

GRAFEN TEKNOLOJİSİ VE SAVUNMA SANAYİNDE KULLANIMI

TREND ANALİZİ EYLÜL 2019



İşbu eserde yer alan veriler/bilgiler, yalnızca bilgi amaçlı olup, bu eserde bulunan veriler/bilgiler tavsiye, reklam ya da iş geliştirme amacına yönelik değildir. STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş. işbu eserde sunulan verilerin/ bilgilerin içeriği, güncelliği ya da doğruluğu konusunda herhangi bir taahhüde girmemekte, kullanıcı veya üçüncü kişilerin bu eserde yer alan verilere/bilgilere dayanarak gerçekleştirecekleri eylemlerden ötürü sorumluluk kabul etmemektedir. Bu eserde yer alan bilgilerin her türlü hakkı STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş.'ye aittir. Yazılı izin olmaksızın işbu eserde yer alan bilgi, yazı, ifadenin bir kısmı veya tamamı, herhangi bir ortamda hiçbir şekilde yayımlanamaz, çoğaltılamaz, işlenemez.

 STM ThinkTech

1. GİRİŞ

21'inci yüzyılın ezberbozan teknolojilerinin beslendiği ana kaynaklardan biri de malzeme bilimindeki ilerlemelerdir. Malzeme biliminin araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetleri sayesinde bilgisayar işlemcileri, sensörler, uydular, ölçüm cihazları, kameralar ve diğer optik cihazların kapasiteleri belirgin biçimde artarken hacimleri hızla küçülmüştür. Yeni malzemelerle yeni teknolojilerin maliyetleri düşerken uygulama alanları genişlemiş ve tarihte görülmemiş bir inovasyon hızına ulaşılmasını sağlamıştır.

Malzeme biliminin 21'inci yüzyılın başlarında tanıttığı en çok yankı uyandıran malzemelerden biri grafendir. Manchester Üniversitesinin Rus kökenli bilim insanları Andre Geim ve Konstantin Novoselov'un 2004'te, grafit kristallerini oluşturan altıgen şeklinde dizilmiş karbon atomu katmanlarını sıradan bir yapışkan bant yardımıyla ayırarak elde ettiği grafen; yüksek iletkenliği, esnekliği ve sağlamlığı ile dikkatleri üzerinde toplamış ve kısa süre sonra "mucize malzeme" olarak anılmaya başlanmıştır.

Geim ve Novoselov'a 2010'da Kimya Nobel'i kazandıran grafenin üretiminin artırılması ve ticarileştirilmesi için ülkeler ve yatırımcılar yarışa girmiş ancak geçen süre zarfında tatmin edici sonuçlara erişilememiştir. Ne var ki grafen konusunda yapılan analizlerde sıkça dile getirildiği üzere son yıllarda gerek üretim ve uygulama çeşitliliğinin artması gerekse grafene olan talebin artmasıyla belirgin canlanma gözlenmektedir. Arz ve talepteki canlanmayla grafenin uygulama alanlarının artacağına dair tahminler sıklıkla dile getirilmeye başlanmıştır. Bu uygulama alanları arasında savunma sanayii de bulunmaktadır.

Bu analizde küresel grafen sektörünün durumu, başta savunma sanayii olmak üzere uygulama alanları incelenecek, dünyadan ve Türkiye'den örnek çalışmalara göz atılacak ve grafen konusunda yapılan projeksiyonlar aktarılacaktır.

2. GRAFEN ÜRETİMİ VE FİYAT TRENDLERİ

Keşfedilmesinin üzerinde 15 yıl geçmesine rağmen grafen malzemesinin ticari kullanımı kısıtlı kalmıştır. Bu durumun çeşitli nedenleri bulunmaktadır. Dünyanın dört bir yanından 10.000'in üzerinde kişi, kuruluş veya şirketin üyesi olduğu grafen alanındaki en büyük birlik olan The Graphene Council'in 2019'da yayınladığı rapora göre, grafen sektörünün önündeki en büyük engeller şunlardır⁽¹⁾:

- Üretim maliyeti ve malzeme fiyatlarının yüksekliği,
- Üretim ölçeği,
- Üretim kalitesi,
- Uygulama alanlarının kısıtlılığı/talep yetersizliği,
- Üretim süreçlerindeki sorunlar,
- Evrensel standartlar ve ürün özelliklerinin olmayışı,
- Sağlık, güvenlik ve çevre düzenlemeleri.

Grafen malzemesi, sunduğu pek çok avantaja rağmen henüz yeterli olarak kullanılamamaktadır. Bunun başlıca

nedeni üretimdeki sıkıntılardır. İki boyutlu bir malzeme olan grafenin üretiminde henüz ölçek ekonomisi yakalanamamıştır. Grafenin seri üretimindeki zorluk bu malzemenin en verimli özelliklerinin iki boyutlu ve yüksek saflık düzeyinde ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. Grafen karbon atomlarının birbirlerine altıgen oluşturacak şekilde bağlanmaları sonucu oluşur ve tek atom kalınlığında bir malzemedir. Karbon atomlarının iki boyutlu altıgen bir yapıda dizilmiş bu formu grafene olağanüstü özellikler sağlamaktadır. Tek tabaka grafen helyum atomlarına bile geçit vermeyecek ölçüde yoğundur. Isı iletkenliği bakırdan 10 kat daha fazladır. Elektron iletkenliği ise elektronik cihazlarda kullanılan silisyumdan (silikon) 100 kat daha fazladır.

Bilinen en ince malzeme olmasının yanında, güçlü karbon bağları, grafeni bilinen en güçlü malzeme de yapmaktadır. Grafen, çelikten yaklaşık 100-300 kat daha güçlü olup, ısıyı iyi iletmediği düşünülen diğer bir karbon allotropu olan elmasın daha iyi bir ısı iletkenidir. Ayrıca bir metrekaresi sadece 0,77 miligram ağırlığında olan grafen, kolayca esneyebilmekte ve 2011’de keşfedilen üstün yapıya özelliği sayesinde değişik formlardaki birçok malzemenin yüzeyine kolayca kaplanabilmektedir^{[2], [3], [4]}.

Grafen bu üstün özellikleriyle malzeme biliminin odak noktası olmuştur. Ancak grafenin seri üretimi için ekonomik bir teknik henüz geliştirilememiştir. Geim ve Novoselov’un yapışkan bantla grafit katmanlarını ayırma tekniği basittir ve elde edilen grafen en yüksek kaliteye sahiptir. Ancak bu teknik yavaş olup, bir mikrometre grafen üretmenin maliyeti 1000 doları bulmaktadır^[5]. Bu nedenle grafen üretimde günümüzde çoğunlukla kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapour Deposition -CVD) yöntemi kullanılmaktadır. CVD yönteminde bir karbon kaynağının (çoğunlukla metan gazı) bir metal (genellikle bakır folyolar) üzerinde 1000 °C sıcaklıkta dağılması ve grafenin metal yüzeyinde tabakalaşması sağlanır. Daha sonra elde edilen grafen kimyasallar kullanılarak silika veya polimer alt tabakaya aktarılır. Bu yöntemle elde edilen grafen tabakaların büyüklüğü onlarca santimetrekareye ulaşabilmektedir. Dolayısıyla grafenin metrekaresi maliyeti 100.000 doların altına düşürülebilmektedir. Ne var ki bu yöntemle elde edilen grafen sıklıkla kusurlar taşımaktadır^[5]. CVD yönteminde değerli titanyum kadmiyum veya nikel gibi madenleri ucuz bakır folyolarının kullanımı tekniği, 2015’te Glasgow ve Bilkent Üniversitesi bilim insanları tarafından geliştirilmiştir^[6]. Ancak CVD için gerekli 1000 °C sıcaklık endüstriyel uygulamalar açısından çok yüksektir^[7].

Grafen, yeni keşfedilen bir malzemenin yaşam eğrisinin başında çektiği sıkıntıları yaşamaktadır. Nitekim 1950’lerde keşfedilmesine rağmen karbon fiber malzemesinin yaygın kullanıma geçmesi 30-40 yılı bulmuş, yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesini beklemek zorunda kalmıştır^[8]. Genç bir teknoloji olan grafenin üretim sorunlarının giderilmesi ve maliyetlerin aşağı çekilmesi için çalışmalar sürmektedir. Araştırmalar grafen üretim maliyetinin yakın gelecekte belirgin biçimde düşebileceğine işaret etmektedir. Örneğin, Singapur’lu ve Çinli bilim insanları 2018’de grafen üretiminde organik

çözücü ihtiyacını azaltarak, grafen üretim maliyetini 100 kat ucuzlatacak bir yöntem geliştirdiklerini duyurmuşlardır^[9]. ABD’nin Kansas State Üniversitesi bilim insanları “patlatma” yöntemiyle grafen üretimi tekniğinin patentini almışlardır. Bu yöntemde bir hidrokarbon gaz bir gaz odasına alındıktan sonra oksijen verilmekte, bir bujiyle gaz karışımı patlatılmakta ve grafen elde edilmektedir. Yöntemin basit, endüstriyel olarak ölçeklenebilir ve dolayısıyla kitlesel üretimin gerçekleştirilebilir olduğu belirtilmektedir^[10].

Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT), Nisan 2018’de mühendislerinin yüksek kaliteli uzun grafen şeritlerinin sürekli olarak üretimini sağlayacak bir imalat süreci geliştirdiğini duyurdu. Sözkonusu şeritlerin tuz, büyük iyonlar, proteinler veya nanopartikülleri filtreleyebileceği, deniz suyunun arıtılması, biyolojik ayrıştırma ve benzeri alanlarda kullanılabilmesi belirtildi^[11]. Avustralya’nın önde gelen araştırma kuruluşlarından CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), 2007 yılında, grafen üretiminde CVD ve benzeri yöntemlerde hava kontrollü (vakumlu tüp, yoğuz gazlı ortam vb) ortama gerek kalmayacak bir yöntem geliştirdiklerini duyurmuşlardır. CSIRO, “GraphAir” adını verdiği yöntemle, soya yağının oda sıcaklığında açık havada ısıtılması halinde çözülmeye başladığını ve grafen katmanlarının elde edildiğini belirtmektedir^[12]. Güney Kore Seul Ulusal Üniversitesi bilim insanlarıyla Graphene Square Inc. şirketi 2018 yılında sıradışı bir üretim tekniği tanıtmıştır. Güney Koreli uzmanlar grafen ve grafen benzeri yapılar sentezlemek için sıradan lazer yazıcılar kullanmışlardır. Bu yöntemde, lazer yazıcı toneri olarak grafit kullanılmakta ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılan grafitten elde edilen grafen, kâğıt yerine bakır folyolar üzerine basılmaktadır. Bu folyolar üzerindeki grafen, 2014’te Pennsylvania Üniversitesinin kurduğu startup Graphene Frontiers’in geliştirdiği “rulodan ruloya” yöntemiyle önce polimer filmlere ardından da istenilen yüzeye aktarılabilir. Rulodan ruloya yöntemi, grafenin seri üretiminin de yolunu açmaktadır^[7].

Görüldüğü üzere endüstriyel olarak grafen üretiminde ölçek yakalanması yönünde arayışlar sürmektedir. Dünyada 250’den fazla firmanın grafen üretimi üzerinde çalıştığı bildirilmektedir^[13]. Bu firmalar farklı grafen teknikleri benimsemekte, bu nedenle farklı kalite (katan sayısı ve saflık derecesi) ve fiziki formda (toz, plaka, çözelti vb) grafen ürünlerini piyasaya sunmaktadır.

The Graphene Council’in yaptığı araştırmaya göre, dünyada piyasaya 60’tan fazla grafen ürünü sunulmaktadır. Sözkonusu ürünler için 45’ten fazla spesifikasyon (ürün özelliği) belirtilmektedir. Ancak sözkonusu spesifikasyonların ortak paydası bulunmamaktadır. Ayrıca ürün açıklamalarında grafen katman sayısını belirtenlerin oranı yüzde 60’ı geçmemektedir^[1].

Bu durum bir alıcının farklı tedarikçilerden elde edeceği grafen malzemeleri, her bir numuneyi laboratuvarında incelemeyi karşılaştırmasını imkânsız hale getirmektedir. Dünyada bu özellik tespitini yapan laboratuvarlar bulunmaktadır ancak her bir numunenin test edilmesi 15.000 dolara mal olabilmektedir^[14]. Bu nedenle bir

yandan grafen malzemesinin standart tanım ve özelliklerinin belirlenmesi, öte yandan ise grafen üreticilerinin lisanslanması yönünde çalışmalar yürütülmektedir. The Graphene Council üreticiler için “Doğrulanmış Grafen üreticisi” programı başlatmıştır^[14]. Grafen ürünlerinin tanımlarına ilişkin ilk ISO standardı, İngiltere Ulusal Fizik Laboratuvarının öncülüğünde 2017’de ortaya konulmuştur^[15]. Bu standartta iki boyutlu malzemelere ilişkin 99 tanım bulunmaktadır. ISO/TS 80004-13 grafen ürün sınıfları ve bunların önerilen kullanım alanları Tablo 1’de verilmiştir:

Tablo 1’de görüldüğü üzere iki boyutlu bir malzeme olan grafen, giderek daha fazla farklı formda satışa sunulmaktadır. Yukarıdakilerin dışında “işlevlendirilmiş grafen” malzemeleri de geliştirilmektedir. Burada karbon petekleri oksijen, hidrojen ve fosfor gibi element atomları ile kaplanarak yeni işlevler sağlanmaktadır. ISO standardı ile 10 katmandan fazlasına sahip yapılar “Grafen” olarak tanımlanmaktan çıkmıştır.

Grafen malzemesine ilişkin standartlaştırma çalışmaları önemli ilerleme kaydetmekle birlikte, sektörde sıkıntılar sürmektedir. Örneğin üretim yöntemi ve ürün çeşitliliğinden ötürü literatürde küresel grafen üretimine dair sağlıklı bir rakam bulunmamaktadır. CVD yöntemiyle elde edilen ve genellikle silikon filmler üzerinde satışa sunulan grafen şeritleri, yaprakları veya plakalarının fiyatları alanları üzerinden; toz, macun veya çözelti içinde satışa sunulan grafen nanotozlar ve grafen oksitlerin fiyatları ise ağırlıkları üzerinden belirlenmektedir. Bu da küresel ölçekte grafen üretim miktarı konusunda net rakamların elde edilmesini güçleştirmektedir. Araştırma kuruluşu IDTechEx, 2016 yılında açıkladığı bir raporda, 2026 yılında küresel grafen üretim miktarının yıllık 3.800 tona ulaşacağını belirtmektedir^[19]. Buna karşılık Kanadalı nanoteknoloji firması NanoXplore Ocak 2019’da, 2020 yılı ilk çeyreğinde yılda 4.000 ton grafen üretim kapasitesine ulaşacağını, bu miktarı yakın gelecekte 10.000 tona çıkarmanın mümkün olduğunu duyurmuştur^[20].

Ürün ^{*[16]}	Tabaka sayısı	Açıklama	Önerilen kullanım alanları ^[17]
Grafen**	1	Karbon ve hidrojen atomlarının (CH)n birini alarak tekrarlanan iki boyutlu tabakadan oluşan tek katmanlı materyal.	Grafen araştırmaları; Enerji depolama çalışmalarında süperkapasitör elde edilmesi; Güneş enerjisi performans artırılması; Optoelektronik, plazmonik ve nanofotonik; Yarı iletken çipler; İletken grafen filmleri; Bilgisayar bellekleri; Biyomalzemeler ve Biyoelektronik.
Çift katmanlı grafen (2LG)	2	Sınırları belli olacak şekilde üst üste konulmuş iki grafen katmanından oluşan iki boyutlu malzeme.	Sensörler, bataryalar, kaplama malzemeleri, nanoelektronik.
Bükülmüş çift katmanlı grafen / turbostratik çift katmanlı grafen (tBLG veya t2LG)	2	Sınırları belli olacak şekilde turbostratik olarak belli bir açıyla istiflenmiş iki grafen katmanından oluşan iki boyutlu malzeme.	Otomotiv ve bilişimde süper iletken.***
Bükülmüş çift katmanlı grafen / turbostratik birkaç katmanlı grafen/ t (n+m)LG	2	Sınırları belli olacak şekilde turbostratik olarak belli bir açıyla istiflenmiş birkaç grafen katmanından oluşan iki boyutlu malzeme.	Otomotiv ve bilişimde süper iletken.***
3 katmanlı grafen (3LG)	3	Sınırları belli olacak şekilde üst üste konulmuş iki grafen katmanından oluşan iki boyutlu malzeme.	Sensörler, bataryalar, kaplama malzemeleri, nanoelektronik.
Birkaç katmanlı grafen (FLG)	3-10	Sınırları belli olacak şekilde üst üste konulmuş üç ile 10 grafen katmanından oluşan iki boyutlu malzeme.	İletken mürekkepler, kayganlaştırıcılar, kompozitler, kaplama ve güçlendirme malzemeleri.
Grafen Nanotoz (Graphene NanoPlatelet) (GNP)	Değişmektedir.	Grafen katmanları içeren nanotozlardır. GNP’ler genellikle 1-3 nm kalınlığında ve 100nm ile 100 mikrometre uzunluğundadır.	Kompozitler, elektronik, havacılık, fotovoltaik enerji, fotonik.
Grafen Oksit (GO)	-	Grafitin yoğun oksitlendirilmesiyle hazırlanan kimyası değiştirilmiş grafen.	Enerji Depolaması, biyomedikal uygulamalar, biyosensörler.
İndirgenmiş Grafen Oksit (rGO)	-	Grafen oksitin oksijen miktarını azaltılmış formudur.	Enerji üretimi ve depolanması, biyomedikal uygulamalar, biyosensörler.

* Ürün tanımları ISO/TS 80004-13 standardından alınmıştır

** Sektörde CVD Grafen veya Tek Tabaka Graphene olarak da anılmaktadır.

*** Sektörde TBG olarak da anılmaktadır.

Tablo 1: ISO/TS 80004-13 grafen ürün sınıfları ve bunların önerilen kullanım alanları^[18]

Üretim ve ürün sunumundaki farklılıklar, grafen ürünlerinin fiyatlarında da oynamalara yol açmaktadır. Ürünlerin genel fiyat seviyesi konusunda sağlıklı rakamlara ulaşmak mümkün değildir. The Graphene Council'in Mart 2019'da yayınladığı, "Graphene and Composite Materials -Stronger Together" başlıklı sunum, grafen türlerine göre fiyatların seviyesi konusunda fikir vermektedir. Buna göre ileri teknoloji elektronik ürünlerde süper iletken olarak kullanılmaya başlanan 1-2 katmanlı grafen plakalarının (Epitaksal CVD) metrekaresi maliyeti 500.000 dolara kadar ulaşmaktadır. Sensörlerde kullanılan hayli iletken, esnek ve geniş yüzeyleri kaplayabilen birkaç katmanlı grafenlerin (FLG) maliyetleri ise kilogram başına 100-2.000 dolara kadar gerilemiştir. Özellikle yapı malzemeleri ve kaplamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan Grafen oksit fiyatları ise kilogram başına 50-2.000 dolar arasındadır^[1].

3. GRAFENİN PAZAR TRENDLERİ

Küresel grafen sektörünün üretim ve maliyet sorunları sürmekle birlikte, grafen tanım ve standartlarının 2017'de ortaya konulmasına paralel olarak, üretim miktarı ve çeşitliliğinde belirgin bir canlanma yaşandığı, fiyatların ise makul seviyelere doğru ilerlediği anlaşılmaktadır. Bu gelişme grafenin ticari kullanımı ile, grafen araştırma ve patent sayılarının 2018 yılında belirgin biçimde artmasıyla da kendini göstermektedir. 2018'de dünyanın dört bir yanında grafen bağlantılı firmalar savunma, uzay ve madencilik gibi alanlarda yüksek miktarlı grafen siparişleri almışlar, grafenin kullanıldığı çok sayıda prototip geliştirmişlerdir. Öyle ki, kimi yorumculara göre 2018 yılı grafenin ticarileşmesi açısından "kırılma yılı" olmuştur^[21].

2018'de grafen araştırmaları ve pazarına ilişkin rakamlar bir önceki yıla göre çarpıcıdır. Research and Market'in raporuna göre grafen sektörünün gelirleri 2017'de 85 milyon dolarken, 2018'de 200 milyon dolara çıkmıştır^[22]. Aynı kuruluşun bir başka araştırmasında küresel grafen sektörünün 2017-2026 döneminde yıllık ortalama yüzde 40 büyüme oranına ulaşacağı^[23] öngörülmektedir. Yine Research and Market'in bir başka araştırmasına göre ise, 2023 yılında bir milyar dolarlık küresel pazar büyüklüğüne ulaşılacağı tahmin edilmektedir^[24].

Grafen alanında 2018'de yaşanan belirgin ilerlemeye ilişkin yorumlar üretici ve kullanıcı alanındaki değişimlere işaret etmektedir. Avrupa Birliği Komisyonunun grafen konsorsiyumu The Grafen Flagship (Grafen Amiral Gemisi) 2018'de yaşanan gelişmeleri, "Malzeme bilimi araştırmalarından bileşen geliştirme ve sistem seviyesinde entegrasyona geçiş" olarak yorumlamıştır^[25]. Nanoteknoloji yazarı Liam Chritcley ise kullanıcı tarafındaki bilinçlenmeye dikkat çekmektedir. Chritcley, ISO'nun grafen standartlarını belirlediği "2017'de üreticiler hâlâ grafen türleri arasındaki farkları yeterince bilmemekte ve istenilen sonuçlara uygun olmayan grafen formları kullanılmaktaydı. Bu karışıklık hâlâ sürmekle birlikte, insanlar kullanıma uygun pek çok grafen formu bulunduğunu fark etti ve bunları düşük teknoloji uygulamalarında katkı

malzemesi olarak kullanmaya başladı" ifadelerini kullanmıştır. Chritcley'e göre kullanıcıların grafene karşı güveni belirgin biçimde artmıştır. Bu durum yakın gelecekte de sürecek gibi görünmektedir^[21].

3.1 Bölgesel Pazar Trendleri

Grafene yönelik talepteki canlanma, grafen malzemesinin ticari kullanımının artırılması için devletler öncülüğünde başlatılan çabaların meyve vermeye başladığına işaret etmektedir. Grafen teknolojisinin Ar-Ge faaliyetlerinin organizasyonu ve finansal yükü günümüze kadar büyük ölçüde devletler ve uluslararası kuruluşlarca yüklenilmiştir. Geim ve Novoselov'un Grafen keşiflerinin 2010'da Nobel ile ödüllendirilmesinin ardından grafen teknolojisine yapılan yatırımlar da hızla artmıştır. Çin, ABD, Güney Kore, Japonya, Hindistan, Malezya, Tayvan, Avustralya, Kanada, Singapur ve Avrupa Birliği (AB) gibi ülke ve gruplar grafen araştırmaları için yoğun çaba sarf etmiş ve hatırı sayılır kamu fonları tahsis etmişlerdir. Kamu desteğindeki üniversiteler ve grafen araştırma enstitüleri bir yandan grafen ürünleri geliştirirken öte yandan grafenin ticari kullanımının artması için özel şirketler kurarak sektörün gelişmesine katkıda bulunmuşlardır. Aşağıda söz konusu ülke ve gruplardan bazılarında grafen alanında yapılan yatırım, teşvik, araştırma ve ürün geliştirme faaliyetleriyle grafen sektörünün performansı özetlenecektir.

3.1.1 Çin, Grafende Küçük Oynayıp Büyük Lokma Yutuyor

Çin, grafen malzemesi üzerine araştırma ve ticarileştirme çalışmalarının yoğun olduğu ülkelerin başında gelmektedir. Çin devleti "Made in China 2025" ve 13'üncü Beş Yıllık Kalkınma Planı gibi stratejik belgelerinde grafen gibi yeni malzemelerin geliştirilmesini ulusal ekonominin öncelikleri arasında saymış ve araştırmalarının destekleneceğini bildirmiştir^[26]. Ancak grafen araştırmalarına sağlanan fonlara ilişkin bir raporlama bulunmamaktadır^[27]. Çin Ulusal Doğal Bilimler Vakfının 2017'de malzeme bilimi projelerine yaklaşık 2 milyar yen fon sağladığı belirtilmektedir^[28]. Buna karşılık yayınlanan uluslararası raporlar, 2017 rakamlarına göre, küresel grafit pazarının yüzde 68'ini elinde bulunduran Çin'in grafen araştırmaları ve üretimi konusunda dünya lideri olduğunu ortaya koymaktadır^[29]. Ekim 2018'de yayınlanan bir rapora göre Çin'de kayıtlı 4.000'den fazla grafen bağlantılı şirket bulunmaktadır. Söz konusu şirketler 2017'de gelirlerini yüzde 69,3 artırarak 18 milyon 820 bin dolar gelir elde etmiştir. Aynı yıl küresel grafen pazarının büyüklüğü bir rapora göre 83 milyon dolar civarında gerçekleşmiştir. Dolayısıyla Çin şirketleri, küresel grafen pazarının yüzde 22,1'ini elinde tutmaktadır^[30].

Çinli kurum ve kuruluşlar grafen patentlerinin de yaklaşık yüzde 60'ına sahiptir. 2017'de dünyada tanınan 13.371 grafen bağlantılı patentin 5.603'ü Çinli firmalarca alınmıştır. Dünyada 2004 yılından beri tanınan grafen bağlantılı patent sayısı 2017 sonu itibarıyla 53.644'e ulaşırken bunların 32.143'ü Çinli firmalara tanınmıştır. Patent sayısında Çin'i, Güney Kore ve ABD takip etmektedir^[27].

Çinli grafen malzeme üreticileriyle teknoloji şirketleri grafen üretimi ve uygulamalarıyla da ilgiyi üzerlerine toplamaktadır. Örneğin, dünyanın ilk grafen malzemesi ürün sertifikası Temmuz 2018'de Çinli Leadermano şirketi tarafından alınmıştır. 2011'de kurulan şirket, yılda 20 ton grafen tozu, 30.000 ton polimer kompozit ve 50.000 ton fonksiyonel kaplama malzemesi üretmektedir^[31]. Pekin'deki Carbon Century Technology şirketi motor yağlarında enerji tasarrufu sağlayan bir grafenli katkı maddesi geliştirmiştir. Wuxi kenti merkezli GMCC Electronic Technology, elektrokimyasal bataryalara alternatif olabilecek, çok daha kısa şarj süreli grafenle güçlendirilmiş süper kapasitör üretmektedir. Pekin merkezli Xiaomi ile Guangzhou merkezli FiiO grafen kulaklıklar üzerinde çalışmaktadır. Grafenle güçlendirilmiş optik ekranlar, LED ampuller ve otomobil lastikleri Çinli firmalarca piyasaya sürülen diğer ürünlerdir^[26].

Ancak AB, ABD ve Güney Koreli rakipleri ile karşılaştırıldığında, Çinli grafen bağlantılı şirketlerin çok daha düşük katma değerli alt pazar segmentlerine yönelik üretim yaptığı gözlemlenmektedir. IBM ve Samsung gibi firmalar elektronik, telekomünikasyon ve giyilebilir elektronik ürünleri gibi yüksek katma değerli alanlarda grafenli çözümlerine patent alırken, Çinli firmaların genellikle ürün performansını artıran grafenli kaplama ve katkı malzemelerine odaklandığı belirtilmektedir. Büyük bölümü startup olan Çinli grafen şirketlerinin en fazla üç yıllık Ar-Ge sürecine sahip ürünlere odaklanmasının bu duruma yol açtığı ifade edilmektedir^[32].

Yüksek segmentteki grafen ürünleri arayışındaki büyük Çinli firmalar ise uluslararası kuruluşlarla işbirliğine gitmektedir. Dünyada akıllı cep telefonu pazarında liderliği 2019 yılında Apple'ın elinden alacağı ileri sürülen Çinli teknoloji şirketi Huawei bunlardan biridir. 2015'ten bu yana İngiltere'nin Ulusal Grafen Enstitüsü (NGI) ile araştırma işbirliği yapan şirket grafen katkılı ürünler geliştirmekte ve yenileri için araştırmaları desteklemektedir^[33]. Örneğin şirket, 2016'da mobil baz istasyonlarını aşırı sıcak ve soğuk havalarda bile çalışır halde tutacak grafenle güçlendirilmiş lityum-iyon batarya geliştirdiğini duyurmuştur^[34]. Şirket, grafen filmlili soğutma sistemi bulunan Mate 20 X telefonlarını Ekim 2018'de piyasaya sunmuştur^[35]. Şirketin ayrıca birkaç dakikada yüzde 100 şarj olan grafen katkılı bataryaları yakında tanıtılabileceği belirtilmektedir^[32].

Çinli uçak motorları üreticisi Aero Engine Corporation (AECC) da 2015'ten beri NGI ile birlikte ortak araştırmalar yürütmektedir^[36]. AECN'nin 2017'de kurduğu Pekin Grafen Teknolojisi Enstitüsü (BIGT) Nisan 2019'da yine İngiltere'nin önde gelen grafen üreticisi Versarien ile Çin'de grafen üretim tesisi kurmak üzere bir ön protokol imzalamıştır^[37].

3.1.2 Avrupa Birliği'nin Uzun Vadeli Liderlik Arayışı

Grafenin anavatanı olarak anılan Avrupa kıtası, grafen pazarına hâkimiyet yarışına önde başlamasına rağmen liderlikten uzaktır. Yapılan araştırmalar bölgesel olarak Kuzey Amerika'nın yaklaşık yüzde 33 payla küresel grafen pazarında birinci durumda olduğunu göstermektedir.

Çin, Hindistan, Japonya, Avustralya, Singapur, Malezya ve Tayvan gibi gelişmekte olan grafen pazarlarının yer aldığı Asya-Pasifik bölgesi az farkla ikinci, Avrupa ise AB ve Rusya'nın gayretleriyle yaklaşık yüzde 25 payla üçüncü sıradadır^[38].

Ancak Avrupa'nın, grafen alanında yoğun Ar-Ge, endüstriyel uygulama ve ürün geliştirme çabalarıyla yakında gelecekte liderliği geri alabileceği de belirtilmektedir. AB, 2013'te 10 yıllık bütçesi 1 milyar avro olarak belirlenen Grafen Amiral Gemisi (Graphene Flagship) konsorsiyumunun kurulmasını sağlamıştır. 23 Avrupa ülkesinden 150'den fazla akademik ve endüstriyel araştırma kuruluşunu tek çatı altında toplayan konsorsiyumun, aralarında Türkiye'nin de bulunduğu çok sayıda ülkeden işbirliği ortağı da bulunmaktadır. Konsorsiyumda Türkiye'den Ankara Üniversitesi, Boğaziçi Üniversitesi ve İzmir Teknoloji Enstitüsü bulunmaktadır. Grafen Amiral gemisi kuruluşundan bu yana grafen bağlantılı 31 projeye ortak olmuş, dokuz şirketin kuruluşuna öncülük etmiştir. Kurulan şirketler 46 grafen ürünü geliştirmiş, 25 patent almıştır^[25].

2008 yılında konsorsiyum ortaklarından çarpıcı ilerleme açıklamaları gelmiştir. Örneğin Airbus, uçak kanatlarında grafen kullanarak yakıt tasarrufunu artırırken karbondioksit salımını azaltan ve uçakların kullanım ömrünü uzatan bir çözüm geliştirdiğini duyurmuştur^[25]. Grafen Amiral Gemisi'nin İtalyan ortağı Directa Plus, 2018'de Arvind Jeans ile çok sayıda grafenle güçlendirilmiş lifin kullanıldığı kıyafet geliştirdiğini^[39], İtalyan kimya grubu Iterchimica ise grafen asfalttan oluşan bir yol kaplamasının denemelerine başladığını duyurmuştur^[40]. Yine konsorsiyum ortaklarından Almanya merkezli Talga, lityum-iyon pillerinde grafen silikon kullanımı testlerinden olumlu sonuç aldığını duyurmuştur. Grafen silikonlu lityum-iyon pillerin diğerlerine oranla yüzde 50 daha hızlı şarj olabildiği belirtilmiştir^[41]. Bütün bu firmalar Grafen Amiral Gemisi'nin belirlediği yol haritasına uygun olarak çalışmalar yürütmektedir. Konsorsiyumun açıkladığı 2019-2030 yol haritasına göre farklı grafen uygulamalarının olgunlaşma süreleri şöyle sıralanmaktadır^[42]:

2022 yılı ve öncesinde;

- Fonksiyonel kaplama ve yüzey dönüşümü malzemeleri,
- Güçlendirilmiş yapı malzemeleri,
- Hızlı şarj olan bataryalar,
- Gelişmiş fotovoltik cihazlar,
- Gelişmiş uzun mesafeli optik iletişim,
- Düşük maliyetli basılabilir elektronik ürünleri,
- Işık dedektörleri, fiziki ve kimyasal dedektörler,
- Geniş bant kameralar ve spektrometreler,
- Biyosensörler.

2023-2029 döneminde;

- Çok fonksiyonlu inşaat malzemeleri,
- Su arıtma ve deniz suyunu tuzdan arındırma,
- Depo lojistiği için süperkapasitörler,
- Esnek perovskit güneş hücreleri,
- Perovskit çok eklemlerli fotovoltik paneller,

- Gelişmiş ağ üstyapıları,
- Yüksek frekanslı elektronik cihazlar,
- Esnek elektronik cihazları,
- Beynin bilişsel ve duyuşsal motor fonksiyonlarına yardımcı beyin-bilgisayar ara yüzleri

2030 sonrası;

- Taşıtlar için yakıt pilleri,
- 6G ve sonrası için kablosuz ağlar,
- Çip üzeri optik veri (On-chip optical data),
- Düşük enerji harcayan "spin logic" elektronik cihazlar,
- Vücut içinde hareket edip hedefini bulan ilaçlar,
- Vücut elektriğini okuyup değiştirerek (Biyoelektrik tıp) ile gerçek zamanlı tedavi.

Avrupa'nın en büyük ortak bilimsel araştırma programı olan Grafen Amiral Gemisi ortakları şimdiden, daha kaygan kayak takımları, daha güçlü motosiklet kaskları, patlaması neredeyse imkânsız bisiklet lastikleri üretmiştir^[43]. Ancak İngiltere'nin AB'den ayrılma sürecine (Brexit) girmesi sürecin daha da ilerlemesine engel olarak görülmektedir. Çünkü Avrupa'nın İngiltere'nin grafen bilgisine, İngiltere'nin ise AB finansmanına ihtiyacı bulunmaktadır^[44]. İngiltere hükümeti grafenin keşfedildiği Manchester Üniversitesinde 7500 metrekareden büyük Ulusal Grafen Enstitüsü kurulması için 540 milyon avro harcamıştır. Enstitünün araştırma bütçesi 50 milyon avrodur. İngiliz hükümeti ayrıca yine Manchester'da Grafen Mühendislik ve İnovasyon Merkezinin kurulması için 530 milyon avro harcamıştır^[27]. Bu merkezler yukarıda belirtildiği gibi sadece Avrupalı değil Çinli ve ABD'li şirketlerle ortak Ar-Ge faaliyetleri yürütmektedir. İngiltere ayrıca, Versarien, Haydale ve AGM gibi uluslararası yatırım çeken ve İngiltere dışında yatırımları bulunan grafen sektörünün önde gelen şirketlerine de ev sahipliği yapmaktadır. Haydale, grafen mürekkebi kullanarak diyabetli hastaların kanlarındaki şeker seviyesindeki ani değişiklikleri haber veren sensör geliştirerek dikkatleri üzerine çekmiştir^[45].

3.1.3 Kuzey Amerika Pazarı Elektronik, Savunma, Uzak ve Havacılıkla Büyüyor

ABD, Kanada ve Meksika'dan oluşan Kuzey Amerika, piyasa araştırmaları kuruluşlarının raporlarına göre dünya grafen pazarının yaklaşık üçte birine sahiptir. Kuzey Amerika'da grafen alanında araştırmaları mali olarak destekleyen çok sayıda kuruluş bulunmaktadır. ABD'de, Ulusal Bilim Vakfı (National Science Foundation -NSF) her yıl grafen bağlantılı projelere yüz binlerce dolarlık kaynak aktarmaktadır. ABD, ayrıca 2016 yılında Malzeme Genomu Projesi (Materials Genome Initiative -MGE) başlatmış ve aralarında grafenin de bulunduğu yeni malzeme projelerine belirsiz süreli 250 milyon dolarlık bir fon tahsis edilmiştir^[28]. Buna karşılık Kanada ve Meksika'da devletin doğrudan grafen araştırmalarına desteği bulunmamaktadır. Ancak bilimsel kuruluşlar, vakıflar ve özel fonların grafen araştırmalarına desteği bulunmaktadır.

Kuzey Amerika'nın öncüsü ABD'de grafen pazarının büyümesinin ardındaki en önemli etmenler bu ülkenin

dünyanın en büyük elektronik, savunma, havacılık ve uzay sektörlerine sahip olmasıdır^[46]. ABD Uzay Ajansı NASA hem grafen araştırmalarına öncülük etmekte hem de ülkenin önde gelen grafen alıcıları arasında bulunmaktadır. NASA'nın Langley Araştırma Merkezinde, uçaklar için çok hafif bataryalar^[47], Holey Grafeni adı verilen solüsyonsuz yeni bir grafen sentezleme tekniği^[48], elektrikli araçlar için yüksek güçlü kapasitörler^[49] ve uzay araçları için koruyucu malzeme geliştirme gibi çalışmalar yürütülmektedir.

Ülkenin büyük teknoloji ve sanayi şirketleri de grafen araştırmaları yürüterek sektörün gelişmesine katkı sağlamaktadır. Dünyanın dört bir yanında araştırma laboratuvarları bulunan IBM grafen bağlantılı teknolojilere de yatırım yapmaktadır. IBM'in araştırma alanlarının başında grafen bazlı transistörler ve ışık dedektörleri bulunmaktadır. Şirket 2014 yılında yeni nesil çiplerin geliştirilmesi için 3 milyar dolar bütçeli program açıklamış, çiplerde silikon yerine grafen veya karbon nano tüpleri kullanma olasılıklarının araştırılacağını duyurmuştur^[50]. Şirket aynı yıl mühendislerinin "dünyanın en hızlı grafen çipini geliştirdiğini" de açıklamıştır^[51]. Bir diğer teknoloji şirketi Apple da grafen araştırmalarında ülkenin öncü kuruluşları arasındadır. Şirketin grafen bağlantılı patent sayısı 197'ye ulaşmıştır^[52]. Şirketin özellikle akıllı cep telefonlarının ses ve enerji tüketim özelliklerini iyileştirmek üzere çalışmalar yaptığı belirtilmektedir^[53]. Savunma sanayii şirketi Lockheed Martin Mayıs 2018'de grafenle güçlendirilmiş lityum-iyon bataryaları geliştirmek üzere Kanadalı Elcora Advanced Materials ile anlaşma imzalamıştır^[54]. Şirket ayrıca gözenekli grafen teknolojisi üzerinde çalışmalar yapmakta ve yeni ürünler geliştirmektedir^[55]. Hava araçları üreticisi Boeing, 787 Dreamliner ticari yolcu uçaklarının gövdelerinde yüzde 50 oranında grafen katkılı kompozit malzeme kullanmaktadır^[56]. Tesla^[57], General Motors ve Ford^[58] gibi otomotiv üreticileri de grafenle güçlendirilmiş bataryalar üzerine araştırmalarını sürdürmektedir^[53]. Ford, ayrıca 2014'ten beri grafen parça üretimi için ABD'li grafen üreticisi XG Sciences ile işbirliği yapmaktadır. Şirket 2018'de Mustang ve F-150 modellerinden başlayarak araçlarında grafen parçaları kullanan ilk otomotiv üreticisi olmuştur. Ford, grafeni bazı parçalarının güçlendirilip hafifleştirilmesinde ve motorun sessizleştirilmesinde kullanmaktadır^[59].

Kuzey Amerika'da grafen şirketleri de dikkat çekici bir gelişme içindedir. Grafen-info.com veritabanına göre Kuzey Amerika'da 71 grafen üreticisi, uygulama geliştiricisi veya ekipman sağlayıcısı bulunmaktadır. Bunların 50'si ABD, 20'si Kanada, biri ise Meksika'da kurulmuştur. Örneğin bilinen ilk grafenle pekiştirilmiş ürün bir akıllı paketleme güvenlik şerididir. Siren Technology bu şeritleri ABD merkezli Volberk Materials'ın grafen mürekkebini kullanarak geliştirmiş ve 2011'de piyasaya sunmuştur^[60].

3.1.4 Güney Kore Grafende Rekabet Avantajı Arıyor

Güney Kore grafen teknolojisi üzerine yoğun Ar-Ge çalışmalarının yapıldığı ülkeler arasındadır. Güney Koreli şirketler ve akademik kuruluşların aldığı grafen bağlantılı patentlerin sayısı 2017 sonunda 7.175'e ulaşmıştır. Güney Kore grafen patenti sayısı açısından Çin'in



ardından ikinci sıradadır. Dünyada en çok patent sahibi 10 kuruluşun 3'ü; Samsung, LG ve Kore İleri Bilimler ve Teknoloji Enstitüsü, Güney Kore merkezlidir. Teknoloji şirketi Samsung, 810 patentle 1001 patent sahibi Çin Bilimler Akademisinin ardından ikinci sırada yer almaktadır^[27].

Bu gelişmenin ardında, Seul yönetiminin grafen ve nanomalzemeler alanına verdiği desteklerin önemi büyüktür. Güney Kore Bilgi Ekonomisi Bakanlığı, 2012-2018 döneminde grafen alanında 259 milyon dolar yatırım yapmıştır. Bu fonun 124 milyon doları grafeni ticari hale getirmek üzere yapılan araştırmalara tahsis edilmiştir^[27]. Hükümet 2012'de 45 özel şirket ve araştırma kuruluşuyla altı farklı konsorsiyum oluşmasına öncülük etmiştir^[61]. Güney Kore'nin geliştirilmesinde öncelik verdiği ticari grafen uygulamaları şunlardır^[62]:

- Grafen bazlı dokunmatik ekranlar,
- Grafen OLED ekranlar,
- Elektrokrom pencereler,
- Elektrikli araçlar için ikinci bataryalar,
- Yüksek voltajlı, yüksek güçlü süper kapasitörler,
- Çok hafif ve güçlü kompozitler,
- Yüksek performanslı gaz önleyici filmler,
- Elektromanyetik sızıntı önleyiciler,
- Çevre dostu paslanmaz çelik levhaları.

Grafen ürünleri geliştirilmesindeki tercihler, Güney Kore hükümetinin ülkenin rekabet avantajının bulunduğu elektronik, otomotiv ve çelik gibi alanlara yoğunlaşılmasını istediğini göstermektedir. Güney Kore'nin tüketici elektroniğinde küresel gelirin 2019'da 9,8 milyar dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir ve bu alanda dünyada altıncı sıradadır^[63]. Güney Kore otomotiv endüstrisinin 2018 ihracatı 38,2 milyar dolardır ve dünya otomotiv pazarında yüzde 5,1 paya sahiptir^[64]. Ülke çelik ihracatında

ise Çin ve Japonya'nın ardından üçüncü sıradadır^[65]. Koreli grafenle ilintili şirketlerin de bu yol haritasına uygun çalışmalar yürüttüğü gözlemlenmektedir. Tüketici elektroniği üreticileri Samsung^[66] ve LG^[67], uzun ömürlü ve kısa sürede şarj edilen bataryalar, bükülebilir grafen ekranlar^[68] ve grafenle güçlendirilmiş elektrikli ev aletleri^[69] geliştirmiş ve patentlerini almışlardır. Ülkenin iki büyük otomotiv üreticisi Hyundai ve Kia, ortak bir çalışmayla grafenli yakıt pili patenti almışlardır^[70]. Güney Kore'nin önde gelen grafen üreticisi Standart Graphene, 2018'de grafen oksit, indirgenmiş grafen oksit ve grafen nano kum ürünlerinin seri üretimine geçtiğini açıklarken, grafen bisikleti, grafenli dayanıklı ve ince kızartma tavaları gibi metal endüstrisinin ilgi alanlarına giren ürünleri geliştirdiğini de bildirmiştir^[71].

Koreli bilim insanları grafenin uygulama alanlarını genişletecek çalışmalar da yürütmektedir. Örneğin Samsung ve Sungkyunkwan Üniversitesi uzmanları, 2017'de su arıtma sistemlerinde kullanılabilecek, suya geçit verirken iyonları süzen geniş yüzeyli kristalize olmayan tek katmanlı bir grafen türü geliştirdiklerini bildirmiştir^[72].

3.1.5 Türkiye Yarışta Geç Kalıyor

Dünyada grafen alanındaki gelişmeler bu sektörün son yıllarda emekleme safhasına geçtiğini ortaya koymaktadır. 2017 sonu itibarıyla alınan grafen bağlantılı patentler üzerine yapılan bir incelemede Çinli kurum ve kuruluşlarca alınan 32.000'den fazla patentün yüzde 63,5'inin "büyüme safhasındaki" bir grafen teknolojisine işaret ettiği görülmektedir. Bu oran Güney Koreli firmalar tarafından alınan grafen patentlerinde yüzde 12,8, ABD'li firmalarca alınanlarda ise yüzde 10,1'dir^[27]. AB üyesi İngiltere, Almanya ve Fransa'nın gelişme evresindeki grafen patentlerinin oranı yüzde 2'nin altındadır ancak yukarıda belirtildiği üzere AB Grafen Amiral Gemisi'nin

gayretleriyle bu oranın 2020’li yılların başından itibaren hızla artacağı tahmin edilmektedir.

Grafen alanında bu hızlı gelişim yaşanırken Türkiye’de henüz emekleme devresi yaşandığını söylemek mümkündür. Grafen araştırmalarına Türkiye’de destek sınırlı kalmıştır. Araştırmalara destek açısından en önemli adım, 2013’te TÜBİTAK tarafından atılmıştır. TÜBİTAK, “1003-Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destek Programı” kapsamında, bir Grafen Çağrısı açmıştır. Çağrı ile ulaşılması beklenen hedefler şöyle sıralanmıştır^[73]:

- Grafenin temel özelliklerinin (yapısal, kimyasal, mekanik, elektronik, optik, manyetik) araştırılması (ölçüm, karakterizasyon ve/veya modelleme),
- Yüksek kaliteli grafen üretilmesi,
- Grafen tabanlı işlevsel yapıların (malzeme veya aygıt bileşenleri) geliştirilmesi,
- Grafen tabanlı aygıt tasarımı, üretimi ve performans değerlendirmesi,
- Grafen ürünlerinin daha ekonomik üretimine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi ve grafen benzeri diğer iki boyutlu malzemelerin üretilmesi ve geliştirilmesi.

TÜBİTAK bu çağrısını 2018 yılında yenilemiştir^[74]. Çağrı sonrası 48 grafen bağlantılı projenin desteklenmesine karar verilmiştir. Desteklenen projelerden biri grafenin diş implantlarında kullanılmasına ilişkindir. Samsun 19 Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden Dr. Mevlüt Gürbüz başkanlığındaki bir ekip, dünyada ilk kez, grafen ile güçlendirilmiş yeni nesil titanyum kompozit implant geliştirmiştir. Sözkonusu implant, aşınmalara ve enfeksiyonlara daha dayanıklıdır, implantın ömrünü de uzatmaktadır^[75].

Türkiye’nin bir grafen stratejisi ve eylem planı bulunmamaktadır. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2017-2018 Nanoteknoloji Stratejisi ve Eylem Planı hazırlamış ancak belgede grafen alanına ilişkin herhangi bir ifadeye yer verilmemiştir^[76].

Türkiye’nin grafen ve iki boyutlu malzemeler konusundaki girişimleri, akademik kuruluşların bilimsel çabaları ve az sayıdaki özel girişimin inisiyatifiyle ilerlemektedir. Türkiye’de grafen alanında çalışmalar yapan çok sayıda akademik kuruluş ve bunlara bağlı araştırma merkezleri bulunmaktadır. Ankara’da 2008’de açılan Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde (UNAM), grafen dahil nanomalzemelerin geliştirilmesi ve uygulamaları konusunda çalışmalar yapılmaktadır^[77]. UNAM’ın grafene ilişkin bir patenti bulunmaktadır^[78]. İstanbul Teknik Üniversitesi’nin Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde ise 10 grafen ilintili araştırma yürütülmektedir^[79]. Sabancı Üniversitesi de grafen alanında hayli aktif akademik kuruluşlar arasındadır. Üniversiteye bağlı Nanoteknoloji Uygulama Merkezi (SUNUM) bulunmaktadır. 2011’de Devlet Planlama Teşkilatı (Bugünkü T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı) ve Sabancı Vakfının 25 milyon avroluk yatırımıyla kurulan SUNUM’da nanomalzeme araştırmaları önemli bir paya sahiptir. SUNUM, AB’nin Grafen Amiral Gemisi’nin enerji alanındaki araştırmalarına katkı sağlamaktadır. SUNUM uzmanları 2013 yılından beri

grafenin yakıt pillerinde kullanımı üzerine araştırma yapmaktadır. Projenin 2015’te sona eren ilk fazında, grafen esaslı elektrotlar geliştirilerek, yakıt pili içinde düşük miktarlarda katalizör kullanımıyla yüksek verimlilik değerlerine ulaşıldığı açıklanmıştır. 2023’e kadar sürecek projenin ikinci fazında, grafen esaslı elektrotları modifiye ederek yakıt pili içinde yüksek performans ve güç değerlerine ulaşmak hedeflenmektedir^[80]. Grafen bağlantılı bir patenti bulunan SUNUM, bir de grafen üretim firmasının kurulmasına öncülük etmiştir. Gebze Teknopark merkezli Nanografen, SUNUM araştırmacıları ve Inovent A.Ş. ortaklığı ile 2013’te kurulmuştur. Nanografen, grafeni ekonomik, iyi kalitede ve yüksek miktarlarda üreterek enerji, havacılık, otomotiv, yapı-inşaat gibi birçok alanda kullanılabilecek grafen katkılı prototip ürünler hazırlamaktadır^[81]. Şirket, 2017’de, grafen katkılı, çizilme ve darbelere dayanıklı bir klarnet ürettiğini duyurmuştur^[82].

Türkiye’de Ankara merkezli iki grafen üreticisi firma daha bulunmaktadır. ODTÜ Teknokent’te 2011’de kurulan Nanografi, Türkiye’de ticari amaçlı karbon nanotüp üreten ilk firma olduğunu ileri sürmektedir. Firma tüm formlarda grafen üretimi yapabildiğini bildirmektedir^[17]. Grafen Chemical Industries (GCI) ise sadece grafen ürünleri değil grafen üretim ekipmanı ve yazılımı da sağlamaktadır^[83].

Grafen uygulamaları alanında ise özel girişim ile akademik kuruluşların işbirliği örnekleri görülmeye başlanmıştır. Örneğin Hazerfen Kimya, 2018’de Gebze Teknik Üniversitesi işbirliğiyle normallerine göre üç kat daha uzun ömürlü grafen yol boyası üreteceğini açıklamıştır^[84].

4. GRAFENİN SAVUNMA SANAYİNDE KULLANIM POTANSİYELİ

Dünyada grafen üretimindeki artış ve giderek genişleyen ürün yelpazesi, bu malzemenin kullanılabileceği sektör sayısını da hızla artırmıştır. 10.000’den fazla üyesi olan The Graphene Council, grafenin kullanılabileceği 40’tan fazla sektör belirlemiştir ve bunlar arasında savunma sanayii bulunmamaktadır^[1].

Grafenin kullanım alanı hızla yaygınlaşırken savunma çevreleri de bu gelişmeleri yakından izlemeye ve araştırmalara destek vermeye başlamıştır. Nitekim AB’nin “Savunma Bakanlığı” niteliğindeki Avrupa Savunma Ajansı (EDA), “Grafenin Savunmaya Etkisi” başlıklı bir araştırmayı 2017’de başlatmıştır. EDA bu proje çerçevesinde Mayıs 2018’de yaptığı teknik toplantıda grafenin sekiz savunma bağlantılı uygulama alanı belirlemiştir^[85]:

- Elektronik/ optoelektronik malzemeler ve cihazlar,
- Esnek sistemler,
- Enerji cihazları,
- Çok fonksiyonlu malzemeler,
- Kamuflej ve iz yönetimi,
- Filmler ve filtreler,
- Biyomedikal,
- Sensörler.

Grafenin savunma sanayiinde kullanım potansiyelinin ortaya koyulmaya çalışılacağı bu bölümde EDA'nın öncelikle savunma ilintili grafen uygulama alanlarındaki çalışmalarına ve sözkonusu alanda savunma şirketleriyle araştırma kurumlarının çalışmalarına göz atılacaktır.

4.1 Elektronik

Grafen, elektronik sektöründe taşları yerinden oynatacak çok sayıda özelliğe sahiptir. Sadece 0.34 nanometre kalınlığındadır. Bugüne kadar geliştirilen en ince malzeme olup, çelikten ve elmadan daha iyi çekme direncine sahiptir. Bir metrekaresi bile sadece 0,77 miligram olan son derece hafif bir malzemedir. Çok esnektir; eski şeklinin yüzde 20'si boyutlarına düşene kadar deforme olmadan katlanabilir. Çok iletken bir malzemedir; bazı metotlarla elektriği yüzde 100 ileten bir süper iletken haline getirilebilir^[86]. Ayrıca grafen ısıyı da hızla ve her yöne iletebilmektedir. Grafenin bu üstün özellikleri, elektronik cihazları minyatürleştirirken esnekleştirme, iletişimi ise hızlı, etkin ve güvenli hale getirme yolları arayan elektronik sektörüne yeni inovasyonların kapılarını aralamaktadır. Nitekim çok sayıda kurum ve kuruluş grafen ile daha ince, hassas ve esnek ekranlar, esnek çipler, daha hızlı veri iletişim ara bağlantı araçları geliştirmek üzere çalışmalar yapmaktadır ve bu çalışmalara savunma sanayii şirketleri de destek vermektedir.

Örneğin Ağustos 2018'de Sabancı Üniversitesi ile ASELSAN işbirliği ile "Dünyanın en yüksek çözünürlüklü grafen tabanlı OLED ekranı geliştirildiği" duyurulmuştur^[87]. OLED ekranlar oksijen ve neme karşı hassastır ve bu nedenle koruma katmanına ihtiyaç duyulmaktadır. Taşınabilir cihazların OLED ekranları esnek olmayan cam tabakalarla korunmaktadır. Cam tabaka yerine grafen tabakası kullanılması ekranı son derece esnek ve ince hale getirebilmektedir^[88]. Türkiye'de geliştirilen OLED ekranın savaş uçaklarının gösterge panellerinde kullanılacağı ve böylece dışa bağımlılığın azalacağı da belirtilmektedir^[87].

4.2 Fotonik ve Optoelektronik

Saf (tek katmanlı) grafenin optik özellikleri de elektro optik alanında büyük yeniliklere yol açacak yeni kabiliyetler sunmaktadır. Siyah karbon atomlarından oluşan grafen çok incedir ama hâlâ çıplak gözle görülebilecek bir malzemedir. Beyaz ışığın sadece yaklaşık yüzde 2,3'ünü yutar. Bu da grafeni hem şeffaf hem de iletken bir malzeme haline getirmektedir. Grafen aynı zamanda sıradışı bağ yapısı sayesinde elektromanyetik radyasyon ile etkileşime girebilen bir malzemedir^[89]. Grafen kızılötesi veya terahertz aralıklarında ışık tespitinde yarı iletken malzemelere göre daha kullanışlıdır^[89]. Bu özellikler grafeni optik, fotonik, optoelektronik, elektro optik ve fotovoltik enerji (güneş enerjisi) alanlarında değerli bir malzeme haline getirmektedir.

Savunma sektörü grafenin optik özelliklerinden yararlanmak üzere harekete geçmiştir. ABD'nin İleri Savunma Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA), 2016 yılında kızılötesi kameraları ve gece görüş gözlüklerini daha küçük, daha hafif ancak daha yüksek çözünürlüklü hale

getirmeyi hedefleyen Florida Üniversitesinin "Grafen Kızılötesi Dedektör" projesine 1,3 milyon dolar bağışlamıştır^[90].

Saf grafenin diğer tüm özelliklerinin yanı sıra, ışık yönetme, saptama ve kontrol kabiliyetleri, bu malzeme, iletişim sistemleri açısından da ilginç kılmaktadır. Dijital iletişim sistemlerinin yarı iletken malzemelerle fiziksel sınırlarının sonuna geldiği; daha fazla bant genişliği, daha düşük enerji tüketimi ve daha yüksek erişim gibi taleplerin karşılanması için yeni teknolojilere ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir. Grafen malzemesi, fiziksel özellik ve kabiliyetlerle iletişim teknolojisi açısından da sıkça kullanılan "mucize malzeme" niteliğini doğrular niteliktedir. Günümüzde grafenin fotonik ve optoelektronik uygulamalarda kullanılması yönünde yoğun araştırma ve ürün geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bunlardan biri 5G mobil iletişim teknolojisi. 2020 yılında dünyanın önemli bir bölümünde kullanılmaya başlanacak olan 5G teknolojisi, savunma açısından da dikkatle izlenmektedir^[91]. Ancak bu teknolojinin yüksek maliyet, yüksek enerji tüketimi ve erişim kısıtlılığı gibi sorunları bulunmaktadır^[92]. Grafen ile üretilen son derece hızlı optoelektronik cihazların 5G iletişiminde daha yüksek performans sağlaması beklenmektedir^[93].

4.3 Enerji

Grafenin kimyasal özellikleri de inovasyonu tetikleyecek niteliktedir. Saf grafen kimyasal olarak istikrarlıdır; başka atomlarla reaksiyona girmemektedir. Ancak grafen başka atom ve molekülleri özümseyebilmektedir. Bu durum grafenin elektronik özelliklerinde değişiklik yapabilmektedir. Grafen başka atomlarla işlevselleştirilebilmektedir^[86]. Örneğin oksijenle grafenoksit, flor ile fluörür oksit elde etmek mümkündür. Grafen ayrıca yüksek yüzey alanına sahiptir: 1 gramı 2630 metrekaresi alanı kaplayabilmektedir. 3 gramı ile bir futbol sahasını kaplamak mümkündür^[94].

Grafenin istikrarlı kimyasal ve fiziksel kabiliyetleri grafeni enerji alanında da çekici kılmaktadır. Güneş pili, batarya, süperkapasitör ve hidrojen pillerinde performans artırıcı olarak denemeleri süren grafenin günümüzün en önemli problemlerinden enerji sorununa çare olabileceği belirtilmektedir^[95].

Özellikle grafen bazlı süperkapasitörler geliştirilmesi yönünde çalışmalar hız kazanmıştır. Süperkapasitörler, normal kondansatörlerden kat kat fazla yük saklayabildikleri için günümüzde özellikle taşınabilir elektronik ürünleri ve elektrikli araçlarda tercih edilen lityum-iyon pillerine de daha ekonomik bir alternatif olmaktadır^[96]. Ayrıca aktif hale getirilmiş grafen, lityum-iyon pillerinin ömrünü uzatmakta, enerji kapasitesini artırmakta ve şarj süresini kısaltmaktadır^[25]. Bilim insanları herhangi bir yüzeye yerleştirilerek elektrik üretimi yapabilecek küçük, ince, esnek ve şeffaf grafen pilleri üzerinde çalışmalar yürütmektedir^[97].

Daha uzun ömürlü, daha küçük, daha esnek, daha güçlü ve kısa şarj süreli piller savunmanın da ilgi alanındadır. Modern ordular envanterlerinde daha fazla otonom nesnelere (İnsansız kara, hava ve deniz araçlarıyla

robotlar) bulundurmakta, kablosuz iletişim, bilgi, komuta ve silah sistemlerini yoğun olarak kullanmaktadır. Bu cihazların enerji depolama kabiliyetlerinin artırılması yönünde savunma çevrelerinin de arayışları sürmektedir. Örneğin ABD’li savunma şirketi Lockheed Martin’in, sürücüsüz kara araç konvoylarının batarya ömürlerinin artırılması amacıyla Kanadalı grafen firması Elcora ile grafen katkılı lityum-iyon pilleri geliştirilmesine yönelik 2018’de ortaklık kurduğu belirtilmektedir^[98].

4.4 Kaplama ve Kompozitler

Grafenin en çok uygulama bulunduğu alan kaplama ve kompozitler olmuştur. Otomotivden boyaya, inşaat metal eşya sektörüne, uzay ve havacılıktan kişisel bakım ürünlerine kadar pek çok alanda grafen içeren kaplamalar ve kompozitler kullanılmaya başlanmıştır. Araştırmalara göre grafen kompozit pazarının büyüklüğü 2018’de 50 milyon dolara ulaşmıştır. Bu pazarın 2028’de 800 milyon dolara çıkacağı tahmin edilmektedir^[99].

Grafenin yüksek yapışma özelliği sayesinde anti-bakteriyel kaplamalar, izolasyon sağlayan boyalar, pas önleyici kaplamalar, morötesi ışın önleyicileri üretilebilmektedir. Grafen kaplamaların, mikrobiyal kaynaklı korozyona karşı tipik polimer kaplamalardan daha fazla koruma sağladığı gözlemlenmiştir. Grafen kaplamalar hidrofobik, iletken ve kimyasal olarak dirençli olabilmektedir. Hidrofobik grafen kaplamalar, gemi gövdeleri, yapılar (çimento), cam yüzeyler (aynalar, pencereler) ve tekstil gibi hidrofobik yüzeylerin gerekli olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Grafen kaplamalar ayrıca üstün kimyasal, nem, korozyon, UV ve yangına dayanıklı özelliklere sahip koruyucu kaplamalar olarak da kullanılabilir. Grafen, üstün mekanik, termal ve elektriksel özellikleri sayesinde hafif, dayanıklı ve uzun ömürlü kompozit üretiminde büyük ilgi görmektedir^[100].

Grafen kaplamalar askeri alanda balistik direnç özelliğiyle dikkatleri üzerine toplamıştır. ABD’de yapılan araştırmalar, grafenin atılan mermilerin kinetik enerjisini bertaraf edecek güçte olduğunu ortaya koymuştur^[101]. Bu kabiliyet grafenin son derece hafif ve ince bir zırh veya kurşun geçirmez yelek gibi giyilebilir balistik koruma donanımlarında kullanılabilirliği ihtimalini ortaya koymaktadır. Çin’in Z-10 saldırı helikopterlerinde grafen zırhı kullandığı ileri sürülmektedir^[102].

Çinli bilim insanlarının, özellikle Güney Çin Denizi’ndeki deniz üslerindeki savaş platformları, elektronik ekipman ve silahları korozyondan korumak amacıyla grafen kaplama malzemesi geliştirmek üzere çalışmalar yürüttüğü de açıklanmıştır^[103].

Grafen kaplama ve kompozitler, havacılıkta da hakkettiği ilgiyi bulurken, savunma çevreleri de bu çalışmalara katılmaktadır. Grafen kaplamalar hava araçlarını atmosfer koşullarından korurken, grafen kompozitler uçağın ağırlığını azaltmakta ve yakıt tüketimini düşürmektedir. İngiltere merkezli savunma sanayi şirketi BEA Systems’in desteklediği bir projede Manchester Üniversitesi bilim insanları grafen kaplı bir insansız hava aracı test etmiş, grafen kaplama sayesinde uçakların

daha yüksek irtifalarda uçabileceklerini, yakıt tüketimlerinin azalabileceğini ve yıldırım gibi atmosfer olaylarından korunabileceğini ortaya koymuştur^[104]. Yine İngiltere’deki Central Lancashire Üniversitesi uzmanlarınca geliştirilen grafen kompozit, grafen kaplama ve grafen bazlı piller kullanılan “Juno” adı verilen insansız hava aracı 2018’de kamuoyuna tanıtılmıştır^[105].

Savunma sektörünün ilgisini grafen kaplama ve kompozitlere yöneltmesinin bir diğer nedeni de iz yönetimi ve kamuflajdır. Grafen kaplama ve kompozitler üzerinde buldukları yüzeylerin şekillerinin radyo frekansları ve elektromanyetik radyasyon ile algılanmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle grafen malzemelerinin savaş platformlarının düşman tarafından algılanmasının engellenmesinde kullanılması yönünde çalışmalar yürütülmektedir. Savunma çözümleri de geliştiren İsveçli sanayi devi Saab, 2015 yılında grafeni uçak, gemi, denizaltılar ve hatta asker üniformalarının kamuflajında kullanmak üzere araştırmalar başlattığını duyurmuştur^[106]. İngiliz ordusunun araştırma birimi DASA, grafen üreticisi AMD, geçen yıl yine grafen iz yönetimi ve kamuflaj araştırmaları için 83 bin avro yardımda bulunmuştur^[107].

5. SONUÇ

Grafen, üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleriyle hemen tüm alanlarda sınırsız fırsatlar tanıyan bir malzemedir. Ancak tek atom kalınlığındaki bu iki boyutlu malzemeyi üretmek ve uygulanabilir hale getirmek hayli zorlu bir süreçtir. Malzemenin sürdürülebilir kitlesel üretiminin yöntemi halen araştırılmaktadır. Dünyada bu malzemenin ticarileştirilmesi yönündeki çabalar ancak 2017 yılında, grafene ilişkin ilk standartların belirlenmesi ve potansiyel kullanıcıların farklı grafen ürünleri ve uygulama alanlarına ilişkin farkındalığının artmasıyla mümkün olabilmıştır. 2018’den itibaren grafen ürünlerinin hızla farklı sektörlerde kullanılmaya başlandığı, grafen teknolojisinin emekleme evresini geride bırakıp hızla büyümeye başladığı anlaşılmaktadır. Grafen malzemesi 40’tan fazla ekonomik sektörün ilgi alanına girmiştir. Bu 40 sektörün hemen hepsiyle ilintisi bulunan savunma sektörü de grafenin askeri alanda kullanım potansiyelini araştırmaya başlamıştır. Savunma sektöründe grafen kullanımının gelişimi diğer sektörlerdeki gelişmelere bağlı olacaktır. Yapılan projeksiyonlar, grafenin 2020 sonrası dönemde üretimde en çok tercih edilen malzemelerden biri olacağını göstermektedir.

Grafen teknolojisinin ilerlemesinin arkasındaki güç ise devletler ve akademik kuruluşlardır. Günümüzde grafen konusunda en çok Ar-Ge yapan ülkeler, henüz küçük bir pazar olmasına rağmen hızla büyümeye potansiyeline sahip grafen piyasasına hakim ülkelerdir. Türkiye’de ise sınırlı sayıda grafen araştırması, üretimi ve uygulaması söz konusudur. Tüm çalışmalar, akademik çevrelerin ve birkaç girişimcinin inisiyatifiyle sürmektedir. Türkiye’nin grafen konusunda ivedilikle ulusal bir strateji ve yol haritasına ihtiyacı bulunmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] Barkan CAE, Terrance; "The Future of The Graphene Industry – Quality and Quantity! , slâyt 7", *The Graphene Council*, <https://www.thegraphenecouncil.org/page/About>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [2] Johnson, Dexter; (2019), "Europe Has Invested €1 Billion Into Graphene—But For What?", *IEEE Spectrum*, (3 Haziran 2019), <https://spectrum.ieee.org/nanoclast/semiconductors/nanotechnology/europe-has-invested-1-billion-into-graphene-but-for-what>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019).
- [3] *Graphene Flagship*, "What is graphene?", <https://graphene-flagship.eu/material/graphene/Pages/What-is-graphene.aspx>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [4] Johnson, Dexter; (2011), "Adhesion Capability of Graphene Opens New Application Possibilities", *IEEE Spectrum*, (26 Ağustos 2011), <https://spectrum.ieee.org/nanoclast/semiconductors/nanotechnology/adhesion-capability-of-graphene-opens-new-application-possibilities>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [5] Peplow, Mark; (2013), "Graphene: The quest for supercarbon", *Nature*, (20 Kasım 2013), <https://www.nature.com/news/graphene-the-quest-for-supercarbon-1.14193>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [6] Jeffrey, Colin; (2015), "Scientists produce graphene 100 times cheaper than ever before", *New Atlas*, (22 Kasım 2015), <https://newatlas.com/graphene-inexpensive-electronics-university-glasgow/40508/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [7] Millholland, Carl D.; (2018), "Hot Topic (Like 1000 °C) – Analyzing Single-Layer Graphene from CVD", *ThermoFisher Scientific*, (12 Nisan 2018), <https://www.thermofisher.com/blog/materials/hot-topic-like-1000-c-analyzing-single-layer-graphene-from-cvd/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [8] Spasenovic, Marko; "The Price Of Graphene", *Graphenea*, <https://www.graphenea.com/pages/graphene-price#XRSyDOj7Qae>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [9] Dong, Lei; Chen, Zhongxin; (2018), "A non-dispersion strategy for large-scale production of ultra-high concentration graphene slurries in water", *Nature*, (8 Ocak 2018), <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02580-3>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [10] Galeon, Dom; (2017), "We May Finally Have a Way of Mass Producing Graphene", *Futurism*, (8 Ocak 2017), <https://futurism.com/we-may-finally-have-a-way-of-mass-producing-graphene>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [11] Chu, Jennifer; (2018), "A graphene roll-out", *MIT*, (17 Nisan 2018), <http://news.mit.edu/2018/manufacturing-graphene-rolls-ultrathin-membranes-0418>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [12] CSIRO, (2017), "CSIRO makes high-quality graphene with soybeans", (31 Ocak 2017), <https://www.csiro.au/en/News/News-releases/2017/CSIRO-makes-high-quality-graphene-with-soybeans>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [13] 2D Materials Magazine, (2019), "The Global Market for Graphene, 2D Materials and Carbon Nanotubes" (26 Nisan 2019), <https://www.2dmaterialsmag.com/the-global-market-for-graphene-2d-materials-and-carbon-nanotubes/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [14] The Graphene Council, "The Verified Graphene Producer™ Program", <https://www.thegraphenecouncil.org/page/VerifiedProducer>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [15] NPL, (2017), "First graphene ISO standard published to boost commercialisation", (16 Ekim 2017), <https://www.npl.co.uk/news/graphene-iso-standard>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [16] *Svenska Institutet för Standarder*, (2017), "Graphene and related two-dimensional (2D) materials", (Eylül 2017), <https://www.sis.se/api/document/preview/922395/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [17] Nanografi, "Grafen", <http://nanografi.com.tr/grafen/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [18] Gibney, Elizabeth; (2019), "How 'magic angle' graphene is stirring up physics", *Nature*, (2 Ocak 2019), <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07848-2>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [19] Ghaffarzadeh, Khasha; (2016), "The graphene market to reach 3,800 tonnes per year in 2026", *IDTechEx*, (16 Mart 2016), <https://www.idtechex.com/research/articles/the-graphene-market-to-reach-3-800-tonnes-per-year-in-2026-00009213.asp>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [20] *Nanoplore*, (2019), "Operational Update on Commercial Graphene Facility", (6 Haziran 2019), <https://www.nanoplore.ca/update-on-commercial-graphene/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [21] Critchley, Liam; (2019), "A look back at the emergence of Graphene products in 2018", *Nano Magazine*, (13 Şubat 2019), <https://nano-magazine.com/news/2019/2/13/a-look-back-at-the-emergence-of-graphene-products-in-2018>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [22] *Globenewswire*, (2018), "Global and China Graphene Market 2018 - Forecast to 2023", (1 Kasım 2018), <https://globenewswire.com/news-release/2018/11/01/1641346/0/en/Global-and-China-Graphene-Market-2018-Forecast-to-2023.html>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [23] *Research and Markets*, (2018), "Graphene - Global Market Outlook (2017-2026)", (Ağustos 2018), https://www.researchandmarkets.com/research/wqbxp8/graphene_global?w=4. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [24] *Research and Markets*, (2019), "Graphene - Global Market Outlook (2017-2026)", (Temmuz 2019), https://www.researchandmarkets.com/research/cvk34r/global_and_china?w=12. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [25] *Graphene Flagship*, "Annual Report 2018", <https://graphene-flagship.eu/SiteCollectionDocuments/Admin/Annual%20Report/Graphene%20Flagship%20Annual%20Report%202018.pdf>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [26] McNeice, ANGUS; (2018), "Graphene moves from hype to reality", *China Daily*, (5 Ekim 2018), http://www.chinadaily.com.cn/a/201810/05/WS55bb6ad40a310eff303280bd6_3.html. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [27] MDPI, (2018), "Obtaining a Sustainable Competitive Advantage from Patent Information: A Patent Analysis of the Graphene Industry", (16 Aralık 2018), <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/12/4800/html>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [28] O'Meara, Sarah; (2019), "Materials science is helping to transform China into a high-tech economy", *Nature*, (20 Mart 2019), <https://www.nature.com/articles/d41586-019-00885-5>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [29] *Energy Storage Journal*, (2019), "Graphite production to move west as China supply chain to halve", (21 Şubat 2019), <http://www.energystoragejournal.com/2019/02/21/graphite-production-to-move-west-as-china-supply-chain-to-halve/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [30] *ReportLinker*, (2019), "Global and China Graphene Industry Report, 2019-2025", (Temmuz 2019), <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-and-china-graphene-market-to-2023-forecasting-19-foreign-and-16-chinese-graphene-manufacturers-300742263.html>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [31] *IGCC*, (2018), "The World's First 'Graphene Material' Product Certification Came Out in Graphene 2018 Graphene Spring Conference", (28 Haziran 2018), http://www.i-gcc.org/en/news_in.aspx?cid=51&id=1097. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [32] Xuanmin, Li; (2018), "Chinese producer awarded the world's first graphene certificate", *Global Times*, (1 Temmuz 2018), <http://www.globaltimes.cn/content/1109057.shtml>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [33] *The University of Manchester*, (2015), "Huawei signs partnership with University to develop graphene-based technologies", (23 Ekim 2015), <https://www.manchester.ac.uk/discover/news/huawei-signs-partnership-with-university-to-develop-graphene-based-technologies/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [34] *Huawei*, (2016), "Huawei Achieves Major Breakthrough in Graphene-Assisted High Temperature Li-ion Batteries", (1 Aralık 2016), <https://www.huawei.com/en/press-events/news/2016/12/Graphene-Assisted-Li-ion-Batteries>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [35] Mertens, Ron; (2018), "Huawei starts shipping the Mate 20 X smartphone with its graphene film cooling technology", *Graphene-Info*, (2 Aralık 2018), <https://www.graphene-info.com/huawei-starts-shipping-mate-20-x-smartphone-its-graphene-film-cooling-technology>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [36] *The University of Manchester*, "Partnership with the Aero Engine Corporation of China", <https://www.manchester.ac.uk/collaborate/worldwide/aecc-partnership/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)

- [37] *Investegate*, (2019), "Term Sheet with Beijing Institute of Graphene Technology", (15 Nisan 2019), <https://www.investegate.co.uk/versarien-plc--vrs-/rns/term-sheet-with-beijing-institute-of-graphene-tech/201904150700061244W/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [38] *Grand View Research*, (2019), "Graphene Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application (Electronics, Composites, Energy), By Product (Graphene Nanoplatelets, Graphene Oxide), By Region, And Segment Forecasts, 2019 – 2025", (Ocak 2019), <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/graphene-industry>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [39] Peleg, Roni; (2018), "Directa Plus to collaborate with India's Arvind on graphene-enhanced denim products", *Graphene-Info*, (14 Mayıs 2018), <https://www.graphene-info.com/directa-plus-collaborate-in-dias-arvind-graphene-enhanced-denim-products>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [40] Iterchimica, (2019), "Graphene: Iterchimica announces the official results of the first road surface trial in Italy", <http://www.iterchimica.it/en/graphene-iterchimica-announces-the-official-results-of-the-first-road-surface-trial-in-italy/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [41] Peleg, Roni; (2019), "Talga reports positive test results on its graphene silicon Li-ion battery anode project", *Graphene Info*, (19 Şubat 2019), <https://www.graphene-info.com/talga-reports-positive-test-results-its-graphene-silicon-li-ion-battery-anode-project-talnode%E2%84%A2-si>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [42] Mertens, Ron; (2019), "The Graphene Flagship announces its 2019-2030 graphene application roadmap", *Graphene Info*, (7 Nisan 2019), <https://www.graphene-info.com/graphene-flagship-announces-its-2019-2030-graphene-application-roadmap>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [43] *Graphene Info*, (2019), "Graphene products: introduction and market status", (29 Ocak 2019), <https://www.graphene-info.com/graphene-products>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [44] Parkin, Simon; (2017), "Brexit Is Quietly Strangling Science", *Bloomberg*, (8 Ağustos 2017), <https://www.bloomberg.com/news/features/2017-08-08/brexit-guts-british-science-and-risks-graphene-innovation>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [45] Peleg, Roni; (2018), "Haydale's graphene inks target the biomedical sensors market for diabetes monitoring", *Graphene Info*, (29 Kasım 2018), <https://www.graphene-info.com/haydales-graphene-inks-target-biomedical-sensors-market-diabetes-monitoring>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [46] *Mordor Intelligence*, "Graphene Market - Growth, Trends, and Forecast (2019 - 2024)", <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/graphene-market>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [47] Mackey, Paul J.; "Graphene Based Ultra-Light Batteries for Aircraft", *NASA*, <https://nari.arc.nasa.gov/node/301>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [48] Vitug, Eric; (2017), "NASA Langley's Technology Further Enhances Graphene Functions", *NASA*, (27 Temmuz 2017), <https://www.nasa.gov/langley/business/feature/nasa-langley-s-technology-further-enhances-graphene-functions>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [49] Kovo, Yael; (2015), "Technology Opportunity: Graphene Composite Materials for Supercapacitor Electrodes", *NASA*, (28 Ağustos 2015), <https://www.nasa.gov/ames-partnerships/technology/technology-opportunity-graphene-composite-materials-for-supercapacitor-electrodes>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [50] Mertens, Ron; (2014), "IBM to invest \$3 billion trying to seek the next-gen chip technology, graphene is a candidate", *Graphene Info*, (11 Temmuz 2014), <https://www.graphene-info.com/ibm-invest-3-billion-trying-look-next-gen-chip-technology-graphene-candidate>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [51] Anthony, Sebastian; (2014), "IBM builds graphene chip that's 10,000 times faster, using standard CMOS processes", *Extreme Tech*, (30 Ocak 2014), <https://www.extremetech.com/extreme/175727-ibm-builds-graphene-chip-thats-10000-times-faster-using-standard-cmos-processes>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [52] *Free Patents Online*, http://www.freepatentsonline.com/result.html?patents=on&query_txt=an/apple+graphene&sort=relevance&srch=top&submit=. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [53] Mertens, Ron; (2017), "Apple wants to use graphene membranes to enhance next-gen iPhone speakers or microphones", *Graphene Info*, (6 Mayıs 2017), <https://www.graphene-info.com/apple-wants-use-graphene-membranes-enhance-next-gen-iphone-speakers-or-microphones>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [54] Peleg, Roni; (2018), "Lockheed Martin partners with Elcora to deliver graphene-enhanced li-ion batteries", *Graphene Info*, (28 Mart 2018), <https://www.graphene-info.com/lockheed-martins-partners-elcora-deliver-graphene-enhanced-li-ion-batteries>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [55] *Lockheed Martin*, "Perforene Graphene Membrane", <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/perforene-graphene-membrane.html>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [56] *Aerospace Technology*, (2013), "Getting to grips with graphene: aviation's revolution? Share", (17 Mart 2013), <https://www.aerospace-technology.com/features/featuregetting-to-grips-graphene-aviation-revolution/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [57] Kay, Amanda; (2018), "Is Tesla Making a Graphene Battery?", *Investing News*, (8 Kasım 2018), <https://investingnews.com/daily/tech-investing/nanoscience-investing/graphene-investing/graphene-battery-tesla/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [58] Francis, Sam; (2018), "Opinion: Super-material graphene could lead to an electric vehicle breakthrough", *Robotics & Automation News*, (21 Haziran 2018), <https://roboticsandautomationnews.com/2018/06/21/opinion-super-material-graphene-could-cause-an-electric-vehicle-breakthrough/17830/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [59] Brzozowski, Aaron; (2018), "Ford F-150, Mustang To Feature First Under-Hood Uses Of Graphene", *Ford Authority*, (9 Ekim 2018), <http://fordauthority.com/2018/10/ford-f-150-mustang-to-feature-first-under-hood-uses-of-graphene/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [60] *PrintedElectronicsWorld*, (2011), "New security tags built using Vorbeck's graphene based inks to start shipping in Q1 2012", *Graphene Info*, (5 Kasım 2018), <https://www.graphene-info.com/new-security-tags-built-using-vorbecks-graphene-based-inks-start-shipping-q1-2012>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [61] Garreffa, Anthony; (2015), "South Korea is on track to produce graphene-based products by 2017", *TweakTown*, (7 Nisan 2015), <https://www.tweaktown.com/news/44473/south-korea-track-produce-graphene-based-products-2017/index.html>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [62] Hee Hong, Byung; (2012), "Korean Graphene Research Activities and Roadmap", *Seoul National University*, (10 Nisan 2012), http://www.grapheneconf.com/ARCHIVE12/Files/Presentations/Graphene2012_Hong_GF.pdf. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [63] *Statista*, "Consumer Electronics", <https://www.statista.com/outlook/251/125/consumer-electronics/south-korea#market-globalRevenue>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [64] Workman, Daniel; (2019), "Car Exports by Country", *Worlds Top Export*, (24 Temmuz 2019), <http://www.worldstopexports.com/car-exports-country/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [65] *International Trade Administration*, (2019), "Steel Exports Report: South Korea", (8 Haziran 2019), <https://www.trade.gov/steel/countries/exports/korea.asp>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [66] Smith, Chris; (2018), "The Galaxy S10 won't have Samsung's most revolutionary smartphone feature of 2019", *BGR*, (23 Ekim 2019), <https://bgr.com/2018/10/23/galaxy-s10-specs-dont-expect-a-fast-charging-graphene-battery/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [67] Peleg, Roni; (2018), "LG Chem launches a battery technology challenge", *Graphene Info*, (6 Kasım 2018), <https://www.graphene-info.com/lg-chem-launches-battery-technology-challenge>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [68] *OLED-Info*, (2019), "Rollable OLEDs: introduction and market status", (7 Şubat 2019), <https://www.oled-info.com/rollable-oleds>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [69] Peleg, Roni;(2015), *Graphene Info*, "LG files a patent for graphene microwaves", (10 Eylül 2015), <https://www.graphene-info.com/lg-files-patent-graphene-microwaves>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [70] Spasenovic, Marko; (2013), "Kia and Hyundai file patent for graphene in fuel cells", *Graphene Tracker*, (14 Mart 2013), <http://www.graphenetraacker.com/kia-and-hyundai-file-patent-for-graphene-in-fuel-cells/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)

- [71] *Markets Insider*, (2018), "Standard Graphene succeeded in mass production of Graphene", (24 Ocak 2018), <https://markets.businessinsider.com/news/stocks/standard-graphene-succeeded-in-mass-production-of-graphene-1013941502>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [72] Sung-won, Yoon; (2017), "Korean scientists add value to 'dream substance'", *Biz & Tech*, (12 Şubat 2017), http://www.koreatimes.co.kr/www/news/tech/2017/11/325_223788.html. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [73] ODTÜ, "TÜBİTAK 1003 Grafen Çağrısı", <https://www.metu.edu.tr/tr/researchers/tubitak-1003-grafen-cagrisi>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [74] TÜBİTAK, "'1003-BIT-GRFN-2018-1 Grafen ve Grafen Benzeri İki Boyutlu Malzemeler' Çağrı Metni", <http://www.tubitak.gov.tr/sites/default/files/281/1003-bit-grfn-2018-1.pdf>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [75] İnovatif Kimya Dergisi, (2018), "Grafen ile Güçlendirilmiş Yeni Nesil Titanyum Kompozit İmplant", (2 Kasım 2018), <https://inovatifkimyadergisi.com/grafen-ile-guclendirilmis-yeni-nesil-titanyum-kompozit-implant>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [76] T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Bilim ve Teknoloji Genel Müdürlüğü, (2017), "Türkiye Nanoteknoloji Stratejisi Ve Eylem Planı (2017-2018)", (Nisan 2017), <https://btgm.sanayi.gov.tr/Handlers/DokumanGetHandler.ashx?dokumanId=bbcbe307-2d0e-49bd-845b-49492552e6c0>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [77] *Bilkent Üniversitesi*, "Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi Yıllık Raporu 2018", http://unam.bilkent.edu.tr/docs/UNAM_AR2018.pdf. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [78] *Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi*, "Publications Patents", <http://unam.bilkent.edu.tr/patents/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [79] İTÜ Akademi, "Projeler", <https://akademi.itu.edu.tr/akinipe/Projeler>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [80] *GazeteSU*, (2016), "Grafen Projesi tüm hızıyla devam ediyor", (1 Ağustos 2016), <https://gazetesu.sabanciuniv.edu/2016-08/grafen-projesi-tum-hiziy-la-devam-ediyor>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [81] Nanografi, <http://nanografi.com.tr/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [82] *GazeteSU*, (2017), "Türkiye'nin ilk grafen katkılı müzik aleti üretildi", (28 Nisan 2017), <https://gazetesu.sabanciuniv.edu/2017-04/turkiye-nin-ilk-grafen-katkili-muzik-aleti-uretildi>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [83] *Grafen*, <https://www.grafen.com.tr/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [84] İş'te KOBİ, (2018), "Hazerfen Kimya, yol çizgileri boyası üretimi yapacak", (7 Şubat 2018), <https://www.istekobi.com.tr/kobi-bilgi-merkezi/haberler/hazerfen-kimya-yol-cizgileri-boyasi-uretimi-yapacak-h45934.aspx>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [85] *European Defence Agency*, (2018), "Work starts on 'Graphene Roadmap in Defence'", (29 Mayıs 2018), <https://www.eda.europa.eu/info-hub/press-centre/latest-news/2018/05/29/work-starts-on-graphene-roadmap-in-defence>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [86] *Graphene Info*, (2018), "An overview of graphene's properties", (27 Aralık 2018), <https://www.graphene-info.com/graphene-properties>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [87] *GazeteSU*, (2018), "Dünyanın en yüksek çözünürlüklü 'Grafen Tabanlı OLED Ekranı' geliştirildi", (8 Ağustos 2018), <https://gazetesu.sabanciuniv.edu/2018-09/dunyanin-en-yukse-kozunurluklu-grafen-tabanlı-oled-ekrani-gelistirildi>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [88] Mertens, Ron; (2017), "UK researchers demonstrate a viable graphene-based OLED encapsulation solution", *Graphene Info*, (27 Ekim 2017), <https://www.graphene-info.com/uk-researchers-demonstrate-viable-graphene-based-oled-encapsulation-solution>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [89] M K, Kavitha; Jaiswal, Manu; (2016), "Graphene: A review of optical properties and photonic applications", *Research Gate*, (Ocak 2016), https://www.researchgate.net/publication/312070999_Graphene_A_review_of_optical_properties_and_photonic_applications. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [90] *Nano Werk*, (2016), "\$1.3 million DARPA grant to fund graphene infrared detector research" (7 Haziran 2016), <https://www.nanowerk.com/nanotechnology-news/newsid=43596.php>
- [91] *STM ThinkTech*, (2018), "5G ve Savunma Sanayii", (7 Kasım 2018), <https://thinktech.stm.com.tr/detay.aspx?id=180>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [92] *STM ThinkTech*, (2019), "5G Yarışı", (2 Nisan 2019), <https://thinktech.stm.com.tr/detay.aspx?id=217>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [93] *Graphene Info*, (2019), "Defects in layered materials enable 'green' high-performance infrared photodetectors", (30 Nisan 2019), <https://graphene-flagship.eu/news/Pages/Defects-in-layered-materials-enable-%E2%80%99green%E2%80%99-high-performance-infrared-photodetectors.aspx>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [94] Berger, Michael; (2016), "What is graphene?", *Nano Werk*, https://www.nanowerk.com/what_is_graphene.php. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [95] Lloyd, Sophia; (2018), "Interface Engineering for Stable Perovskite Solar Cells" *Graphene Flagship*, (20 Mart 2018), <https://graphene-flagship.eu/interface-engineering-for-stable-perovskite-solar-cells>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [96] *Graphene Info*, (2019), "Graphene Supercapacitors: Introduction and News", (24 Ocak 2019), <https://www.graphene-info.com/graphene-supercapacitors>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [97] Peleg, Roni; (2019), "Korean team designs graphene-based transparent flexible battery" *Graphene Info*, (13 Mayıs 2019), <https://www.graphene-info.com/korean-team-designs-graphene-based-transparent-flexible-battery>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [98] Reyes, Anna; (2018), "How Lockheed Martin's driverless trucks and graphene partnership can revolutionize military might", *Technology.org*, (27 Mart 2018), <https://www.technology.org/2018/03/27/how-lockheed-martins-driverless-trucks-and-graphene-partnership-can-revolutionize-military-might/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [99] *PR Newswire*, (2019), "Graphene Nanocomposites Market Projected to Reach US\$ 800.4 Mn by 2028 - Future Market Insights", (14 Mart 2018), <https://www.prnewswire.com/news-releases/graphene-nanocomposites-market-projected-to-reach-us-800-4-mn-by-2028--future-market-insights-300812332.html>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [100] *Malzeme Bilimi.Net*, "Grafen Nanokaplama", <https://malzemebilimi.net/grafen-nanokaplama.html>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [101] Boyle, Rebecca; (2014), "Bulletproof graphene makes ultra-strong body armour", *New Scientist*, (27 Kasım 2014), <https://www.newscientist.com/article/dn26626-bulletproof-graphene-makes-ultra-strong-body-armor/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [102] *Sputnik News*, (2018), "China Adds Powerful Graphene Armor to Z-10 Assault Helicopters - Report", (24 Ekim 2018), <https://sputniknews.com/military/201810241069185679-china-powerful-graphene-armor-z-10/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [103] Chen, Stephen; (2019), "Can a new graphene coating save the Chinese military from rusting away in the South China Sea?", *South China Morning Post*, (1 Temmuz 2019), <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3016480/can-new-graphene-coating-save-chinese-military-rusting-away>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [104] Qureshi, Yakub; (2016), "Scientists eye first-ever aeroplane made using ultra-thin graphene", *Manchester Evening News*, (12 Temmuz 2016), <https://www.manchestereveningnews.co.uk/news/greater-manchester-news/scientists-graphene-aeroplane-university-lancashire-11602615>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [105] *The Engineer*, (2018), "Uni-built Juno becomes world's first graphene skinned plane", (8 Ağustos 2018), <https://www.theengineer.co.uk/worlds-first-graphene-skinned-plane/>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [106] *Defense World*, (2015), "Saab Experimenting with Graphene in Camouflage Products", (7 Ağustos 2015), https://www.defenseworld.net/news/13672/Saab_Experimenting_with_Graphene_in_Camouflage_Products#.XRvMluj7Qac. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)
- [107] Peleg, Roni; (2019), "AMD secures DASA funding for graphene-based signature management applications in civilian and military fields", *Graphene Info*, (8 Ağustos 2019), <https://www.graphene-info.com/amd-secures-dasa-funding-graphene-based-signature-management-applications-civilian-and-military>. (Erişim Tarihi: Eylül 2019)



thinktech
STM Teknolojik Düşünce Merkezi
<http://thinktech.stm.com.tr>

