

ATMOSFERİN SONRADAN OLUŞAN GAZI OKSİJEN

Bugün atmosferdeki oksijenin, fotosentezin bir yan ürünü olarak ortaya çıktığı herkesçe biliniyor. Kesin olarak bilinen bir başka şey de başlangıçta Dünya'nın oksijenden yoksun olduğu. O halde oksijen ilk ne zaman ve nasıl ortaya çıktı? Atmosferde nasıl birikti ve günün birinde yok olabilir mi? Bazı bilim insanları yıllardır bu soruların yanıtını bulmaya uğraşiyor. Bu soruların tümü henüz yanıtlanamamış olsa da en azından oksijenin nasıl ortaya çıktığı artık kesin olarak biliniyor. Bilinen bir başka şey de nelerin daha tam olarak bilinemediği. Bu araştırmalarla edinilen bilgiler, oksijene dayalı yaşamın başlangıcına ve gelişmesine ilişkin bilinmeyenlerin aydınlanması, gelecekteki uzun erimli atmosfer olaylarının anlaşılması, gezegenin ve yaşamın geleceğine ilişkin öngörülerini etkileyebilir olması gibi çeşitli nedenlerle özel bir önem taşıyor.

Gezegeneimizin tarihi, yeryüzündeki yaşamın atmosferin yapısındaki değişimlere bağlı olarak geliştiğini söylüyor. Araştırmacılar Dünya'nın ilk atmosferinin hidrojen, su buharı, karbon monoksit ve azottan oluştuğunu öngörüyorlar. Yine araştırmalara göre oksijen, Dünya'nın başlangıcındaki atmosferde neredeyse hiç yok. Oysa, bugünün atmosferinde çok büyük miktarda bulunan iki gaz var: azot ve oksijen. Şimdi atmosferde en çok bulunan azot başlangıçtan beri var. Neredeyse durağan bir gaz olan azotun ömrü yaklaşık bir milyar yıl. Üstelik azotun atmosferdeki varlığı ve bolluğu biyolojik süreçlerle ilintili değil. Atmosferdeki miktar bakımından ikinci sıraya yerleşen ve devinimi çok yüksek olan oksijenin, Dünya'nın yaşıyla ya da azotun ömrüyle karşılaştırıldığında çok kısa ömürlü olduğu söylenebilir. Yalnızca 4 milyon yıl kadar.

Eğer jeologların yaptığı gibi bir milyon yılı bir saat kabul edecek olursak, bu durumda azotun 1000 saatlik uzun ömrüne karşın, oksijenin yalnızca 4 saate sığan bir yaşam süresi olduğunu söyleyebiliriz. Gerçekten de çok kısa, değil mi? Oksijenin yüksek devinimi oksidasyon denen tepkimeye girmesini çok kolaylaştırıyor. Yükseltgenme ya da oksitlenme olarak da tanımlanan oksidasyon, elektronların bir atom ya da molekülden ayrılmasını sağlayan bir kimyasal tepkimeden başka bir şey değil. Güneş'ten gelen enerjinin suyu ayrıştırmasıyla bu tepkime durmaksızın sürüyor ve bu sayede oksijenimiz hiç tükenmiyor.

Araştırmalar atmosferdeki kısıcık ömrüne karşın oksijenin atmosferde kapladığı yerin, yaklaşık 500 milyon yıl içinde, toplam atmosfer hacminin %10'undan %30'una genişlediğini gösteriyor. Peki ama hayvan yaşamının ge-

leşmesinde bu kadar önemli bir gaz olan oksijen, nasıl oldu da Dünya üzerinde ikinci en bol gaz durumuna gelebildi? Bu sorunun basit bir yanıtı yok. Bugüne dek yapılan araştırmalar oksijenin ortaya çıkışının ve varlığını çoğaltarak sürdürmesinin altında yatanların kolay anlaşılır olmadığını ortaya koyuyor. Bu konudaki bilgiler, yapılan yeni araştırmalardan edinilenlere göre de zaman içinde değişebiliyor. Örneğin, yakın bir zamana kadar Dünya atmosferinin oksijen bakımından zenginleşmesinin, günümüzden yaklaşık 1,2 milyar yıl önce başladığı kabul ediliyordu. 1999'da yapılan iki araştırma, bu süreyi bir milyar yıl kadar geriye götürdü. Araştırmacılar elbette oksijenin yalnızca ilk ne zaman ve nasıl ortaya çıktığını değil, atmosferde bol miktarda kalmayı nasıl sürdürdürebildiğini de anlamaya çalışıyorlar.

Oksijenin Ortaya Çıkışı

Aslına bakılırsa, oksijenin ve yaşamın varlığını tümüyle ilkel bir organizmaya borçluyuz. Yeryüzünde ortaya çıkan ilk canlılar oksijensiz ortamda yaşayan prokaryotlardı (hücre çekirdeği bulunmayan bir hücreli canlılar). Günümüzden yaklaşık 3,5 milyar yıl kadar önce fotosentez yapan ilk canlılar yani siyanobakteriler ortaya çıktı. Siyanobakterilerin ürettiği oksijen atmosferde birikmeye başladı. Bu, oksijenli yaşamın ortaya çıkışının ilk adımıydı. Ancak oksijenin atmosferdeki artışı, günümüzden 2,2-2,4 milyar yıl önce siyanobakterilerin ortaya çıkışından yaklaşık bir milyar yıl sonra başladı. O dönemlerde üretilen oksijen daha gelişkin bir yaşam için yeterli değildi. Zaman içinde oksijen bakımından zenginleşen atmosfer, yeryüzünde yaşamın değişip gelişmesinde ve çeşitlenmesinde çarpıcı bir etki yarattı.

Evrende oksijen atomu (O) yıldızlarda art arda olan helyum 4 füzyon tepkimelerinin sonucunda oluşur. Dünya'nın ilk dönemlerinde oksijen başka elementlere kimyasal olarak bağlı olduğundan, ortamda serbest durumda oksijen bulunmuyordu. Siyanobakterilerin oksijen üretmeye başlamalarının ardından serbest oksijen, Dünya'nın oluşum hareketlerine bağlı olarak birbirini izleyen ısıtma ve soğutma çevrimleri içinde, manto ve yerkabuğundaki temel minerallerin yapılanmasında önemli rol oynayan silisyum ve karbonla, aynı zamanda da suyu oluşturan hidrojenle tepkimeye girdi. Gezegenin tek su kaynağı yalnızca bu tepkime değildi. Göktaşları ve büyük bir olasılıkla da kuy-

ruklyıldızlar tarafından Dünya'ya su taşındı. Bu üç kaynaktan gelen suyun oranları pek iyi bilinmiyor. Su kaynağından bağımsız olarak, ölçülen izotop verileri gezegenin ilk 200 milyon yılı içinde Dünya yüzeyinde sıvı halde su bulunduğunu gösteriyor. Ancak yalnızca sıvı suyun yeryüzünde bulunması oksijenin biyolojik üretimini sağlamak için yeterli olamaz. O durumda oksijen üretiminde sıvı suyun rolü neydi?

Su morötesi ışığın etkisiyle kendini oluşturan elementlere ayrıştırılabilir ama güçlü olumsuz geri beslemeler yüzünden, ayrıştırma yoluyla yalnızca çok az miktarda oksijen üretilir. Bilim dünyası Dünya'daki oksijenin ana kaynağının suyun fotobiyolojik oksidasyonu olduğunu neredeyse kesin olarak kabul ediyor. Öte yandan bu olayın hem gelişmesi hem de işleyiş mekanizması daha tümüyle anlaşılabilmiş değil. Görünen o ki en başta, oksijen tek bir bakteri türünde bir kez ortaya çıktıktan sonra varlığının sürekliliğini tek bir olayla sağladı. Bu olay yeni bir simbiyotik organizmayı oluşturmak üzere bir hücrenin ötekini yuttuğu bir biyolojik oluşum yani endosimbiyozdu (iç ortak yaşam). İşte, bu olayla ortaya çıkan yeni organizma, bütün fotosentetik (fotosentez yoluyla besin üreten canlıların tümü) ökaryot hücrelerin atası durumuna geldi.

Oksidasyon mekanizması, elektron boşluğu akımı yaratmak için ışığın hızlandırıcı etkisiyle (fotokatalitik) oksitlenen fotosistem II'ye (ışığa bağımlı fotosentez olayında suyun ayrıştırılması sırasındaki elektron aktarımını düzenleyen ilk protein bileşiği) dayanır. Oksijen bir yan ürün olarak

$2H_2O \rightarrow 4e + 4H^+ + O_2$
tepkimesinin sonucunda ortaya çıkar (oksidasyon). Bu tepkimede açığa çıkan proton ve elektronlar,

$CO_2 + 4e + 4H^+ \rightarrow (CH_2O) + H_2O$
tepkimesiyle organik maddeden karbon dioksiti (CO_2) indirgemek (redüksiyon) için kullanılır. İndirgeme sonunda formaldehit (CH_2O) ve su ortaya çıkar. Binlerce yıl süredir bu tepkimeler oksijenin net üretiminin neredeyse sifıra yakın olduğu fotosentez olayının temel işleyişinin bir parçasıdır.

Atmosferin Oksitlenmesi

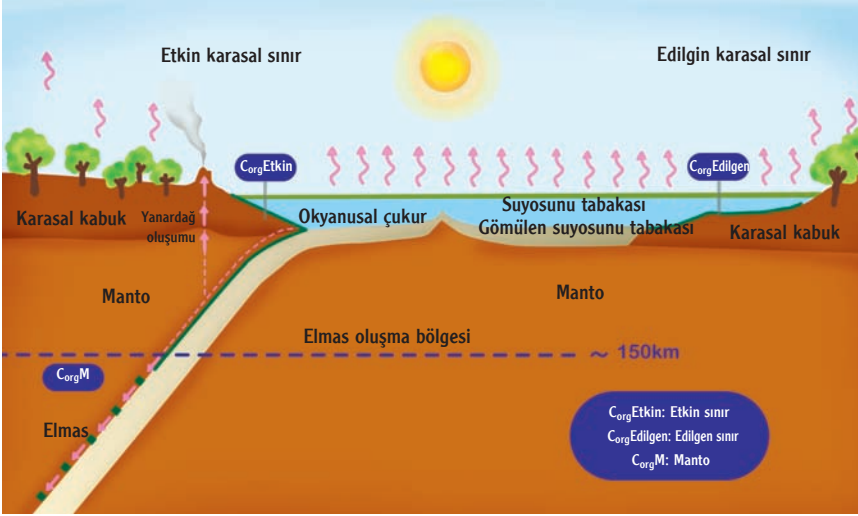
Atmosferin oksitlenmesinin başladığı dönemlerde atmosferdeki oksijen miktarı büyük olasılıkla şu anki atmosferin oksijen düzeyinin %1'i ya da daha azı kadardı. Üstelik okyanusların derin bölgeleri de büyük olasılıkla hâlâ oksijensizdi. Atmosferde oksijen miktarındaki büyük artışın Dünya tarihinde çok sonra, Neoproterozoyik eonun (yaklaşık 750-550 milyon yıl önce) sonlarında ve Karbonifer devrinde (360-300 milyon yıl önce) oluşmaya başladığı görülüyor. Ayrıca Karbonifer'de Dünya üzerindeki birçok organik maddenin çeşitli nedenlerle yerin derinliklerine gömülmesinde sıra dışı bir artış yaşandığı da biliniyor (Hatta bugün enerji kaynağı olarak kullandığımız fosil yakıtları oluşturan hidrokarbonların da Karbonifer'de yaşanan büyük gömülmenin sonucunda oluştuğunu da anımsamakta yarar var).

Araştırmalar organik maddelerin gömülmesiyle atmosferde oksijen birikmesi arasında yakın bir ilişki olduğunu gösteriyor. Başka bir deyişle dünyanın çevrimsel süreçleri organik maddelerin Dünya'nın içlerine doğru gömülmesine yani karbonun atmosfere akışının durmasına neden olmasaydı, organik maddelerin fotosentez yapmayı sürdürmeleri nedeniyle atmosferde çok az miktarda serbest oksijen olacaktı.

Peki, yerin derinliklerine gömülen organik maddeye ne olur? Gömülen organik madde, gömüldükçe üzerinde oluşan basınç ve ısının etkisiyle kimyasal bozunmalara uğrar. Bunların sonucunda gömülü organik maddeden sırasıyla önce su ve su buharı, sonra karbon dioksit, daha sonra oksijen, hidrojen, azot vb. uzaklaşır. Organik madde daha da derinlere gömüldükçe yalnızca bir karbon kaynağına dönüşür (el-

Doğada çökeltme bir çevrim içinde gerçekleşiyor.





Süreçler, oksijenin akışını ve birikimini düzenliyor. Su, güneş enerjisinin de yardımıyla okyanusta suyosunları, karada da bitkiler tarafından fotobiyolojik olarak ayrıştırılıyor. Bu organizmaların ürettiği organik maddenin çok az bir bölümü çökellerde gömülüyor, Dünya'nın derinliklerine dalıp-batırılıyor, en sonunda da levha hareketleri çevrimiyle anakaralara ekleniyor. Bu süreçler bütünü, oksijenin atmosferde birikmesine yol açıyor. Gömülü organik maddeyle bu maddenin oksitlenmesi arasındaki denge, geçmiş 500 milyon yıl boyunca sıkı şekilde kontrol edilmiş görünüyor.

masın yer kabuğunun çok derinlerinde bulunmasının nedeni de budur).

Öyleyse atmosferde oksijenin birikmesi (net oksitlenmesi) nasıl oldu? Bunu anlayabilmek için Dünya'daki bazı çevrimsel süreçlere ve bunların birbirleriyle olan ilişkilerine bakmak gerekiyor. Atmosferde oksijen birikmesi için öncelikle organik karbon gibi indirgeyicilerin, karbon dioksit üretimine engel olacak şekilde, uzun süreli depolanması gerekir. Kuşkusuz Dünya'nın kabuk katmanı, karbon indirgeyicileri içinde saklayan en büyük depodur. Ok-

sijen üretimiyle organik maddelerin gömülmesi arasındaki ilişkiye ışık tutması bakımından, organik maddenin gömülmesine neden olan mekanizmanın anlaşılması da önemlidir. Organik maddenin gömülmesindeki ana mekanizma, büyük oranda çökelmeye ve çökelmenin bir sonucu olarak hareketsiz anakaraların (kıtaların) büyüme sürecine, daha az oranda da Dünya'nın manto katmanının derinliklerindeki dalma-batma sürecine bir başka deyişle levha hareketlerine bağlı olarak çalışır. Dünya'nın derinlerindeki radyo-

aktif ayrışmadan ortaya çıkan ısı, manto ısı çevrimine, manto ısı çevrimi de levha hareketleri çevrimine neden olur. İşte, özünde levha hareketlerinin yönettiği bu süreçlerin tümü anakaraların çarpışmalarına ve ayrılmalarına yol açar. Bu yolla da yeni okyanus havzalarını oluşturur. Bu çevrimsel çarpışmalar ve ayrılmalar sırasında okyanusal levhalar da bir şekilde anakaraların altına dalıp batarlar. Bu sırada çökeltilerde gömülen organik maddenin bir bölümü tektonik olarak anakaraya katılıp, kıyasal dağ kuşaklarını oluşturur. Bu da anakaranın kütlelerini artırır. İşte, bu süreçle deniz çökeltilerinde biriken organik maddenin büyük bir bölümü hareketsiz anakaralardaki hareketlerini sürdürürlerse, yeniden dalıp batırılacak, yeniden ısıtılacak ve oksitlenmenin yeniden başladığı yanardağ oluşumlarıyla, çok miktarda karbon dioksiti de içerecek şekilde yeniden atmosfere salınacaktır. Salınan karbon dioksit redüksiyon tepkimesine neden olacaktır. Bu tepkimenin sonucunda su oluşacağı için atmosferdeki serbest oksijen miktarı azalacaktır. İşte, tüm bu çevrimsel zincir süreçler, suyun biyolojik oksidasyonundan türeyen indirgeyici maddeleri de içeren gömülü organik maddeyi kendi süreçlerinin bir parçası durumuna getirir. Bu nedenle gömülü organik maddeler atmosferde oksijen birikmesinin bir göstergesi olur.

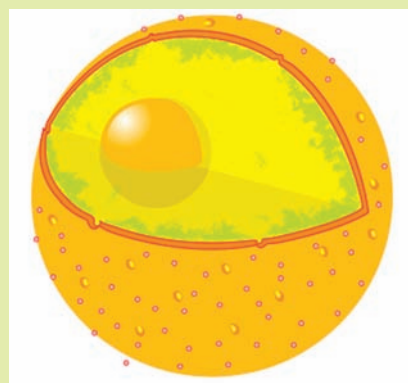
Anlatılanlar oksijenin atmosferde birikmeye başlamasının ve birikimdeki artışının, fotosentezle oksijenli solunum arasında milyonlarca yıl süren dengesiz bir durumun oluşması gerektiğini gösteriyor. Bu gereklilik oksijeni bol bir atmosferin oluşabilmesi için jeolojik zamanlar boyunca, solunum yapan canlılara göre çok daha fazla organik maddenin Dünya'nın derinliklerine gömülmüş olduğunu ortaya koyuyor.

Atmosferde oksijen birikmesinin anlaşılmasına yönelik önemli araştırmalar jeolojik zamanlarda olan bitenleri de çok önemsiyor. Bu nedenle araştırmacılar o olayları araştırmayı da ihmal etmiyorlar. Buradaki temel soru şu: Jeolojik zamanlar boyunca, Dünya atmosferindeki oksijen miktarı ne kadar iyi biliniyor? Henüz pek iyi bilindiği söylenemezse de değişik yöntemlere dayanan bu yöndeki araştırmalar bütün hızıyla sürüyor.

Bazı Kavramlar

Elektronların bir atom ya da molekülden ayrılmasını sağlayan kimyasal tepkimeye oksidasyon, oksitlenme ya da yükseltgenme deniyor. Bir elementin, kimyasal bir tepkimede elektron alması olayına da redüksiyon ya da indirgenme deniyor. Tepkimede elektron vererek yükseltgenen element karşısındakini indirgediği için indirgen, elektron alarak indirgenen element karşısındakini yükselttiği için yükseltgen olarak tanımlanıyor. "A → A⁺ + e⁻" Oksidasyon tepkimesini gösterir. A maddesi bir elektron verir. "B + e⁻ → B" ise indirgenme tepkimesini gösterir: B maddesi bir elektron alır.

Bilimsel sınıflandırmada ökaryotlar, bakteriler ve arkeler tüm canlıları



Ökaryot hücrelerdeki temel çekirdek yapısının şeması

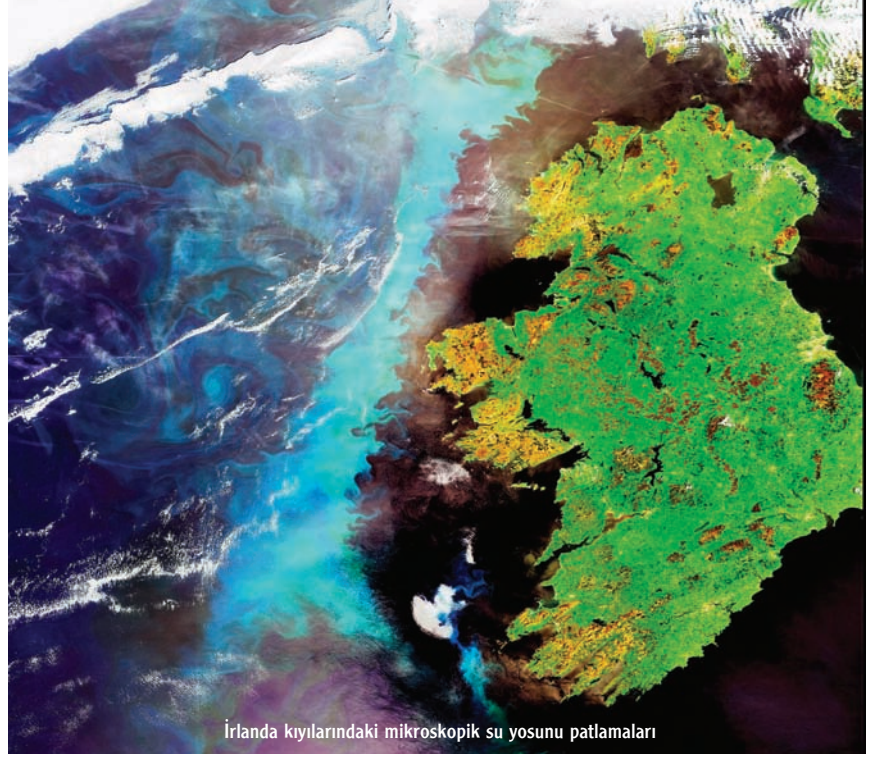
kapsayan üç ana grubu oluştururlar. Ökaryotların tanımlayıcı özelliği genetik malzemelerinin zarla çevrili bir ya da birkaç çekirdek içinde bulunmasıdır. Çekirdeğin yanı sıra, ökaryotların mitokondri ya da kloroplast gibi zarla çevrili çeşitli organelleri bulunur.

İzotop Verileri Ne Söylüyor?

Karbon izotop verilerinden çıkan sonuçlara göre Proterozoik eondaki oksijen artışıyla, bir hücreli suyunun büyük miktardaki artışı, biyolojik olarak uyuyor. Fitoplankton da denen bu suyunu, tıpkı manto katmanının soğumasından ve dalma-batmaların aşırılışmasından ileri gelen jeofiziksel düzenlemelerin yaptığı gibi organik maddenin deniz çökellerinde gömülmesini büyük ölçüde hızlandırmıştı. Başkalaşım kayalarının tarih boyunca tuttuğu kayıtlar, gezegen yavaş yavaş soğudukça Dünya'nın içlerindeki ısı akışının da azaldığını ve hidroksit içeren sulu minerallerin mantonun daha derinlerine dalıp batırıldığı yerlerde, iç sıcaklık değişiminin bir eşik değere ulaştığını gösteriyor. Bazı araştırmalar bu sürecin, büyük olasılıkla çok büyük miktarda yüzey suyunun mantonun derinliklerine taşınmasına, anakaraların da daha hızlı büyümesine öncülük etmiş olabileceğini gösteriyor. Oksijen izotoplarının tarihsel kayıtlarının da bu kuramı daha çok desteklediği vurgulanıyor.

Organik karbonun 750 milyon yıl boyunca büyük miktarlarda gömülmesi, atmosferdeki oksijenin büyük artışına yansımış görünüyor. Hatta bu oksijen artışının Kambriyen Patlaması'nı tetiklemiş olabileceği savunuluyor. Karbonifer'de gömülme verimliliğinin hızlanarak artışında kara bitkilerinin, özellikle de ağaçların, gezegenin gömülme üretkenliğini ikiye katlamasının etkisi olduğu düşünülüyor. Gerçekten de karbon ve kükürtün izotop kayıtlarına dayanan modeller, Dünya tarihinin bu döneminde atmosferdeki oksijen oranının %30'a kadar yükseldiğini gösteriyor.

Triyas Devri'ndeki yok oluşun sonlarında, oksijen miktarlarının çok daha düşük olduğu görülüyor: Şimdiki atmosferde bulunan oksijenin neredeyse %10-12'si kadar. 200 milyon yıl boyunca oksijen miktarları en düşüğe %10'dan en yükseğe %23'e kadar değişti. Sınırları görece dar olan bu değişim, yeryüzündeki organik maddenin gömülme ve oksitlenme oranlarının sıkı sıkı denetlendiğinin işareti kabul ediliyor. Gerçekten de eldeki veriler iki milyar yıl boyunca karbonatlardaki karbon 13 izotopunda uzun süreli düzensiz bir



İrlanda kıyılarındaki mikroskopik su yosunu patlamaları

artışı değil, gömülü organik maddenin az olması nedeniyle Dünya'nın mantonundaki inorganik karbon depolarının aşırı büyük olduğunu; organik karbon gömülmesinin de oksitlenme ve hava koşullarına bağlı ayrışmayla kabaca dengelendiğini gösteriyor.

Şimdilik Bilmediklerimiz

Yaşamın karmaşıklaşmasıyla oksijenin milyarlarca yıl boyunca duraksamalı çoğalışına ilişkin parçaları bir araya getirmeye uğraşan araştırmacılar, oksijen üreten canlıların ortaya çıkışıyla atmosferdeki oksijen düzeyinin yükselmesi arasındaki sürenin neden bu kadar uzun olduğunu bulmaya çalışıyorlar. Öte yandan da oksijenin atmosferde nasıl biriktiğine ilişkin bazı kuramları da ortaya koymaktan geri durmuyorlar. Ancak araştırmacıların işi pek kolay değil. Oksijenin atmosferin büyük bir parçası haline nasıl geldiği genel olarak anlaşılırsa da edinilen bilgiler, süreçteki birçok ayrıntıyı yanıtlamada şimdilik yetersiz. Oksijenli fotosentezde suyun ayrışmasını sağlayan mekanizma hâlâ anlaşılabilmiş değil. Atmosferdeki gaz miktarlarını neyin, nasıl kontrol ettiği de şimdilik bilinmeyenler arasında. Su ayrışma mekanizmasıyla ilgili sürecin önümüzdeki 10 yıl

içinde çözülebileceği öngörülüyor. Ancak gaz miktarlarının kontrolüyle ilgili sorunun açıklığa kavuşmasının daha çok zaman alacağına da kesin gözüyle bakılıyor. Çünkü araştırmacılar bu sorunun sınırlarını çizmenin bile başlı başına çok zor bir iş olduğu görüşünde birleşiyor. Yine de daha geliştirilmiş ve bütünleştirilmiş eksiksiz modellerle bu sorunun da günün birinde aydınlanacağı umuluyor.

Oksijen yaşamın sürdürülmesi için olmazsa olmaz bir öğe. Öte yandan Dünya'daki oksijenin varlığının sonsuza kadar süreceğine ilişkin bir garanti ne yazık ki yok. Atmosferdeki her bir oksijen molekülünün oluşabilmesi için yaklaşık 450 kilo Joule'lük foton enerjisine gereksinim var. Dört milyon yılda yenilenen oksijen moleküllerinin günümüz atmosferindeki sayısının 4×10^{19} dolayında olduğu göz önünde tutulursa, bu oluşumun ne kadar büyük bir enerjiye gereksinim duyduğu kolayca anlaşılır. Neyse ki doğa Dünya'daki yaşamın gelişmesi için inanılmaz bir enerji kaynağını sağlamayı sürdürüyor. Tersi bir durumu hiç kimse hayal bile etmek istemez, değil mi?

Serpil Yıldız

Kaynaklar
P. G. Falkowski, Y. Isozaki, The Story of O₂, Science, 24 Ekim 2008.
R. A. Kerr, The Story of O₂, Science, 17 Haziran 2005.
A. Zülal, O₂'nin Öyküsü, Bilim ve Teknik Dergisi, Eylül 2001.
www.wikipedia.org