

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİLİĞİ ANA BİLİM DALI



Nİ KAPLI GRAFEN NANOPLAKALAR İLE
TAKVİYELENDİRİLMİŞ AL KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU

İREM KOCASÜLEYMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOÇ.DR. ARİF UZUN

EKİM - 2023
KASTAMONU

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

İrem KOCASÜLEYMAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nİ KAPLI GRAFEN NANOPLAKALAR İLE TAKVİYELENDİRİLMİŞ AL KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

İREM KOCASÜLEYMAN

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:DOÇ.DR. ARİF UZUN

Bu çalışmada, nikel kaplı grafen ilavesinin alüminyum kompozitlerin fiziksel ve mekaniksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma öncelikli olarak grafen nano plakaların (GNP) nikel ile kaplanması ile başlamıştır. Bu işlem için beş farklı kimyasal süreç takip edilmiştir. Bunlar GNP parçacıklarının temizlenmesi, yüzey pürüzlülüğünün artırılması, yüzeylerin aktif hale getirilmesi ve kaplama çözeltisinin uygulanması şeklindedir. Kimyasal kaplama süreçleri tamamlandıktan sonra Al ve Ni-GNP (ağırlıkça %0; 0,8; 1,2 ve 2) tozları geleneksel toz metalurjisi prosedürleri uygulanarak bulk numune haline getirilmiştir. Öncesinde başlangıç tozları bilyalı karıştırıcıda 300 rpm dönme hızında dört saat boyunca karıştırılmıştır. Karışım süresince işlem kontrol ajanı olarak ağırlıkça%0,3 oranında stearik asit kullanılmıştır. Soğuk kaynak yapılmasını önlemek ve grafenin yapısının bozulmasını önlemek için bilyalı öğütme her döngüde 10 dakika dinlenerek 20 dakika boyunca çalıştırılmıştır. Karışım sonrasında toz numuneler 600 MPa basınç altında soğuk olarak preslenmiştir. Ham dayanıma sahip bulk numuneler devamında 630°C sıcaklıkta argon atmosferi altında sinterleme işlemine tabii tutulmuştur. Akabinde üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için Vickers mikrosertlik testi ve basma testi uygulanmıştır. Deneysel mikrosertlik sonuçları, Meyer yasası, orantılı numune direnci modeli, elastik-plastik deformasyon modeli ve Hays Kendall (HK) yaklaşımı kullanılarak analiz edilmiştir. Böylece en uygun yaklaşım modeli olarak Hays–Kendall yaklaşımı belirlenmiştir. Artan Ni-GNP oranı ile birlikte basma dayanımında %7 artış sağlanmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER:Grafen; Toz Metalurjisi; Vickers Sertlik

Ekim 2023, 44 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF AL COMPOSITES REINFORCED WITH NI COATED GRAPHEN NANOPATES

İREM KOCASÜLEYMAN

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. ARİF UZUN**

In this study, the effects of nickel-coated graphene addition on the physical and mechanical properties of aluminum composites were examined. The work primarily started by coating graphene nanoplates (GNP) with nickel. Five different chemical processes were followed for this process. These include cleaning GNP particles, increasing surface roughness, activating the surfaces and applying the coating solution. After the chemical coating processes were completed, Al and Ni-GNP (0; 0,8; 1,2 and 2 wt%) powders were turned into bulk samples by applying traditional powder metallurgy procedures. Beforehand, the starting powders were mixed in a ball mixer at a rotation speed of 300 rpm for four hours. Stearic acid at a rate of 0.3% by weight was used as a process control agent during the mixing. To prevent cold welding and prevent the structure of graphene from deteriorating, the ball milling was operated for 20 minutes with a 10-minute rest in each cycle. After mixing, the powder samples were cold pressed under 600 MPa pressure. Bulk samples with green strength were subsequently subjected to sintering under argon atmosphere at 630°C. Subsequently, Vickers microhardness test and compression test were applied to determine the mechanical properties of the produced composite materials. Experimental microhardness results were analyzed using Meyer's law, proportional sample resistance model, elastic-plastic deformation model and Hays Kendall (HK) approach. Thus, the Hays–Kendall approach was determined as the most appropriate approach model. With the increasing Ni-GNP ratio, a 7% increase in compressive strength was achieved.

KEYWORDS:Graphene; Powder Metallurgy; Vickers Hardness

October 2023, 44 Page

TEŞEKKÜR

Tez danışmanlığımı üstlenerek araştırma konusunun seçimi ve yürütülmesi sırasında, değerli bilimsel uyarı ve önerilerinden yararlandığım, yardım ve katkılarını esirgemeyen, lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca akademik bilgileriyle yoluma ışık tutan Sağıdeğer Hocam Doç. Dr. Arif UZUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarında destek sağlayan Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesine ve Merkezi Araştırma Laboratuvarına, ayrıca analiz çalışmalarında desteğini esirgemeyen Doç.Dr. Hanifi BİNİCİ nezlinde Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesine teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak her zaman yanımda olan kıymetli ablam İlay KOCASÜLEYMAN, değerli kardeşlerim İpek ve İlkay KOCASÜLEYMAN ve canım teyzem Rahşan EKİM VURDU başta olmak üzere, aileme benden desteklerini esirgemedikleri için çok teşekkür ederim. Ruhen daima yanımda hissettiğim annem Nurten KOCASÜLEYMAN'a bu çalışmayı atfederim.

İrem KOCASÜLEYMAN

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER	3
2.1 Grafen	3
2.2 Kompozit Malzemelerin Özellikleri	5
2.3 Kompozit Malzemelerin Üretimindeki Güçlükler	9
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	13
3.1 Malzemeler	13
3.2 GNP'lerin Ni Kaplanması.....	14
3.3 Ni Kaplı GNP'lerin Al Tozları ile Karıştırılması	15
3.4 Presleme ve Sinterleme İşlemleri.....	16
3.5 Karakterizasyon İşlemleri	16
3.5.1 Yoğunluk Ölçümü.....	16
3.5.2 Mikroyapısal Analizler	17
3.5.3 Mikro Sertlik Ölçümleri.....	17
3.5.4 Basma Testi.....	18
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	19
4.1 Mikroyapısal Analiz.....	19
4.2 Yoğunluk Değişimi.....	21
4.3 XRD Analizi	21
4.4 Ni-GNP Takviyeli Al Kompozitlerin Vickers Mikro Sertlik Ölçümleri	23
4.4.1 Analizler ve Modeller	25
4.5 Basma Dayanımı	32
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	35
KAYNAKLAR	36
ÖZGEÇMİŞ.....	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Grafen ve grafen bazlı türevlerin sistematik diyagramı.....	4
Şekil 2.2 GNSs/Al kompozitlerinin TEM görüntüleri (a) Al-0.25GNSs; (b) Al-0.50GNS'ler; (c) Al-1.0GNSs ve (d) seçilmiş bir kırınım paterni.....	11
Şekil 3.1 Alüminyum (a) ve GNP'lerin (b) SEM görüntüsü	13
Şekil 3.2 Filtreleme işlemi	14
Şekil 3.3 Manyetik karıştırma işlemi	15
Şekil 3.4 Karıştırma işleminde kullanılan yüksek enerjili bilyeli öğütücü	15
Şekil 3.5 Sinterlenmiş Ni-GNP/Al kompozit numune	16
Şekil 4.1 Ni ile kaplanmış GNP'ye ait SEM görüntüsü ve elemental haritalama sonucu.....	19
Şekil 4.2 Ni-GNP/Al kompozitlerin SEM görüntüsü a) %0 Ni-GNP, b) %0,8 Ni-GNP c) %1,2 Ni-GNP, d) %2 Ni-GNP	20
Şekil 4.3 %1,2 Ni-GNP/Al kompozitlerin SEM görüntüsü ve EDS sonuçları	20
Şekil 4.4 %0 Ni-GNP - Al (a) ve %2 Ni-GNP - Al numunelerin XRD desenleri	22
Şekil 4.5 Numunelerde yüke bağlı sertlik değişimleri	25
Şekil 4.6 Meyer Yasasına göre malzemelerin $\ln F$ ile $\ln d$ değişimi	26
Şekil 4.7 Malzemelerin $F/d - d$ grafikleri.....	28
Şekil 4.8 Malzemelerin $F^{1/2}/d - d$ grafikleri	30
Şekil 4.9 Hays-Kendall yaklaşımına göre malzemelerin F ile d^2 değişimi.....	32
Şekil 4.10 Ni-GNP/Al numunelere ait basma dayanımı eğrileri.....	34

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 .Tozların boyutları ve karışım oranları	13
Tablo 4.1 Ni-GNP takviyeli Al kompozitlerin deneysel ve teorik yoğunlukları	21
Tablo 4.2 Numunelerin yüke bağlı Hv, E ve Y değerleri	24
Tablo 4.3 Meyer Yasasına göre deneysel verilerin en uygun sonuçları	26
Tablo 4.4 OND modeline göre deneysel verilerin en uygun sonuçları.....	29
Tablo 4.5 EPD modeline göre deneysel verilerin en uygun sonuçları.....	30
Tablo 4.6 Hays-Kendall yaklaşımına göre deneysel verilerin en uygun sonuçları....	32



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al	: Alüminyum
Si	: Silisyum
Ni	: Nikel
Cu	: Bakır

Kısaltmalar

GNS	: Grafen Nanoplaklar
TM	: Toz Metalurjisi
Gr	: Grafen
CNT	: Grafen Nanoplaklar
CTE	: Toz Metalurjisi
AMMC	: Alüminyum Matrisli Kompozit
GNP	: Grafen Nanoplateler
COF	: Aşınma Oranı ve Sürtünme Katsayısı
YEBÖ	: Yüksek Enerjili Bilye Öğütme

1. GİRİŞ

Son zamanlarda, olağanüstü özelliklere sahip yeni kompozit malzemelerin keşfedilmesi farklı teknolojilerde hayati bir role sahiptir (Gangil vd., 2017; Kumar vd., 2020; Wang vd., 2017). Birçok endüstri yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve aşındırıcı ortam gibi birçok durumla karşı karşıyadır (Miller vd., 2000; Miracle, 2005; Surappa, 2003). Bu nedenle, güvenilir gelişmiş malzemelerin üretimi gün geçtikçe önem kazanmaktadır (Alishavandi vd., 2020; Dinaharan vd., 2020; Ebrahimi ve Par, 2019; Nie, 2003). Alüminyum alaşımları, güvenilirlik ve şekillendirilebilirlik açısından faydalı özelliklerinden dolayı farklı mühendislik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Lloyd, 1994). Üretilen malzemeler yüksek mukavemet ve toklukta, aşınmaya, hasara ve korozyona karşı dayanıklı olmalıdır (Abu-Okail vd., 2020; Li vd., 2020; Moustafa vd., 2020; Nazari vd., 2019). Örneğin otomobil endüstrisinde motor bloklarının imalatında kullanılan alüminyum alaşım matrisleri, iyi dökülebilirlikleri nedeniyle ötektik Al-Si alaşımlarına dayanmaktadır (Requena, 2009). Son zamanlarda, Al-Si alaşımlarına dayalı matrislere kısa fiberlerin takviye edilmesi kompozitlerin sürünme direncinde önemli bir artış sağlamıştır (Requena vd., 2006; 2008). Ötektik silikonun güçlendirici rolü, yükün alüminyum matrsten daha sert ötektik silisyuma aktarılmasına dayanır. Bu durum Si partiküllerinin yapı içerisindeki oryantasyonuna ve oranına bağlıdır (Requena, 2009). Bununla birlikte alüminyum alaşımlarının mekaniksel ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik pek çok inorganik parçacık matris içerisine ilave edilerek kullanılmaktadır (Abu-Okail vd., 2020; Huang vd., 2018; Santella vd., 2005). Özellikle seramik parçacıklar, termal genleşmeye ve sürünmeye dirençleri gibi faydalı özelliklerinden dolayı şiddetle tercih edilirler (Abu-Okail vd., 2020). Bu parçacıklar arasında nano yapıları grafen son yıllarda oldukça dikkat çekicidir.

Grafen nanoplakalar (GNP) ile güçlendirilmiş nanokompozitlerin araştırılması grafenin pratik uygulaması açısından büyük önem taşımaktadır (Wang vd., 2012). Bazı ön araştırmalar, GNP'lerin eklenmesinin alüminyum matrisli kompozitlerin dayanımını artırdığını göstermektedir (Gao vd., 2016; Jaim vd., 2016; Li vd., 2015; Tian vd., 2016; Yolshina vd., 2016; Zhang vd., 2016; Wang vd., 2012). Örneğin, Wang vd. (2012) flaketo metalurjisi yöntemi ile GNP'lerle güçlendirilmiş alüminyum

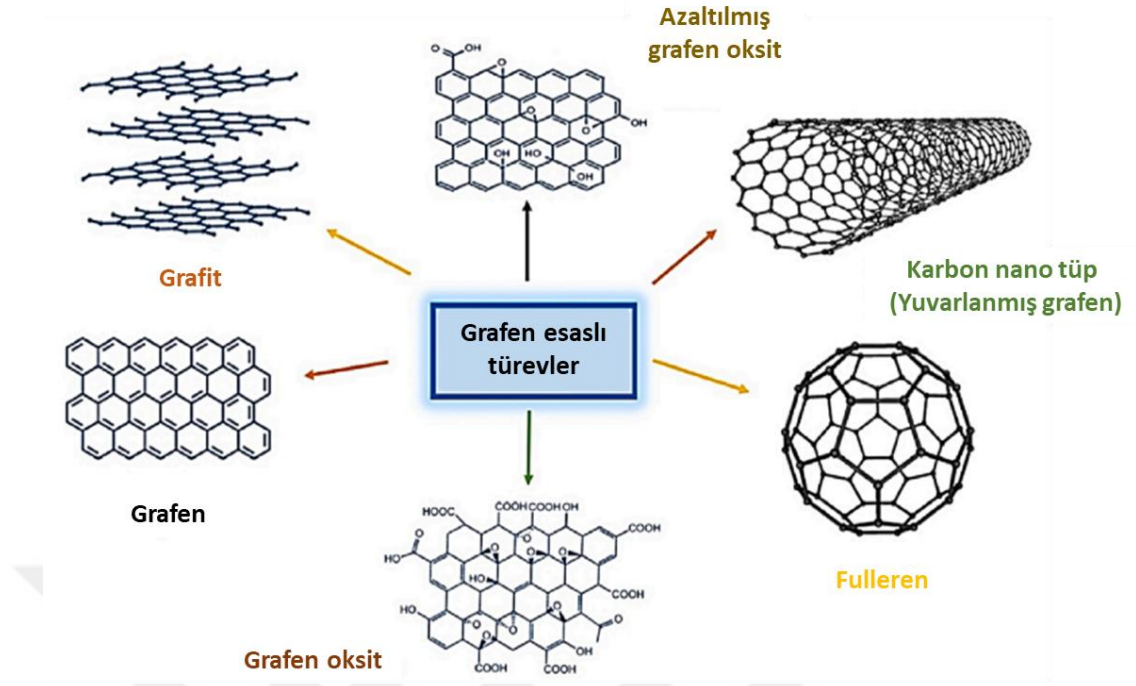
kompozitler üretmişler ve kompozitlerin gerilme mukavemetinin ağırlıkça%0,3GNP'lerin eklenmesiyle %62 arttığını bulmuşlardır. Shin vd., (2015) mekanik öğütme ve sıcak haddelemeyi birleştiren yeni bir üretim yöntemi ile GNP içeren Al matrisli kompoziti başarıyla üretmişlerdir. Araştırmacılar alüminyumun mukavemetinin ağırlıkça %0,7 grafen ilavesiyle %68 arttığını bildirmişlerdir. GNP'lerin yüksek güçlendirme potansiyeline rağmen grafen/Al sisteminlerinde homojen dağılım ve ıslatılabilirlik gibi çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu durumda grafen aglomerasyonları veya zayıf arayüzey bağı gerilme yüklemesi sırasında çatlak başlangıç yerleri olarak hareket edecek ve sonuç olarak kompozit mukavemeti düşecektir (Hai-Yang ve Xin-Wei, 2010). Bununla birlikte Bartolucci vd., (2011) GNP'lerin orta derecede pekiştirici etkilerini ve zaman zaman GNP'lerin eklenmesinin Al'in gücünü azalttığını bildirilmiştir. Grafenin dağılma ve ıslanabilirlik problemlerinin aynı anda üstesinden gelmek için mevcut yaklaşımlardan biri, grafeni bakır veya Ni gibi metallerle kaplamaktır (Guan vd., 2019; Hai-Yang ve Xin-Wei, 2010, Zhao vd., 2015). Cu kaplı grafenin alüminyum ile iyi ıslanabilirlik sergilediği ve haddeleme sonrasında Al kompozitlerinde homojen olarak dağıldığı belirlenmiştir. Ağırlıkça %3 Cu kaplı grafen/Al kompozitin gerilme mukavemeti ve sertliği, takviyesiz alüminyuma kıyasla sırasıyla%77,5 ve%9,1 oranında iyileşmiştir (Zhao vd., 2015).

Bu çalışmada literatürde verilen çalışmalar dışında Ni kaplamalı-kaplamasız grafen plakalar ile takviye edilmiş Al kompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile üretilmesi ve üretilen kompozitlerin mekaniksel ve fiziksel özellikleri üzerine grafenin etkisi belirlenmiştir.

2. GRAFEN TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Grafen

Grafen (Gr), benzersiz yapısı ve özelliklerinden dolayı genellikle "tüm grafit formlarının temeli" olarak anılır. Altıgen bir kafes yapısında düzenlenmiş tek bir karbon atomu tabakasından oluşur. Grafendeki her karbon atomu, güçlü sigma bağları oluşturan üç komşu karbon atomuna kovalent olarak bağlanır. Bu bağlar karbon atomlarının sp^2 hibridizasyonundan kaynaklanır. Her bir karbon atomu trigonal bir düzlemsel düzenlemede sigma bağları oluşturmak için dört değerlik elektronundan üçünü kullanır. Geriye kalan dördüncü değerlik elektronu, grafene olağanüstü elektronik ve termal özelliklerini veren delokalize pi bağından sorumludur (Pérez-Bustamante vd., 2014). Grafen, farklı şekillerde manipüle edildiğinde farklı özelliklere sahip çeşitli yapılar oluşturabilir. Tek bir grafen tabakası bir küreye sarıldığında, Buckminsterfulleren veya bir karbon fulleren adı verilen 0 boyutlu bir yapı oluşturur. C60 olarak da bilinen Buckminsterfullerene altıgen ve beşgen yüzleri olan futbol topu benzeri bir yapıda düzenlenmiş 60 karbon atomundan oluşur. Tek bir grafen tabakası dikişsiz silindirik bir tüpe yuvarlandığında karbon nanotüp (CNT) olarak bilinen 1 boyutlu bir yapı oluşturur. Karbon nanotüpler, grafen tabakasının nasıl yuvarlandığına bağlı olarak farklı yapılara sahip olabilir ve bu da farklı özelliklerle sonuçlanır. Birden fazla grafen tabakası üst üste istiflendiğinde 3 boyutlu grafit oluşturur. Grafit, zayıf Van der Waals kuvvetleri tarafından bir arada tutulan grafen katmanlarından oluşur. Grafitin katmanlı yapısı ona katmanlar boyunca kayganlık ve iletkenlik gibi benzersiz özellikler verir. Şekil 2.1’de grafen ve grafen bazlı türevlerin sistematik diyagramı gösterilmektedir (Hashmi vd., 2022). Hem karbon nanotüpler hem de grafen, alüminyum (Al) matrisler dahil olmak üzere çeşitli malzemelerde takviye olarak önemli ölçüde ilgi görmüştür. Al matrisine karbon nanotüplerin veya grafenin eklenmesi onu çok çeşitli uygulamalar için uygun hale getirerek mekaniksel, elektriksel ve termal özellikleri geliştirebilir (Singh vd., 2019).



Şekil 2.1 Grafen ve grafen bazlı türevlerin sistematik diyagramı

Tek bir karbon atomu tabakası olan grafen, olağanüstü mekanik özellikler sergiler. Gerilme altında deformasyona direnme kabiliyetini ifade eden inanılmaz derecede yüksek bir elastik modülüne ve ayrıca kırılmadan önce gerilime dayanma kabiliyetini ifade eden yüksek bir gerilme mukavemetine sahiptir. Benzer şekilde, karbon nanotüpler (CNT'ler) de olağanüstü mekanik özellikler sergilerler (Pillari vd., 2018). Metal veya polimer gibi bir matris malzemesine grafen veya CNT eklendiğindetemas yüzeyleri arasında bir yağlama tabakası oluşturabilirler. Bu katman yüzeyler arasındaki doğrudan teması ve sürtünmeyi azaltarak sürtünme katsayısını düşürür (Arribas vd., 2012). Grafenin daha yüksek spesifik yüzey alanı solventlerdeki üstün dağılma kabiliyetine katkıda bulunurken karbon nanotüplerin daha yüksek en-boy oranı genellikle onlara bir matris malzemesini güçlendirmek için daha büyük bir potansiyel sağlar ve gelişmiş mekanik özellikler sunar (Bisht vd., 2017; Lahiri vd., 2012; Li ve Xiong, 2017; Li vd., 2015,2018; Yue vd., 2017). Grafen, ısıyı verimli bir şekilde transfer etmesine izin veren tipik olarak 5000 W/m-K civarında, olağanüstü yüksek bir termal iletkenliğe sahiptir. Eşsiz iki boyutlu yapısı termal enerjinin düzlemi boyunca hızla yayılmasını sağlayarak onu mükemmel bir ısı iletkeni yapar. Elektriksel iletkenlik açısından grafen yaklaşık 108 S/cm tipik değerlerle CNT'leri de geçer. Termal iletkenlik ve elektriksel iletkenlik açısından CNT'ler grafenden daha düşük olmasına rağmen yine de dikkate değerdir ve kompozitlerin termal ve elektriksel

özelliklerine katkıda bulunabilirler (Asgharzadeh ve Sedigh, 2017; SeyedPourmand ve Asgharzadeh, 2020). GNP'lerin üretimi, ölçeklenebilirlik ve maliyet etkinliği açısından karbon nanotüplere (CNT'ler) göre avantajlar sunarken, tek katmanlı grafenin sentezi daha zorlu ve daha az ekonomiktir (Karthiselva ve Bakshi, 2016; Shahil ve Balandin, 2012; Yang vd., 2017). Tek katmanlı grafenin sentezlenen hacmi sınırlıdır. Bu durum onu havacılık, uzay ve otomobil sanayisi gibi endüstrilerde büyük ölçekli uygulamalar için pratik yapmamaktadır. Sonuç olarak alüminyum matriste nano-dolgu malzemesi olarak GNP'lerin kullanılması tavsiye edilmektedir (Choi vd., 2010).

2.2 Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Bir kompozit malzemenin nispi yoğunluğu bileşenlerinin yoğunluklarından etkilendiğinden alüminyum matrise grafen veya GNP'lerin eklenmesi nispi yoğunlukta bir azalmaya neden olur. Düşük yoğunluklu grafen veya GNP'lerin ağırlıkça %'si arttıkça kompozitin nispi yoğunluğu giderek azalacaktır (Ghazaly vd., 2016; Hasanzadeh vd., 2019; Khan vd., 2019). Al-grafen kompozitinin bağlı yoğunluğu aynı zamanda malzeme içinde geliştirilen mikro yapıdan etkilenir. Yoğun bir mikro yapıya ulaşmak grafen veya GNP'lerin topaklanma eğilimi gibi belirli faktörler nedeniyle zor olabilir. Grafen ve GNP'ler katmanları arasındaki zayıf van der Waals çekim kuvvetleri nedeniyle aglomeralar oluşturma eğilimindedir. Bu topaklanmalar kompozit malzemede yoğun bir mikro yapının elde edilmesini engelleyebilir. Aglomeraların varlığı malzeme içinde boşluklara veya gözenekliliğe neden olarak daha düşük bir nispi yoğunluğa yol açabilir. Bununla birlikte alüminyum (660 °C) ve grafen/GNP'ler (~4625 °C) arasındaki erime noktalarındaki büyük farkı dikkate almak önemlidir. Kompozitin işlenmesi sırasında alüminyum matris ile grafen/GNP'ler arasında yeterli bağlanma ve entegrasyon sağlanırken alüminyumun ergime noktasının aşılmasına özen gösterilmelidir (Liu vd., 2016; Rashad vd., 2014). Alüminyum ve grafen arasındaki ergime noktalarındaki önemli uyumsuzluk atomların difüzyonunu ve iki malzeme arasında güçlü bir arayüz oluşumunu engelleyebilir. Bu, kompozitte alüminyum ve grafen arayüzünde boşlukların oluşmasına neden olur (Ghazaly vd., 2016). Grafen ve alüminyum farklı termal genleşme katsayısına (CTE) sahiptir. Yani sıcaklık değişikliklerine maruz

kaldıklarında farklı oranlarda genişler ve daralırlar. Termal döngü veya değişen sıcaklıklara maruz kalma sırasında grafen/GNP'ler ve alüminyum arasındaki TGG'daki uyumsuzluk kompozit malzeme içinde iç gerilimlerin oluşmasına neden olur (El-Ghazaly vd., 2017).

Bir alüminyum matraste grafen takviyesinin en önemli avantajlarından biri, sertlik ve çekme mukavemeti dahil olmak üzere farklı mekanik özelliklerin geliştirilmesidir. Al-grafen kompozitinin sertliği karışım kuralı kullanılarak tahmin edilebilir. Karışım kuralı bileşenlerinin özelliklerine ve hacim oranlarına dayalı olarak kompozitin mekanik özelliklerinin bir tahminini sağlayan basit bir modeldir. Sertlik durumunda karışım kuralı her fazın (alüminyum ve grafen) kompozitin genel sertliğine katkısını dikkate alır (Li vd., 2015). Karışım kuralına göre, kompozitin sertliği aşağıdaki denklem (Eşitlik 2.1) kullanılarak hesaplanabilir:

$$H_{kompozit} = (V_{Al} \times H_{Al}) + (V_{Gr} \times H_{Gr}) \quad (2.1)$$

Burada, $H_{kompozit}$; kompozitin sertliğini, V_{Al} ; alüminyumun hacim fraksiyonunu, H_{Al} ; alüminyumun sertliğini, V_{Gr} ; grafenin hacim fraksiyonunu ve H_{Gr} ; grafenin sertliğini temsil etmektedir.

Bununla birlikte, bu modelin kaba bir tahmin sağladığını ve mikroyapı düzeyinde meydana gelen karmaşık etkileşimleri ve takviye mekanizmalarını tam olarak yakalayamayacağını not etmek önemlidir. Bu model topaklanma veya gözeneklilik gibi herhangi bir kusur olmaksızın ideal bir bileşiği varsayar. Esasında mükemmel şekilde üniform ve hatasız bir Al-Gr kompoziti elde etmek zordur. Bir Al-Gr kompozitte sertliği ve buna katkıda bulunan faktörleri doğru bir şekilde analiz etmek için deneysel karakterizasyon ve testler esas alınmalıdır. Deneysel yaklaşım kompozitin mekanik özelliklerinin ve çeşitli faktörlerin etkisinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlar. Genel olarak, GNP'lerin dağılımının ve hizalanmasının iyi kontrol edildiği varsayıldığında, GNP'lerin ağırlıkça %'sindeki bir artış, kompozitin sertliğinde bir artışla sonuçlanma eğilimindedir (El-Ghazal vd., 2017; Geim ve Novoselov, 2007; Jiang vd., 2018; Khan vd., 2020; Sun vd., 2017; Turan,

2019; Yu vd., 2021; Zhang vd., 2017; Zhou vd., 2019; Wang vd., 2012; Wang vd., 2019).

GNP'ler ve alüminyum arasındaki termal genleşme katsayısındaki uyumsuzluk nedeniyle termal döngü veya sıcaklık değişimleri sırasında malzemeler farklı oranlarda genleşirler veya daralır. Bu durum iki malzeme arasındaki arayüzeyde önemli bir stres oluşturur. Arayüzeydeki gerilme birikimi kristal yapıdaki çizgi kusurları olan dislokasyonların kümelenmesine neden olabilir ve plastik deformasyonu engelleyebilir. Buda kompozit içinde gerinim sertleşmesine yol açar. Bununla birlikte, alüminyum matris/grafen kompozitinin sertliğinin azalmaya başladığı grafen ekleme miktarının bir sınırı olabileceğini not etmek önemlidir. Sertlikteki belirli bir sınırın üzerindeki bu düşüş GNP'lerin topaklaşması, zayıf dağılım veya matris içinde grafenin kümelenmesi gibi çeşitli faktörlere bağlanabilir (Hasanzadeh vd., 2019; Khan vd., 2019).

Bisht vd. (2017) GNP ilavesi ile kompozitin gerilme mukavemetinin arttırdığını belirtmiştir. Bulgularına göre, GNP'lerin ağırlıkça %1 dahil edilmesi kompozitin çekme mukavemetinde %54,8 oranında önemli bir artışa neden olmuştur (Bisht vd., 2017). Benzer şekilde ağırlıkça %0,5 oranında grafen eklenmesi üzerine gerilme mukavemetinde %42 oranında artışın bildirilmesi kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmede takviye malzemesi olarak grafenin potansiyelini göstermektedir (Wang vd., 2019). Oysaki belirli bir grafen-GNP oranı aşıldığında gerilme mukavemetinde gözlemlenen azalma kompozit malzemelerde istenen mekanik özellikleri elde etmek için takviye içeriği, dağılım kalitesi ve arayüzey etkileşimleri arasında doğru dengeyi bulmanın önemini vurgulamaktadır (Gao vd., 2016; Khan vd., 2020; Li vd., 2015; Wang vd., 2019). Bununla birlikte Elghazaly vd., (2017) çalışmalarında daha yüksek grafen içeriğinin (%5) dahil edilmesinin bazı çalışmalarda gözlemlendiği gibi gerilme mukavemetinde bir azalmaya yol açmadığını öne sürmüşlerdir (El-Ghazaly vd., 2017). Sinterleme sonrasında sıcak ekstrüzyon kullanarak Al matrisi içinde düzgün bir grafen dağılımı elde edilebilmektedir. Bu iyileştirilmiş dağılım daha yüksek grafen içeriği ile gerilme mukavemetinde gözlemlenen artışa katkıda bulunmuştur (Guan vd., 2019; Tian vd., 2016; Yan vd., 2014).

Grafen içeriğinin Al-Gr kompozitlerinin sünekliği üzerindeki etkisi önemli bir husustur. Genel olarak Al matrise grafen eklenmesi kompozitin sünekliğini etkileyebilir ve takviye edilmemiş Al matrise kıyasla uzama yüzdesinin azaldığı sıklıkla gözlemlenebilir (Geim ve Novoselov, 2007; Jiang vd., 2018; Khan vd., 2020; Yu vd., 2021; ; Zhang vd., 2017; ; Zhou vd., 2019; Wang vd., 2019). Bunun nedeni birkaç faktörle açıklanabilir. Grafeni Al matrisinde dağıtmak için kullanılan bilyeli öğütme işlemi, grafen yapısında mekanik hasara neden olabilir. Bu hasar stres yoğunlaştırıcılar olarak işlev görebilen ve kompozitin sünekliğini azaltabilen kusurların ve yapısal bozulmaların ortaya çıkmasına neden olur (Latief ve Sherif, 2012). Bununla birlikte grafen tabakaları topaklaştığında matris içinde kümeler veya büyük ölçekli yapılar oluştururlar. Bu aglomeralar çatlak başlangıcını destekleyerek sünekliğin azalmasına neden olabilir (Li vd., 2015). Al matrisinde grafenin varlığı iki malzeme arasında arayüz reaksiyonlarını indükleyebilir. Olası bir reaksiyon kırılğan bir bileşik olan Al_4C_3 'ün oluşumunu sağlayacaktır. Bu kırılğan fazın oluşumu genel sünekliği azaltarak kompozitte zayıf bölgelere neden olabilir (Li vd., 2015). Diğer taraftan artan gerilme mukavemetinin yanı sıra yüzde uzamada da iyileşmenin elde edildiği durumlar da vardır. Bu gelişmeler kompozit içinde uygun bir mikro yapının geliştirilmesine bağlıdır. Grafenin etkin dağılımı ve aglomerasyonun kontrolü gibi uygun toz işleme teknikleri ince taneler ve düzgün dağılmış grafen parçacıkları ile iyi dengelenmiş bir mikro yapıya yol açabilir. Bu optimize edilmiş mikro yapı gerilme mukavemetinden ödün vermeden geliştirilmiş sünekliğe katkıda bulunur (Jiang vd., 2019; Yan vd., 2014).

Grafit, düşük sürtünme katsayısına sahip katı bir yağlayıcı olarak geniş çapta tanınmaktadır. İyi paketlenmiş karbon atomlarından oluşan benzersiz katmanlı yapısı sayesinde mükemmel yağlama özelliklerine sahiptir. Grafitteki katmanlar, zayıf van der Waals kuvvetleri tarafından bir arada tutularak birbirleri üzerinde kolayca kaymaları sağlanır. Katmanlar arasındaki bu kayma hareketi temas halindeki yüzeyler arasındaki sürtünmeyi azaltan bir yağlama etkisi oluşturur. Sonuç olarak grafit diğer birçok malzemeden önemli ölçüde daha düşük olan 0,14 civarında düşük bir sürtünme katsayısı sergiler (Jackson ve Morrell, 2011; Lahiri vd., 2012; Sahoo ve Das, 2017). Alüminyum matrisli kompozitlere grafit eklenmesi aşınma direnci özelliklerini artırabilir. Grafitin doğal yağlama özellikleri daha önce bahsedildiği gibi onu etkili bir

katı yağlayıcı yapar. Alüminyum matrise eklendiğinde grafit parçacıkları yağlama sağlayabilir ve kayan yüzeyler arasındaki sürtünmeyi azaltabilir. Benzer şekilde gnp'ler de alüminyum matriste katı yağlayıcılar olarak işlev görebilir. Yapıdaki GNP'lerin varlığı temas halindeki yüzeyler arasında sürtünmeyi ve aşınmayı azaltan yağlayıcı katmanlar sağlayabilir (El-Ghazaly vd., 2017; Tabandeh-Khorshid vd., 2016).

Grafenin alüminyum matrisin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi, grafen içeriğine bağlı olarak değişir. Daha düşük ağırlık yüzdelerinde ağırlıkça %3 gibi grafen ilavesinin Al matrisli kompozitlerde aşınma oranını ve sürtünme katsayısını azalttığı gözlemlenmiştir. Burada grafen katmanları doğrudan teması önleyen ve yüzey hasarını azaltan koruyucu bir bariyer sağlamaktadır. Oysaki ağırlıkça %5 gibi belirli bir grafen içeriğinin ötesinde aşınma oranının ve sürtünme katsayısının artmaya başlayabileceği de dikkat çekicidir. Bu durum birkaç faktöre bağlanabilir. Muhtemel bir sebep düzensiz dağılıma ve etkisiz yağlamaya yol açabilen daha yüksek konsantrasyonlarda grafen parçacıklarının topaklaşmasıdır (Bhadauria vd., 2019; El-Ghazaly vd., 2017; Tabandeh-Khorshid vd., 2016). Bu topaklaşmalar yükü etkili bir şekilde aktaramayabilir veya takviye sağlayamayabilir. Bu da grafenin iyi dağılmış bir dağılımına kıyasla daha düşük sertliğe sahip alanların ortaya çıkmasına neden olur. Sonuç olarak bu bölgelerde kayma veya aşındırıcı teması sırasında daha yüksek aşınma oranları meydana gelir (Guiderdoni vd., 2013).

2.3 Kompozit Malzemelerin Üretimindeki Güçlükler

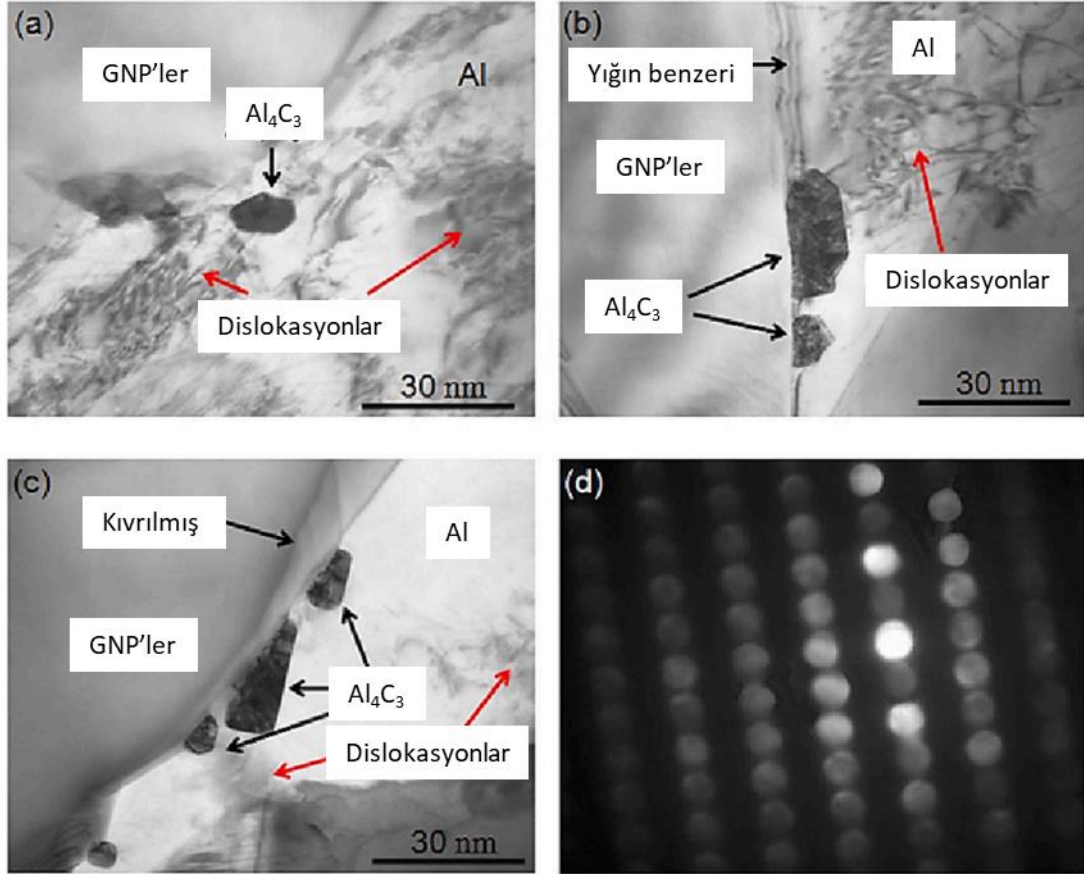
Alüminyum matrisli kompozitlere grafen eklenmesiyle ilgili bazı zorlukların ortaya çıktığı bilinmektedir. Bu zorluklulara örnek olarak grafenin aglomerizasyonu, grafenin Al ile zayıf ıslanabilirliği, istenmeyen arayüzey reaksiyonlarının oluşumu ve grafen yapısının bozulması verilebilir. Esasında bu güçlükler kompozitin fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir (Daha vd., 2021; Jiang vd., 2018; Li vd., 2015; Pérez-Bustamante vd., 2014).

Kompozitte kusurlu grafen yapılarının varlığı Al_4C_3 oluşumuna katkıda bulunabilir. Grafen kafesindeki kusurlar imalat işlemi sırasında alüminyum ve karbon arasındaki

kimyasal reaksiyonlar için tercihli bölgeler olarak işlev görmektedir. Böylece kırılğan bir faz olan ve kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilen Al_4C_3 oluşumu meydana gelir (Bartolucci vd., 2011; Jia vd., 2014; P'erez-Bustamante vd., 2014; Rashad vd., 2014). Al_4C_3 oluşumunu azaltmak için grafen yapısındaki kusurları en aza indirmek önemlidir. Daha az kusurlu yüksek kaliteli grafen kullanmak, etkili sentez yöntemleri kullanmak ve işleme koşullarını optimize etmek gibi stratejiler kusur oluşumu olasılığını azaltmaya yardımcı olabilir. Ek olarak grafenin yüzey işlevselleştirilmesi veya kimyasal modifikasyonu Al_4C_3 fazının alüminyum ile uyumluluğunu artırabilir. Sıcaklık, zaman ve atmosfer gibi sentez ve işleme parametrelerinin kontrol edilmesi Al_4C_3 oluşumunu önlemede çok önemlidir. Bu koşulları dikkatli bir şekilde uyarlayarak kusur oluşumunun boyutunu en aza indirmek ve grafen ile alüminyum arasında istenen arayüzey bağıni desteklemek mümkündür (Bisht vd., 2017; Ghasali vd., 2018). Ayrıca koruyucu kaplamaların, ara katmanların veya yüzey işlemlerinin kullanılması grafen ve alüminyum arasında bir bariyer oluşturarak doğrudan teması engelleyebilir ve kimyasal reaksiyon olasılığını azaltabilir. Bu önlemler grafenin yapısal bütünlüğünün korunmasına ve kompozitin istenen özelliklerinin sağlanmasına yardımcı olur.

Al_4C_3 kompozitin genel sünekliğini ve tokluğunu azaltabilen sert ve kırılğan bir fazdır. Dolayısıyla uygulanan çekme veya eğme yükleri altında erken çatlamaya ve hasara yol açarak kompozitin plastik deformasyona uğrama kabiliyetini sınırlar (Li ve Xiong, 2017; Sun vd., 2017). Bununla birlikte belirtilenin aksine arayüzde ince bir Al_4C_3 tabakasının oluşumu kompozitin arayüzey bağ kuvvetini etkili bir şekilde iyileştirebilmektedir. İnce bir Al_4C_3 tabakasının varlığı alüminyum matris ile grafen takviyesi arasında daha güçlü bir bağlantı sağlayan bir bağ köprüsü görevi görmüştür (Bakshi vd., 2010). Oluşan ara yüzey karbür fazının miktarı kontrol edildiğinde ve uygun bir seviyede tutulduğunda Al_4C_3 , kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerinin genel gelişimine katkıda bulunabilir. Arayüzey karbür fazının aşırı oluşumunun kırılğanlık ve azalan mekanik özellikler gibi zararlı etkileri olabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle kompozitte mukavemet, süneklik ve diğer mekanik özellikler arasında istenen dengeyi elde etmek için ara yüzey reaksiyonunun ve karbür tabaka kalınlığının dikkatli kontrolü ve optimizasyonu yapılmalıdır (Alfonso vd.,

2015; P'erez-Bustamante vd., 2014; Yu vd., 2021). Şekil 2.2'de GNS ve Al matris arasında oluşmuş Al_4C_3 fazı gösterilmektedir (Li ve Xiong, 2017).



Şekil 2.2 GNSs/Al kompozitlerinin TEM görüntüleri (a) Al-0.25GNSs; (b) Al-0.50GNS'ler; (c) Al-1.0GNSs ve (d) seçilmiş bir kırınım paterni

Takviye parçacıkları ve matris arasındaki ara yüzey bağı bir kompozit malzemenin termodinamik stabilitesi ve mekanik özellikleri için oldukça önemlidir (Thakur ve Dhindaw, 2001). Güçlü bir arayüzey bağı takviye ve matris arasında etkili yük aktarımı sağlayarak geliştirilmiş sertlik ve mukavemete yol açar. Al-grafen kompozitlerinde alüminyum ve grafen arasındaki zayıf ara yüzey bağı kompozitte süneklik kaybına yol açar. Al ve grafen arasındaki zayıf ıslanabilirlik bu zayıf arayüz bağının arkasındaki ana nedenlerden biridir (Huang vd., 2014; Uzun, 2019). Al ve grafen arasındaki tipik olarak 140° ila 160° arasında değişen yüksek temas açısı iki malzeme arasında zayıf ıslanma ve sınırlı temas olduğunu gösterir. Bu durum etkili arayüzey alanını sınırlar ve güçlü bağların oluşumunu engeller. Sonuç olarak matris ile takviye arasındaki gerilim ve yük aktarımı tehlikeye girerek süneklikte bir azalmaya yol açar (Huang vd.,

2014). Karbonlu takviyeler üzerinde bir kaplama sağlayarak Al ve grafen arasındaki ıslanabilirlik iyileştirilebilir. Grafen yüzeyine nikel (Ni) veya bakır (Cu) gibi malzemelerin kaplamaları uygulanabilmektedir. Bu kaplamalar Al ve grafen arasında daha iyi temas ve yapışmayı teşvik ederek temas açısını azaltmaya ve ıslanma davranışını geliştirmeye yardımcı olur (Guan vd., 2019; Oh vd., 2012).

Grafenin aglomerasyonu Al-grafen kompozitlerinin üretiminde önemli bir zorluktur. Grafen katmanları arasında güçlü vander Waals kuvvetlerinin varlığı grafenin matris içindeki düzgün dağılımını etkilemekte ve parçacıklarının aglomerasyonuna veya kümelenmesine yol açabilmektedir. Yüksek oranda kompozite grafen yüklemesi yapıldığında parçacıkların birbirine yaklaşma ve aglomera oluşturma olasılığı da artmaktadır (Bisht vd., 2017). Yüksek enerjili bilyalı öğütme (YEBÖ), Al-grafen kompozitlerde grafen takviyesiyle ilişkili topaklanma zorluklarının üstesinden gelmek için etkili bir yöntemdir ve matristeki grafenin dağılımı için daha iyi kontrol sağlar (Xie vd., 2019). Bununla birlikte YEBÖ karıştırma sırasında, grafen yapısında kusurlar ve düzensizlikler meydana getirebilmektedir. YEBÖ sırasında üretilen yüksek darbe kuvvetleri grafen katmanlarının morfolojisinde ve kristalliğinde değişikliklere veya bozulmalara neden olur. Ayrıca artan bilyalı öğütme süresi grafen yapısının kusuruna ve düzensizliğine katkıda bulunabilir (Bastwros vd., 2014; P´erez-Bustamante vd., 2014). Öğütme işlemi sırasında toz parçacıkları arasındaki çarpma ve çarpışmalar grafenin kristalliğini ve özelliklerini etkileyerek yapısında amorfizasyona veya düzensizliğe yol açabilmektedir (Zhou vd., 2018; Zhou vd., 2014). Alüminyum matris ile iyi dağılım ve karışım elde ederken, grafen yapısının hasarını ve düzensizliğini en aza indirmek için bilyalı öğütme süresi ve yoğunluğu gibi işleme parametrelerini kontrol etmek önemlidir.

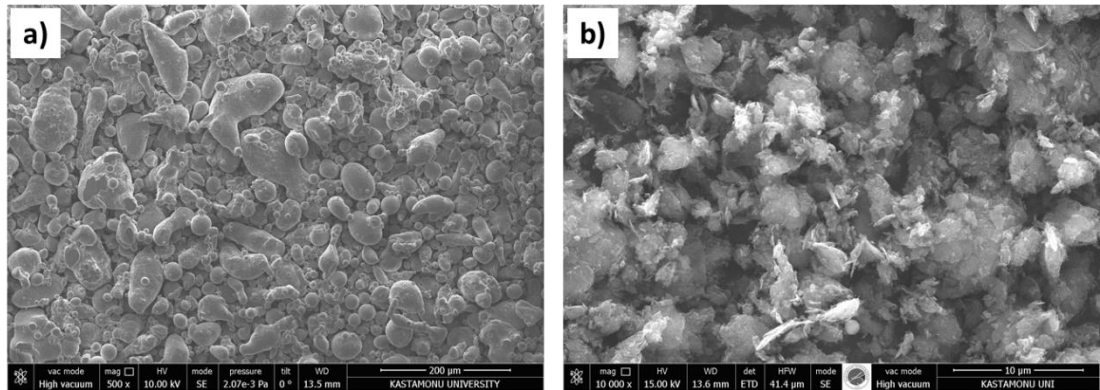
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Malzemeler

Kompozit malzeme üretiminde başlangıç malzemeleri olarak saf Al tozu ve grafen nonoplakalar (GNP) kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak Duha Toz Metal firmasından küresel şekilli Al tozu (%99,9 saflıkta) ve takviye elemanı olarak Nanografi firmasından grafen nonoplakalar (3 nm) temin edilmiştir. Tablo 3.1’de deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin parçacık boyutu ve karışım oranları verilmiştir. Bununla birlikte grafen plakaların kimyasal yöntemlerle Ni ile kaplanmak için; sodyum hidroksit (NaOH - %96), nitrik asit (HNO₃ - %68), hidroklorik asit (HCl - %37,5), kalay(II) klorür (SnCl₂ - %99), kalay (Sn - %99,5), gümüş nitrat (AgNO₃ - %99,8), amonyum hidroksit çözeltisi (%28 NH₃.H₂O), nikel sülfat heksahidrat NiSO₄.6H₂O - %98,0), amonyum klorür (NH₄Cl - %99,5), disodyum hidrojen sitrat seskuhidrat (Na₂HC₆H₅O₇.1.5H₂O - %98,0), borik asit (H₃BO₃ - %99,5), sodyum hipofosfit (NaH₂PO₂ - %99,0) ve damıtılmış su kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların SEM görüntüsü Şekil 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 .Tozların boyutları ve karışım oranları

Toz	Temin edildiği yer	Parçacık boyutu	Karışım oranı (ağırlıkça %)
Al	Duha toz metal	< 45 µm	Kalan
GNP	Nanografi	3 nm	0-0,8-1,2-2



Şekil 3.1 Alüminyum (a) ve GNP’lerin (b) SEM görüntüsü

3.2 GNP'lerin Ni Kaplanması

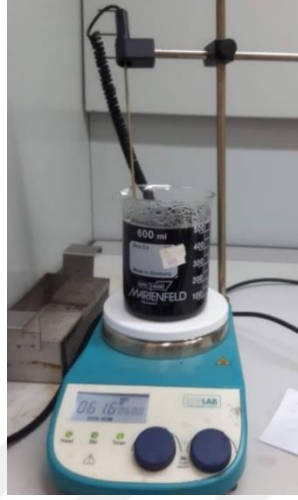
Deneyisel çalışmalar öncelikli olarak GNP'lerin kaplanması ile başlamıştır. Bu süreç beş aşamadan meydana gelmiştir. 1. aşamada GNP'ler ağırlıkça %4.5 NaOH sulu çözeltisine ilave edilmiş ve 35 °C'de 20 dakika boyunca ultrasonik işleme temizlenmiştir. Daha sonra karışım damıtılmış su ile nötr olacak şekilde seyreltilmiş ve filtrelenmiştir (Şekil 3.2). 2. aşamada GNP'ler ağırlıkça %40 nitrik asite ilave edilmiş ve 1 saat boyunca 60 °C'de ultrasonik işleme tabii tutulmuştur. Akabinde 1. aşamada olduğu gibi çözeltiyi seyreltme ve filtreleme işlemleri uygulanmıştır. Bu işlem sonunda nikelin grafenin yüzeylerine tutunması için pürüzlü yüzeyler elde edilmiştir. 3. aşamada GNP'ler hidroklorik asit, SnCl_2 , Sn ve damıtılmış sudan hazırlanan hassaslaştırma çözeltisi içerisine ilave edilmiştir. Burada 30 dakika boyunca 25 °C'de ultrasonik işleme tabii tutulmuştur. Daha sonra karışım damıtılmış su ile nötr olacak şekilde seyreltilmiş ve filtrelenmiştir.



Şekil 3.2 Filtreleme işlemi

4. aşamada GNP'ler aktive edici çözeltiye ilave edilmiş ve 30 dakika boyunca 25 °C'de ultrasonik işleme tabii tutulmuştur. Aktive edici çözelti AgNO_3 ve 1 lt damıtılmış su çözeltisine $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ damlatarak hazırlanmıştır. 5. aşamada GNP'ler $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NH_4Cl , $\text{Na}_2\text{HC}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$, H_3BO_3 ve damıtılmış sudan oluşan Ni kaplama çözeltisine ilave edilerek 60°C'de karıştırılmıştır (Şekil 3.3). Karışımın pH değeri 12 olacak şekilde $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ilave edilmiştir. Ph değeri ayarlandıktan sonra karışıma

NaH_2PO_2 ilavesi gerçekleştirilmiş ve 40 dakika sonra karışım filtrelenmiştir. Akabinde Ni kaplı GNP'ler 60°C 'de 12 saat boyunca kurutulmuştur.



Şekil 3.3 Manyetik karıştırma işlemi

3.3 Ni Kaplı GNP'lerin Al Tozları ile Karıştırılması

Ni kaplı GNP'ler kompozit yapıyı oluşturmak için Tablo 3.1'de belirtilen oranlarda ayrı ayrı Al tozu içerisine ilave edilmiştir. Daha sonra Şekil 3.4'te verilen bilyeli karıştırıcıda 300 rpm dönme hızında 4 saat karıştırılmıştır. Karışım esnasında işlem kontrol ajanı olarak ağırlıkça %0,5 stearik asit kullanılmıştır. Bununla birlikte biye/toz oranı 5:1 olacak şekilde ayarlanmıştır. Soğuk kaynak yapılmasını önlemek ve grafenin yapısal formunun bozulmaması için bilyalı karıştırıcı, her döngüde 10 dakika bekletilerek 20 dakika boyunca çalıştırılmıştır.



Şekil 3.4 Karıştırma işleminde kullanılan yüksek enerjili bilyeli öğütücü

3.4 Presleme ve Sinterleme İşlemleri

Ni-GNP/Al karışım tozları çelik bir kalıp içerisinde tek yönlü olarak oda sıcaklığında 600 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır. Ham yoğunluğa sahip Al numuneler 630 °C’de 2 saat süre ile argon atmosferinde sinterlenmiştir. Şekil 3.5’ de sinterleme sonrası elde edilen kompozit numune gösterilmektedir. Sinterleme sonrası deneysel değişkenlerin etkilerini belirlemek için karakterizasyon işlemlerine geçilmiştir.



Şekil 3.5 Sinterlenmiş Ni-GNP/Al kompozit numune

3.5 Karakterizasyon İşlemleri

3.5.1 Yoğunluk Ölçümü

Ni-GNP/Al kompozit numunelerin teorik yoğunlukları karışım kuralına göre hesaplanmıştır (Eşitlik 3.1). Burada ρ_T ; kompozitin teorik yoğunluğunu, ρ_n ; kompoziti oluşturan bileşenin teorik yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$\rho_T = \frac{(\%Oran \times \rho_1) + (\%Oran \times \rho_2) + \dots + (\%Oran \times \rho_n)}{100} \quad (3.1)$$

Kompozit malzemelerin deneysel yoğunlukları (ρ_D) sabit hacimli olmalarından dolayı Eşitlik 3.2’de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır. Burada m_h ; kompozitin havadaki ağırlığını ve v ; kompozitin hacmini ifade etmektedir.

$$\rho_D = \frac{(m_h)}{(v)} \quad (3.2)$$

Kompozit malzemelerin bağıl yoğunluk değerleri elde edilen deneysel yoğunluğun teorik yoğunluğa oranlanması ile hesaplanmıştır (Eşitlik 3.3).

$$\rho_B = \frac{(\rho_D)}{(\rho_T)} \times 100 \quad (3.3)$$

3.5.2 Mikroyapısal Analizler

Ni-GNP/Al kompozit numunelerin kimyasal bileşimleri ve mikroyapısal analizleri için Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan FEI marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve cihaza entegre enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) kullanılmıştır. Ayrıca faz tayini için Bruker marka X-ışını difraksiyonu (XRD) cihazı kullanılmıştır. Ölçümler 3 ila 90 derece aralığında ve 1,2 s/derece oranında gerçekleştirilmiştir.

3.5.3 Mikro Sertlik Ölçümleri

Vickers sertlik ölçümleri, Shimadzu marka dijital mikro sertlik test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında yapılmıştır. Numune yüzeylerinden alınan ölçümlerde beş farklı yük (0,490-0,980-1,96-2,940 ve 4,90 N) uygulanmıştır. Bu işlem esnasında batıcı ucun izlerinin üst üste binmemesine dikkat edilmiştir. Ardından, malzemenin yüzeyinde, batıcının bıraktığı iz köşegenleri mikroskop kullanılarak okunmuştur. Yük/iz alanı ile Vickers sertlik arasındaki ilişki aşağıda verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 3.4).

$$H_V = 1854.4 (F/d^2) \text{ (GPa)} \quad (3.4)$$

Burada F , N cinsinden uygulanan yükü ve d ise μm cinsinden yükün malzeme üzerinde oluşturduğu izin köşegensel ortalama uzunluğunu ifade etmektedir. Ayrıca bütün numuneler için yüke bağlı elastik modülü E değerleri ve akma dayanımı Y , Eşitlik. (3.5) ve (3.6)' te verilen ifadelerden hesaplanmıştır.

$$E=81,9635 H_v \quad (3.5)$$

$$Y \approx H_v/3 \quad (3.6)$$

3.5.4 Basma Testi

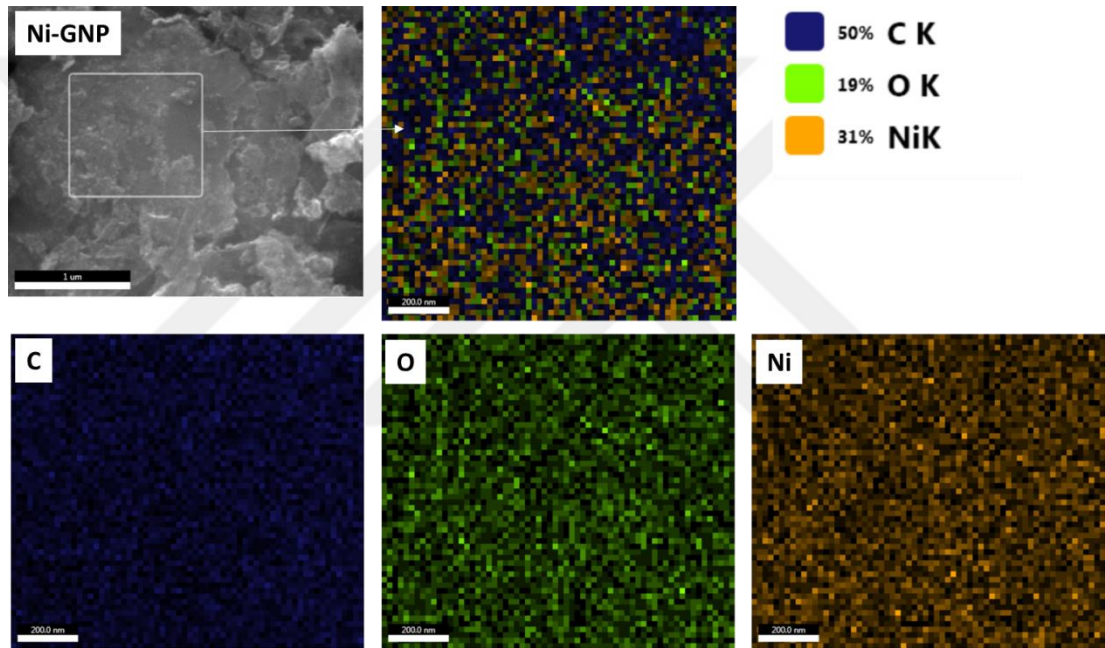
Ni-GNP/Al kompozit numunelerin basma dayanımlarını belirlemek için Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Shimadzu marka universal test cihazı kullanılmıştır. Basma testleri 1 mm/dak deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir.



4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

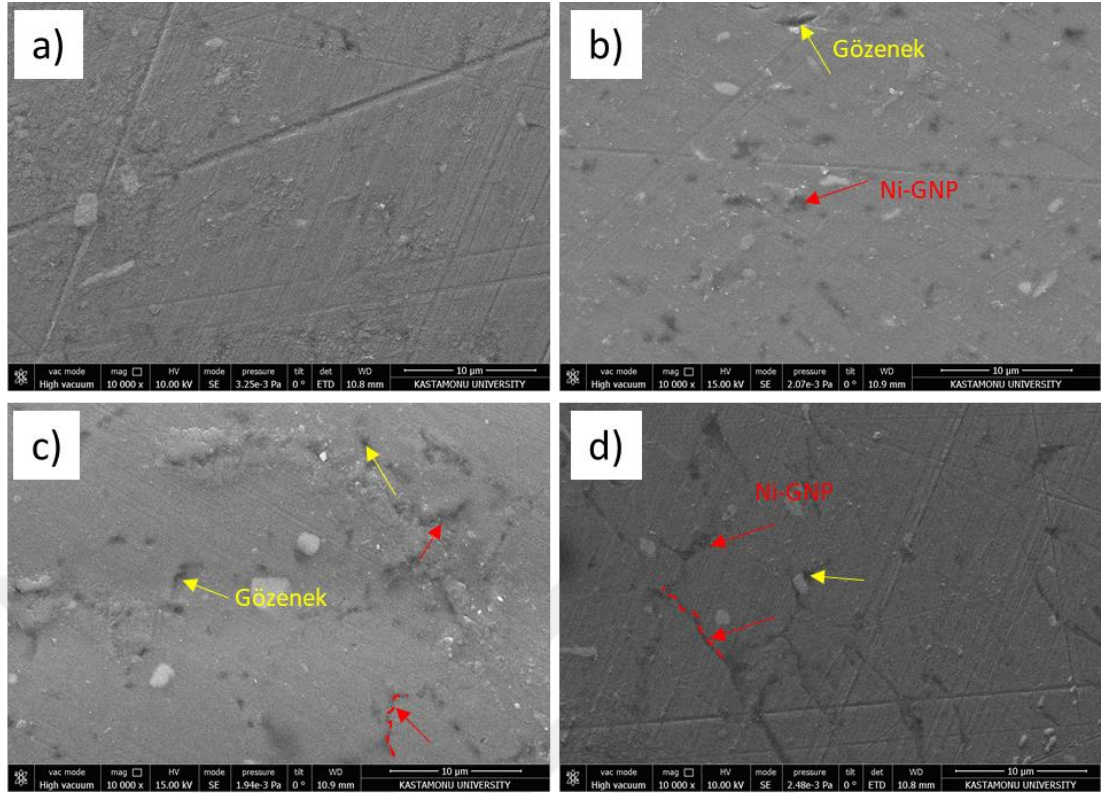
4.1 Mikroyapısal Analiz

Şekil 4.1’de Ni ile kaplanmış GNP’ye ait SEM görüntüsü ve elemental haritalama sonucu gösterilmektedir. GNP’lerin yüzeyinde yoğun şekilde paketlenmiş Ni parçacıklarından oluşan bir tabaka dağıtılmıştır. Bununla birlikte nipten oksijenin varlığında dikkat çekicidir.

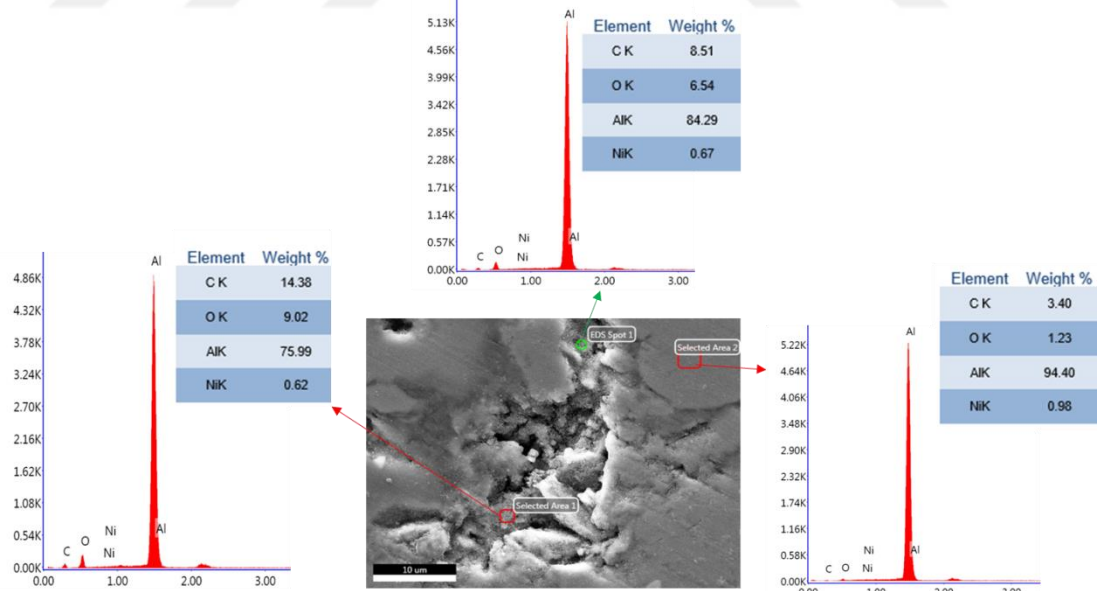


Şekil 4.1 Ni ile kaplanmış GNP’ye ait SEM görüntüsü ve elemental haritalama sonucu

Ni-GNP/Al kompozitlerindeki GNP’lerin morfolojisi ve dağılımı Şekil 4.2’de gözlenmiştir. Ni-GNP’ler yalnızca matriste rastgele dağılmaları nedeniyle kompozitlerin SEM görüntüsünde farklı morfolojiler göstermektedir. Düzensiz nanoplakaların ve doğrusal siyah fazların her ikisi de EDS sonuçlarıyla tanımlanan GNP’leri göstermektedir (Şekil 4.3). Ni-GNP’ler önemli ölçüde gösterilen kompozitlerde takviye olarak tane sınırlarına dağıtılmış ve yer yer çevresinde mikro boşluklar bulunmaktadır.



Şekil 4.2 Ni-GNP/Al kompozitlerin SEM görüntüsü a) %0 Ni-GNP, b) %0,8 Ni-GNP c) %1,2 Ni-GNP, d) %2 Ni-GNP



Şekil 4.3 %1,2 Ni-GNP/Al kompozitlerin SEM görüntüsü ve EDS sonuçları

4.2 Yoğunluk Değişimi

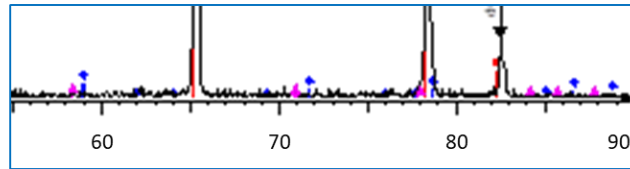
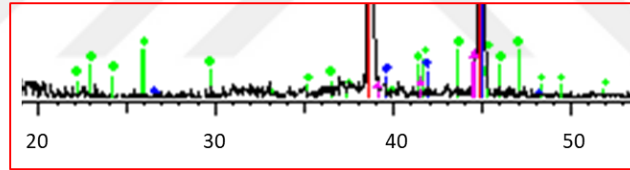
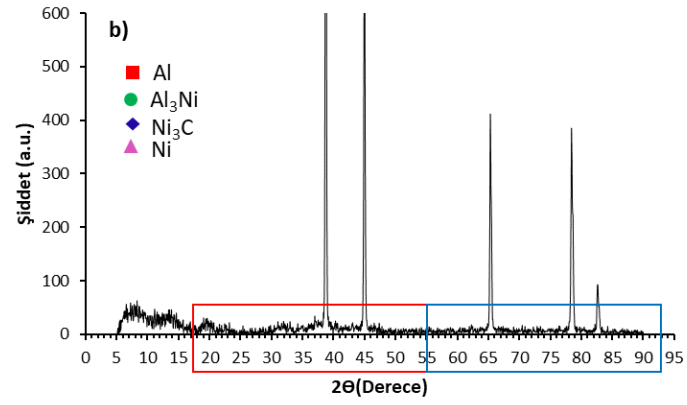
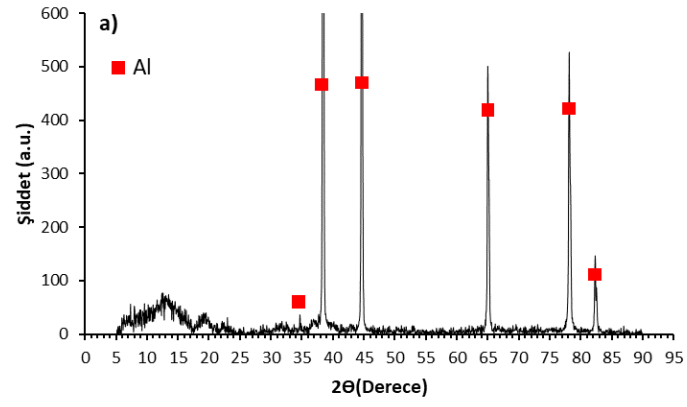
Ni-GNP takviyeli Al kompozitlerinden deneysel ve teorik yoğunlukları Tablo 4.1’de listelenmiştir. Teorik olarak GNP’nin yoğunluğu alüminyuma kıyasla çok daha azdır (Pillari vd., 2018). Bu nedenle grafen ilavesi Al matrisin bağlı yoğunluğunu azaltması beklenilmektedir (Ghazaly vd., 2016; Hasanzadeh vd., 2019; Khan vd., 2019). Ancak elde edilen değerler ve standart sapmalar dikkate alındığında grafen oranına bağlı olarak yoğunluk değişiminde belirgin bir azalma veya artış tespit edilememiştir.

Tablo 4.1 Ni-GNP takviyeli Al kompozitlerin deneysel ve teorik yoğunlukları

Numuneler	<i>Sıkıştırılmış kompakt</i> <i>yoğunluğu</i>			<i>Sinterlenmiş kompakt</i> <i>yoğunluğu</i>	
	<i>Teorik</i> <i>(g.cm⁻³)</i>	<i>Deneysel</i> <i>(g.cm⁻³)</i>	<i>Bağlı</i> <i>(%)</i>	<i>Deneysel</i> <i>(g.cm⁻³)</i>	<i>Bağlı</i> <i>(%)</i>
%0 Ni-GNP	2,700	2,462±0,025	91,20±0,94	2,510±0,040	92,96±1,47
%0.8 Ni-GNP	2,681	2,490±0,030	92,88±1,12	2,529±0,031	94,35±1,16
%1.2 Ni-GNP	2,671	2,488±0,028	93,14±1,03	2,535±0,035	94,89±1,29
%2 Ni-GNP	2,652	2,455±0,021	92,56±0,81	2,507±0,026	94,52±1,00

4.3 XRD Analizi

Şekil 4.4’de %0 Ni-GNP - Al ve %2 Ni-GNP - Al numunelerin XRD desenleri gösterilmektedir. %0 Ni-GNP- Al numunenin XRD desenine göre Al (Bravais kafesi: kübik, $a=b=c = 4,049$ nm) fazı tespit edilmiştir (Şekil 4.4.a). %2 Ni-GNP- Al numunenin XRD desenine göre de Al (Bravais kafesi: kübik, $a=b=c = 4,040$ nm), Al_3Ni (Bravais kafesi: ortorombik, $a=6,598$; $b=7,352$; $c = 4,802$ nm), Ni_3C (Bravais kafesi: rombohedral, $a=4,553$; $b= 4,553$; $c = 12,920$ nm) ve Ni (Bravais kafesi: hegzagonal, $a = 2,651$; $b = 2,651$; $c = 4,343$ nm) fazları tespit edilmiştir (Şekil 4.4.b). Ni ile grafen parçacıkları arasında yarı kararlı Ni_3C fazının oluşması kaplamanın etkinliğini göstermektedir. Ayrıca Al matris ile Ni kaplama arasında Al_3Ni intermetalik oluşumu grafenin doğrudan Al matris ile güçlü bir bağ oluşturmasını sağlayan nikelin etkinliğini göstermektedir. %0 Ni-GNP ve %2 Ni-GNP takviyeli Al kompozitlerin XRD desenleri karşılaştırıldığında, grafen içeriğinin artmasıyla Al piklerinin yoğunluklarının azaldığı fark edilebilir düzeydedir.



Şekil 4.4 %0 Ni-GNP - Al (a) ve %2 Ni-GNP - Al numunelerin XRD desenleri

4.4 Ni-GNP Takviyeli Al Kompozitlerin Vickers Mikro Sertlik Ölçümleri

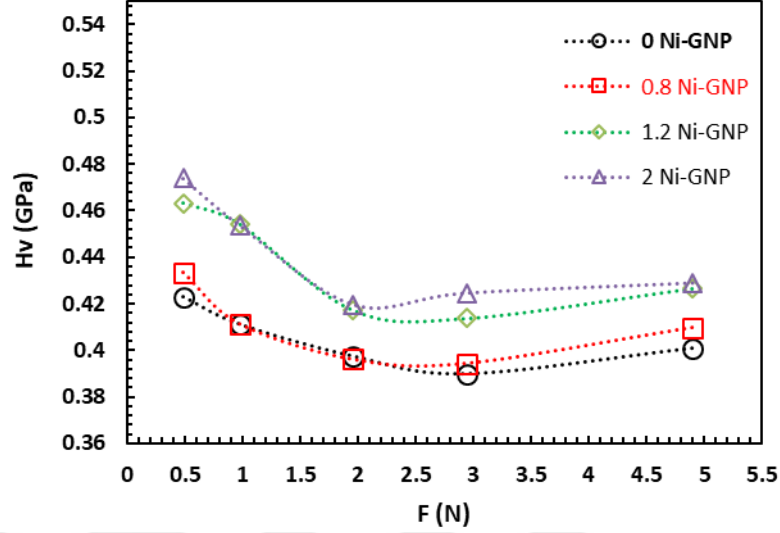
Tablo 4.2’de deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar verilmiştir. Buna göre mikro sertlik değerlerinin batıcı ucun uyguladığı yüke bağlı olduğu açıkça görülmektedir. Numunelerin mikro sertlik değerleri üzerindeki değişimler dikkate alındığında Ni-GNP oranındaki değişimin önemi anlaşılır hale gelmektedir. Bütün numunelerde çentik boyut etkisi (ÇBE) gözlemlenmiştir. Malzemelerin mekanik özelliklerini karakterize etmek için mikro sertliğin yanı sıra elastik modülü ve akma dayanımı da oldukça önemli parametrelerdir. Elastik modülü kuvvet altındaki malzemenin elastik davranışını belirtmektedir. Sert bir malzemenin şeklini değiştirebilmek için çok daha fazla kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda malzemenin elastik modülü yüksektir. H_v ve E artışı malzemeleri şekillendirmek için daha fazla kuvvetin uygulanması gerektiğini göstermektedir. %2 Ni-GNP içeren numunelerde sertlik oranı Ni-GNP içermeyen numunelere kıyasla fazladır. Bu durum Ni-GNP parçacıkların matris içerisinde gerilime neden olmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 4.2 Numunelerin yüke bağlı Hv, E ve Y değerleri

	F (N)	d (μm)	Hv (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)
0 Ni-GNP	0,490	46,346	0,423	34,673	0,141
	0,980	66,480	0,411	33,703	0,137
	1,960	95,637	0,397	32,571	0,132
	2,940	118,264	0,390	31,950	0,130
	4,900	150,553	0,401	32,858	0,134
0.8 Ni-GNP	0,490	45,792	0,433	35,517	0,144
	0,980	66,480	0,411	33,703	0,137
	1,960	95,798	0,396	32,462	0,132
	2,940	117,580	0,394	32,322	0,131
	4,900	148,907	0,410	33,589	0,137
1.2 Ni-GNP	0,490	44,292	0,463	37,964	0,154
	0,980	63,257	0,454	37,225	0,151
	1,960	93,322	0,417	34,207	0,139
	2,940	114,777	0,414	33,921	0,138
	4,900	145,935	0,427	34,970	0,142
2 Ni-GNP	0,490	43,794	0,474	38,832	0,158
	0,980	63,296	0,454	37,179	0,151
	1,960	93,074	0,420	34,389	0,140
	2,940	113,320	0,425	34,798	0,142
	4,900	145,550	0,429	35,156	0,143

Şekil 4.5’de numunelere uygulanan yükün bir fonksiyonu olarak Vickers mikrosertlik değerlerindeki değişimler gösterilmektedir. Şekil 4.5’deki eğrilere bakıldığında bütün numunelere uygulanan yükün artırılmasıyla sertlik değerlerinde azalmanın olduğu görülmektedir. Bütün numuneler için mikro sertlik değerlerinin yaklaşık 1,960N’da doygunluk seviyesine (plato bölgesi) ulaştığı görülmektedir. Bu durumda uygulanan yükün 1,960N’dan fazla olması durumunda mikro sertlik değerlerindeki değişimin çok önemli olmadığı sonucuna varılmaktadır. Dolayısıyla bu durum batıcı iz ile yük arasındaki ilişkinin önemini ortaya koymaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi bütün

numunelerde gözlemlenen ÇBE, batıcı yükünün ne kadar büyük olması o kadar küçük sertlik değerlerinin elde edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.5 Numunelerde yüke bağlı sertlik değişimleri

4.4.1 Analizler ve Modeller

Meyer yasası

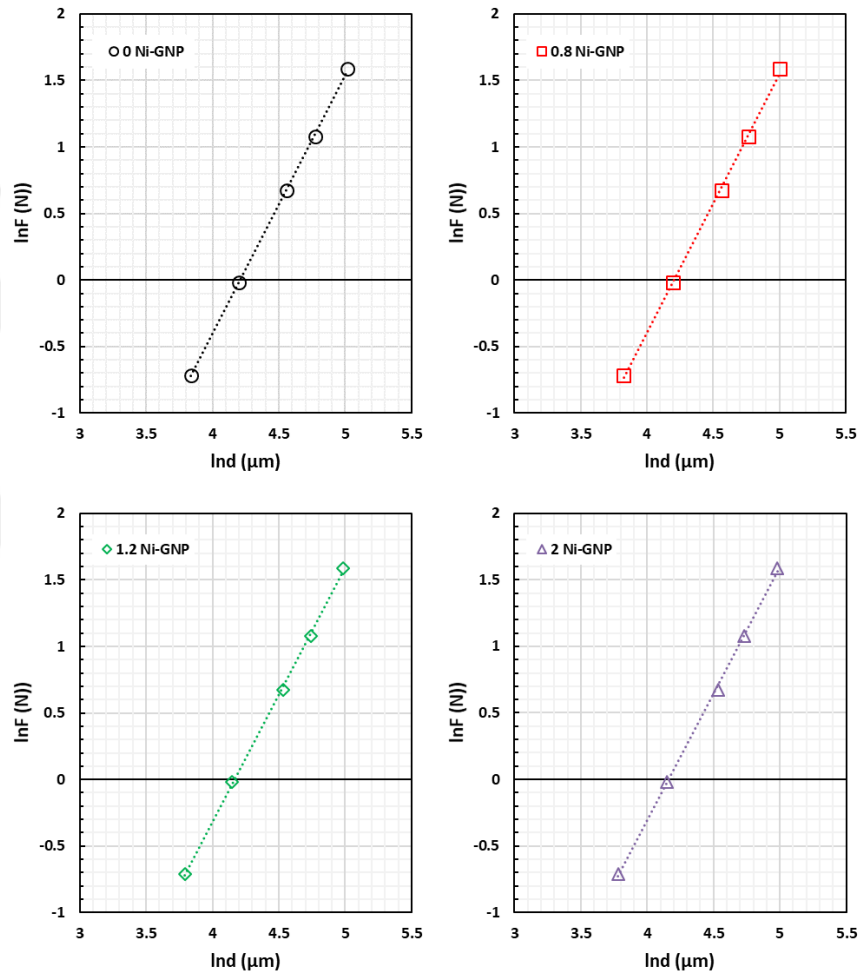
Meyer yasası, çentik boyutu etkisi (ÇBE) davranışını tanımlamak için kullanılan basit bir yöntemdir ve uygulanan yük ile iz arasındaki ilişkiyi belirtmektedir. Basit bir yük yasası olan bu denklem Eşitlik 4.1’de verilmiştir.

$$F = Ad^{n_K} \quad (4.1)$$

Burada A , standart bir sertlik sabiti ve n_K , Meyer indisidir. Bu veriler deneysel verilere göre eğrilerin fit edilmesi ile elde edilmektedir. n_K ’yı zamanda ÇBE davranışın bir ölçüsü olarak kabul edilebilir. Eğer $n_K = 2$ olması durumunda yükten bağımsız sertlik durumunu verir ve Kick’s kanunu olarak aşağıdaki gibi verilir (Eş.4.2) (Asikuzun vd., 2001; Bull vd., 1989; Öztürk vd., 2011; Tosun vd., 2014; Quinn ve D Quinn, 1997).

$$F = A_{1K}d^2 \quad (4.2)$$

Burada A_I , bir geometrik dönüşüm çarpanıdır ve kullanılan batıcının şekline bağlıdır. Eğer $n_K < 2$ olması durumunda ÇBE, $n_K > 2$ olması durumunda ise TÇBE davranış gözlemlenmektedir. Şekil 4.6'da verilen $\ln F$ - $\ln d$ grafiğinin eğiminden elde n_K değerleri tüm numuneler için 2'den daha küçüktür. Bu durum, analiz edilen numunelerin yüke bağlı yer değiştirme davranışının ÇBE davranış şeklinde olduğunu teyit etmektedir. Tablo 4.3'de bu veriler gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Meyer Yasasına göre malzemelerin $\ln F$ ile $\ln d$ değişimi

Tablo 4.3 Meyer Yasasına göre deneysel verilerin en uygun sonuçları

Numuneler	n_K	$\ln A_{IK}$	R
0 Ni-GNP	1,954	-8,21	0,9997
0.8 Ni-GNP	1,953	-8,18	0,9992
1.2 Ni-GNP	1,931	-8,03	0,9992
2 Ni-GNP	1,917	-7,96	0,9993

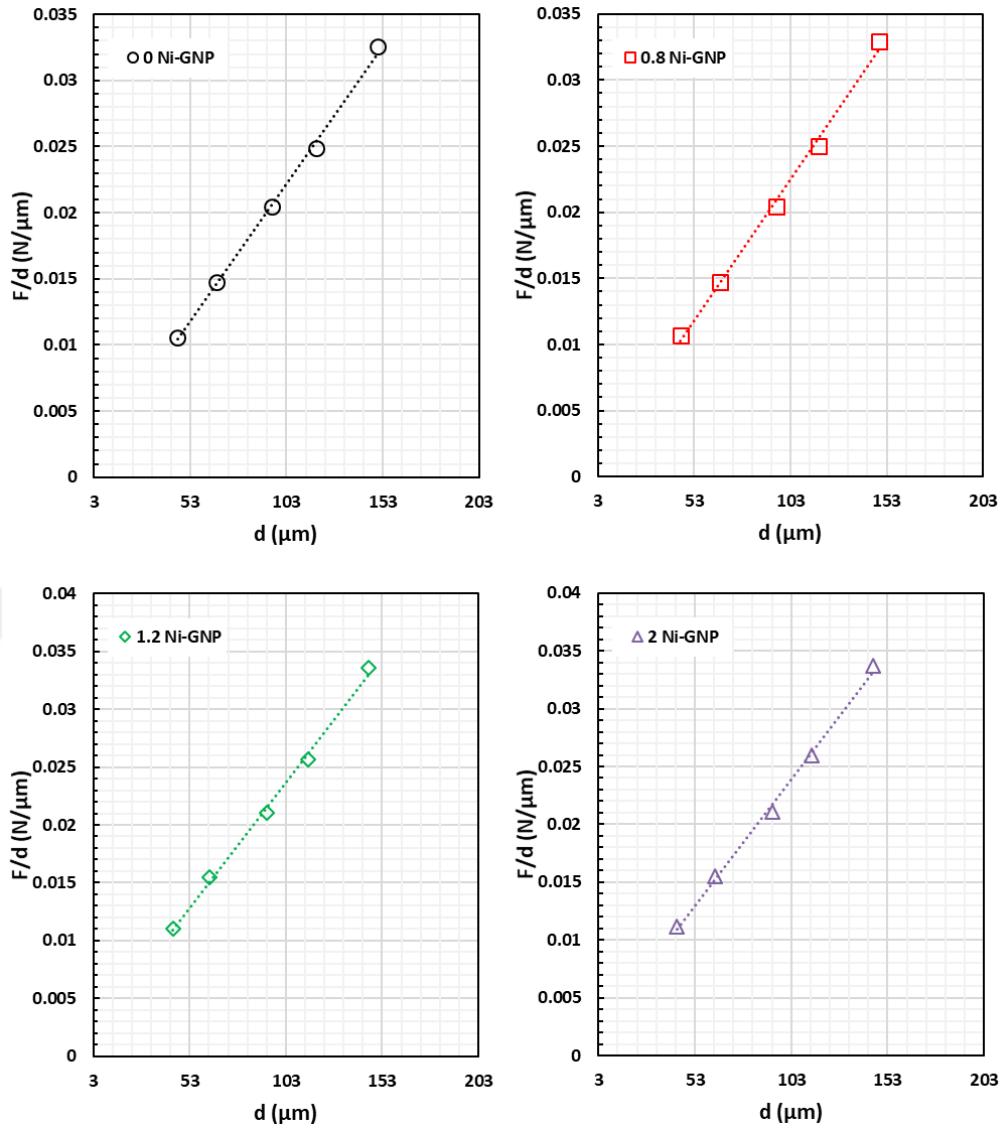
Orantılı Numune Direnç (OND) Modeli

Orantılı Numune Direnç Modeli, ÇBE davranışı olan malzemelerin sertlik analizi için kullanılan bir modeldir (Upit ve Varchenya, 1966). Bu model aşağıda verilen Eşitlik 4.3'deki gibidir.

$$\frac{F}{d} = \alpha + \beta d \quad (4.3)$$

Burada α ve β değerleri Şekil 4.7'de verilen $(F/d) - d$ grafiğinden hesaplanmaktadır. α değerindeki değişim yüzey çatlaklarının dağılımıyla ilişkilidir. OND modelinde yükten bağımsız sertlik modelleri hesaplanmaktadır (Eş. 4.4).

$$H_{OND} = 1854.4\beta \quad (4.4)$$



Şekil 4.7 Malzemelerin $F/d - d$ grafikleri

Tablo 4.4'e bakıldığında bütün numuneler için α değerlerinin pozitif çıktığı görülmektedir. Bu durum ÇBE davranışın göstergesidir. Yani uygulanan yükler karşısında batıcı ucun numune içerisinde daldırılması ve çıkarılması esnasında gerilim boşalması olmuştur. Bundan dolayı malzeme sertliğinde bir miktar azalış meydana gelmiştir. β değerleri gerçek sertlik değerlerini hesaplamada kullanılan bir parametredir. OND modeli ile hesaplanan sertlik değerlerinin Şekil 4.7'de verilen plato bölgesindeki sertlik değerleri ile farklı olduğu açıkça görülmektedir. Bu sebeple numunelerin gerçek sertlik değerlerini tayin etmede OND modeli yetersiz kalmıştır.

Tablo 4.4 OND modeline göre deneysel verilerin en uygun sonuçları

Numuneler	β (N/ μm^2)	α (N/ μm)	R	H_{OND} (Gpa)	H_v (Gpa)
0 Ni-GNP	0,000211	0,0008	0,9982	0,391	0,397-0,401
0.8 Ni-GNP	0,000215	0,000839	0,9962	0,399	0,396-0,410
1.2 Ni-GNP	0,000221	0,001252	0,9959	0,411	0,417-0,427
2 Ni-GNP	0,000221	0,001515	0,9973	0,410	0,420-0,429

Elastik/Plastik Deformasyon Modeli

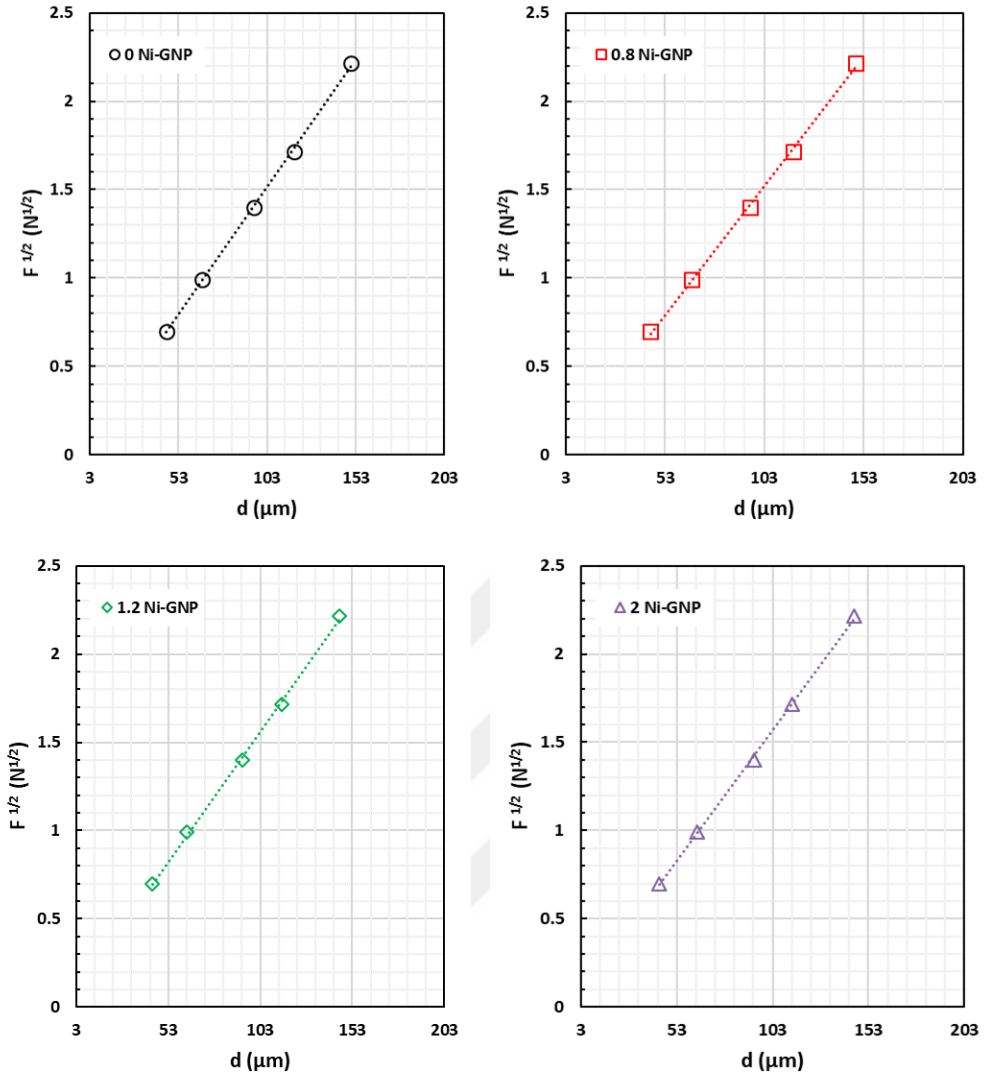
Elastik/plastik deformasyon modeline (EPD) göre uygulanan yük ile iz boyutu arasındaki ilişki aşağıdaki denklemde (Eş. 4.5) verilmiştir (Bull vd., 1989; Upit ve Varchenya, 1966).

$$F = A_2(d_p + d_e)^2 \quad (4.5)$$

Bu denklemde A_2 bir sabiti, d_p ise plastik deformasyonla ilişkili bir değeri ifade etmektedir. Şekil 4.8’te verilen $F^{1/2} - d_p$ grafiğinden A_2 ve d_e değeri hesaplanmaktadır. Buna göre yükten bağımsız sertlik değerleri aşağıda verilen denklemde (Eş.4.6) hesaplanmaktadır.

$$H_{EPD} = 1854.4A_2 \quad (4.6)$$

EPD modeline göre bütün numuneler için elde edilen en iyi fit değerleri Tablo 4.5’te verilmiştir. d_e değerinin pozitif çıkması numunelerin tamamının ÇBE davranışını göstermektedir. Yani uygulanan yüklerle birlikte bir miktar elastik deformasyon davranışı gözlenmiştir. Mikrosertlik değerleri plato bölgesinden nispeten uzaktır. Sonuç olarak, bu model gerçek sertliğin belirlenmesi için yeterli değildir.



Şekil 4.8 Malzemelerin $F^{1/2}/d$ - d grafikleri

Tablo 4.5 EPD modeline göre deneysel verilerin en uygun sonuçları

Numuneler	$A_2^{1/2}$ (N/μm ²)	d_e (μm)	R	H_{EPD} (GPa)	H_v (GPa)
0 Ni-GNP	0,0145	0,0258	0,9996	0,391	0,397-0,401
0.8 Ni-GNP	0,0147	0,0180	0,9991	0,400	0,396-0,410
1.2 Ni-GNP	0,0149	0,0436	0,999	0,411	0,417-0,427
2 Ni-GNP	0,0149	0,0445	0,9994	0,410	0,420-0,429

Hays–Kendall yaklaşımı

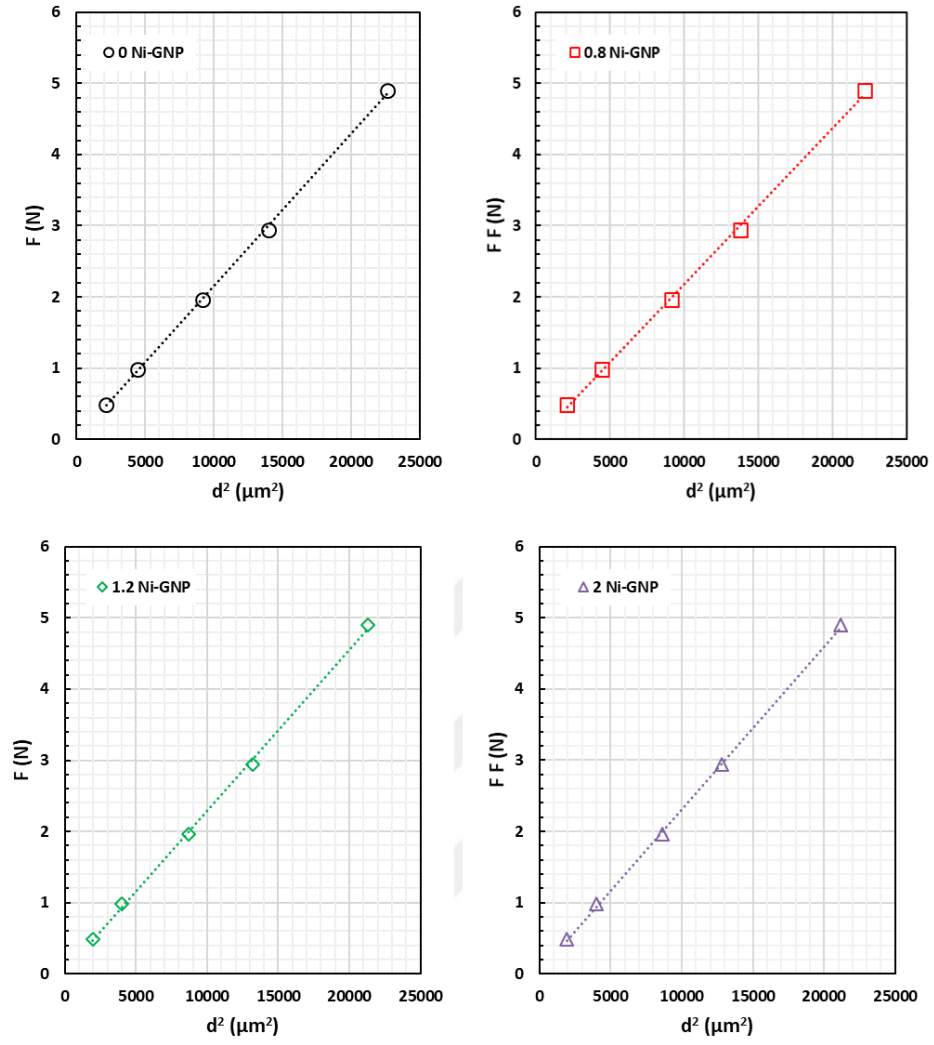
Hays-Kendall numunelerde kalıcı bir deformasyon oluşturmak için minimum bir yüke ihtiyaç sonucuna varmıştır. Buna göre ÇBE davranışı için uygulanan yükün belirli bir limitin altında yalnızca elastik deformasyon, üstünde ise plastik deformasyonun meydana geldiğini ortaya koymuştur. Hays-Kendall deneysel olarak ölçülmüş iz boyutunun, uygulanan test yükü F yerine, etkin bir yük ile olduğu Eşitlik 4.7’de verilmiştir (Hays ve Kendall, 1973).

$$F - W_{HK} = A_{HK}d^2 \quad (4.7)$$

Burada A_{HK} uygulanan yükün bağımsız bir sabitidir. W ve A_{HK} değerleri Şekil 4.9’da verilen $F-d^2$ grafiğinden hesaplanmaktadır. Bu modelde yükten bağımsız sertlik değerleri Eşitlik 4.8’de verilen formülden hesaplanmaktadır. Tüm numuneler için en iyi fit değerleri Tablo 4.6’da verilmiştir.

$$H_{HK} = 1854.4A_{HK} \quad (4.8)$$

Numunelerde elde edilen W_{HK} değerlerinin pozitif yönde olması ÇBE davranışın göstergesidir. Buradan uygulanan yükün plastik deformasyon için tek başına yeterli olmadığı söylenebilir. Hays-Kendall modeli ile hesaplanan sertlik değerlerinin Şekil 4.9’da verilen plato bölgesindeki sertlik değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9 Hays-Kendall yaklaşımına göre malzemelerin F ile d^2 değişimi

Tablo 4.6 Hays-Kendall yaklaşımına göre deneysel verilerin en uygun sonuçları

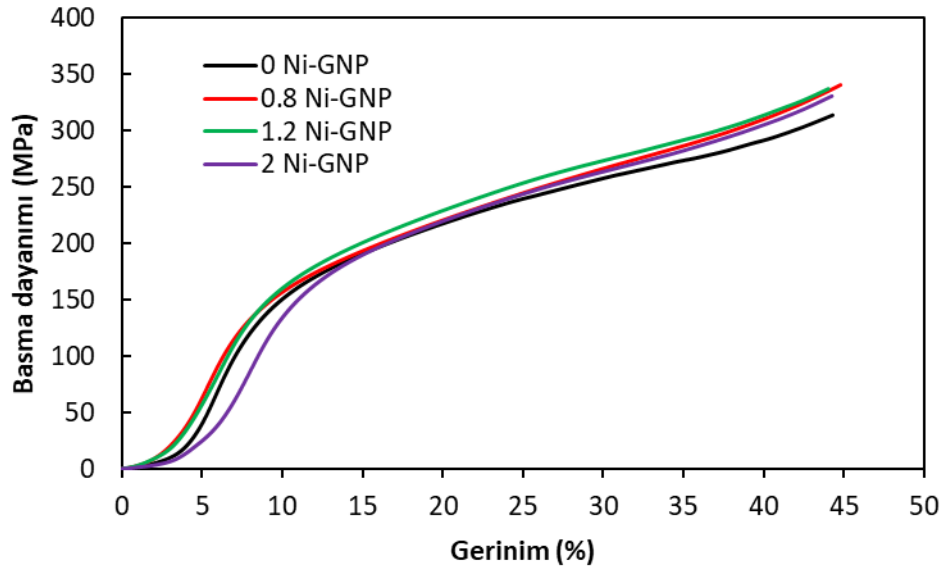
Numuneler	$A_{HK}(\text{GPa})$	$W_{HK}(\text{N})$	R	$H_{HK}(\text{GPa})$	$H_v(\text{GPa})$
0 Ni-GNP	0,00021	0,0283	0,9995	0,3986	0,397-0,401
0.8 Ni-GNP	0,00022	0,0294	0,999	0,4073	0,396-0,410
1.2 Ni-GNP	0,00023	0,0426	0,9991	0,4230	0,417-0,427
2 Ni-GNP	0,00023	0,0510	0,9996	0,4245	0,420-0,429

4.5 Basma Dayanımı

Şekil 4.10’da Ni-GNP/Al numunelere ait basma dayanımı eğrileri gösterilmektedir. Ni-GNP içermeyen numunelere kıyasla grafen katkılı numunelerin basma dayanım değerlerinin nispeten yüksek olduğu verilen grafikten anlaşılmaktadır. %44 gerinim

için elde edilen basma dayanım değerleri saf alüminyum için 314 MPa iken %2Ni-GNP içeren Al kompozit için 337 MPa'dır. Her iki numune için elde edilen basma dayanımı değerleri kıyaslandığında Ni-GNP oranındaki artışın basma dayanımında yaklaşık %7'lik bir artış sağladığı görülmektedir. Alüminyum kompozitlerde grafenin basma dayanımına etkisi, grafenin matris malzemesi içindeki konsantrasyonuna ve dağılımına bağlı olarak değişebilmektedir. Bazı durumlarda, grafen nanoplakaların eklenmesi, yığılmış grafen katmanları arasındaki zayıf bağlanma kuvvetleri ve GNP parçacıklarının olası topaklaşması nedeniyle basma dayanımında bir azalmaya yol açabilir. Bununla birlikte, grafen alüminyum matrise düzgün bir şekilde dağıldığında ve iyi bir şekilde bağlandığında, güçlendirme etkisi sağlayabilir ve kompozitin basma dayanımını artırabilir. Genel olarak, grafenin basma dayanımı üzerindeki etkisi, grafen konsantrasyonu, dağılım kalitesi ve grafen ile alüminyum arasındaki arayüzey bağı gibi faktörlerden etkilenir (Khanna vd., 2023; Rashad vd., 2014). Çalışmamızda grafen parçacıklarının %7 gibi düşük bir oranda olsa artış sağlaması matris ile ara yüzeyde bağlanmanın nispeten yeterli olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen XRD desenlerinde kaplama ile grafen ve matris arasındasirasıyla Ni_3C ve Al_3Ni fazları oluşmuştur. Bu durum arayüzey bağına güçlendirebilecek etki oluşturmuştur. Çok sayıda araştırma, yük transferinin grafen/metal kompozitlerin mekanik özelliklerini arttırmada önemli bir rol oynadığını sağlamıştır (Li vd., 2019; Li vd., 2023). Yük transfer verimliliği ağırlıklı olarak arayüzey reaksiyonları ve arayüzey bağlarının gücü ile bağlantılıdır. Luo vd., (2023) tarafından yapılan çalışmada vakumlu sıcak presleme sinterleme işlemi sırasında, bakır parçacıklarının grafen yüzeyine kimyasal olarak birikmesi ve alüminyum matris ile arayüzde Al_2Cu fazlarının oluşması katkıya ile matris arasında kimyasal bir bağlanmanın oluşmasını sağlamıştır. Çalışmamızda da grafen ile alüminyum matris arasında sırasıyla Ni_3C ve Al_3Ni fazlarının oluşması arayüzey ıslanmasının artmasının ve arayüzey bağının güçlenmesinin göstergesi olarak düşünülmektedir (Huang vd., 2023). Diğer taraftan alüminyum ile grafen arasında Al_4C_3 fazının oluşması kompozitin basma dayanımını düşürebilmektedir (Khanna vd., 2022). Grafenin Ni ile kaplanması kompozitin basma dayanımına olumlu etki ettiği sonucuna varılabilir. Esasında grafen parçacıklarındaki artış ile birlikte basma dayanımında da doğrusal bir artış gözlenmemiştir. %44 gerinim için elde edilen basma dayanım değerleri %1,2 Ni-GNP/Al numune için 340 MPa'dır. Kompozit malzemeler arasında bu değer

maksimum basma dayanımını göstermektedir. Saf alüminyum ve %1,2 Ni-GNP/Al numune için elde edilen basma dayanımı değerleri kıyaslandığında Ni-GNP oranındaki artışın basma dayanımında yaklaşık %8'lik bir artış sağladığı görülmektedir. Alüminyum kompozitlerde grafenin basma dayanımı üzerindeki etkisi grafen içeriğine bağlıdır. Tian vd., (2016) tarafından yapılan çalışmada ağırlıkça %1 grafen ilavesi kompozitlerin basma dayanımını önemli ölçüde artırmıştır. Bununla birlikte, bu içeriğin üzerine daha fazla grafen eklenmesi, basma dayanımında bir azalmaya yol açabileceği vurgulanmıştır. Araştırmaya göre bunun nedeni aşırı grafen eklenmesi grafen plakalarının topaklaşmasına ve birleşmesine neden olabileceği şeklindedir.



Şekil 4.10 Ni-GNP/Al numunelere ait basma dayanımı eğrileri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Ni-GNP/Al kompozit malzemelerin mekaniksel özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada kompozitler Al matris içerisine ağırlıkça %0; 0,8; 1,2 ve 2 oranlarda Ni-GNP parçacıklarının ilavesi ile üretilmiştir. Üretim aşamasında başlangıç tozları bilyeli karıştırıcıda (bilye/toz oranı 5:1) 300 rpm karıştırma hızında 4 saat boyunca karıştırılmıştır. Karışım tozlar 600 MPa basınç altında çelik bir kalıp içerisinde tek yönlü olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sonrası üretilen numuneler argon atmosferinde 630°C sıcaklıkta sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Üretim parametrelerinin numunelerin fiziksel ve mekanik özellikler üzerine etkilerini belirlemek amacıyla sertlik ölçümü yapılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

✓ GNP'lerin Ni ile başarı şekilde kaplandığı tespit edilmiştir. Ni ile C arasında Ni_3C bileşiği ve matris (Al) ile Ni arasında ise Al_3Ni bileşiği oluşmuştur. Ni-GNP'lerin matris içerisinde ve tane sınırı boyunca konumlandığı belirlenmiştir.

✓ Sinterlenmiş Ni-GNP/Al kompozitlerin bağıl yoğunlukları GNP ilavesi ile önemli ölçüde değişmemiştir. Tüm numunelerin bağıl yoğunluk değerleri ortalama $94,18 \pm 1,23$ seviyesindedir. En yüksek bağıl yoğunluk değeri $94,89$ ile $1,2$ Ni-GNP içeren kompozitlerde tespit edilmiştir. En düşük bağıl yoğunluk değeri ise $92,96$ ile Ni-GNP içermeyen numunelerde elde edilmiştir.

✓ Ni-GNP/Al kompozitlerin mikro sertlik değerleri (yükten bağımsız bölgede) grafen ilavesi ile artmıştır. Ayrıca artan yük ile birlikte numune sertlikleri azalmış ve ÇBE davranışı gözlemlenmiştir.

✓ Analiz ve modeller arasında sertlik değerlerinin uyumlu olduğu modelin Hays–Kendall yaklaşımı olduğu tespit edilmiştir.

✓ %44 gerinim için maksimum basma dayanımı (337 MPa) $2Ni$ -GNP içeren Al kompozitte elde edilmiştir. Grafen içermeyen numunelere kıyasla %7 artış sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Abu-Okail, M., Abdelraouf, Y. A., ELSayed, E. M., Abu-Oqail, A., & Farouk, W. M. (2020). Mechanical, microstructural and electrical evaluation of reinforced AA5083 with nano-ceramic powders of silicon dioxide SiO_2 for naval structures. *Journal of Alloys and Compounds*, 155907.
- Alfonso, I., Navarro, O., Vargas, J., Beltrán, A., Aguilar, C., González, G., & Figueroa, I. A. (2015). FEA evaluation of the Al_4C_3 formation effect on the Young's modulus of carbon nano tube reinforced aluminum matrix composites. *Composite Structures*, 127, 420-425.
- Alishavandi, M., Kholari, M. A. R., Ebadi, M., Alishavandi, S., & Kokabi, A. H. (2020). Corrosion-wear behavior of AA1050/mischmetal oxides surface nano composite fabricated by friction stir processing. *Journal of Alloys and Compounds*, 153964.
- Arribas, A., Bermúdez, M. D., Carrion, F., Espejo, C., Martínez-López, E., & Sanes, J. (2012). Scratch resistance of modified polymethyl methacrylate nano composites. In *Materials and Surface Engineering* (pp. 1-21). Woodhead Publishing.
- Asgharzadeh, H., & Sedigh, M. (2017). Synthesis and mechanical properties of Al matrix composites reinforced with few-layer graphene and graphene oxide. *Journal of Alloys and Compounds*, 728, 47-62.
- Bakshi, S. R., Lahiri, D., & Agarwal, A. (2010). Carbon nano tube reinforced metal matrix composites-a review. *International material reviews*, 55(1), 41-64.
- Bartolucci, S. F., Paras, J., Rafiee, M. A., Rafiee, J., Lee, S., Kapoor, D., & Koratkar, N. (2011). Graphene-aluminum nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A*, 528(27), 7933-7937.
- Bastwros, M., Kim, G. Y., Zhu, C., Zhang, K., Wang, S., Tang, X., & Wang, X. (2014). Effect of ballmilling on graphene reinforced Al6061 composite fabricated by semi-solids intering. *Composites Part B: Engineering*, 60, 111-118.
- Bhadoria, A., Singh, L. K., & Laha, T. (2019). Combined strengthening effect of nano crystalline matrix and graphene nano platelet reinforcement on the mechanical properties of spark plasma sintered aluminum based nano composites. *Materials Science and Engineering: A*, 749, 14-26.
- Bisht, A., Srivastava, M., Kumar, R. M., Lahiri, I., & Lahiri, D. (2017). Strengthening mechanism in graphene nano platelet reinforced aluminum composite fabricated through spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 695, 20-28.

- Choi, W., Lahiri, I., Seelaboyina, R., & Kang, Y. S. (2010). Synthesis of graphene and its applications: a review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 35(1), 52-71.
- Daha, M. A., Nassef, B. G., & Nassef, M. G. A. (2021). Mechanical and tribological characterization of a novel hybrid aluminum/Al₂O₃/RGO composite synthesized using powder metallurgy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 2473-2481.
- Dinakaran, I., Zhang, S., Chen, G., & Shi, Q. (2020). Titanium particulate reinforced AZ31 magnesium matrix composites with improved ductility prepared using friction stir processing. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138793.
- Ebrahimi, M., & Par, M. A. (2019). Twenty-year uninterrupted endeavor of friction stir processing by focusing on copper and its alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 781, 1074-1090.
- El-Ghazaly, A., Anis, G., & Salem, H. G. (2017). Effect of graphene addition on the mechanical and tribological behavior of nano structured AA2124 self-lubricating metal matrix composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 95, 325-336.
- Gangil, N., Siddiquee, A. N., & Maheshwari, S. (2017). Aluminium based in-situ composite fabrication through friction stir processing: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 715, 91-104.
- Gao, X., Yue, H., Guo, E., Zhang, H., Lin, X., Yao, L., & Wang, B. (2016). Preparation and tensile properties of homogeneously dispersed graphene reinforced aluminum matrix composites. *Materials & design*, 94, 54-60.
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature materials*, 6(3), 183-191.
- Ghasali, E., Sangpour, P., Jam, A., Rajaei, H., Shirvanimoghaddam, K., & Ebadzadeh, T. (2018). Microwave and spark plasma sintering of carbon nano tube and graphene reinforced aluminum matrix composite. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18, 1042-1054.
- Ghazaly, A., Seif, B., & Salem, H. G. (2016). Mechanical and tribological properties of AA2124-graphene self lubricating nanocomposite. *Light Metals 2013*, 411-415.
- Guan, R., Wang, Y., Zheng, S., Su, N., Ji, Z., Liu, Z., ... & Chen, B. (2019). Fabrication of aluminum matrix composites reinforced with Ni-coated graphene nano sheets. *Materials Science and Engineering: A*, 754, 437-446.
- Guiderdoni, C., Pavlenko, E., Turq, V., Weibel, A., Puech, P., Estournès, C., ... & Laurent, C. (2013). The preparation of carbon nano tube (CNT)/copper composites and the effect of the number of CNT walls on their hardness, friction and wear properties. *Carbon*, 58, 185-197.

- Hai-Yang, S., & Xin-Wei, Z. (2010). Mechanical properties of Ni-coated single graphene sheet and their embedded aluminum matrix composites. *Communications in theoretical physics*, 54(1), 143.
- Hasanzadeh Azar, M., Sadri, B., Nemati, A., Angizi, S., Shaeri, M. H., Minárik, P., ... & Djavanroodi, F. (2019). Investigating the microstructure and mechanical properties of aluminum-matrixreinforced-graphene nano sheet composites fabricated by mechanical milling and equal-channel angular pressing. *Nanomaterials*, 9(8), 1070.
- Hashmi, A., Nayak, V., Singh, K. R., Jain, B., Baid, M., Alexis, F., & Singh, A. K. (2022). Potentialities of graphene and its allied derivatives to combat against SARS-CoV-2 infection. *Materials Today Advances*, 13, 100208.
- Huang, G., Hou, W., & Shen, Y. (2018). Evaluation of the microstructure and mechanical properties of WC particle reinforced aluminum matrix composites fabricated by friction stir processing. *Materials Characterization*, 138, 26-37.
- Huang, J., Wang, K., Li, M., Cheng, Y., Lai, Z., Hu, J., ... & Zhu, J. (2023). Influence of alloy atoms on the electronic structure and interfacial properties of graphene/aluminum composites: Theoretical calculation and experimental verification. *Vacuum*, 112253.
- Huang, Y., Ouyang, Q., Zhang, D., Zhu, J., Li, R., & Yu, H. (2014). Carbon materials reinforced aluminum composites: a review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27, 775-786.
- Jackson, M., & Morrell, J. (2011). Tribology in manufacturing. In *Tribology for Engineers* (pp. 161-241). Woodhead Publishing.
- Jaim, H. I., Isaacs, R. A., Rashkeev, S. N., Kuklja, M., Cole, D. P., LeMieux, M. C., ... & Salamanca-Riba, L. G. (2016). Sp² carbon embedded in Al-6061 and Al-7075 alloys in the form of crystalline graphene nano ribbons. *Carbon*, 107, 56-66.
- Jia, Y., Cao, F., Scudino, S., Ma, P., Li, H., Yu, L., ... & Sun, J. (2014). Microstructure and thermal expansion behavior of spray-deposited Al-50Si. *Materials& Design*, 57, 585-591.
- Jiang, Y., Tan, Z., Xu, R., Fan, G., Xiong, D. B., Guo, Q., ... & Zhang, D. (2018). Tailoring the structure and mechanical properties of graphene nano sheet/aluminum composites by flake powder metallurgy via shift-speed ballmilling. *CompositesPart A: Applied Science and Manufacturing*, 111, 73-82.
- Jiang, Y., Xu, R., Tan, Z., Ji, G., Fan, G., Li, Z., ... & Zhang, D. (2019). Interface-induced strain hardening of graphene nanosheet/aluminum composites. *Carbon*, 146, 17-27.

- Karthiselva, N. S., & Bakshi, S. R. (2016). Carbon nano tube and in-situ titanium carbide reinforced titanium diboride matrix composites synthesized by reactive spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 663, 38-48.
- Khan, M., Din, R. U., Wadood, A., Syed, W. H., Akhtar, S., & Aune, R. E. (2019). Effect of graphene nano platelets on the physical and mechanical properties of Al6061 in fabricated and T6 thermal conditions. *Journal of Alloys and Compounds*, 790, 1076-1091.
- Khan, M., Ud-Din, R., Wadood, A., Husain, S. W., Akhtar, S., & Aune, R. E. (2020). Physical and mechanical properties of graphene nano platelet-reinforced Al6061-T6 composites processed by spark plasma sintering. *Jom*, 72, 2295-2304.
- Khanna, V., Kumar, V., & Bansal, S. A. (2022). Effect of reinforcing graphene nano platelets (GNP) on the strength of aluminium (Al) metal matrix nano composites. *Materials Today: Proceedings*, 61, 280-285.
- Khanna, V., Kumar, V., Bansal, S. A., Prakash, C., Ubaidullah, M., Shaikh, S. F., ... & Shankar, S. (2023). Fabrication of efficient aluminium/graphene nano sheets (Al-GNP) composite by powder metallurgy for strength applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 3402-3412.
- Kumar, H., Prasad, R., Kumar, P., Tewari, S. P., & Singh, J. K. (2020). Mechanical and tribological characterization of industrial wastes reinforced aluminum alloy composites fabricated via friction stir processing. *Journal of Alloys and Compounds*, 154832.
- Lahiri, D., Dua, R., Zhang, C., de Socarraz-Novoa, I., Bhat, A., Ramaswamy, S., & Agarwal, A. (2012). Graphene nano platelet-induced strengthening of ultra high molecular weight polyethylene and biocompatibility in vitro. *ACS applied materials & interfaces*, 4(4), 2234-2241.
- Latief, F. H., & Sherif, E. S. M. (2012). Effects of sintering temperature and graphite addition on the mechanical properties of aluminum. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(6), 2129-2134.
- Li, G., & Xiong, B. (2017). Effects of graphene content on microstructures and tensile property of graphene-nanosheets/aluminum composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 697, 31-36.
- Li, J. L., Xiong, Y. C., Wang, X. D., Yan, S. J., Yang, C., He, W. W., ... & Dai, S. L. (2015). Microstructure and tensile properties of bulk nanostructured aluminum/graphene composites prepared via cryomilling. *Materials Science and Engineering: A*, 626, 400-405.
- Li, J., Huang, Y., Wang, F., Meng, X., Wan, L., & Dong, Z. (2020). Enhanced strength and ductility of friction-stir-processed Mg–6Zn alloys via Y and Zrco-alloying. *Materials Science and Engineering: A*, 773, 138877.

- Li, J., Zhang, X., & Geng, L. (2018). Improving graphene distribution and mechanical properties of GNP/Al composites by cold drawing. *Materials& Design*, 144, 159-168.
- Li, J., Zhang, X., & Geng, L. (2019). Effect of heat treatment on interfacial bonding and strengthening efficiency of graphene in GNP/Al composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 121, 487-498.
- Li, J., Zhang, X., Qian, M., Jia, Z., Imran, M., & Geng, L. (2023). Inhibiting GNPs breakage during ballmilling for a balanced strength-ductility match in GNPs/Al composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 166, 107410.
- Li, Z., Fan, G., Guo, Q., Li, Z., Su, Y., & Zhang, D. (2015). Synergistic strengthening effect of graphene-carbon nano tube hybrid structure in aluminum matrix composites. *Carbon*, 95, 419-427.
- Liu, J., Khan, U., Coleman, J., Fernandez, B., Rodriguez, P., Naher, S., & Brabazon, D. (2016). Grapheneoxide and graphene nano sheet reinforced aluminium matrix composites: Powder synthesis and prepared composite characteristics. *Materials&design*, 94, 87-94.
- Luo, Y., Huang, Y., Liu, J., & Chen, Q. (2023). Copper coated graphene reinforced aluminum composites with enhanced mechanical strength and conductivity. *Vacuum*, 112610.
- Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A., De Smet, P., Haszler, A., & Vieregge, A. J. M. S. (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering: A*, 280(1), 37-49.
- Miracle, D. B. (2005). Metal matrix composites—from science to technological significance. *Composites science and technology*, 65(15-16), 2526-2540.
- Moustafa, E. B., Melaibari, A., & Basha, M. (2020). Wear and micro hardness behaviors of AA7075/SiC-BN hybrid nano composite surfaces fabricated by friction stir processing. *Ceramics International*.
- Nazari, M., Eskandari, H., & Khodabakhshi, F. (2019). Production and characterization of an advanced AA6061-Graphene-TiB₂ hybrid surface nano composite by multi-pass friction stir processing. *Surface and Coatings Technology*, 377, 124914.
- Nie, J. F. (2003). Effects of precipitate shape and orientation on dispersion strengthening in magnesium alloys. *Scripta Materialia*, 48(8), 1009-1015.
- Oh, S. I., Lim, J. Y., Kim, Y. C., Yoon, J., Kim, G. H., Lee, J., ... & Han, J. H. (2012). Fabrication of carbon nanofiber reinforced aluminum alloy nano composites by a liquid process. *Journal of Alloys and Compounds*, 542, 111-117.
- Pérez-Bustamante, R., Bolaños-Morales, D., Bonilla-Martínez, J., Estrada-Guel, I., & Martínez-Sánchez, R. (2014). Microstructural and hardness behavior of

- graphene nanoplatelets/aluminum composites synthesized by mechanical alloying. *Journal of alloys and compounds*, 615, S578-S582.
- Pillari, L. K., Shukla, A. K., Murty, S. N., & Umasankar, V. (2018). On the comparison of graphene and multi-wall carbonnanotubes as reinforcements in aluminum alloy AA2219 processed by ballmilling and spark plasmas intering. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71, 1099-1112.
- Rashad, M., Pan, F., Tang, A., & Asif, M. (2014). Effect of graphene nanoplatelets addition on mechanical properties of püre aluminum using a semi-powder method. *Progress in Natural Science: Materials International*, 24(2), 101-108.
- Requena, G. C., Degischer, P., Marks, E. D., & Boller, E. (2008). Micro tomographic study of the evolution of microstructure during creep of an AlSi12CuMgNi alloy reinforced with Al₂O₃ short fibres. *Materials Science and Engineering: A*, 487(1-2), 99-107.
- Requena, G., & Degischer, H. P. (2006). Creep behaviour of unreinforced and short fibre reinforced AlSi12CuMgNi piston alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 420(1-2), 265-275.
- Requena, G., Garcés, G., Danko, S., Pirling, T., & Boller, E. (2009). The effect of eutectic Si on the strength of short-fibre-reinforced Al. *Actamaterialia*, 57(11), 3199-3210.
- Sahoo, P., & Das, S. K. (2017). 1 Tribological Materials—An Ecosustainable Perspective. In *Progress in Green Tribology* (pp. 1-38). De Gruyter.
- Santella, M. L., Engstrom, T., Storjohann, D., & Pan, T. Y. (2005). Effects of friction stir processing on mechanical properties of the cast aluminum alloys A319 and A356. *Scripta Materialia*, 53(2), 201-206.
- SeyedPourmand, N., & Asgharzadeh, H. (2020). Aluminum matrix composites reinforced with graphene: a review on production, microstructure, and properties. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(4), 289-337.
- Shahil, K. M., & Balandin, A. A. (2012). Thermal properties of graphene and multi layer graphene: Applications in thermal interface materials. *Solid state communications*, 152(15), 1331-1340.
- Shin, S. E., Choi, H. J., Shin, J. H., & Bae, D. H. (2015). Strengthening behavior of few-layered graphene/aluminum composites. *Carbon*, 82, 143-151.
- Singh, L. K., Bhadauria, A., & Laha, T. (2019). Comparing the strengthening efficiency of multiwalled carbon nano tubes and graphene nanoplatelets in aluminum matrix. *PowderTechnology*, 356, 1059-1076.
- Sun, Y., Zhang, C., Liu, B., Meng, Q., Ma, S., & Dai, W. (2017). Reduced grapheneoxide reinforced 7075 Al matrix composites: Powder synthesis and mechanica lproperties. *Metals*, 7(11), 499.

- Surappa, M. K. (2003). Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. *Sadhana*, 28(1-2), 319-334.
- Tabandeh-Khorshid, M., Omrani, E., Menezes, P. L., & Rohatgi, P. K. (2016). Tribological performance of self-lubricating aluminum matrix nanocomposites: role of graphene nano platelets. *Engineering science and technology, an international journal*, 19(1), 463-469.
- Thakur, S. K., & Dhindaw, B. K. (2001). The influence of interfacial characteristics between SiCp and Mg/Al metal matrix on wear, coefficient of friction and micro hardness. *Wear*, 247(2), 191-201.
- Tian, W. M., Li, S. M., Wang, B., Chen, X., Liu, J. H., & Yu, M. (2016). Graphene-reinforced aluminum matrix composites prepared by spark plasma sintering. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 23, 723-729.
- Turan, M. E. (2019). Investigation of mechanical properties of carbonaceous (MWCNT, GNPs and C60) reinforced hot-extruded aluminum matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 788, 352-360.
- Uzun, A. (2019). Production of aluminium foams reinforced with silicon carbide and carbon nano tubes prepared by powder metallurgy method. *Composites Part B: Engineering*, 172, 206-217.
- Wang, J., Guo, L. N., Lin, W. M., Chen, J., Liu, C. L., Zhang, S., & Zhen, T. T. (2019). Effect of the graphene content on the microstructures and properties of graphene/aluminum composites. *New Carbon Materials*, 34(3), 275-285.
- Wang, J., Li, Z., Fan, G., Pan, H., Chen, Z., & Zhang, D. (2012). Reinforcement with graphene nano sheets in aluminum matrix composites. *Scripta Materialia*, 66(8), 594-597.
- Wang, Y., Huang, Y., Meng, X., Wan, L., & Feng, J. (2017). Microstructural evolution and mechanical properties of MgZnYZr alloy during friction stir processing. *Journal of Alloys and Compounds*, 696, 875-883.
- Xie, Y., Meng, X., Huang, Y., Li, J., & Cao, J. (2019). Deformation-driven metallurgy of graphene nano platelets reinforced aluminum composite for the balance between strength and ductility. *Composites Part B: Engineering*, 177, 107413.
- Yan, S. J., Dai, S. L., Zhang, X. Y., Yang, C., Hong, Q. H., Chen, J. Z., & Lin, Z. M. (2014). Investigating aluminum alloy reinforced by graphene nano flakes. *Materials Science and Engineering: A*, 612, 440-444.
- Yang, W., Chen, G., Qiao, J., Liu, S., Xiao, R., Dong, R., ... & Wu, G. (2017). Graphene nanoflakes reinforced Al-20Si matrix composites prepared by pressure infiltration method. *Materials Science and Engineering: A*, 700, 351-357.
- Yolshina, L. A., Muradymov, R. V., Korsun, I. V., Yakovlev, G. A., & Smirnov, S. V. (2016). Novel aluminum-graphene and aluminum-graphite metallic composite

- materials: Synthesis and properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 663, 449-459.
- Yu, H., Zhang, S. Q., Xia, J. H., Su, Q., Ma, B. C., Wu, J. H., ... & Hu, L. X. (2021). Micro structural evolution, mechanical and physical properties of graphene reinforced aluminum composites fabricated via powder metallurgy. *Materials Science and Engineering: A*, 802, 140669.
- Yue, H., Yao, L., Gao, X., Zhang, S., Guo, E., Zhang, H., ... & Wang, B. (2017). Effect of ball-milling and graphene contents on the mechanical properties and fracture mechanisms of graphene nano sheets reinforced copper matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 691, 755-762.
- Zhang, H., Xu, C., Xiao, W., Ameyama, K., & Ma, C. (2016). Enhanced mechanical properties of Al5083 alloy with graphene nanoplates prepared by ballmilling and hot extrusion. *Materials Science and Engineering: A*, 658, 8-15.
- Zhang, H., Zhao, Y., Yan, Y., Fan, J., Wang, L., Dong, H., & Xu, B. (2017). Microstructure evolution and mechanical properties of Mg matrix composites reinforced with Al and nano SiC particles using spark plasmas intering followed by hot extrusion. *Journal of Alloys and Compounds*, 725, 652-664.
- Zhao, Z. Y., Guan, R. G., Guan, X. H., Feng, Z. X., Chen, H., & Chen, Y. (2015). Micro structures and properties of graphene-Cu/Al composite prepared by a novel process through clad for mingand improving wettability with copper. *Advanced Engineering Materials*, 17(5), 663-668.
- Zhou, W., Chen, C., Mikulova, P., Dong, M., Fan, Y., Kikuchi, K., ... & Kawasaki, A. (2019). Thermal expansion behaviors of few-layered graphene-reinforced Al matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 792, 988-993.
- Zhou, W., Fan, Y., Feng, X., Kikuchi, K., Nomura, N., & Kawasaki, A. (2018). Creation of individual few-layer graphene incorporated in an aluminum matrix. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 112, 168-177.
- Zhou, W., Sasaki, S., & Kawasaki, A. (2014). Effective control of nano defects in multiwalled carbon nano tubes by acid treatment. *Carbon*, 78, 121-129.