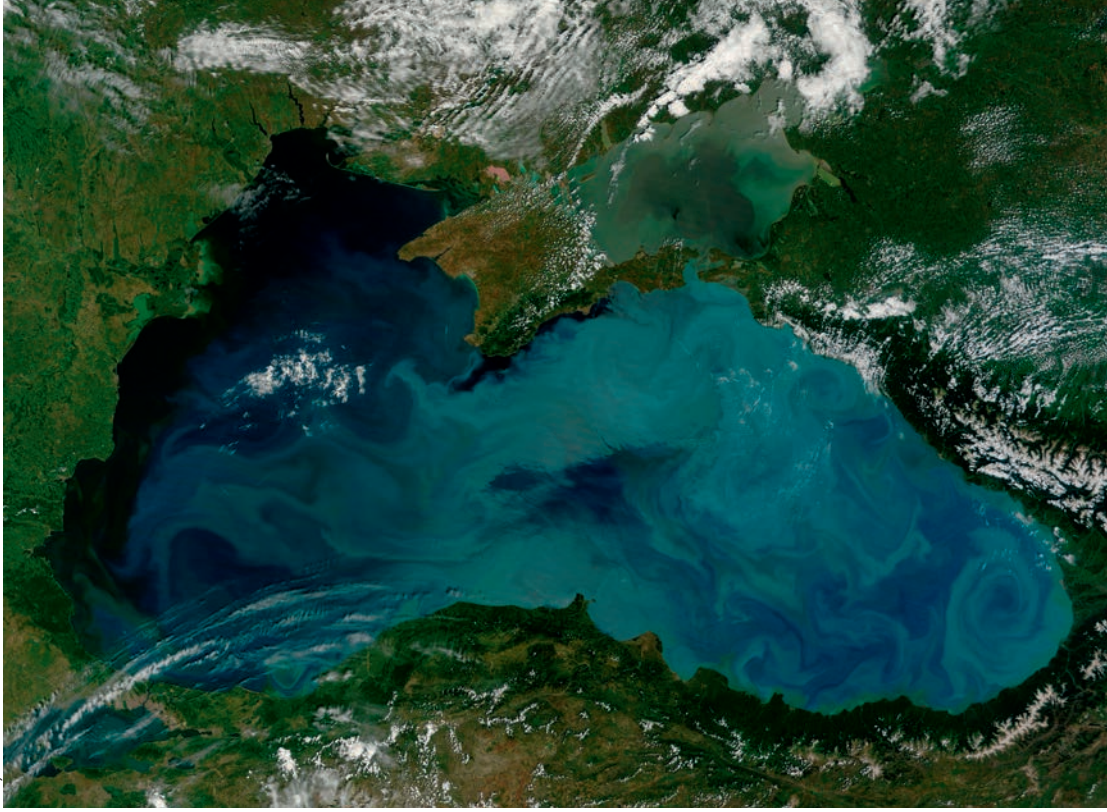


Demir Küresel Isınmaya Karşı Hipotezi Dünya Mühendisliği

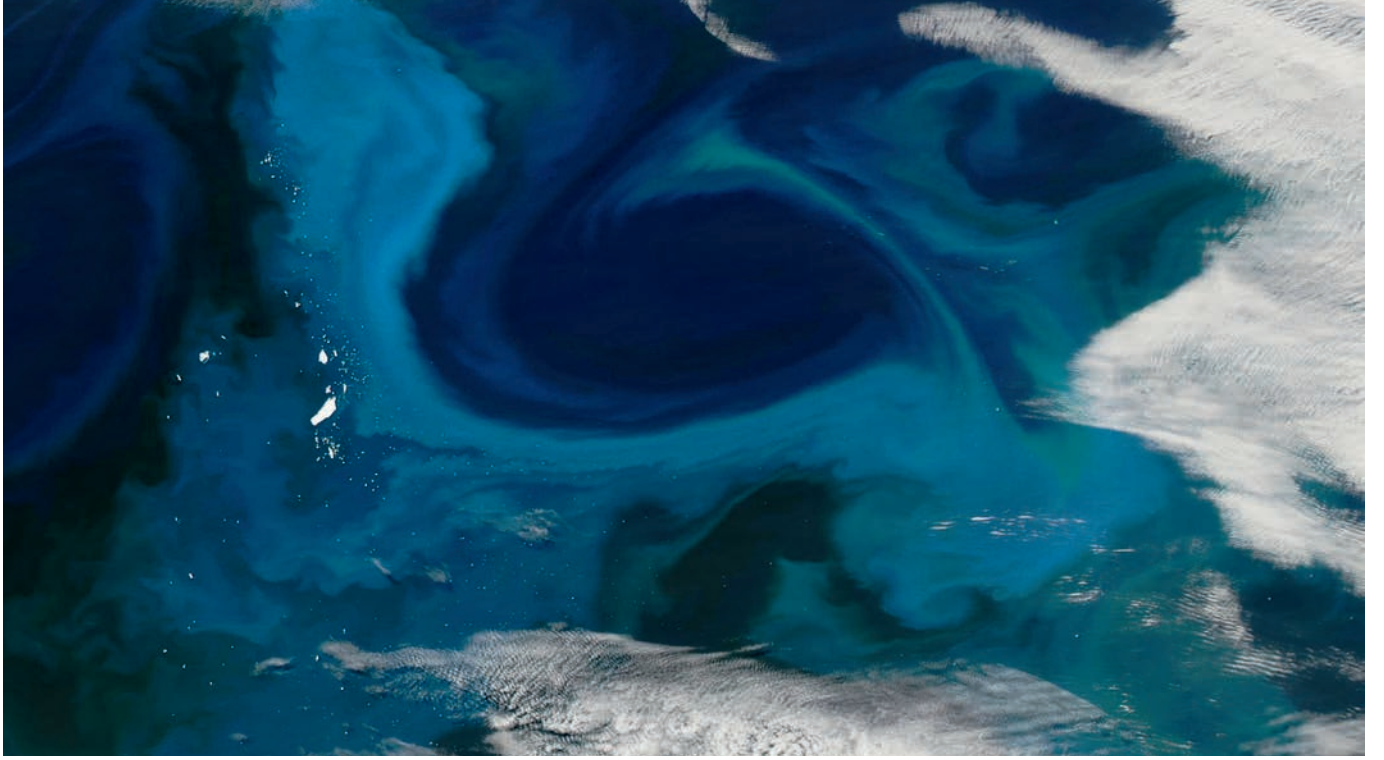


Karadeniz'de fitoplanktonların aşırı üremesi sonucu oluşan görüntü

Alamy

Dünyamızın atmosferi giderek ısınıyor. Küresel ısınma olarak adlandırılan bu olayın en büyük sebebi atmosferin bileşimindeki insan kaynaklı değişiklikler. Küresel ısınmaya sebep olan ve sera gazları olarak adlandırılan gazlardan biri de CO₂ (karbondioksit). Bilimsel çalışmalar küresel ısınma ile atmosferdeki CO₂ derişimi arasında doğrusal bir ilişki olduğunu gösteriyor. Buzul çağları sırasında atmosferdeki CO₂ derişimi litrede 200 miligrama kadar düşerken buzul çağları arasındaki dönemlerde litrede 280 miligrama kadar çıkıyor. Bu da buzul çağları sırasındaki ve buzul çağları arasındaki dönemler arasında atmosferdeki CO₂ miktarında 170 milyar tonluk bir değişim yaşandığını gösteriyor. Okyanuslardaki CO₂ miktarının atmosferdeki CO₂ miktarından 60 kat daha fazla olduğu düşünülürse, atmosferdeki CO₂ miktarında bu büyüklükte değişiklikler yaşanırken okyanuslardaki CO₂ miktarının da değişmesi kaçınılmaz. Atmosfer ve okyanuslar arasında CO₂ geçişini sağlayan iki süreç var. Bu süreçler fiziksel pompa ve biyolojik pompa olarak adlandırılıyor. Fiziksel pompa çözünürlük ile ilgili bir süreç. Atmosferdeki CO₂ miktarı arttığı zaman CO₂ basıncı da arttığı için daha fazla CO₂'nin okyanus sularında çözünmesi mümkün olur. Böylece atmosferdeki CO₂'nin bir kısmı okyanuslara geçer. Atmosferdeki CO₂ miktarı azaldığı zaman ise okyanuslardan atmosfere CO₂ geçişi olur. Biyolojik pompa ise okyanuslardaki canlı yaşamı ile ilgilidir. Metabolizmalarında CO₂ kullanan canlıların okyanuslarda nüfusu arttığı zaman sularda çözünmüş halde bulunan CO₂ derişimi azalır. Bunun sonucunda da atmosferden okyanuslara CO₂ çekilir.

Biyolojik pompayı kullanarak atmosferdeki CO₂ miktarını azaltmayı, böylece küresel ısınmayı kısmen de olsa engellemeyi hedefleyen ve "demir hipotezi" olarak adlandırılan bilimsel bir görüş var. Okyanusların bazı bölgelerinin besin bakımından zengin olmasına rağmen o bölgelerde fitoplanktonların (bitki benzeri mikroskobik canlılar) mümkün olan en fazla miktarda üremediği biliniyor. Dünyadaki oksijenin neredeyse yarısını üreten fitoplanktonların üremesini engelleyen ana nedenin okyanus sularındaki demir miktarının azlığı olduğu düşünülüyor. Fitoplanktonlar verimli bir şekilde fotosentez yapabilmek ve büyümek için demire ihtiyaç duyuyor. Okyanusbilimci John Martin tarafından ortaya atılan demir hipotezine göre okyanusları demir ile "gübreleyerek" fitoplanktonların biyokütlesi artırılabilir. Bu da biyolojik pompanın etkinliğini artırarak atmosferden okyanuslara CO₂ çekilmesine sebep olur. Antarktikadaki Vostok buzullarından alınan numuneler ile yapılan analizlerde, son buzul çağından kalma katmanlarda şimdikinden 20 kat daha fazla demire rastlanması da demir hipotezini destekliyor. 30.000 ton (+2) değerlikli demir kullanılarak bir milyar ton CO₂'nin okyanusların derinliklerine gömülmesinin mümkün olduğu düşünülüyor. Günümüzde yılda yaklaşık on milyar ton CO₂'nin atmosfere salındığı düşünülürse, okyanusları demir ile gübreleyerek yıllık CO₂ salınımının yaklaşık %10'unu okyanuslara aktarmak mümkün olabilir.



Güney Kutup Denizi'ndeki fitoplanktonların uydudan alınmış bir görüntüsü. Fitoplanktonlar açık mavi renkte görülüyor.

Demir Hipotezi Üzerine Yapılan Testler

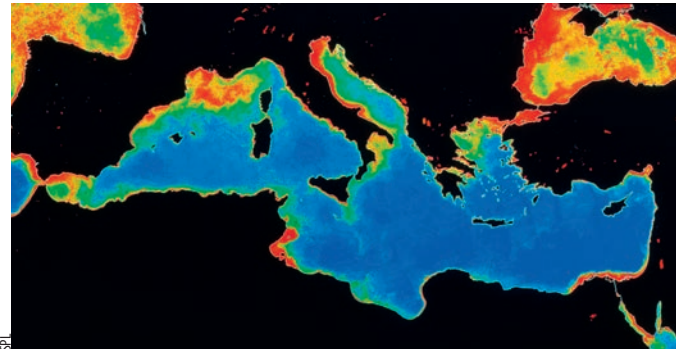
Laboratuvar Deneyleri: Geçmişte demir hipotezini sınamak amacıyla laboratuvar deneyleri yapıldı. Bu deneylerde okyanuslardaki doğal ortamlarından alınan fitoplanktonlar 30 litrelik kaplar içinde laboratuvar ortamına getirildi. Daha sonra bu kaplar demir ile gübrelendi. Sonuçlar demir hipotezini destekler nitelikte. Fakat laboratuvar deneyleri ile ilgili en önemli sorun, laboratuvar ortamının okyanus ortamını tamamen yansıtmaması. Tek başına laboratuvar deneyleri okyanusların demir ile gübrenmesinin yol açacağı sonuçları belirlemek için yeterli değil.

Açık Okyanuslarda Yapılan Deneyler: Demir hipotezini sınamanın en iyi yöntemi şüphesiz deneyleri fitoplanktonların doğal yaşama alanı olan okyanuslarda yapmak. Bugüne kadar yapılan ondan fazla okyanus deneyinin ilki 1993'te yapıldı. Yapılan ilk deney, okyanusa eklenen demirin sulardaki yayılımını takip etmekte yaşanan zorluklar sebebiyle başarısız olmasına rağmen, daha sonra yapılan deneyler demir hipotezini destekleyen sonuçlar verdi. Fakat açık okyanuslarda yapılan deneylerin sonuçları okyanusları demir ile gübremenin yol açacağı yararlı değişikliklerin, laboratuvar deneyleri ile öngörülenden çok daha az olduğunu gösteriyor.

Açık okyanuslarda başarılı bir şekilde deney yapabilmek için çok sayıda ön hazırlık yapılması gerekli. Bu ön hazırlıkların en önemlisi tabii ki deneyin yapılacağı konumun belirlenmesi. Deney nerede yapılırsa yapılsın sonuçta deneyin yapıldığı ortamda bir takım değişiklikler olacaktır. Önemli olan bu değişikliklerin kaynağının ortama bırakılan demir olduğundan emin olunmasıdır.

Bu sebeple deneyin yapılacağı ortamda fitoplanktonların üremesi için gerekli olan her şeyin (demir hariç) yeterli miktarda bulunması gerekir. Böylece fitoplanktonların biyokütlesinde meydana gelebilecek herhangi bir değişikliğin nedeninin demir ile yapılan gübreleme olduğu büyük ölçüde kesinleşmiş olur.

Deneyin yapılacağı ortamda olması gereken önemli bir diğer özellik ise koşulların ortama bırakılan demirin takibine uygun olmasıdır. Okyanuslarda her zaman var olan akıntılar sebebiyle sürüklenmeler olması kaçınılmaz. Demir hipotezini sınamak için yapılan açık okyanus deneylerinde takip için tepkimeye girme eğilimi çok düşük bir gaz olan SF_6 (sülfür florür) kullanılıyor. SF_6 'nın derişimini litrede 10^{-16} mol gibi çok düşük değerlerde bile ölçmek mümkün. Deneyler sırasında demirin takip ettiği rotayı belirlemek için demirle beraber ortama bırakılan SF_6 gazının yoğunluğu birkaç dakikada bir ölçülüyor.



Akdeniz'de ve Karadeniz'de fitoplankton biyokütlesinin dağılımı. Biyokütlenin en yoğun olduğu alanlar kırmızı renk ile gösteriliyor.



Alamy

Salp

Deneyin yapılacağı yer belirlenirken dikkat edilecek bir başka özellik de karışım tabakasının derinliği. Okyanusun yüzeyindeki suların serbestçe karışabildiği tabakanın derinliğine karışım tabakası derinliği deniyor. Bu derinliğin 90 metreden az olması gerekiyor. Aksi takdirde ortama bırakılan demirin derişimi aşırı derecede düşebilir. Ayrıca fitoplanktonların büyümeleri için gerekli olan ışığı yeterli miktarda alabilmeleri için de karışım tabakası derinliğinin fazla olmaması gerekiyor.

Büyük Okyanus'un ve Güney Kutup Denizi'nin belirli kısımları demir hipotezini sınamak için gerekli özelliklere sahip. 1993 yılında yapılan deneyler Güney Kutup Denizi'nin Yeni Zelanda ve Avustralya'nın güneyinde kalan kısımlarında gerçekleştirildi. Aralıklarla 5 tondan fazla demir sülfatın ($FeSO_4$) okyanus sularına bırakıldığı deneyde çok sayıda ve çeşitte ölçüm yapıldı. 13 gün süren deney sırasında yapılan ölçümler arasında sudaki CO_2 yoğunluğu, çözünmüş demir yoğunluğu, su sıcaklığı ölçümleri ve fitoplankton biyokütlesini tahmin etmek amacıyla yapılan klorofil *a* ölçümleri de var. Yapılan ölçümler, deney sırasında fitoplankton biyokütlesinin altı katına çıktığını ve okyanus sularından 2000 ton karbonun çekildiğini gösterdi. Bu sonuçlar okyanus sularını demir ile gübreleyerek biyolojik pompanın daha aktif hale getirilebileceğini gösteriyor.

Demir Hipotezinin Çalışması İçin Neler Gerekli?

Deney sonuçları umut verici, fakat hemen belirtelim ki bu sonuçlar okyanusları demir ile gübrelemenin atmosferdeki CO_2 miktarını azaltmakta tek başına işe yarayacağını göstermiyor.

Fitoplanktonların biyokütlesinin artması sonucunda okyanus sularından CO_2 çekilmesi yeterli değil. Asıl önemli olan, okyanus sularından çekilen karbonun akıbetinin ne olacağı. Şayet bu karbon okyanusların derinlerine gömülüp uzun süre orada kalırsa, ancak o zaman küresel ısınma açısından olumlu bir sonuç elde edilmiş olur. Aksi takdirde, okyanus sularından çekilen karbon birtakım süreçler sonunda yeniden serbest kalıp atmosfere karışsa, bütün emekler boşa gitmiş olur.

Yapılan ölçümler okyanusa atılan her 1 ton demire karşılık 200 ton karbonun okyanusların derinlerine gömüldüğünü gösteriyor. Bu ölçümlerden önce 1 ton demir için 100.000 ton karbonun okyanusların derinlerine gömüleceği tahmin edildiğine göre, sonuçların tam bir hayal kırıklığı olduğu söylenebilir. Bu durumun en önemli sebeplerinden biri fitoplanktonları yiyerek beslenen zooplanktonlar. Fitoplanktonların artan biyokütlesinin büyük bir kısmını tüketen bu canlıların kendileri de karideslere, balıklara ve balinalara kadar uzan bir beslenme zincirinin halkası. Bu sebeple fitoplanktonlar tarafından okyanus sularından çekilen karbonun büyük kısmı bir süre sonra yeniden CO_2 olarak atmosfere karışıyor. Ölü hücrelerle birlikte okyanusların derinliklerine gömülüp binlerce yıl orada kalacak olan karbondioksit miktarı çok az. Yine de karbonun bir kısmı atmosfere karışmasını onlarca yıl engelleyebilecek derinliklere ulaşıyor. Sulardan çekilen toplam karbonun %20-%50 kadarlık kısmına karşılık gelen bu miktarı da azımsamamak gerekir. Çünkü küresel ısınmaya karşı daha etkin yöntemler bulunana kadar bize zaman kazandırabilir.

Fitoplanktonların biyokütlesini artırmak amacıyla okyanusu demir ile gübrelerken diğer minerallerin miktarı da önemli olabilir. Deneylerde biyokütlesinde en fazla artış gözlemlenen bir fitoplankton türü olan diatomların, silisyumdan oluşan sert bir kabukları var. Okyanus sularındaki silisyum tükendiği zaman diatomların üremesi de duruyor.



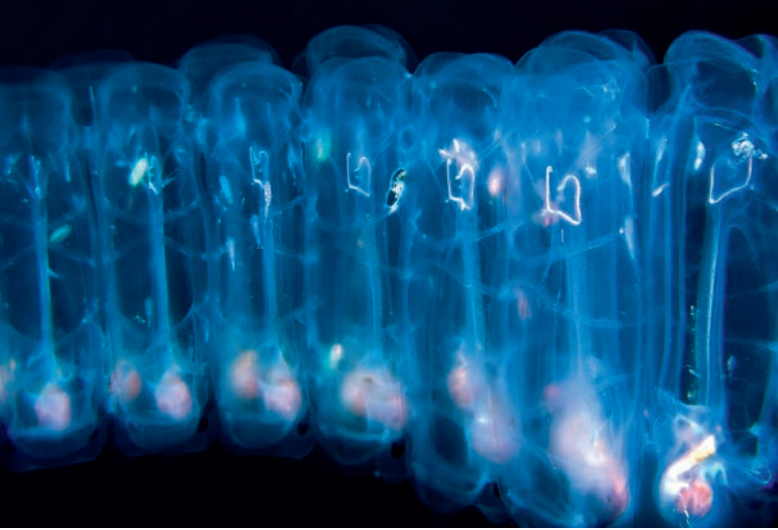
Alamy

Kızıl Deniz'de yüzen bir salp kolonisi

Daha fazla karbonun okyanusların derinliklerine gömülmesini sağlamak, bir tür tunikat (tulumlu hayvan) olan ve salp adı verilen organizmalar sayesinde de mümkün olabilir. Fitoplanktonları yiyen bu canlıların dışkıları karbon bakımından zengin. Dışkıları hızlı bir şekilde deniz dibine çöken salplar ile beslenen çok az sayıda canlı türü olması da bir avantaj.

Olası Yan Etkiler

Çok sayıda canlıya ev sahipliği yapan bir ortama, örneğin okyanuslara yapılacak bir müdahalenin etkilerinin sadece hedeflenen canlı türleri ile sınırlı kalması düşünülemez. Okyanustaki hem canlı hem de cansız nesnelere pek çok yan etki meydana gelecektir. Bu etkilerin bir kısmı yararlı olabileceği gibi bir kısmı da zararlı olabilir.



Salpler

Doğrudan Etkiler: Fitoplanktonların sayısının artması ile onların da içinde yer aldığı besin zincirlerindeki diğer canlıların da nüfusu artacaktır. Bu değişiklikler balık nüfusunun artması gibi olumlu yönde de olabilir, fakat besin zincirindeki diğer canlıların yaşamını olumsuz etkileyecek bir biçimde yosunların ya da denizanalarının nüfusu da artabilir. Yine de bugüne kadar yapılan deneylerde zararlı olabilecek bu tarz nüfus artışları gözlemlenmedi.

Fitoplankton biyokütlesindeki artışa bağlı olarak okyanustaki oksijen miktarının azalması da zararlı yan etkileri olabilecek başka bir değişim. Oksijen miktarındaki azalma sebebiyle okyanus ortamındaki balıklar, yumuşakçalar ve memeliler de dâhil olmak üzere pek çok canlı türü ölebilir.

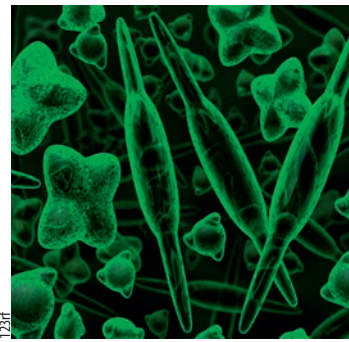
Dolaylı Etkiler: Okyanusları demir ile gübrelemenin dolaylı yollarla da çok sayıda yan etkisi olabilir. Fitoplanktonlar büyürken sadece demiri değil diğer mineralleri de kullanıyor. Dolayısıyla fitoplanktonların biyokütlesindeki artış sularındaki minerallerin aşırı derecede azalmasına sebep oluyor. Bunun sebep olacağı değişikliklerin -okyanus akıntıları dolayısıyla- ancak uzun süre sonra, üstelik de çok uzak mesafelerde ortaya çıkabilmesi de gözlem yapmayı zorlaştırıyor. Ayrıca oksijen miktarının azalması dolaylı olarak, yine kendileri de sera gazları olan azot oksitlerinin ve metanın (CH_4) üretilmesine sebep olabilir. 1999 yılında yapılan bir deneyde CO_2 miktarındaki azalma ile elde edilen soğuma etkisinin bu sebeple %10 kadar azaldığı tahmin ediliyor.

Fitoplanktonların aşırı üremesi okyanusların fiziksel özelliklerinde istenmeyen bazı sonuçlar doğurabilir. Örneğin güneş ışığını soğuran fitoplanktonlar yüzey sularının ısınmasına sebep olabilir. Ayrıca yüzeyleri kaplayan fitoplanktonlar yüzünden daha derinlerde yaşayan yosunlar ve mercanlar güneş ışığından mahrum kalabilir ki, bu da fotosentezin azalmasına sebep olur.

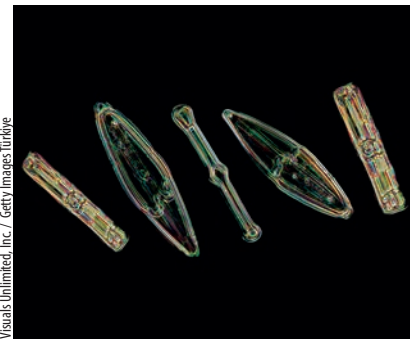
Yararlı olabilecek dolaylı bir etki ise fitoplanktonlar tarafından üretilen dimetilsülfürün ($(CH_3)_2S$) atmosfere karışması ile görülebilir. Dimetilsülfür moleküllerinin etrafında yoğunlaşan su moleküllerinin oluşturacağı bulutlar, Güneş'ten gelen ışığın bir kısmını geri yansıtarak biraz soğumaya sebep olabilir.

Olası Sonuçların Tahmin Edilmesi

Okyanusları demir ile gübrelemenin yukarıda özetlenen yan etkileri göz önüne alınınca, herhangi bir adım atılmadan önce her şeyin iyice hesaplanması gerektiği görülüyor. Gerçi şu ana kadar yapılan deneylerde görülen ciddi bir olumsuz yan etki yok. Fakat bugüne kadar yapılan deneylerin tamamı küçük çapta işlemler. Dünya'nın atmosferinde fark edilebilir bir etkiye neden olacak büyüklükte bir işlemden sonra neler olacağı hakkında bu deneylere bakarak bir yorum yapmak sağlıklı değil. Bir öngöründe bulunmak amacıyla yapılabilecek en basit şey, küçük işlemlerle başlamak sonra da giderek işlemleri büyütme olabilir. Bir noktada yapılan işlemlerin faydasından çok zararı olacağı anlaşılırsa, Dünya üzerinde ciddi bir zarara sebep olmadan işlemler durdurulabilir. Bu yaklaşımın problemleri yanı sıra yapılacak herhangi bir müdahalenin sonuçlarının uzun süre sonra da ortaya çıkabilecek olması. İşlemleri, yan etkilerin tamamı gözlemlenene kadar beklemeden büyütme riskli. Fakat o zaman da sorunu çözmek için geç kalınmış olabilir. Öyleyse yapılması gereken şey olası sonuçları herhangi bir işlem yapmaksızın tahmin etmek. Bu konuda birkaç şeyden yardım alınabilir.

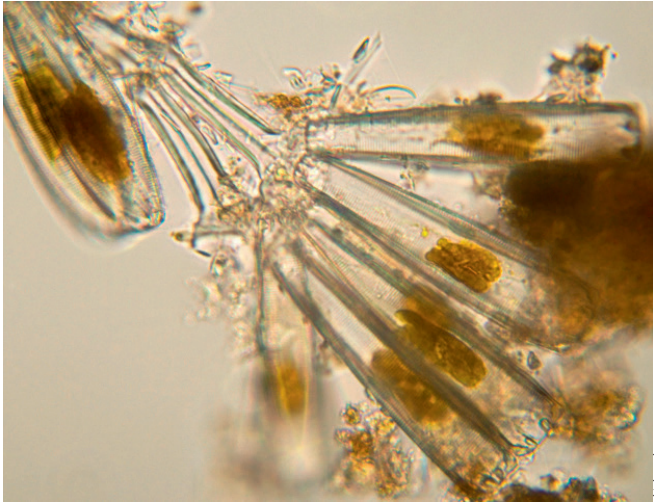


Diatomlar



Bilgisayar ile Yapılan Hesaplar: Olası sonuçları öngörmek konusunda bize yardımcı olabilecek şeylerden biri bilgisayar ile yapılan hesaplar. Bilgisayar modelleri bire bir gerçekliği yansıtmasa bile iyi bir fikir verebilir. Üstelik bilgisayar programlarında tüm parametreler istendiği gibi değiştirilebilir.

Yapılan hesaplar okyanusları demir ile gübrelemenin en etkin olacağı yerin Güney Kutup Denizi olacağını gösteriyor. Hesaplara göre Büyük Okyanus'a yapılacak bir müdahale atmosferdeki CO₂ derişiminde ancak litrede 4 miligramlık bir düşüş sağlanabilir. Güney Kutup Denizi'ne yapılacak bir müdahalenin ise litrede 70 miligramlık bir düşüşe sebep olma potansiyeli var. Güney Kutup Denizi'nin bu kadar büyük bir potansiyele sahip olmasının nedeni sulardaki besin miktarının, demir miktarının az olduğu diğer denizlerden beş kat fazla olması. Fakat Güney Kutup Denizi ile ilgili bazı sorunlar da var. Buz kütleleri, şiddetli fırtınalar ve yılın altı ayının karanlık olması bunlardan bazıları. Bu nedenle gerçek bir müdahale sonucunda CO₂ miktarının beklenenden daha az düşmesi olası.



thinkstock

Diatom kolonisi

Buzullardan Alınan Veriler: Tahmin yapmak için geçmişte doğal olarak gerçekleşmiş olayların izlerine bakmak da yararlı olabilir. Antarktika'daki buzul çağlarından kalma katmanlarda yüksek miktarda demire rastlandığını söyledik. Önceleri bu katmanlardaki demirin karalardan rüzgâr ile taşındığı düşünülüyordu. Fakat son zamanlarda yapılan araştırmalar Güney Kutup Denizi'ni gübreleyen demirin Güney Amerika kıtasından kopan buzullardan geldiğini gösterdi. Bu bilgi gübreleme nasıl yapılırsa daha iyi sonuç alınır sorusunu akla getiriyor. Demir rüzgârla taşındığında olduğu gibi yukarıdan geldiğinde mi, eriyen buzullarla taşındığında olduğu gibi yüzeyden geldiğinde mi, yoksa besin bakımından zengin sular ile okyanus derinliklerinden geldiğinde mi daha etkili olur? İleride yapılabilecek deneyler ile bu soruya bir yanıt bulmak, yapılacak işlemlerin etkinliğini artırmak açısından hayli önemli.

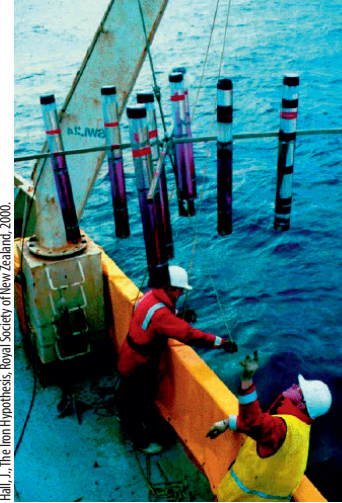
Doğal Olarak Meydana Gelen Katkılar: Okyanusların demir ile gübrelenmesi zaten doğal olarak da gerçekleşen bir olay. İlginç olan, doğal gübrelemenin insan eli ile yapılan gübrelemeden çok daha verimli olması. Güney Afrika ile Avustralya'nın arasında, yaklaşık olarak ortada bulunan Kerguelen Adası civarında doğal olarak meydana gelen bir gübreleme olayını inceleyen araştırmacılar doğal gübrelemenin yapay gübrelemeden 50 kat daha verimli olduğunu gözlemledi. Bunun nedeni de doğal gübreleme sırasında akıntılar ile derinlerden gelen sulardaki demirin, fitoplanktonlar tarafından kullanılmaya çok daha uygun bir formda olması. Deneyler sırasında kullanılan inorganik formdaki demir çabucak oksitleniyor ve fitoplanktonlar için kullanışsız olan bu bileşikler dibe çöküyor. Halbuki doğal gübreleme sırasında, demir organik moleküllere bağlı olarak kullanıma çok daha uygun bir biçimde geliyor. Bu da gübrelemenin etkinliğinin bazı durumlarda 100 kata kadar artmasına neden oluyor.

Sonuç

Küresel ısınma Dünyamızı tehdit etmeye devam ediyor. Sorunun en basit çözümü tabii ki sera gazlarının üretimini ve atmosfere salımını azaltmak. Fakat konunun taraflarının buna pek de gönüllü olduğu söylenemez. Demir hipotezi okyanusları demir ile gübreleyerek soruna kısmen de olsa bir çözüm getirmeyi vaat ediyor. Demir bakımından fakir olan suların gübrelenmesi ile fitoplanktonların biyokütlesinin arttığı bir gerçek. Fakat yapılan müdahalelerin gerçekten işe yaraması için, fitoplanktonlar tarafından suların çekilen karbonun uzun süre atmosfere geri dönmemesini de sağlamak gerekiyor. Şu ana kadar yapılan deneylerin yaklaşık sadece %25'inde okyanus sularından çekilen karbonun derinlere gömüldüğünün belirlenmesi bu bakımdan umut kırıcı. İleride yapılacak çalışmalar ile okyanus sularından çekilen karbonun uzun süre atmosferden uzak tutulmasını sağlayacak yöntemler geliştirilebilirse, küresel ısınma sorununa tamamen olmasa bile daha iyi bir çözüm bulunana kadar zaman kazanmak için demir hipotezinden yararlanılabilir.

Kaynaklar

- Hall, J., *The Iron Hypothesis*, Royal Society of New Zealand, 2000.
- Powell, H., Fertilizing the Ocean With Iron <http://www.whoi.edu/oceanus/printArticle.do?id=34167>
- Powell, H., Will Ocean Iron Fertilization Work? <http://www.whoi.edu/oceanus/printArticle.do?id=35609>
- Powell, H., What are the Possible Side Effects <http://www.whoi.edu/oceanus/printArticle.do?id=35668>
- Powell, H., Lessons from Nature, Models, and the Past <http://www.whoi.edu/oceanus/printArticle.do?id=35746>

Hall, J., *The Iron Hypothesis*, Royal Society of New Zealand, 2000.

Demir hipotezini sınamak için yapılan deneylerden birinde araştırmacılar suda batan parçacıkları ölçmek için kullanılan bir aleti yerleştiriyor.