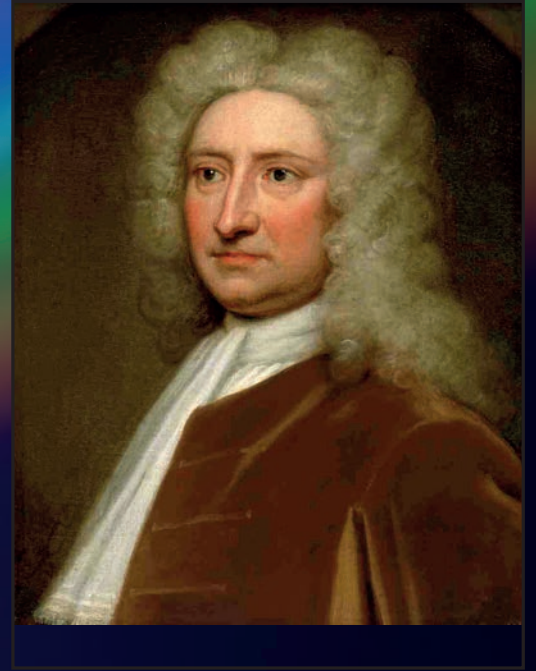
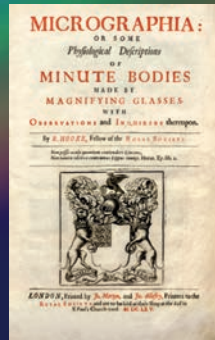


Mürekkepsiz Yazıcılar Geliyor!

RENKSİZ NANO YAPILARDAN GÖZ ALICI RENKLERE

Dr. Tuncay Baydemir [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Yapısal renkleri oluşturan çeşitli maddelerin nano ölçekteki düzenli mimarileri ışığı çok farklı şekillerde yakalayıp doğadaki yanardöner yeşilleri, ateşli kırmızıları, parlak mavileri, abanoz siyahları ve daha fazlasını mükemmel tablolar olarak önümüze seriyor.



Yapısal renklerin bilimsel olarak açıklanması Robert Hooke tarafından 1665 yılında yazılan *Micrographia* isimli esere kadar uzanıyor. Hooke tavus kuşlarının ve ördeklerin parlak tüylerini mikroskop altında incelemiş, tekrarlayan ince tüy katmanlarının ve bunların arasındaki hava boşluklarının ışığı kuvvetli bir şekilde yansıttığını belirtmiş. Ayrıca bu canlı renklerin su damlası ile bozulduğunu veya kaybolduklarını gözlemlemiş.

Zaman içinde ışığın özellikleri daha iyi anlaşıldıkça da yapısal renklerin nasıl oluştuğu ve yüzey renklerinden nasıl farklı oldukları daha net anlaşılmış. Elektron mikroskobunun icat edilmesi ile yapısal renkleri oluşturan mikro ve nano ölçekli yapılar detaylı olarak incelenebilmiş, ışığı kontrol etme ve bunu teknolojiye yansıtma çalışmaları hız kazanmıştır.

Elektromanyetik tayf, elektromanyetik radyasyonun tüm çeşitlerinin bir arada ifade edilmesidir ve dalga boyu en kısa olan gama ışınlarından çok daha uzun olan radyo dalgalarına kadar geniş bir aralıktan oluşur. İnsan gözü ise bu tayfın çok küçük bir kısmını algılayabilir.

Renk, türümüz için görünür ışık tayfı olarak adlandırdığımız yaklaşık 400-700 nanometre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) dalga boyları arasındaki ışığın algılanması olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle görünür ışık elektromanyetik dalgaların insan gözü tarafından algılanabilen hayli dar bir frekans aralığıdır. Tüm renkler bu küçük aralıkta oluşur.

Görme mekanizması herkeste hemen hemen aynı şekilde gerçekleşir, belli bir dalga boyundaki yansıyan ışığı ve dolayısıyla da o ışığa karşılık gelen rengi görürüz. Birbirine çok yakın renk tonlarının daha kolay ayırt edilmesi ise kişisel tecrübeler yoluyla geliştirilebilir.

Renk Algısı

Renk ışık kaynağı, nesne ve izleyiciden oluşan üçlü bir algılama sistemi olarak değerlendirilebilir. Renk bir algıdır ve bahsedilen bu üç öğeden herhangi birinde bir değişiklik olduğunda bu algı da değişir.

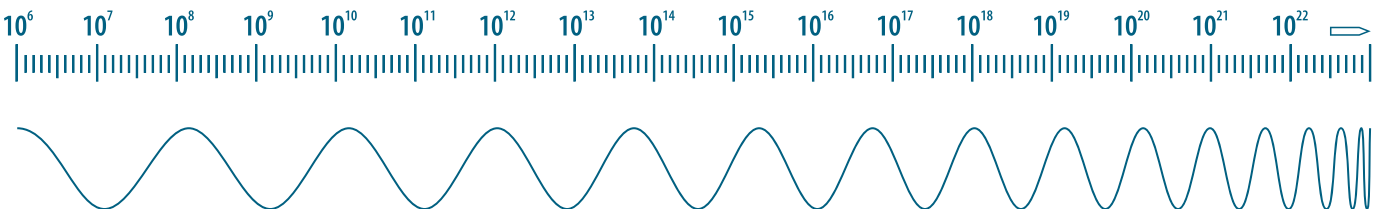
Örneğin bizim kırmızı gördüğümüz bir cisim arılar yeşil görür. Farklı canlılar farklı renk algılayıcılarla donanmıştır. Renkli görme yetisi olmayan ya da zayıf olan canlılar, parlaklıktaki farklılıkları daha iyi ayırt eder. Gündüz aktif olan kuşlarda gece aktif olan kuşlarda olduğundan daha fazla renk algılayıcı hücre vardır. Çoğu memeli hayvan insandan daha az sayıda renk algılar. Bazı canlılar ise insan tarafından algılanamayan renkleri de görür, örneğin arılar UV ışığı görür.

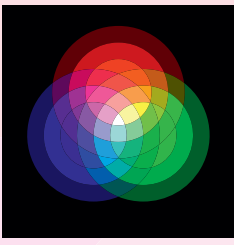
ELEKTROMANYETİK TAYF

Dalga Boyu (m)



Frekans (Hz)





Renk üç temel öge ile tanımlanabilir: Ton, doygunluk ve parlaklık. Renk algısı hem nesnenin rengine hem de gözlemcinin algısına bağlıdır. Başka bir deyişle, gözlemcinin görsel algılayıcılarının öznel özelliklerine, nesnenin yansıttığı ışığa ve nesnenin konumuna bağlıdır. Eğer nesne tüm dalga boylarındaki ışığı yansıtıyorsa beyaz, hepsini soğuruyorsa siyah, bunların arasında kalan durumlarda yani bazı dalga boylarındaki ışığı soğurup bazılarını yansıttığı durumlarda ise görünür ışık tayfındaki renklerde görülür. Ancak gözlemcinin uygun algılayıcılarla donatılmış olması da rengin algılanması açısından önemlidir.

Renk Nasıl Oluşur?

Peki nesnelere rengini veren nedir? Temel olarak doğadaki renklerin üç ana kaynağı vardır: Pigmentler, yapısal renkler ve biyoluminesans.

Çoğunlukla nesnelere içerdikleri renk pigmentleri veya boyar maddeler nedeniyle sahip oldukları renkte görünür. Bu kimyasal maddeler elektromanyetik radyasyonun belli dalga boylarındaki ışınlarını seçici olarak emer ya da yansıtır. Renk algısı, bu maddelerin kimyasal özelliklerine bağlıdır. Renk pigmentlerinden kaynaklanan renk, bu pigmentlerin kimyasal yapısının zaman içinde çeşitli koşullarda bozulmasına bağlı olarak ilk günkü halini koruyamaz ve silikleşir, kısaca zamana yenik düşer.

Biyoluminesans ise canlı organizmaların kimyasal tepkimeler sonucunda ışık yaymasıdır. Ateş böcekleri ve derin sularda yaşayan canlıların çoğunluğu biyoluminesans yapan canlılara örnek olarak gösterilebilir.

Peki renklerin oluşması için mutlaka boyar madde olması gerekli mi? Kimyasal maddelerden kaynaklanan renkleri algılamamızdan başka, daha farklı bir yol var mı? Elbette var. Nesnelere mikro ve nano ölçeklerdeki düzenli fiziksel yapılarından kaynaklanan renk algısı.

Renkli bir malzeme yapmak için genel olarak boya ya da pigment kullanırız. Renk oluşturmanın bir diğer yolu ise ışığı yansıtan veya saçan nano yapılar oluşturmaktır.



Canlılarda biyoluminesans



Çok küçük yapılarla ışığın fiziksel olarak etkileşimi sonucunda ortaya çıkan renklere yapısal renkler denir. Yapısal renklerin oluşumunda temel unsur ışığın soğurulması değil yansmasıdır. Malzemenin mikro veya nano ölçekli mimarisi malzemenin optik özelliklerini belirler.

Yapısal renk, mikro ya da nano ölçeklerdeki yapılar yoluyla oluştuğu ve tamamen fiziksel ilkelere bağlı olduğu için, sonuçta rengin oluştuğu diğer yollardan farklıdır. Bu yolla ortaya çıkan renkler hayli parlak ve göz kamaştırıcı olabilir.



Mavi tarantulanın yapısal renginin kaynağı, bir çiçeğe benzeyen çok katlı nano yapılar. Bu mimari sayesinde tarantulanın canlı mavi rengi görüş açısına göre değişmiyor.

Yapısal renkler, boyalar ve pigmentler yoluyla elde edilen kimyasal renklerin aksine ışığın periyodik olarak birbirini tekrar eden mikro ve nano yapılarla etkileşimi sonucunda oluşuyor. Bu yapıların büyüklükleri ve aralarındaki mesafeler görünür ışığın dalga boyuyla mukayese edilebilecek düzeyde. Yapısal renkler kimyasal bazlı olmadıkları için zaman içerisinde soluklaşmıyor. Optik ilkelerine bağlı olarak oluşan bu renkler genel olarak metalik ve yanardöner renklerdir ve kimyasal yolla elde edilmeleri zordur. Yapısal renklerin pratikte nasıl uygulanabileceği konusunda birçok çalışma yapılıyor. Bu renkler genellikle ışığın geliş açısına ve görüş açısına bağlı olarak değişiklik gösterir. Yapısal renklerin kararlı olmalarının sağlanması görüntü ve algılayıcı teknolojilerinde kullanılmaları açısından önemlidir. Bu nedenle geniş görüş açılarında da kararlı olan yapısal renklerin elde edilmesi için yoğun araştırmalar yapılıyor.

Doğayı taklit ettiğimiz bir teknolojik gelişme örneğiyle daha karşı karşıyayız. Bir mimari düzen içinde ardışık olarak dizilmiş, fotonik kristal yapılar tarafından ışığın yansıtılması sonucunda, bu yapıların büyüklüklerine, dizilişlerine, aralarındaki mesafelere, hava boşluklarına ışığın geliş açısına bağlı olarak farklı yapısal renkler oluşuyor. Bu renkler genelde daha canlı, metalik ve parlak renkler. Yapısal renk oluşturma işlemi laboratuvar ortamında da kontrollü bir biçimde gerçekleştirilebilir. Işığın, yapay olarak oluşturulan nano yapıları tarafından yansıtılması ve saçılması süreçlerinin tam olarak anlaşılması için araştırmalar devam ediyor. Yapısal renklerin günlük hayatta kullanılması ise bu araştırmaların sonuçlarına bağlı.

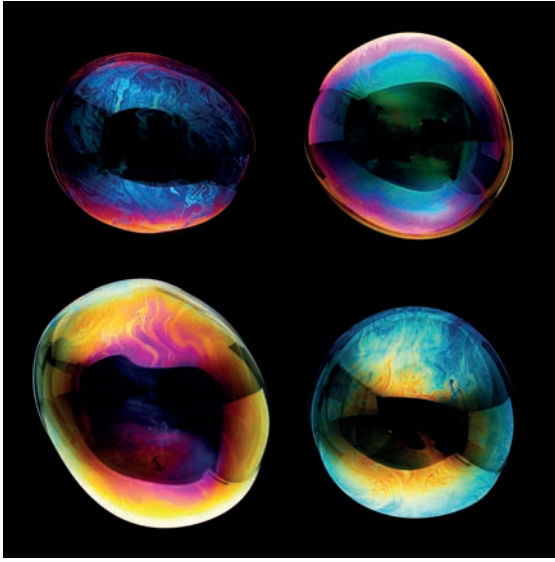
Renk gözlemci yüzeye hangi açıyla bakarsa baksın değişmez. Eğer algılanan renk gözlemcinin görüş açısına göre değişiyorsa, o renk yanardöner olarak tanımlanır. Işık etkileşimleri ve kırınimleri yanardöner renklerin oluşmasına sebep olabilir. Bazı saçılma formlarında ise yanardöner olmayan canlı renkler oluşabilir. Tekstil ve otomotiv sektörlerinde bazen istenilen bir durum olan yanardönerliğin, konu teknolojik cihazlar olunca (örneğin geniş açılı ekranlar) kontrol altına alınması ve hatta tamamen engellenmesi gerekebilir. 2017'nin Ocak ayında

Yapısal Renkler Nasıl Oluşur?

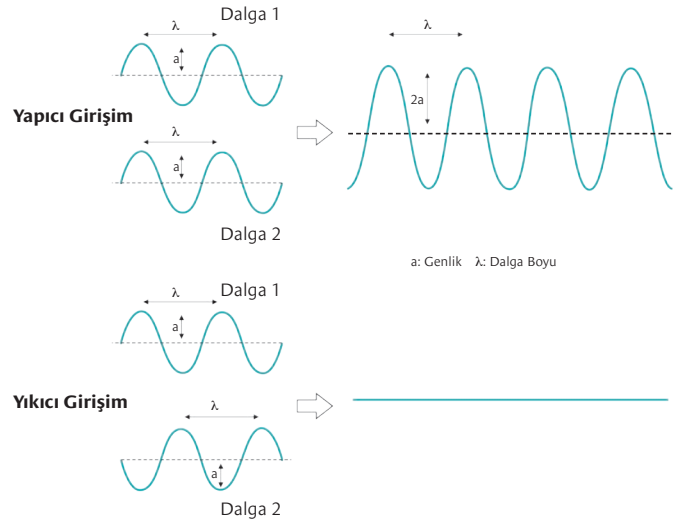
Yapısal renk, görünür ışığın cismin yüzey yapılarıyla etkileşimine bağlı olarak ortaya çıkar. Canlıların bir kısmının vücutlarının dış yüzeylerindeki nano ölçekteki üç boyutlu yapılar, yapısal renklerin oluşmasının sorumlusu. Işığın bu nano ölçekli yapılarda yansımalarıyla ışık dalgaları birbirlerini ya güçlendirir ya da sönmeler. Biz de yansıyan dalga boyundaki ışığa karşılık gelen rengi görürüz.

Fotonik (fotonların kontrol edilmesi, algılanması ve işlenmesi ile ilgilenen bilim dalı) alanında şimdiye kadar yapılan çalışmalar pek çok teknolojik gelişmeye öncülük etti. Yapısal renkler de son yıllarda bilim insanları tarafından üzerinde sıkça çalışılan bir konu haline geldi. Bugün gelinen noktada, yeni pek çok teknolojinin daha yolda olduğu rahatlıkla söylenebilir.

Advanced Optical Materials dergisinde yayımlanan çalışmada Bor-Kai (Bill) Hsiung ve çalışma arkadaşları tarafından mavi tarantuladan ilham alınarak yapılan araştırmalar neticesinde laboratuvar ortamında elde edilen yapısal rengin 160 derecelik görüş açısında değişiklik göstermediği ve yanardöner özelliğın büyük ölçüde kontrol altına alındığı belirtiliyor.



İki dalğanın etkileşiminden daha büyük genlikte bir dalga oluşabileceği gibi bu dalgalar birbirlerini sönümleyerek daha küçük genlikte bir dalga da meydana getirebilir.



Yapısal Renk Oluşum Türleri

Yapısal renkler ince film ve çoklu film etkileşimleri (girişim), kırınım ızgaraları, saçılma ve fotonik kristaller yollarıyla oluşabilir.

İnce film etkileşimlerinin en yaygın örneği yanardöner sabun baloncuklarıdır. Filmin üst ve alt sınırlarından yansıyan çok sayıdaki ışık ışını görünür rengin belirlenmesinde rol oynar. Oluşan renkler filmin kalınlığına göre değişiklik gösterir.

Çoklu film etkileşimlerinde katmanlardan oluşan bir yapı var. Belli dalga boylarındaki ışınlar, katmanlı yapılar arasından geçerken birbirleriyle yapıcı veya yıkıcı olarak etkileşime uğrar. Yansıyan ışıkta bazı renkler ağır basarken diğer renkler baskılanır. Katmanlar arasındaki mesafelerde görülen farklılıklar eğer belli bir rengin dalga boyunun tam katı ise dalgayüzü eşyumlu olur.

Böylece ışınlar o rengi yansıtacak şekilde “yapıcı” girişime uğrar. Eğer dalgayüzü eşyumlu değilse, rengin görülmesini engelleyen “yıkıcı” girişim gözlenir.

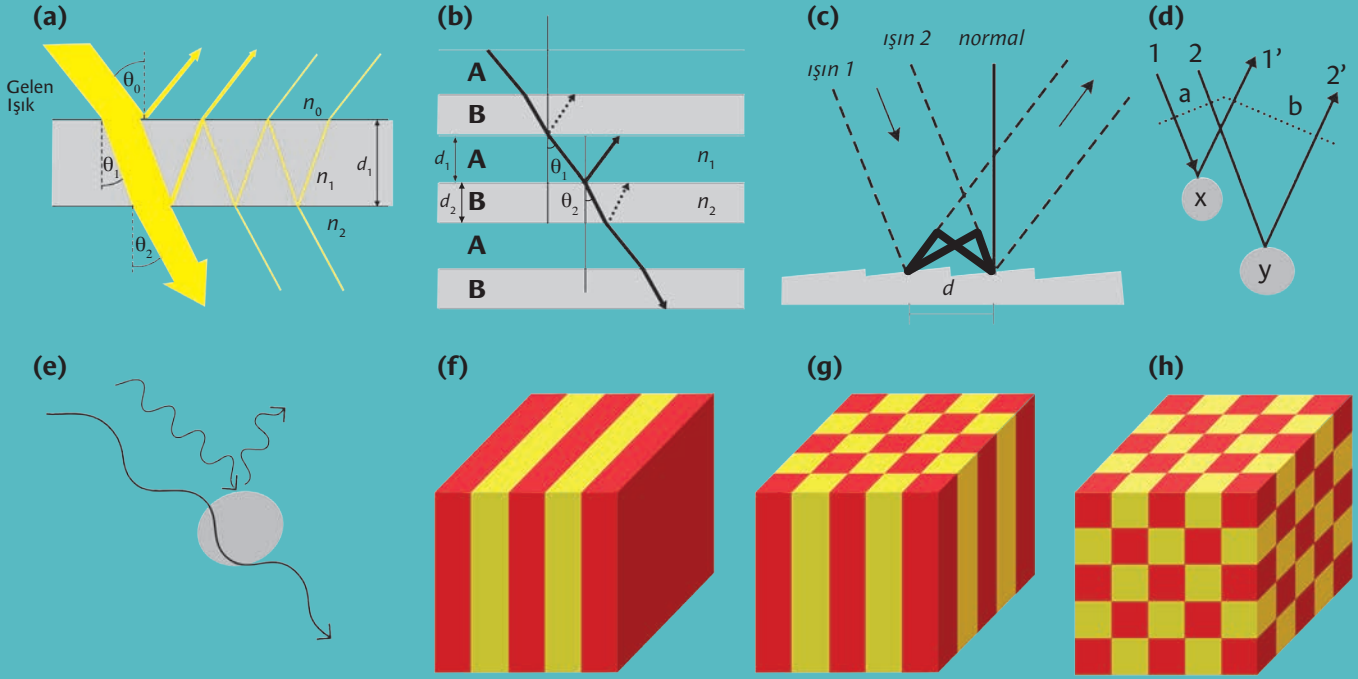
Kırınım ızgaraları ise yüzey boyunca belirli bir yönde periyodik olarak bulunan oluklardan oluşur. Kredi kartlarında, paralarda ve pullardaki metalik hologramlar bu yöntemle oluşturulur.

Saçılma ise doğada mavi rengin oluşmasında önemli rol oynar. Nesnelere yansıyan farklı dalga boylarındaki ışığın birbirini güçlendirici ya da sönümleyici şekilde etkileşmesiyle oluşur.

Fotonik kristaller ise bir, iki ya da üç boyutlu düzene sahip, kırılma indisi farklı olan iki malzemeden oluşan özel bir kompozit türü olarak ifade edilebilir.

Yapısal renklerin oluşma yollarının şematik gösterimi

(a) ince film etkileşimi, (b) çoklu film etkileşimi, (c) kırınım ızgarası, (d) evreyuymulu saçılım, (e) evreyuysuz saçılım, (f, g, h) Fotonik kristaller (1, 2 ve 3 boyutlu)



Doğadaki Bazı Renkler

Yapısal renkleri oluşturan çeşitli maddelerin nano ölçekteki düzenli mimarileri ışığı çok farklı şekillerde yakalayarak doğadaki yanardöner yeşilleri, ateşli kırmızları, parlak mavileri, abanoz siyahları ve daha fazlasını mükemmel tablolar olarak önümüze seriyor.

Doğadaki pek çok canlıda yapısal renk gözlemlemek mümkün. Böcekler, kuşlar, kelebekler, balıklar, bitkiler ve ağaçlar gibi pek çok canlı, göz alıcı renklerinin bir kısmını yapılarındaki mükemmel mimariye borçlu. Bu canlılarda gerçekleşen ufak değişiklikler gizlenme, avlanma, sinyal iletişimi ve çiftleşme için uygun renklere bürünmeyi sağlama gibi işlevler görebiliyor.



Bazı durumlarda yapısal renkler ve pigment bazlı renkler bir arada bulunabiliyor. Örneğin tavus kuşunun kuyruk tüyleri genellikle kahverengi pigment içerse de, yapısal renkler nedeniyle mavi, turkuaz ve yeşil görünür ve bu renkler çoğunlukla yanardönerdir.

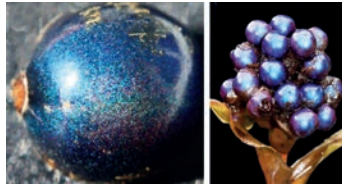
Afrika ormanlarında yetişen ve dünyanın en parlak renkli canlısı olarak bilinen *Pollia condensata* adlı bitkinin çoğunluğu mavi olan meyvelerinin parlaklığının yıllara yenik düşmediğini gören araştırmacılar bu mükemmel renklerin kaynağının da kalın duvarlı hücrelerin en dış katmanları ve buradaki düzenli mimari yapı olduğunu buldu. Meyvede selüloz mikro fibrillerden oluşan katmanlar var. Üst üste dizili bu katmanlardan her biri bir öncekine göre hafifçe dönük. İşte bu katmanlar sayesinde sıra dışı yoğunluktaki renkler oluşuyor. Çoğunlukla mavi ışık yansıyor, ancak hücreden hücreye küçük farklılıklar gösteren selüloz katmanları arasındaki mesafeler nedeniyle kırmızı, mor ve yeşil tonları da oluşuyor ve bu da yakından bakıldığında pikseli bir görüntüye yol açıyor. Selüloz yapılar gelen ışığın yaklaşık %30'unu yansıtıyor. Böylece içleri kuru tohum dolu bilyelere benzeyen ve besleyici özelliği fazla olmayan bu meyveler canlılar için daha görünür ve cazip hale gelince tohumları etrafa daha çok saçılıyor.



Selaginella willdenowii adlı bitki gençken mavi-yeşil yanardöner yapısal renkler sergiler (üstte).

Pollia condensata meyvesi (altta).
Bu meyveler 1974 yılında toplanmış, ama renkleri hâlâ canlı.

Alburnus alburnus sardalyesi (sağda)

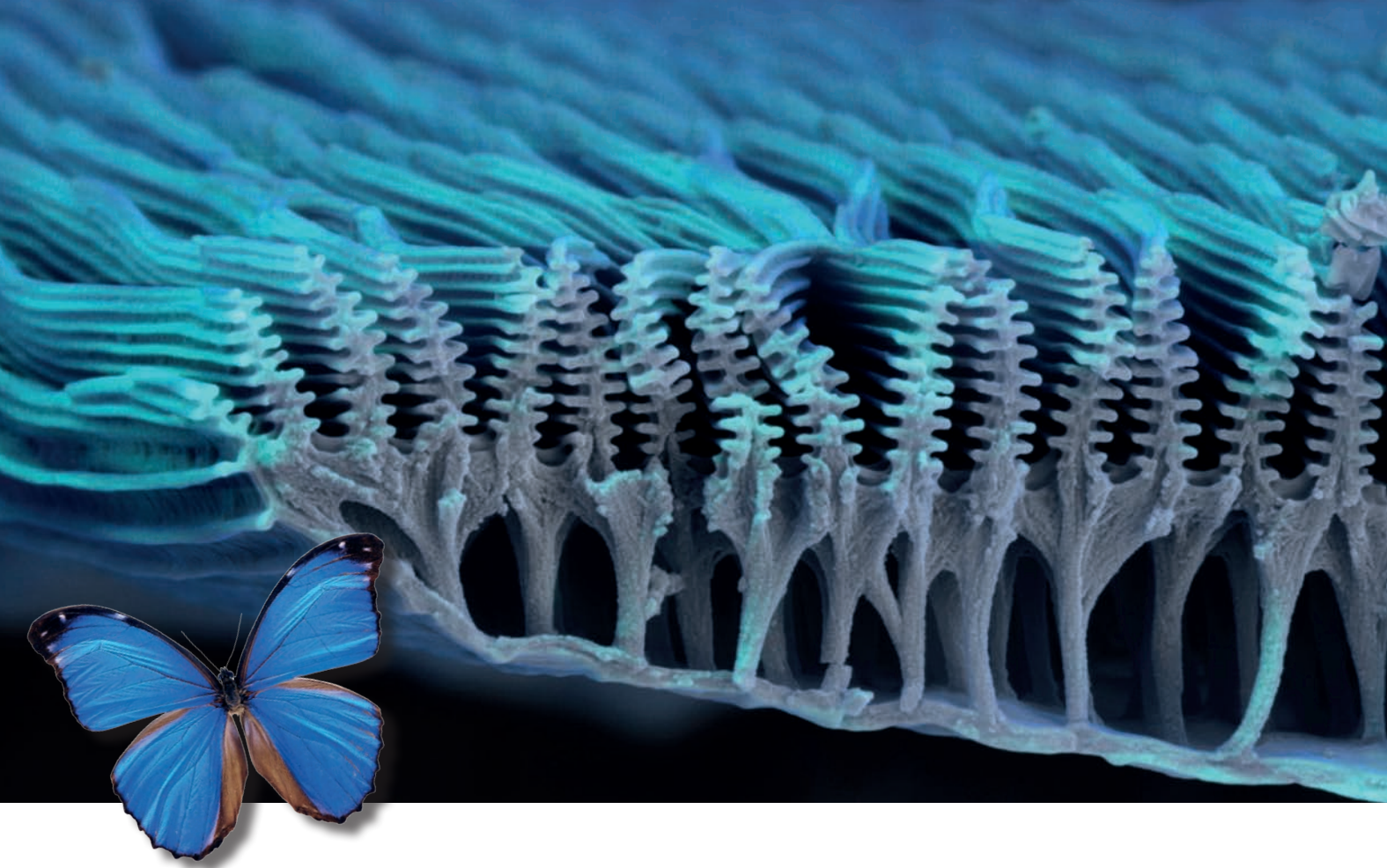


Meyvelerdeki seyrek rastlanan yapısal renk örneklerine yapraklarda ve taç yapraklarda daha sık rastlanıyor. Yapısal renkler polenleşmeye yardımcı oluyor. Parlak ve mavi tonlar eğrelti otu benzeri tropik bitkilerde yaygın. Bazı bitkilerde ise bitki küçükken ve gölgedeyken yapısal renklerin ön planda olduğu, aynı bitki büyüyüp daha fazla ışık almaya başladığında yapısal renklerini kaybetmeye başladığı gözlenmiş.

Avrupa sardalyesi ve Atlantik ringa balığı gibi balık türleriye üzerlerine gelen ışığın yaklaşık %90'ını yansıtarak neredeyse bir ayna gibi davranır. Burada amaç bu sayede dikkat çekmek değil aksine kamufler olmaktır.

Birbirinden sitoplazma ile ayrılmış yüksek yansıtıcı özellikteki ince ve düz guanin kristal plakalarının hücre içinde düzenli istiflenmiş olması sayesinde bu mümkün olur. Sitoplazma ve guanin kristal tabakaları arasındaki boşluğun rastgele değişmesi, geniş bir dalga boyu bandında gelen ışığın büyük kısmının yansıtılmasını sağlar ve gümüşü, ayna benzeri bir görünüm ortaya çıkar.

Doğada 10.000'i aşkın kuş türü var. Hepsinin de renkleri ve desenleri farklı. Renklerin kaynağı ise bazen pigmentler, bazen yapısal renkler ve bazen de ikisinin birleşimi. Ama kuşların göz kamaştıran renklerinin kaynağı elbette yapısal renkler.

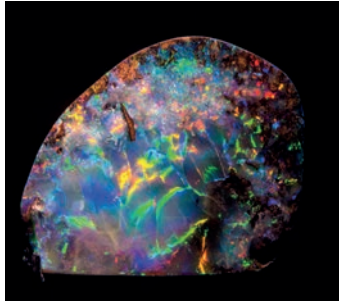


Kelebekleri de unutmamak gerekiyor. Pek çok kelebek türünün kanatlarında muhteşem bir nano mimari var, dolayısıyla renklerin en güzelleri de onlarda. Özellikle Orta ve Güney Amerika'da yaşayan Mavi Morpho kelebeği pek çok araştırmancının odağında olmuştur. Bu kelebek türüne hem düzenli hem düzensiz rengini veren mekanizmaların bilimsel olarak açıklanması için pek çok çalışma yürütülmüştür. Bu türün kanat pulcuklarındaki kitinden oluşan nano ölçekli yapılar bir çam ağacının dallarını andırır ve yüzeyden dışarı doğru katmanlar halinde uzanır. Birbirine paralel olan bu yapılar mavi ışığı yansıtır. Çok uzak mesafelerden fark edilen canlı mavi renk, kanatlar ıslandığında ya da katmanlar başka bir sıvı ile dolduğunda değişir. Morpho kelebeği

gibi daha başka birçok kelebek ve güve türünün çarpıcı renkleri de bilim insanlarının ilgisini çekmeye devam ediyor.

Yapısal renkler sadece canlılarda bulunmuyor. Opal ve inci parlak ve yanardöner renkleri olan cansız varlıklara örnek gösterilebilir.

Doğada benzer özellikler taşıyan sayısız örnek vardır. Canlılardaki doğal fotonik kristallerin ve nano mimarilerin aslında kendi içlerinde küçük farklılıklar ve ufak değişimler gösteriyor olması, doğal yapısal renklerin araştırmacılar tarafından taklit edilmesini güçleştiriyor. Ancak doğadan öğrenilenler ışığında yapılan araştırmalarda bilim insanları her gün yeni gelişmeler kaydediyor ve keşifler yapıyor.



Mavi Morpho kelebeği ve kanat yapısının yakından görünüşü [taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile 10.000 kez büyütülmüş] (üstte)

Sinekuşları yapısal renklerin en çarpıcı örneklerini sergiler (sol başta). Avustralya opali. Opalin canlı ve yanardöner renkleri yaklaşık olarak mikronun onda biri büyüklükteki silikat bazlı küreciklerin yapısına, dizilimine ve aralarındaki boşluklara bağlı olarak değişebilir. Küçük küreler (yaklaşık 150 nm çapında) mavi ve mor tonlarının oluşmasına, daha büyük küreler (yaklaşık 350 nm çapında) ise turuncu ve kırmızı renklerin oluşmasına sebep olur. Kürelerin büyüklükleri eşit ise renkler daha canlı, yoğun ve parlak demektir.

Mürekkepsiz Yazıcı Yakında mı?

Görülebilir dalga boylarındaki ışık ve yapay olarak üretilen nano yapılar arasındaki etkileşimden meydana gelen yapısal renkler mürekkep kullanmadan renkli baskı yapmaya imkân sağlayacak. Yapılan son araştırmalar, yüksek indisli dielektrik maddelerden (elektrik alanı altında kutuplanabilen yalıtkan maddeler) yansıtma özelliği olmayan yapısal renkler üretilebileceğini ve bu teknoloji sayesinde mürekkep kullanılmadan renkli baskı yapılabileceğini gösteriyor.

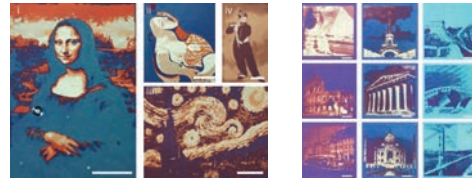
Yüzeyde birbirini tekrar eden nano büyüklükteki yapıların farklı dalga boylarındaki ışıkla etkileşimi araştırmanın temel noktası. Nano ölçeklerde basılmış polimer sütunlar çok ince germanyum filmle kaplanmış. Polimer ve metal ara yüzeylerin mürekkepsiz baskı için renk elde edilmesinde hayli önemli olduğu vurgulanıyor.

Araştırmada, kırılma katsayısının yüksek olması ve görünür dalga boylarında etkisinin hayli az olması sayesinde renk oluşumu için gerekli koşulları sağlayan metal olarak germanyum kullanılmış. Polimer sütunların tercih edilme gerekçesi ise nano baskının ve üretiminin kolay olması.

Mürekkepler belli dalga boylarındaki ışığı soğururken diğerlerini yansıtır. Yapısal renkte ise madde yüzeyinin şekli ve fiziksel yapısı rengi belirleyen temel unsurdur. Burada gerçekleşen asıl olay, birbirini tekrar eden yüzey yapılarının ışıkla etkileşimidir. Araştırmada kullanılan yapılar plastik sütunlar üzerindeki germanyum kaplamalar. Sütunların çapı, aralarındaki mesafe ve germanyum kaplamanın kalınlığı ile renkte ince ayar yapılabiliyor. Araştırmacılar lazer enerjisi kullanarak yapısal renk ile baskı yapabiliyor. Lazerin yoğunluğu değiştirilerek baskı yapılan şekiller değiştirilebiliyor ve bu sayede farklı renkler elde edilebiliyor. Ayrıca basılan renkler polarize ışık kullanılarak gizlenebiliyor veya görünür hale getirilebiliyor. Gerçekleştirilen en yüksek çözünürlüklü baskı ise 100.000 dpi (inç basına düşen nokta sayısı).

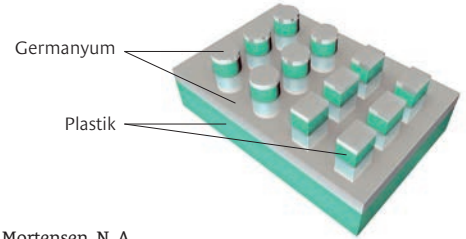
Araştırmanın sonuçlarının yapısal renkler kullanarak baskı yapılmasının yanı sıra veri depolama ve şifreleme gibi farklı alanlarda da kullanılması muhtemel. Sonuçlar cesaret verici olsa da bu teknolojinin masaüstü yazıcılarda kullanılması için biraz daha zamana ihtiyaç var gibi gözüküyor.

Sonuç olarak, doğada bulunan yapısal renkler canlı türlerinin kendilerini korumasına ve neslini devam ettirmesine yardımcı oluyor. Diğer taraftan doğadaki bu karmaşık mekanizma ve süreçlerin bir bir anlaşılması ile ışığa daha fazla hükmetmenin yeni yolları keşfediliyor. Yeni bulgular ışığında ileri teknolojiler ve hayatımızı kolaylaştıracak pek çok yeni ürün de kapımızın eşiğinde sayılır. ■



Çalışmada gerçekleştirilen baskılardan örnekler

Çalışmada oluşturulan yapıların şematik gösterimi. Plastik sütunlar ve aradaki mesafeler nanometre ile ifade edilecek derecede küçük.



Kaynaklar

Zhu, X., Yan, W., Levy, U., Mortensen, N. A., Kristensen, A., "Resonant. Laser Printing of Structural Colors on High-Index Dielectric Metasurfaces", *Science Advances*, Sayı 3, e1602487, Mayıs 2017.

<http://www.the-scientist.com/?articles.view/articleNo/34200/title/Color-from-Structure/>

Ekici, Ö.K., "Doğal Fotonik Yapılar Teknolojinin Hizmetinde", *Bilim ve Teknik*, s. 28-33, Ekim 2012

Sun, J., Bhushan, B., Tong, J., "Structural Coloration in Nature", *Royal Society of Chemistry Advances*, Cilt 3, s. 14862-14889, 2013.

<https://www.theguardian.com/science/punctuated-equilibrium/2007/oct/16/birds-physics>

Kinoshita, S., Yoshioka, S., "Structural Colors in Nature: The Role of Regularity and Irregularity in the Structure", *A European Journal of Chemical Physics and Physical Chemistry*, Sayı 6, s. 1442-1459, 2005.

<http://www.materialstoday.com/amorphous/articles/s136970211600095x/>

<https://www.sciencedaily.com/releases/2016/11/161117082459.htm>

Vignolini, S. ve ark., "Pointillist structural color in Pollia fruit", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Cilt 109, Sayı 39, s. 15712-15715, Eylül 2012

<https://manoharan.seas.harvard.edu/structural-color>

<http://www.webexhibits.org/causesofcolor/15F.html>