

59	140.91	08	16.00	58	140.12	16	32.07	16	32.07
Pr	O	Ce	S	S					
Praseodymium	Oxygen	Cerium	Sulfur	Sulfur					

2026-9. SAYI

Varlık: Olasılıktan
Entropiye

Kimyasal Bağlar Hiç
Kopmasaydı Bir Evren
Mümkün Müydü?

Dünyanın En Eski
Eczanesi: Doğanın Gizli
Laboratuvarı

Deniz Yosunundan
Biyoplastik Üretimi

Doğadan İlham Alan
Güneş Koruyucular

Doğanın Görünmeyen
Mimarisi: Kimya

Doğanın Dijital Kalbi:
Kumdan Çiplere
Kimyasal Yolculuk

Ekosistemin
Sessiz Dili

Yeşil Enerjinin Kirliliği
Sırrı: Lityum İyon
Piller

Görünmez Plastik:
Mikroplastiklerin
Kimyasal Yolculuğu Ve
Besin Zinciri

Metal-Organic
Frameworks (MOF):
Geleceğin Gözenekli
Malzemeleri

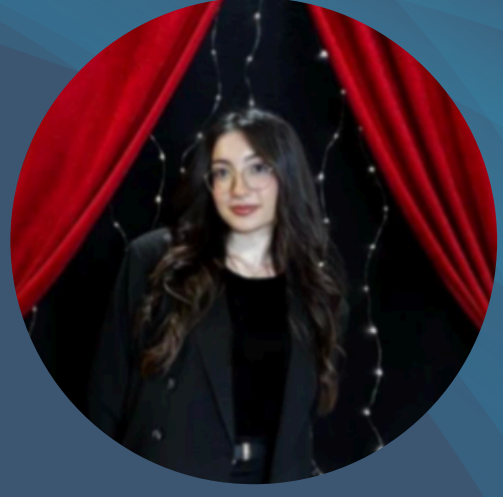
Geoengineering: İklim
Krizi Durdurulabilir
Mi?

Kuraklık Ve
Endüstriyel Su
Yönetimi

Doğanın Kuantum
Süperiletkeni: Fenna-Matthewa-
Olson Kompleksi Enerjiyi
Nasıl Kusursuz Taşıyor?



Halime Dağ



Zeynep Eslem Aktaş



Sümeyye Özbay



Sude Şahin



Ayça Dalkılıç



Buğra Eren Yazıcı



Beyzanur Bulut



Arda Keçe



Furkan Bekkaya



İlbilge Çetin



Ceren Uyar



Helin Uygun



Bahar Ünal



Halide Türkkal

İÇİNDEKİLER:

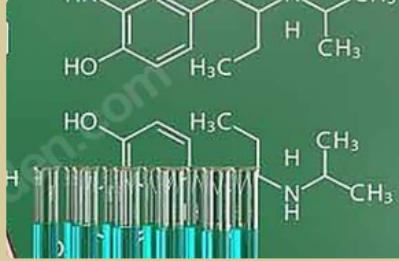
Doğanın Görünmeyen Mimarisi: Kimya	1
Varlık: Olasılıktan Entropiye	2
Kimyasal Bağlar Hiç Kopmasaydı Bir Evren Mümkün Müydü?	6
Dünyanın En Eski Eczanesi: Doğanın Gizli Laboratuvarı	9
Doğadan İlham Alan Güneş Koruyucular	13
Doğanın Dijital Kalbi: Kumdan Çiplere Kimyasal Yolculuk	15
Yeşil Enerjinin Kirli Sırrı: Lityum İyon Piller	18
Geoengineering: İklim Krizi Durdurulabilir Mi?	20
Kuraklık Ve Endüstriyel Su Yönetimi	24
Metal-Organic Frameworks (MOF): Geleceğin Gözenekli Malzemeleri	27
Deniz Yosunundan Biyoplastik Üretimi	29
Görünmez Plastik: Mikroplastiklerin Kimyasal Yolculuğu Ve Besin Zinciri	31
Doğanın Kuantum Süperiletkeni: Fenna-Matthewa-Olson Kompleksi Enerjiyi	
Nasıl Kusursuz Taşıyor?	34
Ekosistemin Sessiz Dili	40
Çengel Bulmaca	44
0 Kelvin Espriler	46
Referanslar	47



Doğanın Görünmeyen Mimarisi: Kimya

Bir ormanda yürürken ağaçların büyümesini, yaprakların yeşermesini ya da bir nehrin akışını görürüz. Ancak çoğu zaman bu olayların arkasında çalışan görünmez sistemi fark etmeyiz. Aslında doğa, sürekli çalışan dev bir kimya laboratuvarı gibidir. Atomlar ve moleküller arasındaki sayısız etkileşim, yaşamın devamlılığını sağlayan temel süreçleri oluşturur.

Kimya, maddelerin yapısını ve dönüşümlerini inceleyen bilim dalı olarak doğadaki bu karmaşık düzeni anlamamızı sağlar. Canlıların yaşamını sürdürebilmesi, gezegenimizin dengesi ve ekosistemlerin işleyişi büyük ölçüde kimyasal reaksiyonlara bağlıdır.



Yaşamın temelinde kimya vardır!

Doğadaki en önemli kimyasal süreçlerden biri fotosentezdir. Bitkiler, güneşten gelen enerjiyi kullanarak karbondioksit ve suyu glikoza dönüştürür. Bu reaksiyon yalnızca bitkilerin büyümesini sağlamaz; aynı zamanda ekosistemdeki diğer canlılar için temel enerji kaynağını oluşturur. Başka bir deyişle, dünyadaki yaşamın büyük bölümü bu kimyasal dönüşüme bağlıdır.

Canlıların enerji üretmesini sağlayan hücresel solunum da benzer şekilde kimyasal reaksiyonlara dayanır. Hücreler, besin moleküllerini parçalayarak enerji açığa çıkarır ve bu enerji yaşam faaliyetlerinin devam etmesini sağlar. Bu süreçler doğadaki enerji akışının sürekliliğini mümkün kılar.



Doğanın dengesi ve kimyasal döngüler

Kimya yalnızca canlıların içinde değil, gezegenimizin tamamında etkili olan bir bilimdir. Atmosferdeki gazların dengesi, okyanusların kimyasal bileşimi ve toprakta bulunan mineraller yaşam için büyük önem taşır. Özellikle karbon, azot ve su döngüleri gibi biyokimyasal döngüler, doğadaki maddelerin sürekli olarak dönüşmesini sağlar. Bu döngüler sayesinde doğa, kaynaklarını sürekli yenileyebilen dinamik bir sistem hâline gelir.

Kimya ve insanlık

İnsanlık, çevresel sorunlara çözüm üretmek için kimyanın gücünden yararlanır. Su arıtma, yeşil enerji ve biyobozunur malzemeler gibi yenilikler, tamamen moleküler düzeydeki bu bilgi birikiminin eseridir. Modern tıbbın temeli de yine moleküllerin bu gizemli davranışlarını çözen araştırmalara dayanır.

Sonuç olarak kimya, laboratuvarların ötesinde yaşamın devamlılığını sağlayan devasa bir düzenin parçasıdır. Doğayı gerçek anlamda kavramak, mikroskobik ölçekte gerçekleşen bu süreçleri anlamaktan geçer.

Nitekim Albert Einstein'ın da söylediği gibi:

"Look deep into nature, and then you will understand everything better."

"Dünyayı anlamanın en iyi yollarından biri kimya aracılığıyla'dır."

-Linus Pauling

Halime DAĞ

Varlık:Olasılıktan Entropiye

Günlük hayatta hemen herkesin gözlemlediği bazı olaylar vardır: sıcak bir kahve zamanla soğur, düşen bir yumurta kırılır, dökülen su zemine yayılır, ısınan demir genişler. Bu süreçlerin ortak özelliği, kendiliğinden belirli bir yönde gerçekleşmeleridir.

Doğada gözlemlediğimiz pek çok fiziksel olay, aslında bu prensiple gerçekleşir.

Peki bu olaylar hiç gerçekleşmeseydi ya da ters yönde ilerleseydi ne olurdu? Daha temel bir soruyla başlayalım: Bu süreçler neden ve nasıl gerçekleşir?

Bu soruların merkezinde tek bir kavram yer alır: entropi. Ancak entropi yalnızca termodinamik derslerinde karşılaşılan ve çoğu zaman $dS = \delta Q_{rev} / T$ ifadesiyle tanımlanıp geçilen bir büyüklük müdür, yoksa doğanın işleyişini belirleyen daha derin bir ilke mi? Genellikle “düzensizlik” kavramıyla özdeşleştirilen entropi, aslında bundan çok daha kapsamlı bir fiziksel anlam taşır.

Bu yazıda entropinin istatistiksel temelini, zamanın yönüyle olan ilişkisini ve yaşamın ortaya çıkışıyla bağlantısını inceleyerek, başlangıçta sorduğumuz soruya bilimsel bir çerçevede yanıt arayacağız.

Düzensizlik değil, İstatistik!

Entropinin istatistiksel anlamını tartışmadan önce iki kavramı netleştirmek gerekir: makrodurum ve mikrodurum. Makrodurum, bir sistemin dışarıdan gözlemlenebilen genel halini ifade eder; örneğin bir gazın sıcaklığı ya da basıncı gibi büyüklüklerle tanımlanır. Mikrodurum ise bu genel durumu oluşturan parçacıkların tüm olası düzenlenişlerini kapsar.

Bu ayrımı daha somut hale getirmek için basit bir örnek düşünelim. İçi kalemle dolu bir kalemliği ters çevirdiğimizi ve kalemlerin zemine dağıldığını varsayalım. İlk bakışta bu durum “düzensizlik” olarak yorumlanabilir: başlangıçta düzenli görünen kalemler artık gelişigüzel bir dağılım sergilemektedir.

Ancak asıl soru şudur: Kalemlerin zemine düştükten sonra yeniden aynı düzenli biçimde yerleşmeleri ne kadar olasıdır? Daha genel bir ifadeyle, kalemler zemine kaç farklı şekilde düşebilir? Düzenli görünen tek bir konfigürasyona karşılık, dağılmış hâli temsil eden çok daha fazla olası yerleşim vardır.

Bu noktada belirleyici kavram düzensizlik değil, olasılıktır. Entropi, belirli bir makroduruma karşılık gelen mikrodurumların sayısı ile ilişkilidir. Bir makrodurumu gerçekleştiren mikrodurum sayısı arttıkça, o durumun gerçekleşme olasılığı da artar.

Entropinin bu istatistiksel yorumu, Ludwig Boltzmann tarafından nicel bir çerçeveye oturtulmuştur. Boltzmann'a göre entropi, bir makroduruma karşılık gelen mikrodurum sayısının logaritmasıyla orantılıdır ve $S = k \ln W$ ifadesiyle gösterilir. Burada W sistemin sahip olabileceği mikrodurumların sayısını, k ise Boltzmann sabitini temsil eder. Bu ifade, entropinin özünde bir "düzensizlik ölçüsü" değil, olasılık ölçüsü olduğunu ortaya koyar. Bir makrodurumu gerçekleştiren mikrodurum sayısı ne kadar fazlaysa, o durum istatistiksel olarak o kadar baskındır. Dolayısıyla ikinci yasa, sistemlerin kaçınılmaz biçimde kaosa sürüklendiğini değil; daha fazla mikroduruma sahip, yani istatistiksel olarak daha olası makrodurumlara yöneldiğini ifade eder.

Bu nedenle entropi artışı, doğanın düzensizliğe teslim olması değil, olasılığın istatistiksel üstünlüğünün bir sonucudur. Ancak bu istatistiksel yönelim yalnızca sistemlerin nasıl evrildiğini değil, zamanın neden belirli bir yönde aktığını anlamak açısından da belirleyicidir.

Zamanın yönü, Olasılığın yönüdür.



Boltzmann'ın ortaya koyduğu istatistiksel çerçeve yalnızca sistemlerin hangi makrodurumlara yönelme eğiliminde olduğunu açıklamakla kalmaz; aynı zamanda zamanın neden belirli bir yönde aktığını anlamamıza da yardımcı olur. İlginç olan şudur ki, fizik yasalarının büyük çoğunluğu zamana göre simetriktir. Temel denklemler, matematiksel olarak geçmiş ve gelecek arasında ayrım yapmaz. Buna rağmen gündelik deneyimlerimiz açık bir yönlülük sergiler: kırılan bir yumurta kendiliğinden birleşmez, soğuyan bir kahve yeniden ısınmaz.

Bu çelişki, yasaların kendisinden değil, başlangıç koşullarından kaynaklanıyor olabilir. Günümüzde kabul gören görüşe göre evren, başlangıçta son derece düşük entropili bir durumda bulunuyordu.

Bu düşük entropi, zamanla artabilecek bir büyüklük yaratmış; başka bir deyişle entropi artışı için bir "alan" sağlamıştır. Eğer evren başlangıçtan itibaren maksimum entropide olsaydı, sistem istatistiksel dengede kalırdı ve makroskopik süreçler belirgin bir yönlülük sergilemezdi.

Böyle bir evrende enerji farkları oluşmaz, sıcak ve soğuk bölgeler arasında akış gerçekleşmezdi. Enerji akışı olmadan iş üretilemez; yıldızlar oluşamaz, kimyasal tepkimeler yönlü ilerleyemezdi. Metabolizma ve biyolojik evrim gibi süreçler de mümkün olmazdı.

Entropi artışı yalnızca fiziksel bir eğilim değil, karmaşıklığın, değişimin ve yapıların ortaya çıkmasının da ön koşuludur. Zamanın yönü, hafıza ve nedensellik gibi kavramlar ancak bu artışla anlam kazanır.

Kralın bütün atları ve askerleri...

Bu geri döndürülemezlik fikrini somutlaştırmak için literatürde sıkça kullanılan bir metafora başvurabiliriz: Humpty Dumpty. Duvarın üzerinden düşen Humpty, bütün kralın atları ve askerleri tarafından bile eski hâline getirilemez. Peki neden? Fizik yasaları kırılan bir nesnenin yeniden birleşmesini yasaklamaz. Ancak yere dağılmış parçaları temsil eden mikrodurum sayısı, bütün ve düzenli hâline karşılık gelen mikrodurum sayısından astronomik ölçüde fazladır. Humpty'nin yeniden birleşmesi fiziksel olarak imkânsız değil, istatistiksel olarak aşırı derecede olasılıksızdır. İşte zamanın oku da bu istatistiksel imkânsızlıktan doğar. Sistemler, daha fazla mikroduruma sahip — yani daha olası — makrodurumlara yönelir. Bu yönelim, geçmiş ile gelecek arasındaki farkı belirler ve deneyimlediğimiz gerçekliğin zamansal yapısını oluşturur.

Kaos değil, hayatın ta kendisi!

Entropinin sürekli arttığını söylemek, her sistemde ve her ölçekte düzensizliğin arttığı anlamına gelmez.

Termodinamiğin ikinci yasası kapalı sistemler için geçerlidir. Oysa Dünya kapalı bir sistem değildir; sürekli olarak Güneş'ten enerji alır ve bu enerjiyi daha yüksek entropili biçimde uzaya geri yayar.

Yaşamın ortaya çıkışı da bu enerji akışı sayesinde mümkün olmuştur. Canlı organizmalar, çevrelerinden aldıkları enerjiyi kullanarak kendi içlerinde düzenli yapılar oluştururlar. Hücre zarları, protein yapıları ve

DNA dizilimleri yüksek derecede organize sistemlerdir. Bu durum ilk bakışta entropiye aykırı gibi görünse de organizma içindeki bu yerel düzen artışı, çevrede daha büyük bir entropi artışı pahasına gerçekleşir.

Bir başka deyişle canlılık, entropiye karşı değil; entropi artışı sayesinde vardır. Güneş'ten gelen düşük entropili enerji, Dünya'da karmaşık kimyasal ve biyolojik süreçlerin gerçekleşmesini sağlar. Bu süreçler sırasında toplam entropi artar, ancak bu artışın bir parçası olarak yerel düzenli yapılar ortaya çıkabilir.

Dolayısıyla yaşam, ikinci yasanın bir istisnası değil; onun doğal bir sonucudur. Evrensel ölçekte entropi artışı devam ederken, bu artışın içinde geçici ve yerel düzen adacıkları oluşabilir. Bizler de bu büyük istatistiksel eğilimin içinde ortaya çıkmış, enerjinin akışıyla varlığını sürdüren geçici düzen biçimleriyiz.

Yazının başında bir kalemliği ters çevirip kalemlerin yere saçıldığını düşünmüştük.

O an bunu "düzensizlik" olarak rahatça tanımlayabilmıştık. Ama artık biliyoruz ki mesele yalnızca düzensizlik değil; mesele olasılık. Kalemlerin düzenli kalması mümkündü, ancak yere dağılmaları çok daha olasıydı. Sistemler mümkün olana değil, daha olası olana gider.

Evren de böyle çalışıyor!

Başlangıçta düşük entropili bir durum vardı ve bu durum entropinin artabileceği bir yön tanımladı. Zamanın oku tam burada doğdu. Geçmiş ile gelecek arasındaki fark, entropi artışının yönüdür.

Şimdi soruyu net soralım: Entropi artmasaydı hayatta kalabilir miydik? Uzun vadede değil, bu açık. Yıldızlar, kimyasal tepkimeler ve evrim gibi süreçler entropi artışına dayanır. Ancak mesele yalnızca uzun vade değildir. İnsan metabolizması da tersinmez süreçlere bağlıdır. Hücre içinde ATP üretimi, iyon pompaları, sinir iletimi ve hatta hafıza oluşumu bile entropi üretir. Eğer entropi artışı tamamen duruyorsa, bu süreçler de durur. Bu yalnızca adapte olamamak anlamına gelmez; fiziksel olarak işleyememek anlamına gelir.

Kısacası, hayatta kalmak entropi üretmektir. Entropi artmıyorsa, yaşam da akmaz.

Bu yüzden cevap düşündüğümüzden daha keskindir: Entropi artmasaydı yalnızca uzun vadede değil, prensipte hiç var olamazdık.

Belki resmi fizik literatüründe böyle bir yasa yoktur, ama tabloya baktığımızda şunu söylemek abartı değildir: Bir sistem için daha fazla mikrodurum varsa, sistem oraya gider. Yaşam, bilinç ve zaman algısı bu istatistiksel yönelimin yan ürünleridir. Eğer buna gayriresmî bir “dördüncü yasa” diyeceksek, o da şu olurdu: Evren daha olası olana doğru akar ve biz bu akışın geçici bir biçimiyiz.

Başta yere düşen kalemleri hatırlayalım. Onlar daha olası bir düzenlenişe geçtiler. Evren de öyle. Ama o dağılmanın içinde, kısa bir süre için düşünen, sorgulayan ve kendi varlığının istatistiksel temelini yazıya dökabilen yapılar ortaya çıkabiliyor. **Biz tam olarak o ihtimalin içindeyiz.**



KİMYASAL BAĞLAR HIÇ KOPMASAYDI BİR EVREN MÜMKÜN MÜYDÜ?

Evreni hareketli, renkli ve canlı yapan şey nedir? Yıldızlar, gezegenler, okyanuslar... hatta şu an bu yazıyı okumanız bile tek bir temel sürece dayanır: kimyasal bağların oluşması ve kopması.

Peki ya bağlar hiç kopmasaydı?

Bu soruya cevap verebilmek için önce kimyasal bağın ne olduğuna bakalım.

- **Kimyasal Bağ: Maddenin Dansı**

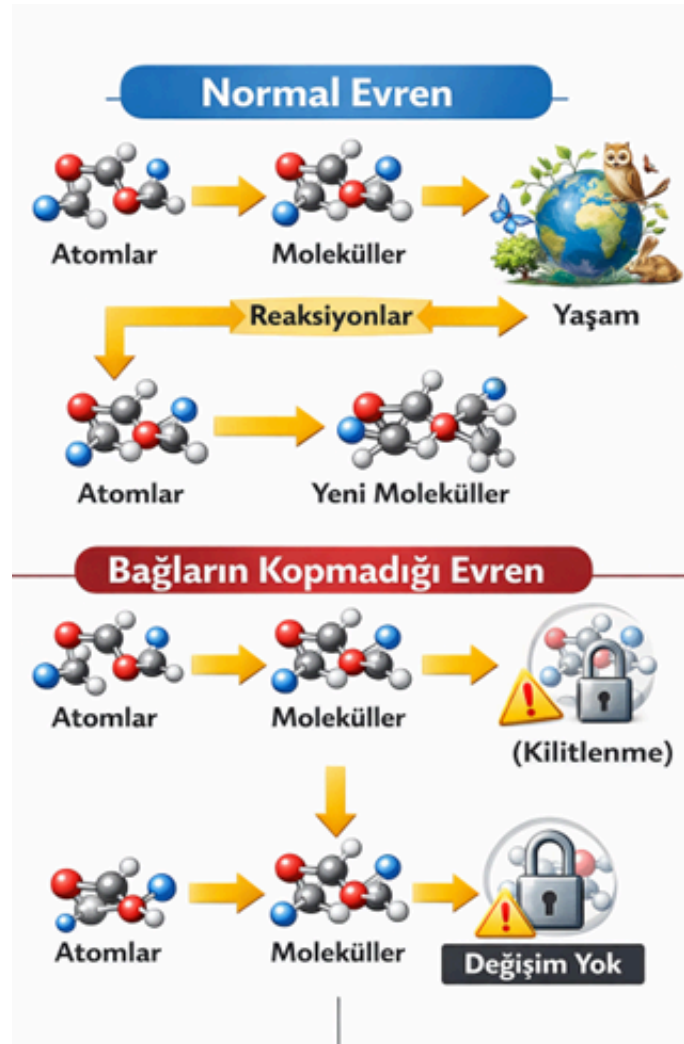
Atomlar, elektronlarını paylaşarak ya da birbirlerine aktararak daha düşük enerjili ve daha kararlı yapılara ulaşma eğilimindedir; bu davranış enerji minimizasyonu ilkesine dayanır. Bir kimyasal bağın oluşması ya da kopması ise termodinamik olarak Gibbs serbest enerjisi denklemiyle açıklanır:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S.$$

Burada ΔG reaksiyonun gerçekleşebilirliğini belirler; eğer ΔG sıfırdan küçükse süreç kendiliğinden ilerler. ΔH sistemin enerji (entalpi) değişimini, ΔS ise entropi değişimini ifade eder. Kimyasal sistemler bu iki büyüklüğün dengesine göre yön belirler. Ancak bağ kopmasının mümkün olmadığı bir durumda bu denge mekanizması işleyemez; çünkü entropi değişimi ve enerji yeniden dağılımı sınırlanır, dolayısıyla reaksiyonların yönü ve geri dönüşlülüğü ortadan kalkar.

- **Reaksiyonlar Tek Yönlü Olsaydı?**

Kimyasal bağların kopmadığı bir evrende kimyasal denge kavramı tamamen ortadan kalkardı ve Henri Le Chatelier'in denge ilkesi anlamsız hale gelirdi. Çünkü bir reaksiyonun dengeye ulaşabilmesi için hem ileri hem de geri yönde gerçekleşebilmesi gerekir; oysa bağ kopmasının mümkün olmadığı bir durumda geri dönüş söz konusu olamazdı. Bir molekül oluştuğu anda sonsuza kadar o formda kalır, başka bir kimyasal türe dönüşemezdi. Bu koşullar altında yanma reaksiyonları yalnızca tek seferlik gerçekleşir, endüstriyel üretim süreçleri sürdürülemez hale gelir ve atmosfer kimyası zamanla değişim yeteneğini kaybederek adeta donar. Sonuçta evren kimyasal açıdan dinamik değil, "kilitlenmiş" ve dönüşümsüz bir yapıya bürünürdü.



Metabolizmanın Temeli



Bağ Kırılması Yoksa

Enerji Akışı Yok → Yaşam Yok

• Canlılık Neden İmkânsız Olurdu?

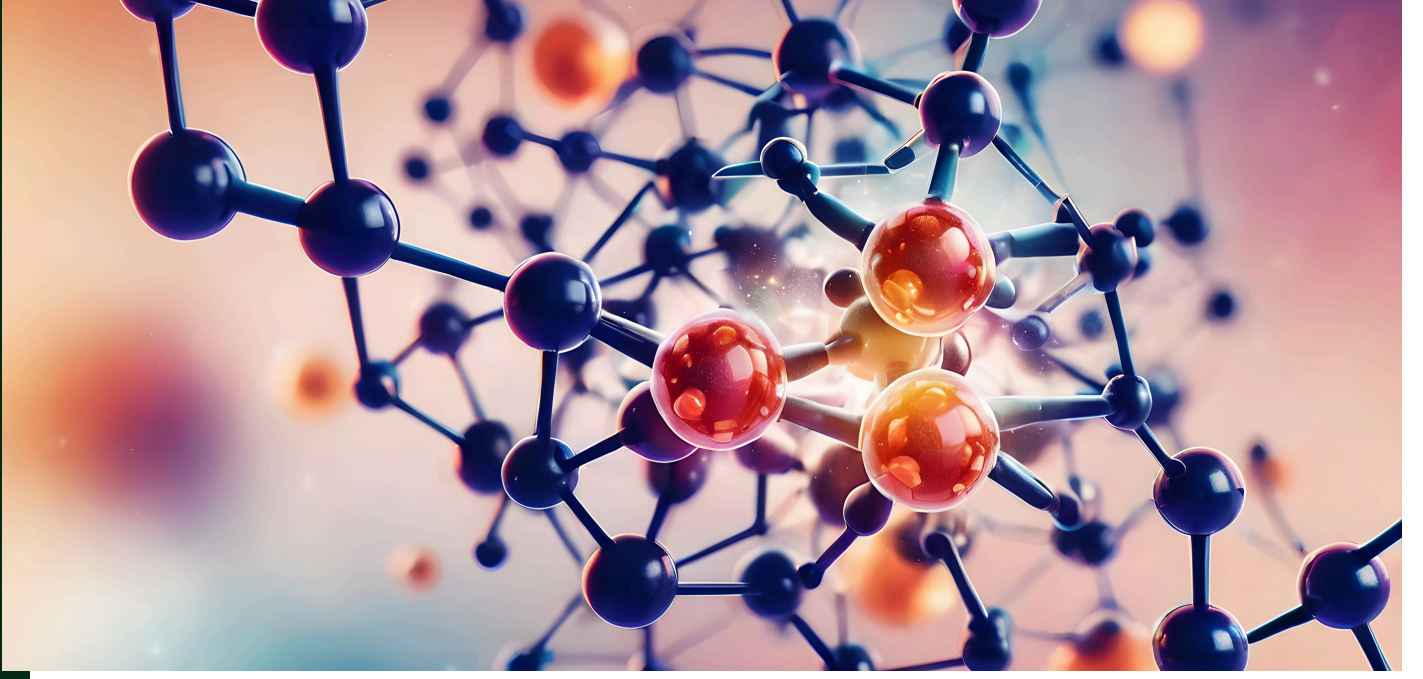
Yaşam, temelde sürekli bağ kırılması ve yeniden bağ oluşması üzerine kurulu dinamik bir kimyasal süreçtir. Örneğin hücrelerin enerji kaynağı olan ATP'nin ADP'ye dönüşümü, yüksek enerjili bir fosfat bağının kopmasına dayanır ve bu kopma sayesinde hücresel faaliyetler için gerekli enerji açığa çıkar. DNA replikasyonu sırasında ise fosfodiester bağları kontrollü biçimde kırılır ve ardından yeniden oluşturularak genetik bilginin doğru şekilde kopyalanması sağlanır. Hücresel solunum da elektron alışverişine dayalı redoks reaksiyonları içerir ve bu reaksiyonlar bağların yeniden düzenlenmesini gerektirir. Tüm bu süreçler, metabolizmanın işleyebilmesi için vazgeçilmezdir; bağ kırılması ve oluşumu olmadan metabolik faaliyetlerin gerçekleşmesi mümkün değildir.

• Fiziksel Dünya Nasıl Değişirdi?

Bağların tamamen kopması bir yana, yalnızca zayıflaması bile faz değişimlerinin temelini oluşturur. Bir katının erimesi, kristal örgüyü bir arada tutan bağların zayıflaması sayesinde parçacıkların daha serbest hareket edebilmesiyle gerçekleşir; buharlaşma ise moleküller arası etkileşimlerin aşılması ve kopmasıyla mümkün olur. Eğer kimyasal bağlar hiçbir koşulda kopmasaydı, sıvı faz büyük ölçüde ortadan kalkabilir, gaz fazı ise ya hiç oluşamaz ya da son derece sınırlı kalabilirdi. Bu durumda maddenin önemli bir kısmı katı halde kalır ve gezegenler dinamik yüzey süreçleri yerine büyük ölçüde değişmez yapılar sergilerdi. Dünya, hareketli ve dönüşen bir sistem olmak yerine kimyasal olarak adeta donmuş bir küreye dönüşürdü.

• Kozmik Ölçekte Ne Olurdu?

Yıldızların enerjisi kimyasal bağlardan değil, atom çekirdeğini bir arada tutan nükleer bağlardan kaynaklanır; bu nedenle kimyasal bağların kopmadığı bir evrende bile yıldızlar varlığını sürdürebilir ve ışımaya devam edebilirdi. Ancak yıldızlardan yayılan enerji, gezegen yüzeylerinde kimyasal dönüşümleri başlatan temel etkidir ve bağ kopması mümkün değilse bu enerji moleküler çeşitlilik yaratamazdı. Organik moleküller gelişip karmaşık yapılara dönüşemez, atmosfer kimyası zaman içinde evrimleşemez ve karbon temelli yaşam için gerekli biyokimyasal süreçler gerçekleşemezdi. Böyle bir senaryoda evren fiziksel olarak var olurdu; yıldızlar parlar, gezegenler dönerdi. Fakat kimyasal evrim gerçekleşmediği için biyolojik açıdan tamamen sessiz kalırdı.



- **Termodinamik Açıdan Büyük Sorun**

Bağ kopması, entropi artışının önemli bileşenlerinden biridir çünkü yeni düzenlenme olasılıklarının ortaya çıkmasına izin verir. Ludwig Boltzmann'ın istatistiksel yorumuna göre entropi, bir sistemin sahip olabileceği mikrodurum sayısı ile ilişkilidir; mikrodurum sayısı arttıkça entropi de artar. Ancak bağların asla kopmadığı bir evrende bu olasılıklar ciddi biçimde sınırlanırdı. Moleküller yeni konfigürasyonlara geçemez, sistemler kinetik olarak adeta hapsolür ve dinamik çeşitlilik azalırdı. Sonuçta evren kimyasal açıdan maksimum derecede bağlanmış, fakat minimum hareketlilik ve dönüşüm kapasitesine sahip bir yapıya dönüşürdü.



Sonuç: Böyle Bir Evren Mümkün mü?

Böyle bir evren fiziksel olarak varlığını sürdürebilir; yıldızlar parlayabilir ve gezegenler oluşabilir. Ancak kimyasal dönüşüm gerçekleşmez, enerji akışı büyük ölçüde sınırlı kalır ve moleküler düzeyde yeni düzenlenmeler ortaya çıkamazdı. Bu durum canlılığın oluşmasını imkânsız hale getirirken, kimyasal ve biyolojik çeşitliliğin gelişmesini de engellerdi. Dolayısıyla kimyasal bağların kopabilmesi yalnızca bir reaksiyon ayrıntısı değil, evrenin dinamik ve üretken kalmasının temel koşuludur. Evreni “canlı” ve sürekli değişim içinde tutan şey atomların mutlak kararlılığı değil, belirli sınırlar içinde işleyen kontrollü kararsızlığıdır.

Sude ŞAHİN

DÜNYANIN EN ESKİ ECZANESİ: DOĞANIN GİZLİ LABORATUVARI

Günlük hayatta marketten aldığımız bir atıştırmalığın veya içeceğin ambalajını çevirip içindekiler kısmını okumak çoğumuz için sıradan bir alışkanlıktır. Peki ya hastalandığımızda hiç düşünmeden yuttuğumuz, sürekli elimizin altında bulundurduğumuz o hayat kurtarıcı ilaçların moleküler düzeyde nereden geldiğini hiç merak ettiniz mi? Genellikle ilaçların tamamen steril laboratuvarlarda, sadece sentetik kimyasalların bir araya getirilmesiyle sıfırdan üretildiğini düşünürüz. Ancak işin aslı çok daha derin ve şaşırtıcıdır; aslında doğa, milyarlarca yıldır durmaksızın çalışan kusursuz bir reaktördür. Bugün eczanelerden aldığımız o paketli ilaçlar aslında bitkilerden, böceklerden, vahşi hayvanlardan ve mantarlardan geliyor. Şimdi hep beraber şifa fabrikası doğanın bu tuhaf ve şaşırtıcı yönünü keşfe çıkalım.

1.Söğüt Ağacından Evrensel Ağrı Kesiciye: Aspirinin Yolculuğu

Söğüt ağacı kabuğunun şifa serüveni antik çağlara kadar uzanır. Sümerler, Mısırlılar ve ünlü hekim Hipokrat, ağrı ve ateş şikayeti olan hastalara söğüt ağacı kabuğu çiğnemelerini tavsiye ederdi. 19. Yüzyılda kimyagerler bu kabuğun içindeki aktif madde olan salisin'i izole etmeyi başardılar. Ancak bu madde mideye ciddi zararlar veriyordu. 1897 yılında kimyager Felix Hoffmann, bu molekülü kimyasal olarak modifiye edip mide dostu hale getirerek günümüzde "aspirin" olarak bildiğimiz ilacı üretti. Aynı zamanda bu ilaç günümüzde düşük dozlarda kan sulandırıcı etkisiyle kalp krizi ve felci önlemek amacıyla da milyonlarca insan tarafından kullanılmaktadır.

Üretim Süreci

Süreç, söğüt kabuğundan "salisin" maddesinin katı-sıvı ekstraksiyonla alınması ve hidrolizle salisilik aside dönüştürülmesiyle başlar. Ardından salisilik asit, asidik ortamda asetik anhidrit ile asetilleme reaksiyonuna sokulur. Sentezlenen asetilsalisilik asit (aspirin), kristalizasyon yöntemiyle saflaştırılarak ilaç üretimine hazır hammadde haline gelir.



2.Böceklerin Salgısından Mide Kalkanına: Şellak (Kerria lacca)

Asya'da binlerce yıldır ahşap cilası ve doğal kırmızı boya olarak kullanılan şellak, aslında Hindistan ve Tayland ormanlarında yaşayan Kerria lacca isimli bir böceğin ağaç dallarına bıraktığı reçinemi bir salgıdır. 20. yüzyılın başlarında ilaç endüstrisi, bu doğal polimerin toksik olmadığını ve aside karşı inanılmaz bir direnç gösterdiğini keşfetti. Günümüzde ise yüzeyi parlak hapların ve kapsüllerin dış kaplamasında (farmasötik glazür) kullanılır.

Üretim Süreci

Süreç, böceklerin ağaç dallarında oluşturduğu ham reçinenin (sticklac) kazınarak toplanmasıyla başlar. Toplanan reçine ezilir ve böcek kalıntıları ile doğal boyasından arındırmak için suyla defalarca yıkanır (katı-sıvı ekstraksiyonu). Elde edilen "tohum şellak" ısıtılarak eritilir, saflaştırılması için sıcak filtrasyon işleminden geçirilir ve ince tabakalar halinde kurutulur. İlaç kaplaması aşamasında ise bu pullar etil alkol gibi uçucu çözücülerde çözülerek dev kaplama kazanlarında tabletlerin üzerine püskürtülür.



5.Ölümcül Zehirden Tansiyon Hapına: Brezilya Çukur Engereği

1960'larda Brezilyalı farmakolog Sergio Ferreira, Güney Amerika ormanlarında yaşayan ölümcül çukur engereğinin zehrini incelerken çok tuhaf bir etki fark etti: Yılanın ısırıldığı avların tansiyonu aniden sıfıra iniyor ve kurban felç geçiriyordu. 1970'lerde araştırmacılar, bu zehrin içindeki kan basıncını düşüren aktif molekülü (teprotit adı verilen bir peptit) izole etmeyi başardılar. Bu keşif, modern kardiyolojide devrim yaratan ilk "ACE inhibitörü" tansiyon ilacının (kaptopril) doğuşunu sağladı.

Üretim Süreci

İlk keşif yıllarında aktif madde, sağılan yılan zehrinin sıvı kromatografisi (HPLC) ile fraksiyonlara ayrılması ve saflaştırılmasıyla elde ediliyordu. Ancak bu doğal peptit mide asidinde parçalandığı için hap olarak yutulamıyordu. Bunun üzerine kimyagerler "yapıya dayalı ilaç tasarımı" adı verilen müthiş bir sentez süreci başlattılar. Günümüzde endüstriyel reaktörlerde yılan zehrine ihtiyaç duyulmaz; L-prolin amino asidine bir sülfhidril (-SH) grubu eklenerek laboratuvar ortamında sentetik olarak "kaptopril" molekülü üretilir ve kristalizasyon ile saflaştırılarak tablet formuna getirilir.



6.Topraktaki Gizli Biyoreaktör: Küf Mantarı (Aspergillus terreus)

1970'lerde Japon biyokimyager Akira Endo, laboratuvarında binlerce mantar ve küf türünü inceleyerek kolesterol üretimini engelleyebilecek doğal bir molekül arıyordu. Sonunda, sıradan bir toprak küfü olan Aspergillus terreus'un diğer mikroorganizmaları kendinden uzak tutmak için "Lovastatin" adlı bir madde salgıladığını keşfetti. Bu tesadüfi ama çığır açıcı keşif, dünya çapında en çok satan ilaç gruplarından biri olan statinlerin yolunu açtı. Lovastatin ve ondan türetilen diğer "statin" grubu ilaçlar, karaciğerde kolesterol sentezinden sorumlu olan kritik bir enzimi (HMG-CoA redüktaz) bloke eder. Kandaki kötü kolesterol (LDL) seviyesini düşürerek milyonlarca insanın kalp krizi ve damar tıkanıklığı riskini azaltır.

Üretim Süreci

Üretim süreci, Aspergillus terreus küfünün devasa paslanmaz çelik biyoreaktörlerde (fermentörlerde) uygun sıcaklık, pH ve oksijen koşullarında kontrollü olarak çoğaltılmasıyla (derin tank fermantasyonu) başlar. Fermantasyon tamamlandıktan sonra, küfün ürettiği aktif madde etil asetat gibi çözücüler kullanılarak "sıvı-sıvı ekstraksiyonu" ile ortamdan çekilir. Elde edilen ham ekstrakt, kromatografi ve kristalizasyon işlemleriyle saflaştırılarak o bildiğimiz beyaz hapların hammaddesi haline gelir.



7.Kazara Gelen Mucize: Penisilin Mantarı (*Penicillium chrysogenum*)

Bilim tarihinin en meşhur hatası 1928'de yaşandı. İskoç bakteriyolog Alexander Fleming, tatile çıkarken laboratuvarında unuttuğu bir petri kabında üreyen yeşil bir küfün, etrafındaki ölümcül bakterileri yok ettiğini tesadüfen fark etti. Rüzgarla açık pencereden giren bu sıradan küf mantarı (*Penicillium*), bakterileri parçalayan bir savunma maddesi salgılıyordu. Ancak bu maddenin saflaştırılıp seri üretime geçmesi ve II. Dünya Savaşı'nda milyonlarca hayat kurtaran bir ilaca dönüşmesi yıllar sonra kimyager ve mühendislerin ortak çalışmasıyla başarılabilirdi. Dünyanın ilk devrimsel antibiyotiği olan bu mantar; zatürre, menenjit, boğaz enfeksiyonları ve savaş yaraları gibi eskiden kesin ölüm sebebi sayılan birçok bakteriyel enfeksiyonu tedavi ederek insan ömrünü ortalama 20 yıl uzatmıştır.

Üretim Süreci

Penisilin üretimi, modern "biyokimyasal mühendisliğin" doğuşudur. *Penicillium* mantarı, devasa biyoreaktörlerde (derin tank fermentasyon sistemleri) steril hava ve besin (örneğin mısır maserasyon sıvısı) takviyesiyle günlerce çoğaltılır. Mantarın ortama salgıladığı penisilin, önce santrifüj ve filtrasyon işlemleriyle mantar hücrelerinden ayrılır. Daha sonra elde edilen sıvı, asidik ortamda bütül asetat veya amil asetat gibi organik çözücüler kullanılarak çok aşamalı "sıvı-sıvı ekstraksiyonu" işleminden geçirilir. Son aşamada sodyum veya potasyum tuzu formunda kristallendirilerek o bildiğimiz beyaz antibiyotik tozuna dönüşür.



Elbette bu anlattıklarımız, doğanın o devasa eczanesindeki raflarından çekip aldığımız sadece birkaç minik örnek. Doğadaki bu eşsiz şifa kaynaklarını incelediğimizde aslında kusursuz bir işbirliği görüyoruz. Doğa, milyonlarca yıllık geçmişiyle sürekli keşfe açık bir ar-ge laboratuvarı gibi. Kimyanın en büyük hazinesi doğa, ikisi arasındaki en belirgin sıklardan birisi de ilaçlar. Günümüzde teknoloji ve mühendisliğin de gelişmesi ile birlikte bu büyüleyici ve tuhaf hammaddeleri sentezlemek, çoğaltmak ve faydalanmak çok daha kolay ve güvenilir. İşte tam bu noktada kimya mühendisliği devreye giriyor. Doğanın toprağın altında, bir mantarın sporlarında veya bir canlının zehrinde tasarladığı o eşsiz moleküler şifreyi alıp; devasa reaktörler yardımıyla ve ekstraksiyon, saflaştırma gibi yöntemlerle tüm dünyanın aynı anda ulaşabileceği bir formüle dönüştüren güç bu meslektir. Kim bilir, belki de bir dahaki sefere iyileşmek için bir ilaç yuttuğunuzda, o küçük tabletin sadece steril bir laboratuvar ürünü olmadığını; içinde doğa ile kimyanın kusursuz uyumunun ve kimya mühendisliğinin dönüştürücü gücünün yattığını hatırlarsınız.



BEYZANUR BULUT

DOĞADAN İLHAM ALAN



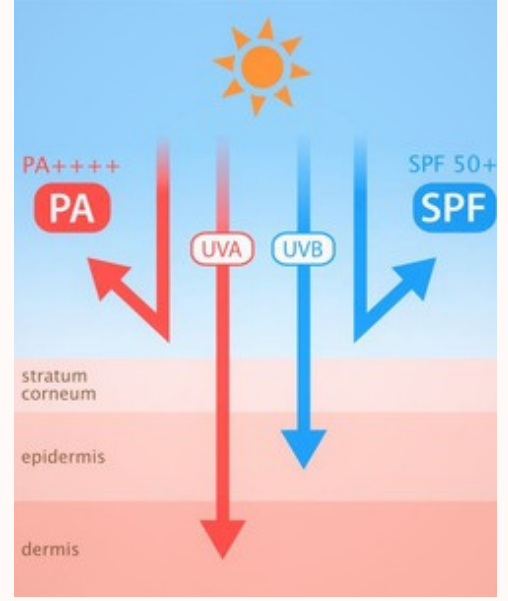
GÜNEŞ KORUYUCULAR



GÜNEŞİN ALTINDAKİ GÖRÜNMEZ KALKAN

Sıcak bir yaz günü sahilde uzanırken, güneşin cildinizi ısıtan o tatlı hissini yaşamak paha biçilemezdir. Ancak bu keyifli anın arkasında, cildimizi yaşlanmaya ve DNA hasarına karşı korumak için verdiğimiz sessiz bir kimyasal savaş yatar. ünlük cilt bakım rutinimizin en vazgeçilmez adımı olan güneş kremlerini yüzümüze sürerken, aslında o beyazımsı tabakanın içinde ne gibi sırlar saklı olduğunu pek düşünmeyiz.

Geleneksel olarak, bu kalkanı oluşturmak için ya titanyum dioksit (TiO₂) ve çinko oksit (ZnO) gibi fiziksel bariyerleri



ya da petrokimya türevi organik UV filtrelerini kullanıyoruz. Ancak son yıllarda hem cildimizin hassas dengesini korumak hem de okyanuslardaki mercan resiflerini sentetik kimyasalların yıkıcı etkisinden kurtarmak için bilim insanları gözlerini doğanın kendisine çevirdiler.

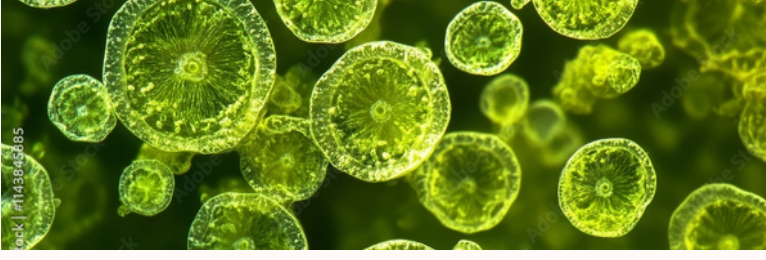
MİLYAR YILLIK FOTOKORUMA: MAA'LAR

Siyanobakteriler, mikroalgler ve mantarlar gibi sucul canlılar, yüksek seviyelerde UV radyasyonundan korunmak için kendi doğal güneş kremlerini sentezlemeyi evrimsel süreçte öğrenmişlerdir. Bu evrimsel başyapıtın adı, Mikosporin Benzeri Amino Asitler, kısaca MAA'lardır.

MAA'lar, 400 Dalton'dan daha küçük, renksiz ve suda son derece iyi çözünebilen bileşiklerdir. Organik kimya perspektifinden bakıldığında, bu moleküllerin merkezinde bir sikloheksenon veya sikloheksenimin halkası bulunur. Bu yapılar, 310 ile 362 nanometre arasındaki oldukça geniş bir UV spektrumunu mükemmel bir şekilde absorbe etme kapasitesine sahiptir.

Geleneksel sentetik filtrelerin aksine, MAA molekülleri zararlı UV enerjisini hiçbir yıkıcı serbest oksijen radikali oluşturmadan zararsız bir ısıya dönüştürerek çevreye dağıtır. Üstelik bu moleküller sadece birer UV filtresi değil; aynı zamanda reaktif oksijen türlerini (ROS) temizleyerek DNA hasarını baskılayan çok güçlü birer antioksidandır.

BİYOPROSES VE FORMÜLASYON



Doğanın bu kusursuz çözümünü okyanuslardan ticari formlara taşımak oldukça zordur. En büyük engeller ise MAA bileşiklerinin hücre içindeki düşük konsantrasyonu ve sürdürülebilir hasat ile ekstraksiyon süreçlerinin getirdiği yüksek maliyetlerdir.

Milyarlarca litrelik deniz suyu yerine, bu canlıların kontrollü biyoreaktörlerde çoğaltılması çok daha verimlidir. Ancak bu değerli moleküllerin saf bir şekilde elde edilmesi, kusursuz bir ayırma işlemi gerektirir.

Bu aşamada, yoğun kimyasal ve yüksek enerji gerektiren geleneksel yöntemlerin yerini sürdürülebilir nanofiltrasyon almaktadır. Bu "yeşil mühendislik" teknolojisi, MAA ekstraktlarını saflaştırıp konsantre ederek ticari üretim için hem çevreci hem de etkili bir çözüm sunar.

Sentetik olarak petrokimyasal yollarla üretilen geleneksel güneş kremlerinin (özellikle oksibenzon ve oktinoksat gibi organik filtrelerin) insan sağlığına ve çevreye olası zararları (özellikle mercan resiflerini beyazlatıp öldürmesi) nedeniyle ortaya çıkan haklı endişeler, MAA gibi doğal ikame moleküllere olan pazar ihtiyacını her geçen gün artırmaktadır. Biyomimetik (doğayı taklit eden) yaklaşım, laboratuvarında doğayı kopyalayarak, onun milyonlarca yıllık Ar-Ge sürecini kendi hücresel sağlığımız için kullanmayı hedefler. MAA'lar, cilde uygulandığında sentetik filtrelerin aksine hücresel düzeyde alerjik reaksiyonlara veya fototoksik etkilere neden olmazlar.



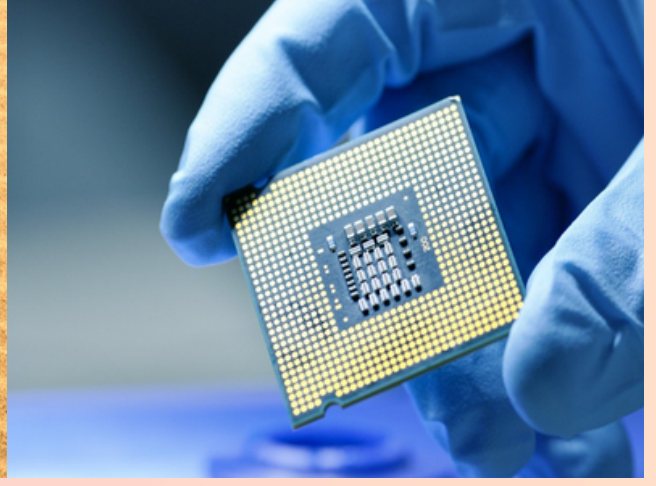
Elde edilen saf MAA'ların bir kozmetik emülsiyonu içinde stabilitesini korumak ve cilt yüzeyindeki tutunma süresini maksimize etmek için formülasyon kısmıdır. MAA moleküllerinin kitosan gibi doğal biyopolimerlerle kapsüllenmesi veya biyo-uyumlu nanopartikül (MAA-Np) konjugatları haline getirilmesi, ürünün ciltte terlemeye akıp gitmesini engeller ve formülasyona kimyasal filtrelere eşdeğer, hatta onlardan üstün bir raf ömrü sağlar.



Dahası, sadece pasif bir fotokoruyucu olmanın ötesindedirler. Sahip oldukları yüksek antioksidan kapasite ve DNA koruma özellikleri, onları yalnızca plaj çantalarımızdaki güneş kremlerinde değil; yaşlanma karşıtı (anti-aging) onarım serumlarında, hücre yenileyici losyonlarda ve cilt bariyerini onaran dermokozmetik formülasyonlarda da başrol oyuncusu yapmaya adaydır. Gelecekte plaj çantalarımızda taşıyacağımız o hafif serumlar, okyanusun derinliklerinden gelen bu görünmez ve mucizevi zırhı barındıracak.

Ayça DALKILIÇ

Doğanın Dijital Kalbi: Kumdan Çiplere Kimyasal Yolculuk



Bastığınız Yerin Farkında Mısınız?

Sahilde yürürken ayaklarınızın altındaki o minik, altın sarısı tanelerin aslında dünyayı yerinden oynatan birer teknoloji devi olduğunu söylesem pek de yanlış olmaz. Çoğumuz sahilde kumların üzerinde uzanırken sadece tatili ve huzuru düşünüyoruz. Birine kumdan ne yapılır diye sorsanız, alacağınız cevap %99 ihtimalle cam olacaktır. Evet, kum binlerce yıldır camın ana hammaddesi olmuştur ancak teknolojik gelişimimiz, bu mütevazı maddeye çok daha önemli bir görev yükledi. Şu an bu satırları okurken parmağınızı kaydırduğınız o ekranın arkasında, cebinizdeki telefonun en derinlerinde ve modern dünyayı ayakta tutan her türlü elektronik sistemin kalbinde, üzerine bastığınız o kumun atomik birer imzası yatıyor.

Doğa, en temel bileşenlerinden biri olan kuvarsi (Silisyum Dioksit), bizim onu modern teknolojinin beynine dönüştürmemiz için milyonlarca yıldır sahillerde saklıyor. Ancak bu dönüşüm, sıradan bir erime sürecinden çok daha fazlasıdır; doğanın kaotik düzensizliğini, atomik bir kusursuzluğa dönüştürme sanatıdır. Birçok insan bu karmaşık mikroçiplerin sadece elektrik-elektronik mühendislerinin masalarında tasarlandığını ve üretildiğini sanıyor. Oysa o devre tasarımlarına ruh veren, onları nanometre ölçeğinde fiziksel bir gerçekliğe dönüştüren asıl güç Kimya Mühendisliği ve malzeme bilimidir.

Yarı iletkenlerin ve çiplerin hikayesi, aslında doğayı anlama ve maddeye hükmetme çabamızın en güzel özetidir. Başlangıçta her şey, devasa salonları kaplayan, sürekli aşırı ısınan ve sürekli arızalanan cam vakum tüpleriyle çalışıyordu. 1947 yılında Bell Laboratuvarları'nda ilk transistörün icat edilmesiyle bu hantal yapı yerini çok daha küçük bileşenlere bıraktı.

İlk başlarda yarı iletken olarak germanyum kullanılıyordu. Ancak germanyumun yüksek sıcaklıklardaki kimyasal kararsızlığı büyük bir mühendislik problemi idi. İşte bu noktada doğada, ayaklarımızın altındaki kumlarda bolca bulunan silisyum sahneye çıktı. 1960'larda birden fazla bileşenin tek bir silisyum plaka üzerine sığdırıldığı entegre devreler (IC) icat edildi. Intel'in kurucularından Gordon Moore, Bir çip üzerindeki transistör sayısı her iki yılda bir iki katına çıkacaktır, diyerek ünlü Moore Yasası'nı ortaya attı. Bu yasanın on yıllarca ayakta kalmasını sağlayan asıl kahramanlar ise, kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve kimyasal mekanik parlatma (CMP) gibi karmaşık yüzey işlemlerini nanometre hassasiyetinde yönetmeyi başaran proses mühendisleriydi.

Hep Duyuyoruz: "Çip Krizi" İyi Ama, Nedir Bu Çip?

Haberlerde, teknoloji bloglarında, hatta sıfır araç almak için gittiğiniz otomobil bayilerinde bile sürekli aynı cümle yankılanıyor: Çip krizi var, üretim durdu. Peki, uğruna küresel tedarik zincirlerinin kilitlendiği, fabrikaların şalter indirdiği bu çip aslında nedir?

En basit tabirle mikroçip; silisyumdan yapılmış, tırnak ucu büyüklüğünde mikroskobik bir elektronik şehirdir. Bu şehrin binaları, elektrik akımını kontrol eden milyarlarca transistör ve yolları ise mikroskobik metal hatlardır.



Krizin temel nedeni, saç telinden binlerce kat ince bir alana kurulan bu nanometrik şehrin kimyasal sürecindeki inanılmaz zorluktur. Bir çipin üretimi; hassas fotolitografi adımlarından, plazma aşındırmadan, kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve kimyasal mekanik parlatma (CMP) gibi yüzlerce karmaşık işlemten geçerek aylar sürer. Süreç o kadar steril bir mühendislik gerektirir ki, tek bir toz tanesi bile bu şehirde devasa bir meteor etkisi yaratıp tüm üretimi çöpe atabilir. Bu yüzden ani talep artışlarında üretimi bir anda hızlandırmak imkansızdır.

Kumdan Külçe: %99.9999999 Saflık



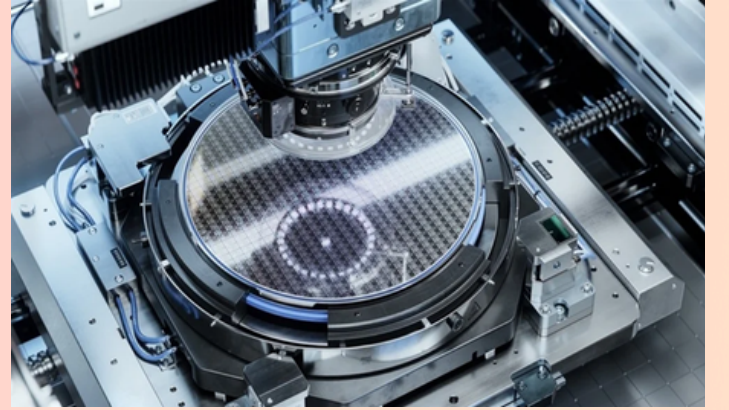
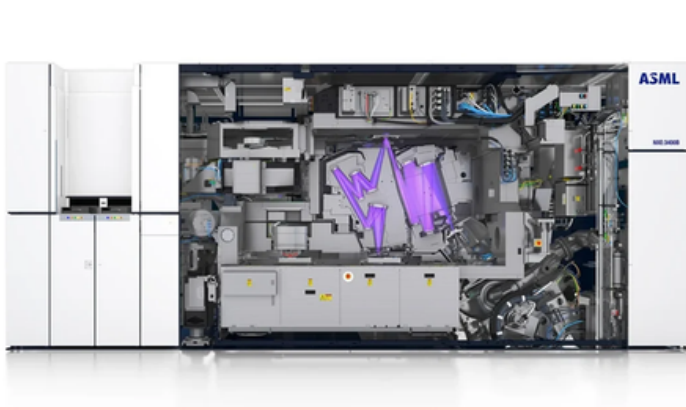
Her şey, doğada bolca bulunan silisyum dioksit (SiO_2) zengini kuvars kumunun devasa ark ocaklarında karbon ile reaksiyona sokulmasıyla başlar. Ancak elde edilen bu metalurjik silisyum, bir çip için yeterince temiz değildir. Akıl almaz bir saflaştırma sürecinden geçerek Elektronik Derece Silisyum (EGS) haline getirilmesi gerekir. Bu saflık derecesi tam olarak %99.9999999'dur. Yani bir milyar silisyum atomunun arasında sadece bir tane yabancı atoma izin vardır. Daha sonra, bu erimiş saf silisyumdan tek bir kusursuz kristal yapı oluşturmak için yavaşça devasa bir silindir (külçe) çekilir.

Elde edilen bu dev silindir, elmas testerelerle kağıt inceliğinde dairelere, yani wafer'lara (yarı iletken plaka) dilimlenir. Ancak bu plakaların yüzeyi henüz üzerine milyarlarca transistör inşa edilecek kadar pürüzsüz değildir. Nanometre ölçeğinde bir şehir inşa edeceğimiz için yüzeyin atomik düzeyde düz olması gerekir. İşte bu noktada CMP (Kimyasal Mekanik Parlatma) devreye girer. Özel kimyasal solüsyonlar (slurry) ve mekanik pedler kullanılarak yarı iletken plaka yüzeyi ayna gibi kusursuz bir pürüzsüzlüğe kavuşturulur.

Fotolitografi: Işıkla Şehir İnşa Etmek

Mikroçip üretiminde fotolitografi, silikon levha üzerine ışık ve kimyasallar yardımıyla nanometrik devre yolları oluşturma yöntemidir. Süreç, levhanın ince bir film tabakasıyla kaplanması ve ardından ışığa duyarlı bir polimer olan fotorezistin yüzeye yayılmasıyla başlar. Daha sonra devre tasarımını taşıyan bir maske levhanın üzerine hizalanır ve güçlü ultraviyole ışık gönderilir. Işık, maskenin boşluklarından geçerek fotorezistte fotokimyasal bir reaksiyon başlatır ve polimerin çözünürlüğünü değiştirir.

Levha geliştirici bir çözücüyle yıkandığında ışık gören veya görmeyen bölgeler çözünerek uzaklaşır ve geriye devrenin taslağını oluşturan bir polimer şablon kalır. Açığa çıkan yüzey daha sonra asitler veya plazma ile aşındırılarak devre yolları silikon içine kalıcı olarak işlenir. Son aşamada fotorezist temizlenir, devre yolları iletken metallere doldurulur ve yüzey pürüzsüzleştirilir. Bu süreç, milyarlarca transistör içeren modern işlemciler oluşana kadar katman katman tekrarlanır.



Plazma ile Heykeltıraşlık: Etching (Aşındırma) İşlemi

Mikroçiplerin Üretiminde Aşındırma Kimyası

Fotolitografi ile oluşturulan polimer şablon, aşındırma işlemi sırasında koruyucu bir kalkan görevi görür. Bu aşamada açıkta kalan bölgeler oyularak devre yolları silikon içine kalıcı olarak işlenir. Geçmişte bu işlem, silikon levhaların asit çözeltilerine daldırıldığı ıslak aşındırma yöntemiyle yapılırdı. Ancak bu yöntem her yöne eşit ilerlediği için nanometre ölçeğinde istenmeyen yan oyuklara neden olabilir.

Bu nedenle modern çip üretiminde kuru aşındırma, özellikle Reaktif İyon Aşındırması (RIE) kullanılmaktadır. Vakum ortamında oluşturulan plazmadaki iyonlar ve reaktif radikaller, yüzeye dik çarparak silikon bağlarını kırar ve uçucu bileşikler oluşturarak yüzeyden uzaklaştırır. Böylece nanometrik ölçekte son derece hassas devre yapıları elde edilir.

İşlem sonunda koruyucu polimer kaldırılır ve yüzey metalizasyon gibi sonraki üretim adımları için hazır hale gelir.

Geleceğin Sınırları

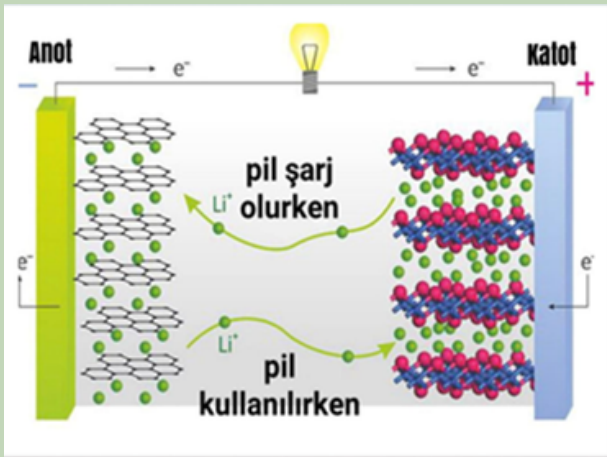
Aşındırma bittikten sonra kalan koruyucu polimer sıyrılır ve yüzey, metalizasyon ve kimyasal mekanik planarizasyon (CMP) gibi adımlarla yeni katmanlar için tamamen pürüzsüzleştirilir. Bütün bu reaksiyon ve kaplama döngüleri, milyarlarca transistörü çok küçük bir alana sığdırmamızı sağlayan muazzam bir mühendislik başarısıdır. Ancak günümüzde donanım boyutlarını birkaç atom genişliğine kadar indirdiğimizde, kuantum tünelleme gibi fiziksel engeller elektronların o incecik duvarlardan sızmasına neden olmaya başlıyor. Geleneksel reaksiyon kinetiğinin ve optik kurallarının sınırlarını zorladığımız bu atomik ölçekte, silikon tabanlı mimarinin sonuna mı yaklaşıyoruz, yoksa yepyeni bir malzeme bilimi devrimi tüm üretim süreçlerini baştan mı yazacak bunu merakla bekliyoruz.

Yeşil Enerjinin Kirliliği: Lityum İyon Piller

Son yıllarda ivme kazanan teknolojik gelişmeler ışığında her alanda büyük bir teknolojik tüketim yaşanmaktadır. Mobil cihazlar, dizüstü bilgisayarlar, sağlık ve savunma sanayi alanında kullanılan yüksek teknoloji içeren cihazlar ve daha fazlası. Elbette ki tüm bu elektronik cihazların uzun süre kullanılabilir olması tüketici tarafından beklenen en önemli ihtiyaçtır. Kullanılan batarya ve geleneksel piller şu an bu sorunu çözmek için yetersiz kalmakta, . Nikel kadmiyum (NiCd) ve nikel-metal hidrit (NiMH) gibi nikel tabanlı pil teknolojileri her ne kadar iyi bir seçenek gibi görünse de hafıza etkisi ve kullanım ömrü sorunu sebebiyle uzun vadede beklenen performansı sağlayamamaktadır. Bilim insanları bu ihtiyaca uzun vadede çözüm bulabilmenin temel şartının yüksek enerji yoğunluğuna sahip, güvenli ,uzun ömürlü, bakımı kolay, kısa sürede şarj edilebilen ve geleneksel yöntemlere kıyasla daha çevreci bir enerji kaynağına sahip olmaktan geçtiğini belirtiyor. İşte bu sebepten lityum iyon pilleri son yıllarda popüleritesini arttırıyor ve her alanda kullanılabilmesi için yoğun Ar-Ge çalışmaları yapıyor. Peki nedir lityum iyon pilleri?

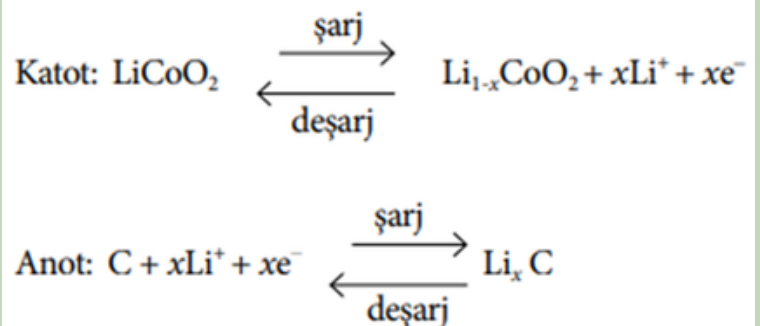


En temel tanımıyla lityum iyon pilleri, enerjiyi kimyasal formda depolayan ve ihtiyaç halinde tekrar elektrik enerjisine dönüştüren şarj edilebilir hücrelerdir. Lityum iyon piller adından da anlaşılacağı üzere lityum iyonlarının batarya içerisinde hareket ederek enerji depoladığı bir pil türüdür. Bir anot, bir katot, bir elektrolit ve bir ayırıcıdan oluşur. Anot (genellikle grafitten yapılır) ve katot (genellikle bir lityum metal oksit), enerji depolama sürecinde önemli roller oynar. Elektrolit, organik bir çözücünde çözünmüş bir lityum tuzudur; ayırıcı ise anot ve katot arasında fiziksel teması önleyen ve iyonik akışa izin veren gözenekli bir malzemedir.



Pil şarj edilirken lityum iyonları pozitif elektrottan (katot) ayrılarak elektrolit üzerinden negatif elektroda (anot) doğru hareket eder.

Katot olarak lityum kobalt oksit kullanılan tipik bir lityum-iyon pil hücresinde şu reaksiyonlar gerçekleşir:



Lityum iyon pillerin çalışma prensibi, onları diğer pil türlerinden ayıran birkaç önemli avantaj sağlar. Bu piller, yüksek enerji yoğunluğu sunarak daha fazla enerji depolayabilir ve bu enerjiyi daha verimli bir şekilde kullanabilir. Lityum iyon pillerinin bir diğer önemli özelliği NiCd pillerde görülen hafıza etkisinin(memory effect) görülmemesi. Hafıza etkisi NiCd pillerin üst üste, tam olarak boşalmadan şarj edilmesi sonucu, maksimum kapasitelerini kaybetme özelliğidir. Bu nedenle lityum-iyon pilleri şarj etmek için tamamen boşalmalarını beklemek veya tam olarak şarj etmek gerekmez (en azından kuramsal olarak). Ayrıca lityum-iyon pillerin zamana bağlı olarak kendi kendine deşarj olma hızı da nikel tabanlı teknolojilere göre hayli düşüktür.



Bugün kullandığımız taşınabilir elektrikli cihazlar , 70'lerde ve 80'lerde lityum (Li) iyon piller üzerinde yaptığı çalışmaları nedeniyle 2019 yılında kimya dalında Nobel Ödülü kazanan üç araştırmacıya, Amerikalı John B. Goodenough, İngiliz M. Stanley Whittingham ve Japon Akira Yoshino'ya teşekkür edebilirsiniz.

Her şeyden önce yaşayan efsane John B. Goodenough, Nobel ödülünü 97 yaşında kazanarak "Nobel ödülü kazanan en yaşlı bilim insanı" ünvanını aldı ve bilim tarihine geçti.

Tüm bu teknik avantajlar ve sağladığı yüksek performans, lityum iyon pillerini yenilenebilir enerji devriminin merkezine yerleştirmiştir. Ancak, bu teknolojinin üretim süreçlerine ve hammadde eldesine yakından bakıldığında, 'çevreci' olarak adlandırılan bu sistemin ciddi ekolojik ve etik sorunlar barındırdığı görülmektedir

Bu teknolojinin en büyük çevresel maliyeti, lityumun elde edilme sürecinde ortaya çıkar. Günümüzde lityumun büyük bir kısmı, Güney Amerika'daki tuz göllerinden buharlaştırma (evaporasyon) yöntemiyle elde edilmektedir. Yalnızca 1 ton batarya sınıfı lityum üretebilmek için milyonlarca litre suyun buharlaştırılması gerekmektedir. Bu durum, halihazırda kurak olan bölgelerde yeraltı su kaynaklarını hızla tüketmekte, yerel tarımı bitirmekte ve ekosistemi geri dönülemez biçimde tahrip etmektedir.

Madalyonun diğer yüzünde ise katot malzemesi yatar. Pilin termal kararlılığını sağlayan lityum kobalt oksit yapısındaki kobaltın dünya rezervlerinin %70'inden fazlası Demokratik Kongo Cumhuriyeti'nden çıkarılmaktadır. Bu madencilik faaliyetleri, çocuk işçiliğinin yaygın olduğu ağır insan hakları ihlalleriyle yürütülmekte ve cevherin işlenmesi sırasında açığa çıkan toksik atıklar doğrudan toprağa ve suya karışmaktadır.

Sonuç olarak; lityum iyon pilleri, fosil yakıtlara olan bağımlılığımızı bitirme yolunda insanlığın elindeki en güçlü araç olsa da, üretim süreçleri henüz tam anlamıyla "yeşil" değildir. Bu ikilemi çözenin tek yolu; ömrünü tamamlamış pillerdeki değerli metallerin geri kazanılmasını sağlayan geri dönüşüm proseslerini (döngüsel ekonomi) geliştirmekten ve kobalt içermeyen yeni nesil batarya teknolojilerine hız vermekten geçmektedir. Geleceğin enerjisi, ancak doğayla ve insan haklarıyla uyumlu bir üretim modeli inşa edildiğinde gerçekten sürdürülebilir olacaktır.

GEENGINEERING: İKLİM KRİZİ DURDURULABİLİR Mİ?

Gezegelimizdeki küresel sıcaklıkların artışı ve iklim politikalarının yetersizliği, bilim dünyasını tartışmalı bir soruyla yüzleştiriyor: Dünya'nın iklimine müdahale edebilir miyiz?

İşte bu noktada geoengineering kavramı bizi karşılıyor.

Geoengineering (jeomühendislik), insan kaynaklı iklim değişikliğinin etkilerini azaltmak veya dengelemek için Dünya'nın doğal sistemlerine bilinçli ve büyük ölçekli müdahaleleri ifade eden, temel bilimler ve mühendislik disiplinlerini bir araya getiren bir yaklaşımdır.

Bu kapsamda, Dünya'nın soğutulması ya da bazı gazların atmosferden uzaklaştırılması gibi geniş ölçekli uygulamalar önerilmektedir.

Jeomühendislik fikri 20. yüzyılın ortalarına uzanmaktadır. II. Dünya Savaşı döneminde gelişen teknolojilerden ilhamla, bölgesel iklim koşullarını değiştirme düşüncesi ortaya atılmıştır.

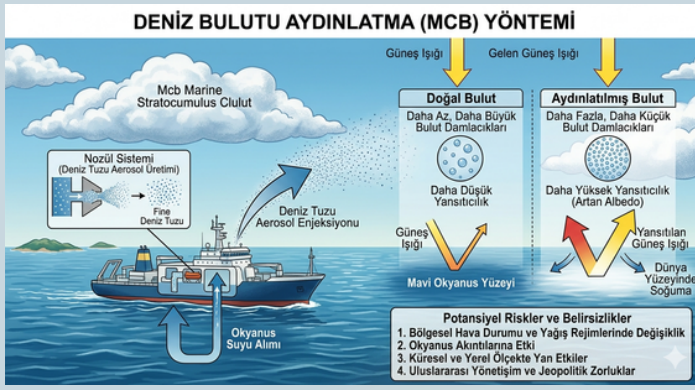
Ancak tartışmanın merkezinde, bu müdahalenin hangi araçlarla ve hangi ölçekte gerçekleştirileceği sorusu yer almaktadır. Bu noktada önerilen teknik yöntemler ön plana çıkmaktadır.

Güneş Radyasyonu Modifikasyonu (SRM)

Güneş jeomühendisliği olarak da adlandırılan bu teknik, Dünya'ya ulaşan güneş ışığının bir kısmını uzaya geri yansıtarak Dünya yüzeyi ve alt atmosfer üzerindeki ısıtıcı etkiyi azaltmayı hedefler.

SRM kapsamında en çok tartışılan uygulamalardan biri, stratosfere uçaklarla sülfat aerosollerini enjekte edilmesidir. Bu yaklaşımda, büyük volkanik patlamalar sonrası atmosferde oluşan aerosol tabakalarının soğutucu etkisinden ilham alınır.



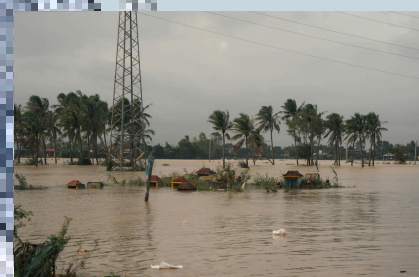


Ayrıca deniz bulutlarının beyazlatılması ve yüzey albedosunun (yansıtıcılığının) artırılması gibi yöntemler de, güneş ışığının daha büyük bir kısmının uzaya yansıtılmasını hedefler.

Daha tartışmalı fikirler arasında ise Dünya yörüngesine yansıtıcı aynalar veya güneşlikler yerleştirilmesi gibi öneriler bulunmaktadır.



Ancak SRM yaklaşımları önemli belirsizlikler ve riskler barındırır. İklim modelleri, bu tür müdahalelerin bölgesel iklim dengelerini farklı şekillerde etkileyebileceğini ve bazı bölgelerde kuraklık, buzulların erimesi ya da aşırı yağış gibi olumsuz sonuçlara yol açabileceğini göstermektedir. Ayrıca bu uygulamaların herhangi bir nedenle durdurulması durumunda, küresel sıcaklıkların kısa sürede hızla yükselmesiyle sonuçlanan “sonlandırma şoku” riski ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle SRM, iklim değişikliğinin temel nedenlerini ortadan kaldırmayan, geçici ve potansiyel olarak yüksek riskli bir müdahale stratejisi olarak değerlendirilmektedir.



Karbondiyoksit Giderimi (CDR)

Karbondiyoksit Giderimi (CDR), atmosferdeki karbondiyoksitin biyolojik ya da teknolojik yöntemlerle uzaklaştırılarak depolanmasını hedefleyen jeomühendislik yaklaşımlarını kapsar.

Bu yöntemler, iklim değişikliğinin temel nedeni olan sera gazı birikimine doğrudan müdahale etmeyi amaçladığı için, Güneş Radyasyonu Modifikasyonu'na kıyasla daha kalıcı bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

CDR kapsamında öne çıkan yöntemler arasında karbon yakalama ve depolama (CCS/CCUS), doğrudan hava yakalama teknolojileri (DAC), okyanus gübrelemesi, biyokömür üretimi ve yapay ağaçlandırma yer almaktadır. Bu yaklaşımlar, atmosferdeki CO₂'nin biyokütlede, yer altında ya da okyanuslarda uzun süreli olarak tutulmasını hedefler.

Aynı zamanda karbondiyoksit seviyelerinin azaltılması, okyanus asitlenmesi gibi iklim değişikliğinin dolaylı etkilerinin hafifletilmesine de katkı sağlayabilir.



Bununla birlikte CDR yöntemleri de önemli sınırlamalara sahiptir. Birçok teknik yüksek maliyet, yoğun enerji gereksinimi ve büyük ölçekli uygulamalarda güvenli depolama sorunlarıyla karşı karşıyadır. Ayrıca karbonun gerçekten uzun vadede atmosferden izole edilip edilemeyeceği ve bu süreçlerin ekosistemler üzerindeki etkileri hâlâ tartışma konusudur. Bu nedenle CDR, potansiyel katkı sunabilecek bir araç olarak görülse de iklim kriziyle mücadelede tek başına yeterli değildir.



Jeomühendisliğe Yönelik Eleştiriler

Jeomühendislik uygulamalarına yönelik temel eleştiri, bu teknolojilerin büyük ölçekli ve uzun vadeli etkilerinin yeterince öngörülememesidir. Çoğu yöntem henüz deneysel aşamadadır ve iklim sistemi üzerindeki olası sonuçları ciddi belirsizlikler içermektedir. Özellikle stratosfere aerosol enjeksiyonu gibi SRM yöntemlerinin yağış rejimleri, muson sistemleri ve bölgesel iklim dengeleri üzerinde nasıl sonuçlar doğuracağı konusunda iklim modelleri farklı senaryolar üretmektedir. Bu durum, küresel ölçekte uygulanacak bir müdahalenin bazı bölgelerde kuraklık ya da aşırı hava olaylarını tetikleme ihtimalini gündeme getirmektedir.

Buna ek olarak, jeomühendisliğin iklim krizine “hızlı bir çözüm” sunabileceği fikri, devletlerin emisyon azaltım politikalarını ertelemesine yol açabilir. Literatürde “moral hazard” olarak tanımlanan bu risk, fosil yakıtlardan çıkış sürecinin yavaşlaması ve yapısal dönüşümlerin gecikmesi anlamına gelmektedir.

Son olarak, bu müdahalelerin bölgesel olarak eşitsiz sonuçlar doğurma ihtimali küresel adalet tartışmalarını beraberinde getirmektedir.

Ortalama küresel sıcaklık düşse bile, bazı bölgelerde yağış azalması ya da tarımsal verim kaybı yaşanması mümkündür. Bu da iklim krizinden zaten orantısız biçimde etkilenen ülkelerin yeni risklerle karşı karşıya kalmasına neden olabilir.



Bu değerlendirmeler, jeomühendisliğin temkinle ele alınması gereken bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır.

Jeomühendislik, iklim krizinin yarattığı aciliyet karşısında bilim dünyasının sınırları zorlayan bir arayışını yansıtmaktadır. Ancak bu yaklaşımlar, henüz kanıtlanmamış etkileri ve yüksek riskleri nedeniyle iklim politikalarının merkezine yerleştirilecek çözümler olarak görülmemelidir.



Fosil yakıt kullanımı ve ekosistem tahribatı sürdüğü sürece, iklim sistemine yönelik müdahaleler kalıcı çözümler üretmekten çok, sorunu erteleyen geçici önlemler olarak kalacaktır.



Bu nedenle iklim krizine verilecek gerçek yanıt, teknik müdahaleleri merkeze almak değil; emisyonları hızla azaltan ve çevresel tahribatı kaynağında önleyen yapısal dönüşümleri kararlılıkla hayata geçirmektir.

Sümeyye ÖZBAY



Kuraklık ve Endüstriyel Su Yönetimi

Küresel iklim değişikliği ile birlikte artan sıcaklıklar ve değişen yağış rejimleri, kuraklık olaylarının hem sıklığını hem de etkisini artırarak su kaynakları üzerinde ciddi bir baskı yaratmaktadır.

Hidrolojik dengedeki bu bozulma, mevcut su arzı güvenilirliğini azaltmakta ve suya bağımlı sektörlerde daha dikkatli bir planlama gerektirmektedir. Özellikle yüksek su tüketimine sahip sanayi sektöründe, artan su talebi ile sınırlı kaynaklar arasındaki uyumsuzluk; tedarik sürekliliğini zorlamakta, maliyetleri artırmakta ve çevresel sorumlulukları daha karmaşık hale getirmektedir. Sanayi süreçlerinde kullanılan suyun miktarı ve kalitesi ile oluşan atık suyun yönetimi arasındaki denge, yalnızca operasyonel verimlilik açısından değil, aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılması bakımından da kritik öneme sahiptir. Bu nedenle kuraklığa uyum sağlayan, suyu bütünsel ele alan endüstriyel su yönetimi yaklaşımları, sürdürülebilir üretim için kritik bir rol oynamaktadır.

Endüstrinin Suya Bağımlılığı

Endüstriyel faaliyetler, üretim süreçlerinin hemen her aşamasında suya doğrudan bağımlıdır. Gıda, tekstil, kimya, petrol rafinasyonu ve metal üretimi gibi sektörlerde su; proses girdisi, soğutma aracı ve temizlik unsuru olarak kritik bir rol üstlenmektedir. Bu bağımlılık bazı üretimlerde çok yüksek boyutlara ulaşmakta; örneğin 1 ton çelik üretimi yaklaşık 100 ton, petrokimya ve asetat üretimi sırasıyla 1100 ve 3160 ton su gerektirebilmektedir.

Su; tesislerin işleyişi, ürün kalitesi ve enerji kullanımı açısından önemli bir girdidir. Ayrıca pompalanması, taşınması ve arıtılması süreçlerinde yüksek enerji gerektirdiği için işletmelerin çevresel performansını da doğrudan etkiler. Artan nüfus, iklim değişikliği ve havza ölçeğindeki su kullanımının çeşitlenmesi ile birlikte su, sanayi için sadece bir üretim girdisi olmaktan çıkarak kaynak yönetimi ve sürdürülebilir planlamalarının temel unsurlarından biri haline gelmiştir.

Kuraklığın Endüstri Üzerindeki Etkisi

Nehir veya yüzey sularına bağımlı tesislerde, uzun süreli kuraklık dönemlerinde debi azalır, su sıcaklığı yükselir ve soğutma verimliliği düşer. Bu durum üretim kapasitesinin azalmasına, enerji maliyetlerinin artmasına ve ürün kalitesinin düşmesine yol açabilir.

Küresel sıcaklık artışıyla birlikte buzulların erimesi ve kar örtüsünün azalması gibi doğal su depolama mekanizmalarının zayıflaması ise uzun vadede su arzının güvenilirliğini azaltmaktadır.



Kuraklık; sanayi, tarım ve diğer kullanıcılar arasındaki rekabeti yoğunlaştırmakta ve suyun yalnızca teknik bir girdi değil, stratejik bir kaynak olarak yönetilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu noktada endüstriyel su ihtiyacına yalnızca tüketim miktarı üzerinden bakmak yeterli değildir; kalite gereksinimleri ve geri kazanım potansiyeli de göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle su temini kısıtlı bölgelerdeki tesisler; uzun vadeli planlama, acil durum rezervleri ve su verimliliği stratejilerini entegre ederek operasyonel riskleri azaltmak zorundadır.

Endüstriyel Su Yönetimi

Kuraklık koşulları günümüzde giderek daha belirgin hale geldiğinden endüstriyel su yönetimi, yalnızca su tüketimini azaltmayı değil; suyun tüm yaşam döngüsünü planlı, ölçülebilir ve entegre bir yaklaşımla yönetmeyi ifade etmektedir.

Bu kapsamda ilk adım, tesis genelinde su dengesi analizlerinin yapılması ve her prosesin su tüketim noktalarının detaylı biçimde haritalandırılmasıdır. Spesifik su tüketimlerinin belirlenmesi, kaçak ve kayıpların izlenmesi, performans göstergelerinin oluşturulması veri temelli bir yönetim altyapısının temelini oluşturur.



Su verimliliğini artırmaya yönelik yöntemlerin başında kapalı devre ve devridaim sistemlerinin yaygınlaştırılması gelmektedir. Özellikle soğutma sistemlerinde kapalı çevrim uygulamaları, tek geçişli su kullanımını azaltarak tatlı su ihtiyacını önemli ölçüde düşürmektedir.



Bununla birlikte, atık suların ileri arıtma teknolojileri (membran sistemleri, ters ozmoz, biyolojik arıtma vb.) ile geri kazanılarak yeniden proses suyu, soğutma suyu veya yardımcı hizmetlerde kullanılması, suyun döngüsel bir kaynak olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

Kazan kondensatı geri kazanımı, soğutma kulesi blöf sularının yeniden kullanımı ve gri su uygulamaları da yaygınlaşan pratikler arasındadır.

Yağmur suyu hasadı, alternatif su kaynaklarının değerlendirilmesi ve su kimyasının doğru yönetilmesiyle sistem içi kayıpların azaltılması da kuraklık riskine karşı dayanıklılığı artıran tamamlayıcı uygulamalardır.

Endüstriyel su yönetimi bu yönüyle yalnızca teknik bir optimizasyon süreci değil; üretim sürekliliğini güvence altına alan, maliyetleri kontrol eden ve çevresel yükü azaltan uzun vadeli planlama gerektiren bir yönetim alanıdır.

Kimya mühendisliği perspektifinden ise su yönetimi, su-enerji-iklim ilişkisiyle birlikte değerlendirilmelidir. Su arıtma ve geri kazanım süreçleri enerji gerektirirken enerji üretimi de suya bağımlıdır. Bu karşılıklı etkileşim, su verimliliğinin aynı zamanda enerji verimliliği ve karbon emisyonlarıyla doğrudan bağlantılı olduğunu göstermektedir. Bu yüzden endüstriyel su yönetimi, düşük karbonlu üretim hedefleriyle birlikte düşünülmelidir.



Ancak su verimliliği günümüzde hâlâ birçok tesis için bir seçenekten öteye geçememekte; sürdürülebilirlik uygulamaları zaman zaman raporlama ve imaj odaklı kalmaktadır.

Gerçek dönüşüm, suyu sadece bir gider kalemi olarak değil, üretim ve operasyon stratejilerinin merkezine yerleştirmeyi gerektirir.

Sonuç olarak kuraklık çağında endüstrinin rekabet gücü ve üretim sürekliliği, suyu yönetme kapasitesiyle doğrudan ilişkilidir. Suyu tüketmek yerine döngüsel ve verimli kullanabilen tesisler, hem çevresel sorumluluklarını yerine getirebilir hem de ekonomik olarak daha güçlü bir konuma geçebilir.

Sümeyye ÖZBAY

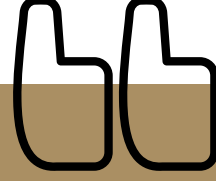
METAL-ORGANIC FRAMEWORKS (MOF): GELECEĞİN GÖZENEKLİ MALZEMELERİ

Bir küp şeker büyüklüğündeki bir Metal Organic Framework kristalinin, teorik olarak bir futbol sahasına yakın yüzey alanına sahip olabileceği düşünülmektedir. Bu sıra dışı özellik, MOF'ları yalnızca kimya araştırmalarında değil; enerji, çevre ve biyoteknoloji alanlarında da geleceğin en umut verici malzemeleri arasına yerleştirmiştir. Günümüzde MOF'lar, atom düzeyinde tasarlanabilen ve istenilen işlevlere göre uyarlanabilen “akıllı kristaller” olarak görülmektedir.

MOF'ların Benzersiz Özellikleri

MOF'ları özel kılan birkaç temel özellik vardır:

- 1. Olağanüstü Yüzey Alanı:** Bazı MOF'ların yüzey alanı gram başına binlerce metrekareye ulaşabilir. Bu durum, gaz depolama ve kataliz gibi uygulamalarda büyük avantaj sağlar.
- 2. Ayarlanabilir Gözenek Yapısı:** MOF'ların gözenek çapı ve kimyasal ortamı tasarlanabilir. Bu sayede belirli molekülleri seçici olarak adsorbe edebilen malzemeler üretilir.
- 3. Kimyasal Fonksiyonelleştirme:** Organik ligandlara farklı fonksiyonel gruplar eklenerek MOF'ların yüzey kimyası değiştirilebilir. Böylece sensör, katalizör veya ilaç taşıyıcı olarak kullanılabilen yapılar elde edilir.
- 4. Çok Yönlü Fiziksel Özellikler:** Bazı MOF'lar iletkenlik gösterebilir, bazıları optik özellikler sergileyebilir, bazıları ise manyetik davranış gösterebilir. Bu çeşitlilik, MOF'ların çok disiplinli araştırmalara açık olmasını sağlar.



Metal Organic Frameworks (MOF), metal iyonları veya metal kümeleri ile organik bağlayıcı moleküllerin koordinatif bağlar aracılığıyla birleşmesi sonucu oluşan kristal ve gözenekli yapılardır. Bu yapılarda metal merkezleri düğüm noktaları gibi davranırken, karbon temelli organik ligandlar bu düğümleri birbirine bağlayan köprüler oluşturur. Böylece üç boyutlu, düzenli ve yüksek boşluk hacmine sahip kristal ağlar meydana gelir.

Bu yapıların en önemli özelliği, gözenek boyutlarının ve kimyasal özelliklerinin tasarlanabilir olmasıdır. Kullanılan metal iyonu, organik ligandın uzunluğu ya da fonksiyonel grupları değiştirilerek tamamen farklı özelliklere sahip yeni MOF'lar sentezlenebilir. Bu durum, MOF'ları geleneksel gözenekli malzemelerden ayıran en kritik avantajdır.



MOF'ların Gelişim Süreci

Gözenekli koordinasyon polimerleri üzerine çalışmalar 20. yüzyılın sonlarında hız kazansa da, MOF kavramının sistematik olarak ortaya çıkışı 1990'lı yıllara dayanır. Bu alandaki öncü araştırmalar, özellikle **Susumu Kitagawa, Richard Robson ve Omar M. Yaghi** tarafından yürütülmüştür.

Kitagawa ve Robson'un koordinasyon ağları üzerine yaptığı çalışmalar, metal-organik yapıları sistematik biçimde tasarlanmasının mümkün olduğunu göstermiştir. Ancak MOF'ların modern anlamda tanımlanması ve geniş uygulama alanına ulaşması, özellikle Omar Yaghi'nin 1990'ların sonlarında gerçekleştirdiği çalışmalarla mümkün olmuştur.

Yaghi'nin geliştirdiği MOF-5 gibi yapılar, son derece yüksek yüzey alanına sahip, stabil ve modüler kristallerin üretilebileceğini ortaya koymuştur. Bu keşif, malzeme kimyasında yeni bir paradigma oluşturmuş ve "retiküler kimya" olarak adlandırılan yapı tasarım yaklaşımının doğmasına yol açmıştır.

Bu alandaki öncü katkılar, gözenekli kristal malzemelerin tasarımına sağlanan devrim niteliğindeki etkiler nedeniyle **2025 Kimya Nobel Ödülü** ile onurlandırılmıştır. Bu ödül, MOF'ların yalnızca akademik bir merak değil, sürdürülebilir teknolojiler için kritik öneme sahip bir malzeme sınıfı olduğunun bilim dünyasınca kabul edildiğinin göstergesidir.

MOF'ların kullanım alanları her geçen yıl genişlemektedir. En dikkat çekici uygulamalar şunlardır:

Gaz Depolama ve Enerji Teknolojileri

MOF'lar hidrojen, metan ve karbon dioksit gibi gazları yüksek miktarda depolayabilir. Bu özellik, özellikle temiz enerji teknolojilerinde ve hidrojen yakıt sistemlerinde önem taşır.

Karbon Yakalama ve İklim Teknolojileri

MOF'lar, karbondioksit moleküllerini seçici biçimde adsorbe edebilir. Bu sayede endüstriyel bacalardan çıkan CO₂'nin tutulması ve depolanması için kullanılacak potansiyel malzemeler arasında yer alırlar.

Su Arıtma

MOF'lar ağır metal iyonlarını, organik kirleticileri ve toksik molekülleri sudan uzaklaştırmada etkili olabilir. Bu yönüyle su arıtma teknolojilerinde yeni nesil filtre malzemesi olarak araştırılmaktadır.

İlaç Taşıma Sistemleri

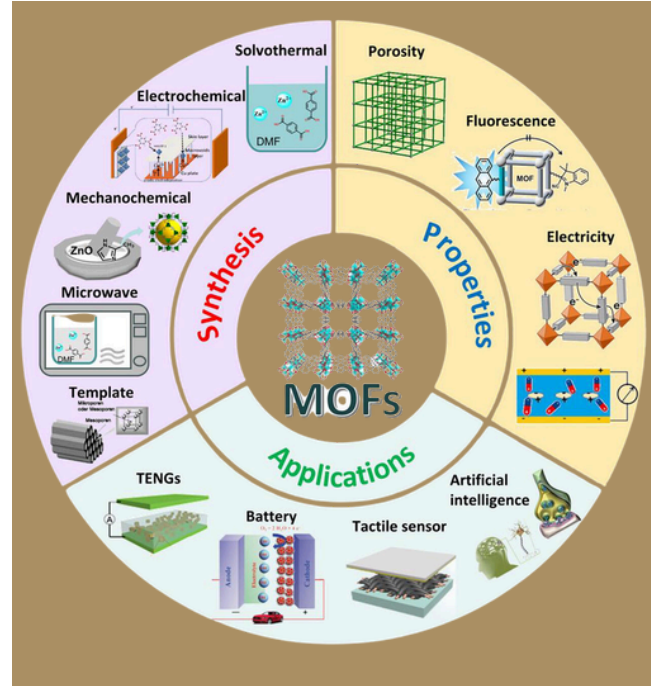
Gözenekli yapıları sayesinde MOF'lar, ilaç moleküllerini taşıyabilir ve kontrollü şekilde salabilir. Bu özellik, hedefe yönelik tedavilerde büyük avantaj sağlayabilir.

Kataliz

MOF'ların geniş yüzey alanı ve ayarlanabilir aktif bölgeleri, onları katalizör tasarımında cazip hale getirir. Kimyasal üretim süreçlerinde daha seçici ve enerji verimli reaksiyonlar elde edilmesine yardımcı olabilirler.

Gelecek Perspektifii

MOF'lar henüz tam anlamıyla ticarileşmiş malzemeler olmasa da, araştırma hızları göz önüne alındığında önümüzdeki yıllarda enerji depolama, karbon yakalama, temiz su üretimi ve biyomedikal uygulamalarda önemli rol oynamaları beklenmektedir. Malzeme tasarımının atom düzeyinde kontrol edilebildiği bir çağda, MOF'lar kimyanın "lego parçaları" gibi görülmektedir. Bu nedenle birçok araştırmacı, MOF'ların sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesinde temel yapı taşlarından biri olacağı görüşünde birleşmektedir.



DENİZ YOSUNUNDAN BİYOPLASTİK ÜRETİMİ

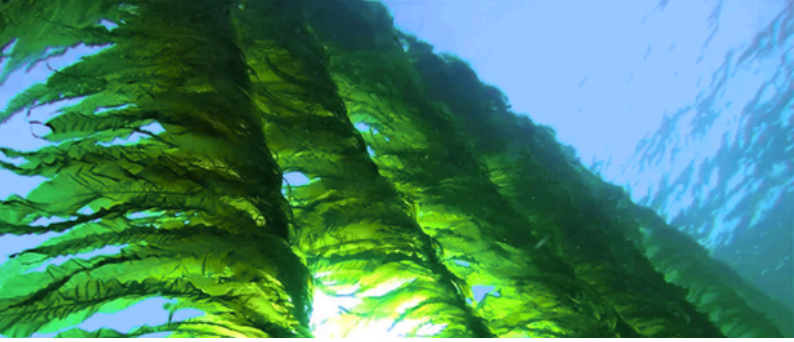


21. yüzyılın başlarında kişi başına yıllık plastik tüketiminin yaklaşık 15 kg olduğu tahmin edilirken, dünya nüfusunun artmasıyla birlikte bu miktar sürekli yükselmiştir. Günümüzde düşük maliyetleri, dayanıklılıkları ve çok yönlü kullanım olanakları nedeniyle plastikler en yaygın kullanılan malzemelerden biri haline gelmiştir. Bu durum yıllık yaklaşık 380-390 milyon tonluk küresel plastik üretimini beraberinde getirmektedir. Üretilen plastiklerin yaklaşık %50'si tek kullanımlık ürünlerden oluşmaktadır.

“İnsanlık her yıl yüz milyonlarca ton plastik üretirken, doğa bunun bedelini yüzyıllarca ödemektedir.”

Biyoplastiklerin pazara girişi tarihsel olarak çeşitli zorluklarla karşılaşmıştır. Yaklaşık 100 yıllık geçmişe sahip geleneksel plastik endüstrisi, iyi tanımlanmış üretim süreçlerine, oturmuş ekonomik modellere ve yerleşmiş tüketim alışkanlıklarına sahiptir. Bu nedenle biyoplastiklerin endüstride daha geniş bir kullanım alanı bulabilmesi için maliyet açısından rekabetçi ve benzer mekanik özelliklere sahip materyallerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Avrupa Biyoplastik Derneği verilerine göre küresel biyoplastik üretimi 2022-2023 döneminde 1,83 milyon tondan 2,18 milyon tona yükselmiştir. Üretim kapasitesinin kısa vadede 2,67 milyon tona, 2025 yılına kadar ise 4,83 milyon tona ulaşması beklenmektedir.



Alternatif Bir Kaynak: Deniz Yosunları

Dünya yüzeyinin yaklaşık %70'inin suyla kaplı olması, biyoplastik üretimi için büyük bir deniz yosunu potansiyeli bulunduğunu göstermektedir. Deniz yosunları, yetiştirilmeleri için tarım arazisi veya içme suyu gerektirmemeleri nedeniyle önemli bir avantaj sunar. Bu özellikleri onları gıda, kozmetik, farmasötik ve biyoteknoloji gibi birçok sektörde cazip bir hammadde haline getirmektedir.

Bununla birlikte, deniz yosunlarının yoğun şekilde toplanmasının ekolojik etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Aşırı hasat, deniz ekosistemlerinde değişimlere, biyolojik çeşitlilik kaybına ve habitat bozulmalarına yol açabilir. Bu nedenle sürdürülebilir hasat yöntemlerinin uygulanması, çevresel etkilerin azaltılması ve deniz ekosistemlerinin korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

Deniz yosunu bazlı biyoplastiklerin en önemli avantajları şunlardır:

- Tamamen biyobozunur olmaları
- Tarım arazisi gerektirmemeleri
- Fotosentez yoluyla karbon dioksit tüketmeleri
- Toksik olmamaları ve gıda ambalajında kullanılabilimleri



Bununla birlikte suya karşı hassasiyet, düşük mekanik dayanım ve yüksek üretim maliyetleri hâlen önemli sınırlamalar arasında yer almaktadır.

Sonuç: Sürdürülebilir Plastik Geleceği

Deniz yosunlarından elde edilen biyoplastikler, plastik atık sorununa çözüm sunabilecek çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu materyallerin yaygınlaşabilmesi için mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, suya dayanıklılıklarının artırılması ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi gerekmektedir. Bilimsel ve teknolojik ilerlemeler sayesinde biyoplastiklerin gelecekte plastik endüstrisinin daha sürdürülebilir bir yapıya dönüşmesine önemli katkılar sağlaması beklenmektedir.

Görünmez Plastik: Mikroplastiklerin Kimyasal Yolculuğu ve Besin Zinciri

Gözle Görülmeyen Bir Tehdit

Günlük yaşamda temiz olduğu varsayılan su, hava ve gıda kaynakları, aslında mikroskobik düzeyde plastik parçacıkları içerebilmektedir. Mikroplastikler, çıplak gözle tespit edilemeyecek kadar küçük olmalarına rağmen, günümüzde okyanuslardan atmosfere, içme suyundan insan dokularına kadar geniş bir yayılım göstermektedir. Bu durum, mikroplastikleri modern çağın en görünmez ancak en yaygın çevresel kirleticilerinden biri haline getirmiştir.

Kimyasal Özellikler ve Taşıyıcı Rol

Mikroplastiklerin çevresel etkileri yalnızca fiziksel varlıklarıyla sınırlı değildir. Plastik üretiminde kullanılan katkı maddeleri (örneğin bisfenol A, ftalatlar ve alev geciktiriciler) zamanla çevreye salınabilmektedir. Bu maddeler, toksik ve endokrin bozucu etkiler gösterebilmektedir. Bunun yanı sıra mikroplastikler, geniş yüzey alanları ve hidrofobik yapıları sayesinde çevrede bulunan çeşitli kirleticileri adsorbe edebilmektedir. Bu kirleticiler arasında:

- Ağır metaller (kurşun, cıva, kadmiyum),
- Pestisitler,
- Kalıcı organik kirleticiler (PCB, DDT)

yer almaktadır. Bu özellikleri nedeniyle mikroplastikler yalnızca bir kirletici değil, aynı zamanda zararlı kimyasalları taşıyan bir vektör görevi görmektedir.



Plastiklerin Parçalanma Süreci: Yok Oluş mu, Dönüşüm mü?

Plastik materyaller doğada biyolojik olarak kolaylıkla parçalanamaz. Bunun yerine fiziksel ve kimyasal süreçler sonucunda daha küçük parçalara ayrılırlar. Bu süreçte;

- Güneş ışığına bağlı fotodegradasyon,
- Mekanik aşınma (rüzgar, dalga ve sürtünme etkileri),
- Kimyasal oksidasyon önemli rol oynamaktadır.

Bu süreçler sonucunda çapı 5 milimetreden küçük olan plastik parçacıkları oluşur ve bu parçacıklar mikroplastik olarak adlandırılır. Mikroplastikler, üretim şekillerine göre iki gruba ayrılmaktadır:

- Birincil mikroplastikler: Doğrudan küçük boyutta üretilen partiküller
- İkincil mikroplastikler: Büyük plastiklerin parçalanmasıyla oluşan partiküller

Bu bağlamda plastiklerin çevrede “yok olmadığı”, yalnızca daha küçük ve daha hareketli formlara dönüştüğü söylenebilir.

Kimyasal Özellikler ve Taşıyıcı Rol

Mikroplastik Nedir?

İnsan yapımı plastiklerin, 5 mm'den daha küçük parçacıklarıdır.

Bu parçacıklar, ekosistemlere ve insan sağlığına zararlı etkiler yaratabilir.



T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI

Mikroplastiklerin çevresel etkileri yalnızca fiziksel varlıklarıyla sınırlı değildir. Plastik üretiminde kullanılan katkı maddeleri (örneğin bisfenol A,ftalatlar ve alev geciktiriciler) zamanla çevreye salınabilmektedir.Bu maddeler, toksik ve endokrin bozucu etkiler gösterebilmektedir. Bunun yanı sıra mikroplastikler,geniş yüzey alanları, hidrofobik yapıları sayesinde çevrede bulunan çeşitli kirleticileri adsorbe edebilmektedir. Bu kirleticiler arasında:

- Ağır metaller (kurşun, cıva, kadmiyum),
- Pestisitler,
- Kalıcı organik kirleticiler (PCB, DDT)

yer almaktadır.

Bu özellikleri nedeniyle mikroplastikler yalnızca bir kirletici değil, aynı zamanda zararlı kimyasalları taşıyan bir vektör görevi görmektedir.

Su Sistemlerine Taşınım Mekanizmaları

Mikroplastiklerin çevreye yayılımı farklı kaynaklar aracılığıyla gerçekleşmektedir.

Başlıca kaynaklar şunlardır:

- Evsel atık sular ve kozmetik ürünler,
- Sentetik tekstil lifleri,
- Endüstriyel atıklar,
- Yağmur suyu ve yüzey akışı

Atık su arıtma tesisleri mikroplastiklerin tamamını tutmakta yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle mikroplastikler nehirler, göller ve okyanuslar aracılığıyla geniş alanlara taşınmaktadır.

Besin Zincirine Giriş ve Biyobirikim



Mikroplastiklerin en kritik etkilerinden biri besin zincirine dahil olmalarıdır. Su ekosistemlerinde planktonlar, mikroplastikleri besin olarak algılayarak tüketebilmektedir. Bu durum, mikroplastiklerin trofik seviyeler boyunca taşınmasına neden olmaktadır. Bu süreçte iki önemli mekanizma söz konusudur:

- Biyobirikim: Mikroplastiklerin canlı organizmaların dokularında zamanla birikmesi
- Biyobüyütme (Biomagnification): Besin zinciri boyunca yukarı çıkıldıkça konsantrasyonun artması

Sonuç olarak, besin zincirinin üst basamaklarında bulunan canlılarda daha yüksek mikroplastik yoğunlukları gözlemlenmektedir.

İnsan Maruziyeti ve Sağlık Etkileri

İnsanlar, besin zincirinin en üst basamağında yer almaları nedeniyle mikroplastiklere doğrudan maruz kalmaktadır.



Mikroplastiklerin insan vücuduna giriş yolları şu şekilde sıralanabilir:

- Gıda tüketimi (özellikle deniz ürünleri),
- İçme suyu, Solunum yoluyla hava

Son yıllarda yapılan çalışmalar, mikroplastiklerin insan akciğer dokusunda, kan dolaşımında ve plasentada tespit edildiğini ortaya koymuştur.

Mikroplastiklerin potansiyel sağlık etkileri arasında:

- Enflamasyon,
- Oksidatif stres,
- Hücresel hasar,
- Endokrin sistem bozuklukları

yer almaktadır. Ayrıca mikroplastiklerin taşıdığı kimyasalların uzun vadede toksik etkiler oluşturabileceği düşünülmektedir.

Küresel Yayılım: Sadece Su Problemi Değil

Mikroplastikler yalnızca su ortamlarıyla sınırlı değildir. Atmosferik taşınım yoluyla farklı bölgelere ulaşabilir ve yağışlar aracılığıyla tekrar yeryüzüne dönebilirler. Bu durum, mikroplastiklerin kutup bölgeleri ve tarım alanları gibi uzak ekosistemlerde dahi tespit edilmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla mikroplastik kirliliği, yalnızca belirli bir bölgeyle sınırlı olmayan, küresel ölçekte değerlendirilmesi gereken önemli bir çevre sorunudur.

Azaltım Stratejileri ve Çözüm Yaklaşımları



Mikroplastik kirliliğinin azaltılması için çok yönlü stratejiler gerekmektedir. Bireysel düzeyde tek kullanımlık plastik tüketiminin azaltılması ve alternatif ürünlerin tercih edilmesi önemli bir adım oluştururken; endüstriyel düzeyde gelişmiş filtrasyon sistemleri, etkin atık yönetimi ve biyobozunur polimerlerin geliştirilmesi kritik rol oynamaktadır. Küresel ölçekte ise plastik üretiminin sınırlandırılması, sürdürülebilir üretim politikalarının benimsenmesi ve karbon ayak izinin azaltılması, mikroplastik kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlayabilecek temel stratejiler arasında yer almaktadır.

Geleceği korumak; bireysel alışkanlıklardan endüstriyel çözümlere, küresel politikalardan karbon ayak izini azaltmaya kadar uzanan bütüncül bir dönüşümle mümkündür.

Küçük adımlar, büyük değişim; temiz bir gelecek hepimizin elinde.

DOĞANIN KUANTUM SÜPERİLETKENİ: FENNA-MATTHEWS-OLSON KOMPLEKSİ ENERJİYİ NASIL KUSURSUZ TAŞIYOR?

**KARANLIKTA YOLUNUZU BULABİLİR MİSİNİZ? BİR LABİRENTİN ÇIKIŞINI
GÖZLERİNİZ KAPALI BULABİLİR MİSİNİZ? PEKİ YA O ÇIKIŞI BİR ÇIRPIDA BULMANIZ
MÜMKÜN MÜ?**

Bu soruların ilk bakışta ne kadar anlamsız ve mantık dışı görüldüğünün farkındayım; ancak aslında sadece üç soruda size anlatacağım konuyu özetledim. Zaten kendisini yazmaya değer kılanda, tabiri caizse “ürpertici” yönüydü. Fakat asıl ilginç olan, bu soruların cevabının klasik fizik kurallarının ötesine geçip, kuantum dünyasının şaşırtıcı yasalarına dayanan mekanizmalarla açıklanabilmesi.



Hazırsanız bugün Fenna-Matthews-Olson (FMO) kompleksi adı verilen, aslında hepimizin lise yıllarından aşına olduğu yeşil sülfür bakterisinin eşsiz yapısının ürünü olan yapıyı konuşacağız. Bu yapı, görünmez yolları ışık hızında ve neredeyse hatasız bulurken, kuantum etkilerinin doğrudan rol oynadığı, klasik sezgilerimizi altüst eden bir işleyiş sergiliyor. Gizemli bir labirentin kalbinde, görünmez yolları ışık hızında ve neredeyse hatasız bulan bu yapı, bilim insanlarını bugün dahi şaşkınlığa uğratıyor.

Yolculuğumuza başlarken aslında öyle çok uzaklara gitmiyoruz; sözünü ettiğim bu “büyülü” yapıya ev sahipliği yapan yeşil sülfür bakterilerinin en sık rastlandığı yerlerden biri, ülkemizin kuzey kıyılarındaki Karadeniz. Derinliği kilometreleri aşan, derinlere indikçe adeta başka bir dünya ortaya çıkan bir denizden bahsediyoruz. Yüzeyde hayat alışıldık seyrinde devam ederken, yüzeyden derinlere indikçe ışık hızla azalıyor, suyun basıncı ise katbekat artıyor. Bu derinliklerde oksijen de hızla tükeniyor ve yerini sülfür bileşiklerine bırakıyor. Işığın yok denecek kadar az olduğu, yüksek basınç ve oksijen yoksunluğu ile sülfür zenginliğinin bir arada görüldüğü bu ortam, Karadeniz’in derinliklerindeki yaşamı baştan sona değiştiriyor; öyle ki burada karşılaştığımız canlılar ve ekosistemler, alıştığımız denizlerden çok farklı bir tablo sergiliyor.

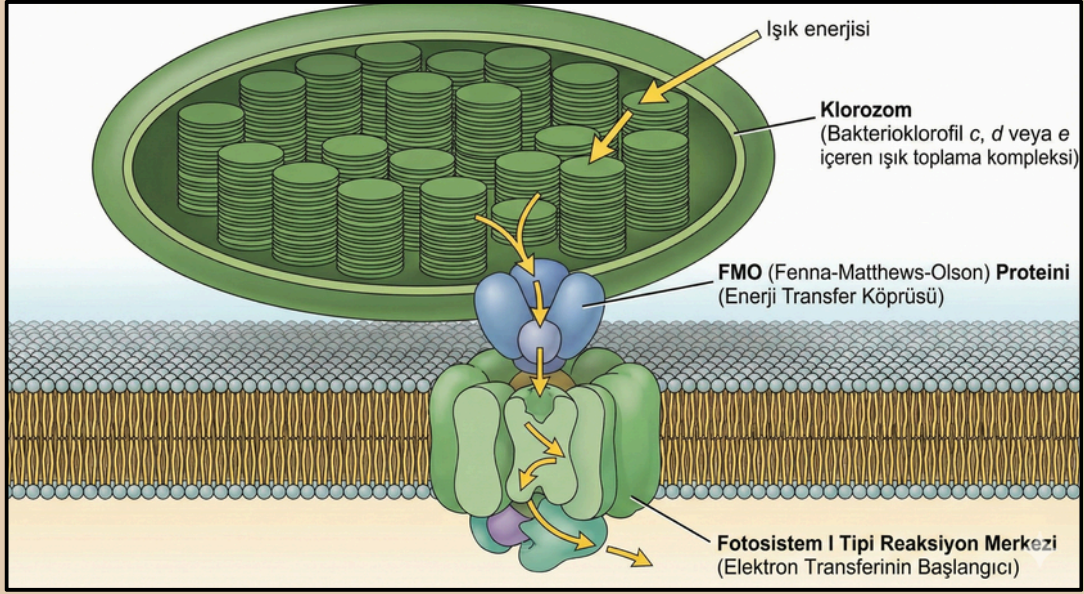


Takdir edersiniz ki böylesine zorlu koşullarda yaşamak her canlının harcı değil. İşte bu noktada canlılığın doğayla olan dansına şahit oluyoruz. Bu koşullarda var olabilmek için canlıların geliştirdiği adaptasyonlar aslında onların milyonlarca yıllık mücadelelerinin bir ürünü. Dolayısıyla doğada karşılaşılabileceğimiz en kusursuz ve en işlevli yapılar olduklarını söylemek yanlış olmaz.

Bugün inceleyeceğimiz yapı olan FMO kompleksleri de bu dansın fotosentez ayağında Karadeniz’in metrelerce derinliklerinde, karanlıkta, yüksek basınçta ve sülfürce zengin bir ortamda yaşayan yeşil sülfür bakterilerinin fotosentez yapabilmesine olanak tanıyor.

FMO kompleksinin yapısını ve işlevini daha iyi anlayabilmek için görev aldığı fotosentez sürecine biraz değinmeliyiz. Bilindiği üzere fotosentez süreci prokaryot ve ökaryot canlılarda birbirinden farklı gerçekleşir. İnceleyeceğimiz yapı olan yeşil sülfür bakterisi prokaryot bir canlı olduğu için konuya girerken muhtemelen çoğumuzun aklındaki “kloroplastlı” fotosentez sürecini bir kenara bırakması gerekiyor. Bahsi geçen koşullar için fazla karmaşık olan bu sistemler yerine bakteriler üç elemandan oluşan, bana hep “çanak anteni” çağrıştıran bir sistem kullanıyorlar. Gelin öncelikle bu sisteme bir göz atalım.





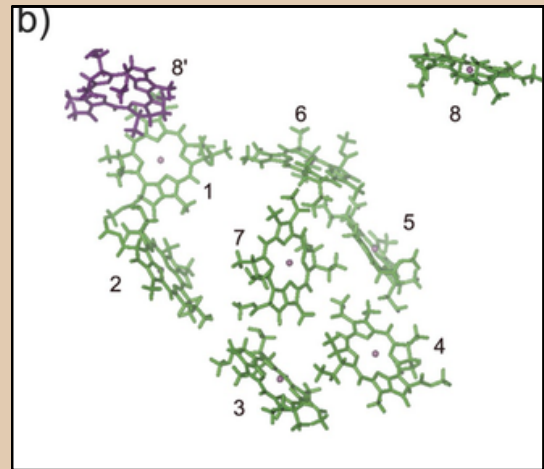
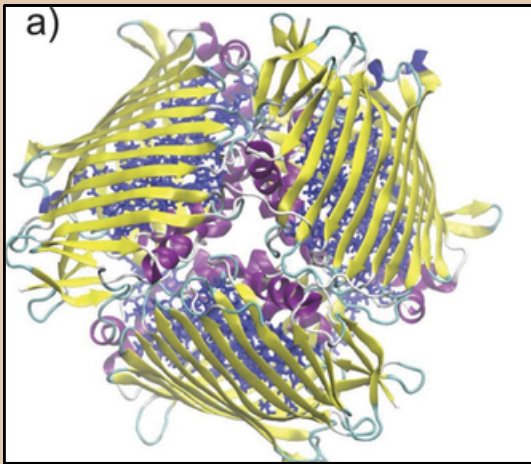
Benzetmemi biraz açmak istiyorum. Yukarıdaki görsele bakarsanız Klorozom yapısı sistemin çanağı, FMO kompleksi -biraz havada kalsa da- antenden alıcıya olan yolu, Fotosistem I ise alıcıyı temsil ediyor. Bu anlatıyı sistemlerin görevleri üzerine oluşturduğumdan ötürü Klorozom aynı çanağın radyo dalgalarını topladığı gibi ışığı topladığını, Fotosistem I'ın ise toplanan bu radyo dalgalarını işleyen anten gibi ışığı işlediğini söylemek yanlış olmaz. Ancak bu sistemin bana kalırsa en “büyülü” yapısı olan FMO kompleksini bu anlatıya tam olarak uyarlayamadım. Çünkü öyle bir yapıya sahip ki, mevcut teknolojimiz ile ona benzer bir sistem henüz geliştiremedik. Ama illa somutlamak istersek bu yapıyı basitçe bir kabloya benzetebiliriz. Ancak ultra verimli bir kablo demek daha doğru olur. Öyle ki “çanağın” topladığı enerjiyi %99 gibi bir verimlilik oranıyla Fotosistem I'e iletebiliyor. Üstelik bu iletimi şartlar itibarıyla gösterememesi gereken kuantum özellikleri göstererek sağlıyor.

İyide nasıl? Böylesine küçük ve basit bir hücre tüm bu kaosun ortasında nasıl oluyor da enerji iletimini bizden bile iyi yapıyor? Cevap aslında az önce bahsettiğim “kuantum özelliklerinden” geliyor.



Kuantum fiziğine ilgisi olan herkes az çok “süperpozisyon” olayından haberdardır ancak bilmeyenler içinde hızlıca özetleyeceğim. Süperpozisyon, bir şeyin aynı anda birden fazla olasılıkla var olabilme halini anlatır. Kısaca bir nesnenin aynı anda hem Ankara’da hem İstanbul’da olabilmesi ihtimali gibi düşünebilirsiniz. Ancak biz o nesneyi gördüğümüzde, sadece bir konumda buluruz; diğer olasılıklar ise ortadan kalkar. Bu özellik, alıştığımız günlük dünyada pek rastlanmaz ama atomların ve çok küçük parçacıkların dünyasında oldukça doğal bir davranış biçimidir. Tabi süperpozisyonun gerçekleşebilmesi için bazı özel şartların sağlanması gerekir. Öncelikle, sistemin dışarıdan herhangi bir gözlem veya etkileşimle bozulmaması, yani kuantum durumunun korunması gerekir; bu duruma "koherens" denir. Buna bağlı olarak ortamın sıcaklığının düşük, çevresel etkilerin ise minimumda olması süperpozisyonun devamlılığı için önemlidir. Eğer sistem dışarıdan bir müdahaleye maruz kalırsa, süperpozisyon durumu bozulur ve parçacık yalnızca tek bir durumda gözlemlenir. Kısacası, süperpozisyonun sürdürülebilmesi için izolasyon, düşük sıcaklık ve minimal çevresel etki gibi koşulların bir arada bulunması gerekir.

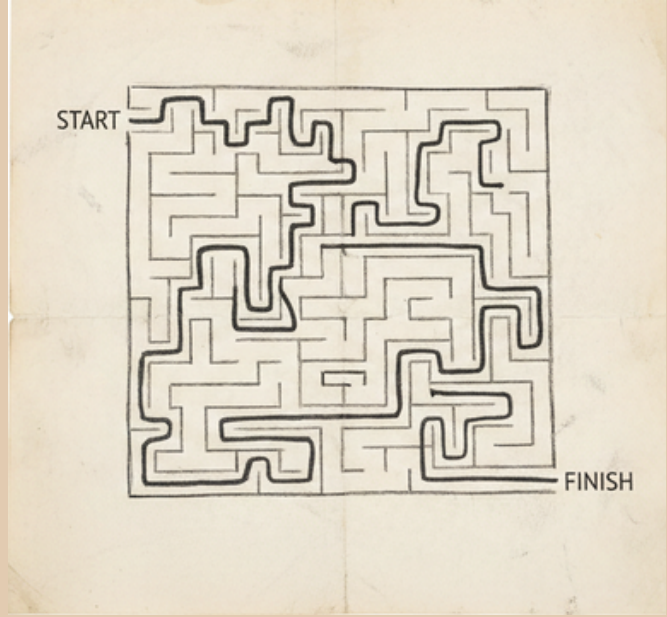
Peki ya bu bakteriler nasıl oluyor da denizin derinlerinde, koherens şartlarına taban tabana zıt bir ortamda, koherense ortam sağlayabiliyorlar?



2008 yılında Greg Engel ve ekibi tarafından keşfedilen bu etki o yıllarda bilim dünyasında büyük bir merak yarattı. Nasıl oluyor da ancak laboratuvar ortamında sağlanabilen bu etkiyi basit bir bakteri hem de denizlerin metrelerce derininde gerçekleştirebiliyordu? Cevap aslında bizlere çok şey öğreten farklı bir metottan geliyordu. Bükemediğin eli öpeceksin.

Evet gerçekten de öyle. Bu yapılar bizim o izole etmeye çalıştığımız çevresel etkileri iletim süreçlerini optimize etmek için kullanıyorlar. Şimdi bunu anlatabilmek adına eklediğim görsele bakmanızı istiyorum. Görsel a'da gördüğünüz FMO bir trimer olduğundan düşünme kolaylığı açısından yan yana konmuş üç tane kablo gibi düşünebilirsiniz. Her ne kadar karman çorman gözükse de aslında FMO adına enerji iletimi Görsel b'deki bakteriyoklorofiller aracılığıyla sağlanmakta. Yani Görsel a'daki o şerit halindeki yapılar aslında başka bir sebep için orada. Tüm bu büyüğü yaratan sebep.

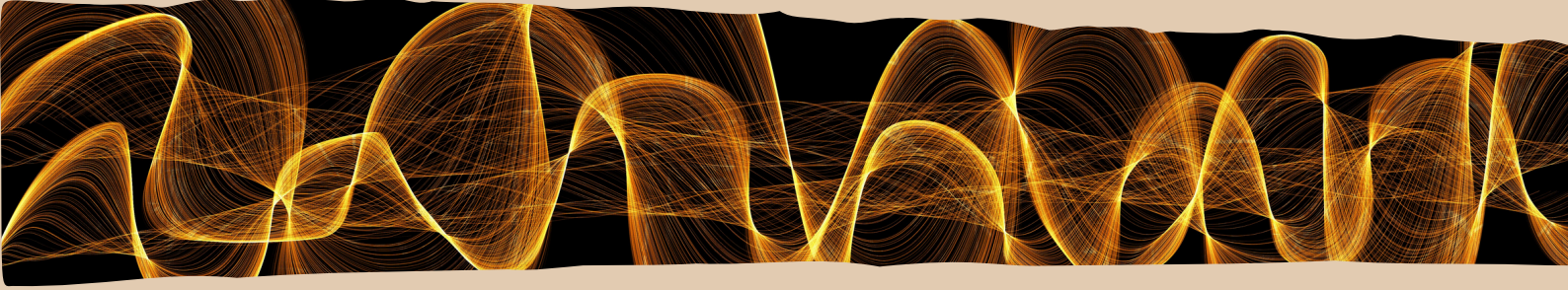
Basitçe bu proteinler pigmentler için aynı bir gimbal gibi görev yapıyor. Doğal durumlarında yaptıkları salınım hareketi iki pigmenti iletim için en ideal açı ve konumda tutuyor. Şimdi akıllara şu soru gelebilir. İyi de hani bu sistemler çevresel etkilere karşı durmuyordu? Onları iletimin bir parçası haline getiriyordu? Evet öyle. Proteinler her ne kadar pigmentleri en optimal konumda tutsa da aslında temelde bu konumlamayı başlatanda tıkanıp yerde düzeltende çevresel etkileşimlerdir.



Labirent analogimize dönersek protein yapı, labirentten çıkış yolunu tasarlayan mimar gibidir; yolları çizip hangi pigmentin nerede duracağını belirler. Ancak labirentin içinde ilerleyen bir yolcunun önüne bazen beklenmedik engeller çıkabilir. İşte bu noktada çevresel etkileşimler devreye girer ve yolcunun yönünü yeniden bulmasını sağlar. Yani proteinler labirentin ana planını oluştururken, çevresel etkileşimler yolcunun kaybolduğu yerde ona yeni bir çıkış yolu sunar. Bu iş birliği sayesinde, bakterinin fotosentez yolundaki enerji transferi adeta karanlıkta kaybolmuş bir yolcunun, proteinlerin çizdiği harita ve çevrenin rehberliğiyle çıkış kapısına ulaşmasına benzer.

Ancak bu noktada sakın proteinlerin ve çevresel etkilerin enerjiye “Şu yoldan git.” veya “Bu aralıktan geç.” dediğini düşünmeyin. Daha çok “Her yerden aynı anda git.” diyorlar. Bunu şu şekilde somutlayalım. Bir gazetede denk geldiğiniz labirenti çözmek için kalemi elinize aldınız. Başlama noktasından itibaren sırasıyla her yolu bir sağa bir sola denediniz. O yollardan çıkmaz olanları tek tek denediniz ve nihayet çıkışa ulaştınız. Eğer aynı labirenti FMO çözüyor olsaydı aynı anda hem sağ yolu hem sol yolu denerdi. Bu şekilde sizin tek tek bakacağınız her ihtimalin en doğrusunu eliyle koymuş gibi bulur, siz tüm enerjinizi labirentten çıkmaya harcarken FMO hiç yorulmadan sistemden çıkardı.

Tabi anlatıya bu kadar kapılıp “Yoksa bu FMO çok mu zeki?” gibi düşünmenizin önüne geçeyim. Aslında sistem için bir karar verme süreci yok. Yani aktarılan enerji için FMO, yalnızca başı ve sonu olan bir sistem. Daha çözmeye başlamadan çözdükleri bir labirent. Bunu ise daha önce bahsettiğim etmenler sayesinde elde ettikleri kuantum süperpozisyona borçlular.



Toparlarsak, FMO kompleksi ve bakterilerin kuantum özellikleriyle enerji iletimi, bilim dünyasının ezberlerini bozarak yeni bir bakış açısı sunuyor. Bizler laboratuvarlarımızda izolasyon, düşük sıcaklık ve minimal çevresel etki ararken; bakteriler, denizin metrelerce derininde, doğanın en çetin koşullarında, çevreyle uyum içinde olağanüstü bir verimlilikle enerji aktarımı gerçekleştiriyor. Kuantum süperpozisyon gibi kavramların yalnızca teoriyle sınırlı olmadığını, doğanın her köşesinde pratikte de yer bulduğunu fark etmek, insanlığın bilgi ufkunu genişletiyor.

Bu büyülü düzenin keşfi, insanlığın teknolojik hayallerini yeniden şekillendirebilir. Doğadan ilham alan yeni nesil enerji transfer sistemleri, bilgisayarlar, iletişim teknolojileri ve belki de kuantum biyolojinin sırlarını çözmek için atılacak adımlar, her zamankinden daha heyecan verici bir geleceğin habercisi olabilir. Kimi zaman bir bakteri, kimi zaman bir protein, kimi zaman ise bir pigment; hepsi kendi görevini en etkili şekilde yerine getirirken, evrensel bir iş birliği ile sisteme katkı sağlıyor.

Yazının sonunda, şu temel noktaya dikkat çekmek istiyorum: FMO kompleksinin kuantum etkileri, yalnızca doğadan ilham almakla kalmayıp, makro ölçekte kuantum sistemlerinin anlaşılması açısından da bilim dünyasında kritik bir dönüm noktasıdır. Bu tür biyolojik yapılarda gözlenen kuantum süperpozisyon ve koherens, insan beynindeki sinaptik iletişimde veya kelaynak kuşlarının navigasyon yeteneklerinde de benzer şekilde karşımıza çıkabilir. Özellikle FMO'nun deniz bakterilerinde gözlenmesi, kuantum mekanik prensiplerin laboratuvar dışında ve karmaşık biyolojik ortamlarda da sürdürülebilir olduğunu göstererek, makro boyutta kuantum biyolojisinin kapılarını aralamaktadır. Doğayı dikkatle izlemek, onun karmaşık mekanizmasını anlamak kadar, kuantum etkilerin canlı sistemlerde nasıl işlediğini çözmek için de anahtar niteliğindedir; bu hem temel bilim hem de gelecekteki teknolojik gelişmeler için yeni ufuklar sunmaktadır.

EKOSİSTEMİN SESSİZ DİLİ

Gökyüzünün Görünmez Terazisi: Gaz Dengesi Nasıl Korunuyor

Atmosferdeki gazların dengesi, doğanın dev geri dönüşüm sistemleri olan oksijen ve azot döngüleri sayesinde korunur.

Oksijen, canlıların solunumuyla karbondioksit dönerken; bitkiler fotosentez yoluyla bu karbondioksiti tekrar oksijene çevirir. Azot ise çok daha gizli bir yolculuk izler: Atmosferdeki azot, özel bakteriler yardımıyla toprağa ve bitkilere geçer; canlılar üzerinden besin zincirine katılır. Atıklar ve ölü dokular ayrıştığında ise azot yeniden gaz formuna dönerek gökyüzüne döner.

Bu kesintisiz alışveriş, atmosferin kimyasal oranlarını milyarlarca yıl boyunca görece dengeli tutan bir denge mekanizmasıdır

Azotun Görünmez Hakimiyeti

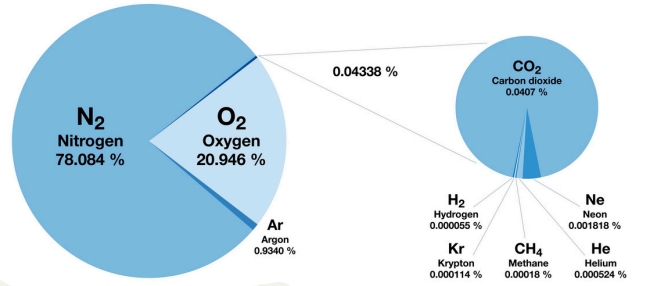
Atmosferin %78'ini kaplasa da azot, yerkürenin toplam kütesine bakıldığında oksijene kıyasla daha az bulunur. bu çarpıcı tezatlığın nedeni azotun "uçucu" karakteridir; o, merkeze çökmek yerine gökyüzüne kaçmayı seçer.

Azotu asıl ayrıcalıklı kılan ise muazzam kimyasal kararlılığıdır. Güneş ışınlarına ve tepkimelere karşı gösterdiği bu direnç, az miktardaki azotun milyarlarca yıl boyunca atmosferde birikerek gökyüzünün mutlak hakimi olmasını sağlamıştır.

"Gökyüzünün o sonsuz maviliği, azot moleküllerinin güneş ışığını bir prizma gibi dağıtarak bize sunduğu görsel bir hediyedir." — Lord Rayleigh

Atmosphere of Earth

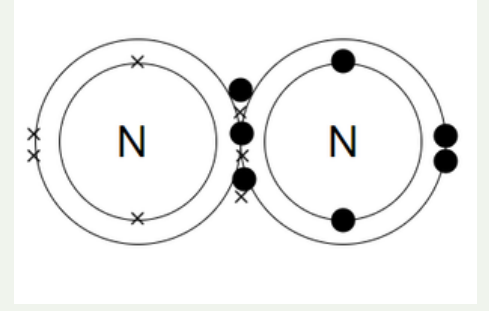
Composition by molecular count, excluding water vapor



Gökyüzündeki Büyük Birikim

Azot, taşın veya toprağın kristal yapısına uyum sağlayamaz; yerin altında hapsolacağı bir yuvası yoktur. Bu fiziksel uyumsuzluk nedeniyle, bulduğu ilk fırsatta gaz haline geçerek gökyüzüne yükselir.

Yerkürenin derinliklerinde tutunamayan azot, milyarlarca yıl boyunca atmosferde birikerek bugünkü hakimiyetine ulaşmıştır.



Kimyasal Zırh: Üçlü Bağın Gücü

Azotun atmosferdeki o meşhur "inertlik"sırrı, moleküler yapısında gizlidir. İki azot atomu, birbirine üçlü bağ koparılması son derece zor olan devasa bir enerjiyle bağlıdır.



Azotun Yaşamsal Görevleri

Biyolojik Kalkan: Hücrelerimizin yüksek yoğunluklu oksijenden dolayı "paslanmasını", yani oksidatif stresi engeller. Oksijeni ideal seviyede seyrelterek yaşamın yanıp kül olmasını önleyen bir tampon görevi görür. **Küresel Isı Dağıtıcısı:** Azotun baskın olmadığı bir atmosferde ısı taşınımı zayıflar, küresel sıcaklık farkları bugünkünden daha uç değerlere ulaşabilirdi. **Gıda Zincirinin Temeli:** Toprağın doğal yollarla zenginleşmesini sağlayarak bitki gelişimini ve dolayısıyla küresel gıda zincirini en alttan destekler.

Azotun Sessizliği Bozulsa Neler Olurdu 'Azot Tepkimeye Girerse'

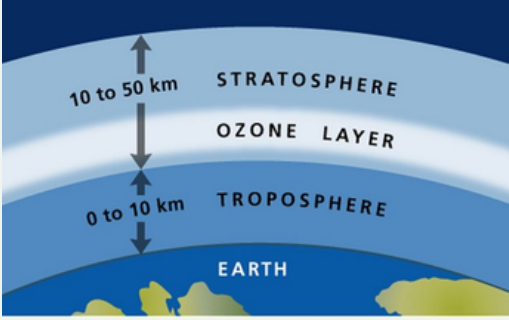
Gökyüzü Renginin Kaybolması (Koyu Atmosfer): Aktif azot, atmosferdeki oksijenle sürekli tepkimeye girerek Azot Dioksit oluştururdu. Azot Dioksit güneş ışığının mavi spektrumunu güçlü bir şekilde emer. Böyle bir durumda gökyüzü bildiğimiz mavi rengini kaybeder, sürekli bir turuncu ya da koyu kahverengi renge bürünürdü.

Küresel Asit Yağmurları: Aktif azot bileşikler su buharıyla anında birleşerek Nitrik Asit oluşturur. Bu, Dünya çapında sürekli bir "kezzap yağmuru" anlamına gelir.

Topraklar asitlenir, okyanusların pH dengesi çöker ve kireç yapılı (mercan gibi) hiçbir canlı var olamazdı.



Ozon Tabakasının Yok Oluşu: Azot oksitler ozon molekülleriyle çok hızlı tepkimeye girer. Reaktif bir azot atmosferinde ozon tabakası asla oluşamazdı. Bu da güneşten gelen ölümcül UV-B ve UV-C ışınlarının yeryüzüne doğrudan ulaşarak DNA'yı kısa bir sürede parçalaması demektir



Oksijenin Keşfi: İki Bilim İnsanı, Bir Gizem

18. yüzyılın sonunda Joseph Priestley, cıva oksiti ısıtarak keşfettiği gaza "yanma kabiliyeti yüksek hava" adını verirken; ondan habersiz benzer deneyler yapan Antoine Lavoisier, bu gizemli molekülün doğasını tanımlayıp ona modern ismi olan "oxygène" adını vermiştir.

Atmosferin Aktif Gücü Oksijen

Atmosferin %21'ini oluşturan oksijen, yaşamın devamlılığı için en hassas sınırdır; bu oran biraz bile artsaydı dünya bir ateş topuna döner, biraz azalsaydı canlılık nefessiz kalırdı.



%100 Oksijen Senaryosu

Dünya'nın 4,5 milyar yıllık geçmişi, atmosferdeki hassas gaz dengesi sayesinde. Eğer atmosferin tamamı oksijenden oluşsaydı, en ufak bir kıvılcım tüm yeryüzünü dev bir ateş topuna çevirirdi. Yanma eğilimi çok yüksek olan oksijenin %100 oranında bulunduğu bir ortamda, en ufak bir kıvılcım tüm yeryüzünü dev bir ateş topuna çevirirdi. Oksijenin diğer gazlarla uygun oranda birleşmesi, biyolojik yaşamın sürdürülebilmesi için en kritik faktördür.



Daha Az Oksijen, Daha Uzun Ömür mü

Harvard Tıp Fakültesi araştırmacıları, genetik olarak erken yaşlanmak üzere kodlanmış fareler üzerinde gerçekleştirdikleri deneyde ezber bozan sonuçlara ulaştı. Oksijen seviyesi Everest Dağı'ndaki kadar düşük (%11) bir ortamda yaşatılan farelerin, normal seviyedeki farelere kıyasla %50 daha uzun yaşadığı gözlemlendi. Bu fareler sadece uzun yaşamakla kalmadı; koordinasyon ve güç gibi nörolojik yetilerini de çok daha uzun süre muhafaza etti.

Kalori Kısıtlamasından Bağımsız: Genellikle az yemek yemenin ömrü uzattığı bilinse de, bu deneydeki düşük oksijen grubu fareler daha fazla yemek tükettiler. Yani sonuç, daha az gıda alımından kaynaklanmıyor.

Evrimsel Adaptasyon: Elde edilen veriler, yüksek rakımlarda yaşayan insanların daha uzun ömürlü olduğuna dair gözlemleri destekleyen biyolojik uyumlarla örtüşen bir tablo sunuyor.

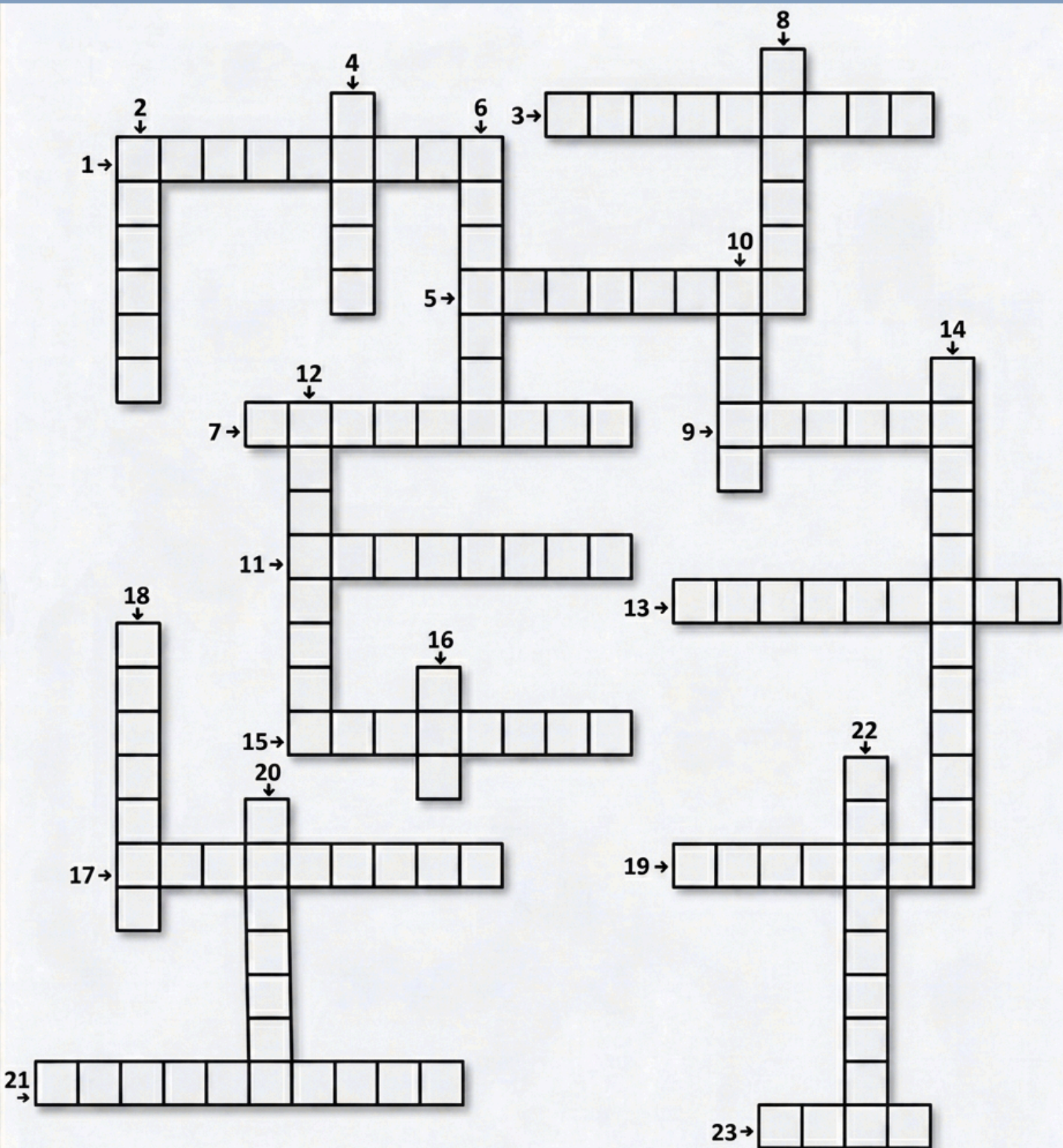
Oksijen, biyolojinin hem lütfu hem de lanetidir; bizi hayatta tutan bu molekül, aynı zamanda bizi içten içe paslandırarak öldüren şeydir."

— Nick Lane

Görünmez Kahramanlar

Sanılanın aksine, soluduğumuz oksijenin yaklaşık yarısından fazlası ormanlar değil, denizlerde yaşayan mikroskobik canlılar olan fitoplanktonlar tarafından üretilir. Her 5 nefesimizden 4'ünü bu görünmez devlere borçluyuz



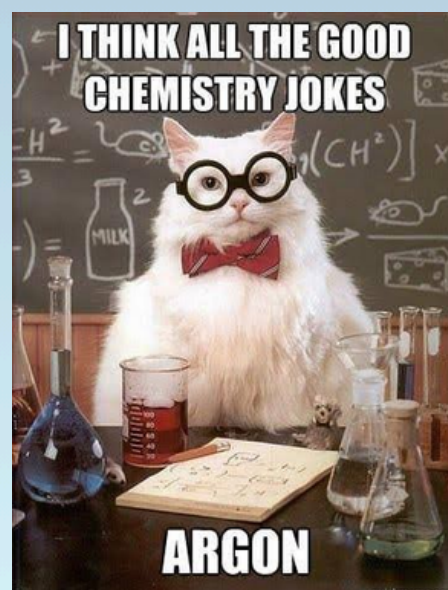
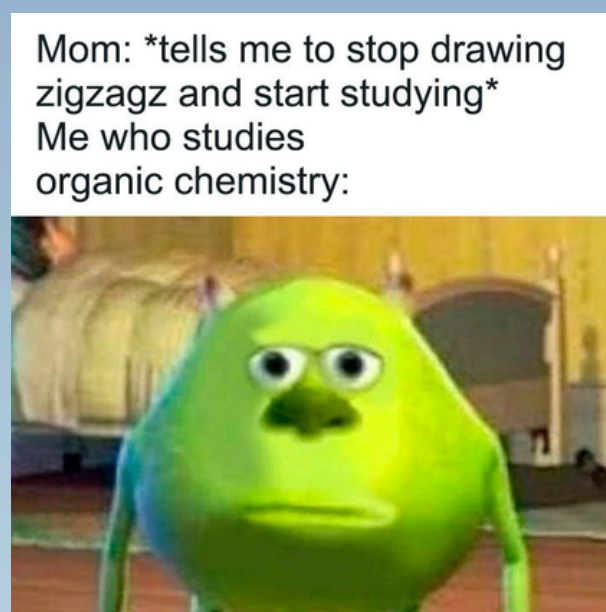
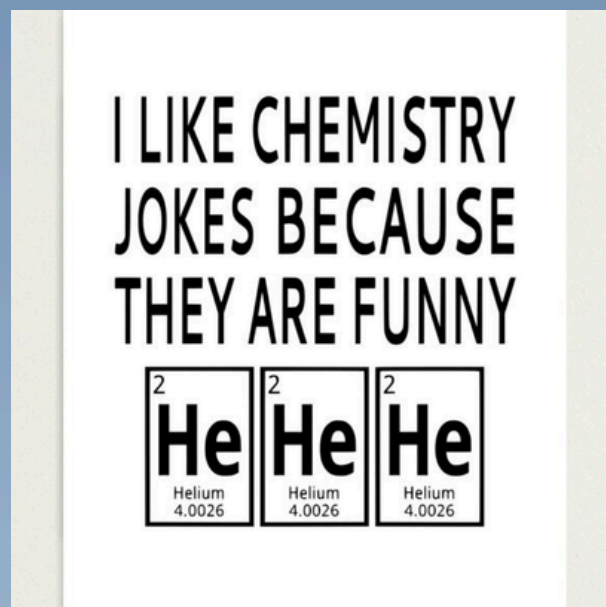
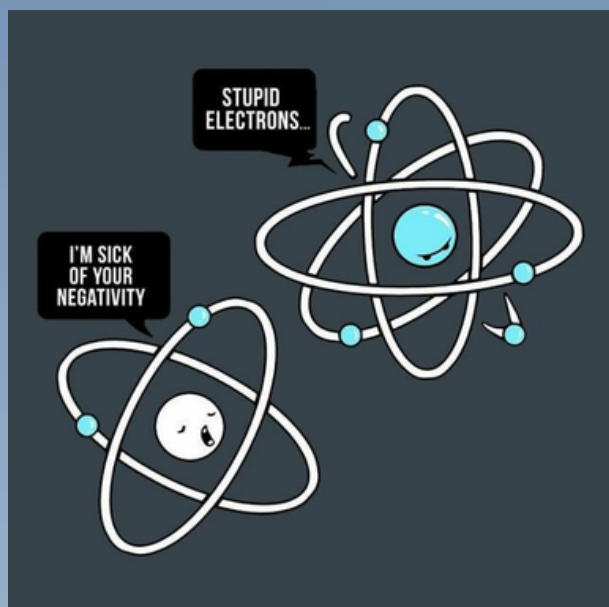


SOLDAN SAĞA (ACROSS)

1. Bir akışkanın iç sürtünmeleri nedeniyle akmaya karşı gösterdiği direncin nicel ölçüsü.
3. Çözeltilerin, çözünenin kimyasal yapısından bağımsız, yalnızca tanecik sayısına bağlı olan fiziksel özellikleri.
5. Atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını temsil eden ve akış rejimini belirleyen boyutsuz sayı.
7. Tepkimenin aktivasyon enerjisini düşürerek hızı artıran ancak süreç sonunda net bir değişime uğramayan madde.
9. Karbon atomlarının altıgen tabakalar halinde dizildiği, elektrik iletkenliği gösteren doğal allotropu.
11. Gerçek gazların ideal davranıştan sapmalarını modellemek için kullanılan "etkin basınç" terimi.
13. Birbiri içinde çözünmeyen iki sıvının (örneğin yağ ve su) oluşturduğu heterojen dağılım.
15. Bir molekülün kendi ayna görüntüsü ile üst üste çakışamaması durumu; asimetri özelliği.
17. Bir kapalı sistemdeki gaz veya sıvı basıncını ölçmek için kullanılan düzenek.
19. Bir sistemin belirli bir referans çevre ile dengelenme sürecinde üretebileceği maksimum yararlı iş potansiyeli.
21. Basınç ve hacim arasındaki ilişkinin $PV = \text{sabit}$ denklemiyle tanımlandığı genel hal değişimi süreci.
23. Bir tepkimenin toplam entalpi değişiminin, tepkimeyi oluşturan basamakların entalpileri toplamına eşit olduğunu belirten yasa.

YUKARIDAN AŞAĞI (DOWN)

2. Fizikte hem büyüklüğü hem de uygulama yönü ile tanımlanan niceliklerin genel adı.
4. Çözücü moleküllerinin yarı geçirgen bir zar üzerinden, düşük derişimli ortamdaki yüksek derişimli ortama kendiliğinden geçişi.
6. Termodinamiğin ikinci kanunu ile ilişkili, bir sistemdeki mikroskobik düzensizliğin veya enerjinin işe dönüşemeyen kısmının ölçüsü.
8. Sayısal verilerin veya fonksiyonların satır ve sütunlar şeklinde düzenlendiği matematiksel matrisel yapı.
10. İleri ve geri yöndeki tepkime hızlarının eşitlendiği, makroskobik değişimlerin durduğu dinamik durum.
12. Yapısında benzen halkası içermeyen, düz veya dallanmış zincirli hidrokarbon bileşiklerinin genel sınıfı.
14. Kimyasal tepkimelerde girenler ve ürünler arasındaki kütle ve mol ilişkilerini inceleyen hesaplama yöntemi.
16. Sulu çözeltilerde hidroksit iyonu derişimini artıran veya proton kabul eden kimyasal tür.
18. Sıvı karışımları, bileşenlerin uçuculuk veya kaynama noktası farklarından yararlanarak ayırma işlemi.
20. Çok sayıda küçük molekülün (monomer) kovalent bağlarla birbirine eklenerek oluşturduğu yüksek molekül ağırlıklı yapı.
22. Akışkan hızının ve basıncının zamanla düzensiz ve kaotik değişimler gösterdiği, girdaplı akış rejimi.



REFERANSLAR

Kimyasal Bağlar Hiç Kopmasaydı Bir Evren Mümkün müydü?

- Atkins, P., & de Paula, J. (2014). Atkins' physical chemistry (10. baskı). Oxford University Press.
- Boltzmann, L. (1877). Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht [Entropy and probability]. Annalen der Physik.
- Chang, R., & Goldsby, K. A. (2016). Chemistry (12. baskı). McGraw-Hill Education.
- Le Chatelier, H. (1884). On the equilibrium of chemical systems.
- Levine, I. N. (2009). Physical chemistry (6. baskı). McGraw-Hill.
- Lewis, G. N. (1916). The atom and the molecule. Journal of the American Chemical Society.
- NASA. (2022). Astrochemistry and the origins of life.
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2017). Lehninger principles of biochemistry (7. baskı). W.H. Freeman.
- Pauling, L. (1960). The nature of the chemical bond. Cornell University Press.
- Royal Society of Chemistry. Chemical bonding and thermodynamics resources.
- Voet, D., & Voet, J. G. (2011). Biochemistry (4. baskı). Wiley.

Dünyanın En Eski Eczanesi: Doğanın Gizli Laboratuvarı

- Bu kaynakları da hiçbir veriyi eksiltmeden, yazarları ve yayın bilgilerini koruyarak APA 7. Baskı formatına uygun şekilde düzenledim ve alfabetik olarak sıraladım:
- APA Stilinde Kaynakça Listesi
- Bailey, C. J., & Day, C. (2004). Metformin: Its botanical background. Practical Diabetes International, 21(3), 115-117.
- Chain, E., Florey, H. W., Gardner, A. D., Heatley, N. G., Jennings, M. A., Orr-Ewing, J., & Sanders, A. G. (1940). Penicillin as a chemotherapeutic agent. The Lancet, 236(6104), 226-228.
- Cushman, D. W., & Ondetti, M. A. (1991). History of the design of captopril and related inhibitors of angiotensin converting enzyme. Hypertension, 17(4), 589-592.
- Endo, A. (1992). The discovery and development of HMG-CoA reductase inhibitors. Journal of Lipid Research, 33(11), 1569-1582.
- Eng, J., Andrews, P. C., Kleinman, W. A., Singh, L., & Raufman, J. P. (1992). Isolation and characterization of exendin-4, an exendin-3 analogue, from Heloderma suspectum venom. Journal of Biological Chemistry, 267(11), 7402-7405.
- Farag, Y., & Leopold, C. S. (2009). Physicochemical properties of various shellac types. Dissolution Technologies, 16(3), 33-39.
- Ferreira, S. H. (1965). A bradykinin-potentiating factor (bpf) present in the venom of Bothrops jararaca. British Journal of Pharmacology and Chemotherapy, 24(1), 163-169.
- Fleming, A. (1929). On the antibacterial action of cultures of a penicillium, with special reference to their use in the isolation of B. influenzae. British Journal of Experimental Pathology, 10(3), 226-236.
- Furman, B. L. (2012). The development of Byetta (exenatide) from the venom of the Gila monster as an anti-diabetic drug. Toxicon, 59(4), 464-471.
- Mahdi, J. G. (2010). Medicinal potential of willow: A chemical perspective of aspirin discovery. Journal of Saudi Chemical Society, 14(3), 317-322.
- Manzoni, M., & Rollini, M. (2002). Biosynthesis and biotechnological production of statins by filamentous fungi and application of these cholesterol-lowering drugs. Applied Microbiology and Biotechnology, 58(5), 555-564.
- Pearnchob, N., & Bodmeier, R. (2003). Coating of pellets with micronized shellac. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 56(3), 363-369.
- Sneader, W. (2000). The discovery of aspirin: A reappraisal. BMJ (Clinical research ed.), 321(7276), 1591-1594.
- Witters, L. A. (2001). The blooming of the French lilac. Journal of Clinical Investigation, 108(8), 1105-1107.

Ekosistemin Sessiz Dili

- Atmosfer Yüzdeleri. (t.y.). <https://www.google.com/search?q=atmosfer+yüzdeleri> adresinden erişildi.
- Bilim Genç TÜBİTAK. (t.y.). Atmosferdeki oksijenin kaynağı. <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/bunu-biliyor-muydunuz/atmosferdeki-oksijenin-kaynagi> adresinden erişildi.
- Bilim Genç TÜBİTAK. (t.y.). Atmosferde neden çok miktarda azot var? <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/atmosferde-neden-cok-miktarda-azot-var> adresinden erişildi.
- Coğrafya Hocası. (t.y.). Asit yağmuru. Coğrafya Sözlüğü. <https://cografyahocasi.com/sozluk/asit-yagmuru.html> adresinden erişildi.
- Denizde Oksijen Üreten Canlılar. (t.y.). <https://www.google.com/search?q=denizde+oksijen+ureten+canli> adresinden erişildi.
- Ekşi Şeyler. (2019, 24 Ocak). İnsan vücudunun farklı şekillerde yüzleşebildiği tehlike: Oksijen zehirlenmesi. <https://eksiseyler.com/insan-vucudunun-farkli-sekillerde-yuzlesebildigi-tehlike-oksijen-zehirlenmesi> adresinden erişildi.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). (t.y.). Reactive nitrogen report.
- Fahey, D. W., & Hegglin, M. I. (2010). Twenty questions and answers about the ozone layer. World Meteorological Organization.
- Goldblatt, C., et al. (2009). Nitrogen-rich atmospheres as a greenhouse gas. Nature Geoscience.
- Harman, D. (1956). Aging: A theory based on free radical and radiation chemistry. Journal of Gerontology, 11(3), 298-300.
- Harvard Medical School. (t.y.). Decrease oxygen, boost longevity. <https://hms.harvard.edu/news/decrease-oxygen-boost-longevity> adresinden erişildi.
- Lovelock, J. E. (1979). Gaia: A new look at life on Earth.
- Navarro-González, R., et al. (2001). Nitrogen fixation by volcanic lightning on early Earth.
- Nitrogen Three Bonds. (t.y.). <https://www.google.com/search?q=nitrogen+three+bonds> adresinden erişildi.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. Wiley.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (t.y.). Ozon tabakası bilgi platformu. <https://ozonturkiye.csb.gov.tr/ozon-tabakasi-bilgi-platfomu-101959> adresinden erişildi.
- UNEP (United Nations Environment Programme). (t.y.). Nitrogen pollution facts.
- Yanan Dünya. (t.y.). <https://www.google.com/search?q=yanan+dunya> adresinden erişildi.

Görünmez Plastik: Mikroplastiklerin Kimyasal Yolculuğu ve Besin Zinciri

- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. Marine Pollution Bulletin, 62(12), 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Galloway, T. S., Cole, M., & Lewis, C. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. Nature Ecology & Evolution, 1, 0116. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>
- GESAMP. (2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: A global assessment. International Maritime Organization.
- Li, J., Liu, H., & Chen, J. P. (2018). Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. Water Research, 137, 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.056>
- Rochman, C. M., Hoh, E., Hentschel, B. T., & Kaye, S. (2013). Long-term field measurement of sorption of organic contaminants to plastic pellets. Environmental Science & Technology, 47(3), 1646–1654. <https://doi.org/10.1021/es303700s>
- Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W., McGonigle, D., & Russell, A. E. (2004). Lost at sea: Where is all the plastic? Science, 304(5672), 838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: A micro issue? Environmental Science & Technology, 51(12), 6634–6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>

Varlık: Olasılıktan Entropiye

- Boltzmann, L. (1896). Lectures on gas theory.
- Carroll, L. (1871). Through the looking-glass.
- Carroll, S. (2010). From eternity to here: The quest for the ultimate theory of time.
- Chang, Y.-F. (2008). Possible entropy decrease and some research of biothermodynamics. *International Journal of Modern Physics B*, 22(30), 5473–5480.
- Clausius, R. (1865). The mechanical theory of heat.
- Gibbs, J. W. (1902). Elementary principles in statistical mechanics.
- Lebowitz, J. L. (1993). Boltzmann's entropy and time's arrow. *Physics Today*, 46(9), 32–38.
- Penrose, R. (2010). Cycles of time: An extraordinary new view of the universe.
- Schneider, E. D., & Kay, J. J. (1994). Life as a manifestation of the second law of thermodynamics. *Mathematical and Computer Modelling*, 19(6–8), 25–48.
- Schrödinger, E. (1944). What is life? The physical aspect of the living cell.

Yeşil Enerjinin Kirli Sırrı: Lityum İyon Piller

- Amnesty International. (2016). “This is what we die for”: Human rights abuses in the Democratic Republic of the Congo power the global trade in cobalt. Amnesty International Ltd.
- Banza Lubaba Nkulu, C., et al. (2018). Sustainability of artisanal mining of cobalt in DR Congo. *Nature Sustainability*, 1(9), 495-504.
- Hackney, S. A., & Kumar, R. V. (2010). High energy density lithium batteries. Wiley-VCH Verlag GmbH. (ss. 70-73).
- International Energy Agency (IEA). (2021). The role of critical minerals in clean energy transitions. *World Energy Outlook Special Report*.
- Linden, D., & Reddy, T. B. (2002). *Handbook of batteries* (3. baskı). McGraw-Hill. (Bölüm 22 ve 35).
- Nazri, G. A., & Pistoia, G. (2009). *Lithium batteries: Science and technology*. Springer Science and Business Media. (ss. 8-11).
- The Nobel Prize. (2019). The Nobel Prize in Chemistry 2019: John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham, Akira Yoshino. NobelPrize.org.
- Ozawa, K. (2009). *Lithium ion rechargeable batteries*. Wiley-VCH Verlag GmbH. (ss. 5-8).
- United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2020). *Commodities at a glance: Special issue on strategic battery minerals*. United Nations.
- Yoshio, M., Brodd, R. J., & Kozawa, A. (2009). *Lithium-ion batteries: Science and technologies*. Springer Science and Business Media. (ss. 1-7).

Doğanın Kuantum Süperiletkeni: Fenna-Matthews-Olson Kompleksi Enerjiyi Nasıl Kusursuz Taşıyor?

- Engel, G. S., Calhoun, T. R., Read, E. L., Ahn, T. K., Mančál, T., Cheng, Y. C., ... & Fleming, G. R. (2007). Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems. *Nature*, 446(7137), 782-786.
- Fenna, R. E., & Matthews, B. W. (1975). Chlorophyll arrangement in a bacteriochlorophyll protein from *Chlorobium limicola*. *Nature*, 258(5536), 573-577.
- Lambert, N., Chen, Y. N., Cheng, Y. C., Li, C. M., Chen, G. Y., & Nori, F. (2013). Quantum biology. *Nature Physics*, 9(1), 10-18.
- Manske, A. K., Glaeser, J., Kuypers, M. M., & Overmann, J. (2005). Physiology and phylogeny of green sulfur bacteria forming a macroscopic phototrophic consortium in the Black Sea. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(12), 8049-8060.
- Plenio, M. B., & Huelga, S. F. (2008). Dephasing-assisted transport: Quantum networks and biomolecules. *New Journal of Physics*, 10(11), 113019.

Metal–Organic Frameworks (MOF): Geleceğin Gözenekli Malzemeleri

- Furukawa, H., Cordova, K. E., O’Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2013). The chemistry and applications of metal–organic frameworks. *Science*, 341(6149).
- Kırhallı, K. S. (2013). Küresel ısınma ve iklim değişikliği ile mücadelede alternatif bir çözüm: Metal organik kafesler (MOK): Sentez ve CO₂ tutma [Doktora tezi/Yüksek lisans tezi]. Marmara Üniversitesi. ProQuest Dissertations & Theses.
- Li, J. R., Kuppler, R. J., & Zhou, H. C. (2009). Selective gas adsorption and separation in metal–organic frameworks. *Chemical Society Reviews*, 38, 1477–1504.
- Rowsell, J. L. C., & Yaghi, O. M. (2004). Metal–organic frameworks: A new class of porous materials. *Microporous and Mesoporous Materials*, 73, 3–14.
- The Nobel Prize. (2025). Press release – Nobel Prize in Chemistry.
- Wang, S., McGuirk, C. M., d’Aquino, A., Mason, J. A., & Mirkin, C. A. (2018). Metal–organic framework nanoparticles. *Advanced Materials*, 30(37), 1800202.

Kuraklık ve Endüstriyel Su Yönetimi

- Escarus. (t.y.). İmalat sanayiinde su kullanımı. <https://escarus.com/imalat-sanayiinde-su-kullanimi/> adresinden erişildi.
- H2O Global News. (t.y.). What is the water treatment for industrial purposes? <https://h2oglobalnews.com/what-is-the-water-treatment-for-industrial-purposes/> adresinden erişildi.
- Sustainability Directory. (t.y.). Industrial water management. <https://climate.sustainability-directory.com/term/industrial-water-management/> adresinden erişildi.

Geoengineering: İklim Krizi Durdurulabilir mi?

- Britannica. (t.y.). Geoengineering. <https://www.britannica.com/science/geoengineering> adresinden erişildi.
- Center for International Environmental Law (CIEL). (t.y.). Why geoengineering is a false solution to the climate crisis. <https://www.ciel.org/why-geoengineering-is-a-false-solution-to-the-climate-crisis/> adresinden erişildi.
- Geoengineering Monitor. (t.y.). What is geoengineering? <https://www.geoengineeringmonitor.org/what-is-geoengineering> adresinden erişildi.

Doğadan İlham Alan Güneş Koruyucular

- Adobe Stock. (t.y.). Microalgae [Stok görsel]. https://stock.adobe.com/search?k=microalgae&asset_id=1143845885 adresinden erişildi.
- [İsimsiz çevrimiçi görsel]. (t.y.). https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRnnVftLcVn8057PJAAaLazpaz_RYmYkzn2CvapJq3VN_BCoKJuj adresinden erişildi.
- Nana. (2022). 10 best Japanese sunscreens for every skin type 2022. Crème Scoop. https://cremescoop.com/best-japanese-sunscreens/?utm_source=pinterest&utm_medium=social&utm_campaign=social-pug adresinden erişildi.
- Pinterest. (t.y.). [Pin içeriği]. <https://ru.pinterest.com/pin/118219558965945982/> adresinden erişildi.
- Teicher, S. (t.y.). Why reefs matter. Restoring Our World's Dying Reefs. <https://sam-teicher.squarespace.com/why-reefs-matter> adresinden erişildi.
- Yang, J. (2026, 20 Şubat). Barrier repair cream with oat lipids and silk peptides. A For Apothecary. <https://www.aforapothecary.com/blogs/magazine/oat-peptide-cream-barrier-repair> adresinden erişildi.

Doğanın Dijital Kalbi: Kumdan Çiplere Kimyasal Yolculuk

- All About Circuits. (t.y.). Semiconductor manufacturing techniques. <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-2/semiconductor-manufacturing-techniques/> adresinden erişildi.
- ASML. (2021). How microchips are made: The semiconductor manufacturing process steps. <https://www.asml.com/en/news/stories/2021/semiconductor-manufacturing-process-steps> adresinden erişildi.
- ASML. (2022). [Yarı iletken üretim cihazı görseli]. https://cdn.eenewseurope.com/wp-content/uploads/2022/06/ASML_nxe3400_simplified_front_semiclosed-scaled.webp adresinden erişildi.
- AZoNano. (t.y.). [Nano teknoloji ve yarı iletken görseli]. https://www.azonano.com/images/Article_Images/ImageForArticle_5583_16039777593377033.png adresinden erişildi.
- Evren Atlası. (2021). [Dilimlenmemiş kalıp çip görüntüsü]. <https://evrenatlası.com.tr/wp-content/uploads/2021/05/dilimlenmemis-kalip-cip-goruntusu.jpg> adresinden erişildi.
- Intel. (2022). [Intel çip fabrikası görseli]. <https://www.otomobilport.com.tr/wp-content/uploads/2022/03/intel-cip-fabrika.jpg> adresinden erişildi.
- McKinsey & Company. (t.y.). What is a semiconductor? <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/featured%20insights/mckinsey%20explainers/what%20is%20a%20semiconductor/semiconductor-1207030752-standard-1536x1536.jpg?mw=677&car=42:25> adresinden erişildi.
- Mitsubishi Electric. (t.y.). [Yarı iletken teknolojisi görseli]. <https://in.mitsubishielectric.com/en/feature/partneringindia/images/stories/siic-c1.jpg> adresinden erişildi.
- Mustad. (t.y.). [Kum ve silis görseli]. https://www.mustad.com/sites/mustad.com/files/styles/1340x1000_focal/public/images/mustad_sand_411106528.jpg?h=832350b5&itok=QAau3lW0 adresinden erişildi.
- Seeking Alpha. (t.y.). [Yarı iletken endüstrisi stok görsel]. https://static.seekingalpha.com/cdn/s3/uploads/getty_images/1468266079/image_1468266079.jpg?io=getty-c-w750 adresinden erişildi.
- Si-Mat. (2021). [Einkristalle - Tek kristal silikon görseli]. <https://www.si-mat.com/wp-content/uploads/2021/01/Einkristalle.jpg> adresinden erişildi.
- Xiao, H. (2012). Introduction to semiconductor manufacturing technology (2. baskı). SPIE.
- [İsimsiz çevrimiçi görsel - 1]. (t.y.). <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTM7wqRvfW9vjrt77G6agxV6xVrfD6K-LGN1A&s> adresinden erişildi.
- [İsimsiz çevrimiçi görsel - 2]. (t.y.). <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSn27v8AleKK34TZSZBMmznqGShADOWk5-NNg&s> adresinden erişildi.

Deniz Yosunundan Biyoplastik Üretimi

- Dalal, S. R. (2023). Biosynthesis of sustainable biodegradable bioplastics. ScienceDirect.
- Duarah, R. (2025). Macroalgal (seaweed) derived bioplastic. ScienceDirect.
- Lim, C. et al. (2021). Seaweed polysaccharide-based bioplastics. ScienceDirect.
- Kajla, P. et al. (2024). Seaweed-based biopolymers for food packaging. ScienceDirect.

Doğanın Görünmeyen Mimarisi: Kimya

- Atkins, P., & Jones, L. (2016). Chemical principles: The quest for insight. W.H. Freeman.
- Encyclopaedia Britannica. (t.y.). Biogeochemical cycle. In Encyclopaedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/biogeochemical-cycle> adresinden erişildi.
- Encyclopaedia Britannica. (t.y.). Ecosystem. In Encyclopaedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/ecosystem> adresinden erişildi.
- Encyclopaedia Britannica. (t.y.). Photosynthesis. In Encyclopaedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/photosynthesis> adresinden erişildi.
- TEMA Vakfı. (t.y.). Doğa, ekosistem ve çevre dengesi. <https://www.tema.org.tr> adresinden erişildi.
- UNESCO. (t.y.). Biodiversity and ecosystem services. <https://www.unesco.org> adresinden erişildi.

TEŞEKKÜRLER

HALİME DAĞ
ZEYNEP ESLEM AKTAŞ
ARDA KEÇE
AYÇA DALKILIÇ
BAHAR ÜNAL
BEYZANUR BULUT
BUĞRA EREN YAZICI
CEREN UYAR
FURKAN BEKKAYA
HALİDE TÜRKKAL
İLBİLGE ÇETİN
İREM NİL GÜNEŞ
SUDE ŞAHİN
SÜEDA ATEŞ
SÜMEYYE ÖZBAY