

MOLEKÜLER ROBOTLAR

Nanomakineler İçin Bugün ve Gelecek

Küçük makineler er geç yapılacaktır, fakat onları yapmakta kullanılan strateji ve hizmet edecekleri amaçların planlaması gereklidir. Biyoloji, parlak bir şekilde geliştirilmiş bir dizi örnek sunar: Yaşayan sistemlerde, nanomakineler vardır ve çok karmaşık sıra dışı fonksiyonlar gerçekleştirirler. Çarpıcı olan, bu nanometre ölçekli makinelerdeki stratejiyle insan ölçekli makinelerdeki ne kadar farklı olduğudur.

Biyoloji bilimi, biliminsanlarının moleküler robotlar hakkındaki karmaşık fantezilerini daha da geliştiriyor.

Nanoteknolojinin sunulan meyveleri arasında, küçük makineler hep göze çarpmıştır. Büyük makineler (uçaklar, denizaltılar, robot kaynak makineleri, ekme kızırtıcısı, fırınlar...), şüphesiz ki yararlıdır. Bir kimse bu cihazların tasarımında kullanılan fikirleri alıp, bunları çok küçük boyuttaki makinelere uygulayabilseydi, ne olurdu?

İki küçük makinenin tasarlanması (birisi mevcut makinelerle benzer, diğeri tamamen yeni) büyük ilgi kaynağı olmuştur. Birincisi nanoölçekli bir denizaltıdır. Ölçüleri bir metrenin sadece birkaç milarda biri kadardır (10 ya da 100 atomun birkaç katı uzunluğu kadar) ve tartışma bu makinenin tıpta damarlar içinde dolaşp hastalıklı hücreleri bularak onları yok edebileceği konusunda yardımcı olabileceği şeklinde sürer.

İkincisi (bilinen adıyla üretici) daha radikal bir fikirdir. Bu makinenin gözle görülebilir (büyük) bir benzeri yoktur (bu makinenin pratik olduğunun düşünülmesindeki önemli bir gerçek). Bu yeni bir tür makine (evrensel bir fabrikatör) olabilir. Herhangi bir yapıyı, kendisi de dahil, atomik ölçüde "al ve yerleştir" şeklinde yapabilir: Nanoölçekte bir set kol ayrı ayrı atomları kendi çevrelerinden alıp, onları gitmeleri gereken yere yerleştirecektir. Bu görüş, toplumu illebet neredeyse hiçbir maliyeti olmayan bir şekilde birkaç saat içinde bir televizyon seti ya da bir bilgisayar yaratabilecek küçük makinelerle değiştirmeyi tasarlamaktadır. Bunun bir de karanlık tarafı vardır. Üreticinin kendi kendini kopyalaması potansiyeli, onun, gri yapışkan (gray goo) olarak adlandırılması olasılığını artırmıştır: Çok sayıda nano yapımcılar kendilerinin sayısız kopyalarını yapıp, bu esnada da dünyayı tahrip ederler.

Nano ölçekli makineler fikri mantıklı mıdır? Yapılabilirler mi? Eğer yapılabilirlerse büyük ölçekli kuzenlerinin etkin bir şekilde küçültülmüş benzerleri olabilirler mi? Yoksa değişik prensiplerle mi çalışacaklar? Gerçekten dünyayı tahrip ederler mi?

Bu ilginç soruları cevaplamaya daha sıradan bir soru sorarak başlayabiliriz: Makine nedir? Birkaç tanım arasından tasarlanmış bir cihaz" olarak seçtik. İleri gidersek, makinenin bir tasarımı vardır, bazı işlemler izlenerek üretilir, güç kul-

lanır, üretilirken kullanılan bilgiye göre çalışır. Makinelerin, insan tasarımı ve arzusunun birer ürünü olarak düşünülmesinin aksine, neden bir fonksiyonu gerçekleştiren karmaşık bir moleküler sistem de aynı zamanda bir makine olarak düşünülmesin, hatta bu tasarımdan çok değişimin bir ürünü olsa dahi?

Erekbilimin (teleology) yayınları bir yana (bu geniş tanıma kabul eder), nanoölçekli makineler çok çeşitli ve karmaşık olarak yaşayan hücrelerin fonksiyonel moleküler bileşenleri olarak vardır. Örneğin protein ya da RNA molekülleri, molekül yığınları ve organeller. Nanoölçekli makinelerin var olup olmadığına ilişkin soru, biyologlar tarafından yıllar önce olumlu bir şekilde cevaplanan bir sorudur. Şimdiki soru şudur: Gelecekteki nanomakineler için kullanılacak en ilginç tasarımlar nelerdir? ve eğer varsa bunlar ne gibi riskler yaratacak?

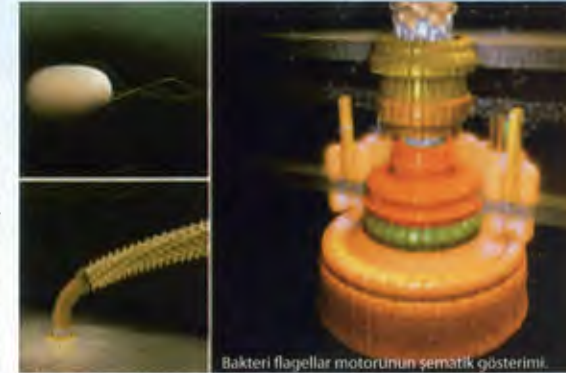
Hücreler, bilinen insan boyutundaki makinelerle benzer gibi görünen bazı moleküler makineler içerir: Bir bakterinin zarına monte edilen bir rotatif motor, bir mili döndürerek, yüzeyel olarak bir elektrik motoruna benzer. Diğerleri tanıdıklarımıza daha az benzer: Bir RNA ve protein bileşimi (ribozom), bir üretim hattı benzeri işlemci proteinler üretir. Bazı moleküler makinelerin büyük makinelerle tipatıp benzerleri yoktur: Bir protein (topoizomeras), çift zincirli DNA sargısını açar. Hücre içerisinde organellerin imal edilmesindeki yöntem, ekonomi ve organizasyon için bir modeldir ve dünyanın tahrip edilmesi ile ilgili olarak: Biyolojik hücreler topluluğu bir anlamda, zaten dünyayı tahrip etmiştir. Hayat, başlamadan önce, gezegen şu anki halinden çok farklıydı. Yüzeysel, inorganik minerallerden oluşuyordu; atmosferi karbondioksit yönünden zengindi. Yaşam, hızla ve tamamen gezegeni yeniden şekillendirdi. Saf yüzeyi mikroorganizmalarla, bitkilerle ve onlardan sağlanan organik bileşikler kirlendi, karbondioksiti

atmosferden büyük oranda uzaklaştırdı ve çok büyük miktarda oksijen enjekte etti. Hücreler (moleküler nanomakineler) kendi kendini kopyalayan birikimleri yüzeyi ve gezegenin atmosferini tamamen değiştirdiler. Biz bu değişimi normal olarak "dünyayı tahrip etme" olarak düşünmeyiz, çünkü biz şu anki koşullarda yaşayabiliyoruz, fakat dışardan bir gözlemci tam tersini düşünebilir.

O zaman mesele, ne nanoölçekli makinelerin varlığı (zaten varlar) ne de önemli olup olmadıkları sorusu değildir (sık sık kendimizi onların önemli olduklarını göstergeleri olarak düşünmüyoruz). Fakat asıl mesele, tasarımda yeni fikirler için nereye bakmamız gerektiğidir. Büyük bir otomobil fabrikasının montaj hattı mı yoksa bir *E.coli* hücresinin içeriği hakkında mı düşünüyor olmalıyız? Biyolojik nanomakineleri (özellikle kendini kopyalayan biyolojik sistem olan hücreleri) şu anda etrafımızı çevreleyen büyük makineler üzerinde modellenen nanoölçekli makinelerle karşılaştırarak işe başlayalım. Biyolojik strateji nasıl çalışır ve varolan makinelerin nanoölçekli çeşitlerine dayanan bir stratejiye ya da üretici tarafından tasarlanan yeni bir tip stratejiyle nasıl kıyaslanır?

Moleküler Kopya Makineleri

Hücre, kendi kendini kopyalayan bir yapıdır. Kendi çevresinden molekülleri içine alarak bunları bazılarını yakıt olarak, diğerlerini kendini oluşturmak, devam ettirmek ve korumak için kullanır. DNA, üretim ve bir kuşaktan diğeri-ne bilgi aktarımında gerekli bilgiyi depolar. RNA'nın bir türü (haberci RNA ya da mRNA) bu bilgi için geçici bir nüsha



Bakteri flagellar motorunun şematik gösterimi.

gibi iş görür ve ribozomlara hangi proteini yapacaklarını söyler. Membranlar, çalışan bölümlerin etrafını çevreleyen bölmelere, hücre içerisine ve dışarısına molekül akışını kontrol eden ve hücrenin çevresini hissedici tutucu moleküller sağlarlar. Proteinler, (sıklıkla diğer moleküllerle birlikte çalışarak) her şeyi hücrenin içinde inşa ederler ve gerektiği zaman parçalarını hareket ettirirler.

Bölümlerini yapmak için hücrenin belirlediği strateji (ve böylece kendini kopyalamak ve devamını sağlamak) iki fikre dayanır: Birincisi büyük, lineer moleküller yaratmak için içerik olarak apaçık, tek bir kimyasal işlem (polimerizasyon) kullanmaktır. İkincisi, kendilerini, fonksiyonel üç boyutlu yapılar içerisine kendiliğinden katan moleküller inşa etmektir. Bu iki kısmı strateji, zor ve karmaşık üç boyutlu tut ve yerleştir şeklinde bir üretimi gerektirmez: Basitçe boncukları (örneğin aminoasitler) bir gerdanlığa (bir polipeptid) dizer ve gerdanlığın kendisini bir makineye (bir protein) dönüştürmesine izin verir. Böylece sonuç için gerekli bilgi, fonksiyonel üç boyutlu yapı, boncuklar sırası şeklinde kodlanır. Hücre içindeki en önemli üç tane molekül sınıfı (DNA, RNA ve proteinler) bu stratejiyle yapılır; proteinler daha sonra hücre içindeki diğer molekülleri yaparlar. Birçok durumda proteinler aynı zamanda kendiliğinden diğer moleküllerle de birlikte çalışarak (proteinler, nükleik asitler, küçük moleküller) daha büyük fonksiyonel yapılar oluştururlar. Kompleks, üç boyutlu yapılan inşa etmek için bir strateji olarak bu lineer sentez metodu ve ardından çeşitli seviyelerde moleküller kendi imal etme metodu, belki de yararlılığı bakımından rekor seviyesindedir.

Hücre, katalizörlerin ve diğer fonksiyonel türlerin (sensörler, yapısal elementler, pompalar, motorlar) bir birliğindedir. Böylece hücre içindeki çoğu nanomakine, moleküller katalizörlerdir. Bu katalizörler hücrenin çoğu işini yaparlar: Daha sonra kendi kendini, hücreyi saran esnek örtüye dönüştüren lipidleri oluşturur; kendini kopyalama için gerekli olan moleküller bileşenleri yapar; hücre için gerekli olan gücü üretir ve hücrenin güç tüketimini ayarlar, arşivsel ve çalışan bilgi deposunu inşa eder ve iç çevrenin uygun çalışma parametrelerinde kalmasını sağlar.

Hücre tarafından kullanılan müthiş moleküller makinelerin arasında dört tanesi ilgi çekicidir:

Ribosomal RNA (rRNA) ve proteinden oluşan Ribozom, bir anahtardır: Bilgi ile işlev arasındaki kesişim noktasında durur (nükleik asitler ile proteinler arasında).

da). Bu, sıra dışı karmaşık bir makinedir ve mRNA'da bulunan bilgiyi alarak bu bilgiyi protein inşa etmek için kullanır.

Kloroplast, bitki hücrelerinde ve algelerde bulunur ve güneş ışığından fotonları toplayarak bunları, hücrenin yaşamsal faaliyetlerinde kullanacağı gücü sağlayacak, hücre içinde depolanabilen kimyasal yakıtı üretmek için kullanır. Kloroplast, yaşam ilk ortaya çıktığında, suyu atmosferi oldukça kirleten oksijene dönüştürmüştür: Yaşamımızın bağlı olduğu madde ilk başta hücrenel ışık haddesinin bir atık ürünüdür.

Mitokondri, güç istasyonudur: Hücrede yer alan organik moleküllerin kontrollü yanması işlemini yürütür (tipik bir örnek: glukoz) ve sistem için güç üretir. Elektrik motorlarını çalıştırmak için kablolardan elektronların pompalanmasının yerine hücre içinde difüzyon ile hareket eden ATP molekülleri üretir ve bunlar birçok biyolojik reaksiyon için çok önemli katkıda bulunan elemanlardır.

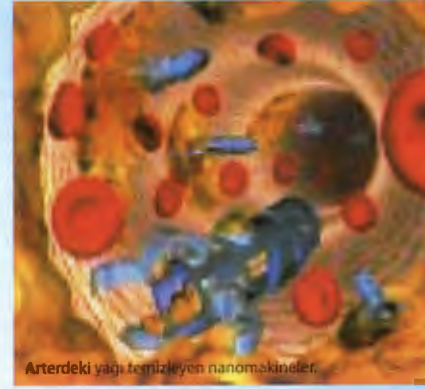
Bakterinin flagellar motoru, belirli fakat kısmen ilginç bir nanomakinedir. Çünkü insan ölçekli motorlara çok benzer. Flagellar motoru, flagellayı döndüren dönme hareketini sağlayan ve birçok bakteri hücrelerinin zarında yer alan yüksek yapılı bir protein agregatıdır. Bunun bir millî vardır ve aynen bir elektrik motoru ile bir motorun armatürü gibi millin etrafında bir yapı bulunur. Flagellar motoru ile elektrik motoru arasındaki benzerlik bunun dışında, büyük oranda asılsızdır. Flagellar motoru, hareket eden manyetik alanları oluşturmak için elektrik akımını kullanarak çalışmaz; bunun yerine, moleküllerin şeklinin değişmesi için ATP'nin bozulmasını kullanır ki, bu

da karmaşık bir moleküler tetikleyici ile birleştiğinde protein milinin dönmelerini sağlar.

İnsan Ölçekli Makineleri Taklit Eden Nanomakineler

Hücrenel nanomakinelerin zarif etkinliğine, icat ettiğimiz daha büyük makinelerin küçük kuzenlerini yaratarak yaklaşabilir miyiz? Küçük, elektronik olarak fonksiyonel cihazların üretilmesinde mikro üretim sıra dışı başarılı bir teknoloji olarak gelişmiştir (transistörler ve çiplerin diğer bileşenleri gibi). Bu tekniklerin hareketli parçaları ile birlikte basit makinelere uygulanması (mekanik osilatörler ve hareket edebilen aynalar) teknik olarak başarılı olmuştur. Bu çok konuşulan mikroelektromekanik sistemlerin gelişimi (MEMS) hızla ilerlemektedir. Ancak makinelerin fonksiyonları halen ilkindir ve bunlar nano değil mikrodur. Gerçek ilk nano ölçekli MEMS (NEMS ya da nanoelektromekanik sistemler) daha geçtiğimiz birkaç yılda ve sadece deneysel olarak yapılmıştır.

Hareketli parçalı nanocihazların üretiminde birçok ilginç problem baş belası olmuştur. Çok önemli bir tanesi sürtünme ve yapışmadır. Çünkü küçük cihazların yüzeyinin hacmine oranının çok büyük olması (hem iyi-hem kötü) bu problemin büyük cihazlara oranla küçülmüş için daha fazla önemli olmasını sağlamıştır. Bu problemlerin bazıları er geç çözülecektir, fakat şimdi bunlar çok zor teknik problemler meydana getirir. Şüphesiz ki kompleks mikromakineler ve nanomakinelerin insan ölçekli makineler üzerinde modellenmesi konusundaki ileri doğru yol alacağı ancak



Arterdeki yağ temizleyen nanomakineler.

bellirli bir pratik amaç için çok miktarda nanomekanik cihazların üretilebilmesi için katetmemiz gereken daha çok yol vardır. Nanomakinelerin insan ölçekli makinelere benzermesi gerekir diye bir neden de yoktur.

Bu sistemler kendini kopyalayabilir mi? Şu an, herhangi bir boyut ya da türde kendini kopyalayan makinelerin nasıl yapılacağını bilmiyoruz. Geçmiş biyolojik çalışmalardan, yaşayan bir hücre içinde kendini kopyalamaya devam edecek minimum karmaşıklık hakkında bir şeyler biliniyor: Kendini kopyalama için 300 genden oluşan bir sistem yeterlidir. Bu rakamı bize daha bildik gelen bir türde mekanik makinelere ve kendi ihtiyaçlarını karşılayan, kendini kopyalayan makine sistemlerine nasıl dönüştüreceğimiz konusunda pek az fikir vardır. Açıkça biyolojik olmayan sistemlerin kendini kopyalaması yönünde birkaç adım attık ve diğer problemler gölge yapmaktadır. Otomatik bir nanomakineyi çalıştıracak güç nereden gelecek? Nanoölçekte elektrik soketleri yoktur. Hücre, kendi işini yürütebilmek için belirli bileşenlerin kimyasal reaksiyonlarını kullanır; Nanoölçekli makineler için benzer bir strateji geliştirilmeyi beklemektedir. Kendini kopyalayan bir nanomakine, bilgiyi nasıl depolar ve kullanır? Biyoloji, DNA'ya dayanan bir strateji sergilemiştir, dolayısıyla bu yapılabilir ama eğer birisi farklı bir strateji isterse, nereden başlayacağı açık değildir.

Üretici, tut ve yerleştir kollarıyla nanomakinelerin üretilmesi ve kendini kopyalama ile ilgili birçok zorluğu bunları göz ardı ederek elimine eder: Her seferinde bir atom yerleştirerek herhangi bir kompozisyon ve yapıyı gerçekleştirebilecek bir makineyi yerleştirmek, üretimin birçok can sıkıcı görünümünü dışarı atacaktır. Bununla birlikte bir

kimyacınn bakışıyla üretici çalışmaz gibi görünebilir. Tehditlerin sadece ikisini göz önüne alalım. Birincisi üreticinin kollarıdır. Eğer bunlar, herhangi bir beceriyle atomları tutup alabilecekseler, atomlardan daha küçük olmaları gerekir. Fakat kollar, atomlardan yapılmalıdır ve böylece tutup yerleştirecekleri atomlardan büyüktürler (aletlerin yardımı olmadan parçaklanmazla iyi bir saat yapmaya çalıştığınızı hayal edin). İkincisi

atomların doğasıdır. Atomlar, özellikle karbon atomları, komşularına sıkıca bağlanırlar. Bir atomu yerinden çekmek için büyük enerji gerekecektir (enerji kaynağı için bir problem) ve yerine konduğunda büyük enerji açığı çıkaracaktır (soğutma problemi). Daha önemlisi, bir karbon atomu hemen hemen her şeyle bağ oluşturur. Üreticinin kollanının nasıl üretileceğini hayal etmek zordur. Öyle ki atomları başlangıç materyalinden ayırıp çekerken yapılmayacaklar (saatiziml imal ederken başka saatten sökülmüş parçaları kullandığınızı ve tüm bu parçaların bir yapışkan ile kaplı olduğunu düşünün; parçaları tamamen ayırabilseniz bile bunlar elinize yapışacaktır).

Nanodenzaltı Olmayı?

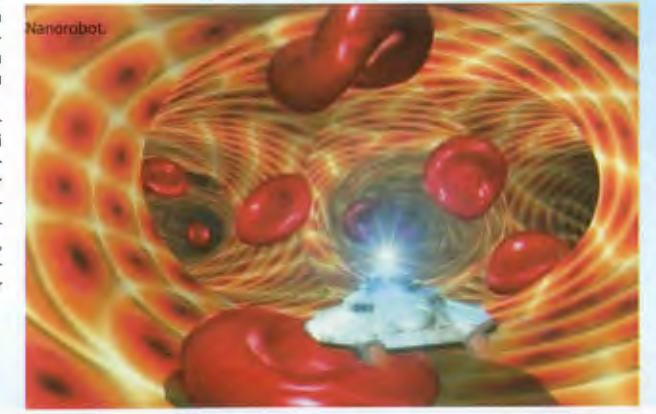
Eğer bir nanodenzaltı imal edilebilseydi, çalışacak mıydı? Bir insan ölçekli denizaltı, bir dönen pervane (dönerek suyu geriye, denizaltını ileri iter) ve istikametini kontrol eden hareketli yüzeylerin bir kombinasyonu ile suyun içinde kolayca hareket eder. Yüzen bakteri, gerçekte flagella dediğimiz, daha çok bükülebilir spiraller ya da kamçılara benzer ve pervanenininkine benzer bir

şekilde hizmet eden yapıları kullanarak hareket eder. Bunlar genellikle amaçlı bir yol izlemez, daha çok etrafa öyle bir hareketle atılır ki eğer her şey iyi giderse bir gıda kaynağına doğru ilerler. Birisi bir pervane yapılırsa bile nanoölçekli nesnelere için yeni bir ciddi problem ortaya çıkaracaktır: Su molekülleri tarafından rasgele darbe almak. Bu su molekülleri nanodenzaltından çok değil ama daha küçük olacaktı ve nanoölçekte termal hareketleri hızlı olacaktı. Bunlarla çarpışma bir nanoölçekli nesneyi hızla etrafa zıplatır (Brownian hareketi diye adlandırılan bir işlem) fakat bu rasgele yönlere olur: Amaçlı bir yola sokmak için harcanan çabalar hızla hareket eden su molekülleriyle amansız çarpışmalarla engellenecektir. Nanoölçekli seyrüseferciler, kabuklarına çarpan Brownian fırtınalarına karşı koymak durumunda kalacaklardı. Yaklaşık 100 nanometre ölçekli gemilerde birçok seyahatin varış noktasına bırakılacağı, çünkü küçük aracın yönlendirilmesi muhtemelen mümkün olmayacaktır. En azından bir denizaltı-nininkine benzer bir mantıkta olmayacaktır. Can nehrinde içindeki hücreler (bir nanodenzaltından 10 ya da 100 kat daha büyük nesnelere) bu nehir içinde kendilerini yönlendirmezler; Sadece bu nehir içinde yuvarlanırlar. Olsa olsa bir nanodenzaltı genel bir istikamet seçmeyi ümid edebilir fakat belirli bir varış noktasını değil. Nanoölçekli aygıtların yapılabileceği ya da yönlendirilebileceğinden bağımsız olarak, eğer yapılabilseler hastalığı tespit etmeyi gerektiren karmaşık görevlerde işe yaramayacaklardı.

Vücudtaki hastalıklı hücreleri (örneğin kanser hücreleri) bulup yok edecek "küçük denizaltı" stratejisinin bölümleri, avlarını bulma üzerinde odaklanmak zorunda olacaklardı. Bunu yaparken muhtemelen, şu an vücudumuzdaki bağışıklık sistemini taklit etmek zorunda kalacaklardı. Bir hücrenin "normal", "patojen" ya da "kanseri" olduğunu tanımlamak sıra dışı şekilde karmaşık bir



Flagellum.



Nanorobot.

İşlemdir. Bunun için bağışıklık sistemi hakkında tam bir bilgi gerekir (bunu oluşturan milyarlarca belirli hücreyi de ihtiva eden). Birçok kanser hücresinin üzerinde onların tehlikeli olduğunu jkaz eden basit işaretler yoktur. Birçoğunun karakteristiklerinde normal hücrelerden büyük farklılıkları yoktur. Kanseri avlayıp öldürecek bir küçük denizaltı, güvertesinde küçük bir teşhis laboratuvarı taşımak zorunda kalacak ve bu laboratuvar modelleme aygıtları, kimyasallar, reaksiyon hazneleri ve analitik aygıtlara ihtiyaç duyacağından artık bu denizaltı küçük olmayacaktır. Bu aygıt çalışırken aynı zamanda enerji de gerektirecektir. Bağışıklık sistemi hücreleri diğer hücrelerle aynı besinleri kullanır; küçük bir denizaltı da muhtemelen aynısını yapmak zorunda kalacaktır.

Dizayn Ötesi Değişim

Küçük makineler er geç yapılacaktır, fakat onları yapmakta kullanılan strateji ve hizmet edecekleri amaçların planlaması gereklidir. Biyoloji, parlak bir şekilde geliştirilmiş bir dizi örnek sunar: Yaşayan sistemlerde, nanomakineler vardır ve çok karmaşık sıra dışı fonksiyonlar gerçekleştirirler. Çarpıcı olan, bu nanometre ölçekli makinelerdeki stratejiyle insan ölçekli makinelerdekini ne kadar farklı olduğudur.

Nanomakinelerin yapımının ne kadar mükemmel olduğunu düşünürken iki kısıtlayıcı strateji ile karşılaşınz. Birincisi varolan makineleri alıp (hücrede varolan) onları incelemek ve öğrenmektir. Şüphesiz ki bu sistemlerden bizim amaçlarımızı hizmet edecek ve tamamen yeni fonksiyonlu olacak diğerlerinin kavramlarından ve prensiplerinden bir şeyler alacağız. Genetik mühendisliği çoktan bu yolda yürümeye başlamıştır ve kimyanın yeni bir türünün gelişimi, protein ve nükleik asitler olmayan moleküler sistemlerde biyolojik prensipleri kullanmamıza olanak sağlayacaktır. İkincisi bir sıyrıktan başlayarak bağımsız olarak temel yeni tür nanosistemler geliştirmektir. Biyoloji, fonksiyonel nanomakinelerin üretimi ve sentezi için pratik bir vasıta yapmıştır ve diğerlerinin de yapılamayacağına inanmak için bir neden yoktur. Fakat bu yol çetin olacaktır. Etrafımızı çevreleyen makinelere bakıp büyük ölçekte kullanılan işlemlere benzer işlemler kullanarak bunların nanoölçekli versiyonlarını imal etmeyi başarmayı beklemek genellikle pratik olmayacaktır ve birçok durumda mümkün olmayacaktır.

Makine ile üretimin ve kaynakla birleştirilmenin nanometre ölçüsünde kar-

şılıktan yoktur ya dahut da elektromagnetlerle manyetik alanları oluşturmanın ya da bir sıvı içinde düz bir hatta geçen işlemlerin karşılığı yoktur. Basit mekanik nanoaygıtların yapımına olanak veren elektronik aygıtların tasarlanması teknikleri şüphesiz yapılabilecektir ancak bunlar sadece yapabilecekleriyle sınırlıdır.

Üreticinin rüyası, bu sayısız güçlüğün üstesinden gelebilecek gibi görünen baştan çıkarcı çekiciliktedir. Bu çekicilik asılsızdır: Gerçekten çok mecazi olarak daha caziptir ve bir mucize ümidinden daha az olasılıklı bir problem çözümdür. Nanomakinelerin üretimi ve işleviyle ilgili engeller gözönüne getirilirse, bunların üretimi için yeni sistemler en sonunda ilkel biyolojik sistemlerine benzeyecektir. Eğer değişimi dizayn edersek bu göreceğimiz olağanüstü bir meydan okuma olacaktır. En basit canlı hücrenin taklit edilmesi şoke edici bir başan olacaktır.

Öyleyse biyolojik nanomakineler çizginin sonu mudur? Bunlar varolabilecek en iyi derecede kullanılan yapılar mıdır ve değişim, en iyisine ulaşmak için tüm olasılıkları sıralamış mıdır? Bu soruya genel bir cevabımız yoktur. Harvard Üniversitesi'nden Jeremy R.Knowless, bir enzimin (triose fosfat; somerese ya da TIM) "mükemmel" olduğunu öne sürmüştür: Belirli bir reaksiyon için bu enzimden daha iyi katalize eden başka bir katalizör olamaz. Pek çok enzim ve enzimden daha karmaşık tüm yapılar için alternatifler keşfetmeye hiçbir çaba harcamadık.

Biyolojik yapılar su içinde ve pek çoğu kısıtlı sıcaklık bölgelerinde ve tuz konsantrasyonlarında çalışır. Genellikle elektrigi iyi iletmez (kloroplast ve mitokondri gibi bazıları etrafındaki elektronları büyük bir bilgelikle hareket ettirir). İkili bir hesaplama ve iletişim yürütmezler. Belirgin olarak mekanik yönden güçlü değillerdir. Böylece, eğer nanomakineler, biyolojik olmayan çevrede başarılı olarsa daha iyi birçok fonksiyon türü icat edilmek zorundadır.

Bu gri yapışkanın tüm bu kıyamet günü senaryosundan ne öğrendik? Eğer nanomakinelerin bir zarar varsa bu, kendini kopyalamada yatmaktadır. Kendini kopyalayan bir sistem olmak için üretim ve enerji açısından gerekli tüm malzemeleri kendi çevresinden toplayabilmek ve kendini yapmak için gerekli tüm bilgiye sahip olmak zorundadır. Aynı zamanda kendinin bir kopyasını yapabilmek için gerekli tüm parçaların montaj ve imalini yapabilmelidir (ya da montajına müsaade edebilmeli). Biyo-

loji, tüm bu problemleri çözmüştür ve kendini kopyalayan biyolojik sistemler (patojenik bakterilerden kanser hücrelerine) bize birer tehliktir. Bilgisayar sistemlerinde bitlerin dizgileri (bilgisayar virüsleri), bedensel nesnelere olmaları karşın, aynı zamanda en azından büyük bir baş belasıdır, fakat bize sadece dolaylı olarak tehliktir.

Eğer yeni bir sistem (herhangi bir sistem) çevresinde mevcut malzemeleri kullanarak kendini kopyalayabilirse bu bir ilgi nedeni olacaktır. Fakat şu an biyolojik olmayan bir sistemde kendini kopyalamanın yeniden üretiminden ne kadar uzakta olduğumuzu yeteri kadar biliyoruz. Bence üreticiye dayanan bir imalat çalışır bir strateji değildir ve bu nedenle ilgi konusu değildir. İleriyi görebilen gelecek için gri yapışkandan korkacak bir şeyimiz yok. Eğer kuvvetli kendini üreten mikro (ya da belki de nano) yapılar er geç türeyecekse, bunlar muhtemelen ilkel bakteriler kadar karmaşık kimyasal sistemler olacaktır. Benzer herhangi bir sistem hem inanılmaz bir başan hem de dikkatli bir inceleme nedeni olacaktır. Tehdit, çıldırıcı üreticilerden değil, halen hayal edilemeyen, kendini katalize eden sistemlerden gelecektir.

Dolayısıyla biyoloji ve kimya, mekanik mühendislik ders kitabı değil, cevaplar için bakmamız gereken yönü gösteriyor (ve bu yön aynı zamanda kendini kontrolsüz olarak çoğaltan organizma ve aygıtlarla ilgili korkularımızı doğrulayan yöndür). Kendini kopyalayan sistemleri ve onları "canlı" yapan sistemlerin karakteristiklerini düşünürken, bilgeliğin en üst seviyelerinde başanlı olan dizaynlar ve stratejileri sunan biyolojiyle başlanmalıdır. •



Kan dolaşımında nanomakineler.