

# KARTOPU DÜNYA

**Bir gezegen düşünün. Tüm yüzeyi, okyanusları ve karaları buzla kaplı. Tüm kıtaların üzerinde en azından bir km kalınlıktaki buzlar yavaş yavaş hareket ediyor. Okyanuslarda, sadece derin bölgelerin alt kısımları, gezegenin çekirdeğinden kaynaklanan ısı sayesinde donmadan kalabilmiş. Sıcaklığın en azından -40 °C olduğu gezegende sadece birkaç etkin yanardağın çevresinde az sayıda canlı türü yaşamını sürdürabiliyor. Bunlar, okyanuslarda ve karalardaki sıcak su kaynaklarının yakınında yaşayabilen alg ve bakteriler. Atmosferde hiç bulut yok; sadece, yanardağlardan kaynaklanan miktar karbondioksit kristali atmosferde asılı duruyor. Bu gezegen pek tanıdık gelmiyor, değil mi? Daha çok uzaktaki, başka bir yıldız sistemindeki bir gezegeni ya da dış Güneş Sistemi'ndeki gezegenlerin uydularını çağırıştırıyor. Oysa, bu gezegen üzerinde yaşadığımız Dünya'dan başkası değil. Yalnızca, onun günümüzden birkaç yüz milyon yıl önceki hali.**

Dünya'nın uzaydan çekilmiş fotoğraflarına bakınca, bu masmavi gezegenin bir zamanlar, dev bir kartopu gibi yörüngesinde dolandığına inanmak zor. Zaten, bir süre öncesine kadar bilim adamları Dünya'nın tarihinde hiç bir zaman çok ciddi iklim değişikliklerine tanık olmadığına inanıyorlardı. Ancak şimdi, durumun böyle olmadığına ilişkin önemli ipuçları var. Akıllara gelebilecek en büyük donmanın günümüzden 750 ile 580 milyon yıl önce, en azından dört kez gerçekleştiği ve bu büyük buzul devirlerinin her birinin, milyonlarca yıl sürüp güçlü sera etkisiyle sona erdiği düşünülüyor.

Jeolojik dönemlerden Üst Proterozoik'e denk gelen bu aralıkla ilgili veriler, sadece kayalarda gizli. Ne var ki, bu döneme ait veriler on yıllar önce bulunmuş olsa da, bilimadamları onları açıklamakta zorlanıyorlardı. Bu izlerdeki en büyük aykırılıklardan biri, kayalardaki izlerin tropikal bölgelerde, üstelik deniz seviyesinde, buzul hareketinin izlerini taşımasıydı. Günümüzde, tropikal bölgelerdeki buzulların kalıntılarına, ancak 5.000 metrenin üze-

rindeki yüksekliklerde rastlanabiliyor. Oldukça sert geçtiği düşünülen 20.000 yıl önceki son buzul çağında bile, bu radaki buzullar 4.000 metrenin altına inemedi.

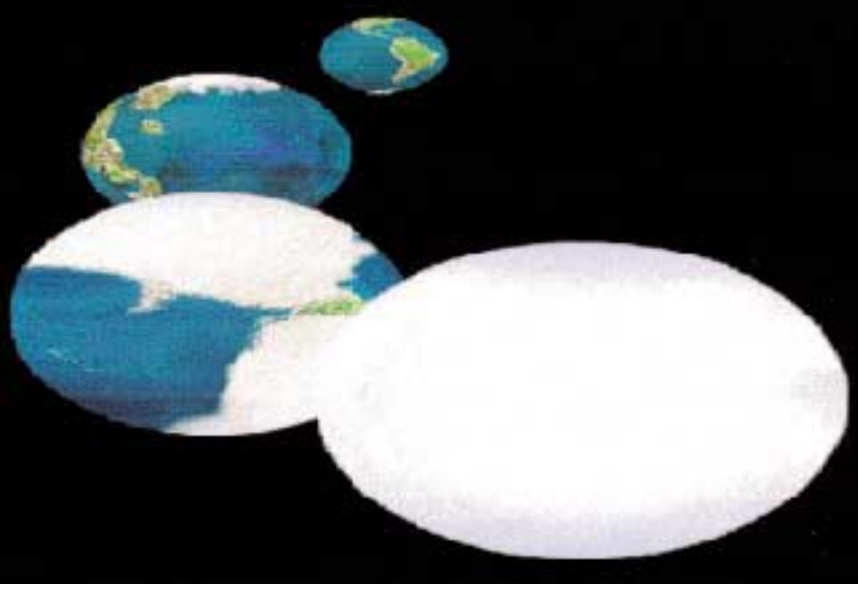
Bilim adamları, gezegenimizin büyük bir buzul döneminden geçtiğine yönelik ipuçlarını 1960'lı yıllarda yakalamaya başladılar. Cambridge Üniversitesi'nden Brian Harland, eski buzulların izlerini kayalarda arıyordu. Buzullarla sürüklenen taşları ve kayaları ayırt etmek kolaydı. Çünkü kayalara sürtünen taşlar düzleşiyordu. Yine bu sürtünmenin etkisiyle, kayalarda belirgin izler oluşuyordu. Ayrıca, buz dağlarından düşen taşlar, denizin ince kumdan oluşan tabanına birikiyordu. Yaklaşık 700 milyon yıl öncesinden kalan bu kaya kalıntılarına, yeryüzünün hemen her bölgesinde rastlanabiliyor.

Harland'ı şaşkırtan da bu buzulların Güneş'in dik olarak geldiği ekvator bölgesinde bulunması olmuştu. Üst Proterozoik dönemde, kıtaların tek parça olduğunu düşünen Harland, buzulların etkisinde kalmış olduğunu düşündüğü kayaların içindeki mineralle-

rin manyetik doğrultularını inceledi. Henüz sertleşme aşamasında olan ergimiş kayalarda bulunan manyetik moleküller, kendilerini Dünya'nın manyetik alanına göre hizalıyorlardı. Eski kayalardaki manyetik hizalanmaya bakılarak, bu kayaların yeryüzünde hangi enlemde oluştuğunu anlamak mümkün olabilirdi. Harland'ın incelediği kayalar, ekvatora yakın bir yerde oluşmuş gibi görünüyordu.

Yine 1960'lı yıllarda, Rus iklimbilimci M.I. Budyko, tuhaf bir etkiyi farketti. Modellerine göre, kutuplardan yeterince uzaklaşan bir buzul kütlesi, bir tepkime başlatıyordu. Buz, Güneş ışınlarını yansıttığı için gezegenin soğumasına, dolayısıyla da daha fazla buz oluşumuna yol açıyordu. Bir noktadan sonra, yani yeryüzü yeterince buzla kaplandığında, bu etki artık geri dönülmez bir biçim alıyor ve sadece birkaç on yıl içinde gezegen tümüyle buzla kaplanıyordu. Dev bir kartopu gibi...

Ancak, bu konu üzerinde çalışan öteki araştırmacılar, bu senaryodaki önemli bir çıkmaza dikkat çektiler.



Dünya bir kez donduğunda, bunun geri dönüşü nasıl olabilirdi? Beyaz buz, Güneş'ten gelen ısının büyük bölümünü geri yansıtır ve gezegen hep böyle kalırdı. Böylece, bilim adamları arasında, bu şekilde bir senaryonun hiçbir zaman gerçekleşmediği düşüncesi hakim oldu. "Kartopu Dünya" senaryosu, neredeyse ortaya çıktığı anda rafa kaldırıldı.

Tartışmalar sürerken, manyetik veriler üzerine yoğunlaşıldı. Sorun, kayaların oluştuktan uzun süre sonra da manyetik özellik kazanabileceği düşüncesinin hakim olmasıydı. Bu nedenle, kimsenin tam olarak bu kayaların nerede oluştuğunu kanıtlaması olanaklı görünmüyordu.

1986'da, California Teknoloji Enstitüsü'nden Joe Kirschvink, Avustralya'da yaptığı araştırmalarda, kayaların henüz yumuşakken, büküldüğünü ve buruştuğunu, buna karşın, bükülmeden önce kazandıkları manyetik imzayı koruduklarını farketti. Yani, kayaların içindeki moleküller, oluşumları sırasında kazandıkları manyetik doğrultuyu koruyorlar, daha sonra karşılaştıkları manyetik etkenlerden etkilenmiyorlardı. Böylece, buzulların gerçekten ekvatora yakın bir yerde oluştuğu anlaşıldı.

Kirschvink, tropikal bölgelerin bir zamanlar buzla kaplı olduğuna ikna olmuştu. Ancak, aşılması gereken daha büyük bir engel, Dünya'nın bu durumdan nasıl geri döndüğüydü. Kirschvink, bunun yanıtının yanardağlar olduğunu düşündü. Levhaların hareketi nedeniyle, volkanik etkinliğin

yoğun olarak devam ettiği Üst Proterozoik dönemde, diğer gazlarla birlikte atmosfere bol miktarda karbondioksit de salınıyor olmalıydı.

Atmosferde bulunan karbon dioksit, normalde yağmur suyunda kolayca çözünür ve yere düşen yağmur damlalarıyla kayaların içine sızar. Birtakım kimyasal tepkimelerin ardından, karbondioksit, bikarbonata; bikarbonat da kalsiyum ve magnezyum iyonlarıyla birleşerek karbonat bileşiklerine dönüşür. Karbonat bileşikleri, okyanuslara sürüklenir ve burada çöker. Ancak, donmuş bir Dünya'da buharlaşma çok sınırlı olacağından, yağmur ve dolayısıyla da karbonat oluşumu beklenebilir. Böylece, atmosfere karışan karbon dioksit birikir ve güçlü bir sera gazı olan karbon dioksit, gezegeni buzun erimesini sağlayacak kadar ısıtabilir.



Kilimanjaro Dağı'nın yüksek bölgelerinde buzul kalıntıları. Tropikal bölgelerde eski buzulların izlerine ancak 5000 metrenin üzerinde rastlanıyor. Oldukça soğuk geçen son buzul çağında bile bu buzullar 4000 metrenin altına inmedi. Oysa, 600 ile 700 milyon yıl önce, Dünya birkaç kez tümüyle buzla kaplandı.



Namibya'da ki jeolojik katmanlar, günümüzden yüz milyonlarca yıl öncesine ışık tutuyor.

Kirschvink'in ilgisini çeken bir başka oluşum, Üst Proterozoik dönemde görülen kayaların demir bakımından oldukça zengin oluşuydu. Bu tür oluşumların bir benzeri, günümüzden 2,5 milyar yıl önce ilk fotosentez yapan canlıların ortaya çıkmasıyla görülüyor. Bu sırada oksijen artmış ve kayalardaki demir ( $Fe^{3+}$ ) oranı da buna bağlı olarak artmıştı. Demir iki temel oksitlenme durumuna sahip. İndirgenmiş durumdaki demir ( $Fe^{2+}$ ), deniz suyunda çözünebilir özelliğine sahip. Buna karşılık, daha yüksek oranda oksijen varlığında oksitlenebilen demir ( $Fe^{3+}$ ), oksijenle birleşerek bildiğimiz pası oluşturur ve bu demir bileşiği suda kolay çözünemez ve çöker.

Günümüzden yaklaşık 700 milyon yıl önce atmosferde bol miktarda oksijen bulunuyordu. Normal koşullarda  $Fe^{2+}$  ve  $Fe^{3+}$  oranının bozulması beklenmezdi. Bu durumda, koşulların normal olmadığını, yani okyanusların oksijenle temasının kesilmiş olduğu düşünülebilirdi. İşte, bu da okyanusların bu sırada buzlarla kaplı olduğuna ilişkin başka bir ipucu. Okyanuslarda biriken bol miktarda  $Fe^{2+}$ , buz katmanının erimesinin ardından oksijenle karşılaşarak  $Fe^{3+}$  haline dönüştü ve bu tortu çökecek tabanda bir katman oluşturdu.

Kirschvink, 1992'de bu konudaki düşüncelerini açıkladığı bir makale yazdı ve büyük buzul çağını "Kartopu Dünya" (Snowball Earth) olarak adlandırdı. Ne var ki, uzmanlık dalı manyetizma olan bir bilim adamının böyle bir



Kartopu Dünya kuramını destekleyen araştırmalar yapan Paul Hoffman ve Daniel Schrag, Dünya'nın buzla kaplandığı son büyük buzul döneminin kaya katmanlarındaki izlerini işaret ediyorlar.

varsayımla ortaya çıkması pek fazla ilgi görmedi. Son buzul çağında buzullar, Avrupa Asya ve Amerika'nın kuzey bölgelerini kaplamıştı. Kirschvink'se, okyanuslar dahil, tüm Dünya'nın buzla kaplanmış olduğundan söz ediyordu. Bu biraz abartılı bulundu.

Bu sırada, Harvard'lı jeolog Paul Hoffman, Namibya'da bir kazı yürütüyordu. Birkaç yıl süresince Üst Proterozoik döneminden kalma buzul izlerini ayrıntılı biçimde inceleyen Hoffman, gördüklerinden bir türlü anlam çıkaramıyordu. Hoffman, Kirschvink'in çalışmalarını mantıklı bulmakla birlikte, bir türlü daha ileriye gidemiyordu. Hoffman, aynı zamanda, karbonatlı kayaların içindeki karbon izotoplarını anlamaya çalışıyordu.

Yerkabuğunu oluşturan karbon, iki karbon izotopu içerir. Bunlar, çok yaygın olan karbon-12 ve küçük ama sabit oranda bulunan karbon-13 izotopları. Bitkiler fotosentez yaparken, her iki izotopu da kullanırlar; ancak, karbon-12'nin kullanılabilirliği karbon-13'e göre çok az daha yüksektir. Bu nedenle, denizaltında yaşayan ve fotosentez yapan canlılar sayesinde zamanla karbon 13 birikmesi olması beklenir. Hoffman, 1997 yılında, çalışmaları sırasında tam da Kirschvink'in buzul dönemine denk gelen dönemde, karbon-13 düzeyinde önemli bir düşme olduğunu farketti.

Bu durumun Kartopu Dünya kuramıyla ilişkisini düşününce, Hoffman, okyanuslardaki canlıların, buzlarla kaplanan sularda yaşamını sürdürme-

diği, dolayısıyla da artık fotosentezin durduğu anlamını çıkarttı. Elbette, bu durumda karbon oranlarında bir değişme meydana gelecekti. Bu, "Kartopu Dünya" kuramını destekleyen önemli bir kanıt oldu. Hoffman, Harvard'lı jeokimyacı Daniel Schrag'la birlikte, bu durumu bilim dünyasına açıkladı.

Biraz eskiye, 1992 yılına dönecek olursak, bu sıralarda, Pennsylvania Eyalet Üniversitesi'nden iki ABD'li araştırımcı Jim Kasting ve Ken Caldeira, Kartopu Dünya'yı eritmek için gereken ısıyı sağlayacak sera etkisini sağlayacak karbon dioksit miktarını hesapladılar. Buna göre Dünya'yı parlak, beyaz giysisinden kurtarmak için, atmosferde bulunması gereken karbon-

dioksit miktarı, günümüzdekinin yaklaşık 350 katı olmalıydı. Bu kadar çok karbondioksitin atmosferde birikebilmesi içinse milyonlarca yıl geçmesi gerekirdi.

Schrag, yeteri kadar karbondioksitin atmosferde biriktiğini varsayarak, ısınmanın nasıl olacağını düşünmeye başladı. Öncelikle, okyanusların üzerindeki buz eriyecek ve bunun ardından atmosfere yeniden su buharı karışmaya başlayacaktı. Su buharı, bilinen en etkili bir başka sera gazıdır. Karbon dioksit ve su buharının etkileri birleşince, sıcaklığın büyük bir hızla 40 ila 50 °C'lere fırlaması işten bile değildi. Yani, milyonlarca yıl süren küresel bir buzul döneminin ardından, birkaç yüzyıl içinde yeryüzü olağanüstü bir şekilde ısınıyordu. Bu ısınma, karbondioksitle birlikte ait yağmurlarını ve dev kasırgaları getiriyordu. Isınmış Dünya'nın da hiç de konuksever olmadığı açıktı.

Hoffman ve Schrag, araştırmalarının sonuçlarını "Kartopu Dünya" (Snowball Earth) başlığı altında Science dergisinde yayımladıktan sonra uzun süren bir tartışma başladı. Özellikle Science ve Nature dergilerinin sayfalarında bu konu üzerinde çok tartışıldı. Bunlar arasında, Dünya'nın bir zamanlar dönme ekseninin şimdikine göre oldukça yatık olduğu yönünde eski bir iddia da yer alıyordu. Bu durumda ekvator bölgesi kutuplar yerine geçmiş olacaktı. Ancak, bu tartışmaların hiçbiri "Kartopu Dünya" kuramını çü-



Kanada'nın Mackenzie Dağları'nda bulunan ve son büyük buzul döneminden kalan demir içeren katmanlar.

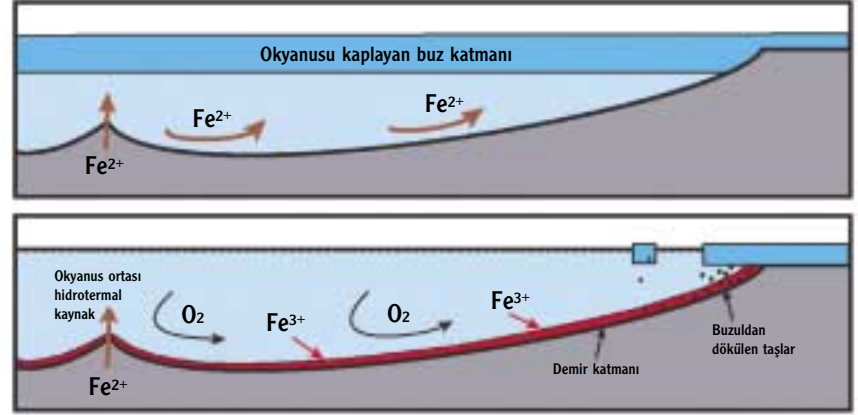
rütmeye yetmedi.

Eleştiriler çok olsa da bu kuram daha önce açıklanamayan birçok bulguyu yanıtlıyor. Gözlenen buzul izlerinin hemen hemen tüm yeryüzüne yayılmış olması, bunların bir bölümünün ekvator da gözlenmesi, karbon izotoplarının oranındaki değişim, demir oluşumları ve karbonatlı kayalar bunlar arasında. Kartopu Dünya kuramı bu bulguların tek açıklaması olarak görünüyor.

Namibya'daki veriler, asitli bir ısınma dönemiyle izlenen en azından iki farklı Kartopu Dünya döneminin olduğunu gösteriyor. Emin olmak zor olsa da, yeryüzünün öteki bölgelerindeki buzul izleri, en azından beş büyük buzul çağının yaşandığını gösteriyor. Yaklaşık 575 milyon yıl önce meydana gelen büyük buzul çağı, gezegenimizin tarihinde çok önemli bir yer tutuyor. Yaşam, ilk olarak yaklaşık 3,5 milyar yıl önce ortaya çıkmış olmakla birlikte, çok uzun süre boyunca tek hücreli basit bakteri ve alglerden öteye geçemedi. Ancak, bu son büyük buzul döneminin hemen ardından, ilk çok hücreli canlılar ortaya çıktı. Bunun ardından Kambriyum döneminde, günümüzde bilinen canlı şubelerinin hepsi birden ortaya çıktı. Son büyük buzul döneminin ardından bu karmaşık yaşam biçimlerinin ortaya çıkmasını tetikleyen bir takım etkenler olmalıydı.

Öncelikle, donma aşamasının yeryüzünde henüz çok ilkel olan canlılar için önemli bir yıkım olduğu açık. Gezegenin dev bir kartopu haline geldiği sırada, yalnızca jeotermal kaynakların yakınlarındaki ya da buzun üzerinde fotosentez yaparak yaşayabilen bazı canlılar yaşamını sürdürebildi. Bu canlılar, milyonlarca yıl süresince birbirinden genetik olarak yalıtılmış oldular. Birbirlerinden farklı ortamlarda uzun süre varlıklarını korumayı başaran canlılar, buldukları ortamlara göre genetik değişimler geçirdiler. Isınmanın ardından, farklı türler farklı evrim aşamalarından geçtiler. Günümüzde varolan çoğu canlı şubesinin, temel genetik yapılarına bu dönemde kavuşmuş olabileceği düşünülüyor.

Peki, gezegenimiz sadece Üst Proterozoik dönemde mi dev bir kartopu haline geldi? Kirschvink, bunun yaklaşık 2,5 milyar yıl önce de gerçekleştiği



Okyanusların tümüyle buzla kaplandığı dönemlerde, biriken bol miktarda Fe<sup>2+</sup>, buz katmanının erimesinin ardında oksijenle karşılaşarak Fe<sup>3+</sup> haline dönüştü ve bu tortu çökerek okyanusların tabanlarında bir katman oluşturdu.

ne ilişkin bazı kanıtlar buldu. Yine bu dönem, yeryüzündeki fotosentez yapan ilk canlıların, dolayısıyla da oksijen gazının ortaya çıkmasına denk geliyor. Dünyamız, tarihte başka donma evrelerinden geçmiş olabilir. Ancak, Üst Proterozoik döneminden sonra, Dünya'nın bir kez daha tümüyle donduğuna ilişkin bir kanıt yok. Sadece yeryüzünü sınırlı miktarda örten buzul çağları yaşanmış gibi görünüyor.

Çoğu zaman buz tek başına yeterli olmuyor. Küresel çapta bir soğuma olduğunda, okyanuslar kutuplardan ekvatora doğru donuyor. Buzul kütleleri genişledikçe, kıtaların da üzerini kaplıyor. Kıtaların üzeri kaplandıkça, kayalardaki kimyasal tepkimeler de azalıyor ve bu, atmosferdeki karbon dioksitin kayalar tarafından soğurulmasına engel olmaya başlıyor. Atmosferdeki karbon dioksit oranının artması da sera etkisi yaratıyor ve buzulların ilerlemesi duruyor.

Üst Proterozoik dönemde, ardı ardına yeryüzünün buzla kaplanmasının nedeni, sıralar karaların ekvator bölgesinde toplanmasına bağlanabilir. 600 ila 700 milyon yıl önce, kıtaların büyük bölümü ekvatora yakın olarak bir arada toplanmıştı. Bu durum, kutup buzullarının genişlediği durumlarda bile atmosferdeki karbon dioksit oranını dengede tutabiliyordu. Küçük bir miktar küresel soğuma, böyle bir Dünya'nın tümüyle donmasını sağlayacak süreci başlatmaya yetebilir. Schrag'ın bu kuramı, şimdilik bir varsayımdan öteye gitmiyor. Ancak, birçok şeyi açıklıyor.

Kıtaların konumları bundan birkaç yüz milyon yıl öncesine kadar tahmin edilebiliyor. Ne var ki, daha eski dö-

nemler için bunu bilmek çok zor. Ancak, tüm kıtaların ekvatora yakın yerlerde toplandığı dönemler pek sık değil. Bu da büyük buzul dönemlerinin Üst Proterozoik dönemde toplanmasının bir nedeni olabilir. Bunun öncesinde ve sonrasında, kıtalar kuzey ve güney yarıkürelere dağılmış olduğundan iklim bir şekilde kontrol altında tutulabilmiş olabilir.

Peki, gelecekte bir Kartopu Dünya'yla daha karşılaşacak mıyız? Dünya, son bir milyon yıl içinde, Üst Proterozoik dönemden bu yana geçirdiği en soğuk dönemden geçti. 20.000 yıl önce yaşanan son buzul çağında, buzullar güneyden ve kuzeyden 40 derece enlemlere kadar indi. Ancak, bu bile kritik düzeyin epeyce altında kaldı. Bir sonraki buzul çağına da yaklaşık 80.000 yıl var. Gelecekte ne olacağını kimse bilemez. Ancak, gezegenimizin yeniden dev bir kartopu olması pek olası görünmüyor. Kıtaların yeniden ekvator da toplanması çok düşük bir olasılık. Ayrıca, önümüzdeki yüz milyonlarca yıl içinde Güneş'in parlaklığı yavaş da olsa giderek artacak. Böyle bir durumda, gezegenimizin geleceği için endişelenmek yersiz. Dünyamız, bir kez daha böyle bir dönemden geçerse, çoğu türün yeryüzünden silineceği açık; ancak bu son, daha önce olduğu gibi, yeni bir yaşam çeşitliliğinin ortaya çıkmasını sağlayacaktır.

Alp Akoğlu

**Kaynaklar**  
Hoffman P., Schrag D., Snowball Earth, Scientific American, Ocak 2000  
Hoffman P., Schrag D., A Neoproterozoic Snowball Earth, Nature, vol 396, 1998  
Lemley B., The New Ice Age, Discover, Eylül 2002  
Walker G., Snowball Earth, New Scientist, 6 Kasım 1999  
<http://www.geotimes.org/>