

Her Derde Deva ZEOLİTLER

Dr. Tuncay Baydemir [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Zeolit kristalleri, keşfedildikleri günden itibaren çok sayıda bilimsel araştırmaya konu olmuş, sahip oldukları üstün özellikler sayesinde pek çok uygulama alanında kullanım bulmuştur. Zeolitlere olan ilgi günümüzde de canlılığını korumaya devam ediyor. Bu ilginin kaynağını anlamak için onlara biraz daha yakından bakmak gerekiyor.



Nedir Bu Zeolitler?

Temel olarak, zeolitler silikon, alüminyum ve oksijenden oluşan kristal katı yapılardır. Bu karmaşık üç boyutlu yapıların içinde katyonların, suyun ve/veya küçük moleküllerin tutulabileceği boşluklar ve kanallar bulunur. Zeolitlere sulu alüminosilikatlar da denir.

Zeolit kavramı ilk olarak İsveçli mineralog Fredrick Cronstedt (d.1722-ö.1765) tarafından kullanıldı. 1756 yılında bir zeolit çeşidi olan stilbiti bulan Cronstedt, zeolit mineralini ısıttığında içinde tutulan suyun buharlaştığını ve hızlı su kaybına bağlı olarak

zeolit in kaynar gibi göründüğünü gözlemledi. Bu tür malzemelere bu yüzden Yunanca “*zeo*” (kaynamak) ve “*lithos*” (taş) kelimelerinden oluşan ve “kaynayan taş” anlamına gelen “zeolit” adı verildi. Günümüzde bu terim çok farklı kullanım alanlarına sahip iki yüzden fazla farklı minerali temsil ediyor.

Zeolitler alüminyum oksit ve silisyum oksit düzgün dörtyüzlü yapılarının oksijen atomları üzerinden birbirlerine bağlanmasıyla oluşur. Kafes biçimine sahip zeolitlerin öne çıkan bir başka özelliği de dörtyüzlü moleküler yapılar oluşturan dört bağlı merkezî atomlardan oluşmasıdır. Bu dörtyüzlüler köşelerden birbirine

bağlanır ve çok çeşitli kristal yapılar oluşturabilir. Si (silisyum) ve Al (alüminyum) atomları merkezî konumda yer alırken O (oksijen) atomları ise köşelerde konumlanır, bu birimler O atomlarından birbirlerine bağlanarak mikro boyutlarda gözenekler ve kanallar içeren kafes yapılar oluşturur.

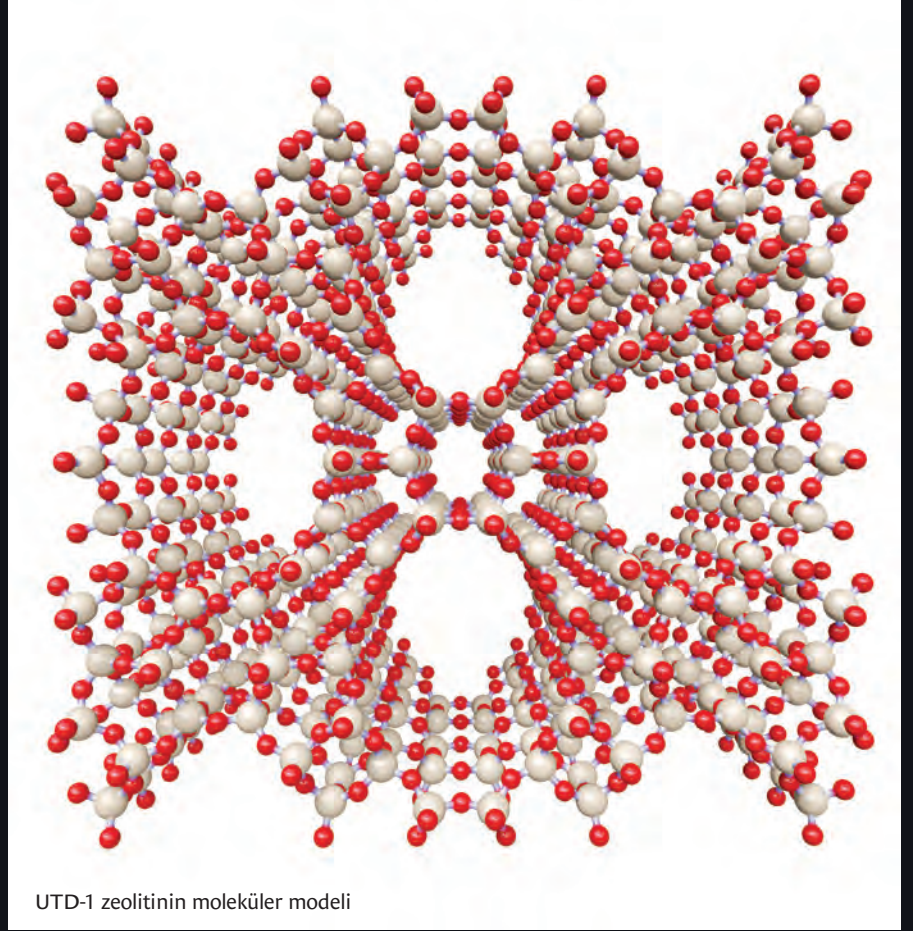
Çeşitli uygulamalar için kullanılan zeolitlerde birbirine bağlı geniş kanallar sayesinde yerleşik iyonlar ve moleküller yapının içine ve dışına kolayca taşınır. Isıtma ve dehidrasyon (bünnyede tutulan suyun uzaklaştırılması) sonucunda zeolitlerde oluşan



Skolesit zeoliti kristalleri

boşluklardan küçük boyutlardaki moleküller geçebiliyorken daha büyük olanlar ise dışarda kalır. Bu şekilde zeolitler moleküler anlamda elek işlevi de görür. Oldukça kararlı yapıya sahip zeolit kafesler, gözeneklerindeki iyonlar ve moleküller uzaklaştırıldığında herhangi bir zarar görmeden bütünlüklerini koruyabilir.

Özel yapıları ile zeolitler; maddeleri ayırma, filtrasyon, seçici geçirgenlik, iyon değişimi, katalizleme ve adsorpsiyon (yüzeyde tutunma) konularında çok çeşitli uygulamalar sunuyor. Ayrıca son zamanlarda zeolit malzemeler; lüminesans (ışıldama), elektrik, manyetizma, tıp ve mikroelektronik alanlarında da kullanım bulmaya başladı.



UTD-1 zeolitinin moleküler modeli

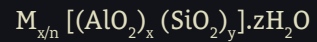
Karmaşık Görünüyorlar Ama Aslında Çok Düzenliler!

Zeolitler paylaşılan bir oksijen atomu üzerinden birbirine bağlanan $[\text{SiO}_4]^{4-}$ ve $[\text{AlO}_4]^{5-}$ tetrahedral (dört yüzlü) moleküler yapılardan oluşan üç boyutlu ağlardır. Bu dört yüzlü yapılar zeolitlerin birincil yapı blokları olarak adlandırılıyor ve genel

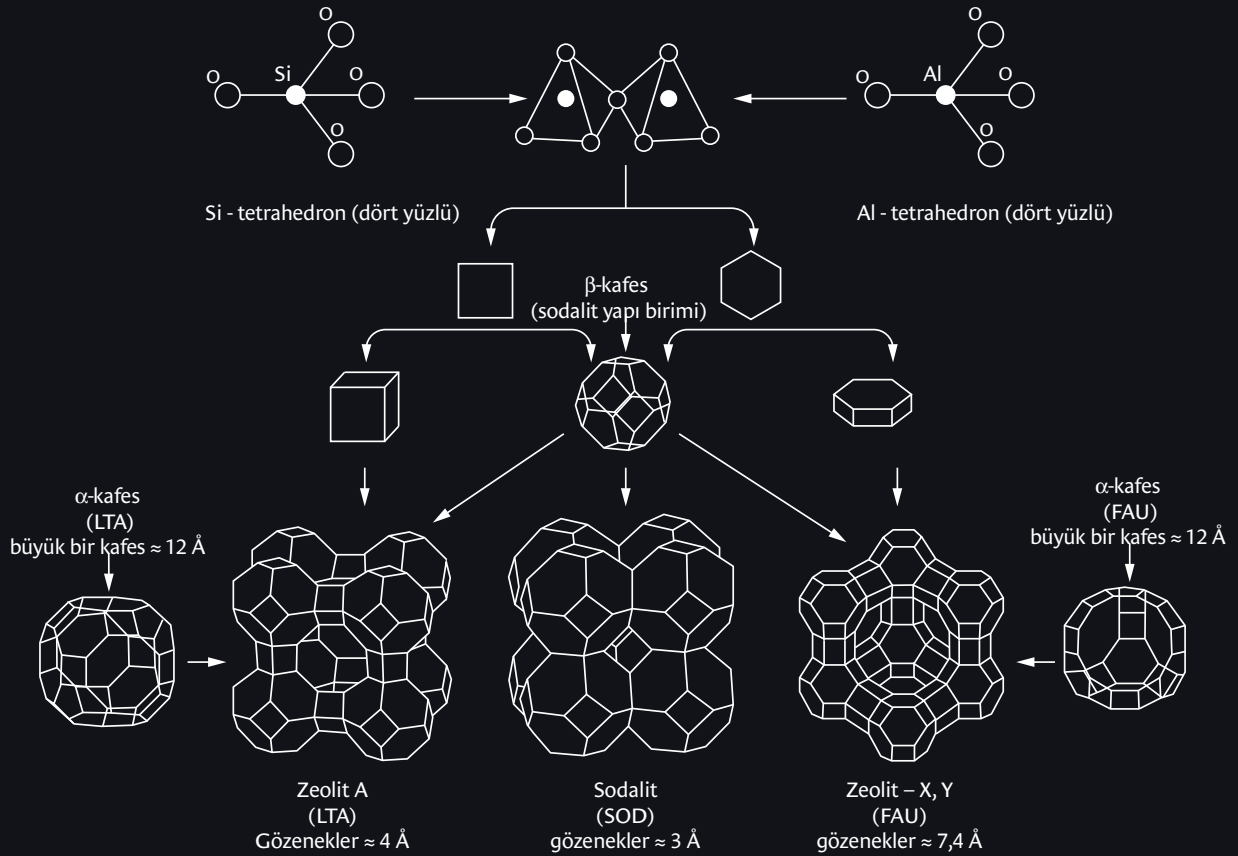
olarak TO_4 formülü ile ifade ediliyor. Burada T silisyum (Si^{4+}) veya alüminyum (Al^{3+}) iyonlarını temsil ediyor.

Zeolitler, gözenekli, negatif yüklü, kristalli ve alüminosilikat çerçevesi yapılarıdır. Zeolitlerin gözenekleri pozitif yüklü IA ve IIA metal iyonları ile ya da su molekülleriyle dolabiliyor. Pozitif yüklü metal iyonları, belirli bir kimyasal filtrelemek veya bir tür reaksiyonu katalize etmek için ideal boyut ve şekilde üretilen gözeneklere

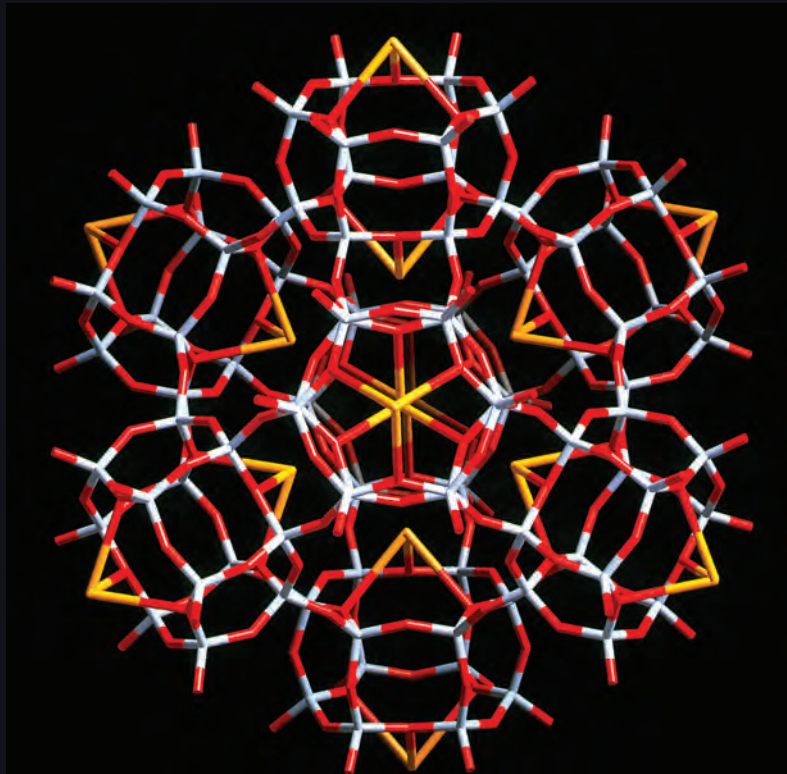
sığabiliyor. Zeolitlerin kimyasal yapısını genel bir ifade ile göstermek için aşağıdaki kapalı formül kullanılıyor:



Bu formülde; M bir alkali metal ya da alkali toprak metal katyonunu, n metal katyonunun değerliğini, x ve y bir birim yapı ünitesindeki tetrahedral yapıların sayısını, z ise bu birim yapıdaki su molekülü sayısını ifade etmek için kullanılıyor.

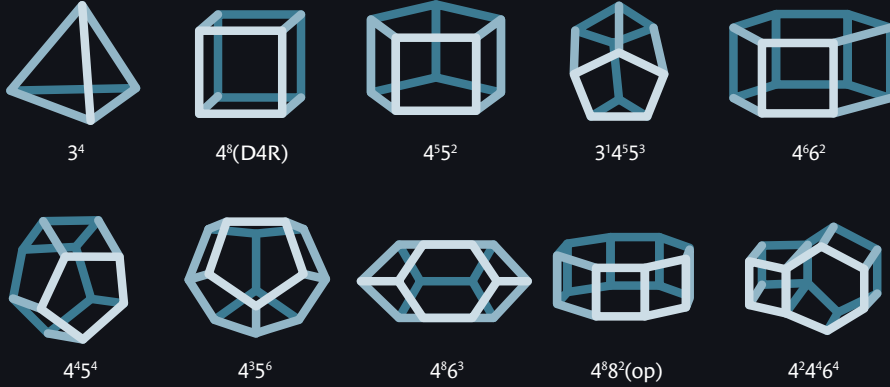


Üç zeolit yapısının yapı birimlerine ve gözenek/kafes boyutlarına örnekler: zeolit A (LTA), sodalit (SOD) ve fojasit (FAU) -X, Y zeolitleri



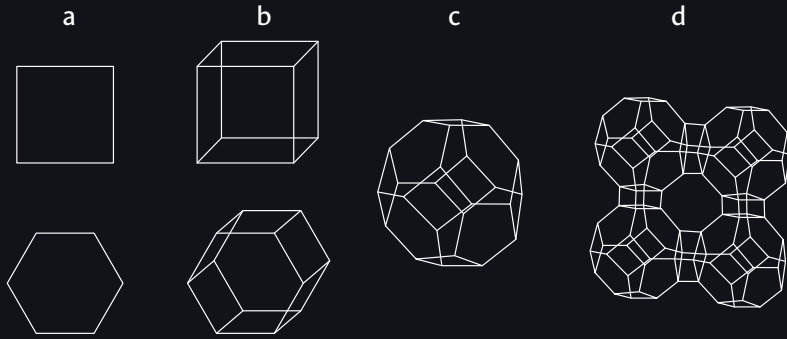
Yapay bir zeolit olan ZK-5'in üç boyutlu moleküler yapısını gösteren çubuk model.

Farklı boyutlardaki boşluklar kanalları ve kafesleri temsil ediyor. Birincil yapı blokları paylaştıkları oksijen atomu ile ikincil yapı bloklarını oluşturuyor. Bu bloklar tek halkalı, çift halkalı, çok yüzlü veya daha karmaşık üç boyutlu yapılar olabiliyor. İkincil yapı blokları birleşerek farklı kanal ve kafes yapılar içeren zeolitleri meydana getiriyor. Sarı renkler sodyum, kırmızı renkler oksijen, beyaz renkler ise silisyum ve alüminyum atomlarını temsil ediyor.



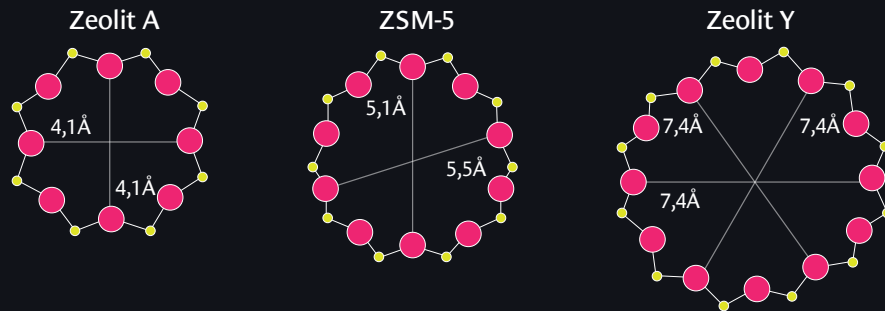
Zeolitlerdeki farklı kafes yapı blokları.

Şekillerdeki her köşe, yapı bloğunda yer alan silisyum veya alüminyum atomunu temsil ediyor.



Çeşitli ikincil yapı birimi örnekleri. Köşeler tetrahedral yapıda yer alan birincil yapı birimlerindeki alüminyum veya silisyum katyonlarını temsil ediyor.

- a) 4 ve 6 halkalı yapılar
- b) 4 ve 6 halkalı yapılardan oluşmuş ikili yapılar
- c) 4 ve 6 halkalı yapılardan oluşan kübo-oktahedron
- d) 4 halkalı yapıdan oluşmuş 4 adet ikili yapı ile birleştirilmiş 4 tane kübo-oktahedron



Zeolitik çerçevedeki gözenekli yapıları oluşturan farklı halka türlerinin örnekleri ve boyutları. Belirli bir zeolitın gözenek boyutu halkanın türüne göre değişiklik gösterir. (1 Å (angström) = 10⁻¹⁰ metre (metrenin 10 milyarda biri))

Birincil ve ikincil yapı birimlerinin yanında, zeolitlerin yapısında daha karmaşık olan bileşik yapı birimleri de bulunabiliyor. Bunların en yaygın örneği halka yapılar olup boyutları halkadaki tetrahedral yapıların sayısı ile ifade ediliyor. Örneğin n sayıda tetrahedral birim içeren halkaya n halkası deniyor. Zeolit halkaları sıklıkla 4, 5, 6, 8, 10 veya 12 tetrahedral yapıdan oluşuyor. Ancak yapılan araştırmalarda 14, 18 ve 20 halkalı yapıların varlığı da bildirilmiş. Bu halkalı yapılar gözenek boyutlarını belirleyici rol oynuyor.

Nasıl Elde Edilir?

Zeolitler en basit şekilde doğal ve yapay olmak üzere iki sınıfa ayrılıyor. Doğal zeolitler çoğunlukla bir zamanlar volkanik aktivitenin olduğu aktif veya sönmüş yanardağlara yakın bölgelerde bulunuyor. Volkanlardan püsküren lav ve kül, su ile birleşerek uzun yıllar süren etkileşimler sonucunda zeolitleri oluşturuyor. Doğal zeolitler önce bazalt kayalarda keşfedilmelerine rağmen daha sonra yer kabuğuna oldukça yakın tortul kayalarda da bulundular.

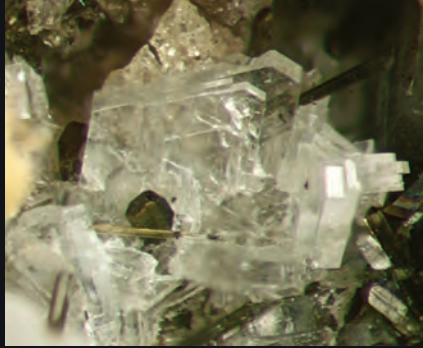
Dünyanın pek çok yerinde farklı ortam koşullarında oluşmuş farklı türlerde zeolitler çıkarılıyor. Oluşan zeolitlerin türü çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik gösteriyor. Sıcaklık ve basınç gibi faktörlerin yanında suya ulaşan volkanik malzemenin fiziksel ve kimyasal yapısı, malzemenin ulaştığı suyun türü (deniz suyu, tatlı su gölü, yeraltı suları, tuzlu sığ göller gibi), suyun pH değeri, suda bulunan iyonlar ve iyon derişimleri bunların başlıcaları arasında sayılabilir.

Doğal zeolitlerden yaklaşık 40 tanesi bilinse de bu sayının 80 civarında olabileceği tahmin ediliyor. Doğal zeolitler hem volkanik hem de tortul kayalarda bulunabiliyor. Bu zeolitlerden en bilinenleri arasında klinoptilolit, şabazit, mordenit, stilbit, eriyonit, höylandit ve fillipsit sayılabilir.

Yapay zeolitler ise hızlı oluşum metotları ile belirli maddeleri bir araya getirerek elde ediliyor. Uygun alkali ortamlar ve hidrotermal koşullar altında daha kısa sürelerde farklı kristal büyüklüklerine sahip zeolitler sentezlemek



Stilbit



Klinoptilolit



Höylandit



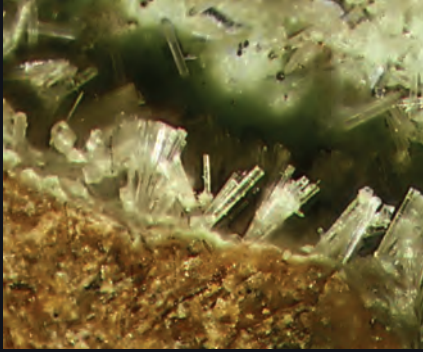
Mordenit



Fillipsit

için çeşitli teknikler uygulanıyor. Son yıllarda istenilen yapıdaki zeolitleri sentezlemek için hesaplamalı ve istatistiksel kimya ile yapay zekâ uygulamalarından da faydalanılıyor.

Doğal zeolitlerin yapay olanlara göre bazı üstünlükleri bulunsa da kimyasal ve yapısal bileşimlerindeki değişkenlikler, düşük rezerve sahip maden yatakları, yüksek işleme maliyetleri ve kirlilik gibi etmenler; söz konusu minerallerin yapay yollarla



Eriyonit



Şabazit

ticari açıdan elverişli olarak üretilmesini teşvik ediyor.

2007 yılında yayımlanan *Zeolit Çerçeve Türleri Atlası*'nda Uluslararası Zeolit Birliği tarafından her birine üç harfli bir kod verilen 176 zeolit çerçeve türü onaylandı. Atlasın yayınlanmasından sonra yapılan yeni çalışmalarla bu sayı artmaya devam etti. Günümüzde 230'dan fazla zeolit yapısı biliniyor ve yapısal parametrelere göre sınıflandırılabilir.

Doğal veya yapay zeolitlerin tercih edilebilirliği konusundan söz etmek gerekirse bu zeolitlerin istenilen fizikokimyasal özellikleri taşıyıp taşıyamamasına bağlı. Zeolitlerin kristal yapıları ve kimyasal bileşimleri gibi önemli özellikleri kullanım alanlarında da belirleyici rol oynuyor. Ayrıca çoğu durumda kirleticilerin varlığı da seçim yaparken etkili oluyor. Zeolitler doğal ya da yapay kaynaklı olarak sınıflandırılmalarının yanında gözenek çaplarına göre küçük, orta veya büyük gözenekli zeolitler; silisyum içerme oranına göre de düşük, ara ve yüksek silika zeolitleri olarak da değerlendirilebiliyor.

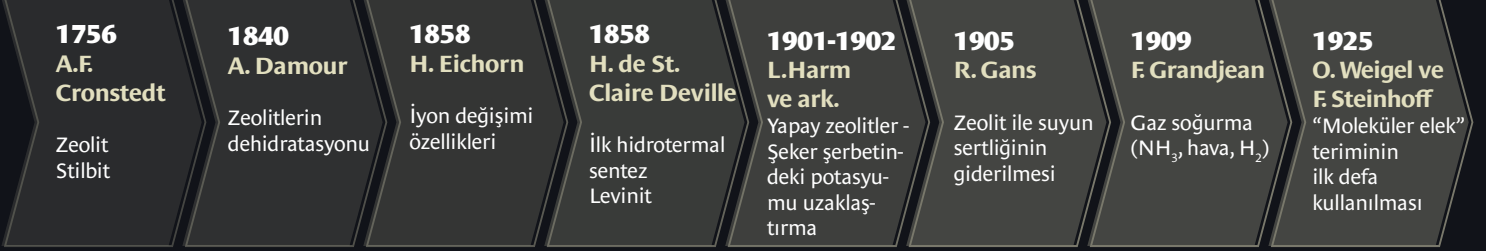
Kısa Bir Tarihçe

Zeolit malzemelerin modern mineralojinin kurucusu sayılan Axel Fredrik Cronstedt tarafından keşfinin ardından doğal zeolitlerin kimyasal, fiziksel ve mineralojik özelliklerinin araştırılmasına başlandı. Günümüzün modern araştırma yöntemlerinin eksikliğine rağmen bu araştırmalar günümüzdeki doğal ve sentetik zeolitlerin ve günümüz uygulamalarının temellerini oluşturdu.



Axel Fredrik Cronstedt (d.1722-ö.1765) İsveçli mineralog ve kimyager. Yaptığı çalışmalarla modern mineralojinin kurucusu sayılıyor. Aynı zamanda 1751 yılında nikel elementini de keşfeden kişidir.

ZEOLİT MALZEMELERİN VE ÖZELLİKLERİNİN KEŞİFLERİ



Margeta, K., & Farkaš, A., Introductory Chapter: Zeolites - From Discovery to New Applications on the Global Market, In K. Margeta, & A. Farkaš (Eds.), Zeolites - New Challenges, IntechOpen, 2020.

Cronstedt'in gözlem ve araştırmalarını temel alan çalışmalarla sentezlenen ilk yapay zeolit levinit oldu. Daha sonraki dönemlerde de doğalına benzer yapay mordenit sentezlendi. Zeolit sentezi üzerine gerçekleştirilen yoğun çalışmalar onları endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere daha da uygun hâle getirdi. Zeolitler böylece pek çok endüstriyel alanda kendilerine önemli ve sağlam bir yer edindi.

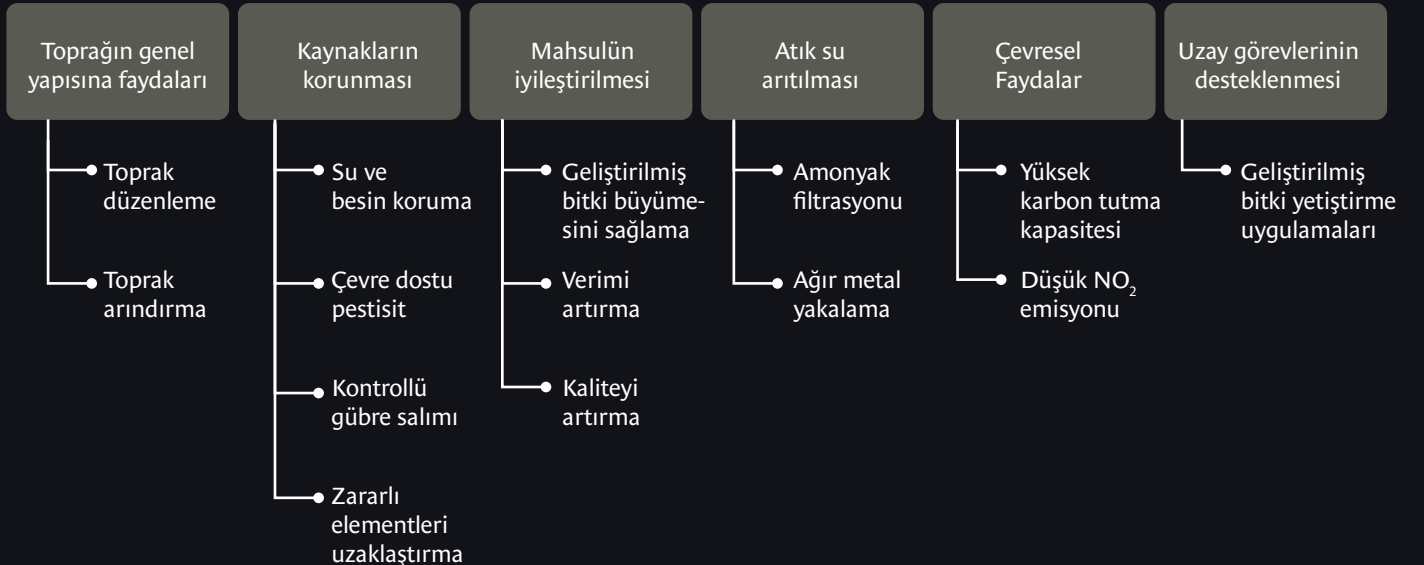
Zeolitler Her Yerde

Zeolitlerin kafese benzer yapısı onları pek çok açıdan kullanışlı malzemeler yapıyor. Suyun filtrelenmesi ve yumuşatılması adına zeolitler oldukça önemli malzemelerdir. İyon değiştiricili su yumuşatıcılarda, kalsiyum ve magnezyum iyonlarınca zengin olan sert sular, sodyum içeren zeolitle dolu bir kolondan geçirildiğinde kalsiyum ve

magnezyum iyonları sodyumla yer değiştirir. Bu sayede daha yumuşak bir su elde edilir. Endüstriyel ve çevresel atık suların kirleticilerden arıtılması için de zeolit malzemeler kullanılıyor. Günümüzde kullanılan çamaşır ve bulaşık deterjanlarının çoğu da zeolit içeriyor.

Zeolitlerin gözenekli kristal yapısı, istenmeyen sıvı ve kokuları hapsedmekte oldukça başarılıdır. Hayvancılık sektöründe, yemlerde ve gıda takviyelerinde kullanılan

Zeolitlerin Tarımsal Faaliyetlerde Kullanımı



MODERN ZEOLİT BİLİMİNİN BAŞLAMASI

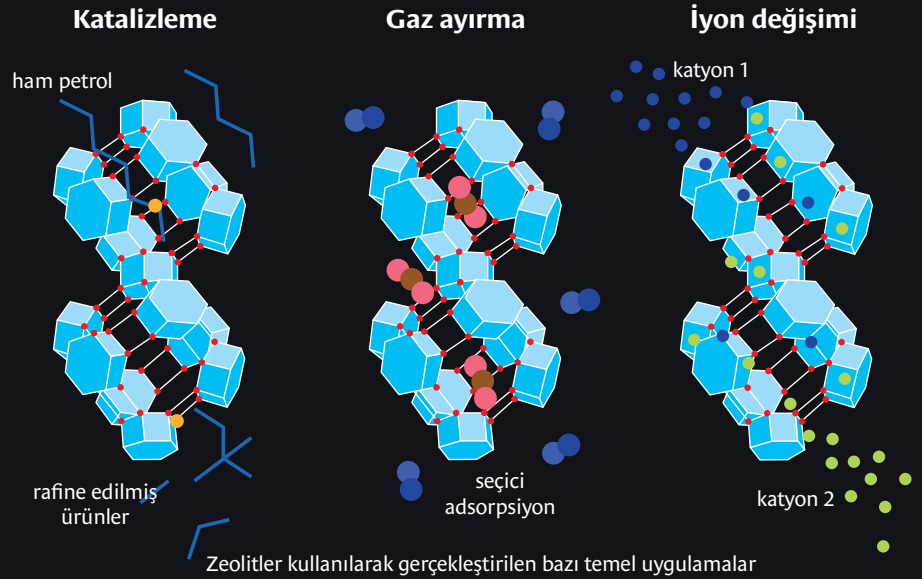


ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR

bu malzemeler; koku kontrolü ve evcil hayvan kumlarında da yaygın olarak değerlendiriliyor.

Zeolitlerin tarımsal faaliyetlerde kullanımı da çok yaygındır. Bu malzemeler, kumlu topraklarda suyun tutulmasını artırabiliyor ve killi topraklarda da gözenekli bir yapı oluşturabiliyor. Bunun yanında, topraktaki besleyici maddeleri koruyarak daha yüksek verim elde edilmesini sağlıyor. Yüksek iyon değiştirme ve ağır metalleri tutma kapasiteleri ile toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirmekte kullanılan bu malzemeler; gübreleme uygulamalarında da değerlendiriliyor. Böylece zeolitler kullanarak besleyici maddelerin toprağa kontrollü bir şekilde bırakılması sağlanıyor. Ayrıca zeolit bazlı gübreler üretilirken doğaya daha az karbondioksit salımı gerçekleşiyor.

Zeolitler biyoyumlu, yenilebilir ve çoğunlukla zararsız malzemeler olup tıp ve biyomalzeme alanlarında da sıklıkla kullanılıyor. Kontrollü



ilaç salım sistemlerinde, biyobelirteç tespitinde, biyoalgılayıcılarda, yara iyileştirmede, doku iskelelerinde, protez kaplamalarda, tıbbi görüntüleme sistemlerinde, diş kökü dolgularında, diyaliz işlemlerinde, zararlı iyonların vücuttan uzaklaştırılmasında ve çeşitli tedavilerde farklı kullanımları olan çeşitli zeolitler; tüm bunların yanında taşıdıkları antibakteriyel/ antimikrobiyal özellikler ile de tıpta önemli malzemeler arasında gösteriliyor.

Gıda sektöründe de antimikrobiyal özellikleri ile çeşitli patojenlere karşı etkili olan zeolitler önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle zeolit malzemeler gıda kalitesini ve raf ömrünü artırmada, gıda paketlenme malzemelerinde, zeolit bazlı reaktörlerde, gıda içeriği algılama sistemlerinde, gıda örnek analizlerinde, oksijen ve nem tutma işlemlerinde, gıda atıklarının yönetiminde ve gıdayla temas edecek akıllı malzemeler geliştirilmesinde kullanılıyor.

Zeolitlerden ayrıca çeşitli tepkimelerde katalizör olarak da faydalanılıyor. Petrokimya endüstrisindeki büyük hidrokarbon moleküllerinin petrol ve yan ürünlerine parçalanması işlemlerinde, bilimsel çalışmalarda kimyasal tepkimelerin seçici bir şekilde gerçekleştirilmesinde, ayrıca ilaç geliştirilmesi ve üretiminde zeolitler de görev alıyor. Bunun yanında, katalizör işlevi gören zeolit malzemeler tekrar tekrar kullanılabilir.

Moleküler elek görevi yapan zeolitlerin işlevleri arasında en önemli birkaç tanesi; atık su ıslahı ve su arıtma, zararlı baca gazlarının tutulması, petrol sızıntılarının ve ağır metallerin temizlenmesi diyebiliriz. Zeolitlerin seçici geçirgenlik özelliği üzerinde bunun gibi çok fazla uygulama mevcut olmakla birlikte yeni kullanım alanları bulmak için çalışmalar devam ediyor.

Zeolitlerin kullanıldığı bir diğer sektör de inşaat ve yapı malzemeleri. Çeşitli inşaat malzemelerinde ve çimento üretiminde zeolitler fazlaca yer alıyor. Zeolit katkıları betonların fiziksel ve kimyasal özelliklerini olumlu yönde geliştiriyor ve böylece yüksek performanslı beton üretimini mümkün kılıyor.

Günlük hayattaki basit kullanımlarının yanında nükleer atıklardaki radyoaktif parçacıkların

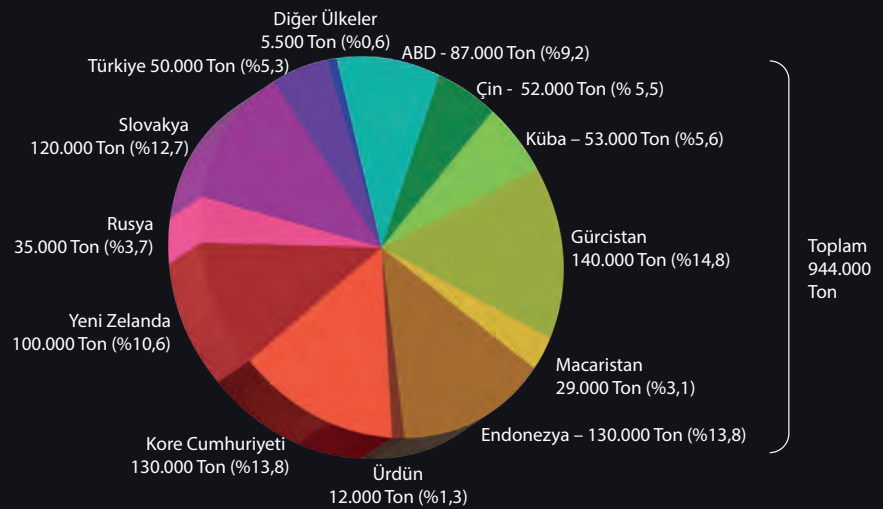
tutulması ve zehirli ağır metallerle kirletilmiş toprakların temizlenmesi gibi oldukça önemli görevleri de zeolitler başarıyla yerine getirebiliyor.

Küresel Bir Zeolit Pazarı

Doğal zeolit madenleri çeşitli ülkeler tarafından işleniyor. ABD Jeolojik Araştırma Kurumu tarafından sunulan zeolit madenciliği verileri birçok ülkenin üretimini düzenli olarak rapor etmemesi yüzünden tam doğru olmasa da genel çerçeveyi vermesi açısından önemli görülüyor. Yerel ve küresel zeolit rezervlerinin büyüklüğü hakkında da net veriler bulunmuyor. Yine de dünya toplam rezervinin hayli büyük olduğu tahmin ediliyor.

Tüm kıtalarda doğal ve yapay zeolit ürünlerinin ticareti yapılıyor. Pazar payı büyüklüğü bakımından ilk sıradaki ABD'yi sırasıyla Asya-Pasifik bölgesi, Çin, Hindistan, Avrupa ve diğer pazarlar izliyor. Yapay zeolitlerin ticaret hacminin ise doğal zeolitlerden daha fazla olduğu bildiriliyor.

2016 yılında yaklaşık olarak 29 milyar dolar olan küresel zeolit pazar payının 2022 yılı sonuna kadar yıllık %2,5'lik büyümeyle 34 milyar dolara ulaşması bekleniyor. Zeolit üretiminde modern teknolojilerin kullanılmaya başlanması ile yeni endüstriyel kullanım alanlarının ve buna bağlı olarak yapay zeolitlere olan talebin daha da artacağı tahmin ediliyor.



Ülkeler bazında 2021 yılı doğal zeolit madenciliği verileri

Zeolitlerin Geleceği Nasıl Olacak?

Zeolitlerin tarım, hayvancılık, kimya, petrol, inşaat, sağlık ve malzeme alanlarında sahip olduğu mevcut uygulamalarıyla birlikte henüz keşfedilmemiş alanlarda yeni kullanımlar da bulması bekleniyor. Günümüzün gelişen teknolojileriyle birlikte zeolit kullanımının önümüzdeki dönemde de artarak devam edeceği düşünülüyor. Bunun yanında, karmaşık zeolit yapıların modern teknolojiler ile sentezlenmesi daha da kolaylaşıyor. Özel amaçlar için üretilen zeolit yapılar sayesinde belirli ölçülerde doğal kaynaklardaki kirlenmenin de önlenmesi öngörülmüyor.

Yeni zeolit yapılarının sayısı özellikle son on yıllık dönemde oldukça hızlı artış gösterdi. Sentezlenen her bir yeni yapı yeni olasılıkların da kapısını açıyor. Bu oldukça ilginç malzemelerin pek çok endüstriyel alanda kullanılmalarının yanında enerji tasarrufu sağlayan katalitik süreçler, atık ve enerji depolama, sera gazı emisyonları, toprak ve su temizleme gibi konularda düşük maliyetli çevre dostu çözümler üretilmesinde de önemli rol oynaması bekleniyor.

Zeolit uygulamalarının ve kullanımının sürekli artma eğiliminde olması küresel ihtiyacı karşılamak adına yapay zeolit sentezlerini gerekli kılıyor. Ayrıca sentetik zeolit üretimlerinde doğal zeolitlerin elde edilmesi sırasında ortaya çıkan istenmeyen kirliliklerin önüne geçilebiliyor; kimyasal bileşim, fonksiyonel

gruplar, fiziksel yapı, yüzey alanı ve gözenek boyutları gibi çeşitli özellikler kullanım amacına uygun olacak şekilde düzenlenebiliyor.

Her bir zeolit türü için Uluslararası Zeolit Birliği Yapı Komisyonu (IZA) tarafından standartlaştırılmış zeolit sentezleri genellikle ticari reaktif malzemeler kullanılarak gerçekleştiriliyor. Diğer taraftan yapılan bazı çalışmalarda silisyum ve alüminyum açısından zengin endüstriyel yan ürünler ve atıklar kullanılarak zeolit sentezlenmesi de çevre adına önemli gelişmelerden sayılıyor.

Benzersiz inorganik fonksiyonel malzemeler olan zeolitlerin dünyasını daha fazla anlamak ve yeni zeolit türleri sentezlemek için daha fazla araştırma yapmak gerekiyor. Mevcut durumda tüm göstergeler zeolit biliminin yükselişini sürdüreceğini işaret ediyor. ■

Kaynaklar

- Serati-Nouri, H., Jafari, A. ve ark., "Biomedical applications of zeolite-based materials: A review", *Materials Science and Engineering C*, 116, 111225, 2020.
- Jarosz, R., Szerement, J., Gondek, K., Mierzwa Hersztek, M., "The use of zeolites as an addition to fertilizers – A review", *Catena*, 213, 106125, 2022.
- Yoldi, M., Fuentes-Ordoñez, E.G., Korili, S.A., Gil, A., "Zeolite synthesis from industrial wastes", *Microporous and Mesoporous Materials*, 287, 183-191, 2019.
- Villa, C.C., Valencia, G. A., ve ark., "Zeolites for food applications: A review", *Food Bioscience*, 46, 101577, 2022.
- Moshoeshoe, M., Nadiye-Tabbiruka, M.S., Obuseng, V., "A Review of the Chemistry, Structure, Properties and Applications of Zeolites", *American Journal of Materials Science*, 7(5), 196-221, 2017.
- Derbe, T., Temesgen, S., Bitew, M., "A Short Review on Synthesis, Characterization, and Applications of Zeolites", *Advances in Material Science and Engineering*, 6637898, 2021.
- Li, J., Corma, A., Yu, J., "Synthesis of new zeolite structures", *Chemical Society Reviews*, 44, 7112, 2015.
- Margeta, K., & Farkaš, A., Introductory Chapter: Zeolites - From Discovery to New Applications on the Global Market, In K. Margeta, & A. Farkaš (Eds.), *Zeolites - New Challenges*, IntechOpen, 2020.
- Miteva, A., Stoyanova, V., "Zeolites Application in terrestrial and Space Industry-A Review", *Aerospace Research in Bulgaria*, 32, 2020.
- Van Speybroeck, V., Hemelsoet, K., Joos, L. ve ark., "Advances in theory and their application within the field of zeolite chemistry", *Chemical Society Reviews*, 44, 7044, 2015.
- Li, Y., Yu, J., "Emerging applications of zeolites in catalysis, separation, and host-guest assembly", *Nature Reviews Materials*, 6, 1156-1174, 2021.
- Mgbemere, H.E., Ekpe, I.C., Lawal, G.I., "Zeolite Synthesis, Characterization and Application Areas: A Review", *International Research Journal of Environmental Sciences*, Cilt 6(10), 45-59, 2017.
- <https://www.explainthatstuff.com/zeolites.html>
- <https://asdn.net/asdn/chemistry/zeolites.php>
- <http://www.bza.org/zeolites/#:~:text=What%20are%20zeolites%3F,other%20molecules%20within%20their%20pores.>