

# GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ YENİ NESİL KOMPOZİTLER

**Mahmut Can Şenel<sup>1</sup>**

Arş. Gör.,  
mahmutcan.senel@omu.edu.tr

**Mevlüt Gürbüz<sup>\*</sup>**

Yrd. Doç. Dr.,  
mgurbuz@omu.edu.tr

**Erdem Koç<sup>1</sup>**

Prof. Dr.,  
erdemkoc@omu.edu.tr

<sup>1</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makina Mühendisliği Bölümü,  
Samsun

## NEW GENERATION COMPOSITES WITH GRAPHENE REINFORCED ALUMINUM MATRIX

### ÖZ

Grafen, bir atom kalınlığındaki karbon atomları tabakasıdır. Grafen, sahip olduğu hegzagonal latis-te  $sp^2$  bağı, iki boyutlu tek atom kalınlığındaki yapısı ve sıra dışı elektrik, ısı, mekanik özellikleri ve hafifliğinden dolayı son yıllarda yaygın olarak çalışılmaktadır. Grafen, ilk kez 2004 yılında sentezlenmesine rağmen, 2008 yılından itibaren alüminyum matrisli kompozit üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerle ilgili 2008 sonrası yayımlanmış yayınlar ve uluslararası patentler araştırılmıştır. Bu çalışmalardan, kompozitlerin üretim metodları, üretim aşamaları ve üretim sonrası mekanik test sonuçları değerlendirilmiştir. Grafenin alüminyum matris içerisine ilavesiyle kompozitin mekanik özelliklerinin arttığı belirlenmiştir. Genel olarak saf alüminyum içerisine %0.5'e kadar grafen katkısı yapıldığında, kompozitin maksimum çekme dayanımı 155 MPa'dan 315 MPa'a, mikro Vickers sertlik değeri ise 76 HV'den 85 HV'ye artmaktadır. Bu sebeple, yeni nesil bu kompozitlerin sahip oldukları üstün özelliklerinden (hafiflik, yüksek mukavemet vb.) dolayı yakın gelecekte otomotiv, savunma sanayi, havacılık ve uzay gibi bir çok endüstriyel alanda kullanılabilceği öngörülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum, grafen, kompozit, metal matris

### ABSTRACT

Graphene is one atomic layer thick sheet of carbon atoms. In recent years, it has been widely studied due to its  $sp^2$  bonded two dimensional single-atom thick-layer structure in hexagonal lattice and extraordinary electrical, thermal, mechanical properties and low weight. It has been studied in fabrication of aluminum matrix composite since 2008 even though it was synthesized for the first time in 2004. In this study, research studies and international patents after 2008 related to graphene reinforced aluminum matrix composites were investigated. Also, manufacturing methods, process steps and mechanical test results of those composites from published studies were evaluated. Addition of graphene in aluminum matrix leads to increase in mechanical properties of composites. The maximum tensile strength was increased from 155 MPa to 315 MPa with the addition of 0.5% graphene in pure aluminum. The micro Vickers hardness of the composite was determined to increase from 76 HV to 85 HV. Hence, new generation composites with graphene reinforced aluminum matrix are proposed to be used in many industrial fields such as automotive, defense and aerospace industry because of their superior properties (lightness, high strength etc.) in the near future.

**Keywords:** Aluminum, graphene, composite, metal matrix

<sup>\*</sup> İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 07.07.2015  
Kabul tarihi : 25.08.2015

Şenel, C. M., Gürbüz, M., Koç, E. 2015. "Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 669, s. 36-47.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde artan küreselleşme ve sanayileşmeye bağlı olarak, geleneksel yöntemlerle üretilen malzeme, cihaz ve makine parçalarından beklenen performanslar yeterli olmamaktadır. Bu nedenle katma değeri yüksek, fonksiyonel ve yüksek performanslı ileri teknoloji malzemelerinin geliştirilmesi üzerine yapılan araştırma-geliştirme (AR-GE) faaliyetleri son yıllarda hız kazanmıştır. Özellikle nanoteknolojinin insan hayatına girmesiyle birçok endüstriyel alanda yeni nesil malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Bu malzemelerden biri de kompozit malzemelerdir [1]. Kompozit malzemeler, en az iki farklı malzemenin makro seviyede (birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde) birleştirilmesiyle oluşmakta olup, matris malzemesine göre; polimer matrisli, seramik matrisli ve metal matrisli kompozitler (MMK) şeklinde sınıflandırılabilir [2].

Metal matrisli kompozitler (MMK), ana yapıyı metalin oluşturduğu ve takviye elemanı olarak seramik veya organik bir malzemenin kullanıldığı kompozitlerdir. MMK malzemeler, geleneksel mühendislik malzemelerine göre yüksek dayanım, hafiflik, güçlendirilmiş mekanik ve ısı özellikleri ve kolay şekillendirilmelerinden dolayı çok çeşitli uygulamalarda tercih edilmektedir. MMK'ler, uzay ve havacılık, otomotiv ve demiryolu taşıtları, elektronik ve ısı sistemler, güç iletimi, eğlence ve spor ürünleri, aşınmaya karşı dirençli malzemeler gibi birçok endüstriyel alanda giderek artan bir ilgiyle kullanılmaya devam etmektedir. MMK'lerdeki matris malzemelerinin en önemli görevi, kompozit malzemeye gelen yüklerin homojen bir şekilde takviye elemanlarına aktarılmasını sağlamaktır. Al, Ti, Mg, Cu, Fe, Co, Mo ve Ni gibi metaller ile bunların alaşımları metal matrisli kompozitlerde matris malzeme olarak kullanılabilir [3-4]. Kompozit malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesinde matris malzeme kadar takviye elemanı da etkilidir. Takviye elemanı, kompozit üzerine gelen yükün büyük bir bölümünü taşımakta olup, metal matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan parçacık takviye elemanları  $Al_2O_3$ , SiC,  $B_4C$ ,  $TiB_2$ , TiC, WC, W, C, MgO ve karbon esaslı (grafen, karbon nanotüp) malzemelerdir [4].

Metal matris kompozitlerde matris malzeme olarak kullanılan alüminyum, demirden sonra dünyada en fazla tüketilen madendir. Bu madenin yoğun bir şekilde kullanılması, şekillendirilebilirliğinin yüksek olması, hafif olması, iyi bir ısı ve elektrik iletkeni olmasından kaynaklanmaktadır. Günümüzde alüminyum ve alaşımları, havacılık ve uzay sanayi, otomotiv sanayi ve inşaat sektörü gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Karbon esaslı takviye elemanlarından grafen ise neredeyse bir atom kalınlığında, mekanik, elektrik, termal ve optik özellikleri yeni keşfedilmiş bir karbon allotropu olup, karbonun bal peteği örgülü yapılarından oluşmaktadır. Bu yapı, altıgen hücrelerden oluşan grafit yapısının tek katmanıdır. Ayrıca grafen; süper-esnek, süper-sağlam, süper-hafif ve süper-ince bir

malzeme olup, günümüzdeki en heyecan verici bilimsel gelişmelerinden biri olarak görülmektedir [5-6].

Grafenin ilk kez 2004 yılında sentezlenmiş bir malzeme olması sebebiyle, kompozit yapı içerisinde grafenin takviye elemanı olarak kullanımına 2008 yılından sonra başlanmıştır. Bu alanda yayımlanmış bilimsel çalışmalarda, grafenin kompozit yapı içerisinde kullanımının kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmalarda, kompozit yapı içerisinde ağırlıkça kullanılan grafen takviyesi %0.1-3 arasında değişmekte olup, ağırlıkça %0.5'den sonra grafenin topaklanma eğilimine girdiği ve  $Al_4C_3$  gibi istenmeyen ikincil fazların oluşabileceği belirlenmiştir [7-10].

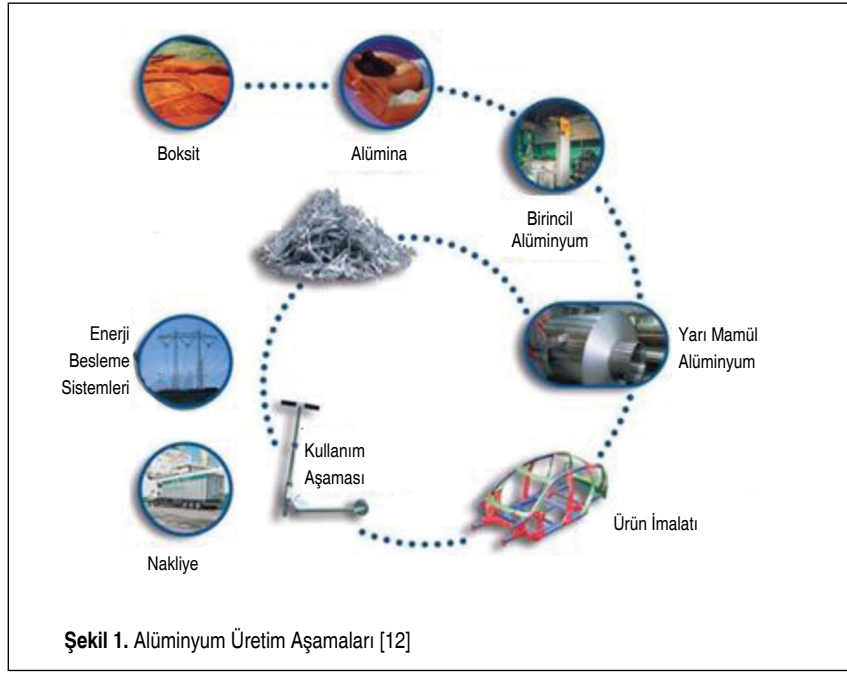
Bu çalışmada, grafenin matris alüminyum içerisinde kullanımının öneminden bahsedilerek yeni nesil grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitler incelenmiştir. Bu alanda 2008-2014 yılları arasında yapılmış yayın ve patent sayıları değerlendirilerek alüminyum esaslı kompozitlerin üretim metodları, üretim aşamaları ve üretim sonrası mekanik test sonuçları (mikro sertliği, akma dayanımı, maksimum çekme dayanımı vb.) geniş bir boyutta değerlendirilmiştir.

## 2. MATRİS MALZEMESİ OLARAK ALÜMİNYUM

Alüminyum ilk olarak 1808 yılında İngiltere'de ortaya çıkmış olup, alüminyumun endüstriyel çapta üretimi ise 1886 yılında geliştirilen elektroliz yöntemi ile başlamıştır. Günümüzde alüminyum, 5 ana üretim aşamasından oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla; boksit madeni işletmeciliği, boksit cevherinden alümina üretimi, alüminadan elektroliz yolu ile sıvı alüminyum üretimi, sıvı alüminyumun alaşımlandırılarak dökülmesi, ekstrüzyon, haddeleme işlemleriyle yarı ürün veya uç ürün üretimini kapsamaktadır. Şekil 1'de, genel olarak alüminyum üretim zinciri verilmiştir [11].

Alüminyum sanayi, birincil ve ikincil alüminyum üretimi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Birincil alüminyum, boksit cevherinin işlenmesinden; ikincil alüminyum ise hurdadan üretilmektedir. Üretim yöntemlerine göre de alüminyum ürünleri; hammadde (külçe, biyet) ve yarı ürünler (ara mallar) olan ekstrüzyon ürünleri (alüminyum profiller, çubuklar, lamalar, filmaşinler), yassı ürünler (levha, şerit, folyo), döküm ürünleri ve iletkenler şeklinde gruplandırılmaktadır.

Alüminyumun diğer metallere göre neredeyse %100 geri dönüşümünün sağlanabilmesi, bu malzemeyi geleceğin metali olarak ön plana çıkartmaktadır. Birincil alüminyum üretimine harcanan enerjinin %5'i kadar bir enerji harcanarak alüminyumun geri dönüşümünün sağlanabilmesi, alüminyumun çevre dostu bir malzeme olduğunu göstermektedir. Ayrıca, ABD'nin her yıl yayımladığı stratejik metaller listesinde alüminyum ilk sıralarda yer almaktadır [11].



nümüzde yoğun bir şekilde kullanılmasında; hafifliği, ömrünün uzunluğu, dış etkenlere ve değişik iklim şartlarına karşı dayanıklılığı, iyi ısı ve elektrik iletkenliği, yüksek korozyon direnci, kolay şekillendirilebilmesi, düşük bakım maliyetleri, renklendirilebilmesi ve teknolojik açıdan sonsuz ürün çeşitliliği önemli rol almaktadır. Alüminyum, demirden üç kat daha hafif olup, alaşımlandırılmak suretiyle demire yakın mukavemette bir malzemeye dönüşebilmektedir [1].

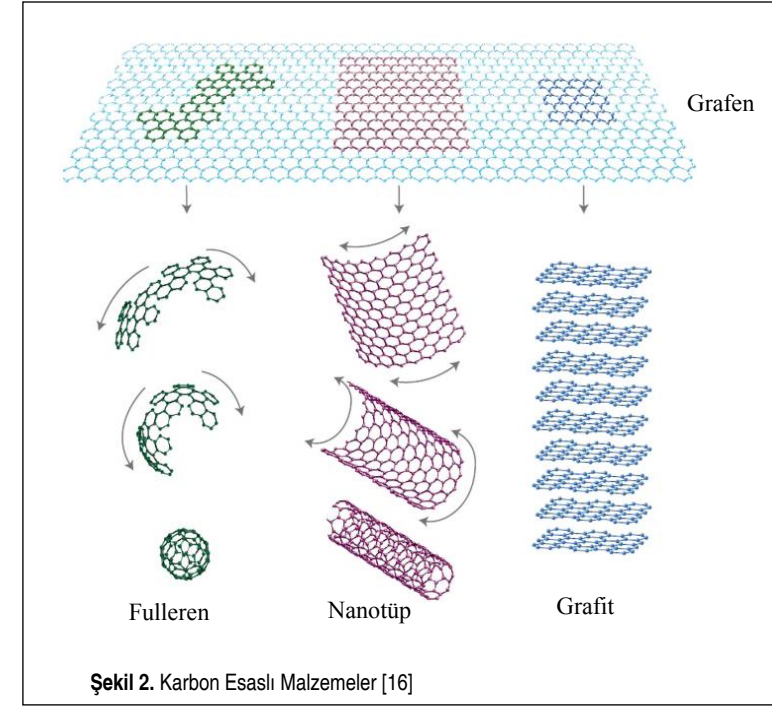
Alüminyum, oksijen ve silisyumdan sonra yer kabuğunda en fazla bulunan üçüncü elementtir. Periyodik cetvelin III A gurubunda bulunan ve atom numarası 13, atom ağırlığı 26.98 g/mol olan "+3" değerlikli bir element olan alüminyumun 20°C'deki yoğunluğu 2.7 g/cm<sup>3</sup>, ergime noktası 660.2°C, ısı iletkenliği 237 W/(m<sup>2</sup>K) olup, bu özellikler alaşım elementleri katılarak değiştirilebilmektedir (Tablo 1) [12].

Alüminyum, dünyada bileşik (oksit) halinde bulunmakta olup, alüminyumun en önemli ham maddesi boksittir. Dünya boksit rezervi, 38 milyar ton olup, 4 ton boksitten yaklaşık 1 ton birincil alüminyum üretilmektedir. Ülkemiz ise boksit açısından oldukça sınırlı bir rezerve sahiptir. Ülkemizin görünür boksit rezervi yaklaşık 68.91 milyon ton olup, bu rezerv daha çok Toroslar kuşağında yer almaktadır. Dünya birincil alüminyum üretimi ise her geçen yıl artmaktadır. 1980 yılında 15.39 milyon ton olan dünya birincil alüminyum üretimi, 2014 yılında 53.057 milyon tona ulaşmıştır. Bu durum, endüstri ve sanayide alüminyuma olan talebin sürekli olarak artmasından kaynaklanmaktadır [11-13]. Alüminyumun gü-

Alüminyumun çok çeşitli kullanım alanları mevcuttur. Avrupa'da kullanılan alüminyumun yaklaşık üçte biri ulaşım sektöründe kullanılmaktadır. Otomobillerde, uçaklarda, ulaşım sistemlerinde yük taşıma ve yolcu kompartımanlarının yapımında, gemi sanayiinde gittikçe artan oranlarda alüminyum kullanılmaktadır. Son yıllarda, alüminyumun en hızlı gelişen kullanım alanlarından biri de ambalaj sektörüdür. Çok miktardaki farklı tür ambalaj malzemeleriyle sağlanan korumayı, alüminyum birkaç mikron kalınlıkla çok daha etkin bir şekilde sağlayabilmektedir. Alüminyumun homojen yapısı, ince folyo şeklinde üretilebilmesi, hava geçirmezliği ve kolay şekillenebilmesi onu ideal bir ambalaj malzemesi yapmaktadır. Alüminyumun bir diğer kullanım alanı da içecek kutularıdır. Dünyada kullanılan metal kutuların %80'i alüminyumdandır. Bunun nedenleri; hafif, açılması kolay, darbeye dayanıklı, sağlam, geri kazanılabilir oluşu ve çabuk soğutma özellikleridir. Bu kullanım alanlarının dışında alüminyum ve alaşımları; elektrik/elektronik sektöründe (yüksek voltajlı elektrik nakil hatlarında, şaselerde, transistör soğutucuları, veri kayıt diskleri vb.), inşaat sektöründe (çatı ve cephe kaplamaları, merdivenlerde, kapı ve pencerelerde, sera yapımında, köprü inşaatında, çatı ve inşaat iskelesinde vb.) ve savunma sanayiinde (roket ve füze sistemleri vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır [11, 13, 15]. Son yıllarda, tercih edilen uygulamalarından biri de grafen takviyeli kompozitlerde alüminyumun matris malzemesi olarak kullanımınıdır.

### 3. TAKVİYE ELEMANI OLARAK GRAFEN

Grafen, ilk kez 2004 yılında Manchester Üniversitesi'nden Andre Geim ve Konstantin Sergeevich Novoselov isimli iki



bilim insanı tarafından ortaya konulmuş yeni bir malzemedir. Karbon elementinin bal peteği örgülü yapıları olan grafen, iki boyutlu sp<sup>2</sup> bağlı karbon atomlarının hegzagonal latiste bir araya gelmesiyle oluşmuş tek tabakalı yapılardır. Bu iki boyutlu malzeme, altı adet karbon halkalarının bir araya gelmesiyle oluşan nanokarbon tabakalarıdır. Grafen karbon nanotüp ve fullerenden oldukça farklı olup, sıra dışı özelliklere

sahiptir (Şekil 2). İdeal grafen yapısı tek tabakalı olmalıdır. Fakat birkaç tabakaya sahip yapılar da eşit öneme sahiptir [16].

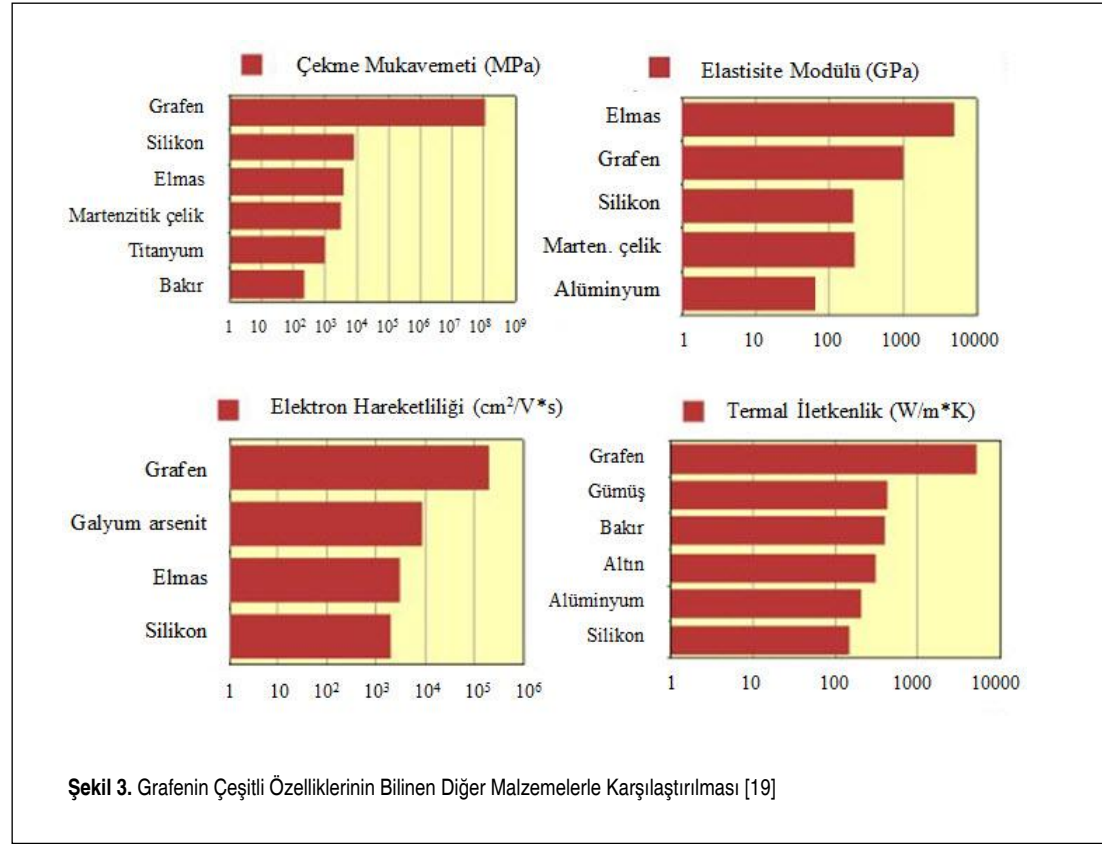
İdeal, bir tek tabakalı grafenin tahmin edilen yüzey alanı 2600 m<sup>2</sup>/gr, kalınlığı 1-2 nm, termal iletkenliği 4840-5300 W/(m<sup>2</sup>K), gerçek yoğunluğu 2.25 g/cm<sup>3</sup>, elastisite modülü 1 TPa olup, grafenin diğer özellikleri Tablo 2'de verilmiştir [16-19].

Karbon atomlarının iki boyutlu altıgen bir yapıda dizilmiş bu formu, doğada iki boyutlu tek malzeme örneğini oluşturmasının yanı sıra, grafene olağanüstü özellikler de kazandırmaktadır. Dijital teknolojide önemli bir noktada bulunan silisyum, grafen ile karşılaştırıldığında, elektronların silisyum içindeki hızlarının, grafen içindeki hızlarına göre 100 kez daha yavaş olduğu tespit edilmiştir. Grafenin elektrik özellikleri bu sıra dışı malzemenin tek olağanüstü özelliği değildir. Bilinen en ince malzeme olmasının yanında, güçlü karbon bağları, grafeni bilinen en güçlü malzeme de yapmaktadır. Şekil 3'te verildiği üzere, grafenin elastisite modülü, çelikten yaklaşık 100 kat daha fazla olup, ısıyı iyi iletmediği düşünülen diğer bir karbon allotropu olan elmaştan daha iyi bir ısı iletkenidir. Ayrıca grafen, kolayca esneyebilmekte ve değişik formlardaki birçok malzemenin yüzeyine kolayca kaplanabilmektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı grafen, dünyada çok önemli değişikliklere sebep olabilecek bir malzeme olarak görülmektedir [17-19, 21].

Yakın gelecekte grafenin; otomotiv ve havacılık sektörü, elektrik-elektronik sektörü, robot yapımı, güneş hücreleri, enerji depolama, telekomünikasyon, biyokimya, tıp gibi birçok alanda kullanılması beklenmektedir. Grafenin en önemli uygulama alanlarından biri de süper kapasitörlerdir. Süper kapasitörler, yeniden şarj edilebilir pillere benzer şekilde enerji depolayabilen sistemler olup, bu tip sistemlere yönelik son yıllardaki çalışmalar hızla artış göstermektedir. Grafen yapısının vücut içerisinde bulunan iyonik sıvılarda bozulmamasından dolayı, biyonik göz, biyonik kulak vb. organ teknolojilerinin geliştirilmesi ilerleyen senelerde grafen ile mümkün olabilecektir. Grafenin termal iletkenliği bakırdan daha fazla olup, polimerin içine yüzde 1 oranında grafen karıştırıldığında grafen, polimeri iletken hale getirmektedir. Bunun yanı sıra, su islahı, petrol sızıntısı temizliği konularında da grafenin faydalı olabileceği öngörülmektedir. Grafenin en önemli kullanım alanlarından biri yüksek mukavemete sahip kompozit malzemelerin geliştirilmesi olarak görülmektedir. Alüminyum, titanyum, magnezyum gibi matris malzemelerine grafen katkısı yapılarak otomotiv, tramvay, hızlı tren, gemi, uçak, uzay ve havacılık sektöründe kullanılabilecek yeni nesil kompozitler üretilebilecektir [21].

Tablo 2. Tek Tabakalı Grafenin Genel Özellikleri [20]

Özellikler	Değer
Hibrit şekli	sp <sup>2</sup>
Tabaka sayısı	Tek tabakalı
Kristal yapısı	Hegzagonal
Boyut	İki
Safılık derecesi (%)	99
Kütleli (bulk) yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	~0.3
Gerçek yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2.25
Kalınlık (nm)	~1-2
Yüzey alanı (m <sup>2</sup> /g)	2600
Yüksek sıcaklık direnci	-75 +200 °C arasında özellikleri değişmiyor.
Termal iletkenliği (WK <sup>-1</sup> /m)	4840-5300
Elektron hareketliliği cm <sup>2</sup> /(V.s)	~2.5x10 <sup>5</sup>
Elastisite modülü (TPa)	~1



#### 4. GRAFEN VE GRAFEN TAKVİYELİ KOMPOZİTLER ÜZERİNE ARAŞTIRMALAR

Grafenin sahip olduğu süper-esnek, süper-sağlam, süper-hafif ve süper-ince özellikler grafeni hemen hemen tüm endüstri kollarında kullanılabilecek bir malzeme haline getirmiştir. Bu sebeple, bu alanda yürütülen çalışmalar son yıllarda hızla önem kazanmaya başlamıştır. Bu duruma en güzel kanıt, 2013 yılında TÜBİTAK'ın yapmış olduğu "1003-Öncelikli Alanlar AR-GE Projeleri Destek Programı" kapsamındaki "Grafen" çağrısı gösterilebilir. Bu çalışma kapsamında, grafen ve grafen takviyeli alüminyum kompozitlerin önemini vurgulamak amacıyla, bu alanda yapılmış SCI indeksli yayınlar ve üretilmiş patentler araştırılmıştır. Bu çalışma konusuna yönelik yayın araştırması yapılırken Scencedirect ve Web of Science veri tabanından; patent araştırması içinse Espacenet ve Google patent veri tabanından faydalanılmıştır.

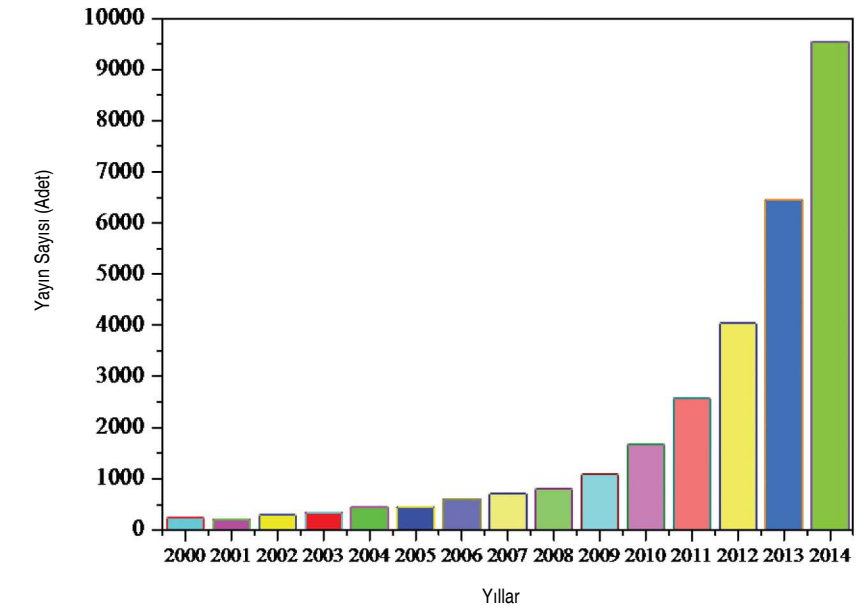
##### 4.1 Grafen Alanında Yapılmış Yayınlar

Grafenin ilk kez 2004 yılında sentezlenmiş bir malzeme olması sebebiyle, grafen alanındaki yayınlar da bu tarihten itibaren yayımlanmaya başlanmıştır. Scencedirect veri tabanı kullanılarak "grafen" kelimesinin taraması yapıldığında bu alandaki

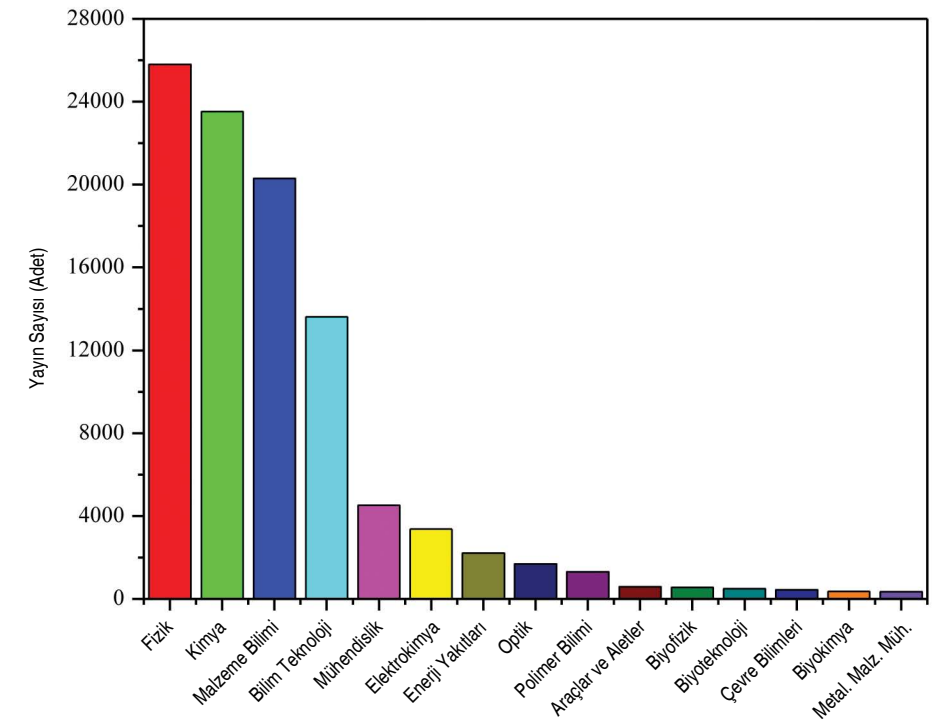
yayın sayısının önemli oranda arttığı belirlenmiştir. 2000-2014 yılları arasında grafenle ilgili yayın sayısındaki değişim Şekil 4'te verilmiştir. 2000 yılında bu alandaki toplam yayın sayısı 242 iken; 2005 yılında 444, 2010 yılında 1671 ve 2014 yılında ise 9544'e yükselmiştir. Bu durum, üstün özelliklere sahip grafenin yeni sentezlenmiş bir malzeme olmasından ve önemli bilim dallarında (optik, fizik, mühendislik vb.) kullanımının her geçen gün artmasından kaynaklanmaktadır.

Grafen, kullanım alanı çok geniş bir malzeme olup, bu çalışma alanlarında birçok bilimsel çalışma yürütülmüştür. Web of Science veri tabanına göre grafen alanında en fazla yayının üretildiği ilk beş bilim dalı sırasıyla; fizik (25.803), kimya (23.526), malzeme bilimi (20.298), bilim teknolojisi (13.616) ve mühendislik (4522) şeklindedir (Şekil 5). Bu durum grafenin, disiplinlerarası bir çalışma konusu olduğunu ve ilerleyen yıllarda bu alandaki yayın sayısının daha da artacağını ortaya koymaktadır.

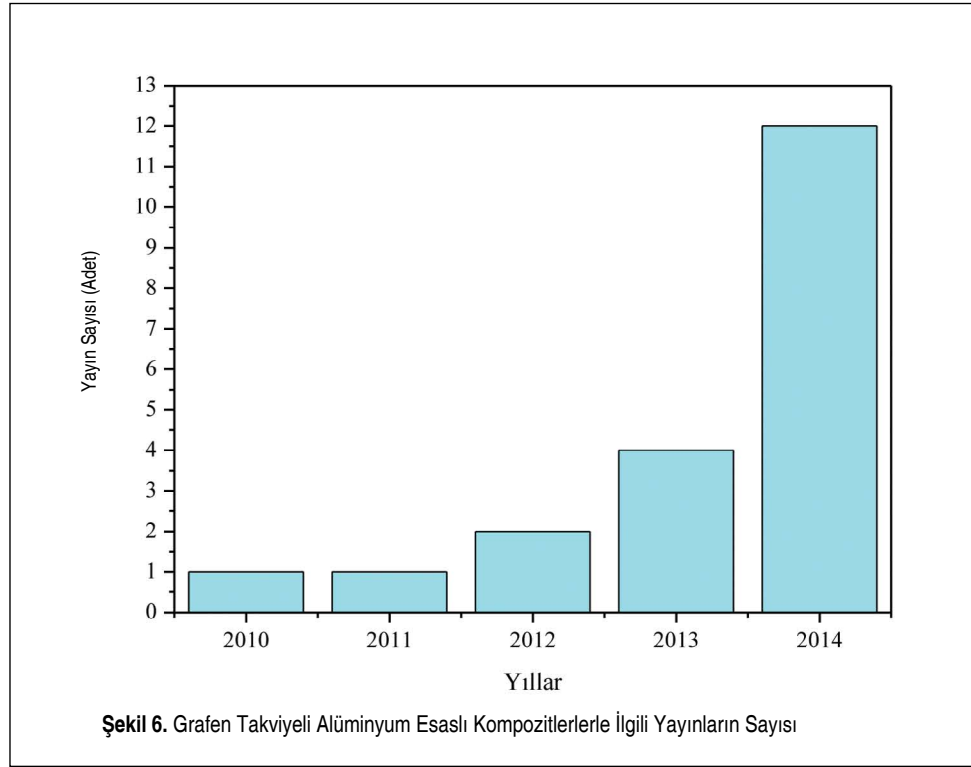
Web of Science veri tabanına göre, 2000-2014 yılları arasında grafen konulu yayın sayısının en fazla olduğu beş ülke sırasıyla; Çin (19.399), ABD (12.373), Güney Kore (4408), Japonya (3503), Almanya (3012) şeklindedir. Grafen konulu dünyadaki toplam yayın sayısı 2000-2014 yılları arasında 55.099 olarak gerçekleşmiştir. Ülkemizin bu alanda yaptığı



Şekil 4. 2000-2014 Yılları Arasında Grafen Konulu Yayınların Sayısı



Şekil 5. 2000-2014 Yılları Arasında Grafen Konusuyla İlgili Bilim Dallarındaki Toplam Yayın Sayıları



Şekil 6. Grafen Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerle İlgili Yayınların Sayısı

bu alandaki uluslararası patentler çoğunlukla son 10 yıl içerisinde yayımlanmıştır. Dünyada grafen konulu patent sayısı Espacenet veri tabanına göre 14.226, Google patent veri tabanına göre 4530 olarak gerçekleşmiştir (Tablo 3). Bu alanda dünyada en fazla patente sahip olan ülke, Amerika Birleşik Devleti (ABD) olup, ABD patent veri tabanına (USPTO) göre ABD'nin bu alandaki toplam patent sayısı 557'dir. Grafen takviyeli alüminyum kompozitlere yönelik patent sayısı Espacenet veri tabanına göre 5, Google patent veri tabanına göre 1 olarak gerçekleşmiştir. Ülkemizde ise grafen takviyeli alüminyum kompozitlere yönelik herhangi bir patent bulunmamaktadır.

toplam yayın sayısı 304 olup, ülkemiz bu alanda 26. sırada yer almaktadır. Bu istatistik verilerden, ülkemizin bu alandaki toplam yayın sayısının diğer ülkelerin çok gerisinde olduğu görülebilmektedir. Bu sebeple, ülkemiz bu alanda daha fazla proje ve yayın üretmek bilime olan katkısını arttırmaya çalışmalıdır.

Grafen takviyeli alüminyum esaslı metal matrisli kompozitler, son yıllarda otomotiv, havacılık ve uzay gibi yüksek teknoloji gerektiren birçok alanda kullanılmaktadır. Bu malzemenin hafif olması, yüksek mukavemete sahip olması ve aşınma direncinin yüksek olması en önemli avantajları arasında görülmektedir. Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitler üzerine son birkaç yıldır çalışmalar yürütülmekte olup, Web of Science veri tabanına göre, bu çalışmaların yıllara göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, grafen takviyeli alüminyum kompozitlere yönelik 2010 yılında 1 adet araştırma makalesi yayımlanmışken, 2014 yılında sadece 12 araştırma makalesi yayımlanmıştır. Özellikle son iki yıldır yürütülen çalışma sayısındaki hızlı artış dikkat çekmektedir. Ek olarak, 2011 yılında grafen takviyeli alüminyum kompozitlere yönelik yayımlanmış çalışmaların toplam atıf sayısı 10 iken, aynı konuda 2014 yılında 76'ya yükselmiştir.

#### 4.2 Grafen Alanında Üretilmiş Patentler

Grafen, yeni ve özgün bir çalışma alanı olması sebebiyle,

Tablo 3. Dünyada Grafen ve Grafen Takviyeli Al Kompozitlerle İlgili Patentlerin Sayısı

		Dünya (Adet)
Espacenet	Grafen	14.226
	Grafen takviyeli Al kompozit	5
Google Patent	Grafen	4530
	Grafen takviyeli Al kompozit	1

### 5. GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM KOMPOZİTLER

Grafenin sahip olduğu sıra dışı termal, mekanik ve elektronik özellikler, kompozit üretiminde grafeni önemli bir takviye elemanı haline getirmiştir. Ayrıca grafen takviyesinin bilinen diğer kompozitlere göre oldukça az miktarda olması ve grafenin sahip olduğu bu sıra dışı özellikler en önemli tercih nedenlerindedir. Grafen, basit proseslerle kompoziti daha hafif yapmasının yanı sıra, kompoziti çok fonksiyonlu uygulamalar için daha mukavemetli hale getirebilmektedir. Grafenin bu kayda değer üstün özelliklerinin kompozite olan etkisi grafenin matris içerisinde homojen dağılımına bağlıdır [22, 23].

Geçen on yıl içerisinde, özellikle karbon nanotüp alüminyum (KNT/Al) nano kompozitler üzerine çalışmalar yapılmış ve halen devam etmektedir. Fakat KNT'lerin metal

matris içerisinde dağıtımının zorluğu, homojen dağıtımın sağlanamaması, üretiminin daha zor ve pahalı olması bu malzemenin dezavantajlarıdır [24, 25]. Grafenin nano tabakalı (GNT) plaka şeklinde olması; grafenin kolay proses edilebilmesini ve matris içerisinde homojen dağıtımını sağlamaktadır. Bu nedenle GNT/Al kompozitler, KNT/Al kompozitlerin yerine alternatif bir kompozit yapısıdır. Alternatif bir malzeme olmasının nedeni, eksfoliyasyon (pul pul dökülme, tabakalara ayırma) işlemiyle grafit tabakalardan (flakelerinden) grafen tabakaların üretiminin birkaç yıldır başarılı olarak yapılıyor olmasındandır. Grafenin metal matris içerisinde homojen dağıtılması, kompozit yapıda istenilen mukavemete ulaşmasında en önemli parametredir. Diğer taraftan, metal matris ile karbon esaslı malzemenin reaksiyona girmemesi gerekmektedir. Al esaslı bir metal, karbon ile reaksiyona girdiğinde  $4Al+3C=Al_4C_3$  oluşmakta olup, bu nedenle karbon ile metalin reaksiyonu önlenmelidir. Diğer önemli bir husus ise metal ile grafenin ıslanabilirlik, arayüz bağlanması açısından oldukça önemlidir. Bunun için yüzey serbest enerjisinin minimum olması gerekmektedir [24].

En yaygın MMK üretim yöntemleri, sıvı metal ve toz metalurjisi prosesleridir. Bu proses, üç türe ayrılmaktadır. Bunlar; eriyik karıştırma, eriyik infiltrasyonu ve lazer deposizyonudur. Eriyik karıştırmada, metal eriyik inert gaz (argon)

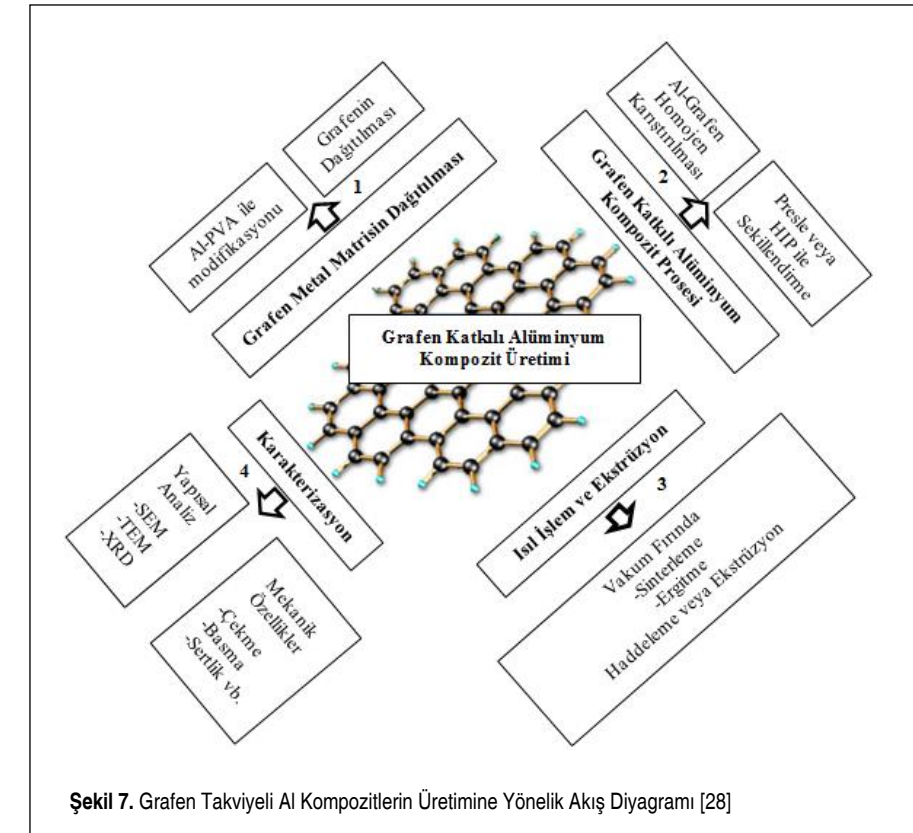
ortamında ergitilerek ya döküm yapılmakta ya da katılaşmaya maruz bırakılmaktadır. Metal infiltrasyonunda karbon esaslı yapı üretildikten sonra, metal eriyik içine akıtılarak infiltre olmaktadır. Lazer prosesinde ise takviye elemanı ile metal tozu karışımı lazer ile ergitilmekte, katılaşma sonucunda kompozit üretilmektedir [26]. Toz metalurjisi prosesinde ise üretilen grafen takviyeli kompozit tozlar; el presiyle, soğuk ve sıcak izostatik presle (CIP ve HIP) şekillendirilmektedir. Şekillendirme sonrası ham kompozit numuneler, argon atmosferinde alüminyumun ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta ısıtılma maruz bırakılarak kompozit numuneler üretilmektedir. Son olarak, mukavemet artışı sağlamak amacıyla kompozitler, sıcak haddeleme veya ekstrüzyon işlemine tabi tutulmaktadır [27].

GNT/Al kompozit yapının genel üretim akış diyagramı Şekil 7'de verilmiştir. Üretim dört ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; 1) grafenin metal matris içinde dağıtılması ve modifikasyonu, 2) grafen ile alüminyumun öğütülmesi ve şekillendirilmesi, 3) kompozit yapının ısıtılma maruz bırakılması, sıcak haddeleme ve ekstrüzyon işlemleri, 4) üretilen kompozitlerin yapısal özelliklerinin karakterizasyonu şeklindedir.

2010-2015 yılları arasında grafen takviyeli Al kompozitlerin üretimine yönelik yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar Tablo 4'te özetlenmiştir. Görüldüğü üzere, yapılan çalışmalar daha çok kompozitlerin sertlik ve çekme dayanımları üzerine odaklanmıştır.

Grafenin 2008 yılından itibaren kompozit yapı içerisinde kullanılmaya başlanması sebebiyle, GNT/Al kompozitler üzerine 2008-2013 yılları arasında gerçekleştirilen çalışma sayısı oldukça azdır. Sonraki yıllarda, grafen üretiminin ticari olarak hızlanmasıyla 2014-2015 yılları arasındaki yayın sayısında hızlı bir artış gerçekleşmiştir. Yapılan çalışmalarda, üretim yöntemi olarak başlangıç aşamasında toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin özelliklerini iyileştirmek amacıyla, sıcak izostatik preslemenin ve sıcak ekstrüzyonun yapıldığı ve bunun sonucunda üretilen kompozitlerin özelliklerinin iyileştiği görülmüştür.

Literatürdeki SCI indeksli çalışmalar değerlendirildiğinde, grafen miktarının Al kompozitin mekanik özelliklerine etkisi Şekil 8a'da verilmiştir. Burada, saf alüminyumun maksimum çekme dayanımı yaklaşık 155 MPa iken, ağırlıkça %0.5 grafen katkısıyla 315 MPa'a kadar çıkmaktadır [30]. Buna karşın, ağırlıkça



Şekil 7. Grafen Takviyeli Al Kompozitlerin Üretimine Yönelik Akış Diyagramı [28]

Tablo 4. GNT/Al ile İlgili Çalışmalar ve Üretilen Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Kimyasal Kompozisyon (Ağırlıkça %)	Üretim Yöntemi	Sertlik (HV)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Referans
Takviyesiz Al	Toz metalurjisi	40	154	[7]
%0.1GNT-Al	Toz metalurjisi+Sıcak izostatik pres-ekstrüzyon	Katkısız Al: 76 %0.1 GNT-Al: 84	260	[8]
%0.3GO-Al	Toz metalurjisi+Sıcak ekstrüzyon	-	249	[27]
%1GNT-Al6061	Toz metalurjisi-Mekanik alaşımlama	-	Katkısız Al6061: 350-400 %1GNT-Al6061: 760-800	[7]
%0.3GNT-Al	Toz metalurjisi-sıcak ekstrüzyon	Katkısız Al: 76 %0.3GNT-Al: 85	Katkısız Al: 252 %0.3GNT-Al: 280	[29]
%0.25-0.50-1 GNT-Al	Toz metalurjisi	%0GNT-Al: 40 %0.25GNT-Al: 73 %0.5GNT-Al: 85 %1GNT-Al: 94	-	[9]
%0.15-0.5 GNT-Al	Toz metalurjisi-sıcak izostatik pres- sıcak ekstrüzyon	-	Katkısız Al: 210 %0.15GNT-Al: 250 %0.5GNT-Al: 315	[30]
%0.50-1-1.5-2 GNT-Al	Toz metalurjisi	-	Katkısız Al: 150 %0.5GNT-Al: 165 %1GNT-Al: 250 %1.5GNT-Al: 212 %2GNT-Al: 160	[31]
(%1-3 GNT)- (%10-15-20 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )-Al	Toz metalurjisi	155-400	-	[32]

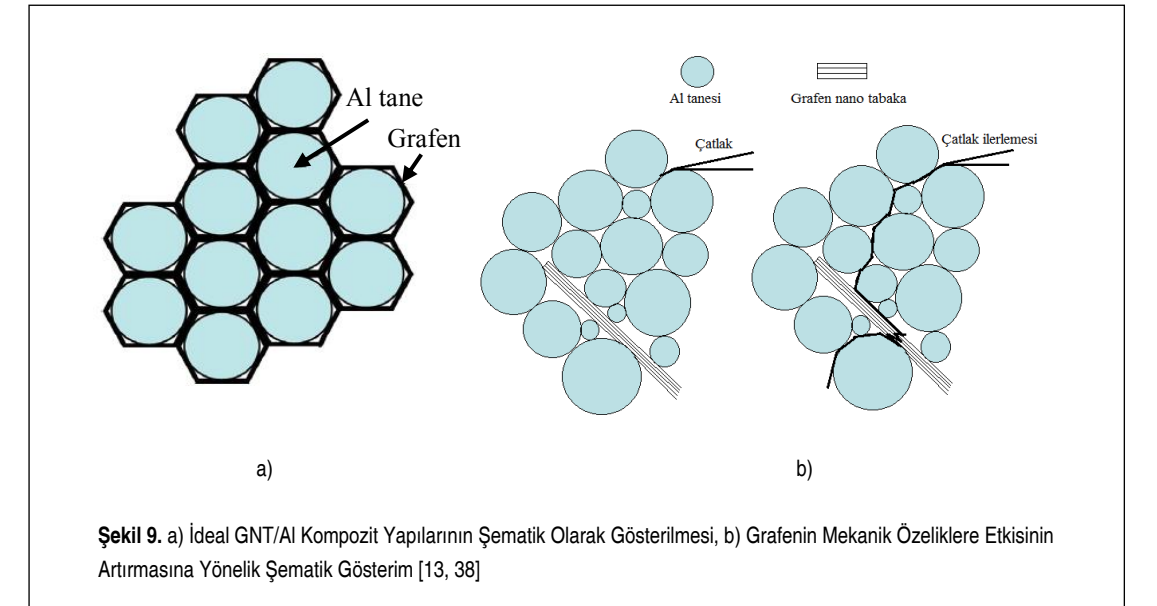
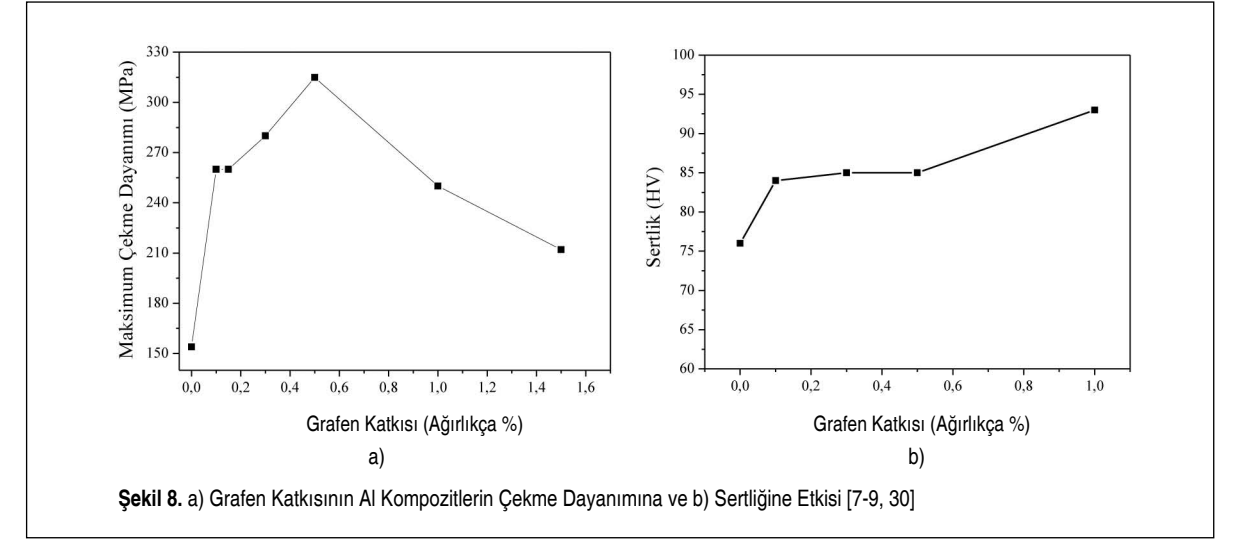
%0.5 grafen katkısından sonra ise maksimum çekme dayanımında düşüş gözlenmektedir. Ayrıca grafen saf Al yerine, Al alaşımlarda, Al-seramik kompozitlerin üzerinde de takviye elemanı olarak kullanılabilir. Alaşım olarak kullanıldığında çekme dayanımı 350 MPa'dan 800 MPa'a çıkmaktadır [7].

Grafen, son yıllarda, yüksek yağlayıcılık özelliğinden dolayı sürtünmeyi düşüren ve aşınmayla alakalı mekanik hataları azaltan bir malzeme olarak da tercih edilmektedir [33]. Grafen, Ni<sub>3</sub>Al matris içerisinde %1 oranında kullanıldığında aşınma dayanımının arttığı, sürtünme katsayısının ise azaldığı tespit edilmiştir. Oda sıcaklığında ölçülen sürtünme katsayısı grafen katkısız malzemelerde 0.75 iken, grafen katkılı kompozit için 0.25 olarak ölçülmüştür. Aşınma hızı incelendiğinde ise katkısız malzemelerde aşınma hızı 126.8x10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup>/(Nm) iken, grafen katkılı kompozitte bu değer 5.3x10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup>/(Nm) olarak ölçülmüştür [34, 35]. Bu da grafenin iyi bir yağlayıcı olduğunun göstergesidir. Ayrıca, SiC gibi seramik ve grafen birlikte takviye elemanı olarak kullanıldığında grafenin yağlayıcı özelliğinden, seramiğin ise yüksek aşınma dayanımından faydalanılarak kompozitler üretilmektedir. SiC ve grafen takviyeli olarak üretilen numunelere çekme testi uygulandığında katkısız alüminyum alaşımına göre, akma dayanı-

mının ve sünekliliğinin sırasıyla, %45 ve %84 oranında arttığı sonucuna ulaşılmıştır [36].

Şekil 8b'de ise katkısız Al'nin Vickers sertlik değeri 76 iken, artan GNT miktarıyla sertliğin arttığı görülmektedir. Ağırlıkça %1 GNT kullanılmasıyla sertlik değerinin yaklaşık 94'e kadar arttığı belirlenmiştir [9]. Fakat %0.5'ten sonra, artan grafen miktarına bağlı olarak Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> fazının oluşma ihtimali yükselmiştir. Bu nedenle, literatürde en çok çalışılan kompozisyon, ağırlıkça %0.3 ve %0.5 grafen takviyeli alüminyum kompozitlerdir.

Yukarıda verilen şekillerde, grafen nano tabakaların (GNT), Al matris içerisinde takviye elemanı olarak kullanılmasının ve mekanik özelliklerinin iyileştirmesinin üç temel nedeni vardır. Bunlar; tane boyut kontrolü, dislokasyon mukavemeti ve gerilme transferidir. İlk olarak, GNT'ler, ısıl işlem esnasında tane büyümesini engellemekte ve plastik deformasyon anında dislokasyon hareketini engellemektedir. Bu nedenle, kompozit yapının çekme dayanımı artmaktadır. İkinci olarak ise plastik deformasyon altında mekanik yükün önemli bir kısmı GNT'lere geçmektedir. Gerilme transferinde ise kırık yüzey analizinde yükün yönünde uzamış çukurcuklar oluşmakta olup, GNT'lerin bu çukurcukların kenarlarından ayrıldığı görülmüştür. Bu da malzemenin tokluğunu artırmaktadır



[37]. Şekil 9a'da görüldüğü üzere, grafen, Al tanelerini kaplamakta ve tane sınırlarında homojen olarak dağılmaktadır. Şekil 9b'de ise GNT ile takviye edilmiş Al kompozitlerde çatlak oluştuğunda, çatlak tane sınırlarını tercih ederek ilerlemektedir. İlerleyen çatlak GNT'ye kadar ilerlediğinde, çatlak tabaka üzerinde ilerlemekte ve enerjisini azaltmaktadır. Dolayısıyla çatlakın ilerlemesi durdurulmakta, bu da malzemenin mekanik özelliklerini artırmaktadır [31, 38].

## 6. SONUÇ

Bu çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmiştir:

- 2008-2014 yılları arasında yapılan yayın taramasında, grafen konulu yayın sayısı oldukça fazla olup, grafen

takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerle ilgili yayın sayısı 2014 yılı itibarıyla sadece 12'dir. Patent sayısına bakıldığında ise bu kompozitlerle ilgili patent sayısı 5 olup, ülkemizde bu konuda henüz patent bulunmamaktadır.

- Grafen takviyeli alüminyum kompozitler üzerine yapılan araştırmalar neticesinde, kompozit yapı içerisinde %0.5'e kadar bir grafen katkısı yapıldığında, kompozitin mekanik özelliklerinin arttığı belirlenmiştir. %0.5'in üzerindeki katkılarda ise grafenin topaklanma eğilimine girdiği ve ikincil faz oluşarak (Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>) mekanik özellikleri olumsuz etkilediği görülmüştür.
- Yapılan çalışmalardan, saf alüminyum içerisinde %0.5'e kadar grafen katkısı yapıldığında, kompozitin maksimu-

- mum çekme dayanımının 155 MPa'dan 315 MPa'a kadar arttığı, mikro Vickers sertlik değerini ise 76 HV'den 85 HV'ye arttırdığı tespit edilmiştir.
- Grafenin saf alüminyum içerisinde takviye elemanı olarak kullanımının dışında, alüminyum alaşımlarda da kullanılabilir. Grafen, alaşım içerisinde kullanıldığında kompozitin çekme dayanımı 350 MPa'dan 800 MPa'a çıkmıştır.
  - Grafenin sahip olduğu yüksek yağlayıcılık özelliğinden dolayı, özellikle aşınma dayanımı arttırdığı, sürtünme katsayısını ise azalttığı tespit edilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan tribolojik çalışmalarda, grafen takviyesiyle sürtünme katsayısının yaklaşık 0.75'den 0.25'e düştüğü belirlenmiştir.
  - Son yıllarda, grafen SiC gibi seramik malzemelerle birlikte, alüminyum matris içerisinde takviye elemanı olarak aşınma dayanımı yüksek kompozit malzeme üretiminde de kullanılabilir. Seramik ve grafen birlikte takviye elemanı olarak kullanıldığında seramiğin yüksek aşınma dayanımından, grafenin ise yağlayıcı özelliğinden faydalanılarak kompozitler üretilmektedir.
  - Günümüzdeki çalışmalar daha çok tek grafen kompozisyonu üzerine olup, farklı grafen katkıları henüz yeterince çalışılmamıştır. Yapılan çalışmalar daha çok sertlik ve çekme dayanımı üzerine olup, farklı kompozisyon ve grafen katkıları için detaylı mekanik testler ileriki dönemlerde çalışılabilecektir.

Sonuç olarak, yayımlanmış çalışmalar incelendiğinde, grafenin alüminyum esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve gelecekte endüstriyel alanlarda ortaya çıkabilecek talepleri karşılayabilecek yeni nesil bir kompozit olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, grafenin sahip olduğu bu üstün özelliklerden dolayı magnezyum, titanyum ve bakır gibi metal matrisler içerisinde de takviye elemanı olarak kullanılacağı öngörülmektedir.

## KAYNAKÇA

- Gürbüz, M., Gençoğlu, O., Durmuş, A., Kolbakır, F., Pekşen, C., Üreyen, M. E., Kopal, A. S., Doğan, A. 2010. "Kompozit Malzemeler ve Nano Boyutlu Antibakteriyel Seramik Toz Katkılı Kompozitlerin Havacılık Sektöründe Kullanımı," III. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 16-18 Eylül 2010, Eskişehir.
- Pul, M. 2010. "Al Matrisli MgO Takviyeli Kompozitlerin İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretimi ve İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi," Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Şahin, Y. 2006. Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Yayınevi, Ankara.
- Erdoğan, M. 2005. "Çelik Takviyeli Alüminyum Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Tjong, S. C. 2013. "Recent Progress in the Development and Properties of Novel Metal Matrix Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes and Graphene Nanosheets," Materials Science and Engineering, vol. 74, no.10, p.281-350.
- Geim, A. K., Novoselov, K. S. 2007. "The Rise of Graphene," Nature Materials, vol. 6, p.183-191.
- Bastwros, M., Kim, G. Y., Zhang, C. Z. K., Wang, S., Tang, X. 2014. "Effect of Ball Milling on Graphene Reinforced Al6061 Composite Fabricated by Semi-Solid Sintering," Composites: Part B, vol. 60, p.111-118.
- Bartolucci, S. F., Paras, J., Rafiee, M. A., Rafiee, J., Lee, S., Kapoor, D., Koratkar, N. 2011. "Graphene-Aluminum Nanocomposites," Materials Science and Engineering A, vol. 528, no. 27, p. 7933-7937.
- Pérez-Bustamante, R., Bolaños-Morales, D., Bonilla-Martínez, J., Estrada-Guel, I., Martínez-Sánchez, R. 2014. "Microstructural and Hardness Behavior of Graphene-Nanoplatelets/Aluminum Composites Synthesized by Mechanical Alloying," Journal of Alloys and Compounds, vol. 615, no.1, p. 578-582.
- Wang, J., Li, Z., Fan, G., Pan, H., Chen Z., Zhang, D. 2012. "Reinforcement with Graphene Nanosheets in Aluminium Matrix Composites," Scripta Materialia, vol. 66, no. 8, p.594-597.
- Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Sektörü Raporu. 2012. Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB) Yayınları, Ankara.
- [http://www.alcoa.com/sustainability/en/info\\_page/products\\_design\\_lifecycle.asp](http://www.alcoa.com/sustainability/en/info_page/products_design_lifecycle.asp), son erişim tarihi: 12.06.2015.
- Alüminyum Raporu. 2006. TMMOB Metalürji Mühendisleri Odası, 24. Dönem Çalışma Raporu, Ankara.
- Aluminium - Specifications, Properties, Classifications and Classes, Supplier Data by Aalco, <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863#7>, son erişim tarihi: 17.06.201.
- Demirci, K. M. 2012. Dünya Alüminyum Ticaretinde Türkiye'nin Yeri, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalürji Mühendisleri Odası, s.17-29.
- Randviir, E. P., Brownson, D. A. C., Banks, C. E. 2014. "A Decade of Graphene Research: Production, Applications and Outlook," Materials Today, vol. 17, no. 9, p. 426-432.
- Savage, N. 2012. "Materials Science:Super Carbon," Nature, vol. 482, p. 30-31.
- Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S. I. 2012. "Graphene Based Materials: Past, Present and Future," Progress in Materials Science, vol. 56, no. 8, p. 1178-1271.
- Adams, J., Pendlebury, D. 2011. Global Research Report Materials Science and Technology, Thomsons Reuters, UK.
- Kumar, H. G., P., Xavior, M. A. 2014. "Graphene Reinforced Metal Matrix Composite (GRMMC): A Review," Pcedia Engineering, vol. 97, p. 1033-1040.
- Başçı, M. 2015. "Geleceğin Malzemesi Grafen," Bilişim Dergisi, sayı 177, s. 156-165.
- Dhand, V., Rhee, K. Y., Kim, H. J., Jung, D. H. 2013. "A Comprehensive Review of Graphene Nanocomposites: Research Satatus and Trends," Journal of Nanomaterials, vol. 2013, p. 1-14.
- Chen, L. Y., Konishi, H., Fehrenbacher, A., Ma, C., Xu, J. Q., Choi, H., Xu, H. F., Pfeferkorn, F. E., Li, X. C. 2012. "Novel Nanoprocessing Route for Bulk Graphene Nanoplatelets Reinforced Metal Matrix Nanocomposites," Scripta Materialia, vol. 67, p. 29-32.
- Dashwood, R. C., Grimer, R. 2010. Structural Materials: Aluminium and its Alloys-Properties, Encyclopedia of Aerospace Engineering, ISBN: 9780470686652 John Wiley&Sons, USA, p.1-12.
- Porwal, H., Grasso, S., Reece, M. J. 2013. "Review of Graphene-Ceramic Matrix Composites", Advances in Applied Ceramics, vol. 112, no. 8, p. 443-454.
- Tjong, S. C. 2013. "Recent Progress in the Development and Properties of Novel Metal Matrix Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes and Graphene Nanosheets," Materials Science and Engineering, vol. 74, p. 281-350.
- Wang, J., Li, Z., Fan, G., Pan, H., Chen, Z., Zhang, D. 2012. "Reinforcement with Graphene Nanosheets in Aluminium Matrix Composites," Scripta Materialia, vol. 66, p. 594-597.
- Porwal, H., Grasso, S., Reece, M. J. 2013. "Review of Graphene-Ceramic Matrix Composites", Advances in Applied Ceramics, vol. 112, no. 8, p. 443-454.
- Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Asif, M. 2014. "Effect of Graphene Nanoplatelets Addition on Mechanical Properties of Pure Aluminium Using a Semi-Powder Method," Progress in NaturalScience: Materials International, vol. 24, p. 101-108.
- Yan, S. J., Dai, S. L., Zhang, X. Y., Yang, C., Hong, Q. H., Chen, J. Z., Lin, Z. M. 2014. "Investigation Aluminium Alloy Reinforced by Graphene Nanoflakes," Materials Science&Engineering A, vol. 612, p. 440-444.
- Li, J. L., Xiong, Y. C., Wang, X. D., Yan, S. J., Yang, C., He, W. W., Chen, J. Z., Wang, S. Q. 2015. "Microstructure and Tensile Properties of Bulk Nanostructured Aluminum/Graphene Composites Prepared via Cryomilling," Materials Science&Engineering A, vol. 626, p. 400-405.
- Iacob, G., Ghica, V. G., Buzatu, M., Buzatu, T., Petrescu, M. I. 2015. "Studies on Wear Rate and Micro-Hardness of the Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Gr Hybrid Composites Produced via Powder Metallurgy," Composites: Part B, vol. 69, p. 603-311.
- Berman, D., Erdemir, A., Sumant, A. V. 2014. "Graphene: a New Emerging Lubricant," Materials Today, vol. 17, no. 1, p. 31-42.
- Zhai, W., Shi, X., Wang, M., Xu, Z., Yao, J., Song, S., Wang, Y. 2014. "Grain Refinement: A Mechanism for Graphene Nanoplatelets to Reduce Friction and Wear of Ni<sub>3</sub>Al Matrix Self-Lubricating Composites," Wear, vol. 310, p. 33-40.
- Zhai, W., Shi, X., Yao, J., İbrahim, A. M. M., Xu, Z., Zhu, Q., Xiao, Y., Chen, L., Zhang, Q. 2015. "Investigation of Mechanical and Tribological Behaviors of Multilayer Graphene Reinforced Ni<sub>3</sub>Al Matrix Composites," Composites: Part B, vol. 70, p. 149-155.
- Boostani, A. F., Tahamtan, S., Jiang, Z. Y., Wei, D., Yazdani, S., Khosroshahi, R. A., Mousavian, R. T., Xu, J., Zhang, X., Gong, D. 2015. "Enhanced Tensile Properties of Aluminium Matrix Composites Reinforced with Graphene Encapsulated SiC Nanoparticles," Composites: Part A, vol. 68, p. 155-163.
- Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Asif, M., Hussain, S., Gou, J., Mao, J. 2015. "Improved Strength and Ductility of Magnesium with Addition of Aluminum and Graphene Nanoplatelets (Al+GNPs) using Semi Powder Metallurgy Method," Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol. 23, p. 243-250.
- Kvetkova, L., Duszova, A., Hvizdos, P., Dusza, J., Kunb, P., Balazsib, C. 2012. "Fracture Toughness and Toughening Mechanisms in Graphene Platelet Reinforced Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composites," Scripta Materialia, vol. 66, p. 793-796.