



**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN DEMİR
MATRİSLİ METALLERE GRAFEN VE GRAFİT
İLAVESİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Ahmet Nusrev TANRIVERDİ

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN
Arş. Gör. Dr. Yasin AKGÜL**

**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN DEMİR MATRİSLİ METALLERE
GRAFEN VE GRAFİT İLAVESİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Ahmet Nusrev TANRIVERDİ

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN
Arş. Gör. Dr. Yasin AKGÜL**

**KARABÜK
Ocak 2021**

Ahmet Nusrev TANRIVERDİ tarafından hazırlanan “TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN DEMİR MATRİSLİ METALLERE GRAFEN VE GRAFİT İLAVESİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN
Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Arş. Gör. Dr. Yasin AKGÜL
Tez İkinci Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 29/01/2021

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Halil DEMİR (KBÜ)
Üye : Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ)
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet AKKAŞ (KÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ahmet Nusrev TANRIVERDİ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN DEMİR MATRİSLİ METALLERE GRAFEN VE GRAFİT İLAVESİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Ahmet Nusrev TANRIVERDİ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN

Arş. Gör. Dr. Yasin AKGÜL

Ocak 2021, 43 sayfa

Toz metalürjisi (TM) yöntemiyle, döküm gibi geleneksel çelik üretim yöntemlerine kıyasla, karmaşık geometriye sahip parçalar daha düşük maliyet ile üretilebilmektedirler. Ayrıca, TM yöntemi, farklı alaşım kompozisyonlarının hassas olarak hazırlanmasına imkân vermektedir.

Çeliklerin mekanik özelliklerini etkileyen önemli faktörlerden biri, içerdikleri alaşım elementlerinin türü ve miktarıdır. Dolayısıyla, dayanım/ağırlık oranı daha yüksek olan çeliklerin geliştirilmesi için alaşımlama üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca, tribolojik performanslarını iyileştirmek için de yumuşak metal malzemelere sert partikül takviyesine ek olarak, bazı katı takviyelerin kendi kendini yağlama

özelliğinden yararlanmak da mümkündür. Son yıllarda, grafenin metal matrisli kompozitlerin hem mekanik hem de tribolojik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, TM yöntemiyle farklı oranlarda (%0,25, %0,5 ve %0,75) grafit ve grafen ilave edilen demir matrisli metal malzemeler üretilmiştir. Üretim aşamasında, belirlenen kompozisyonlarda, turbula marka üç eksenli karıştırıcı ile 2 saat karıştırılan tozlar, 700 MPa presleme basıncında sıkıştırılmış ve ardından 1200°C'de argon atmosferinde sinterleme gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapıları optik mikroskop ve elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Yoğunluk ölçümü gerçekleştirilmiş ve porozite miktarları hesaplanmıştır. Çekme ve aşınma testleri uygulanmıştır. Ayrıca, çekme ve aşınma test sonuçları ile ilişki kurmak adına numunelerin sertlik değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar, toz metalurjisi (PM) yoluyla çelik üretiminde, grafen kullanımının ağırlıkça %0,5 takviye oranına kadar grafitte kıyasla daha etkili olabileceğini göstermektedir. Ancak grafen üretimi oldukça zor ve maliyetlidir. Bu nedenle, maliyet-fayda analizi yapıldıktan sonra, grafenin daha yüksek mukavemetli PM çelik ürünleri için umut verici bir malzeme olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler : Toz metalürjisi, çelik, grafit, grafen, çekme testi, sertlik, aşınma özellikleri, mikroyapı.

Bilim Kodu : 91528

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

COMPARISON OF THE EFFECTS OF GRAPHENE AND GRAPHITE ADDITION ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF IRON MATRIX METALS VIA POWDER METALLURGY

Ahmet Nusrev TANRIVERDİ

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Manufacturing Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Akif ERDEN

Res. Assist. Dr. Yasin AKGÜL

January 2021, 43 pages

By powder metallurgy (TM) method, parts with complex geometry can be produced at a lower cost compared to traditional steel production methods such as casting. In addition, the TM method allows precise preparation of different alloy compositions.

One of the important factors affecting the mechanical properties of steels is the type and quantity of alloying elements they contain. Therefore, alloying studies are being carried out to develop steels with a higher strength-to-weight ratio. In addition to solid particle reinforcement to soft metal materials, it is also possible to take advantage of the self-lubricating property of some solid reinforcements to improve their tribological performance. In recent years, graphene has been used to improve both the mechanical and tribological properties of metal matrix composites.

In this thesis study, iron matrix composites which added graphite and graphene in different proportions (0.25%, 0.5% and 0.75%) were produced via TM method. For production, powders mixed with three-axis mixer for 2 hours were compressed at a pressing pressure of 700 MPa and then sintered in an argon atmosphere at 1200 °C. The microstructures of the produced samples were studied using an optical microscope and electron microscope. Density measurement was performed and porosity amounts were calculated. Tensile test and abrasion test were applied. In addition, hardness values of the samples were determined to relate to tensile and wear test results.

Results show that using graphene in steel production via powder metallurgy (P/M) could be effective compared to graphite up to 0.5 wt.% reinforcement ratio. However, graphene production is quite difficult and costly. Therefore, it is thought that graphene can be a promising material for higher strength P/M steel products after the cost-benefit analysis was made.

Keywords : Powder metallurgy, steel, graphite, graphene, tensile test, hardness, wear properties, microstructure

Science Code : 91528

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocalarım Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN ve Arş. Gör. Dr. Yasin AKGÜL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Karakterizasyon çalışmalarımı yürüttüğüm Demir Çelik Enstitüsünün değerli ekibine şükranlarımı sunarım. Çalışma imkânlarından faydalandığım Teknoloji Fakültesi Dekanlığı, İmalat Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
TOZ METALÜRJİSİ	3
2.1. TOZ METALÜRJİSİ PARÇA ÜRETİMİ	3
2.2. TOZ METALÜRJİSİ PAZAR DURUMU.....	6
BÖLÜM 3	8
ÇELİKLER	8
3.1. ÇELİK İLE İLGİLİ KAVRAMLAR	8
3.2. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	9
3.2.1. Yapısal Çelikler	10
3.2.2. İnşaat Çelikleri.....	10
3.2.3. Dış yüzeyi Sertleştirilmiş Çelikler.....	10
3.2.4. Geliştirilmiş Çelikler	10
3.2.5. Yüksek Mukavemetli Çelikler.....	11
3.2.6. Yay Çelikleri.....	11
3.2.7. Rulman Çelikleri.....	11

	<u>Sayfa</u>
3.2.8. Otomat Çelikler	11
3.2.9. Aşınmaya Dayanıklı Çelikler	12
3.2.10. Korozyona Dayanıklı (Paslanmaz) Çelikler	12
BÖLÜM 4	13
KOMPOZİT MALZEMELER.....	13
4.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI.....	13
4.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler.....	14
4.1.2. Metal Matrisli Kompozitler	15
4.2. GRAFİT VE GRAFEN	16
4.2.1. Grafit.....	16
4.2.2. Grafen	18
BÖLÜM 5	21
DENEYSEL METOD	21
5.1. MALZEMELER.....	21
5.2. ÜRETİM YÖNTEMİ	22
5.3. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI	24
BÖLÜM 6	26
BULGULAR VE TARTIŞMA	26
6.1. NUMUNELERİN MİKROYAPI ANALİZİ.....	26
6.2. NUMUNELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	30
6.3. NUMUNELERİN AŞINMA DAVRANIŞLARI.....	33
BÖLÜM 7	36
SONUÇLAR	36
KAYNAKLAR	37
ÖZGEÇMİŞ	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 5.1.	Tozların SEM resimleri; a) Grafen, b) Grafit ve c) Demir.....	22
Şekil 5.2.	Deneysel çalışmada proses adımları.	23
Şekil 5.3.	Sinterlemede kullanılan atmosfer kontrollü fırın görüntüsü.	24
Şekil 5.4.	Yüzey pürüzlülüğü cihazında yapılan örnek bir ölçümün görüntüsü.	25
Şekil 6.1.	a) Fe-0.25 Gr, b) Fe-0.25 GNP, c) Fe-0.50 Gr, d) Fe-0.50 GNP, e) Fe-0.75 Gr, f) Fe-0.75 GNP optik görüntüleri.....	27
Şekil 6.2.	a) Fe-0.75 Gr ve b) Fe-0.75 GNP için SEM-Haritalama sonuçları.....	28
Şekil 6.3.	Fe-0.50 Gr için SEM-EDX sonucu.	29
Şekil 6.4.	Fe-0.50 GNP için SEM-EDX sonucu.	29
Şekil 6.5.	Fe-0.25 Gr için SEM-EDX sonucu.	30
Şekil 6.6.	a) Fe-0.25 Gr, b) Fe-0.25 GNP, c) Fe-0.50 Gr, d) Fe-0.50 GNP, e) Fe-0.75 Gr, f) Fe-0.75 GNP gerilme-uzama eğrileri.	31
Şekil 6.7.	Numunelerin akma dayanımı ve sertlik değerleri.	32
Şekil 6.8.	a) Fe-0.25 Gr, b) Fe-0.25 GNP, c) Fe-0.50 Gr, d) Fe-0.50 GNP, e) Fe-0.75 Gr, f) Fe-0.75 GNP gerilme-uzama eğrileri.	33
Şekil 6.9.	Numunelerin aşınma oranı.	34
Şekil 6.10.	Numunelerin aşınmış yüzeyleri a) Fe-0.25 Gr, b) Fe-0.25 GNPs, c) Fe-0.50 Gr, d) Fe-0.50 GNPs, e) Fe-0.75 Gr, f) Fe-0.75 GNPs.	35
Şekil 6.11.	a) Fe-0.25 Gr ve b) Fe-0.25 GNP aşınmış yüzeylerinin SEM-EDX sonuçları.	35

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1. Deney için hazırlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.....	23
Çizelge 6.1. Ortalama tane boyutları, perlit fazlarının hacim oranı ve numunelerin yüzde yoğunlukları.	30

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- dak : Dakika
mm : Milimetre
 μm : Mikrometre
MPa : Megapaskal
s : Saniye
T : Sıcaklık
y : Akma gerilmesi

KISALTMALAR

- SEM : Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
Ni : Nikel
W : Tungsten
Mo : Molibden
V : Vanadyum
Nb : Niobyum
C : Grafit
Fe : Demir
GNP : Graphene Nanoplatelets (Grafen Nanoplateletler)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Toz metalurjisi imalatı zor, küçük hassas parçaların nihai şekilde veya son şekline yakın olarak ekonomik üretiminin gerçekleştirildiği metal şekillendirme veya üretim yöntemi olarak tanımlanabilir. Toz metalurjisi (TM) ürünlerinin çoğu, makine ve imalat mühendisliği için yapısal parçalardır. Avrupa Toz Metalurjisi Derneği (ETMA) Başkanı'na göre, 2016 yılında Avrupa'da toplam toz metalürjisi ile ürün üretimi 248 bin ton olarak gerçekleşmiştir ve bunun % 80'ini demir matrisli yapısal parçalar oluşturmuştur [1]. Dolayısıyla mühendisler, TM yöntemleri kullanarak üretilen ürünlerin yelpazesini genişletmek üzerine çalışmalar yürütmektedir. Hali hazırda presleme ve sinterleme, yapısal parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Toz metalurjisi yönteminde, geleneksel döküm yöntemine göre istenilen özelliklerin daha kapsamlı ve kontrollü olarak üretimi gerçekleştirilmektedir.

Karbon çelikleri nispeten düşük maliyetlerinden dolayı, inşaat, makine parçaları (miller, civatalar, pense vb.), ulaşım gibi birçok farklı uygulamada kullanılırlar [2]. Karbon çelikleri, genel olarak incelendiğinde kapsadıkları karbon oranına göre üç bölüme ayrılırlar. %0.25 oranına kadar karbon içeren çelikler düşük karbonlu, %0.25-0.55 oranı arasında karbon içeren çelikler orta karbonlu ve %0.55-2 oranı arasında karbon içeren çelikler ise yüksek karbonlu olarak ifade edilirler. İçerdikleri karbon oranına çeliklerin mekanik özellikleri değişim göstermektedir [3].

Grafit, mekanik özelliklerinin yanı sıra tribolojik performanslarda da iyileştirme için çeşitli metal alaşımlarına eklenmiştir. Grafen ile güçlendirilmiş metal matrisli kompozitler de, muadillerine kıyasla mekanik davranışlarında önemli gelişme gösterirler. Grafit gibi, grafen de tribolojik uygulamalar için metal matrislere eklendiğinde yağlama özelliklerini iyileştirmektedir [4,5].

Bu çalışmada demir matris içerisine farklı oranlarda grafit ve grafen ilave edilerek toz metal elik parçalar üretilmiştir. Üretilen parçaların mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Grafit ve grafenin etkileri karşılaştırılmış ve optimum grafit veya grafen ilavesi belirlenmiştir. Ayrıca, literatür incelendiğinde daha önce demir matrisli metalik malzemelere grafen ilavesi yapılmadığı tespit edilmiştir.

Özetle, bu çalışma toz metal parça üretiminde ürün geliştirmeye yönelik bilgi birikimi ortaya koyacaktır. Böylelikle, elde edilen bilgi birikimi ile sanayimizde elik malzemelerinin üretiminin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

BÖLÜM 2

TOZ METALÜRJİSİ

Toz metalurjisi, metal, seramik, kompozit tozların işlemlerden geçirilerek yararlı mühendislik parçalarına dönüştürülme işlemidir. Genel olarak ifade etmek gerekirse tozlar istenilen kompozisyonda tartılır, karıştırılır, sinterlenir ve ihtiyaç olması durumunda yüzey işleme, ikinci presleme ve birleştirme gibi ikincil işlemlere tabi tutularak bitmiş ürün elde edilir.

TM parçaları sonraki talaşlı işlemlere ihtiyacı ortadan kaldırarak, son şekil veya son şekle yakın olarak seri üretilebilir. TM işlemi çok az malzeme zayi eder. Başlangıç tozunun yaklaşık % 97'si mamule dönüştürülür. TM parçaları gözenekli metal parçaları imal etmek için belirli bir gözeneklilik seviyesinde yapılabilir. Filtreler, yağ emdirilen yataklar ve dişliler üretilen parçalara örnek olarak verilebilir. Diğer yöntemlerle işlenmesi zor bazı metaller toz metalurjisiyle şekillendirilebilir. Örneğin, ampullerdeki Tungsten filamentler TM ile üretilir. TM ile üretilen belirli alaşım kombinasyonları ve sermetlerin, başka bir yöntemle imal edilmesi daha zordur. TM, boyut kontrolü bakımından çoğu döküm yönteminden daha üstündür. TM imalat yöntemleri, ekonomik üretim için otomatize edilebilir.

2.1. TOZ METALÜRJİSİ PARÇA ÜRETİMİ

1900'lü yılların başında ilk modern toz metalurjisi ürünü olarak elektrik lambası için tungsten filament üretilmiştir. 1980'li yıllara gelindiğinde ise uçak türbin motor parçalarının üretimi yapılmıştır. Günümüzde ise TM, çok gözenekli metalik filtrelerden, kendiliğinden yağlamalı yataklara ve yoğunluğu kontrol edilen toz metalurjisi parçalara kadar geniş bir yelpazede yayılmaktadır.

Bu yöntem kullanılarak elde edilen malzemeler, mekanik özelliklerde bir azalmaya yol açan çok sayıda gözenek içerir [6]. Bu nedenle, üretilen toz ürün yelpazesinin genişletilmesi; statik, dinamik ve önemli etkilerin etkisi altında çalışan yüksek yoğunluklu parçaların üretimi için verimli teknolojilerin geliştirilmesi ile ilişkilidir. Bu teknolojiler, gözenekli iş parçalarının [7,8] basınç ve sıcak işleme yöntemlerinin kullanımını içeren teknolojileri içerir. İçten yanmalı motorların bağlantı çubukları ve araba dişli kutusunun senkronizör halkaları, gözenekli boşlukların sıcak preslenmesiyle üretilir [9]. Dişliler, mandallar, vb. pres, sinterleme veya sıcak presleme yöntemleriyle üretilen parçalar önemli kalıntı gözenekliliğe sahiptir. Bu, ek yüzey işleminin kullanılmasını gerekli kılar. Sıcak izostatik presleme gibi yöntemler tarafından üretilen parçaların malzemesinin yoğunluğu, kompakt parçaların yoğunluğuna yaklaşır. Ayrıca, toz alaşımların kırılma oluşturma eğiliminin ana nedenlerinden biri, hem partikül hacminde hem de yüzeylerinde artan safsızlık içeriğidir. TM ile üretilen parçalar, özellikle sıcak deformasyon yöntemleri kullanılarak elde edilenler olmak üzere, toz malzemelerde kristaller arası kırılmanın gelişimi için koşulları en aza indirmek için etkili yöntemler geliştirmeyi amaçlayan daha fazla araştırma ihtiyacına işaret etmektedir.

Toz çeliğin mikroyapısı ve oluşum mekanizması, geleneksel metalurjik işleme çeliklerinin mikroyapısından önemli ölçüde farklıdır [15]. Fark sadece toz çeliklerin karakteristik özelliği olan gözeneklerin varlığından kaynaklanmamaktadır. Ayrıca oksitlerle kirlenebilmesi ve yapısal homojenlik, toz çeliklerin mikroyapısının bir başka karakteristik özelliğidir. Mikroyapısal heterojenlik, teknolojik sürecin uygulanmasının özellikleriyle ilişkilidir. Toz çeliklerin alaşımlanması için en yaygın yöntemlerden biri, bileşenlerin alaşım tozlarının matris toz ile karıştırılmasıdır. Karıştırıldıktan sonra karışım sıkıştırılır ve ardından sinterlenir. Ön alaşımlı tozlar, geleneksel pres - sinterleme teknolojisi kullanılan ürünlerin üretiminde her zaman kullanılamaz. Bunun nedeni, katı ferrit çözeltilisinin sertleşmesi ve tozun sıkışmasının bozulmasıdır. İyi bir sıkıştırma sağlamak için, alaşımsız veya düşük alaşımlı demir tozları (ağırlıkça <math>< 3\%</math>) kullanılır. Alaşım elementleri ve karbon, sinterleme sırasında demir partiküllerine difüzyonla dağıtılır. Alaşım elementlerinin homojen dağılımı için, toz partiküllerinin yüzeyini kaplayan ve alaşım elementlerinin kütle transferini engelleyen oksit tabakası kaldırılmalıdır. Bu, hidrojen veya karbon monoksit gibi

gazlı indirgeyici maddelerle yapılabilir. Bununla birlikte, maliyetleri ve / veya saflıkları genellikle sınırlayıcı faktördür. Aynı zamanda, karbon, bir alaşım elementi işlevine ek olarak, yüksek sıcaklıklarda etkili bir indirgeme ajanı rolünü oynayabilir. Karbonun çözünme hızı, toz parçacıklarının boyutundan ve yapısından etkilenir. Yüksek oranda dağılmış grafit parçacıkları en yüksek reaktiviteye sahiptir. Mekanik özelliklerin optimal kombinasyonu, ağırlıkça 0,45-0,55 karbon içeriğinde gözlemlenir.

Dünya pazarında çok çeşitli demir tozları ve düşük alaşımlı çelikler bulunmasına rağmen, bazı kuruluşlar ve firmalar, bunların tamamen veya kısmen bağımsız olarak geliştirilmiş malzemelerle değiştirilmesi olasılığını incelemek için araştırmalar yapmaktadır. Şu anda, endüstriyel üretim uygulamasında, toz çeliklerin alaşımlanması için üç yöntem kullanılmaktadır. Bunlar, demir tozu ve alaşım elementlerinin karışımlarının elde edilmesi, daha sonra indirgeme ve öğütme ile demir tozları ve alaşım elementlerinin oksit karışımlarının elde edilmesi ve alaşım elementlerinin tozlarının veya oksitlerinin homojen alaşımlı bir demir-molibden alaşım tozu ile karıştırılması şeklinde sıralanabilir. Parçacıklar arası bağ kalitesini iyileştirmek ve üretim sonrası parçaların kırılma eğilimini azaltmak için etkili yöntemlerin geliştirilmesi, bugün araştırmacıların karşı karşıya olduğu önemli problemdir [16,17].

Toz çelikler üretilirken, kompakt çeliklerin üretiminde kullanılan alaşım elementleri kullanılır. Bununla birlikte, sinterleme sırasında alaşım elementinin matriste çözünme derecesi sadece çok bileşenli sistemlerin sinterlenmesi sırasında meydana gelen difüzyon işlemleriyle değil, aynı zamanda nem ve gazların uzaklaştırılması ve oksitlerin azaltılmasıyla ilişkili hacimsel değişikliklerle de belirlendiğinden, toz malzemelerin alaşımlanması birtakım özelliklere sahiptir. Bazı durumlarda, pahalı alaşım elementlerinin maliyetinden kaçınabilir ve mikroalaşımlama veya istenilen özellikleri sağlayan katkı maddelerin kullanılması ile istenilen özelliklerde parça üretimi sağlanabilir [18].

2.2. TOZ METALÜRJİSİ PAZAR DURUMU

Şu anda, enerji taşıyıcılarının fiyat seviyesi Batı Avrupa'da düşük kalmaktadır ve bu da elektrik için düşük tarifelere yol açmaktadır. Bu da genel olarak endüstriyel üretimin ve özellikle de toz metalurjisinin büyümesini teşvik etmektedir [10,11]. 2016 yılında, küresel erimiş çelik üretim seviyesi yüksek kalmıştır ve bu üretimin neredeyse yarısı Çin tarafından gerçekleştirilmiştir. Korozyona dirençli ve ısıya dayanıklı çeliklerin dünya üretim hacmi büyümektedir. Çin'in payı yaklaşık % 60 civarındadır. Çin'in baskın rolü, 2016 yılında bu ülkedeki otomobil üretiminin, otomotiv endüstrisinin eski liderleri olan ABD ve Japonya'nın üretim hacimlerinden 2 kat daha fazla olan 30 milyon adede yaklaşması gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Otomotiv endüstrisinin lokomotif olması ve dünyada toz metalurji ürünlerinin ana tüketicisi olması nedeniyle, toz ürünlerin üretiminde artış vardır.

Araba üretiminin yapısında değişiklikler olmaktadır ve gittikçe daha fazla sayıda yeni tip elektrikli araç üretilmektedir. Hem hibrit hem de tamamen elektrikli araçların dünya çapında filosu zaten 2 milyonu aşmış durumdadır. Küresel pazarda ise her iki türdeki elektrikli araçların payı küçüktür (700 milyon adet) ve yalnızca % 0,3'tür. Ancak, otomotiv üretiminde dünya liderleri (Volkswagen, Toyota, General Motors) ve diğer üreticiler içten yanmalı motorlu ve dizel motorlu otomobillerin üretiminin sona erdiğini ve elektrikli araç üretimine tam bir geçiş olduğunu ilan etmektedirler [1]. Dolayısıyla, toz metalurjisi ürünlerinin dünya tüketimindeki payı genişlemektedir. Mevcut durumda, önemli tüketiciler arasında kağıt hamuru ve kağıt üretimi (% 2), otomotiv endüstrisi (% 26), havacılık ve uzay mühendisliği (% 12) ve inşaat (% 7) sektörleri bulunmaktadır. Toz metalurjisi yöntemleriyle tıbbi ekipman imalatında da artış vardır (% 4). Avrupa toz metalurjisi pazarı, 2016'da, 2015 yılına göre % 6 artışla 248 bin tona ulaşmıştır. 2015 yılında toz metalurjisi üretimindeki büyüme 2014 yılına göre 2 kat daha düşük (% 3) olmuştur. Aynı zamanda 2016 yılında demir esaslı yapısal parçaların payı fiziksel olarak % 80 iken parasal olarak sadece % 28 olmuştur. Bunun nedeni, özellikle sert alaşımlar ve elmas aletlerle karşılaştırıldığında, demir tozları 1 kg ürün başına daha düşük fiyat olmasıdır.

Haziran 2018'de San Antonio'daki Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı'nda Toz Metalurjisi Endüstrileri Federasyonu Başkanı Sweet JF'nin yaptığı sunuma göre, Kuzey Amerika'da metal tozlarının ve ürünlerinin satışları ılımlı olma eğilimindedir [12]. 2017 yılında bir önceki yıla göre yaklaşık % 2 daha fazla 386.080 ton demir tozu ve buna dayalı 354.570 ton ürün üretilmiştir. Sweet D.F. şirketlerin yeni geliştirmeleri arasında gazla püskürtülen ilave alaşım tozları, gelişmiş işlenebilirlik tozları, manyetik malzemeler yer aldığını belirtmiştir. Bazı üreticiler 2019-2020'de toz ürün üretiminde iki basamaklı (% olarak) bir büyüme öngörmektedir. Hafif kamyonlar, toz bileşenlerin kullanımında liderler arasındadır. Özellikle 2017 yılında Ford tarafından üretilen F-150 kamyon, bir tür rekor olan 32,46 kg ağırlığındaki toz parçalarla donatılmış durumdadır. Höganäs AB (İsveç) temsilcileri sıcak preslemeye alternatif olabilecek yüksek sıcaklıkta (1250 ° C ve üzeri) sinterlemeye vurgu yapmaktadır [10,11,13]. Ayrıca, özellikle sinterlemeden önce soğuk preslenmiş bir kütüğün yoğunluğunun en az 7.0 gr/cm³ olması gerektiği ifade edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta sinterleme sırasında çekme % 3-4'tür, bu da belirli bir doğrulukta ürünlerin elde edilmesini zorlaştırır [14].

BÖLÜM 3

ÇELİKLER

3.1. ÇELİK İLE İLGİLİ KAVRAMLAR

Toz çelik, karbon (% 2,14'e kadar) ve diğer elementlerle işlenmiş (dövülebilir) bir demir alaşımıdır. Esas olarak oksijen konvertörlerinde, açık ocak fırınlarında ve elektrikli fırınlarda çelik hurda ile pik demir karışımından elde edilir. % 2.14'ten fazla karbon içeren karbonlu bir demir alaşımına dökme demir denir [19]. Bunun yanında %0,8 oranında karbon içeren çeliklere ötektoid çelik adı verilir. Bunun sebebi, bu bileşimdeki östenitin yavaş halde ötektoid sıcaklığın altına soğutulması sırasında tam olarak sementit ve α ferritten oluşan bir yapının meydana gelmesidir. %0,8'den az karbonu içermesi halinde ötektoid altı çelik, %0,8'den fazla karbonu içermesi halinde ise ötektoid üstü çelik adını alırlar [3].

Çeliğin kullanım alanları: bina yapıları, makine parçaları, elastik elemanlar, aletler ve özel çalışma koşullarıdır. Başlıca nitelikleri ise ısıya dayanıklı, dayanımlı (çalışma sırasında yeterli gerilmelere dayanma yeteneği), plastisite (hem yapıların üretimi sırasında hem de operasyonları sırasında aşırı yük yerlerinde yeterli deformasyonlara zarar vermeden dayanma yeteneği), viskozite (dış kuvvetlerin çalışmasını emme, çatlakların yayılmasını önleme yeteneği), esneklik, sertlik, yorulma, çatlama direnci, soğuk direnç ve ısı direnci olarak sıralanabilir [19]. Örneğin; bilyalı rulmanlı krom çelikler, rulman üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilyalı rulman çelikleri yüksek sertliğe, mukavemete ve aşınma direncine sahiptir. Yay çelikleri ise malzemenin elastik deformasyon bölgesinde çalışır. Aynı zamanda, çoğu döngüsel yüklere maruz kalır. Bu nedenle, yay çelikleri için temel gereksinimler, yüksek elastikiyet, akma dayanımı, dayanıklılık değerlerinin yanı sıra gerekli plastisite ve ani kırılmaya karşı direnci arttırmaktır [19]. Başka bir çelik çeşidi olan yüksek mukavemetli çelikler, yeterli süneklik, yüksek yapısal mukavemet, çentiklere karşı

düşük hassasiyet, ani kırılmaya karşı yüksek direnç, iyi kaynaklanabilirlik ile yüksek mukavemete sahiptir [19].

3.2. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Çeliklerin ve alaşımların sınıflandırılması şu şekilde yapılır. Bunlar, kimyasal bileşime göre veya kaliteye göre (üretim yöntemi ve zararlı safsızlıkların içeriği ile ilgili) göre sınıflandırılabilir. Kimyasal bileşimlerine göre karbonlu çelikler, karbon içeriğine bağlı olarak şu şekilde gruplara ayrılır. Bunlar, düşük karbonlu (% 0,25 karbondan az), orta karbonlu (% 0,25 –0,55 karbon), yüksek karbonlu (% 0,55' ten fazla karbon içeren) çelikler olarak ifade edilebilir [19].

Çelikte alaşım elementi çeliğin teknolojik özelliklerini geliştirmek için katılır. Ayrıca alaşımlı çelik ise sıradan safsızlıklara ek olarak, belirli kombinasyonlarda Cr, Ni, Mo, W, V, Al, B, Ti, Mn, Si vb. alaşım elementlerini içeren çeliklere denir [19].

Alaşımlı çeliklerde, kimyasal bileşim sınıflandırması, alaşım elementlerinin toplam yüzdesi ile belirlenir. Bunlar, düşük alaşımlı (% 2,5' ten az alaşım elementi içeren), orta alaşımlı (% 2,5 ile 10 arasında olan) ve yüksek alaşımlı (% 10' dan fazla alaşım elementi içeren) çelikler olarak ifade edilebilir.

Çeliğin safsızlık içeriğine göre sınıflandırılması ise kaliteye göre dört gruba ayrılır. S ve P'nin % oranı, sıradan kalite (özel) çelikte 0,06'dan yüksek 0,07'den az içerirken, kalite çelikte 0,04-0,035'ten düşük oranda içerir. Ayrıca, yüksek kalite çelikte 0,025'ten düşük; ekstra yüksek kalite çelik ise 0,015'ten düşük olmalıdır. Kimyasal bileşimdeki sıradan kalitede (sıradan) çelikler, % 0,6 oranına kadar karbon içeren karbon çelikleridir. Sıradan kalitede çelikler, en ucuz olanları, mekanik özelliklerinde diğer sınıf çeliklere göre daha düşük olan çelik grubudur. Kaliteli çelik ise genellikle açık ocak fırınlarında eritilirler, ancak eritme ve döküm işlemleri için daha katı gereklilikler vardır [19].

Deoksidasyon derecesine ve kalıptaki metalin katılma niteliğine göre sıradan kalitede ve yüksek kalitede karbon çelikleri sakin, yarı sakin ve kaynar olarak ayrılır.

Bu çeşitlerin her biri oksijen, nitrojen ve hidrojen içeriği bakımından farklılık gösterir. Bu nedenle, kaynar çelikler bu elementlerin en büyük miktarını içerir [19].

Yüksek kaliteli çelik esas olarak elektrikli fırınlarda ve özellikle yüksek kaliteli olanlar için elektro cüruf yeniden eritme (ESR) ve gaz içeriği için artan saflığı elde edebilen diğer gelişmiş yöntemler kullanılması ile elektrikli fırınlarda eritilerek elde edilir. Bu çelikler sadece alaşımlı eritilir. Elektrikli fırınlarda ve özel elektrometalurji yöntemler kullanılarak üretilirler. % 0.01'den fazla kükürt ve % 0.025'ten fazla fosfor içermezler [19].

3.2.1. Yapısal Çelikler

Yapı çelikleri genellikle soğuk presleme, yüzeyi sertleştirilmiş çelikler, yüksek mukavemetli çelikler, yay çelikleri, bilyalı rulman çelikleri, otomatik çelikler, korozyona dayanıklı çelikler, ısıya dayanıklı çelikler, aşınmaya dayanıklı çelikler olarak ifade edilebilir [19].

3.2.2. İnşaat Çelikleri

İnşaat çelikleri, normal kalitede karbon çelikleri ve düşük alaşımlı çelikleri içerir. Çeliklerin yapımı için temel gereksinim, iyi kaynaklana birliktir [19].

3.2.3. Dış yüzeyi Sertleştirilmiş Çelikler

Yüzey aşınması koşulları altında çalışan ve dinamik yüklere maruz kalan parçaların imalatında yüzeyi sertleştirilmiş çelikler kullanılır. Bu çelikler, karbonlu çelikleri, % 0,1-0,3 karbon içeren düşük karbonlu çelikleri ve bazı alaşımlı çelikleri (18X2N4VA ve 18XGT gibi) içerir [19].

3.2.4. Geliştirilmiş Çelikler

Geliştirilmiş çelikler, iyileştirmeye tabi tutulan çelikleri içerir. Bu çelikler ısıl işlem, su verme ve yüksek tavlama ile oluşur. Bunlar arasında orta karbonlu, krom çelikler,

borlu krom çelikler, krom-nikel, krom-silikon-manganez, krom-nikel-molibden çelikler yer almaktadır [19].

3.2.5. Yüksek Mukavemetli Çelikler

Yüksek mukavemetli çelikler, kimyasal bileşim ve ısıl işlem seçimi ile geleneksel yapısal çeliklerin yaklaşık iki katı gerilme mukavemetine ulaştığı çeliklerdir. Bu güç seviyesi orta karbon alaşımlı çeliklerde elde edilebilir [19].

3.2.6. Yay Çelikleri

Yay çelikleri yüksek elastik sınıra, kırılma ve yorulmaya karşı yüksek dirence sahip oldukları için elastik özelliklerini uzun süre korurlar. Yay çelikleri, karbon çelikleri ve elastik sınırı artıran silikon, manganez, krom, tungsten, vanadyum, bor gibi elementlerle alaşımlı çelikleri içerir [19].

3.2.7. Rulman Çelikleri

Rulman çelikleri yüksek mukavemete, aşınma direncine ve dayanıklılığa sahiptir. Genellikle bilyalı rulman çelikleri, yüksek karbon içeriği (yaklaşık %1) ve krom varlığı ile karakterize edilir [19].

3.2.8. Otomat Çelikler

Otomat çelikler, seri üretimin kritik olmayan parçalarının (vida, civata, somun vb.) üretiminde kullanılır. Bu çeliklerde kesme yoluyla işlenebilirliği artırmak için etkili bir metalurjik teknik, kısa ve kırılğan talaşların oluşumunu destekleyen ve ayrıca kesici ile talaşlar arasındaki sürtünmeyi azaltan kükürt, selenyum, tellür ve kurşununun çeliğe ilave edilir [19].

3.2.9. Aşınmaya Dayanıklı Çelikler

Aşınmaya dayanıklı çelikler, sürtünme, yüksek basınç ve darbeler (demiryolu raylarının ara parçaları, paletli araçlar, kırıcı yanakları, hafriyat makinelerinin kepçeleri, ekskavatör kepçeleri vb.) altında çalışan parçalar için kullanılır [19].

3.2.10. Korozyona Dayanıklı (Paslanmaz) Çelikler

Korozyona dayanıklı (paslanmaz) çelikler, yüksek krom içeriğine (en az % 12) ve nikele sahip alaşımlı çeliklerdir. Krom, ürün yüzeyinde koruyucu (pasif) bir oksit film oluşturur. Karbon, paslanmaz çeliklerde istenmeyen bir elementtir ve krom ne kadar fazlaysa korozyon direnci o kadar yüksek olur [19]. Bu amaç için en tipik alaşımların yapısı şu şekilde olabilir. Bunlar, ferrit, karbür ve martensitik yapıli çeliklerdir. Bu çelikler zayıf agresif ortam için (hava, su, buhar) kullanılır. Bir diğeri ise ferritik yapıli çeliklerdir. Bu çelikler ise nitrik ve fosforik asit çözeltileri için kullanılır. Ayrıca diğeri bir çelik ise östenitik yapıli çeliklerdir. Bu çelikler ise deniz suyunda, organik ve azot ortamı için kullanılır [19].

BÖLÜM 4

KOMPOZİT MALZEMELER

4.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Modern dünyada, genellikle cihaz yapımı, sadece geleneksel yapısal malzemeleri (çelik, dökme demir, pirinç, alüminyum vb.) kullanarak gerçekleştirilmez. Cihaz yapımında geleneksel yapısal malzemelerin yanı sıra bu malzemelere kıyasla nispeten düşük özgül ağırlığa sahip yüksek sıcaklıklarda süper sertlik, süneklik, akma ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklere sahip kompozit malzemelerde birlikte kullanılır [20].

Kompozit malzemeler, belirli ihtiyaca göre uyarlanabilen esnek tasarım avantajına sahiptir. Kompozitler, ikiden fazla fazdan oluşan bir bileşik olarak düşünülebilir: bir fazı süreklidir, yani bir matristir, diğeri ise süreksizdir, yani takviye fazıdır [21]. Çoğu zaman, takviye elemanlarının boyutu mikroskobiktir, çünkü fiber veya parçacık ne kadar ince olursa, kompozitin mekanik özellikleri o kadar yüksektir. Kompozit matrisleri, metaller ve alaşımlarının yanı sıra organik ve inorganik polimerler, seramik, karbon ve diğeri malzemeler temelinde yapılabilir ve fiyatları mekanik özelliklerine bağlıdır. Kompozit malzemelerde mekanik özellikler ne kadar iyi olursa, matris o kadar pahalıdır. Matris özellikleri, kompozit üretim sürecinin teknolojik parametrelerini ve operasyonel özelliklerini (yoğunluk, özgül mukavemet, çalışma sıcaklığı, yorulma kırılmasına karşı direnç ve agresif ortam) belirler.

Dolgu maddeleri veya takviye elemanları kompoziti güçlendirmek için kullanılır ve yüksek mukavemetli çelikten, molibdenden, tungstenden, diğeri metallere ve bunların alaşımlarından, bor, karbon, camdan lifler, oksitlerden, monokristaller, alüminyum ve silikon nitrürlerden ve diğeri bileşiklerden yapılabilir. Kompozit malzemeler birkaç ana özelliğe göre sınıflandırılabilir. Bunlar, matris malzemesi ve

takviye bileşenleri ile, yapı - geometri (morfoloji) elde etme yöntemi ve uygulama alanları olarak sıralanabilir [22]. Bununla birlikte, kompozitlerin fizikokimyasal özelliklerinin daha iyi anlaşılması için, bunları mikroyapılarını oluşturan fazların morfolojisine veya bileşenlerin geometrisine göre sınıflandırılabilir [22]. Bunlar, lifli kompozit malzemeler, bir matris içindeki liflerden oluşan malzemeler (kompozit malzemelerden oluşan matris, bağlayıcı, yapışkan veya birleştirici malzeme), bir matrisle bağlanmış çeşitli malzemelerden oluşan katmanlardan oluşan lamine (katmanlı) kompozit malzemeler, dispersiyonla sertleştirilmiş kompozit malzemeler, ilk üç türün bir kısmının veya tamamının kombinasyonu olarak ifade edilebilir. Kompozit malzemelerde yapının sağlamlığını ve sağlamlığını sağlamaya ek olarak, matris gerekli plastikliğe sahip olmalı ve kompozitin amaçlandığı sıcaklık aralığında da istenilen özellikleri korumalıdır. 200 ° C'nin altındaki sıcaklıklarda kullanılan kompozitlerin üretimi için polimer matrisler kullanılır.

4.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler

Günümüzde cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Cam elyafı, yüksek mukavemete, termal şok ve değişken yüklere karşı dirence ve korozyon direncine sahiptir. Takviye elemanı olarak iplikler, ipler veya kumaşlar şeklindeki sürekli lifler kullanılabilir. Lamine cam elyaf esaslı kumaşlara fiberglas denir. Çok katmanlı cam kumaşların kullanılması plastiğin ara katman mukavemetini artırır, boş ürünün montajını basitleştirir ve manuel işlemlerin sayısını azaltır. Bu tür kompozitler, gemi yapımı, havacılık, uzay teknolojisi, otomotiv endüstrisi ve bazı ev aletlerinin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bağlayıcı olarak hem ısıyla sertleşen reçineler (epoksi, polyester, fenol-formaldehit vb.) hem de termoplastik reçineler kullanılır.

Yüksek mukavemetli karbon katkılı CFRP kompozitler, en umut verici kompozit malzemeler arasında yer alır. Yüksek mukavemete ve sertliğe, 570 ° K'ye kadar ısı direncine, düşük sıcaklıkta doğrusal genleşme katsayısına (TCLE) ve korozyon ortamına karşı dirence sahiptirler. Takviye edici elemanlar olarak, iplikler, demetler, kumaşlar veya dokumasız malzemeler şeklinde sürekli lifler kullanılırlar. Matrisler epoksi, poliamid, polyester veya diğer reçinelerden yapılır. CFRP'ler, örneğin Ruslan, Su-

30MK, Su-34, S-37 Berkut, MIG-29, uzay aracı Buran gibi modern uçakların tasarımlarında yüksek teknik verimliliklerini ve operasyonel olduklarını kanıtlayan kullanım örnekleridir. CFRP'ler, agresif ortamlar da dahil olmak üzere -60 ila $+100$ ° C arasındaki sıcaklık aralığında çalışır ve yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir.

Lifli kompozitler genellikle yüksek mukavemetli lifler, teller veya iplik şeklindeki kristallerle güçlendirilmiş plastik bir matrise sahiptir. Bu kompozitlerde, ana gerilmeler kompozit boyunca lifler tarafından emilir. Lifler, lif yönünde kompozite mukavemet ve sertlik sağlar. Kompozitin mekanik özellikleri ve kırılma mekanizması üç parametrenin oranı ile belirlenir. Bunlar, liflerin mukavemeti, matrisin mukavemeti ve sertliği ve elyaf-matris bağının mukavemeti olarak ifade edilebilir.

4.1.2. Metal Matrisli Kompozitler

Toyota (Japonya), otomotiv parçaları için metal kompozitler üretmiştir. Bu metal kompozitlerden birisinde alüminyum, çeşitli oranlarda Al_2O_3 ve SiO_2 karışımı kısa lifler (yaklaşık 3 μm çapında ve 10 μm uzunluğa kadar) ile güçlendirilmiştir. Al_2O_3 liflerinin kütle fraksiyonundaki artışla birlikte mukavemet ve elastik modül artar iken SiO_2 liflerinin fraksiyonundaki artışla aşınma direnci artar. Bu malzeme, piston kaplamalarının üretiminde nikel alaşımları yerine kullanılmıştır ve bu da motorun yanma odasındaki sıcaklığı ve gücünü artırmayı mümkün kılmıştır. Pistonların aşınma direnci artırılarak aracın kilometresi 300 bin km'ye çıkarılmıştır. Japon uzmanlara göre bu tür metal kompozitlerin üretimi, yeni nesil endüstriyel teknolojinin önünü açacaktır.

Uçak ağırlığından tasarruf etmek için doğru malzeme seçimi belirleyici bir rol oynar. Askeri uçaklar için inşaat maliyeti % 40, ticari uçaklar için % 68, uzay araçları için % 19, "Mekik" tipinde yörüngedeki bir uzay aracı için % 50 civarındadır. Uzay teknolojisinde, toplu tasarruflar genellikle fırlatma sayısı dikkate alınarak 1 kg kütleyi yörüngeye koymanın maliyeti ile tahmin edilir. Bu değer 30 bin dolar / kg'a kadar çıkabilmektedir.

"Mekik" uzay aracının yapısında kompozitlerin kullanılması, kütlenin boroplastikler 410 kg ve boralümin 82 kg.' de dahil olmak üzere 1402 kg azaltılmasını mümkün kılmıştır. Bu ağırlık tasarrufu, uzay aracını yörüngeye fırlatma maliyetini birkaç milyon dolar azaltmıştır ve bu da bu malzemelerden yapılan yapısal elemanların maliyetini önceden telafi etmektedir. Sonuç olarak, kompozit malzemelerin geniş olanakları, uygulamaları ve üretimleri olduğu görülmektedir [20].

Dümenler, kuyruk elemanları, direkler, pervane kanatları, kanat kaplamaları gibi metal kompozitlerin uygulama alanı sürekli genişlemektedir. Birçok kritik ürünün teknik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra, metal kompozitlerin kullanılması ağırlıkça % 20-30 tasarruf sağlayabilir. Modern Al-Li alaşımları bu rakama % 10-15 seviyesinde sahiptir. Titanyum alaşımları ile karşılaştırıldığında, boralüminli alaşımlardan yapılan parçalar ağırlıkta % 30-40 azalma sağlayarak, 500 ° C'ye ısıtıldığında daha uzun süreli ve yorulma mukavemeti sağlar. Boralüminyumun roket teknolojisinde kullanımı daha da etkilidir.

Atlas roketleri, Apollo ve Shuttle uzay aracı için büyük parçaların üretiminde kullanılması, kütlelerini %20-50 oranında azaltmayı mümkün kılmıştır. Bu da taşıma kapasitesini ve askeri uçaklar için uçuş menziline, silah miktarını arttırmıştır. F-15 avcı uçağının uçuş ağırlığını % 6 veya yaklaşık 1100 kg azaltmak, uçuş menziline % 15 artışa yol açabileceği düşünülmektedir [20].

4.2. GRAFİT VE GRAFEN

4.2.1. Grafit

Grafit (Gr), ucuz, bol olması ve tane boyutunda kolaylıkla küçültülebilmesi nedeniyle takviye olarak yaygın kullanılan bir bileşendir. Ayrıca, demir karbür, alüminyum karbür, titanyum karbür gibi karbür oluşturur, kompozit malzeme sinterlendiğinde, bu sert faz dislokasyon hareketini zorlaştırabilir. Bunun yanı sıra grafit, grafen ve karbon nano tüpler gibi karbon malzemeler arasında grafit, yüksek sıcaklıkta yüksek kimyasal stabilite, mükemmel korozyon direnci, termal şok direnci sahip olup ucuzdur. Böylelikle grafit malzemeler enerji ve kimya endüstrilerinde

yaygın olarak kullanılmaktadır [23,24], aynı zamanda tercih edilen güçlendirme malzemelerinden biridir [25].

Demir bazlı malzemelerdeki grafit oluşumu, çok sayıda özellik ile ilgili olarak artırılmış serbestlik dereceleri sunar. Şimdiye kadar, esas olarak katılma büzülmesinin grafit genişlemesi ile önlendiği demir dökümlerinde kullanılmıştır. Aynı zamanda grafit işlenebilirliği geliştirmiştir, çünkü grafit hem yağlayıcı olarak hareket eder hem de süreksiz talaşlara neden olur [25,26].

Grafit ayrıca katı hal yağlamasıyla sürtünme katsayısını düşürür. Demir tozunda karıştırılan grafit miktarı % 0,2 ile % 1 arasında değişir. Grafitin demir ile reaktivitesi, sinterleme işlemi için en önemli özelliklerden biridir. Grafit çözünmesi, karbon konsantrasyonunun homojenliğini ve dolayısıyla boyutsal değişim ve şeklin tutarlılığını da etkiler.

Grafit tozları, uygulamalarına bağlı olarak farklı gereksinimleri karşılama eğilimindedir. Sert metaller söz konusu olduğunda, yüksek saflıkta bir grafit bir gerekliliktir ve yapısal bileşenlerin durumları için boyutsal kararlılık, sıkıştırılabilirlik ve kayganlık da kilit faktörlerdir. Özellikle bakır çeliklerin üretiminde gelişmiş mekanik dayanım için karbonun iyi yayılabilirliği ve grafitin demir ile reaktivitesi gereklidir.

Bugün piyasada iki tür grafit bulunmaktadır. Bunlar doğal grafit ve sentetik grafitir. Grafitin özelliklerini tanımlayan dört temel parametre vardır [27,28]. Bunlar ise kristal yapı, doku, partikül boyutu ve şekli ve saflıktır. Bu dört parametrenin birleştirilmesiyle farklı derecelerde çok çeşitli sentetik ve doğal grafitler üretilebilir. Doğal ve sentetik grafit arasındaki temel fark saflıktır. Külün karbon içeriği, nemi ve kimyasal bileşimi ile tanımlanır. Sentetik grafitler daha saftır. Doğal grafitlerdeki safsızlıklar, kararlı oksitler oluşturur ve grafit çözüldüğünde demir partikül yüzeylerinde kalması beklenir. Bu, doğal bir grafitin çözünme sürecini engeller. Saf olan sentetik grafitler, yüksek sertlik veren demirde daha hızlı çözünme eğilimindedir.

Doğal ve sentetik grafitlerin kristalografik düzenlemelerinde brüt bir kristalografik seviyede [mikroskobik seviyede aşağı yukarı aynıdır] farklılık vardır. Grafit özelliklerini karakterize etmek için kullanılan kristal parametreleri L_c ve L_a , doğal ve sentetik grafitler için çok farklıdır. Daha küçük L_c ve L_a değerlerine sahip bir grafit hacim elemanı, daha fazla faz sınırına ve ilişkili kusurlara sahiptir. Bu, yüzey enerjisini, difüzyon ve çözünürlük özelliklerini etkileyen diğer özellikleri etkileyecektir. Sentetik grafitler genel olarak daha küçük L_c ve L_a değerlerine sahiptir ve ayrıca sentetik grafitlerin bazal düzlemleri doğal grafitlere göre daha gelişmiştir. Bu, kenarda daha prizmatik yapılara yol açar. Bir grafitin reaktivitesi kenar karbon atomlarına bağlı olduğundan, daha prizmatik atomlara sahip grafit kimyasal olarak hızlı reaksiyona girme eğilimindedir [29,30].

Kuru kayma tribolojik performanslarını iyileştirmek için daha yumuşak metal malzemelerin sert partikül takviyesine ek olarak, bazı katı takviyelerin kendi kendini yağlama özelliğinden yararlanmak da mümkündür. Makro düzeyde, grafit kapsamlı bir şekilde kullanılmış ve tribolojik performanslarını arttırmak için alüminyum alaşımları da dâhil olmak üzere çeşitli metal alaşımlarına eklenmiştir [4].

4.2.2. Grafen

Grafen nanoplateletler (Gnp'ler), çekici termal ve elektriksel özellikleri nedeniyle nanoteknoloji uygulamaları için çekici malzemelerdir. Ayrıca, Gnp'ler benzersiz mekanik özelliklere sahiptir (1 tpa elastik modülü ve 125 GPa kırılma mukavemeti) [31]. Bu nedenle, son yıllarda Gnp'lerin takviye malzemesi olarak metalik malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi üzerine birçok çalışma yayınlanmıştır [32], [33], [34].

Turan vd. [31] PM ile farklı GNPs içeriğine (0.1, 0.25 ve 0.5 wt%) sahip magnezyum (Mg)/GNPs kompozitleri üretmiştir. Sonuçlar, saf Mg'nin mekanik özelliklerinin GNPs ilavesiyle geliştirildiğini göstermektedir. Benzer bir çalışmada, Rashad ve ark. [35] Mg-alüminyum(Al)/GNPs kompozitleri (GNPs), farklı GNPs içeriği (0.09, 0.18 ve 0.30 wt%) ile PM yöntemi ile üretmiştir. Bu çalışmada, Mg-Al akma mukavemetinin %0.30 GNPs takviye ile %131 oranında arttığı gözlenmiştir.

Alüminyum (Al), Perez-Busmante vd. tarafından mekanik frezeleme ve PM ile GNP's (0.25, 0.50 ve 1.0 wt%) ile güçlendirilmiştir [36]. Sonuçlar, öğütme süresinin ve Gnp içeriğinin saf Al'nin mekanik davranışını arttırdığı görülmüştür. Başka bir çalışmada, Mu ve vd. [37] Titanyum (Ti)/GNP's kompozitleri PM ve daha sonra sıcak haddeleme ile üretmiştir. Sonuçlar, Ti-0.1 wt% Gnp's'nin nihai gerilme mukavemetinin (UTS) saf Ti'den %54.2 daha yüksek olduğunu göstermektedir. GNP's ile güçlendirilmiş bir başka metal matris Bakır (Cu)'dır. Birleştirilmiş Cu / GNP's, Chen ve vd. [38] tarafından moleküler düzeyde karıştırma işlemi ve kıvılcım plazma sinterleme işlemi kullanılarak üretilmiştir. Gnp'lerin güçlendirilmesinin Cu'nun elektriksel iletkenliği üzerinde biraz olumsuz bir etkisi olmasına rağmen, Cu'nun aşınma direncini önemli ölçüde arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Novoselov ve arkadaşları [39] neredeyse on yıl önce grafenin bir atomik karbon katmanı olduğunu göstermiştir. Günümüzde grafenin, metal, polimer [40] ve seramik matrisler için ana takviye dolgu maddelerinden biri olduğu düşünülmektedir. Grafen ile güçlendirilmiş magnezyum [41], bakır [42], alüminyum [4] ve nikel [43] matrisleri, monolitik muadillerine kıyasla kompozitler olarak mekanik davranışlarında önemli gelişme göstermiştir. Grafit gibi, grafen de kendi kendine tribolojik uygulamalar için metal matrislere eklendiğinde yağlama özellikleri sağlar. Ancak grafitin davranışının aksine grafen katı yağlama sağlayabilir ve kompozitin çalıştığı ortamdan bağımsız olarak aşınmayı önemli ölçüde azaltır. Grafenin minimize etmek için kendi kendini yağlama işlevine ek olarak aşındırıcı aşınma monolitik malzemelere kıyasla metal-grafen kompozitlerin çekme mukavemetinde bir artış gözlenmiştir. Uygulanan grafen fazının boyutuna ve morfolojisine bağlı olarak üretilen kompozitlerin artan mukavemetine katkıda bulunduğu düşünülen ana mekanizma vardır [44]. Bu güçlendirme mekanizmaları başlıcaları, Orowan güçlendirmesi ve Hall-Petch güçlendirmesi olarak ifade edilebilir. Aşınmaya dirençli uygulamalar için kompozitler dolgu maddesi olarak grafeni kullanmanın sayısız avantajına rağmen, metal / grafen imalatçıları tarafından sık sık karşılaşılan pek çok zorlukla karşılaşmaktadır. Genel olarak, daha yüksek grafen içeriklerinin kullanımına yönelik araştırma çabaları, matrisler içindeki grafenin homojen olmayan dağılımı, artan yığılma ve yoğun karbür oluşumu [45,46] nedeniyle mekanik özelliklerde bir düşüşe yol açmıştır. Sıcak ekstrüzyon, sıcak haddeleme [47],

sürtünmeli karıştırma işlemi [48] ve ıslak karıştırma üretim yöntemleri [41], grafen ile güçlendirilmiş metal matris kompozitlerin fabrikasyonunda kullanılan gelişmiş tekniklerdir. Bununla birlikte, toz metalurjisinin kullanımı geri çekilmelerinin üstesinden gelmekle birlikte, bu kompozitlerin ve özellikle alüminyum-Grafen kompozitlerinin imalatı için daha ucuz bir alternatif olarak kaldığından, dolayısıyla daha yüksek endüstriyel beklentilere sahip olduğundan, yine de elverişlidir [49].

Daha düşük hacimli fraksiyonda eklenen grafen, daha yüksek mukavemet sağlarken, ağırlıkça% 'deki artış topaklaşmaya neden olarak malzeme özelliklerinde bozulmaya yol açmaktadır [50]. Karıştırmalı döküm işleminde [51] takviyenin düzgün dağılımı ve ıslatılabilirliği zordur, oysa bilyalı öğütme işlemi grafeni matris içinde eşit olarak dağıtır ve homojen bir karışım yapar. Böylelikle, etkili gerilim iletimi için bağı güçlendirir [52]. Ek olarak, birçok araştırmacı, bilyeli öğütmenin, tane inceltme ve matris malzemesindeki takviyenin düzgün dağılımı üzerindeki etkisini göstermiştir [53–56].

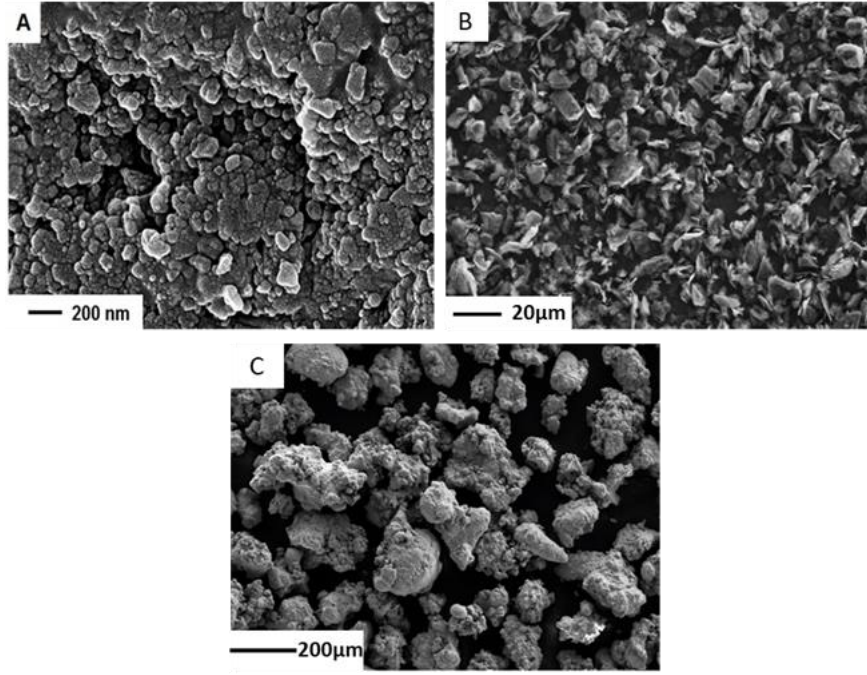
BÖLÜM 5

DENEYSEL METOD

Bu çalışmada, demir matrisli kompozitler toz metalurjisi yöntemiyle birleştirilerek numune haline getirilmiştir. Gerçekleştirilen işlem basamakları bölüm 5.2’de verilmiştir. Tozların karıştırılması, preslenme ve sinterleme prosesi, çekme sertlik ve aşınma testinin uygulanması yoğunluk, gözeneklilik oranı ölçümleri bölüm 5.3’de açıklanmıştır.

5.1. MALZEMELER

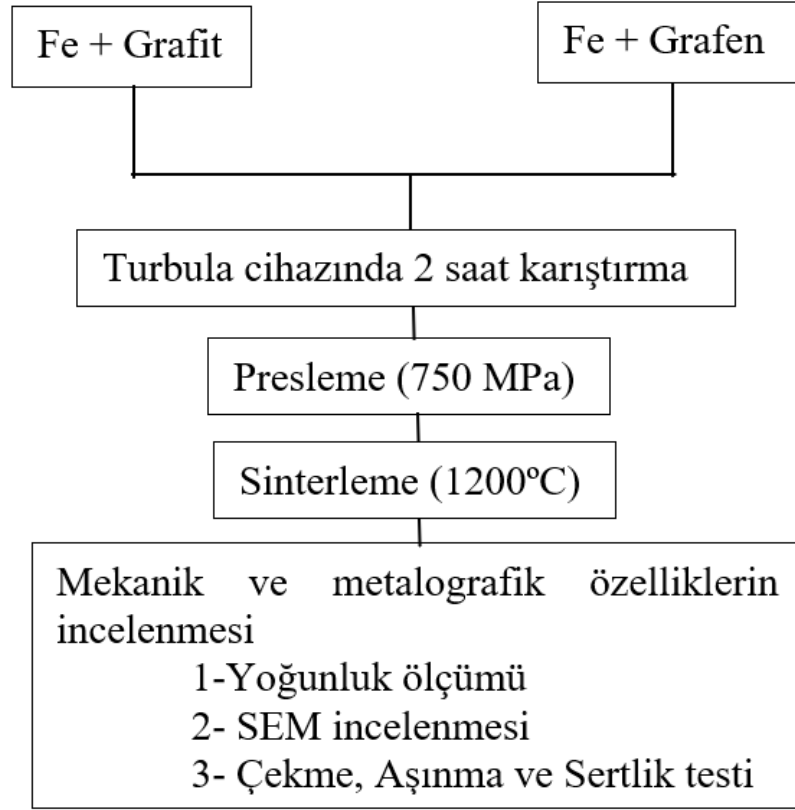
Demir (Fe) tozu (%99 saflık ve <180 µm boyut aralıkları), Sigma-Aldrich (Almanya) firmasından tedarik edilmiştir. 5-8 nm çapında ve 750 m²/g yüzey alanına sahip Gnp'ler (%90 saflık), Nanografi firmasından (Türkiye) satın alınmıştır. Bir başka takviye malzemesi olan grafit tozu ise (%96.5 saflık ve <20 µm boyut aralıkları) Sintek firmasından (İstanbul, Türkiye) tedarik edilmiştir. Malzemelerin SEM fotoğrafları Şekil 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1. Tozların SEM resimleri; a) Grafen, b) Grafit ve c) Demir.

5.2. ÜRETİM YÖNTEMİ

Bu deneysel çalışmada gerçekleştirilen işlem basamakları Şekil 5.2’de olduğu gibi gerçekleştirilmiştir. Değişik firmalardan temin edilen tozlar, belirlenen kompozisyonlarda tartılıp karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Ardından tek yönlü presleme ve sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme sonrası numunelerin karakterizasyon aşamasına geçilmiştir.



Şekil 5.2. Deneysel çalışmada proses adımları.

Tozlar, Çizelge 5.1’de verilen kimyasal oranlarda, on binde bir gram hassasiyetine sahip olan RADWAG AS-60-220 C/2 marka terazi ile tartılmıştır. Tartılan tozlar üç eksenli karıştırıcı olan Turbula marka karıştırıcı ile 90 dakika süreyle bilyasız olarak karıştırma işlemine tabi tutulmuştur.

Çizelge 5.1. Deney için hazırlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.

Numune	Grafit (%ağ.)	Grafen (%ağ.)	Fe (%ağ.)
Fe-0.25 Gr	0,25		Kalan
Fe-0.25 GNP	-	0,25	Kalan
Fe-0.50 Gr	0,5	-	Kalan
Fe-0.50 GNP	-	0,5	Kalan
Fe-0.75 Gr	0,75	-	Kalan
Fe-0.75 GNP	-	0,75	Kalan

Elde edilen karışım toz partiküllerinin preslenmesi 96 ton basma kapasiteli Hidroliksan marka tek yönlü preste, 750 MPa basınçta gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemleri koruyucu gaz olarak argon gazı kullanılan Protherm PTF 16/75/610 modeli atmosfer kontrollü boru fırında 1200 °C' de 2 saat süre ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.3. Sinterlemede kullanılan atmosfer kontrollü fırın görüntüsü.

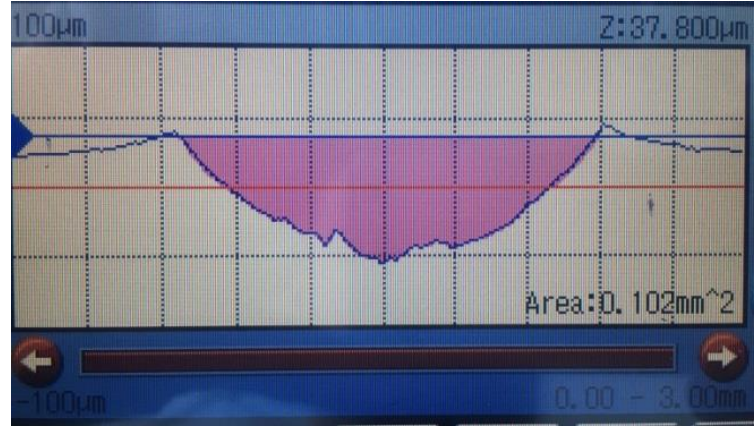
5.3. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

Tüm numuneler için SiC kağıtlarıyla (400, 800, 1200, 2000 mesh) zimparalama, 3 μ elmas süspansiyonla parlatma ve % 2 nital çözelti ile aşındırma gibi metalografik işlemler yapılmıştır. Örneklerin mikroyapıları Nikon MA 200 optik mikroskobu ile incelenmiştir. Vickers sertlik testi, 15 saniye bekleme süresiyle 500 g yük altında gerçekleştirilmiştir. Örnekler, Shimadzu marka çekme test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında 1 mm / dak. çekme hızında çekme testlerine tabi tutulmuştur. Örneklerin tane boyutları, optik mikroskoptan alınan mikroyapı resimleri kullanılarak ortalama doğrusal kesişme yöntemine göre hesaplanmıştır [57]. Perlit fazlarının hacim oranları, nokta sayım yöntemi [58] ile hesaplanmıştır. Numunelerin aşınma direncini belirlemek için 30N yükler altında, 100 m kayma mesafesi için, 30 mm / s kayma hızında ve AISI 52100 çelik bilye kullanılarak UTS Tribometre cihazı ile aşınma testi yapılmıştır. Numunelerin aşınma oranı, aşağıdaki Archard'ın katsayı formülüne

(Denklem 1) göre kayma mesafesinin [59] sonunda aşınma hacmi kaybı kullanılarak belirlenmiştir.

$$\text{Aşınma oranı} = W_v/l \quad (5.1)$$

Burada W_v , aşınmış hacim ve l kayma mesafesidir. Aşınan hacim, ISO 4287-1997 standardına göre bir Mitutoyo SJ-410 cihazı kullanılarak hesaplanmıştır [60]. Örneklerin aşınmış yüzeyleri, kırık yüzeyleri ve mikroyapısı, enerji dağılımlı spektrum (EDS) (Bruker X Flash 6/10) ile donatılmış Carl Zeiss Ultra Plus taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Şekil 5.4'te ise yüzey pürüzlülüğü cihazında yapılan örnek bir ölçümün görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 5.4. Yüzey pürüzlülüğü cihazında yapılan örnek bir ölçümün görüntüsü.

Üretilen malzemelerin gözenek oranının belirlenmesinde aşağıdaki verilen formül kullanılmıştır. Üretilen numunelerin yoğunlukları saf su kullanılarak Arşimet prensibine göre gerçekleştirilmiştir [61]. Numunelerin teorik yoğunlukları ise, karışım kuralı esasına göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Gözeneklilik} = (q_{\text{teorik}} - q_{\text{deneysel}}) \times (100) / (q_{\text{teorik}})$$

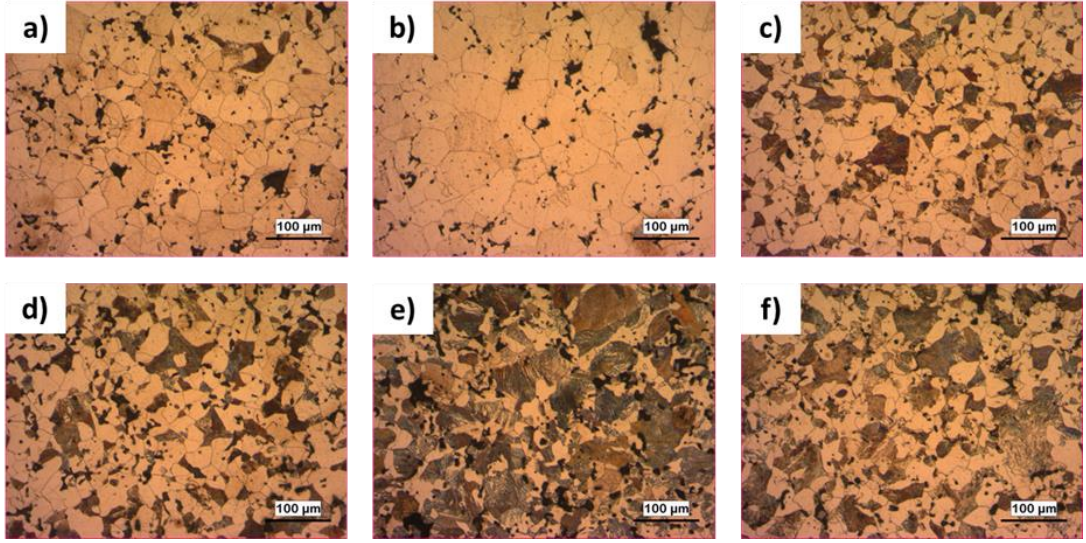
Burada; q_{teorik} : Teorik yoğunluk (gr/cm^3) ; q_{deneysel} : Deneysel yoğunluk (gr/cm^3) şeklindedir.

BÖLÜM 6

BULGULAR VE TARTIŞMA

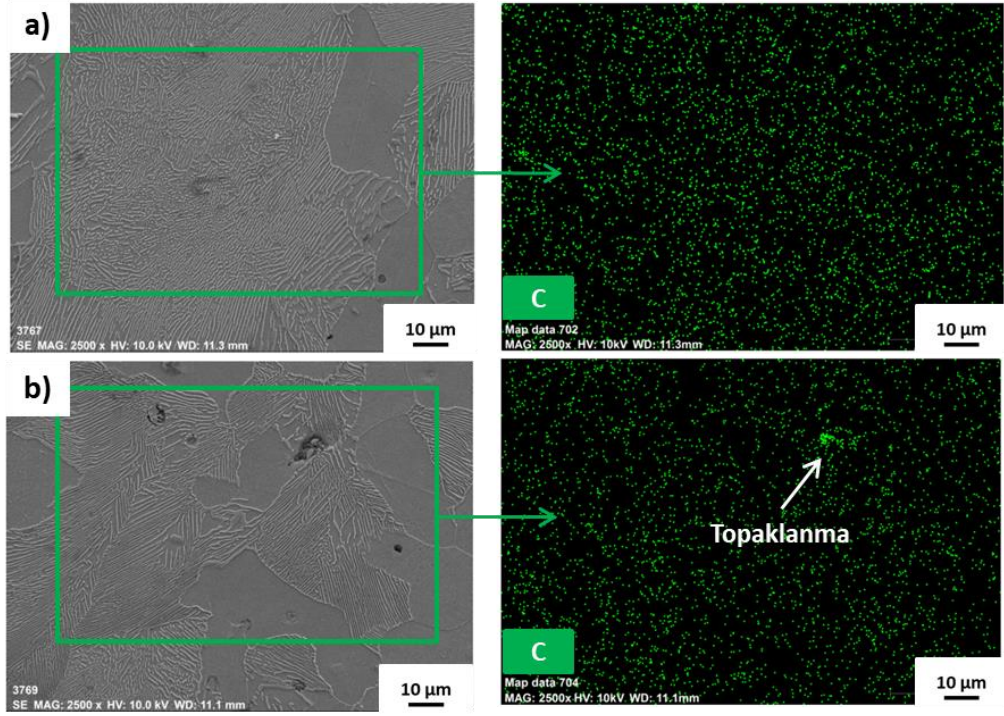
6.1. NUMUNELERİN MİKROYAPI ANALİZİ

Örneklerin mikroyapıları Şekil 6.1'de sunulmuştur. Örnekler, perlit ve ferrit fazlarından oluşmaktadır. Ayrıca, numuneler için tane sınırları açıkça görülebilmektedir. Çizelge 6.1'de gösterildiği üzere, takviye miktarı artması ile numunelerin ortalama tane boyutları küçülmüştür, perlit fazının hacim oranlarının ise arttığı görülmektedir. Bu durum, çok daha fazla sementit oluşumuna neden olan daha yüksek karbon içeriğinin varlığı ile açıklanabilir. Bu sonuçlar literatürdeki çalışmalarla tutarlılık göstermektedir [62,63]. Bununla birlikte, Fe-0.25 GNP ve Fe-0.50 GNP, sırasıyla Fe-0.25 Gr ve Fe-0.50 Gr'den daha yüksek miktarda perlit fazına ve daha küçük tane boyutlarına sahiptir. GNP'lerin grafitte göre daha yüksek yüzey alanına sahip olması nedeniyle çok daha fazla sementit oluşumuna yol açtığı söylenebilir.



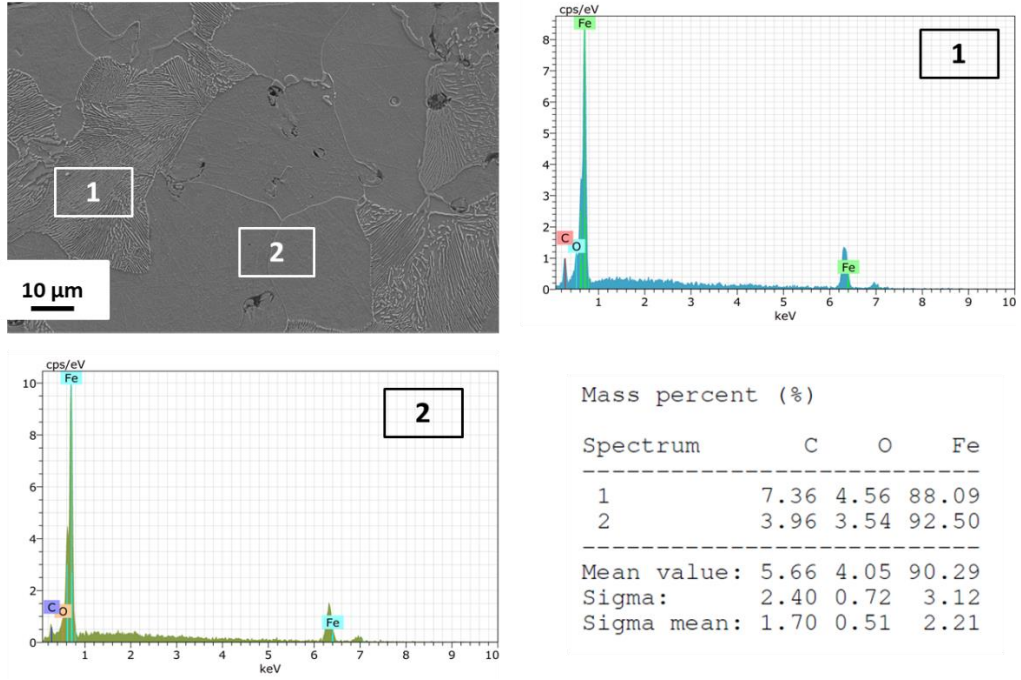
Şekil 6.1. a) Fe-0.25 Gr, b) Fe-0.25 GNP, c) Fe-0.50 Gr, d) Fe-0.50 GNP, e) Fe-0.75 Gr, f) Fe-0.75 GNP optik görüntüleri.

Öte yandan, Fe-0.75 Gr ve Fe-0.75 GNP içeren kompozisyonlar karşılaştırıldığında perlit fazlarının hacimsel oranında önemli bir farklılık vardır. Bu durum, takviye miktarı % 0,75 olduğunda, GNP'lerin matriste topaklanmasına bağlanabilir. Bunu doğrulamak için SEM-Mapping analizi yapılmıştır (Şekil 6.2). Sonuçlara göre Fe-0.75 GNP için kısmen aglomerasyon, Fe-0.75 Gr için ise karbonun homojen olarak dağıldığı görülmüştür.



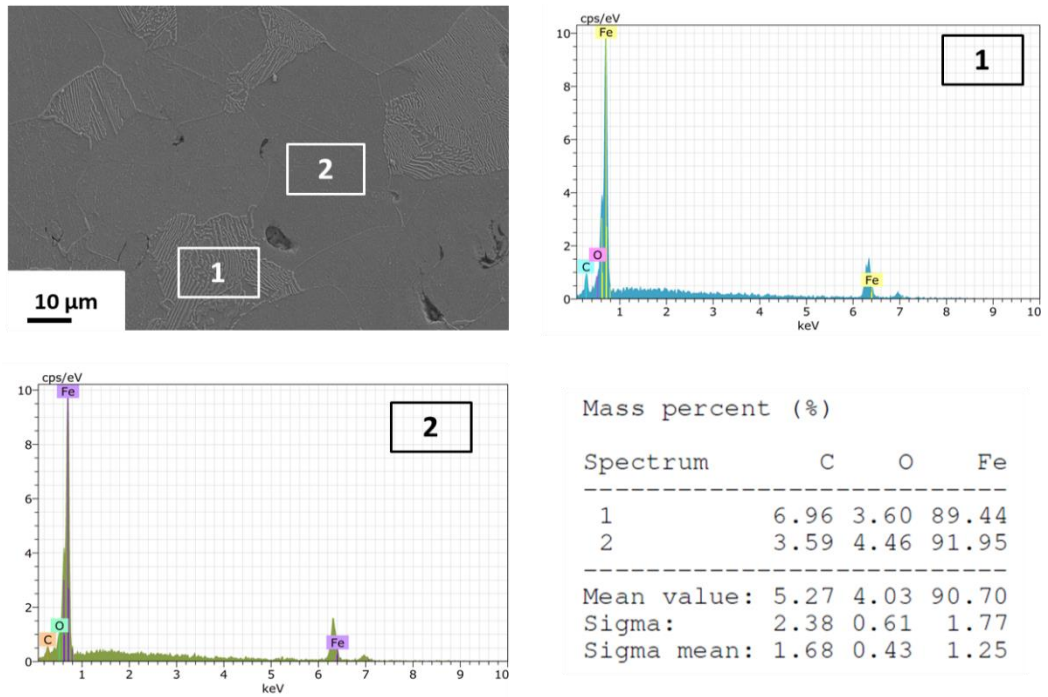
Şekil 6.2. a) Fe-0.75 Gr ve b) Fe-0.75 GNP için SEM-Haritalama sonuçları.

Numunelerin yüzde yoğunlukları Çizelge 6.1'de verilmiştir. Katkı tipi ve oranının değiştirilmesi örneklerin yoğunlukları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmamıştır. Bununla birlikte, numunelerin deneysel yoğunlukları teorik yoğunluklardan daha düşüktür. Bunun nedeni, metal tozların preslenmesi ve sinterlenmesi sırasında gözeneklerin oluşmasıdır [64]. TM yöntemi ile üretilen parçaların gözenekleri genellikle % 5-15 aralığındadır [65]. Bu nedenle, numunelerin makul gözeneklilik oranlarına sahip olduğu söylenebilir.



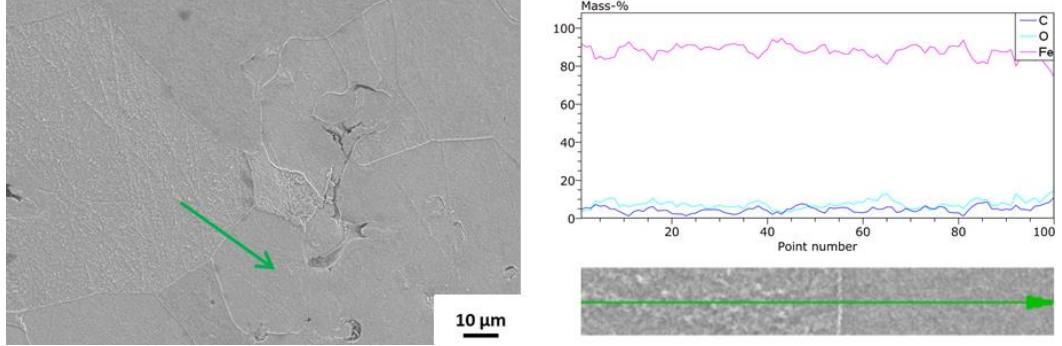
Şekil 6.3. Fe-0.50 Gr için SEM-EDX sonucu.

Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te gösterildiği üzere %0,5 takviye içeren numunelerin SEM-EDX sonuçlarında karbon ve oksijen içeriği açısından kayda değer bir fark görülmemiştir. Oksitlenmenin kabul edilebilir seviyede olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 6.4. Fe-0.50 GNP için SEM-EDX sonucu.

Fe-0.25 Gr numunesinde SEM-Line (çizgi) EDX (Şekil 6.5) analizi yapıldığında oksitlenme miktarının tane içi ve tanı sınırlarında da yakın olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.5. Fe-0.25 Gr için SEM-EDX sonucu.

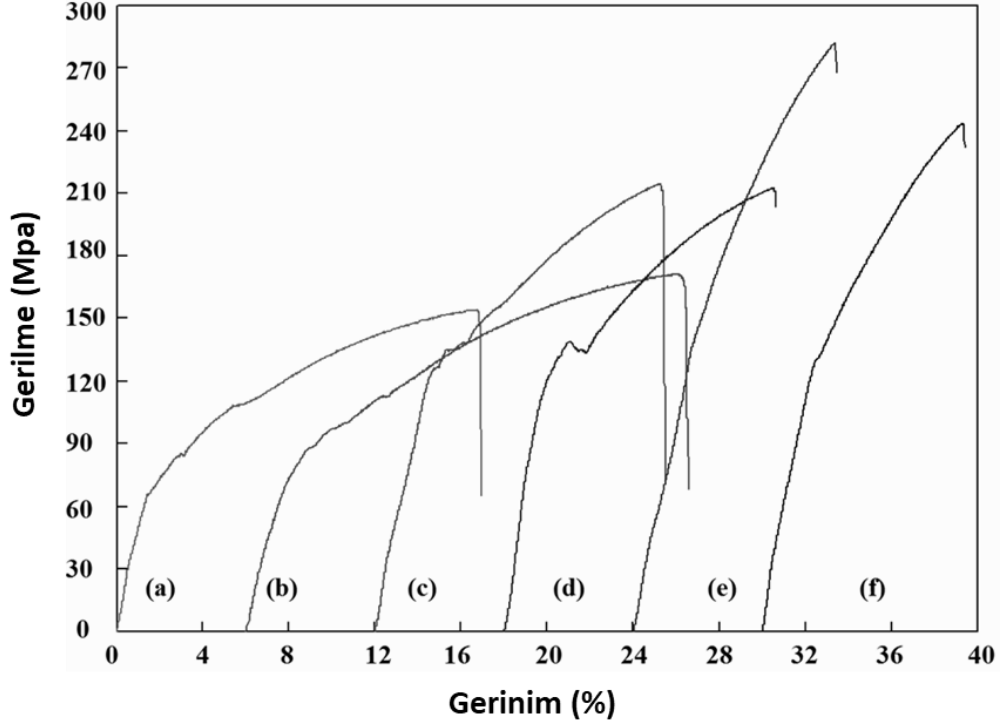
Çizelge 6.1. Ortalama tane boyutları, perlit fazlarının hacim oranı ve numunelerin yüzde yoğunlukları.

Numune	Perlit Miktarı (%)	Ortalama Tane Boyutu (µm)	Yüzde Yoğunluk (%)
Fe-0.25 Gr	3,6	33,7	95,7
Fe-0.25 GNPs	4,5	32,9	95,3
Fe-0.50 Gr	32,8	24,5	95,8
Fe-0.50 GNPs	37,3	19,9	95,5
Fe-0.75 Gr	78,8	18,6	95,7
Fe-0.75 GNPs	52,7	21,9	95,5

6.2. NUMUNELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

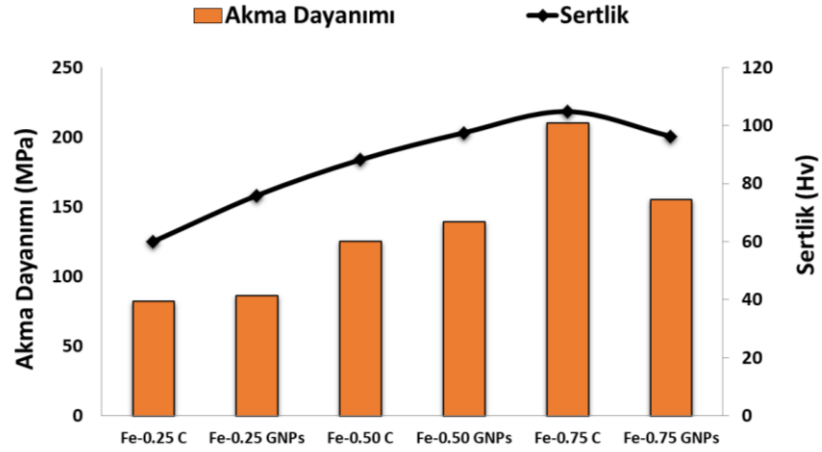
Üretilen kompozisyonların gerilme-uzama eğrileri Şekil 6.6'te sunulmuştur. Demir matrisine hem grafit hem de grafen ilavesi ile numunelerin çekme dayanımları artırılmıştır. Ayrıca, takviye oranına bağlı olarak numunelerin sertliği ve akma dayanımı da artırılmıştır (Şekil 6.7). Mekanik özelliklerdeki iyileşme iki sebeple açıklanabilir. İlk olarak, daha yüksek miktarda karbon, mekanik özellikleri iyileştiren çok daha fazla perlit fazının oluşmasına neden olmuştur [62]. İkinci olarak, daha

küçük tane boyutları dislokasyon hareketine daha fazla engel oluşturur, bu nedenle numunelerin mekanik mukavemeti Hall-Petch mekanizmasına göre artar [66].



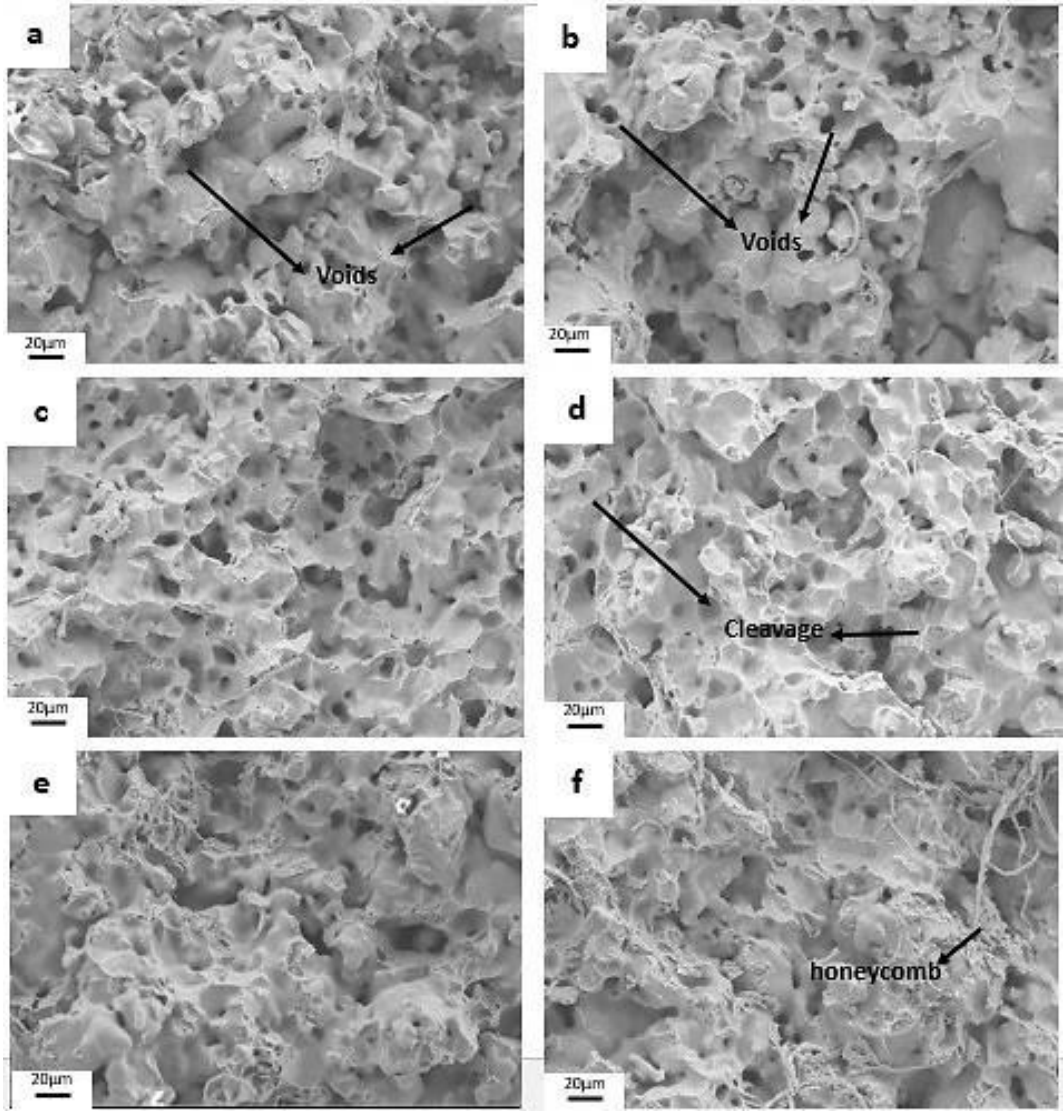
Şekil 6.6. a) Fe-0.25 Gr, b) Fe-0.25 GNP, c) Fe-0.50 Gr, d) Fe-0.50 GNP, e) Fe-0.75 Gr, f) Fe-0.75 GNP gerilme-uzama eğrileri.

Bununla birlikte, grafit takviyeli numunelerin sertliği ve akma dayanımı, daha küçük tane boyutları ve daha yüksek perlit fazı miktarına sahip olması nedeniyle grafit takviyeli numunelere göre % 0,5 takviye oranına kadar daha yüksek olduğu görülmüştür. Öte yandan grafit takviyeli numuneler, % 0,75 takviye oranı olan numunelerde daha iyi mekanik performans göstermiştir. Bu, topaklanmış GNP'lerin matris fazında homojen dağılmamasına ve GNP'lerin topaklaşması nedeniyle stresi etkili bir şekilde paylaşmamasına yol açmasının bir sonucu olabilir [67]. Ayrıca, Fe-0.75 GNP, Fe-0.75 Gr'den daha iri tane boyutlarına sahiptir. Mukavemet artırıcı mekanizmalardan biri olan tane boyutu küçültme mekanizmasının, %0,75 Gr ilave numunelerde daha etkin olduğu görülmüştür. %0,75 Gr ilave edilen numunenin mekanik özellikleri %0,75 GNP ilave edilen numuneye göre daha iyi çıkmıştır.



Şekil 6.7. Numunelerin akma dayanımı ve sertlik değerleri.

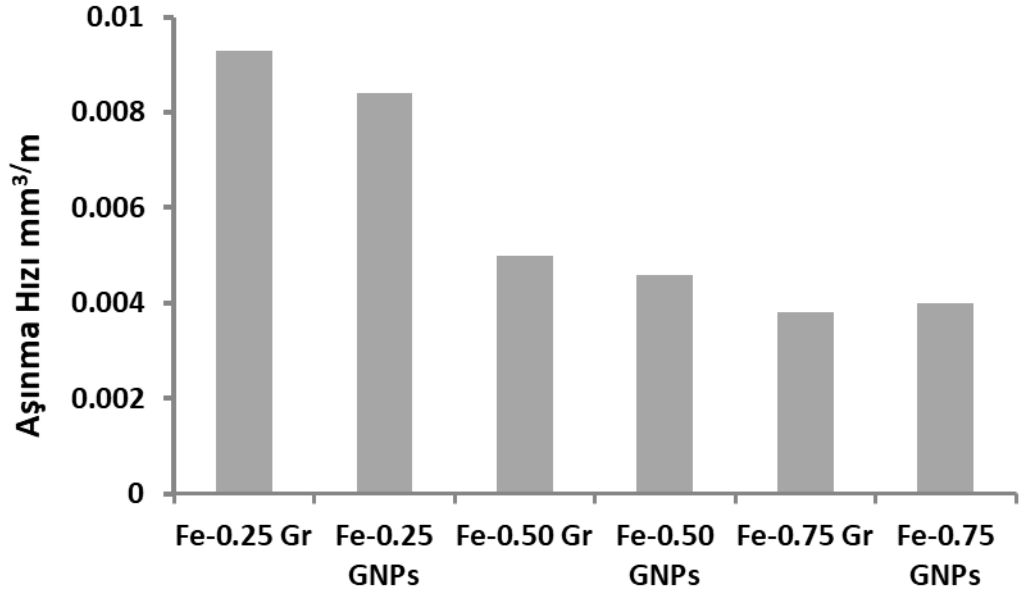
Bu çalışmada elde edilen diğer bir sonuç ise, takviye içeriği arttıkça numunelerin uzama değerlerinin azalmasıdır. Bunun nedeni yapıdaki sert ve kırılğan sementit miktarının karbon oranı ile doğru orantılı olmasıdır [68]. Numunelerin kırılma yüzeyleri Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Numunelerin kırılma yüzeyleri kısmen sünek ve kısmen gevrek bölgelere sahiptir. Bal peteği yapısı (çukur) sünek bölgeleri temsil ederken, ayrılma düzlemleri gevrekliği temsil etmektedir [69]. Fe-0.75 Gr ve Fe-0.75 GNP numunelerinde çok daha fazla ayrılma düzlemi yapısının görülebileceği söylenebilir. Bu nedenle, bu numunelerin % uzamaları diğerlerinden daha düşüktür. Ayrıca, hem Fe-GNP hem de Fe-Gr örnekleri için kırık yüzeylerinde boşlukların görüldüğüne dikkat edilmelidir (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. a) Fe-0.25 Gr, b) Fe-0.25 GNP, c) Fe-0.50 Gr, d) Fe-0.50 GNP, e) Fe-0.75 Gr, f) Fe-0.75 GNP gerilme-uzama eğrileri.

6.3. NUMUNELERİN AŞINMA DAVRANIŞLARI

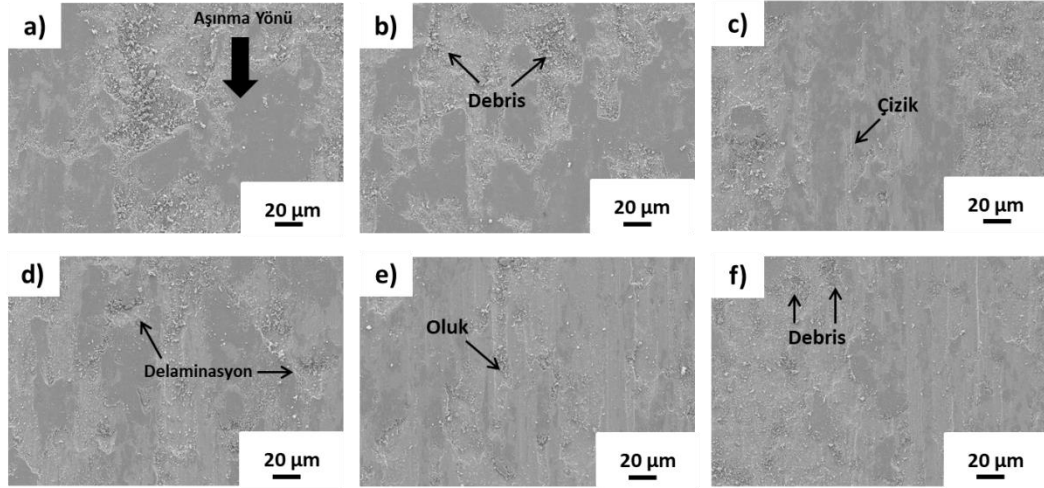
Numunelerin aşınma oranları Şekil 6.9'da sunulmuştur. Archard [70], yasasına göre numunelerin aşınma oranları, sertlikleri ile ters orantılıdır. Dolayısıyla numunelerin aşınma direncindeki artışın bu kanunla uyumlu olduğu söylenebilir. En düşük sertlik değerine sahip Fe-0,25 Gr'nin aşınma hızı $0,0093 \text{ mm}^3/\text{m}$ iken, en yüksek sertlik değerine sahip Fe-0,75 Gr'ın aşınma hızı $0,0038 \text{ mm}^3/\text{m}$ 'dir. İkincisi, grafen [71] ve grafitin [72] kendi kendini yağlayan bir malzeme olması nedeniyle yağlayıcı bir etkiye sahip oldukları iyi bilinmektedir. Bu nedenle, bu takviyelerin eklenmesi, numunelerin aşınma direncinin artmasına yol açmıştır.



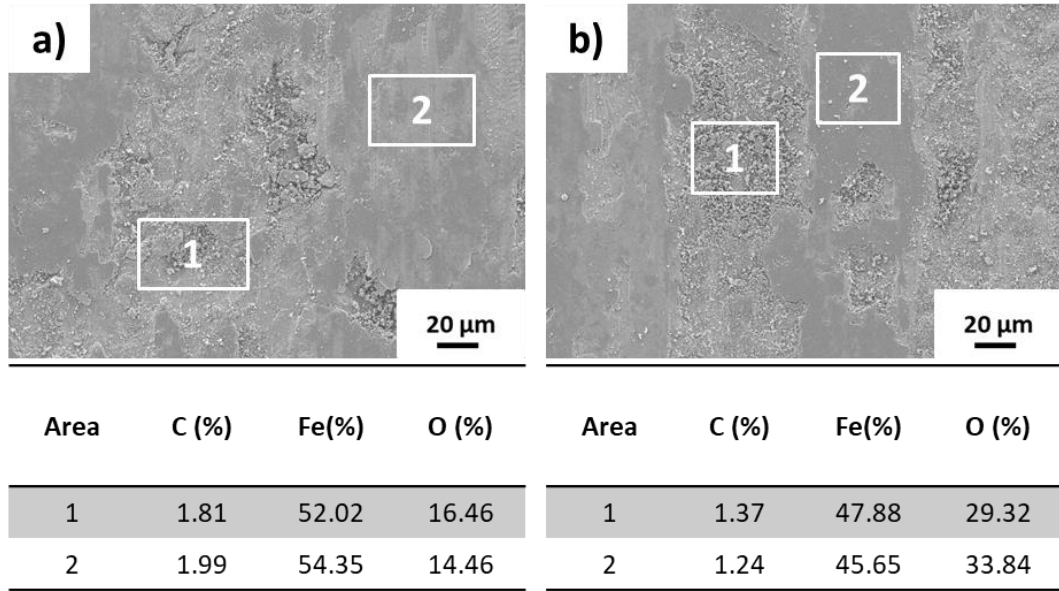
Şekil 6.9. Numunelerin aşınma oranı.

Şekil 6.10 numunelerin aşınmış yüzeylerini temsil etmektedir. Çizikler ve oluklar kayma yönüne paralel olduğundan örnekler için aşındırıcı mekanizmanın etkili olduğu söylenebilir [73,74]. Ayrıca delaminasyon aşınma mekanizması gözlemlenmiştir. Ek olarak, grafit ve grafen takviyeli numunelerin aşınma mekanizmaları arasında önemli bir farklılık gözlenmemiştir.

Şekil 6.11'de gösterildiği gibi, oksijenin varlığı SEM-EDX analizi ile desteklenmektedir. Kayma sırasındaki sürtünme ısı, temas yüzeyinde oksidasyon oluşumuna neden olmuştur [75], bunun sonucunda, her iki tip güçlendirilmiş numune için de oksidatif aşınma mekanizmasının meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 6.10. Numunelerin aşınmış yüzeyleri a) Fe-0.25 Gr, b) Fe-0.25 GNPs, c) Fe-0.50 Gr, d) Fe-0.50 GNPs, e) Fe-0.75 Gr, f) Fe-0.75 GNPs.



Şekil 6.11. a) Fe-0.25 Gr ve b) Fe-0.25 GNP aşınmış yüzeylerinin SEM-EDX sonuçları.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Bu çalışmada grafen ile güçlendirilmiş karbon çelikleri ilk kez toz metalurjisiyle üretilmiştir. Numunelerin mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca bulgular grafit-demir örnekleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

- GNP takviyeli çelik numuneler daha küçük ortalama tane boyutlarına ve daha düşük miktarlarda (ağırlıkça% 0.25 ve ağırlıkça % 0.5) daha yüksek perlit fazlarının hacim oranına sahiptir. Bununla birlikte, takviye oranı ağırlıkça % 0.5'in üzerinde çıktığında GNP'ler kısmen topaklanmıştır.
- Mikroyapısal özelliklere bağlı olarak, Fe-0.25 GNP'nin sertliği ve gerilme mukavemeti, Fe-0.25 Gr'den sırasıyla yaklaşık% 26 ve % 14 daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak %0,75 Gr ve %0,75 GNP ilave edilen numuneler kıyaslandığında %0,75 Gr ilave edilen numunelerin mekanik özellikleri daha iyi olduğu görülmüştür.
- Her iki tip için de takviye miktarının artırılmasıyla, aşınma özellikleri iyileştirilmiş ve numunelerin aşınma oranlarının sertlikleriyle ters orantılı olduğu görülmüştür.

Özetle, toz metalurjisi (PM) yoluyla çelik üretiminde grafen kullanılması, grafit ile karşılaştırıldığında ağırlıkça% 0,5'e kadar güçlendirme oranına kadar etkili olabilir. Ancak grafen üretimi oldukça zor ve maliyetlidir. Bu nedenle grafen, maliyet-fayda analizi yapıldıktan sonra daha yüksek mukavemetli PM çelik ürünleri için umut verici bir malzeme olabilir.

KAYNAKLAR

1. Gundermann, P., "Overview of the status and trends in the European PM Industry", *European Powder Metallurgy Association*, Hamburg, (2016).
2. Dwivedi, D., Lepková, K., and Becker, T., "Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods", *RSC Advances*, 7 (8): 4580–4610 (2017).
3. Aytar, Ö. B., "Borlanmış düşük karbonlu mikro alaşımlı çeliklerin magnetik ve mekaniksel özelliklerinin incelenmesi", .
4. El-Ghazaly, A., Anis, G., and Salem, H. G., "Effect of graphene addition on the mechanical and tribological behavior of nanostructured AA2124 self-lubricating metal matrix composite", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 95: 325–336 (2017).
5. Berman, D., Erdemir, A., and Sumant, A. V., "Graphene: a new emerging lubricant", *Materials Today*, 17 (1): 31–42 (2014).
6. Metallurgy, P., "Applications, Advantages and Limitations, Ed. by E", *Klar, American Society For Metals, Metals Park, Ohio*, 310 (1983).
7. Dorofeev, Y. G., Gasanov, B. G., and Dorofeev, V. Y., "Industrial Technology of Hot Pressing of Powder Articles", *Metallurgiya, Moscow (1990)*, (1990).
8. Dorofeev, Y. G., Gasanov, B. G., and Dorofeev, V. Y., "Commercial Technology for the Hot Pressing of Powder Products", *Metallurgiya, Moscow*, (1990).
9. Dorofeev, V. and Dorofeev, Y., "Powder Forging: Today and Tomorrow", *Powder Metallurgy And Metal Ceramics*, 52: (2013).
10. Vityaz, P. A., Ilyushchanka, A. P., and Savich, V. V., "Powder Metallurgy in Belarus and Global Developmental Trends", *Russian Journal Of Non-Ferrous Metals*, 60 (6): 775–781 (2019).
11. Vityaz, P. A., "Powder metallurgy and metallurgical additive technologies. Based on materials of the European Congress of Powder Metallurgy", .
12. Sweet, J. F., "Sweet, J. F. State of the PM Industry in North America", .
13. Shivanath, R., Jones, P., and Thieu, D. T., "Hi-density sintered alloy", *Google Patents*, (1996).

14. Jones, P. K., Buckley-Golder, K., and Sarafinchan, D., "Developing P/M gear tooth and bearing surfaces for high stress applications", *International Journal Of Powder Metallurgy (1986)*, 34 (1): 26–33 (1998).
15. Hryha, E. and Nyborg, L., "Microstructure Development in Powder Metallurgy Steels: Effect of Alloying Elements and Process Variables", *Materials Science Forum*, 782: 467–472 (2014).
16. Kotthoff, G. and Zeller, A., "Advanced gear technology for high-performance PM gears", *International Journal Of Powder Metallurgy*, 52 (3): 45–59 (2016).
17. Kotthoff, G. and Zeller, A., "High performance PM gears–Status and Opportunities", *Int. Conference On Powder Metallurgy*, (2013).
18. Dyachkova, L. N. and Dechko, M. M., "Influence of dispersed microadditives on the structure and properties of powder carbon and high-chromium steels", *Russian Journal Of Non-Ferrous Metals*, 57 (5): 477–483 (2016).
19. "Классификация Стали", http://steelcast.ru/steel_classification (2020).
20. "Classification of Composite Materials | Rogov | RUDN Journal of Engineering Researches", <http://journals.rudn.ru/engineering-researches/article/view/4839> (2020).
21. Vasil'ev, V. V. and Tarnopol'skii, Y. M., "Composite Materials. Handbook", *Mashinostroenie, Moscow*, 4 (4.0): 4–9 (1990).
22. Karabasov, Y. S., "Novye materialy [new materials]", *Moscow: MISIS.[In Russian]*, (2002).
23. Fu, K., Yao, Y., Dai, J., and Hu, L., "Progress in 3D printing of carbon materials for energy-related applications", *Advanced Materials*, 29 (9): 1603486 (2017).
24. Antonelou, A., Sygellou, L., Vrettos, K., Georgakilas, V., and Yannopoulos, S. N., "Efficient defect healing and ultralow sheet resistance of laser-assisted reduced graphene oxide at ambient conditions", *Carbon*, 139: 492–499 (2018).
25. Mendoza-Duarte, J. M., Martínez-Sánchez, R., Carreño-Gallardo, C., and Estrada-Guel, I., "Effect of Graphite Addition on the Mechanical Properties and Microstructure in an Aluminum Composite Produced by High-Energy Ball Milling", *Microscopy And Microanalysis*, 19 (S2): 1568–1569 (2013).
26. Rubin, P., Larker, R., Navara, E., and Antti, M.-L., "Graphite Formation and Dissolution in Ductile Irons and Steels Having High Silicon Contents: Solid-State Transformations", *Metallography, Microstructure, And Analysis*, 7 (5): 587–595 (2018).
27. Xu, Y., Yu, C., Miao, Q., Yan, S., and Ma, G., "Effect of graphite addition on mechanical properties of Al₂O₃ ceramics by directed laser deposition", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 0954405420944805 (2020).

28. Masuhara, S., "Effect of Particle Size of Powder on Dimensional Change", *Adv. In Powder Met. And Particulate Mat.*, 3: 267–284 (1992).
29. Tamashauskyy, A. V., "An Introduction to synthetic graphite", *Asbury Graphite Mills Inc. Asbury, NJ, USA Publ*, 12 (2006).
30. Jonnalagadda, K., "Influence of graphite type on copper diffusion in Fe–Cu–C PM alloys", *Materials*, 3: 45–55 (1999).
31. Turan, M. E., Sun, Y., Akgul, Y., Turen, Y., and Ahlatci, H., "The effect of GNPs on wear and corrosion behaviors of pure magnesium", *Journal Of Alloys And Compounds*, 724: 14–23 (2017).
32. Hu, Z., Tong, G., Lin, D., Chen, C., Guo, H., Xu, J., and Zhou, L., "Graphene-reinforced metal matrix nanocomposites—a review", *Materials Science And Technology*, 32 (9): 930–953 (2016).
33. Baig, Z., Mamat, O., Mustapha, M., and Sarfraz, M., "Influence of surfactant type on the dispersion state and properties of graphene nanoplatelets reinforced aluminium matrix nanocomposites", *Fullerenes, Nanotubes And Carbon Nanostructures*, 25 (9): 545–557 (2017).
34. Prashantha Kumar, H. G. and Anthony Xavier, M., "Effect of graphene addition and tribological performance of Al 6061/graphene flake composite", *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, 11 (2): 88–97 (2017).
35. Rashad, M., Pan, F., Hu, H., Asif, M., Hussain, S., and She, J., "Enhanced tensile properties of magnesium composites reinforced with graphene nanoplatelets", *Materials Science And Engineering: A*, 630: 36–44 (2015).
36. Pérez-Bustamante, R., Bolaños-Morales, D., Bonilla-Martínez, J., Estrada-Guel, I., and Martínez-Sánchez, R., "Microstructural and hardness behavior of graphene-nanoplatelets/aluminum composites synthesized by mechanical alloying", *Journal Of Alloys And Compounds*, 615: S578–S582 (2014).
37. Mu, X. N., Zhang, H. M., Cai, H. N., Fan, Q. B., Zhang, Z. H., Wu, Y., Fu, Z. J., and Yu, D. H., "Microstructure evolution and superior tensile properties of low content graphene nanoplatelets reinforced pure Ti matrix composites", *Materials Science And Engineering: A*, 687: 164–174 (2017).
38. Chen, F., Ying, J., Wang, Y., Du, S., Liu, Z., and Huang, Q., "Effects of graphene content on the microstructure and properties of copper matrix composites", *Carbon*, 96: 836–842 (2016).
39. Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., and Firsov, A. A., "Electric field effect in atomically thin carbon films", *Science*, 306 (5696): 666–669 (2004).
40. Chandrasekaran, S., Sato, N., Tölle, F., Mülhaupt, R., Fiedler, B., and Schulte, K., "Fracture toughness and failure mechanism of graphene based epoxy composites", *Composites Science And Technology*, 97: 90–99 (2014).

41. Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Asif, M., She, J., Gou, J., Mao, J., and Hu, H., "Development of magnesium-graphene nanoplatelets composite", *Journal Of Composite Materials*, 49 (3): 285–293 (2015).
42. Li, M., Che, H., Liu, X., Liang, S., and Xie, H., "Highly enhanced mechanical properties in Cu matrix composites reinforced with graphene decorated metallic nanoparticles", *Journal Of Materials Science*, 49 (10): 3725–3731 (2014).
43. Dahal, A. and Batzill, M., "Graphene–nickel interfaces: a review", *Nanoscale*, 6 (5): 2548–2562 (2014).
44. Moghadam, A. D., Omrani, E., Menezes, P. L., and Rohatgi, P. K., "Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene—a review", *Composites Part B: Engineering*, 77: 402–420 (2015).
45. Wang, J., Li, Z., Fan, G., Pan, H., Chen, Z., and Zhang, D., "Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites", *Scripta Materialia*, 66 (8): 594–597 (2012).
46. Yan, S. J., Dai, S. L., Zhang, X. Y., Yang, C., Hong, Q. H., Chen, J. Z., and Lin, Z. M., "Investigating aluminum alloy reinforced by graphene nanoflakes", *Materials Science And Engineering: A*, 612: 440–444 (2014).
47. Zhang, W. L., Gu, M. Y., Wang, D. Z., and Yao, Z. K., "Rolling and annealing textures of a SiCw/Al composite", *Materials Letters*, 58 (27–28): 3414–3418 (2004).
48. Jeon, C.-H., Jeong, Y.-H., Seo, J.-J., Tien, H. N., Hong, S.-T., Yum, Y.-J., Hur, S.-H., and Lee, K.-J., "Material properties of graphene/aluminum metal matrix composites fabricated by friction stir processing", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 15 (6): 1235–1239 (2014).
49. Liu, J., Khan, U., Coleman, J., Fernandez, B., Rodriguez, P., Naher, S., and Brabazon, D., "Graphene oxide and graphene nanosheet reinforced aluminium matrix composites: powder synthesis and prepared composite characteristics", *Materials & Design*, 94: 87–94 (2016).
50. Gao, C., Zhan, B., Chen, L., and Li, X., "A micromechanical model of graphene-reinforced metal matrix nanocomposites with consideration of graphene orientations", *Composites Science And Technology*, 152: 120–128 (2017).
51. Suchanek, W. and Yoshimura, M., "Processing and properties of hydroxyapatite-based biomaterials for use as hard tissue replacement implants", *Journal Of Materials Research*, 13 (1): 94–117 (1998).
52. Raj, R. R., Yoganandh, J., Saravanan, M. S., and Kumar, S. S., "Effect of graphene addition on the mechanical characteristics of AA7075 aluminium nanocomposites", .

53. Saravanan, M. S., Sivaprasad, K., Susila, P., and Babu, S. K., "Anisotropy models in precise crystallite size determination of mechanically alloyed powders", *Physica B: Condensed Matter*, 406 (2): 165–168 (2011).
54. Chu, K. and Jia, C., "Enhanced strength in bulk graphene–copper composites", *Physica Status Solidi (A)*, 211 (1): 184–190 (2014).
55. Zhang, J., Chen, Z., Zhao, J., and Jiang, Z., "Microstructure and mechanical properties of aluminium-graphene composite powders produced by mechanical milling", *Mechanics Of Advanced Materials And Modern Processes*, 4 (1): 4 (2018).
56. Stankovich, S., Dikin, D. A., Dommett, G. H., Kohlhaas, K. M., Zimney, E. J., Stach, E. A., Piner, R. D., Nguyen, S. T., and Ruoff, R. S., "Graphene-based composite materials", *Nature*, 442 (7100): 282–286 (2006).
57. Fischmeister, H. F., "Applications of quantitative microscopy in materials engineering", *Journal Of Microscopy*, 95 (1): 119–143 (1972).
58. Gladman, T. and Woodhead, J. H., "The accuracy of point counting in metallographic investigations", *Journal Of The Iron Steel*, 194: 184–193 (1960).
59. Akgul, Y., Ahlatci, H., Turan, M. E., Simsir, H., Erden, M. A., Sun, Y., and Kilic, A., "Mechanical, tribological, and biological properties of carbon fiber/hydroxyapatite reinforced hybrid composites", *Polymer Composites*, (2020).
60. Polat, S., Sun, Y., Çevik, E., Colijn, H., and Turan, M. E., "Investigation of wear and corrosion behavior of graphene nanoplatelet-coated B4C reinforced Al–Si matrix semi-ceramic hybrid composites", *Journal Of Composite Materials*, 53 (25): 3549–3565 (2019).
61. Standard, A., "B328-96 (Reapproved 2003)", *American Society For Testing And Materials, Philadelphia, PA*, (2003).
62. Turkmen, M., "Effect of Carbon Content on Microstructure and Mechanical Properties of Powder Metallurgy Steels", *Powder Metallurgy And Metal Ceramics*, 55 (3–4): 164–171 (2016).
63. Calado, W. R. and Barbosa, R., "Influence of Carbon Content and Deformation Temperature on Ultra-Grain Refinement of Plain Carbon Steels by Means of Torsion Test", *ISIJ International*, 53 (5): 909–914 (2013).
64. Shanmugasundaram, D. and Chandramouli, R., "Tensile and impact behaviour of sinter-forged Cr, Ni and Mo alloyed powder metallurgy steels", *Materials & Design*, 30 (9): 3444–3449 (2009).
65. Wong-Ángel, W. D., Téllez-Jurado, L., Chávez-Alcalá, J. F., Chavira-Martínez, E., and Verduzco-Cedeño, V. F., "Effect of copper on the mechanical properties of alloys formed by powder metallurgy", *Materials & Design*, 58: 12–18 (2014).

66. Moghadam, A. D., Omrani, E., Menezes, P. L., and Rohatgi, P. K., "Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene—a review", *Composites Part B: Engineering*, 77: 402–420 (2015).
67. Liao, J., Tan, M.-J., and Sridhar, I., "Spark plasma sintered multi-wall carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites", *Materials & Design*, 31: S96–S100 (2010).
68. Gill, A. S. and Kumar, S., "Surface roughness and microhardness evaluation for EDM with Cu–Mn powder metallurgy tool", *Materials And Manufacturing Processes*, 31 (4): 514–521 (2016).
69. Neimitz, A., Galkiewicz, J., and Dzioba, I., "The ductile-to-cleavage transition in ferritic Cr–Mo–V steel: A detailed microscopic and numerical analysis", *Engineering Fracture Mechanics*, 77 (13): 2504–2526 (2010).
70. Turan, M. E., Sun, Y., and Akgul, Y., "Improved wear properties of magnesium matrix composite with the addition of fullerene using semi powder metallurgy", *Fullerenes, Nanotubes And Carbon Nanostructures*, 26 (2): 130–136 (2018).
71. Şenel, M. C., Gürbüz, M., and Koç, E., "Mechanical and tribological behaviours of aluminium matrix composites reinforced by graphene nanoplatelets", *Materials Science And Technology*, 34 (16): 1980–1989 (2018).
72. Baradeswaran, A. and Perumal, A. E., "Study on mechanical and wear properties of Al 7075/Al₂O₃/graphite hybrid composites", *Composites Part B: Engineering*, 56: 464–471 (2014).
73. Akgul, Y., Ahlatci, H., Turan, M. E., Erden, M. A., Sun, Y., and Kilic, A., "Influence of carbon fiber content on bio-tribological performances of high-density polyethylene", *Materials Research Express*, 6 (12): 125307 (2019).
74. Turan, M. E., Sun, Y., Aydın, F., and Akgul, Y., "Influence of multi-wall carbon nanotube content on dry and corrosive wear performances of pure magnesium", *Journal Of Composite Materials*, 52 (23): 3127–3135 (2018).
75. Turan, M. E., Sun, Y., and Akgul, Y., "Mechanical, tribological and corrosion properties of fullerene reinforced magnesium matrix composites fabricated by semi powder metallurgy", *Journal Of Alloys And Compounds*, 740: 1149–1158 (2018).

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Nusrev TANRIVERDİ. 1990'da Adana'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Yeşilevler Teknik, Anadolu ve Endüstri Meslek Lisesi, Makine Teknolojisi Bölümü'nden 2009 yılında mezun oldu. 2010 yılında Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 2016 yılında lisans programından mezun olduktan sonra 2017 yılında Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü'nde başlamış olduğu yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir. 2019 yılından beri Teknik Grup Sav. ve Hav. firmasında Kalite Kontrol Mühendisi olarak çalışmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi, İmalat Mühendisliği, Merkez / KARABÜK

Tel. : 0507 887 0805

E-posta : ahmetnusrevertanriverdi@ogrenci.karabuk.edu.tr