



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makalesi

Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Tungsten Karbür ve Grafen Takviyelerinin Mekanik Özelliklere Etkileri Üzerine Bir Araştırma

 Salih KORUCU ^a,  Gürkan SOY ^{b,*}

^a İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

^b Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Turgutlu M.Y.O., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: gurkan.soy@cbu.edu.tr

DOI : 10.29130/dubited.536359

ÖZET

Teknolojinin hızla gelişmesi ile birlikte, imalat, havacılık ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılan standart malzemeler yerini yeni nesil yüksek mukavemete ve hafifliğe sahip malzemelere bırakmaktadır. Özellikle, Tungsten karbür (WC) ve Grafenin sahip olduğu yüksek termal ve elektriksel özellikler, yüksek elastisite modülü, yüksek mukavemet gibi üstün özellikleri sayesinde alüminyum matrisli kompozit malzeme üretiminde büyük etki ve avantajlara sahiptir. Bu çalışmada, WC ve Grafen takviyelerinin alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi ile ilgili çalışmalar incelenerek sunulmuştur. Alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde %20'ye kadar WC ve %0.7'ye kadar grafen katkısının etkili olduğu raporlanmıştır. Grafen ilavesinin %0.5'ten fazla artırılması topaklanmalara, WC ilavesinin %30'dan fazla artırılması ise gözenekliğin artmasına ve mekanik özelliklerin azalmasına neden olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Toz metalurjisi, Alüminyum matrisli kompozit malzeme, Tungsten karbür, Grafen

An Investigation on the Effects of Tungsten Carbide and Grafen Reinforcements to Mechanical Properties in the Aluminium Matrix Composites

ABSTRACT

With the rapid improvement of technology, standard materials which commonly used in manufacturing, aerospace and automotive sectors are being replaced with new generation high strength and lightweight materials. Tungsten carbide (WC) and Graphene, due to their high thermal and electrical characteristics, high elasticity module and high strength characteristics, have great effect and advantages in the production of aluminium matrix composite materials. In this study, studies on the effects of WC and Graphene reinforcements to mechanical characteristics of aluminium matrixed composite materials were represented.

It has been reported that up to 20% WC and up to 0.7% graphene addition were effective in improving the mechanical properties of aluminium matrix composites. Increasing addition of graphene by more than 0.5% causes aggregation, ascending addition of WC by more than 30% an increase in porosity and decreases the mechanical properties.

Keywords: Powder metallurgy, Aluminium matrix composite material, Tungsten carbide, Graphene.

I. GİRİŞ

A laşım, iki ve daha fazla metalin eritilerek veya karıştırılarak elde edilen, ayrı ayrı esas metallerin özelliklerine kıyasla bazı farklılıklara ve avantajlara sahip karışım olarak bilinmektedir. Saf alüminyumun aksine çekme dayanımı, yoğunluk, süneklik, şekillenebilirlik, işlenebilirlik, kaynak kabiliyeti ve korozyon direnci gibi özellikler dikkate alınarak alaşımlı alüminyum üretilmesi ve kullanılması ile birlikte alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi önemli ölçüde artarak devam etmiştir [1, 2]. Metal matris kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılan, alüminyum metalinin mekanik özelliklerini iyileştirmek için partikül haldeki Al_2O_3 [3], SiC [4], Si_3N_4 [5] B_4C [6], SiO_2 [7], ZrO_2 [8], WC [9] ve Grafen [10] gibi birçok takviye elemanı kullanılmaktadır [11–14] Alüminyum alaşımlı takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri genel olarak matrisin özelliğine, ıslanma yeteneğine, takviye oranına ve takviye çapına bağlı olmaktadır [12, 13].

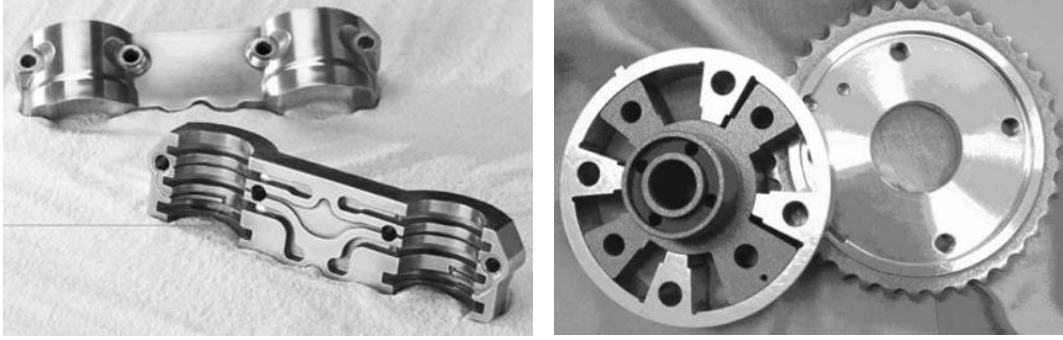
Alüminyum alaşımlarının ağırlığına oranla mukavemetlerinin yüksek olması, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci gibi yüksek mekanik özellikleri olmasının yanında işlenebilirliği kolay olması sebebiyle başta otomotiv ve havacılık, elektronik, makine ve imalat endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca alüminyumun malzemelerin yoğunluğu çeliklere kıyasla üçte bir oranla daha düşük olması ağırlığın azaltılmak istenildiği, yakıt tasarrufu sağlanmasında ve hava kirliliğinin önlenmesi amacıyla birçok uygulamada çeliklere göre avantaj sağlamaktadırlar [2, 12, 15–18]. Tablo 1’de alüminyum’un mekanik özellikleri verilmektedir.

Tablo 1. Saf Alüminyum mekanik özellikleri [19].

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (HB)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Poisson oranı	Kristal Yapısı
Saf Alüminyum	2.7	68.3	21	90	660.2	0.34	YMK

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin ticari kullanımı ilk olarak 1983 yılında Toyota Motor Company tarafından dizel motor pistonu ile olmuştur. 1989 yılında Honda, ABD ve Japonya’da benzinli motorlar için yeni bir silindir bloğu üretmiştir. Bununla birlikte, fren diskleri, %15 Al_2O_3 takviyeli AA6061 alaşımı tekerlek çivileri, %20 SiC takviyeli Al_3Si Golf sopası başlığı ve fren kampanaları, alüminyum matrisli kompozit malzemelerden üretilmektedir. [11, 13]. Şekil 1’de

alüminyum esaslı kompozit olarak üretilen eksantrik mil rulman kapağı, rotor ve zincir dişli gösterilmektedir.



Şekil 1. Alüminyum matrisli otomobil eksantrik mil rulman kapağı, rotor ve zincir dişli [20, 21].

Alüminyum matrisli kompozit malzemeler ile ilgili literatür incelendiğinde, “ScienceDirect” veri tabanında 2019 yılına kadar toplamda 142.382 çalışma yapılmıştır. Son 5 yıl içinde alüminyum matrisli kompozitler üzerine yapılan toplam 46.872 çalışma bulunmaktadır. Alüminyum matrisli kompozit malzemeler kapsamında bulunan WC ve Grafen takviyeli kompozit malzeme çalışmaları da yıllara göre ayrı ayrı Tablo 2’de verilmektedir. Önceki çalışmalardan da görüldüğü üzere alüminyum matrisli kompozit malzemelere yönelik araştırmalar özellikle enerji verimliliği açısından önem ve cazibesini arttırmaktadır.

Tablo 2. Alüminyum matrisli kompozitler ile ilgili çalışmaların yıllara göre dağılımı

Malzeme / Yıllar		2014	2015	2016	2017	2018	2019*	Toplam
WC takviyeli kompozitler	Makale	172	172	190	210	309	113	1166
	Derleme	17	32	36	46	41	20	192
	Kitap bölümü	71	62	48	80	66	54	381
	Diğer	79	50	43	75	54	22	323
	Toplam	339	316	317	411	470	209	2062
Grafen takviyeli kompozitler	Makale	388	604	812	1142	1380	855	5181
	Derleme	83	121	203	258	372	196	1233
	Kitap bölümü	69	77	99	167	206	163	781
	Diğer	90	101	111	162	185	92	741
	Toplam	630	903	1225	1729	2143	1306	7936
Alüminyum matrisli kompozitler	Makale	5366	5819	6215	6980	8005	4096	36.481
	Derleme	368	440	573	650	818	431	3280
	Kitap bölümü	690	715	622	881	842	573	4323
	Diğer	579	456	428	594	515	216	2788
	Toplam	7003	7430	7838	9105	10.180	5316	46.872

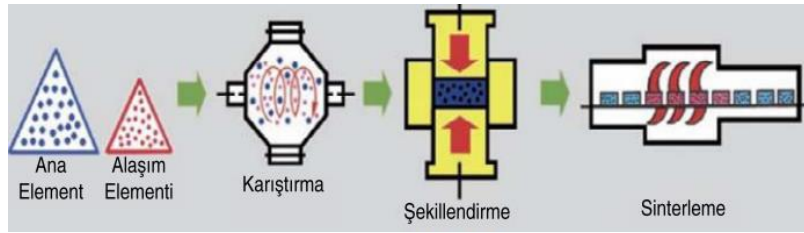
*01.04.2019 tarihine kadar yapılan çalışmaları kapsamaktadır.

Bu çalışmada, WC ve Grafen ilaveleri ile üretilen alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ile ilgili çalışmalar incelenerek sonuçları ile birlikte sunulmuştur. Genel bir bakış açısı ile alüminyum matrisli kompozit malzeme üretim yöntemlerinden biri olan toz metalürjisi,

mekanik alaşımlama, toz sıkıştırma, sinterleme, tungsten karbür ve grafen takviyeli alüminyum kompozit malzemeler olarak irdelenmiştir.

II. TOZ METALURJİSİ

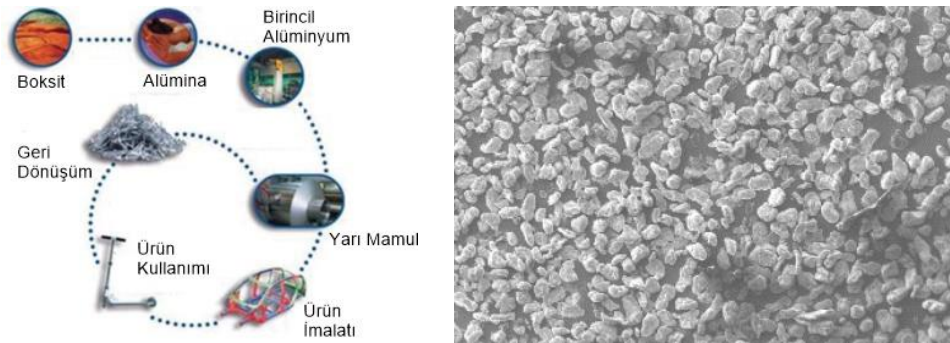
Toz metalurjisi (TM), çeşitli oranlarda bir karıştırıcı yardımıyla karıştırılmış alaşım tozlarının veya saf metal tozlarının biçimlendirilmek istenilen forma sahip bir kalıp içerisinde basınç altında şekillendirilmesi ve tüm bileşenlerin birbirlerine bağlanması amacıyla uygun bir atmosfer ile kontrollü bir şekilde ısıtılması işlemidir. Genel olarak TM, toz imalatı, karıştırma, sıkıştırma ve sinterleme olmak üzere dört temel adımdan oluşmaktadır [2, 15, 20, 22]. Şekil 2’de toz metalurjisi yönteminde işlem aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2. Toz metalurjisi yönteminde işlem aşamaları [17, 23].

19. yüzyılın ortalarından itibaren çeşitli tozların karıştırılarak çeşitli ürünler yapmak için ortaya çıkan TM yöntemi aynı yüzyılda, Thomas Alva Edison’un William Coolidge tarafından tasarlanan lamba filamanını tungsten tozunu kullanarak üretmiştir. Üretimi gerçekleştirilen malzemenin daha esnek, daha fazla aydınlatma sağladığı ve yüksek sıcaklıkta çalışabildiğini keşfetmişlerdir. 20. yüzyılın başlarında ise TM yöntemiyle elektrik kontakları, gözenekli rulmanlar ve sementte karbürler imal edilmeye başlanmış sonrasında birçok endüstriye uygulanarak popüler hale gelmiştir [2].

TM’de yaygın olarak kullanılan Alüminyum, periyodik tablo 3A grubunda bulunan, yumuşak, manyetik olmayan, kimyasal bir element ve sünek bir malzemedir. Alüminyumun ana cevheri Boksit’tir. Dünyadaki çekirdek kütleinin %10’unu oluşturan alüminyum, dünyadaki en yaygın metaldir. Oksijen ve silisyumdan sonra, alüminyum gezegenimizdeki en yaygın kimyasaldır. Alüminyum ilk defa 1824 yılında Danish ve Hans Christian Orsted tarafından üretilmiştir [2]. Şekil 3’te alüminyumun üretim aşamaları ve saf alüminyum tozunun görüntüsü verilmektedir.

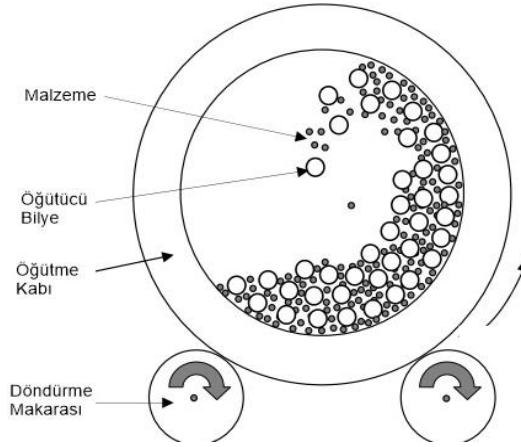


Şekil 3. Alüminyumun üretim aşamaları ve saf alüminyum tozunun taramalı elektron mikroskobu ile görüntüsü [24, 25].

Toz metalürjisi yöntemi ile kompozit malzeme üretiminde ilk işlem basamağı olan mekanik alaşımlama (toz öğütme ve karıştırma) işlemi tozların homojen bir dağılım sergilemesi ve tane boyutunun inceltilmesi açısından önem arz etmektedir.

A. MEKANİK ALAŞIMLAMA İŞLEMİ

Mekanik alaşımlama, esas olarak tozların eşit şekilde karıştırılması veya harmanlanması işleminin gerçekleştirildiği bilyeli öğütmedir. Çarpışma ve aşındırma prensibi ile çalışmaktadır. Silindirik bir kap şeklinde olan öğütücü içerisinde karıştırılacak alaşım tozların ve öğütücü bilyelerin yerleştirilmesi sonrasında eksenini etrafında dönerek, bilyelerin birbirleriyle çarpışması ve bilyeler arasında kalan katı parçacıkların boyutlarının küçültülmesi işlemlerini kapsamaktadır [2]. Mekanik alaşımlama yönteminde sünek malzemelerde ilk olarak metalik tozlar yassı bir şekil almaktadır ve deformasyonun devam etmesiyle birlikte birbirlerine soğuk kaynak olmaktadır. Mekanik öğütme süresinin artmasıyla birlikte gevrekleşen tozlar kırılır ve belirli bir soğuk kaynak-kırılma çevrimi sonrasında alaşımlama işlemi kararlı bir hale ulaşır [18, 26]. Şekil 4'te mekanik alaşımlama işleminin yapılışı gösterilmektedir.



Şekil 4. Mekanik alaşımlama (öğütme) işleminin yapılışı [5].

Öğütücü bilye olarak, seramik, paslanmaz çelik, krom ve bazen kauçuk gibi farklı malzemeler kullanılmaktadır [2]. Mekanik alaşımlama işlemi, matris içerisinde karbonun homojen olarak dağıtılması, tozların ciddi bir şekilde ince tane boyutuna sahip olması ve bu sayede malzemenin mukavemetini arttırması (dislokasyon yoğunluğunu arttırması) gibi önemli avantajlara sahiptir. Tablo 3'te bazı alüminyum esaslı toz kompozitlerin çeşitli parametrelerde mekanik alaşımlama işlemi uygulanması ve sonuçları verilmektedir.

Tablo 3. Alüminyum matrisli toz metal kompozitlerin mekanik alaşımlama parametreleri ve sonuçları

Alaşım	Üretim Tek.	Takviye Elemanı	Tane Boyutu	Karıştırma Süresi	Bilye malzeme ve ağırlık oranı	Sonuç	Ref. No
Saf Al- 44 µm	TM	WC-%1, %5, %10	200 nm-20 µm	30 dk.		Partikül dağılımı ve ara yüzey özelliklerinde mikro boşluklar veya mikro çatlaklar olmadan iyileşme gözlenmiştir.	[27]
Al-Cu, ECKA Alumix 123, 24 µm	TM	WC-%5, %10, %15	1 µm	15-30 dk.		Homojen dağılım için karıştırma süresi yeterli değildir.	[28]
Saf Al- %99.72	TM	WC-%4	5 µm	30 sa-200 devir	10:1, WC (Ø10mm) ve zirkonya bilye (Ø6 mm)	Tane boyutu 400nm'den 42 nm'ye düşürülmüştür.	[29]
Saf Al- %99.5, 10 µm	TM	WC-%7	3 µm	1,2,3,5 sa-1200 devir	10:1, WC bilye (Ø10mm)	Karıştırma süresinin artması ile daha küçük tane boyutları oluşmuş ve tozlar arasındaki etkileşimi arttırmıştır. Bu durum sinterleme sırasında oluşan yoğunlukları arttırmaktadır. En iyi sonuç 5 sa. karıştırma süresi ile alınmıştır.	[30]
Saf Al- %99.5, 60 µm	TM	WC-%5, %10, %15	0.7µm	300 devir		Artan mekanik özellikler gözlenmiştir.	[31]
AA 7075, 1 µm	TM	WC-%5, %10, %20, %30	1 µm	20 sa.	20:1, Sertleştirilmiş paslanmaz çelik bilye,	Tungsten partiküllerin öğütme işlemini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca alüminyum tozların içerisine nüfuz ederek iyi bir dağılım göstermiştir. Tane boyutları mikro boyuttan nano boyuta geçmiştir.	[32]
Al-10Zn-3.5Mg, 45 µm	SE	Grafen %0.1, %0.3, %0.7, %1.0	25 µm	120 dk-250 devir	10:1	Tozların morfolojisinin küreselden yassı hale dönüştüğü ve alüminyum tozları arasında düzgün bir dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. Toz büyüklüğü ise 20 µm'ye düşmüştür.	[33]

Tablo 3. Alüminyum matrisli toz metal kompozitlerin mekanik alaşımlama parametreleri ve sonuçları (devamı)

Saf H-10 Alüminyum, 22 µm	TM	Grafen %0.1		1 sa.			İnce tane boyutları ile homojen bir dağılım gerçekleşmiştir. Bunun yanı sıra oksit tabakasını alüminyumdan ayırarak temiz arayüz sağlamıştır.	[34]
AA 2024, 20-30 µm	TM	SiC-Grafen, %0.5	10 µm	60 dk., 200 devir		16:1	Homojen bir dağılım gözlenmiştir.	[35]
AA 2024, 2-10 µm	TM	MWCNT-Grafen, %0.4		60 dk.		15:1	MWCNT topraklarının kırılmasına ve matris partiküllerinin düzleşerek birbiri içerisinde nüfuz etmesine yardımcı olduğu gözlenmiştir.	[36]
Saf Al, 7 µm	TM Eks	Grafen %0.1, %0.2, %0.4, %0.9		1 sa-100 devir			Tozların yassı şekle dönüştüğü ve birbiri içerisine nüfuz ettiği gözlemlenmiştir.	[37]

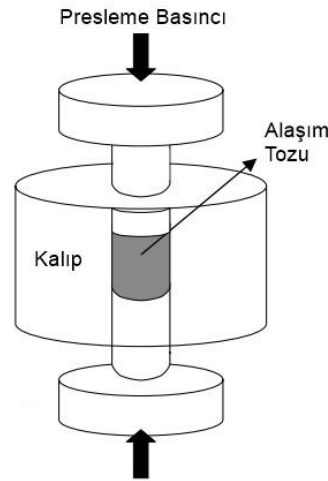
TM: Toz metalurjisi, SE: Sıcak ekstrüzyon, TM Eks.: Toz metalurjisi ve ekstrüzyon.

Tablo 3 incelendiğinde mekanik alaşımlama işlemi 15 dakika ile 30 saat süreleri arasında, ortalama olarak yaklaşık 6 sa. karıştırma süresi olduğu görülmektedir. Düşük alaşımlama süreleri (15-30 dk.) homojen dağılım için yeterli değildir. Çok yüksek alaşımlama süreleri tane boyutunu ciddi oranda azaltmıştır. Genellikle 1 saat süresince alaşımlama işlemi yapılmıştır.

Mekanik alaşımlama işleminin ardından homojen bir şekilde dağıtılmış alaşım tozların basınç ile üretilmek istenilen şekle uygun bir kalıp içerisinde bir kütle haline getirilmesi işlemi gelmektedir. Daha az gözeneklilik ve uygun yoğunluğun elde edilmesi açısından önemlidir.

B. TOZ SIKIŞTIRMA İŞLEMİ

Toz sıkıştırma işlemi, toz malzemelerin bir kalıp boşluğuna yerleştirilerek pres ile basınç uygulanarak kompakt hale getirilmesi işlemidir. Basınç miktarının değiştirilmesi malzeme yoğunluğu arttırmaktadır. Kompaktların düşük yoğunluk eğilimlerini azaltmak için genellikle basınç aynı anda hem üstten hem de alttan verilmektedir. Basıncın uygulanması ile birlikte toz parçacıkları aralarındaki yüzey düzensizlikleri birbirine kenetlenmektedir ve tozlar birbirlerini sıkıştırmaktadır [2]. Şekil 5'te toz sıkıştırma işlemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 5. Toz sıkıştırma işleminin şematik olarak gösterilmesi [38–40].

Tablo 4'te bazı alüminyum esaslı toz kompozitlerin üretiminde kullanılan toz sıkıştırma işlemleri için preslenme basınçları verilmektedir.

Tablo 4. Alüminyum matrisli toz metal kompozitlerin presleme basınçları

Malzeme	Ürt. Tek.	Takviye Elemanı	Tane Boyutu	Sıkıştırma Basıncı	Ref. No
Saf Al- 44 µm	TM SPS	WC-% 1, % 5, % 10	200 nm-20 µm	50 MPa	[27]
Al-Cu, ECKA Alumix 123, 24 µm	TM	WC-% 5, % 10, % 15	1 µm	500 MPa	[28]
Saf Al- %99.5, 10 µm	TM	WC-% 7	3 µm	220 MPa	[30]
Al 7075, 1 µm	TM	WC-% 5, % 10, % 20, % 30	1 µm	300 MPa	[32]

Tablo 4. Alüminyum matrisli toz metal kompozitlerin presleme basınçları (devamı)

Al-10Zn-3.5Mg, 45 µm	SE	Grafen %0.1, %0.3, %0.7, %1.0	25 µm	350 MPa	[33]
Saf Al, 7 µm	TM Eks.	Grafen %0.1, %0.2, %0.4, %0.9		400 MPa	[37]

TM: Toz metalurjisi, SE: Sıcak ekstrüzyon, TM Eks.: Toz metalurjisi ve ekstrüzyon. TM SPS: Spark plazma sinterleme

Tablo 4 incelendiğinde, presleme basınçlarının 50 ile 500 MPa arasında olduğu görülmektedir. Ortalama olarak yaklaşık 300 MPa basınç altında sıkıştırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Uygun presleme basıncını tespit edebilmek için farklı basınçlarda sıkıştırılmış numunelerin teorik yoğunluğa en yakın ve sertliğe göre belirlenip, kompakt oluşturma işlemlerinin tespit edilen basınç ile yapılması kanaatine varılmıştır.

Mekanik alaşımla ve kompakt hale getirilen numunelerin bağlanması açısından toz metalurjisinde en önemli aşama sinterleme işlemidir. Mekanik özellikleri doğrudan etkileyen bu işlem uygun sıcaklık ve sinterleme sürelerinde yapılması, üretilen numunelerin performansı açısından önem teşkil etmektedir.

C. SİNERLEME İŞLEMİ

Sinterleme, sıkıştırılmış kompaktların belirli bir sıcaklıkta ısıtılması ve toz parçacıkları arasında metalurjik bağların oluşturularak birbirine bağlanması amacıyla yapılan, yüksek serbest enerjiye sahip, daha rijit ve daha az gözenekli bir ürün elde etme işlemidir [17, 21]. Genellikle sinterleme sıcaklığı olarak, toz metallerin erime noktasının %70 ile %90'ı arasında seçilmektedir. Sinterleme sırasında, toz malzemelerdeki atomlar partiküllerin sınırları boyunca yayılarak partikülleri birleştirmektedir [2, 17]. Sinterleme sıcaklığının artırılması ile sıkıştırma kuvveti azalacağından sinterleme sıcaklığının iyi hesaplanması gerekmektedir [2]. Tablo 5'te alüminyum esaslı toz kompozitlerin sinterleme parametreleri ve elde edilen sonuçlar verilmektedir.

Tablo 5. Alüminyum matrisli toz metal kompozitlerin sinterleme parametreleri ve sonuçları

Malzeme	Ürt. Tek.	Takviye Elemanı, Oranı ve Boyutu	Sinterleme Yöntemi ve Ortamı	Sinterleme Süresi	Sinterleme Sıcaklığı	En İyi Sonuç ve Parametreler	Ref. No
Saf Al- 44 µm	TM	WC-%1, %5, %10, 200 nm-20 µm	Spark Plazma Sinterleme-Argon	5, 10 dk.	400, 450, 500 °C	Sinterleme sıcaklığı 500°C, Yoğunluk ≥ %99.8, En düşük porozite %1 WC, en yüksek sertlik %5 WC olarak belirlenmiştir.	[27]
Al-Cu, ECKA Alumix 123, 24 µm	TM	WC- %5, %10, %15, 1 µm	Nitrojen	20 dk.	580 °C	En yüksek porozite %15 WC en düşük %0 WC, en iyi sertlik %15 WC ve en kötü %5 WC, Al ₄ C ₃ fazı bulunmamaktadır. Artan WC miktarı ile mikro sertlik ve aşınma dayanımı artışı sağlanmıştır.	[28]
Saf Al- %99.72	TM	Red Mud-WC-%4, 5 µm	Konvensiyonel	30 dk.	620 °C	Aşınma direncinde artış gözlenmiştir.	[29]
Saf Al- %99.5, 10 µm	TM	WC-%7, 3 µm	Konvensiyonel-Argon	4 sa.	650 °C	Mekanik alaşımlama süresinin artmasıyla birlikte yoğunlukta ve sertlikte artış, Maksimum yoğunluk %93.3, Sinterleme sonrası maksimum sertlik 5 sa. mekanik alaşımlama için 201 HV olmuştur.	[30]
Saf Al- %99.5, 60 µm	TM	WC-%5, %10, %15, 0.7µm		60 dk.	450 °C	WC artışı ile aşınma direnci artışı, Al'ye kıyasla daha yüksek mekanik özellikler ve mukavemet elde edilmiştir.	[31]
AA 7075, 1 µm	TM	WC-%5, %10, %20, %30, 1 µm	Sıcak presleme-Argon	15 dk.	430 °C	En düşük tane boyutu %30 WC için 11nm, en düşük yoğunluk %5 Al için %99.5, maksimum sertlik %20 WC için 221 HB ölçülmüştür.	[32]
Saf Al, 10 µm	TM	WC-%1, 0.33 µm	Konvensiyonel	2 sa.	640 °C	Ultra ince WC ile %53 sertlik artışı, Tane boyutunda 7.0 ± 3.6 µm'den 4.3 ± 2.7 µm'ye incelleme gözlenmiştir.	[41]

Tablo 5. Alüminyum matrisli toz metal kompozitlerin sinterleme parametreleri ve sonuçları (devamı)

Al 1056 merck	TM	WC- %10, %15, %20, 1 μm	Mikrodalga, Konvansiyonel	1 sa.	650, 750, 850, 950 °C	Maksimum yoğunluk 950 °C, %10 WC, %97.4±1.2 mikrodalga ile ve %98.6±0.8 konvansiyonel yöntem ile bulunmuştur. Maksimum eğilme dayanımı 650 °C'de %10 WC ile 223±12 MPa ile konvansiyonel, 950 °C'de %20 WC ile 256±12 MPa olarak elde edilmiştir.	[42]
Al 2009, 13 μm	TM	WC- %12, 2 μm		2 sa.	600 °C	İyi arayüz reaksiyonu, önemli ölçüde azaltılmış süneklik ve arttırılmış çekme dayanımı, %80'den %95'e artan verimlilik gözlemlenmiştir.	[43]
Saf Al	TM	WC- %2.5, %5, %7.5, %10, 270 mesh	Konvansiyonel	1 sa.	640 °C	WC ilavesiyle artan yoğunluk, maksimum yoğunluk %93.73, %7.5 WC ilavesine kadar kademeli yoğunluk artışı elde edilmiştir.	[44]
Al-10Zn-3.5Mg, 45 μm	SE	Grafen %0.1, %0.3, %0.7, %1.0, 25 μm	Konvansiyonel- Vakum	240 dk.	560 °C	Grafen içeriği %0.7'ye kadar iç yapıda homojen bir dağılım, grafen içeriğinin artışı ile tane boyutunda önemli ölçüde azalma, maksimum çekme dayanımı ve en yüksek mukavemet %0.7 grafen katkısı ile tespit edilmiştir.	[33]
Saf H-10 Alüminyum, 22 μm	TM Eks.	Grafen %0.1		4 sa.	550°C	Alüminyumun dayanımında %12'ye kadar artış tespit edilmiştir.	[34]
AA 2024, 20-30 μm	TM	SiC-Grafen, %0.5, 10 μm	Mikrodalga	3 sa.	550 °C	Baz alaşıma kıyasla sertlik ve bükülme mukavemetinde önemli oranda gelişme, aşınma kayıpları, yüzey pürüzlülüğü ve sürtünme katsayısı değerlerinde azalma görülmüştür.	[35]

Tablo 5. Alüminyum matrisli toz metal kompozitlerin sinterleme parametreleri ve sonuçları (devamı)

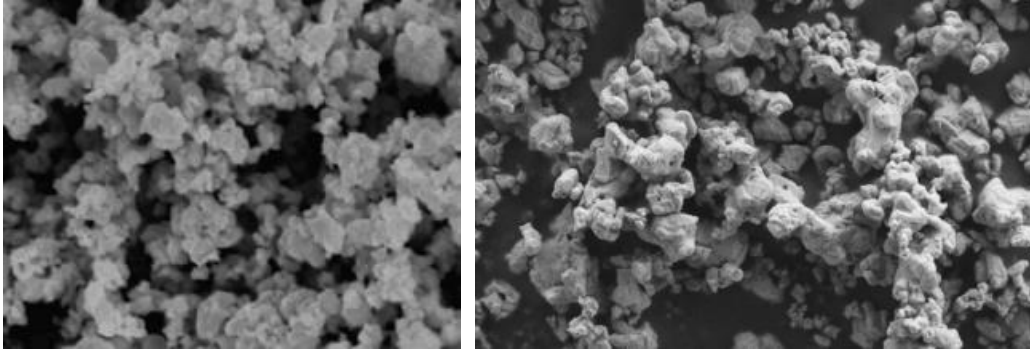
AA 2024, 2-10 μm	TM SP	MWCNT- Grafen, %0.4		0 dk.	480 °C	Diğer kombinasyonlara kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı ve daha ince tane yapısı elde edilmiştir.	[36]
AA 2900, 10 μm	SE	Grafen, %2.5, %5, %7.5, %10, 10 nm	Mikrodalga	1 sa.	450, 500, 550, 600 °C	En iyi mukavemet ve bükülme dayanımı için uygun sıcaklıklar 500 ve 550 °C arasında olduğu, en iyi mekanik davranışların %5 ve fazlası değerlerindeki grafen katkılarında gözlemlenmiştir.	[45]
AA 2024, 10 μm	SE	Grafen, %0.25, 10 nm	Mikrodalga	2 sa.	425 °C	Artan mekanik özellikler ve mukavemet değerleri elde edilmiştir.	[46]
Saf Al, 8-15 μm	TM	Grafen, %0.1, %0.3, %0.5, 5 μm	Konvansiyonel	20, 60, 90, 120, 180, 300 dk.	550, 600, 630 °C	Maksimum sertlik değeri 57HV ve ağırlıkça %0.1 grafen takviyesinde, 630 °C'lik sinterleme sıcaklığında, 180 dk. sinterleme süresinde ulaşılmıştır.	[25]

TM: Toz metalurjisi, SE: Sıcak ekstrüzyon, TM Eks.: Toz metalurjisi ve ekstrüzyon, TM SP: Toz metalurjisi ve sıcak presleme.

Tablo 5 incelendiğinde grafen ve WC katkıli alüminyum matrisli kompozit malzemeler için çeşitli sinterleme sıcaklıkları ve süreleri kullanılmıştır. Sinterleme sıcaklıkları için kullanılan en düşük değer 425 °C, en yüksek değer ise 650 °C'dir. Ortalama sıcaklık değeri ise yaklaşık 560 °C'dir. Genel olarak 500 °C ve 600 °C arasında sıcaklıklarda düşük sıcaklıklara nispeten daha iyi özellikler elde edilmiştir. Sinterleme süresi olarak 5 ile 240 dakika arasında çeşitli sinterleme süreleri seçilmiştir. Çalışmalarda sıklıkla 1 ve 2 saat sinterleme süreleri tercih edilmiştir.

III. TUNGSTEN KARBÜR (WC) TAKVİYELİ KOMPOZİTLER

6B geçişli metal karbürler grubunda bulunan WC yüksek sertlik, yüksek aşınma dayanımı, yüksek korozyon direnci, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik gibi üstün özelliklere sahiptir [29, 30, 42, 47–49]. Bu özellikleri sayesinde kesici aletler, kalıplar, refrakter malzemeler, nozullar ve aşındırıcı malzemelerde sıklıkla tercih edilmektedir [30, 47, 48, 50–52]. WC, 2875 °C erime sıcaklığı ile çok kararlıdır ve faz dönüşümlerine uğramamaktadırlar [50, 52]. WC, bu üstün özelliklerinin yanı sıra alüminyumlara iyi ıslanabilirlik kabiliyetine sahip olmaları nedeniyle takviye elemanları arasında yüksek öneme sahiptir [27, 49]. Buna karşın, günümüze kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde alüminyum matrisli kompozit malzemelerde potansiyel bir takviye olarak WC ile ilgili yeterli araştırma yapılmadığını görülmektedir [27, 51]. Tungsten karbürün taramalı elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 6'da, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 6'da verilmektedir.



Şekil 6. Tungsten karbür'ün taramalı elektron mikroskobu görüntüsü [47, 48].

Tablo 6. Tungsten karbür mekanik özellikler [53, 54].

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (HB)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Poisson Oranı
WC	15.25-15.63	530-627	1630-1700	3700-5000	2875	0.2

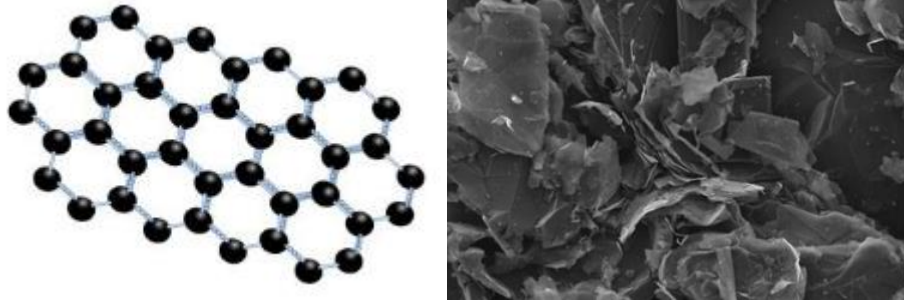
Li ve arkadaşları [55] Al 2009 alaşımına 20% B₄C ve 12% WC ilavesi ile kompozit malzemenin akma dayanımında %7, çekme dayanımında %19 oranında artış sağlamıştır. Chinta vd. [29] Saf alüminyuma %2, %4, %6 Red Mud ve %4 WC ilavesi yapmış ve sertliklerde sırası ile %21, %15, %12 artış sağlamıştır. Simon vd. [28] Al-Cu alaşımına %5, %10, %15 oranlarında WC ilavesi yapmış ve sertliklerinde yaklaşık olarak sırası ile -%2, %14 ve %28 artış ve kenar aşınmasında azalma sağlamıştır. Liu vd. [56] Al 1060 alaşımına %1, %2, %3 oranında WC ilavesi ile yaklaşık olarak %31 oranında çekme dayanımında gelişme olduğunu belirlemiştir. Ravikumar vd. [57] AA 6082 alaşımına %2, %4, %6, %8, %10 oranında WC ilave etmiş, akma dayanımında yaklaşık olarak %20, çekme

dayanımında %16 oranında gelişme, sertlik değerinde yaklaşık %46 artış ve % uzama miktarı ise yaklaşık olarak %40 oranında azalma sağlamıştır. Dahs vd. [58] AA 5052 alaşımına %5, %10 WC , SiC ve %4 Grafit katkısı ile darbe dayanımını %34.2, sertlik değerini %10.3 ve çekme dayanımını %15.12 oranında arttırmayı başarmıştır. Ramnath vd. [59] Al 6061 alaşımına %0.5, %1, %1.5, %2 oranında WC ilavesi yapmış, çekme dayanımı %0.5 WC ilaveli kompozite göre yaklaşık olarak %67 artış, akma dayanımı %65 artış ve %uzama miktarı %8 azalma tespit etmişlerdir. Liang vd. [60] Al 2024 alaşımına %12 oranında WC ilavesi ile sertliklerde %50 artış sağlamıştır. Swamy vd. [53] çalışmalarında Al 6061 alaşımına %1, %2, %3, %4 oranında WC katkısı ile yaklaşık olarak %14 sertlik artışı, %55 çekme dayanımı artışı ve elastisite modülünde %70 oranında artış sağlamışlardır. Arivukkarasan vd. [61] Al LM4 alaşımına %5, %10, %15 oranında WC ilavesi ile sertlikte %265, çekme dayanımında %220 oranında artış sağlandığını raporlamışlardır.

Yukarıda verilen araştırmaların ışığında, alüminyum matrisli kompozitlere düşük oranlarda olsa bile WC ilavesi, mekanik özellikleri ciddi bir şekilde geliştirdiği tespit edilmiştir. Bu durum, özellikle mukavemet ve aşınma dayanımı arttırılmak istenilen kompozitler için çekiciliğini arttırmaktadır. Ancak % olarak çok yüksek oranlarda kullanımı malzemenin ağırlığını arttıracığından bu durum takviye elemanı olarak kullanımını sınırlayabilmektedir. Bunun yanı sıra, çok yüksek oranlarda kullanımı özelliklere bir noktaya kadar geliştirmektedir ve gözenekliliği arttırmaktadır.

IV. GRAFEN TAKVİYELİ KOMPOZİTLER

Altıgen bir kafes yapısı ile karbon atomunun iki boyutlu formu olan Grafen sahip olduğu mükemmel elektriksel özellikler, yüksek ısı iletkenliği, yüksek elastisite modülü, yüksek mukavemet ve süper ince ve hafiflik gibi üstün özellikleri sayesinde şimdiye kadar keşfedilen en güçlü malzemedir [14, 24, 35, 55, 62, 63]. Grafenin moleküler yapısı ve taramalı elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 7’de, fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 7’de verilmektedir.



Şekil 7. Grafenin moleküler yapısı ve taramalı elektron mikroskobu görüntüsü [35].

Tablo 7. Grafen mekanik özellikleri [24, 64].

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Kristal Yapısı
Grafen	2.25	1000	130500	5503.85	sp ² -Hegzagonal

2004 yılında Andre Geim ve Konstantin Sergeevich Novoselov Geim tarafından keşfedilen Grafen altı adet karbon halkasının bir araya gelmesiyle oluşmaktadır ve elastisite modülü çelikten 100 kat daha fazladır [24, 63]. Keşfedilmesinden bu yana, polimerlerde ve metal matris kompozit malzemelerde

takviye elemanı olarak kullanımı üzerine birçok araştırma yapılmıştır. [14, 55]. Ancak homojen dağılımdaki zorlukları ve yüksek sıcaklıktaki işleme koşullarında metal ara yüzleri arasındaki yoğun reaksiyon sebebiyle daha araştırılması gerekmektedir [35]. İlerleyen zamanlarda elektronik, havacılık, otomotiv, biyomedikal ve enerji sektörlerinde kullanılması beklenen grafenin en önemli özelliği üstün mekanik özelliklere sahip kompozit malzeme üretiminde kullanılabilecek olmasıdır [24].

Lokesh vd. [1] Al 7075 alaşımına %0.5, %1, %1.5, %2 oranlarında grafen katkısı yapmış, basma dayanımını %0.5 grafen katkısı ile %8 oranında arttırmıştır. Kandemir [65] AlSi10Mg alaşımına %0.25 grafen nano levha katkısı ile akma dayanımında %7 artış, çekme dayanımında %23 artış ve %uzama miktarında %8 azalma sağlamışlardır. Çavdar ve Akkurt [62] saf alüminyuma %0.1, %0.2, %0.3, %0.4 oranında grafen katkısı yapmış ve sertlik değerinde yaklaşık olarak %67 artış sağlamışlardır. Prakash vd. [66] Al 7075 alaşımına %0.5, %1, %1.5, %2 oranında grafen takviyesi ile %0.5 oranında takviyeye göre %5 oranında çekme dayanımı artışı sağlamışlardır. Anthony vd. [67] AA 2024 alaşımına %0.4 oranında grafen katkısı yapmış ve çekme dayanımında yaklaşık olarak %40 artış sağlamıştır. Yang vd. [37] saf alüminyuma %0.06, %0.14, %0.21, %0.54 oranında grafen katkısı yapmış ve akma dayanımında %116 ve çekme dayanımında %43 oranında artış elde etmiştir. Gao vd. [68] saf alüminyuma %0.1, %0.3, %0.5 oranında grafen ilave etmiş ve çekme dayanımında %30 artış sağlamışlardır. Li vd. [69] saf alüminyuma %0.25, %0.5, %1 oranında grafen ilavesi ile akma dayanımında %38 artış elde etmiştir. Zhang vd. [70] Al 5083 alaşımına %0.5, %1 oranında grafen katkısı yapmış ve çekme dayanımında %50 artış sağlamıştır. Asgharzadeh vd. [71] saf alüminyuma %1 grafen katkısı yapmış, akma dayanımında %54 ve sertliğinde %28 artış sağlamıştır. Şenel vd. [72] toz metalürjisi yöntemini kullanarak saf alüminyuma %0.1 ve %0.5 aralığında değişen oranlarda grafen katkıları yapmışlar, %0.1 grafen katkılı kompozitlerde sertlik değerini 28 ± 2 HV'den 57 ± 2.5 HV'ye, basma dayanımını ise %0.5 grafen katkılı kompozitlerde 106 ± 4 MPa'dan 138 ± 4 MPa'ya yükseltmişlerdir. Rashad vd. [73] çalışmalarında, saf alüminyuma %0.3 oranında grafen takviyesi yapmış ve çekme dayanımını 252 ± 4.5 MPa'dan 280 ± 5 MPa'ya (%11 artış), sertlik değerini ise 76 ± 5 HV'den 85 ± 5 HV'ye (%12 artış) yükseltmeyi başarmışlardır. Şenel vd. [74] çalışmalarında saf alüminyuma %0.1, %0.3 ve %0.5 oranlarında grafen katkısı yaparak mekanik ve 10N ile 40N yükleri arasında değişen değerlerde sürtünme-aşınma davranışlarını incelemişlerdir. En az kütle kaybı %0.1 grafen takviyeli kompozit malzemede 10N ve 40N için 1.6mg ve 9.7mg olarak, en az aşınma oranı ise %0.1 grafen takviyesinde 10N ve 40N için 12×10^{-5} ve 18×10^{-5} mm³/Nm olarak tespit etmişlerdir. Rashad vd. [75] yaptıkları çalışmada saf alüminyuma %0.25, %0.5, %1 oranlarında grafen takviyesi yaparak ekstrüzyon öncesi ve sonrası özelliklerini incelemişlerdir. Sertlik değerini 69 HV'den %1 grafen takviyesi ile 77 HV'ye (%12 artış) yükseltmişlerdir. Gürbüz vd. [76] çalışmalarında saf alüminyuma %0.1, %0.3, %0.5 oranlarında grafen katkısı yaparak farklı sinterleme sıcaklıkları ve sürelerinde özelliklerini incelemişler ve optimum sonuca %0.1 grafen katkısı, 180 dk. sinterleme süresi ve 630 °C sıcaklıkta ulaşarak sertlik değerinde %50 artış sağlamışlardır.

Genel olarak, grafenin sahip olduğu üstün özellikler ile ilerleyen zamanlarda, özellikle araştırmaların artarak daha da genişletilmesi sayesinde kompozitlerde takviye olarak tercih edilecek elemanların en önemlileri arasında olacağı aşikardır. Özellikle, çok düşük oranlarda ilavesi ile çok yüksek mekanik özellikler sergilemesi, alaşımlama ile ilgili bazı sorunların giderilmesi (topaklanma vb.) sonrasında grafeni birçok endüstride kullanılan ve önemini her geçen gün arttıran bir duruma getirecektir.

V. SONUÇ

Bu çalışmada WC ve Grafen takviyelerinin Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisini kapsayan çalışmaların taraması gerçekleştirilmiştir. Ağırılıkça hafif ancak yüksek performansa sahip malzemelere duyulan ihtiyacın artmasıyla birlikte Alüminyum matrisli kompozitler üzerine araştırmalar artarak devam etmektedir. Taranan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmektedir.

- WC ile güçlendirilen kompozit malzemelerin özelliklerinde büyük oranda iyileşme gözlenmektedir. WC kompozitlerin yoğunluğu, darbe dayanımı ve yüzde uzama miktarı %WC oranındaki artışla azalırken, sertlik ve dayanım artmaktadır.
- Al-WC kompozitlerden üretilen malzemeler baz alüminyum metaline kıyasla daha yüksek mukavemet, daha yüksek aşınma direnci ve ömür, daha yüksek güvenilirliğe sahip olmaktadır.
- Artan öğütme süresi (mekanik alaşımlama) tozların homojen bir şekilde harmanlanmasına ve tane boyutunun incelenerek daha iyi sonuçlar alınmasına yardımcı olmaktadır.
- Sinterleme süresinin arttırılması ile mikroyapıdaki WC dağılımında iyileşme gözlenerek düşük gözeneklilik seviyelerine neden olmaktadır. Ancak toz sıkıştırma basıncının arttırılması kompozit malzemenin mikro yapısı üzerinde büyük bir etkiye sahip olmamaktadır.
- Grafen ile güçlendirilen alüminyum kompozit malzemelerin mekanik özellikleri % grafen ilavesinin çok az olmasına rağmen yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu gözlenmektedir. Özellikle %0.5 üzerinde grafen katkısı kompozitlerde topaklanma eğilimi gözlemlenmektedir.
- Grafen katkısı ile üretilen kompozit malzemelerin çekme dayanımı, sertlik ve aşınma değerlerinde artış gözlemlenirken, sürtünme katsayısında grafenin yağlayıcı özelliğinden dolayı azalma görülmektedir.
- WC ve Grafenin kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde büyük bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir. Ancak WC ile ilgili çalışmaların az olması ve grafen üzerine yapılan çalışmaların daha ilk aşamalarında olması sebebiyle bu konularda yapılacak çalışmaların arttırılarak literatüre kazandırılması gerekmektedir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] K. S. Lokesh, I. C. Chethan, N. Kumar, and V. Kannantha, "Determination of Compressive Strength of Graphene Reinforced with Aluminium-7075 Metal Matrix Composites," *International Journal of Mechanical Engineering & Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 327–335, 2018.
- [2] D. Surrya Prakash, R. Mariappan, J. Viswanathan Anand, D. Jana Sundar, and K. Dinesh, "A review on latest development of aluminium alloy metal matrix composite through powder metallurgy route," *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, vol. 2018, no. Special Is, pp. 235–241, 2018.
- [3] S. Pournaderi and F. Akhlaghi, "Wear behaviour of Al6061-Al₂O₃ composites produced by in-situ powder metallurgy (IPM)," *Powder Technology*, vol. 313, pp. 184–190, 2017.
- [4] H. Izadi, A. Nolting, C. Munro, D. P. Bishop, K. P. Plucknett, and A. P. Gerlich, "Friction stir processing of Al/SiC composites fabricated by powder metallurgy," *The Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 11, pp. 1900–1907, 2013.
- [5] H. Arik, "Effect of mechanical alloying process on mechanical properties of α -Si₃N₄ reinforced aluminum-based composite materials," *Materials and Design*, vol. 29, no. 9, pp. 1856–1861, 2008.
- [6] H. Alihosseini, K. Dehghani, and J. Kamali, "Microstructure characterization, mechanical properties, compressibility and sintering behavior of Al-B₄C nanocomposite powders," *Advanced Powder Technology*, vol. 28, no. 9, pp. 2126–2134, 2017.
- [7] A. Pattnayak, N. Madhu, A. S. Panda, M. K. Sahoo, and K. Mohanta, "A Comparative study on mechanical properties of Al-SiO₂ composites fabricated using rice husk silica in crystalline and amorphous form as reinforcement," *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 8184–8192.
- [8] M. Ramachandra, A. Abhishek, P. Siddeshwar, and V. Bharathi, "Hardness and Wear Resistance of ZrO₂ Nano Particle Reinforced Al Nanocomposites Produced by Powder Metallurgy," *Procedia Materials Science*, vol. 10, pp. 212–219, 2015.
- [9] A. Pakdel, A. Witecka, G. Rydzek, and D. N. Awang Shri, "A comprehensive microstructural analysis of Al-WC micro- and nano-composites prepared by spark plasma sintering," *Materials & Design*, vol. 119, pp. 225–234, 2017.
- [10] H. G. Prashantha Kumar and M. Anthony Xavier, "Processing and Characterization of Al 6061 - Graphene Nanocomposites," *Materials Today: Proceedings*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 3308–3314.
- [11] H. Arik, K. Kırmızı, and Y. Özçatalbaş, "TM Yöntemiyle Alumix13-B₄C MMK Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması," *International Journal of Materials and Product Technology*, ss. 1–9, 2017.
- [12] H. Arik, G. Kırmızı, and P. Semerci, "Sıcak Presleme ile Alüminyum Matrisli ve Al₂O₃ Takviyeli Toz Metal Kompozit Malzeme Üretimi ve Abrasif Aşınma Davranışının Araştırılması," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi: PART:C "Tasarım ve Teknoloji" Dergisi*, c. 5, s. 4, ss. 87–97, 2017.
- [13] İ. Şahin, "Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Matkap İle Delinmesi Konusunda Yapılan Çalışmaların İncelenmesi," *Mühendis ve Makina*, c. 55, s. 649, ss. 9–16, 2014.
- [14] P. Ashwath, P. Jeyapandiarajan, M. Anthony Xavier, R. Verma, N. Kumar Singh, and Varalaxshmi, "Heat Treating Studies of Graphene Reinforced Aluminium Metal Matrix

Composite,” *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 5, pp. 11859–11863.

- [15] M. Taştan, H. Gökozan, P. Sarı Çavdar, G. Soy, and U. Çavdar, “Energy Consumption Analysis of Sintering Temperature Optimization of Pure Aluminum Powder Metal Compacts Sintered by Using The UHFIS,” *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 9, no. 3, pp. 175–185, 2017.
- [16] B. Akyuz and S. Şenaysoy, “Alüminyum Alaşımlarında Yaşlandırma İşleminin Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik Üzerindeki Etkisi Effect of Aging on Mechanical Properties and Machining on Aluminum Alloys,” *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 2330, s. 1, ss. 1–9, 2014.
- [17] A. Gökçe, F. Fındık, and A. O. Kurt, “Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri Powder Metallurgy Processing of Aluminum Alloys,” *Engineer&Machinery*, c. 58, s. 686, ss. 21–47, 2017.
- [18] J. R. Pickens, “Aluminium powder metallurgy technology for high-strength applications,” *Journal of Materials Science*, vol. 16, no. 6, pp. 1437–1457, 1981.
- [19] M. C. Şenel, M. Gürbüz, and E. Koç, “Toz Metalürjisi Metoduyla Üretilen Al-Si₃N₄ Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,” *Mühendis ve Makina*, c. 59, s. 693, ss. 33–46, 2018.
- [20] S. H. Huo, M. Qian, G. B. Schaffer, and E. Crossin, “Aluminium powder metallurgy,” *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*, no. December, Woodhead Publishing Limited, 2010, pp. 655–701.
- [21] T. A. Martin, D. H. Causey, A. L. Sheffner, A. G. Wheeler, and J. R. Currihan, “Amides of N-Acylcysteines as Mucolytic Agents,” *Journal of Medicinal Chemistry*, vol. 10, no. 6, pp. 1172–1176, 1967.
- [22] T. Yıldız, N. Kati, and A. K. Gür, “The effect of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of alloys produced by using hot isostatic pressing method,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 737, pp. 8–13, 2018.
- [23] T. Tsutsui, “Recent Technology of Powder Metallurgy and Applications,” *Hitachi Chemical Technical Report No.54*, no. 54, pp. 12–20, 2012.
- [24] M. Şenel, M. Gurbuz, and E. Koç, “Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler,” *Mühendis ve Makina*, c. 56, ss. 36–47, 2015.
- [25] M. C. Şenel, M. Gürbüz, and E. Koç, “Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 23, s. 8, ss. 974–978, 2017.
- [26] T. Varol, “Mekanik öğütme yöntemi ile üretilen mikronaltı Al₂O₃ seramik parçacıklarının fiziksel özellikleri üzerine öğütme zamanı, öğütme hızı ve bilye toz ağırlık oranının etkisi,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 24, s. 4, ss. 635–642, 2018.
- [27] A. Pakdel, A. Witecka, G. Rydzek, and D. N. Awang Shri, “A comprehensive microstructural analysis of Al–WC micro- and nano-composites prepared by spark plasma sintering,” *Materials&Design*, vol. 119, pp. 225–234, 2017.
- [28] A. Simon, D. Lipusz, P. Baumli, P. Balint, G. Kaptay, G. Gergely, A. Sfikas, A. Lekatou, A. Karantzalıs, and Z. Gacsi, “Microstructure and mechanical properties of Al-WC composites,” *Archives Of Metallurgy and Materials*, vol. 60, no. 2, pp. 1517–1521, 2015.
- [29] N. Devi Chinta, N. Selvaraj, and V. Mahesh, “Characterization of aluminium-red mud-tungsten carbide hybrid metal matrix composite,” *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques*, pp. 3722–3725, 2016.

- [30] A. Evirgen and M. L. Öveçoğlu, "Characterization investigations of a mechanically alloyed and sintered Al-2 wt%Cu alloy reinforced with WC particles," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 496, no. 1–2, pp. 212–217, 2010.
- [31] B. Gnanasundarajayaraja and N. Selvakumar, "Effect of WC Content in Aluminium Metal Matrix Sintered Powder Composites," *European Journal of Scientific Research*, vol. 10, no. 3, pp. 42–47, 2005.
- [32] M. Razavi and I. Mobasherpour, "Production of aluminum nano-composite reinforced by tungsten carbide particles via mechanical milling and subsequent hot pressing," *International Journal of Materials Research*, vol. 105, no. 11, pp. 1103–1110, 2014.
- [33] S. S. Mirjavadi, M. Alipour, A. M. S. Hamouda, S. Kord, P. G. Koppad, Y. A. Abuzin, and R. Keshavamurthy, "Effect of hot extrusion and T6 heat treatment on microstructure and mechanical properties of Al-10Zn-3.5Mg-2.5Cu nanocomposite reinforced with graphene nanoplatelets," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 36, pp. 264–271, 2018.
- [34] S. F. Bartolucci, J. Paras, M. A. Rafiee, J. Rafiee, S. Lee, D. Kapoor, and N. Koratkar, "Graphene-aluminum nanocomposites," *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, no. 27, pp. 7933–7937, 2011.
- [35] H. G. G. P. Kumar and M. A. Xavier, "Assessment of Mechanical and Tribological Properties of Al 2024- SiC - Graphene Hybrid Composites," *Procedia Engineering*, 2017, vol. 174, pp. 992–999.
- [36] M. Anthony Xavier, H. G. Prashantha Kumar, and K. Ajith Kumar, "Tribological studies on AA 2024 -Graphene/CNT Nanocomposites processed through Powder Metallurgy," *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 6588–6596.
- [37] W. Yang, Q. Zhao, L. Xin, J. Qiao, J. Zou, P. Shao, Z. Yu, Q. Zhang, and G. Wu, "Microstructure and mechanical properties of graphene nanoplates reinforced pure Al matrix composites prepared by pressure infiltration method," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 732, pp. 748–758, 2018.
- [38] A. Altıntaş, U. Çavdar, and İ. M. Kuşoğlu, "The Effect of Graphene Nanoplatelets on the Wear Properties of High-Frequency Induction Sintered Alumina Nanocomposites," *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, pp. 1–9, 2018.
- [39] H. C. Kim, D. Y. Oh, and I. J. Shon, "Sintering of nanophase WC-15vol.%Co hard metals by rapid sintering process," *The International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 22, no. 4–5, pp. 197–203, 2004.
- [40] H. C. Kim, I. J. Shon, and Z. A. Munir, "Rapid sintering of ultra-fine WC-10 wt% Co by high-frequency induction heating," *Journal of Material Science*, vol. 40, no. 11, pp. 2849–2854, 2005.
- [41] O. Emadinia, M. T. Vieira, and M. F. Vieira, "Effect of reinforcement type and dispersion on the hardening of sintered pure aluminium," *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 10, pp. 1–16, 2018.
- [42] E. Ghasali, A. H. Pakseresht, M. Agheli, A. H. Marzbanpour, T. Ebadzadeh, I. K. Blvd, and S. Technical, "WC-Co Particles Reinforced Aluminum Matrix by Conventional and Microwave Sintering," *Journal of Materials Research*, vol. 18, no. 6, pp. 1197–1202, 2015.
- [43] Y. Z. Li, Q. Z. Wang, B. L. Xiao, and Z. Y. Ma, "Fabrication and Welding of Aluminum Matrix Composite Reinforced with WC and B4C Particles," *The Journal of Materials Science*, vol. 46, pp. 1470–1481, 2013.
- [44] S. Jerry, A. Fabian, and B. Selvam, "Densification behaviour of Aluminium reinforced with Tungsten Carbide particulate Metal Matrix Composite processed by P/M," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, pp. 24–29, 2014.

- [45] P. Ashwath, P. Jeyapandiarajan, J. Joel, H. G. Prashantha Kumar, M. Anthony Xavier, N. Sumanth, C. Saketh Reddy, and Deepa, "Flexural studies of graphene reinforced aluminium metal matrix composite," *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 5, pp. 13459–13463.
- [46] P. Ashwath, J. Joel, H. G. G. P. Kumar, M. A. Xavier, A. Goel, T. Nigam, and M. Rathi, "Processing and characterization of extruded 2024 series of aluminum alloy," *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 5, pp. 12479–12483.
- [47] I. J. Shon, I. K. Jeong, I. Y. Ko, J. M. Doh, and K. Do Woo, "Sintering behavior and mechanical properties of WC-10Co, WC-10Ni and WC-10Fe hard materials produced by high-frequency induction heated sintering," *Ceramic International*, vol. 35, no. 1, pp. 339–344, 2009.
- [48] I. J. Shon, "High-frequency induction-heated consolidation of nanostructured WC and WC-Al hard materials and their mechanical properties," *The International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 64, pp. 242–247, 2017.
- [49] A. Lekatou, A. E. Karantzalis, A. Evangelou, V. Gousia, G. Kaptay, Z. Gácsi, P. Baumli, and A. Simon, "Aluminium reinforced by WC and TiC nanoparticles (ex-situ) and aluminide particles (in-situ): Microstructure, wear and corrosion behaviour," *Material&Design*, vol. 65, pp. 1121–1135, 2015.
- [50] I. J. Shon, "Effect of Al on sintering and mechanical properties of WC-Al composites," *Ceramic International*, vol. 42, no. 15, pp. 17884–17891, 2016.
- [51] K. Ravikumar, K. Kiran, and V. S. Sreebalaji, "Characterization of mechanical properties of aluminium/tungsten carbide composites," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 102, pp. 142–149, 2017.
- [52] S.-J. Oh, B.-S. Kim, and I.-J. Shon, "Mechanical properties and rapid consolidation of nanostructured WC and WC-Al₂O₃ composites by high-frequency induction-heated sintering," *The International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 58, pp. 189–195, 2016.
- [53] A. R. K. Swamy, A. Ramesha, G. B. V. Kumar, and J. N. Prakash, "Effect of Particulate Reinforcements on the Mechanical Properties of Al6061-WC and Al6061-Gr MMCs," *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol. 10, no. 12, pp. 1141–1152, 2011.
- [54] T. Muthuramalingam, W. Zhenyu, C. Fenghong, G. Anbuezhhiyan, and C. Chang, "Effects of Silicon Carbide and Tungsten Carbide in Aluminium Metal Matrix Composites," *Silicon*, pp. 1–8, 2019.
- [55] Z. Hu, G. Tong, D. Lin, C. Chen, H. Guo, J. Xu, and L. Zhou, "Graphene-reinforced metal matrix nanocomposites - A review," *Materials Science & Technology (United Kingdom)*, vol. 32, no. 9, pp. 930–953, 2016.
- [56] C. Y. Liu, Q. Wang, Y. Z. Jia, B. Zhang, R. Jing, M. Z. Ma, Q. Jing, and R. P. Liu, "Evaluation of mechanical properties of 1060-Al reinforced with WC particles via warm accumulative roll bonding process," *Materials&Design*, vol. 43, pp. 367–372, 2013.
- [57] K. Ravikumar, K. Kiran, and V. S. Sreebalaji, "Characterization of mechanical properties of aluminium/tungsten carbide composites," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 102, pp. 142–149, 2017.
- [58] D. S. S. E. Jacob Dhas, C. Velmurugan, K. L. D. Wins, and K. P. BoopathiRaja, "Effect of tungsten carbide, silicon carbide and graphite particulates on the mechanical and microstructural characteristics of AA 5052 hybrid composites," *Ceramic International*, vol. 45, no. 1, pp. 614–621, 2019.

- [59] B. Vijaya Ramnath, J. Jeykrishnan, S. Akilesh, B. Saravanan, and V. Krishna Vivek, "Investigation of Micro-structure and Mechanical Behaviour of Aluminum - Zircon Sand - Tungsten Carbide Metal Matrix Composites," *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 11, pp. 25553–25561.
- [60] Q. Liang, C. Mao, J. Yang, and J. Du, "Analyse of the interfacial reaction in WCp/2024Al composites," *Fenmo Yejin Jishu/Powder Metallurgy Technology*, vol. 27, no. 5, pp. 327–330, 2009.
- [61] S. Arivukkarasan, V. Dhanalakshmi, B. Stalin, and M. Ravichandran, "Mechanical and tribological behaviour of tungsten carbide reinforced aluminum LM4 matrix composites," *Particulate Science and Technology*, vol. 36, no. 8, pp. 967–973, 2018.
- [62] U. Çavdar and O. Akkurt, "The Effect of Sintering on the Microstructure, Hardness, and Tribological Behavior of Aluminum–Graphene Nanoplatelet Powder Composites," *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 57, no. 5–6, pp. 265–271, 2018.
- [63] L. C. Kumruoğlu, "Alüminyum-Magnezyum-Zirkonyum Alaşımına Grafen-Nano Karbon Esaslı Takviyelerin, Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi," *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, c. 7, s. 2, ss. 1–8, 2019.
- [64] C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, and J. Hone, "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene," *Science (80-.)*, vol. 321, no. 5887, pp. 385–388, 2008.
- [65] S. Kandemir, "Grafen Nanolevha Takviyesinin AlSi10Mg Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C Tasarım ve Teknoloji*, c. 6, s. 1, ss. 177–187, 2018.
- [66] P. B. Prakash, K. B. Raju, K. Venkatasubbaiah, and N. Manikandan, "Microstructure Analysis and Evaluation of Mechanical Properties of Al 7075 GNP's Composites," *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 6, pp. 14281–14291.
- [67] M. Anthony Xavier, N. Ranganathan, H. G. Prashantha Kumar, J. Joel, and P. Ashwath, "Mechanical properties evaluation of hot extruded AA 2024 -Graphene Nanocomposites," *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 5, pp. 12519–12524.
- [68] X. Gao, H. Yue, E. Guo, H. Zhang, X. Lin, L. Yao, and B. Wang, "Preparation and tensile properties of homogeneously dispersed graphene reinforced aluminum matrix composites," *Materials&Design*, vol. 94, pp. 54–60, 2016.
- [69] G. Li and B. Xiong, "Effects of graphene content on microstructures and tensile property of graphene-nanosheets / aluminum composites," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 697, pp. 31–36, 2017.
- [70] H. Zhang, C. Xu, W. Xiao, K. Ameyama, and C. Ma, "Enhanced mechanical properties of Al5083 alloy with graphene nanoplates prepared by ball milling and hot extrusion," *Materials Science and Engineering A*, vol. 658, pp. 8–15, 2016.
- [71] G. Li and B. Xiong, "Effects of graphene content on microstructures and tensile property of graphene-nanosheets / aluminum composites," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 697, pp. 31–36, 2017.
- [72] M. C. Şenel, M. Gürbüz, and E. Koç, "Fabrication and characterization of synergistic Al-SiC-GNPs hybrid composites," *Composites Part B Engineering*, vol. 154, pp. 1–9, 2018.
- [73] M. Rashad, F. Pan, A. Tang, and M. Asif, "Effect of Graphene Nanoplatelets addition on mechanical properties of pure aluminum using a semi-powder method," *Progress in Natural Science: Material International*, vol. 24, no. 2, pp. 101–108, 2014.

- [74] M. C. Şenel, M. Gürbüz, and E. Koç, “Mechanical and tribological behaviours of aluminium matrix composites reinforced by graphene nanoplatelets,” *Materials Science and Technology. (United Kingdom)*, vol. 34, no. 16, pp. 1980–1989, 2018.
- [75] M. Rashad, H. Lin, R. Pan, Z. Yu, F. Pan, and M. Asif, “Investigation on microstructural, mechanical and electrochemical properties of aluminum composites reinforced with graphene nanoplatelets,” *Progress in Natural Science: Material International*, vol. 25, no. 5, pp. 460–470, 2015.
- [76] M. Gürbüz, M. Can Şenel, and E. Koç, “The effect of sintering time, temperature, and graphene addition on the hardness and microstructure of aluminum composites,” *Journal of Composites Materials*, vol. 52, no. 4, pp. 553–563, 2018.