

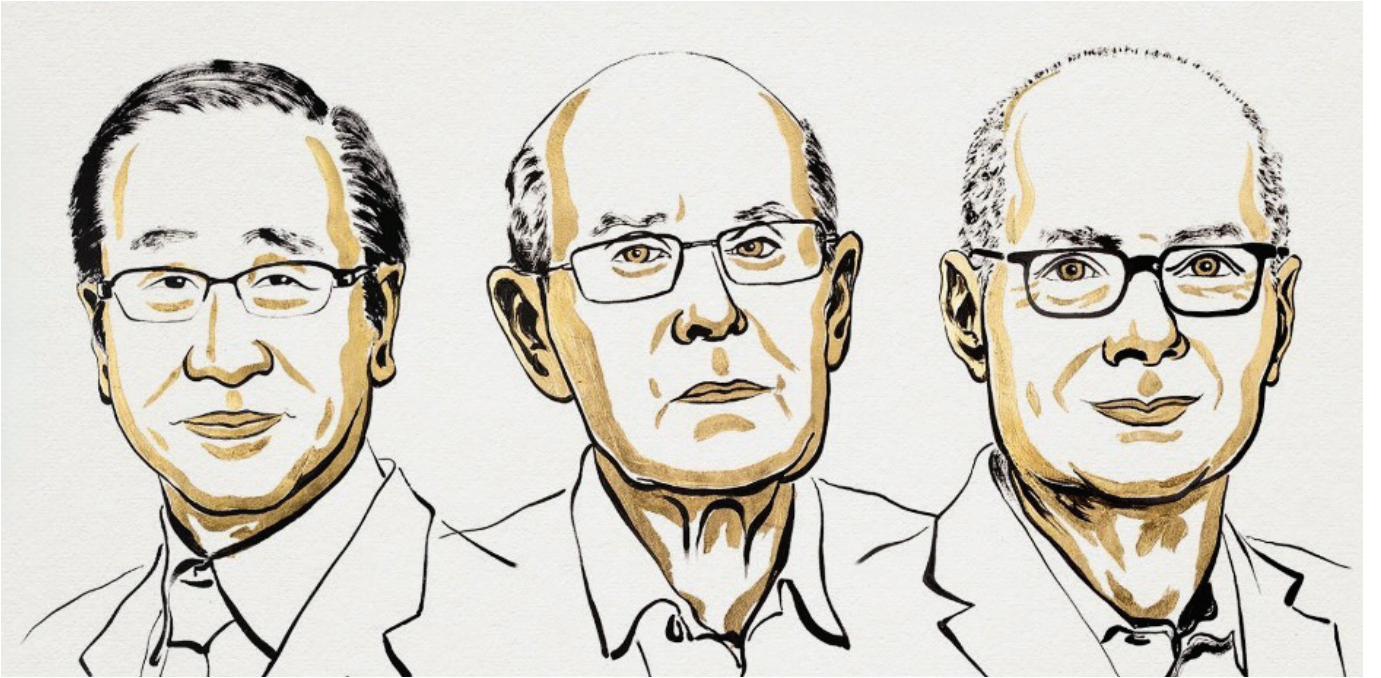


**2025 NOBEL KİMYA ÖDÜLÜ:  
METAL ORGANİK  
KAFESLERİN GELİŞTİRİLMESİ**

Özge Altıntaş ve Dr. Adil Denizli

Hacettepe Üniversitesi, Kimya Bölümü, Beytepe, Ankara

**İSVEÇ KRALİYET BİLİMLER AKADEMİSİ,  
“METAL-ORGANİK KAFESLERİN  
GELİŞTİRİLMESİ” İÇİN 2025 NOBEL KİMYA  
ÖDÜLÜ’NÜ ŞU KİŞİLERE VERME KARARI ALDI:**



Susumu Kitagawa

Richard Robson

Omar M. Yaghi

1951 yılında Kyoto, Japonya'da doğdu. 1979 yılında Kyoto Üniversitesi'nde doktora derecesini aldı. Kyoto Üniversitesi'nde profesör olarak görev yapmaktadır.

1937 yılında Glusburn, İngiltere'de doğdu. 1962 yılında Oxford Üniversitesi'nde doktora derecesini aldı. Melbourne Üniversitesi'nde profesör olarak görev yapmaktadır.

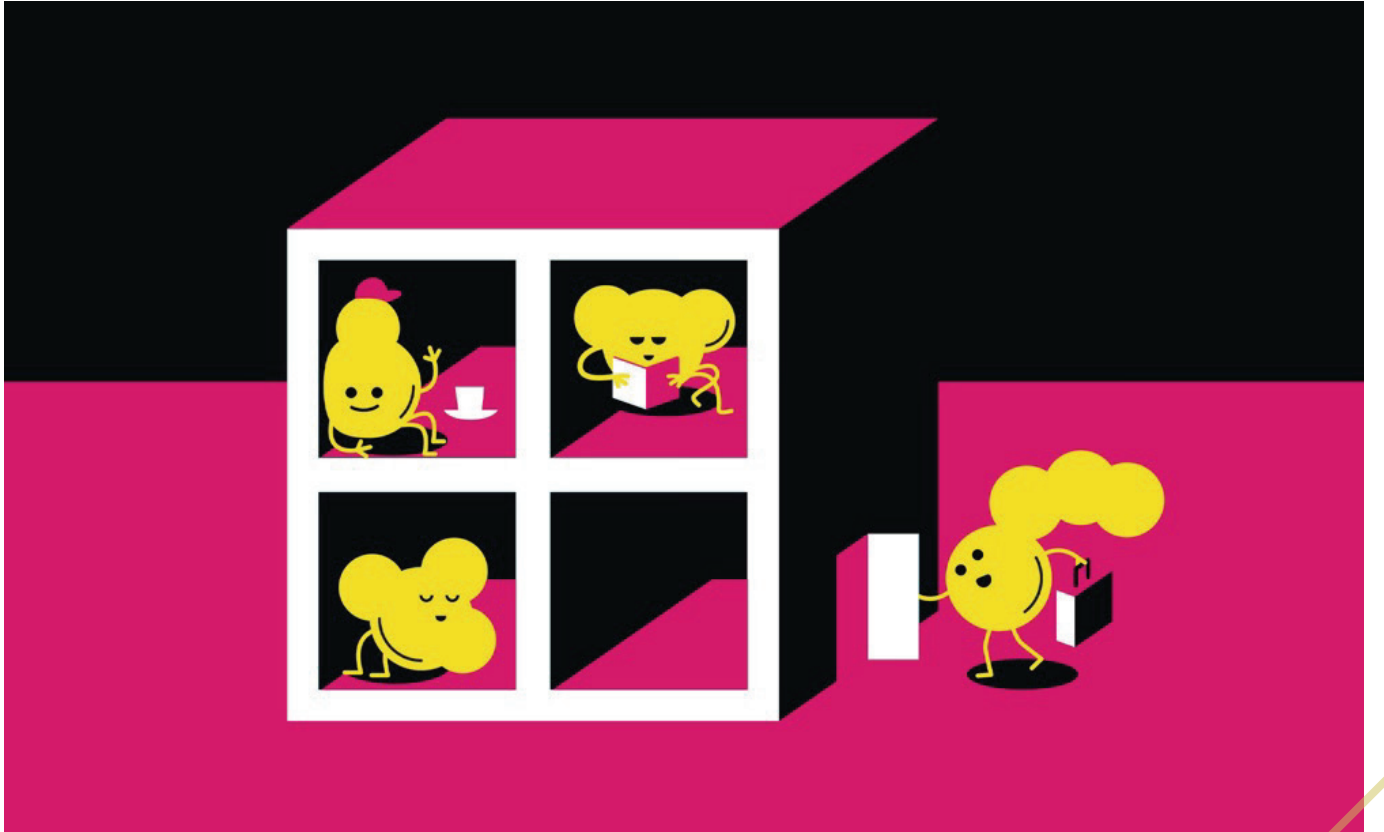
1965 yılında Amman, Ürdün'de doğdu. 1990 yılında Illinois Urbana-Champaign Üniversitesi'nde doktora derecesini aldı. Kaliforniya Üniversitesi'nde profesör olarak görev yapmaktadır.

## KİMYA İÇİN YENİ ODALAR YARATTILAR

Susumu Kitagawa, Richard Robson ve Omar M. Yaghi, yeni bir moleküler mimari türünün geliştirilmesi nedeniyle 2025 Kimya Nobel Ödülü'ne layık görüldüler. Onların oluşturduğu yapılar-metal-organik kafesler (MOF-s)-moleküllerin içeri girip çıkabildiği büyük boşluklar içerir. Araştırmacılar bu yapıları çöl havasından su toplamak, sudan kirleticileri uzaklaştırmak, karbondioksiti yakalamak ve hidrojen depolamak için kullandı-

lar. Bir emlakçı, dünyanın dört bir yanındaki laboratuvarlarda son yıllarda geliştirilen bu metal-organik kafeslerden birini, "su molekülü olarak yaşamınız için özel olarak tasarlanmış, cazip ve son derece ferah bir stüdyo daire" şeklinde tanımlayabilir. Bu tür diğer yapılar, karbondioksiti yakalamak, sudan PFAS maddelerini ayırmak, vücutta ilaç taşımak veya son derece zehirli gazları yönetmek üzere özel olarak tasarlanabilir. Bazıları meyvelerden yayılan etilen gazını hapsederek olgunlaşmalarını yavaşlatabilir ya da çevredeki antibiyotik kalıntılarını parçalayan enzimleri kapsülleyebilir.

Basitçe ifade etmek gerekirse, metal-organik kafesler son derece kullanışlıdır. Ödül sahiplerinin çalışmaları sayesinde, kimyagerler on binlerce farklı MOF tasarlayabilmiş ve yeni kimyasal harikaların ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır. Bilimde sıkça olduğu gibi, 2025 Kimya Nobel Ödülü'nün hikâyesi de "kutu dışında düşünen" biriyle başlamaktadır. Bu kez ilham, öğrencilerin çubuklar ve toplardan moleküller inşa edeceği klasik bir kimya dersine hazırlık sırasında gelmiştir.



## BİR MOLEKÜLÜN BASİT TAHTA MODELİ YENİ BİR FİKİR DOĞURUYOR

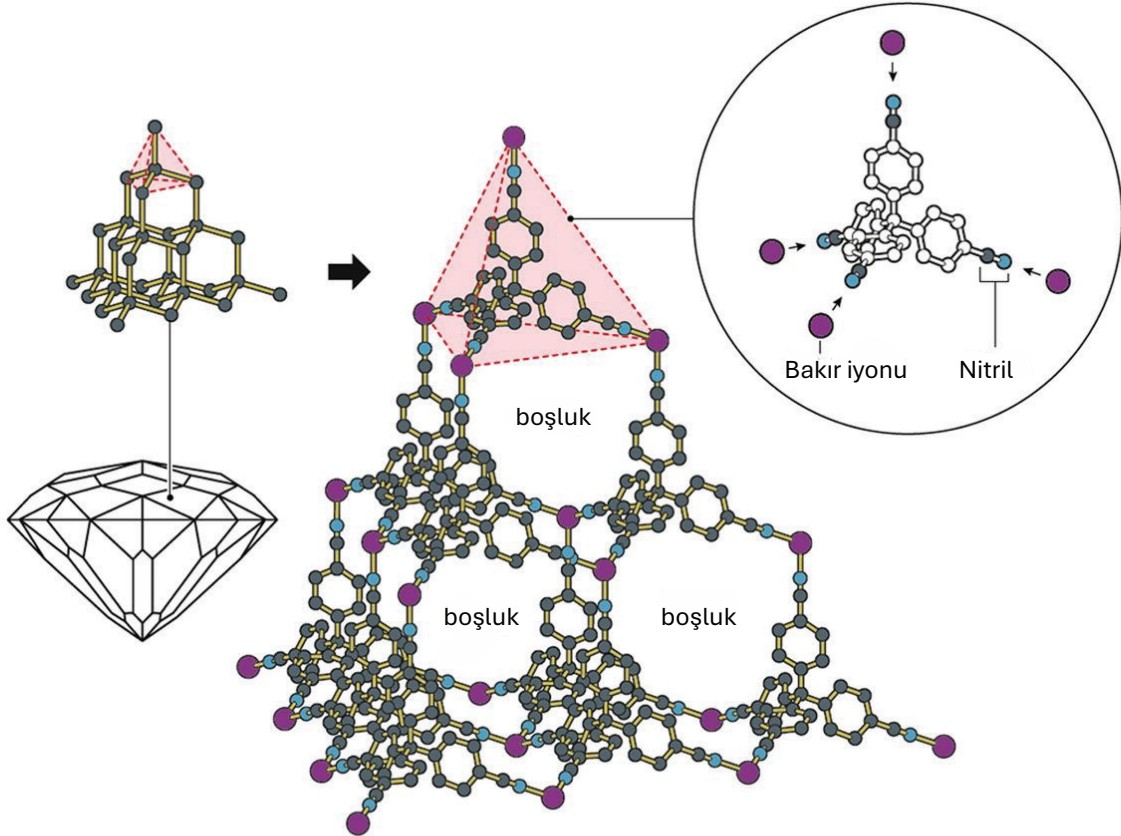
1974 yılında Avustralya'daki Melbourne Üniversitesi'nde ders veren Richard Robson, öğrencilerin moleküler yapılar oluşturabilmeleri için tahta topları atom modellerine dönüştürmekle görevlendirilmişti. Bunun işe yaraması için, üniversitenin atölyesinin toplara delikler açması gerekiyordu; böylece tahta çubuklar-yani kimyasal bağlar-atomlara tutturulabilecekti. Ancak delikler rastgele açılmamalıydı. Her atom (örneğin karbon, azot veya klor) kimyasal bağlarını belirli bir biçimde oluşturur. Robson, deliklerin nereye açılması gerektiğini işaretlemek zorundaydı. Atölye topları geri getirdiğinde, Robson birkaç molekül

modeli yapmayı denedi. İşte o sırada bir farkındalık anı yaşadı: deliklerin konumu, başlı başına büyük bir bilgi içeriyordu. Model moleküller, deliklerin konumuna bağlı olarak otomatik biçimde doğru şekli ve yapıyı kazanıyordu. Bu bulgu, onu yeni bir fikre götürdü: Eğer tek tek atomları değil de, atomların doğal özelliklerini kullanarak farklı türde molekülleri birbirine bağlasa ne olurdu? Acaba tamamen yeni türde moleküler yapılar tasarlayabilir miydi?

## ROBSON YENİLİKÇİ KİMYASAL YAPILAR İNŞA EDİYOR

Her yıl Robson, yeni öğrencilerine ders anlatırken bu tahta modelleri tekrar kullandığında, aynı fikir aklına geliyordu. Ancak bu

fikri test etmeye karar vermesi on yılı aşkın bir süre aldı. Denemelerine elmasın yapısından esinlenen oldukça basit bir modelle başladı; bu yapıda her karbon atomu dört başka atomla bağ kurarak küçük bir piramit oluşturmaktadır (Şekil 2). Robson'un amacı benzer bir yapı inşa etmektir, fakat onun modeli pozitif yüklü bakır iyonları (Cu<sup>+</sup>) üzerine kurulacaktı. Karbon gibi, bu iyonlar da çevrelerinde dört atom bulundurmaya tercih etmektedir. Robson, bakır iyonlarını dört kollu bir molekül olan 4,4,4,4-tetrasiyano tetrafenilmetan ile birleştirdi. Bu karmaşık isimli molekülün her kolunun ucunda, pozitif yüklü bakır iyonlarını çeken nitril adı verilen bir kimyasal grup bulunmaktadır (Şekil 2).



Richard Robson, her karbon atomunun piramit benzeri bir yapıda dört başka karbon atomuna bağlandığı elmasın yapısından ilham aldı. Karbon yerine, bakır iyonları ve her birinin ucunda bir nitril bulunan dört kollu bir molekül kullandı. Bu, bakır iyonlarını çeken kimyasal bir bileşiktir. Bu maddeler bir araya geldiğinde düzenli ve çok geniş bir kristal oluşturdular.

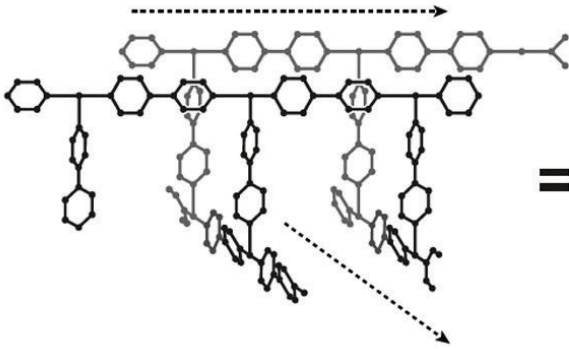
O dönemde çoğu kimyager, bakır iyonlarını dört kollu moleküllerle birleştirmenin yalnızca iyonlar ve moleküllerden oluşan bir "kuş yuvası" benzeri karmaşık bir yapı ortaya çıkaracağını düşünüyordu. Ancak işler Robson'un istediği gibi gitti. Öngördüğü gibi, iyonlar ile moleküller arasındaki doğal çekim etkili oldu; bu sayede kendilerini düzenli bir şekilde organize ederek büyük bir moleküler yapı oluşturdular. Elmasın yapısındaki karbon atomlarına benzer biçimde, bu birleşim de düzenli, kristal bir yapı meydana getirdi. Ancak elmasın aksine-ki elmas sıkı ve yoğun bir malzemedir-Robson'un kristali içinde çok sayıda geniş boşluk bulunuyordu (Şekil 2). 1989 yılında Robson, bu yenilikçi kimyasal yapısını Journal of the American Chemical Society dergisinde yayınladı. Makalesinde geleceğe dair öngörülerde bulunuyor ve bunun malzeme oluşturmanın yeni bir yolu olabileceğini öne sürüyordu. Ayrıca, bu tür

yapıların daha önce hiç görülmemiş-hatta potansiyel olarak faydalı-özelliklerle donatılabileceğini belirtiyordu. Sonunda, Robson'un öngördüğü gelecek gerçekten de gerçekleşti.

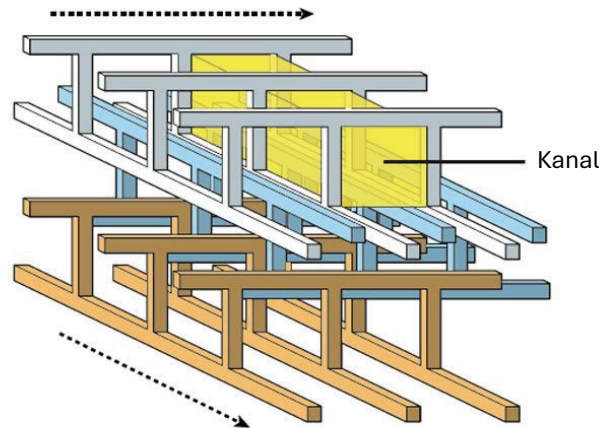
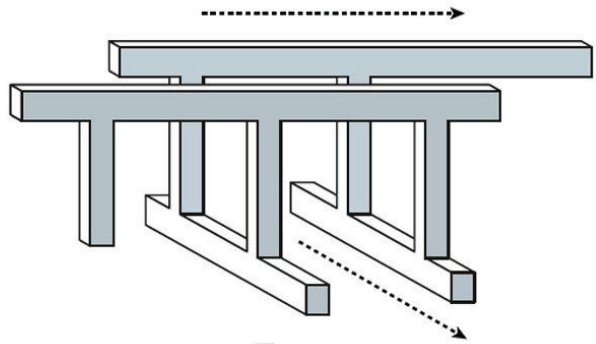
## ROBSON KİMYADA ÖNCÜ BİR RUHU HAREKETE GEÇİRİYOR

Öncü çalışmasının yayımlanmasından hemen sonraki yıl, Robson boşlukları farklı maddelerle dolu çeşitli yeni moleküler yapılar tanıttı. Bunlardan birini iyon değişimi yapmak için kullandı. İyonlarla dolu yapıyı, farklı türde iyonlar içeren bir sıvıya batırdı. Sonuç olarak iyonlar yer değiştirdi ve maddelerin bu yapının içine girip çıkabildiğini gösterdi. Yaptığı deneylerde Robson, rasyonel tasarımın geniş iç boşluklara sahip

ve belirli kimyasallar için optimize edilmiş kristaller inşa etmekte kullanılabileceğini kanıtladı. Ayrıca, doğru şekilde tasarlandığında bu yeni tür moleküler yapıların kimyasal tepkimeleri katalize etmek için de kullanılabileceğini öne sürdü. Ancak Robson'un inşa ettiği yapılar oldukça kırılğandı ve kolayca dağılıyordu. Birçok kimyager bunları işe yaramaz olarak görse de, bazıları onun önemli bir gelişimin eşliğinde olduğunu fark etti. Onlar için Robson'un gelecek vizyonu, kimyada öncü bir ruhu yeniden canlandırdı. Robson'un fikirlerine sağlam bir temel kazandıracak olanlar ise Susumu Kitagawa ve Omar Yaghi idi. 1992 ile 2003 yılları arasında, birbirlerinden bağımsız olarak, bir dizi çığır açıcı keşfe imza attılar. Hikâye, 1990'larda Japonya'daki Kindai Üniversitesi'nde çalışan Kitagawa ile başladı.



=



Kitagawa, 1997 yılında, açık kanallarla kesişen metal-organik bir kafes oluşturdu. Bu kanallar farklı gaz türleriyle doldurulabiliyordu. Malzeme, yapısı etkilenmeden bu gazları serbest bırakabiliyordu.

## KITAGAWA'NIN İLKESİ: İŞE YARAMAZ ŞEYLER BİLE YARARLI HALE GELEBİLİR

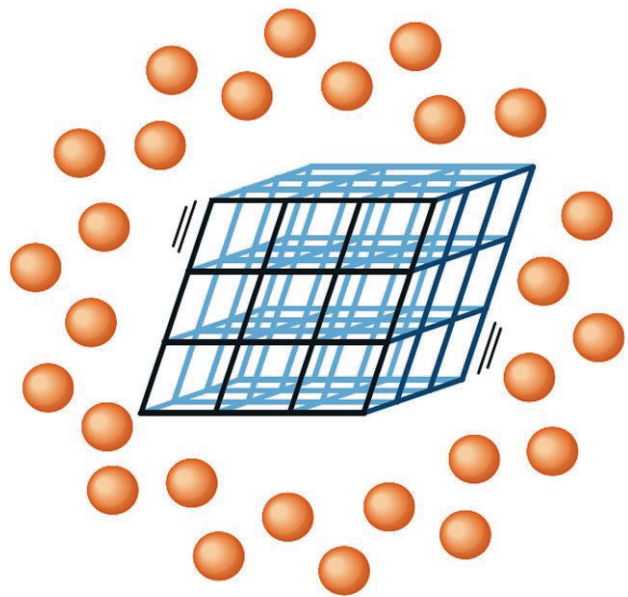
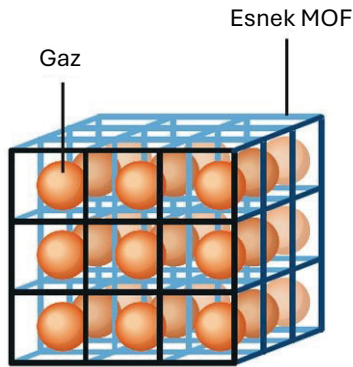
Susumu Kitagawa, araştırma kariyeri boyunca şu önemli prensibi benimsedi: "İşe yaramazın yararlılığını görmeye çalış." Genç bir öğrenci iken, Nobel ödüllü Hideki Yukawa'nın bir kitabını okumuştur. Yukawa, kitabında antik Çinli filozof Zhuangzi'den bahsediyor ve "yararlı olduğunu düşündüklerimizi sorgulamamız gerekir" diyor. Bir şey hemen fayda sağlamasa bile, gelecekte değerli hale gelebilirdi. Bu anlayışla Kitagawa, gözenekli moleküler yapılar oluşturma olasılığını araştırmaya başladığında, bunların belirli bir amaca hizmet etmesi gerekmediğine inanıyordu. 1992'de ilk moleküler yapısını tanıttığında, bu pek kullanışlı değildi: içinde asetonu hapseden boşluklara sahip iki boyutlu bir malzemeydi. Ancak bu yapı, moleküllerle inşa etme sanatına dair yeni bir düşünme biçiminin sonucuydu. Robson gibi Kitagawa da köşe taşları olarak bakır iyonlarını, bunları birbirine bağlayan daha büyük moleküllerle

birleştirerek kullandı. Bu yeni yapı teknolojisiyle denemelerini sürdürmek istiyordu; fakat fon başvuruları yaptığında, araştırma destek kuruluşları onun hedeflerinde özel bir değer görmedi. Oluşturduğu malzemeler kararsızdı ve görünürde bir kullanım amacı yoktu; bu yüzden birçok projesi reddedildi. Ancak Kitagawa pes etmedi ve 1997 yılında ilk büyük atılımını gerçekleştirdi. Araştırma ekibi kobalt, nikel veya çinko iyonlarını ve 4,4'-bipiridin adlı molekülü kullanarak, içlerinden açık kanallar geçen üç boyutlu metal-organik kafesler (MOFs) yarattı (Şekil 3). Bu malzemelerden biri kurutulduğunda-yani içindeki su uzaklaştırıldığında-stabil kaldı ve boşlukları gazlarla doldurulabilirdi. Malzeme metan, azot ve oksijeni yapısını değiştirmeden emme ve salma kapasitesine sahipti.

## KITAGAWA, BULUŞLARININ BENZERSİZLİĞİNİ FARK EDİYOR

Kitagawa'nın geliştirdiği yapılar hem karardı hem de işlevsel özelliklere sahipti;

ancak araştırma fonu sağlayan kurumlar hâlâ bu yapıların çekiciliğini göremiyordu. Bunun bir nedeni, kimyagerlerin hâlihazırda zeolitler gibi kararlı ve gözenekli malzemelere sahip olmalarıydı. Zeolitler, silisyum dioksitten yapılabiliyor ve gazları emebiliyordu. O hâlde neden benzer ama o kadar iyi çalışmayan başka bir malzeme geliştirmeye ihtiyaç olsun ki? Susumu Kitagawa, büyük araştırma fonları alabilmesi için MOF'ların diğer malzemelerden farkını açıkça tanımlaması gerektiğini anladı. Bu nedenle 1998 yılında çalışmasını Bulletin of the Chemical Society of Japan dergisinde yayınladı. Makalesinde MOF'ların birkaç önemli avantajını sundu. Örneğin, MOF'lar birçok farklı türde molekülden oluşturulabildiği için, farklı işlevlerin bir araya getirilmesi konusunda muazzam bir potansiyele sahiptir. Ayrıca Kitagawa, MOF'ların yumuşak malzemeler oluşturabileceğini fark etti. Zeolitler genellikle sert yapılar olmasına karşın, MOF'lar esnek moleküler yapı taşları (Şekil 4) içeriyordu; bu da onların bükülebilir ve uyumlu malzemeler oluşturmalarını sağlıyordu. Bundan sonra yapması gereken tek şey, bu fikirlerini pratiğe dökmektir.



Kitagawa, 1998'de MOF'ların esnek hale getirilebileceğini öne sürmüştü. Günümüzde, çeşitli maddelerle doldurulduklarında veya boşatıldıklarında şekil değiştirebilen çok sayıda esnek MOF bulunmaktadır.

Kitagawa, diğer araştırmacılarla birlikte esnek MOF'lar geliştirmeye başladı. Onlar bu çalışmalarını sürdürürken, şimdi dikkatlerimizi ABD'ye çeviriyoruz-burada Omar Yaghi, moleküler mimariyi yeni bir seviyeye taşımakla meşguldü.

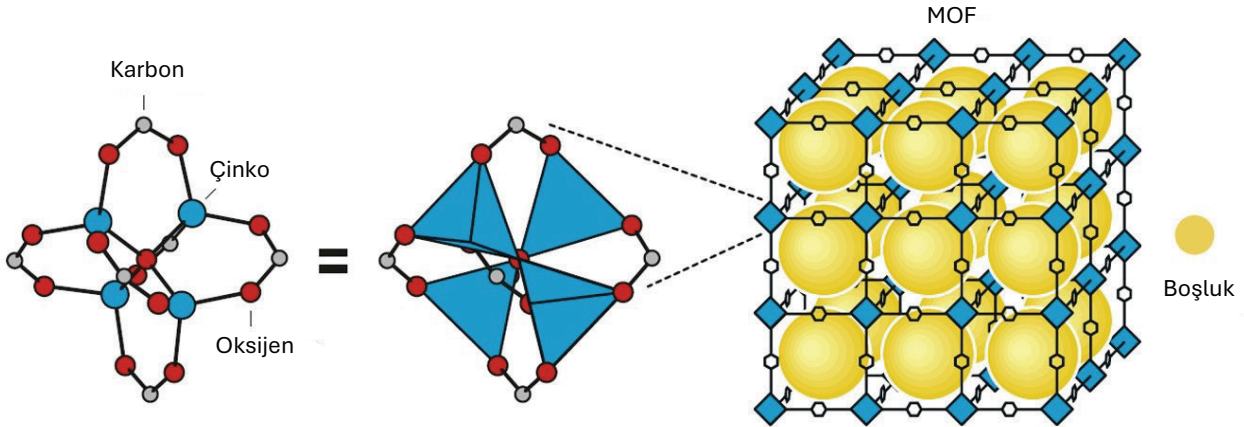
## GİZLİ BİR KÜTÜPHANE ZİYARETİ YAGHI'NIN KİMYAYA BAKIŐINI DEĞİŞTİRİYOR

Kimya okumak, Omar Yaghi için başlangıçta açık bir tercih değildi. O ve birçok kardeşi, Ürdün'ün Amman kentinde, elektriği ve akan suyu olmayan tek odalı bir evde büyüdüler. Okul, onun zorlu yaşam koşullarından kaçabildiği bir sığınaktı. Bir gün, on yaşındayken, normalde kilitli tutulan okul kütüphanesine gizlice girdi ve raftan rastgele bir kitap aldı. Kitabı açtığında, gözleri anlam veremediği ama büyüleyici olan garip şekillere takıldı, bu onun moleküler yapılarla ilk karşılaşmasıydı. On beş yaşına geldiğinde babasının isteği üzerine eğitimine devam etmek için ABD'ye taşındı. Kimyaya ilgi duymaya başladı ve zamanla

yeni malzemeler tasarlama sanatı onu cezbetti. Ancak, yeni moleküller oluşturmanın geleneksel yöntemini fazla öngörülemez buluyordu. 1992'de Yaghi, Arizona Eyalet Üniversitesi'nde ilk araştırma grubunu kurduğunda, malzeme oluşturmanın daha kontrollü yollarını bulmayı hedefliyordu. Amacı, rasyonel tasarım yaklaşımıyla, farklı kimyasal bileşenleri Lego parçaları gibi birleştirip büyük kristaller oluşturmaktı. Bu zorlu bir süreçti, ancak grup sonunda metal iyonlarını organik moleküllerle birleştirmeye başladığında başarıya ulaştı. 1995'te Yaghi, bakır veya kobaltla bağlanmış iki farklı iki boyutlu yapı geliştirdi. Bu yapılar, aė şeklindeydi ve özellikle kobalt içeren boşluklarında "konuk moleküller" barındırabiliyordu. Bu boşluklar tamamen dolduğunda, yapı o kadar kararlı hale geliyordu ki, 350°C'ye kadar ısıtıldığında bile bozulmuyordu. Yaghi, bu malzemeyi Nature dergisinde yayınladığı makalesinde tanıttı ve ilk kez "metal-organik kafes (metal-organic framework)" terimini kullandı. Bu terim artık, metallere organik (karbon temelli) moleküllerden oluşan, genişletilmiş ve düzenli yapılar için genel ad haline geldi. Bu yapılar genellikle boşluklar içerir ve bu özellikleriyle büyük bir potansiyel taşır.

## YAGHI'NIN KAFESLERİNİN BİRKAÇ GRAMINA BİR FUTBOL SAHASI SİĞDIRABİLİYOR

Yaghi, metal-organik kafeslerin gelişiminde bir sonraki dönüm noktasını 1999 yılında attı; o yıl dünyaya MOF-5 adlı malzemeyi tanıttı. Bu yapı, alanının klasik örneklerinden biri haline geldi. MOF-5 son derece geniş iç hacimli ve kararlı bir moleküler yapıydı. Boş olsa bile, 300°C'ye kadar ısıtıldığında bile çökmüyordu. Ancak birçok araştırmacının dikkatini çeken şey, bu malzemenin kübik boşluklarının içinde gizlenen muazzam yüzey alanıydı. Birkaç gram MOF-5, bir futbol sahası büyüklüğünde bir yüzey alanı barındırıyordu. Bu da onun, bir zeolit emebileceğinden çok daha fazla gazı absorbe edebilmesi anlamına geliyordu (şekil 5). Zeolitler ile MOF'lar arasındaki farklılara gelince, araştırmacıların esnek MOF'lar geliştirmesi yalnızca birkaç yıl aldı. Bu tür esnek bir malzeme sunabilenlerden biri, yine Susumu Kitagawa'nın kendisiydi.



Yaghi, 1999 yılında kübik boşluklara sahip, oldukça kararlı bir malzeme olan MOF-5'i geliştirdi. Sadece birkaç gramı, bir futbol sahası büyüklüğünde bir alanı tutabiliyordu.

Kitagawa'nın geliştirdiği malzeme, su veya metanla dolduğunda şeklini değiştiriyor, boşaldığında ise orijinal haline dönüyordu. Bu malzeme, gazı içine çekip dışarı verebilen, "nefes alıp veren" bir akciğer gibi davranıyordu.

## YAGHI'NIN ARAŞTIRMA GRUBU ÇÖL HAVASINDAN İÇME SUYU ELDE EDİYOR

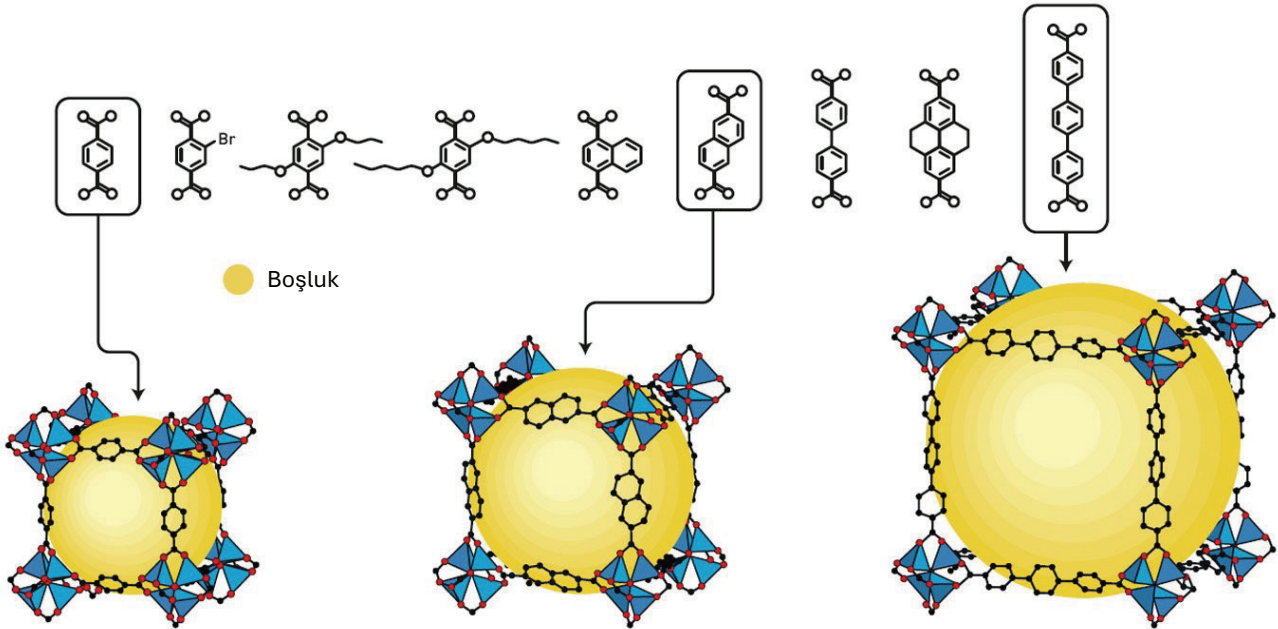
Omar Yaghi, 2002 ve 2003 yıllarında metal organik kafeslerin temeline son tuğlaları yerleştirdi. Science ve Nature dergilerinde yayınlanan iki makalesinde, MOF'ların rasyonel bir şekilde değiştirilip düzenlenebileceğini ve böylece farklı özellikler kazandırılabilceğini gösterdi. Yaghi'nin yaptığı çalışmalardan biri, orijinal malzeme de bulunanlardan hem daha büyük hem de daha küçük boşluklara sahip 16 farklı MOF-5 varyantı üretmekti (Şekil 6). Bu varyantlardan biri, çok büyük miktarlarda metan gazı depolayabiliyordu; Yaghi bu

özelliğin, biyogaz (RNG) ile çalışan araçlarda kullanılabilceğini öne sürdü. Daha sonra MOF'lar dünyada büyük bir etki yarattı. Araştırmacılar, yeni MOF'lar oluşturmak için kullanılabilcek çok çeşitli parçalardan oluşan bir moleküler yapı seti geliştirdiler. Bu yeni MOF'lar farklı şekil ve karakterlere sahip olup, çeşitli amaçlar için rasyonel ya da yapay zekâ tabanlı MOF tasarımları için olağanüstü bir potansiyel sundu. Şekil 7, MOF'ların nasıl kullanılabilceğine dair örnekler göstermektedir. Örneğin, Yaghi'nin araştırma grubu Arizona çöl havasından su topladı. Geceleri, MOF malzemeleri havadaki su buharını yakaladı; sabah olduğunda ve güneş malzemeyi ısıttığında, bu sudan içme suyu elde edilebildi.

## KARBONDİOKSİT VE ZEHİRLİ GAZLARI YAKALAYAN MOF MALZEMELER

Araştırmacılar, çok sayıda farklı ve işlevsel MOF malzemesi geliştirdi. Şimdiye kadar

bu malzemeler çoğunlukla küçük ölçekli uygulamalarda kullanıldı. MOF malzemelerinin insanlık için sunduğu faydalardan yararlanabilmek amacıyla birçok şirket, bu malzemelerin seri üretimi ve ticarileştirilmesi için yatırım yapmaya başladı. Bazı girişimler bu konuda başarıya ulaştı. Örneğin, elektronik endüstrisi artık yarı iletken üretiminde gereken bazı zehirli gazları güvenli bir şekilde tutmak için MOF malzemeleri kullanmaktadır. Başka bir MOF türü ise, kimyasal silah olarak kullanılabilcek zararlı gazlar da dahil olmak üzere tehlikeli gazları parçalayarak etkisiz hale getirebilmektedir. Ayrıca, pek çok şirket, fabrika ve enerji santrallerinden çıkan karbondioksiti yakalayıp sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla MOF tabanlı malzemeleri test etmektedir.

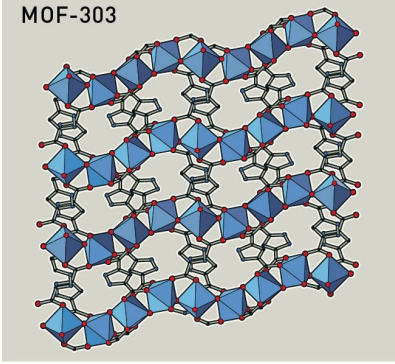


Yaghi, 2000'lerin başında, MOF malzeme ailelerinin tamamının üretilabileceğini gösterdi. Moleküler bağlantıları değiştirerek farklı özelliklere sahip malzemeler elde etti. Bunlar arasında, çeşitli boyutlarda boşluklara sahip 16 farklı MOF-5 çeşidi yer almaktadır.

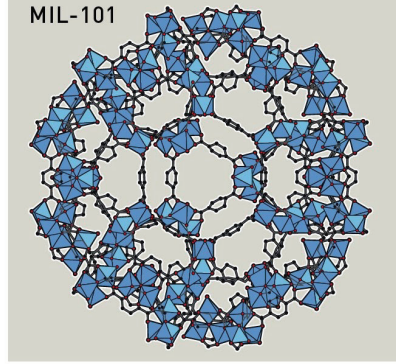
Bazı araştırmacılar, MOF'ların o kadar büyük bir potansiyele sahip olduğuna inanmaktadır ki, bunların yirmi birinci yüzyılın malzemesi olacağı öne sürmektedir. Bunu

zaman gösterecek; ancak metal-organik kafeslerin geliştirilmesiyle, Susumu Kitagawa, Richard Robson ve Omar Yaghi, kimyacılar karşı karşıya olduğumuz bazı

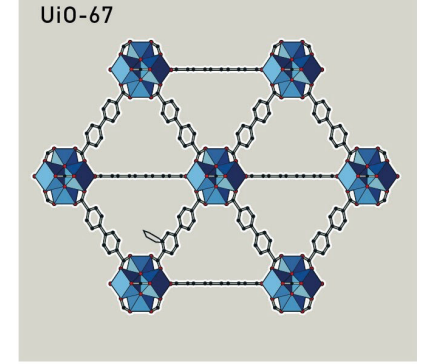
zorlukları çözmek için yeni fırsatlar sundular. Böylece, Alfred Nobel'in vasiyetinde belirttiği gibi, insanlığa en büyük yararı sağladılar.



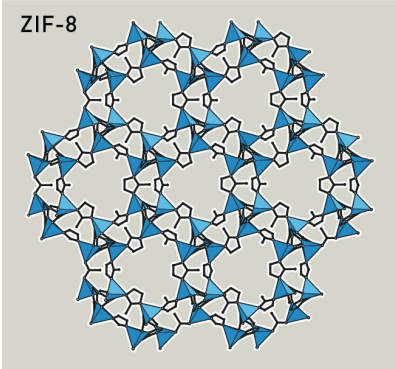
MOF-303, geceleri çöl havasındaki su buharını yakalayabilir. Güneş malzemesini ısıttığında, içilebilir su açığa çıkar.



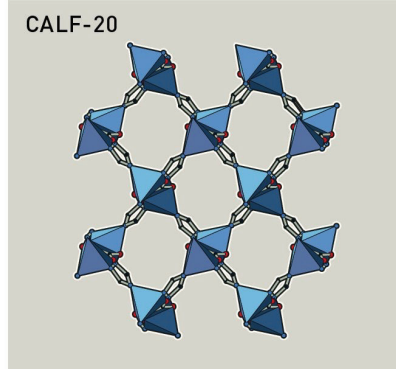
MIL-101, devasa boşluklara sahiptir. Kirlı sularda ham petrol ve antibiyotiklerin ayrışmasını katalize etmek için kullanılmıştır. Ayrıca büyük miktarlarda hidrojen veya karbondioksit depolamak için de kullanılabilir.



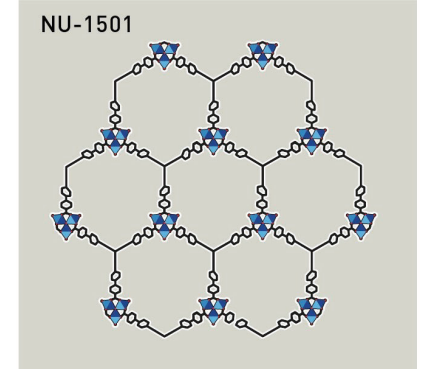
UiO-67, sudaki PFAS'ı emebilme özelliğine sahip olduğundan, su arıtımı ve kirlitcilerin giderilmesi için umut vadeden bir malzemedir.



ZIF-8 atık sulardan nadir toprak elementlerinin çıkarılması için deneysel olarak kullanılmıştır.



CALF-20, yüksek oranda karbondioksit emme kapasitesine sahiptir. Kanada'daki bir fabrikada test edilmektedir.



NU-1501, normal basınçta hidrojeni depolayıp serbest bırakacak şekilde optimize edilmiştir. Hidrojen araçlarda yakıt olarak kullanılabilir, ancak sıradan yüksek basınçlı tanklarda son derece patlayıcıdır.

## 1901-2025 NOBEL KİMYA ÖDÜLÜ İSTATİSTİKLERİ



## Nobel Kimya Ödülü

1901-2025

İki ödül sahibi daha önce  
iki kez bu ödüle  
layık görüldü

Kimya ödülünün bir/iki/üç  
kişiye paylaştırıldığı sayı

En yaşlı

97

29



En genç

35

25

63

Kimya Ödülleri

117

Kimya Ödülü Sahipleri

198

NOBEL ÖDÜLÜ

