

Dünyayı Uzayın Soğuğuyla Serinletmek

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

Bir süredir araştırmacılar çevresinden aldığı ısıyı uzaya gönderen boyalar, plastikler ve hatta ahşap malzemeler üretiyorlar. Enerji tüketmeden sıcağlığını düşük tutmayı başaran bu malzemelerin yakın gelecekte elektrikli soğutma sistemlerinin yerini alacağı tahmin ediliyor.

Pasif Işınımsal Soğuma

Çevremizdeki tüm nesnelere ısı (kızılötesi ışık) yayılır. Bir nesnenin yaydığı ısı çevredeki diğer nesnelere tarafından soğutulduğu için birbirine yakın konumlanmış maddeler zamanla ısı alışverişini yaparak aynı sıcaklığa gelme eğilimindedirler. Bugün belirli bir ortamı ısıtmak ya da soğutmak (ortam sıcaklığını çevre sıcaklığından farklı hâle getirmek) için kullandığımız sobalar, soğutucular, klimalar ve benzer cihazlar bir sıcaklık farkı oluşturmayı enerji tüketerek başarır. Ancak hiç enerji

tüketmeden de bir malzemenin sıcaklığını ortam sıcaklığının altına düşürmesi mümkündür. Nasıl mı? Atmosfer tarafından soğutulmayan tayf bölgesinde ışımaya yaparak.

Atmosferdeki gazlar çevremizdeki nesnelere tarafından yayılan ısımanın büyük bir kısmını soğutur ve tekrar yayılır. Böylece Dünya'nın sahip olduğu ısı enerjisinin hızla boş uzaya yayılmasını engelleyen bir kalkan görevi görürler. Ancak atmosferdeki gazların hiçbirisi dalga boyu 8 ila 13 mikrometre arasında olan ışık ışınlarını soğutmaz. Bu dalga boylarına sahip ışık ışınları rahatlıkla atmosferin içinden geçer. Dolayısıyla, bir cismin ışık tayfının bu bölgesinde ışımaya yaparak sahip olduğu enerjinin bir kısmını doğru-

dan uzaya göndermesi ve böylece sıcaklığını ortam sıcaklığının altına düşürmesi mümkündür. Pasif ışınımsal soğuma olarak adlandırılan bu olgu esasen 1960'lardan beri biliniyordu. Ancak söz konusu olan sıradan malzemeler olduğunda pasif ışınımsal soğuma sadece gece vakitlerinde gözlemlenebilir. Gündüz vakitlerindeyse Güneş'ten gelen yüksek enerji, atmosfer tarafından soğutulmayan tayf bölgesinde ışımaya yapıyor olsa bile, açık havadaki bir cismin sıcaklığının ortam sıcaklığının altına düşmesine izin vermez. Ancak araştırmacılar son on yıl içinde güneş ışığı altındayken bile sıcaklığını ortam sıcaklığının altında tutmayı başarabilen metamalzeme (doğada örneği olmayan malzemeler) üretmeyi başardı.



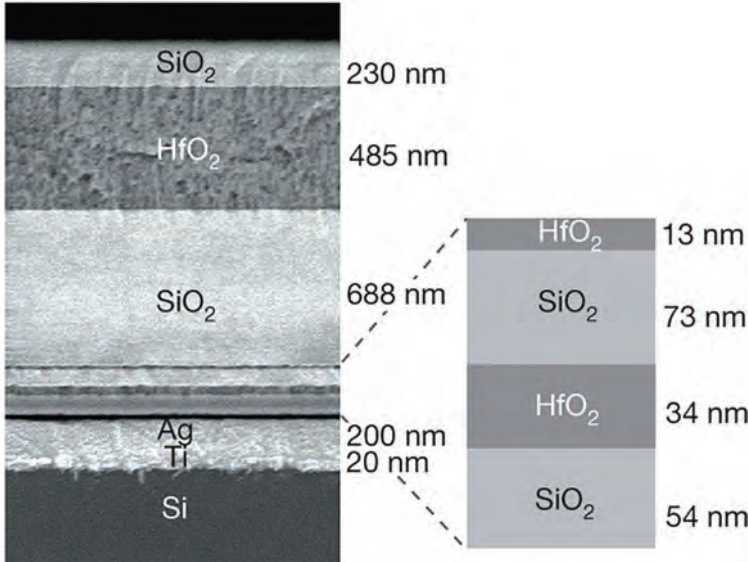
Süper-serin Malzemeler

Gündüz vakti pasif ışınımsal soğuma üzerine çalışmalar yapmaya başlayan ilk araştırma grubu Stanford Üniversitesinden oldu. 2012 yılında, o sıralar Prof. Dr. Shanhui Fan'ın danışmanlığında doktora çalışmalarına devam eden Aaswath Raman, güneş ışığı altındayken bile sıcaklığını ortam sıcaklığının altında tutmayı başarabilen malzemeler üretmenin mümkün olup olmadığı üzerine kafa yormaya başladı. Raman, ilk olarak böyle bir malzemenin sahip olması gereken özellikler üzerine kuramsal tahminler yaptı.

Sonuçlar, gündüz vakti pasif ışınımsal soğumayı gerçeğe dönüştürebilecek bir malzemenin sahip olması gereken iki temel özelliğin şunlar olduğunu gösteriyordu: Birincisi, malzemenin güneşten gelen ve dalga boyu 200 ila 2500 nanometre olan ışığın %94'ünden fazlasını yansıtması gerekiyordu ki bu malzemenin yansıtıcılığının beyaz boyalarınkinden bile daha yüksek olması gerektiği anlamına geliyordu. İkincisi, malzemenin dalgaboyu 8 ila 13 mikrometre olan ışık ışınlarını yüksek oranda soğurabilmesi ve yayabilmesi gerekiyordu. Sıradan hiçbir malzeme bu özelliklere sahip değildir. Ancak araştırmacılar nanometre ölçeğinde mühendislik yaparak bu özelliklere sahip malzemelerin üretilebileceğini düşündüler.

Raman ve Fan'ın 2013 yılında yayımladıkları ilk makalelerinde kuramsal hesapların yanı sıra soğutma gücü 100 W/m² olacağını tahmin ettikleri bir tasarım örneği de vardı. Ancak araştırmacılar bu tasarımı gerçeğe dönüştürmediler ve yine kendi tasarladıkları üretilmesi çok daha kolay başka bir malzeme üzerine çalışmaya başladılar. Bir yıl sonra yayımladıkları ikinci makalelerinde gündüz vakti pasif ışınımsal soğumayı gerçeğe dönüştürdüklerini açıkladılar.

Kırılma indisi yüksek ve düşük malzemeleri art arda sıralayarak bir malzemenin optik özelliklerinin ayarlanabileceği bilinir. Araştırmacıların ürettikleri malzeme de art arda sıralanmış, HfO₂ ve SiO₂ katmanlarından oluşuyordu. Toplamda yedi adet olan katmanların alttaki dört tanesi daha ince üstteki üç tanesi ise daha kalın olarak tasarlanmıştı. Altta ince katmanlar Güneş'ten gelen ışınları azami derecede geri yansıtıyor, üstteki daha kalın katmanlarsa atmosfer içinden geçebilen dalga boylarındaki kızılötesi ışıma miktarını artırıyor. Araştırmacılar, geliştirdikleri malzeme için açık havada, metrekareye 850 W güneş ışığı düşen bir zamanda (güneşli bir günde, deniz seviyesinde metrekareye ortalama 1000 W güneş ışığı düşer) test ettiklerinde malzemenin sıcaklığının ortam sıcaklığının yaklaşık 5°C altına düştüğünü tespit ettiler. Malzeme üzerine düşen Güneş ışığının %97'sini yansıtmayı başarıyordu ve soğutma gücü yaklaşık 40 W/m²'ydi.



Raman ve Fan tarafından geliştirilen süper-serin malzemenin yapısı. Malzeme art arda sıralanmış yedi adet HfO₂ ve SiO₂ katmanından oluşuyor. Altta 200 nanometre kalınlığında Ag ve 20 nanometre kalınlığında Ti katmanları var. Tüm yapı bir silisyum plakanın üzerinde duruyor. Görsel: Raman ve Fan, *Nature*

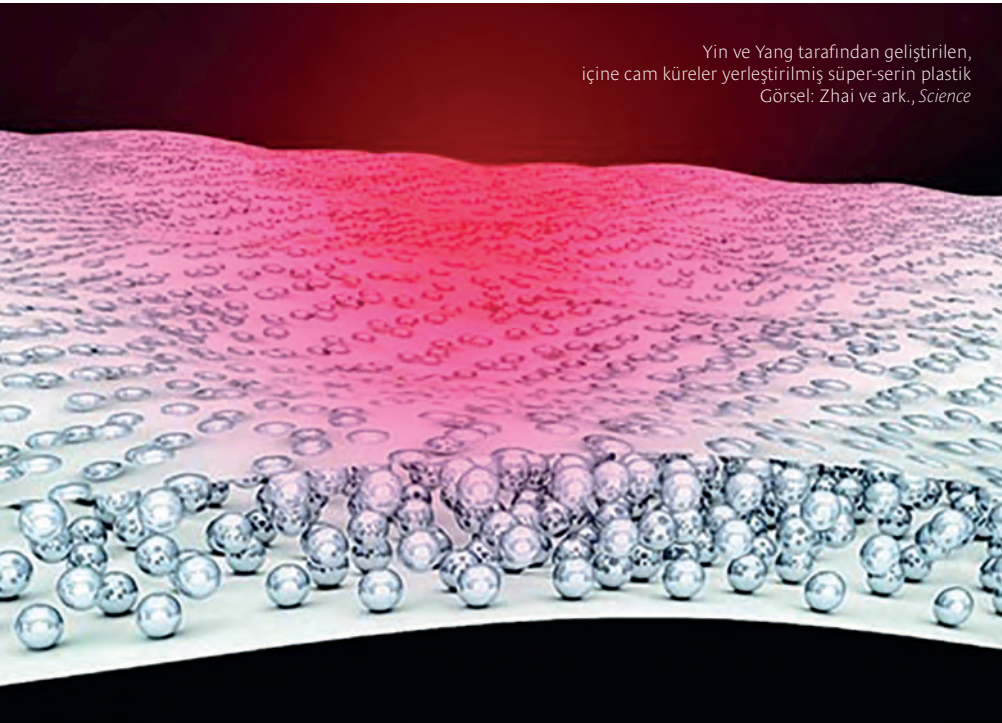
2017 yılında Colorado Üniversitesinden Xiaobo Yin ve Ronggui Yang, ucuz plastik ve cam malzemeler kullanarak sıcaklığını ortam sıcaklığının altında tutmayı başara-bilen başka bir malzeme üretti. Çapı birkaç mikrometre olan cam küreler, atmosfer tarafından soğurulmayan tayf bölgesinde yüksek miktarda ışıma yapar. Araştırmacılar, SiO₂'den üretilmiş, doğru büyüklükteki cam küreleri laboratuvar ve mutfak aletlerinin de üretiminde kullanılan bir tür plastiğin içine katmış, malzemenin altına da ışığı çok yüksek oranda geri yansıtan bir gümüş ayna koymuşlardı. Üretimde kullanılan plastiğin ışık geçirgenliğinin yüksek olması, malzemenin üzerine düşen güneş ışığının kolaylıkla malzemenin içinden geçip aynadan geri yansımısını sağlıyordu.

Araştırmacılar içine %6 oranında cam küreler katılmış plastikler üretilip, geliştirdikleri sistemi test ettiklerinde metamalzemenin Güneş ışığının %96'sından fazlasını yansıttığını gözlemlədiler. Malzemenin soğutma gücü, öğle vakti yüksek miktarda güneş ışığına maruz kaldığı sırada 93 W/m² olarak ölçüldü. Kesintisiz üç gün süren bir test sırasındaki ortalama soğutma gücünün ise 110 W/m² olduğu görüldü.

Yin ve Yang tarafından geliştirilen metamalzemenin en önemli özelliği endüstriyel ölçekte üretime uygun olması. Öyle ki, araştırmacılar yaptıkları çalışmalar sırasında laboratuvar ortamında her dakika 50 mikrometre kalınlığında, 30 santimetre eninde ve 5 metre uzunluğunda metamalzeme üretilabiliyorlardı.

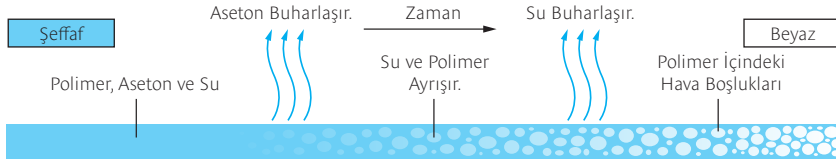
Pasif ışınımsal soğuma ile sıcaklığını ortam sıcaklığının altında tutabilen metamalzemelerle ilgili başka bir önemli gelişme 2018 yılında yaşandı. O sıralar Columbia Üniversitesinde Prof. Dr. Yuan Yang'ın danışmanlığında doktora çalışmalarına devam eden Jyotirmoy Mandal polimer bazlı bir süper-serin boya geliştirdi. Pek çok polimer zaten yüksek oranda 8-13 mikrometre dalga boylu ışık yayar. Dolayısıyla polimer bazlı bir süper-serin boya geliştirmek için araştırmacıların aşması gereken temel zorluk, boyanın güneş ışığını çok yüksek oranda yansıtmasının nasıl sağlanacağıydı. Araştırmacıların bulduğu çözüm boyanın içinde baloncuklar oluşturmak oldu. Geliştirilen süper-serin boyanın üretim ve uygulanma süreci özetle şu şekilde ilerliyor: Polimer bazlı boya aseton ve az miktarda su ile karıştırılıyor ve elde edilen karışım püskürtülerek boyanacak yüzeye uygulanıyor. Bir süre sonra uçucu aseton buharlaşarak ortamdaki uzaklaşıyor ve su ile polimer birbirinden ayrışmaya başlıyor. Ortaya çıkan su damlacıkları da bir süre sonra artlarında boş baloncuklar bırakarak buharlaşıyor. Süreç tamamlandığında başlangıçtaki renksiz karışımdan geriye içi baloncuklarla dolu beyaz renkli bir boya kalıyor. Ortaya çıkan baloncuklar, metamalzemenin güneş ışığını sıradan beyaz boyalardan daha etkin bir biçimde yansıtmasını sağlıyor. Böylece kendi sıcaklığını ortam sıcaklığının altında tutmayı başarabilen bir boyalı yüzey ortaya çıkıyor. Araştırmacılar geliştirdikleri boyayı güneşli bir günde açık havada test ettiklerinde boyanın sıcaklığının ortam sıcaklığının 6°C

Yin ve Yang tarafından geliştirilen, içine cam küreler yerleştirilmiş süper-serin plastik
Görsel: Zhai ve ark., *Science*

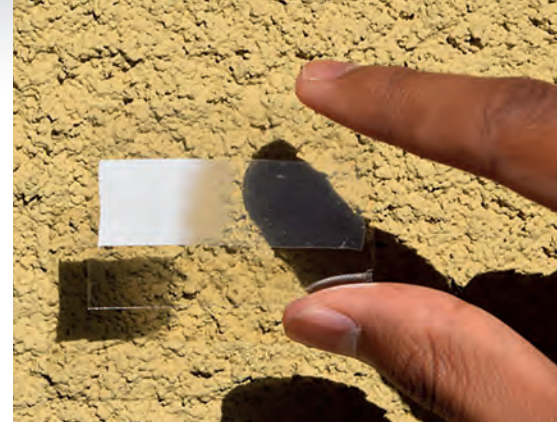


altında kaldığını ve boyanın soğutma gücünün yaklaşık 96 W/m^2 olduğunu gözlemlədiler. Geliştirilen boya, üretimi oda sıcaklığında yapılabildiği ve çözeltili bazlı olduğu için sıradan yöntem-

lerle plastik, metal ve ahşap yüzeylere kolaylıkla uygulanabiliyor. Ayrıca metalmazemeyi sıradan boylarla karıştırarak farklı tonlar ya da farklı soğutma güçleri elde etmek de mümkün.



Süper-serin boyanın üretim süreci
Görsel: Mandal ve ark., *Science*



Süper-serin boya
Görsel: Mandal ve ark.

Geçen yıl mayıs ayında Xiaobo Yin ve çalışma arkadaşları, Maryland Üniversitesinden Liangbing Hu ve Tian Li ile ortak yaptıkları çalışma sonucunda süper-serin ahşap geliştirdiklerini açıkladılar. Ahşap malzemeler de polimerler gibi atmosfer tarafından soğutulmayan dalga boylarında yüksek oranda ışık yayar. Ancak sıradan ahşap malzemelerin güneş ışığını yansıtma oranı düşüktür. Araştırmacılar lignin adlı bir tür organik polimeri kimyasal işlemlerle ahşaptan ayırarak bu soruna çare bulmuşlar. Ayrıca ahşap malzemeyi sıkılaştırarak içerisindeki selüloz iplikçiklerinin hizalanmasını sağlamış, böylelikle

de malzemenin yaydığı ısı miktarının artmasını sağlamışlar. Sonuçta mekanik direnci sıradan ahşabın yaklaşık 8 katı olan bir yapı malzemesi ortaya çıkmış. Gözlemler bu malzemenin 24 saat içindeki ortalama soğutma gücünün 53 W/m^2 olduğunu gösteriyor. Gündüz vakitlerinde dahi sıcaklığını düşük tutmayı başarabilen bu malzemeyi kullanarak sıcak ve kurak iklimlerde inşa edilecek ya da dış yüzeyi kaplanacak yapılarda soğutma masraflarından %60'a varan oranda tasarruf etmenin mümkün olabileceği düşünülüyor. Ancak malzemenin açık havada ne kadar uzun süre dayanacağı henüz bilinmiyor.

Geçtiğimiz ağustos ayında New York Eyalet Üniversitesinden Qiaoqi-ang Gan ve arkadaşları süper-serin yüzey kaplaması geliştirdiler. Saç kremlerinde de bulunan bir tür silikonlu polimerden üretilen malzeme, yansıtıcılığı yüksek bir yüzeyi kaplamak için kullanıldığında sıcaklığını ortam sıcaklığının altında tutmayı başarıyor. Araştırmacılar alüminyum bir yüzeyi geliştirdikleri malzemeyle kapladıklarında laboratuvar ortamında $9,5^\circ\text{C}$ 'lik, açık havada da 11°C 'lik soğuma gözlemlədiler. Malzemenin soğutma gücü yaklaşık 120 W/m^2 olarak ölçüldü.

Aynı araştırma grubunun bu konudaki bir diğer önemli katkısı, süper-serin malzemelerden yayılan ısıyı doğrudan uzaya yönlendiren yapılar geliştirmek oldu. Işınimsal soğumanın gözlemlenebilmesi için yayılan ısının atmosferin içinden geçerek doğrudan uzaya ulaşabilmesi gerekir. Ancak süper-serin malzemeler belirli yönlerde değil her yönde ısı yayarlar ve bu ısının bir kısmı çevredeki insanlar, hayvanlar, binalar ve diğer nesnelere



Doğal ahşap (solda) ve süper-serin ahşap (sağda)
Görsel: Liangbing Hu, InventWood

tarafından soğurulur. Araştırmacıların geliştirdiği yapı “yanlış” doğrultularda yayılan ısının yönünün uzaya doğru çevrilmesini sağlıyor. Böylece bir metal malzemenin ışınımsal soğutma kapasitesinin artması sağlanıyor.

Süper-serin metal malzemelerin soğutma kapasitesini artırmak için yapılmış bir başka çalışmaya da MIT’den Evelyn Wang ve arkadaşları imza attı. Araştırmacılar geçen yıl ekim ayında yayımladıkları bir makalede pasif ışınımsal soğuma gösteren bir filmi yalıtıcı bir aerojelle kaplayarak metal malzemenin soğutma kapasitesini artırdıklarını açıkladılar. Araştırmacılar Şili’deki Atacama Çölü’nde yaptıkları deneyler sırasında üzeri aerojelle kaplı metal malzemenin sıcaklığının ortam sıcaklığının 13°C altına düştüğünü gözlemledi. Aerojel olmadığı durumda soğuma sadece 1,7°C ile sınırlı kalıyordu. Bugüne kadar geliştirilmiş herhangi bir süper-serin malzemeyi bu aerojelle kaplayarak malzemenin soğutma kapasitesini artırmak mümkün.

Süper-serin boyalar ile ilgili bir gelişme de geçtiğimiz temmuz ayında yaşandı. Jyotirmoy Mandal ve arkadaşları üzerine düşen güneş ışığının %98’ini geri yansıtan beyaz boyalar geliştirdiklerini açıkladılar. Sıradan bir beyaz boya, üzerine düşen güneş ışığının %85’ini geri yansıtır. Ancak bu oran pasif ışınımsal soğumanın gözlemlenmesi için yeterli değildir. Araştırmacılar yansıtma oranını artırmak için beyaz boyaların mor ötesi ışığı soğurma oranını azaltma yoluna gitmişler. Bu amaçla, beyaz boyalarda bulunan ve

mor ötesi ışığı yüksek oranda soğurduğu bilinen TiO bileşiği yerine morötesi ışığı daha az soğuran polimerler ve pigmentler kullanıldı.

Geçtiğimiz haziran ayında yayımlanan bir başka makalede de Fan ve arkadaşları yeni bir soğutucu yüzey kaplaması ürettiklerini açıkladılar. Araştırmacılar kısaca PDMS olarak adlandırılan bir tür polimeri süper-serin malzeme hâline getirmek için yeryüzünün en sıcak bölgelerinde bile hayatta kalmayı başaran bir böcek türünden esinlendiler. Geliştirilen filmin üzerinde tıpkı böceğin kanatlarında olduğu gibi güneş ışığının yüksek oranda yansıtılmasını sağlayan piramit biçimli yapılar var. Gözlemler, malzemenin güneş ışığının %96’sını yansıttığını ve soğutma gücünün yaklaşık 90 W/m² olduğunu gösteriyor.

Uygulamalar

Bugün çeşitli ortamları soğuk tutmak için kullanılan soğutucu ve klimalar gibi cihazların tamamı enerji tüketerek çalışır. Süper-serin malzemelerse hiçbir enerji kaynağına ihtiyaç duymadan kendi sıcaklıklarını ortam sıcaklığının altında tutmayı başarıyor. Bu durum süper-serin malzemelerin doğal uygulama alanı olarak soğutma sistemlerinin ön plana çıkmasına neden oluyor.

Süper-serin metal malzemeler üzerine çalışmalar yapan tüm araştırma grupları, geliştirdikleri ürünleri endüstriyel ölçekte üretip pazarlamak için de çalışıyorlar. Fan ve Raman, 2017 yılında yayımladık-



ları bir makalede geliştirdikleri me-tamalzemedan ürettikleri panelleri bir binanın çatısında konumlandırarak binanın soğutma giderlerini %21 oranında azaltmayı başardıklarını açıklamışlardı. Araştırmacılar, SkyCool isimli bir şirket kurup geliştirdikleri ürünü piyasaya sürmeye başladılar. Gan, geliştirdiği süper-serin filmleri endüstriyel ölçekte üretip pazarlamak için çeşitli sanayi kuruluşlarıyla iş birliği yapıyor. Columbia Üniversitesi araştırmacıları geliştirdikleri süper-serin boyanın patentini MetaRE isimli bir şirkete verdiler. MetaRe sadece evlerin çatıları için değil tekstil ürünleri, soğuk taşıma ve depolama için de süper-serin boyalar geliştirmeye çalışıyor. Yin ve Yang içi cam küreler dolu süper-serin plastiği üretmek için Radi-Cool isimli bir şirket kurdular. Geçen yıl yayımladıkları bir makalede, su soğutucu sistemlerde kullanılması durumunda geliştirdikleri plastiğin yaz aylarındaki elektrik tüketimini %32-45 oranında düşüreceğini yazdılar. Hu geliştirdiği süper-serin ahşabın patentini InventWood isimli bir firmaya devretti. Binaların dış yüzeyinde kullanılması durumunda, malzemenin soğutma sistemlerinde tüketilen enerjiyi %20-35 oranında azaltacağı öngörülüyor.

Kaliforniya'da (ABD)
bir evin çatısına
yerleştirilmiş
süper-serin
paneller

Görsel: Aaswath Raman



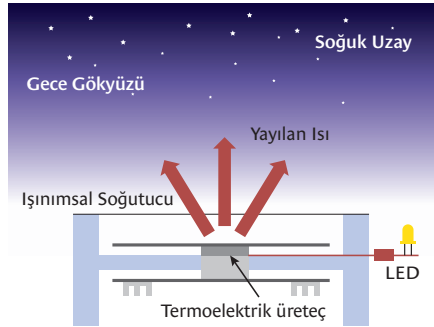
Söz konusu olan enerji tasarrufu olduğunda makalelerde geçen değerlerin genel geçer olmadığını belirtmek lazım. Çünkü bir malzemenin gösterdiği performans bulunduğu koşullara göre değişebiliyor. Süper-serin malzemeler kuru iklimlerde ve açık havalarda daha iyi performans gösteriyorlar. Hava bulutlu ve nemli olduğu zaman, havadaki su buharı malzemedan yayılan ısının atmosferden geçerek uzaya yayılmasına engel oluyor. Ancak bu durum yine de önemli bir sorun olarak görülüyor. Çünkü süper-serin malzemelere daha çok Orta Doğu gibi sıcak ve kuru iklimlere sahip, soğutma giderlerinin yüksek olduğu bölgelerden talep olacağı öngörülüyor.

Süper-serin malzemelerle ilgili bir sorun, soğuk kış şartlarında ısınma giderlerini artırmaları olabilir.

Ancak araştırmacılar bu soruna da çare bulmak için çalışmalar yapıyorlar. Avustralya'daki New South Walles Üniversitesinden Mattheos Santamouris tarafından öne sürülen bir çözüm, süper-serin malzemelerin üzerine bir sıvı katmanı eklemek. Buna göre, kışın soğuk havalarda sıvı donduğu zaman, yayılan ısının uzaya kaçması engellenecek ve böylece soğuma etkisi görülmeyecek. Kendi geliştirdikleri polimer kaplama malzemesi için Mandal ve Yang tarafından öne sürülen çözümse, içindeki boşlukları izopropanolla doldurarak, malzemenin ısı yaymak yerine ısı soğurmasını sağlamak. Malzemedan yeniden soğutma amacıyla yararlanılmak istenildiğinde, üzerine hava tutularak izopropanolün buharlaşması ve gözeneklerin yeniden açılması sağlanabilir.

Süper-serin malzemelerin kullanım alanı sadece soğutma sistemleriyle sınırlı değil. Örneğin Ming Zhou ve arkadaşları, havadan su elde etmek için kullanılan bir cihazda süper-serin malzemeler kullanarak verimi artırmayı başardılar. Süper-serin malzemenin sıcaklığının ortam sıcaklığından düşük olması, sıradan malzemelere kıyasla, üzerlerinde daha çok suyun yoğunlaşmasına sebep oluyor.

Stanford Üniversitesinden Aaswath Raman, Shanhui Fan ve Wei Li, geçtiğimiz eylül ayında yayımladıkları bir makalede, süper-serin



Dünya'nın sıcaklığı ile uzayın soğuğu arasındaki ısı alışverişine aracılık ederek elektrik üreten anti-güneş gözesi
Görsel: Raman ve ark., *Joule*

malzemeler kullanarak gece vakti çalışan anti-güneş gözeleri geliştirdiklerini açıkladılar. Sıradan güneş gözeleri sıcak Güneş ile soğuk Dünya arasındaki ısı alışverişine aracılık ederek elektrik üretirler. Anti-güneş gözeleri ise sıcak Dünya ile soğuk uzay arasındaki ısı alışverişine aracılık ederek elektrik üretiyor. Araştırmacılar, geliştirdikleri cihazdan gece vakti küçük bir LED lambayı çalıştıracak kadar elektrik elde etmeyi başardılar.

Süper-serin malzemelerden küresel ısınmayı engellemek için yararlanılabileceğini öne süren araştırmacılar da var. Kuramsal hesaplara göre, yeryüzünün %1-2'lik kısmını soğutma gücü 100 W/m² olan süper-serin malzemelerle kaplayarak ısınmayı durdurmak mümkün olabilir. Ancak henüz gelişme aşamasında olan bir teknolojinin küresel ısınma açısından yararlı olabilecek bir süre içerisinde olgunlaşıp yaygın bir biçimde kullanılmaya başlaması pek olası görülüyor.

Günümüzde tüketilen enerjinin önemli bir kısmını soğutma sistemleri kullanıyor. Üstelik giderek ısınan Dünya ile birlikte soğutma sistemlerinin tükettiği enerjinin de artacağı öngörülüyor. Süper-serin malzemelerse, pasif ışınımsal soğumayla, güneş ışığı altındayken bile sıcaklığını ortam sıcaklığının altında tutmayı başarıyor. Üstelik de bir enerji kaynağına ihtiyaç duymadan.

Birbiri ile yakın temas hâlindeki nesnelere ısı alışverişini yaparak zamanla aynı sıcaklığa gelirler. Süper-serin malzemeler tarafından yayılan ısının atmosferin içinden geçerek boş uzaya yayılması da bu malzemelerin boş uzayla "yakın temas" hâlinde olmasına yol açıyor. Uzayın soğuğuyla serinleyen malzemeler, içinde buldukları ortamın serinlemesine de katkıda bulunuyorlar. Gelecek yıllarda, özellikle dünyanın kurak ve sıcak bölgelerinde, süper-serin malzemelerin giderek yaygınlaşması ve günlük hayatta kendine yer edinmesi bekleniyor. ■

Kaynaklar

- Lim, XiaoZhi, "The super-cool materials that send heat to space", *Nature*, Cilt 577, s. 18, 2020.
- Raman, A. P., ve ark., "Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight", *Nature*, Cilt 515, s. 540, 2014.
- Rephaeli, E., ve ark., "Ultrabroadband photonic structures to achieve high-performance daytime radiative cooling", *Nano Letters*, Cilt 13, s. 1457, 2013.
- Zhai, Y., ve ark., "Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling", *Science*, Cilt 355, s. 1062, 2017.
- Goldstein, E. A., ve ark., "Sub-ambient non-evaporative fluid cooling with the sky", *Nature Energy*, Cilt 2, Makale No: 17143, 2017.
- Mandal, J., ve ark., "Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling", *Science*, Cilt 362, s. 315, 2018.
- Zhao, D., ve ark., "Subambient cooling of water: toward real-world applications of daytime radiative cooling", *Joule*, Cilt 3, s. 111, 2018.
- Li, T., ve ark., "A radiative cooling structural material", *Science*, Cilt 364, s. 760, 2019.
- Zhou, L., ve ark., "A polydimethylsiloxane-coated metal structure for all-day radiative cooling", *Nature Sustainability*, Cilt 2, s. 718, 2019.
- Leroy, A., ve ark., "High-performance subambient radiative cooling enabled by optically selective and thermally insulating polyethylene aerogel", *Science Advances*, Cilt 5, Makale No: eaat9480, 2019.
- Mandal, J., ve ark., "Paints as scalable and effective radiative cooling technology for buildings", *Joule*, Cilt 4, s. 1350, 2020.
- Mandal, J., "Porous polymers with switchable optical transmittance for optical and thermal regulation", *Joule*, Cilt 3, s. 3088, 2019.
- Zhang, H., ve ark., "Biologically inspired flexible photonic films for efficient passive radiative cooling", *Proceedings of The National Academy of Sciences (USA)*, Cilt 117, s. 14657, 2020.
- Raman, A. P., ve ark., "Generating light from darkness", *Joule*, Cilt 3, s. 2679, 2019.