

Özlem Kılıç Ekici

Dr. Bilimsel Programlar Başuzmanı,
TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Doğal Fotonik Yapılar Teknolojinin Hizmetinde

Canlıların ilginç ışık oyunları sonucunda vücutlarında oluşan doğal renk cümbüşünün altında yatan gerçek mekanizma, yeni teknolojik tasarımların ve ürünlerin geliştirilmesi yönünde bilim insanlarına ilham veriyor

Fizikçilerin, biyologların ve mühendislerin ortaklaşa yürüttüğü disiplinlerarası araştırmalarla fotonların sentetik yapılar kullanılarak işlenmeye başlanmasından milyonlarca yıl önce, canlılar vücutlarındaki nanometre büyüklüğündeki üç boyutlu yapıları kullanarak gözalıcı, rengârenk optik efektler oluşturuyordu bile. Kuşların renkli tüyleri, balıkların ve kelebeklerin renkli pulcukları, böceklerin kabukları ışığı yansıtan, katmanlar halindeki mikroskopik kristal yapılarla kaplı. Birçok canlının tüylerinde ya da vücutlarındaki bu çok küçük, farklı desenli, üç boyutlu nano yapılar parlak ve canlı sarı, yeşil, mavi gibi gökkuşağı renklerinin oluşmasını sağlıyor. İşte bu doğal fotonik kristal yapılar, keşfedildikleri andan itibaren merak uyandırmaya ve yeni nesil, yüksek teknolojik uygulamalar için ilham kaynağı olmaya başlamış.

Fotonik Bilimi ve Uygulama Alanları

Fotonik bilimi ve teknolojisi, ışık taneceklerinin yani fotonların kontrol edilmesi, algılanması ve işlenmesi yönünde araştırmaların yapıldığı bir çalışma alanı olarak tanımlanabilir. Fotonik bilimi son zamanlarda öyle bir yol kat etti ki evlerde, fabrikalarda ve araştırma laboratuvarlarında kullanılan birçok cihazın üretiminde kullanılıyor. Fotonik malzemeler sayesinde ses, görüntü ve veriler çok daha hızlı ve verimli bir şekilde iletilebiliyor, saklanabiliyor ve işlenebiliyor. Kütleli, elektrik yüksüz ve ışık hızındaki fotonlar birçok uygulamada elektronların yerini almaya başladı bile. Fotonik bilimi ve modern optik teknolojisi günümüzde hem Nobel Ödülü kazandıran hem de milyarlarca dolarlık endüstriyel yatırımların yapıldığı bir çalışma alanı haline geldi.

Fotonik biliminin günümüzde çok fazla uygulama alanı olduğunu görüyoruz:

- Tüketici odaklı cihazlar: barkot okuyucular, lazer yazıcılar, CD/DVD/Blu-ray ve uzaktan kumanda cihazları
 - Telekomünikasyon ve bilgisayar: fiberoptik iletişim, optik çeviriciler, mikroçipler, bilgi işleme ve depolama
 - Tıp: lazerli operasyonlar
 - Endüstriyel üretim: lazerlerle yapılan kaynak, sondaj, kesim ve yüzey düzeltme
 - İnşaat: lazerlerle seviyelendirme, mesafe ölçme, zekice tasarlanmış mimari yapılar
 - Askeriye ve havacılık: fotonik jiroskoplar (kara, hava ve deniz araçları ile güdümlü füzelerde denge veya istikamet istikrarını korumak için kullanılır), algılayıcılar, navigasyon, arama kurtarma, mayın tarama, komuta ve kontrol cihazları
 - Eğlence: lazer gösterileri, ışık efektleri
 - Ölçümbilim: zaman, frekans ve mesafe ölçümü
 - Fotonik hesaplamalar: bilgisayarlar, baskılı devre kartları ve optoelektronik entegre devreler arasında iletişim
- Tüm bu uygulamaların başlangıç noktasının doğanın ta kendisi olduğunu söylersem şaşırmasnız değil mi?

Fotonik Kristaller ve Optik Yansımanın Mekanizmaları

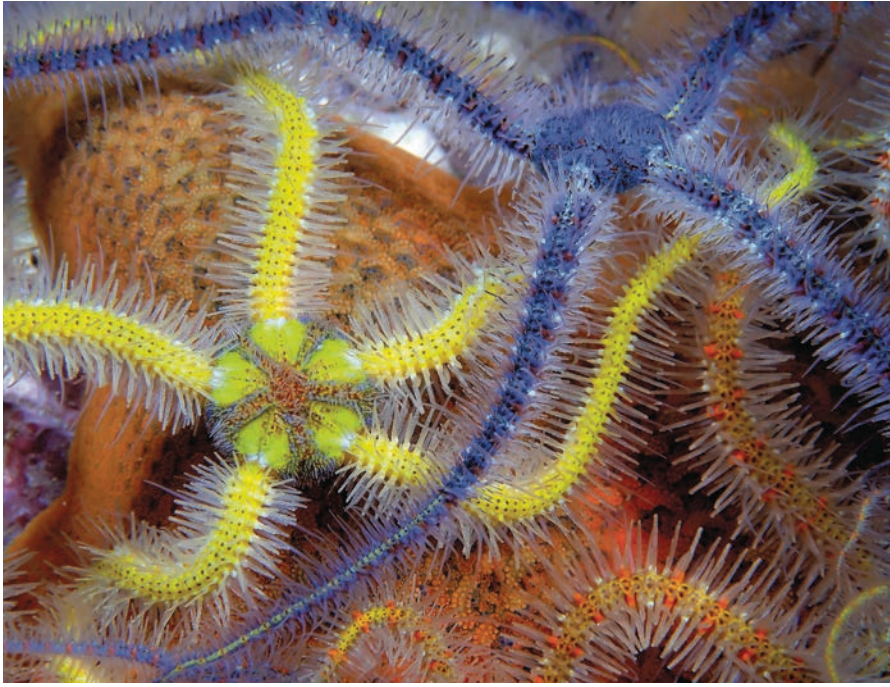
Kuşların tüylerindeki, kelebeklerin kanatlarındaki, bazı kabuklu böceklerin, mürekkep balığının ve deniz yıldızlarının vücutundaki yoğun, parlak, gözalıcı renkler ışığı emen pigment maddeleri tarafından değil de belli bir geometrik düzende ardışık olarak dizilmiş minik fotonik kristal yapılar tarafından ışığın yansıtılması sonucunda oluşuyor. Vücuttaki fotonik yapıların büyüklükleri, dizileş desenleri, birbirleri arasındaki mesafeler ve hava boşlukları, ışığın geliş açısı, Güneş'ten gelen ışığın belirli dalga boyunda ışık tayflarına ayrışmasını sağlıyor. Bu şekilde farklı farklı renkler oluşuyor. Oluşan farklı renk tonları çoğunlukla yanardöner, metalik, parlak nitelikte. Canlıların üzerinde oluşan renkler, onlara hangi açıdan baktığımıza bağlı olarak değişebiliyor. Ayrıca, ilginç bir şekilde, oluşan renkler canlının tüyleri ya da kanatları ıslanınca kayboluyor, ton değiştiriyor ya da tamamen farklı bir renk alıyor. Bu renk cümbüşü, küçük aralıklarla birbirinden ayrılmış yapıların şekline dolaylı oluşuyor.





Doğal Fotonik Yapıların Keşfi

Canlıların vücutlarındaki bu nano büyüklükteki yapıların ışığı nasıl işleyip değiştirdiği ve yansıttığı bilim insanları tarafından 17. yüzyıldan itibaren detaylı bir şekilde incelenmiş. Robert Hooke ve Isaac Newton bu sistemin altında yatan fiziği açıklayan ilk bilim insanlarından. Tavuskuşunun kanatlarında ve böceklerin kabuklarında görülen yanardöner, metalik parlak renklerin pigmentasyon sonucunda değil, canlıların fiziksel özellikleri nedeniyle oluştuğunu doğru olarak tahmin etmişler. Hooke ve Newton'dan sonra, elektron mikroskobun biyolojik çalışmalara girdiği 19. yüzyıla kadar, bu yapılar üzerinde fazla çalışma yapılmamış. James Clerk Maxwell'in elektromanyetik ışımının madde ile nasıl etkileşime geçtiğini açıklayan matematiksel modelleri geliştirmesinden sonra, yüzeydeki belli bir geometrik düzende, ardışık olarak dizilmiş yapıların ışığı nasıl ilettiği, yansıttığı ve emdiği daha iyi anlaşılmaya başlanmıştır. Ardışık yapıların arasındaki mesafelerin ışığın kırılma oranını ve nasıl yayıldığını etkilediği belirtiliyor.

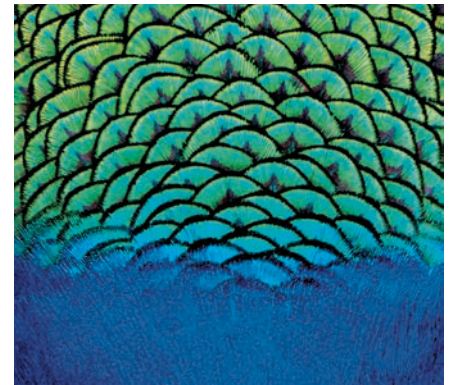
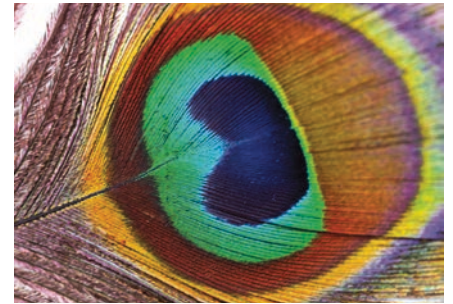


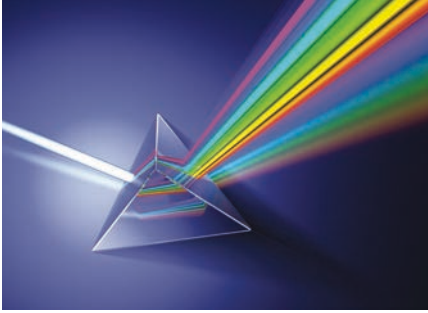
Canlıların vücutlarındaki bu yapıların aralarındaki mesafeler gözle görülen ışığın dalga boyları ile hemen hemen aynı, bu nedenle bu yapılar ışınların kırınımına uğramasına neden oluyor. Bu yapılar ve aralarındaki hava boşlukları, geometrik desenler ve katmanlar halinde fotonik kristal yapıları oluşturuyor. Canlının vücuduna gelen belli dalga boylarındaki ışınlar, bu katmanlı yapılar arasından geçerken birbirleriyle yapıcı veya yıkıcı olarak etkileşime giriyor ve sonuçta yansıyan ışıkta bazı renkler ağır basarken diğer renkler baskılanıyor. Yapılar 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 eşyumsuz değilse, rengin görülmesini engelleyen "yıkıcı" girişim gözlenir. Sabun köpükleri üzerinde oluşan renkleri gözünüzde canlandırın. Gün ışığı köpük kabarcığına çarptığında oluşan renkler kabarcığın kalınlığına göre değişir. Yüzeyi parlak bir CD'yi öne arkaya hareket ettirdiğimizde farklı tonlarda oluşan gökkuşağı renklerini gördüğümüzde de benzer bir olguya tanık oluyoruz.



Kelebeklerin kanatlarındaki, ışığı yansıtan yapıların ana maddesi doğal bir polimer olan kitin adlı madde. Kanatların pulcuklarının yer aldığı üst tabakada (epiderm veya kütikül) bulunan ve kitinden oluşmuş bu yapıları birbirlerinden hava ile dolu boşluklar ayırıyor. Kuşların tüylerindeki fotonik yapıların ana maddesi ise melanin ve keratin. Dışarda doğlaşıırken sıkça karşılaştığımız güvercinlerin boyunlarındaki yanardöner tüylerin nasıl yeşilden eflatuna doğru renk değiştiğini görmüşsünüzdür.

Yeşil ve eflatun tüylerin yapısı incelendiğinde iliksi tabakayı çevreleyen üst katmanın keratinden oluştuğu görülmüş. Keratin yapının kalınlığı, tüylerde oluşan yeşil ve eflatun renkleri belirliyor.





Doğal Fotonik Yapıların Teknolojiye Uyarlanması

Günümüzde birçok canlının kamuflaj, avcılardan korunmak ve cezbetmek amacıyla kullandığı renk yansımaları olgusuna neden olan biyolojik düzenlemeler ve desenlerin işleyiş mekanizmaları mühendisler tarafından taklit edilerek optik teknolojide model olarak kullanılıyor. Bu şekilde elde edilen yeni nesil malzemeler sayesinde daha parlak görüntüler elde edilebiliyor; içme sularındaki zararlı kimyasalları daha hassas bir şekilde saptayan sensörler, bilginin daha etkin ve hızlı bir şekilde depolanmasını, işlenmesini ve iletilmesini sağlayan bilgisayar çipleri tasarlanabiliyor; banka kartlarına güvenlik amacıyla taklit edilmesi mümkün olmayan işaretler yapılabiliyor.



Optik sanayisinde fotonik malzemelerden yapılmış, ışığı seçerek belli bir renkte yansıtan ve ileten ince ve çok katmanlı filtreler, teleskoptan yarı iletken lazerlere, hassas dedektörlerden tıbbi ölçüm aletlerine kadar pek çok ürünün geliştirilmesinde kullanılıyor.

Deniz faresi (*Aphrodita*) olarak bilinen organizmanın omurlarından dışarıya doğru uzanan tüylerde altıgen şeklinde dizilmiş, fotonik kristal fiber yapılar bulunur. Kitinden yapılmış olan bu kristal fiber yapılar üzerlerine gelen ışığı işleyerek kırmızı rengi yansıtır. Bu deniz canlısından ilham alınarak geliştirilen sentetik fotonik kristal fiberler, telekomünikasyon alanında büyük gelişmelere neden oldu. Bilginin elektrik kabloları aracılığıyla değil de

optik olarak kabloların içinden geçen ışık demetleri halinde iletildiği teknoloji (fibre optik) artık yaygın bir şekilde kullanılıyor. Fotonik kristaller ışığı çok dar alanlarda bile kolaylıkla yönlendirebildiği için bilgisayarlarda ve cep telefonlarında elektronik çiplerin yerine artık fotonik kristal malzemelerden yapılmış optik mikroçipler kullanılıyor.

Lamprocyphus augustus adlı kabuklu böceğin, her ne açıdan bakılırsa bakılsın, bariz olarak görülen yanardöner metalik yeşil renginin altında yatan mekanizma araştırıldığında, ışığı yansıtan kristal yapılar içinde en makbulü olan tetrahedral yani dört yüzlü fotonik yapılarla karşılaşıldı. Bu yapının şekli karbon atomlarının elmastaki yerleş-



me düzenine benziyor. Bu özelliğiyle el- masa benzeyen bu yapı, gözle görülen ışığı yansıtan fotonik kristaller içinde en etkili olanı, çünkü yansıtma özelliği çok yüksek, yani çok geniş bir yelpazede, farklı renkleri yansıtabiliyor. Bu da araştırmacılara fotonları daha iyi kontrol edebilme ve işleme imkânı sağlıyor.



Mavi *Morpho* kelebeğinin kanatlarının pulcuklarındaki kitinden oluşan nano büyüklükte yapılar, tıpkı bir çam ağacının dalları gibi yüzeyden dışarıya doğru katmanlar halinde uzanır. Birbirine paralel olarak uzanan yapıların her biri kanadın üzerine gelen ışığın nerdeyse tamamını mavi renkte yansıtır. Bu kelebeklerin parlak mavi renkteki kanatları çok uzak

mesafelerden bile seçilebilir. Mavi kanatlar ıslandığında ise ışığın kırılımı değişir. Farklı sıvıların farklı kırılım dereceleri olduğundan, sıvının cinsine göre farklı renkler yansır. Bilim insanları *Morpho* kelebeğinin bu fotonik yapısını model alarak farklı sıvıları kendilerine karşılık gelen renklerle ayırt edebilen ve tanımlayabilen kimyasal sensörler geliştirmiş. Bu sensörler sayesinde enerji santrallerinde meydana gelen birtakım istenmeyen salımlar ve içme sularındaki zararlı yabancı maddeler kolayca belirlenebiliyor.

Parides sesostris türü kelebeğin kanatlarındaki, yama yapılmış gibi görünen yeşil renk, delikli ve süngerimsi yapıdaki fotonik nanoyapıların ışığı yansıtması sonucunda oluşuyor. Pulcuklarda dizilen bu delikli kristal yapı detaylı olarak incelendiğinde, kelebeğin embriyonik gelişiminden itibaren lipidlerin bu üç boyutlu delikli yapıyı oluşturduğu ve daha sonra kitinin bu deliklerin etrafını kuşatarak yapıyı sertleştirdiği belirlenmiş. Bu biyolojik düzenin benzerini yapmaya çalışan araştırmacılar lipid benzeri yüzey aktif maddeleri kullanarak süngerimsi yapıya ben-

zeyen polimerler üretmiş. Daha sonra bu polimerler, niyobyum ve titanyum oksit nanoparçacıkların mineral benzeri nano-sünger yapılara dönüştürülmesinde kullanılmış. Hem verimli hem de maliyeti düşük olan güneş gözesi yapımında da bu delikli malzemeler yaygın bir şekilde kullanılıyor.



Çatalkuyruk kelebeğinin (*Papilio palinurus*) kanatlarındaki parlak zümrüt yeşili rengi oluşturan fotonik kristal yapılar mikroskopla incelendiğinde, kanatların pulcukları üzerinde yan yana dizilmiş çukur kâselere benzeyen kristal yapıların bir desen oluşturduğu görülmüş. Bu çukur, yuvarlak kitin yapıların aralarındaki hava boşlukları ise bir ayna vazifesi görüyor. Çukur fotonik yapıların alt kısımları yani tabanları sadece sarı ışığı, yan yüzeyler ise mavi ışığı yansıtıyor. Gözümüz bu kadar küçük ölçekte sarı ve mavi yansımayı ayırt edemediği için ikisinin karışımı olan yeşil rengi görüyor. Bu doğal fotonik yapıyı ince filmlere uygulayan mühendisler banka kartlarının arkasındaki hologramlı bandrolleri geliştirmiş. Bandrolün yüzeyinde sadece parlak yeşil yansımayı görebiliyoruz, ama aslında bu yüzeyde gizli kalan, taklit edilmesinin mümkün olmadığı söylenen ve sadece polarize filtrelerle ayırt edilebilen, sarı ve mavi renkli filigranlar yani işaretler de var.

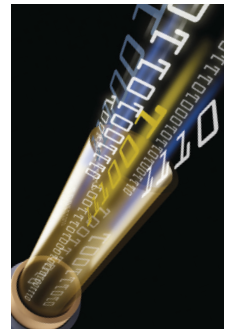
Boya ve yüzey kaplama malzemeleri üreten teknolojide de fotonik yapılardan esinlenilmiş. Böceklerin kabuklarındaki ve kuşların kanatlarındaki yapılar taklit edilerek delikli yapıya sahip malzemeler üretilmiş. Çok parlak beyaz ya da mavi-yeşil renkte, ince opak film şeklinde üretilen kaplama malzemeleri organik pigment maddeler içermediği için hiç solmadan canlı renklerini koruyor. Boya endüstrisinde fotonik yapılar kullanılarak üretilen malzemeler sayesinde aklınızın almayacağı kadar çok renk tonu var. İlginç bir şekilde, bir yönden bakıldığında tamamen mavi, diğer yönden bakıldığında ise mor görünen otomobillerin çok yakın bir zamanda trafiğe çıkacağı bildiriliyor. Bunun arkasında yatan mekanizma, ışığın geliş açısına göre davranan ve reflektör işlevi gören kaplama malzemeleri.

Cennet kuşunun (*Parotia lawesii*) erkeğinin göğsündeki tüyler yakından incelendiğinde melanin içeren fotonik yapılar sayesinde parlak turuncu ve sarı renkli yansımalar oluştuğu görülmüş. Ayrıca her bir tüycüğün kesit yüzeyinin "V" harfi şeklinde ve eğimli yapıda olduğu tespit edilmiş. Bu yüzey özelliği nedeniyle de mavi ışığın yansıdığı gözlenmiş. Erkek kuş, dışisine kur yaparken tüylerdeki hafif kıvrımlar göğüs kısmındaki tüylerin renginin turuncu-sarıdan mavi-yeşile dönmesine neden oluyor, bu da doğal olarak dişinin dikkatini çekiyor. Tekstil ve

otomobil endüstrisi bu "V" şeklindeki yapılanmayı taklit ederek hareket ettikçe renk değiştiren kumaş ve otomobil geliştirmeye çalışıyor.



Bilim insanları devam eden ve gelecek vaat eden bütün bu çalışmalarında kullandıkları verileri doğadan alıyor. Bu verilerden elde edilen bilgiler fotonik kristallerin sadece diziliş desenleri ve optik yapıları hakkında değil, işleyiş mekanizmaları hakkında da araştırmacıları aydınlatıyor. Öyle görünüyor ki doğadaki canlıların bizlere öğreteceği şeylerin sınırı yok. Dikkatlice izlemeye ve ilham almaya devam.



Kaynaklar

Parker, A. R., "Natural photonics for industrial inspiration", *Philosophical Transactions of The Royal Society*, Sayı 364, s. 1759-1782, 2009.
Ball, P., "Nature's color tricks", *Scientific American*, s. 76-79, Mayıs 2012.
Vukusic, P., "Natural photonics", *Physics World*, Cilt 17, Sayı 17, s. 35-39, 2004.
Vukusic, P. ve Sambles, J. R., "Photonic structures in biology", *Nature*, Cilt 424, s. 852-855, 2003.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Photonics>
<http://photonics.com/>
<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/367/1894/1759.full.pdf>
http://144.173.231.195/research/emag/photonics/pubs/pdf/Vukusic_PW_2004.pdf
<http://www.youtube.com/watch?v=xWuwbw7sdpk>
(Engineering Your Future - Photonics Engineer)