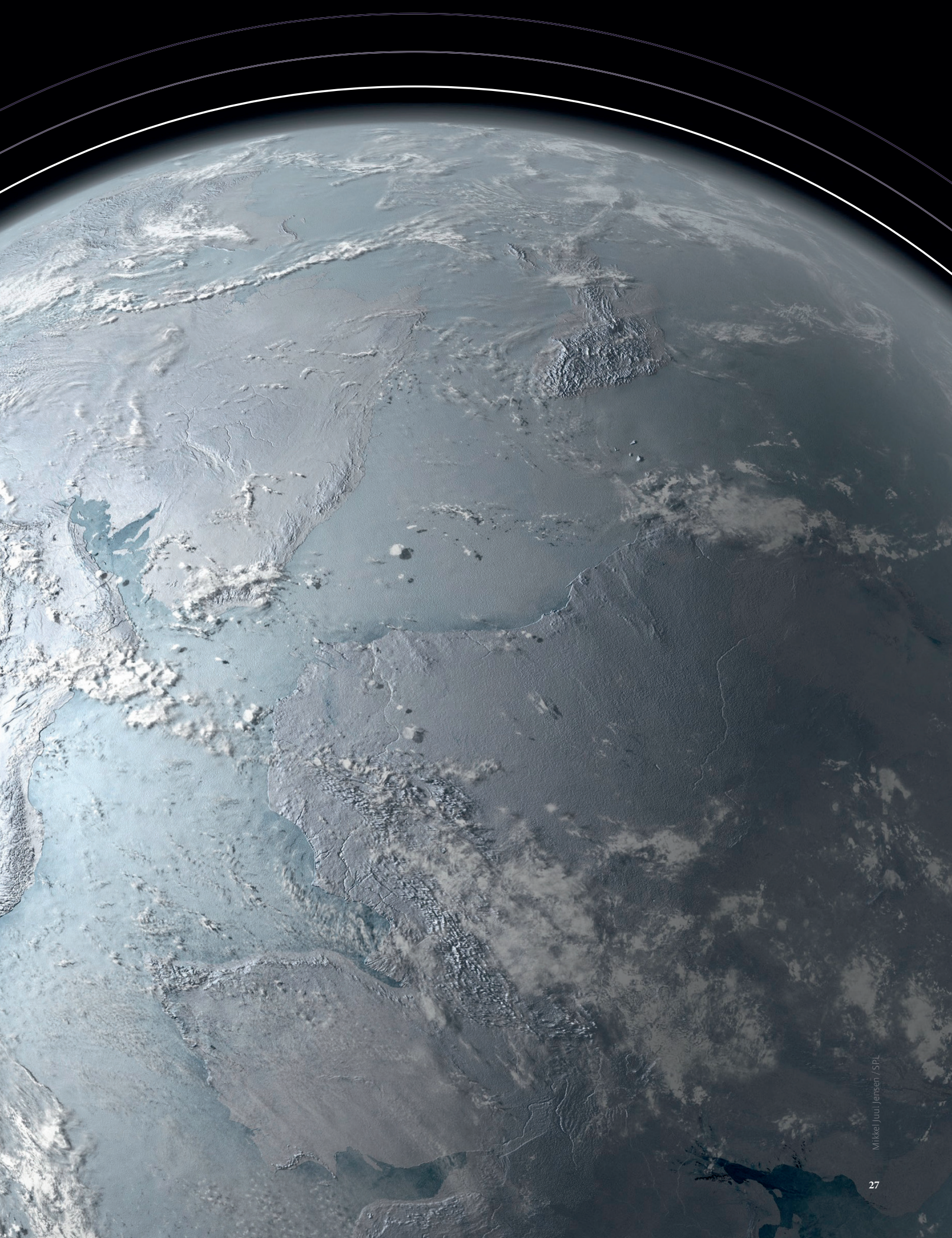


Bir İklim Bulmacası: Kartopu Dünya

Dr. Tuba Sarıgül [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Jeolojik kayıtlar, geçmişte en az iki kere okyanuslar da dahil Dünya'nın bütün yüzeyinin buzullarla kaplanmış olabileceğini gösteriyor. Kartopu Dünya Hipotezi olarak isimlendirilen bu görüş, bazı yer bilimciler tarafından kabul görse de gezegenimizin geçmişte tamamen buzullarla kaplanıp kaplanmadığı ile ilgili tartışmalar varlığını devam ettiriyor.



Dünya, yaklaşık 4,5 milyar yıllık geçmişinde birçok değişime tanık oldu.

Bu değişimlerden en zorlayıcı olanlardan biri de Kartopu Dünya olarak isimlendirilen dönemdi. “Kartopu Dünya” kavramı ilk defa, bu dönemde Dünya’nın uzaydan devasa bir kartopu gibi görünmesinden ilhamla, California Teknoloji Üniversitesinden Joe Kirschvink tarafından 1992 yılında yayımlanan makalesinde kullanıldı.

Kartopu Dünya döneminin, Neoproterozoyik Zaman’da yani günümüzden 1 milyar ila 539 milyon yıl önce en az iki kez gerçekleştiği düşünülüyor. Yaklaşık 717-660 milyon yıl önce gerçekleşen kartopu Dünya dönemi Sturtian olarak isimlendirilirken, 645-635 milyon yıl önce gerçekleşen buzul dönemi Marinoan olarak biliniyor. Sturtian ve Marinoan dönemlerinin isimleri, üzerinde buzulların izlerinin bulunduğu jeolojik yapıların keşfedildiği, Güney Avustralya’nın Adelaide kenti yakınlarındaki Sturt Gorge ve Marino kayalarından geliyor. Sturtian dönemin, Marinoan döneme kıyasla daha uzun sürdüğü ve aralarında yaklaşık 20 milyon gibi bir zaman aralığı olduğu tahmin ediliyor.

Kartopu Dünya hipotezine göre Sturtian ve Marinoan dönemlerinde Dünya’nın ortalama sıcaklığı suyun donma sıcaklığının çok altında olduğu için gezegenimizin yüzeyi tamamen buzullarla kaplanmıştı. İklim modelleri, Kartopu Dünya

dönemlerinde Dünya’nın ortalama sıcaklığının -20 °C ile -50 °C arasında olduğunu gösteriyor.

Peki yer bilimciler neden Neoproterozoyik Zaman’da Dünya’nın kutuplardan ekvatora kadar buzullarla kaplı olduğu bir buzul çağı yaşandığını düşünüyor?

Küresel Buzullaşmanın Kanıtları

Kartopu Dünya Hipotezi’ni destekleyen en önemli jeolojik kanıtlar, Güneş ışınlarının daha dik açıyla geldiği ekvatora yakın alçak enlemlerde kutuplarda oluşan kayaç türlerine rastlanmasındı.

Buzullar tarafından taşınan birikintilerin buzulların altında, üstünde, kenarlarında ve

sonlandığı kısımlarda depolanması ile oluşan yer şekilleri moren olarak isimlendirilir. Morenler kutuplara yakın, yüksek enlemlerde görülür, ekvatora yakın enlemlerde bulunmaları ise olağan dışı bir durumdur. Ancak bugüne kadar buzulların kayaçlar üzerinde bıraktığı izlere kutup bölgeleri dışında Dünya’nın yaklaşık 90 farklı noktasında rastlandı.

Peki buzullar kayaçlar üzerinde ne tür izler bırakıyor?

Buzullar üzerinde hareket ettikleri ana kayada çizik şeklinde izler bırakabilir. Buzul çizikleri olarak isimlendirilen bu izler, buzulların hareket doğrultusu ve yönü hakkında bilgi verir.

Buzullar hareket ederken farklı büyüklükteki kayaç parçalarını sürükler. Buzullar tarafından taşınan bu malzemeler buzulların



Norveç’te bulunan, Neoproterozoyik Zaman’da oluşmuş bir kayaç üzerindeki buzul çizikleri

Buzul kaynaklı
diyamiktit
kayaç



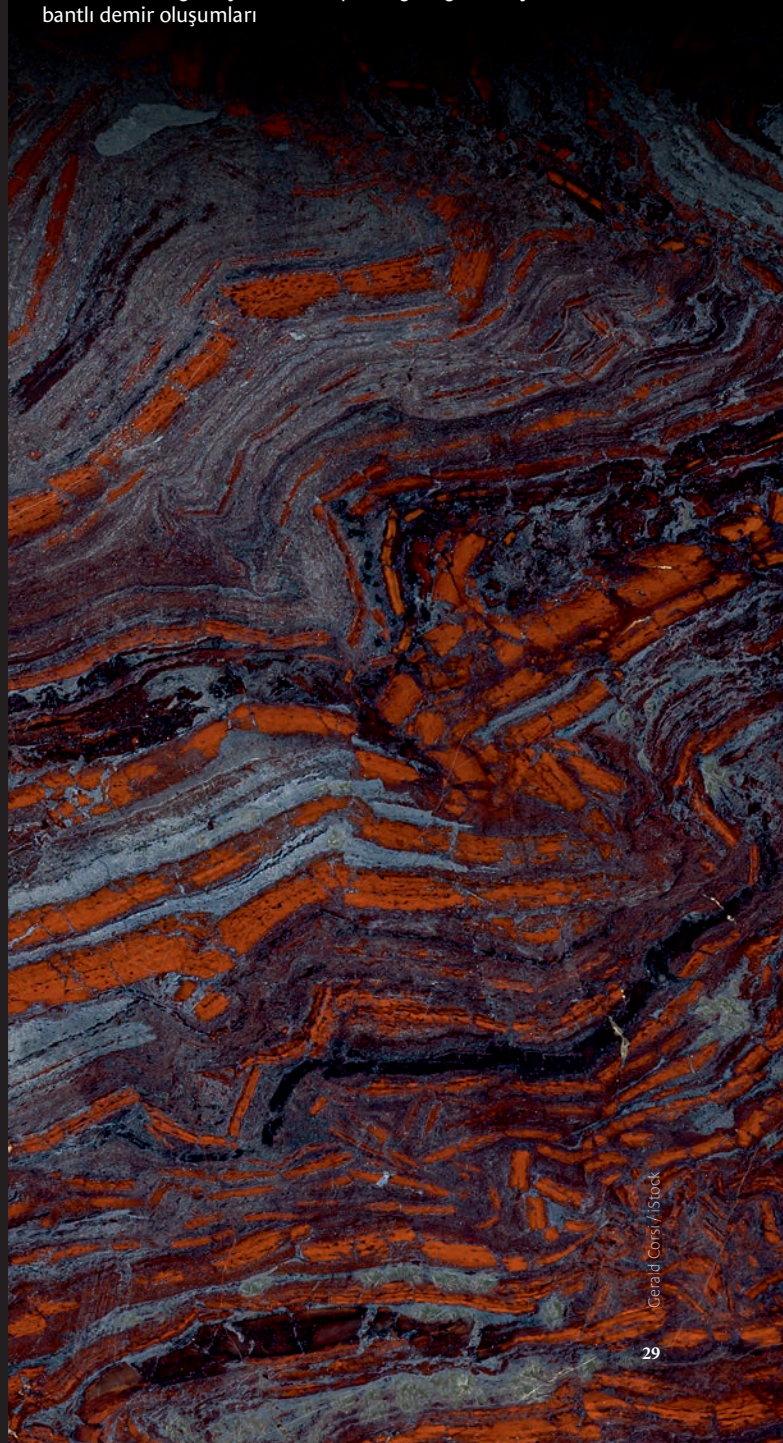
tabanında ya da önünde birikebilir. Bu birikintiler buzul kütlelerinin altında sıkışarak sertleşebilir. Buzul kaynaklı diyamiktit olarak isimlendirilen bu kayaçlarda, büyük kaya parçaları küçük toz parçacıklarının içinde birbirine temas etmeden düzensiz bir şekilde bulunur. Bugüne kadar Neoproterozoyik Zaman'da oluşmuş buzul kaynaklı diyamiktit kayaçlara farklı kıtalarda rastlandı.

Buzul kaynaklı kayaçların diğer bir türü ise “dropstone”. Buzullar hareket ederken buz kütlelerinin içinde çok sayıda kayaç parçası taşır. Buzulların denize ulaşan kısımlarında buz eridiğinde içindeki kayaçlar denizin tabanına iner. Bu kayaç parçacıklarının üzeri zamanla ince taneli birikintiler ile kaplanır. Bu yapılar “dropstone” olarak isimlendirilir.

Kartopu Dünya hipotezini destekleyen başka bir jeolojik kanıt ise bantlı demir oluşumları (BIF) olarak isimlendirilen yapılardır. Bantlı demir oluşumları demir açısından zengin katmanlar ile silisyum dioksit açısından zengin katmanların üst üste gelmesi ile oluşurlar. Katmanlı yapıdaki bu oluşumların neredeyse tamamı günümüzden 3,5 -1,8 milyon yıl öncesine tarihlendirilir. Jeolojik kayıtlar bu yapıların Kartopu Dünya döneminin yaşandığı Neoproterozoyik Zaman'da tekrar ortaya çıktığını gösteriyor.

Bantlı demir oluşumlarının meydana gelebilmesi için okyanus sularının oksijen açısından fakir olması gerekir. Bu durumda okyanus sularındaki çözünmüş hâldeki demir derişimi yükselebilir. Bu dönemden

ABD'nin Michigan eyaletinin Ishpeming bölgesinde yer alan bantlı demir oluşumları



sonra atmosferdeki oksijen derişimi arttığında okyanus sularında çözünmüş hâldeki demir oksitlenerek demir oksit bileşiklerini oluşturarak okyanus tabanına çöker ve bantlı demir oluşumlarını meydana getirir.

Okyanus sularındaki demir kayaların aşınması ve okyanus tabanındaki volkanik aktiviteler sonucu açığa çıkar. Okyanus sularında çözünmüş hâldeki demir; demir (II) ve demir (III) iyonları şeklinde bulunabilir. Ancak oksijen varlığında demir (II) iyonları yükseltgenerek demir (III) iyonlarını oluşturur. Demir (III) iyonlarının oluşturduğu bazı bileşiklerin çözünürlüğü ise düşüktür. Atmosferdeki oksijen oranının yüksek olduğu günümüzde okyanus sularındaki çözünmüş hâldeki demir derişimi çok düşük olduğundan bantlı demir oluşumu gözlenmez.

Bazı bilim insanlarına göre Neoproterozoyik Zaman'a ait bantlı demir oluşumlarının görülmesinin nedeni Kartopu Dünya döneminde okyanusların yüzeyinin tamamen buzullarla kaplanması. Bu durum atmosfer ile okyanuslar arasındaki gaz alışverişinin durmasına neden olarak, okyanus suyunda çözünmüş hâldeki demir derişiminin artmasını sağladı. Buzullar eriyip okyanus ve atmosfer arasında tekrar oksijen alışverişi başladığında ise demir, oksijen varlığında yükseltgenerek bantlı demir oluşumlarını meydana getirdi.



Dünya, sıvı hâldeki dış çekirdeğinin hareketinden kaynaklı bir manyetik alana sahiptir. Manyetik alan çizgileri ekvator bölgelerinde yerin yüzeyine paralelken, kutup bölgelerinde diktir. Kuvvetli manyetik özelliğe sahip minerallerden meydana gelen tanecikler kayaları oluştururken Dünya'nın manyetik alanına göre yönelir. Bu sayede jeolojik yapıların hangi enlemde oluştuğu belirlenebilir. Bu yöntem paleomagnetizma olarak isimlendirilir.

Bazı bilim insanları ekvatora yakın bölgelerde buzul kaynaklı kayalara rastlanmasının olağan dışı iklim koşulları ile ilişkili olduğunu düşünürken, bazı yer bilimcilere göre kıtaların hareketinden kaynaklanıyor. Bilim insanları, buzul izlerinin rastlandığı tortul kayalardaki taneciklerin manyetik özelliklerini inceleyerek, bu kayaların ekvatora mı kutuplara mı yakın bölgelerde oluştuğunu tespit edebiliyor.

Kayaların manyetik özelliklerinin incelenmesi sonucu ekvatora yakın enlemlerde oluşan buzul kaynaklı kayaç örneklerine rastlandı. Örneğin jeolojik veriler Güney Avustralya'da bulunan ve buzul kaynaklı Elatina Oluşumları'nın ~8 derece kuzey enleminde oluştuğunu gösteriyor. Bunlar Kartopu Dünya Hipotezi'ni destekleyen en önemli kanıtlar olarak kabul ediliyor.

Kartopu Dünya Dönemleri Nasıl Başladı ve Sonlandı?

Kartopu Dünya döneminin nasıl başladığına dair farklı görüşler bulunsa da kesin nedeni bilinmiyor. Dünya'nın atmosferindeki sera gazlarının azalması sonucu küresel ölçekteki soğuma bu olayı tetiklemiş olabilir. Diğer bir görüşe göre Dünya'nın eksen eğikliğinde ya da yörünge şeklinde ortaya çıkan değişimler, Güneş'ten gelen enerji miktarında azalmaya neden oldu. Bazı bilim insanları ise Dünya'ya çarpan bir gök taşı ya da devasa volkanik patlamalar sonucu atmosfere dağılan toz parçacıklarının, güneş ışınlarını yerin yüzeyine ulaşmasını engelleyerek küresel ölçekte bir soğumayı tetiklemiş olabileceğini düşünüyor.

Kartopu Dünya dönemini başlatan etkenin ne olduğu tam olarak bilinmese de bu dönemde buzulların Dünya'nın bütün yüzeyini kaplamasının, birbirini besleyen buz-yansıtıcılık döngüsünden kaynaklandığı düşünülüyor. Bu görüşe göre; buzulların Güneş ışınlarını yansıtıcı etkisinin yüksek olması nedeniyle, Dünya üzerinde buzulların kapladığı alan arttıkça Güneş ışınları yeryüzü tarafından daha fazla yansıtıldı. Bu durum ise Dünya'nın daha fazla soğumasına neden olarak buzulların kapladığı alanın daha da genişlemesine yol açtı. Sonunda Dünya tamamen buzla kaplandı.

Dünya'nın yüzeyine ulaşan Güneş ışınları, karalar ve okyanuslar tarafından farklı oranlarda yansıtılır. Okyanuslar Güneş ışınlarının yaklaşık %12'sini, karalar ise %10-%40'ını yansıtırken, buzun Güneş'ten gelen ışınları yansıtma oranı (%55-%80) karalara ve okyanuslara kıyasla çok daha

yüksektir. Bir cismin yüzeyine ulaşan ışığın ne kadarını yansıttığı Albedo kavramıyla ifade edilir.

Kartopu Dünya dönemlerini başlatan sürecin ne olduğuna dair en çok kabul gören görüş, kayaçların kimyasal olarak aşınmasındaki artış sonucu, atmosferdeki karbondioksit (CO₂) derişiminin düşerek küresel ölçekte soğumayı başlatmış olması. Bu dönemde atmosferdeki karbondioksit derişiminin 100-130 ppm olduğu tahmin ediliyor. Günümüzde ise bu değer 420 ppm. Peki, bu dönemde atmosferdeki karbondioksit derişimi neden azaldı?

Ekvator bölgesinde yoğunlaşmış olan Rodinia süper kıtası, günümüzden 850-650 milyon yıl önce parçalanmaya başladı. Hem ortaya çıkan kıtaların okyanuslarla olan sınırlarının fazla olmasının hem de bugün olduğu gibi Neoproterozoyik Zaman'da da sıcak ve nemli olan Ekvator bölgesindeki koşulların kayaçların aşınmasını hızlandırdığı düşünülüyor.

Atmosferdeki karbondioksit seviyesini düzenleyen iki süreç vardır: Kayaçların kimyasal aşınması atmosferdeki karbondioksit derişimini düşürürken, volkanik etkinlikler sonucu açığa çıkan karbondioksit ise artırır.

Sonuçları *Geology* dergisinde yayımlanan araştırmada bilim insanları bu görüşü destekleyen sonuçlara ulaştı. Araştırmada Neoproterozoyik Zaman'daki tektonik plakaların hareketinin tahmin edilebilmesi için bir bilgisayar modellemesi kullanıldı. Sonuçta Sturtian dönemindeki küresel buzullaşmanın ortaya çıkmasında, bu dönemde ekvatora yakın enlemlerde yer alan Franklin Büyük Volkanik Bölgesi'ndeki kayaçların

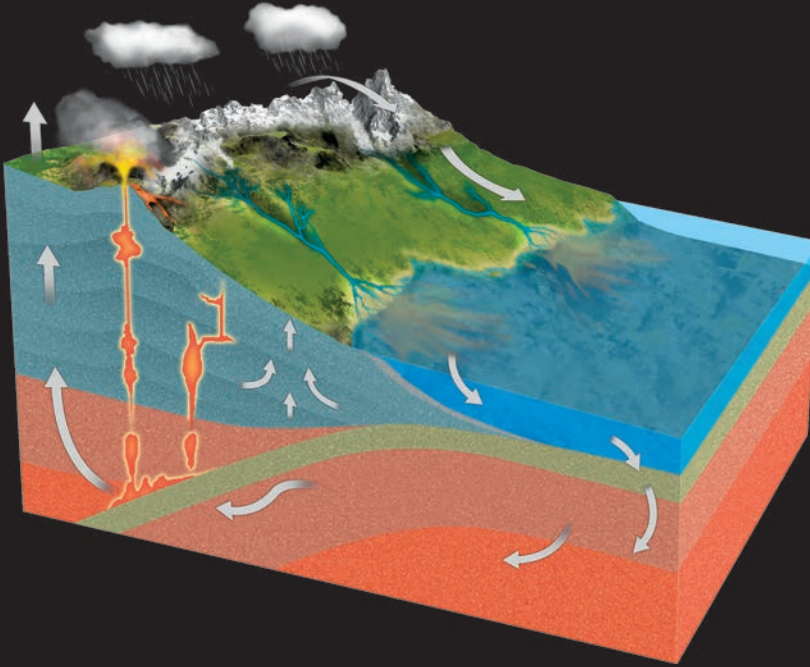
aşınmasındaki hızlanmanın rolü olabileceği belirlendi. Ayrıca bu dönemde okyanus ortası sırtı boyunca volkanik aktiviteler sonucu açığa çıkan karbondioksit miktarının düşük olduğu gösterildi.

Kartopu Dünya dönemini başlatan olaylardan biri olabileceği düşünülen diğer doğal süreç ise volkanik patlamalar. Harvard Üniversitesinden bilim insanları bu görüşü destekleyen jeolojik kanıtlar

buldu. Araştırmacılar Kanada'nın kuzeyinde bulunan Franklin Büyük Volkanik Bölgesi'ndeki volkanların ilk Kartopu Dünya dönemi olan Sturtian döneminde aktif olduğunu belirledi. Daha sonra bu iki olayın birbiriyle ilişkili olup olmadığını jeolojik kayıtlar ve bilgisayar modellemeleri kullanarak test ettiler. Sonuçta Franklin Büyük Volkanik Bölgesi'ndeki volkanik aktivitenin küresel ölçekte soğumaya neden olabileceği bulundu. Sonuçları *Geophysical Research Letters*'de yayımlanan araştırmada bilim insanları, kükürt açısından son derece zengin bir bölge olan bu alandaki volkanik patlamaların, atmosfere büyük miktarda kükürt dioksit (SO_2) ve hidrojen sülfür (H_2S) gibi kükürt bileşiklerinin karışmasına neden olduğunu düşünüyor.

Bu bileşikler atmosferin stratosfer tabakasına ulaştığında, güneş ışınlarını yansıtıcı etkisi olan sülfat aerosollerini (gaz içinde asılı hâlde bulunan katı ya da sıvı parçacıklar) oluşturur. Franklin Büyük Volkanik Bölgesi'nin Neoproterozoyik Zaman'da ekvatora yakın bir konumda bulunması ise volkanik patlamalar sonucu oluşan sülfat aerosollerinin güneş ışınlarını yansıtıcı etkisinin maksimuma ulaşmasına neden olmuş olabilir. Ancak bu görüş ikinci kartopu Dünya dönemi olan Marinoan'ı açıklayamıyor. Çünkü bu dönemde gerçekleşen büyük volkanik etkinliklere dair bir kanıt bulunmuyor.

Yavaş Karbon Döngüsü Nedir?



Atmosferdeki karbondioksit su ile tepkimeye girerek karbonik asiti oluşturur. Zayıf bir asit olan karbonik asit kayaçların aşınmasına ve kalsiyum, magnezyum, potasyum, sodyum iyonlarının serbest kalmasına neden olur. Oluşan bu iyonlar nehir suları ile okyanuslara taşınır. Okyanus sularında artı yüklü kalsiyum iyonları, eksi yüklü karbonat iyonları ile birleşerek kalsiyum karbonatı meydana getirir. Kalsiyum karbonat, kabuklu deniz canlılarının dış iskeletini oluşturur. Bu canlılar öldüğünde kalsiyum karbonat deniz tabanında birikir ve zamanla değişim geçirerek kireç taşı oluşturur. Yani kayaçların kimyasal aşınması arttığında atmosferdeki karbondioksit derişimi düşer.

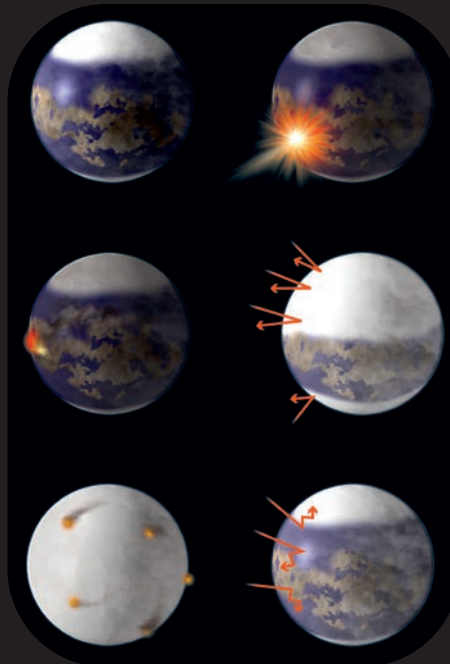


Okyanus ortası sirtı, okyanus tabanında tektonik plakaların birbirinden ayrıldığı hattır ve dünyanın en aktif plaka sınırlarından biridir.

Yakın zamanda yapılan bir araştırmada ise bilim insanları bilgisayar modelleri kullanarak yeryüzüne çarpan büyük bir göktaşının Kartopu Dünya dönemini başlatabilecek nedenlerden biri olabileceğini gösterdi. Sonuçları *Science Advance*'te yayımlanan araştırmada, dünyanın en büyük kraterlerinden biri olan Chicxulub'un oluşmasına neden olan asteroitle benzer büyüklükteki bir gök taşının Dünya'ya çarpmasının küresel buzullaşmayı başlatacak buz-yansıtıcılık döngüsüne sebep olabileceği gösterildi. Ancak şu ana kadar bu görüşü destekleyen jeolojik bir kayıt bulunamadı.

Massachusetts Teknoloji Enstitüsünden (MIT) bilim insanları Güneş'ten gelen enerji miktarındaki değişimin Dünya'nın tamamen buzullarla kaplandığı bir buzul dönemine girmesine neden olup olmayacağını araştırdı. Sonuçları *Proceedings of the Royal Society A* dergisinde yayımlanan araştırmada, Güneş'ten gelen enerjinin jeolojik ölçekte kısa bir zaman aralığında azalması durumunda, küresel ölçekte

bir buzullaşmanın tetiklenebileceği belirlendi. Araştırmacılar Güneş'ten gelen enerji miktarını, Dünya'nın yüzey sıcaklığını, atmosferdeki karbondioksit derişimini ve karbon döngüsünü dikkate alarak oluşturdukları bir iklim modelini kullandılar. Böylece, bu parametrelerden hangilerinin Dünya'nın tamamen donmasına neden olacak bir süreci başlatmış olabileceği gözlemlenebildi. Sonuçta Güneş'ten gelen enerji miktarındaki azalma belirli bir eşik değerden daha hızlı gerçekleştiğinde, gezegenimizin



tamamen donabileceği sonucuna vardı. Örneğin hesaplamalar Güneş'ten gelen enerjideki %2'lik bir azalmanın 10.000 yıl gibi bir zaman aralığı içinde gerçekleşmesi durumunda küresel ölçekte bir buzul çağına neden olabileceğini gösteriyor. Kartopu Dünya döneminde ise Güneş'in bugünkünden %6 daha sönük olduğu tahmin ediliyor.

Kartopu Dünya Dönemi Nasıl Sonlandı?

Buzul dönemleri sürekli değildir. Çünkü okyanuslar donup, Dünya'nın yüzeyi tamamen buzla kaplandığında volkanik aktiviteler sonucu açığa çıkan karbondioksit kayaçların kimyasal aşınması sürecinde harcanamaz ve atmosferde birikmeye başlar. Atmosferde biriken karbondioksit sera gazı etkisine yol açarak Dünya'nın ısınmasına neden olur.

Kartopu Dünya döneminin jeolojik kanıtlarını araştıran bilim insanlarını şaşırtan bulgulardan biri, buzul kaynaklı kayaçların üzerinin kireçtaşı ve dolomit çökeltileri ile kaplanmış olmasıydı. Örtü karbonatlar olarak isimlendirilen bu yapılar, sıcaklık koşullarının kartopu Dünya döneminde hızla değiştiğini ve buzulların hızla eridiğini gösteriyor. Çünkü bu yapıların birikmeye başlayabilmesi için

atmosferdeki karbondioksit derişimin son derece yüksek olması gerekiyor.

Bu görüŖe göre; atmosferde biriken karbondioksit Dünya'nın ısınmasına neden olduğunda, buzullar hızla eridi. Atmosfer ve okyanuslar arasındaki bağlantının tekrar sağlanmasıyla atmosferdeki karbondioksit, kayaçların (özellikle kireçtaşı ve dolomit gibi kalsiyum içeren kayaçların) aşınma sürecini hızlandırdı. Sonuçta okyanus sularında karbonat iyonlarının derişimi arttı ve oluşan kireçtaşı ve dolomit buzul kaynaklı kayaçların üzerinde birikti.

Bazı bilim insanları ise kartopu Dünya döneminin sonlanmasında başka bir sera gazı olan metanın rolü olabileceğini düşünüyor. Sonuçları *Geology* dergisinde yayımlanan araştırmada bilim insanları Çin'in güneyinde yer alan ve örtü karbonat

türünde birikintiler barındıran Doushantuo oluşumlarından aldıkları örnekleri inceledi. 635 milyon yaşında olduğu tahmin edilen oluşumların yaşı, ikinci kartopu Dünya dönemi olan Marinoan'ın bitişıyle yaklaşık olarak eş zamanlı. Metan içeren bir kayaç türünün ayrışması sonucu ortaya çıkan metanın, bakteriler tarafından yükseltgenmesi sonucu örtü karbonat birikintileri oluşturduğu düşünülüyor. Kayaçların izotop oranı, metan kaynaklı olduğu görüşünü destekliyor.

Kartopu Dünya görüşüyle ilgili temel sorunlardan biri, Dünya'nın tamamen buzullarla kaplandığı bu dönemde yeryüzündeki canlı yaşamın varlığını nasıl devam ettirdiği. Çünkü yerin yüzeyini kaplayan buz örtüsü, atmosfer ile karalar ve okyanuslar arasındaki bağlantının kesilmesine neden olduğu için karbon döngüsü, su döngüsü gibi biyojeokimyasal

döngülerin bu dönemde durması gerekirdi. Ayrıca kalın buz tabakası fotosentez yapan canlıların ihtiyaç duyduğu güneş ışınını engellemeliydi. Ancak jeokimyasal kayıtlar bu dönemde biyojeokimyasal döngülerin tamamen durmadığını gösteriyor. Ayrıca paleontolojik kayıtlar çok hücreli canlı yaşamın devam ettiğini gösteriyor. Örneğin Çin'in güneyindeki Nantuo Oluşumları'nda Marinoan dönemine ait buzul kaynaklı birikintilerde makroskopik ölçekteki çok hücreli canlılara ait fosillere rastlandı.

NASA'nın Goddard Uzay Araştırmaları Enstitüsünden araştırmacılar tarafından yürütölen çalışmada, kullanılan modellemeler Neoproterozoyik Zaman'ın üç alt döneminden biri olan Kriyojeniyen dönemde (yaklaşık olarak Kartopu Dünya koşullarının ortaya çıktığı jeolojik periyotla eş zamanlıdır) Dünya'nın tamamen "donmadığını", yerin yüzeyinde buzlarla kaplanmayan bazı bölgeler olabileceğini gösteriyor. Araştırmacılar tarafından Kartopu Dünya değil Sulu Kartopu Dünya Dönemi olarak tanımlanan bu dönemde, Dünya'nın ortalama sıcaklığının -12 °C olduğu tahmin ediliyor.

Veriler Neoproterozoyik Zaman'ın bazı dönemlerinde Dünya'nın buzul çağlarına girdiğini gösteriyor. Ancak bu dönemde "Dünya'nın yüzeyi tamamen



Justineznick / iStock

buzullarla kaplandı mı?”, yoksa “Yeryüzünde buz tabakasının son derece ince olduğu ya da hiç olmadığı bölgeler var mıydı?” soruları varlığını devam ettiriyor.

Kartopu Dünya Dönemi’ne yönelik araştırmalar, başka gezegenlerde yaşam arayışlarına yönelik çalışmalara da ışık tutuyor. Çünkü Dünya’nın dışındaki yaşam arayışlarında yıldızın etrafındaki yaşama elverişli bölgede bulunan gezegenlere odaklanılıyor. Yaşama elverişli bölge ise bir gezegenin yüzeyinde sıvı hâlde suyun bulunabileceği bölge olarak tanımlanıyor ve sınırları yıldızın büyüklüğüne ve ısıma miktarına bağlı olarak belirleniyor. Kartopu Dünya hipotezi, bir gezegenin yüzeyinde sıvı hâlde su bulunmasının yıldızın özellikleri dışında başka faktörlere de bağlı olabileceğini gösteriyor. ■



anyaberkat / iStock

Kaynaklar

- Hoffman, P. F. ve ark., “A Neoproterozoic Snowball Earth”, *Science*, Cilt 281, s. 1342-1346, 1998.
- Hoffman, P. F. “Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology”, *Science Advance*, Cilt, 3, Makale no: e1600983, 2017.
- Dutkiewicz, A. ve ark., “Duration of Sturtian “Snowball Earth” glaciation linked to exceptionally low mid-ocean ridge outgassing”, *Geology*, 2024.
- Macdonald, F. A. ve Wordsworth, R., “Initiation of Snowball Earth with volcanic sulfur aerosol emissions”, *Geophysical Research Letters*, Cilt 44, Sayı 4, s. 1938-1946, 2017.
- Fu, M. ve ark., “Impact-induced initiation of Snowball Earth: A model study”, *Science Advance*, Cilt 10, Makale no: eadk5489, 2024.
- Amscheidt, C. W. ve Rothman, D. H., “Routes to global glaciation”, *Proceedings of the Royal Society A*, Cilt 476, Makale no: 20200303, 2020.
- Wang, J. ve ark., “Carbon isotope evidence for widespread methane seeps in the ca. 635 Ma Doushantuo cap carbonate in south China”, *Geology*, Cilt 36, Sayı 5, s. 347–350, 2008.
- Rooney, A. D. ve ark., “A Cryogenian chronology: Two long-lasting synchronous Neoproterozoic glaciations”, *Geology*, Cilt 43, Sayı 5, s. 459–462, 2015.
- Cox, G. M. ve ark., “Continental flood basalt weathering as a trigger for Neoproterozoic Snowball Earth”, *Earth and Planetary Science Letters*, Cilt 446, s.89-99, 2016.
- Higgins, J. A. ve Schrag, D. P., “Aftermath of a snowball Earth”, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, Cilt 4, Sayı 3, Makale no: 1028, 2003.
- Song, H. ve ark., “Mid-latitude habitable environment for marine eukaryotes during the waning stage of the Marinoan snowball glaciation”, *Nature Communications*, Cilt 14, Makale no: 1564, 2023.
- <https://opengeology.org/historicalgeology/case-studies/snowball-earth/>
- <https://sites.dartmouth.edu/dujs/2010/05/30/oceans-of-ice-the-snowball-earth-theory-of-global-glaciation/>
- <https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/640>
- <https://www.scientificamerican.com/article/a-new-idea-on-how-earth-became-a-giant-snowball/>
- https://www.giss.nasa.gov/research/features/201508_slushball/
- <https://ansiklopedi.tubitak.gov.tr/kutup/ansiklopedi/morenler>