DENİZ YOSUNU Madenciliği

Değerli Mineralleri Deniz Yosunları ile Elde Etmek

Dr. Tuba Sarıgül [*TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*

Özellikle fosil yakıtlardan temiz enerji kaynaklarına geçiş sürecinde kritik öneme sahip bazı elementlere olan ihtiyaç, her geçen gün artıyor. Güncel araştırmalar, deniz yosunlarının bu değerli mineralleri yapılarında biriktirebildiğini gösteriyor.
Peki, bu elementlerin deniz yosunları kullanılarak çevre dostu bir şekilde üretilmesi mümkün olabilir mi?

Velvetfish / iStock

Günümüzde lityum, bakır, nikel, kobalt, nadir toprak metalleri, platin grubu metalleri gibi elementler, birçok teknolojik uygulama için kritik öneme sahip. Örneğin elektrikli araçların, taşınabilir elektronik cihazların en önemli bileşenlerinden biri olan bataryaların üretimi için lityum, nikel, kobalt ve manganez elementlerine ihtiyaç duyuluyor. Elektrik enerjisinin taşınmasında çok miktarda bakır ve alüminyum kullanılıyor. Nadir toprak metalleri ise rüzgâr türbinlerinde ve elektrik motorlarında kullanılan kalıcı mıknatıslar için gerekli.

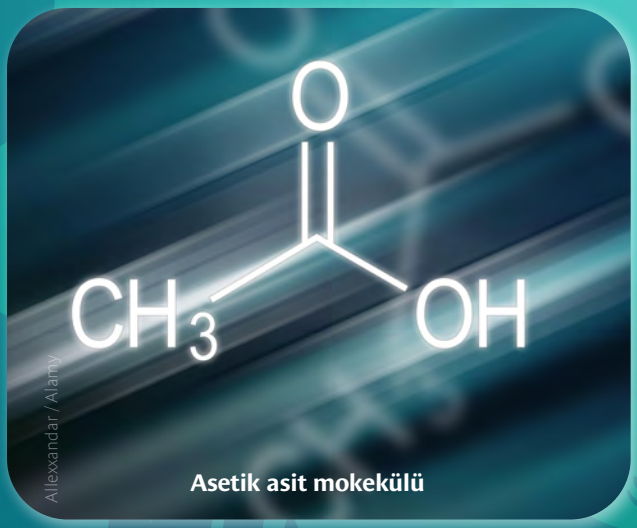
Kritik öneme sahip bu elementlere olan ihtiyaç ise her geçen gün artıyor. Temiz enerji sistemlerinin yaygınlaşması, bu talebin artmasının ana nedenlerinden biri. Örneğin 2023 yılında güneş ve rüzgâr enerjisi santrallerinin kurulumunda %70 oranında artış oldu. Ayrıca küresel ölçekteki lityum ihtiyacı %30 yükseldi. Ancak bu elementler, talebi karşılayacak düzeyde üretilemiyor. Ayrıca nadir toprak metallerinin üretimi, az sayıda ülke tarafından gerçekleştiriliyor. Örneğin nadir toprak metalleri açısından zengin yeraltı kaynakları, büyük oranda Çin'de bulunuyor ve bu elementlerin üretimi de %77 oranında Çin tarafından gerçekleştiriyor. Bu durum, ekonomik olarak değerli elementlerin arz güvenliğinde yani bu elementlerin kesintisiz bir şekilde ulaşılabilir olmasında sorunlara neden oluyor. Dolayısıyla kritik öneme sahip elementlerin sürdürülebilir ve çevreci yollarla elde edilmesi, son derece önemli. Bu amaçla kullanılan yöntemlerden biri de biyomadencilik uygulamaları.

Enerjinin üretimi, depolanması ve kullanımına yönelik yüksek etki potansiyeline sahip yenilikçi projeleri finanse eden bir kuruluş olan ABD Enerji Bakanlığı'na bağlı Enerji İleri Araştırma Projeleri Ajansı (ARPA-E), yakın zamanda deniz yosunlarının biyomadencilik uygulamalarında kullanımına (bu yöntem, "deniz yosunu madenciliği" olarak isimlendiriliyor) yönelik 3 farklı projeyi destekleme kararı aldı.

Peki deniz yosunları, endüstriyel olarak kritik öneme sahip elementlerin elde edilmesinde bir kaynak olarak kullanılabilir mi? Bu soruyu yanıtlamak için ilk olarak deniz yosunlarının, çeşitli maddeleri yapısında nasıl biriktirdiğini açıklayalım.

Deniz makroalgleri olarak da bilinen deniz yosunları, çok hücreli ve makro ölçekteki canlılardır. Fotosentez süreci ile kendi besinlerini kendi üretebilen deniz yosunları, deniz ekosistemlerindeki besin zincirinin temelini oluştur. Deniz yosunlarından besin, biyoyakıt, ilaç etkin maddesi gibi ekonomik değeri olan maddeler elde edilir. Deniz yosunlarının kimyasal bileşimi ise türlerine ve çevresel koşullara göre değişebilir.

Deniz yosunları, kahverengi algler (*Phaeophyta*), kırmızı algler (*Rhodophyta*) ve yeşil algler (*Chlorophyta*) olarak üç gruba ayrılır. Deniz yosunlarının hücre duvarının yapısı ve kimyasal bileşimi, farklı metallerin yüzeylerine tutunmasına imkân verir. Örneğin kahverengi makroalglerin hücre duvarında karboksil ve sülfat, kırmızı ve yeşil makroalglerin hücre duvarında ise amino, hidroksil, sülfat ve karboksil fonksiyonel grupları bulunur.



Allexxandar / Alamy

Asetik asit mokekülü

Kimyasal bir moleküldeki fonksiyonel grup, moleküldeki diğer atomlardan farklı olarak moleküle belirli kimyasal özellikler kazandıran atom grubudur. Örneğin sirkeye asidik özellik kazandıran asetik asit bileşiğindeki karboksil grubu, fonksiyonel bir gruptur ve asetik asit bileşiğinin asit özelliği göstermesini sağlar.

Deniz suyundaki artı yüklü iyonlar yani katyonlar, makroalglerin hücre duvarındaki eksi yüklü fonksiyonel gruplarla etkileşim kurarak yüzeylerindeki uygun yerlere tutunabilir.

İyon hâlindeki metal atomlarının canlı organizmaların yüzeyinde tutunması "biyobirikme", canlı organizmalardan elde edilen organik maddelerin (kuru biyokütle olarak isimlendirilir) yüzeyinde tutunması ise "biyoadsorpsiyon" olarak isimlendirilir. Büyüme hızı, pH yani asitlik derecesi, sıcaklık ve tuzluluk derecesi, elementlerin makroalglerin yapısında birikme ya da yüzeyinde tutunma sürecini etkileyen faktörlerdendir.

Deniz marulu olarak da bilinen *Ulva lactuca*, bir yeşil alg türüdür.

Geçmişte biyobirikme ve biyoadsorpsiyon yöntemlerinin atık sulardaki cıva gibi ağır metallerin uzaklaştırmasında kullanılmasına yönelik yapılan araştırmalar bulunuyor. Örneğin sonuçları 2020 yılında *Journal of Environmental Management* dergisinde yayımlanan bir araştırmada, altı farklı tür makroalgin (*Ulva lactuca, Ulva intestinalis, Fucus spiralis, Fucus vesiculosus, Osmundea pinnatifida ve Gracilaria sp.*) deniz suyundaki itriyum (Y), lantan (La), seryum (Ce), praseodim (Pr), neodim (Nd), evropiyum (Eu), gadolinyum (Gd), terbiyum (Tb) ve disprosiyum (Dy) nadir toprak metallerinin uzaklaştırılmasındaki etkinliği ölçüldü. Araştırmada hazırlanan deniz suyu örneklerinde bu dokuz nadir toprak metalinin derişimleri, 10 mikrogram/litre ilâ 500 mikrogram/litre arasındaydı. Sonuçta deniz marulu olarak da bilinen *Ulva lactuca* türünün deniz suyu örneklerindeki nadir toprak metallerinin tümü üzerinde etkili olduğu ve bu elementleri çözeltiden en az %60 oranında uzaklaştırdığı belirlendi. Ayrıca nadir toprak metallerini biriktiren makroalglerin metabolik faaliyetlerini devam ettirdiği yani bu elementlerin deniz yosunları üzerinde toksik etki göstermediği anlaşıldı.

Sonuçları *Groundwater for Sustainable Development* dergisinde yayımlanan araştırmada ise sulu çözeltilerdeki lantan (La) ve seryum (Ce) iyonlarının, deniz yosunlarından elde edilen organik maddeler kullanılarak biyoadsorpsiyon süreci ile geri kazanılabileceği gösterildi. Araştırmada bir kahverengi alg türü olan *Cystoseira indica*'dan elde edilen kuru biyokütle kullanıldı. Lantan ve seryum iyonlarının kuru biyokütle tarafından adsorbe edilmesinin nasıl gerçekleştiğini belirlemeye yönelik analizler, makroalgin hücre duvarında bulunan sülfat, karboksil, hidroksil ve amid fonksiyonel gruplarının bu süreçte temel rolü olduğunu gösterdi. Araştırmacılar, çalışmanın bir sonraki aşamasında geliştirdikleri yöntemin atık su örneklerinden metalleri uzaklaştırmadaki verimini değerlendirmeyi planlıyor.

Deniz yosunlarının çeşitli elementleri yapısında biriktirebilme özelliğinin keşfedilmesi, farklı doğal kaynaklardaki nadir toprak metallerinin elde edilmesinde deniz yosunlarının nasıl kullanılabileceği konusunda geliştirilen projelere öncülük etti.

Deniz yosunu madenciliği projelerinden biri olan ve Aralık 2023'te tamamlanan UNCLE-SAM isimli projede Pasifik Kuzeybatı Ulusal Laboratuvarından araştırmacılar, deniz suyunda bulunan kritik elementleri deniz yosunları aracılığıyla elde etmeyi amaçladı.

Okyanuslar, nadir toprak metalleri ve platin grubu metalleri içeren mineraller açısından zengindir. Ancak bu elementler, deniz suyunda çok düşük derişimlerde bulunur. Deniz suyundaki nadir toprak metallerinin kaynağı ise çoğunlukla silikat mineralleridir.

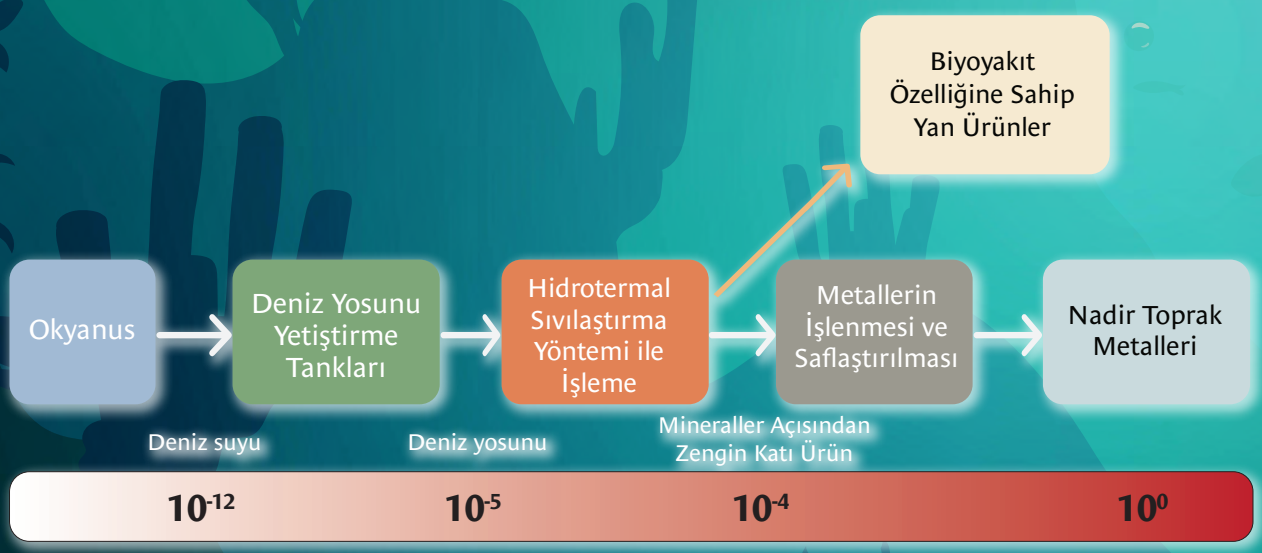
Araştırmacılar, Pasifik Okyanusu'nun kuzeydoğusunda yer alan Salish Denizi'ndeki iki bölgeden deniz suyu örnekleri aldı. Analizler, deniz suyu örneklerinde nadir toprak metallerinin derişiminin genellikle ppb yani milyarda bir birim seviyesinde olduğunu; evropiyum (Eu), terbiyum (Tb), holmiyum (Ho), tulyum (Tm) ve lütesyum (Lu) gibi elementlerin ise trilyonda bir birim kadar düşük seviyelerde bulunduğunu tespit etti.

Deneylerde *Ulva expansa* türü bir yeşil alg kullanıldı. Seçilen deniz yosunları, okyanus suyu ile doldurulmuş havuzların içindeki sıcaklık, pH, ışık yoğunluğu gibi koşulların kontrol edilebildiği ortamlarda yetiştirildi. Sonuçta deniz yosunlarının, okyanus suyundaki derişimleri ppb yani milyarda bir birim seviyesinde olan nadir toprak metallerini yapılarında biriktirerek ppm yani milyonda bir birim seviyesine kadar zenginleştirebildiği belirlendi. Örneğin deniz yosununun yapısında biriktirdiği seryum derişiminin, elementin deniz suyundaki derişiminin yaklaşık 40.000 katı olduğu anlaşıldı.

organik moleküllerin parçalanmasının sağlandığı bu yöntem ile deniz yosunları işlemden geçirildiğinde, mineraller açısından zengin katı ürün ayrılırken enerji kaynağı olarak kullanılabilecek biyoyakıtlar ve biyoplastik üretiminde kullanılabilecek ham maddeler üretilebiliyor. Mineraller açısından zengin ürün ise daha sonra cevher işleme yöntemleri ile saflaştırılarak nadir toprak metalleri elde edilebiliyor.

ARPA-E'nin deniz yosunu madenciliği kapsamında desteklediği projelerden birinde ise nadir toprak metalleri yatakları bulunan bölgedeki sulardan deniz yosunları aracılığı ile elementlerin elde edilmesi amaçlanıyor. Araştırma, Alaska'nın güneybatısında yer alan Bokan Dağı bölgesinde yürütülüyor. Bu bölge, özellikle "ağır nadir toprak metalleri" olarak isimlendirilen metaller (itriyumun yanı sıra atom numarası 64-71 arasında olan lantanitler) yönünden zengin yeraltı kaynaklarına ev sahipliği yapıyor.

Deniz Yosunu Madenciliği Yöntemi ile Deniz Suyundaki Nadir Toprak Metallerinin Zenginleştirilerek Ayrılması



Nadir Toprak Metallerinin Derişimi

Araştırmacılar, deniz yosunlarının yapılarında biriktirdiği kritik öneme sahip metalleri ayırmak için "hidrotermal sıvılaştırma" adı verilen bir yöntem kullandı. Yüksek sıcaklıkta ve basınçta su kullanılarak

Alaska Fairbanks Üniversitesi tarafından yürütülen araştırmada Balıkçılık ve Okyanus Bilimleri Fakültesinden Schery Umanzor ve arkadaşları, bölgede doğal olarak bulunan deniz yosunlarını kullanmayı

planlıyor. Bu amaçla ilk olarak bölgeden farklı deniz yosunu örnekleri toplandı. Toplanan deniz yosunu türlerinin kimyasal yapıları incelenerek nadir toprak metallerini yapılarında biriktirme kapasiteleri belirlenebilecek. Sonrasında ise biyobiriktirme sürecinin maksimum verimle gerçekleştirilmesi amacıyla seçilen deniz yosunu türleri için en uygun yetiştirme koşullarının tespit edilmesi hedefleniyor.

Alaska'daki Bokan Dağı'nda nadir toprak metalleri açısından zengin yeraltı kaynakları bulunuyor.

Araştırmacılar, projenin uygulama alanı olarak nadir toprak metallerine yönelik madencilik çalışmaları yapılan bir bölge seçti. Çünkü araştırmanın amaçlarından biri de nadir toprak metallerinin erozyon sonucu akarsular ve yağmur suları aracılığıyla dağ sırtlarından okyanuslara nasıl taşındığının anlaşılması. Bu kapsamda bölgedeki koyların ve kıyı şeridinin nadir toprak metalleri içeriği açısından haritalandırılması amaçlanıyor. Nisan 2024'te başlayan projenin Mart 2026'da tamamlanması planlanıyor.

Deniz yosunlarının, kritik öneme sahip elementlerin elde edilmesinde bir kaynak olarak kullanılıp kullanılamayacağıyla ilgili en önemli sorun, yöntemin verimliliği ile ilgili. Deniz yosunlarının bu elementleri yapılarında pratik uygulamalarda kullanılabilecek kadar yüksek derişimde biriktirip biriktiremeyecekleri ve deniz yosunlarının yapısındaki biriken elementlerin yüksek verimle alınıp alınamayacağı, henüz cevabı netleşmeyen sorular arasında yer alıyor. ■

Kaynaklar

International Energy Agency, Global Critical Minerals Outlook 2024, IEA, Paris, 2024.

Pinto, J. ve ark., "A green method based on living macroalgae for the removal of rare-earth elements from contaminated waters", *Journal of Environmental Management*, Cilt 263, Makale no: 110376, 2020.

Henriques, B. ve ark., "Study on bioaccumulation and biosorption of mercury by living marine macroalgae: Prospecting for a new remediation biotechnology applied to saline waters", *Chemical Engineering Journal*, Cilt 281, s. 759–770, 2025.

Pinteus, S. ve ark., "Seaweed's Role in Energetic Transition—From Environmental Pollution Challenges to Enhanced Electrochemical Devices", *Biology*, Cilt 11, Sayı 3, Makale no: 458, 2022.

Edmundson, S. J. ve ark., "Unrealized Critical Lanthanide Extraction from Sea Algae Mining (UNCLE SAM): Domestic production of critical minerals from seawater", Pacific Northwest National Laboratory, 2024.

https://www.newscientist.com/article/2433063-can-seaweed-provide-the-minerals-we-need-for-clean-energy/

https://hakaimagazine.com/news/what-the-heck-is-seaweed-mining/

https://arpa-e.energy.gov/technologies/exploratory-topics/algal-mining#

https://www.uaf.edu/news/uaf-led-project-will-look-for-rare-earth-elements-in-se-alaska-seaweed.php