

MOLEKÜLER HABERLEŞME VE NANOAGLAR

Barış Atakan

*Elektronik ve Haberleşme Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Urla, İzmir, Türkiye, 35430
e-mail:barisatakan@iyte.edu.tr*

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Moleküler haberleşme, nanoağlar, nanomakine.

Nano ve biyo teknolojilerdeki olağanüstü gelişmeler çok basit işlem, iletişim veya algılama yapabilen mikro ve nanometre ölçekli boyutlara sahip nanomakinelerin gerçekleştirilmesini olanaklı hale getirdi. Nanomakinelerin böylesine küçük boyutları ve bu boyutlarda çalışabilme yetenekleri bir çok yeni nanoteknoloji uygulamasının da önünü açtı. Örneğin, bir nanotıp uygulamasında bir grup nanomakinenin vücuda zerk edilmesi sureti ile kanserli hücrelerin anında tespiti ve yok edilmesi mümkün olabilmektedir. Bununla birlikte, nanomakinelerin çok küçük boyutları bu uygulamalarda güvenilirlik ve kontrol edilebilirlik problemlerini de beraberinde getirdi. Örneğin, kanser hücrelerini tespit edip yok eden nanomakineler güvenli bir biçimde kontrol edilemezlerse kanserli hücreler yerine vücudun sağlıklı hücrelerini yok etmeleri kaçınılmazdır. Ne var ki; güvenilirlik ve kontrol edilebilirlik problemleri nanomakinelerin kendi aralarındaki haberleşme ve koordinasyonu ile aşılabilmektedir. Örneğin, birbirleri ile iletişim kurmayan nanomakinelerin kullanıldığı bir uygulamada nanomakinelerin senkron şekilde çalışarak bir görevi yapabilmeleri mümkün değilken, haberleşen nanomakineler senkronizasyon problemini aşarak aynen bir lojik devre gibi çalışabilmektedirler. Nanomakinelerin oluşturduğu lojik devrelerde (burada nanomakineler genetiği değiştirilmiş bakteriler olabilir) nanomakineler arası iletişim aynen bir mikro işlemcinin hafıza birimleri arasındaki iletişim gibi çok önemlidir. Bu koordinasyon ve haberleşme nanomakinelerin bir nanoağ oluşturmasını sağlar. Daha da önemlisi iletişim heterojen nanoağların koordinasyonunu sağlayarak oldukça sofistike yeni uygulamaların doğmasına ve bu sayede dizayn alternatiflerinin artmasına yardımcı olur. Literatürde nanomakineler arasındaki iletişim için düşünülebilecek en önemli paradigmalardan birisi moleküler haberleşme paradigmasıdır. Bu bildirinin amacı moleküler haberleşme ve moleküler haberleşme ile gerçekleştirilen nanoağları tanıtmaktır.

I. GİRİŞ

Kuşkusuz gelişen nanoteknolojilerin en göze çarpan meyvesi çok basit işlem, algılama, ve hareket yeteneklerine sahip nanomakinelerdir. Var olan ve henüz dizayn aşamasında bulunan nanomakineler kimyasal olarak sentezlenen moleküler makineler, nano-ölçekli bileşenlerden oluşan elektromekanik makineler, biyolojik olarak değiştirilmiş yaşayan hücreler ve hücre bileşenleridir. Yapısal ve fonksiyonel çeşitliliklerine rağmen nanomakineleri iki ana gruba ayırmak mümkündür. Bir grup var olan elektromekanik

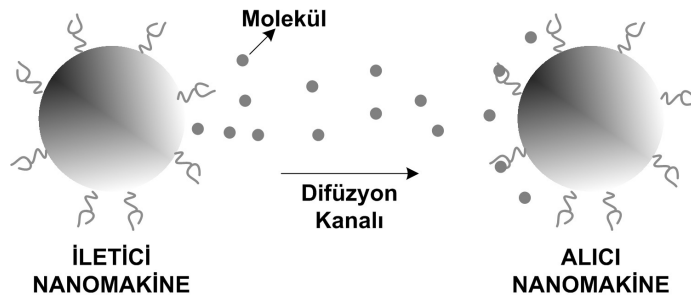
makinelere taklit eden nanomakineler diğere grup ise doğada bulunan moleküler motor, algılayıcı gibi biyolojik fenomenleri taklit eden nanomakinelerdir [1]. Aslında doğada nanomakineler bulunmaktadır ve doğanın vazgeçilemez parçalarıdır. Örneğin, bir bitki hücresinde bulunan kloroplast optik anten olarak çalışarak solar enerjiyi soğuran bir nanomakine olarak düşünülebilir. Mitokondri hücrenin enerji ihtiyacını karşılamak için organik moleküllerin kontrollü olarak yakılmasını sağlayan bir nanomakinedir. Bakterilerde bulunan flagellar motor bakterinin hareketini sağlayan belli bir mimariye sahip proteinlerden oluşan bir nanomakinedir. Bunların yanında nanotüpler de birçok nano-ölçekli sistemin dizaynı için kullanılabilir. Örneğin karbon nanotüp tabanlı oda sıcaklığında çalışabilen transistörler ve tek bir elektron ile dijital anahtarlama yapabilen elektronik devreler ve nano-ölçekli hafıza elemanlarının dizaynı ve üretilmesi olanaklıdır. Çok küçük boyutları ve bu boyutlarda işlem yapabilme yetenekleri nanomakineleri bir çok yeni medikal, endüstri ve askeri uygulamanın vazgeçilmez bir parçası haline getirmiştir. Bu uygulamalardan bazı örnekler aşağıda verilmektedir.

- Biyomedikal alanında belli sayıda haberleşen nanomakine etkili ilaç teslimatı sağlayabilir. Örneğin, inorganik nanotüplerden oluşan ağ belli miktardaki ilacı tüplerin aside duyarlı hareket potansiyelleri (acidity-sensitive action potential) sayesinde tümörlü hücrelere ulaştırabilir [2].
- Endüstride nanomakineler nano-ölçekli vakumlu temizlik aracından su ve yiyeceklerde kalite kontrol yapan nano-ölçekli araçlara kadar birçok uygulamaya sahip olabilir. Örneğin, kirli sudaki bütün toksin maddelerden arınmayı sağlayabilecek nano-ölçekli toplayıcılar mümkündür [3].
- Askeri alanda biyolojik ve kimyasal saldırıları önceden haber verebilen nano-ölçekli moleküler algılayıcılar gözlemlenen ortamdaki çok küçük kimyasal ve biyolojik değişimleri hemen fark edebilme yeteneğine sahiptirler [4].

Tek bir nanomakine yukarıda belirtildiği gibi çok basit algılama, işlem, ve hareket yeteneklerine sahipken, birbirleri ile konuşabilme yeteneğine sahip belli sayıdaki nanomakinelerin oluşturduğu bir nanoağ karmaşık görevleri etkili bir şekilde yerine getirebilecek muhteşem bir yeteneğe kavuşabilir. Örneğin, doğal bağışıklık sisteminde B-hücresi ve T-hücresi (B-cell ve T-cell) olarak isimlendirilen beyaz kan hücreleri vücuda giren bir patojeni yok etmek için birbirleri ile haberleşirler. Bu haberleşme doğal bağışıklık sistemine inanılmaz bir yetenek kazandırır öyle ki bu yetenek sayesinde bağışıklık sistemi vücuda giren yabancı maddeleri öğrenerek bu maddeleri etkili bir şekilde yok etmeyi sağlayabilecek genetik şekillere sahip hücreleri üretebilir [5]. Aslında bağışıklık sistemi hücreleri gibi organizmayı oluşturan bir çok hücre ve bakteri gibi tek hücreli canlıların hemen hemen hepsi birbirleri ile haberleşir. Bu haberleşme moleküler sinyallerin yani moleküllerin buldukları ortama bırakılması ve algılanması ile gerçekleşir. Örneğin bakteri kolonileri buldukları ortamın durumuna göre haberleşerek koloninin büyümesini kontrol edebilirler. Eğer ortam besin açısından zengin ise bakteriler arasındaki haberleşme kolonideki çoğalmayı tetiklemeye yarar. Doğadakinine benzer şekilde nanomakineler arasındaki iletişim ve koordinasyon ihtiyacını gidermek için moleküler haberleşme büyük bir potansiyele sahiptir. Bu potansiyeli açığa çıkarmak için moleküler haberleşme konusunda yapılacak çalışmalar önümüzdeki yıllarda hayatımıza doğrudan girebilecek birçok uygulamanın gerçekleştirilmesi için çok büyük önem taşımaktadır. Bu bildiride moleküler haberleşmenin temel prensipleri tanıtılmaktadır.

II. MOLEKÜLER HABERLEŞME

Moleküler haberleşme nanomakinelerin birbirleriyle haberleşmelerini çevrelerine molekül salgılamaları sayesinde olanaklı kılan yeni bir nano-ölçekli haberleşme paradigmasıdır [6][7]. Koku, tat, ışık veya herhangi bir kimyasal durum gibi moleküler bilgiyi paylaşmak için bir bölgeye dağılmış ve moleküler haberleşme kullanan belli sayıda nanomakine nano-ağ olarak öngörülebilir. Figür 1’de görüldüğü gibi moleküler haberleşmede iletici nanomakine tarafından yayılır daha sonra yayılan moleküller ortamda serbest difüzyon ile yayılarak alıcı nanomakinenin alıcılarına yapışırlar. Bu yapışma alıcı nanomakinenin yapışan molekülü difüzyon sayesinde içeri almasını sağlar. Alınan moleküller alıcı nanomakinenin iletici nanomakine tarafından gönderilen bilgiyi anlamasını sağlar [8][9]. Moleküller ve alıcılar arasındaki reaksiyon biyolojideki ligand-alıcı yapışma (ligand-receptor binding) fenomenine benzemektedir. Örneğin biyolojik endokrin sisteminde salgı hücreleri (gland cells) hormon moleküllerini hücreler arası ortama yayarlar, hormon molekülleri difüzyona uğrar ve ortama saçılırlar ve ilgili hücreler tarafından alınırlar. Yayılan hormon molekülünün tipine göre alıcı hücreler hormon molekülünü biyolojik olarak anlamlı bilgiye çevirirler. Bu doğal mekanizma hemen hemen bütün hücreler tarafından kullanılır.



Figür 1. Difüzyona dayanan moleküler haberleşme.

Moleküler haberleşme mevcut haberleşme paradigmalarından çok farklıdır ve moleküler haberleşme sistemlerinin hayata geçirilmesi bir çok yeni zorluğu da beraberinde getirmektedir. Nano-ölçekli vücut ağlarından nano-ölçekli moleküler bilgisayarlara birçok yeni nanoteknoloji uygulamasının hayata geçirilebilmesi için bu zorluklar ile baş edebilecek yeni teori ve tekniklerin geliştirilmesi çok büyük öneme sahiptir. Özetle, bu zorluklar nanomakinelerin çok sınırlı olan algılama, hareket, ve işlem yeteneklerinden ve bilgi taşıyıcısı olarak kullanılan moleküllerin kullanıldığı moleküler haberleşme kanalının çok değişken kanal, sinyal, gürültü, ve yayılma özelliklerinden kaynaklanır. Moleküler haberleşme geleneksel kablosuz haberleşme paradigmaları arasındaki ana farklar Tablo 1’de özetlenmektedir.

	Geleneksel Haberleşme	Moleküler Haberleşme
Bilgi Taşıyıcı	<i>Elektromanyetik dalga</i>	<i>Moleküller</i>
Sinyal tipi	<i>Elektronik ve optik sinyal</i>	<i>Kimyasal sinyaller</i>
Yayılma hızı	<i>Işık hızı</i>	<i>Çok düşük yayılma hızı</i>
Yayılma ortamı	<i>Hava Ortamı</i>	<i>Islak ortam</i>
Kodlanan bilgi	<i>Metin, ses, görüntü</i>	<i>Kimyasal durumlar</i>
Alıcının görevi	<i>Bilgi kodunun çözülmesi</i>	<i>Kimyasal reaksiyonlar</i>

Tablo 1. Molüküler haberleşmenin geleneksel haberleşme paradigmaları ile karşılaştırılması [6].

Literatürde moleküler haberleşme ile ilgili yapılmış çalışmalar iki ana grupta toplanabilir. Bunlardan ilki moleküler haberleşme sistemlerinin dizaynları ile ilgili yapılan çalışmalardır. Bir inceleme (survey) çalışması olan [10]'da bu çalışmalar kapsamlı olarak bulunabilir. İkinci grupta bulunan çalışmalar moleküler haberleşme konusunda yapılan teorik çalışmaları içerir ve bu çalışmalar yine bir inceleme çalışması olan [11]'de detaylı olarak tartışılmaktadır.

II.1. Moleküler Haberleşme Modeli

Moleküler haberleşmede bilgi taşıyan moleküllerin iletici nanomakineden alıcı nanomakineye ulaşmaları serbest difüzyon sayesinde olur. Dolayısıyla moleküler haberleşmenin performansı difüzyon performansı ile çok yakından ilgilidir. Moleküllerin iletici nanomakineden belli bir salgılama hızı (emission rate) ile bırakıldığını düşünürsek moleküllerin iletici nanomakineden x kadar uzakta t anında yarattıkları konsantrasyon $u(x,t)$ aşağıdaki kısmi türevli denklemin belli sınır (boundary) ve başlangıç (initial) koşullarına göre çözümü ile bulunabilir.

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}$$

(1)

Burada D (cm^2/s) moleküllerin difüzyon katsayısıdır. (1)'de verilen kısmi türevli denklem difüzyon denklemi (Fick's diffusion law) ya da ısı denklemi (heat equation) olarak da adlandırılır. Alıcı nanomakinenin ileticiden r kadar uzakta olduğu düşünüldüğünde alıcının çevresinde oluşacak molekül konsantrasyonu $u(r,t)$ olarak verilebilir. Bunun yanında alıcı nanomakinenin çevresindeki molekülleri α olarak verilen bir olasılıkla içe çektiği (absorb) varsayılırsa alıcı nanomakine içindeki molekül konsantrasyonu

$$g(t) = \alpha u(r,t)$$

(2)

olarak verilebilir. Moleküler haberleşmede alıcı tarafından alınan molekül konsantrasyonu kullanılarak iletici ve alıcı nanomakineler arasında bir ikili (binary) kiplenme (modulation) tasarlamak mümkündür [8][9]. Belli bir eşik konsantrasyon değerinden fazla konsantrasyon alıcı tarafından alındığında alıcı ileticinin 1 ikilini (bitini) gönderdiğini düşünür aksi halde 0 gönderdiğini düşünür. Bunun dışında her bir molekülün üzerinde belli sayıda 0 ya da 1 ikili taşımak mümkündür öyle ki; her bir molekülün n tane bilgi ikili ve molekülün kaçınıcı molekül olduğunu gösteren bir dizin (index) taşıdığı düşünülürse bilgi iletim hızı inanılmaz derecede artırılabilir [12].

Moleküler haberleşme çok yeni fakat literatürde hızlı yayılan ve kabul gören bir araştırma alanıdır. Bu alanda yapılan çalışmalar çok yeni nano ve biyoteknoloji uygulamalarının hayatımıza girmesini sağlayabilecek. Moleküler haberleşme biyolojik olarak hayatımızı devam ettirebilmek için milyonlarca yıldır otonom olarak kullandığımız bir mekanizma ve gelecekte hayatımız üzerindeki etkisinin giderek artacağını şimdiden görebilmek çok zor değil.

KAYNAKLAR

- [1] Whitesides, George M. "The once and future nanomachine." *Scientific American* 285.3 (2001): 70-5.
- [2] Tenne, R. "Inorganic nanotubes and fullerene-like nanoparticles." *Nature Nanotechnology* 1.2 (2006): 103-111.
- [3] Savage, Nora, and Mamadou S. Diallo. "Nanomaterials and water purification: opportunities and challenges." *Journal of Nanoparticle Research* 7.4-5 (2005): 331-342.
- [4] Altmann, Jurgen, and Mark Gubrud. "Anticipating military nanotechnology." *Technology and Society Magazine, IEEE* 23.4 (2004): 33-40.
- [5] Farmer, J. Doyme, Norman H. Packard, and Alan S. Perelson. "The immune system, adaptation, and machine learning." *Physica D: Nonlinear Phenomena* 22.1 (1986): 187-204.
- [6] Hiyama, et al. "Molecular communication." *Journal-Institute of Electronics Information and Communication Engineers* 89.2 (2006): 162.
- [7] I Akyildiz, Ian F., Fernando Brunetti, and Cristina Blázquez. "Nanonetworks: A new communication paradigm." *Computer Networks* 52.12 (2008): 2260-2279.
- [8] Atakan, Baris, and Ozgur B. Akan. "An information theoretical approach for molecular communication." *Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems, 2007. Bionetics 2007. 2nd. IEEE, 2007.*
- [9] Atakan, Baris, and Ozgur B. Akan. "On channel capacity and error compensation in molecular communication." *Transactions on Computational Systems Biology X. Springer Berlin Heidelberg, 2008.* 59-80.
- [10] Hiyama, Satoshi, and Yuki Moritani. "Molecular communication: Harnessing biochemical materials to engineer biomimetic communication systems." *Nano Communication Networks* 1.1 (2010): 20-30.
- [11] Nakano, Tadashi, et al. "Molecular communication and networking: opportunities and challenges." *NanoBioscience, IEEE Transactions on* 11.2 (2012): 135-148.
- [12] Freitas, Robert A. *Nanomedicine, volume I: basic capabilities.* Georgetown, TX: Landes Bioscience, 1999.