

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 06.02.2018 <u>Kabul/Accepted</u> 05.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.290340	

Nano iletişim teknolojilerinin biyomedikale katkısı

Mustafa Alper Akkaş*¹

ÖZ

Nano teknoloji biyomedikal alanında birçok yeni çözümler vaat etmektedir. Nano ölçek de, bir nano makinede en temel fonksiyonları yerine getirebilen bir birimdir. Nano makineler arası iletişim, dağıtılmış şekilde nano makinelerin daha karmaşık fonksiyonlarını yerine getirmesine izin verir. Bio-Nano nesnelerin interneti ise, geliştirmek için yeni zorlukların beklediği, verilerin güvenli bir şekilde değiştirilip, işlenip ve biyokimyasal alan içerisinde iletişim kurabileceği aynı zamanda internet ara yüzüne verilerin ulaştırılabileceği bir paradigma-kayması konseptidir. Bu makalede ileri teknoloji ürünleri olan Moleküler Haberleşme ve Bio-Nano Nesnelerin İnterneti, nano makineler arasındaki nano haberleşme temel alınarak anlatılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Nano ağlar, Nano teknoloji, Moleküler Haberleşme, Bio-Nano Nesnelerin İnterneti, Nano Telsiz Duyarga Ağları

Contribution of communication technology to the biomedical field

ABSTRACT

Nanotechnology promise new solutions for several applications in the biomedical field. At the nanoscale, a nanomachine is considered as the most basic functional unit. Communication among nanomachines will allow them to accomplish more complex functions in a distributed manner. The Internet of Bio-Nano Things, stands as a paradigm-shifting concept, where novel challenges are faced to develop efficient and safe techniques for the exchange of information, interaction, and networking within the biochemical domain, while enabling an interface of the Internet. In this paper, the state of the art in molecular communication and Internet of Bio-Nano Things are reviewed to motivate the study of nano communication among nanodevices.

Keywords: Nanonetworks, Nanotechnology, Molecular Communication, Internet of Bio-Nano Things, Wireless Nanosensor Networks

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bolu, Türkiye - alperakkas@ibu.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1959 yılında Nobel ödüllü fizikçi Richard Feynman ‘Aşağıda Oldukça Fazla Yer Var!’ (There’s Plenty of Room at the Bottom!’) başlıklı konuşmasında, eğer nano boyutlarda üretim yapılabilirse birçok yeni keşiflerin doğabileceğini söylemiştir[1]. Feynman konuşmasında, nano ölçekte özel ölçme ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiğini özellikle vurgulamıştır. Feynman’ın bu konuşması nano bilim ve nano teknolojinin başlangıcı kabul edilmektedir.

Feynman’ın konuşmasında üzerinde durduğu konu başlıkları şöyle özetlenebilir:

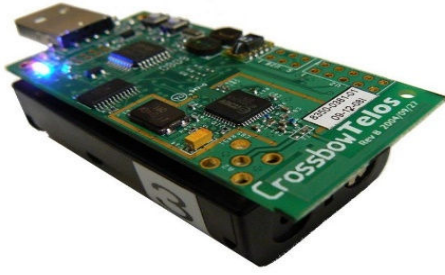
- 24 ciltlik Brittanica Ansiklopedisinin toplu iğne başı kadar büyüklükte bir yere sığdırabileceği,
- Küçük boyutun nasıl tanımlanması gerektiği,
- Küçük boyuttaki bilgi,
- Elektron mikroskopunun daha iyi geliştirilebileceği,
- Fevkalade biyolojik yapıların tasarlanabileceği,
- Bilgisayarların boyut olarak daha da küçüleceği,
- Minyatürleştirmenin buharlaştırma ile de yapılabilmesi,
- Yağlama sorunları,
- Yüzlerce minik el,
- Atomları yeniden düzenleme,
- Küçük bir dünyadaki atomlar

Feynman konuşmasını şöyle bir örnekle bitirmiştir: Bir lisenin öğrencileri bir toplu iğne başına “iyi mi ?” yazısını yazıp, rakip lise öğrencilerine göndermişlerdir. Rakip lise ise “iyi mi?” yazısının i harflerinden birisinin noktası içine “o kadar da değil!” yazısını yazıp geri göndermiştir. Feynman gerçekleşmesini istediği bu düşünceler için farklı düzeylerde yarışmalar düzenlemiş ve kısa sürede istediği hedeflere ulaşan öğrenciye 1000 dolar ödül vermiştir. Bu konuşma; önemli gelişmelerin, hayal gücü geniş, ufku açık insanlar tarafından gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Günümüzde Feynman’ın birçok hayali gerçek olmuştur, fakat daha kat edilmesi gereken çok mesafe vardır.

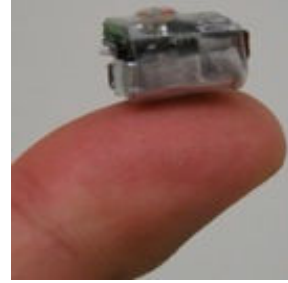
Telsiz duyurga ağları ise Feynman’ın ön gördüğü gibi yıllara göre boyutlarında küçülecek şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Tablo 1 de telsiz duyurga ağlarının boyutlarına göre sıralanması gösterilmektedir. Şekil 1 de gösterildiği gibi 2004 yılında üretimi gerçekleşen TelosB düğümleri 3.20 cm genişlik, 6.55 cm uzunluk, 0.66 cm yüksekliğe sahip iken; 2008 yılında tasarlanan EcoMote ise 1.30 cm genişlik, 1.10 uzunluk, 0.70 cm yüksekliğe sahiptir. 4 yıl gibi kısa bir sürede telsiz duyurga düğümün boyutu üçte birden fazla küçültülebilmektedir. Gelecekte tasarlanması istenen nano düğümlerin ise birçok yönden alt yapısı hazırdır. Tablo 1’de aynı boyut sınıfında olan telsiz duyurga düğümleri aynı ton renkte gösterilmiştir.

Tablo 1. Telsiz duyurga ağlarının boyutlarına göre sıralanması (Comparing mote size for wireless sensor network)

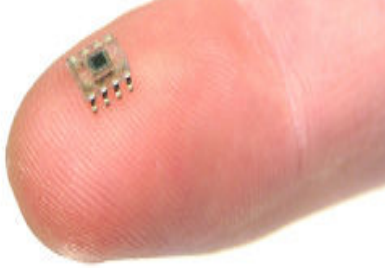
Düğüm	Boyut
TelosB [2]	3.20 cm x 6,55 cm x 0.66 cm (GxUxY)
Tmote Sky[3]	3.15 cm x 6.47 cm x 0.60 cm (GxUxY)
Mica2 [4]	3.17 cm x 5.71 cm x 0.63 cm (GxUxY)
MicaZ [4]	3.17 cm x 5.71 cm x 0.63 cm (GxUxY)
Imote2 [5]	3.60 cm x 4.80 cm x 0.90 cm (GxUxY)
SHIMMER [6]	2.03 cm x 4.44 cm x 1.27cm (GxUxY)
IRIS [2]	3.17 cm x 5.71 cm x 0.63 cm (GxUxY)
Sun SPOT [7]	6.35 cm x 3.81 cm x 2.54 cm (GxUxY)
Monnit [8]	2.00 cm x 2.64 cm x 4.50 cm (GxUxY)
LORD MicroStrain's [9]	4.00 cm x 4.00 cm (UxY)
EcoMote [10,11]	1.30 cm x 1.10 cm x 0.70 cm (batarya dahil) (GxUxY)
Spec [10]	0.005 cm ³
uPart [10]	0.005 cm ³ (batarya dahil değil)
ZN1 [10]	1.5 cm x 1.5 cm (UxY)
SAND [10]	1.5cm ³
stack and bandaid [10]	25µm x 1.20 cm x 3.50 cm (GxUxY)
DSYS25	0.50 cm x 0.50 cm x 0.50 cm (GxUxY)
Nanodüğüm [12]	1 µm x 2 µm x 6 µm (GxUxY) (ortalama 10-100 µm ³)



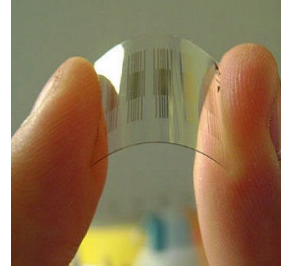
a)TelosB (TelosB)[2]



b) Eco düğüm (Eco node)[10]



c)Mikro düğüm (Micro node)[13]



c)Nano düğüm (Nano node)[12]

Şekil 1.Farklı boyutta telsiz duyurga ağları(Different size wireless sensor nodes)

2. NANO DÜĞÜMÜN BÖLÜMLERİ (NANONODE PARTS)

Nano telsiz duyurga düğümlerinin bölümlerinin, mevcut telsiz duyurga bölümlerinden herhangi bir farkı yoktur. Temel farklılık boyut alanındadır. Nano telsiz duyurga ağlarının, adından da anlaşıldığı gibi nano ölçülere sahip olacak şekilde tasarlanması hedeflenmektedir. Nano telsiz duyurga ağlarının nasıl tasarlanması gerektiği, bölüm bölüm anlatılarak gösterilmektedir [12,14].

2.1. Algılama Ünitesi (Sensing Unit)

Algılama ünitesinde, karbon atomun tek bir katmanından yapılan son derece kuvvetli bir malzeme olan grafen kullanılması hedeflenmektedir. Grafen, rakamsal olarak çelikten yaklaşık 200 kat daha güçlü, bal peteği

şeklinde düzenlenmiş karbon atomlarının tek bir tabakasıdır. Grafenin bu yapısı sayesinde aşırı hızlı transistörler, yarı iletkenler, şeffaf elektrotlar ve algılayıcılar yapılması hedeflenmektedir. Nano düğümlerin bölümlerinin mevcut kablosuz düğümlerin bölümlerinden herhangi bir farkı yoktur. Algılama ünitesinde ise kuvvet, basınç, yer değiştirme gibi fiziksel büyüklükleri; kimyasal bileşimi, moleküler yoğunluğu gibi kimyasal büyüklükleri; antikor / antijen etkileşimi, DNA etkileşimi ve enzimatik etkileşimler gibi biyolojik büyüklükleri ölçebilecek nano algılayıcılar tasarlanması hedeflenmektedir. Bu aşamada ise NTES (NEMS - Nano Teknoloji Elektromekanik Sistemler) [15] sürece yardımcı olacaktır [16]. Nano düğümler, şekil 2 de gösterildiği gibi fiziksel, kimyasal ve biyolojik olmak üzere 3 ana gruba ayrılmaktadır.

Nano Düğüm Çeşitleri



Fiziksel Nano Düğümler:

Kuvvet, basınç, yer değiştirme

Kimyasal Nano Düğümler:

Kimyasal bileşimi, moleküler yoğunluğu

Biyolojik Nano Düğümler:

Antikor / antijen etkileşimi, DNA etkileşimi,enzimatik etkileşimler

Şekil 2. Nano Düğümlerin Çeşitleri (Varieties of nano nodes)

Karbonnanotüpler (KNT) nano telsiz duyurga ağların da algılama ünitesinin geliştirilmesi için uygulanan başka bir alternatif teknolojidir. KNT'lerin başlıca özellikleri küçük boyutta olmaları, hassas olarak hızlı yanıt verebilmeleri, oda sıcaklığında ideal çalışmalarıdır. Bu temel özellikleri KNT'lerin gaz molekül algılayıcı olarak kullanılmasını sağlar. Ayrıca KNT'ler elektrokimyasal reaksiyonlarda elektrot olarak kullanıldığında hatırlama yeteneği ve elektron geçişini artırması sayesinde algılama ünitesi tasarımında kullanılması daha avantajlıdır. KNT'ler yapı itibariyle nano boyuttaki malzeme ve tepkimeleri hissetmektedir. Özellikle, yarı iletken tek duvarlı KNT'lerin çevresindeki değişimlere karşı ileri düzeyde hassas olduğu gözlemlenmektedir. Kısacası KNT'ler mevcut algılayıcılardan 3 kat daha hassastır. KNT'lerin bu yapısı sayesinde, mevcut cihazlardan daha küçük boyutta, çok daha hassas, oda sıcaklığında daha iyi tepkime veren ve daha fonksiyonel cihazların yapılmasına olanak sağlayacaktır [17].

KNT'leri, biyosensör olarak tasarlamak üzere çalışmalara başlayan ilk kişi Dr. Meyyappan dır. Dr. Meyyappan çalışmasında, KNT'lerin mikro boyutta çalışma alanlarında elektrokimyasal sinyalleri algılayarak tepkime vermesini hedeflemiştir. Günümüzde farklı metotlarla üretilen nano sensörlerin, vücut içinde tepkimeleri tanımlamaları ve istenilen cevabı vermeleri mümkündür. Vücut içine yerleştirilmesi hedeflenen nano ölçekli telsiz duyurga ağlarında bulunan nano algılama birimi sayesinde, Glikoz, DNA gibi serum biyomolekülünü tanınması sağlanmaktadır. Vücut içerisindeki hormonlarda değişiklik saptandığında nano algılayıcı hormonun konsantrasyonunu hesaplayarak, gerekirse normal seviyesine dönmesi için ters tepki gösterecek nanoaraçların yapılması mümkündür. Sadece hormonlarda değil aynı zamanda hücre içi ve dışı olayları algılayabilecek, ters giden bir durumda ise enzimatik aktivite, ilaç verme ya da mekanik olarak müdahale edebilme yeteneğine sahip nano makineler konusunda da çalışmalar devam etmektedir [18-20].

2.2. Güç Ünitesi (Power Unit)

Telsiz duyurga düğümünün güç ünitesi için nanometrik ölçülerde olan lityum nanobataryaları düşünülmektedir. Nano bataryaların kapasitesi $45 \mu\text{Ah}^{-1}\text{cm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ 'e kadar çıkmaktadır. Lityum

nanobataryalarının vücut içi haberleşme tercih edildiğinde ise şarj edilmesi zor olmaktadır. Fakat uzaktan şarj imkânlarının da gelişmesiyle farklı uygulamalarda, örneğin doğa takibi gibi tekrar şarjın imkân tanındığı uygulamalarda bu tip bataryalar kullanılabilir. Vücut içi haberleşme de nano düğümlerinin güç ünitesinin oluşturulmasının bir diğer alternatifi ise çinko oksit (ZnO) nano teller kullanılmasıdır. Çinko oksit nano teller, belli bir kuvvet uygulandığında kendi şekline tekrar geri dönme eğilimi gösterirler. Bu sayede oluşturulan titreşimler akım üretir. Cep telefonu teknolojisi ve taşınabilir elektronik cihazlar için hafif ve yüksek enerji kapasiteli bataryalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alanda ki ihtiyaca cevap vermek için Sol-Jel tekniğiyle nano ölçekli kristaller üzerinde çalışılmaktadır. Metal hidrat ve nikel nano kristaller kullanılarak tasarlanan bataryalar ise bu alanda oluşan açıklığı gidermek için tasarlanan diğer bir çalışma alanıdır [21-23].

2.3. İşlemci Ünitesi (Processing unit)

Nano işlemcilerin üretilmesinin önünü açan ise yine Grafen'dir. Günümüzde kullandığımız silikon işlemciler 9 GHz yanmaya başlarken Grafen ise 500 GHz e kadar ısı sorunu yaşamamaktadır. Günümüzdeki teknolojiye ulaşmayı sağlayan transistörler, yapısına göre aldıkları belirli miktardaki elektrik akımına göre açılıp ya da kapanabilmesi sayesinde günümüzdeki işlemcilerin tasarlanmasına olanak sağlamaktadırlar. Grafen transistörler ise en ufak bir akımda dahi kendileri kapatabilmekte ve bu işlemi bir saniyede binlerce kez yapabilmektedirler. Yapılan testler göstermiştir ki Grafen temelli işlemciler 427 GHz'e kadar çalışabilmektedirler. Bu hız ise kabataslak olarak hesaplanırsa bile, günümüz bilgisayarlarından 100 kat daha hızlı bilgisayarların yapılabileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca Prof. Dr. Engin Umut Akkaya yaptığı çalışmalarında moleküllerin matematiksel işlem yapabildiklerini göstermiştir. Profesör bu icadıyla gelecekte mikro ve nano boyutlarda bilgisayar yapımının önünü açmıştır [24,25].

2.4. Hafıza Ünitesi (Storage unit)

Giriş bölümünde de bahsedildiği gibi Feynman gerçekleşmesi o gün ki şartlara göre zor olan iki proje önerisinde bulunmuş ve sonuca ulaşanlara

ise 1000 dolar ödül vereceğini açıklamıştır. Bu projelerden ilki santimetre boyutlarında üretilmesi istenilen bir motordur. İkincisi ise bir sayfa yazının 25000 kat küçültülerek elektronik mikroskopla okunabilecek boyutlara indirilmesidir. Feynman'ın ilk projesi, sadece birkaç ay sonra Elektrik Mühendisi William McLellan tarafından gerçekleştirilmiştir. McLellan'ın gerçekleştirdiği motorun özellikleri ise 250 mikrogram ağırlığında, 0,3 mm uzunluğunda ve saniyede 33 devir yapabilen küp şeklinde bir motordur. McLellan'a 1000 dolar kazandıran bu motor günümüzde çalışmıyor olsa da Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nde sergilenmektedir. İkinci proje ise bu kadar erken yapılmamıştır. 25 yıl sonra lisansüstü öğrencisi olan Tom Newman, Charles Dickens'in "İki Şehrin Hikâyesi" romanının ilk sayfasını 25000 kat küçültürken Feynman'a göndermiş ve 1000 doların sahibi olmuştur. Feynman, bu projeleri sayesinde ilk kez nanoteknolojinin adımlarını atmıştır. Nano teknoloji terimini ise ilk kez 1974 yılında Prof. Dr. Norio Taniguchi kullanmıştır. Atomik hafızalar günümüzde de hala çalışma konusudur. CD-ROM ve türevlerinde olduğu gibi bilgi bitlerin olup olmaması 0 ve 1'lerle ifade edilmeye çalışılmaktadır.

IBM laboratuvarlarında atomlar kullanılarak bir film yapılmıştır. Bu film moleküllerin anlık görüntüsü kaydedilerek yapılmıştır. Filmde yaklaşık 5000 atomun hareketleri ile bir hikâye anlatılmıştır. Bu film çekilmesi itibarıyla tek resimli hareket tekniğiyle yapılan dünyanın en küçük filmi unvanını alarak, Guinness Rekorlar Kitabına girmeye hak kazanmıştır. Film boyut olarak açıklanacak olursa; eğer bir atom portakal büyüklüğünde olsaydı, portakal ise dünya büyüklüğünde olurdu. Yani elektronik mikroskopta görülen atomun 100 milyon kez büyültülmüş hali düşünülürse, filmin ne kadar zor çekildiği tahmin edilebilir. Filmde atomları hareket ettirmek için ses kullanılmıştır. Atoma verilen sesin şiddeti, atomun ne hızla ne kadar ilerleyebileceğini hesaplanabilmesine yardımcı olduğu için önemliydi. Bu örnek, atom teknolojisinde bugün nereye kadar geldiğini bildirmektedir. Tekrar Feynman'a dönülecek olursa, Feynman her atomun bir bilgi taşıyabileceğini, bu sayede 5X5X5 atom sayesinde 125 atom bir bite eşitlendiğinde 32 atomla DNA'daki bir bitlik bilgiyi kodlayabileceğini ifade etmiştir [25]. Yoğunluk olarak düşünülürse, karbon bir yapı ele alındığında iki atom arasındaki mesafe 0.142 nm [27] olarak alınırsa depolama

kapasitesi 1 bit/nm³veya 1 gigabit/µm³ den daha büyük olabilecektir.

2.5. Haberleşme Ünitesi (Communication Unit)

Nano düğümlerin haberleşmeleri, moleküler ya da nano-elektromanyetik olarak sağlanacaktır. Haberleşme biriminde grafen temelli antenler yer almaktadır. Karbonun tek atom kalınlığındaki yapısı olarak tanımlanan grafen, olağanüstü mekanik mukavemet, sıra dışı elektronik ve termal iletkenlik, gazlara karşı sızdırmazlık özellikleri ile birlikte diğer fiziksel ve kimyasal özelliklerinin birleşimi sonucu yaygın uygulama alanlarında potansiyel kullanıma sahip ilgi çekici bir malzemedir. Grafenin önemli yapısal özellikleri arasında saflığı, hata yoğunluğu, kalınlığı ve boyutu gelmektedir. Bu üstün özelliklerinden dolayı nano düğümlerden grafen temelli antenler kullanılması hedeflenmektedir. Kablosuz veri aktarımında 20-30 GB gibi büyük verilerin gönderilmesi zahmetli ve uzun olabiliyor. Georgia Teknoloji Üniversitesi Profesörü Ian F. Akyildiz önderliğinde yapılan çalışmalarda grafen temelli antenler sayesinde birkaç metrelik mesafeden 1 terabit/saniye hızında veri aktarımı yapabildiklerini iletmişlerdir. Grafen antenin yapısı ise Akyildiz'in MIT Teknolojisi dergisine verdiği demeçte grafen antenlerin nano yapıda olup 1 mikrometre uzunluğunda ve 10-100 nano metre genişliğinde olacağını, yapısı sayesinde terahertz frekanslarını aktarabileceklerini özetlemektedir [28,29].

3. NANO-HABERLEŞMENİN GÜNÜMÜZ SAĞLIK SEKTÖRÜNE FAYDALAR (NANO-COMMUNICATION BENEFITS TODAY'S HEALTH CARE SYSTEM)

Nano haberleşme son yıllarda adını sıkça duyduğumuz yeni bir haberleşme metodudur. Bu yeni teknoloji sayesinde nano boyutta telsiz duyurğa ağırları üretilerek hücre boyutunda veya yaşayan küçük organizmalar ile etkileşime geçerek yeni teşhis ve tedavi yöntemlerinin gelişmesi sağlamaktadır. Bu telsiz duyurğa ağırları vücutta bulunun zararlı virüs ya da hücrelere yok etmek için istenirse sadece virüs ya da hücrelerin bulunduğu zararlı bölgeye nüfus etmek suretiyle tasarlanabileceklerdir. Nano boyuttaki telsiz duyurğa ağırları sayesinde vücut içindeki değişimler anlık ve hassas bir şekilde takip edilebilecektir. Bir örnek vermek gerekirse kalp krizi geçiren bir hastanın anlık verileri doktora iletilebilecek ve bu

sayede doktorun hastaya daha hızlı müdahale etmesini sağlayacaktır. Nano düğümler vücudun dolaşım sistemine girerek hücre seviyesinde onarım yapıp hastalıkları iyileştirebilecek ayrıca vücut içerisinde dolaşan bu düğümler sayesinde hasatlıkların birçoğu erken teşhis edilebilecektir. Nano boyutlu telsiz duyurga ağları mikro makasları vasıtası ile bir cerrah gibi hücrelerdeki aksaklıklara müdahale edebilecek, hatta DNA üzerinde değişiklikler bile yapabileceklerdir [30]. Nano boyuttaki telsiz duyurga ağları sayesinde sadece kanserli dokulara veya civarına kontrollü bir şekilde DNA'yı ve istendiğinde de kemoterapi ajanını da birlikte salabilen nano düğümlerle anti kanser terapileri geliştirilebilecektir. Ayrıca, sinir-nano ağlarının da incelenip elektro-moleküler tasarım prensipleri de ortaya çıkarılarak biyolojik sistemlerden esinlenen nanohaberleşme yöntemlerinin gelişmesine ön ayak olacaktır. Bu sayede vücut içi akıllı ilaç dağıtımı, yan etkisiz kanser tedavisi, hücre düzeyinde sağlık durumu inceleme, yanı sıra halen tedavisi bulunamayan omurilik felci gibi sinir sistemi hastalıkları için nanohaberleşmenin bir umut olduğu söylenebilir [31,32].

Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde gerçekleştirilen bir projede, vücutta kansere yol açabilecek kimyasal değişimleri izleyebilecek çok küçük algılayıcılar geliştirilmiştir. Bu algılayıcılar aynı zamanda kanser ilaçlarının canlı hücreler üzerindeki etkisini de gözlemleyebilmektedir. Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde Profesör Michael Strano karbon moleküllerinin ince iplikçilerinden yapılan ve DNA ile kaplanabilen algılayıcıların, insan vücudundaki hücrelerden çok daha küçük olduğunu belirtmiştir. Bu algılayıcılar insan dokusu ile aynı tayfta floresan ışığı yayabilmektedirler. Bu sayede algılayıcılar gerekli veriyi almaktadırlar. Işığın şiddeti ise DNA ile etkileşime girdiğinde değişmektedir. Bu sayede araştırmacılar belirli molekülleri tanıyabilmektedirler. Algılayıcıların DNA ile etkileşimde herhangi bir sorun yaşanmaması, bu algılayıcıların vücut içerisinde rahatlıkla kullanılabilmesini göstermektedir [33,34]. Algılayıcıların bahsedildiği özellikleri sayesinde, bu yöntem, insan vücudunun gözlemlenebilmesi için alternatif bir yöntem olabileceğini de göstermektedir [17].

4. SAĞLIK SEKTÖRÜNDE KULLANILMASI HEDEFLENEN HABERLEŞME METOTLARI (COMMUNICATION METHODS THAT PLAN TO USE IN HEALTH CARE SYSTEM)

Sağlık sektöründe kullanılması hedeflenen iki tip haberleşme metodu vardır. Bunlardan ilki yeni bir haberleşme metodu olan moleküler haberleşme diğeri ise günümüzdeki haberleşme metoduna benzeyen elektromanyetik haberleşmedir.

4.1. Moleküler Haberleşme (Molecular Communication)

Moleküler haberleşme nano ölçekli ağlar için umut verici bir iletişim metodudur. Bir kimyasal tepkimeyi ya da koku, ışık, tat gibi değişimleri nano düğümler sayesinde nano ağ kullanarak birbirleriyle haberleşmesini öngören haberleşme çeşididir. Moleküler haberleşmede, klasik haberleşmede olduğu gibi alıcı, verici ve ortamdan oluşmaktadır. Moleküler haberleşmede alıcı; alıcı nano makine, verici; verici nano makine olarak adlandırılırsa; ortam ise moleküllerden oluşan difüzyon kanalına benzetebilir. Moleküler ve nano makineler arasındaki iletişim, biyolojide kullanılan ligand-alıcı yapışma fenomenine benzetebilir. Bu fenomen açıklanacak olursa, insanın endokrin sistemi hormonlar ve hormonları üreten salgı bezlerinden oluşmaktadır. Vücudun dolaşım, sindirim, boşaltım, solunum ve iskelet sistemi endokrin sistemindeki hormonlar vasıtası ile haberleşir. Bu haberleşme oldukça yavaştır. Endokrin sistemdeki hormonlar sayesinde büyüme hızı gibi birçok değişiklik buradan kontrol edilir [35,36]. Endokrin sisteminde kullanılan haberleşme metodu oldukça yavaştır. Hormonlar salgı bezleri tarafından üretilerek kana verilir. İlgili hormon hedef birime ulaştığında, hedef birimi başka bir hormon salgılatarak kendisini tetikleyen hormonun azalmasını sağlar. Bu sayede vücut bir denge içerisinde çalışmaya devam eder [37].

Moleküler haberleşmenin, mevcut nanomakineler düşünüldüğünde yapabilecekleri sınırlıdır. Nanomakinelerin iletişim mesafeleri ve çalışmaları ortamın dielektrik özelliklerinden, yoğunluğuna, su karışımı gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Bu açıdan, nano-makinelerin birbirleriyle haberleşebilmeleri için yeni teori ve

tekniklere gereksinim duyulmaktadır. Moleküler haberleşmede ayrıca haberleşme kanalı değişken sinyal/gürültü oranına sahiptir. Moleküler

haberleşmenin diğer kablosuz haberleşme metotları ile karşılaştırılması Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2. Moleküler haberleşmenin diğer kablosuz haberleşme metotları ile karşılaştırılması (Comparing molecular communication method for other wireless communication network methods)

	Moleküler Haberleşme	Elektromanyetik Haberleşme	Manyetik İndüksiyon	Optik Haberleşme	Akustik Haberleşme
Bilgi Taşıyıcı	Molekül	Elektromanyetik dalga	Elektromanyetik dalga	Fiber optik	Ortam
Sinyal Çeşidi	Kimyasal sinyal	Elektronik sinyal	Elektronik sinyal	Optik sinyal	Ses sinyali
Yayıma Hızı	Aşırı derecede düşük	Işık hızı ($3 \cdot 10^8$ m/s)	Işık hızı ($3 \cdot 10^8$ m/s)	Işık hızı ($3 \cdot 10^8$ m/s)	Ses hızı
Yayıma Ortamı	Sulu ortam	Hava, toprak, su	Genellikle toprak	Hava, su	Genellikle su

4.2. Elektromanyetik Haberleşme (Electromagnetic Communication)

Elektromanyetik haberleşme günümüzde olduğu gibi gelecekte de kullanılacaktır. Özellikle vücut içi haberleşmesinde, moleküler haberleşmeye bir alternatif olarak gelişeceği düşünülmektedir. Gelişen yüksek frekansları işleyebilen teknolojileri ve anten boyutlarının grafen, KNT'leri gibi materyallerle küçültülmesi nano boyutlarda nano düğümlerin yapılmasına olanak sağlayacaktır. Nano düğümlerin bileşenleri bölüm 2'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Fakat Elektromanyetik haberleşmenin de üstesinden gelmesi gereken birçok problem vardır. Dar ve küçük alanları oluşturan moleküllerin dielektrik özellikleri elektromanyetik haberleşmede önemlilik arz etmektedir. Belli frekans aralıklarında iletişim mesafesi artarken belli frekanslarda ise iletişim mesafesi ani bir düşüş gösterebilir. Bu yüzden ortamı oluşturan moleküllerin yapısı detaylı bir şekilde analiz edip modellenmeli, uygun bant geçişleri bulunarak en uzun iletişim mesafesine ulaşılmalıdır. Elektromanyetik haberleşme sadece ortamın dielektrik özelliklerinden değil aynı zamanda sinyal/gürültü oranı, alıcı ve vericinin gücü, boş uzay kaybı gibi mevcut elektromanyetik haberleşmeyi etkileyen etmenlerden de etkilenecektir. Bu bileşenlerde mevcut vücut içi ağı oluşturulurken hesaplanmalıdır [12].

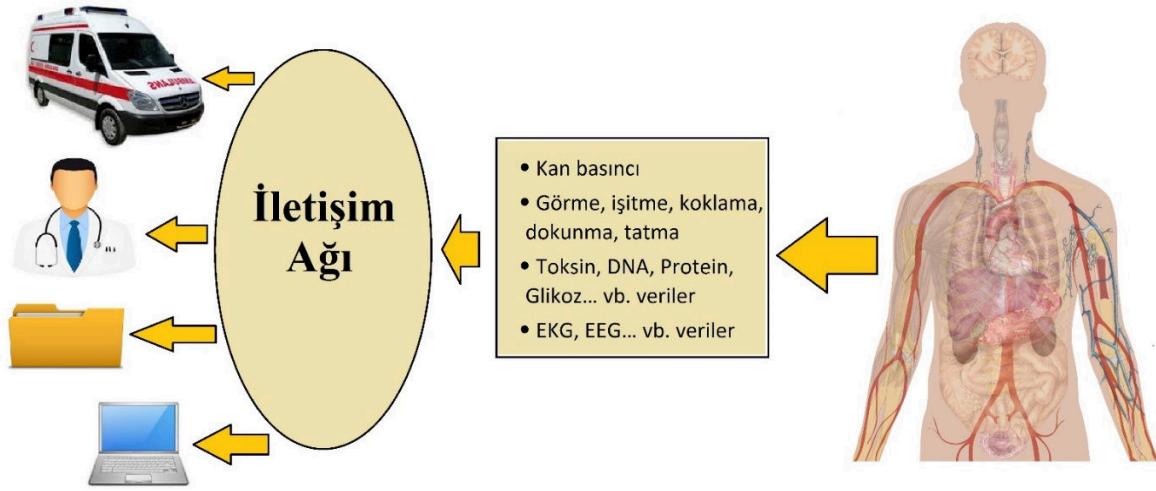
5. NESNELERİN İNTERNETİ (INTERNET OF THINGS)

Gelecekte, geliştirilen LTE (Long-Term Evolution, Uzun Süreçli Evrim) [38], M2M (Machine-to-machine, Makineler arası iletişim) [39] gibi projeler sayesinde günümüzde kullanılan çoğu cihaz bir IP (Internet Protocol Address, İnternet Protokol Adresi) olarak internete girebilecektir. Bu gelişim günlük hayata birçok yenilik getirecektir. Bütün bu gelişmeler, yeni bir teknoloji olan "Nesnelerin İnterneti (Nİ, Internet of Things-IoT)" kavramını dile getirmektedir. Nİ kısaca tanımlanacak olursa, akıllı cihazların birbirleriyle çeşitli haberleşme protokolleri vasıtası ile haberleşerek akıllı bir ağ oluşturmuş cihazlar kümesini temsil etmesidir. Günlük hayatta kullanılan buzdolabından televizyona, çamaşır makinesinden kombiye kadar her nesnenin internete bağlı bir IP adresine sahip olup, sürekli haberleşebildikleri düşünülebilir [40, 41]. Nİ teknolojisi ilk kez 1999 yılında Kevin Ashton tarafından ortaya atılmıştır ve RFID (Radio Frequency Identification (RFID), Radyo Frekanslı Tanımla) üzerinden birbirleri ile haberleşen cihazları kapsadığı belirtilmiştir, fakat şimdilerde bu kavram Nİ olarak daha geniş ve kapsamlı bir alana dönüşmüştür [42]. 2008 yılında IP adresi almış cihaz sayısının, o yıl ki dünya nüfusundan daha fazla olduğu belirtilmiştir. 2020 yılında ise bu rakamın 50 milyar seviyesine çıkması

beklenmektedir. Bu kadar cihaza IP verebilmenin imkânı ise, 128 bitlik adres uzunluğuna sahip IPv6 (Internet Protocol Version 6, Internet Protokol sürüm 6) protokolü sayesinde sağlanabilecektir.

Nİ interneti, sadece evlerdeki akıllı cihazların birbirleri ile haberleşmesi mantığıyla düşünmek alanı daraltmak olur. Nİ sadece evlerde değil birçok sektörde de yenilik getirecektir. Bunların en başında sağlık sektörü gelmektedir. Nİ sayesinde kronik rahatsızlığı bulunan hastaların durumu anlık olarak izlenebilecek bu sayede hastanın durumu yine anlık olarak doktoruna ya da yakınlarına iletilebilecektir [43]. Acil bir durumda doktoruna ya da yakınlarına sistem ulaşmasa bile, sistem ilk yardım ekibini çağırıp, hastanın anlık kan değerlerini ya da doktor için ihtiyaç olan değişkenlerini daha hasta hastaneye ulaşmadan gönderilmesini sağlayacaktır. Bu sayede hastaya daha hızlı bir şekilde müdahale edilerek, daha iyi

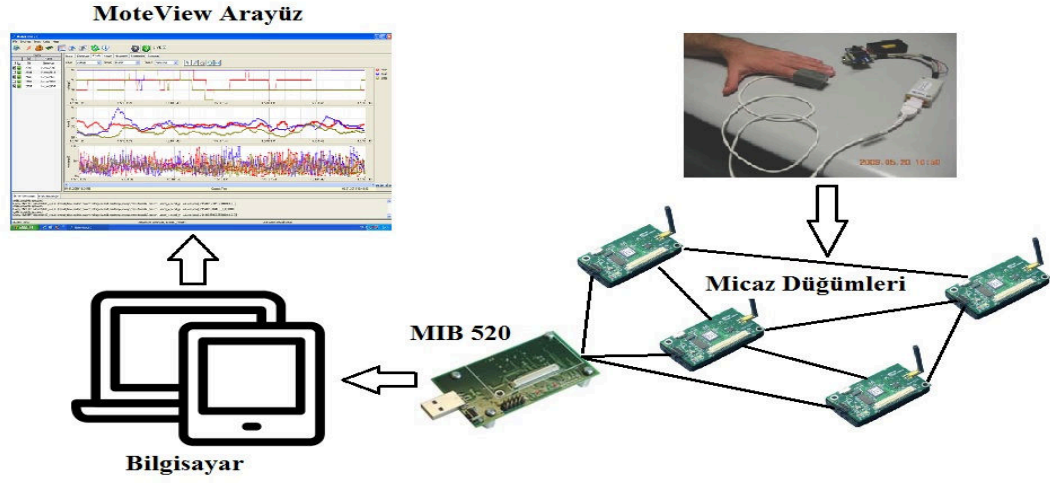
bir sonuç alınması sağlanacaktır. Başka bir örnek verilecek olursa, hastanın kan değerlerine ve kalbin çalışmasına göre kalp krizi geçirme ihtimali artan bir hasta önceden tespit edilebilecektir. Eğer hasta kalp krizi geçiriyor ise kan değerleri anlık olarak hasta, hastaneye getirilmeden önce hastaneye ulaşmış olacaktır. Bu sayede hasta hastaneye gelmeden önce gerekli ilk yardım tedbirleri alınmış ve ilaçları hazırlanmış olacak ve hastanın kaybedilme olasılığı düşürülecektir. İnternet ağı gibi birbirine bağlı olan vücut organları arasındaki koordinasyondan Nİ ve nano haberleşme teknolojileri birleşerek bu koordinasyondan insanlığın anlık olarak bilgilendirilmesi sağlanacaktır. Eğer koordinasyonda yanlış giden bir durum var ise bu durum doktora anlık olarak iletilebilecektir. Bu bahsedilen uygulamaların bir kısmı günlük hayata geçmiş ve birçoğu da yakın bir zamanda günlük hayata geçecektir.



Şekil 3. Nİ teknolojinin biyomedikalde kullanımı (Using IoT in biomedical)

Nİ'nin sağlık sektöründeki en büyük bileşeni ise Kablosuz Vücut Alan Ağları (KVAA)'dır. KVAA'lar kablosuz olarak haberleşebilen vücut içine yerleştirilen çok küçük akıllı cihazlardan meydana gelmektedir. Günlük yaşamda bu teknolojiye yakın uygulamalara örnek verilecek olursa, tablet şeklinde yutulan ve içorganları gösteren kameralar, giyilebilir EKG/EMG/EEG/SpO₂, kanbasıncı, adım ve sıcaklık ölçerlerdir [44]. Nİ sadece hastanın anlık olarak takibini değil aynı zamanda günlük verilerinin depolanarak detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağlar. Biriktirilmiş veriler sayesinde daha net ve kalıcı tedavi yapılabilmesinin önünü açmaktadır. Şimdilerde bu tarz uygulamalar Zigbee tabanlı telsiz duyurğa ağları kullanılarak

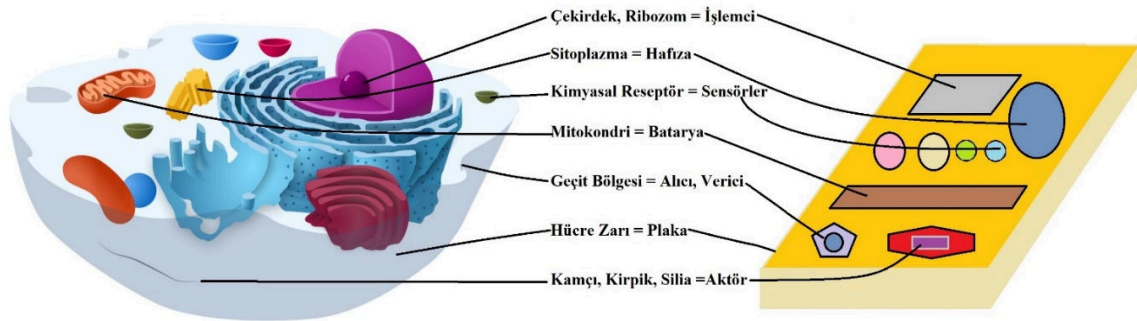
gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır [45]. Bu uygulamaya benzer bir çalışma ise Ege Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliğinde pulse oksimetre cihazını şekil 4'te görüldüğü gibi Micas telsiz duyurğa düğümüne bağlayarak, hastanın kan basıncı, nabız ve oksijen gibi değerlerinin anlık olarak ana monitöre gönderilmesi sağlanmıştır. Türkiye de gerçekleştirilen bu uygulama sayesinde, hastanın kanının anlık değerleri bir ekranda gözlemlenebilmekte ve istenirse sistem verileri sağlık personelinin cihazına gönderebilmektedir [46]. Bu uygulama nano düğümler ve Nİ teknolojilerin birleşimi sayesinde daha verimli, hızlı kullanılabilir ve daha uzak mesafelere veri gönderebilme olanağı sağlayacaktır.



Şekil 4. Micaz düğümleri ile anlık hasta takip sistemi (Instant patient monitoring system with Micaz motes)

Çalışmanın [46] adımları şekil 4’de verilmiştir. Bu çalışmada duyurğa ağlarının biyomedikal bir uygulaması gerçekleştirilmiş ve geliştirilen sistem Ege Üniversitesi Hastanesi’nde denenmiştir. Kablosuz düğümler nesC programla diliyle programlanmış, pulse oksimetre cihazı Micaz düğümlerine bağlanarak hastanın nabız, pletismogram ve kandaki oksijen oranı verileri ZigBee standardı kullanılarak, kablosuz ağ üzerinden merkezi veri tabanına aktarılmıştır. Sistemin performansı, değişik ağ topolojilerinde, paket kaybı yüzdesi olarak ölçülmüştür.

Günümüzde bu sistem oldukça yaygınlaşmaktadır. Moleküler Haberleşme ve Nİ’i teknolojileri sayesinde bu proje daha da geliştirilebilir. Şekilde görülen pulse oksimetre cihazı ve Micaz düğümünün görevini, nano düğümlerin yapması hedeflenmektedir. Ayrıca Nİ sayesinde bu veriler uygulamada olduğu gibi sadece bilgisayar vasıtası ile MoteView ara yüzünden değil aynı zamanda farklı yerlerdeki farklı kullanıcılar için de ulaşılabilirliğinin sağlanması hedeflenmektedir.



Şekil 5. Nİ teknolojisinde kullanılması hedeflenen düğümlerin hücre ile benzetimi (Elements of a biological cell and components of a typical IoT device)

Şekil 5, Nİ teknolojisinde kullanılması hedeflenen düğümlerin hücre ile benzetimini göstermektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi düğümün, bir hücreyi oluşturan temel birimlerin çoğuna sahip olacak şekilde tasarlanması hedeflenmektedir. Bu birimlerin oluşturulmasında, nano düğümlerin birimlerinin oluşturulmasında anlatılan metotlardan faydalanılacaktır. Bu düğümlerde istenirse de vücut içinde aktör düğümler sayesinde mikro makasları vasıtası ile bir cerrah gibi hücrelerdeki aksaklıklara müdahale edilebilecek, hatta DNA üzerinde değişiklikler bile yapabilecektir. Anne karnındaki bebeğe bile

gerekli durumlarda neştersiz müdahale etmeyi sağlayacaktır [47].

5.1. Nesnelerin İnterneti Haberleşme Metotları (Internet of Things Communication Methods)

Nİ haberleşme metodu vücut içi haberleşmede bio-Nİ haberleşme metodu olarak adlandırılmaktadır. Temel olarak bio-Nİ haberleşme metodu moleküler haberleşme metodunun türevleriyle benzerdir. Veri, vücut içinden aşağıdaki verilen haberleşme adımlarından biriyle elde edilir ve sağlık birimine iletilir. Fakat bu haberleşme metotlarında da çözülmesi gereken çeşitli

problemler vardır. Örneğin moleküler sinyaller elektromanyetik sinyaller gibi yönünü tayin edemez. Moleküler haberleşmede bir nevi sinyal iletişimi rasgele olur. Bu yüzden yeni veri iletme

ve ortak kanalı kullanma gibi yeni metotlar geliştirilmelidir. Moleküler haberleşmede bir çözüm önerisi bakterilerde olduğu gibi kanal modelleme, analiz etme ve tekrar kullanmadır.



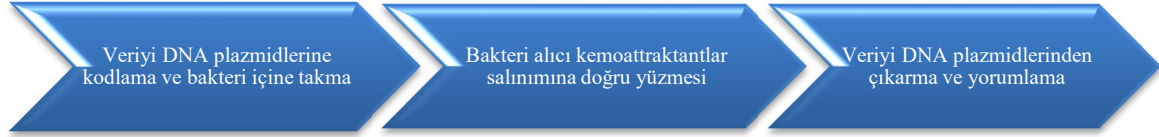
Klasik Haberleşme Adımları



Moleküler Haberleşme-1: Çok kısa Ca^{2+} Haberleşmesi



Moleküler Haberleşme-2: Çok Kısa Mesafe Moleküler Motor Haberleşmesi



Moleküler Haberleşme-3: Orta menzilli - bakteriyel kemotaksi ve konjugasyon

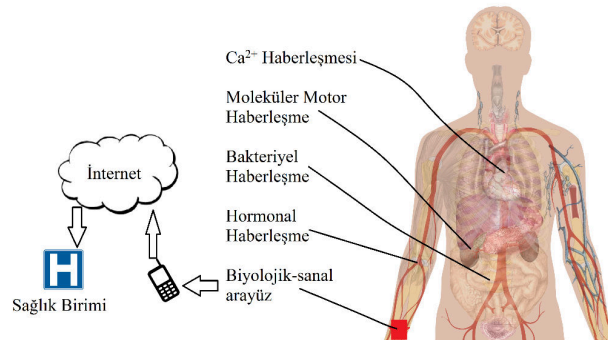


Moleküler Haberleşme-4: Uzun Mesafe Hormonal Haberleşme

Şekil 6. Bio-Nİ haberleşme metotları (Bio-IoT communication methods)

Yukarıdaki şekil, klasik haberleşme adımlarının, bio-Nİ haberleşme metotlarıyla karşılaştırılmasını göstermektedir. Moleküler haberleşme adımları temel olarak klasik haberleşme adımıyla benzerlik gösterir. Moleküler haberleşmede, haberleşme menziline göre haberleşme metodu farklılık

göstermektedir. Kısa mesafelerde taşıyıcı olarak Ca^{2+} veya moleküllerle sağlanırken, orta menzilli haberleşmede bakteriler taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. Vücut içi uzun menzilli haberleşmelerde ise hormonların taşıyıcı olarak kullanılması hedeflenmektedir [48,49].



Şekil 7. Bio-Nİ haberleşme ağ mimarisi (Bio-IoT communication network architecture)

Moleküler haberleşmenin elde etmek istediği verileri, insan vücudu kendi sistemleri vasıtası ile algılayabilmektedir. Moleküler haberleşmenin amacı vücudun kendi sistemine adapte olarak sıra dışı durumlarda sağlık birimini bilgilendirmektir. İnsan vücudunda, haberci moleküller, birincil ve ikincil haberciler olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Birincil haberciler hormonlar, büyüme faktörleri gibi hücreler arası iletişimi sağlayan haberci moleküllerdir. İkincil haberciler ise hücre içi haberleşme ile ilgilenir. Birincil habercilerle ikincil haberciler organize şekilde çalışır. Oldukça karmaşık olan bu haberleşmenin hızı hücrelerin birbirlerine yakınlığına göre değişir. Sinir hücrelerinde ise durum biraz daha farklıdır, hücreler birbirlerinden çok uzak olsa bile gövdeden çıkan uzantılar sayesinde hücreler arası temas çok daha hızlı gerçekleşmektedir [50-52].

Bio-Nİ haberleşmesinde kat edilmesi gereken çok mesafe vardır fakat bu mesafelerin hiç biri imkânsız değildir. Tıpkı 90'lı yıllarda cep telefonları ilk çıktığında, gün gelecek bu küçük aletlerle görüntülü görüşebileceği, internete girebileceği gerçeği 10 yıl gibi kısa bir sürede gerçekleştirildiği gibi, bio-Nİ haberleşmesinde de 10 yıl sonraya kadar birçok mesafe aşılmış olacaktır. Fakat bunları aşarken de yeni problemleri de beraberinde getirebilir. Örneğin insan vücudunun bu kadar yakın bir şekilde takip edilmesi, insanlığı biyolojik savaşlara ve terörist saldırılara maruz bırakabilir. Bu yüzden güvenlik tedbirleri de düşünmeli ve yeni standartlar geliştirilmelidir. Yeni virüsler ortaya çıkma ihtimaline karşı tedbirler alınmalıdır. Bu tarz güvenlik önlemleri ise günümüz internet teknolojisindeki güvenlik önlemleri geliştirilerek alınabilir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede haberleşme teknolojisinin gelecekte sağlık sektörüne nasıl bir katkı sağlayacağı anlatılmıştır. Vücut içi haberleşmenin metotlarından bahsedilmiş, özellikle moleküler haberleşme ve bunun türevleri hakkında bilgi verilmiştir. Moleküler haberleşmenin de bir uzantısı olan bio-Nİ haberleşme metotları hakkında bilgi verilmiş ve bu teknolojilerde kullanılabilecek düğüm prototipleri hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Nano makinelerin, nano ağların, nano düğümlerin ve nano algılayıcıların gelişmesi sayesinde bu makalede anlatılan metotların gelişmesi çok uzak değildir. Prof. Dr.

Ian F. Akyildiz önderliğinde Georgia Teknoloji Enstitüsünde, Geniş Bant Haberleşme Laboratuvarında, bahsedilen teknolojilerin gelişmesi için bütçesi 3 milyon dolara yakın projeler yapılmaktadır. Türkiye de ise Prof. Dr. Özgür Barış Akan önderliğinde yapılan "Minerva" isimli çalışma ile biyolojik kökenli nanoağlar ve bilişim esinli nörolojik tedavi için sinir sisteminin haberleşme temellerinin incelenmesini hedefleyen 1,8 milyon avroluk Avrupa Araştırma Konseyi'nin (European Research Council - ERC) projesine imza atılmıştır. Bu nedenle bu makalenin günümüzde ve gelecekte önemli bir araştırma konusunda bilgi vererek, bu alanda çalışmak isteyen araştırmacılara Türkçe bir yol gösterici niteliği taşıyacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Feynman, R. P. . "There's plenty of room at the bottom," *Engineering and science*, 23(5), 22-36,1960.
- [2] Memsic Telos B node, <http://www.memsic.com>
- [3] Tmote Sky node, <http://www.eecs.harvard.edu>
- [4] MICA2, <http://www.eol.ucar.edu>
- [5] Crossbow Imote2 node, <http://www.xbow.com>.
- [6] SHIMMER, <http://www.shimmersensing.com>
- [7] Sun Microsystems Sun SPOT, <http://www.oracle.com/technetwork/>
- [8] Monnit Wireless Sensors, <http://www.monnit.com>
- [9] LORD MicroStrain's Wireless Sensor Networks, <http://www.microstrain.com>
- [10] Ecomote, <http://www.ecomote.net>
- [11] Park, C., Liu, J. ve Chou, P. H. . "Eco: an ultra-compact low-power wireless sensor node for real-time motion monitoring," In *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks* (p. 54),2005, April.
- [12] Akyildiz, I. F. ve Jornet, J. M. "Electromagnetic wireless nanosensor networks," *Nano Communication Networks*, 1(1), 3-19, 2010.
- [13] Ceylan, H., Külah, H., Alp D, A., Haşçelik, G. ve Özgen, C. "MEMS Tabanlı Elektrokimyasal Biyosensör Tasarımı ve Üretimi," *Biomedical Engineering Meeting (BIYOMUT)*, 1-5, 2010.

- [14] Jornet, J. M. ve Akyildiz, I. F. "Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 10(10), 3211-3221, 2011.
- [15] Erkoç, Ş. "Nanobilim ve nanoteknoloji," ODTÜ yayıncılık, 2007.
- [16] Dragoman, M., Muller, A. A., Dragoman, D., Coccetti, F. ve Plana, R. "Terahertz antenna based on graphene," *Journal of Applied Physics*, 107(10), 104313, 2010.
- [17] Onur, A. R. I., GÖRGÜN, A. R., Adnan, K. A. Y. A., ÇOŞKUN, Ö. ve İrfan, K. A. Y. A. . "Karbon Nanotüp Malzeme İle Tasarlanan Heliks Antenlerin Performans Parametrelerinin İncelenmesi," *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 2(2), 2012.
- [18] Li, J., Lu, Y., Ye, Q., Cinke, M., Han, J. ve Meyyappan, M. . "Carbon nanotube sensors for gas and organic vapor detection," *Nano letters*, 3(7), 929-933, 2003.
- [19] Meyyappan, M. (Ed.). *Carbon nanotubes: science and applications*. CRC press, 2004.
- [20] Kocaefe, Ç. "Nanotıp: Yaşam Bilimlerinde Nanoteknoloji Uygulamaları," *Hacettepe Dergisi*, 38, 33-38., 2007.
- [21] Poizot, P. L. S. G., Laruelle, S., Grugeon, S., Dupont, L. ve Tarascon, J. M. "Nano-sized transition-metal oxides as negative-electrode materials for lithium-ion batteries," *Nature*, 407(6803), 496-499, 2000.
- [22] Li, H., Huang, X., Chen, L., Wu, Z. ve Liang, Y. "A high capacity nano Si composite anode material for lithium rechargeable batteries," *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2(11), 547-549, 1999.
- [23] Kayır, Y. Z. ve Baççıl, E. G. "Nanoteknoloji Nedir." *KOSGEB Sincan İşletme Geliştirme Merkezi*, 1-6, 2010.
- [24] Wirthlin, M. J., Hutchings, B. L. ve Gilson, K. L. "The nano processor: a low resource reconfigurable processor.," In *FPGAs for Custom Computing Machines, 1994. Proceedings. IEEE Workshop on* (pp. 23-30). IEEE, 1994, April.
- [25] Coskun, A. ve Akkaya, E. U. "Signal ratio amplification via modulation of resonance energy transfer: proof of principle in an emission ratiometric Hg (II) sensor.," *Journal of the American Chemical Society*, 128(45), 14474-14475, 2006.
- [26] Bennewitz, R., Crain, J. N., Kirakosian, A., Lin, J. L., McChesney, J. L., Petrovykh, D. Y. ve Himpsel, F. J. "Atomic scale memory at a silicon surface," *Nanotechnology*, 13(4), 499, 2002.
- [27] Avouris, P. "Carbon nanotube electronics and photonics," *Physics Today*, 62(1), 34-40, 2009.
- [28] Akyildiz, I. F., Brunetti, F. ve Blázquez, C. "Nanonetworks: A new communication paradigm," *Computer Networks*, 52(12), 2260-2279, 2008.
- [29] Akyildiz, I. F. ve Jornet, J. M. . "The internet of nano-things," *IEEE Wireless Communications*, 17(6), 2010.
- [30] Akyildiz, I. F., Jornet, J. M. ve Pierobon, M. "Nanonetworks: A new frontier in communications," *Communications of the ACM*, 54(11), 84-89, 2011.
- [31] Gregori, M. ve Akyildiz, I. F. "A new nanonetwork architecture using flagellated bacteria and catalytic nanomotors," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 28(4), 2010.
- [32] Ezziane, Z. "DNA computing: applications and challenges," *Nanotechnology*, 17(2), R27, 2005.
- [33] Gai, P. L., Stephan, O., McGuire, K., Rao, A. M., Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G. ve Colliex, C. "Structural systematics in boron-doped single wall carbon nanotubes," *Journal of Materials Chemistry*, 14(4), 669-675, 2004.
- [34] Cheng, H. M., Li, F., Su, G., Pan, H. Y., He, L. L., Sun, X. ve Dresselhaus, M. S. "Large-scale and low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by the catalytic pyrolysis of hydrocarbons.," *Applied Physics Letters*, 72(25), 3282-3284, 1998.
- [35] Dixon, R. A. ve Lamb, C. J. "Molecular communication in interactions between plants and microbial pathogens.," *Annual review of plant biology*, 41(1), 339-367, 1990.
- [36] Hiyama, S., Moritani, Y., Suda, T., Egashira, R., Enomoto, A., Moore, M. ve Nakano, T. "Molecular communication," *Journal-Institute of Electronics Information and*

- Communication Engineers*, 89(2), 162, 2006.
- [37] Atakan, B. "Moleküler Haberleşme ve Nanoağlar," emo.org.tr
- [38] Sesia, S., Baker, M. ve Toufik, I. "LTE-the UMTS long term evolution: from theory to practice," *John Wiley & Sons*, 2011.
- [39] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. ve Palaniswami, M. "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660, 2013.
- [40] Atzori, L., Iera, A. ve Morabito, G. "The internet of things: A survey," *Computer networks*, 54(15), 2787-2805, 2010.
- [41] Welbourne, E., Battle, L., Cole, G., Gould, K., Rector, K., Raymer, S. ve Borriello, G. "Building the internet of things using RFID: the RFID ecosystem experience," *IEEE Internet Computing*, 13(3), 2009.
- [42] AKTAŞ, F., ÇEKEN, C. ve ERDEMLİ, Y. E. "Nesnelerin İnterneti Teknolojisinin Biyomedikal Alanındaki Uygulamaları," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(1), 2016.
- [43] Aktaş, F., Çeken, C. ve Erdemli, Y. E. "Transmission of physiological signals with quality of service support by using Wireless Body Area Networks," In *Medical Technologies National Conference (TIPTEKNO)*, 2015 (pp. 1-4). IEEE, 2015.
- [44] Luo, J., Chen, Y., Tang, K. ve Luo, J. "Remote monitoring information system and its applications based on the Internet of Things," In *BioMedical Information Engineering*, 2009. *FBIE 2009. International Conference on Future* (pp. 482-485). IEEE, 2009.
- [45] Sokullu, R., Akkas, M. A. ve Çetin, H. E. "Wireless patient monitoring system," In *Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, 2010 *Fourth International Conference on* (pp. 179-184). IEEE, 2010.
- [46] Akyildiz, I. F., Pierobon, M., Balasubramaniam, S. ve Koucheryavy, Y. "The internet of bio-nano things," *IEEE Communications Magazine*, 53(3), 32-40, 2015.
- [47] Nakano, T., Suda, T., Moore, M., Egashira, R., Enomoto, A. ve Arima, K. "Molecular communication for nanomachines using intercellular calcium signaling," In *Nanotechnology*, 2005. *5th IEEE Conference on*(pp. 478-481). IEEE, 2005.
- [48] Giné, L. P. ve Akyildiz, I. F. "Molecular communication options for long range nanonetworks," *Computer Networks*, 53(16), 2753-2766, 2009.
- [49] Atakan, B. ve Akan, O. B. "An information theoretical approach for molecular communication," In *Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems*, 2007. *Bionetics 2007. 2nd* (pp. 33-40). IEEE, 2007.
- [50] Nakano, T., Moore, M. J., Wei, F., Vasilakos, A. V. ve Shuai, J. "Molecular communication and networking: Opportunities and challenges," *IEEE transactions on nanobioscience*, 11(2), 135-148, 2012.
- [51] Çoşkun, A., "Hücrelerarası İletişim ve Haberleşme," *Bilim ve Teknik*, Eylül 2011.