

Yeşeren Saylan, Hasan Şahin, Adil Denizli

Hacettepe Üniversitesi, Kimya Bölümü

BİYOİLHAM: HERKES İÇİN BİR ŞEYLER

Biyolojik olmayan bilim ve teknoloji alanındaki araştırmaları teşvik etmek için biyolojide kullanılan biyoilham, araştırmalar için yeni alanları öneren bir stratejidir. Yeni fikirleri oluşturma potansiyelinin ötesinde, biyoilhamın başka iki ilginç özelliği daha vardır. Araştırmalardaki maddelerin teknik olarak basit olmasının ileri sürer; ayrıca kimyada popüler olup daha çok bilinen alanlar yerine doğrudan daha kullanışlı sonuçları olan alanlara liderlik eder. Bu yüzden biyoilham araştırmalarını, yeni ve kullanışlı özelliklere yönlendirir ve farklı coğrafi bölgelerdeki kültürel ve jeolojik farklılıklara köprü olduğu için kısıtlı kaynakları olan laboratuvarlarda kolayca ulaşma potansiyeli vardır.

GİRİŞ

Fikir nasıl oluştu?

Bilim ve teknolojide fikirler genellikle doğa kaynaklıdır [1,2]. Kepler ve Newton yerçekiminin ilk basit tanımını güneşin ve gezegenlerin durumunu

gözlemleyerek geliştirmişlerdir. Faraday ve Maxwell de elektromanyetizmanın temellerini elektrik akımı ve mıknatıs arasındaki etkileşimi inceleyerek oluşturmuşlardır. Termodinamik, ısı aktarımı ve mekanik iş çalışmalarından türetilmiştir. Peki ya şu an kimyada merak uyandıran nesnelere? Elbette birçok sebebi vardır ama onların içinde en verimli biyolojidir. Biyoloji, genetikteki moleküler temellere, hücrelerin özelliklerine, hayvanların ve hastalıkların gelişimine odaklanma eğilimindedir.

Biyoloji, biyoilham, biyotaklit ve biyobenzerlik

Tek hücreden karmaşık bir organizmaya kadar bir hayat çalışması olan biyoloji, bütünüyle nesnelere kümesidir. Sadece canlı sistemler üzerine odaklanmayan zengin bir karışımdır. Moleküler



“Bir fonksiyonu taklit etmek için onu tamamen anlamamıza gerek yoktur. Çözücünün organik sentezde kullanmak için moleküler seviyede nasıl çalıştığını bilmemize de gerek yoktur. Bir uçak uçabilmek için kuş ile aynı süreci kullanmaz ama kuş ve uçak, uçuş fikrini paylaşır.”

biyolojiden ortaya çıkan bilgi seli içerisinde biyobenzerlik ve biyotaklit bunlardan birisidir. Bu konunun amacı, biyolojik oluşumu tek başına molekülleri ile ayrıntılı olarak incelemek ya da kopyalamak yerine cansız sistemlerde biyolojik sistemin özelliklerini benzetmek ya da taklit etmektir. Örneğin; bir mürekkep balığının kollarını, kontrol etme süreci (algı, kas, beyin sistemlerinin birleşimi) hala bizim ilerimizdedir (Şekil 1). Mürekkep balığı tarafından kullanılan kolların benzerlik ile alakası olmasa bile kolların bazı özelliğinin mekanik olarak benzetilmesi fikri daha basit, daha doğrudan ve daha kullanışlı bir aktivitedir. Mürekkep balığının (ya da yaşayan herhangi bir canlının) moleküler seviyede ayrıntılı olarak anlaşılması konusu muhtemelen önümüzdeki dönemde bilimi oyalayacak çok yönlü bir zorluktur. Mürekkep balığının

gibi hareketleri, onun yeterliliklerinden ilham alıp bazı özelliklerini taklit edip bunu farklı mekanizmalarda kullanmak bu konuyla ilgilidir. Fakat büyük görünüşlü ve potansiyelli farklı bir amaç ile yeni bir sistemin oluşturulması (örneğin ne mürekkep balığında ne de şu anki sistemde olan işlevler) ve problemleri çözmeye sadece biyolojik çözüm amaçlı kullanılması durumunu çözmeyecektir.

Biyotaklit? Soyutlama ve tekrar kullanma? Motivasyon?

Biyolojiyi basitleştirme ve soyutlama, biyolojinin kendisini çalışmaktan daha az talep edilen ve daha az karlı bir aktivite midir? Kesinlikle daha az talep edilir. İstisnalar dışında canlı sistemler oldukça karmaşıktır. En basit tek hücreli organizmalar onlarca yıllık çalışma sonrasında bile anlayamayacağımız ve kopyalayamayacağımız karakterdedir ve bu bağlamda işlemler yürütülür. Tüm bu karışıklıklara rağmen biyolojik işlevlerin anlaşılması (örneğin üst düzey fenotipik davranışlar) milyarlarca yıl önce ortaya çıkan Darwin Teorisi'nin optimizasyon sürecinin değerinin artmaya başlamasına izin vermiştir. Bu değer artışı hücre ve organizmaların niçin bu yapıda olduklarını ve sentetik sistemlerdeki "gerçekçi" kısayol işlevinin oluşmasını açıklar. Bir işlevi taklit etmek için onu tamamen anlamamıza gerek yoktur. Organik sentezde kullanılması için çözücünün moleküler seviyede nasıl çalıştığını bilmemize de gerek yoktur. Bir uçak uçabilmek için kuş ile aynı süreci kullanmaz ama kuş ve uçak, uçuş fikrini paylaşır. Metan-hava alevi ve bir hücre, ikisi de, karbonun indirgenmiş formunu yakarlar (metan ve glukoz) ama bu iki süreç birbirinden farklı sonuçlar üretir, ve bu farklılıklar enerjiyi tüketen sistem olarak hücreyi anlamayla ilgilenenler için büyük bir ilham kaynağıdır. Biyoloji, işlevler ve bunların kökenleri hakkında yeni fikirler oluşturur.

Ayrıntılı mekanizmalar tam olarak anlaşılmasa bile muhteşem olan şey, biyolojik sistemlerin benzetilebilmesi, soyutlanabilmesi ve eklenebilmesidir.

Bu da birçok icadın çıkış noktası olan bilimsel ve teknolojik bulmacalar serisini oluşturmuştur. Biyolojik sistemleri davranış ve işlev açısından taklit etme kaynağı olarak kullanırken; tek doğru yol yoktur. Biyoloji, başarılı tasarımlardan sınırsız uyarıcı örneklerini sağlar ve istenilen şekilde kullanılması da özgürdür.

Biyolojik Sistemler ve Biyoilham

Biyoilham, moleküller, malzemeler, yapılar ve işlevler

Biyoloji yeni yapıların ve işlemlerin her kademede dikkate değer örneklerini sunduğu için bir kişinin nereye odaklanması gerekir? Biyolojide, her kademede "işlev" anahtar kelimedir: Organizmalar büyük Darwin yarışmasında işlevsiz özelliklerle kendi kendilerine donanmazlar. Canlı sisteminin özelliklerini ve davranışlarını taklit etmeye çalışırken, otomatik olarak işlevsel işlemler ve yapılarını taklit etmekle meşgul olunur. Bu yüzden "biyoilham" -doğrudan ya da dolaylı olarak- organizmaya ya da insanlara yararlı olabilecek şeyler üretilmesini sağlar. Fakat çevreleyen "işlev", biyoilham içeren araştırmalarda problemlerin seçimine etki eden ve uygun araştırma stratejisini belirleyen kavramsal fikirlerdir.

Biyoloji ve biyoilhamın bazı özellikleri

"Benzetme" biyolojik sistemlerin kullanışı özelliklerinin anlaşılmasına çalışılırken kısmen ilginç olabilecek üç düşünsel kuvvet bulunmuştur:

İşlev/ Kullanışlılık

Organizmalar işlevi olmayan yapıların üretimi sırasında nadiren enerji harcarlar. Eğer onlara avantaj olarak verilen özelliklere odaklanmazlarsa, yenileceklerini göze alamazlar. Avantajın ne olabileceğini ya da nasıl başarılı olduğunu genellikle anlamaz; fakat iki soru da doğrudan bir değer işlevine yöneltmesi de araştırmaya değerdir [3]. Sonuç olarak; teknolojinin birçoğu hala kullanışlılık hakkındadır. Örneğin; neredeyse hiç kimse polistirenin moleküler yapısını önemsemez, tek akla gelen fabrikalarda

çok ucuza üretilen bardaklar gibi kullanışlı nesnelere. Biyolojideki kullanışlılığı bakarak, bir insan işlevsel bir sonuca yaklaşmaya başlar.

Basitlik

Birçok biyolojik sistem tasarımdaki zarafetiyle dikkat çeker. Karışık mekanizma ve yapılar görünüşte basit yapılar olmakla karıştırılır. Elma toplamak ve onu yemek işlevsel olarak çok basit görünmesine rağmen bu nispeten doğrudur. Ayrıntılı olarak incelendiğinde, bir elmayı toplamak ve yemek genellikle görülmeyen sıra dışı karışıklıkta, bir dizi paralel ağ sisteminden oluşur. Biyoloji basit, kullanışlı, güvenilir karışık alt sistemlerin entegre edilmesi hakkında oldukça büyük bir araştırmaya sahiptir.

Dağılım / Yayma / Yok Olma

Neredeyse bütün ilginç biyolojik sistemler yok olur ve sadece serbest enerji akışı olduğunda harekete geçer. Kimyanın ve bilim malzemelerinin birçoğu yok olmayan dünyanın içinde hala donmuş durumdadır. Bilimin sınırı yok olan sistemlerin ve yapıların (organizmalar, trafik, şehirler, hava durumları, piyasa durumları) çalışmasıdır [4,5]; bir kişi yaşamı tamamen çalışmadan yok eden sistemleri anlayamaz.

Bilimsel "Etki"

Biyolojik sistemleri anlama ve benzetmenin diğer bir yolu, bilim adamlarının farklı fikirlere sahip olduğu bir konu üzerinde çalışmaktır. Araştırma yapmanın bir nedeni de bilim insanlarının çalışmalarına katkı sağlamak ve belki de yeni fikirler üretmelerine teşvik etmek için onlarda merak uyandırmaktır (Örneğin; onların çalışmaları üzerinde "etki" oluşturmak ve sonunda onlar aracılığı ile toplum için önem taşıyan bir problemin çözümüne katkı sağlamak gibi). Neredeyse herkes canlı şeylerle ilgilenir, çünkü gözlem yoluyla başarılı bir bilimsel ya da teknolojik sonuca ulaşmak biyoilham içeren çalışmalarda diğer çalışmalara göre daha kısa olabilir. Biyoilham, bilimsel etki ile ilgilenen kişilerin çalışmalarında tarih boyunca karlı ve yapılmaya değerdir.

Yumuşak Madde

Daha geniş kapsamlı bakıldığında, biyoilham önem ve ilgi açısından hızla büyüyen bilim alanına doğrudan liderlik etmektedir. Bu da özellikle bilim malzemesi olan yumuşak maddedir [6]. Bilim malzemeleri "sert" olan maddeler (sağlam, şekil ve işlev olarak sağlam, dirençli) arasında büyür. Birçok biyolojik sistem (bazı kemikleri de içeren) yumuşaktır. Örneğin; elastik ve kolayca zedelenenler gibi maddeler sert maddelere göre daha az keşfedilmiştir ve biyoloji ile alakalı ya da alakasız bilimde nispeten keşfedilmeyen icat ve keşiflerde şans sağlar. Kas, tendon, bağ dokusu, sinirler, zarlar gibi yumuşak maddeler kullanan organizmaların çeşitli yollarını anlamak için geniş bir yelpaze oluşturur.

Biyoilham Çalışma Örnekleri

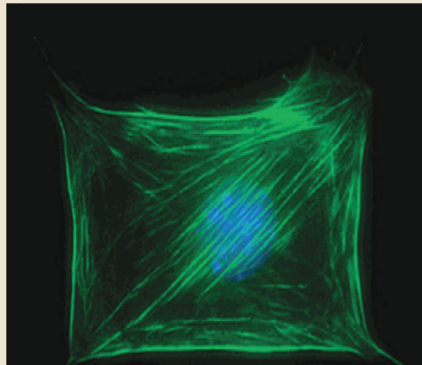
Biyoilhamın önemli bir rol oynadığı birçok alan keşfedildi. Bunlardan bazıları aşağıdadır:

Kendiliğinden bir araya gelen tek katmanlı yapılar

Biyolojik sistemlerin önemli bir özelliği bölümlere ayrılmış olmasıdır. Birçok farklı sebeplerle; organeller, hücreler, dokular, organlar ve birçok diğer yapılar, dokular ve yapısal filmlerle çevrilidir. Kendiliğinden bir araya gelen moleküler fosfolipitler oluşturan göz alıcı, çift katmanlı yapılardan (hücre ve organellerin boyutlarını tanımlayan prototip duvarla çevrilenler) ilham alınmıştır [7]. Çift katmanlı lipitler ile çalışmak yerine, yüzeyleriyle güçlü bir şekilde işlevsel n-alkil grupları yüzeyinde tuttuğu için yapı olarak daha basit, birçok metal ve metal oksitleri yüzeyinde oluşturan tek katmanlı filmler üzerinde çalışılmıştır. Kendiliğinden bir araya gelen tek katmanlılar (self-assembled monolayer-SAMs) gibi sistemin bu türlerinin kimyası şimdilik bilinmemektedir [8]. Onları biyoilham içerisinde kısmen ilginç yapan özelliklerinden biri biyoloji boyunca yaygın olan karmaşık organik yapıları (kendiliğinden bir araya gelen ve kovalent olmayan sentezler) oluşturma ile alakalı fikirlere dayanmasıdır.

Kendiliğinden bir araya gelen ve kovalent olmayan yapının biyolojik sistemlerde yaygın olması onların sentetik stratejinin diğer türleri için değerli bir temel olduğunu gösterir. Buna ek olarak biyoloji -SAMs ve diğer biyoilham yapıları- klasik kovalent yapılar tarafından üretilebilenlerden daha büyük yapılar oluşturabilen, kendiliğinden bir araya gelen yapılar oluşturabildiğini öğretir. Böylece moleküller ve makroskobik madde arasında bir köprü oluşturur.

SAMs 'tasarım malzemelerinin' erken örnekleri arasındadır: Bunlar kolayca sentezlenen yapıların farklı malzemeleri, malzemenin makroskobik alandaki kullanışlılığı ve yapı üzerindeki bina-blokları ve düşük-molekül ağırlıklardır. Hücreler ve yüzeyleri arasındaki doğanın etkileşimini anlamaya katkı sağlamlarına rağmen, bu yapıları temelde biyolojik olmayan işlevlere çalışmak için kullanılmıştır[10]. SAMs; nemlendirme, bağlılık, yağlama ve şarj tünelleme çalışmaları için yüzey biliminde standart alt katmanlar haline gelmiştir. Uyarlamadaki basitliği ve moleküler-seviye yapısının istisnai olarak kolay kontrol edilebilmesi sebebiyle SAMs'in yüzey bilimi üzerindeki etkisi büyüktür. Yüzey bilimi ve malzeme biliminden çok önce, elbette tüm bu fikirler biyolojide geliştirilmiş ve gösterilmiştir [11-13].



Şekil 1. Kendiliğinden bir araya gelen tek katmanlı yapılar, araştırmalarda yeni ufuklar açan biyoilhamlı yapılardır. [9] numaralı kaynağın izniyle kullanılmıştır.

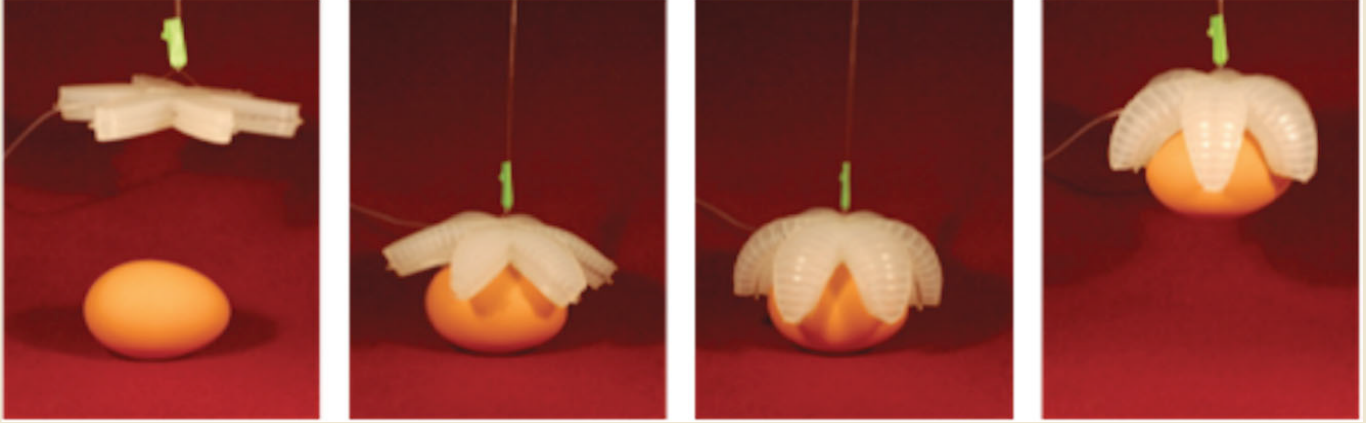
Mikroakışkanlar ve kağıt teşhisleri

Bütün, hatta en küçük organizmalar; hayatta kalma ve çoğalma için gerekli aktif biyomoleküller seviyesine sıvı

pompalamasıyla moleküllerin pasif difüzyonuna katkı sağlar [14]. Büyük hayvanlarda sıvı, kılcıl damarlarla bağlı arterler ile damarlar arasında pompalanır. Küçük kanallardaki sıvıların ilginç bir özelliği mikroakışkanların gelişiminde uyarıcı olmasıdır ve kanallardaki sıvıların hareketleri kılcıl damarlara benzeyen bir boyuttadır (Şekil 4) [15,16]. Teşhis sisteminde biyolojiden çok potansiyel değeri olduğu için aktif olarak mikroakışkan sistemlerin gelişmesi ile ilgilenilmiştir. Aslında oluşturulan üretim yöntemleri, doğrudan SAMs şekillerinde geliştirilen malzemeler ve işlemlerden türemiştir [17,18]. Yüzeyleri topografik özelliklerle çevrelenmiş polidimetilsiloksanlar üzerine dayanan bu yöntemler, mikroişlemci bakımının, mikro dökümün, ilk mikroakışkan çalışmalarının ve yumuşak baskının temelini oluşturmaya başlamıştır [19]. Bu çalışmanın temeli kısmen biyobenzerlik olsa da, biyolojik işlevle ilgili birçok çalışmaya ilham vermiştir [20]. Teşhis sistemlerinin ve biyoanalitik yeni sınıfların temeli olarak mikro kanallar sisteminin gelişmesi bu çalışmanın en aktif alanıdır. Elastomere dayalı mikroakışkan sistemlerin uygulanması -biyoanalitik sistemler, teşhisler, çip sistemindeki organ sisteminin bir kısmı için- hala geliştirilmektedir [21]. Bu çalışmanın temel noktası, daha geniş organizmalardaki sıvı akışından ilham alınan PDMS'ye dayalı mikroakışkanlardır. Kolay üretiminin yanında mikroakışkan kanalların biyolojik mikrokanallara benzerliği; herhangi bir laboratuvar da kolay üretilebilme güvencesi, sıvı akışını anlayabilme rehberliği ve gelişimi ile ilgili fikirler sağlar. (PDMS evrensel olarak uygun olmasa da birçok diğer elastomer mikroakışkan yapmak için kullanılabilir). Böylece, biyoilham biyoanalitik kimyadaki yeni alanlara, malzeme bilimine ve akışkan fiziğine çok önemli katkı sağlamıştır.

Yumuşak robotlar

Biyoilhamın diğer bir güçlü alanı neredeyse hiç değişim gerektirmeden mikroakışkan sistemler için geliştirilmiş yöntemlerde kullanılan yumuşak robotlardır (soft robotics) (Şekil 5) [22,23]. SAMs ve mikroakışkanlar için önemli olan daha



Şekil 2. Bir deniz yıldızı nesnelere kavramak için kendi uzantılarını kullanamaz ama yapabildiği mekanik yapılara ilham kaynağıdır [22].

geniş boyutlar ve yapılar bu alandaki ilginç sebebidir. İki gözlemci hızla gelişen bu alana başlama ilhamını gerçekleştirmiştir. Büyük memelilerin özelliklerinin ve hareketlerinin benzetilmesi ve çoğaltılmasına dayanan yumuşak robotlar iyi kurulmuş ve özellikle üretimde önemli bir alandır. Bu robotlar genel olarak metalden üretilmiş ve hidrolik ve elektrikle harekete geçmektedirler. Büyük güç ve yüksek hız gerektiren görevler için tasarlanmış; ağır, pahalı ve insanlar için zararlıdır. Yumuşak robotlardaki temel çabalar deniz yıldızlarından ilham alma üzerine dayanmış ve basit kısıcılar yapmak için tasarlanmıştır. PDMS ile birleştirilmiş mikrokannaların pnömomatik biçimdeki deniz yıldızı kısıcılarının çalışma mekanizması tasarlanmıştır. Böylece şişkinlik anizotropik seviyede sonuçlanmıştır [24].

Pnömomatik biçimde aktif olan yumuşak robotlar oldukça hızlı bir şekilde gelişmişlerdir. Çünkü yumuşak yapı elde etme yöntemleri, PDMS'ye dayalı mikroakışkanların oldukça iyi geliştirilmesidir. Biyoloji benzetilmeye uygun birçok ilginç yapı ve doğal harekete geçirme örnekleri ve birçok yumuşak organizma örnekleri sağlar (Şekil 6). Biyolojik sistemlerde harekete geçirme elbette kaslara dayalıdır. Yumuşak robotlar ile ilgili hiçbir mekanizmayı anlamaya gerek duymadan biyolojik sistemlerdeki bazı hareket ve işlevleri benzetebilirler. Belli seviyelerde mekanizma alakasızdır ve bu alanın hızlıca gelişmesine sebep olan şey mekanizma değil benzetme işlevidir.



Şekil 3. Kalamar, ahtapot, mürekkep balığı gibi kafadan bacaklılar avcılardan saklanmak için rengini değiştirme yeteneğini kullanırlar [23].

Gelecek

Sınırsız fırsatlar

'Biyoilham' onlarca yıldır canlı organizmaların karşılaştığı birçok problemi muazzam çözümler sunan bir alan olduğunu ispatlamış ve buna devam edeceğinin garantisini vermiş bir bilim dalıdır. Biyoloji, karmaşıklığın ve onun işlevinin hemen hemen tüm seviyelerinde örneklenmeyi sağlar. İşte size birkaç örnek:

Moleküler seviyedeki yapılar

Biyoloji, bilimin taklit etmeye bile yaklaşmadığı küçük boyutlardaki moleküllerin, moleküler topaklanma ve çok moleküllü yapıların işlevlerinin karmaşıklığını örneklenmeyi sağlar. Motorlar, kaslar, hücre zarları ve enzimatik katalizler birçokları içinde dört önemli örnektir [25]. (i) Çark hareketindeki moleküler topaklanmalar, biyolojik ve insan yapımı sistemler arasındaki ayrımlardan biridir [26]. Çarklar, saatlerden kamyonlara kadar her yerde kullanılırlar. Biyolojide çarklı motorlar, mikroorganizmaların yüzmesi için kamçıları hareket ettirirler.

Dikkat çekici olan yapısal benzerlikteki topaklar, tüm hücrelerde iyonların pompalanması ve adenosin trifosfat (ATP) sentezi için kullanılır. Bu biyolojik yapılar, fikrin prensiplerinin gösterimini sağlar ki bu da özellikle nanoboyuttaki yapıların hücre zarına gömülmesi için kullanılarak moleküler boyutta çark hareketinin gerçekleşmesini mümkün kılar. Moleküler boyuttaki sistemleri taklit etmek zor gibi gözükse de büyük bir meydan okumanın örneğidir [27]. (ii) Kas, geniş aralıktaki organizmalarla şaşırtıcı bir şekilde benzer bir yapıya sahiptir. Topaklanmalar miyozin ve aktin iki temel protein olmak üzere birinden diğerine 'yürüyen' çeşitli tipteki yapılar oluştururlar ve en son hareket işe yarayarak ATP'nin hidrolizi için gereken serbest enerjiyi sağlar. (iii) Çok işlevli hücre zarları, biyolojik zarlar tipik olarak yarı-iki-boyutlu, kendiliğinden bir araya gelebilen yapıların oluşmasıyla basitleştirilir [3,28]. Bunlar genellikle düzenli ve sıraya girmiş glikoproteinleri ve glikolipitleri tasvir eder. Bu da hücrelere ve organellere sınırlar sağlar ve daha da ilginç hareketli ve heterojen bileşenleri katalitik, tanımlama ve sinyal gönderme ile karmaşıklık sağlar.

Hangi tanımlama kullanılırsa kullanılsın, biyolojik zarlar seçici veya pasif taşıma, aktif tanıma ve pompalama, enerji depolama, bilgi aktarımı gibi geniş çaptaki işlevleri ile hizmet ederek biyotanımlama sistemlerinin keşfedilmesini sağlar. (iv) Katalizörler, biyolojide hem metabolizmanın hem de bilgi işlenmesinin gerçekleştirilmesi ve kontrol edilmesi moleküler katalizörler

tarafından gerçekleştirilir. Enzimler, biyolojide en geniş çeşitliliğe sahip katalitik yapıdaki sınıftır ve kimyasal katalizörlerle benzer gibi düşünülürler. Aslında basit katalizörlerden daha fazladır. Enzimlerin hücredeki işlevleri bakımından en önemli ve kritik özelliği, katalitik aktivitelerinin hücre içerisindeki diğer moleküllerin ürünleri ve reaktifleri tarafından değiştirilebilir olmasıdır. Bu da hücrenin iç düzeninden ve aktivitesinden sorumlu metabolik ağların anahtar kısmını oluşturur. Enzimler ayrıca şekil seçici olduklarından tepkimelerdeki moleküler seçiciliğin bütünlüğünü sağlarlar. Kataliz yaşam için olduğu kadar kimyasal işlemler için de kritiktir. Katalizörlerin sulu çözültideki çalışmalarının tasarımı ve daha da önemlisi birbiri arasında bağ kuran molekülleri üretmesi için ağ oluşturulmasında biyokimyacılar, sentetik kimyacılar ve biyomimetik kimyacılar arasında muhakkak karşılıklı bir ilgi vardır. Biyolojik katalizin çalışılması, biyolojik olmayan katalizörlerin anlaşılması için de önemli bir fırsattır.

Mezo- ve makroboyutlu yapılar

Hayvanlar aleminde kollar, bacaklar, kanatlar ve yüzgeçler gibi herbiri çevresi ve görevi açısından eşsiz avantajlara sahip sayısız harekete geçiren örnekler vardır [38]. (i) Vücut tasarımları, örneğin hamam böcekleri, birçok işi birarada yapabilen böceklerdir. Son derece zorlu yolları küçük yanklar açarak geçebilme yeteneğine sahiptirler. Arama ve kurtarma çalışmalarında kullanılmak üzere bu böceklerden ilham alınmış birçok araç vardır. Bir diğer örnek de kanguruların bacaklarının tendonlarında enerji depolaması olağanüstü bir hızda ve çeviklikte koşmalarını ve yönlerini bulmalarını sağlar. Bu da çevre çalışmalarında, verimli enerji modelli hareket etme yeteneğini kullanan bir diğer ilham alınan örnektir [29]. (ii) Sensör sistemleri, hayvanlar için sensörler yemeğin bulunması, saklanması, tehlikenin farkına varılması ve çevrenin öğrenilmesi açısından oldukça önemlidir. Biyolojik sensörlerin birçok özelliği taklit edilerek çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Örneğin; elektronik köpek burnu olarak isimlendirilen reseptörler, polimer matrikslerin içindeki kokulu maddelerin şekil-seçici olarak

moleküler tanınmasına olanak sağlarlar [30]. Biyolojide devasa çeşitlilikteki gözleri taklit etmek burnu taklit etmekten daha zordur. Yarıiletken teknolojiye dayalı sistemlerde retinanın hassasiyetinin artırılması mümkündür. Ancak farklı yapıdaki canlılar için farklı gözler üretmek oldukça zordur ve hala anlaşılammış kısımları mevcuttur [31].

Dokunma, polimerik matrikslerdeki kapasitif hissetmeye bağlı olan elektronik sistemleri araştırır [32–34]. Daha karmaşık işlemlere sahip modellerin denge, yüksek hassasiyette tayin, iç algı ve sesle yer bulma gibi yetenekler hala çözülememiş zorluklardır. (iii) Renk ve kamuflaj, hayvanlarda renkler farklı amaçlar için kullanılırken kamuflaj ortadan kaybolmak için kullanılır. Pigmentler optik metamazemeler neredeyse inanılmayacak yetenekteki ahtapotları taklit ederek hem çevresini algılamasını hem de gelecekteki işler için ilham olmaya devam eder [23, 35].

Bilgi

Bilginin toplanması, saklanması, işlenmesi ve yorumlanması bilimin kalbidir [36]. Bilgiyi izlemek şaşırtıcı uygulamalar bulmaya olanak sağlar. Biyoloji bilgiyi işlemek için birçok strateji kullanır [37]. Biyoloji büyük ölçüde belli sebeplere dayanarak dijital hesaplama tarafına geçti. Canlı organizmalardaki bilginin saklanması ve işlenmesi biyoilham alınmış araştırmalar için haklı olarak ilginç, zengin ve henüz keşfedilmemiş bir alan sağlar.

Enerjinin kullanımı

Birçok biyolojik sistem biyomimetik anlamında benzer sentetik sistemlerden daha verimli enerji kaynaklarıdır [38]. Bir midilli büyüklüğündeki sert bir robot, daha az iş yapmak için normal bir midilliden 100 kat daha fazla enerji kullanır. Neden? Mekanik, insanlar tarafından yapılan ısı motorlarının çalışmasının termodinamiğinin anlaşılmasına rağmen biyolojik sistemlerin verimliliğini kısıtlanması anlaşılammıştır. Göreceli ağırlık bu farka bir katkıda bulunmaktadır ama enerji depolayan ve üreten farklı startajilere sahip organizmalar, biyoloji ve mekanik sistemlerde farklı yollarda ilerleyenler, biyolojik ve insan yapımı sistemlerde güç ve dayanıklılık için

gerekenleri empoze eden farklı kısıtlamalar gibi birçok çeşiti vardır. Termodinamik açılarından organizmalara bakıldığında mekanik işleri yapabilme kapasitesi hala bilimin olgunlaşmamış bir alanıdır ve organizmalardan daha işlevli ve etkili aletler yapmak için hala erken olduğu düşünülmektedir [39]. Tüm uygulamalar için enerjinin verimli kullanılması çok önemli olduğundan pratik bir kullanımın ana maddesidir.

Tepkime ağları

Temel, yaşayan biyolojik yapılardan hücrelerin en önemli özelliklerinden biri, metabolizma ve kopyalama gibi sentetik tepkimelerin oluşturduğu olağanüstü karmaşık yapıları inşa etme ve yönetme kabiliyetidir [40]. Bunların çalışması için gereken anahtarın hücredeki katalizörlerin başlangıç malzemesini ve diğer anahtar tepkimelerdeki ürünleri oluşturma yeteneğidir [41, 42].

Bu yapılar nasıl çalışır ve neden bu kadar kararlıdır? Bu sorular bir anlamda 'Yaşam nedir?' sorusunun başka bir çeşitidir. Anlama ve taklit etme, metabolizmanın karmaşık kinetik yapıları, biyoilham alınmış araştırmalar için olağanüstü iddialı bir hedefdir.

Kovalent ve kovalent olmayan sentez

Moleküler işlemlerin basit ama biyolojide en önemli bir örneği moleküler tanıma ve kovalent olmayan kendiliğinden biraraya gelmedir. Sentetik organik kimya yönlendirilmiş kovalent bağlar için olağanüstü karmaşıklıkta deneysel yöntemler geliştirir. Biyoloji de kovalent bağlar sentezler ama fosfolipit zarların oluşumu, proteinlerin katlanması, DNA ve RNA'daki bazların eşleşmesi gibi çoğu önemli işlem genellikle kovalent olmayan kimyaya dayanır. Moleküler tanıma genellikle hidrojen bağları gibi basit etkileşimleri kullanarak suyla ilgisi olmayan çözücülerde gerçekleşir. Suda ve su bazlı ortamlarda gerçekleşen moleküler tanıma daha karmaşık olan iyonik veya dağıtıcı etkileşimlerle oluşur ve henüz tam olarak anlaşılammıştır [43].

Coğrafi ve teknik farklar arasındaki köprü: Biyoilham

Bilimin taklit tipleri

Akademik kimya, Avrupa ve Amerika'da gelişmiş ve karmaşıklığı araştırma eğiliminde olmuştur. Birçok alanda yapılan ve en aşırı, en karmaşık ve en pahalı olarak nitelendirilen araştırmaları tamamlamak için kaynakların az olması hem akademik hem de diğer laboratuvarlar için zordur. Bu nedenle özellikle gelişmekte olan dünyadaki bilimsel sistemli laboratuvarlar yapıları, tipleri ve nesnelere taklit etme yoluna gitmiştir. Biyotaklit genellikle karmaşık araçları kullanmak yerine en basit stratejiyi takip eder. Bilim adamlarının biyolojik malzemelerle yakın ve derin ilişkide olması dışarda gözlem yaparak zaman harcamasından daha faydalıdır.

'Kullanma' ile 'anlama' nın

kombinasyonu: Bilim, mühendislik ve Pasteur dörtlü kuramı

Biyoilham, düşük kaynaklı bilimsel sistemlere ilginç fırsatlar sunar. Avrupalı/Amerikalı akademik model tipik olarak yeni bir iş üretmekte veya sosyal bir probleme çözüm bulmak yerine kendi ürünü olan bilimsel makalelere odaklanır [44]. Çünkü biyoilham biyolojiye dayanır ve biyoloji biyoilham araştırma basamağından uygulamasına kadarki çalışmanın işlevidir [45]. Dörtlü diyagram bir topluluk için önemli olan problemleri biraraya getirme potansiyeline sahiptir ve biyoilham araştırmalar da yeni çalışmalarla Pasteur'un bu dörtlü diyagramına yaklaşırlar.

Sonuç

Biyoilham alınmış araştırma bilimin özüne dönmedir. Yani canlı organizmaların olağanüstü işlevlerini karakterize etmek için gözlemlemek ve bu işlevleri taklit etmeye çalışmaktır.

Biyoloji bir işlevdir

Biyoilham alınmış araştırmanın başlama noktası aslında farklı kimya sınıflarından başlar. Moleküler yapıya, karmaşık senteze veya yüksek çözünürlüklü spektroskopiyeye odaklanmaz. Darwin evriminin binlerce

türü tarafından gerçekleştirilen işlevlerin gözlemine, bu işlevlerin işleyişinin anlaşılmasına ve biyoloji tarafından herhangi bir kısıtlama olmaksızın bu işlevlerin ilişkisini taklit etmeye dayanır. Biyoilhamlı bilim, bu nedenle moleküllerin ve tepkimelerin bilimi olan kimyanın paradigmasını otomatik olarak kabul eder ve moleküler bilim, biyoloji, anatomi, fizyoloji, zooloji, robot bilimi, ayırma bilimi ve diğer alanlar gibi her zaman kimyanın temel bilimsel problemleriyle ilişkisi olmayan kimyanın diğer çeşitlerine taşır [44].

Biyoilham etkili fikirlerin sınırsız kaynağıdır

Birçok farklı çeşitte organizma bulunduğundan biyolojide problem çözmek için birçok farklı strateji de başarılı bir şekilde ispat edilmiştir. Biyoilham da bir strateji olarak yeni fikirler geliştirmek için sınırsızdır (Şekil 7). Biyolojinin tecrübelerinin tavsiyelerine göre hiçbirşey basit değildir. Bir yüzü tanıma, yüzme veya hayvan otlatma gibi yüksek seviyedeki hareketler işlev olarak basit gibi görünebilir ama yapının içine ve işleyişine bakıldığında tüm bu hareketlerin tabaka tabaka birbiri arasında karmaşık etkileşimleri olduğu görülür.

Basitlik

Taklit etme çoğu zaman doğru bir şekilde tekrarlamaktan daha kolaydır. Örneğin; uçak yapmak için kuşun nasıl uçtuğunu veya dokunmak için kalamın nasıl düşündüğünü bilmek zorunda değilsiniz. Bu nedenle biyoilham hala genç bir alandır ve basit olmak için iyi bir seçimdir.

Biyoilham kültürler arası bir alandır

Biyoilhamın etkisi doğayı gözleyerek problemlerin kaynağına inmesiyle başlar. Birçok ilginç olayla biyoilhamın ilhamı insan gözüne ihtiyaç duymadan doğrudan gözlenebilir. Biyoilhamlı stratejilerden çıkan birçok problemin basitliği farklı tipteki hayvanlara, balıklara, bitkilere, kuşlara veya birçok mikroorganizmalara sahip farklı kültürel ve jeolojik bölgelere biraraya gelir. Bu da o bölgelerin doğal avantajlarına sahip olmasını sağlar.

Son değil yeni şeyler yapmak

Biyoilham, kimya biliminde kendine bir yer edinmiştir ancak tam olarak merkezine yerleşmemiştir (Belki de böylesi daha iyidir!). Özellikle hem akademik hem de endüstriyel alanlarda bilimsel ve teknolojik sistemlerin gelişmesi hala devam etmektedir. Bu da biyoilham sayesinde her zaman yapılacak yeni şeyler olduğunu gösterir.

Kaynaklar

1. Hawking S. 1996 A brief history of time. New York, NY: Bantam Books.
2. Rigden JS. 2002 Hydrogen: the essential element. Cambridge, MA: Harvard University Press.
3. Vogel S. 2000 Cats' paws and catapults: mechanical worlds of nature and people. New York, NY: WW. Norton Company, Inc.
4. Kaneko K. 2006 Life: an introduction to complex systems biology. Berlin, Germany: Springer.
5. Barabási A-L. 2009 Scale-free networks: a decade and beyond. Science 325, 412–413. (doi:10.1126/ science.1173299)
6. Hamley IW. 2013 Introduction to soft matter: synthetic and biological self-assembling materials. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Inc.
7. Zhang S. 2003 Fabrication of novel biomaterials through molecular self-assembly. Nat. Biotechnol. 21, 1171–1178. (doi:10.1038/nbt874)
8. Love JC, Estroff LA, Kriebel JK, Nuzzo RG, Whitesides GM. 2005 Self-assembled monolayers of thiolates on metals as a form of nanotechnology. Chem. Rev. 105, 1103–1169. (doi:10.1021/cr0300789)
9. Brock A, Chang E, Ho C-C, LeDuc P, Jiang X, Whitesides GM, Ingber DE. 2003 Geometric determinants of directional cell motility revealed using microcontact printing. Langmuir 19, 1611–1617. (doi:10.1021/la026394k)
10. Chen CS, Mrksich M, Huang S, Whitesides GM, Ingber DE. 1997 Geometric control of cell life and death. Science 276, 1425–1428. (doi:10.1126/ science.276.5317.1425)

11. Kumar A, Biebuyck HA, Whitesides GM. 1994 Patterning self-assembled monolayers: applications self-assembled monolayers: applications in materials science. *Langmuir* 10, 1498–1511. (doi:10.1021/la00017a030)
12. Laibinis PE, Nuzzo RG, Whitesides GM. 1992 Structure of monolayers formed by coadsorption of two n-alkanethiols of different chain lengths on gold and its relation to wetting. *J. Phys. Chem.* 96, 5097–5105. (doi:10.1021/j100191a065)
13. Fan FRF et al. 2002 Charge transport through self-assembled monolayers of compounds of interest in molecular electronics. *J. Am. Chem. Soc.* 124, 5550–5560. (doi:10.1021/ja017706t)
14. Truskey GA, Yuan F, Katz DF. 2009 Transport phenomena in biological systems. New York, NY: Prentice Hall.
15. Whitesides GM. 2006 The origins and the future of microfluidics. *Nature* 442, 368–373. (doi:10.1038/nature05058)
16. Squires TM, Quake SR. 2005 Microfluidics: fluid physics at the nanoliter scale. *Rev. Mod. Phys.* 77, 977–1026. (doi:10.1103/RevModPhys.77.977)
17. Maxwell EJ, Mazzeo AD, Whitesides GM. 2013 Paper-based electroanalytical devices for accessible diagnostic testing. *MRS Bull.* 38, 309–314. (doi:10.1557/mrs.2013.56)
18. Nemiroski A, Christodouleas DC, Hennek JW, Kumar AA, Maxwell EJ, Fernandez-Abedul MT, Whitesides GM. 2014 A universal mobile electrochemical detector designed for use in resource-limited applications. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 111, 11 984–11 989. (doi:10.1073/pnas.1405679111)
19. Xia YN, Whitesides GM. 1998 Soft lithography. *Annu. Rev. Mater. Sci.* 37, 551–575. (doi:10.1146/annurev.matsci.28.1.153)
20. Dittrich PS, Manz A. 2006 Lab-on-a-chip: microfluidics in drug discovery. *Nat. Rev. Drug Discov.* 5, 210–218. (doi:10.1038/nrd1985)
21. Huh D, Matthews BD, Mammoto A, Montoya-Zavala M, Hsin HY, Ingber DE. 2010 Reconstituting organ-level lung functions on a chip. *Science* 328, 1662–1668. (doi:10.1126/science.1188302)
22. Ilievski F, Mazzeo AD, Shepherd RF, Chen X, Whitesides GM. 2011 Soft robotics for chemists. *Angew. Chem. Int. Ed.* 50, 1890–1895. (doi:10.1002/anie.201006464)
23. Morin SA, Shepherd RF, Kwok SW, Stokes AA, Nemiroski A, Whitesides GM. 2012 Camouflage and display for soft machines. *Science* 337, 828–832. (doi:10.1126/science.1222149)
24. Shepherd RF, Ilievski F, Choi W, Morin SA, Stokes AA, Mazzeo AD, Chen X, Wang M, Whitesides GM. 2011 Multigait soft robot. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 108, 20 400–20 403. (doi:10.1073/pnas.1116564108)
25. Alberts B, Johnson A, Lewis J, Morgan D, Raff M, Roberts K, Water P. 2014 Molecular biology of the cell. New York, NY: Garland Science.
26. Kinbara K, Aida T. 2005 Toward intelligent molecular machines: directed motions of biological and artificial molecules and assemblies. *Chem. Rev.* 105, 1377–1400. (doi:10.1021/cr030071r)
27. Eelkema R, Pollard MM, Vicario J, Katsonis N, Ramon BS, Bastiaansen CWM, Broer DJ, Feringa BL. 2006 Molecular machines: nanomotor rotates microscale objects. *Nature* 440, 163. (doi:10.1038/440163a)
28. Simons K, Ikonen E. 1997 Functional rafts in cell membranes. *Nature* 387, 569–572. (doi:10.1038/42408)
29. Autumn K et al. 2002 Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 99, 12 252–12 256. (doi:10.1073/pnas.192252799)
30. McQuade DT, Pullen AE, Swager TM. 2000 Conjugated polymer-based chemical sensors. *Chem. Rev.* 100, 2537–2574. (doi:10.1021/cr9801014)
31. Goldsmith TH. 1990 Optimization, constraint, and history in the evolution of eyes. *Q. Rev. Biol.* 65, 281–322. (doi:10.1086/416840)
32. Lotz JC, Olthuis W, Veltink PH, Bergveld P. 1997 The mechanical properties of the rubber elastic polymer polydimethylsiloxane for sensor applications. *J. Micromech. Microeng.* 7, 145–147. (doi:10.1088/0960-1317/7/3/017)
33. Sun J, Keplinger C, Whitesides GM, Suo Z. 2014 Ionic skin. *Adv. Mater.* 26, 7608–7614. (doi:10.1002/adma.201403441)
34. Kramer RK, Majidi C, Wood RJ. 2011 Wearable tactile keypad with stretchable artificial skin. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1103–1107. (doi:10.1109/ICRA.2011.5980082)
35. Yu C et al. 2014 Adaptive optoelectronic camouflage systems with designs inspired by cephalopod skins. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 111, 12 998–13 003. (doi:10.1073/pnas.1410494111)
36. Webster F. 2006 Theories of the information society. New York, NY: Routledge.
37. Shannon CE. 1998 A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.* 27, 379–423. (doi:10.1145/584091.584093)
38. Gaesser GA, Brooks GA. 1975 Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *J. Appl. Physiol.* 38, 1132–1139.
39. Seok S, Wang A, Chuah MY, Hyun DJ, Lee J, Otten DM, Lang JH, Kim S. 2014 Design principles for energy-efficient legged locomotion and implementation on the MIT Cheetah Robot. In *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, pp. 1–13. (doi:10.1109/TMECH.2014.2339013)
40. Soh S, Byrskas M, Kandere-Grzybowska K, Grzybowski BA. 2010 Reaction-diffusion systems in intracellular molecular transport and control. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 49, 4170–4198. (doi:10.1002/anie.200905513)
41. Koshland D, Goldbeter A, Stock J. 1982 Amplification and adaptation in regulatory and sensory systems. *Science* 217, 220–225. (doi:10.1126/science.7089556)
42. Kholodenko BN. 2006 Cell-signalling dynamics in time and space. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 7, 165–176. (doi:10.1038/nrm1838)
43. Snyder PW, Lockett MR, Moustakas DT, Whitesides GM. 2013 Is it the shape of the cavity, or the shape of the water in the cavity? *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 223, 853–891. (doi:10.1140/epjst/e2013-01818-y)
44. Whitesides GM. 2015 Reinventing chemistry. *Angew. Chem. Int. Ed.* 54, 3196–3209. (doi:10.1002/anie.201410884)
45. Stokes DE. 1997 Pasteur's quadrant: basic science and technological innovation. Washington, DC: Brookings Institution Press.