoruz. Model tahminlerinin gözlemlerle doğru bir şekilde eşleşmesi iki şeye bağlıdır: iklim fiziğinin doğru modellenmesi ve gelecekteki CO₂ emisyonları ve iklimi etkileyen diğer faktörlerle ilgili doğru varsayımlar. Fiziğe dayalı en iyi model, gelecekteki emisyon değişikliklerinin gerçeklikten farklı olması durumunda yine de hatalı olacaktır. Bunu hesaba katmak için, sıcaklık ve atmosferik CO₂ (ve diğer iklim faktörleri) arasındaki ilişkinin modeller ve gözlemler arasında nasıl farklılık gösterdiğine bakıyoruz. Son elli yılda yayınlanan iklim modellerinin, özellikle atmosferik CO₂ ve diğer iklim etmenlerindeki modellenmiş ve gerçek değişiklikler arasındaki farklılıklar hesaba katıldığında, yayınlandıktan sonraki yıllarda küresel ısınmayı tahmin etmede genellikle oldukça doğru olduğunu bulduk. Bu araştırma, geçmişteki iklim modelleme çalışmalarının performansına ilişkin kamuoyundaki kafa karışıklığını gidermeye yardımcı olacak ve modellerin küresel ısınmayı doğru bir şekilde öngördüğüne dair güvenimizi artıracaktır.

1. Giriş

Fizik tabanlı modeller, dış zorlama ve iç değişkenlik nedeniyle Dünya iklimindeki değişiklikleri değerlendirmek için önemli bir araç sağlar (örneğin, Arrhenius, 1896; IPCC, 2013). Ancak, bu modellerin performansını değerlendirmek zor olabilir. Modeller genellikle önceki iklim değişkenlerinin "hindcast" lerini tarihsel gözlemlerle karşılaştırarak değerlendirilirken, hindcast simülasyonlarının geliştirilmesi her zaman çözülmemiş fiziği yöneten parametrelerin ayarlanmasından bağımsız değildir (Gettelman vd., 2019; Mauritsen vd., 2019; Schmidt vd., 2017). Araştırmaların çoğu en yeni nesil modelleme sonuçlarına odaklanma eğiliminde olduğundan, iklim modeli projeksiyonlarının gelecek projeksiyon dönemleri boyunca (bundan sonra model projeksiyonları olarak anılacaktır) performansını değerlendiren nispeten az çalışma (Eyring vd., 2019).

Son birkaç on yıl içinde birçok farklı iklim projeksiyonu seti üretilmiştir. Gelecekteki sıcaklıkların ilk zaman serisi projeksiyonları 1970'lerin başında basit enerji dengesi modelleri kullanılarak hesaplanmıştır ve bunların çoğu yalnızca öngörülen bir dış zorlama zaman serisi (başlangıçta CO₂ konsantrasyonları) ve tek sütunlu radyatif-konvektif denge modellerinden (örneğin, Manabe & Wetherald, 1967) veya genel sirkülasyon modellerinden (örneğin, Manabe & Wetherald, 1975) elde edilen bir denge iklim hassasiyeti tahmini ile kısıtlanmıştır. Basit enerji dengesi modelleri o zamandan beri yavaş yavaş bir kenara bırakılmıştır.

İlk 1980'lerin sonlarında yayınlanan giderek artan yüksek çözünürlüklü ve kapsamlı genel sirkülasyon modelleri (örneğin, Hansen vd., 1988; IPCC, 2013; Stouffer vd., 1989).

İklim modeli projeksiyonları, belirli bir zorlama senaryosuna bağlı tahminler olarak düşünülebilir. Bunların, gerçekçi bir zorlama senaryosunun kullanılması amaçlandığında ve gerçekleşen zorlamaların projeksiyon zorlamalarına niteliksel olarak benzer olduğu durumlarda gelecekteki olası sonuçların projeksiyonları olduğunu düşünüyoruz. Model projeksiyonlarının model geliştirmeden sonraki gözlemlerle değerlendirilmesi model becerisinin test edilmesini sağlar ve başarılı projeksiyonlar gelecek için yapma sürecine somut bir şekilde güven katabilir. Bununla birlikte, gelecekteki projeksiyon performansının değerlendirilmesi, model projeksiyonlarında mevcut olan zorlanmış sinyalin doğal değişkenliğin gürültüsünden ayırt edilebilmesi için yayın sonrası yeterli bir süre gerektirir (Hansen ., 1988; Hawkins ve Sutton, 2012).

Araştırmacılar daha önce Hansen ve diğerleri (1988) Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi Goddard Uzay Araştırmaları Enstitüsü modeli (Hargreaves, 2010; Rahmstorf vd, 2007), Stouffer ve diğerleri (1989) Jeofiziksel Akışkanlar Dinamiği Laboratuvarı modeli (Stouffer & Manabe, 2017), IPCC Birinci Değerlendirme Raporu (FAR-IPCC, 1990; Frame & Stone, 2012) ve IPCC Üçüncü ve Dördüncü Değerlendirme raporları (IPCC, 2001; IPCC, 2007; Rahmstorf ve diğerleri, 2012). Ancak, 1970 yılından itibaren ısınma tahminlerinin mevcut olmasına rağmen, bugüne kadar geçmiş iklim modellerinin performansına ilişkin sistematik bir inceleme yapılmamıştır.

Bu makale, en görünür iklim modeli çıktılarından biri olan küresel ortalama yüzey sıcaklığı (GMST) değişiminin birkaç nesil geçmiş modelden projeksiyonlarını analiz etmektedir. GMST, iklim değişikliğinin etkilerinin belirlenmesinde büyük bir rol oynamakta, uluslararası düzeyde üzerinde anlaşmaya varılan azaltım hedefleriyle doğrudan bağlantılıdır ve en doğru ve en uzun gözlem kayıtlarına sahip iklim değişkenlerinden biridir. GMST aynı zamanda 1970'lerde ve 1980'lerde çalıştırılan birçok erken iklim modeli için en yaygın olarak mevcut olan çıktıdır.

Model GMST uzun vadeli performansını iki temel faktör etkilemektedir: (1) iklimin dış zorlamalara karşı hassasiyeti ve derin okyanus tarafından ısı alımı gibi çeşitli fiziksel süreçlerin çözünürlüğü veya parametrelerinin belirlenmesi dahil olmak üzere model fiziğinin doğruluğu ve (2) sera gazları ve aerosollerin yanı sıra güneş veya volkanik zorlama gibi doğal zorlamalardan kaynaklanan dış zorlamalarda öngörülen değişikliklerin doğruluğu.

İklim modellerinin model fiziği formülasyonlarının doğruluğuna değerlendirilmesi gerekirken, iklim modelcilerinin insan davranışına, teknolojik değişime ve ekonomik ve nüfus artışına bağlı olan gelecekteki emisyonları ve bunlarla ilişkili dış etkenlerdeki değişiklikleri doğru bir şekilde öngörmeleri beklenemez. İklim modelcileri genellikle gelecekteki emisyonları deterministik olarak tahmin etme görevini atlayarak, bunun yerine marjinal olarak makul uç noktalarla paranteze alınmış birkaç makul geleceği temsil eden bir dizi zorlama yörüngesini öngörürler. Örneğin, Hansen ve diğerleri, 1988, "emisyonların genel olarak hayal edilenden daha sert bir şekilde azaltıldığı" düşük emisyonlu aşırı Senaryo C'yi, emisyonların "sonunda gerçeğin yüksek tarafında olması gereken" yüksek emisyonlu aşırı Senaryo A'yı ve "belki de üçü arasında en akla yatkın olan" orta yol Senaryo B'yi dikkate almaktadır. Daha yakın zamanda, CMIP5 ve IPCC AR5 raporunda kullanılan Temsili Konsantrasyon Yolları (RCP'ler) benzer şekilde düşük emisyonlu aşırı Senaryo RCP2.6 ve yüksek emisyonlu aşırı Senaryo RCP8.5 ile parantez içine alınmış bir dizi makul senaryo içermektedir (van Vuuren ., 2011). Bu nedenle, model projeksiyon performansının değerlendirilmesi, özellikle öngörülen zorlamaların sonradan gözlemlenen zorlamalara ilişkin en iyi tahminimizden önemli ölçüde farklı olduğu durumlarda, öngörülen sıcaklıkların gözlemlerle ne kadar iyi örtüştüğünü değerlendirmek yerine, model zorlamaları ile sıcaklık değişimi arasındaki ilişkiye odaklanmalıdır.

Bu yaklaşım - hem model projeksiyonlarında hem de gözlemlerde zorlama ve sıcaklıklar arasındaki ilişkinin karşılaştırılması - model fiziğinin performansını etkili bir şekilde değerlendirirken, iklim modelleyicilerinin o zamanlar ele almadığı öngörülen zorlamadaki olası uyumsuzlukları da hesaba katabilir. Bu makalede, gözlemlere kıyasla geçmişteki iklim modellerinin gelecek projeksiyonlarının performansını değerlendirmek için hem zaman içinde sıcaklıktaki değişimin geleneksel bir değerlendirmesini hem de zorlamadaki değişime sıcaklığın tepkisinin yeni bir değerlendirmesini uyguluyoruz.

İklim modelleme çalışmaları, Dünya ikliminin ilk modern tek sütunlu (Manabe ve Strickler, 1964) ve genel sirkülasyon modellerinin (Manabe vd., 1965) 1960'ların ortalarında yayınlanmasından bu yana önemli ölçüde ilerlemiş ve model hindcast becerisinin sürekli olarak gelişmesine neden olmuştur (Knutti vd., 2013; Reichler ve

Kim, 2008). Bu gelişmeler, burada açıklanan modellerin neredeyse tamamını operasyonel olarak geçersiz hale getirmiş olsa da, onlarca yıllık yayın sonrası projeksiyon dönemleri sayesinde projeksiyonlarının değerlendirilmesi için benzersiz bir konumda olduklarından değerli araçlar olmaya devam etmektedirler.

2. Yöntemler

1990'ların başından önce yayınlanan ve hem gelecekteki GMST'nin öngörülen bir zaman serisini (zaman içinde en az iki nokta ile) hem de gelecekteki zorlamaları (hem yayın tarihi hem de gelecekteki öngörülen atmosferik CO₂ konsantrasyonları dahil) içeren iklim modeli çıktıları için makaleleri belirlemek için bir literatür araştırması yaptık. Bu kriterlere uyan 14 farklı projeksiyona sahip on bir makale tespit edilmiştir. 1990'ların ortalarından itibaren, iklim modelleme çalışmaları öncelikle IPCC süreciyle (ve daha sonra Birleştirilmiş Model Karşılaştırma Projeleri, CMIP'ler) bağlantılı olarak yürütülmüş ve model projeksiyonları IPCC FAR (1990), İkinci Değerlendirme Raporu (SAR-IPCC, 1996), Üçüncü Değerlendirme Raporu (TAR-IPCC, 2001) ve Dördüncü Değerlendirme Raporu'nda (AR4-IPCC, 2007) yer alan modellerden alınmıştır.

Değerlendirilen belirli model projeksiyonları Manabe, 1970 (bundan sonra Ma70 olarak anılacaktır), Mitchell, 1970 (Mi70), Benson, 1970 (B70), Rasool & Schneider, 1971 (RS71), Sawyer, 1972 (S72), Broecker, 1975 (B75), Nordhaus, 1977 (N77), Schneider & Thompson, 1981 (ST81), Hansen, 1981 (H81), Hansen ve diğerleri, 1988 (H88) ve Manabe & Stouffer, 1993 (MS93). FAR, SAR ve TAR'ana metninde yer alan enerji dengesi modeli projeksiyonları incelenirken, AR4 için CMIP3 çoklu model ortalaması (ve yayılımı) incelenmiştir (AR4'ten önce ana metinde yer alan birincil IPCC projeksiyonları olarak çoklu model ortalamaları kullanılmamıştır). Her bir model projeksiyonunun nasıl sayısallaştırıldığı ve analiz edildiğinin yanı sıra ilk üç IPCC raporunda yer alan bireysel modellerin değerlendirmeleriyle ilgili ayrıntılar destekleyici bilgilerde bulunabilir.

AR4 projeksiyonu, hem gözlemsel belirsizliklerin hem de model projeksiyonu belirsizliklerinin 2007-2017 gibi kısa bir dönemde çok faydalı sonuçlar çıkarmak için çok büyük olması ve dahil edilmesinin rakamların okunmasını zorlaştırması nedeniyle makaledeki ana analizden çıkarılmıştır. Bununla birlikte, AR4 projeksiyonunu içeren analizler destekleyici bilgilerde bulunabilir.

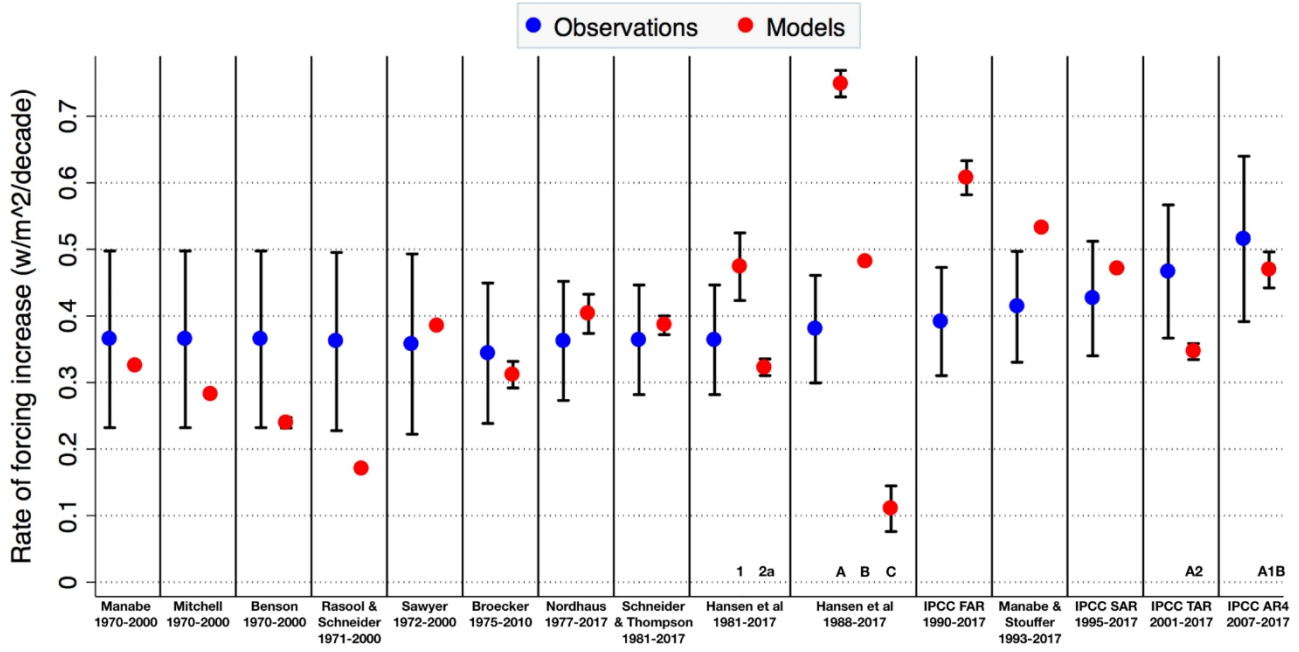
Model projeksiyonlarını, model projeksiyonunun yayınlandığı tarih ile 2017 sonu arasındaki dönem boyunca veya model çalışmalarının 2017'ye kadar uzanmadığı durumlarda model projeksiyonunun sona erdiği boyunca değerlendirdik. Analiz için 2017 bitiş tarihi seçilmiştir çünkü kullandığımız radyatif zorlamaların gözlemsel tahminleri topluluğu sadece bu tarihe kadar uzanmaktadır.

Bu analizde beş farklı gözlemsel sıcaklık zaman serisi kullanılmıştır: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi GISTEMP (Lenssen vd., 2019), Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi GlobalTemp (Vose vd., 2012), Hadley/UEA HadCRUT4 (Morice vd., 2012), Berkeley Earth (Rohde vd., 2013) ve Cowtan ve Way (Cowtan ve Way, 2014). Modeller yüzey hava sıcaklığı (SAT) alanları sağlarken gözlemler kara üzerindeki SAT alanlarına ve okyanus üzerindeki deniz yüzeyi sıcaklığı (SST) alanlarına dayandığından, kullanılan gözlemsel sıcaklık kayıtları modellerle tamamen benzer bir karşılaştırma sunmamaktadır. Bu, burada kullanılan modellerdeki eğilimlerin gözlemlere kıyasla muhtemelen yüksek önyargılı olduğu anlamına gelmektedir, çünkü model karışımı alan eğilimleri 1970-2017 döneminde model küresel SAT alanlarından yaklaşık %7 (±%5) daha düşüktür (Cowtan vd., 2015; Richardson vd., 2016). Bununla birlikte, burada analiz edilen modellerde SST alanlarının bulunmaması, harmanlanmış SAT/SST'nin gözlemlerle karşılaştırılmasını engellemektedir.

Model projeksiyon dönemi boyunca gözlemleri iklim modeli projeksiyonlarıyla iki yaklaşım kullanarak karşılaştırdık: zamana karşı sıcaklık değişimi ve radyatif zorlamadaki değişime karşı sıcaklık değişimi ("zımnı TCR"). Zorlama farklılıklarının varlığında bile anlamlı bir model-gözlem karşılaştırması sağlamak için ima edilen TCR ölçütünü kullanıyoruz. Zımnı TCR, hem modeller hem de gözlemler için sıcaklık değişimini ışınimsal zorlamaya karşı regresyona tabi tutarak ve elde edilen değerleri iki katına çıkan atmosferik CO₂ konsantrasyonlarıyla ilişkili zorlama, F_{2x} ile çarpılarak hesaplanır (Otto ve ark., 2013'ü takiben):

$$TCR_{implied} = \frac{1}{4} F_{2x} \Delta T / \Delta F_{anthro}$$

Zımnı TCR-yi sabit bir F_{2x} değeri kullanarak sıcaklık birimleriyle ifade ediyoruz= 3.7 W/m² (Vial vd., 2013). ΔF_{anthro} sadece antropojenik zorlamaları içerir ve volkanik ve güneş kaynaklı değişiklikleri hariç tutar.



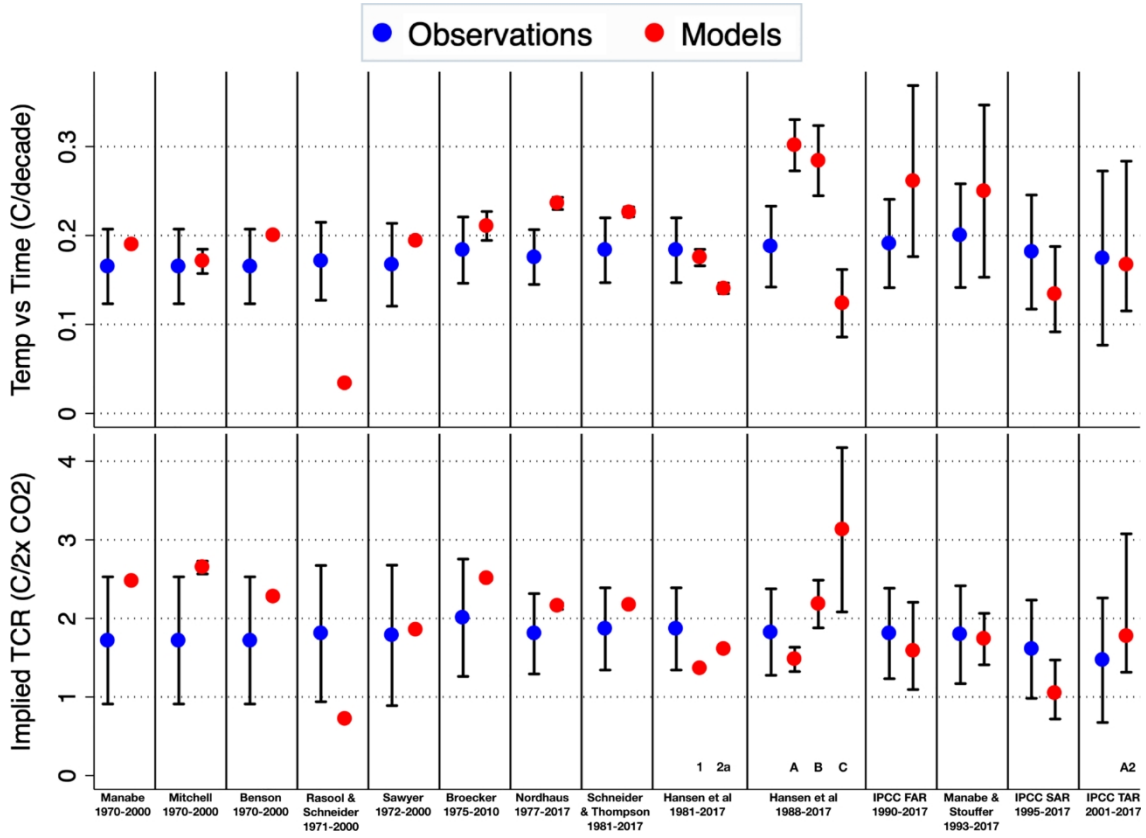
Şekil 1. Model projeksiyon dönemleri boyunca modellerde ve gözlemlerde dış zorlama artış oranı (on yılda metre kare başına watt cinsinden)

TCR'nin daha kısa zaman dilimlerinde yorumlanmasını zorlaştıracak zorlamada keskin yıllararası değişiklikler ortaya çıkarır. Gözlemsel kayıt için ΔF_{anthro} , gözlemsel olarak bilgilendirilmiş zorlama tahminlerinden oluşan 1.000 üyeli bir topluluğa dayanmaktadır (Dessler & Forster, 2018). Model zorlamaları mümkün olduğunda yayınlanmış formül ve tablolardan yeniden hesaplanmış, aksi takdirde yayınlanmış şekillerden sayısallaştırılmıştır (ayrıntılar için destekleyici bilgiler bölüm S2'ye bakınız). Etkili veya etkinliği ayarlanmış zorlamalar yerine anlık zorlamalar kullanılmıştır, çünkü bazı erken dönem modeller için mevcut olan tek şey bunlardır (Hansen vd., 2005; Marvel vd., 2016; bkz. destekleyici bilgiler bölümü S1.0). Zımnı TCR'yi hesaplamak için kullanılan yaklaşımla ilgili ayrıntılar destekleyici bilgiler bölümü S1.2'de bulunabilir.

Zımnı TCR yoluyla modellerin ve gözlemlerin karşılaştırılması, önceki analizlerde yaygın olarak kullanılan bir yaklaşım olan zorlama ve ısınma arasında doğrusal bir ilişki olduğunu varsayar (Gregory vd., 2004; Otto vd., 2013). Eğer zorlama zaman içinde yeterince yavaş değişiyorsa ve derin okyanus sıcaklıkları yaklaşık olarak sabit kalıyorsa, radyatif geri beslemelerin ve okyanus ısı alımının gücüne bağlı olan bir orantı sabiti ile doğrusal bir ilişki olması beklenir (Held vd., 2010). Bu rejimde, ima edilen TCR ölçütümüz model fiziği hakkında bilgi sağlar ve zorlamanın zaman içindeki değişim oranından etkilenmez; ayrıca, önceki çalışmalar yirminci yüzyılda antropojenik zorlamaya verilen sıcaklık tepkisinin bu rejime girdiğini öne sürmüştür (Gregory & Forster, 2008; Gregory & Mitchell, 1997; Held vd., 2010).

Ancak, volkanik patlamalarla ilişkili olanlar gibi ani artışlar veya düşüşler eşdeğer bir ani sıcaklık tepkisine yol açmayacaktır. Bu nedenle, H88'in B ve C Senaryoları hariç, değerlendirilen tüm modellerde projeksiyon dönemleri boyunca ek volkanik olaylar olmadığından, $TCR_{(ima)}$ tahmininde yalnızca antropojenik zorlamalar kullanılmıştır. Benzer şekilde, iklim sistemindeki termal atalet, zorlamanın yeterince hızlı artması halinde sıcaklık ve dış zorlama arasındaki ilişkiyi etkileyebilir (Geoffroy vd., 2012). Zorlamanın hızla arttığı senaryolar, her şey eşit olduğunda, belirli bir sonra daha kademeli bir artışa sahip senaryolara göre denge durumundan daha uzak olma eğiliminde olacaktır (Rohrschneider vd., 2019) ve dolayısıyla daha düşük bir ima edilen TCR'ye sahip olacaktır. Bununla birlikte, birkaç istisna dışında (örneğin, RS71, H88 Senaryoları A ve C), değerlendirilen modellerin çoğu, gözlemsel zorlamaların ortalama tahmininin 1,3 katı içinde bir dış zorlama artış oranına sahipti ve bu nedenle muhtemelen ima edilen TCR'nin büyük ölçüde radyatif geri bildirimlere ve okyanus ısı alımına bağlı olduğu rejime girmektedir.

Bu analizde, ikisi arasındaki farkların karşılaştırılmasına dayalı olarak model projeksiyonlarını gözlemlerle tutarlı veya tutarsız olarak adlandırıyoruz. Spesifik olarak, eğer farklardaki %95 güven aralığı



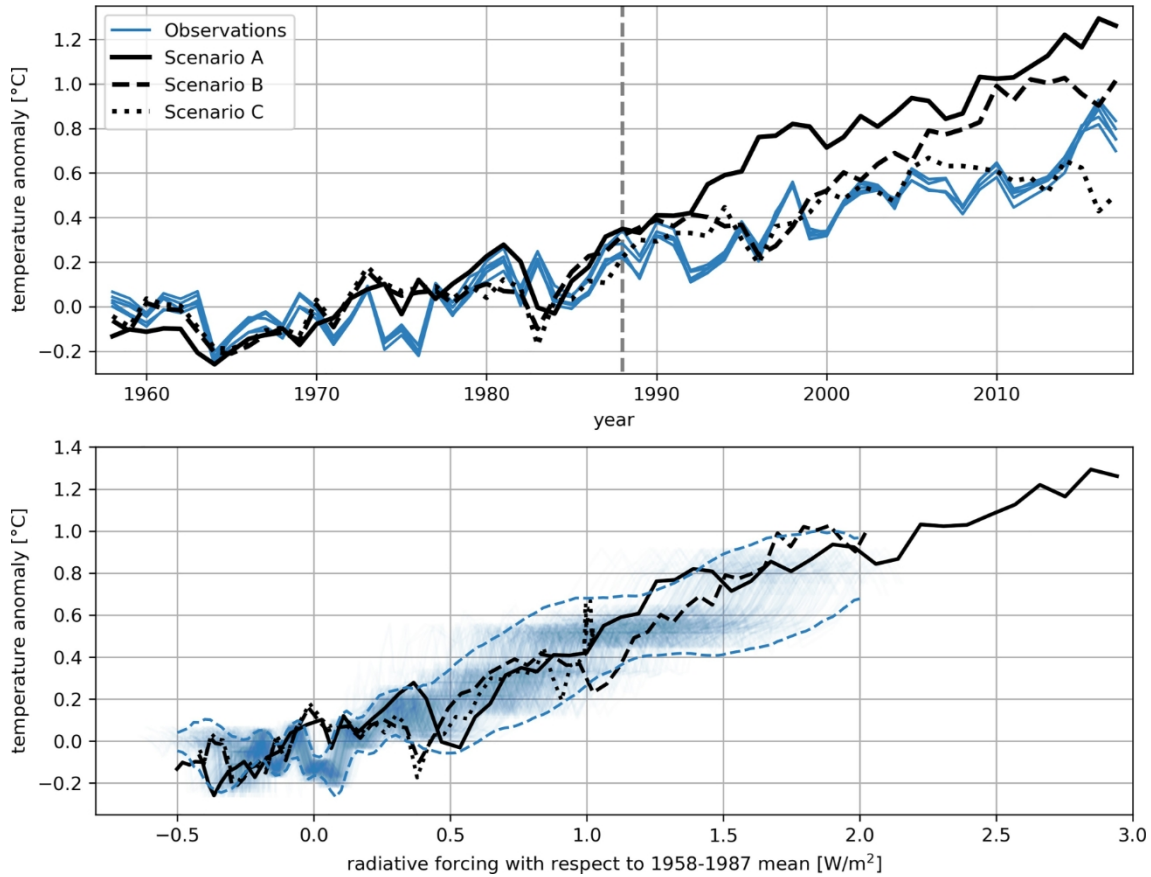
Şekil 2. Şeklin alt kısmında gösterilen model projeksiyon dönemleri boyunca gözlemler ve modeller arasında zamana karşı sıcaklık (üst panel) ve ima edilen TCR (alt panel) eğilimlerinin karşılaştırılması. Şekil S1, bu şeklin AR4 projeksiyonlarının dahil edildiği bir varyantını göstermektedir

modellenen ve gözlemlenen ölçümler arasındaki fark 0'ı içeriyorsa, ikisi tutarlı kabul edilir; aksi takdirde tutarsızdır (Hausfather vd., 2017). Ayrıca, Hargreaves'in (2010) yaklaşımını izleyerek her model için hem zamana karşı sıcaklık hem de ima edilen TCR ölçümleri için bir beceri puanı hesaplıyoruz. Bu beceri puanı, sıfır değişimli boş hipotez projeksiyonuna kıyasla gözlemlere karşı model eğiliminin kök-ortalama-kare hatalarına dayanmaktadır. Tutarlılık ve beceri puanlarının hesaplanmasına ilişkin ayrıntılar için destekleyici bilgiler bölüm S1.3'e bakınız.

3. Sonuçlar

Her bir tarihsel modelin projeksiyon dönemi boyunca öngörülen ve gözlemlenen sıcaklık değişiminin doğrudan karşılaştırılması, model projeksiyon zorlamalarının gözlemsel olarak bilgilendirilmiş radyatif zorlama tahminleri topluluğu ile makul uyumlu olması koşuluyla, model becerisinin etkili bir şekilde test edilmesini sağlayabilir. İncelenen 17 model projeksiyonunun yaklaşık 9'unda, öngörülen zorlamalar gözlemsel zorlama topluluğunun belirsizlik zarfı içindeydi. Bununla birlikte, geriye kalan sekiz modelde (RS71, H81 Senaryo 1, H88 Senaryo A, B ve C, FAR, MS93 ve TAR) öngörülen zorlamalar gözlemlenen önemli ölçüde daha güçlü veya daha zayıftır (Şekil 1). Sonucunu için, modeller ve gözlemler arasında ima edilen TCR'yi karşılaştıran bir analiz, model performansının daha doğru bir değerlendirmesini sağlayabilir.

Model projeksiyon dönemleri boyunca iklim modelleri gözlemler arasındaki karşılaştırmalar, hem zamana karşı sıcaklık hem de ima edilen TCR ölçütleri için Şekil 2'de gösterilmektedir (modeller ve gözlemler arasındaki farklar Şekil S2'de gösterilmektedir). Genel olarak, dikkate alınan model projeksiyonlarının çoğunluğu her iki ölçüt altında da gözlemlerle tutarlıdır. Zamana karşı sıcaklık ölçütü kullanıldığında, 17 model projeksiyonundan 10'u gözlemlerle tutarlı sonuçlar göstermektedir. Kalan yedi model projeksiyonundan dördü gözlemlenenen daha fazla ısınma öngörürken (N77, ST81 ve H88 Senaryo A ve B), üçü gözlemlenenen daha az ısınma öngörmektedir (RS71, H81 Senaryo 2a ve H88 Senaryo C).



Şekil 3. Hansen ve diğerleri, 1988 projeksiyonları, zamana karşı sıcaklık (üstte) ve dış zorlamaya karşı sıcaklık (altta) bazında gözlemlerle karşılaştırılmıştır. Üst paneldeki kesikli gri çizgi projeksiyon döneminin başlangıcını temsil etmektedir. Alt paneldeki şeffaf mavi çizgiler, beş sıcaklık gözlem ürününün 5.000 kombinasyonunun 500 rastgele örneğini ve tahmini zorlamaların 1.000 topluluk üyesini temsil etmektedir (görsel netlik için tüm topluluk alt örneklenmiştir). Kesikli mavi çizgiler 5.000 üyeli topluluk için %95 güven aralıklarını göstermektedir (ayrıntılar için destekleyici bilgi Metin S1.4'e bakınız).

Hem sıcaklık hem de zorlama için anomaliler 1958-1987 projeksiyon öncesi taban çizgisine göre gösterilmiştir.

Öngörülen ve gözlemlenen zorlamalar arasındaki uyumsuzluklar dikkate alındığında, daha iyi bir performans görülmektedir. Zimni TCR ölçütü kullanıldığında, 17 model projeksiyonundan 14'ü gözlemlerle tutarlıdır; tutarlı olmayan üç modelden Mi70 ve H88 Senaryo C gözlemlerden daha yüksek zimni TCR gösterirken, RS71 daha düşük zimni TCR göstermiştir (Schneider, 1975; RS71'de kullanılan anormal derecede düşük denge iklim duyarlılığı (ECS) modeline ilişkin bir tartışma için destekleyici bilgi Metin S2'ye bakınız).

Bazı model projeksiyonları sıcaklığa karşı zaman bazında gözlemlerle tutarsızdır, ancak modellenen ve gözlemlenen zorlamalar arasındaki uyumsuzluklar dikkate alındığında tutarlıdır. Örneğin, N77 ve ST81 gözlemlenenenden daha fazla ısınma öngörürken, ima edilen TCR'leri, gözlemsel tahminlerin topluluk aralığının üst ucunda olmasına rağmen, zorlamalara rağmen gözlemlerle tutarlıdır. Benzer şekilde, H81 Senaryo 2a gözlemlenenenden daha az ısınma öngörürken, ima edilen TCR gözlemlerle tutarlıdır.

1970'lerden kalma bir dizi model (Ma70, Mi70, B70, B75 ve N77), gözlemsel topluluk tabanlı aralığın yüksek ucunda zimni TCR göstermektedir. Bunun nedeni büyük olasılıkla atmosferin dış zorlama ile anında dengelendiği varsayımdır, bu da geçici okyanus ısı alımının rolünü göz ardı etmektedir (Hansen vd., 1985). Bununla birlikte, bu yüksek zimni TCR'ye rağmen, bazı modeller (örneğin Ma70, Mi70, B70 ve B75), projeksiyonlarında herhangi bir CO₂ dışı zorlayıcı ajanın bulunmaması nedeniyle zorlamaları gözlemlerin alt ucunda olduğundan, gözlemlerle uyumlu sıcaklık projeksiyonları sağlamaya devam etmektedir.

Prensipte, aynı temel model, ima edilen TCR ölçütü altında mütevazı derecede farklı zorlama senaryoları için tutarlı sonuçlar göstermelidir. Bununla birlikte, H88 Senaryo C'nin tutarsızlığı aşağıdakileri göstermektedir

Tablo 1

Projeksiyon Dönemi Boyunca Model Beceri Skorları, Burada 1 Gözlemlerle Mükemmel Uyumu Temsil Eder ve O'dan Küçük Değişim Yok Hipotezinden Daha Kötü Performansı Temsil Eder

Model	Zaman Çerçevesi	$\Delta T/\Delta t$ beceri	$\Delta T/\Delta F$ becerisi
Ma70	1970-2000	0,84 [0,57 ila 0,99]	0,51 [-0,11 ila 0,94]
Mi70	1970-2000	0,91 [0,69 ila 0,99]	0,41 [-0,26 ila 0,90]
B70	1970-2000	0,78 [0,45 ila 0,97]	0,63 [0,06 ila 0,96]
RS71	1971-2000	0,19 [0,16 ila 0,25]	0,42 [0,28 ila 0,59]
S72	1972-2000	0,83 [0,49 ila 0,99]	0,83 [0,43 ila 0,98]
B75	1975-2010	0,85 [0,64 ila 0,98]	0,72 [0,31 ila 0,97]
N77	1977-2017	0,67 [0,44 ila 0,84]	0,79 [0,48 ila 0,98]
ST81	1981-2017	0,76 [0,53 ila 0,94]	0,82 [0,52 ila 0,98]
H81(1)	1981-2017	0,93 [0,81 ila 0,99]	0,74 [0,59 ila 0,93]
H81(2a)	1981-2017	0,77 [0,66 ila 0,91]	0,87 [0,69 ila 0,99]
H88(A)	1988-2017	0,38 [0,01 ila 0,68]	0,81 [0,63 ila 0,98]
H88(B)	1988-2017	0,48 [0,08 ila 0,77]	0,79 [0,41 ila 0,98]
H88(C)	1988-2017	0,66 [0,48 ila 0,89]	0,28 [-0,46 ila 0,84]
FAR	1990-2017	0,63 [0,29 ila 0,87]	0,86 [0,68 ila 0,99]
MS93	1993-2017	0,71 [0,20 ila 0,97]	0,87 [0,61 ila 0,99]
SAR	1995-2017	0,73 [0,58 ila 0,95]	0,66 [0,49 ila 0,91]
TAR	2001-2017	0,81 [0,15 ila 0,98]	0,76 [-0,13 ila 0,98]
AR4	2007-2017	0,56 [0,35 ila 0,92]	0,60 [0,37 ila 0,93]

Not. Hem sıcaklığa karşı zaman ($\Delta T/\text{yıl}$) hem de ima edilen TCR ($\Delta T/\Delta F$) medyan skorları ve belirsizlikleri gösterilmiştir.

Model zorlamaları gözlemlerden önemli ölçüde farklı olduğunda, Senaryo C 2000 yılından sonra kabaca sabit zorlamalara sahip olduğundan, ima edilen TCR metriğinin sınırlamaları.

H88 modeli, modellenen ve gözlemlenen zorlamalar arasındaki uyumsuzlukları hesaba katabilen bir yaklaşımın faydasının yararlı bir örneğini sunmaktadır. H88, kongre ifadelerinde belirgin bir şekilde yer aldı ve 2018'deki olayın otuzuncu yıldönümü, projeksiyonun doğruluğuna önemli ölçüde dikkat çekti (Borenstein & Foster, 2018; United States. Cong. Senate, 1988). H88'in "en makul" Senaryosu B, yayınlandıktan sonra yaşanan ısınmayı yaklaşık %54 oranında abartmıştır (Şekil 3). Bununla birlikte, bu uyumsuzluğun büyük kısmı, özellikle CH_4 ve halokarbonlardan kaynaklanan gelecekteki dış zorlamanın fazla tahmin edilmesinden kaynaklanmıştır (Şekil S3). H88 Senaryo B, öngörülen sıcaklıklar ve öngörülen zorlamalar arasındaki ilişkiye dayalı olarak değerlendirildiğinde, sonuçlar gözlemlerle tutarlıdır (Şekil 2 ve 3).

Hem sıcaklık ver- sus süresi hem de ima edilen TCR ölçümleri için beceri puanı medyan tahminleri ve belirsizlikleri Tablo 1'de gösterilmektedir (bkz. destekleyici bilgi Metin S1.3). Bir beceri puanı, bir model projeksiyonu ile gözlemler arasında mükemmel uyumu temsil ederken, O'dan düşük bir beceri puanı, değişiklik olmayan sıfır hipotezli bir projeksiyondan daha kötü performansı temsil eder.

Değerlendirilen tüm model projeksiyonlarındaki medyan beceri puanlarının ortalaması için 0,69'dur. Sadece üç projeksiyon (RS71, H88 Senaryo A ve H88 Senaryo B) 0,69'un üzerinde beceri puanına sahipken, H81 Senaryo 1 herhangi bir modelin en yüksek beceri puanına sahipti - 0,93. Zimni TCR metriği kullanıldığında, modellerin ortalama projeksiyon becerisi de 0,69 olmuştur. Zimni TCR beceri puanı 0,5'in altında olan modeller arasında Mi70, RS71 ve H88 Senaryo C yer alırken, MS93 0,87 ile en yüksek beceri puanına sahip olmuştur. H88 Senaryo A ve B ile IPCC FAR'ın tümü, yüksek sıcaklık projeksiyonlarında yanlış belirlenmiş gelecek zorlamalarının rolünü yansıtan zimni bir TCR ölçütü altında önemli ölçüde daha iyi performans göstermiştir. TAR ve AR4'te olduğu gibi çok kısa gelecek projeksiyon dönemleri için beceri puanı belirsizliklerinin oldukça büyük olduğunu ve kısa vadeli sıcaklık değişkenliği ile zorlamalardaki belirsizliklerin bir araya gelmesi nedeniyle ihtiyatla ele alınması gerektiğini belirtmek önemlidir.

Bir dizi model projeksiyonu, CO_2 dış zorlayıcı etkenlerin hariç tutulması nedeniyle gözlemsel tahminlerle zayıf bir şekilde eşleşen dış zorlamalara sahipti. Bununla birlikte, tüm modeller karşılaştırma için ortak bir ölçüt sağlayan gelecekteki CO_2 konsantrasyonlarını öngörmüştür ve bunlar Şekil S4'te gösterilmiştir. Tarihsel iklim modeli projeksiyonlarının çoğu, gelecekteki CO_2 konsantrasyonlarını, bazıları mevcut seviyelerden 40 ppm kadar fazla tahmin etmiş ve öngörülen CO_2 konsantrasyonları gerçekte gözlemlenenen iki kat daha hızlı artmıştır (Meinshausen, 2017). 1970'lerin iklim modeli projeksiyonlarından sadece Mi70, atmosferik CO_2 artışını gözlemlerle aynı doğrultuda öngörmüştür. Birçok 1980'ler projeksiyonu da benzer şekilde CO_2 'yi aşırı tahmin etmiş, sadece Hansen 88 Senaryo A ve B projeksiyonları gözlemlenen konsantrasyonlara yakın çıkmıştır.

İlk üç IPCC değerlendirmesi, o dönemde nispeten az sayıda bireysel model çalışması mevcut olduğundan, genel dolaşım modeli sonuçlarına göre ayarlanmış basit enerji dengesi modellerine dayalı projeksiyonları içeriyordu. AR4'ten itibaren IPCC projeksiyonları çoklu model ortalamasına ve model yayılımına dayandırılmıştır. Şekil S5'te ilk üç IPCC raporundaki bireysel modelleri hem zamana karşı sıcaklık hem de ima edilen TCR bazında inceliyoruz.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Genel olarak, bu analizde değerlendirilen geçmiş iklim modeli projeksiyonları, yayınlandıktan sonraki yıllarda GMST ısınmasını tahmin etmede becerikliydiler. Bazı modeller çok fazla, bazıları ise çok az ısınma gösterirken, incelenen modellerin çoğu, özellikle öngörülen ve gözlemsel olarak bilgilendirilmiş zorlama tahminleri arasındaki uyumsuzluklar dikkate alındığında, gözlemlerle tutarlı bir ısınma göstermiştir. Bu makalede değerlendirilen iklim modellerinin sistematik olarak fazla veya eksik tahmin yaptığına dair hiçbir kanıt bulamadık.

projeksiyon dönemleri boyunca ısınmayı olduğundan düşük tahmin etmişlerdir. Dünyanın son birkaç on yıldır soğuduğu düşünüldüğünden (örneğin Broecker, 1975; Broecker, 2017), 1970'lerin modellerinin projeksiyon becerisi, o dönemde ısınmaya ilişkin sınırlı gözlemsel kanıt göz önüne alındığında özellikle .

Bir dizi yüksek profilli model projeksiyonu -88 Senaryoları A ve B ve özellikle IPCC FAR- gözlemlenenden daha yüksek ısınma oranları öngördüğü için eleştirilmiştir (örn. Michaels & Maue, 2018). Ancak, bu farklılıklar büyük ölçüde öngörülen ve gözlemlenen zorlamalar arasındaki uyumsuzluklardan kaynaklanmaktadır. H88 A ve B zorlamaları, ortalama gözlemsel tahminden sırasıyla %97 ve %27 daha hızlı artarken, FAR zorlamaları %55 daha hızlı artmıştır. Zımnı TCR bazında, her üç projeksiyon da yüksek model beceri puanlarına sahiptir ve gözlemlerle tutarlıdır.

İklim modelleri burada incelenen ilk modellerden çok daha karmaşık hale gelmiş olsa da, ilk modellerin gelecekteki ısınmayı başarılı bir şekilde öngörmeye gösterdiği beceri, iklim modellerinin GMST'nin çok yıllık evrimini yönlendiren süreçleri etkili bir şekilde yakaladığını göstermektedir. Burada analiz edilen modellerin göreceli basitliği, iklim projeksiyonlarını operasyonel olarak geçersiz kılsa da, son teknoloji iklim modellerini değerlendirmek için kullanılan yöntemleri doğrulamak veya yanlışlamak için kullanışlı araçlar . İklim modeli projeksiyonları olgunlaşmaya devam ettikçe, doğal değişkenliğin gürültüsünden daha fazla sinyalin ortaya çıkması ve iklim modeli projeksiyonlarının diğer yönlerinin geriye dönük olarak değerlendirilmesine izin vermesi muhtemeldir.

Teşekkür

Z. H. projeyi tasarladı, Z. H. ve H. F. D. şekilleri oluşturmuş ve Z. H., H. F. D., T. A. ve G. S. verilerin toplanmasına ve makale metninin yazılmasına yardımcı olmuştur. Verileri analiz etmek ve gösterilen verileri içeren şekiller ve csv dosyaları oluşturmak için kullanılan kodu içeren halka açık bir GitHub deposu çevrimiçi olarak mevcuttur (<https://github.com/hausfath/OldModels>). Analizde kullanılan kod ve veriler hakkında ek bilgi destekleyici bilgilerde bulunabilir. Gözlemsel olarak bilgilendirilmiş ısınmsal zorlama tahminleri topluluğunu sağladığı için Piers Forster'a teşekkür ederiz. Yazarların hiçbiri bu projeyi özel bir fonla desteklememiştir.

Referanslar

- Arrhenius, S. (1896). Havadaki karbonik asidin yer sıcaklığı üzerindeki etkisi üzerine. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 5(41), 237-276.
- Benson, G. S. (1970). Karbondioksit ve iklim değişikliğindeki rolü. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 67(2), 898-899. doi.org/10.1073/pnas.67.2.898
- Borenstein, S., & Foster, N. (2018). *30 yıl önce uyarılan küresel ısınma 'oturma odamızda'*. New York, NY: Associated Press. <https://www.apnews.com/dbd81ca2a7244ea088a8208bab1c87e2> 18 Haziran 2018. (son erişim 22 Ağustos 2019).
- Broecker, W. (2017). İklim değişikliği tahminleri yanlış nedenlerle doğru olduğunda. *Climatic Change*, 142(1-2), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1927-y>
- Broecker, W. S. (1975). İklimsel değişim: Belirgin bir küresel ısınmanın eşliğinde miyiz? *Science*, 189(4201), 460-463. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.460>
- Cowtan, K., Hausfather, Z., Hawkins, E., Jacobs, P., Mann, M. E., Miller, S. K., ve diğerleri (2015). Kara havası ve okyanus deniz yüzeyi sıcaklıklarının harmanlanmasıyla iklim modellerinin gözlemlerle sağlam bir şekilde karşılaştırılması. *Geophysical Research Letters*, 42, 6526-6534. <https://doi.org/10.1002/2015GL064888>
- Cowan, K., & Way, R. G. (2014). HadCRUT4 sıcaklık serisindeki kapsam yanlışlığı ve bunun son sıcaklık eğilimleri üzerindeki etkisi. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140, 1935-1944. <https://doi.org/10.1002/qj.2297>
- Dessler, A. E., & Forster, P. M. (2018). Yıllar arası değişkenlikten denge iklim duyarlılığı tahmini. *Jeofizik Araştırma Dergisi: Atmospheres*, 123, 8634-8645. <https://doi.org/10.1029/2018JD028481>
- Eyring, V., Cox, P. M., Flato, G. M., Gleckler, P. J., Abramowitz, J., Caldwell, P., ve diğerleri (2019). İklim modeli değerlendirmesini bir üst seviyeye taşımak. *Nature Climate Change*, 9(2), 102-110. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0355-y>
- Frame, D. J., & Stone, D. A. (2012). İklim değişikliğine ilişkin ilk uzlaşma tahmininin değerlendirilmesi. *Nature Climate Change*, 3(4), 357-359. <https://doi.org/10.1038/nclimate1763>
- Geoffroy, O., Saint-Martin, D., Olivié, D. J. L., Voldoire, A., Bellon, G., & Tytéc, S. (2012). İki katmanlı bir enerji dengesi modelinde geçici iklim tepkisi. Bölüm I: CMIP5 AOGCM deneyleri kullanılarak analitik çözüm ve parametre kalibrasyonu. *İklim Dergisi*, 26(6), 1841-1857. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00195.1>
- Gettelman, A., Hannay, C., Bacmeister, J. T., Neale, R. B., Pendergrass, A. G., Danabasoglu, G. ve diğerleri (2019). Topluluk Yer Sistemi Modeli Sürüm 2'de (CESM2) yüksek iklim duyarlılığı. *Geophysical Research Letters*, 46, 8329-8337. <https://doi.org/10.1029/2019GL083978>
- Gregory, J. M., & Forster, P. M. (2008). Radyatif zorlama ve gözlemlenen sıcaklık değişiminden tahmin edilen geçici iklim tepkisi. *Journal of Geophysical Research*, 113, D23105. <https://doi.org/10.1029/2008JD010405>
- Gregory, J. M., Ingram, W. J., Palmer, M. A., Jones, G. S., Stott, P. A., Thorpe, R. B., ve diğerleri (2004). Radyatif zorlama ve iklim duyarlılığını teşhis etmek için yeni bir yöntem. *Geophysical Research Letters*, 31, L03205. <https://doi.org/10.1029/2003GL018747>
- Gregory, J. M., & Mitchell, J. F. B. (1997). Hadley Centre birleşik AOGCM'nin flux ayarlaması olan ve olmayan CO₂ye iklim tepkisi. *Geophysical Research Letters*, 24(15), 1943-1946. <https://doi.org/10.1029/97GL01930>
- Hansen, J., Fung, I., Lacis, A., Rind, D., Lebedeff, S., Ruedy, R., ve diğerleri (1988). Goddard Uzay Araştırmaları Enstitüsü üç boyutlu modeli tarafından tahmin edilen küresel iklim değişiklikleri. *Journal of Geophysical Research*, 93, 9341-9364. <https://doi.org/10.1029/JD093iD08p09341>
- Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., Lebedeff, S., Lee, P., Rind, D., & Russell, G. (1981). Atmosferik karbondioksit artışının iklim üzerindeki etkisi. *Science*, 213(4511), 957-966. <https://doi.org/10.1126/science.213.4511.957>
- Hansen, J., Russell, G., Lacis, A., Fung, I., Rind, D., & Stone, P. (1985). İklim tepki süreleri: İklim duyarlılığına ve okyanus karışımına bağımlılık. *Science*, 229(4716), 857-859. <https://doi.org/10.1126/science.229.4716.857>
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Nazarenko, L., Lacis, A., Schmidt, G. A., ve diğerleri (2005). İklim zorlamalarının etkinliği. *Journal of Geophysical Research*, 110, D18104. <https://doi.org/10.1029/2005JD005776>
- Hargreaves, J. C. (2010). (2010). İklim modellerinde beceri ve belirsizlik. *Wiley Disiplinlerarası İncelemeler: Climate Change*, 1, 556-564. <https://doi.org/10.1002/wcc.58>
- Hausfather, Z., Cowtan, K., Clarke, D. C., Jacobs, P., Richardson, M., & Rohde, R. (2017). Enstrümental olarak homojen deniz yüzeyi sıcaklık kayıtları kullanılarak son ısınmanın değerlendirilmesi. *Science Advances*, 3(1). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601207>

- Hawkins, E., & Sutton, R. (2012). İklim sinyallerinin ortaya çıkış zamanı. *Geophysical Research Letters*, *39*, L01702. <https://doi.org/10.1029/2011GL050087>
- Held, I. M., Winton, M., Takahashi, K., Delworth, T., Zeng, F., & Vallis, G. K. (2010). Sanayi öncesi zorlamaya aniden geri dönerek küresel ısınmanın hızlı ve yavaş bileşenlerini araştırmak. *İklim Dergisi*, *23*, 2418-2427. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3466.1>
- IPCC (AR4) (2007). S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, & H. L. Miller (der.), *İklim değişikliği 2007: Fiziksel bilim temeli, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli Dördüncü Değerlendirme Raporuna Çalışma Grubu I'nın Katkısı*. Cambridge, Birleşik Krallık ve New York, NY: Cambridge Üniversitesi Yayınları. ISBN 978-0-521-88009-1 (pb: 978-0-521-70596-7)
- IPCC (AR5) (2013). T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *İklim değişikliği 2013: Fiziksel bilim temeli. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli Beşinci Değerlendirme Raporuna Çalışma Grubu I'nın Katkısı* (s. 1535). Cambridge, Birleşik Krallık ve New York, NY: Cambridge University Press.
- IPCC (FAR) (1990). İklim değişikliği: IPCC bilimsel değerlendirmesi. Çalışma Grubu I tarafından hazırlanan rapor. J. T. Houghton, G. J. Jenkins, & J. J. Ephraums (Eds.), *Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli* . 365) içinde. Cambridge, Birleşik Krallık ve New York, NY: Cambridge University Press.
- IPCC (SAR) (1996). J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, & K. Maskell (der.), *İklim değişikliği 1995: İklim değişikliği bilimi, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli İkinci Değerlendirme Raporuna Çalışma Grubu I'nın Katkısı*. Cambridge, Birleşik Krallık ve New York, NY: Cambridge Üniversitesi Yayınları. ISBN 0-521-56433-6 (pb: 0-521-56436-0)
- IPCC (TAR) (2001). J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, & C. A. Johnson (der.), *Climate change 2001: The scientific basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* içinde. Cambridge, Birleşik Krallık ve New York, NY: Cambridge Üniversitesi Yayınları. ISBN 0-521-80767-0 (pb: 0-521-01495-6)
- Knutti, R., Masson, D., & Gettelman, A. (2013). İklim modeli soyağacı: CMIP5 nesli ve oraya nasıl ulaştık. *Geophysical Research Letters*, *40*, 1194-1199. <https://doi.org/10.1002/grl.50256>
- Lenssen, N. J. L., Schmidt, G. A., Hansen, J. E., Menne, M. ., Persin, A., Ruedy, ., & Zys, D. (2019). GISTEMP belirsizlik modelindeki iyileştirmeler. *Jeofizik Araştırma Dergisi: Atmospheres*, *124*, 6307-6326. <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>
- Manabe, S. (1970). Atmosferik sıcaklığın karbondioksit konsantrasyonuna bağımlılığı. S. F. Singer (Ed.), *Çevre kirliliğinin küresel etkileri* içinde (Bölüm 3, s. 25-29). Dordrecht: Springer.
- Manabe, S., Smagorinsky, J., & Strickler, R. F. (1965). Hidrolojik döngüye sahip bir genel sirkülasyon modelinin simüle edilmiş klimatolojisi. *Monthly Weather Review*, *93*, 769-798. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1965\)093<0769:SCOAGC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1965)093<0769:SCOAGC>2.3.CO;2)
- Manabe, S., & Stouffer, R. J. (1993). Atmosferik CO₂ artışının okyanus-atmosfer sistemi üzerindeki yüzölçümündeki etkileri. *Nature*, *364*(6434), 215-218. <https://doi.org/10.1038/364215a0>
- Manabe, S., & Strickler, R. F. (1964). Konvektif bir ayarlama ile atmosferin termal dengesi. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *21*, 361-385. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1964\)021<0361:TEOTAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1964)021<0361:TEOTAW>2.0.CO;2)
- Manabe, S., & Wetherald, R. T. (1967). Belirli bir bağıl nem dağılımına sahip atmosferin termal dengesi. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *24*(3), 241-259. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1967\)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2)
- Manabe, S., & Wetherald, R. T. (1975). CO₂ konsantrasyonunun iki katına bir genel sirkülasyon modelinin iklimi üzerindeki etkileri. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *32*, 3-15. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2)
- Marvel, K., Schmidt, G. A., Miller, R. L., & Nazarenko, L. S. (2016). Bireysel zorlamalara verilen yanıtın iklim duyarlılığı için çıkarımlar. *Nature Climate Change*, *6*, 386. Erişim adresi. <https://doi.org/10.1038/nclimate2888>
- Mauritsen, T., Bader, J., Becker, T., Behrens, J., Bittner, M., Brokopf, R. ve diğerleri (2019). MPI-M Yer Sistemi Modeli sürüm 1.2'deki (MPI-ESM 1.2) gelişmeler ve artan CO₂'ye tepkisi. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *11*(4), 998-1038. doi.org/10.1029/2018MS001400
- Meinshausen, M., Vogel, E., Nauels, A., Lorbacher, K., Meinshausen, N., Etheridge, D. M., ve diğerleri (2017). İklim modellemesi için tarihsel sera gazı konsantrasyonları (CMIP6). *Geoscientific Model Development*, *10*(5), 2057-2116. <https://doi.org/10.5194/gmd.10.2057.2017>
- Michaels, P., & Maue, R. (2018). Otuz yıl sonra, küresel ısınma tahminleri ne kadar tutuyor? *The Wall Street Journal*, 21 Haziran.
- Mitchell, J. M. (1970). Geçtiğimiz yüzyıldaki küresel sıcaklık dalgalanmasının bir nedeni olarak atmosferik kirliliğin bir ön değerlendirmesi. S. F. Singer (Ed.), *Global Effects of Environmental Pollution* içinde (Bölüm 12, s. 139-155). Dordrecht: Springer.
- Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., & Jones, P. D. (2012). Bir gözlemsel tahminler topluluğu kullanarak küresel ve bölgesel sıcaklık değişimindeki belirsizliklerin : HadCRUT4 veri seti. *Journal of Geophysical Research*, *117*, D08101. <https://doi.org/10.1029/2011JD017187>
- Nordhaus, W. (1977). Karbondioksit kontrolü için stratejiler (Cowles Foundation Discussion Papers). Cowles Ekonomi Araştırmaları Vakfı, Yale Üniversitesi. <https://econpapers.repec.org/RePEc:cwl:cwldpp:443> adresinden alındı.
- Otto, A., Otto, F. E. L., Boucher, O., Church, J., Hegerl, G., Forster, P. M., ve diğerleri (2013). İklim tepkisi üzerindeki enerji bütçesi kısıtlamaları. *Nature Geoscience*, *6*, 415. <https://doi.org/10.1038/ngeo1836>
- Rahmstorf, S., Cazenave, A., Church, J. A., Hansen, J. E., Keeling, R. F., Parker, D. E., & Somerville, R. C. J. (2007). Projeksiyonlarla karşılaştırıldığında son iklim gözlemleri. *Science*, *316*(5825), 709-709. <https://doi.org/10.1126/science.1136843>
- Rahmstorf, S., Foster, G., & Cazenave, A. (2012). İklim projeksiyonlarının 2011'e kadar olan gözlemlerle karşılaştırılması. *Çevre Araştırma Mektupları*, *7*(4), 44035. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044035>
- Rasool, S. L., & Schneider, S. H. (1971). Atmosferik karbondioksit ve aerosoller: Büyük artışların küresel iklim üzerindeki etkileri. *Science*, *173*(3992), 138-141. <https://doi.org/10.1126/science.173.3992.138>
- Reichler, T., & Kim, J. (2008). Birleştirilmiş modeller günümüz iklimini ne kadar iyi simüle ediyor? *Bulletin of the American Meteorological Society*, *89*, 303-312. <https://doi.org/10.1175/BAMS-89-3-303>
- Richardson, M., Cowtan, K., Hawkins, E., & Stolpe, M. B. (2016). İklim modellerinden ve Dünya'nın enerji bütçesinden elde edilen uzlaştırılmış iklim tepkisi tahminleri. *Nature Climate Change*, *6*, 931. <https://doi.org/10.1038/nclimate3066>
- Rohde, R., Muller, R. A. ve diğerleri (2013). 1753'ten 2011'e uzanan ortalama Dünya yüzeyi kara sıcaklığının yeni bir tahmini. *Geoinfor Geostat: Genel Bakış 1:1*. <https://doi.org/10.4172/gigs.1000101>
- Rohrschneider, T., Stevens, B., & Mauritsen, T. (2019). Dış ışınimsal zorlamaya iklim tepkisinin basit gösterimleri üzerine. *Climate Dynamics*, *53*(5-6), 3131-3145. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04686-4>
- Sawyer, J. S. (1972). İnsan yapımı karbondioksit ve "sera" etkisi. *Nature*, *239*(5366), 23-26. <https://doi.org/10.1038/239023a0> Schmidt, G. A., Bader, D., Donner, L. J., Elsaesser, G. S., Golaz, J. C., Hannay, C. ve diğerleri (2017). Altı ABD modelleme merkezinde iklim modeli ayarlama pratiği ve felsefesi. *Geoscientific Model Development*, *10*, 3207-3223. <https://doi.org/10.5194/gmd.10.3207.2017>
- Schneider, S. H. (1975). Karbondioksit-iklim karışıklığı üzerine. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *32*, 2060-2066. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<2060:OTCDC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<2060:OTCDC>2.0.CO;2)

- Schneider, S. H., & Thompson, S. L. (1981). Atmosferik CO₂ ve iklim: Geçici tepkinin önemi. *Journal of Geophysical Research*, *86*(C4), 3135-3147. <https://doi.org/10.1029/JC086iC04p03135>
- Stouffer, R. J., & Manabe, S. (2017). 1989'da yapılan sıcaklık modeli tahminlerinin değerlendirilmesi. *Nature Climate Change*, *7*(3), 163-165. doi.org/10.1038/nclimate3224
- Stouffer, R. J., Manabe, S., & Bryan, K. (1989). Atmosferik CO₂'nin kademeli artışına iklim tepkisinde yarıküreler arası asimetri. *Nature*, *342*(6250), 660-662. <https://doi.org/10.1038/342660a0>
- Birleşik Devletler. Kong. Senato (1988). Enerji ve Doğal Kaynaklar Komitesi. Sera Etkisi ve Küresel İklim Değişikliği. Oturumlar, 23 Haziran 1988. 100. Kongre. 1. oturum. Washington: GPO.
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ve diğerleri (2011). Temsili konsantrasyon yolları: Genel bir bakış. *Climatic Change*, *109*(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vial, J., Dufresne, J.-L., & Bony, S. (2013). CMIP5 iklim duyarlılığı tahminlerinde modeller arası yayılımın yorumlanması üzerine. *Climate Dynamics*, *41*(11), 3339-3362. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1725-9>
- Vose, R. S., Arndt, D., Banzon, V. F., Easterling, D. R., Gleason, B., Huang, B., ve diğerleri (2012). NOAA'nın birleştirilmiş kara-okyanus yüzey sıcaklığı analizi. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *93*(11), 1677-1685. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00241.1>