

O'NUN ÖYKÜSÜ

Dünya'nın atmosferinde oksijen oranının artışı, günümüzden 2,2 - 2,4 milyar yıl önce gerçekleşti. Oksijen bakımından zengin bir atmosfer, yeryüzünde yaşamın evrimini çarpıcı bir biçimde değiştirdi. Bugün atmosferdeki oksijen, fotosentezin yan ürünü olarak çıkıyor. Fosil kayıtlarıysa, yeryüzünde fotosentez yoluyla oksijen üreten canlıların, atmosferdeki oksijen derişiminin artmasından yaklaşık bir milyar yıl önce ortaya çıktığını gösteriyor.

Gezegeneimizin tarihi boyunca yaşamın evrimi, atmosferi oluşturan gazların yapısındaki değişimlerle bağlantılı olarak gelişti. Bilim adamları, Dünya'nın ilk atmosferinin hidrojen, su buharı, karbonmonoksit ve nitrojenle oluştuğunu tahmin ediyorlar. Yeryüzünde ortaya çıkan ilk canlılar da oksijensiz ortamda yaşayan prokaryotlardı (hücre çekirdeği bulunmayan il-

kel canlılar). Günümüzden yaklaşık 3,5 milyar yıl kadar önce, fotosentez yapan ilk canlılar olan siyanobakteriler ortaya çıktı. Siyanobakterilerin ürettiği oksijen gazı, atmosferde birikmeye başladı; bu, oksijenli yaşamın ortaya çıkışı açısından ilk adım oldu. Ancak, oksijen gazı, siyanobakterilerin ortaya çıkışından yaklaşık bir milyar yıl sonra atmosferde saptanabilir dü-

zeyeye gelebildi. Bilim adamları, oksijen gazı üreten canlıların ortaya çıkışıyla atmosferdeki oksijen düzeyinin artması arasında neden bu kadar uzun bir zaman farkı olduğunu bulmaya çalışıyorlar. Mineral kayıtlarından sözünü ettiğimiz değişikliklerin ne zaman gerçekleştiği ortaya çıkarılmaya çalışılıyor. Bu değişimde hangi canlıların rol oynadığını bulmak için fosil kayıtları-

na başvuruluyor. Bu canlıların evrimini ortaya çıkarmak içinse biyokimyasal özellikleri saptanmaya çalışılıyor.

Yakın bir zamana kadar, Dünya atmosferinin oksijen bakımından zenginleşmesinin, günümüzden 1,2 milyar yıl kadar önce gerçekleştiği kabul ediliyordu. 1999 yılında yapılan iki araştırmaysa, bunu bir milyar yıl kadar geriye götürdü ve bilim dünyasında büyük yankı yaptı. Bu araştırmaların ilki, Pennsylvania Üniversitesi'nden Hiroshi Ohmoto ve arkadaşlarının, Afrika'nın güneyinde, bantlı demir oluşumları olarak adlandırılan demirce zengin kayaç oluşumları üzerinde yaptıkları incelemelere dayanıyordu. Bantlı demir oluşumları, demir bulunmayan iki kayaç tabakasının arısına sıkışmış, demir bakımından zengin kayaç katmanlarıdır. Oksijen gazının ortaya çıkmasından önce demir deniz suyunda çözülebiliyordu. Oksijen, ortaya çıkmasıyla birlikte okyanusun üst bölümlerine sızmaya başladı ve burada çözünmüş demirle tepkimeye girdi. Ortaya çıkan demir oksit, silisyum oksitle birlikte okyanus tabanına çökelecek burada birikmeye başladı. Siyanobakteriler gibi canlıların öldükten sonra bozunması sırasında çıkan organik asitler oksitlenmiş demiri çözerek, yeryüzünün alt katmanlarına sızmasını sağladı ve lateritler oluştu.

Ohmoto ve arkadaşları araştırmalarını, Güney Afrika ve Botswana'da madencilerin ocaklardan çıkardığı kayaç örnekleri üzerinde yürütmüşler. Öncelikle, bu oluşumların sanılandan çok daha geniş bir alanı kapladığı anlaşılmış. Hatta, önceden daha genç kaya örnekleri olduğu sanılan ve 2,3 - 2,4 milyar yaşındaki ünlü Hekpoort bazaltının üzerinde bulunan kayaların da bu oluşumun bir parçası olduğu ortaya çıkmış. 80 metre derinliğe kadar inceleme yapan araştırmacılar, inceledikleri kayaç oluşumlarının Hekpoort bazaltından çok kısa bir süre sonra oluştuğunu bulmuşlar. Ohmoto'ya göre, bu tabakaların oluşabilmesi için, o zamanlar atmosferde yaşamı destekleyecek ve demiri demir oksite çevirecek kadar oksijen bulunuyordu. Bu da, atmosferdeki oksijen oranının artmaya başlamasının, sanıldığı gibi 1,2 milyar yıl önce değil, bu tarihten bir milyar yıl kadar daha önce olduğunu gösteriyordu.



Siyanobakteriler. Okyanusların kayalık sahillerinde ya da azot bakımından zengin ve nemli ortamlarda yaşayan ve fotosentez yapan ilk canlılar. Siyanobakterilerin etkinlikleri, canlıların evriminin yönü ve çevresel değişiklikler açısından gezegenimizin tarihinde önemli yere sahip. Dünya'daki ilk canlıların ortaya çıktığı zamanlarda, atmosfer bambaşka kimyasal özelliklere sahipti. Bugünkü yaşamın yapıtaşlarından oksijen gazının oluşumunu Arkeozoik ve Proterozoik dönemlerde (günümüzde 3,5-2,5 yıl önce) fotosentez yapan siyanobakterilere borçlu olduğumuz düşünülüyor.

Oksijen Gazı Yaşamı Güçleştiriyor...

Oksijen gazının atmosferde birikmesi, Dünya'daki yaşam için yeni bir başlangıç oldu; ancak bu pek de olumlu bir başlangıç sayılmazdı. Oksijenin ilk etkisi, o zamana kadar evrimleşmiş canlılar için koşulları daha da güçleştirmek oldu. Oksijen gazı, Güneş'ten gelen ışınların atmosferde kalmasını sağlayan metan gazıyla tepkimeye girerek atmosferdeki metanı silmeye başladı. Bunun sonucunda birkaç milyon yıl içinde yeryüzünü buzul ve kar örtüsü kapladı; evrimleşmiş olan ilkel canlıların çoğu da öldü. Günümüzden 2,3 milyar yıl önce, atmosferdeki oksijen oranının artmasıyla, gezegenimizin dev bir kartopuna benzemesine yol açan, bilinen ilk buzul dönemi başlamıştı. O dönemde ekvatorun çevresinde birbirine yapışık olarak bulunan kıtaların hepsi buzullarla kaplandı ve yerkürenin görünümü dev bir kartopuna benzedi. Bilim adamları, gezegenimizin günümüzden 600 ve 750 milyon yıl önce böyle iki "kartopu" dönemi daha geçirdiğini de ortaya koymuşlardı. Son iki olayın başlama nedeninin karbondioksit düzeylerinin azalması olduğu tahmin ediliyorsa da, günümüzden yaklaşık olarak 2,3 milyar önce gerçekleşen ilkinin ortaya çıkma

nedeni, Pennsylvania Üniversitesi'nden James F. Kasting ve arkadaşlarının 1999 yılında açıklanan çalışmasına kadar bilinmiyordu.

Kasting'in modeline göre, gezegenin dev bir kartopuna benzediği bu buzul dönemlerinin ilki, atmosferdeki oksijenin bollaşmasına bağlı olarak gerçekleşmişti. Bunun öncesinde, karbondioksit ve su buharının yanı sıra metan, atmosferdeki en önemli sera gazıydı. Ancak, bugünkünün yüzde biri kadar oksijen gazı, metanın etkisini azaltmaya yetiyordu. Atmosferdeki oksijen oranı yükseldikçe, metan gazı azaldı ve yeryüzü hızla soğumaya başladı. O zamanki karbondioksit düzeyi, ortaya çıkan soğuma etkisini dengelemeye yetecek miktarda değildi. Yerkürenin, kutuplardan ekvatora 30°'lik uzaklığa kadar olan bütün bölgeleri buzullarla kaplandı. Bundan sonraki yaklaşık bin yıl boyunca, yerkürenin buzullarla kaplı bölgelerinin yansıtıcı özelliği ve Güneş'ten gelen ısının tutulmaması sonucu yeryüzünün geri kalan bölgeleri de buzullarla kaplanmaya başladı. Dünya, dev bir kartopu haline geldi; okyanuslar bile 800 metre derinliğe kadar dondu. Kasting, yanardağ etkinliklerinin buzulları eritmeye yetecek kadar karbondioksit oluşturmalarının 5-10 milyon yıl kadar sürdüğünü, bu zaman süresince de kıtaların buzullarla kaplı olduğunu düşünüyor.



Bantlı demir oluşumları adı verilen demirce zengin çökeller. Bu kayaların büyük bir bölümü, günümüzden iki milyar yıl kadar önce, birkaç yüz milyon yıl gibi görece kısa bir sürede oluşmuştu.

Bantlı demir oluşumları, günümüzden 2,2 milyar yıl önce Dünya'nın atmosferinde önemli miktarlarda oksijen bulunduğunu gösteriyor. Ancak, 3,5 milyar yılla 2,2 milyar yıl arasında geçen sürede atmosferin ve yaşamın özellikleri konusundaki bilgilerimiz oldukça sınırlı.

İzotopların Anlattıkları

Geçtiğimiz yıl Ağustos ayında, San Diego'daki California Üniversitesinden araştırmacılar, bantlı demir oluşumlarındaki oksijen gazı ve ozonun izlerini inceleme olanağı veren bir yöntem geliştirdiler. James Farquhar ve arkadaşları, geliştirdikleri bu yöntemle, 3,8 milyar yıl önce oluşmaya başlamış tortul kayalarda, atmosferdeki kükürt ve oksijenin rol oynadığı kimyasal tepkimelerin izlerini buldular. Böylece, atmosferdeki oksijenin ve canlıları morötesi ışınımın zararlı etkisinden koruyarak yaşamın karalara yayılmasına olanak tanıyan ozon (O₃= bir tür ağır oksijen) tabakasının oluşumu konusunda ilk ayrıntılar ortaya çıkmış oldu.

Araştırmacıların ilk atmosferi izlemek için geliştirdikleri yöntem, kükürtlü gazların oksitlenme süreçlerinin, kayalarda bıraktığı farklı izotopların izlerinin ortaya çıkarılmasına dayanıyor. Bu dönemde, kükürtün rol oynadığı kimyasal tepkimeler daha çok atmosferde görülüyordu. Bugünse, atmosferde çok daha fazla oksijen gazı bulunuyor ve kükürtün rol oynadığı kimyasal tepkimeler daha çok karalarda gerçekleşiyor. Kayalardaki izlerden, Dünya'nın ilk atmosferindeki kükürt gazlarıyla beslenen mikroorga-

nizmaların, bu elementin hafif izotoplarından üçünü tercih ettikleri anlaşılıyor. Aynı dönemde, biyolojik olmayan ve düzeneği henüz anlayamamış olan ve kükürt içeren başka tepkimeler de gerçekleşiyordu ve bunlar da kayalarda iz bırakıyordu. Bu ikinci grup tepkimelere, Güneş'ten gelen morötesi ışınlar neden oluyordu. Atmosferde oksijen birikmeye başladığında, Güneş'ten gelen morötesi ışınların yeryüzüne ulaşmasına engel olacak ozon tabakası oluştu ve kükürtlü tepkimeler yavaşlamaya başladı. Bir yandan da, ortaya çıkan oksijen gazı, kükürtle tepkimeye girerek onu atmosferden temizliyordu. Bu iki etki, kükürtün kayalardaki izlerine de yansdı. Farquhar ve arkadaşları, günümüzden 2,45 milyar yıl önceki dönemden sonra, atmosferde oksijen gazı birikmesine bağlı olarak bu izlerin oluşumunun durduğunu ortaya çıkardılar.

Daha önceleri, Farquhar ve arkadaşlarının incelediği izotop çeşitliliğinin, yalnızca göktaşlarında ya da Dünya dışı başka kaynaklarda bulunduğu ve yıldızlardaki çekirdek sentezinin yan ürünü olduğu düşünülüyordu. Farquhar'ın ekibinin de aralarında bulunduğu bir grup araştırmacı, geçtiğimiz yıl Temmuz ayında, kükürt izotoplarındaki bu çeşitliliğin 20 milyon yıllık volkanik kül tortularında ve 10 milyon yıllık alçıtışı birikimlerinde bulunmasının da Dünya'nın atmosferindeki kimyasal süreçleri yansıttığını kanıtlamışlardı. İzotop farklılıklarının saptanmasına yarayan bu yöntem, araştırmacıların Dünya'nın eski atmosferi, eski yanardağ patlamalarının atmosferde neden olduğu süreçler, okyanuslardaki dolaşım ve ilk canlıların yayılımı gi-

bi konularda da yararlanabilecekleri bir araç olarak kabul ediliyor.

Oksijenin Atmosferde Birikimi Neden Uzun Sürdü?

Jeolojik bulgular oksijenin yaklaşık 2,2 - 2,5 milyar yıl önceye kadar atmosferde ancak eser miktarda bulunduğunu gösterse de, fosil kayıtlarında siyanobakterilerin günümüzden 3,5 milyar yıl önce ortaya çıktığını öğreniyoruz. Eğer siyanobakteriler 1 milyar yıl öncesinde de oksijen üretiyordusa, atmosferdeki oksijen gazının saptanabilir düzeylere gelmesini engelleyen güç neydi?

Harvard Üniversitesi'nden yerbilimci Heinrich Holland'a göre, bu sorunun yanıtını bulmak için oksijen gazının ortaya çıkmasına neden olan süreçlere değil, bu gazın ortaya çıktığı dönemlerde, onunla tepkimeye girerek yok edilecek süreçlere bakmak gerekiyor. Holland'a göre, ölü bakterilerin bozulması sırasında çıkan organik karbonlar, oluşan oksijen gazıyla tepkimeye girerek oksijenin atmosferde birikmesini engellemiş olabilir. Daha sonra bu organik maddeler, belli bir nedenle, atmosferdeki ve okyanuslardaki oksijen kaynaklarından uzak duracak biçimde yeraltına gömülmüş olabilir. Örneğin, 2,2 milyar yıl önce oluşmuş kayalarda, bu karbonların arttığı gözlenmiş. Araştırmacılara göre, tektonik levhaların hareketleri, okyanus tabanında organik maddelerin çökebileceği derin havuzlar oluşturmuş olabilir. Böylece serbest kalan oksijen de atmosferde birikme olanağı bulmuş olabilir.



Stromatolitler. Eski dönemlerden kalma siyanobakterilerin etkinlikleri sonucu oluşmuş olan bu kayalar, aynı zamanda bilinen en eski fosil kaynakları. Stromatolitlerin katmanları, şilte adı verilen bakteri toplulukları üzerine kalsiyum karbonat çökmesiyle oluşmuş. Çökme, bakterilerin fotosentez yaparak kendilerini çevreleyen sudaki karbondioksiti tüketmesiyle başlamış. Bu süreç tekrarlandıkça, çökelti katmanları oluşmuş.

Pennsylvania Üniversitesi'nden James Kasting'e göreyse, oksijenin ortaya çıkışından sonra atmosferde birikmesini önleyen, yanardağlardan çıkan gazlar oldu. Kasting ve arkadaşlarının Ocak ayında yayımlanan çalışmaları, yaklaşık 2,7 milyar yıl önce bu gazların, oluşan oksijen gazının yoğunluğunu önemli ölçüde etkilediğini gösteriyor. Araştırmacılar, yanardağlardan çıkan gazların olduğu yeryüzünün manto katmanı (yerkabuğuyla çekirdek arasında kalan katman) üzerinde incelemeler yapmışlar.

Atmosferdeki oksijenin ortaya çıkışından önce manto, oksijenle karşılaşırken tepkimeye giren, demir silikatları gibi mineraller açısından zengindi. Manto bu özelliklere sahip olduğu için, burada oluşan gazlar da oksijen gazıyla karşılaştığında tepkimeye girecek nitelikteydi. Yanardağ patlamalarıyla çıkan gazlar, siyanobakterilerin fotosentezle oluşturduğu oksijen gazıyla tepkimeye girerek oksijenin atmosferde birikmesini engelliyordu. Ancak, manto durağan bir yapıda olmadığı için bu durum da kalıcı olmadı. Yeryüzüne püskürerek atmosferdeki ve okyanuslardaki oksijenle tepkimeye girerek oksitlenen maddeler, yeryüzündeki çatlaklardan manto tabakasına geri sızarak yüzlerce milyon yıl süren bir süreç sonucu buradaki yapıyı değiştirdi.

Günümüzden 2,7 milyar yıl önce yanardağlar, oksijen gazıyla tepkimeye girerek atmosferde birikmesini engelleyecek gazlar üretmemeye başladı. Kasting ve arkadaşlarının hesaplarına göre bunun üzerine 2,7 milyar yıl önce oksijen düzeyleri de yükselmeye başladı.

Başka Oksijen Kaynakları

Kimi araştırmacılar da, ilk atmosferde ortaya çıkan oksijenin bir bölümünün, fotosentez yapan siyanobakterilerin yanı sıra, su moleküllerinin hidrojen ve oksijen olarak ayrışmasından çıktığını düşünüyorlar. Ancak, kayalara bakarak oksijenin miktarı ya da kaynağının ne olduğunu eksiksiz olarak ortaya çıkarma olanağı yok; en azından şimdilik.

Geçtiğimiz ay, ard arda yayımlanan iki araştırma, ilk atmosferde oksijen birikiminin metan gazının etkisiyle de ortaya çıkmış olabileceğini gösteriyor. NASA'nın Ames Araştırma Merkezi'nden iki farklı araştırma grubu, gezegenimizin oksijen bakımından zengin bir atmosfere nasıl kavuştuğu sorusunu yeniden ele aldılar. David Catling ve arkadaşlarının modeline bakılırsa, ilk atmosferde oksijen oranının artması, günümüzden 2 milyar yıldan daha uzun bir süre önce, ilkel mikropların ürettiği metan gazının sudaki hidrojenle birlikte uzaya kaçmasına bağlı olarak gerçekleşti. Geride kalan oksijen, zamanla önce yeryüzü kabuğunu doldurdu, sonra da atmosferde birikmeye başladı.

Tori Hoehler ve arkadaşlarının Meksika'nın Baja bölgesindeki şilte adı verilen, suyun yüzeyinde tabaka halinde yaşayan bakteri toplulukları üzerinde, ilk atmosferin koşullarına benzer koşullarda yaptıkları araştırmanın sonuçları da bu modeli destekler nitelikte. Bu bakteri şilteleri, günümüzden 3,5 milyar yıl önce ortaya çıkan siyanobakterilerin akrabası sayılabilecek bakteri-

lerce oluşturuluyor. Hoehler ve arkadaşları, inceledikleri bakterilerin geceleri yüksek düzeyde hidrojen açığa çıkardığını gözlemişler. Araştırmacılara göre, eğer dünyanın ilk bakteri şilteleri de üzerinde çalışılan şiltelere benziyorsa, o zaman yanardağların ve hidrotermal kaynakların binlerce katı daha fazla hidrojen açığa çıkarıyorlardı. Bu hidrojenin bir bölümü doğrudan uzaya kaçıyor; geri kalanıysa, metan üreten bakteriler için önemli bir besin kaynağı oluşturuyordu. Hoehler ve arkadaşlarının bulguları, Catling'in ekibinin bulgularıyla tutarlılık gösteriyor. Her iki araştırmaya göre de, Dünya'nın ilk atmosferinde büyük oranda hidrojen uzaya kaçıyor ve gittikçe daha fazla oksijen gazı açığa çıkıyor. Bu bulgular, araştırmacılar arasında yeni bir tartışma başlattı.

Dünya'nın atmosferinde oksijen oranının nasıl ve ne zaman arttığının ortaya çıkarılması, gezegenimizdeki yaşamın ilk zamanları konusunda birçok bilinmeyenin gün ışığına çıkmasına yarayacak. Bu araştırmalar, oksijene dayalı yaşamın geçmişi ortaya çıkarmanın yanı sıra, gelecekteki uzun vadeli atmosfer olaylarının anlaşılmasına da olanak tanıyacak. Çünkü, bugünü ve geleceği anlamının yolu, bir bakıma geçmişi anlamaktan geçiyor.

A s l ı Z ü l â l

- Kaynaklar**
 Clayton, N. R. "Rock signature from the sky" *Nature*, 13 Temmuz 2000
 Copley, J. "The story of O" *Nature*, 19 Nisan 2001
 Farquhar, J., Bao, H., Thieme, M. "Atmospheric influence of Earth's earliest sulfur cycle" *Science*, 4 Ağustos 2000
 Jorgensen, B. B. "Biogeochemistry: Space for hydrogen" *Nature*, 19 Temmuz 2001
 Kasting, J. F. "The rise of atmospheric oxygen" *Science*, 3 Ağustos 2001
 Leutwyler, K. "The first ice age" *Scientific Am. Explore!* 1 Kasım 1999