

# Karbon Esaslı Malzeme Takviyeli Titanyum Kompozitler ve Grafen Üzerine Yeni Eğilimler

Mevlüt Gürbüz<sup>\*1</sup>, Tuğba Mutuk<sup>2</sup>

## ÖZ

Bu derlemede karbon siyahı, grafit, karbon nanotüp ve grafen takviyeli titanyum matrisli kompozit üretimi üzerine yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Özellikle grafen takviyesinin önemi vurgulanmış ve gelecekte titanyum kompozitler için yeni eğilimlerin ne olacağı ortaya konulmuştur. Ayrıca, yapılan takviyelerin kompozit mekaniği üzerine olan etkileri mukavemet artırıcı mekanizmalarla açıklanmıştır. Karbon esaslı malzemelerden biri olan grafen bir atom kalınlığında olup, ilk kez 2004 yılında sentezlenmiş ve 2008 yılından itibaren metal matrisli kompozit üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Son yıllarda titanyum matrisli kompozit üretiminde de tercih edilmektedir. Grafen ve diğer karbon esaslı takviye malzemeleri kıyaslandığında, grafen takviyesi ile daha yüksek sertlik, akma ve çekme dayanımı elde edilmiştir. Literatürde grafen miktarının, sinterleme sıcaklığı ve zamanının, toz metalürjisi süreçlerinin ve ikincil işlemlerin kompozitin mekanik özelliklerine etkisi yeterince ortaya konulmamıştır. Bu durum titanyum esaslı malzemelerde grafen kullanımına yakın gelecekte de devam edileceğini göstermektedir. Bu nedenlerle, özellikle grafen takviyeli yeni nesil titanyum kompozitler sahip olduğu hafiflik, yüksek mukavemet, yüksek aşınma ve korozyon dayanımından dolayı yakın gelecekte implant, otomotiv, savunma sanayi, havacılık ve uzay uygulamalarında kullanım alanı bulacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Grafen, karbon, kompozit, mekanik, titanyum

## Carbon Based Material Reinforced Titanium Composites and New Trends on Graphene

### ABSTRACT

In this review, the studies on titanium matrix composites reinforced with carbon black, graphite, carbon nanotube and graphene are summarized. Especially, the importance of graphene reinforcement has been emphasized, and new trends for titanium composites will be addressed in the future. Furthermore, the effects of the reinforcements on the composite mechanics are explained by strengthening mechanisms. Graphene is one of the carbon-based materials which has one atomic thickness. It was first synthesized in 2004 and started to be used in metal matrix composite fabrication from 2008. Graphene is also preferred in the production of titanium matrix composite in recent years. When graphene is compared with other carbon based reinforcing materials, titanium composites with graphene addition have high hardness, high corrosion resistance, greater yield and tensile strength. In the literature, the effect of the amount of graphene, sintering temperature and time, processes of powder metallurgy method and secondary processes on the mechanical properties of the titanium composites have not been sufficiently revealed. Therefore, the use of graphene in titanium based materials will continue to be used in the near future. Because of these considerations, new generation titanium composites, especially with graphene additives, will be used in implant, automotive, defense industry, aerospace and space applications in the near future due to their lightness, high strength, high wear and corrosion resistance.

**Keywords:** Carbon, composite, graphene, mechanic, titanium

\* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 20.11.2017

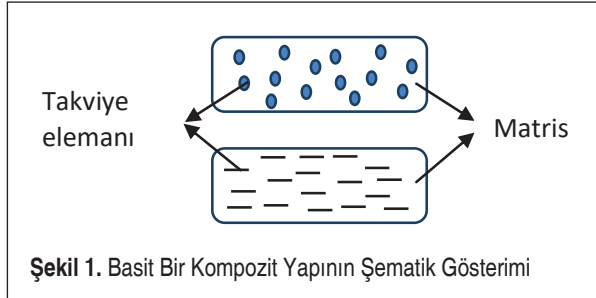
Kabul/Accepted : 21.12.2018

<sup>1</sup> Doç. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü - mgurbuz@omu.edu.tr

<sup>2</sup> Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü - tugba.isitan@omu.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Günümüzde mühendislik uygulamalarında yeni malzemelere olan ihtiyaç, malzeme bilimi, enerji, iletişim, ulaşım, savunma ve uzay teknolojileri gibi birçok ana sanayi kollarında yeni atılımlar yapılması ihtiyacını doğurmuştur. Bu durum üstün özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretilmesinin de temel nedenini oluşturmaktadır. Kompozit malzemeler geniş uygulama alanlarında kullanılmasından dolayı son zamanlarda kompozit üretimi büyük önem kazanmıştır [1]. Kompozit malzeme, birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelmesiyle elde edilen yeni bir malzeme grubudur. Bileşimindeki malzemelerin tek başına gösteremeyeceği çoğu özelliği gösterebilen ve uygulama için daha uygun olan malzemelerdir. Genel olarak kompozitler, yüksek dayanım ve rijitlik gösteren bir malzemenin başka bir ana malzeme tarafından çevrelenmesi sonucu elde edilen malzemeler olarak da tanımlanabilir. Şekil 1’de şematik olarak gösterilen kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak fiber ya da partikül (parçacık) malzeme kullanılmakta, bu takviye malzemesinin çevresinde de matris malzemesi bulunmaktadır. Takviye malzemesi kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini oluştururken, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da takviye malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü takviyeler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Matris malzemesine göre kompozitler; polimer, metal ve seramik matrisli kompozitler olarak sınıflandırılmaktadır [2].



Metal matrisli kompozitler (MMK) yüksek ergime sıcaklığına ve yüksek mekanik özelliğe sahip takviye malzemeleri ile güçlendirildiklerinde diğer kompozitlere göre yüksek sıcaklıklarda bile yüksek korozyon direnci ve fiziksel kararlılık göstermektedir. MMK’larda matris malzemesi seçerken tokluk, süneklik, mukavemet gibi özellikler göz önünde bulundurulmalıdır. MMK uygulamalarında Al, Fe, Cu, Mg, Pb, Ti, Mo ve Ni gibi metaller ile bunların alaşımları matris malzemesi olarak kullanılmaktadır [2]. Kompozit malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesinde takviye elemanının etkisi oldukça büyüktür. Takviye malzemesi seçilirken üretilecek malzemenin kullanım



alanına göre, yüksek elastik modülü, yüksek mukavemet ve düşük yoğunluğa sahip takviye malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Takviye malzemesi sürekli fiber, partikül ve kırpıntı şeklinde seramik ya da karbon esaslı malzeme olmaktadır. Genelde takviye malzemesi olarak kullanılan seramik malzemeler; oksitler ( $Al_2O_3$ -Alümina,  $SiO_2$ - Silika), nitrürler ( $S_3N_4$ -Silisyum nitrür,  $AlN$ -Alüminyum nitrür) ve karbürlerdir ( $SiC$ - Silisyum karbür,  $TiC$ - Titanyum karbür). Bunlara ek olarak karbon esaslı grafit, karbon nanotüp ve grafen de son yıllarda seramiklere alternatif takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır [2-3].

Titanyum (Ti) ve alaşımları, MMK'larda matris malzemesi olarak yaygın kullanım alanına sahiptir. Ti'nin korozyona karşı dayanımı çok iyi olup, yüksek sıcaklık uygulamalarında yüzeyinde ince bir  $TiO_2$  tabakasının oluşması korozyon dayanımı iyileştirmektedir. Ayrıca Ti metali diğer metal matrislere göre daha rijit ve dayanıklıdır. Ti başta biyomalzemeler olmak üzere uçak ve uzay sanayinde de kullanılmaktadır. Bu alanlarda Ti ve Ti kompozitlerin kullanımı maliyetli olmasına rağmen yüksek dayanımı nedeniyle alüminyum alaşımlarıyla rekabet edebilmektedir. Parçacık takviyesi titanyum matrisli kompozit (TMK) malzemelere sertlik, çekme ve aşınma dayanımında iyileşme sağlamasından dolayı yapısal uygulamalarda yaygın kullanım alanı sunmaktadır [4].

Günümüzde karbon esaslı takviye malzemeleri olarak daha çok karbon siyahı, grafit ve karbon nanotüp kullanılmakta olup son yıllarda grafen tercih edilmeye başlanmıştır. Yapısındaki güçlü karbon bağları grafene yeryüzündeki bilinen en sağlam malzemelerden biri olma özelliğini kazandırmıştır. Grafen metal matris içerisinde kullanıldığında sahip olduğu katı yağlayıcı özelliği nedeniyle kompozit malzemeye düşük sürtünme ve yüksek aşınma dayanımı kazandırmaktadır. Grafen bütün grafit esaslı formların kaynağıdır. İki boyutlu malzeme altı adet karbon halkalarının biraraya gelmesiyle oluşan nano-karbon tabakalarıdır. Grafen karbon nanotüp ve fullerenden oldukça farklı olup sıradışı özelliklere sahiptir. Grafen esnek, sağlam, süper ince ve hafif bir malzeme olup günümüzdeki bilimsel araştırmalarda önemli yer almaktadır. Grafen nano tabakalar halinde matris malzemelere takviye edildiğinde mekanik özelliklerin iyileştirdiği tespit edilmiştir [5-6].

Bu çalışmada, karbon esaslı takviye malzemeleri arasında özellikle grafenin Ti matris içerisinde takviye olarak kullanımının önemine değinilmiş ve gelecekte Ti kompozitler için yeni eğilimlerin neler olabileceği ortaya konulmuştur. Bu alanda son yıllarda yapılmış olan yayınlar değerlendirilerek Ti kompozitlerin üretim metotları, üretim aşamaları ve üretim sonrası mekanik test sonuçları detaylı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca yapılan takviyenin neden kompozit mukavemetine olumlu etki yaptığı mukavemet artırıcı mekanizmalarla açıklanmıştır.

## 2. MATRİS MALZEMESİ OLARAK TİTANYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ

Ti 1791’de keşfedilmiş olmasına karşın ilk yüksek saflıkta Ti üretimi 1910 yılında gerçekleştirilmiştir. Yeryüzünde en çok bulunan dokuzuncu element olup Al, Fe ve Mg’den sonra dördüncü metaldir. Buna rağmen oksijen, hidrojen, azota karşı çok tepkin olduğundan saf Ti elde edilmesi oldukça maliyetlidir. Ti ve alaşımları üstün mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri nedeni ile otomotiv sektöründe, kimya/ petrokimya endüstrisinde, askeri/sivil havacılık alanında ve biyomalzeme sektöründe geniş kullanıma sahiptir. Ti’nin üstün mekanik özellikleri ve korozyon dayanımının yanı sıra yüksek sıcaklık dayanımı, düşük yoğunluğu ve yüksek biyoyoumluluğu da bulunmaktadır [7-8].

Saf Ti’nin ve alaşımının özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Görüldüğü üzere saf Ti’nin akma ve çekme dayanımı sırasıyla yaklaşık 140 MPa, 235 MPa iken Ti alaşımının (Ti6Al4V) akma ve çekme dayanımı 800-1100 MPa, 900-1200 MPa arasındadır. Saf Ti’nin sertliği 120-280 HV arasında iken, Ti alaşımının sertliği 300-400 HV arasındadır. Saf Ti’nin elastik modülü yaklaşık 100-145 GPa arasında olup alaşım halindeki Ti’nin elastik modülü ise 100-140 GPa arasındadır [9].

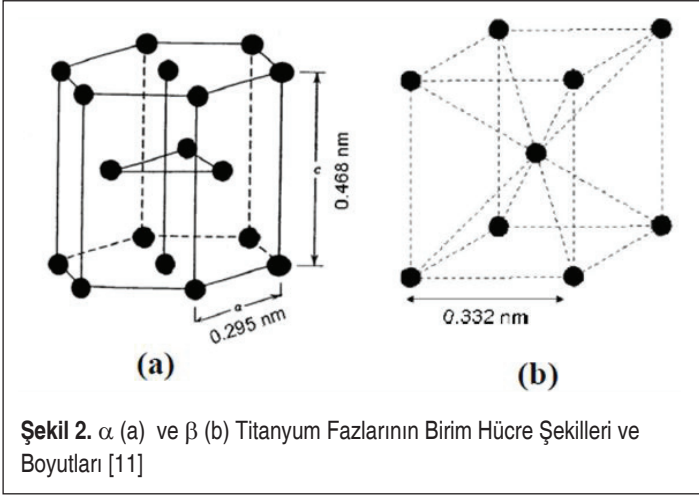
Ti yüksek ergime noktasına sahip olup (1668 °C), 882 °C’de allotropik faz dönüşümü meydana gelmektedir. Oda sıcaklığından 882 °C’ye kadar hegzagonal sıkı paket (HCP) birim hücre yapısına sahip olan  $\alpha$ -Ti, bu sıcaklıkta yüzey merkezli kübik (BCC) yapıdaki  $\beta$ -Ti fazına dönüşmektedir. Şekil 2’de verilen birim hücre boyutla-

**Tablo 1.** Saf Ti ve Ti6Al4V Alaşımının Özellikleri [9-10]

Saf Ti ve Alaşımı	Saf Ti	Ti6Al4V
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	4,51	4,43
Ergime Sıcaklığı (°C)	1675	1630-1650
Dönüşüm Sıcaklığı (°C)	882	985
Elastik Modül (GPa)	100-145	110-140
Akma Dayanımı (MPa)	140	800-1100
Çekme Dayanımı (MPa)	235	900-1200
Kesit Alan Daralması (%)	30	36
Yorulma Dayanımı (MPa)	250	240
Kırılma Tokluğu (MPa $\sqrt{m}$ )	99-140	75
Kayma Modülü (GPa)	40	44
Sertlik (Vickers)	120-280	300-400
Sertlik (Brinell)	265	334
Isıl iletkenlik (W/mK)	17,2	6,7



rı göz önüne alındığında  $\beta$ -Ti birim hücre hacmi  $0,0366 \text{ nm}^3$  iken  $\alpha$ -Ti birim hücre hacmi  $0,10581 \text{ nm}^3$  olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla  $\beta$  fazından  $\alpha$  fazına soğutma sırasında hacim artışı meydana gelir. Ticari saflıkta Cp olarak adlandırılan Ti saflığına göre derecelendirilir. Bu tür Ti tozlar Cp-Ti olarak kodlanır ve  $\alpha$ -Ti olarak da adlandırılır. Alfa ( $\alpha$ ) fazındaki Ti yumuşak ve şekil verilebilir olup,  $\beta$  fazında sert, dayanıklı ve şekil verilebilirliği zordur [9-10].

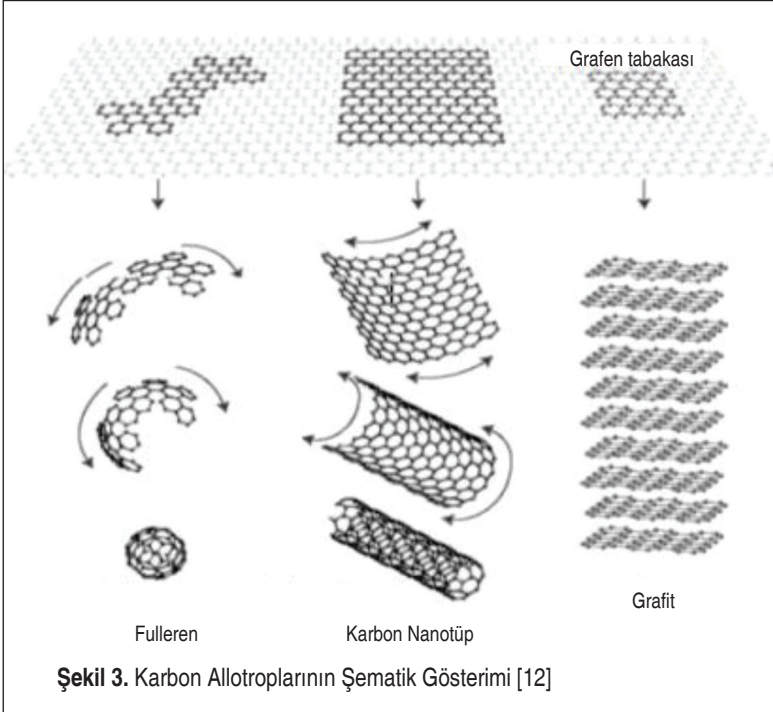


Ti ve alaşımlarının ısı etkileriyle oksitlenmesi iki şekilde gerçekleşmektedir. İlk olarak oksit tabakasının oluşumu ve oksijenin iç bölgelere doğru difüzyonu ile gerçekleşir. Ti malzemesinin yüzeyindeki oksit tabakası temel olarak  $\text{TiO}_2$  içerir ve difüzyon için bir bariyer oluşturmaktadır. Bu da Ti'ye korozyon direnci ve biyoyoumluluk kazandırmaktadır [11].

### 3. KARBON ESASLI TAKVİYE MALZEMELERİ

Periyodik tablodaki en önemli elementlerden biri de karbondur (C). Karbonun grafit (kurşun kalem, katı yağlayıcılar vb) ve elmas gibi gündelik hayattan çok iyi bilinen allotroplarının yanında nanotüp ve fulleren gibi yeni sentezlenen formları da mevcuttur. C atomunun elektronik olarak hibritleşmesi  $sp$ ,  $sp^2$  ve  $sp^3$  şeklinde kovalent bağ yapmasını sağlamaktadır. Bal peteği kristal yapısında  $sp^2$  melezleşmesi yapan; grafitin, nanotüpün ve  $\text{C}_{60}$ 'ın ana yapısını oluşturan grafen ise ancak 2004 yılında sentezlenilmiştir. Şekil 3'te C allotropları verilmiş olup Tablo 2'de tek tabakalı grafenin yüzey alanı ve termal iletkenliği gibi önemli özellikleri verilmiştir. Ayrıca grafen bütün grafit esaslı formların kaynağıdır. Bu iki boyutlu malzeme altı adet karbon halkalarının bir araya gelmesiyle oluşan nanokarbon tabakalarıdır. Grafen, karbon nanotüp ve fullerenlerden oldukça farklı sıradışı özelliklere sahiptir. Grafen yapısında C-C bağ uzaklığı

yaklaşık olarak  $1.42 \text{ \AA}$  iken grafen tabakalarının üst üste gelmesi ile meydana gelen grafitte iki grafen tabakası arasındaki mesafe yaklaşık  $3.35 \text{ \AA}$ 'dur. Grafendeki güçlü C bağları ona yeryüzündeki bilinen en sağlam malzemelerden biri olma özelliğini kazandırmıştır. Bununla birlikte grafitteki grafen katmanları arasındaki bağlar oldukça zayıftır. Kurşun kalem kâğıda sürtüldüğünde bu zayıf bağlar kırılmakta ve kâğıda yayılan grafen ve grafit tabakalar yazı izlerini oluşturmaktadır [12].

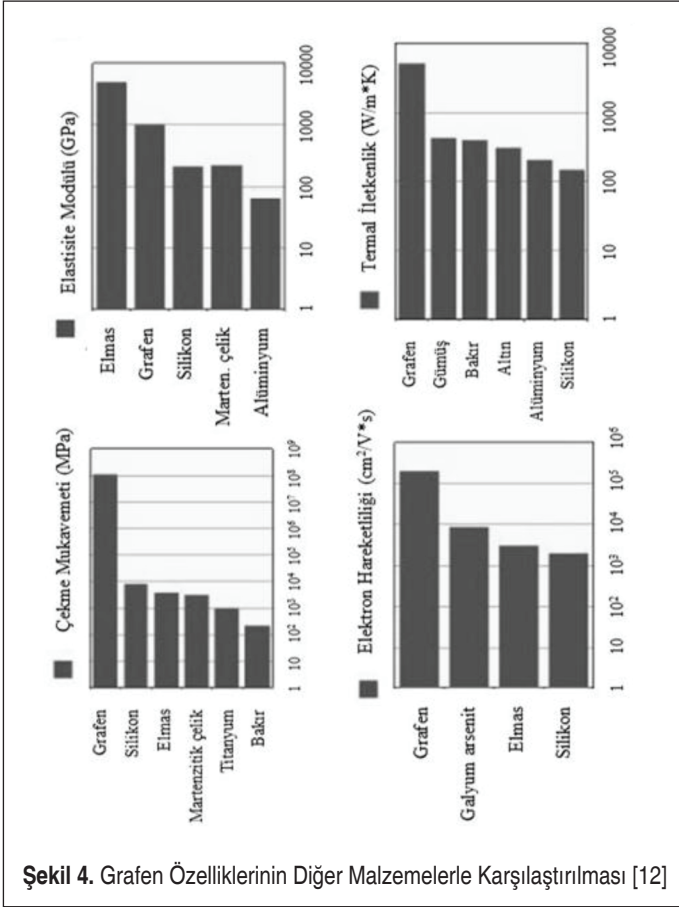


**Tablo 2.** Grafenin Genel Özellikleri [12]

Grafen Özellikleri	Açıklama
Hibrit şekli	$sp^2$
Tabaka sayısı	Tek tabakalı
Kristal yapısı	Hegzagonal
Gerçek yoğunluk ( $g/cm^3$ )	2,25
Termal iletkenliği (W/mK)	4.840-5.300
Elektron hareketliliği $cm^2/(V.s)$	$\sim 2,5 \times 10^5$
Elastisite modülü (TPa)	$\sim 1$



Karbon atomlarının iki boyutlu altıgen bir yapıda dizilmiş bu formu, doğada iki boyutlu tek malzeme örneğini oluşturmasının yanı sıra grafene olağanüstü özellikler de kazandırmaktadır. Elektronlar bu tek atom kalınlığındaki C tabakası içerisinde oldukça hızlı hareket etmektedir. Grafenin elektrik ve ısıl iletkenliğinin yüksek olmasının yanı sıra Şekil 4'te görüldüğü üzere birçok metal ve çelikten çok daha yüksek mekanik özelliğe sahiptir [12].



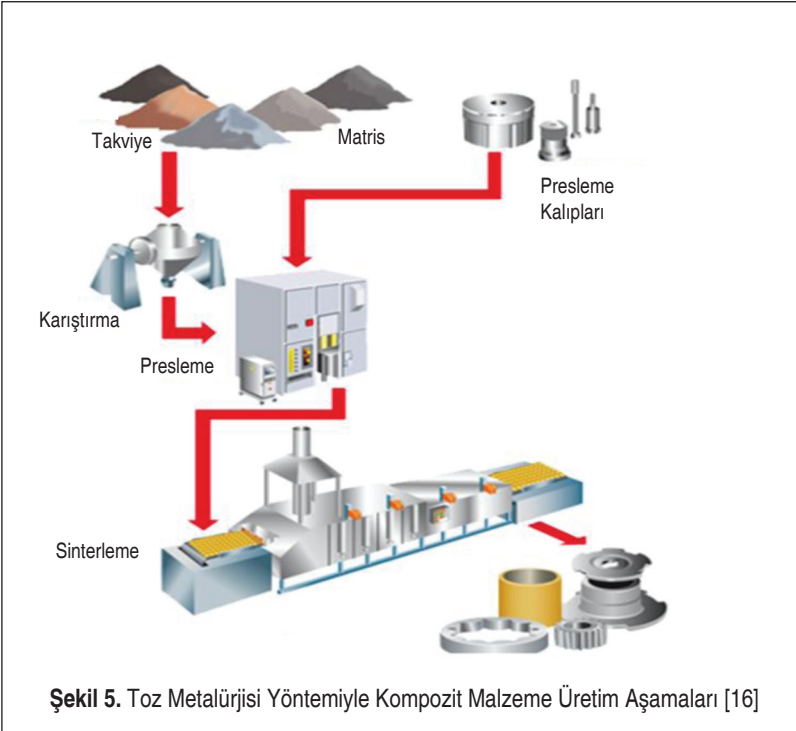
## 4. KARBON ESASLI MALZEME TAKVİYELİ TİTANYUM KOMPOZİTERİN ÜRETİMİ VE YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 4.1 Karbon Esaslı Malzeme Takviyeli Titanyum Kompozitlerin Üretimi

Malzemeler kendine özgü fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahiptir. Bu nedenle malzemeye son şeklini vermek için uygun üretim tekniğinin seçimi oldukça

önemlidir. Üretim şeklinin başarılı olabilmesi için sistemin güvenilir, verimli ve maliyet açısından uygun olması gerekir. Metal matrisli bir kompozit malzemenin üretim tekniği; üretilecek parçanın şekline, istenilen mekanik ve fiziksel özelliklerine, matrisin özelliklerine, takviye elemanının şekline, türüne, boyut ve dağılımına göre belirlenmektedir. Her üretim yönteminin kendine özgü avantajları ve dezavantajları mevcut olup, üretim yöntemleri kendi aralarında genel olarak katı ve sıvı faz üretim yöntemleri olarak sınıflandırılabilir [13].

Karbon esaslı metal matrisli kompozitlerin üretiminde de en çok kullanılan yöntem toz metalürjisi üretim (TM) tekniğidir. Bu yöntem, seri üretime oldukça uygun olup elde edilmek istenen şekle oldukça yakın ürünler üretebilir. Bu yöntemle toz halindeki matris ve takviye elemanları birlikte değirmen ve karıştırıcı vasıtasıyla karıştırılarak, istenilen şekli oluşturmak için kalıpta yük uygulanarak şekillendirilir. Şekillendirme sonrası gözenegın azalması, yoğunluğun artması ve yüksek mekanik özelliklere sahip olmak için sinterleme işlemi uygulanır. Sinterleme sonrasında ikincil işlemler (haddeleme, parlatma, dövme vb) gerek malzemeye son şekli vermek gerekse mukavemeti artırmak için gerekli olabilir (Şekil 5) [14-16].







## 4.2 Karbon Esaslı Malzeme Takviyeli Titanyum Kompozitler Üzerine Yapılan Çalışmalar

Karbon esaslı malzemelerin MMK'larda takviye elemanı olarak kullanım alanı çok geniş olup, bu alanlarda birçok bilimsel çalışma yürütülmektedir. Özellikle Alüminyum (Al) ve Magnezyum (Mg) ve bakır (Cu) matrisli kompozitler üzerine çalışmalar oldukça yaygındır. Dasari vd [17] tarafından yapılan çalışmada, grafen oksit (GO) katkılı Al metal matrisli kompozit toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Al tozu içine ağırlıkça %0,05, %0,1 ve %0,2 oranlarında grafen oksit katkısı yapılmıştır. GO katkısı kompozitin mikrosertlik değerlerini ağırlıkça %0,05 grafen katkısı için %16, %0,1 grafen katkısı için %23 ve %0,2 grafen katkısı için %29 oranında artırmıştır. Yapılan diğer bir çalışmada Yang vd [18] grafen katkılı alüminyum metal matris kompozit malzemeyi döküm yöntemiyle üretmiştir. Malzemenin akma ve çekme dayanımında sırasıyla %116 ve %45 değerlerinde artış görülmüştür. Al kompozit üretimi üzerine yapılan diğer bir çalışmada Gürbüz vd [19] kompozitin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için toz metalürjisi tekniğiyle grafen katkılı Al metal matrisli kompozit üretilmiştir. Grafen ağırlıkça %0,1, %0,3, %0,5 oranlarında kompozite katkılanmıştır. %0,1 grafen katkısı kompozitin sertlik değerini 38'den 57 HV'ye yükseltmiştir. Sinterleme sıcaklığı ve süresi üzerine yapılan bu çalışmada en iyi değerlerin 630 °C 180 dakika çalışma süresinde elde edildiği görülmüştür.

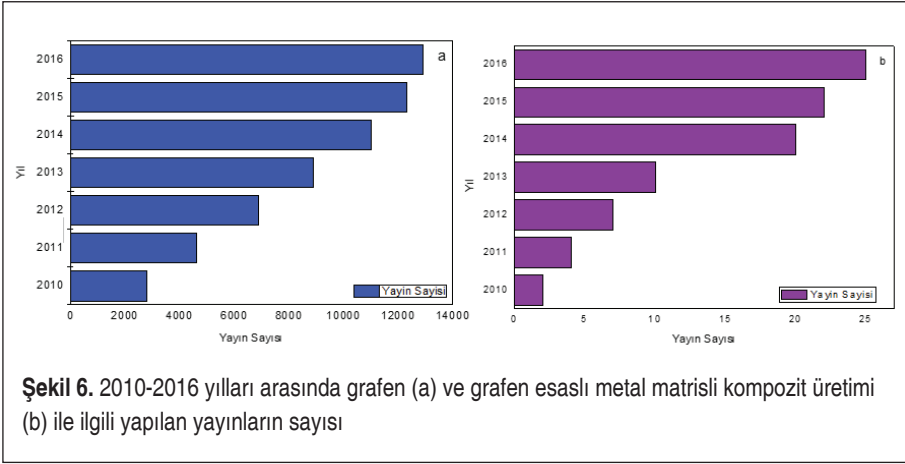
Grafen takviyeli MMK'lardan biri de magnezyum (Mg) kompozitlerdir. Bunun üzerine yapılan bir çalışmada [20] %10 titanyum, ve %0,18 grafen tozu Mg matrisli kompozite katkılanarak toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Grafen katkısının kompozit yoğunluğunu 1,17 g/cm<sup>3</sup>'ten 1,84 g/cm<sup>3</sup>'e, akma dayanımını 131 MPa'dan 160 MPa'ya, çekme dayanımını da 163 MPa'dan 230 MPa'ya yükselttiği görülmüştür. Rashad vd [21] tarafından yapılan diğer bir çalışmada, ağırlıkça % 0,3 oranında grafen katkılanarak kompozit malzeme üretilmiştir. Mikroyapı ve mekanik testler üretilen kompozit malzemelere uygulandığında grafen katkısı sayesinde Mg'nin özelliklerinde iyileşmeler görülmüştür. Elastik modülü (13,2 GPa'dan 14,6 GPa'ya) ve akma dayanımı (187 MPa'dan 197 MPa'ya) değerlerinde artış görülmüştür. Rashad vd [22] Mg tozu içerisine ağırlıkça %1 Al, %1 Sn ve %0,18 grafen tozu katkılanarak yarı toz metalürjisi yöntemiyle kompozit malzemeler üretmiştir. Sonuçlara göre, akma dayanımı 161 MPa'dan 208 MPa'ya ve çekme dayanımı 236 MPa'dan 269 MPa'ya yükselmiştir. Turan vd [23] tarafından yapılan çalışmada, grafen (ağırlıkça %0,1, %0,25 ve %0,5) farklı oranlarda Mg kompozite katkılanıp toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Grafen katkısı saf Mg'nin sertlik değerini 40,2HV'den 48,5HV'ye artırmıştır. Çalışmada aşınma miktarında grafen katkısının artması ile azalış görülmüştür.

Grafenin kullanıldığı metal matrislerden biri de bakırdır (Cu). Xiong vd yapmış olduğu çalışmada saf Cu'nun çekme dayanımı 218 MPa iken artan grafen ile bu değer 378 MPa olmuştur [24]. Jiang vd toz metalürjisi yöntemi ile ağırlıkça %0,3 grafen

takviyesi için Cu matrisli kompozitin akma dayanımını 95 MPa'dan 172 MPa'ya artırmıştır. Basma dayanımı ise 120 MPa'dan 228 MPa'ya artış göstermiştir [25]. Yue vd farklı grafen miktarının Cu kompozitler üzerine olan etkisini incelemiştir. Maksimum çekme dayanımının 185 MPa'dan 210 MPa'ya kadar arttığı ağırlıkça % 0,3 grafen takviyesi için elde edilmiştir. Sertlik değeri ise 43 HV'den 52 HV'ye artış göstermiştir [26].

Karbon esaslı malzeme takviyeli kompozitler üzerine yapılan çalışmaların çoğu Al, Mg ve Cu matrisli kompozitler üzerine yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte, Ti matrisli karbon esaslı malzeme takviyeli kompozitler üzerine yapılan araştırmalar ise oldukça az sayıdadır. Ti ve alaşımları kompozit malzeme üretiminde matris olarak kullanıldığında takviye elemanı ile iyi bir arayüz sağlamaktadır. Ayrıca Ti'nin korozyona karşı dayanımı yüzeyinde ince bir TiO<sub>2</sub> tabakası oluşmasından dolayı yüksektir. Sahip olduğu biyouyumluluğu sayesinde vücut içine konan implantlarda Ti ve alaşımları kullanılmaktadır. Fakat bu malzemelerden günümüz uygulamalarında daha yüksek aşınma dayanımı, yüksek sertlik, yüksek akma ve çekme dayanımı istenmektedir. Bu özellikleri sağlamak için alaşımlamanın yanı sıra kompozit formunda üretim yapmak oldukça önemlidir. Son yıllarda kompozit malzeme üretiminde matris olarak Ti tercih edilmesine ek olarak, takviye malzemesi olarak karbon esaslı grafit, karbon siyahı, karbon nanotüp ve grafen tercih edilmektedir. Özellikle kompozit üretiminde grafen kullanımı sahip olduğu üstün özelliklerinden dolayı son yılların dikkat çekici araştırma konularından biri olmuştur.

Web of Science veri tabanında yapılan araştırmaya göre grafen 2004 yılında sentezlenmiş olmasına rağmen grafen ile ilgili yapılan kompozit çalışmaları genelde 2008 yılından sonra artmaya başlamıştır. Şekil 6a'da görüldüğü üzere, 2010-2016 yılları arasında grafen üzerine yapılan çalışmalar giderek artış göstermiştir. Grafen elektronik, bilgisayar, savunma, enerji, biyoloji, sağlık ve bunların mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Son yıllarda ise grafenin kompozit malzemelerde kullanımına yönelik olarak yenilikçi çalışmalar bulunmaktadır. Bu alanda yayımlanmış bilimsel çalışmalarda, grafenin metal matris yapı içerisinde kullanımı kompozitin mekanik ve mikroyapı özelliklerini olumlu yönde iyileştirdiği tespit edilmiştir. Metal matris (Al, Mg, Ti) ve alaşımlarının matris olarak kullanıldığı ve grafenin takviye edildiği kompozitler ile ilgili 2010-2016 yılları arasında Web of Science veri tabanına göre yapılan çalışmaların sayısı Şekil 6b'de verilmiştir. Görüldüğü üzere, özellikle son yıllarda grafen kullanımı çok dikkat çekici bir konu haline gelmiştir. 2016 yılında yapılmış olan yayın sayısının artması özellikle grafenin hâlâ özgün bir malzeme olduğu ve gelecekte Ti esaslı kompozit üretiminde de kullanımının artacağını desteklemektedir. Üretilen bu yeni nesil Ti kompozitler yakın zamanda daha önce belirtilen uygulamalarda kullanım alanı bulacaktır. Grafenin sahip olduğu katı yağlayıcı özelliği, biyolojik olarak vücudu olumsuz etkilememesi, yüksek mekanik özelliğe sahip



olması gibi nedenler üretilen malzemelere hafiflik, yüksek mukavemet ve biyoyumluluk gibi avantajlar sağlamaktadır.

Son yıllarda Ti ve alaşımlarına karbon esaslı malzeme takviyesiyle kompozit üretimi üzerine yapılan araştırmalar Tablo 3'te özetlenmiştir. Tabloda görüldüğü üzere saf Ti yaklaşık akma dayanımı 140 MPa iken çekme dayanımı 235 MPa ve sertliği ise 120-280 HV arasındadır. Ti alaşımı (Ti6Al4V) ise 800-1100 MPa arası akma dayanımına sahip olup, çekme dayanımı 900-1200 MPa arasındadır. Sertlik değeri ise 300-400 HV arasında belirlenmiştir. Tablodan görüldüğü üzere Ti ve alaşımından beklenen yüksek mekanik özellik talebi yeni malzemelerin geliştirilmesi için itici güç olmuştur. Tabloda yıllara göre verildiği üzere C türevi malzemeler Ti esaslı kompozitlerin üretiminde tercih edilmektedir. 2008-2010 yılları arasında daha çok karbon siyahı ve karbon nanotüp kullanımı tercih edilmiştir. Karbon siyahı kullanımı ile yapıda titanyum karbür fazı (TiC) elde edilerek özellikle akma ve çekme dayanımında ciddi artış meydana gelmiştir [27-29]. 2010-2015 arasında ise karbon nanotüp ve grafit üzerine çalışmalar yapılmış olup, özellikle karbon nanotüp ve grafit kullanıldığında akma dayanımı 500 MPa'nın üzerine, çekme dayanımı ise yaklaşık 700 MPa'nın üzerine artış göstermiştir [29-31]. 2015 yılından sonra ise sentezlenmesi yeni gerçekleştirilen çok katmanlı grafen yeni takviye elemanı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Gerek saf Ti gerekse alaşımı için yapılan çalışma sayısı oldukça azdır. Toz metalürjisinin yanında haddeleme, dövme ve lazerle sinterleme gibi işlemler de üretilen kompozitlerin özelliklerini iyileştirmiştir. Özellikle lazerle üretilen grafen takviyeli kompozitlerde gerek saf Ti'nin gerekse alaşımından yaklaşık dört kat daha yüksek sertlik değeri elde edilmiştir. Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalar grafen takviyesinin diğer karbon türevi malzemelere göre çok daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Grafen takviyeli saf Ti'de akma dayanımı 817 MPa'ya kadar artış gösterirken çekme dayanımı 887 MPa olarak raporlanmıştır. Grafen takviyeli Ti alaşımında ise bu

**Tablo 3.** Karbon Esaslı Malzeme Takviyeli Ti Matrisli Kompozit Üretimi İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Malzeme	Malzeme Üretim Yöntemi	Sertlik (HV)	Akma Dayanımı (MPa)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Yayın Yılı	Ref.
Takviyesiz Ti	TM	120-280	140	235	-	[9-10]
Ti6Al4V	TM	300-400	800-1100	900-1200	-	[9-10]
CNT+Saf Ti	TM+SPS	Gözenekli Ti: 171 Ti/TiC: 204 İnce Ti: 261 İnce Ti/TiC: 285	Gözenekli Ti: 239 Ti/TiC: 367 İnce Ti: 423 İnce Ti/TiC: 592	Gözenekli Ti: 234 Ti/TiC: 490 İnce Ti: 484 İnce Ti/TiC: 658	2008	[27]
CNT+Saf Ti	TM+SPS	Saf Ti: 261 CNT+Ti: 285	Saf Ti: 472 CNT+Ti: 697	Saf Ti: 591 CNT+Ti: 754	2009	[28]
CS+Saf Ti	TM+SPS	Gözenekli Ti: 171 Ti/TiC: 228 İnce Ti: 261 İnce Ti/TiC: 340	Gözenekli Ti: 247 Ti/TiC: 317 İnce Ti: 453 İnce Ti/TiC: 744	Gözenekli Ti: 412 Ti/TiC: 479 İnce Ti: 647 İnce Ti/TiC: 878	2009	[29]
CNT+GFT+Saf Ti	TM+Ekstrüzyon	-	Saf Ti: 386 CNT+Ti: 542 GNF+Ti: 505	Saf Ti: 625 CNT+Ti: 696 GNF+Ti: 725	2013	[30]
Gr+10Ti+Mg	TM+Sıcak ekstrüzyon	-	Mg: 131 Mg-10Ti: 141 Mg-(10Ti-0.18GNPs): 160	Mg: 163 Mg-10Ti: 212 Mg-(10Ti-0.18GNPs): 230	2013	[36]
CNT+Saf Ti	TM+SPS	Saf Ti: 150 CNT+Ti: 230	-	*Basma dayanımı Saf Ti: 685 CNT+Ti: 1106	2015	[31]
Gr+Saf Ti	TM+SPS	Saf Ti: 8,98 GPa Gr+Ti: 15,39GPa	Saf Ti: 473 Gr+Ti: 918	-	2016	[39]
Gr+Ti	TM+Lazer sinterleme	Saf Ti: 200 Gr+Ti: 742	-	-	2016	[37]
Gr+Ti	TM+Sıcak pres	-	-	Saf Ti: 385 Gr+Ti: 750	2017	[38]
Gr+Saf Ti	TM+SPS+ Sıcak Hadde	-	Saf Ti: 520 Gr+Ti: 817	Saf Ti: 575 Gr+Ti: 887	2017	[32]
Gr+ Ti6Al4V	TM+HIP+Dövme	-	Ti6Al4V: 850 Gr+ Ti6Al4V: 817	Ti6Al4V: 942 Gr+Ti6Al4V: 1021	2017	[33]
Gr+Saf Ti	TM	Saf Ti: 390 Gr+Ti: 566	-	-	2018	[40]
Gr+TiAl	Alaşımlama	-	TiAl: 900 Gr+TiAl: 1050	TiAl: 1700 Gr+TiAl: 2250	2018	[41]
Gr+Ti	TM	Saf Ti: 370 Gr+Ti: 435	Saf Ti: 927 Gr+Ti: 1122	Saf Ti: 1172 Gr+Ti: 1345	2018	[42]

TM: Toz metalurjisi, SPS: Spark plazma sinterleme, CNT: Karbon nanotüp, CS: Karbon siyahı, GFT: Grafit, Gr: Çok katmanlı grafen



değerler katkısız alaşımda verilen sınırlar arasında olmaktadır [32-35]. Günümüzde yapılan çalışmalara bakıldığında ise grafen takviyesi ile beraber saf Ti için çekme dayanımının 1300 MPa üzerine alaşım için ise 2000 MPa üzerine çıktığı görülmüştür [41,42]. Sonuç olarak grafen takviyesi diğer karbon türevlerine göre daha yüksek sonuçlar vermektedir. Literatürde detaylı olarak grafen miktarının etkisinin az çalışılmış olması, sinterleme sıcaklığı ve zamanının etkisinin yeterince irdelenmemesi, toz metalürjisi süreçlerinin (toz boyutu, dağılımı, şekli, öğütme vb) etkisinin yeterince çalışılmaması, ikincil işlemlerin (dövme, ekstrüzyon, haddeleme gibi) mekanik özelliklere etkisinin ortaya tam olarak konulmaması grafeni Ti esaslı malzemeler için özgün kılmaktadır.

Yukarıda özetlenen karbon esaslı takviyelerin (özellikle grafenin) mekanik özellikleri artırması takviye elemanı ile güçlendirme (reinforcement filler strengthening), dislokasyon ile güçlendirme (dislocation strengthening), termal uyumsuzluk etkisi (thermal mismatch), küçük tane güçlendirmesi (fine grain strengthening) ve matristen grafene yük transferi (load transfer) gibi mukavemet artırıcı mekanizmalarla açıklanabilir [34, 35-37]. Takviye elemanı ile güçlendirme ana mukavemet artırma mekanizmalarından biridir. Eşitlik 1’de verilen karışım kuralına göre yüksek mekanik özelliğe sahip grafen gibi takviye elemanı kullanıldığında kompozitin akma ve çekme dayanımı artış göstermektedir. Burada  $\sigma_c$ ,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_g$  kompozitin, matris ve takviye malzemesinin gerilmesini ifade etmekte olup,  $V_m$  ve  $V_g$  matris ve takviye fazının kompozit içindeki hacimsel oranını vermektedir [37].

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_g V_g \quad (1)$$

Dislokasyon ile güçlendirmede ise kullanılan takviye fazının hacimce Ti kompozit içinde miktarı arttıkça ve boyutu azaldıkça kompozit içinde dislokasyon yoğunluğu artmaktadır. Özellikle ısıtım işlem sonrası termal kalıntıların gevşemesi de dislokasyon yoğunluğunu artırmaktadır. Eşitlik 2’de verildiği üzere Ti matris ile grafen arasındaki termal genişleme ve elastik modülü farklılığı dislokasyon yoğunluğunu artırmaktadır. Bu da Ti kompozitin mekanik özelliğini iyileştirmektedir. Eşitlikte  $\Delta\rho$  dislokasyon yoğunluğunu,  $\Delta\alpha\Delta T$  termal uyumsuzlukla alakalı olup, N nanopartikül sayısını ve b Burgers vektörünü ifade etmektedir [26]. Dislokasyon yoğunluğu aynı zamanda kompozitin sertliğine de etki etmektedir. Eşitlik 3’te verildiği üzere sertlik dislokasyon yoğunluğunun karekökü ile orantılıdır. Burada H sertliği,  $H^*$ ,  $\alpha$ , G malzeme sabitlerini, b Burgers vektörünü ve  $\rho$  dislokasyon yoğunluğunu ifade etmektedir. Dolayısıyla artan dislokasyon yoğunluğu Ti kompozitin sertliğini de artırmaktadır [37].

$$\Delta\rho = \Delta\alpha\Delta TN_A/b \quad (2)$$

$$H = h\sqrt{Dt} + \alpha Gb\sqrt{\rho} \quad (3)$$

İnce tane güçlendirme mekanizması Hall-Petch güçlendirme mekanizması olarak da

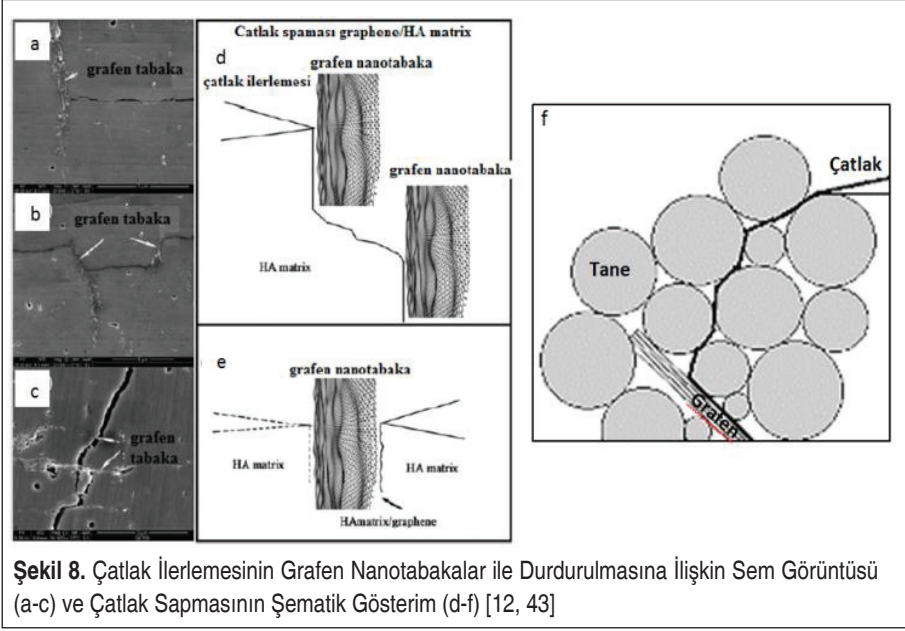
bilinmektedir. Eşitlik 4’te verildiği üzere tane boyutu alakalı bir mekanizmadır. Eşitlikten görüldüğü üzere tane boyutu azaldıkça kompozitin mukavemeti artmaktadır. Şekil 7’de görüldüğü üzere mukavemetin artma nedeni tanelerin takviye elemanı varlığında matris malzemesinin tanelerinin yeniden düzenlenmesi ile alakalıdır. Takviye fazı tane sınırlarına yerleştiğinde ısıtılma işlemi sırasında matris tane büyümesinin önüne geçilmekte böylece hem dislokasyon yoğunluğu artmakta hem de takviye elemanı tane sınırında bariyer gibi davranarak dislokasyon hareketini engellemektedir. Ayrıca tane boyutunun azalmasıyla dislokasyona karşı daha çok tane sınırı oluşmakta, bu tane sınırları dislokasyonu durdurarak mukavemeti artırmaktadır [33, 35, 37].



$$\Delta\sigma_{H-P} = k_y / \sqrt{d} \quad (4)$$

Ti kompozitlerde kontrollü olarak anlık oluşan TiC fazı belli bir miktara kadar Ti ile takviye malzemesi (grafen, karbon nanotüp) arayüzünde güçlü bağlanma sağladığı için kompozit yoğunluğunu artırmakta bu da kompozitin sertlik, tokluk ve aşınma dayanımını iyileştirmektedir. Fakat kompozitin sünekliği ve işlenebilirliği azalmaktadır. Ayrıca grafen gibi karbon esaslı takviyeler ile Ti arasında reaksiyon olacağından takviye fazının yapısının bozulmasına ve mekanik özelliklerin kötüleşmesine neden olmaktadır. Bu da takviye elemanının güçlendirici etkisini zayıflatmaktadır [31, 34].

Yük transferinde ise plastik deformasyon altında yükün önemli bir kısmı grafene aktarılmaktadır. Grafenin mukavemetinin daha yüksek olması nedeniyle plastik deformasyona maruz bırakıldığında Ti kompoziti deforme etmek için daha fazla yüke ihtiyaç vardır. Ayrıca kırık yüzey analizinde plastik deformasyon anında yük yönünde uzamış çukurcuklar oluşmakta ve grafenin bu çukurcukların kenarlarından ayrıldığı tespit edilmiştir. Yükün büyük kısmı bu çukurcuklarda absorbe olmasıyla kompozitin darbeye karşı dayanımı artmakta, yani bu durum malzemenin tokluğunu artırmaktadır. Liu vd tarafından yapılan bir çalışmada, grafen takviye edilmiş hidroksiapatit matrisli kompozit Şekil 8’de görülmektedir. Şekil 8a-c’de görüldüğü üzere, grafen tane sınırlarında yer alarak ve deformasyonla oluşan çatlak ilerlemesi tane sınırlarında görülmektedir. Şekil 8d-f’de görülen çatlak ilerleme esnasında grafen nanotabakalar ile karşılaşmaktadır. Grafenin mekanik özelliği çok yüksek olduğu için çatlak ilerleme enerjisi grafeni deforme edemeyeceğinden çatlak sapma eğilimine girerek



ilerlemesi durdurulmaktadır. Bu da kompozitin mekanik özelliklerini artırmaktadır [13, 43].

## 5. SONUÇ

Bu derlemede karbon esaslı (karbon siyahı, grafit, karbon nanotüp ve grafen) malzeme ilaveli titanyum matrisli kompozitler üzerine yapılan çalışmalar irdelenmiş ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca mukavemet artırıcı mekanizmalarla yapılan takviyelerin kompozit mekaniği üzerine olan olumlu etkileri açıklanmıştır. Yapılan derlemeye göre;

- Takviyesiz titanyumun sertliği, akma dayanımı ve maksimum çekme dayanımı sırasıyla 120 HV, 140 MPa ve 235 MPa olarak bulunmuştur. Fakat son yıllarda grafenin kullanılmasıyla üretilmiş kompozitlerde bu değerler 566, 817 ve 887 MPa'ya kadar artırılmıştır.
- Günümüzde en yaygın kullanılan Ti6Al4V alaşımına da yeni yeni grafen takviyesi yapılmakta olup maksimum çekme dayanımı 1020 MPa'ya kadar artış göstermiştir.
- Son yılların en özgün çalışmalarından biri olan katmanlı mühendislik (üç boyutlu lazer) ile de grafen takviyeli titanyum kompozitler üretilmeye başlanmıştır. Sertliği 200 HV'den 742 HV'ye kadar artırılmıştır.

Sonuç olarak, titanyum esaslı malzemelere grafen takviyesi ile daha yüksek sertlik,

akma ve çekme dayanımı elde edilmiştir. Mevcut TM ile üretilen saf titanyum içeren kompozitlerde grafen kullanımına yönelik çalışmaların sayısı her geçen gün artmaktadır. Fakat bunlarda da sinterleme sıcaklığı/zamanı, toz metalürjisi üretim süreçleri ve ikincil işlemlerin kompozitin mekanik özelliklerine etkileri yeterince ortaya konulmamış olması halen bir eksiklik. Ayrıca katmanlı mühendislik ve titanyum alaşımlarında yapılan çalışmaların çok daha yeni olması bu alanlarda grafen kullanımını özgün kılmaktadır.

## KAYNAKÇA

1. **Korçak M.** 2005. "Seramik Takviyeli Çinko Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Karakterizasyonu," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
2. **Ürkmez, N.** 2004. "AlMg3/SiCp Kompozitlerinin Üretimi ve Mekanik Özelliklerdeki Değişimlerin İncelenmesi," Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
3. **Kurt, H.** 2010. "Alüminyum-Alümina Kompozit Malzeme Üretiminde Karıştırma Tekniğinin Kompozitin Aşınma Davranışı Üzerine Etkilerinin Araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
4. **Eskizeybek, Z.** 2006. "Paslanmaz Çelik Elyaf Takviyeli Alüminyum Kompozitlerde Yorulma Çatlak İlerlemesi," Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
5. **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 Ni3Al Matrix Self-Lubricating Composites," *Wear*, vol. 310, p. 33-40.
6. **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 Ni3Al Matrix Composites," *Composites: Part B*, vol. 70, p. 149-155.
7. **Lutjering, G., Williams, J. C.** 2007. *Titanium, Engineering Materials and Processes*, Springer.
8. **Karaduman, B., Meydanoğlu, O., Kayalı, E. S., Çimenoğlu, H.** 2009. "Production of Titanium Carbide Reinforced Titanium Matrix Composites via Conventional Powder Metallurgy Method," 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye.
9. **Kotan, G.** 2006. "Production and Characterization of Porous Titanium and Ti-6Al-4V Alloy," Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
10. **ASM Metals Handbook**, (8<sup>th</sup> ed.), Atlas of Microstructures of Industrial Alloy, Microstructure of Titanium and Titanium Alloys, 321.
11. **Baril, E., Lefebvre, L. P., Thomas Y.** 2010. "Interstitial Sources and Control in Titanium P/M Processes," European Powder Metallurgy Association Powder Metallurgy Congress.
12. **Şenel, M., Gürbüz, M., Koç, E.** 2015. "Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler," *Mühendis ve Makina*, 669, 36-47.
13. **Ersoy, M.** 2005. "Lif Takviyeli Polimerik Kompozit Malzeme Tasarımı," Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş.





14. **Brian James, W.** ASM Handbook, Powder Metallurgy, Powder Metallurgy Methods and Applications, 7, p. 9-19.
15. **Tunçer, N.** 2011. "Gözenekli Titanyumda Yapı-Özellik İlişkisi," Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
16. AMES Sintered Components Manufacturer, <https://www.ames-sintering.com/basic-manufacturing-process>, son erişim tarihi: 16.11.2017.
17. **Dasari, B. L., Morshed, M., Nouri, J. M., Brabazon, D., Naher, S.** 2018. "Mechanical Properties of Graphene Oxide Reinforced Aluminium Matrix Composites," Composites Part B: Engineering, 145, p. 136-144.
18. **Yang, W., Zhao, Q., Xin, L., Qiao, J., Zou, J., Shao, P., Wu, G.** 2018. "Microstructure and Mechanical Properties of Graphene Nanoplates Reinforced Pure Al Matrix Composites Prepared by Pressure Infiltration Method," Journal of Alloys and Compounds, 732, p. 748-758.
19. **Gürbüz, M., Can Şenel, M., Koç, E.** 2017. "The Effect of Sintering Time, Temperature, and Graphene Addition on the Hardness and Microstructure of Aluminum Composites," Journal of Composite Materials, 52(4) 431-447.
20. **Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Lu, Y., Asif, M., Hussain, S., Mao, J.** 2013. "Effect of Graphene Nanoplatelets (GNPs) Addition on Strength and Ductility of Magnesium-Titanium Alloys," Journal of Magnesium and Alloys, 1(3): p. 242-248.
21. **Rashad, M., Pan, F., Hu, H., Asif, M., Hussain, S., She, J.** 2015. "Enhanced Tensile Properties of Magnesium Composites Reinforced with Graphene Nanoplatelets," Materials Science and Engineering: A, 630: p. 36-44
22. **Pan, F., Asif, M., Tang, A.** 2014. "Powder Metallurgy of Mg-1% Al-1% Sn Rashad Alloy Reinforced with Low Content of Graphene Nanoplatelets (GNPs)," Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 20(6): p. 4250-4255
23. **Turan, M. E., Sun, Y., Akgul, Y., Turen, Y., Ahlatci, H.** 2017. "The Effect of GNPs on Wear and Corrosion Behaviors of Pure Magnesium," Journal of Alloys and Compounds, 724, p. 14-23.
24. **Cao, M., Xiong, D. B., Tan, Z., Ji, G., Amin-Ahmadi, B., Guo, Q., Fan, G., Guo, C., Li, Z., Zhang, D.** 2017. "Aligning Graphene in Bulk Copper: Nacre-inspired Nanolaminated Architecture Coupled with in-situ Processing for Enhanced Mechanical Properties and High Electrical Conductivity," Carbon, 117, p. 65-74.
25. **Jiang, R., Zhou, X., Fang, Q., Liu, Z.** 2016. "Copper-Graphene Bulk Composites with Homogeneous Graphene Dispersion and Enhanced Mechanical Properties," Materials Science & Engineering A 654, p. 124-130.
26. **Gao, X., Yue, H., Guo, E., Zhang, H., Wang, B.** 2016. "Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Graphene Reinforced Copper Matrix Composites," Powder Technology, 301, p. 601-607.
27. **Thotsaphon, T., Katsuyoshi, K., Hisashi, I., Junko, U., Bunshi, F.** 2008. "Microstructures and Mechanical Properties of Powder Metallurgy Pure Ti Composite Reinforced With Carbon Nanotubes," Transaction of JWRI, vol. 37, no.1, p. 57-61.
28. **Kondoh, K., Threrujirapapong, T., Imai, H., Umeda, J., Fugetsu, B.** 2009. "Characteristic of Powder Metallurgy Pure Titanium Matrix Composite Reinforced with Multi-Wall Carbon Nanotubes," Composites Science and Technology, 69, p. 1077-1081.

29. **Threrujirapapong, T., Kondoh, K., Imai, H., Umeda, J., Fugetsu, B.** 2009. "Mechanical Properties of a Titanium Matrix Composite Reinforced with Low Cost Carbon Black via Powder Metallurgy Processing," *Materials Transactions*, 50, 12, p. 2757-2762.
30. **Li, S., Sun, B., Imai, H., Mimoto, T., Kondoh, K.** 2013. "Powder Metallurgy Titanium Metal Matrix Composites Reinforced with Carbon Nanotubes and Graphite," *Composites: Part A*, 48, p. 57-66.
31. **Wang, F. C., Zhang, Z. H., Sun, Y. J., Hu, Z. Y., Wang, H., Korznikova, E., Liu, Z. F.** 2015. "Rapid and Low Temperature Spark Plasma Sintering Synthesis of Novel Carbon Nanotube Reinforced Titanium Matrix Composites," *Carbon*, 95, 396-407.
32. **Mu, X. N., Zhang, H. M., Cai, H. N., Fan, Q. B., Zhang, Z. H., Wu, Y., Fu, Z. J., Yu, D. H.,** 2017. "Microstructure Evolution and Superior Tensile Properties of Low Content Graphene Nanoplatelets Reinforced Pure Ti Matrix Composites," *Materials Science & Engineering A*, 697, 164-174.
33. **Zhen, C., Wang, X., Li, J., Wu, Y., Zhang, H., Guo, J., Wang, S.,** 2017. "Reinforcement with Graphene Nanoflakes in Titanium Matrix Composites," *Journal of Alloys and Compounds*, 696, 498-502.
34. **Munir, K. S., Li, Y., Liang, D., Qian, M., Xu, W., Wen, C.,** 2015. "Effect of Dispersion Method on The Deterioration, Interfacial Interactions and Reagglomeration of Carbon Nanotubes in Titanium Metal Matrix Composites," *Materials & Design*, 88, 138-148.
35. Brush Wellman Inc., 2010. Technical Tidbits, Grain Size and Material Strength, Issue No. 15.
36. **Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Lu, Y., Asif, M., Hussain S., She, J., Gou, J., Mao, J.** 2013. "Effect of Graphene Nanoplatelets (GNPs) Addition on Strength and Ductility of Magnesium-Titanium Alloys," *Journal of Magnesium and Alloys*, 242-248.
37. **Hu, Z., Tong, G., Nian, Q., Xu, R., Saei, M., Chen, F., Chen, C., Zhang, M., Guo, H., Xu, J.** 2016. "Laser Sintered Single Layer Graphene Oxide Reinforced Titanium Matrix Nanocomposites," *Composites Part B*, 93, p. 352-359.
38. **Mu, X. N., Zhang, H. M., Cai, H. N., Fan, Q. B., Wu, Y., Fu, Z. J., Wang, Q. X.** 2017. "Hot Pressing Titanium Metal Matrix Composites Reinforced with Graphene Nanoplatelets Through an In-Situ Reactive Method," *AIP Conference Proceedings*, 1846 (1).
39. **Song, Y., Chen, Y., Liu, W., Li, W. L., Wang, Y. G., Zhao, D., Liu, X., Song, Y., Chen, Y.** 2016. "Microscopic Mechanical Properties of Titanium Composites Containing Multi-Layer Graphene Nanofillers," *Materials and Design*, 109, p. 256-263.
40. **Gürbüz, M., Mutuk, T.** 2018. "Effect of Process Parameters on Hardness and Microstructure of Graphene Reinforced Titanium Composites," *Journal of Composite Materials*, 52(4), p. 543-551.
41. **Cui, S., Cui, C., Xie, J., Liu, S., Shi J.** 2018. "Carbon Fibers Coated with Graphene Reinforced TiAl Alloy Composite with High Strength and Toughness," *Scientific Reports*, 8, no. 2364, p. 1-8.
42. **Liu, J., Wu, M., Yang, Y., Yang, G., Yan, H., Jiang, K.** (Baskıda) 2018. "Preparation and Mechanical Performance of Graphene Platelet Reinforced Titanium Nanocomposites for High Temperature Applications," *Journal of Alloys and Compounds*, 10.1016/j.jallcom.2018.06.148.
43. **Liu, Y., Huang, J., Li, H.** 2013. "Synthesis of Hydroxyapatite-Reduced Graphite Oxide Nanocomposites for Biomedical Applications: Oriented Nucleation and Epitaxial Growth of Hydroxyapatite," *Journal of Materials Chemistry B*, p. 1826-1834.