



6G'de Nesnelerin İnterneti Teknolojisinin Biyomedikal Alandaki Gelişmeleri

Biomedical Improvements of the Technology of Internet of Things in 6G

Semih SAK
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği ABD
Bolu, Türkiye
semihsak@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5409-7202

Mustafa Alper AKKAŞ
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Bolu, Türkiye
alperakkas@ibu.edu.tr
ORCID: 0000-0003-0185-0464

Öz

Geçtiğimiz son yıllarda nano teknolojideki ilerlemelerle birlikte, cihazlar nano ölçeğe hatta nano boyuta indirgenmiştir. Buna ek olarak Nano Nesnelerin İnterneti (NNI), duyurğa ağları ve nano ağların geliştirilmesiyle hayatın her alanında çok sayıda uygulama ile bu akımın nihai oluşumu olarak kabul edilir. Bununla birlikte bu tür nano cihazlar arasındaki iletişim halen çözülecek bir problemdir. Vücut merkezli Nano Ağların (VMNA) gelişiminde NNI'nin önemli bir rol oynadığına inanılıyor. Vücut Merkezli Nano Ağlar, kablosuz duyurğalar gibi alana özgü olarak kabul edilir ve her zaman belirli bir amacı desteklemek için uygulanırlar. Bu ağlarda, moleküler ve elektromanyetik haberleşme yaygın olarak iki ana paradigma olarak kabul edilir ve her ikisi de kendi gelişim sürecini takip eder. Bahsedeceğimiz yeni iletişim teknolojisiyle birbirleriyle haberleşecek aygıt sayısının önümüzdeki on yılda yaklaşık yüz milyar seviyesine ulaşabileceği tahmin edilmektedir. Bu denli büyük verinin aygıtlar arasında daha hızlı, yüksek kalitede yüksek güvenilirlik altında aktarılması 5G'ye olan ihtiyacı arttırmaktadır. 6G ile de THz bant kullanımıyla birlikte nano haberleşme sistemleri, moleküler ağlar arttırılmış gerçeğin bir seviye üstü olan hologram haberleşmesi de mümkün hale geleceği beklenmektedir.

Anahtar Sözcükler: Nano ağlar, giyilebilir teknoloji, nano nesnelerin interneti, 5G ve ötesi, 6G

Abstract

With the improvements in nanotechnology last recent years, devices have been reduced, the nanoscale, even nanosized. In addition, Internet of Nano-Things (IoNTs) is considered as the

Gönderme, düzeltme ve kabul tarihi: 05.01.2023 - 04.07.2023 - 11.07.2023

Makale türü: Derleme

ultimate creation of this trend, with numerous applications in all areas of life with the development of sensor networks and nano-networks. However, communication between such nano-devices is still a problem to be solved. IoNTs are believed to play an important role in the development of Body-centric Nano Networks. Body-centric nano-networks, like wireless sensors, are considered domain-specific and are always applied to support a specific purpose. In these networks, molecular and electromagnetic communication are widely considered to be the two main paradigms, and both follow their own developmental process. By the newl adopted communication technology, it is estimated that the number of devices that will communicate with each other may reach the level of approximately one hundred billion in the next ten years. The transfer of such large data between devices in a faster, high quality and high reliability increases the need for 5G. With the utilization of 6G by THz band, nano-communication systems, molecular networks, hologram communication, which is a higher above the augmented reality, will also possible.

Keywords: Nano networks, wearable technology, Internet of Nano-Things, 5G beyond, 6G

1.Giriş

Gelecek yıllarda nano teknolojideki başarımlarla birlikte tümdevrelerin birkaç yüz nanometre ile sınırlandırılmasının önünü açacağı tahmin edilmektedir. Nano teknolojiler, geleneksel makineleri küçültmek yeni işlevlere sahip nano cihazlar üretmek amacıyla mikroskobik düzeyde gözlemlenen yeni davranış ve özelliklere sahip bazı nano malzemeler ve nano parçacıklar üretilmiştir. Dağıtık nano cihazlar arasındaki bağlantılar ve birlikte çalışabilirliğini tanımlamak için nano makineler kavramı ortaya atılmıştır. Nano makinelerin

kapasiteleri, karmaşıklığı ve işlev aralığının birlikte çalışabilirliği sınırlıdır. Bu paradigma, nano ağlardaki benzer geliştirme süreçlerine sahip Nesnelerin İnterneti (Nİ) kavramının bir alt kolu olan Nano Nesnelerin İnterneti (NNİ) ile birlikte değişeceği öngörülmektedir. NNİ ile iki nano makine arasındaki iletişim, nano mekanik, akustik dalgalanma, kimyasal, elektromanyetik ve moleküler haberleşme yaklaşımlarıyla kurulabilmektedir. Günümüzde geleneksel haberleşme teknolojileri nano boyuttaki haberleşme için, karmaşıklık, alıcı ve verici terminalleri arasındaki enerji gerekliliği, boyut, gibi nedenlerle uygulanamamıştır. Bu nedenle yeni, uygulanabilir fiziksel katmanlardan daha üst katmanlara iletişim tekniklerinin geliştirilmesi gerekliliği doğmuştur. Moleküler ve elektromekanik haberleşme bu görüşler içerisinde öne çıkmıştır. Bu baskın görüşler üzerinde çokça uygulama yapılmıştır. 5G ile Nİ kavramı ve endüstri 4.0 ivmelenecek hayatımıza girmiş ve yalnızca halihazırda kullandığımız cihazların internete bağlanabilir olması değil aynı zamanda medikal alanda kullanılan ameliyat robotlarıyla ve yeni nesil haberleşme teknolojilerinin etkisiyle uzaktan ameliyatlara mümkün hale gelmesi muhtemeldir. Bunun yanında vücudumuzdaki nano makinelerin, otonom araçlar ve endüstride yer alan robotlar internet ile birbirleriyle haberleşerek bir eşgüdümlü çalışması mümkün olduğunda veri üretimimiz artması olası görülmektedir. 6G ile bu ihtiyaç çok yüksek boyutlara ulaşacağı tahmin edilmektedir. 6G teknolojisi kullanılabilir hale geldikçe akıllı makinelerin yetenekleri daha hızlı veri işleme daha iyi erişim gibi birçok potansiyel avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Bu alanda kaynak taraması yapılmış yerel kaynak bulunmadığından bu çalışmanın yerel kaynağımıza eklenmesi ve araştırmacıların bu yeni araştırma alanına ilgi göstermesi hedeflenmiştir. Bu çalışmamızda nano haberleşme ve NN interneti uygulamaları ve bu ileri teknolojik gelişmelerin grafen bazlı giyilebilir teknolojilerle insan yaşamına olabilecek etkilerine değinilmiştir. Makale oluşturulurken Google Akademik, ResearchGate, IEEE Science Repository, IEEE Explore platformları üzerinde "Nano Networks, Wearable Technologies, Internet of Nano-Things, 5G Beyond, 6G and Nano-Networks" anahtar sözcükleri kullanılmış son yıllarda yayınlanan indeks faktörü yüksek dergiler ve konferans bildirileri tercih edilmiştir. Çalışmamızın literatüre katkısı, bu alanda gelecekte oluşabilecek yenilikçi teknolojilerle insan yaşamının ne denli kolaylaştırabileceği, bunun yanında diğer alanları nasıl etkileyeceği konusunda bir fikir oluşturmak hedeflenmiştir.

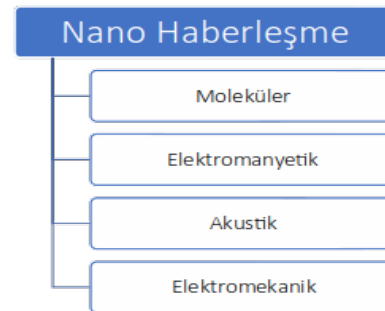
2. Nano Ağlara Giriş

Nobel ödüllü fizikçi Richard Feynman 1959 yılında yaptığı "There's Plenty of Room at the Bottom" (Aşağıda gidilecek oldukça yer var) isimli bildirisinde, nano ölçeklerde araştırma yapılması halinde birçok yeni keşfin oluşturabileceğini söylemiştir [1]. Feynman bu bildirisinde, gelecekte boyutları çok küçük olan ancak işlevsel açıdan oldukça iyi olabilecek insan yapımı cihazların, maddelerin moleküler yapısının irdelenmesi ve değiştirilmesiyle elde edilebileceği üzerinde öngörüsünü ve vizyonunu ortaya koymuştur. Diğer bir deyişle ölçme ve üretim yöntemlerinin nano ölçekte geliştirilmesi

gerektiğinin üzerinde durmuştur. Feynman'ın bu bildirisi bilim dünyasında nano çağı başlangıcı olarak kabul edilmektedir. Bilim dünyasınca kabul gören bu ifadelerle yakın geçmişten itibaren nano teknoloji olarak tabir edilen biyolojiden fiziğe, mühendislik ve kimyadan tıba birçok sistemlerin arasındaki koordinasyonu elektro moleküler mesajlar aracılığıyla sağlamıştır [2]. Vücudumuzu saran sinir sistemimiz ise nöron adını verdiğimiz sinir hücrelerinin oluşturduğu bir yapıdır ve nano haberleşme olarak en doğal, gelişmiş ve kompleks yapı örneği olduğu düşünülmektedir. Bu nano ağ vücudumuzu saran farklı sistemlerin arasındaki koordinasyonu elektro-moleküler mesajlar aracılığıyla sağlamıştır. Böylece insan vücudunun hayati derecede en önemli haberleşme sistemini oluşturmuştur [3]. Nano teknolojideki önemli gelişmelere dayanarak Prof. Metin Sitti, "Eğer nano robotlar moleküler makine unsurları olarak benimsenirse yakın gelecekte ağı nano ölçeğe ineceğini öne sürmüştür [4]." Bu nedenle nano haberleşme, nano cihazlar arasındaki iletişim olarak tanımlanmış bu haberleşme ilkelerinin yeni olması nano bilim dünyasından gelen taleplerle birlikte güncellendi. Bu gereklilikler, IEEE P1906.1'de ifade edilmiştir [5].

2.1. Nano Haberleşme Paradigmaları

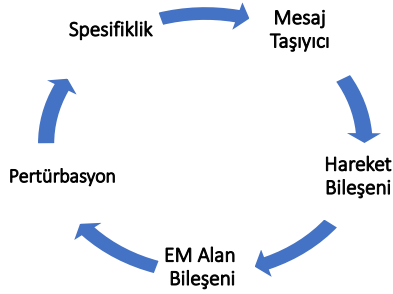
Nano haberleşme iki ana senaryoda çalışmaktadır. Bunlar, nano cihazlar ile mikro/makro sistemler ya da nano cihazlar ile nano cihazlar arasında gerçekleşmektedir. Bu cihazlar, hücreler arasındaki nano haberleşme, elektromanyetik, moleküler, akustik ya da nano mekanik olarak gerçekleşebilmektedir. Elektromanyetik haberleşme, doğru uygulanmadığında sağlığa zarar verebilmektedir. Onun için vücuda uygulanacak kuvvetin iyi hesaplanması gerekmektedir. Elektromanyetik haberleşme, moleküler haberleşmeye göre daha hızlı olabilmektedir. Moleküler haberleşmede ise iletişim daha yavaş olmaktadır; fakat sağlığa herhangi bir olumsuz etkisi henüz kanıtlanmamıştır. Bunun için haberleşme metodunun sağlık uygulayıcısı tarafından iyi belirlenmesi gerekmektedir. Nano haberleşme türleri Şekil-1'de belirtilmiştir [4].



Şekil-1: Nano Haberleşme Türleri [4]

Nano teknolojideki ilerlemeler 2015 yılında bir nano mekanik haberleşme örneği olan TouchCom'un transparan mikro robotları [6-9] harici bir makro ünitesi rehberliğinde ilaç partiküllerini taşımıştır [10, 11]. Vücut içinde hücrede ya da damarda yer alan bu mikro robotlar sayesinde vücut içerisinde ilaç dağıtımları daha etkili yapılacak ve yan etkisiz çözümler geliştirilebileceği düşünülmektedir. TouchCom kanal modelinde yayılma gecikmesi, açılma/gecikme

spektrumları yönünde sinyal gücünün kaybı ile ifade edilmiştir. [12]. Nano robotların kan damarlarındaki hareketini simüle etmek için bir araçta tanıtılmıştır [11]. Bir nano ölçekte iletişimden bahsedebilmemiz için beş temel bileşenin gerekliliği söz konusu olmuştur. Bunlar,



Şekil-2: Nano-ölçekte iletişim için gereklilikler [5]

Mesaj taşıyıcı, partikülün bir formu ya da bir elektriksel sinyaldir ve mesaj taşıyan fiziksel varlık olarak tanımlanmıştır. Hareket bileşeni, mesaj taşıyıcının hareket etmesini sağlayan kuvveti sağlayan olgudur. Hareket bileşeni, bir iletişim kanalı aracılığıyla bilgi taşımak için gerekli enerjiyi sağlama işlevindedir. Elektromanyetik alan bileşeni, mesaj taşıyıcısına rehberlik etmektedir. Örneğin bir bakterinin belli bir bölgesine uygulanacak kimyasal bileşimin ulaşımı için dışarıdan uygulanan etki olarak düşünülebilir.

Pertürbasyon, geleneksel haberleşme sistemlerindeki "modülasyon" olarak düşünülebilir. Perbürtasyonda alınan mesaj taşıyıcıların sayısına bağlı olarak değişebilmektedir.

Spesifiklik bir mesaj taşıyıcısının bir hedef tarafından alınması işlevini sağlamaktadır. Klasik haberleşme sistemlerinde adresleme olarak ifade edilmiştir. Spesifiklik, bir molekülün şeklinde veya hibritasyon için tamamlayıcı DNA da olabilir.

Bu temel yapıda, her bir bileşen diğer bileşenlerle ilişkili bir arabirim oluşturmuştur. Bu klasik ağ protokol yığını ve OSI protokol katmanları ile karşılaştırıldığında bir ağ için daha kapsayıcı bir tanım sağlamıştır [4]. Çizelge-1'de iletişim katmanına karşılık gelen haberleşme türlerine dair karşılaştırma verilmiştir.

Çizelge-1: Nano ölçek haberleşme bileşenlerine bir örnek [IEEE P1906.1]

Katman Adı	Örnek (Moleküler Hab.)	Örnek (Nanotüp/Terahertz)
Spesifiklik	Şekil ya da DNA hibritasyonu için bir hedef moleküle olan benzerliği	Anten açıklığı, rezonans frekansı, empedans eşleşmesi
Pertürbasyon	Yoğun, seyrek molekül konsantrasyonları sinyal moleküllerinin veya motorların açık/kapalı akışı, moleküllerdeki konformasyonel değişiklikler	Genlik, frekans ya da faz modülasyon
EM Alan	Akan sıvı karşısında uygulanan EM alanı	Omni ya da yönlendirilmiş çoklu CNT'ler

Hareket Bileşeni	Sıvı içerisinde yayılan moleküller, bağlanmamış moleküler motorlar, kendinden tahrikli hareket	Dalga yayılımı ve faz hızı
Mesaj Taşıyıcı	Molekül zinciri	EM dalga

2.2. Nano Ağ Uygulamaları

Nano haberleşme spor, sağlık, askeri, eğlence gibi alanlarda geniş uygulama alanı bulunmaktadır. Bunlar Çizelge-2'de detaylandırılmıştır [13-16].

Çizelge-2: Nano ağ uygulama alanları

Biyomedikal	Endüstri	Askeri	Çevresel
Sağlık Monitörü	Ürün Kalite Kontrol	Nükleer, Biyolojik ve Kimyasal Savunma	Biyolojik Bozulma
Hedeflenmiş Terapi/İlaç İletimi	Biyo Kontrol	Nano ekipmanlar	Biyo Kontrol

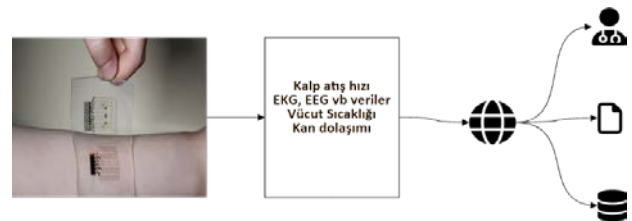
Tüm bu uygulamaların ortak yönü insan yaşamını daha kaliteli hale getirme amacı taşımaktadır. Genel anlamda, bu uygulamalar iki ana başlıkta kategorize edilmiştir. Bunlar,

- Medikal uygulamalar
- Medikal olmayan (diğer alanların tümü) uygulamalar

2.2.1. Medikal Uygulamalar

Medikal alanda literatüre kazandırılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin, göz tansiyonunu takip etmek için kullanılan robotlar [17] ve kanser hücrelerini takip için kullanılan robotlar geliştirilmiştir [18]. Hatta nano haberleşme sayesinde insan beden sağlığı gerçek zamanlı olarak takip edilebilir olması beklenmektedir. Nano robotlar sayesinde de biyolojik implantlar (doku ikamesi) gerçekleşmesi olasıdır. Bir diğer konu sağlık izleme, sinir sistemi hastalıkları için gelecek nesil medikal uygulamalar hayati önem taşıyacağı tahmin edilmektedir. Sağlık izleme sistemi Şekil-3'te gösterildiği gibi iki ana kısımdan oluşmaktadır [19].

Grafen materyali ve bu materyal üzerinde yer alan elektronik



Şekil 3: Sağlık izleme sistemi [19]

duyargalardan oluşmaktadır. Bu yapıda yer alan nano duyargalar, insana ait sağlık verilerini kalp ritmi, kan basıncı gibi gerçek zamanlı olarak alabilecektir. Bu duyargalar vücut içinde yer alan nano robotlarla bağlantıda kalabilecektir. İstendiğinde bu veriler internet aracılığıyla bir kayıt cihazına, dosyaya ya da sağlık kuruluşundaki ilgili doktorla paylaşılabilir. Buna ek olarak, bu veriler mevcut fitness cihazı tarafından elde edilemeyen verilerdir. Bir diğer faydası, kardiyovasküler hastalıkları önlemek için kan viskozitesi

ölçümü olacağı düşünülebilir [20]. Diğer yandan acil durumlarda hastanın kan değerleri, vücut sıcaklığı kalp ritim değerleri kısa zamanda doktoruna ulaştırılabilecektir. Böylece kişinin kan değerleri ile kalp ritmine göre kalp krizi geçirme ihtimali hesaplanacak ve erken müdahale yapılabilecektir. Kişi kalp krizi geçirdiğinde, vücudu ile ilgili değerler önceden sağlık kuruluşuna iletilmiş olacaktır. Böylece önceden müdahale ekipmanları ve gerekli ilaçlar hazırlanabilecek ve teşhis için maliyetli tetkiklere gerek kalmayacaktır. Kritik bir ameliyat sırasında hastanın yaşam fonksiyonları kablosuz olarak takip edilecek ameliyathanelerde bugünden farklı olarak hastaya bağlı olan kablo karmaşasının önüne geçilerek ameliyatların beklenenden erken bitirilerek hem zaman hem de maliyet tasarrufu sağlanabileceği olasıdır.

Akıllı bant uygulamasının daha gelişmiş uygulaması olan grafen bazlı dövme alacağı tahmin edilmektedir. İngilizce "graphite" ve "ene" kelimelerinin birleşmesinden üretilen "graphene" terimi Türkçede grafen olarak adlandırılmıştır. Karbon atomlarının altıgen şeklinde dizildiği (bal peteği örgülü) yapıya verilen isimdir ve iki boyutlu yüzeyden oluşan bir karbon formudur. Son yıllarda, yüksek hızlı cihazlar, duygular, termal ve elektriksel iletkenli kompozitler, güneş pilleri ve ekranları için şeffaf elektrotlar olarak farklı elektronik cihazlar geliştirilmiştir [21]. Bununla beraber hızla büyüyen bu teknolojiyi desteklemek ve elektroniklerin performansını geliştirmek için kuantum noktaları ve nadir toprak elementleri gibi yeni materyaller üzerinde çalışmalar yapılmıştır [22-24]. Bu ürünlerin sentezindeki zorluklar, tedarik noktasındaki sınırlamalardan dolayı yüksek maliyet oluşturmaları, bu materyallerin kullanımını zorlaştırmıştır [25]. Tam da bu noktada grafen bu tür bir malzemelerin yerini almak için mükemmel bir elementtir. Grafen, elektronik ve termal yapısı sayesinde, Dirac fermiyonları, kuantum Hall etkisi(QHE), ambipolar elektrik alan etkisi gibi olağan dışı elektronik özellikleri gösterdiği keşfedilmiştir [26-28]. Grafenin düşük enerjili uyarımları kütseldir ve termal olarak oldukça iyi iletkenlik gösterebilmektedir [29-31]. Grafen elektrik akımını ısıya dönüştürmeyi kolaylaştıran yüksek bir Seeback katsayısına (iletkenlik katsayısına) sahiptir [32]. Bundan dolayı grafen enerji toplama uygulamalarında kullanılma potansiyeli de yüksek olabilmektedir. Ayrıca kırılma mukavemeti, optik şeffaflık ve yüksek oda sıcaklığında taşıyıcı hareketliliği gibi etkileyici mekanik ve optik özelliklere sahiptir [33, 34]. Beklenen uyumluluğa özelliklere sahip olan, bal peteği kristali yapısındaki grafen ilk defa 2004 yılında sentezlenmiştir [35]. Sadece bir karbon atomu kalınlığında olan grafen, iki boyutlu düzlemsel olarak tarif edilen yapıların nadir örneklerindedir. Karbon atomunun ayrıca grafit (kurşun kalem gibi), kömür ve elmas gibi gündelik hayatta çok iyi bilinen allotroplarının nanotüp ve fulleren gibi yeni sentezlenen formları da mevcuttur. İki boyutlu grafen basketbol topu şeklinde paketlenildiğinde, sıfır boyutlu fullerenleri oluşurken, bir eksen etrafında silindirik şekilde katlandığında ise bir boyutlu karbon nano tüplerin ve düzlem tabakaların birbirine paralel olarak üst üste yığıldığında üç boyutlu grafiti oluşmaktadır. Yani karbon atomlarının iki boyutlu heksagonal SP2 şeklinde bağlanmasıyla oluşan bir tek tabakasıdır [36]. Yapılan bu çalışmalar ile grafenin bazı özelliklerini şu şekilde özetlenebilmektedir. Elektron

hareketleri silikondan yüz kat daha hızlı, ısıyı elmadan iki kat daha iyi iletir, yansıttığı ışığın yalnızca %2,3'ünü emer ve gram başına 2630 m²'lik yüksek yüzey alanı ile üç gramdan daha azı ile tüm bir futbol sahasını kapatabilir. Hafif olmasına rağmen çelikten iki yüz kat daha güçlü ve elmadan daha sert bir yapıya sahiptir. Nano ölçekte kararlılığını kaybetmemesi, elektronik bileşenlerin giderek küçülmesinden dolayı bu sektörde öne çıkan grafen, duygara yapımının yanı sıra, sağlam yapısından ve elektriği iyi tutup iletmesinden dolayı pil teknolojisinde de kullanılabileceği tahmin edilmektedir. Böylece pillerin yeniden şarj edilebilme döngüsünü çok yüksek noktalara çıkaracak pillerin ömrü yükselebilecektir. Bununla beraber elektronik cihazlar, yarı iletkenler, enerji üretimi, tranzistörler, havacılık, elektrokimya, sağlık ürünleri, yapı malzemeleri, kaplama, tarım gibi birçok alanlarda kullanılabilecektir. Kararlılığı sayesinde, uzun ömürlü ve hızlı şarj edilebilen biyoteknoloji cihazlar üretilebilecek, vücuttaki nöronlara bağlanabilen biyoteknoloji cihazlar geliştirilebilecektir. Nöronlara bağlanabilecek olmasının önemli yanı, bilindiği üzere sinir hücreleri bir hasar sonucu kendisini yenileyemeyen hücrelerdir.

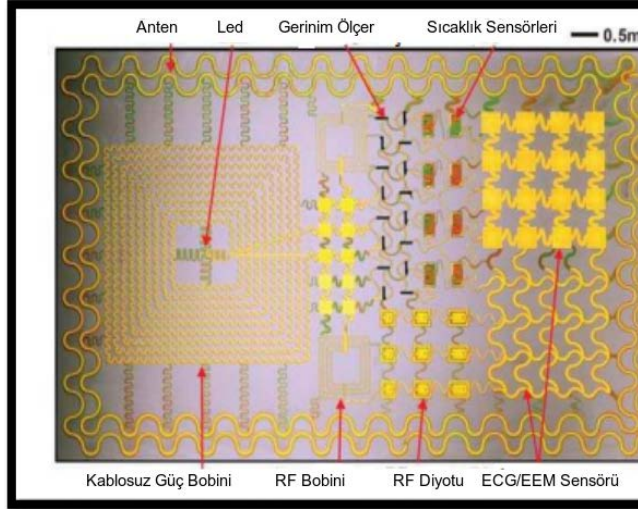
Nöronlara bağlanabilecek grafen bazlı iletkenler ile ilgili iletişimden yoksun bölgenin rehabilitasyonu yapılarak işlevsel hale getirilebileceği düşünülmektedir. Geniş açıdan bakılırsa, felç olmak aslında vücudumuzdaki sinirsel haberleşme problemi. Beyinde üretilen sinyaller ilgili nörona iletilmiyor ve ona bağlı olan kas grubunun hareket ettirilememesine neden olmaktadır. Buna benzer sorunlarda grafenin vücudumuza uygulanmasıyla ileride bu gibi durumların önemli ölçüde azalacağı düşünülmektedir. Dahası, bugün kullandığımız akıllı bantlar daha da küçülecek vücudumuzda bir epidermal dövme şeklini alabileceği düşünülmektedir. Hatta üç boyutlu baskı alabildiğimiz yazıcılarla tarzımızı yansıtan grafen bazlı dövme internet üzerinden bir iki tıklamayla edinecek ve anında kullanmaya başlanabileceğimiz olasıdır.

Günümüzde bilgisayar işlem gücünün ve mobil bağlantıların hızlanmasıyla, klinik araştırmaların ve sağlık hizmetlerinin kalitesini küresel ölçekte değiştirebilen mobil sağlık teknolojilerinin de doğmasını sağlamıştır. Akıllı telefonlarla iletişim kurabilen giyilebilir teknolojiler, ihtiyaç duyulan anda medikal tanı cihazlarıyla görüntüleme, gerçek zamanlı karar destek araçlarıyla desteklenen teknolojilerle de fizyolojik değişikliği anlamamızı kolaylaştırabilecektir. Günümüzde akıllı bantlarla yapabildiğimiz bütün işlemleri grafen bazlı epidermal dövmeyle yapabilir hale gelmemiz hedeflenmektedir. Uzun süreli giyilebilir biyometrik duygular medikal kuruluşlar dışında da uygulanma potansiyeline sahip olabilecektir. Mobil sağlık hizmeti, fitness takip, insan makine etkileşimleri gibi farklı pek çok alanı da kapsayabilmektedir. Hali hazırda kullanılan tıbbi tanı duygularının x-ray gibi kısıtlayıcı olmaları ve sinyallerin işlenmesinin güç olması teknolojisini de pahalı hale getirebilmektedir. Günümüzde elektrofizik ölçümler için tasarlanan geleneksel yöntemlerde kalın, elektrotlar kullanılırken; bunlar derinin yüzeyine bantlanan ve sabit veri toplama sistemlerine terminal bağlantıları olan düz elektrotlardır [37]. Grafen bazlı dövme uygulamalarında cilt

hafif aşındırılarak düz bir zemin elde etmek için hazırlanır, temas empedans seviyesini azaltmak için elektrot deri arayüzü arasına jel türü ürün uygulanır [38]. Jel zamanla kuruma durumuna geçebileceğinden, cilt için zararlı etki verebilir olması durumundan dolayı bu tür işlemler zaman alıcı, uzun süreli kayıtlar için uygun olmadığı tespit edilmiştir.

Grafen bazlı giyilebilir elektroninin ortaya çıkmasıyla devamlılığı olan koruyucu takip olanağı sağlanabilecektir. Bununla beraber işlevselliği ve sinyal kalitesi hala sınırlıdır. Hali hazırda giyilebilir elektro cihazlar insan vücuduna bilek, göğüs gibi yerlere bant veya kayışla monte edilir şekilde tasarlanmış, sert elektrot duyarları ve çipleri şeklindedir. Bu cihazlar ile aktivite takibi, kalp hızı kaydı, biyo empedans ölçümleri yapılmasına rağmen veri kalitesi istenilen tıbbi seviyeden uzak görülmektedir. Epidermal elektronik parçalar veya elektronik dövme, saç inceliğinde ve deri yumuşaklığında giyilebilir parçalar olarak yüksek hassasiyeti biyometrik algılama için tasarlanmışlardır. Bunun sayesinde insan derisi ile uzun süreli olarak iyi derecede ilişki kurmaları sağlanmıştır. Grafen bazlı duyarlar hafif ve yumuşak olmasıyla birlikte en büyük avantajı duyar-deri entegrasyonudur. İnsan derisinin mikroskobik olarak pürüzlü yapıda olması nedeniyle doğal cilt morfolojisine yalnızca ultra incelikte ve ultra yumuşak dövmelemin uyabileceği analizler sonucu tespit edilmiştir [39, 40]. Bu uyumluluk sayesinde kuru elektrot ve deri arasındaki temas alanı genişler ve dolayısıyla bu durum temas empedansını düşürür ve ciltte doğrudan daha yüksek sinyal gürültü oranına yol açmaktadır. Hali hazırda altın, biyo uyumlu ve tahriş etmeyen bir malzeme olduğundan, kuru elektrotlar ve e-dövme ara bağlantıları için en uygulanabilir elementtir. Kalınlığı genellikle on ila yüz nanometre aralığında olan altın, mekanik sağlamlık için daha kalın yarı saydam polimerler ile desteklenmektedir [41]. Altın maliyet açısından bakıldığında tek kullanımlık elektronik dövmelemlerde kullanılması fiyat avantajını yitirebilmektedir. Ayrıca bu tür duyarların görülebilir olması nedeniyle yüz gibi vücudumuzun bazı bölgelerinde kullanılamamasına yol açabilmektedir. En ince elektriksel iletken olan grafen, optik olarak saydam, mekanik olarak sağlam ve elektrokimyasal olarak biyo uyumludur. Bu sayede eş zamanlı yapılan çalışmalarda kablosuz bakteri algılayıcılarında da başarılı şekilde kullanıldığı çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca deri empedansı, sıcaklığı ve hareket algılamanın nöro görüntüleme ve eş zamanlı elektrokardiyografi (ECoG) kayıtları için esnek ve saydam elektrot dizileri oluşturmasını sağlayabilmektedir [42-46]. Yine grafen bazlı duyarların kalınlıkları deriye uyumlu olmasını gerektirecek şekilde çok küçük mikro metreler seviyesindedir. Bu zamana kadar yapılan çalışmalarda mikro metre kalınlığının çok altında elektriksel ve mekanik olarak yüksek performans sergileyen saydam grafen bazlı elektronik dövme (GET) duyarları geliştirilmiştir. Islak transfer kuru desen oluşturma işlemi ile doğrudan dövme kağıdına uygulanan GET'in insan derisine geçici dövme gibi saydam olarak aktarılması sağlanmıştır. İnceliği sayesinde mikroskobik morfolojiye tamamen uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Açık örgülü yapısı sayesinde GET ile derinin nefes alması sağlanmıştır. Diğer bir deyişle hem mekanik hem de optik açıdan neredeyse algılanamaz durumdadır. GET, EKG

(elektrokardiyogram), EMG (elektromiyogram), EEG (elektroensefalogram) ölçümleri gibi farklı fizyolojik ölçümler için de kullanılabilirliği gözlemlenmiştir [47, 48].



Şekil 4: Elektronik dövme içeriğine örnek bir uygulama [47, 48]

Grafen bazlı elektronik dövmelemler üzerine yerleştirilen fiziksel ve kimyasal duyarlar, algılama mekanizmalarındaki farklılıkla ayırt edilebilmektedir. Fiziksel duyarlar, kendisi üzerindeki bir değişiklik yoluyla bir özneliği ölçerken, kimyasal duyarlar hedef analit (hedef alınan kimyasal içerik) ile duyar arasındaki bir reaksiyonu ölçebilmektedir. Örneğin fiziksel duyarlar sinyalleri transdermal olarak ölçerken, kimyasal duyarlar ise bir çözünen madde ve dolayısıyla bir vücut sıvısı gerektirir. Sıvı olarak epidermal ter veya interstisyel sıvı (doku ve hücreleri çevreleyen, hücreler arasındaki boşluklarda bulunan sıvı) örneklendirilebilir.

Nano ağların bir diğer alt uygulama alanlarından biri de hiç şüphesiz nano robotlara yüklenmiş olan ilacın iletimidir. Damarlarımızda yer alan nano duyarlarla kanımızdaki glikoz seviyesinin gerçek zamanlı bilgisini almak mümkün olacağı düşünülmektedir. İnsülin taşıyan nano robotlarla da glikoz seviyesi ideal aralıkta tutulabileceği düşünülmektedir. Böylelikle diyabet hastaları için dışarıdan herhangi bir takviyeye ihtiyaç duyulmadan doğru anda gereken tedavi yapılabileceği tahmin edilmektedir. İnternet ile veri alışverişinde bulunabilecek giyilebilir cihaz ya da akıllı telefonlarımız ile alanında uzman kişilerle paylaşılabilir. Diyabet hastaları, hiçbir aksama olmaksızın günlük yaşamlarını sürdürebilir olabileceği tahmin edilmektedir. Bunun gibi hastalıkların ortaya çıkmadan önce tedavi edilmesi gözümüzle görülemeyecek kadar küçük boyutlarda nano robotlar; hava, su veya gıdanın kontrolünü yapabilecek moleküler boyutta işlev gören duyarlar gibi pek çok yenilikle nano teknolojideki ilerleme bizlere umut vermektedir. Bu bağlamda karbon nano tüp, grafen gibi elektriksel ve mekanik anlamda gelişmiş özelliklere sahip sentetik nano moleküllerin keşfedilmesiyle nano boyutlarda biyo duyarlardan tranzistörlere kadar birçok nano duyar üretilmiştir.

2.2.2. Medikal Olmayan Uygulamalar

Günümüzde, Sanal Gerçeklik (Virtual Reality) diğer bir deyişle

Arttırılmış Gerçeklik (Argumented Reality) içerik tüketimi bir akıllı cep telefonu ya da bilgisayar gibi harici cihazlardan yardım alınarak gerçekleştirilmektedir. Bu durum işin doğasına uygun değildir. Nano cihazlar gözümüzün çevresinde retina yakınlarında yoğunlaşmış olsaydı insanların olayları gerektiği gibi görmelerine yardımcı olabileceği tahmin edilmektedir. Aynı zamanda vücudumuzda çeşitli bölgelerimize yayılan nano aygıtlar ile deneyimi gerçeğe dönüştürmek adına insanlığı heyecanlandırmaktadır. Örneğin bir video oyunu sırasında, gözümüzün çevresinde yayılan nano cihazlar sayesinde arttırılmış gerçeklik dünyasında olacağız ve rakipten gelen bir etki karşısında vücudumuzdaki nano cihazlarla etkinin uyarlamasını hissedecek olmamız kuvvetle muhtemeldir. Ayrıca bu teknoloji, sporcu eğitimi, askeri simülasyon, harici beyin gibi diğer alanlara da genişletilebilir. Nano cihazlar sayesinde nefes hızı ve glikoz seviyesi gibi vücut durumlarındaki değişikliğini algılamakla kalmaz aynı zamanda insan vücudunda bazı tepkileri anlamamıza neden olur. Ziraat alanında bir bitki üzerine yerleştirilen nano cihazların oluşturduğu gurupla çevre durumunu ve bitki büyüme durumunu analiz etmek için fayda sağlayabilecektir. Bitki gelişimini gerçek zamanlı izlemenin yanında toprağın altındaki nem ve diğer koşulların da bilgisine sahip olup bitkinin savunma sistemini dengede tutabilir olmamız muhtemeldir. Aynı zamanda bu teknoloji, gerçek zamanlı kaliteye dair bilgi sağlayacak ve her daim taze meyvelere ve sebzelere ulaşabilir olunabileceği düşünülmektedir [16, 46].

Nano teknoloji devrimiyle askeri alanlarda da birtakım gelişmeler söz konusu olabilecektir. Ülkelerin çoğu kimyasal silaha sahip olduğu bu yönde geliştirmeler yaptığı yadsınamaz bir gerçek olarak karşımızda durmaktadır. Olası bir nedenden ötürü bu tür silahların kullanılması hem çevremiz hem de insanlık için geri dönülemez hasarlar verebilir. Bu noktada nano aygıtlar bir bölgedeki zararlı radyoaktif sızıntıları, bölgedeki zararlı bileşenlerin tehditi hakkında bilgi vermek amacıyla kullanılabilir. Nano aygıtların buradaki en büyük avantajı bu tip bileşenlerin varlığını atomik düzeyde tespit edebilecek olmasından ileri gelmektedir. Yine nano aygıtlar herhangi bir radar veya görüntüleme sisteminde fark edilmediğinden savaş alanlarında istihbarat için oldukça uygun olabileceği düşünülmektedir [13].

Endüstri alanındaysa, bundan birkaç yıl öncesine kadar endüstri 4.0'a kadar endüstriyel otomasyon olarak adlandırdığımız tümleşik sistemler, tedarik zincir optimizasyonu, otonom ekipmanlar, genişleyebilen üretim tesisleri, veri analizleri ve nesnelerin interneti olarak konseptlere ayrılmıştır. Buna da endüstri X.0 paradigması adı verilmektedir. Bu ana kadar endüstride yer alan ekipmanlar ayrı olarak değerlendiriliyordu. Artık endüstri X.0 ile birlikte modern endüstriyel sistemlerin geleceğinde genellikle milisaniyenin altında bir hızla binlerce cihaz arasında güvenilir, yüksek verimli bağlantı gereksinimleri almıştır. Bu da onların bir sonraki kullanım senaryosunda gerekli altyapıyı sağlayacak olması muhtemeldir. [49, 50].

Bir diğer uygulamasına değinilecek olunursa günümüzde kullandığımız akıllı cihazlarla, kişisel bilgisayarlarımızla etkileşim kurarken tuş takımı, dokunmalı yüzey gibi birkaç

arabirime ihtiyaç duyulmaktadır. Bu aslına bakılırsa çok yüksek gecikmeli bir bağlantı anlamına gelmektedir. Şöyle ki, beynimizde oluşturduğumuz bir cümleyi yazıya dökmek istediğimizde beynimizde oluşturduğumuz elektrik sinyallerini kullanarak ve bu sinyali hareket enerjisi halinde tuş takımının tuşlarına basmamız gerekmektedir. İşte tam bu noktada geliştirilme aşamasında olan ve üç yıl önce Nöralink firması tarafından giyilebilir entegre bilgisayar beyin arabirimi duyurusu yapılmıştır. Nöralink, bu düşünceler henüz beynimizdeyken onları yakalayıp çok hızlı bir bağlantıyla bilgisayar ortamına aktarabilecek bir cihaz duyurusu yapılmıştı. Bu tür cihazların gelişimiyle beraber çok çeşitli klinik bozukluklara sahip insanlara yardım etme potansiyeline sahip olabileceği muhtemeldir [51].

Bu noktaya kadar olabilecekler üzerinde durulmuşsa da elbette ki bu teknolojinin geliştirilmesi gereken yönleri aşması gereken engelleri vardır. Örneğin; NNİ altyapısının nano aygıtlardan toplanan önemli verileri güvenli olarak depolama ve veri iletiminde herhangi bir sızıntıya maruz kalmaması adına şifreleme protokolleri oluşturması gerekmektedir. Bu nedenle NNİ geliştiricilerinin seri üretimden önce bu konuları göz önünde bulundurması gerekmektedir [52].

3. Sonuç

Bu çalışmalar gösteriyor ki nano boyutlarda kablosuz haberleşme moleküller arası ve THz bandı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Özellikle biyomedikal uygulamalarda kullanılacak bu teknoloji geleceğimiz adına önemli bir kilometre taşını da geçeceğimiz düşünülmektedir. Artık, konunun uzmanları kritik bir ameliyatı gerçekleştirmek için yalnızca yeni nesil iletişim teknolojisinin getirdiği düşük gecikmeye sahip geniş bant internet bağlantısına ihtiyaç duyacak mekândan bağımsız günlük rutinini aksatmadan ameliyatını yapabileceği ve günlük yaşamımızın hızlanabileceği tahmin edilmektedir. Hologram yansıtma ile toplantı, konferans, ders gibi topluluk ile yapılması gereken çalışmalar uzaktan VR/AR ile oluşturulan ortamlarda yapılabilir olunacaktır.

Grafen bazlı elektronik dövmeler ile de hastalıkların erken teşhisi, ilaç tedarikinin erkenden sağlanması, erken müdahale ve dahası bir tahribat aldığında yenilenemeyen sinir hücrelerinin yerine uygulanarak o bölgeyi işlevsel hale getirilmesi gibi çığır açıcı bir niteliğe sahip olabilir. Felç geçirmiş hastalara uygulandığında belki de bugünün ihtiyacı olan tekerlekli sandalye gibi araçlara ihtiyacımız kalmayabilir. Geniş çapta düşünüldüğünde otonom araçları destekleyen yapay zekâ uygulamalarını barındıran daha iyi ölçeklenebilir yeni nesil şebeke altyapılarıyla akıllı şehirlerin oluşmasına katkı sunabilir. Böylece şehirlerin enerji tüketimleri optimize edilebilir ve enerjinin daha sürdürülebilir çevreye verdiği zararı minimize edilmiş bir geleceğe doğru gidilmesi tahminler dahilindedir. Bu konuda yerel bir kaynak bulunmadığından ve bu alandaki gelişmelerle ilgili literatüre Türkçe kaynak oluşturma amacıyla derlenmiştir.

Kaynakça

- [1] Feynman, R. P. *There's plenty of room at the bottom*, Engineering and science, 1960, 23(5), 22-36 p.
- [2] Malak, D., ve Ozgur B. Akan. *Molecular communication nano-networks inside human body*, Nano Communication Networks 3.1, 2012, 19-35 p.
- [3] Balevi, Eren ve Ozgur B. Akan. *A physical channel model for nanoscale neuro-spike communications*, IEEE Transactions on Communications, 2013, 1178-1187.
- [4] Yang K., Deng Y., Zang R., M. Mahboob, Rahman U., Ali A. N., Imran M.A., Jonet J.M. Abbasi Q. H., Alomainy A. A, *Comprehensive Survey on Hybrid Communication in Context of Molecular Communication and Terahertz Communication for Body-Centric Nanonetworks*, IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications, 2020, 2-5 p.
- [5] S.F. Bush, J. Eckford, A. Paluh, T. Thai, T. Sato, G. Piro, Y. Chen, K. Yang, V. Rao, V. Prasad, A. Mukherjee, T. Wysocki, E. F. Armay, A. Rafiei, ve S. Goel. *IEEE draft recommended practice for nanoscale and molecular communication framework*. IEEE P1906.1/D1.1, 2014, 1-52 p.
- [6] Yuanfeng Chen, Panagiotis Kosmas, Putri Anwar, ve Liwen Huang. *A touch-communication framework for drug delivery based on a transient microbot system*. *Nanobioscience*, IEEE Transactions on, 2015, 397-408 p.
- [7] Suk-Won Hwang, Hu Tao, Dae-Hyeong Kim, Huanyu Cheng, Jun-Kyul Song, Elliott Rill, Mark A Brenckle, Bruce Panilaitis, Sang Min Won, Yun-Soung Kim ve ark. *A physically transient form of silicenelectronics*. *Science*, 2012, 1640-1644 p.
- [8] Sylvain Martel, Mahmood Mohammadi, Ouajdi Felfoul, Zhao Lu, ve Pierre P. *Flagellated magnetotactic bacteria as controlled mri-trackable propulsion and steering systems for medical nanorobots operating in the human microvasculature*. *The International journal of robotics research*, 2009, 571-582 p.
- [9] Sylvain Martel, Ouajdi Felfoul, Jean-Baptiste Mathieu, Arnaud Chanu, Samer Tamaz, Mahmood Mohammadi, Martin Mankiewicz, ve Nasr Tabatabaei. *Mri-based medical nanorobotic platform for the control of magnetic nanoparticles and flagellated bacteria for target interventions in human capillaries*. *The International journal of robotics research*, 2009, 1169-1182 p.
- [10] I.S.M. Khalil, V. Magdanz, S. Sanchez, O.G. Schmidt, L. Abelman, ve S. Misra. *Magnetic control of potential microrobotic drug delivery systems: Nanoparticles, magnetotactic bacteria and self-propelled microbots*. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 35th Annual International Conference of the IEEE, July 2013, 5299-5302 p.
- [11] Yifan Chen, Panagiotis Kosmas, ve Rui Wang. *Conceptual design and simulations of a nano-communication model for drug delivery based on a transient microbot system*. In *Antennas and Propagation (EuCAP)*, 8th European Conference IEEE, in 2014, 63-67 p.
- [12] Yuanfeng Chen, Panagiotis Kosmas, Putri Anwar, ve Liwen Huang. *A touch-communication framework for drug delivery based on a transient microbot system*. *Nanobioscience*, IEEE Transactions on, 2014, 397-408 p.
- [13] Ian F Akyildiz, Fernando Brunetti, ve Cristina Blázquez. *Nano networks: A new communication paradigm*. *Computer Networks*, 2008, 2260-2279 p.
- [14] Cheryl M. *Molecular communication technology and implications for sport management*. *Emerging Technologies in Sport*, 2019, ISBN:9781351117906
- [15] Usman M., Ansari S., Taha A., Zaid A., A. Qammer H., A.I. Muhammad, *Terahertz-Based Joint Communication and Sensing for Precision Agriculture: A 6G Use-Case*, *Frontiers in Communication and Networks*, 2022, 2-5 p.
- [16] Barakat B., Taha A., Samson R., Steponenatie A., Ansari S. ve Imran M.A, *6G Opportunities Arising from Internet of Things Use Cases: A Review Paper*, *Future Internet Journals*, MDPI, 2021, 11-29 p.
- [17] Metin Sitti, Hakan Ceylan, Wenqi Hu, Joshua Giltinan, Mehmet Turan, Sehyuk Yim, ve Eric Diller. *Biomedical applications of untethered mobile milli/microrobots*. *Proceedings of the IEEE*, 2015, 205-224 p.
- [18] G. Enrico Santagati ve T. Melodia. *Opto-ultrasonic communications for wireless intra-body nanonetworks*. *Nano Communication Network*, 2014, 3-14 p.
- [19] R. Yu, T. Mak, R. Zhang, S. Wong, Zheng J Lau, Carmen C., *Smart healthcare: Cloud-Enabled body sensor networks*, *IEEE 14th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, 2017, 99-102 p.
- [20] L. Felicetti, M. Femminella ve G. Reali, *A molecular communications system for live detection of hyperviscosity syndrome*. *IEEE Transactions on Nano Bioscience*, 2020, 410-421 p.
- [21] Kang, K., Cho, Y., ve Yu, K. J., *Novel nano-materials and nanofabrication techniques for flexible electronic systems*. *Micro-machines*, 2018, 263 p.
- [22] Medintz, I. L., Uyeda, H. T., Goldman, E. R., ve Mattoussi, H., *Quantum dot bioconjugates for imaging, labelling and sensing*. *Nature materials*, 2005, 435-446 p.
- [23] Harman, T. C., Taylor, P. J., Walsh, M. P., ve LaForge, B. E., *Quantum dot superlattice thermoelectric materials and devices*. *Science*, 2002, 2229-2232 p.
- [24] Song, X., Zhang, J., Yue, M., Li, E., Zeng, H., Lu, N., ve Zuo, T. *Technique for Preparing Ultrafine Nanocrystalline Bulk Material of Pure Rare-Earth Metals*. *Advanced Materials*, 18(9), 2006, 1210-1215 p.
- [25] Massari, S., ve Ruberti, M. *Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies*. *Resources Policy*, 2013, 38(1), 36-43 p.
- [26] Castro Neto, A. H., Guinea, F., Peres, N. M. R., Novoselov, K. S., ve Geim, A. K. *The electronic properties of graphene*. *Reviews of modern physics*, 2009, 81(1), 109-162 p.
- [27] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Katsnelson, M. I., Grigorieva, I., ve Firsov, A. A. *Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene*. *Nature*, 2005, 438(7065), 197-200 p.
- [28] Geim, A. K., ve Novoselov, K. S., *The rise of graphene*. In *Nanoscience and technology: a collection of reviews*. *Nature journals* 2010, 11-19 p.
- [29] Chen, S., Moore, A. L., Cai, W., Suk, J. W., An, J., Mishra, C., ve Ruoff, R. S., *Raman Measurements of thermal transport in suspended monolayer graphene of variable sizes in vacuum and gaseous environments*. *ACS nano*, 5(1), 2011, 321-328 p.
- [30] Balandin, A. A., *Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials*. *Nature materials*, 10(8), 2011, 569-581 p.
- [31] Chen, S., Wu, Q., Mishra, C., Kang, J., Zhang, H., Cho, K. ve Ruoff, R. S. *Thermal conductivity of isotopically modified graphene*. *Nature materials*, 11(3), 2012, 203-207 p.
- [32] Seol, J. H., Jo, I., Moore, A. L., Lindsay, L., Aitken, Z. H., Pettes, M. T., ve Shi, L., *Two-dimensional phonon transport in supported graphene*. *Science*, 328(5975), 2010, 213-216 p.

- [33] Nair, R. R., Blake, P., Grigorenko, A. N., Novoselov, K. S., Booth, T. J., Stauber, T., ve Geim, A. K., *Fine structure constant defines visual transparency of graphene*. Science, 320(5881), 2008, 1308-1308 p.
- [34] Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., ve Hone, J., *Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene*, Science, 2008, 321(5887), 385-388 p.
- [35] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Yiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, *Nomenclature and terminology of graphite intercalation compounds*. Science. 2004, Cilt 306, 666 p.
- [36] C. N. R. Rao, Kanishka Biswas, K. S. Subrahmanyama ve A. Govindaraj, *Graphene, the new nanocarbon*. Journal of Materials Chemistry, 2019, 19(17), 2547-2469 p.
- [37] LU, Nanshu; YANG, Shixuan. *Mechanics for stretchable sensors*. *Current Opinion in Solid State*, Materials Science, 2015, 149-159 p.
- [38] Webb, R. C., Bonifas, A. P., Behnaz, A., Zhang, Y., Yu, K. J., Cheng, H. ve Rogers, J. A., *Ultrathin conformal devices for precise and continuous thermal characterization of human skin*. Nature materials, 2013, 12(10), 938-944 p.
- [39] Wang, L., ve Lu, N., *Conformability of a thin elastic membrane laminated on a soft substrate with slightly wavy surface*. Journal of Applied Mechanics, 2016, 83(4) p.
- [40] Yeo, W. H., Kim, Y. S., Lee, J., Ameen, A., Shi, L., Li, M., ve Rogers, J. A., *Multi-Functional Electronics: Multifunctional Epidermal Electronics Printed Directly Onto the Skin*, Advanced Materials, 2010, 25(20), 2772-2772 p.
- [41] Mannoor, M. S., Tao, H., Clayton, J. D., Sengupta, A., Kaplan, D. L., Naik, R. R., ve McAlpine, M. C., *Graphene-based wireless bacteria detection on tooth enamel*. Nature communications, 2012, 1-9 p.
- [42] Kuzum, D., Takano, H., Shim, E., Reed, J. C., Juul, H., Richardson, A. G., ve Litt, B. *Transparent and flexible low noise graphene electrodes for simultaneous electrophysiology and neuroimaging*. Nature communications, 2014, 1-10 p.
- [43] Park, D. W., Schendel, A. A., Mikael, S., Brodnick, S. K., Richner, T. J., Ness, J. P., ve Williams, J. C., *Graphene-based carbon-layered electrode array technology for neural imaging and optogenetic applications*. Nature communications, 2014, 1-11 p.
- [44] Lee, H., Choi, T. K., Lee, Y. B., Cho, H. R., Ghaffari, R., Wang, L., Kim, D. H. *A graphene-based electrochemical device with thermoresponsive microneedles for diabetes monitoring and therapy*. Nature nanotechnology, 2016, 566-572 p.
- [45] Choi, M. K., Park, I., Kim, D. C., Joh, E., Park, O. K., Kim, J., ve Kim, D. H., *Thermally controlled, patterned graphene transfer printing for transparent and wearable electronic/optoelectronic system*. Advanced Functional Materials, 2015, 7109-7118 p.
- [46] Yang K., Imran M., Yao X., W. Alomainy A., ve Q. H. Abbasi, *Nano-Electromagnetic Communication at TeraHertz and Optical Frequencies Principles and Applications*, Institution of Engineering and Technology, 2019
- [47] G. Yuyan, Cheng H., *Esembly of Heterogeneous Materials for Biology and Electronics: From Bio-Inspiration to Bio-Integration*, Journal of Electronic Packaging, 2017, 1-16 p.
- [48] J. M. Jornet ve I. F. Akyildiz, *Graphene-based plasmonic nano transceiver for terahertz band communication*, in Proc. 8th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP), Apr. 2014, 492-496 p.
- [49] Ian F Akyildiz, Ahan Kak, Sunai Nie, *6G and Beyond: The Feature of Wireless Communication Systems*, IEEE Access, 2020,8-30 p.
- [50] W. Saad, M. Bennis, ve M. Chen, *A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems*, IEEE Network., vol. 34, no. 3, 2020, 134-142 p.
- [51] Musk E. ve Neuralink, *An Integrated Brain-Machine Interface Platform with Thousands of Channels*, 2019, 1-12 p.
- [52] *The Internet of Nano Things (IoNT) existing state and future prospects*, GSC Advanced Research and Receive, 2020, 10-20 p.