

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİLYELİ DÖVMENİN YARI-KATI DÖKÜM TEKNİĞİ
İLE ÜRETİLMİŞ İNDİRGENMİŞ GRAFEN OKSİT
KATKILI AA1070 KOMPOZİTİNİN ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

İremnur BÜLBÜL

**Danışman
Prof. Dr. Remzi VAROL**

**II. Danışman
Doç. Dr. Mehmet Fahri SARAÇ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2022**



© 2022 [İremnur BÜLBÜL]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Alüminyum ve Alaşımları	2
1.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması	3
1.2.1. Dökme alüminyum alaşımları.....	3
1.2.2. Dövme alüminyum alaşımları.....	4
1.3. AA1070 Alaşımının Özellikleri	5
1.4. Alüminyum Esaslı Metal Matrisli Kompozitler	5
1.4.1. Üretim Yöntemleri.....	6
1.4.2. Takviye elemanı olarak grafen	8
1.4.3. Grafen-Al kompozitinde güçlendirme mekanizması	8
1.4.4. Nanopartiküllerin Orowan döngüsü	9
1.4.5. Grafen-Alüminyum yük aktarımı	10
1.4.6. Dayanım artırma mekanizması.....	12
1.5. Grafen-Al Kompozitinin Mekanik Özelliklerini Sınırlayan Faktörler	12
1.5.1 Üretim süreçleri	13
1.5.2. Grafen içeriği	13
1.5.3 Karbon allotropları.....	14
2. BİLYELİ DÖVME.....	15
2.1. Bilyeli Dövme İşlemi ve İşlem Amaçları	15
2.2. Bilyeli Dövme İşleminde Bilyelerin Sınıflandırılması.....	18
2.3. Bilyeli Dövme İşlem Parametreleri	19
2.3.1. Almen şiddeti	20
2.3.2. Yüzey sarma oranı	22
2.4. Kalıntı Gerilme Analizi	23
2.4.1. Kalıntı gerilmesinin oluşum mekanizması	23
2.4.2 Kalıntı gerilme karakterizasyon teknikleri	24
2.4.2.1 Tahribatlı ölçme yöntemleri	24
2.4.2.1.1. Tabaka kaldırma.....	25
2.4.2.1.2. Delik delme	25
2.4.2.1.3. Halka çekirdek	26
2.4.2.1.4. Kanal açma.....	26
2.4.2.1.5. Kesit profili ölçümü	27
2.4.2.1.6. Tüp yarma	28
2.4.2.1.7. İnce kesitlere ayırma	28
2.4.2.2. Tahribatsız ölçme yöntemleri	29
2.4.2.2.1. Ultrasonik yöntemler.....	29
2.4.2.2.2. Manyetik yöntemler	29
2.4.2.2.3. Termoelastik yöntemler.....	30
2.4.2.2.4. Fotoelastik yöntemler.....	30
2.5. Kalıntı Gerilme Analizi	30

2.5.1. XRD yöntemi ile kalıntı gerilmesinin fiziği	32
2.5.2. XRD yöntemi ile kalıntı gerilme analiz hesabı	34
3. LİTERATÜR ÖZETİ.....	36
4. MALZEME VE YÖNTEM.....	42
4.1. Malzeme	42
4.2. Grafen Oksitlerin Üretimi	42
4.3. Grafen Oksit Katkılı AA1070 Kompozitin Üretimi.....	43
4.4. Bilyeli Dövme Parametreleri.....	43
4.5. Karakterizasyon Teknikleri	44
4.5.1. X-Işınları Difraktometresi (XRD)	44
4.5.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	45
4.5.3. Kalıntı gerilme analizi	46
4.5.4. Yüzey pürüzlülük ölçümü.....	46
4.5.5. Mikrosertlik ölçümü	47
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	49
5.1. Bilyeli Dövme Sonrası Katman Kalınlığı	49
5.2. Bilyeli Dövme Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü	50
5.3. XRD Analizi.....	52
5.4. SEM/EDS Analizi	53
5.5. Mikrosertlik Testi	54
5.6. Kalıntı Gerilmesi	56
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	69

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİLYELİ DÖVMENİN YARI-KATI DÖKÜM TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMİŞ İNDİRGENMİŞ GRAFEN OKSİT KATKILI AA1070 KOMPOZİTİNİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

İremnur BÜLBÜL

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Remzi VAROL

II. Danışman: Doç. Dr. Mehmet Fahri SARAÇ

Bu tez çalışmasında indirgenmiş grafen oksit (rGO) katkısının AA1070 kompozitlerinin yapısal, kalıntı gerilme, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü üzerine bilyeli dövme işleminin etkileri incelenmiştir. Ayrıca artan miktarlardaki rGO'nun (%0.25, %0.5 ve %1 ağırlık) AA1070 matrisine olan etkisi de beraber araştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda, artan miktarda rGO ile matris içerisindeki rGO'nun kademeli olarak arttığı ancak matris içinde rastgele dağıldığı söylenebilir. XRD analizinde, Al matrisinde karbon izi olmadığı ve karbon yapısının döküm sırasında Al matrisi ile reaksiyona girmediği görülmüştür. Ancak EDS analizinde rGO varlığının artması nedeniyle karbon değerinin arttığı tespit edilmiştir. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış deney numunelerinde işlem parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Bilya çapları ve buna bağlı olarak bilyalı dövme şiddeti değerleri değiştirilmiştir. Bilya çapı ve bilyalı dövme şiddetine bağlı olarak yüzeyde oluşan plastik deformasyona uğramış tabaka kalınlığı artmaktadır. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilme değerleri farklılık göstermektedir. Buna paralel olarak yüzeydeki sertlik değerleri de değişim göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: İndirgenmiş grafen oksit, AA1070, karıştırmalı döküm, bilyeli dövme

2022, 67 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SHOT PEENING ON THE PROPERTIES OF AA1070 COMPOSITE WITH REDUCTION GRAPHENE OXIDE MANUFACTURED BY SEMI-SOLID CASTING TECHNIQUE

İremnur BÜLBÜL

**Suleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Program of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Dr. Remzi VAROL

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Fahri SARAÇ

The shot peening effects of reduced graphene oxide (rGO) additive on the structural, residual stress, hardness and surface roughness of AA1070 composites were investigated and reported in detail for the first time. It can be said that with increasing amounts of rGO added into AA1070 alloy, rGO is randomly distributed into the Al matrix with increasing amounts. The XRD analysis shows that there is no trace of carbon in the Al matrix, showing the the carbon structure did not diffuse into Al matrix during casting. However, in the EDS analysis, it was determined that the carbon value increased due to the increased presence of rGO.

The effect of the process parameters on the test specimens applied with the shoot peening process was investigated. Ball diameters and, accordingly, shot peening intensity which is also named as Almen intensity values have been changed. Depending on the ball diameter and almen intensity, the plastically deformed layer thickness on the surface increases. In addition, the surface roughness and residual stress values differ as weel as the hardness values on the surface.

Keywords: Reduced graphene oxide, AA1070, stir casting, shot peening

2022, 67 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni ynlemdiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman hocam Prof. Dr. Remzi VAROL'a teőekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımın deneysel aşamasında yardımlarını esirgemeyen Doç.Dr. Mehmet Fahri SARAÇ hocama da ayrıca teşekkür ederim.

FYL-2021-8294 No`lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Hep yanımda olan çok kıymetli akmak Ailesi'ne çok teşekkür ederim. Her zaman beni destekleyen ve hiç yalnız bırakmayan anneme, babama ve abime sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

İremnur BÜLBÜL
ISPARTA, 2022

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Yarı katı döküm tekniği	7
Şekil 1.2. (a) grafen, (b) grafen oksit, (c) indirgenmiş grafen oksit ve (d) grafen nanopelet yapıları	14
Şekil 2.1. Bilyeli dövme işleminin uygulanması	15
Şekil 2.2. Bilyeli dövme makinelerinin sınıflandırılması	17
Şekil 2.3. Uçak motoru bileşenleri üretiminde kullanılan bilyeli dövme sistemi.....	17
Şekil 2.4. Çelik bilyelerin görünümü	19
Şekil 2.5. Bilyeli dövme uygulamasında bilyenin geliş açısı.....	20
Şekil 2.6. Almen test cihazı	21
Şekil 2.7. Almen testi doyma noktası eğrisi.....	22
Şekil 2.8. 66.2m/s dövme hızında sırası ile 1, 2 ve 4 peening adımında oluşan yüzey örtme oranı yüzdeleri.....	22
Şekil 2.9. Üç elementli rozet tip gerinim ölçerin şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.10. Halka çekirdek yöntemiyle tahribatlı muayene	26
Şekil 2.11. Kanal açma yöntemi ile tahribatlı muayene.....	27
Şekil 2.12. Kesit profili yöntemi ile tahribatlı muayene	27
Şekil 2.13. Tüp yarma yöntemi ile tahribatlı muayene	28
Şekil 2.14. İnce kesitlere ayırma yöntemi ile tahribatlı muayene	29
Şekil 2.15. XRD yönteminde kalıntı gerilme parametrelerin gösterimi (Verilen iki yön: $\psi=0$ (sol) ve dönüş ψ açısı (sağ)).....	31
Şekil 2.16. Bragg yasası ile kristal düzlem hesabının şematik gösterimi	32
Şekil 4.1. Bilyeli dövme cihazı	43
Şekil 4.2. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM- SDÜ YETEM).....	45
Şekil 4.3. Hommel Tester T500 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.....	47
Şekil 4.4. Mikrosertlik ölçme cihazı	48
Şekil 5.1. A10-12 şiddetiyle bilyeli dövme uygulanmış ağırlıkça %0.5 rGO takviyeli AA1070	49
Şekil 5.2. A14-16 şiddetiyle bilyeli dövme uygulanmış ağırlıkça %0.5 rGO takviyeli AA1070	50
Şekil 5.3. A16-18 şiddetiyle bilyeli dövme uygulanmış ağırlıkça %0.5 rGO takviyeli AA1070	50
Şekil 5.4. Farklı Almen şiddetleri ile bilyeli dövülmüş ağırlıkça %0.25 rGo takviyeli numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri	51
Şekil 5.5. Saf ve rGO eklenmiş AA1070 kompozitlerin XRD analiz.....	52
Şekil 5.6. (a) Saf AA1070 ve (b) ağırlıkça %0.25 rGO takviyeli AA1070 SEM görüntüleri- 20 μ m.....	53
Şekil 5.7. (c) Ağırlıkça %0.5 AA1070 ve (d) ağırlıkça %1 rGO takviyeli AA1070 SEM görüntüleri- 20 μ m	54
Şekil 5.8. Farklı Almen şiddetlerinde bilyeli dövülmüş saf ve ağırlıkça %0.25, %0.5, %1 rGO takviyeli AA1070 kompozitlerin sertlik değerleri.....	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Saf Alüminyumun teknik özellikleri.....	2
Çizelge 1.2. Dökme alüminyum alaşımlarının standart gösteriliş biçimleri.....	4
Çizelge 1.3. Dövme alüminyum alaşımlarının isimlendirilmesi.....	5
Çizelge 2.1. Seçilmiş bilyeli dövme işleminde kullanılan bilye türleri ve özellikleri	16
Çizelge 2.2. Bilye tiplerinin içeriklerine göre sınıflandırılması.....	18
Çizelge 2.3. Çelik Bilye Tane Boyutları(mm)	19
Çizelge 2.4. Kalıntı gerilmesi ölçmek için kullanılan testler	24
Çizelge 2.5. XRD ile kalıntı gerilmesi ölçme yöntemleri.....	31
Çizelge 3.1. Grafen esaslı alüminyum alaşımlarına ait çalışmalar	38
Çizelge 4.1. AA1070 alaşımının kimyasal bileşimi.....	42
Çizelge 4.2. Bilyeli dövme parametreleri	44
Çizelge 5.1. İndirgenmiş grafen oksit eklenmiş AA1070 numunelerin üç farklı Almen şiddeti altındaki alıntı gerilmeleri	56

1. GİRİŞ

Alüminyum demir-dışı metaller içerisinde dünyada en çok kullanılan malzeme olarak bilinmektedir. Kullanımının bu kadar yüksek olmasında hafiflik, yüksek mukavemet, korozyona dayanıklılık ve kolay elde edilmesidir. Alüminyum yapısı itibari ile alaşımlandırıldığında yüksek mukavemet değerlerine çıkabilmekte aynı zamanda ısı ve termal iletkenlik konusunda da oldukça etkili özellik gösterebilmektedir. Bu yönü ile havacılık, savunma, enerji, otomotiv, elektronik ve imalat sanayinde oldukça yaygın olarak kullanılmaya gelmiştir. (Davis, 2001).

Alüminyum alaşımlarının yorulma ömrünü arttırmada son yıllarda karbon ve türevi malzemelerin eklenmesi oldukça dikkat çekmektedir. Karbon ve türevi malzemeler içerisinde grafen yapıların yüksek yüzey alanı ve hekzagonal yapısından dolayı çok düşük katkı oranlarında yüksek mekaniksel ve fiziksel özellikler göstermiştir. Özellikle grafen türevi malzemelerin katkılı olduğu alüminyum matrisli yapılarda ciddi oranda mekaniksel dayanımlarda artış gözlemlenmiş olması bu tür çalışmaları popüler kılmıştır. (Celasco ve Chaika, 2019)

Diğer taraftan, alüminyum ve alaşımlarının kullanım ömrünü artırma da bilinen en eski yöntemlerden biri yüzey sertleştirme işlemidir. Yüzey sertleştirme işlemlerinden biri olan bilyeli dövmede dövme şiddeti uygulanarak metalik malzemelerin yüzeyinde aşırı plastik deformasyon oluşturularak yüzeyde sertliğin artmasını sağlamaktadır. Böylece yüzeyde basma gerilme şeklinde oluşan kalıntı gerilmeler sayesinde üretilen parçaların yorulma ömrünü arttırmaktadır. (Ünal, 2011)

Bu tez çalışmasında, farklı oranlarda AA1070 alaşımına katkılanan indirgenmiş grafen oksit (rGO) yapısının farklı Almen dövme şiddetlerinde bilyalı dövülmesi sonrası gösterdikleri yapısal ve mekaniksel davranışları incelenecektir. Bu deneysel çalışma da özellikle rGO yapısının matris içerisindeki karakteristik davranışları ve malzeme-özellik-performans açısından karşılaştırılacaktır.

1.1. Alüminyum ve Alaşımaları

Bu bölümde; AA1070 alaşımların genel özellikleri, sınıflandırılması ve yüzey sertleştirme işlemi için kullanılan yöntemler yer almaktadır.

Alüminyum alaşımları günümüzde demir dışı malzemeler arasında en çok kullanılan alaşımlardan biridir. Özellikle yüksek mukavemet dayanımı, korozyon direnci ve farklı üretim yöntemlerinde kullanılabilme kolaylığı sayesinde pek çok uygulamalarda kullanılmasını sağlamaktadır. Özellikle demirin yoğunluğunun üçte bir oranında olması birçok avantaj sunmaktadır. Bu alüminyum alaşımlarının bazı dökme demir ve çelik alaşımlarından neredeyse üç kata kadar daha hafif olması demektir. Dayanım değerlerini, yoğunluk değerlerine göre karşılaştırsak alüminyumun üstün özelliklere sahip olduğunu kanıtıdır. Saf alüminyumun teknik özellikleri Çizelge 1.1’de verilmiştir (Asma, 2014). Saf alüminyumun alaşımlandırılması veya ısıl işlem yöntemleri ile çekme mukavemetleri yapı çeliğinin mukavemetine oldukça yakın değerler ulaştığı da bilinmektedir (Yıldıran, 2013). Otomotiv, havacılık, gıda gibi çok farklı sektörlerde kullanılan alüminyum, ekonomik olması, hafifliğine göre yüksek dayanım özellikleri göstermesi, demir ihtiva eden alaşımlardan daha kolay dökülebilmesi ve döküm parçalardaki yüksek yüzey kalitesi, kolay geri dönüştürülebilmesi gibi sebeplerden dolayı pek çok uygulama alanında kendisine yer bulmasına olanak sağlamıştır (Davis, 2001).

Çizelge 1.1. Saf alüminyumun teknik özellikleri (Asma, 2014)

Ergime Sıcaklığı	660
Isıl Genleşme Katsayısı (25°C’de)	23.1
Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	70-140
Akma Mukavemeti (N/mm ²)	20-30
Sertlik (HB)	5-15
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2.7
Elastiklik Modülü (kN/mm ²)	65-70

1.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları, üretim yöntemlerine göre döküm ve dövme alüminyum alaşımları olarak sınıflandırılmakta olup yine kendi içlerinde ısıl işlem yapılabilir ve yapılamaz olarak ayrılmaktadırlar. Örneğin yaşlandırma işlemi ile ısıl işlemi yapılabilen alaşımlar olduğu gibi katı eriyik sertleşmesi, pekleşme veya dağılım sertleşmesi ile de ısıl işlem yapılamayan alüminyum alaşımlarının dayanımı arttırabilir. Süneklilik ise tavlama ısıl işlemi ile gerçekleştirilebilir (Davis, 2001; Yalçın, 2010; Başer, 2012; Fakıoğlu, 2012; Yıldırım, 2013; Asma, 2014; Harbelioğlu, 2018).

1.2.1. Dökme alüminyum alaşımları

Dökme alüminyum, dövme alüminyuma kıyasla daha yüksek oranda alaşım elementi içerir. Dökme alüminyum ayrıca, döküm kusurlarını ortadan kaldırmanın zorluğundan dolayı, dövme alüminyumdan genel olarak daha düşük bir çekme mukavemetine sahiptir (Aktuğ, 2009; Yıldırım, 2013; Asma, 2014; Harbelioğlu, 2018).

Dökme alüminyum alaşımları, dört basamaklı bir numaralandırma sisteminden yararlanır ve üçüncü basamaktan sonra bir ondalık nokta içerir. Bu sistem Alüminyum Derneği tarafından geliştirilmiş ve devam etmektedir. Alüminyum alaşımları için en yaygın olarak kullanılan sınıflandırmadır (Davis, 2001; Tımaç, 2006; Aytaç, 2010; Fakıoğlu, 2012). Alüminyum Derneği, ANSI yönetmeliklerine uygun olarak çalışmaktadır. İlk hane, ana alaşım elementlerini göstermektedir.

Dökme alüminyum alaşımları, aşağıdaki listede belirtildiği gibi dövme alaşımlara kıyasla çeşitli avantajlar sunar:

- Dövme alüminyum ile karşılaştırıldığında kilogram başına daha düşük fiyatlıdır.
- Döküm esnekliği sayesinde çok çeşitli şekiller elde edilebilir.
- Bazı özel alaşımlar, düşük sünekliliklerinden dolayı sadece döküm olarak mevcuttur.
- Sınırlı döküm sonrası işleme gerektiren parçalar üretilebilir.

Çizelge 1.2'de dökme alüminyum alaşımlarının sınıflandırmasını görülmektedir (Aktuğ, 2009; Fakıoğlu, 2012; Yıldırım, 2013; Harbelioğlu, 2018).

Çizelge 1.2. Dökme alüminyum alaşımlarının standart gösteriliş biçimleri

(Aktuğ,2009; Fakıoğlu, 2012; Yıldiran, 2013; Harbelioğlu, 2018)

Dökme Alüminyum Alaşımları	Alaşım Elementi
1XX.X	Ticari Saflıkta Alüminyum
2XX.X	Al-Cu
3XX.X	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si
4XX.X	Al-Si
5XX.X	Al-Mg
7XX.X	Al-Mg-Zn
8XX.X	Al-Sn

1.2.2. Dövme alüminyum alaşımları

Dövme alüminyum olağanüstü mekanik özelliklere sahiptir ve çeşitli standart ve standart olmayan şekillerde şekillendirilebilir (Asma, 2014; Harbelioğlu, 2018). Dövme alüminyum alaşımı dört haneli bir sayı ile tanımlanabilir. İlk hane, ana alaşım elementlerini göstermektedir. İkinci hane, 0 olmadığı sürece, alaşımın bir modifikasyonunu gösterir ve üçüncü ve dördüncü haneler, özel alaşımın kimlik numarasıdır.

Dövme alüminyum, belirli bir alüminyum sınıfı yapmak için gereken özel alaşım elementleri ile saf alüminyum külçelerin eritilmesiyle üretilmektedir. Eritilmiş alaşım daha sonra kütüklere veya büyük levhalara dökülür. Bu malzeme daha sonra haddelenir, dövülür veya son şekline ekstrüde edilir. Bazı durumlarda, özelliklerini daha da geliştirmek için alaşımlar ısıtılma tabii tutulmaktadır. Çizelge 1.3' de dövme alüminyum alaşım serilerinin içerdiği alaşım elementlerinin nasıl adlandırıldığını göstermektedir.

Çizelge 1.3. Dövme alüminyum alaşımlarının isimlendirilmesi (Aktuğ, 2009; Asma, 2014; Harbelioğlu, 2018)

1.Hane	2. Hane	3. ve 4. Hane
Al alaşımını temsil eder.	Orijinal alaşımın değişimini göstermektedir.	1XXX alüminyum alaşımlarında saflık belirtir.

Dövme alüminyum alaşımları, aşağıda belirtildiği gibi dökme alüminyuma kıyasla birçok avantaj sunmaktadır. Şöyle ki,

Mükemmel mekanik özellikler

- Yapısal bütünlük yani döküm hatası yok
- Daha iyi yüzey finisajları
- Örneğin kaynak ve işleme gibi üretim kolaylığı
- Şekillendirme kolaylığı, örneğin alüminyum, belirli bir uygulamaya uyacak şekilde özel olarak tasarlanabilen neredeyse sonsuz bir enine kesit aralığına ekstrüde edilebilir.

1.3. AA1070 Alaşımının Özellikleri

1070 alüminyum alaşımı, "ticari olarak saf" dövme ailesinde (1000 veya 1xxx serisi) alüminyum esaslı bir alaşımdır. Dövme alaşım olduğu için dökümlerde kullanılmaz. Bunun yerine, genellikle ekstrüzyon veya haddeleme ile oluşturulur. Yüksek elektrik iletkenliği, korozyon direnci ve işlenebilirliği nedeniyle elektrik ve kimya endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

1070 alaşımı, diğer alaşımlardan daha yüksek bir termal iletkenliğe sahip olduğu için bazen ısı alıcıların imalatında da kullanılabilir. Ayrıca önemli ölçüde alaşımlı metallere kıyasla düşük mekanik mukavemete sahiptir. Soğuk işleme güçlendirilebilir, ancak ısı ile güçlendirilemedikleri bilinmektedir.

1.4. Alüminyum Esaslı Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler, en az biri metal ve diğeri seramik veya organik bileşik gibi başka bir malzeme olan iki veya daha fazla farklı malzemenin kombinasyonlarıdır. En az üç malzeme mevcut olduğunda hibrit kompozitler olarak adlandırılmaktadır. Kompozitlerde optimum özellik kombinasyonunu elde etmek

için, bileşenlerin morfolojilerini kontrol ederek üretmek gerekir. Herhangi bir kompozitin özellikleri, kimyasal bileşime veya parçacıklar dâhil bileşen faz geometrisinin özelliklerine, matristeki boyut şekli ve oryantasyonuna bağlıdır. Metal matris kompozitler (MMK) havacılık, uzay, otomobil, savunma endüstrileri, nükleer santral, elektronik, biyo medikal ve spor endüstrileri vb. geniş uygulamalar için kullanılabilir geliştirilmiş bir malzemedir.

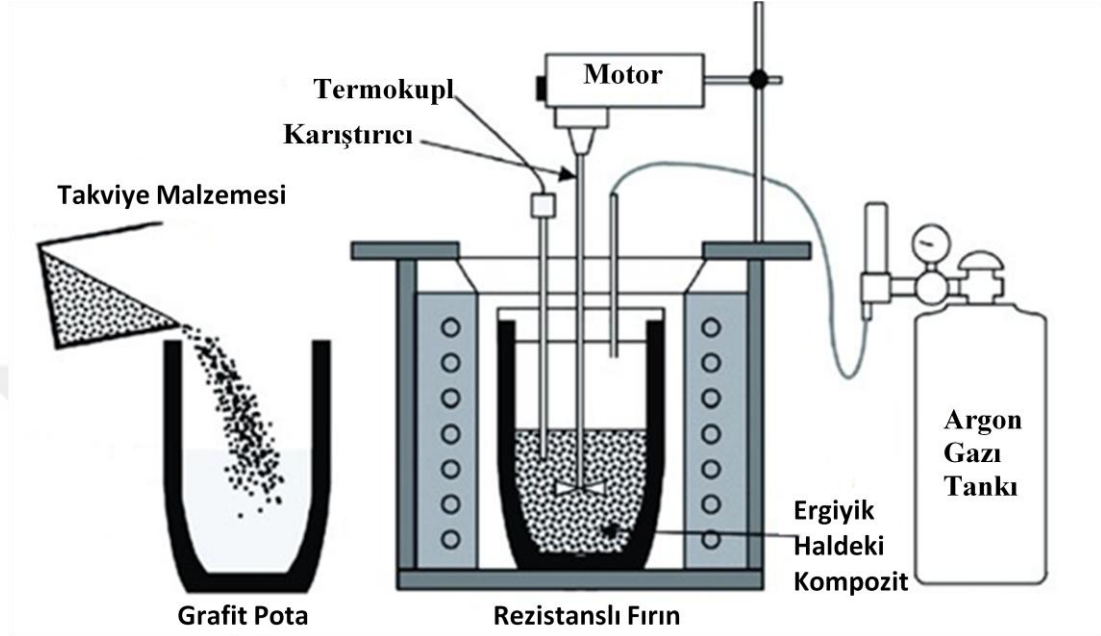
Alüminyum kompozitler, esas olarak, silisyum karbür (SiC), alümina (Al_2O_3), boron nitrid (B_4N), bor karbür (B_4C), alüminyum nitrit (AlN), titanyum diborür (TiB_2), grafen, karbon nanotüp ve organik takviyeler de uçucu kül gibi sert malzemeler kullanılarak güçlendirilmektedir. Bu takviye malzemeleri, ana metal alaşımına göre avantajlı özellikler sağlayabilmekte böylece termal iletkenlik, aşınma, düşük yoğunluk, yüksek tokluk, daha yüksek yorulma dayanımı, dayanıklılık, işlenebilirlik, yüksek sürtünme direnci gibi avantajlar göstermektedir.

Alüminyum metal matris kompozitlerinin hazırlanması için kullanılan farklı imalat işlemleri vardır. Yaygın olarak kullanılan dövme, döküm ve toz metalürjisi yöntemleridir. Özellikle yarı katı döküm yöntemi, diğer yöntemlere göre daha geniş kullanılabilirliği nedeniyle genellikle takviye için kullanılır. Döküm işlemleri, daha iyi karıştırma etkisinden dolayı takviyeli parçacıklar ve matris arasındaki bağlanma gücünü de artırır. Yarı katı dökümle ilgili en büyük sorun, takviyeli parçacıkların ayrılması veya tozlanmasıdır, çünkü ıslattıktan sonra bazı parçacıklar katılma sırasında yoğunluk farkı nedeniyle yüzelebilmektedir. Bu nedenle gözenekler, üfleme delikleri ve inklüzyon gibi birçok döküm hatası ortaya çıkabilir.

1.4.1. Üretim Yöntemleri

Yarı katı döküm işlemi esas olarak partikül takviyeli metal matrisli kompozit üretimi için kullanılır. Takviye maddesi malzemesinin karıştırılarak erimiş metale dâhil edildiği birincil bir kompozit üretim sürecidir. Metal matrisli kompozitlerin karıştırılarak dökümü, seçilen matris malzemesinin bir eriyiğinin üretilmesini, ardından takviye malzemesinin eklenmesi şeklinde gerçekleştirilir. Eriyik, uygun bir ortamda gaz ile atmosferik oksitlerden arındırılarak oksidasyon sonucunda malzemenin özelliklerinin bozulması engellenir.

Şekil 1.1.'de bir pota fırınında ısıtılarak bir pota içinde eritilen matris malzemesini göstermektedir (Malaki vd., 2019). Karıştırma, karıştırıcının üst kısmındaki bir motor vasıtasıyla etkinleştirilir. Karıştırıcı yukarı ve aşağı hareket ettirilebilir. Matris malzemesi belirli bir süre karıştırıldıktan sonra matrise takviye eklenir.



Şekil 1.1. Yarı katı döküm tekniği (Malaki vd., 2019)

Yarı katı döküm, geleneksel bir metal işleme yolu kullanıldığından ve mevcut tüm metal matrisli kompozit üretim yolları arasında en ekonomik yol olduğu için çekicidir. Bu yöntemi kullanarak kompozit malzeme hazırlamanın maliyeti diğer rekabetçi yöntemlerin yaklaşık üçte biri ile yarısı kadardır ve yüksek hacimli üretim için maliyetin onda birine düşeceği tahmin edilmektedir. Karıştırma dökümü sırasında dikkat edilmesi gereken önemli faktörlerden bazıları şunlardır:

- Takviye malzemesinin düzgün dağılımını sağlamanın zorluğu.
- İki ana madde (matris ve takviye maddeleri) arasında ıslanabilirlik.
- Dökme metal matrisli kompozitlerde gözeneklilik.
- Takviye malzemesi ve matris alaşımı arasındaki kimyasal reaksiyonlar
- Matris ve takviye maddelerinin atmosferik elementlerle reaksiyonu

1.4.2. Takviye elemanı olarak grafen

Tek katmanlı grafen, grafit, GO, rGO, grafen nanopelet dahil olmak üzere yayınlanmış literatürde kullanılan çeşitli grafen türevleri vardır. Karbon kafesi ve fonksiyonel gruplarla doğrudan ilişkili olan bu türevler birçok katmana ve kristal yapıya sahiptir.

Bir takviye malzemesi olarak grafeni kullanmanın zorlukları arasında zayıf dağılım, düşük ara yüzey yapışması, karbür oluşumu ve düşük yapısal bütünlük bulunur (Jiang vd., 2020). Zayıf dağılım, grafen ve alüminyumun değişen bağlanma özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Al metalik bağlara sahipken grafen Van der Waals ve kovalent bağlara sahiptir. (Saboori vd., 2017; Arif vd., 2020)

Aglomerasyon sorunu, genellikle mekanik özellikler üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olan metalik bir matris içindeki grafen levhalar arasındaki güçlü düzlemler arası Van der Waals kuvvetleri nedeniyle ortaya çıkar. Aglomerasyon kompoziti etkiler, gözenek oluşumuna sebep olur ve kompozitin erken bozulmasına neden olur. Al matrislerde grafen kullanımı devam etmektedir ve homojen olmayan dağılım büyük bir sorundur. Dayanımı arttırmak için yapısal bütünlük çok önemli bir yere sahiptir. Toz metalurjisi yöntemi basit ve ergonomik bir yöntem olması sebebiyle yaygın şekilde kullanılmaktadır (Hanizam vd., 2019a, b; 2019; Xu vd., 2020). Dağılıma kabilyeti ve yüksek ölçekte üretim kolaylığı sebebiyle grafen takviyeli alüminyum kompozitlerin yapımında kullanılması etkilidir. Bununla birlikte, bu yöntemin dezavantajı, yapısal hasar ve güçlendirme verimliliği arasındaki güçlü ilişki nedeniyle, mekanik özellikleri etkileyecek olan yapısal bütünlük üzerindeki olumsuz etkisi söz konusudur (Baig vd., 2018). Minimum gözenekli yüksek yoğunluklu kompozit elde etmek için diğer ikincil işleme yöntemleri arasında sıklıkla sıcak haddeleme, karıştırmalı döküm ve ultrasonikasyon yer alır (Iijima, 1991; Kumar ve Abhishek, 2018; Su ve Teng, 2021; Hidalgo-Manrique vd., 2017).

1.4.3. Grafen-Al kompozitinde güçlendirme mekanizması

Grafenin alüminyum metal matrisindeki güçlendirme etkisini tanımlayan güçlendirme mekanizmaları bu bölümde yer alacaktır. Takviye güçlendirme sistemi genel olarak iki şekilde tanımlanabilir. Bunlar; takviyeyle dolaylı güçlendirme ve metal matristen takviyeye doğrudan güçlendirme. Yumuşak matristeki sert takviye malzemesi eklenilerek doğrudan güçlendirme gerçekleştirilebilir. Uygulanan yükün

sert takviye malzemesi yüzünden matristen takviyeye taşınması ile plastik deformasyona karşı direnç artmış olur (Wang vd., 2012).

Dolaylı güçlendirme, matrisin daha yüksek termal genişleme katsayısı (CTE) ile takviyenin daha düşük CTE'si arasındaki termal genişleme uyumsuzluğundan kaynaklanmaktadır. Termal stres, sıcaklığın artmasıyla matris/takviye ara yüzeyinde dislokasyon oluşumuna neden olur. Dislokasyon yoğunluğundaki artma ile kompozit malzemenin mukavemetinde bir iyileşme sağlanmaktadır. Takviyedeki artış ve takviye malzemesinin tane boyutundaki azalmayla birlikte dislokasyon yoğunluğu ve mukavemetin arttığı bulunmuştur (Srivivas ve Charoo, 2018).

Alüminyum metal matrislerde, güçlendirme mekanizmaları şu şekilde olabilir:

- (1) Nanopartiküllerin Orowan döngüsü,
- (2) Al matrisinden grafene yük transferi,
- (3) CTE uyumsuzluğu yoluyla dislokasyon güçlendirmesi
- (4) Dayanım artırma

Grafen takviyeli metal matrislerin güçlendirilmesi, işleme yöntemine, arayüz kalitesine, tane sınırlarındaki dağılıma ve tane boyutu, en boy oranı ve geometri gibi içsel özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, kompozit özelliklerini etkileyen güçlendirme mekanizmasının anlaşılması önemlidir. Grafen ve Al arasındaki arayüz reaksiyonu, 298 K'de düşük Gibbs serbest enerjisi $-196 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ nedeniyle alüminyum karbür (Al_4C_3) oluşumuna izin verir. Karbon ve Al arasındaki reaksiyon, termodinamik olarak grafen takviyeli Al matrisli kompozitler içindeki arayüz reaksiyonunu kontrol etmeyi zorlaştıran kendiliğinden bir reaksiyondur. İlginç bir şekilde, grafenin Al matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerindeki Al_4C_3 fazı etkileri halen tartışılmaktadır (Jiang vd., 2020).

1.4.4 Nanopartiküllerin Orowan döngüsü

Orowan döngüsü, dislokasyon yolu içindeki daha küçük boyutlu parçacıkların neden olduğu girişimin etkisini tahmin etmeye çalışır. Parçacıkların mikro boyutlu olup olmaması, parçacıklar arasındaki boşluk büyük olduğundan önemli değildir. Buna rağmen, GNP'ler gibi nano boyutlu parçacıkların takviye malzemesi olarak kullanılmasıyla Orowan döngü mekanizması baskın bir güçlendirme etkisi sağlar. Genel olarak, takviyenin nano boyutu, Orowan döngüsündeki dislokasyon sonuçlarına karşılık gelmektedir. (Xiong vd., 2020).

Grafen nanoparçacıkları, dislokasyonların hareketini ve yığılmasını önleyici görev görmektedir. Böylece, grafende dislokasyon döngüleri başarılı bir şekilde oluşturulduğunda, bu dislokasyon hareketini yönlendiren geri strese neden olur. Bu, Orowan döngüsü olarak bilinen grafen ilavesinde yarım daire biçimli şekillerin oluşmasına neden olur. Orowan döngüsü ile kazanılan iyileşme denklem (1.1)'de gösterilmektedir.

$$\Delta\sigma_{orowan} \text{ (MPa)} = \frac{\alpha G b}{d_p \left[\left(\frac{1}{2} f_v \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]} \ln \frac{d_p}{2b} \quad (1.1)$$

Denklem (1.1)'de verilen parametreler aşağıdaki gibidir.

α =Taylor faktörü,

G = matrisin kesme modülü

b =burger vektörü

d_p = takviyeler arasındaki ortalama mesafe

f_v = hacim oranı.

Düzgün dağılım da parçanın boyutu gibi önemli etkiye sahiptir. Grafen parçacıklarının homojen olarak dağılması yer değiştirmelerini engellemektedir. Yanı sıra grafen miktarının belirli bir değer üzerine çıkmasıyla topaklanma ve mekanik özelliklerde bozulma meydana gelmektedir (Fadavi Boostani vd., 2015; Bisht, 2017; Sharma vd., 2020).

1.4.5. Grafen-Alüminyum yük aktarımı

Matristen takviye malzemesine yük transferi kayma gecikmesi modeli ile tanımlanabilir (Xiong, 2020). Yük transferinden gelen matris ve kompozitin arasındaki ara yüzey bağının iki büyük etkeni ara yüzey kesme gerilmesi ve mukavemetidir. (Fadavi Boostani, 2015). Kelly ve Tyson tarafından türetilen Denklem 1.2 ve 1.3'de verilen model ile ortalama gerilme yüklemesi hesaplanabilmektedir (Kelly ve Tyson, 1965; Seyed Pourmand ve Asgharzadeh, 2020).

$$\Delta\sigma_{yük} = \sigma_{re} V_{re} \left(\frac{1}{2l_c} \right) - \sigma_m V_{re} \quad l \leq l_c \text{ için,} \quad (1.2)$$

$$\Delta\sigma_{yük} = \sigma_{re}V_{re} \left(1 - \frac{1}{2l_c}\right) - \sigma_mV_{re} \quad l \geq l_c \text{ için,} \quad (1.3)$$

Denklem (1.2) ve (1.3)'de verilen parametreler aşağıdaki gibidir.

σ_{re} = Takviye malzemesinin çekme dayanımı

σ_m = Takviye malzemesinin çekme dayanımı

V_{re} = Takviye malzemesinin hacim oranı

l_c = Kritik uzunluk

Denklem (1.4)'de verilen l_c = Kritik uzunluk yukarıdaki modele dahil edilmiştir.

Çekme testleri yapılırken, yükler, arayüzey kesme gerilmesi (τ_m) ile metal matristen grafen yapıların çekme yönü boyunca iletilir. Denklem (1.3)'de verilen eşitliğe göre grafen yapıların uzunluğu kritik uzunluktan fazlaysa ($l \geq l_c$) grafen kırılma boyunca kopacaktır. Denklem (1.2)'de verilen eşitliğe göre grafen yapıların uzunluğu kritik uzunluktan kısaysa ($l \leq l_c$) grafen kırılma boyunca arayüzey bağları ayrılana kadar çekilebilecektir.

$$l_c = \frac{d\sigma_{re}}{2\tau_m} \quad (1.4)$$

Denklem (1.4)'de verilen parametreler aşağıdaki gibidir.

σ_{re} = Takviye malzemesinin çekme dayanımı

τ_m = Matris malzemesinin kesme dayanımı

d = Takviye malzemesinin çapı

Grafen esaslı kompozitlerde grafen ya kısa fiber ya da kılcal formda olmak durumundadır. Bu modelde grafenin çekme yönü boyunca hizalandığı ve matris ile temasının var olduğu kabul edilmektedir.

1.4.6. Dayanım arttırma mekanizması

Dayanım arttırma mekanizması genellikle Hall-Petch mekanizması ile temsil edilir ve Alüminyum metal matrisli kompozitlerde mukavemetin artmasını sağlayan önemli bir etkidir (Tang vd., 2018). İmalat sırasında grafen esaslı parçacıkları Al taneciklerinin büyümesini engellediğinden Al'in tane boyutu, Grafen-Al kompozitinde rafine edilir (Fadavi Boostani vd., 2015; Gupta vd., 2018) Bu nedenle,

yüksek bir tane sınırı yoğunluğu, dislokasyon hareketini ve bitişik taneye yayılmayı etkileyebilir, bu da mukavemet artışına neden olur. Dayanım arttırma $\Delta\sigma_{GR}$ denklem (1.6)'da verilmektedir.

$$\Delta\sigma_{GR} = \frac{k_y}{D} \quad (1.6)$$

Denklem (1.6)'de verilen parametreler aşağıdaki gibidir.

k_y = Al için malzeme sabiti ($k = 0.068 \text{ MPa} \cdot \text{M}^{-0.5}$)

D = matrisin ortalama tane boyutu

1.5. Grafen-Al Kompozitinin Mekanik Özelliklerini Sınırlayan Faktörler

Grafen takviyeli Al kompozit matrisin üretimindeki birtakım zorluklar, imalattaki gelişimlerini sınırlamıştır. İmalat süreci, grafen yapısındaki farklar ve kullanılan grafen miktarı Zorluklara yol açan ve grafenle güçlendirilmiş alüminyum kompozitlerin performansını sınırlayan önemli etkenlerdendir. Al matrisi içinde grafenin iyi dağılımı, yüksek ara yüzey bağlanması ve güçlendirme mekanizmaları nedeniyle iyi mekanik özellikler sergilerler. Bununla birlikte, küme sorunu, zayıf ıslanabilirlik, gözeneklilik ve yapısal hasar, mekanik özelliklerin bozulmasına yol açar (Saboori vd., 2017; Baig vd., 2018; Zheng vd., 2020; Boostani vd., 2018). Bu sebeplerle mekanik özelliklerin değişimine sebep olacak faktörler iyi şekilde belirlenmelidir.

1.5.1 Üretim süreçleri

Önceki çalışmalarda, özellikle yüksek grafen içeriği (>%2 ağırlık) ile birçok durumda grafenin homojen olmayan dağılımı gözlemlendi (Liang vd., 2018; Zhao vd., 2020). Düzgün dağılım elde etmek ve aglomerasyonu önlemek için Grafen-Al kompozitini imal etmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. TM (Yan vd., 2014; Shin vd., 2015; Boostani vd., 2015; Şenel vd., 2018; Kumar ve Abhishek, 2018) döküm tekniği (Wang vd., 2012; Yan vd., 2014; Şenel vd., 2018), ultrasonikasyon (Chandrashekar, 2018; Lokesh vd., 2018; Venkatesan ve Xavior 2019; Shil vd., 2019) ve kıvılcım plazma sinterleme (Tian vd., 2016; Bisht vd., 2017; Khoshghadam-Pireyousefan, 2020; Xiong vd., 2020; Zheng vd., 2020) yaygın olarak üretim yolu olarak kullanılmıştır. Bu yöntemlerin çoğu, boşluğu arayüzden çıkarmak için son işleme tekniği ile birleşir ve grafen levhalar arasındaki Van der Waals etkileşimini kırmayı amaçlar.

Toz metalurjisi en yaygın imalat yöntemidir. Homojen dağılımı ve imalat kolaylığı sağlamasıyla çok tercih edilse de kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyen yapısal hasara neden olmaktadır.

Döküm düşük maliyetli ve yüksek üretim oranı ile avantajlı bir yöntem olmasına rağmen bileşenleri kontrol etmedeki zorluk, nanopartiküllerin zayıf dağılımı ve fazlar arasında zayıf arayüzey gibi dezavantajları bulunmaktadır (Rashad vd., 2014).

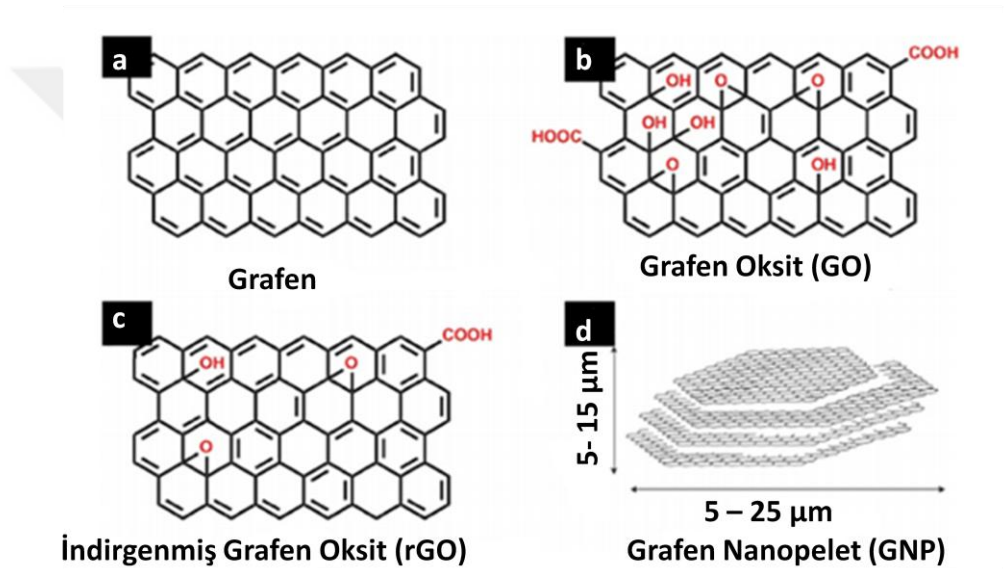
1.5.2. Grafen içeriği

Alüminyum matrisli grafen takviyeli kompozitlerde optimum mekanik özellikler grafenin yapısından çok grafen miktarı ile belirlenmektedir. Çok fazla miktardaki grafen takviyesi yapıyı zayıflatmaktadır. İyi dağılım sağlanmadığında da topaklanma sebep ile hem gücünü azaltır hem de kompozitlerin daha erken bozulmasına sebep olur (Li vd., 2019) (Tian vd., 2016).

Rashad ve ark. (2014) ile Wang ve ark. (2012) optimize edilmiş grafen miktarının ağırlıkça %0.3 olduğunu belirtirken, diğer çalışmalar grafenin optimum değerlerinin ağırlıkça %0.7-1.0 arasında olduğunu bildirmişlerdir.

1.5.3 Karbon Allotropları

Grafen tek katmanlı bir yapıdadır. Çok katmanlı olan grafen yapısı grafen nanopelet (GNP)'lerdir. Grafenle aynı karbon yapısına sahip ayrıca hidroksil (OH), alkoksi (COC), karbonil (CO), karboksilik asit (COOH) ve diğer oksijen bazlı fonksiyonel grupların var olduğu yapıya grafen oksit (GO) denmektedir. Grafenin iyi özelliklerine sahip GO yapıların sentezlenmesi daha kolaydır (Güler ve Bağcı, 2020). GO'nun indirgenmesiyle indirgenmiş grafen oksit (rGO) elde edilmektedir. Şekil 1.2'de farklı grafen esaslı yapılar gösterilmiştir.



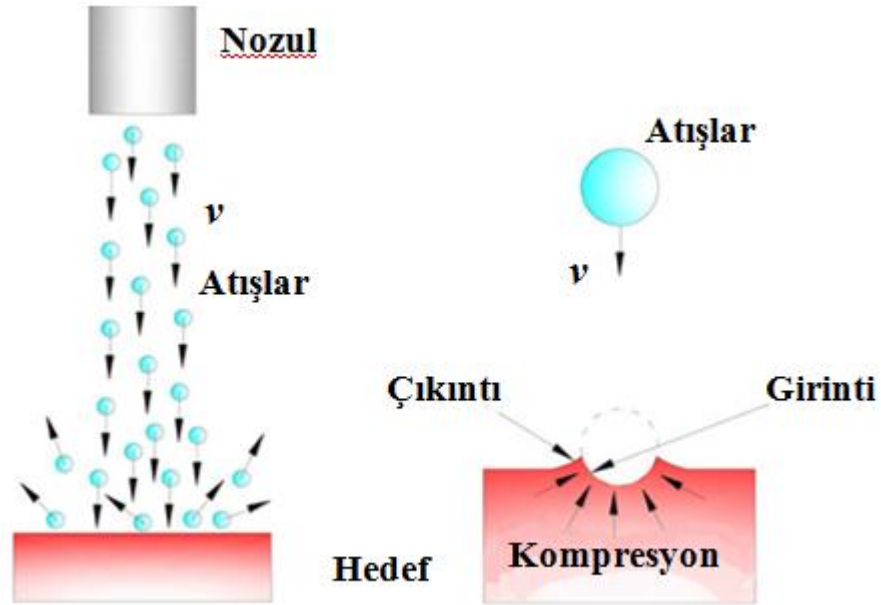
Şekil 1.2. (a) grafen, (b) grafen oksit, (c) indirgenmiş grafen oksit ve (d) grafen nanopelet yapıları (Chintalapudi ve Pannem, 2020)

2. BİLYALI DÖVME

2.1. Bilyeli Dövme İşlemi ve İşlem Amaçları

Bilyeli dövme, yüksek mukavemetli çelikler, titanyum ve alüminyum alaşımlar gibi metal malzemelerin yüzeye yakın bölgelerinde kalıntı basma gerilmelerinin oluşumunu sağlayan, yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özelliklerinin değişimi için kullanılan, endüstriyel kullanıma uygun, güvenilir ve ekonomik bir yüzey işlemidir (Mhaede, 2012). Malzeme yüzeyinin basınçlı hava kullanılarak çelik bilye bombardımanına tabi tutulması sonucunda, malzemenin yüzey sertliğinin ve yorulma ömrünün artışı sağlanan bu tekrarlı çarpmalar, plastik deformasyon ile yüzey ve yüzey altı bölgelerde mikroyapıda değişime neden olur. Bu süreç karakteristik yüzey topografyasında ve dislokasyon yoğunluğunda artışa, ayrıca çatlak oluşumunun sınırlandırılmasına neden olmaktadır (Gariépy vd., 2013; Mitrovic vd., 2014). Bu yüzey işlemi, ısıtma işlem yöntemlerine zayıf cevap veren malzemelerin mekanik özelliklerinin gelişiminde kullanılmaktadır (Ganesh vd., 2014).

Şekil 2.1’de bilyeli dövme işlemi sonrası malzeme yüzeyindeki plastik deformasyon ile kalıntı gerilmeler ve bilyeli dövme işleminin uygulaması gösterilmiştir (Wang vd., 2020).



Şekil 2.1. Bilyeli dövme işleminin uygulanması (Wang vd., 2020)

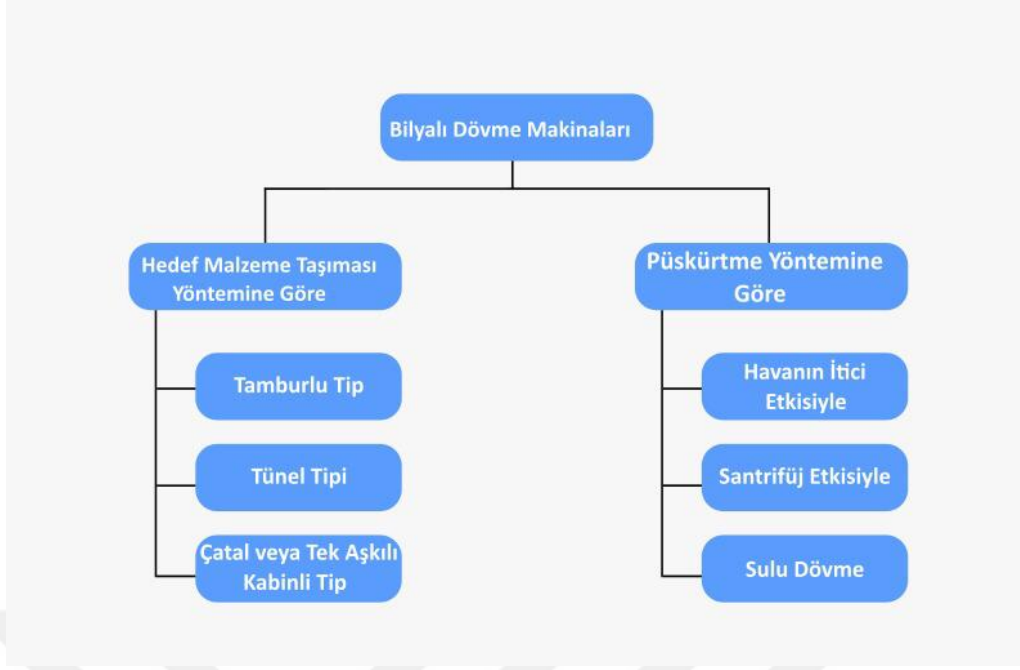
Malzemenin yüzeyinde istenen özelliklerin sağlanması için bilyenin türü ve boyutunun seçimi önemli bir parametredir. Örneğin dökme demir, paslanmaz çelik, seramik, cam gibi (Çizelge 2.1.) farklı malzemelerden üretilen bilye türleri bulunmaktadır.

Çizelge 2.1. Seçilmiş bilyeli dövme işleminde kullanılan bilye türleri ve özellikleri (Kirk, 2009)

Bilyeli Dövme Kodu	Çap (mm)	Kütle (g)	100 g başına parça sayısı
S70	0.1778	0.02313	4322983
S110	0.2794	0.08976	1114037
S170	0.4318	0.33134	301808
S230	0.5842	0.82055	121869
S280	0.7112	1.48046	67547
S330	0.8382	2.42362	41261
S390	0.9906	4.00052	24997
S780	1.9812	32.00414	3125
S1320	3.3528	155.11154	645

Bilyeli dövme işlemi, havacılık ve otomotiv sektöründe kullanılan sürekli olarak basma ve çekme yüklemelerine maruz kalan makine elemanlarının (motor ve gövde aksamları, iniş takımları, türbin ve türbin kanatları, dişliler, yük altında çalışan yaylar, kam ve krank milleri gibi) yorulma dayanımının artırılması amacıyla kullanılmaktadır (Harbelioğlu, 2018; Yalçınkaya, 2019).

Bilyeli dövme işleminde kullanılan makineler Şekil 2.2’de gösterildiği gibi püskürtme yöntemi ve hedef malzeme taşınması yöntemine göre iki kategoride sınıflandırılır (Balyalı, 2015; Harbelioğlu, 2018). Makine seçiminde önemli olan çalışılacak parçanın malzeme özellikleri ve elde edilmek istenilen malzeme özellikleridir (Savaş,2010).



Şekil 2.2. Bilyeli dövme makinelerinin sınıflandırılması (Balyalı, 2015; Harbelioğlu, 2018)

Bilyeli dövme işleminde işlem parametrelerinin önemi büyük olduğu için otomatik makinelerde genellikle belirli parçalara yönelik özel tasarımlar yapılmaktadır. Şekil 2.3'de gösterilen çift robotlu akıllı bilyeli dövme sisteminde uçak motoru bileşenlerine bilyeli dövme işlemi uygulanmaktadır.



Şekil 2.3. Uçak motoru bileşenleri için kullanılan bilyeli dövme sistemi (Progressive Surface,2022)

2.2. Bilyeli Dövme İşleminde Bilyelerin Sınıflandırılması

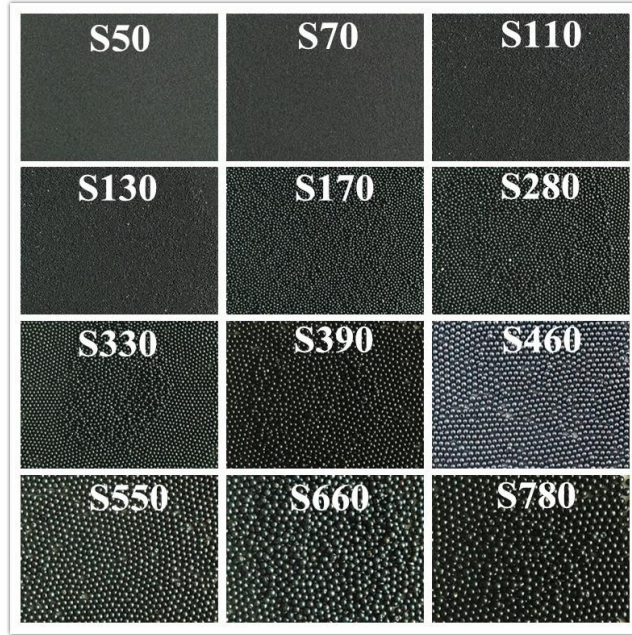
Bilyeli dövme işleminin temel elemanı olan bilyeler, demir ve demir dışı bilyeler olarak gruplandırılır (Çizelge 2.2.) (Ünal, 2011). Kullanım sürecinde kırılan bilyelerin tekrar kullanılmaması elde edilmek istenen sonuçlar için önemli bir durumdur.

Çizelge 2.2. Bilye tiplerinin içeriklerine göre sınıflandırılması (Ünal, 2011)

Bilye Tipleri		
Demir Esaslı Malzemeler	Demir Dışı Malzemeler	
Çelik Bilye Paslanmaz Çelik Bilye Yuvarlatılmış Kesme Tel	Metalik Olanlar	Metalik Olmayanlar
	Alüminyum Çinko Bronz Bakır	Cam Seramik

Society of Automotive Engineers (SAE) tarafından hazırlanan standartlar bilye tiplerinin sınıflandırılmasında kullanılmaktadır. Sınıflandırmada “S” harfi malzemenin çelik (steel) olduğunu belirtmektedir. SAE J444 standartında bilyeler, boyutuna göre S70 ile S1320 değerleridir. Burada S bilye malzemesinin çelik olduğunu, 70 ise bilye boyutunu gösterir. Bu değer bilye çapının inç olarak değer 10.000 katıdır. Bilye çapı $(70 \cdot 25,4) / 10.000 = 0.1778$ mm mertebesindedir. (Balyalı, 2015).

Şekil 2.4’de çelik bilyelerin boyutlarının değişimine göre görünümü gösterilmektedir. Çizelge 2.3’de l_{bilye} boyutlarının büyüklük değerleri sayısal olarak verilmiştir.



Şekil 2.4. Çelik bilyelerin görünümü (Saykar, 2022)

Çizelge 2.3. Çelik bilye tane boyutları (mm) (Saykar, 2022)

S-70	S-110	S-170	S-230	S-280	S-330	S-390	S-460	S-550	S-660	S-780
0.20-0.40	0.30-0.60	0.40-0.70 mm	0.60-0.90 mm	0.70-1.00 mm	0.90-1.20 mm	1.00-1.40 mm	1.20-1.70 mm	1.40-2.00 mm	1.70-2.40 mm	2.00-2.40 mm

2.3. Bilyeli Dövme İşlem Parametreleri

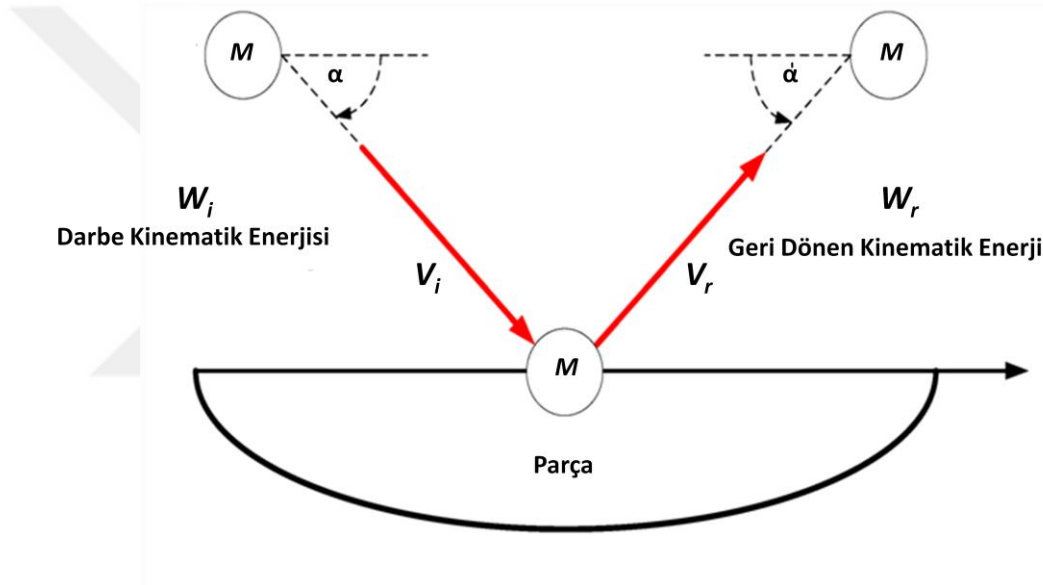
Bilyeli dövme işleminin tam kontrolü ve efektif tekrarlanabilir kullanımı için temel parametrelerin tanımlanması önemlidir. Parametreler: bilye, işlem görece parça ve işlem koşulları olmak üzere üç gruba ayrılabilir. En yaygın parametreler şunlardır:

- Bilyelerin malzemesi, boyut ve şekli
- İşlem görece parçanın malzeme özellikleri ve geometrik şekli
- Nozulun uzunluğu, çapı ve sapma açısı, nozul çıkışından iş parçasına olan mesafe, dövme şiddeti, yüzey sarma oranı, parçacık akış hızı, hava basıncı ve bilyeli dövme süresi, bilye çarpma açısı (Ganesh vd., 2014; Nguyen vd.,2014).

İşlemin uygun kalitede standart hale gelebilmesi için “dövme şiddeti” parametresi geliştirilmiştir (Harbelioğlu, 2018) ve bu parametre için bilye boyutu çok etkilidir.

Bilye boyut dağılımı, dövme işlemindeki çeşitlilik ile doğru orantılıdır. Bir diğer parametre, bilye hızıdır. Hız vektörel bir tanım olup, yönü ve büyüklüğü ile tanımlanır. Bundan dolayı bilye hızına doğrudan etki eden faktörler vardır: püskürtme basıncı, akış hızı, hava kalitesi, hortum ve nozul çapı gibi. Bu faktörlerden hız üzerinde en etkili olan parametre püskürtme basıncıdır ve artışı ile yüksek dövme şiddet değerleri elde edilebilmektedir.

Bilyenin yönü, bilyenin çarpma açısına bağlı olarak ifade edilmekte ve dövme şiddeti çarpma açısının sinüs değerine göre değişmektedir. Bilye çarpma açısının değişimi ise nozulun pozisyonu ve parça geometrisine bağlıdır (Yalçınkaya, 2019). Bilyenin geliş açısı Şekil 2.5’de gösterilmiştir (Edward vd., 2019).



Şekil 2.5. Bilyeli dövmede bilyenin geliş açısı (Edward vd., 2019)

2.3.1. Almen şiddeti

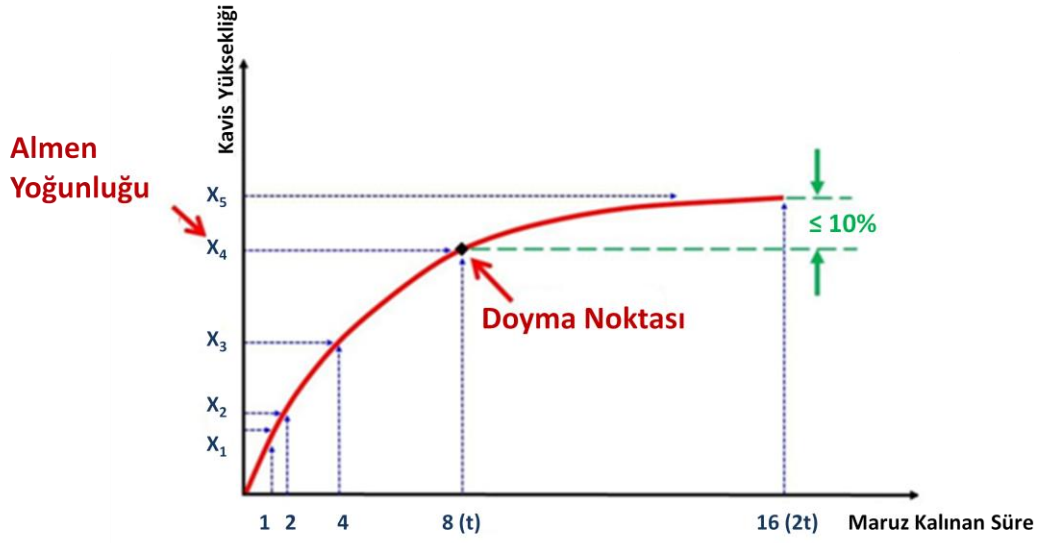
Bilyeli dövme işlemi öncesi muayene metodu olarak kullanılan Almen Testi (Şekil 2.6), 1943 yılında John Almen tarafından geliştirilmiştir (Bhuvaraghan vd., 2010). Bu metot, Almen şiddeti büyüklüğünün tüm parametrelerin birleşik etkisini aynı anda ve nispeten düşük bir maliyetle temsil ettiğinden, endüstride dövme uygulamalarında yaygın bir kullanıma sahiptir.



Şekil 2.6. Almen test cihazı (Craftlast Ltd, 2022)

Bilyeli dövme işleminin parametrelerinin yeterliliği, bu metodun striplere (şerit) (SAE 1070 yay çeliği) uygulanıp, ölçüm cihazı ile elde edilen nicel ve grafiksel veriler ile tespit edilmektedir. Tanımlı dövme süresince bir tutucu içinde dövülen Almen şeridi, tutucudan çıkarıldıktan sonra Almen gage ile eğrilik yay yüksekliği değeri ölçülür (Gariépy vd., 2013).

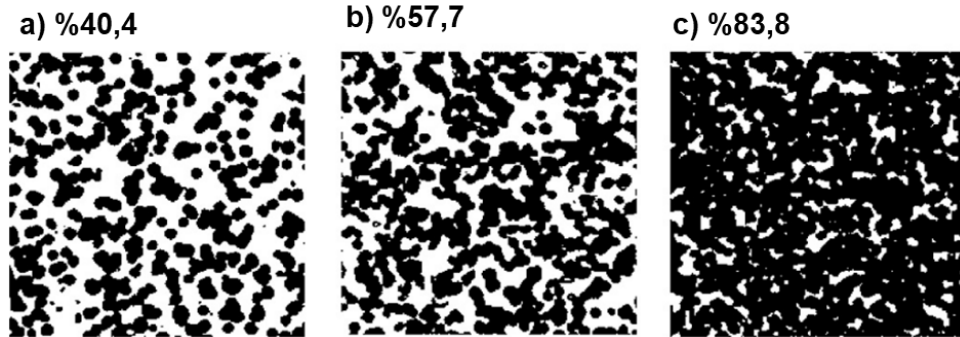
Farklı parametreler ve farklı dövme sürelerinde bilyeli dövme işlemleri gerçekleştirilerek Almen şiddeti ve buna bağlı olarak doyum noktası eğrisi Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Almen şiddeti, doyma noktasında elde edilen yayın yüksekliği olarak tanımlanmaktadır. Doyma noktası (t), bilyeli dövme süresinin iki katına (2t) çıktığında yay yüksekliğinde meydana gelen artışın %10'dan az olduğu ilk nokta olarak bilinmektedir.



Şekil 2.7. Almen testi doyma noktası eğrisi (Granato, 2020)

2.3.2. Yüzey sarma oranı

Bilyeli dövme işlemi sonrası girinti ve çıkıntı ile kaplanan alanın toplam işlenmiş yüzey alanına oranı yüzey örtme oranı olarak tanımlanmaktadır (Sheng vd., 2012). Bu oran, kalıntı gerilme tabaka kalınlığı ve işlenmiş parça yüzeyinin emniyet ve homojenliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüzey örtme oranını deneysel olarak belirlemek için görsel muayene, mavi mürekkep veya kopyalama yöntemi kullanılmaktadır. Miao ve arkadaşları ölçümle yüzey sarma oranlarını bularak yüzde şeklinde vermişlerdir (Şekil 2.8). Görsellerde açık renkli kısımlar bilye ile dövülmemiş, koyu renkli kısımlar ise bilye ile dövülmüş alanları göstermektedir (Miao vd., 2010).



Şekil 2.8. 66.2m/s dövme hızında sırası ile 1, 2 ve 4 peening adımında oluşan yüzey örtme oranı yüzdeleri (Miao vd., 2010)

2.4 Kalıntı Gerilme Analizi

Malzemeye yük uygulanmadan yani dış kuvvetlerin uygulanmadığı halde malzemenin kendi içinde bulunan gerilmeye kalıntı gerilmesi adı verilir (Anderoğlu, 2004; Ekmekçi, 2004).

Malzemeye uygulanan her işlem malzeme üzerinde kalıntı gerilmesi meydana getirebilir. Eğer malzeme mekanik üretim işlemleri ile üretiliyorsa kalıntı gerilmesi genel olarak plastik deformasyon sebebiyle ortaya çıkar. Bu istenmeden meydana gelen bir olaydır. Kalıntı gerilmeleri doğal olarak oluşmasının yanında planlı olarak da malzemeye eklenebilir. Kalıntı gerilmeleri mekanik işlemler sonucu meydana gelebileceği gibi termal ve kimyasal işlemlerden dolayı da meydana gelebilmektedir. Kalıntı gerilmesini ölçmek için kullanılan yöntemler, ölçerken malzemede kalıcı hasar bırakıp bırakmamasına göre tahribatlı ve tahribatsız ölçme yöntemleri olarak ikiye ayrılabilir.

Kalıntı gerilmesi sadece malzeme içerisinde görülen bir gerilme durumu olmayıp aynı zamanda çevresi ile denge durumunda olan gerilme olarak da adlandırılmaktadır (Anderoğlu, 2004).

2.4.1 Kalıntı gerilmesinin oluşum mekanizması

Kalıntı gerilmeleri fiziksel, kimyasal ve termal bir işlem süreci esnasında ortaya çıkmaktadır. Bu durum özellikle mekanik üretim esnasında plastik deformasyona uğramış malzemelerde sıklıkla görülmektedir. Ayrıca kalıntı gerilmesi bir işlem esnasında ortaya çıkabildiği gibi dolaylı yollardan da oluşabilme durumu söz konusudur.

2.4.2 Kalıntı gerilme karakterizasyon teknikleri

Kalıntı gerilmesi tahribatlı ve tahribatsız olmak üzere iki yöntemle incelenmektedir. Çizelge 2.4’te kalıntı gerilme ölçme yöntemleri toplu halde verilmektedir.

Çizelge 2.4. Kalıntı gerilmesi ölçmek için kullanılan testler (Çınar ve Toktaş, 2019)

Tahribatlı ve Tahribatsız Kalıntı Gerilmesi Testleri	
Tahribatlı	Tahribatsız
Tabaka kaldırma	Kırınım Yöntemleri
Delik delme	Ultrasonik Yöntemler
Halka çekirdek	Manyetik Yöntemler
Kanal açma	Termoelastik Yöntemler
Kesit profili ölçme	Fotoelastik Yöntemler
Tüp yarma yöntemi	
İnce kesitlere ayırma yöntemi	

Tahribatlı yöntemler genel olarak malzeme içerisinde delik veya kanal açılarak iç yüzeyde denge durumunun belirlenmesine göre kalıntı gerilme ölçülmektedir. Diğer taraftan tahribatsız yöntemde ise malzemenin kristal özelliklerinden faydalanılarak ölçüm yapılmaktadır. Bu durumda parçanın belirli bölgelerinden alınan ölçümlerden dolayı farklılık göstermesi nedeni ile tahribatlı mı tahribatsız yöntemin mi seçilmesi gerektiği tamamen malzemenin türüne, kalıntı gerilmenin tipine, ölçme problemlerine, ölçüm alma sayısına, parça geometrisine, laboratuvar şartlarına, ölçüm hassasiyetine ve maliyete bağlıdır (Osman vd., 2008).

2.4.2.1 Tahribatlı ölçme yöntemleri

Tahribatlı ölçme yöntemi, gerilme anında ya da gerilmeden sonra oluşan gerilmeyi ölçmek için planlı olarak gerilme gevşemesi oluşturarak, şekil değişiminin ölçüldüğü mekanik kalıntı gerilme ölçme yöntemi adı da verilen yöntemdir. (Withers ve Bhadeshia, 2001; Ekmekçi, 2004). Yöntem, planlanarak malzeme kaldırma ve buna bağlı olarak yeni gerilme oluşumunun bölgesel olarak değişiminin ölçülmesi ve kalıntı gerilmesinin elastisite teorisiyle hesaplanması esasına dayanmaktadır. Tahribatlı ölçme yöntemleri genel olarak delik delme, kanal açma, tabaka kaldırma ve kesit profil ile yapılmaktadır.

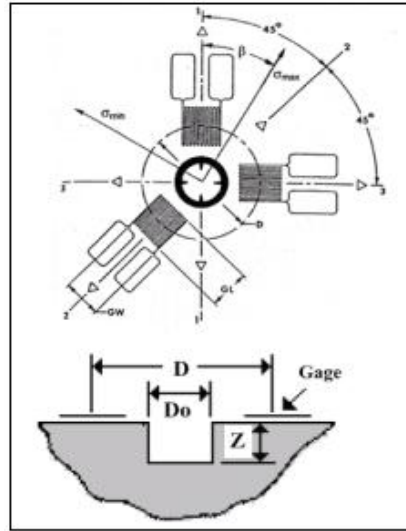
Kalıntı gerilmesinin ölçümü esas olarak bilinçli olarak oluşturulan gerilme gevşemesine müsaade edilerek gerilme sırasında veya sonrasında parçada meydana gelen şekil değişmesinin ölçülmesi yolu ile hesaplanmaktadır (Withers ve Bhadeshia, 2001). Elastisite teorisi temel alınan bu yöntemde malzeme kaldırılan bölgelerde oluşan bölgesel değişimler belirlenerek kalıntı gerilmeler ölçülmektedir (Ekmekçi, 2004).

2.4.2.1.1 Tabaka kaldırma

Kimyasal yöntemler kullanılarak malzeme yüzeyinde ve alt tabakalarına doğru kademeli kalıntı gerilmeler oluşmaktadır. Bu katman tabakaları kaldırıldığında momentlerin ve iç gerilmelerin dengelenmesine tabaka kaldırma yöntemi denilmektedir. Bu yöntemde kaldırılan tabaka katman kalınlığı yeniden dengelemeden dolayı oluşan gerilme veya şekil değiştirmeleri de doğrudan etkilemektedir (Ekmekçi, 2004).

2.4.2.1.2 Delik delme

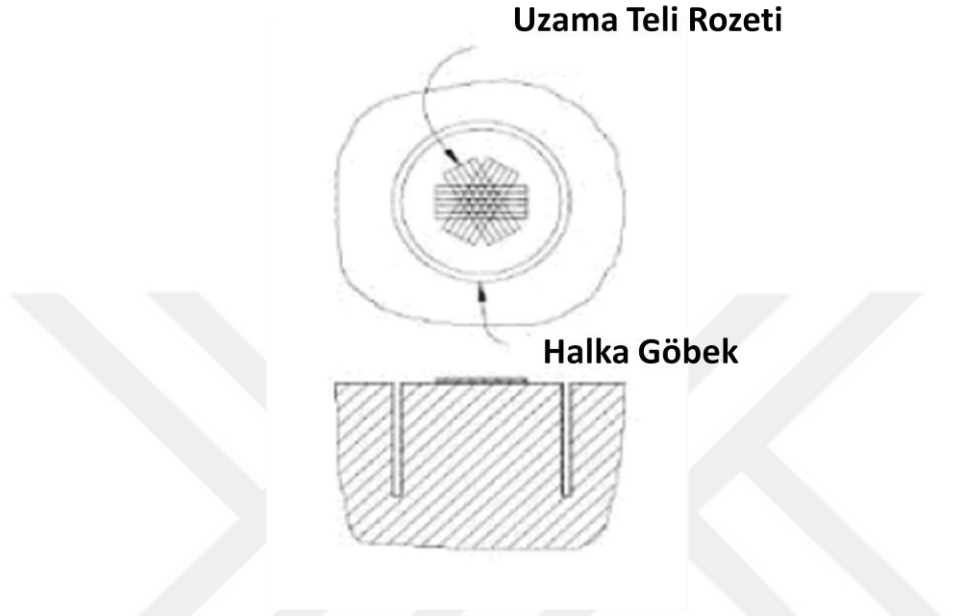
Şekil 2.11'de rozet tipi gerinim ölçer numuneye yapıştırılmıştır (Özer ve Özçatalbaş, 2013). Devamında sentroid noktadan 0.4-2 mm derinliğinde sığ bir delik delinmektedir. Delik içerisindeki gerilmeli tabakanın uzaklaştırılması ile malzeme etrafında yeniden gerilmeleri stabilize ederek gerilme gevşemelerini hesaplamaktadır (Schajer, 2001).



Şekil 2.9. Üç elementli rozet tip gerinim ölçerin şematik gösterimi (Özer ve Özçatalbaş, 2013)

2.4.2.1.3 Halka çekirdek

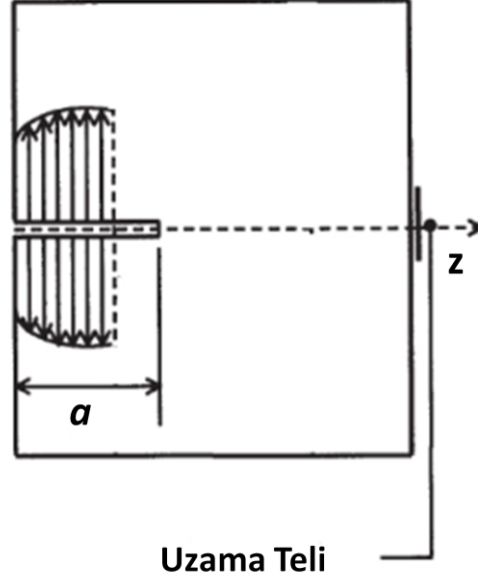
Halka çekirdek yönteminde delik delme metodundaki gibi rozet içerisinde bir delik açılması yerine rozetin dış kenar çevresine bir kanal açılmaktadır (Şekil 2.10). Genel anlamda 0.1-6 mm derinlikteki kalıntı gerilmeleri ölçülebilmektedir (Dronavalli, 2004).



Şekil 2.10. Halka çekirdek yöntemiyle tahribatlı muayene (Çınar ve Toktaş, 2019)

2.4.2.1.4 Kanal açma

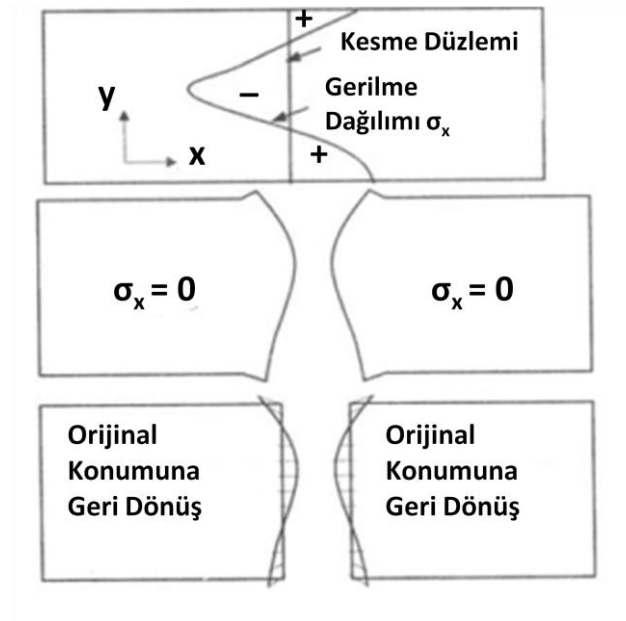
Kanal açma yönteminde açılan kanala dik bulunan gerilmeleri gerinim ölçer yardımı ile gerinme gevşemeleri ölçülmektedir. Açılan kanalda, kanala dik kalıntı bağlantıları gevşettiği durumlarda bu yöntem kullanılmaktadır (Şekil 2.11). (Schajer, 2001).



Şekil 2.11. Kanal açma yöntemi ile tahribatlı muayene (Çınar ve Toktaş, 2019)

2.4.2.1.5 Kesit profili ölçümü

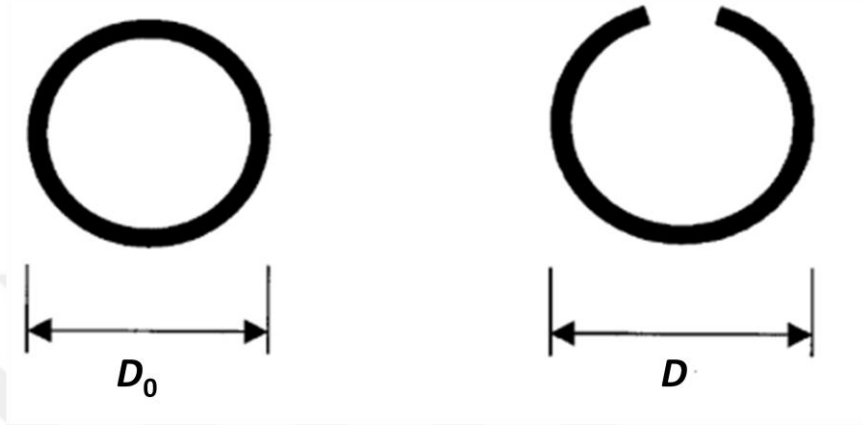
Kesit profil ölçümü malzemenin iki parçaya ayrılarak yapılan kolay, ucuz ve hızlı kalıntı gerilme hesaplarından biridir (Şekil 2.12). Malzemede eğer kalıntı gerilmesi mevcut ise yüzey kesit profili kesme düzleminde ayrılacaktır ve bu kesit profili kalıntı gerilmeleri ile ilişkilendirilmektedir. Bu yöntemin tek dezavantajlı yönü sadece kesme düzlemine dik kalıntı gerilmeler ölçülmektedir (Zhang Y., 2005).



Şekil 2.12. Kesit profili yöntemi ile tahribatlı muayene (Çınar ve Toktaş, 2019)

2.4.2.1.6 Tüp yarma

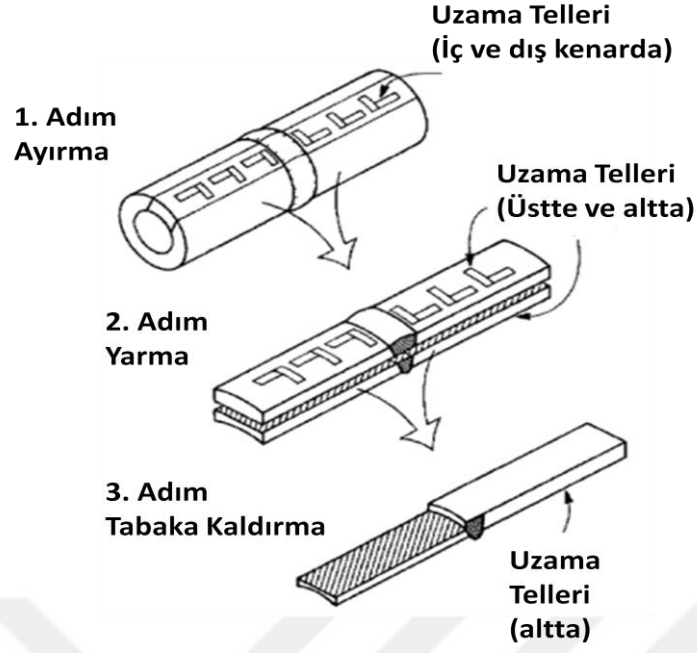
Sadece tüp şekillerin kalıntı gerilmesini belirlemede kullanılan bu yöntemde önce dış çapı ölçülen tüp, sonrasında boyunca kesilmektedir. (Şekil 2.13) Böylelikle çevresel gerilmelerde gevşeme sağlanarak tüpün dış çapındaki değişimler ölçülür ve kalıntı gerilmesinin hesaplanması sağlanır (Schajer, 2001).



Şekil 2.13. Tüp yarma yöntemi ile tahribatlı muayene (Çınar ve Toktaş, 2019)

2.4.2.1.7 İnce kesitlere ayırma

Bu yöntemde numune içerisindeki kalıntı gerilmeleri doğrultusunda değişik boyutlarda parçalar kaldırılarak ölçüm alınmaktadır (Şekil 2.14). Numuneye ait kalıntı gerilmesinin bölgesel olarak inceleyerek iç yapı hakkında detaylı analiz yapma imkânı vermektedir (Ekmekçi, 2004).



Şekil 2.14. İnce kesitlere ayırma yöntemi ile tahribatlı muayene (Çınar ve Toktaş, 2019)

2.4.2.2 Tahribatsız ölçme yöntemleri

Malzemede kalıcı hasar meydana getirmeden kalıntı gerilmelerin hesaplanmasını sağlayan tahribatsız ölçme yöntemlerinin sıklıkla kullanılan çeşitleri; X-ışını yöntemi, ultrasonik yöntem, manyetik yöntem, termoelastik yöntem, fotoelastik yöntem şeklindedir (Ekmekçi, 2004).

2.4.2.2.1 Ultrasonik yöntemler

Kalıntı gerilmesinin büyüklüğüne ve yönüne bağlı olarak değişen ses ötesi dalgalardan yararlanarak yapılan ölçüm türüdür. Mevcut kalıntı gerilmelerin doğrultu ve büyüklükleri ses ötesi dalga hız farklılıkları ile ayırt edilebilmektedir.

2.4.2.2.2 Manyetik yöntemler

Manyetik etkiye duyarlı malzemelerde kalıntı gerilme ölçümü manyetizasyon ile ilişkilendirilebilmektedir. Elektromanyetik özellikler malzemedeki kalıntı gerilmesine bağlı olarak değişiklik gösterdiğinden bu yöntem de ayırt edici bir yöntem olarak kullanılmaktadır (National Physical Laboratory, 2020).

2.4.2.2.3 Termoelastik yöntemler

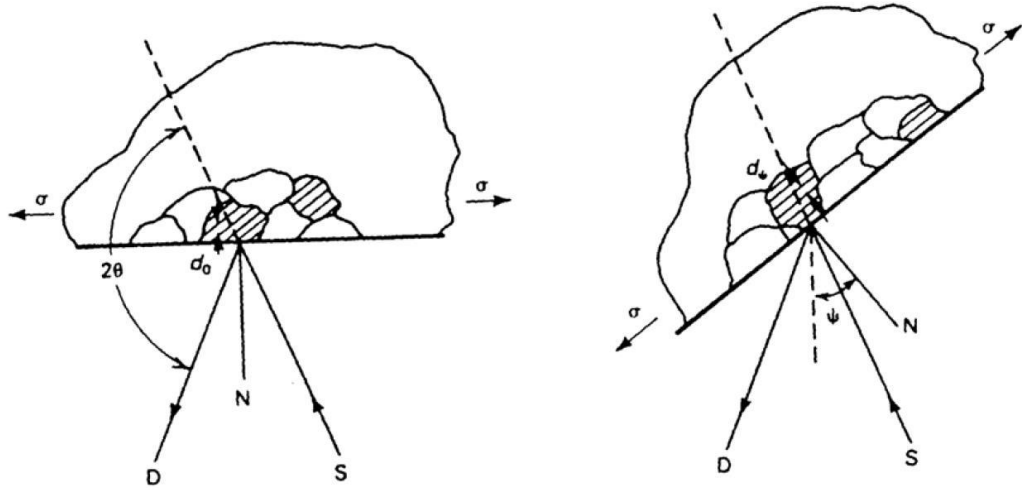
Sıcaklığa bağlı olarak malzemelerdeki küçük şekil değişimleri aynı zamanda yüzey gerilmelerin toplam değişimi ile paralellik göstermektedir. Özellikle yorulma uygulanmış parçadaki elastik deformasyon mevcut kalıntı gerilmeleri de belirleyebilmektedir (Turan, 2015).

2.4.2.2.4 Fotoelastik yöntemler

Işığın geçiren malzemelere ait kalıntı gerilmesinin hesaplanmasında bu yöntem kullanılmaktadır. Malzeme iç yüzeyinden geçen ışık farklı kırılmalar gösterecek ve bu kalıntı gerilmenin varlığını ispatlayacaktır (Anderoğlu, 2004).

2.5. Kalıntı Gerilme Analizi

Kalıntı gerilmenin XRD analizinde, işleme veya diğer işlemler sonucunda kristal kafeste ortaya çıkan gerilme gerekli kabul edilir. Malzeme üzerindeki kalıntı gerilmesinin anlaşılmasında kafes gerilmesi yardımcı olur. Burada, kafes üzerindeki elastik bozulma doğrusal olarak sayılır. Malzeme üzerindeki gerilmenin hemen harici ölçümünü gerektirir. Numunenin master uzunluğuna göre yer değiştirmesini ölçerek ve çapraz kesit alanından gelen verilerle malzemeye uygulanan gerilmeyi belirlemektedir. Bu bilgi daha sonra stres seviyelerini yorumlamak için kullanılabilir. Kalıntı gerilmesinin ölçümünde, kafes üzerindeki gerilimi elde etmek için malzemenin yüzey düzlemine göre en az iki kesin olarak verilmiş yön gerektirir. Bu nedenle, kalıntı gerilmeleri değerlendirmek için incelenen malzeme iri taneli değil kristalli olmalıdır. XRD, numune yüzeyi etrafında farklı yönlerden gelen sapmalar üretmektedir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. XRD yönteminde kalıntı gerilme parametrelerin gösterimi (Verilen iki yön: $\psi=0$ (sol) ve dönüş ψ açısı (sağ)) (Prevey, 1986)

Makroskopik gerilmeler, büyük mikroyapısal bölgelerin ölçümlerinden elde edilir. Gerilme, kuvvetin yönünü dikkate alan gerilme tensörüne göre değerlendirilir. Yüzeydeki belirli yön ve konum, seçilen yöndeki gerinimi belirleyerek kalıntı gerilmesini verir.

Mikro ölçekli gerilmelerde, pozisyondan ve yönden bağımsız olarak sertlik değeri veya sertleşme miktarı görüntülenir. Değerleri, mikro yapıda bulunan kusurların sayısına bağlıdır. Kafes çapraz konumundaki gerilmeler, gerilme alanının şekli ile ilgilidir. Bu tam konumun değişebileceği anlamına gelir.

Aşağıdaki Çizelge 2.5’de XRD ile kalıntı gerilmesi ölçme yöntemleri verilmektedir.

Çizelge 2.5. XRD ile kalıntı gerilmesi ölçme yöntemleri (Sarıoğlu vd., 2005)

XRD ile kalıntı gerilmesi ölçme yöntemleri
Williamson-Hall metodu
Warren-Averbach tekniği
$\text{Sin}2\Psi$ (Rocking) tekniği
FIM metodu

2.5.1. XRD yöntemi ile kalıntı gerilmesinin fiziği

X-Işını, numunede tutulan gerilmenin yüzeyine çarptığında saçılmaktadır. (Şekil 2.16) Bu saçılma işlemi, numunede X-ışını kalıntı gerilmesinin bir profilini vermektedir. Numune yüzeyinin oryantasyonu, çarpık X-ışını ile yüzeyin normal düzlemi arasındaki derece cinsinden ψ açısı ile tanımlanır. X-ışını kırınım açısı Bragg yasasına göre açıklanmaktadır.

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de verilen parametreler aşağıdaki gibidir.

$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta$ burada;

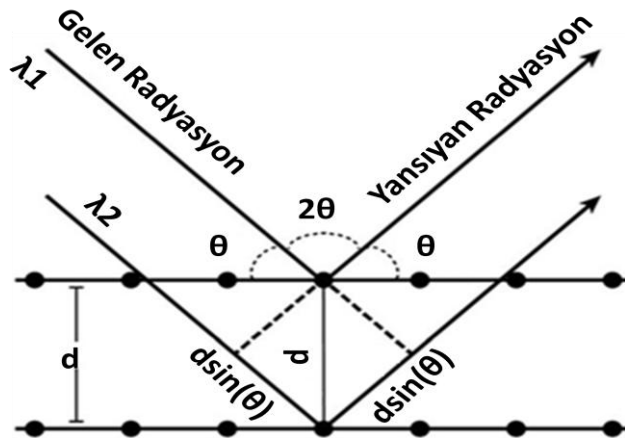
n: Tamsayı

λ : Işınlardan dalga boyu

θ : Gelen ışınlar ile kristalin yüzeyi arasındaki açı

d: Atomun katmanları arasındaki boşluk (Stan vd., 2018)

Şekil 2.16'da Bragg yasasına göre hesaplanan kristal düzlem yüzeylerine ait parametrelerin yerleri gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Bragg yasası ile kristal düzlem hesabının şematik gösterimi (Stan vd., 2018) (Stan vd., 2018)

Bir X-ışını tüpündeki metalik bir nesne tarafından yayılan X-ışınlarının dalga boyu 1 ila E+05 arasındadır. Katmanlar arasındaki boşluğa bağlı olarak kırılma açısı değişecektir. Malzeme üzerindeki çekme gerilmesi atomik katmanlar arasındaki boşluğun azalmasına neden olur ve açıda bu değişiklik katmanlar arasındaki mesafenin artmasına ve kırılma açısının azalmasına neden olur. Bu ölçümlerle, en az iki yön, kırılma açısındaki değişimi göstererek, malzemenin yüzeyinde oluşan kalıntı gerilmeyi ortaya çıkarır.

X-ışını kırınım yöntemiyle kristal kafes üzerindeki elastik gerilme değişiklikleri ile makroskopik gerilmelerin ölçümü yapılmaktadır. Yükleme altında plastik gerinim olması, kafes içindeki kristallerin hareket ederek yer değiştirmesine ve böylelikle mikrogerilmelere neden olur. Plastik deformasyon oluşumu makro ölçekli gerilmeleri etkilemez. Mikroyapıda oluşan elastik gerilmelerden kaynaklanan her türlü kalıntı gerilme kalıcı deformasyon sebebiyle meydana gelmektedir.

Kalıntı gerilmesi miktarı, difüzyon ışınının yüzeyindeki hedef alan ve derinlik profili ile birlikte değişmektedir. XRD ışınının penetrasyon derinliği, numunenin lineer absorpsiyon katsayısından direkt alakalıdır. Burada kalıntı gerilmesi, demir, alüminyum alaşımları ve nikeller için yayılan kirişin yaklaşık yarısı olan 50 mikron derinlikten gelen bilgilerle değerlendirilir. Bununla birlikte, bu tekniğin sonuçları kalıntı gerilmesinin ölçülmesi söz konusu olduğunda diğer yöntemlerden çok daha iyidir (Prevéy, 1986).

Malzeme üzerindeki kalıntı gerilmeyi ölçmek için, X-ışını kaynağının sınırlamaları nedeniyle belirli kristal düzlemlerin hesabı gerekir; ancak atomik katmanlar arasında herhangi bir aralıkta ölçüm yapmak mümkündür. Gerilme ölçümlerinin doğruluğu, seçilen kırınım açısına bağlıdır.

X Işını kalıntı gerilme ölçümü; Tek açılı, iki açılı ve numune şekil yüzeylerinde düzlemsel gerilme ($\sin 2\psi$) teknikleri ile gerçekleştirilebilir. Tek açılı teknikte kırınım açısının döndürme açısından dolayı kısıtlanması dolayısıyla hassasiyeti düşüktür. Fakat iki açılı teknik ile yüksek hassasiyet elde etmek mümkündür. İki açılı ölçme tekniği ile benzer şekilde çalışan $\sin 2\psi$ tekniğinde birçok açısal değişim yapılabilmektedir. $\sin 2\psi$ tekniğinin avantajı, kalıntı gerilme ölçümü sırasında $\sin 2\psi$ 'nin bir fonksiyonu olarak düzlemler arası mesafenin doğrusallığının elde edilmesidir ancak veri toplama için ekstra zaman gerektirir.

2.5.2. XRD yöntemi ile kalıntı gerilme analiz hesabı

Numune hazırlama yöntemi, uygulama amacına bağlı olarak değişir. Numune hazırlığının X ışını kaynağına uygun olması gerekmektedir. Isıl işlemler için önerilen elektrokimyasal cilalamadan, kalıntı gerilmesi ölçülecek alanın etkilenmemesi için kaçınılmalıdır. Ayrıca numunelerin boyutunun küçük olmalıdır.

Doğru okumalar için numunenin pozisyonları doğru olmalıdır. Oryantasyon ve difüzyon açısını bulabilmek için numune X-Ray ışını üzerine sabitlenmeli ve radyasyon esnasında numunenin yönünü değiştirmeden tutmak önemlidir. Kalıntı gerilmesi ölçümündeki belirsizlikler numunenin geometrisi ile değişiklik göstermektedir. Bu sebeple düz yüzeylerde daha doğru ölçümler yapılmaktadır.

Kalıntı gerilmesi ölçümlerinde elde edilen değerler ışın boyutuna göre değişim gösterdiği için X-Ray boyutu uygulamanın amacına göre değişiklik göstermektedir. Küçük ışın boyutu ile lokal ölçümler için kalıntı gerilmesindeki değişimi gözlemlerken, büyük ışın boyutu ortalama gerilme tespit etmek için daha geniş bir alanın gözlemlenmesini sağladığından hedefte daha iyidir. Geniş bir alana odaklanılarak gerekli ölçüm süresi azaltılır. Daha yüksek doğruluk elde etmek için daha fazla sayıda ışına ihtiyaç vardır. Bunun nedeni, radyasyon alanının azalmasının yoğunluk duyarlılığında ve ölçüm süresinde bir azalma ile sonuçlanmasıdır.

Bir kırılmadan sonra kalan gerilmeyi belirlerken, gerilme dağılımındaki tepe noktalarının boyutunu dikkate almak önemlidir. Daha keskin kenarlı tepe noktaları, daha geniş kenarlı tepe noktalarına göre daha az hassasiyete sahiptir. Kırınım doğruluğu, daha fazla zaman ve daha büyük tepe noktaları gerektiren toplanan X-ışınlarının sayısına bağlıdır. Daha doğru ölçümler için daha fazla sayıda ışın ile yoğunluğun artırılması gerekmemektedir. Ortaya çıkan yoğunluk, tepe pozisyonundan önünde Lorentz polarizasyonu ve emilimi kullanılarak değiştirilmelidir. Ortaya çıkan yoğunluk daha sonra kafesin lineer elastik distorsiyonu kullanılarak arka plan yoğunluğundan çıkarılır.

Kafes içerisindeki ve kristal kafesin boyutundaki kalıntı gerilmeler sebebiyle kırınım pikleri genişlemektedir. FTT yöntemi ile buradaki gerilmeler ve kristalin boyutu yüzünden oluşan genişlemenin dağılımı sağlanır.

Radyasyon ile yüksek hassasiyetli kalıntı gerilmesi ölçümü yapmak amaçlanmaktadır. Bunun için demir, krom, titanyum içeren elementler de ölçüm için tercih edilebilir ancak floresan ile ilgili istenmeyen bir durum bulunmaktadır. Floresan, kırınım kadar gürültülü hale gelebilmektedir. Folyo filtre kullanımı ile düzeltilmeye çalışılabilir ama ölçümün hata oranını arttırarak net olmayan sonuçlar vermektedir. Çok verimli olmasa da monokromatör veya katı hal dedektörü kullanarak düzeltilmeye çalışılabilir.



3. LİTERATÜR ÖZETİ

Zhu ve ark (2016) çalışmalarında pul toz metalürjisi yöntemi kullanarak ağırlıkça %1.5 CNT/6061 kompozit üretimi ve kompozitin farklı dövme şiddeti parametreleri ile bilyeli dövme işlemini oluşturmaktadır. Bahsedilen çalışmada bilyeli dövme işleminin yüzeyin 3D topografisine, kalıntı gerilme alanlarına, mikroyapıya ve deforme olmuş tabakaların mikrosertliklerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca Rietveld iyileştirme yöntemi ile mikroyapının alan boyutu, mikrogerilme yoğunluğu ve dislokasyon yoğunluğu hesaplamaları da yapılmıştır. Çalışma sonucunda bilyeli dövme şiddetinin artışı ile yüzey pürüzlülüğünün, güçlendirilmiş tabakanın mikrosertliğinin ve derinliğinin arttığını, genellikle kalıntı gerilmesinin de arttığını ortaya koymuşlardır (Zhu vd., 2016)

Zhan ve ark. (2018) alüminyum ve yüksek mekanik özelliklere sahip ağırlıkça %1.0 grafen takviyeli alüminyum kompozit üretimi ve bilyeli dövme işlemi ile yüzey katmanı özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri üzerine çalışmışlardır. X-ışını kırınım çizgi profil analiz yöntemi ile bilyeli dövme işlemi uygulanmış kompozitlerin yüzey katmanı karakteristiğini incelemişlerdir. Al ve Gr/Al kompoziti için yüzey katmanı karakteristiğinin değişimlerinin benzer olduğunu belirtmişlerdir. Çizgi analizinden mikrogerinme, dislokasyon yoğunluğu ve kristalografik yapının derinlik dağılımlarını da değerlendirmişlerdir.

Çalışma sonucunda hem Al hem de Gr/Al kompozit için kompozitlerin üst yüzey katmanındaki mikrosertliği, bilyeli dövmeden sonra %50'den fazla artışla dikkat çekici bir büyüklükte iyileştirildiği sonucuna varmışlardır. Bu deneysel veri ile bilyeli dövmenin grafen takviyeli Al kompozitin yüzey özelliklerini iyileştirmede önemli bir süreç olarak kabul edilebileceği sonucuna ulaşmışlardır. Kompozitin dislokasyon yoğunluğunun ise bilyeli dövme işleminden sonra üst yüzeyde belirgin bir şekilde $9.0 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 'ye arttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, bilyeli dövme işleminden sonra yapının dayanımının azaldığını ve kompozit numunenin mikroyapı değişiminin grafen takviyesi olmayan alüminyum numuneden daha fazla olduğunu belirtmişlerdir (Zhan vd., 2018).

Çizelge 3.1’de alüminyum malzemenin farklı grafen türevleri ile ilişkisi incelenmiştir. Kompozit malzemeyi üretmede kullanılan yöntem ve elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Çizelgedeki çalışmalar kısaca incelendiğinde, alüminyum matris içerisinde farklı üretim yöntemleri ile katılan karbon türevi yapılar olarak seçilen karbon nanotüp, grafen oksit, grafen nanopul ve grafen nanopelet gibi yapıların mekaniksel dayanımlarını (çekme, sertlik) belirlenen maksimum katkı miktarında arttırdığı görülmüştür. Fakat bu tür kompozitlerde darbe özelliklerine incelemeye yönelik çalışmaların olmaması bir eksiklik olarak görülmektedir. Çünkü Al esaslı kompozitlerin kullanılması genellikle otomotiv ve savunma sanayilerde yüksek performans / maliyet özelliği istendiğinden yüzey sertleştirilmiş Alüminyum matrisli karbon türevli yapılar üzerine çalışmaların yapılması büyük önem taşımaktadır. Bu amaç doğrultusunda tez çalışmamızda bilyeli dövülmüş indirgenmiş grafen oksit katkılı AA1070 kompozit yapısının bu alanda bir boşluğu dolduracağı düşünülmektedir.

Çizelge 3.1. Grafen esaslı alüminyum alaşımlarına ait çalışmalar

Matris Malzemesi	Kullanılan Takviye Malzemesi	Üretimde Uygulanan İşlemler	Elde Edilen Sonuçlar	Kaynak
Alüminyum	Ağırlıkça % 0.1, % 0.3 ve % 0.5 grafen	Toz metalürjisi	-Çekme dayanımının başlangıçta arttığını ancak grafen takviyesinin artmasıyla çekme dayanımında azalma gözlemlenmiştir. -Grafen takviye edildikçe kompozit malzemede yüzde uzamanın azaldığını gözlemlenmiştir. -Grafen içeriği % 0.3 olduğunda çekme dayanımının maksimuma ulaştığını ve %0.5 grafen takviyesiyle çekme dayanımında azalma gerçekleşmiştir.	Gao vd., 2016
AA 7050	Ağırlıkça % 0.33, % 0.55 ve % 0.77 grafen	Döküm	-Ağırlıkça % 0.33 grafenin eklenmesinin çekme dayanımını 90 MPa' dan 145MPa' a arttırarak % 60 oranında iyileşme sağlamıştır. -Ağırlıkça % 0.55 ve % 0.77 oranlarında grafen takviyesi çekme dayanımında azalma meydana getirmiştir.	Vankatesan ve Xavior, 2017
Alüminyum	Grafen nanopelet (GNP)	Toz metalürjisi	-%0,1 GNP katkısı ile, saf Al yoğunluğunun değeri 2.32'den 2.52 g/cm ³ 'e çıkmıştır. -Sertlik değeri 38 HV'den 57 HV'ye yükselmiştir.	Gürbüz vd.,2017
Alüminyum	% 0.05, % 0.1 ve % 0.2 ağırlıkça Grafen oksit	Toz metalürjisi	-Ağırlıkça %0.05 grafen katkısı için mikrosertlik değerinde %16, %0.1 grafen katkısı için %23, %0.2 grafen katkısı için mikrosertlik değerinde %29 oranında artma olmuştur.	Dasari vd.,2018

Çizelge 3.1.(devam) Grafen esaslı alüminyum alaşımlarına ait çalışmalar

Matris Malzemesi	Kullanılan Takviye Malzemesi	Üretimde Uygulanan İşlemler	Elde Edilen Sonuçlar	Kaynak
Alüminyum	Karbon nanotüp (CNT)	Toz metalurjisi ve sürtünme karıştırma prosesi	-293 K'de, hacimce %4.5 CNT/2009Al kompozitinin akma mukavemetinde, 2009Al alaşımı ve hacimce %1.5 CNT/2009Al kompozitine göre artış gözlemlenmiştir. 423-473 K'daki akma dayanımı artışı 293 K'daki kadar belirgin gözlenmemiştir. -573 K'daki akma dayanımı, daha ince tane boyutu nedeniyle 2009Al alaşımından bile daha düşüktür.	Liu vd.,2012
Alüminyum	Grafen nanopul (GNF)	Sıcak ekstrüzyon kriyolama	-Ağırlıkça %1.0 GNF'lerin alüminyuma eklenmesi %8.3 çekme uzaması sağlamıştır. GNF miktarının ağırlıkça %1.0'ın üzerinde olması yığılmayı arttırmıştır. -Ağırlıkça % 0.5 oranında GNF takviyesi, sırasıyla akma ve çekme mukavemetlerin % 8.8 ve % 17.7 artmıştır.	Li vd., 2015
Alüminyum	Karbon nanotüp (CNT)	Mekanik öğütme işleminin ardından sıcak ekstrüzyon yöntemi	- Al-1 %vol CNT kompozitinde saf alüminyuma göre sırasıyla çekme dayanımı 116,4 MPa'dan 297,7 MPa'ya; akma dayanımı 77,6 MPa'dan 262,8 MPa'ya yükselmiştir.	Kwon ve Leparoux, 2012
Alüminyum	Grafen nanopul (GNF)	Bilyeli dövme Toz metalürjisi Sıcak ekstrüde	Ağırlıkça %0.5 GNF takviyesi ile 214MPa'dan 319 MPa'ya yükselerek yaklaşık %50'lik bir artış sağlanmıştır.	Yan vd., 2014

Çizelge 3.1.(devam) Grafen esaslı alüminyum alaşımlarına ait çalışmalar

Matris Malzemesi	Kullanılan Takviye Malzemesi	Üretimde Uygulanan İşlemler	Elde Edilen Sonuçlar	Kaynak
Alüminyum	Grafen	Döküm yöntemi Sıcak ekstrüzyon işlemi ve tavlama	<ul style="list-style-type: none"> - Sıcak ekstrüzyon öncesi; akma dayanımındaki artış %116, çekme dayanımındaki artış %45 olarak ölçülmüştür. - Sıcak ekstrüzyon sonrası; akma dayanımındaki artış %228, çekme dayanımındaki artış %93 olarak ölçülmüştür. 	Yang vd, 2018
Alüminyum	Grafen nanopelet (GNP)	Toz metalürjisi	<ul style="list-style-type: none"> - Al-%0.1 GNP ilavesi için maksimum sertlik değeri 30 HV'den 57 HV'ye artış göstermiştir. - Basınç dayanımında 90 MPa'dan 118 MPa'ya artış gözükümüştür. - % 0.1 GNP takviyesine kadar Al-GNP kompozitlerin mekanik özelliklerde artış gözükümüştür. 	Şenel ve Gürbüz, 2019
Alüminyum	Grafen nanotabaka (GNS)	Toz metalürjisi Sinterleme sıcak ekstrüzyon	<ul style="list-style-type: none"> - %0.3 GNS takviyeli alüminyum kompozitler gerilme dayanımı %62 artışla 249MPa'ya yükselmiştir. 	Wang vd., 2012

Çizelge 3.1.(devam) Grafen esaslı alüminyum alaşımlarına ait çalışmalar

Matris Malzemesi	Kullanılan Takviye Malzemesi	Üretimde Uygulanan İşlemler	Elde Edilen Sonuçlar	Kaynak
AA 6061	Birkaç katman grafen	Bilyeli dövme	- Ağırlıkça %1.0 grafen takviyesi için kompozitin eğilme dayanımı, 60 ve 90 dakikalık bilyeli öğütme için %47 ve %34 artış göstermiştir.	Bastwros vd., 2013
Alüminyum içecek kutuları	Grafen	Döküm yöntemi	- En yüksek sertlik değeri %0.1 takviye oranında elde edilmiştir, takviye oranı arttıkça sertlik 70HV'den 80HV'ye artmıştır. Daha yüksek grafen takviyesinde topaklanma sorunu ile karşılaşmıştır.	Öztop, 2017
Alüminyum	Grafen nanopelet (GNP)	Kısmi toz yöntemi ile sıcak ekstrüzyon	- Ağırlıkça %0.3 GNP takviyeli AL-GNP takviyeli kompozitlerin, saf alüminyuma göre akma dayanımlarında %14,7, çekme dayanımları %11,1 artmıştır.	Rasdah vd., 2014

4.MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Malzeme

AA1070, ISM Dış Ticaret, Türkiye'den satın alınmıştır ve AA1070 alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 1'de verilmektedir. Belirtilen alaşımın seçilmesinin ana nedeni, alüminyumun grafen oksit ile mümkün olan en yüksek saflıkta etkileşimini incelemektir.

Çizelge 4.1. AA1070 alaşımının kimyasal bileşimi

Element	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	V	Zn
Ağırlıkça (%)	Kalanı	0.04	0.25	0.03	0.03	0.2	0.03	0.05	0.04

Grafen oksit sentezinde kullanılan grafit (<20 µm toz), sülfürik asit (H₂SO₄, %98), sodyum nitrat (NaNO₃), hidrojen peroksit (H₂O₂, %30) ve potasyum permanganat (KMnO₄, %98) Sigma Aldrich tarafından temin edilmiştir.

4.2. Grafen Oksitlerin Üretimi

İndirgenmiş grafen oksit eklenmiş AA1070 matris kompozit numunelerin üretimi için öncelikle grafen oksit Geliştirilmiş Hummers Yöntemiyle üretilmiştir. Numune üretimi için 3 g doğal grafit, 1°C'de bir buz banyosuna yerleştirilmiş bir beher içinde 30 dakika boyunca 1.2 g sodyum nitrat ile karıştırılmış ve ardından 150 mL sülfürik asit ilave edilmiştir. Daha sonra, grafitin oksitlenmesi için 12 g potasyum permanganat ilave edilmiştir. Nihai çözelti, buz banyosundan çıkarıldıktan sonra, 90 dakika boyunca 35°C'de manyetik karıştırmaya tabi tutulmuştur. Bu deneysel çalışma sırasında ultra saf su ilavesi ile sıcaklıkta hızlı bir artış olduğu gözlemlenmiş ve deney boyunca sıcaklık 100°C'nin altında tutulmuştur. Bu işlemlerden sonra 30 dakika daha karıştırılan solüsyon 300 mL ultra saf su ile inceltip ve 20 mL %30 hidrojen peroksit eklenerek reaksiyon sonlandırılmıştır. Karışım sırayla hidroklorik asit (HCl) ve su (H₂O) ile yıkandı ve katıyı ayırmak için 4000 devir/dakika'da 10 dakika santrifüjlendi ve grafen oksit tozu verecek şekilde bir gece boyunca 80°C'de vakum altında kurutuldu. GO tozu elde edildikten sonra hacim oranı 1:1 olan askorbik aside tabi tutulmuş ve ardından 90°C'de 30 dakika ısıtılmıştır. Son olarak, sulu çözelti 8000 devir/dakika'da yeniden santrifüjlendi, sırasıyla etanol ve su ile üç kez yıkandı ve 120°C'de 60 dakika fırında kurutuldu.

4.3. Grafen Oksit Katkılı AA1070 Kompozitin Üretimi

Ağırlıkça %0.25, %0.5 ve %1 oranlarında toz formundaki indirgenmiş grafen oksit (rGO), bir grafit probu ile bir grafit pota içinde ve 4000 devir/dakika'da 5 dakika karıştırıldıktan sonra, ergimiş AA1070 alaşımına ayrı ayrı ilave edilmiştir. Al ve grafenin ergime sıcaklıkları farklı olduğundan, alüminyumun ergidiği sıcaklıkta indirgenmiş grafen oksit katı/toz halde bulunmaktadır. İşlem sırasında toz haldeki rGO parçacıkları sıvı alüminyum içine karıştırılarak yarı katı vaziyette döküm uygulanması için kompozitler hazırlanmıştır. Sonrasında 10 mm çapında ve 100 mm uzunluğundaki silindirik kalıp boşluğuna numune dökülerek soğuması sağlanmıştır. Numunelerin hazırlanmasında son adım olarak 100 mm uzunluğundaki çubuklardan 10 mm boyunda kesilmesi ile yapısal ve mekanik testlere hazır deney numuneleri elde edilmiştir.

4.4 Bilyeli Dövme Parametreleri

Bilyeli dövme işlemi farklı parametrelerle (dövme şiddeti, bilye boyut ve sertliği, püskürtme basıncı gibi) numunenin mekanik özelliklerin iyileştirmesinde kullanılan bir yüzey işlemidir.

Bilyeli dövme uygulaması İstanbul'da bulunan Sigma Shot Peening Sistemleri firmasında bulunan BLAST 20 20 NP bilyeli dövme cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 4.1. Bilyeli dövme cihazı (Sigma Shot Peening Sistemleri)

A10-12, A14-16 ve A16-18 olmak üzere üç farklı dövme şiddeti ile diğer parametreler sabit kalacak şekilde bilyeli dövme işlemi uygulanmıştır. Çizelge 4.2'de gösterilen koşullar altında MIL-13165 standardına uygun olarak bilyeli dövme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2. Bilyeli dövme parametreleri

Almen Şiddeti	Bilye ölçüsü ve sertliği	Püskürtme Hava Basıncı (bar)[MPa]	Bilye Akış oranı (kg/dk)	Yüzey sarma oranı (%)	Süre (s)
A10-12	S110 45-52 HRC	4.5 [0,45]	5.0	100	35
A14-16	S170 45-52 HRC	5.5[0,55]	5.5	100	31
A16-18	S230 45-52 HRC	5.5 [0,55]	5.0	100	42

4.5. Karakterizasyon Teknikleri

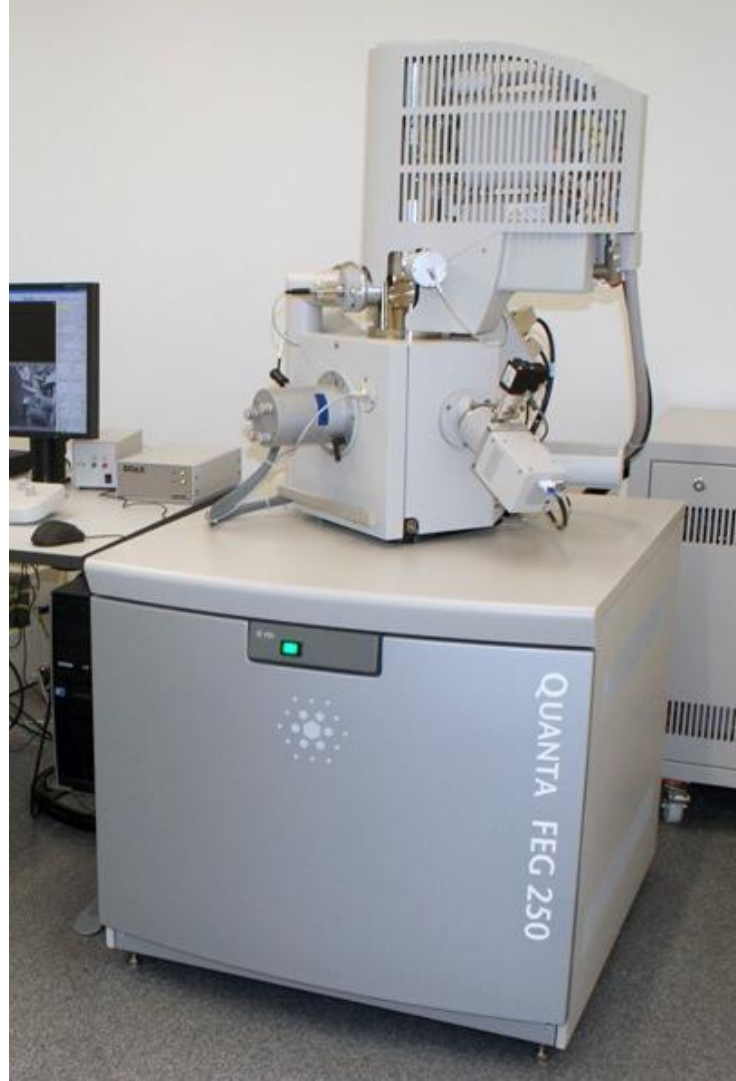
4.5.1. X-Işınları Difraktometresi (XRD)

X-ışınları kırınım yöntemi; kristalin fazların her birinin kendine özgü olan atomik dizilimlerinin karakteristik bir düzenle kırması esasına dayanmaktadır. Kırınım profilleri her kristalin faz için özeldir, bir nevi parmak izidir. Bu yöntem kullanılarak yapılan X-Işını kırınım analizi sırasında numuneler üzerinde bir tahrip oluşmamakta ve çok az miktardaki numuneye dahi analiz yapılabilir. XRD ölçümleri Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama Ve Araştırma Merkezi'nde Bruker D8 Advance Twin-Twin cihazında yapılmıştır.

Kristalin malzeme, kompozit ve ince film gibi numuneler üzerinde nitel ve nicel incelemeler yapılabilir (Callister, 1997). XRD cihazı kullanılarak hazırlanan saf ve rGO eklenmiş AA1070 matris kompozit numunelerin faz analizi yapılmıştır. Difraktogramlar, 38.47°, 44.74° ve 65.13°, 78.23° ve 82.43°de bulunan kırınım açılarında (2θ) toplanmıştır. Saf alüminyum faz tanımlamasının (JCPDS kart no. 04-0787) tek fazlı yapısı gözlemlenmiştir.

4.5.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) numune yüzeyini yüksek enerjili elektron demetleri ile taraması sonucunda yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilmesini sağlar. Yüzey görüntüleri FEI QUANTA FEG 250 marka taramalı elektron mikroskobu kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 4.2’de taramalı elektron mikroskobu gösterilmiştir. Yüzey görüntüleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarından alınmıştır.



Şekil 4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM- SDÜ YETEM)

SEM ile numune yüzeyinden yüksek çözünürlüklü görüntünün eldesi için hızlandırılmış elektron demetleri ile numune atomları arasında çeşitli girişimler oluşur. Bu girişimlere uygun dedektörlerin sinyaller algılamasını ve bu sinyallerin dijital sinyallere çevrilip bilgisayardan görüntü elde edilmesi ile görüntü elde edilir. (Callister, 1997). SEM Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) numunelerin elemental kompozisyonu tanımlamak için kullanılan analiz işlemidir (Hodoroaba, 2020).

Saf ve rGO eklenmiş AA1070 matris kompozit numunelerin bilyeli dövme işlemleri sonrası SEM görüntüleri ve SEM-EDS analizleri yapılmıştır. SEM-EDS analizi ile kompozit numunelerde rGO varlığı ve rGO yapının dağılımı incelenmiştir.

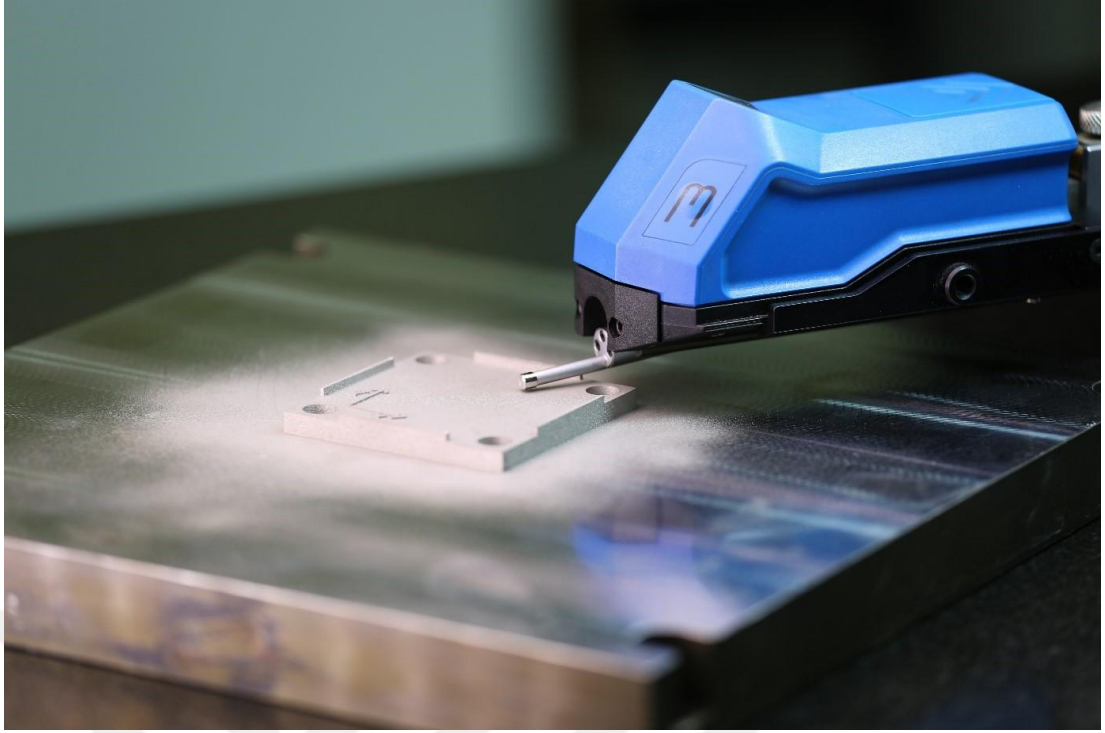
4.5.3. Kalıntı gerilme analizi

Bu tez çalışmasında kalıntı gerilme analizi tahribatsız muayene işlemi olarak X-ışını kalıntı gerilme analizi ile gerçekleştirilmiştir. Kalıntı gerilmesi numune yapısı içine giren karbon atomlarının alüminyum matris içerisinde oluşturduğu kafes yapısındaki gerilmeyi verir. Kalıntı gerilmesinin bulunmasında XRD analizi yapmak kadar XRD analiz sonuçlarını değerlendirmek de çok büyük öneme sahiptir. Kalıntı gerilmesi Bruker D8 Advance Twin-Twin cihazı ile Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde farklı Almen şiddeti parametreleri (A10-12, A14-16 ve A16-18) ile bilyeli dövülmüş tüm numunelere X-ışını kalıntı gerilme ölçümleri uygulanmıştır.

4.5.4. Yüzey pürüzlülük ölçümü

Yüzey pürüzlülüğü yüzey kalitesi ve işlenebilirlik değerlendirilmesi için önemli bir parametredir. Bilyeli dövme işlemi uygulanmış numunelerin yüzey kalitesini değerlendirmek için yüzey pürüzlülüğü Hommel Tester T500 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 4.3'de yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı gösterilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde alınmıştır.

Ölçüm cihazı ile yüzey profili elde edilmektedir. Bu yüzey profili kullanılarak ortalama yüzey pürüzlülüğü hesaplanmıştır. Bu hesaplamaları yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı otomatik olarak yapmaktadır.



Şekil 4.3. Hommel Tester T500 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

4.5.5. Mikrosertlik ölçümü

Sertlik iki cismin birbiri ile karşılaştırılması sonucu gösterdiği dirence göre ölçülen bir değerdir. Bu ölçüm için sertliğinin ölçülmesi istenen malzemeye bir uç batırılır. Uçun batırılmasıyla malzeme üzerinde oluşan izin görünümü malzemenin sertliği hakkında bilgi vermektedir. Çoğunlukla sertlik deneylerinde kullanılan yöntemler Brinell, Vickers ve Rockwell mikrosertlik ölçme yöntemleridir. (Bargel vd., 1993).

Mikron seviyesinde sertlik ölçümünde tabaka, kaplama, sertleştirme işlemi görmüş numunelerin mikrosertlik ölçümü yapılabilmektedir.

Kompozit yapının içerisindeki rGO miktarının değişimi ile bilyeli dövülmüş yüzeyin mikrosertlik değerinin ölçümleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (YETEM) laboratuvarlarında bulunan TTS Matsuzawa HWMMT-X3 marka-modeline sahip mikro sertlik ölçme cihazı (Şekil 4.4) ile alınmıştır.

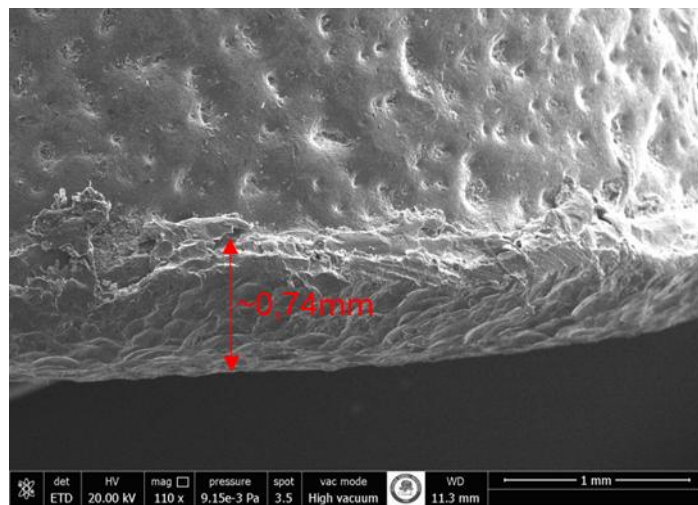


Şekil 4.4. Mikrosertlik ölçme cihazı

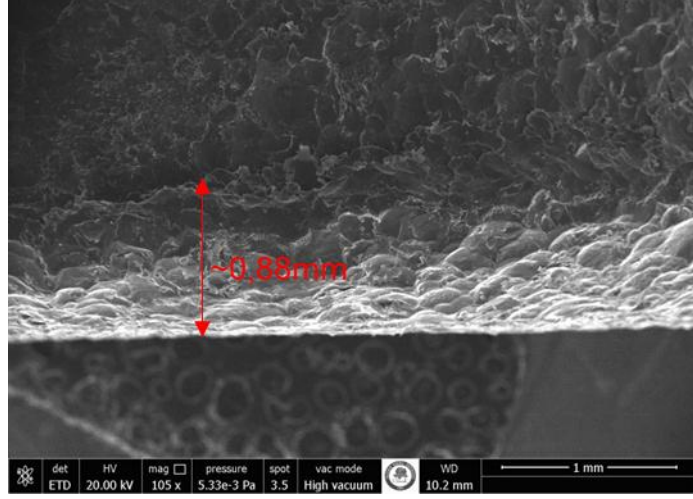
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Bilyeli Dövme Sonrası Katman Kalınlığı

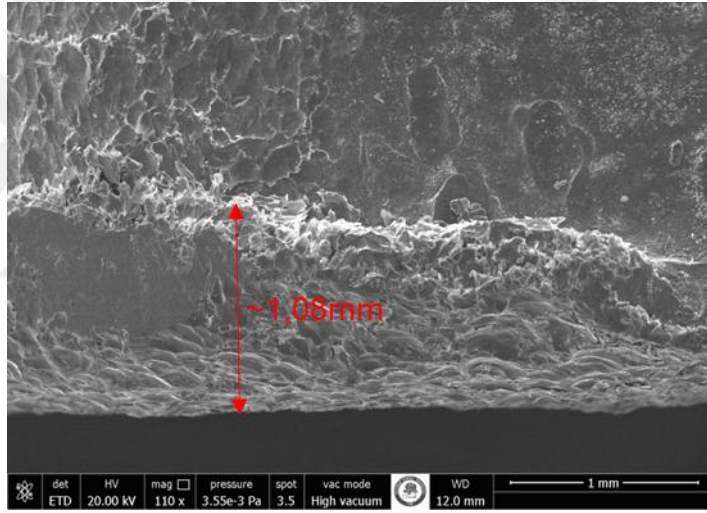
Aynı ölçüm aralığında, 3 farklı Almen şiddeti ile bilyeli dövme işlemi uygulanan ağırlıkça %0.5 rGO eklenen AA1070 numunelerin kesit alan görüntüleri taramalı elektron mikroskobu ile alınmıştır. Almen şiddeti, bilyeli dövme parametrelerine bağlıdır. Bilye çapı, hava basıncı, doyma hızı ve bilyeli dövme süresi, bilyeli dövme şiddetini özellikle etkiler. Bu çalışmada, A şeritleri kullanılarak Almen şiddeti değerleri belirlendi. Şekil 5.1’de A10-12 Almen şiddetinde S110 bilye ve %100 doyurma oranı ile bilyeli dövme uygulanmış numunenin kesit alan değişimi gösterilmiştir. Şekil 5.2’de A14-16 Almen şiddetinde S170 bilye kullanılarak ve %100 doyurma oranı ile bilyeli dövme uygulanmış numunenin kesit alan değişimi gösterilmiştir. Şekil 5.3’te ise A16-18 Almen şiddetinde S230 bilye ve doyurma oranı aynı kalacak şekilde bilyeli dövme uygulanmış numunenin kesit alan değişimi gösterilmiştir. A10-12 Almen şiddeti ile bilyeli dövülmüş alaşımın ortalama tabaka kalınlığı 0.74 mm olarak ölçülmüştür. A14-16 Almen şiddeti ile bilyeli dövülmüş alaşımın ortalama tabaka kalınlığı 0.88 mm ve A16-18 Almen şiddeti ile bilyeli dövülmüş alaşımın ortalama tabaka kalınlığı 1.08 mm’dir. Yani artan bilye şiddeti ile beraber kalınlıkların da arttığı gözlemlenmiştir. Dövme şiddeti değerleri arttıkça bilyeli dövülmüş tabaka kalınlığı artar. Almen şiddeti arttıkça dövmede kullanılan bilyelerin dövme malzemeye aktardığı kinetik enerji değeri de artmaktadır. Bu nedenle dövme veya bilyeli dövme tabaka kalınlığı artar.



Şekil 5.1. A10-12 şiddetiyle bilyeli dövme uygulanmış ağırlıkça %0.5 rGO takviyeli AA1070



Şekil 5.2. A14-16 şiddetiyle bilyeli dövme uygulanmış ağırlıkça %0.5 rGO takviyeli AA1070

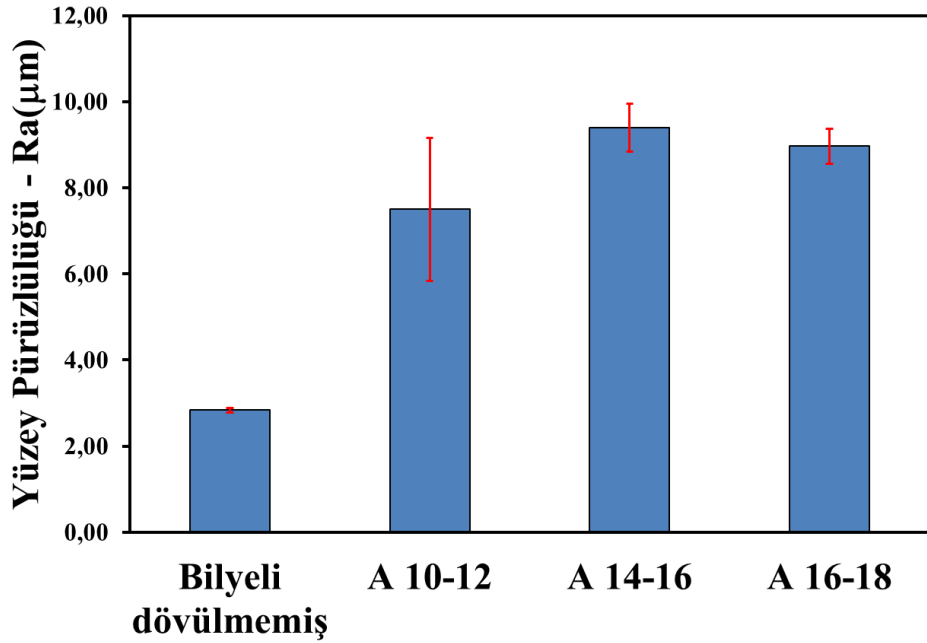


Şekil 5.3. A16-18 şiddetiyle bilyeli dövme uygulanmış ağırlıkça %0.5 rGO takviyeli AA1070

5.2 Bilyeli Dövme Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü

Bilyeli dövme işlemi uygulanan numunelerin yüzey pürüzlülükleri de sertliğe ve diğer mekanik özelliklere nasıl etkidiği için incelenmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri her numune için 5 kere ölçülmüştür. Ağırlıkça %0.25 seçilen rGO eklenmiş AA1070 numuneleri için üç farklı bilyeli dövme işlemiyle yüzey pürüzlülükleri Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Numunenin dövülmemiş durumdaki yüzey pürüzlülüğü 2.8 μm bulunmuştur. A10-12 Almen şiddeti ile bilyeli dövülmüş alaşımın yüzey pürüzlülüğü 7.4 μm olarak ölçülmüştür. A14-16 Almen şiddeti ile bilyeli dövülmüş alaşımın

yüzey pürüzlülüğü 9.4 μm 'dir. Bu ana kadar kademeli olarak artış gösteren yüzey pürüzlülüğü daha sonra A16-18 Almen şiddeti altında aniden 8.97 μm 'ye düşer. A16-18 Almen şiddetinde dövme süresi 42 saniyeydi. S230 bilye kullanılarak bu sürenin artması yüzey kalitesinin iyileşmesine neden olur. S170 bilye kullanılması durumunda uygulanan hava basıncı değeriyle aynı olduğu için S230 bilyenin kütlesinin daha fazla olması çarpma hızını düşürmüştür. Sonuç olarak, S170 bilye kullanılarak A14-16 dövme şiddetinde elde edilen yüzey kalitesinden daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir.



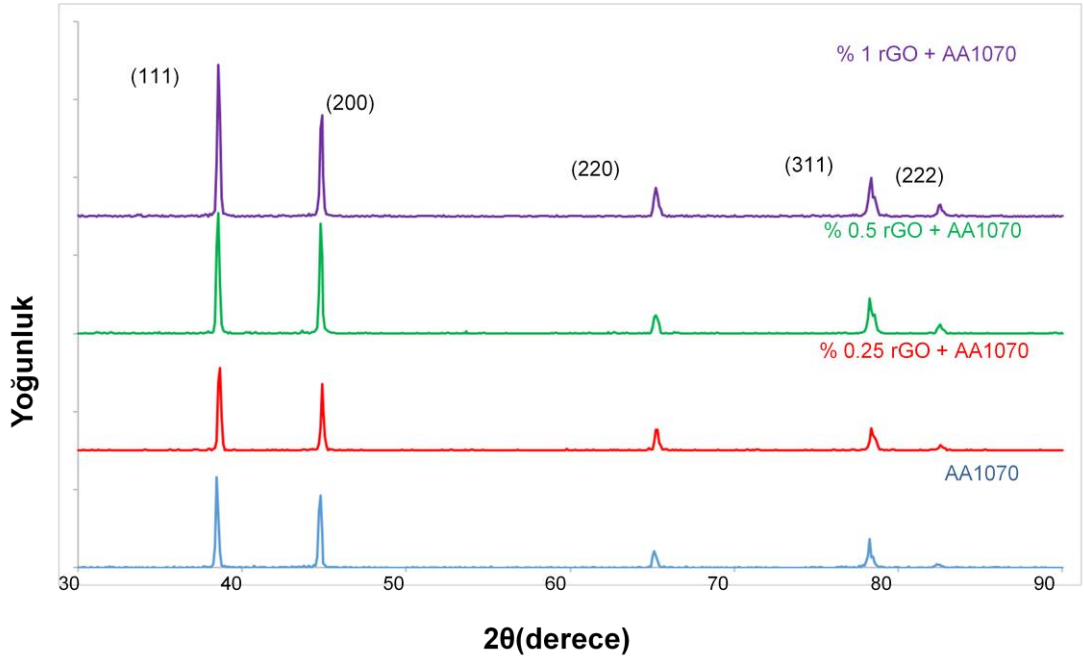
Şekil 5.4. Farklı Almen şiddetleri ile bilyeli dövülmüş ağırlıkça %0.25 rGo takviyeli numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

Sonuçlarda görüldüğü gibi yüzey pürüzlülüklerinin birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Fakat bilyeli dövme yapılmamış yüzeylerdeki pürüzlülük değerinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebini bu çalışmada şu şekilde yorumlanmıştır: Burada bilye çapından ziyade bilye atım sürelerinin farklı olması yüzey pürüzlülüğünü ciddi oranda etkilemektedir. Mesela A16-18'deki bilyede yani S230 bilye çapındaki yüzeylerde hız biraz daha düşük olduğu için yüzey pürüzlülüğü daha düşük çıkmaktadır. Yani süre ne kadar fazla olursa yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır. Bu da sonuçların birbirleriyle tutarlı hale geldiğini göstermektedir. Aynı zamanda da tamamen beklenen bir şey olan yüzey kalitesi de bilye çaplarından

ziyade biraz daha maruz kalınan bilye süresinin fazlalığıyla doğru orantılı olduğu söylenebilmektedir. Bu düşüş-artışın tamamen bilye süresiyle ilişkili olduğu gözlemlenmiştir.

5. 3 XRD Analizi

Al alaşımlarının grafen eklendiği zamanki yapısal karakterizasyonu gözlemlenmiştir. Saf ve rGO eklenmiş AA1070 matris kompozitinin XRD analizi, 2θ 'de 38.47° , 44.74° ve 65.13° , 78.23° ve 82.43° 'de bulunan saf alüminyum faz tanımlamasının(JCPDS kart no. 04-0787) tek fazlı yapısını gösterir. Sonuçta karbon atomlarının ya da karbonun AA 1070 matris içerisinde yeni bir bileşik oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Grafenin yeteri kadar bir sürede reaksiyona girmediği ve sonrasında da katılaştığı yorumu yapılmıştır. Bu durumu alüminyum yapısını gevreklettiği bilinen Al_3C fazının oluşmadığını göstermiştir. Al_3C seramik esaslı bir malzemedir ve alaşım içerisinde reaksiyon sonucu Al_3C gibi ikinci fazlar oluşması malzemeyi gevrek kıldığından XRD analizlerinde Al_3C gibi bir oluşumun yapı üzerinde gözlemlenmemesi olumlu olarak yorumlanmıştır. Her üç durumda da aşağıdaki saf AA 1070'e göre de bütün piklerin birbiriyle uyduğunu ve karbonun izine üç malzemede de rastlanmadığı açıkça söylenebilir.

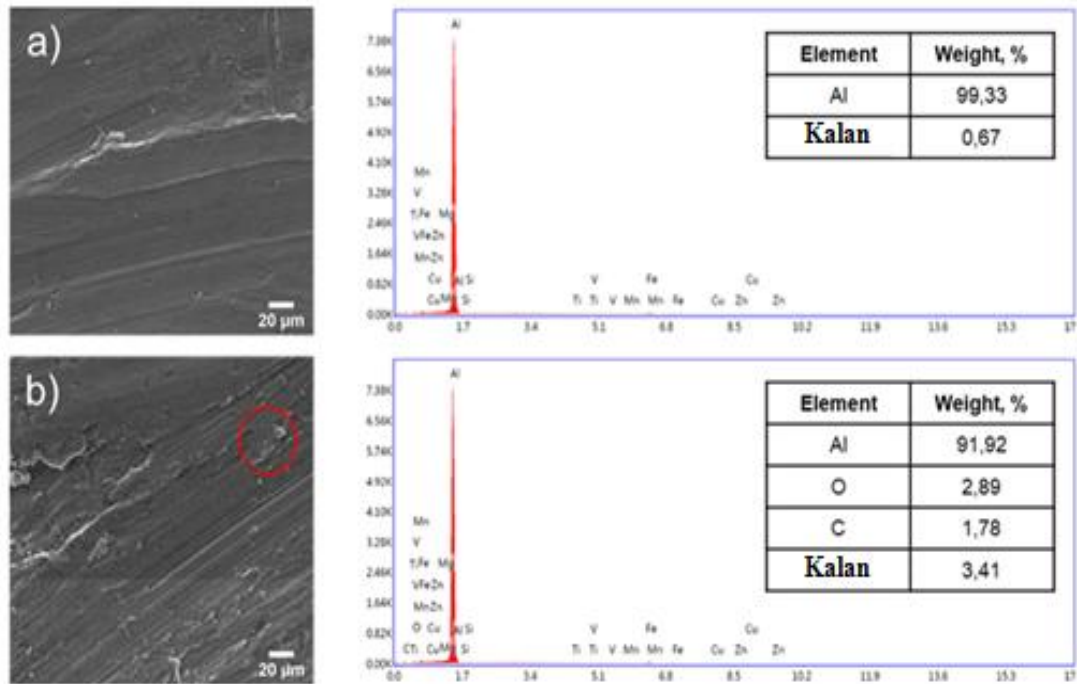


Şekil 5.5. Saf ve rGO eklenmiş AA1070 kompozitlerin XRD analiz

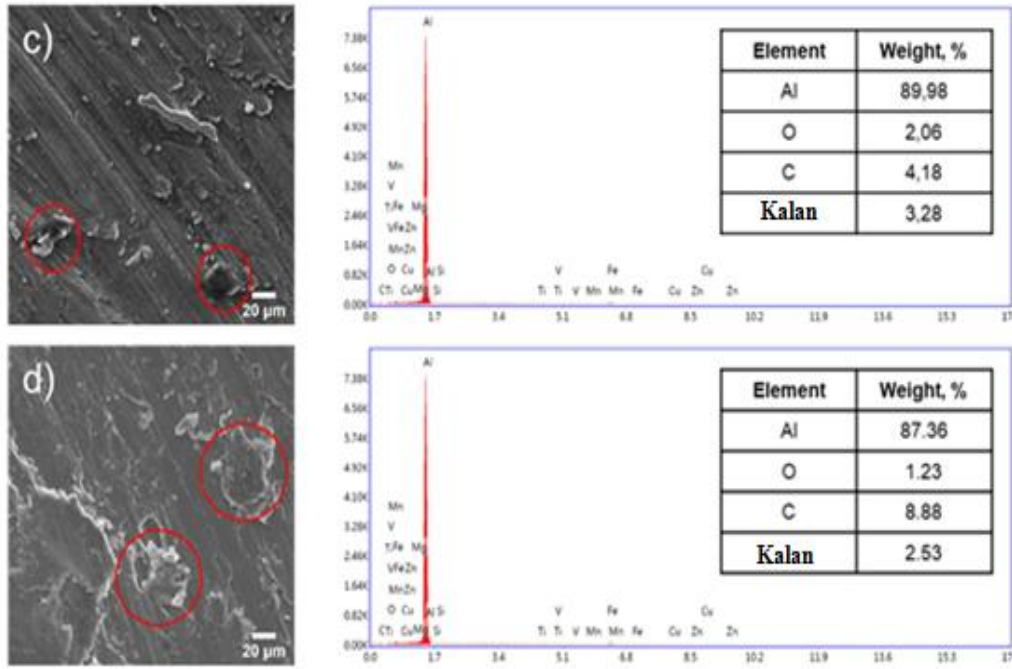
5.4. SEM/EDS Analizi

Artan takviye miktarı ile birlikte rGO'nun varlığı yapısal olarak gözlemlenmiştir. Kırmızı yuvarlak içine alınan numuneler indirgenmiş grafen oksidin varlığını gösteriyor ve indirgenmiş grafen oksitlerin hem yapılarında hem de sayılarında bir artış söz konusu olduğu söylenebilir. Burada rGO'nun homojen dağılımı amaçlanmıştır ve yarı katı döküm tekniği ile yapılmış bir çalışmada bu kadar rastgele bir dizilime sahip olan indirgenmiş grafen oksitlerin gözükmesi başarılı olarak yorumlanmıştır.

Saf ve rGO eklenmiş AA1070 örneklerinin SEM görüntüleri (Şekil 5.6 - 5.7) gösterilmiştir. rGO parçacıklarının Al matrisine rastgele dağıldığı ve Al matrisinde artan rGO miktarı ile rGO varlığının arttığı açıkça görülmektedir. Ayrıca EDS analizinde karbonun, ağırlıkça %0.25'lik rGO ilaveli AA1070 numunelerinde bile gözlemlendiği ve ağırlıkça %1.78'den ağırlıkça %8.88'e kademeli olarak arttığı görülmektedir. AA1070 örneğinin yanı sıra, EDS analizi ile uyumlu Al matrisi üzerinde rGO parçacıkları kırmızı ile işaretlenmiş olarak açıkça görülebilir.



Şekil 5.6. (a) Saf AA1070 ve (b) ağırlıkça %0.25 rGO takviyeli AA1070 SEM görüntüleri- 20µm



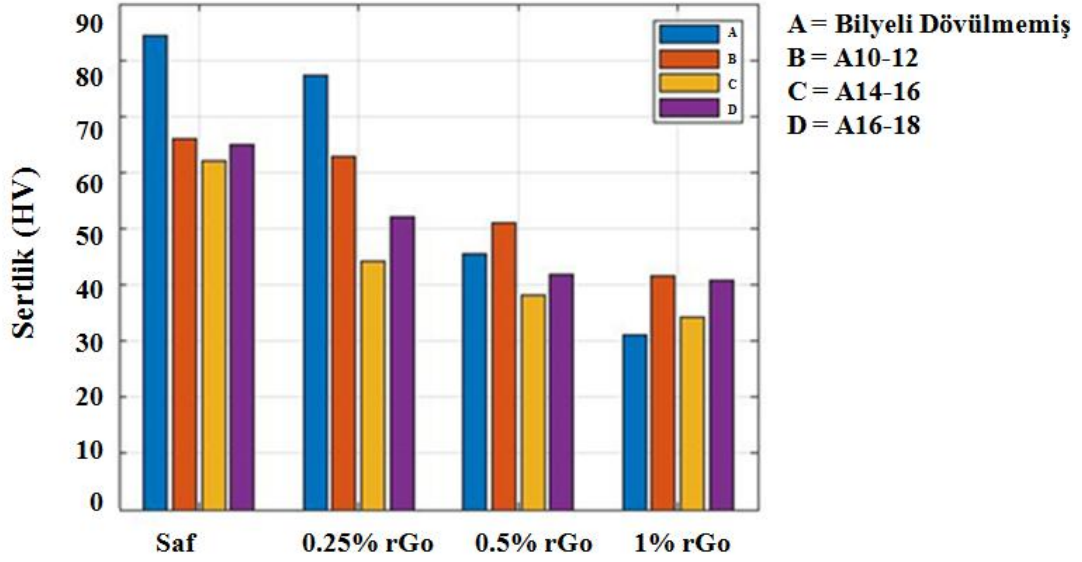
Şekil 5.7. (c) Ağırlıkça %0.5 AA1070 ve (d) ağırlıkça %1 rGO takviyeli AA1070 SEM görüntüleri- 20µm

EDS analizlerine bakıldığında artan oranda karbon görülmektedir. Bu durumda karbonun artması istenilen bir gelişme iken alüminyum oksit yapılarında birbirlerine yakın değer çıkması da alüminyum için kararlı bir yapıda olduğunu göstermektedir.

5.5 Mikrosertlik Testi

Kompozitlerde sertlik ölçümü özenle yapılması gereken ve görünür sertlik olarak adlandırılan bir sertlik değeridir. Kompozit malzemede birden fazla kullanılan bileşenden dolayı yüzey sertlik değerlerinde lokal farklılıklar meydana geleceğinden mikrosertlik ölçümü çok önemlidir. Bilyeli dövmenin yüzeyde oluşturduğu topolojiden dolayı da özenli ölçüm yapılması gerekmektedir. bilyeli dövme uygulaması sertlik değerlerine etkiyeceğinden mekanik testlerin diğer bir bakılan noktası da sertlik değerleridir. Şekil 5.8'deki grafikte her bir grafen katkılı malzemenin dövmesiz ve 3 farklı bilyeli dövme yapılarındaki gelişmeler görülmektedir. Görüldüğü gibi, çeşitli bilyeli dövme şiddetleri altında artan rGO miktarı ile sertlik değerleri azalmıştır. rGO parçacıklarının seramik gibi davranarak yapıda pekleşmediğinden sertliği düşürdüğü net görülmektedir. Bilyeli dövme işlemi

sırasında yüzeyin en az %99'u bilyeler tarafından vurulmuştur. Ancak matris malzemesine (AA1070) eklenen rGO miktarı arttıkça dövme malzemenin yüzey alanı azalmaktadır. Esasen, sertlikteki artışı ortaya çıkaran bilyeli dövülmüş malzemenin yüzeyinin soğuk deformasyonu sırasında meydana gelen sertleşmedir. Ancak, rGO'nun sertleşmesi beklenmemelidir. Bu nedenle rGO miktarı arttıkça bilyeli dövülmüş yüzeyin sertlik değerindeki azalma bu durum için düşünülmektedir.



Şekil 5.8. Farklı Almen şiddetlerinde bilyeli dövülmüş saf ve ağırlıkça %0.25, %0.5, %1 rGO takviyeli AA1070 kompozitlerin sertlik değerleri

Dövme sonrası malzeme yüzeyinde oluşan çukur ve tepelerden kaynaklı ölçüm ucunun tepelere ya da çukurlara denk gelmesi olasılığı sertlik değerlerindeki ölçüme etkimektedir. Sertlik ölçme yöntemlerinin değişmesi de sertlik değerlerinde farklı ölçümlere neden olabilmektedir.

Sertlik ölçümünde kullanılan dalıcı uç grafen oksite ya da alüminyum matrise temas etmektedir. Grafenin pekleşmesi mümkün değildir, dolayısıyla sertlik artışı beklenmemektedir. Şekil 5.8'deki grafikte mavi bar ile gösterilen bilyeli dövülmemiş malzemelerde sertlik değerinin daha yüksek olmasının sebebinin de grafen oksit varlığının olmaması şeklinde yorumlanmıştır. İlave edilen takviyeye temas edilmemesi halinde daha yüksek sertlik değerleri elde edilebilir. Aynı zamanda alüminyumun pekleşme özelliği de çok iyi değildir. Bilyeli dövme sonrasında mikrosertlik değerlerinde artış olması beklenirken yukarıda belirtilen sebeplerden

dolayı böyle bir durum görünür sertlik değerlerine yansımamıştır şeklinde yorum yapılmıştır.

5.6 Kalıntı Gerilmesi

Bilyeli dövme sonucunda meydana gelen plastik deformasyon sebebiyle malzeme yüzeyinde kalıntı basma gerilmeleri oluşmuştur. Tahribatsız muayene işlemi olarak X-ışın yöntemi ile kalıntı gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Oluşan bu kalıntı gerilmeler 0° ile 120° (yanlış hatırlamıyorsam $138,5^\circ$) arasında açısal değişikliklerle ölçülerek 3 boyutlu olarak basma gerilmeleri ölçülmeye çalışılmıştır. Kalıntı gerilmesi, parçanın içerisindeki, içeriye giren karbon atomlarının Al matris içerisindeki kafes yapısındaki gerilmeyi bizlere sunmaktadır. Çizelge 5.1'de görüldüğü gibi, farklı bilyeli dövme işlem parametreleri altındaki tüm numunelere X-ışını kırınım kalıntı gerilme ölçümleri uygulanmıştır. Ağırlıkça %0.25'lik rGO eklenen AA1070, artan bilyeli dövme şiddeti ile kalıntı gerilmeyi azaltır, bu da rGO'nun %0.25'lik ilavenin üzerindeki yüzey alanının diğer numunelere göre belirgin bir değişiklik yapmadığını doğrular. Kalıntı gerilme sonuçları, sertlik değerleriyle tam olarak eşleşir. Bu, sertleşme etkisinin büyük ölçüde kalıntı gerilmesine bağlı olduğunu da göstermektedir.

Çizelge 5.1. İndirgenmiş grafen oksit eklenmiş AA1070 numunelerin üç farklı Almen şiddeti altındaki kalıntı gerilmeleri

Kalıntı Gerilmesi (MPa)				
Almen Şiddeti	Saf	%0.25 rGO	%0.5 rGO	%1 rGO
A10-12	-37.3±1.8	-44.7±1.6	-37.2±1.1	-36.3±1.9
A14-16	-41.1±1.1	-38.5±2.0	-41.0±1.7	-30.3±4.0
A16-18	-32.7±1.5	-35.5±0.9	-32.6±1.2	-30.3±1.8

Sertlik ölçümü sonuçlarında da bahsedildiği şekilde indirgenmiş grafen oksit ile karşılaşılması değerlere etkimektedir. Kalıntı gerilmesi analizinde bazı yerlerde indirgenmiş grafen oksit ile karşılaşılması saçılma farklılıklarına neden olabilmekte ve ölçüm sonuçlarında saçılmaya bağlı sapmalar meydana gelmektedir. İlave edilen rGO miktarı arttıkça kalıntı gerilmesi değerlerinde dalgalanma ve düşüş gözlemlenmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, üç farklı Almen şiddeti değerinde (A10-12, A14-16, A16-18) bilyeli dövme işlemi uygulanmış farklı katkı oranlarına sahip rGO (%0.25, %0.5 ve %1 ağırlık) katkı AA1070 kompozitlerin yapısal ve mekaniksel özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmada, toz formundaki rGO'lerin ergiyik alüminyum içerisinde mekanik karıştırıcı ile karıştırılarak homojen bir yapı elde edilmesi sağlanmıştır.

Yapılan analiz ve ölçümler neticesinde artan Almen şiddeti ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve yüzeyde sertleşmiş bir yapının varlığı tespit edilmiştir. Bilyeli dövmede kullanılan bilyelerin kütlelerinin artmasıyla bilyeli dövme uygulanan yüzeye aktarılan kinetik enerjinin artması tabaka kalınlığındaki artışın sebebi olarak bilinmektedir. Fakat A16-18 şiddetinde görülen izafi düşüş nedeni, kullanılan S230 bilyenin kütlesinin daha fazla olması ve uygulanan hava basıncının sabit kalmasından dolayı bilye çarpma hızında düşmeye neden olmuştur.

Yapısal olarak incelendiğinde rGO yapılarının Al matris içerisinde belli bir boyutta dağılım gösterdiği ancak %1 rGO katkı yapılarında topaklaşmaya meyil ettiği görülmüştür. XRD sonuçlarında ise karbon yapının alüminyum kafes içerisinde yüksek hızla katılaşmadan ötürü alüminyum kristal kafes yapısını bozmadığı görülmüştür. Kompozitte karbon varlığı EDS analizi ile tespit edilmiştir.

Sertlik verileri incelendiğinde ise artan rGO konsantrasyonu ve Almen şiddeti ile beraber sertlikte lineer bir düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum rGO yapısının Al matris içerisinde pekleşmediğinden dolayı bilyeli dövmede matris malzemede plastik deformasyona neden olurken grafenin ise aynı sertlikte kaldığı ve bundan dolayı sertlik değerlerinde düşüşün görüldüğü sonucuna varılmıştır.

Bilyeli dövme sonucunda meydana gelen plastik deformasyon sebebiyle malzeme yüzeyinde kalıntı basma gerilmeleri oluşmuştur. Kalıntı gerilme analizinde görülen artış, azalış ve buna bağlı olan farklılıklar X-ışınlarının içyapıda rGO yüzeyine teması sonrası yaşanan saçılma farklılıklarının neden olabileceği ve bu sebeple ölçüm sonuçlarında saçılmaya bağlı sapmalar meydana geldiği şeklinde yorumlanmaktadır.

Bundan sonra yapılacak benzer çalışmalar için öneriler:

Bu tez çalışması sonucunda bilyeli dövülmüş alüminyum matrisli farklı karbon allotroplar, farklı karıştırma teknikleri veya farklı kalıntı gerilmesi ölçüm metotları kullanarak kalıntı basma gerilmesinin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların yapılabileceğinin mümkün olacağı öngörülmektedir. Günümüzde hafif, mukavemetli ve yüksek performans maliyet oranına sahip yapıların talep edildiğı ortamda bu tür çalışmaların yaygınlaşması büyük öneme sahiptir.



KAYNAKLAR

- Aktuğ S. L., 2009. İkiz Merdane Döküm Yöntemiyle Üretilmiş AA1050 ve AA3003 Alüminyum Alaşımlarının Termomekanik İşlemler Sonrası Mikro Yapı İncelemesi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 66s, Gebze.
- Anderoğlu, O. 2004. Residual Stress Measurement Using X-Ray Diffraction Residual Stress Measurement Using X-Ray Diffraction. Materials Science, 1-64.
- Arif, M. A. M., Omar, M. Z., Sajuri, Z. ve Salleh, M. S. 2020 . Effects of Cu and Mg on thixoformability and mechanical properties of aluminium alloy 2014. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 30, 2020, 275–287.
- Asma Y., 2014. AA7075 – AA6061 Malzeme Çiftinin Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 95s, Elazığ.
- Aytaç A., 2010. Eşit Kanal-Açısal Presleme Yöntemi İle 7075 Alüminyum Alaşımlarında Nano Boyutlu Tane Üretimi ve Mikroyapısal Karakterizasyonun Belirlenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,67s, Ankara.
- Baig, Z., Mamat, O., Mustapha, M., Mumtaz, A., Sarfraz, M. ve Haider, S. 2018. An efficient approach to address issues of graphene nanoplatelets (GNPs) incorporation in aluminium powders and their compaction behaviour. Metals, 8.
- Balyalı H. A., 2015. Metalik Malzemelerin Bilyeli Dövme Uygulaması Sonrası Tribolojik Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 149s, İstanbul.
- Bargel, H. J., Cardinal, P., Hilbrans, H., Schulze, G. ve Wurzel, G. 1993. Malzeme Bilgisi-Cilt I, Metal Malzemelere Genel Bakış. Güleç, Ş. ve Aran, A. 190s. Almanya.
- Bastwros, M., Kim, G. Y., Zhang, K., Wang, S. 2013. Fabrication of Graphene Reinforced Aluminum Composite by Semi-Solid Processing. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE).
- Başer T. A., 2012. Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı, Mühendis ve Makina, 53(635), 51-58.
- Bhuvaraghan, B., Srinivasan, S.M. ve Maeo, B. 2010. Almen Response with Strain rate eects.

- Bisht, A., Srivastava, M., Kumar, R.M., Lahiri, I. ve Lahiri, D. 2017. Strengthening mechanism in graphene nanoplatelets reinforced aluminum composite fabricated through spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering A*, 695, 20–28
- Boostani, A. F., Mousavian, R. T., Tahamtan, S., Yazdani, S., Khosroshahi, R. A., Wei, D., Xu, J. Z., Gong, D., Zhang, X. M. Z., Jiang, Z. Y. 2015. Graphene sheets encapsulating SiC nanoparticles: a roadmap towards enhancing tensile ductility of metal matrix composites. *Materials Science and Engineering A*, 648, 2015, 92–103.
- Boostani, A. F., Yazdani, S., Khosroshahi, R. A., Jiang, Z. Y. ve Wei, D. 2018. A novel graphene-stimulated semi-solid processing to fabricate advanced aluminium matrix nanocomposites. *Materials Science and Engineering A*, 736, 316–322.
- Callister, William D. 1997. *Materials science and engineering: an introduction*. New York: John Wiley & Sons.
- Celasco, E., Chaika, A.N. (Ed.), 2019. *Handbook of Graphene, Volume 1: Growth, Synthesis, and Functionalization*. John Wiley & Sons, 678p, New Jersey.
- Chandrashekar, A. 2018. Mechanical and tribological properties of AA-7075 and graphene reinforced metal, 3, 230–235.
- Chintalapudi, K. ve Pannem, R. M. R. 2020 . An intense review on the performance of graphene oxide and reduced graphene oxide in an admixed cement system. *Construction and Building Materials*, Vol. 259.
- Craftlast Ltd, 2022. Erişim Tarihi: 07.05.2022. <http://www.craftlast.co.uk/page2.html>.
- Çınar, K. ve Toktaş, G. 2019. Artık Gerilmeleri Ölçme Yöntemleri, *Mühendis ve Makine*, 48-56.
- Dasari, B. Li, Morshed, M., Nouri, J.M., Brabazon, D., Naher, S. 2018. Mechanical properties of graphene oxide reinforced aluminium matrix composites, *Composites Part B: Engineering*, 145, 136-144.
- Davis J. R. (Ed.), 2001. *Light Metals and Alloys*. ASM international, 351-416.
- Dronavalli, S. B. 2004. *Residual Stress Measurements and Analysis by Destructive and Non Destructive Techniques*, University of Nevada, Yüksek Lisans Tezi, 46s, Las Vegas.
- Edward, A.B., Heyns, P.S., Kok, S. 2019. A Numerical Investigation of a Single-Shot in a DEM-FEM Approach to Shot Peening Simulation. *Metals* 2019, 9.
- Ekmekçi, B. 2004. *Theoretical and Experimental Investigation of Residual Stresses in Electric Discharge Machining*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 247s, Ankara.

- Fadavi Boostani, A., Tahamtan, S., Jiang, Z. Y., Wei, D., Yazdani, S., Azari Khosroshahi, R., Taherzadeh Mousavian, R., Xu, J., Zhang, X., Gong, D. 2015. Enhanced tensile properties of aluminium matrix composites reinforced with graphene encapsulated SiC nanoparticles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68, 155–163.
- Fadavi Boostani, A., Yazdani, S., Taherzadeh Mousavian, R., Tahamtan, S., Azari Khosroshahi, R., Wei, D., Brabazon, D., Xu, J. Z., Zhang, X. M., Jiang, Z. Y. 2015. Strengthening mechanisms of graphene sheets in aluminium matrix nanocomposites. *Materials and Design*, 88, 983–989
- Fakıoğlu A., 2012. Yaşlandırılan AA7075 Alüminyum Alaşımının Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111s, Karabük.
- Ganesh B.K.C., Sha W., Ramanaiah N., Krishnaiah A. 2014. Effect of Shotpeening on Sliding Wear and Tensile Behavior of Titanium Implant Alloys, *Materials & Design*, 56, 480-486.
- 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.
- Gariépy A., Bridier F., Hoseini M., Bocher P., Perron C., Lévesque M. 2013. Experimental and Numerical Investigation of Material Heterogeneity in Shot Peened Aluminium Alloy AA2024-T351, *Surface and Coatings Technology*, 219, 15-30.
- Granato, J. A., Pontes, J. A., Gonçalves, E. P., Sinka, V. 2020. Excessive coverage effect (over peening) in the blasting operation of aluminum alloy “AA 7475-T7351” with steel shot. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 25(2)
- Gupta, R., Chaudhari, G. P. ve Daniel, B. S. S. 2018. Strengthening mechanisms in ultrasonically processed aluminium matrix composite with in situ Al₃Ti by salt addition. *Composites Part B: Engineering*, 140, 27–34.
- Gürbüz, M., Şenel, M. C., Koç E. 2018. An Investigation into the Mechanical Properties and Microstructures of Graphene Reinforced Aluminum Composites, *nt'l Journal of Research in Chemical, Metallurgical and Civil Engg. (IJRCMCE)*, 5(1).
- Gürbüz, M., Şenel, M. C., Koç E. 2018. The effect of sintering time, temperature, and graphene addition on the hardness and microstructure of aluminum composites. *Journal of Composite Materials*.52(4), 553-563.
- (a)Hanizam, H., Salleh, M. S. ve Omar, M. Z. 2019. Homogenous dispersion and interfacial bonding of carbon nanotube reinforced with aluminum matrix composite: a review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 58, 295–303.

- (b) Hanizam, H., Salleh, M. S. ve Omar, M. Z., Sulong, A.B., Yahaya, S.H. ve Siswanto, N. 2019. Effect of magnesium surfactant on wettability of carbon nanotube in A356 alloy composite. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13, 33–44.
- Harbelioğlu E., 2018. Bilyeli Dövmenin AA7075-T6 Alaşımının Yüzey Özelliklerine ve Erozyon Aşınma Davranışına Etkileri, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 117s, Kocaeli.
- Hidalgo-Manrique, P., Yan, S., Lin, F., Hong, Q., Kinloch, I. A., Chen, X., Young, R. J., Zhang, X., Dai, S. 2017. Microstructure and mechanical behaviour of aluminium matrix composites reinforced with graphene oxide and carbon nanotubes. *Journal of Materials Science*, 52(23), 13466-13477.
- Hodoroaba, V. D., 2020, Chapter 4.4 - Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), *Characterization of Nanoparticles*, Elsevier, Pages 397-417.
- Iijima, S. 1991. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354, 56–58.
- Jiang, Y., Tan, Z., Fan, G., Zhang, Z., Xiong, D., Guo, Q., Li, Z., Zhang, D., 2020. Nucleation and growth mechanisms of interfacial carbide in graphene nanosheet/Al composites. *Carbon*, 161, 17-24.
- Kelly, A. ve Tyson, W. R. 1965. “Tensile properties of fibre-reinforced metals: Copper/tungsten and copper/molybdenum,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 13(6), 329–338.
- Khoshghadam-Pireyousefan, M., Rahmanifard, R., Orovcik, L., Švec, P. ve Klemm, V. 2020. Application of a novel method for fabrication of graphene reinforced aluminum matrix nanocomposites: synthesis, microstructure, and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 772.
- Kirk, D., 2009. Size and Variability of Cast Steel Shot Particles. Erişim Tarihi: 03.05.2022. <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2009005.pdf>.
- Kumar, D. ve Abhishek, S. 2018 Effect of graphene reinforcement on the mechanical properties of Aluminium 6061 nanocomposite prepared by stir casting method, *International Journal for Scientific Research & Development*, 6, 45–48.
- Kwon H. ve Leparoux, M. 2012. Hot extruded carbon nanotube reinforced aluminum matrix composite materials, *Nanotechnology*, 23(41).
- Li, J., Zhang, X. ve 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.L., Xiong, Y.C., Wang, X.D, Yan, S.J., Yang, C., He, W.W., Chen, J.Z., Wang, S.Q., Zhang, X.Y., 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.

- Liang, A., Jiang, X., Hong, X., Jiang, Y., Shao, Z. ve Zhu, D. 2018 Recent developments concerning the dispersion methods and mechanisms of graphene. *Coatings*, Vol. 8.
- Liu, Z.Y., Xiao, B.L., Wang, W.G., Ma, Z.Y. 2012. Elevated temperature tensile properties and thermal expansion of CNT/2009Al composites, *Composites Science and Technology*, 72(15), 1826-1833.
- Lokesh, K. S., Chethan, I. C., Naveen Kumar, K. R., Kannantha, V. ve Naveen Kumar, J. R. 2018 . Determination of compressive strength of graphene reinforced with aluminium-7075 metal matrix composites. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9, 327–335.
- Malaki, M.; Xu, W.; Kasar, A.K.; Menezes, P.L.; Dieringa, H.; Varma, R.S.; Gupta, M, 2019. *Advanced Metal Matrix Nanocomposites*. *Metals*, 9:330.
- Mhaede M. 2012. Influence of Surface Treatments on Surface Layer Properties, Fatigue and Corrosion Fatigue Performance of AA7075 T73, *Materials & Design*, 41, 61-66.
- Miao, H.Y., Demers, D., Larose, S., Perron, C., Lévesque, M. 2010, Experimental study of shot peening and stress peen forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2089-2102.
- Mitrovic S., Adamovic D., Zivic F., Dzunic D., Pantic M. 2014. Friction and Wear Behavior of Shot Peened Surfaces of 36CrNiMo4 and 36NiCrMo16 Alloyed Steels Under Dry and Lubricated Contact Conditions, *Applied Surface Science*, 290, 223-232.
- National Physical Laboratory, 2020. Erişim Tarihi: 15.06.2022. <https://www.npl.co.uk/gpgs/residual-stresses-xray-diffraction>
- Nguyen V. B., Poh H. J., Zhang Y. W. 2014. Predicting Shot Peening Coverage Using Multiphase Computational Fluid Dynamics Simulations, *Powder Technology*, 256, 100-112.
- Osman, Y., Murat, D.ve Selçuk, H. 2008. Tabaka Kaldırma Yöntemi ile Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması. *Mühendis ve Makina*, 49(579), 20-27.
- Özer, A. ve Özçatalbaş, Y. 2013. Delik Delme Yöntemiyle Kalıcı/Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi Ve Gerinim Ölçerlerin Kalibrasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(3):657, Ankara.
- Öztop, B. ve Gurbuz, M. 2017. Atık Alüminyumdan Elde Edilen Matrise Grafen Takviyesiyle Üretilen Kompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*. 1. 4-8.

- Prevey, P. S. 1986. X-ray Diffraction Residual Stress Techniques, Metals Handbook, 10, Metals Park, OH: American Society for Metals, 1986, 380-392.
- Prevey, P. S., 1986. X-ray Diffraction Residual Stress Techniques. Whan, R. E. (Ed.), ASM International, ASM Handbook İçinde (380- 392).
- Progressivesurface, 2022. Erişim Tarihi:07.05.2022. <https://www.progressivesurface.com/shotpeening/dual-robot-intelligent-shot-peening-system.htm>
- Rashad, M., Pan, F., Tang, A. ve Asif, M. 2014. Effect of Graphene Nanoplatelets addition on mechanical properties of pure aluminum using a semi-powder method. Progress in Natural Science: Materials International, 24, 101–108.
- Saboori, A., Pavese, M., Badini, C. ve Fino, P. 2017. Microstructure and thermal conductivity of Al-graphene composites fabricated by powder metallurgy and hot rolling techniques. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 30, 675–687.
- Sarioğlu, C., Demirler, U., Kazmanlı, M. K. ve Ürgen, M. 2005. Measurement of residual stresses by X-ray diffraction techniques in MoN and Mo2N coatings deposited by arc PVD on high-speed steel substrate, Surface and Coatings Technology, 2-3(190), 238–243.
- Savaş S., 2010. Monitoring Variation Of Surface Residual Stresses in The Shot-Peened Steel Components by Magnetic Barkhausen Noise Method, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tez, 97s, Ankara.
- Saykar, 2022. Erişim Tarihi: 07.05.2022. https://www.saykar.net/celik_bilye.
- Schajer, G. 2001. Residual Stresses: Measurement by Destructive Testing. Encyclopedia of Materials Science and Technology, 8152-8158.
- Seyed Pourmand, N. ve 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, 289–337.
- Sharma, A., Sharma, V. M., Gugaliya, A., Rai, P., Pal, S. K. ve Paul, J. 2020. Friction stir lap welding of AA6061 aluminium alloy with a graphene interlayer. Materials and Manufacturing Processes, 35, 258–269.
- Shil, A., Roy, S., Balaji, P. S., Kumar Katiyar, J., Pramanik, S. ve Kumar Sharma, S. 2019 . Experimental analysis of mechanical properties of stir casted aluminium-graphene nanocomposites. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 653, 2019.

- Shin, S. E, Choi, H. J., Shin, J. H. ve Bae, D. H. 2015. Strengthening behavior of few-layered graphene/aluminum composites. *Carbon*, Vol. 82, 143–151.
- Srivivas, P. D. and Charoo, M. S. 2018. Role of reinforcements on the mechanical and tribological behavior of aluminum metal matrix composites – a review. *Materials Today: Proceedings*, 5, 20041–20053.
- Stan, C., Beavers, C., Kunz, M., Tamura, N. 2018. X-Ray Diffraction under Extreme Conditions at the Advanced Light Source. *Quantum Beam Science*, 2(1):4.
- Su, J. ve Teng, J. 2021. Recent progress in graphene-reinforced aluminum matrix composites. *Frontiers of Materials Science*, 15, 79–97.
- Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama Ve Araştırma Merkezi, 2022. X-Işınları Difraktometresi. Erişim Tarihi: 07.6.2022. <https://yetem.sdu.edu.tr/tr/malzeme-uretim-ve-karakterizasyon-birimi/malzeme-karakterizasyon-laboratuvari-9774s.html>
- Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama Ve Araştırma Merkezi, 2022. Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM). Erişim Tarihi: 07.6.2022. <https://www.nanbiosis.es/u28-e08-fei-quanta-250-feg-scanning-electron-microscope-esem-mode/>
- Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama Ve Araştırma Merkezi, 2022. Hommel Tester T500 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı. Erişim Tarihi: 07.6.2022. <https://yetem.sdu.edu.tr/tr/tasarim-ve-imalat-birimi/tasarim-test-ve-olcum-laboratuvari-9785s.html>
- Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama Ve Araştırma Merkezi, 2022. Mikro sertlik ölçme cihazı. Erişim Tarihi: 07.6.2022. <https://yetem.sdu.edu.tr/tr/test-ve-analiz-teknolojileri/metalografi-laboratuvari-12119s.html>
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. 2018. Mechanical and tribological behaviours of aluminium matrix composites reinforced by graphene nanoplatelets. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 4, 1980–1989.
- Tang, X. C., Meng, L. Y., Zhan , J. M., Jian , W. R., Li, W. H., Yao, X. H., Han, Y.L. 2018. Strengthening effects of encapsulating graphene in SiC particle-reinforced Al-matrix composites. *Computational Materials Science*, 153, 275–281.
- Tımaç G., 2006. Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynak Yöntemi ile Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,180s, İstanbul.
- Tian, W., Ming, S., Mei Li, B., Wang, X., Chen, J, Liu, M., vd. 2016. Graphene-reinforced aluminum matrix composites prepared by spark plasma sintering. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 23, 723–729.

- Turan, M. E. 2015. R260 Kalite Tren Raylarında Kalıntı Gerilmenin Belirlenmesi ve Bunun Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 81s, Karabük.
- Ünal O., 2011. Bilyeli Dövme İşleminin Tane Boyutuna Etkisinin Deneysel İncelenmesi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bartın, 2011.
- Venkatesan, S. ve Xavior, A. 2017. Mechanical behaviour of Aluminium metal matrix composite reinforced with graphene particulate by stir casting method. *Materials Science*, 10(10).
- Venkatesan, S. ve Xavior, M. A. 2019 . Characterization on aluminum alloy 7050 metal matrix composite reinforced with graphene nanoparticles. *Procedia Manufacturing*, 30, 2019, 120–127.
- Wang, C., Lai, Y., Wang, L., Wang, C. 2020. Dislocation-based study on the influences of shot peening on fatigue resistance, *Surface and Coatings Technology*, 383.
- Wang, J., Li, Z., Fan, G., Pan, H., Chen, Z. ve Zhang, D. 2012. Reinforcement with graphene nanosheets in aluminum matrix composites. *Scripta Materialia*, 66, 594–597.
- Withers, P. J. ve Bhadeshia, H. D. 2001. Residual Stress, Part 1- Measurement Techniques. *Materials Science and Technology*, 17, 355-365.
- Xiong, B., Liu, K., Xiong, W., Wu, X. ve Sun, J. 2020. Strengthening effect induced by interfacial reaction in graphene nanoplatelets reinforced aluminum matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 845.
- Xu, Z. Y., Li, C. J., Wang, Z., Fang, D., Gao, P., Tao, J. M., Yi, J. H., Eckert, J. 2020. Balancing the strength and ductility of graphene oxide-carbon nanotube hybrid reinforced aluminum matrix composites with bimodal grain distribution. *Materials Science and Engineering A*, 796.
- Yalçın E. D., 2010. AA7075 ve AA5754 Alüminyum Alaşımların Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 117s, Trabzon
- Yalçınkaya A., 2019. Bilyeli Dövme Prosesi Uygulanan Tank Palet Pimlerinin Yorulma Analizi, Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 109s, Ankara.
- 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 nanoflakes. *Materials Science and Engineering A*, 612, 440–444.

- Yang, W., Zhao, Q., Xin, L., Qiao, J., Zou, J., Shao, P., Yu, Z., Zhang, Q., Wu, G. 2018. Microstructure and mechanical properties of graphene nanoplates reinforced pure Al matrix composites prepared by pressure infiltration method, *Journal of Alloys and Compounds*, 732, 748-758.
- Yıldıran Y., 2013. 3003 H14 Alüminyum Katı Partikül Erozyonu Davranışı, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111s, Kocaeli.
- Zhan, K., Wu, Y., Li, J., Zhao, B., Yan, Y., Xie, L., Wang, L, Ji, V. 2016. Residual stress and microstructure of the CNT/6061 composite after shot peening, *Materials & Design*, Volume 107, 333-340.
- Zhang Y., P. S. 2005. Residual Stress Mapping in Welds Using the Contour Method. *Materials Science Forum*, 490-491, 294-299.
- Zhao, Z., Bai, P., Du, W., Liu, B., Pan, D., Das, R., Liu, C., Guo, Z. 2020. An overview of graphene and its derivatives reinforced metal matrix composites: preparation, properties and applications. *Carbon*, 15, 969–979.
- Zheng, Z., Zhang, X. X., Li, J. C. ve Geng, L . 2020. High-content graphene nanoplatelet reinforced aluminum composites produced by ball milling and hot extrusion. *Science China Technological Sciences*, 63, 1426–1435.
- Zhu, K., Jiang, C., Li, Z., Du, L., Zhao, Y., Chai, Z., Wang, L., Chen, M. 2016. Residual stress and microstructure of the CNT/6061 composite after shot peening, *Materials & Design*, 107, 333-340.