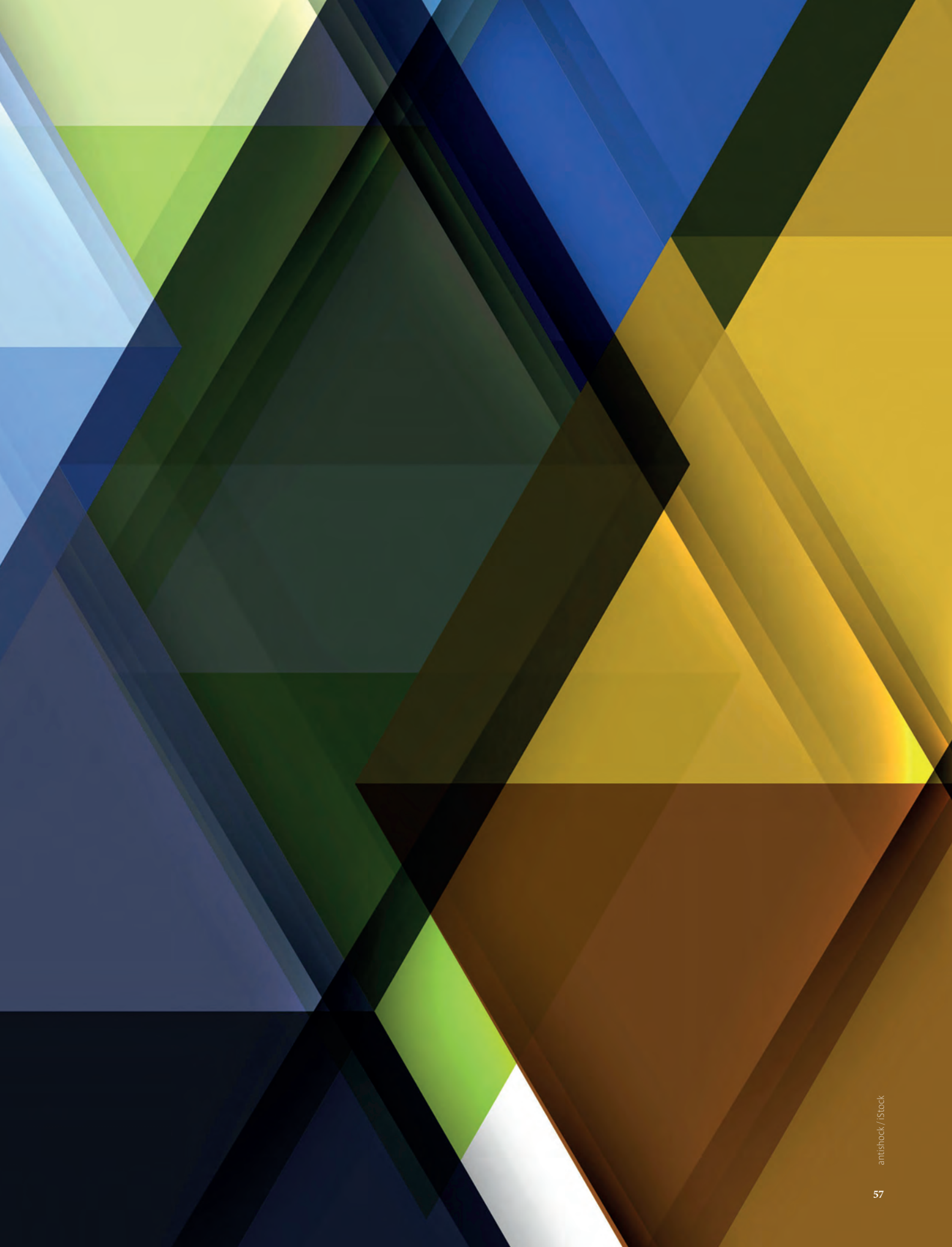
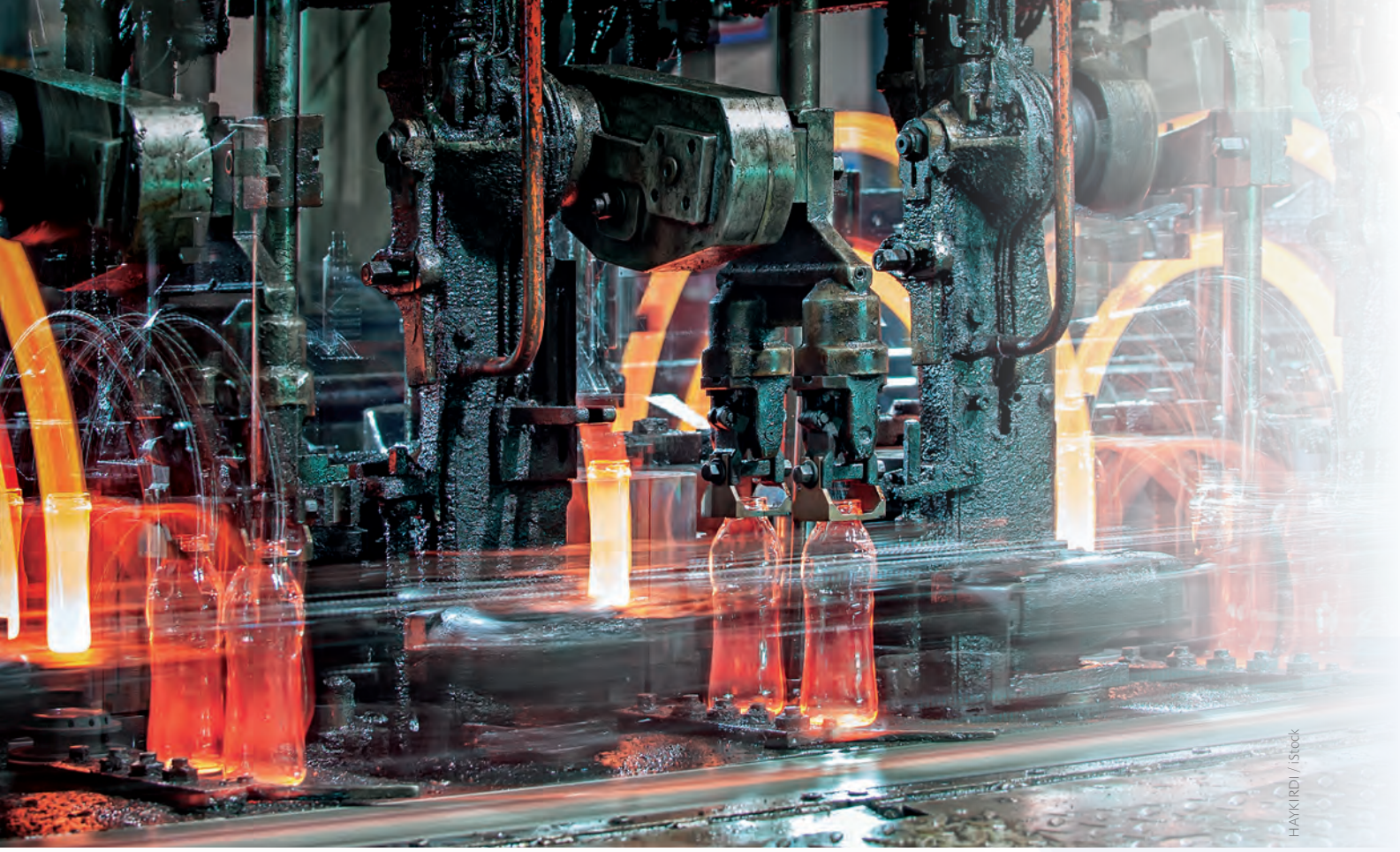


Camların Sıra Dışı Bir Uygulama Alanı: Nükleer Atıklar

Dr. Mahir E. Ocak [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Nükleer atıkların uzun süre çevreye ve canlılara zarar vermesini önlemek amacıyla kullanılan yöntemlerden birinin de camlaştırma olduğunu biliyor muydunuz?





HAYKIRDI / İSTOCK

Nükleer Atıklar

Bilimsel araştırmalar, nükleer enerji üretimi, madencilik ve nükleer tıp gibi çeşitli faaliyetler nükleer atıkların ortaya çıkmasına neden oluyor. Bu atıkların sağlığa ve çevreye zarar vermemesi için önlemler alınması gerekiyor.

Nükleer atıklar radyoaktiflik derecelerine göre düşük seviyeli, orta seviyeli ve yüksek seviyeli olarak üç başlık altında sınıflandırılıyor. İçerdikleri radyoaktif maddeler kısa süre içinde bozunarak zararsız hâle geldiği için düşük seviyeli atıkların sağlığa ve çevreye zarar vermesini önlemek görece kolay. Orta ve yüksek seviyeli atıklarsa yaydıkları radyasyonun etrafa yayılmasını engelleyen kalkanlarla çevreleniyor. Ayrıca yüksek seviyeli atıklardan yayılan yüksek ısıya karşı da önlem alınması gerekiyor.

Nükleer atıkları zararsız hâle gelinceye kadar canlılardan uzak tutmak için kullanılan yöntemlerin başında atıkların yer altına gömülmesi geliyor.

Yüksek seviyeli atıklar yerin 200 ila 1.000 metre derinlerine gömülüyor. Daha düşük seviyeli atıklarsa bazen yüksek seviyeli atıklarla beraber gömülüyor. Bazen de çok daha sığ, 15 ile 200 metre arasında değişen derinliklere gömülüyorlar.

Yerkürenin derinlerine gömmek, nükleer atıkları etkisizleştirmek için tek başına yeterli değil. Örneğin bu atıklar zaman içinde yer altı sularına karışabilir, başka yerlere taşınarak yeniden canlılara ve çevreye zarar verecek hâle gelebilir. Bu tehlikeye karşı bir önlem olarak, nükleer atıklar birkaç katmanlı konteynırların içine hapsedilerek gömülüyor. Nükleer atıkların buldukları yerde hareketsiz kalabilecekleri süreyi uzatmak için başvurulan yöntemlerden biri de camlaştırma.

Önce camların yapısı ve özellikleri hakkında bazı bilgiler verelim, sonra nükleer atıkların nasıl camlaştırıldığından bahsedelim, son olarak da bu konu hakkında süregiden araştırmalara göz atalım.

Camlar

Camlar, amorf (şekilsiz, biçimsiz) katılar olarak adlandırılan malzemelerin örnekleridir. Kristalli katıların aksine camları meydana getiren atomlar düzenli bir yapı oluşturmaz.

Kumun ana bileşeni olan kuartz (SiO_2) insanlar tarafından üretilen camların büyük çoğunluğunun ana ham maddesidir. Cam üretimi, ham maddelerin ısıtlarak eritilmesiyle başlar. Daha sonra düzensiz yapıya sahip amorf bir katı elde etmek için eriyik hızla soğutulur. Farklı katkı maddeleri ortaya çıkan son ürünün özelliklerini çeşitlendirmek -örneğin ürünü renklendirmek ya da ısıya daha dayanıklı hâle getirmek- için kullanılır.

İlk cam üretiminin nerede başladığı bilinmiyor. Adaylar arasında Lübnan, Suriye, Mezopotamya ve Mısır var. İnsanlar tahminen 6.000 yıldan beri cam üretiyorlar. Ancak büyük çapta cam üretimi yapılmaya başlanması, Bronz Çağı'nın sonlarına doğru, MÖ 1500 civarında, cam üretim teknolojilerinin hızla gelişmesinden sonradır. Bugün cam denince aklımıza gelen ilk şey, pencere camları gibi saydam, ışığı geçiren malzemelerdir. Ancak o dönemlerde üretilen camların büyük çoğunluğu renkliydi ve ışığı geçirmiyordu.

Cam, sadece insanlar tarafından üretilen bir malzeme değildir. Doğal süreçler de camları ortaya çıkarabilir. Örneğin yıldırım düşmesi ya da gök taşı çarpması gibi olaylar sırasında ortaya çıkan yüksek ısı kumun camlaşmasına neden olabilir. Yeryüzüne düşen meteoritlerde de bazen camlara rastlanır. Yanardağ patlamaları sırasında yayılan lavlar hızla soğuduğunda da obsidiyen denilen volkanik camlar oluşur.

Eski zamanlarda cam; zümrüt, yakut ve safir gibi kıymetli taşlarla aynı değerde görülürdü. Bu kıymetli camların en bilinen örneklerinden biri Mısır firavunu Tutankamun'un mezarında bulundu. Mumyanın altından üretilmiş maskesinin üzeri mavi şeritlerle bezeliydi. Ayrıca göğsünün üzerinde solgun sarı renkli, Mısır böceği biçiminde şekillendirilmiş bir ziynet eşyası vardı. Hem maskedeki mavi şeritler hem de sarı renkli Mısır böceği camdan üretilmişti.



Tutankamun'un mezarında bulunan ziynet eşyası. Sarı renkli Mısır böceği 29 milyon yıllık bir camın şekillendirilmesiyle üretilmiş.



Tutankamun'un mumyasının maskesindeki mavi şeritler camdan üretilmiş.

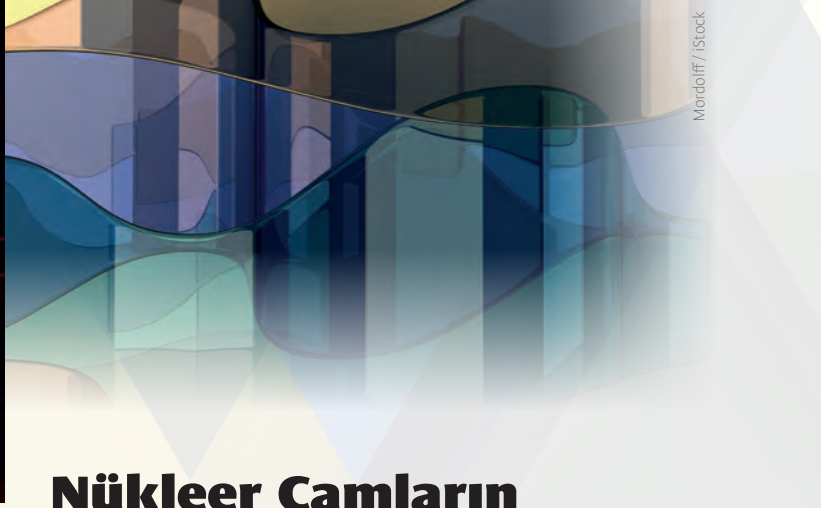


Nükleer Atıkların Camlaştırılması

Nükleer atıkların uzun süre yapıları bozulmadan, çevresiyle kimyasal tepkimelere girmeden, kolayca havaya ya da suya karışmayacak bir biçimde depolanması gerekiyor. Bu amaçla kullanılan yöntemlerin başında da camlaştırma geliyor. Bazı ülkeler tüm nükleer atıkları camlaştırmayı tercih etseler de bu yöntem daha çok yüksek seviyeli atıklar için kullanılıyor.

Camlaştırma başlamadan önce nükleer atıkların içindeki su buharlaştırılarak atık kuru toz hâline getiriliyor. Daha sonra bu tozlar devasa fırınların içinde eriyik hâline getirilmiş ham maddelerin içine katılıyor. Karışım hızla soğutulularak camlaştırıldıktan sonra konteynerların içine yerleştiriliyor. Kaynak yapılarak sıkıca kapatılan konteynerlar yerin derinliklerine gömülmeye hazır hâle getiriliyor.

Camlaştırma sonucunda ortaya çıkan ürün, nükleer atıkların etrafa yayılmasını engelleyen bir bariyer görevi görmüyor. Nükleer atıklardaki radyoaktif elementler üretilen camların yapısına katılıyor.



Nükleer Camların Yapısı

Ana ham maddesi kuartz olan camlarda, silisyum ve oksijen atomları birbirleriyle güçlü bağlar kurarak düzensiz bir ağ oluşturur. Camın yapısına katılan katkı maddeleri bu yapıda değişikliklere neden olur. Bu katkı maddeleri iki gruba ayrılır. Birinci grupta bor ve alüminyum gibi elementler yer alır. Ağ oluşturucular olarak adlandırılan bu katkı maddeleri, silisyum atomlarının yerini alır ve tıpkı silisyum atomları gibi oksijen atomlarıyla kimyasal bağlar kurar. Değiştiriciler olarak adlandırılan ikinci grupta ise sodyum, potasyum ve kalsiyum gibi bazı elementler yer alır. Bu katkı maddeleri de yine silisyum atomlarının yerini alır ancak oksijen ile kimyasal bağ kurmaz. İkinci grupta yer alan bu katkı maddeleri camın daha zayıf bir yapıya sahip olmasına; erime noktasının, yüzey geriliminin ve viskozitesinin düşmesine yol açar.

Nükleer atıklar camlaştırılırken en çok tercih edilen katkı maddelerinin başında bor oksit (B_2O_3) gelir. Bu durumun nedeni borosilikat camların genleşme katsayısının çok düşük olması ve dolayısıyla aşırı ısıya karşı çok daha dayanıklı olmalarıdır. Hem yüksek seviyeli atıkların aşırı miktarda ısı yayması hem de yerükürenin derinlerine gidildikçe artan sıcaklıklar nedeniyle yerin derinliklerine gömülecek nükleer camların içlerine B_2O_3 katılarak ısıya karşı daha dayanıklı olmaları hedeflenir.

Camlar Ne Kadar Dayanıklı?

Nükleer atıkların içinde yarılanma ömrü (radyoaktif madde miktarının yarıya düşmesi için gereken süre) binlerce hatta milyonlarca yıl olan elementler bulunuyor. Örneğin iyot-129 izotoplarının yarı ömrü 15 milyon yıldan daha fazla. Peki camlar, özellikle de nükleer camlar, bu kadar uzun süre yapısı bozulmadan kalabilir mi?

Camlar genel olarak dayanıklı malzemelerdir. Eski zamanlardan kalma tarihî binalara baktığımızda insanlar tarafından üretilmiş yüzlerce yıllık camlar görebiliriz. Hatta Mısır firavunu Tutankamun'un mumyasını süsleyen Mısır böceği biçimindeki sarı broş, Libya Çölü'ne gök taşı düşmesi sonucu oluşmuş, yaklaşık 29 milyon yıllık bir camın şekillendirilmesiyle üretilmiştir. Ancak bu örnekler her tür camın her tür koşul altında çok uzun süreler dayanıklı olduğu anlamına da gelmiyor. Bir camın ne kadar uzun süre bozulmadan kalabileceği bileşimine ve ortam koşullarına bağlı olarak değişiyor.

Hangi tür camın hangi koşullar altında ne kadar dayanıklı olduğu sorusuna cevap vermekle ilgili bir zorluk, kuramsal fizikte son yüz elli yıldır yaşanan büyük gelişmelere rağmen camların özellikleri

hakkında kuramsal tahminler yapmanın hâlâ çok zor olması. Camın bileşimindeki ve ortam koşullarındaki ufak farklar camların bozulma hızında çok büyük değişikliklere sebep olabiliyor. Üstelik nükleer camların bileşimi günlük hayatta aşına olduğumuz camlardan çok farklı. Nükleer atıklarda periyodik tabloda yer alan elementlerin neredeyse tamamı bulunuyor.

Camlaştırılan nükleer atıkların ne kadar uzun süre doğayı tehdit etmeden yer altında depolanabileceği hakkında fikir edinmek isteyen araştırmacılar deneysel çalışmalara yöneliyorlar. Önce camların yapısının nasıl bozulduğu hakkında bilinenleri özetleyelim, daha sonra da yapılan araştırmalara göz atalım.

Camların Yapısı Nasıl Bozulur?

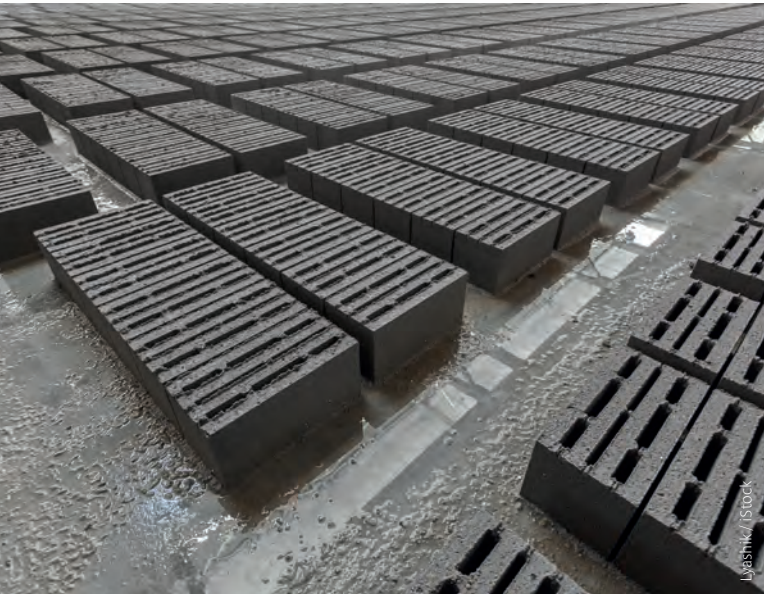
Su ile temas hâlinde olduklarında camların yapısı çok yavaş bir biçimde bozulur. İlk olarak sodyum ve potasyum gibi alkali metaller suya sızar. Bu durum cama dayanıklılık kazandıran güçlü ağ yapısının bozulmasına yol açar. Böylece ağ yapısının ana bileşenlerinden olan silisyum ve bor gibi atomlar da oksijenli iyonlar hâlinde suya karışmaya başlar. Sonuçta cam yüzeyinde amorf bir jel katmanı oluşur.



Bu jel zamanla giderek yoğunlaşır ve camdaki atomların daha fazla dışarı sızmasını yavaşlatan bir “pasifleştirme” katmanı ortaya çıkar. Camdaki atomların suya karışmaları için bu pasifleştirme katmanını aşmaları gerekir. Böylece camın bozulma hızı düşer. Ancak her zaman olmasa da çeşitli koşullar altında – örneğin ortamda demir ve magnezyum içeren mineraller olması durumunda-pasifleştirme katmanının yapısı da bozulabilir. Bu durum camın bozulma hızının yeniden artmasına yol açar.

Deneysel Çalışmalar

Laboratuvar ortamında camların dayanıklılığı üzerine çalışmalar yapan araştırmacılar “ivmelendirilmiş testler” yapıyor. Meydana gelen süreçleri hızlandırmak için camların yüzey alanı artırılıyor ve camlar yüksek sıcaklıklara maruz bırakılıyor. Bu testler, farklı türde camların dayanıklılıklarını karşılaştırmak açısından yararlı olsa da laboratuvar ortamından çok daha karmaşık doğal ortamlarda camların hangi hızla bozulacağı hakkında net bir fikir vermiyor.



Cüruftan üretilmiş tuğlalar

Doğal camlar da nükleer camların dayanıklılığı hakkında iyi fikir vermez. Doğal camlardaki alkali metal yoğunluğu, nükleer camların aksine, çok düşüktür. Bu durum doğal ve nükleer camların farklı özelliklere sahip olmasına neden olur.

Nükleer camların dayanıklılığı hakkında fikir edinmek için bir diğer seçenek de insanlar tarafından üretilmiş arkeolojik camların kalıntılarını incelemektir. Bu eski camlar nükleer camlardan çok farklı bileşimlere sahip olsalar da çok çeşitli türde elementler içerir. Bu yüzden laboratuvar ortamında yapılan ivmelendirilmiş testlere ve doğal camlara kıyasla nükleer camların dayanıklılığı hakkında daha iyi fikir verebilirler. Özellikle buldukları bölgelerin iklim koşulları hakkında güvenilir kayıtlar bulunan, görece yakın zamanlarda üretilmiş camlar, bu konuda çok yararlı olabilir. Bu çalışmalarla ilgili en önemli sorunsu antik camların bor içermemesidir. Camlaştırma sırasında neredeyse tüm nükleer atıklara, ısıya karşı daha dayanıklı olmaları için, B_2O_3 ekleniyor. Ancak insanlar tarafından üretilen borosilikat camların tarihi 1900’lerden öncesine gitmiyor.

Bugüne kadar incelenen arkeolojik cam örneklerinden biri Kerkük yakınlarındaki antik Nuzi şehrinin kalıntılarındaki camlar. Bronz Çağı’na tarihlenen antik şehrin kalıntılarındaki camlarla ilgili en dikkat çekici şey, bazı camların 3.000 yıl boyunca mükemmel bir şekilde korunmuş, bazılarının ise tamamen dağılmış olması. Aynı evin yan yana iki odasında bile buna benzer durumlara rastlanabiliyor. Bu durum, ortam koşullarındaki küçük farkların bile camların dayanıklılığını büyük oranda etkileyebileceği gerçeğini gözler önüne seriyor.

Camların dayanıklılığıyla ilgili araştırmalara konu olan bir diğer arkeolojik kalıntı ise İngiltere açıklarındaki bir gemi batığı. Margate şehrinin yakınlarındaki batıkta 265 yıllık cam kalıntıları var. Üstelik bölgedeki su sıcaklıkları ve tuzluk oranları ile ilgili yaklaşık 200 yıldır kayıtlar tutuluyor.

Arkeolojik camsı cüruf örneklerinin de camların dayanıklılığı hakkında fikir edinmek için yararlı olacağı düşünülüyor. Demir dökümü sırasında ortaya çıkan bu atık maddenin yapısının özellikle plütonyum içeren nükleer camlara benzediği belirtiliyor. İncelenen cüruf örnekleri arasında İngiltere'nin Hayle şehrindeki 250 yıllık bir köprünün inşasında kullanılmış cüruf bloklar da var. Hareketsiz olan bloklar, yıllardır havaya ve nehir sularına maruz kalıyor. Hem üretim tarihlerinin hem de yıllar içinde maruz kaldıkları koşulların iyi bilinmesi nedeniyle bu çalışmalardan elde edilecek bilgilerin çok faydalı olması bekleniyor.

Laboratuvar deneylerinin yapıldığı zaman ölçeği ile arkeolojik camların üretildiği zaman ölçeği arasında çok büyük fark var. Bu boşluğu doldurmak ve camların hangi hızla bozulduğunu anlamak için çeşitli saha çalışmaları da gerçekleştiriliyor. Örneğin Derbyshire'daki eski bir taş ocağında 50 yıldan uzun süredir devam eden bir deney yapılıyor. Başlangıçta arkeolojik camların alkali koşullar altında nasıl bozulduğunu incelemek için tasarlanmış deneye daha sonra nükleer camlar da dâhil edildi. Periyodik aralıklarla toprağın altına gömülmüş cam örneklerinden bazıları çıkarılarak incelemeye alınıyor. Ayrıca bölgedeki hava koşulları sürekli takip ediliyor. Yine Derbyshire'daki bir mağarada da kalsiyum bakımından zengin sularla camların nasıl bozulduğu ile ilgili yaklaşık 30 yıldır devam eden bir deney yapılıyor. Yer altına gömülen nükleer atıklar çimento kullanılarak üretilen bariyerlerin içine hapsediliyor. Derbyshire'daki deneyde de çimentodaki kalsiyumun camların bozulmasına etkisi anlaşılmasına çalışılıyor.



Sonuç

Nükleer atıkları insanlara ve çevreye karşı zararsız hâle getirmek için kullanılan yöntemlerin başında, atıkları camlaştırdıktan sonra toprağın derinliklerine gömmek geliyor. Ancak camların yapısı zamanla bozulabiliyor.

Camların yapısının bozulması sırasında meydana gelen süreçler büyük ölçüde anlaşılmış olsa da bu süreçlerin farklı bileşimlerdeki camlar için hangi hızlarla ilerlediği hakkında fazla bir şey bilinmiyor. Zamana karşı en dayanıklı camların nasıl üretilebileceği hakkında fikir edinmek isteyen araştırmacılar, sadece laboratuvar ortamında çalışmalar yapmakla kalmıyor, onlarca yıldır devam eden deneyler yapıyor, eski zamanlardan kalma antik camları inceliyor. Bu çalışmaların büyük çoğunluğu doğrudan nükleer camların dayanıklılığı hakkında net çıkarımlar yapmaya imkân vermese de çok çeşitli türdeki camların incelenmesiyle nükleer camların hangi hızla bozulduğunun da daha iyi anlaşılacağı düşünülüyor. Elde edilecek sonuçlar, nükleer atıkların canlılara ve çevreye verebileceği zararları önlemek açısından büyük önem taşıyor. ■

Kaynaklar

- Brazil, Rachel, "A glassy solution to nuclear waste", *Physics World*, <https://physicsworld.com/a/a-glassy-solution-to-nuclear-waste/>, 22 Haziran 2022.
- Shortland, A. J., ve ark., "The analysis of late bronze age glass from Nuzi and the question of the origin of glass-making", *Archaeometry*, Cilt 60, s. 764-783, 2018.
- Michelin, A., ve ark., "Silicate glass alteration enhanced by iron: Origin and long-term implications", *Environmental Science & Technology*, Cilt 47, s. 750-756, 2013.
- Thorpe, C. L., ve ark., "Forty years of durability assessment of nuclear waste glass by standard methods", *npj Materials Degradation*, Cilt 5, Makale No: 61, 2021.
- Thorpe, C. L., "Natural analogues for nuclear waste: a window into the future?", *Environmental Chemistry Group Bulletin*, <https://www.envchemgroup.com/natural-analogues-nuclear-waste.html>, 2021.