The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Dünya ne kadar süre yeşil kalabilir? Bir iklim modeli kıyamet tarihi değil, aralıklar veriyor

Yirmi dokuz üç boyutlu iklim simülasyonu, Dünya'nın fotosentetik biyosferi için farklı sınırları bugünden yaklaşık 1,35 ile 1,87 milyar yıl sonrasına yerleştiriyor. Değerler kaya ayrışması, sıcaklık ve bitkilerin kullanabileceği en düşük karbondioksit düzeyleri için bilerek basitleştirilmiş yollara bağlı. Tüm bitkilerin, tüm yaşamın, uygarlığın veya gezegenin ne zaman sona ereceğini öngörmüyorlar.

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Matteo · Edited by Michele Renda · Figures by Cinzia Vaglio and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere*, Jacob Haqq-Misra and Eric Wolf, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026) · DOI: 10.1029/2025JD045586

Dünya ne kadar süre yeşil kalabilir? Bir iklim modeli kıyamet tarihi değil, aralıklar veriyor

Bir yaprak dar bir denge içinde yaşar. Işığa, suya, karbondioksite ve kimyasının dayanabileceği bir sıcaklığa ihtiyaç duyar. İnsan ömrü ölçeğinde Güneş bu dengenin değişmeyen parçası gibi görünür. Bir milyar yıl ölçeğinde ise öyle değildir.

Güneş ana kol üzerinde yaşlandıkça yavaşça parlaklaşır. Daha fazla güneş ışığı Dünya'yı ısıtır, ancak gezegenin uzun vadeli bir yanıtı vardır: yağmur suyu, karbondioksit ve silikat kayalar arasındaki tepkimeler atmosferden karbondioksit çekebilir. Bu, sera etkisini zayıflatır ve ısınmanın bir bölümünü dengeler. Fakat gezegeni soğutan aynı tepki, sonunda fotosentetik organizmaları canlı doku oluşturmak için kullandıkları karbondan mahrum bırakabilir.

Yeni bir Journal of Geophysical Research: Atmospheres makalesi, hangi sınırın önce gelebileceğini soruyor: fazla sıcaklık mı, yoksa fazla az karbondioksit mi? Yanıtı Dünya'nın öleceği bir tarih değil. Bilerek basitleştirilmiş iki gelecek yolu boyunca, fotosentetik yaşam için benimsenen sınırlar bugünden yaklaşık **1,35 ile 1,87 milyar yıl sonrası** arasına düşüyor.

Bu aralık **vejetatif biyosfer** hakkındadır: Dünya'daki canlı sistemin fotosentetik organizmalar tarafından sürdürülen bölümü; özellikle ışığı ve karbondioksiti biyolojik maddeye dönüştüren bitkiler ve diğer yaşam biçimleri. Her mikrop için bir öngörü değildir. İnsan uygarlığının ömrü değildir. Gezegenin ömrü değildir.

Gezegen termostatının iki belirsiz ayarı var

Temel belirsizlik **silikat ayrışmasıdır**. Karbondioksit yağmur suyunda çözünür, silikat kayalarla tepkimeye girer ve sonunda okyanuslara ve tortullara taşınır. Volkanlar jeolojik zaman ölçeklerinde karbondioksiti yeniden atmosfere verir. Bu süreçler birlikte, genellikle gezegensel bir termostat olarak tanımlanan karbonat-silikat döngüsünün bir bölümünü oluşturur.

Daha sıcak ve daha ıslak bir dünyada ayrışma hızlanabilir ve karbondioksiti daha hızlı uzaklaştırabilir. Ancak bilim insanları, daha parlak bir gelecekteki Güneş altında bu geri bildirimin Dünya'yı ne kadar güçlü yöneteceğini bilmiyor. Jacob Haqq-Misra ve Eric Wolf bu nedenle tek bir sözde doğru yol seçmedi. Belirsizliğin sınırlarını çizmek için kasıtlı olarak uç örnekler olan iki **uç durum** modellediler.

- **Zayıf ayrışma uç durumunda**, atmosferik karbondioksit milyonda 400 parçacıkta sabit kalırken parlaklaşan Güneş sıcaklığı yükseltiyor.
- **Güçlü ayrışma uç durumunda**, küresel ortalama yüzey sıcaklığı 288 kelvinde, yani yaklaşık 15 santigrat derecede sabit kalırken güneş ışığı arttıkça karbondioksit azalıyor.

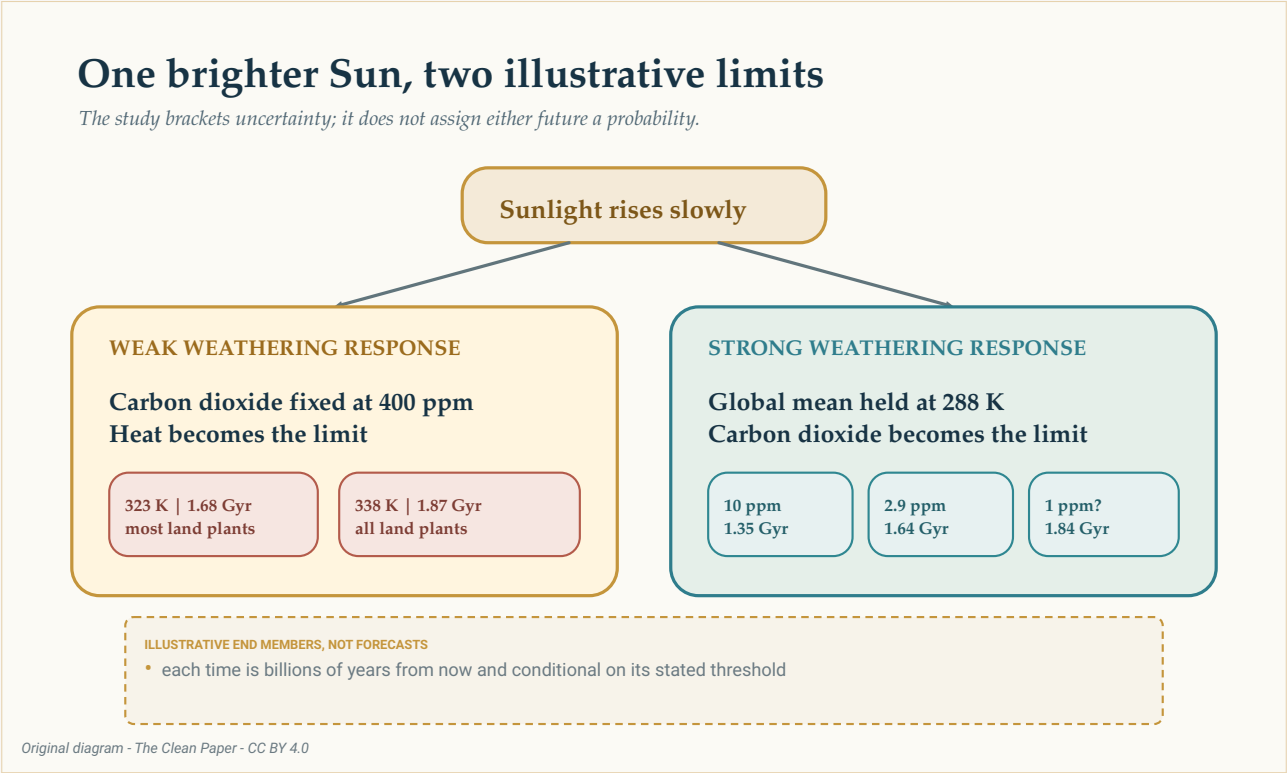
Bu dallardan hiçbiri Dünya'nın gerçek geleceği olarak sunulmuyor. İlki, karbondioksit yüksek kalsaydı sıcaklığın ne yapacağını soruyor. İkincisi, ayrışma küresel sıcaklığı bugünkü ortalamaya

yakın tutabilseydi karbon kıtlığının ne yapacağını soruyor.

Ayrışma nasıl termostat gibi davranabilir?

Benzetme, gerçek bir kontrol düğmesi değil geri bildirim hakkındadır. Daha sıcak bir iklim kimyasal ayrışmayı hızlandırdığında, atmosferdeki daha fazla karbondioksit çözünmüş maddelere, minerallere ve tortullara geçebilir. Bu sera gazının uzaklaştırılması, ilk ısınmanın bir bölümüne karşı koyar. Çok uzun zaman ölçeklerinde volkanik gaz salımı karbondioksiti geri getirir.

Her bağlantının gücü yağışa, açıkta kalan kayaya, erozyona, biyolojiye, tektoniğe ve okyanus kimyasına bağlıdır. Makalenin termostatı bilinen bir makine gibi kabul etmek yerine sınırlayıcı yanıtları sınamasının nedeni budur.



Makale belirsiz bir geleceği iki açıklayıcı uç durumla sınırlar. Ayrışma zayıf yanıt verirse artan sıcaklık, kara bitkileri için benimsenen eşiklere ulaşır. Güçlü yanıt verirse düşen karbondioksit, fotosentez için benimsenen eşiklere ulaşır. Bunlar koşullu model dallarıdır; olasılıklar ya da geri sayım tarihleri değildir.

The Clean Paper CC BY 4.0

İki milyar yıllık tek bir film değil, dengeye oturmuş 29 model dünyası

Araştırmacılar, daha güçlü güneş ışığı ve daha düşük karbondioksit kombinasyonları boyunca **29 kararlı durum iklimi** hesaplamak için üç boyutlu küresel iklim modeli ExoCAM'i kullandı. Her vaka 70 model yılı boyunca çalıştırıldı. Burada bir model yılı, sabit koşullar altında simüle edilmiş bir yıllık döngüdür: yapay iklimin dengeye oturmasına izin veren çalışma süresidir, Dünya'nın geleceğine ilişkin yıl yıl ilerleyen bir tahminin bir adımı değildir. Simüle edilen iklimin oturması için zaman verildikten sonra son 20 yılın ortalaması alındı.

Bu 29 vaka birbirinden ayrı model dünyalarıdır. Her çalışma, "seçilmiş bu güneş ışığı ve karbondioksit çiftiyle hangi dengelenmiş iklim uyumlu?" sorusuna yanıt veren bir ızgara noktasıdır. Bilgisayar bugünkü Dünya ile başlayıp atmosferini, kayalarını, okyanuslarını ve canlılarını sonraki iki milyar yıl boyunca sürekli olarak evrimleştirmedi. Yazarlar bunun yerine önceden hesaplanmış noktaların içinden iki şematik ayrışma yolunu izledi; noktalar arasındaki yolun kendisi simüle edilmedi.

Tablo, resmî model-veri arşivindeki güneş ışığı ve karbondioksit kombinasyonlarını yeniden verir. Vaka kimlikleri burada arşiv sırasına göre okuma kolaylığı için eklendi. **S/S0**, göreli güneş sabitidir: modelde kullanılan gelen güneş enerjisinin bugünkü değer S0'a bölünmesiyle elde edilir. Dolayısıyla 1,2 değeri bugüne göre yüzde 20 daha fazla gelen güneş enerjisi anlamına gelir. **CO2 (ppm)**, milyon atmosfer molekülü başına karbondioksit molekülü olarak atmosferik karbondioksit karışım oranıdır.

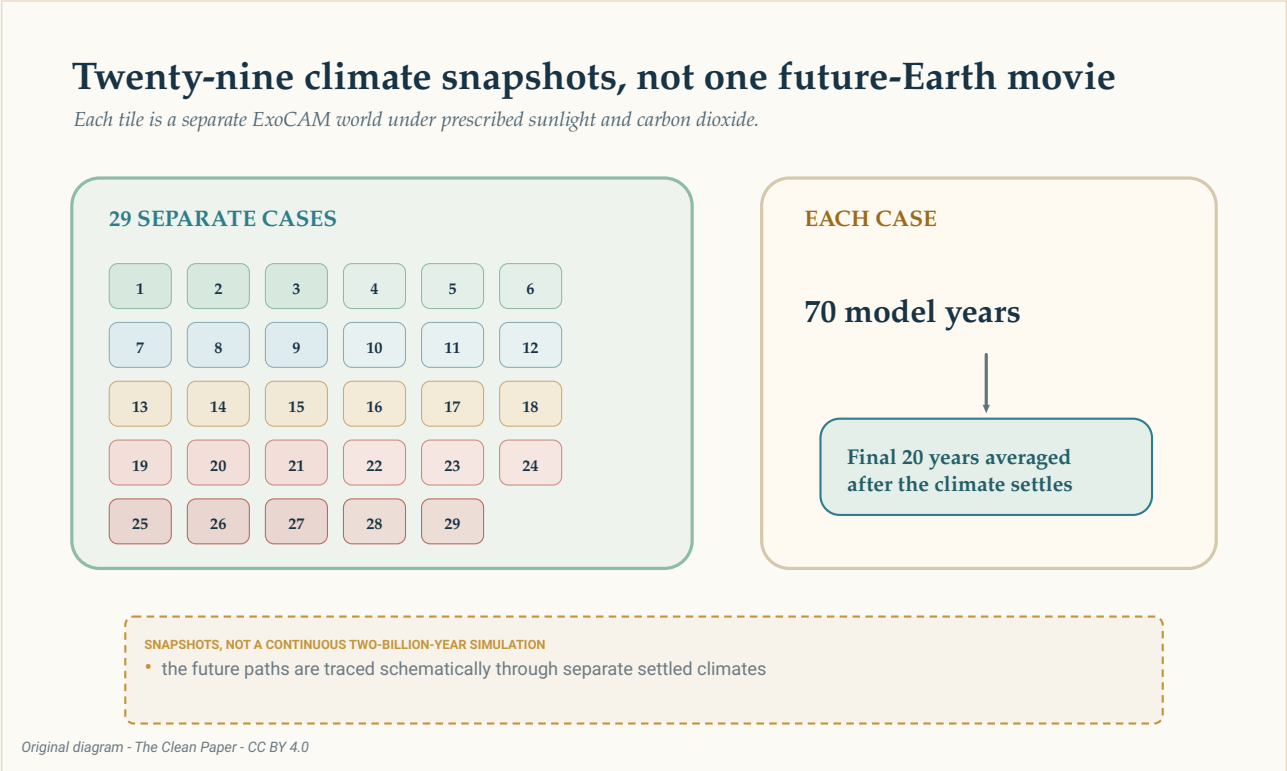
Vaka ID	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180
21	1.143	11.25

Vaka ID	S/S0	CO2 (ppm)
22	1.143	6
23	1.143	1.40625
24	1.2	400
25	1.2	180
26	1.2	11.25
27	1.2	1.40625
28	1.2	0.45
29	1.2	0

Model Dünya tanıdık olsa da kasıtlı olarak sınırlıdır. Dünya boyutundadır ve bugünkü coğrafyayı kullanır. Tam dolaşımlı bir okyanus yerine basitleştirilmiş bir "slab ocean"a, yani yüzeysel karışım tabakası okyanusuna sahiptir; atmosfer basıncı yaklaşık bugünkü Dünya değerine (bir bar) ayarlanmıştır ve metan sabittir. Yörüngesi kusursuz daireseldir (sıfır dışmerkezlik) ve dönme ekseninde eğiklik yoktur (sıfır eksen eğikliği). Açık biçimde modellenmiş topraklar, bitki örtüsü ya da değişen biyosferden gelen geri bildirimler içermez. En önemlisi, iklim modeli dinamik olarak bir kaya-ayrışma modeline bağlı değildir. Başka bir deyişle ExoCAM ayrışmayı hesaplayıp karbondioksiti buna göre güncellemez ve ardından geri besleme döngüsünde bir sonraki iklimi çalıştırmaz. Araştırmacılar bunun yerine iki sınırlayıcı yolu önceden belirleyip 29 vakalık iklim ızgarası içinde izledi.

İklim modelinde "kararlı durum" ne demektir?

Kararlı durum vakası, seçilmiş bir Güneş ve atmosfer altında dengeye oturmasına izin verilen model iklimidir. Simülasyon içinde hava günden güne ve yıldan yıla değişmeye devam eder, ancak uzun dönem ortalamaları güçlü biçimde sürüklenmeyi bırakır.
Bu, "bu koşullara hangi iklim uyar?" diye sormak için kullanışlıdır. Gerçek Dünya'nın bir koşul kümesinden diğerine hangi kesin yolla geçtiğini tahmin etmekten farklıdır.



Her karo, 70 model yılı çalıştırılmış ayrı bir ExoCAM iklimidir; son 20 yılın ortalaması alınmıştır. Çalışma, önceden belirlenmiş güneş ışığı ve karbondioksit koşulları boyunca 29 dengelenmiş iklim örnekledi; iki milyar yıl boyunca sürekli değişen tek bir Dünya simüle etmedi.

The Clean Paper CC BY 4.0

Uç durum bir: yeterli karbondioksit, fazla sıcaklık

Zayıf ayrışma dalında karbondioksit milyonda 400 parçacıkta sabit kalır. Güneş girdisi arttıkça sınırlayıcı etken sıcaklık olur.

Makale önceki çalışmalardan alınan iki küresel ortalama sıcaklık eşiği kullanıyor:

- **323 kelvinde**, küresel yıllık ortalama olarak yaklaşık **50 santigrat derecede**, dünya çoğu kara bitkisi için fazla sıcak kabul ediliyor. Model bu eşiğe yaklaşık **1,68 milyar yıl** sonra ulaşıyor.
- **338 kelvinde**, küresel yıllık ortalama olarak yaklaşık **65 santigrat derecede**, dünya tüm kara bitkileri için fazla sıcak kabul ediliyor. Model bu eşiğe yaklaşık **1,87 milyar yıl** sonra ulaşıyor.

Bunlar benimsenmiş biyolojik sınırlar; her fotosentetik organizmanın mutlaka çöktüğü evrensel sıcaklıklar değil. Küresel ortalama ayrıca büyük bölgesel farkları gizler. Çalışma, sıcaklık ve su kombinasyonlarının nerelerde uygun kalabileceğini ayrıca inceliyor, ancak bir iklim haritasındaki etiket gelecekteki her sığınağı veya uyumu kataloglayamaz.

Uç durum iki: dayanılabilir sıcaklık, fazla az karbondioksit

Güçlü ayrışma dalında küresel ortalama sıcaklık 288 kelvinde, yaklaşık 15 santigrat derecede tutulurken atmosferik karbondioksit düşer. Burada yanıt, farklı fotosentetik yolların ne kadar az karbonla çalışabileceğine bağlıdır.

- Geleneksel **milyonda 10 parçacık** eşiğinde — her bir milyon atmosfer molekülüne 10 karbondioksit molekülü — C4 fotosentezinin sınırı yaklaşık **1,35 milyar yıl** sonra gelir. C4 fotosentezi mısır ve şeker kamışı gibi bitkiler tarafından kullanılır ve karbondioksiti onu bağlayan enzimin çevresinde yoğunlaştırır.
- Önceki çalışmalarda tartışılan alternatif **milyonda 2,9 parçacık** C4 eşiği kullanılırsa sınır yaklaşık **1,64 milyar yıl** sonrasına kayar.
- Bazı CAM bitkilerinin — gece karbondioksit alımını gündüz kullanımından ayıran Crassulacean asit metabolizmasını kullanan bitkilerin — ya da çözünmüş bikarbonatı kullanabilen sucul bitkilerin olası devamlılığıyla ilişkilendirilen ihtiyatlı bir **milyonda 1 parçacık** eşiği, sınırı yaklaşık **1,84 milyar yıl** sonrasına taşır.

Son sayı en büyük biyolojik çekinceyi taşır. Yazarlar milyonda bir parçacık sınırını açıkça ihtiyatlı/deneysel bir varsayım olarak adlandırıyor. Bu, gelecekteki Dünya koşullarında tüm CAM bitkileri veya sucul bitkiler için deneysel olarak belirlenmiş bir hayatta kalma eşiği değildir.

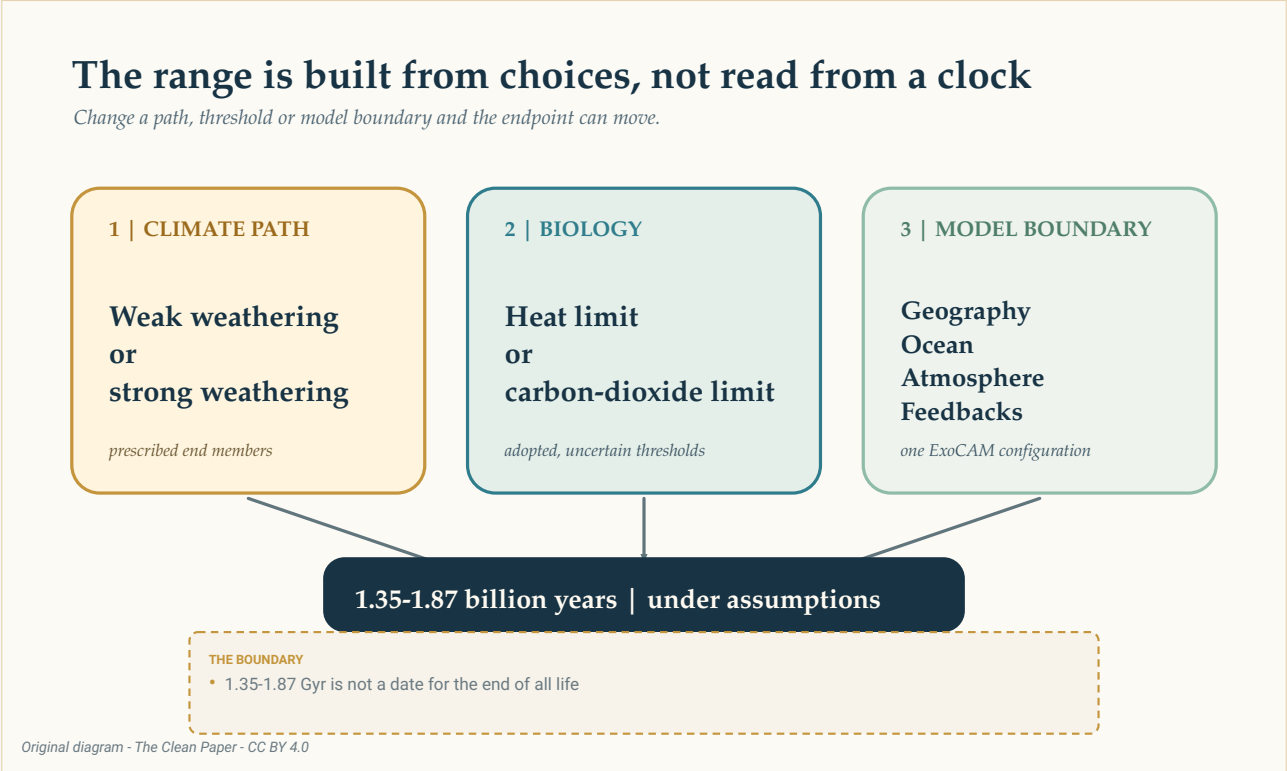
> **C3, C4 ve CAM bir merdiven değil, stratejilerdir**
>
> Bitkiler karbon yakalamak için farklı biyokimyasal yollar kullanır. **C3 fotosentezi** en yaygın olandır. Mısır ve şeker kamışı gibi bitkilerin kullandığı **C4 fotosentezi**, karbonu bağlayan enzimin çevresinde karbondioksiti yoğunlaştırır ve karbondioksit kıt olduğunda daha iyi çalışabilir. **Crassulacean asit metabolizması (CAM)** ise karbon alımını ve kullanımını gece ile gündüz arasında ayırarak birçok bitkinin su korumasına yardımcı olur.
> Bunlar tür düzeyinde pek çok farklılık içeren strateji aileleridir; "daha iyi" bitkilerin art arda gelen basamakları değildir. Makaledeki çok düşük karbondioksit eşikleri olası sınırları keşfetmek için kullanılan varsayımlardır; gelecekteki bir ekosistemin bunları kullanacak şekilde evrimleşeceğinin garantisi değildir.

1,86 milyar yıl neden bir son kullanma tarihi değil?

Makalenin sık öne çıkan yaklaşık **1,86 milyar yıl** tahmini, iki iyimser üst ucun ortalamasıdır: karbondioksit sınırlı dalda 1,84 milyar yıl ve ısı sınırlı dalda 1,87 milyar yıl. İki farklı senaryonun kısa bir özetidir. Daha yüksek hassasiyet taşıyan üçüncü bir model sonucu değildir ve en iyi tahmin tarihi değildir.

Daha geniş olan 1,35 ile 1,87 milyar yıllık aralık bile tek bir olasılık taşımaz. Alt ve üst değerleri farklı ayrışma varsayımlarına, farklı biyolojik eşiklere ve tek bir iklim modeli yapılandırmasına bağlıdır.

Bu aralık zamanı ölçtüğü kadar deneydeki seçimleri de ölçer.



1,35 ile 1,87 milyar yıllık aralık ancak bir ayrışma yolu, biyolojik eşik ve model sınırı seçildikten sonra ortaya çıkar. Bu bir varsayımlar haritasıdır; tüm yaşamın yok oluşuyla biten bir saat değil.

The Clean Paper CC BY 4.0

Başka sınırlar daha önce gelebilir

Vejetatif biyosfer için en uzun tahminler ayrı ve belirsiz bir sınıra yaklaşır: büyük okyanus kaybına yol açabilecek nemli ya da kontrolden çıkmış sera durumu. Güneş ışığı arttıkça bu durumların ne zaman başlayacağı konusunda iklim modelleri, özellikle bugünkü koşullardan çok uzak rejimlerde, ciddi biçimde anlaşmaz. Bazı tahminler bunları en iyimser fotosentez sınırından önceye koyuyor.

Bu, üst dalın Dünya'nın okyanuslarını, bildiğimiz kıtaları veya yaşanabilir yüzey koşullarını bugünden 1,87 milyar yıl sonrasına kadar koruyacağına dair bir vaat gibi okunamayacağı anlamına gelir. Model ayrıca gelecekteki levha tektoniğini, kara alanı değişimlerini, evrimleşen ekosistemleri veya bütünüyle dinamik bir okyanusu içermiyor. Atmosferin enerjiyi nasıl soğurup yaydığına ilişkin hesapları da yoğun güneş ışığı ve son derece düşük karbondioksit düzeyleri gibi modellerin birbirinden ayrıldığı rejimlere kadar zorlanıyor.

Evrimsel uyum ve teknolojik müdahale makalenin tartışma bölümünde olasılıklar olarak yer alıyor. 29 iklim simülasyonunun çıktıları değiller. Model, gelecekteki organizmaların milyonda bir parçacıkta çalışan bir fotosentetik yol geliştirdiğini göstermiyor ve bir uygarlığın atmosferi bir milyar yıl boyunca yönettiğini de göstermiyor.

Bu, bugünkü iklim krizi hakkında bir sonuç değil

Güneş'in parlaklaşması yüz milyonlarca ile milyarlarca yıl ölçeğinde gerçekleşir. Günümüzde insan kaynaklı ısınma, sera gazlarının on yıllar ve yüzyıllar içinde hızla artmasından kaynaklanıyor. Bunlar kökten farklı zaman ölçeklerinde, farklı soruları yanıtlayan farklı zorlamalardır.

Bu çalışmadaki hiçbir şey günümüzdeki iklim değişikliğinin kanıtlarını zayıflatmıyor ya da eylemi ertelemek için gerekçe sunmuyor. Uzak bir model senaryosunda bazı fotosentetik yaşam biçimlerini sürdürebilecek bir biyosfer, bugünün toplumları ve ekosistemlerinin güvende kaldığı bir iklimle aynı şey değildir.

Makale değerli çünkü çok uzak bir soruyu daha disiplinli hâle getiriyor. Daha önceki basit modellerin güneş ışığı artarken karbondioksiti sabit tuttuğunda fazla ısınmış olabileceğini ve fotosentetik yaşamın sürmek için tek bir kanonik karbon eşiğinin düşündürdüğünden daha fazla yolu bulunabileceğini gösteriyor. Aynı zamanda her ek milyar-yıl kesrinin nasıl bir varsayım zincirine bağlı olduğunu da gösteriyor.

Bir yaprağı besleyen Güneş yavaşça değişiyor. Dünya'nın bir 1,35 milyar yıl mı, 1,87 milyar yıl mı, yoksa başka bir süre mi daha yeşil kalacağı; kayaların, suyun, atmosferin ve yaşamın birlikte nasıl tepki verdiğine bağlı olacak. Dürüst sonuç bir tarih değil. Bu dengenin daha geniş bir görünümüdür.

Kısa özet

Üç boyutlu bir iklim çalışması, Güneş yavaşça parlaklaşırken Dünya'nın vejetatif — yani fotosentetik — biyosferinin ne kadar süre devam edebileceğini soruyor. Araştırmacılar 29 ayrı kararlı durum iklimi hesapladı ve bunların içinden iki açıklayıcı uç durum yolu izledi. Zayıf ayrışma ve karbondioksitin milyonda 400 parçacıkta sabit kalması durumunda, kara bitkileri için benimsenmiş ısı sınırlarına bugünden yaklaşık 1,68 ve 1,87 milyar yıl sonra ulaşılıyor. Güçlü ayrışma ve küresel ortalama sıcaklığın 288 kelvinde, yaklaşık 15 santigrat derecede sabit tutulması durumunda ise fotosentez için benimsenen karbondioksit sınırları yaklaşık 1,35, 1,64 ve — ihtiyatlı bir eşik kullanılırsa — 1,84 milyar yıl sonra geliyor. Sık alıntılanan 1,86 milyar yıl, yalnızca iki iyimser üst ucun yuvarlatılmış ortalamasıdır. Bunlar senaryoya bağlı model aralıklarıdır; Dünya'nın, insanlığın veya tüm yaşamın sona ereceği bir tarih değil. Model önceden belirlenmiş yollar, bugünkü coğrafya, slab okyanus ve açık bir toprak-bitki örtüsü ya da iklim-ayrışma bağlaşımı olmadan çalışıyor; en uzun tahminler belirsiz sera ve okyanus-kaybı sınırlarına yaklaşıyor.

Abartısız değerlendirme

Makalenin gösterdiği: Bu ExoCAM yapılandırmasında, artan güneş ışığı ve sabit karbondioksit altında üç boyutlu iklimler, karşılaştırmada kullanılan daha basit modellerden genellikle daha az ısınıyor. Önceden belirlenmiş iki ayrışma uç durumu ve çeşitli benimsenmiş biyolojik eşikler

boyunca vejetatif biyosfer sınırları bugünden kabaca 1,35 ile 1,87 milyar yıl sonrasına düşüyor.

Makul ama gösterilmemiş olan: Bazı CAM bitkilerinin veya çözünmüş bikarbonat kullanan sucul bitkilerin atmosferik karbondioksit milyonda bir parçacık düzeyine yakınken fotosentezi sürdürebileceği; uyum veya teknolojinin fotosentetik yaşamı daha da uzatabileceği; gerçek iklim-ayrışma yolunun iki model uç durumu arasında kalacağı.

Göstermediği: Tüm bitkilerin, tüm yaşamın, insan uygarlığının, Dünya okyanuslarının ya da gezegenin sonu için sabit bir tarih; sonraki iki milyar yılın kesintisiz tek bir simülasyonu; veya günümüzde insan kaynaklı iklim değişikliğini küçümsemek için herhangi bir neden.

Başlıca sınırlamalar: Tek bir iklim-modeli ailesinden 29 kararlı durum vakası; dinamik olarak bağlanmak yerine önceden belirlenmiş ayrışma yolları; bugünkü coğrafya; slab okyanus; sabit metan; sıfır eksen eğikliği ve dışmerkezlik; açık toprak, bitki örtüsü veya biyosfer geri bildirimi olmaması; belirsiz ısı ve karbondioksit eşikleri; nemli ve kontrolden çıkmış sera koşulları yakınında modeller arasındaki geniş anlaşmazlık.

Genel okuyucu ne kadar güvenmeli? Çalışmanın makul model aralığını genişlettiğine ve onu kontrol eden varsayımları belirlediğine yüksek güven. Bu model içinde sayısal aralığın yararlı bir sınırlandırma olduğuna orta düzey güven. Kesin herhangi bir tarihe düşük güven; çünkü en uzak uçlar kasıtlı olarak uç iklim yollarına ve belirsiz biyolojiye bağlıdır.

Kaynaklar

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026)
https://doi.org/10.1029/2025JD045586

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere: Model Data, Zenodo record 16584870
https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870