T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GRAFEN KATKILI ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN KURU SÜRTÜNMELİ AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Tuna AKKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon Programı

Danışman
Dr. Öğretim Üyesi İlyas İSTİF

Temmuz, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GRAFEN KATKILI ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN KURU SÜRTÜNMELİ AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Tuna AKKAYA tarafından hazırlanan tez çalışması 18.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğretim Üyesi İlyas İSTİF
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğretim Üyesi İlyas İSTİF, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ferhat DİKMEN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğretim Üyesi Vedat TEMİZ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğretim Üyesi İlyas İSTİF sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Alüminyum Matrisli Grafen Kompozitlerin Kuru Sürtünmeli Aşınma Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Tuna AKKAYA

İmza

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, gerek literatür gerekse deneysel bilgileri edinmem kısmında eşsiz bilgi birikimi ve değerli zamanı ile beni sonsuz destekleyen saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF'e, deney numunelerinin hazırlanması konusunda destek veren Bursa Teknik Üniversitesi'nin kıymetli öğretim üyeleri Prof. Dr. Deniz UZUNSOY ve Dr. Öğr. Üyesi Nazlı AKÇAMLI'ya ve hayatım boyunca öğrendiğim her şeyi borçlu olduğum aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tuna AKKAYA

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vi
KISALTMA LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
TABLO LİSTESİ xi
ÖZET xii
ABSTRACT xiv
1 Giriş 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 2
1.3 Hipotez 2
2 Aşınma ve Malzeme 3
2.1 Sürtünme ve Aşınmanın Tanımı 3
2.2 Aşınma Tipleri 3
2.2.1 Adhesiv Aşınma 3
2.2.2 Abrasiv Aşınma 4
2.2.3 Korozif (Tribo-Oksidatif) Aşınma 5
2.3 Aşınma Hesabı 5
2.4 Metal Matrisli Nanokompozitler ve Malzeme Çifti Seçimi 6
2.5 Al-GNP Kompozit Malzemenin Üretilmesi 8
2.6 Aşınma Testleri ve Metodları 8
3 Pin-on-disk Testleri ve Sonuçları 11
3.1 Pin-on-Disk Test Düzeneği 11
3.2 Ağırlık Ölçüm Ekipmanı 12
3.3 Malzeme (Saf Alüminyum ve GNP) 13
3.4 Deneysel Çalışma 13
3.5 Deney Numuneleri – Pim 14
3.6 Deney Numuneleri – Disk 14
3.7 Deneyin Yapılışı 14
3.8 Deney Sonuçları 15
3.8.1 Test-1 / Saf Alüminyum 15
3.8.2 Test-2 / 0.5 wt% GNP (Öğütme Yok, 1 Saat Sinterleme) 16
3.8.3 Test-3 / 0,5 wt% GNP (1 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme) 17

3.8.4 Test-4 / 0,5 wt% GNP (2 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme).....19
3.8.5 Test-5 / 0,5 wt% GNP (4 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme).....20
3.8.6 Test-6 / 1 wt% GNP (1 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme).....21
3.8.7 Test-7 / 1 wt% GNP (2 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme).....23
3.8.8 Test-8 / 1 wt% GNP (4 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme).....24
3.8.9 Test-9 / 2 wt% GNP (1 Saat Öğütme , 1 Saat Sinterleme).....26
3.8.10 2 wt% GNP (2 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme).....27
3.8.11 2 wt% GNP (4 Saat Öğütme , 1 Saat Sinterleme).....29
3.8.12 Farklı Malzeme Tipleri İçin Sürtünme Katsayısı ve Ağırlık Kaybı Özeti 30
4 Sonuç ve Öneriler **34**
Kaynakça **37**

SİMGE LİSTESİ

Al_2O_3	Alümina
A_r	Temas alanı
CNT	Karbon Nano Tüp
F	Kuvvet
F_n	Normal kuvvet
F_s	Statik sürtünme kuvveti
F_t	Teğetsel sürtünme kuvveti
gr	Gram
GNP	Grafen Nano Plaka
l	Aşınma Uzunluğu
N	Newton
nm	Nanometre
W	Ağırlık
μ	Sürtünme katsayısı
Δw	Toplam ağırlık kaybı

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	American Society For Testing and Materials
ASLE	American Society of Lubrication Engineers
DSRW	Dry Sand, Rubber Wheel (Kuru Kum – Kauçuk Teker)
PAT	Pin Abrasion Test
RCF	Rolling Contact Fatigue – Dönel Temas Yorulması
SEM	Scanning Electron Microscope
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Adhesiv aşınma 4

Şekil 2.2 Abrasiv aşınma....5

Şekil 3.1 Pin-on-disk deney düzeneği şematik gösterimi....11

Şekil 3.2 Pin-on-disk deney düzeneği görseli....12

Şekil 3.3 Ağırlık ölçüm aleti....12

Şekil 3.4 Aşınma testlerinde kullanılan pim ölçü ve görseli 14

Şekil 3.5 Aşınma testlerinde kullanılan disk ölçü ve görseli....14

Şekil 3.6 Saf alüminyum - dökme demir için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 15

Şekil 3.7 Saf alüminyum - dökme demir için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 16

Şekil 3.8 0,5 wt% GNP, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi 16

Şekil 3.9 0,5 wt% GNP (630 °C' de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvvet (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 17

Şekil 3.10 0,5 wt% GNP (630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 17

Şekil 3.11 0,5 wt% GNP, 1 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi 18

Şekil 3.12 0,5 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 18

Şekil 3.13 0,5 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği....18

Şekil 3.14 0,5 wt% GNP, 2 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunmesi 19

Şekil 3.15 0,5 wt% GNP (2 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 19

Şekil 3.16 0,5 wt% GNP (2 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı(μ) / aşınma uzunluğu(l) grafiği....20

Şekil 3.17 0,5 wt% GNP, 4 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi 20

Şekil 3.18 0,5 wt% GNP (4 saat öğütme, 630 C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 21

Şekil 3.19 0,5 wt% GNP (4 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği.....21

Şekil 3.20 1 wt% GNP, 1 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi.....22

Şekil 3.21 1 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 22

Şekil 3.22 1 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği.....22

Şekil 3.23 1 wt% GNP, 2 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi.....23

Şekil 3.24 1 wt% GNP (2 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 23

Şekil 3.25 1 wt% GNP (2 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği.....24

Şekil 3.26 1 wt% GNP, 4 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi.....24

Şekil 3.27 1 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 °C'de 4 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 25

Şekil 3.28 1 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 C'de 4 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği.....25

Şekil 3.29 2 wt% GNP, 1 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi.....26

Şekil 3.30 2 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 26

Şekil 3.31 2 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği.....27

Şekil 3.32 2 wt% GNP, 2 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi.....27

Şekil 3.33 2 wt% GNP (2 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 28

Şekil 3.34 2 wt% GNP (2 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği.....28

Şekil 3.35 2 wt% GNP, 4 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi 29

Şekil 3.36 2 wt% GNP (4 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 29

Şekil 3.37 2 wt% GNP (4 saat öğütme, 630 C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği 30

Şekil 3.38 Farklı malzeme tipleri için sürtünme katsayısı (μ) özet grafiği 31

Şekil 3.39 Farklı malzeme tipleri için ağırlık kaybı (Δw) özeti 32

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Basitleştirilmiş tribolojik testler, ilgili aşınma prosesleri ve simüle edilen aşınma mekanizmaları 10

Tablo 3.1 Ağırlık ölçümünde kullanılan hassas terazinin özellikleri.....12

Tablo 3.2 .....Farklı malzeme tipleri için sürtünme katsayısı ve ağırlık değişimi test sonuçları.....33

ÖZET

Grafen Katkılı Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Kuru Sürtünmeli Aşınma Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Tuna AKKAYA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi İlyas İSTİF

Sürtünme ve aşınma kavramları mühendislik çalışmaları açısından çok önemli araştırma konularından biridir. Temas halinde çalışan parçalarda eşleşen malzemelere, bu malzemelerin yüzey pürüzlülüğüne, temas yüzeyindeki yabancı madde tipine ve miktarına, sistem üzerine etkiyen kuvvet miktarına bağlı olarak gerçekleşen aşınma, belli bir seviyeden fazla olursa sistemde hasara sebep olur. Parçaların hasarlanması hem bakım maliyetlerini arttırır hem de sistem çalışmasında aksamalara neden olur.

İstenmeyen bu durumu engellemek için yağlama yapılabilir ya da kuru sürtünmeli durumlarda parçaların aşınma direncini arttırıcı önlemler uygulanabilir. Bu önlemlerden biri olarak parça aşınma direncini etkilemek için malzeme yapısı ile alakalı çalışmalar yapılabilir.

Son yıllarda kompozit alanındaki gelişmelerden sonra sürtünme ve aşınma anlamında tam olarak amaca yönelik ve çok daha uzun ömürlü parça tasarımları yapmak mümkün olmaktadır ve bu alandaki çalışmalar sürekli iyileşme göstermektedir.

Düşük yoğunluğu, yüksek dayanımı, bol bulunan bir malzeme olması ve son yıllarda üretim teknolojilerinde gözlemlenen artıştan sonra alüminyum otomotiv endüstrisi ile beraber havacılık alanında da çok kullanılan bir malzeme olmuştur.

Aşınma özelliği iyileştirilmek istenen alüminyum, matris olarak kullanıldığı kompozit yapılarda karbon nanotüp (CNT) ve grafen nanoplaka (GNP) ile alaşımlanabilmektedir.

Bu çalışmada sinterleme yöntemiyle, farklı öğütme proses parametreleri (1 saat, 2 saat, 4 saat) kullanılarak imal edilmiş, farklı 0,5 wt% - 1 wt% ve 2 wt% oranında grafen nanoplaka (GNP) ilave edilmiş alüminyum grafen malzemelerin aşınma dayanımlarının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu tez çalışması 3 bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde sürtünme ve aşınma ile genel bilgiler, ikinci bölümde aşınma test metodları ve bu çalışmada kullanılacak pin-on disk test düzeneği hakkında bilgiler verilmiş, üçüncü bölümde ise bu çalışmaya esas olan test sonuçları incelenmiş, üretim paremetrelerinden biri olan öğütmenin ve kompozit malzemedeki grafen oranının aşınma dayanımına etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma deneyleri, aşınma karakteristikleri, pin-on disk, grafen nano tabaka (GNP), sürtünme katsayısı

ABSTRACT

Experimental Investigation Of Wear Characteristics Of Graphen Nanoplate Reinforced Aluminum Matrix Composites Under Dry Friction

Tuna AKKAYA

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. İlyas İSTİF

Friction and wear are very important research subjects for engineering studies. Wear occurs when two surfaces with a relative motion interact with each other, depends on pairs of materials, surface roughness, impurity in the working surface and the forces applied onto the system. If wear excess the limits, it causes damage on the system. Damage brings inefficiency for working performance and higher maintenance cost.

To improve wear performance, lubrication can be one option or precautions can be planned for dry friction. Material structure can be studied as one of the most important ways to increase wear resistance.

After significant improvements on composite technologies, it is possible to design parts just towards the wear issue and have long life.

With its low density, high durability, easy accessibility aluminum is one of the most used materials in automotive and aviation.

If wear durability wanted to be improved, aliminum can be alloyed with carbon nanotubes (CNT) and graphene nanoplate (GNP).

This study has been done for aluminium graphene alloys which manufactured by sintering method with different milling parameters (1 hour, 2 hours, 4 hours) and the graphene

content of 0.5 wt% - 1wt% and 2 wt%. Intention was to observe aluminum graphene wear behaviours in experimental conditions.

This thesis contains three sections. In the firts section, generic informations regarding friction and wear were given. In the second section wear test methods and pin-on disc test equipment which will be used in this study were introduced. In the last section experimental results and effect of different milling and graphene mixing ratio were examined.

Keywords: Wear experiments, wear characteristics, pin-on disc, graphene nano plate (GNP), friction rate

1
Giriş

1.1 Literatür Özeti

Alüminyum ve alaşımları otomotiv, havacılık ve savunma endüstrisi için çok önemlidir ve üstün mekanik özelliklerinden dolayı halihazırda bu sektörlerde en fazla kullanım miktarına sahip metallerdendir [1]. Kullanıldığı alanların her geçen gün artan beklentilerinden dolayı, her ne kadar klasik alüminyum alaşımlar yüksek mukavemetlerinden dolayı tercih edilebilir olsalar da yüksek sertlik ve yüksek aşınma direnci gerektiren çalışma koşullarında yetersiz kalmaktadırlar. Bundan dolayı alüminyum alaşımlarının tribolojik özelliklerini iyileştirmek için ek bazı işlemler yapılması gerekmektedir [2]. Uygulamalardan biri olan sıvı ya da gres yağlayıcı uygulamak sürtünmeyi ve malzeme kaybını azaltmasına rağmen yüksek veya düşük sıcaklık, yüksek vakumlu çalışma ortamı ya da yüksek hız veya yükler altında çalışma gibi bazı aşırı çalışma koşullarında kullanışlı olmamaktadır [3]. Bir diğer uygulama katı yağlayıcı kaplamalar kullanmaktır. Ancak bu yöntemin de ömür, yenileme, paslanma ve zayıf adhezyon direnci gibi dezavantajları vardır. Yağlayıcıların tüm bu dezavantajlarından kaçınmak için metal matrisli malzemeleri karbon esaslı malzemeler ile takviye etmek son yıllarda sıkça uygulanan yöntemlerden olmuştur [4]. Alüminyum malzeme için karbit, oksit, nitrür, grafit ve karbon nano tüplerle (CNT) güçlendirmek bu yöntemlerden bazılarıdır [5]. Bunların yanında, grafen nano plakaları (GNP) da son dönemde saf alüminyumun sertlik ve çekme dayanımının arttırılması için kullanılabilmektedir [6].

Grafen nano plakalar mekanik ve tribolojik iyileşme sağlamak amacıyla metal matrisli kompozitler ile 2011 yılı itibariyle kullanılmaya başlamıştır [7]. Bu tarihten beri endüstride kullanımı gitgide artmıştır. Özellikle gelişmiş kendinden yağlama özelliği sayesinde grafen nano plaka takviyeli metal matrisli kompozitlerin kullanımı önemlidir ve yakın gelecekte çok daha fazla kullanılacağı öngörülmektedir. Ağırlık olarak %3'lük bir GNP takviyesinin metal matrisli kompozitin aşınma dayanımını %34, sürtünme katsayısını %25 iyileştirildiği gözlemlenmiştir [8]. Ancak GNP eklenme miktarının ve kompozit üretim parametrelerinin etkisi halen doğrudan kestirilebilir değildir. Bu

sebepten farklı oranlarda ve farklı proses parametreleri ile üretilmiş grafen katkılı alüminyum matrisli kompozit malzemelerin aşınma davranışlarını belirlemek için deneysel çalışmalar çok büyük önem taşımaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Grafen kullanımı ile hafif, yüksek dayanım ve oksidasyon direnci yüksek alüminyum matrisli kompozit malzemeler elde edilmektedir. Bu çalışmada Al-GNP metal matrisli kompozitlerin aşınma testleri pin-on disk test düzeneğinde yapılacaktır. Deney düzeneğinden elde edilecek aşınma verileri ile, farklı üretim parametrelerine sahip deney numunelerinin aşınma davranışları irdelenerek ve saf alüminyumun aşınma karakteristikleri ile karşılaştırma yapılacaktır.

Grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerdeki yüzde ağırlık olarak grafen oranı (%0.5, %1 ve %2) ve öğütme süresi proses değişkenleri olarak alınacaktır. Pin on disk deney düzeneğinde karşı disk malzemesi olarak dökme demir kullanıcaktır. Elde edilen deney numunelerinin kuru sürtünmeli aşınma davranışları deneysel olarak gözlemlenip, yorumlanarak bu malzeme çifti için optimum sinterleme parametreleri belirlenecektir.

1.3 Hipotez

Alüminyum matrisli kompozitler içinde takviye malzemesi olarak grafen kullanımı, grafenin kendinden yağlama özelliğinden ötürü kompozitin aşınma dayanımını iyileştirici etkisi bulunmaktadır. Aşınma dayanımı yüksek bir kompozit elde etmek için takviye malzemesinin kompozitteki ağırlık oranı ile birlikte sinterleme prosesi parametrelerinin optimum değerleri standart pin on disk testlerinden yararlanılarak bulunabilir. Elde edilen aşınma karakteristikleri karşılaştırılmak suretiyle en iyi aşınma performansını veren parametreler seçilebilir.

2
Aşınma ve Malzeme

2.1 Sürtünme ve Aşınmanın Tanımı

Aşınma tanım olarak birbirine temas eden yüzeylerde mekanik etkilerden dolayı, mikro parçacıklar oluşması ve malzemede istenmeyen bir değişikliğin meydana gelmesi olayıdır. Birbirine temas eden yüzeylerde sürtünme kuvvetleri güç kaybına neden olurken, aşınma ise çalışma toleranslarının bozulması sonucu makine parçalarında fonksiyon kaybına sebebiyet vermektedir. Sürtünme ve dolayısıyla aşınma mühendislik malzemelerinin ve makine elemanlarının ömürlerine ciddi anlamda olumsuz etki etmektedir.

Sürtünme ve aşınma davranışı etkileşime giren yüzeylerin karakteristikleri ile ilgilidir. Bu iki mekanizma için mutlak doğru bir açıklama ve gerçekçi bir tahmin yapmanın zorluğu yüzeylerin karmaşık doğasını yansıtır. Bu karmaşıklığın sebepleri çok farklı malzeme özellikleri, geometrik düzensizlikler, yüzeyde olabilecek oksit tabakası, organik moleküller, su buharı ve kirlilik gibi dış etmenler olabilir.

2.2 Aşınma Tipleri

İki cisimin temas durumunda, cisimlerin yüzey özellikleri birbirlerini nasıl etkileyeceğini belirler. Gerilme ve Şekil değiştirme ile mekanik, yüzeysel bağların oluşması ile fiziksel ve kimyasal bir etkileşim oluşur [9].

Genel itibariyle 5 farklı aşınma türünden söz edilebilir;

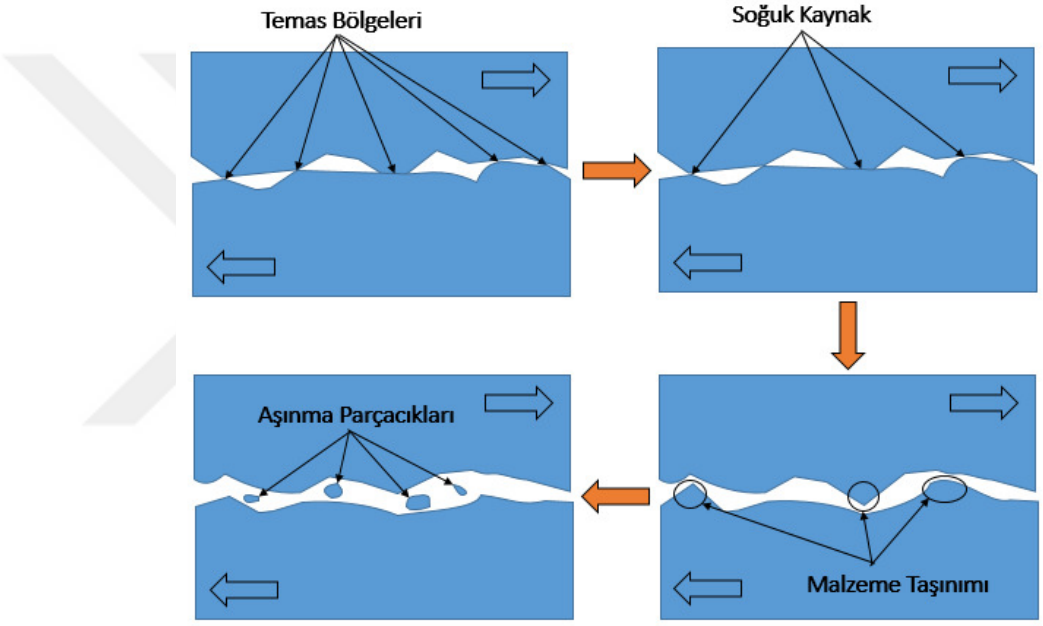
- Adhesiv aşınma
- Abrasiv aşınma
- Yorulma aşınması
- Korozif aşınma
- Erozyon aşınması

Bu çalışmanın amacı itibariyle adhesiv, abrasiv ve korozif aşınma üzerinde durulacaktır.

2.2.1 Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma, kayma sürtünmesine maruz yüzeylerde soğuk kaynak ya da bölgesel bağlanma mekanizmaları sonucu, yüzeyler arası malzeme transferi ve kayma hareketinin

devam etmesi ile malzeme kaybı gerçekleşmesi olayıdır. (Şekil 2.1) Birbirine temas eden yüzeylerdeki pürüzlülükler üzerine etkiyen basıncın bölgesel plastik deformasyon sınırını aşması durumunda küçük pürüz tepelerine çok yüksek basınç etkir. Bu noktalardaki gerilme, malzemenin akma sınırını aşınca plastik deformasyon meydana gelir. Bunun sonucunda pürüzlerin birbirini çizmesi ve sıvanıp kaynaklaşma olayları başlar. Kayma hareketi sırasında ise bu kaynaklaşmış noktalarda koparak yenme ve aşınma gözlemlenir. Bu tip aşınmaya adhesiv aşınma denir. Adhesiv aşınmaya önlem olarak yüzey sertleştirme ve yağlayıcı kullanımı önerilmektedir.

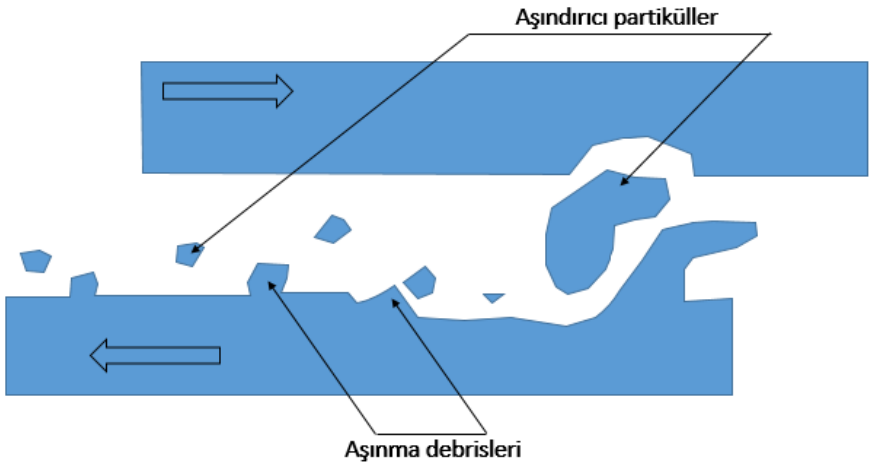


Şekil 2.1 Adhesiv aşınma

2.2.2 Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma birbiri ile eş çalışan iki farklı malzeme çiftinde hızlı ve büyük oranda hasar oluşturma ihtimali olan oldukça önemli bir aşınma türüdür. Adhesiv aşınma aynı zamanda çizilme ya da yırtılma aşınması olarak da adlandırılabilir. Bu aşınma mekanizması genel olarak malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan parçacıklarla etkileşmesi ile yüksek basınç altında sert parçacıkların malzeme yüzeylerinden parçacık kaldırması şeklinde gerçekleşmektedir. (Şekil 2.2) Bu aşınma türüne yatak malzemesi içerisine olumsuz çalışma koşulları nedeniyle giren toz parçacıklarının oluşturduğu aşınma örnek gösterilebilir. Eğer aşınma olayı malzeme çifti arasındaki sertlik farkından

meydana geliyorsa iki cisimli aşınma, diğer taraftan ilave aşındırıcı partiküller de aşınmayı etkiliyorsa bu aşınma türü de üç cisimli aşınma olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.2 Abrasiv aşınma

2.2.3 Korozif (Tribo-Oksidatif) Aşınma

Korozif aşınma oksijen içeren bir ortamda yüzeyler arası etkileşim sonucunda meydana gelmektedir. Korozif aşınmada temas pürüzlülüklerinde hem oksidatif hem de mekanik hareket meydana gelmektedir. Genel olarak, yüzeyde bir oksit tabaka oluşturularak, pürüzlerde metal teması önlenir ve oksit tabakası katı bir yağlayıcı gibi davranır, böylece sürtünme ve aşınmayı azaltır [10].

2.3 Aşınma Hesabı

Aşınma ile ilgili teorik bir hesaplama ve modelleme yapmak zordur. Malzeme çiftine bağlı olarak aşınma direncinin ortaya konmasında deneysel çalışmalar çok önemlidir. Standart aşınma deneyleri sonucunda malzemelerin aşınma dayanımları ve karakteristikleri hakkında bilgi sahibi oluruz ve konstrüktör olarak malzemenin aşınma direncini bilmemiz durumunda malzeme çiftinin çalışma koşullarına uygun olup olmadığına karar verebiliriz. Bu durumun bir adım ötesine geçersek, deneysel verileri kullanmak suretiyle istatistiksel ve yapay sinir ağ temelli modeller oluşturmak ve bu modeller ile benzetim çalışmaları yapılarak aşınma prosesi hakkında öngörüde bulunmak mümkündür [11].

2.4 Metal Matrisli Nanokompozitler ve Malzeme Çifti Seçimi

Metal matrisli nanokompozitler yüksek mukavemet özellikleri ve sert yapıları başta olmak üzere, istenen termal genleşme katsayısı ve iyi sönümleme özellikleri de dahil, yüksek mekanik özellikleri ile çeşitli uygulamalar için mükemmel bir adaydır. [10]

Alüminyum ilgi çekici özellikleri, yüksek üretim kapasitesi ve ekonomik bir malzeme olarak metal matrisli kompozitler için önemli bir malzemedir. Oldukça hafif olması, iyi elektriksel ve termal iletkenlik ve korozyon direnci, alüminyumu ve alüminyum alaşımlarını havacılık, otomotiv, alt yapı ve elektronik endüstrileri için uygun bir malzeme haline getirmektedir [12,13].

Alüminyum dünya üzerinde en çok kullanılan metaller sıralamasında demirden sonra ikinci sırada yer alır. Düşük yoğunluğu, yüksek işlenebilirlik özelliği, mükemmel korozyon dayanımı, iyi ısı iletimi, düşük elektriksel direnci ve kolay Şekillendirilebilme özelliğiyle ön plana çıkar [14]. Cevherden alüminyum üretimi yüksek miktarlarda enerji gerektiren bir üretim yöntemidir ve iki farklı prosesi içerir. İlk adım "Bayer Prosesi" olarak adlandırılır, bu proseste alüminyum içeren boksit cevherinden alümina (Al_2O_3) elde edilir. İkinci adım elde edilen bu alüminanın (Al_2O_3) saf alüminyum haline getirilmesidir, bu proses "Hall-Heroult Prosesi" olarak adlandırılır [15].

İki boyutlu kristalin malzemeler yeni tanımlanan ve analiz edilmeye başlanan malzemelerdir. Grafen de bu sınıfın bir üyesidir ve karbon atomlarının birbirine 0,142 nm uzaklıkta hegzagonal bir yapı oluşturarak birleşmesiyle oluşan tek katmanlı yapı olarak tanımlanır. Grafen sahip olduğu üstün elektriksel ve mekanik özellikleri ile dikkatleri üzerine çekmektedir. Bu yeni malzeme, çelikten çok daha mukavemetli ve aynı zamanda esnek bir yapıya sahip olması, ısı ve elektrik iletiminin çok iyi olması gibi özellikleriyle dikkatleri üzerine çekmiştir. Grafen eldesi ilk olarak 2004 yılında gerçekleştirilmiş, bu yeni malzemenin sentezini, tanımlamasını ve karakterizasyonunu yapan Andre K. Geim ve Konstantin S. Novoselov'a 2010 yılında fizik dalında Nobel ödülünü getirmiştir. Grafen ilk olarak sentezlendiği bu tarihten bu yana artan bir ivmeyle dikkatleri üzerine çekmiş ve üzerinde yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmıştır [16]. Grafen sentezi için birçok farklı yol mevcuttur. Bunlar mekanik ayırma, grafenoksitin kimyasal yollarla indirgenmesi, kimyasal buhar biriktirme yöntemi (CVD) gibi farklı metotlardır [17].

Kompozit malzemeler, genel tanımıyla, iki veya daha fazla malzemenin makro seviyede bir araya gelmesiyle oluşan ve kendisini meydana getiren malzemelerin arzulanan

özelliklerini tek bir malzemede toplayan malzemeler olarak tanımlanabilir. Elde edilen bu yeni malzeme kendisini oluşturan malzemelerin özelliklerinin hepsine sahip olabileceği gibi, kullanılmış olan takviye elemanları ile farklı özellikler de kazanabilmektedir. Kompozit malzemelerin bünyesinde takviye elemanı ve bunu çevreleyen matris malzemesi bulunur. Kompozit malzemeler matris malzemelerine göre üç gruba ayrılabilir, bunlar; seramik matrisli kompozitler, polimer matrisli kompozitler ve metal matrisli kompozitlerdir [18].

Metal matrisli kompozitler, ana metalin; bir diğer metal, seramik veya organik bileşenle desteklendiği kompozit türüdür. Bu takviye elemanları metal matris içerinde dağılarak matris metalin, mukavemet, direngenlik, iletkenlik gibi özelliklerinin gelişmesine katkı sağlarlar. Metal matris kompozitler içerisinde dikkatleri en çok üzerinde toplayan matris malzemesi alüminyum ve alüminyum alaşımlarıdır [19].

Alüminyum matrisli kompozitler üzerindeki ilgi, düşük maliyete sahip olmaları, hafif olmaları ve üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olmaları sebebiyle gün geçtikçe artmaktadır. Alüminyum matrisli kompozit malzemeler özellikle otomotiv ve havacılık-uzay sanayisi için uygulama alanlarına sahip olarak görülmektedirler [20]. Alüminyum matrisli kompozitlerde matris malzemesi olan alüminyum farklı takviye elemanları ile desteklenebilir. Bunlara örnek olarak oksitler, karbürler, borürler ve metalik camlar verilebilir. Bunların yanısıra, grafitin farklı formları, karbon nanotüpler ve grafen nano plaklar (GNP) da alüminyum matrisli kompozitlerde kullanılabilir [21,22].

Grafen nano plakalar herbiri sp2 hibritleşmesi yapmış karbon atomlarından oluşan iki boyutlu grafen tabakalarının birkaçının katman katman olarak bir araya gelmesiyle oluşur. Grafenin young modülü 1,0 TPa ve kırılma mukavemeti 130 GPa olarak rapor edilmiştir. Grafen, karbonun diğer nano yapılarından daha fazla yüzey alanına sahiptir, bu özelliği sayesinde metal matrislerle daha iyi bir arayüzey birleşmesi sağlanır. Ayrıca GNP'ler halinde üretilmesi düşük maliyetlerle gerçekleştirebilir [22]. Grafen katkılı kompozitler kendinden yağlama özelliği sayesinde, hem yağlama prosesinin getirdiği maliyet, zaman ve verimlilik kaybını azaltmakta hem de kuru sürtünme mekanizmalarında malzeme ömrüne çok olumlu yönde katkı sağlamaktadır.

Takviye malzemesinin türü, boyut dağılımı, hacimsel olarak oranı ve matris içerisindeki dağılımı metal matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini etkileyen faktörlerdir. Metalik matrisli kompozitlerin üretimindeki en önemli noktalardan bir tanesi takviye

elemanının topaklanmasının önlenmesi ve matris içerisinde homojen olarak dağıtılmasıdır. Bu Şekilde düzenli ve homojen bir kompozit yapısı oluşturabilmek için uygulanan birçok farklı teknik vardır. Bu tekniklere; ergiyik karıştırma, ultrasonik metotlar, sıkıştırmalı döküm ve mekanik alaşımlama gibi örnekler verilebilir [22].

2.5 Al-GNP Kompozit Malzemenin Üretilmesi

Bu çalışmada kullanılacak 0,5 wt%, %1 wt% ve 2wt% oranında homojen kompozit tozlardan elde edilen Al-GNP kompozit pin numunelerinin hazırlanmasında toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak grafen partiküllerinin Al matris içinde homojen olarak dağıtılmasını sağlamak için mekanik alaşımlama uygulanmıştır. Daha sonra bu toz karışımları soğuk presleme yapılarak yaş numunelerin ön Şekillendirilmesi gerçekleştirilmiştir. En son olarak da yaş numuneler basınçsız olarak 630°C'de sinterlenmiş ve Al-GNP kompozit numuneleri elde edilmiştir.

FRITSCH-pulwerisette 5 planet bilyalı değirmen üzerinde mekanik öğütme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Alüminyum tozu ve GNP partiküller, çapı 10mm olan paslanmaz çelik bilyalarla birlikte 250ml'lik hacme sahip kapalı sisteme konarak öğütme gerçekleştirilmiştir. Bazı durumlarda öğütme elemanlarıyla kaynak oluşmasını önlemek adına, sitrik asit ve etanol toz yağlama işlemi görmesi için öğütücüye eklenmiştir.

Öğütme işlemi, aşırı ısınmanın önüne geçmek amacıyla 250 d/dk sabit devirde her 20 dakikada bir 10 dakika durdurularak gerçekleştirilmiştir. Belirli bir öğütme süresinden sonra, küçük örnekler alıp tekrar yerine konulması yerine bütün numune pot dışına çıkarılmıştır. Toz karışımı, 475 MPa basınç altında ve 10 mm çap ve 20 mm uzunluğunda tek eksenli silindirle preslenmiştir. Yeşil preformlar 630 °C'de, ısıtma oranı 10 °C/dk olan argon atmosfer altında tutulmuş ve sonrasında 1 saat boyunca 10 °C/dk oranında gaz su verme işlemi yapılarak sinterlenmiştir.

Ayrıca 100 mm çapında ve test cihazına oturtulmasını sağlamak amacıyla merkezinde 10 mm çapında delik bulunan, pik döküm diskler kullanılmıştır.

2.6 Aşınma Testleri ve Metodları

Farklı aşınma mekanizmalarına maruz kalan sistemlerde sürtünme katsayısı gibi aşınma tepkileri malzemenin kendi iç yapısının yanında, tribolojik sistem olarak adlandırılan malzeme çifti, eşleşen yüzeylerin yüzey karakteristikleri, kontak şekli ve yağlama durumu gibi pek çok parametreye bağlıdır. Bu karmaşık sebeplerden dolayı daha gerçekçi

tribolojik davranışların belirlenmesi için saha testlerinin yapılması özel önem taşımaktadır. Bahsedilen bu saha testleri uzun süreli, karmaşık ve pahalıdır, aynı zamanda değişkenlerin etkisini çıkarmak çok zor olduğu için sonuçların yorumlanması genelde çok zordur. Bu nedenle, çoğu çalışmada aşağıda belirtilen daha basit laboratuvar testleri yapılmaktadır;

(1) Tezgah testleri

(2) Gerçek sistemden izole edilmiş tekil komponent testleri

(3) Aşınma mekanizmasını simüle eden basitleştirilmiş testler

Yukarıda bahsedilen testler gerçek saha testlerine oranla çok daha uygun maliyetli ve daha kısa sürelidir. Bunun yanısıra literatürde birçok laboratuvar testi için özel standart prosedürler geliştirilmiştir ve bu da test parametrelerinin çok daha iyi kontrol edilebilmesine ve sonuçların çok daha basit bir Şekilde yorumlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Çalışma çıktısı olarak test sonuçları, belirli bir güven seviyesi ile beraber, farklı malzemelerinin performans incelemesinde ve hatta literatürde benzer şartlarda yapılmış test sonuçları ile karşılaştırılmasında bile kullanılabilir. Bu sebeplerden dolayı basitleştirilmiş testler büyük bir özenle seçilmeli ve gerçekleştirilmelidir. Yorumlama yapılırken aynı zamanda gerçek tribolojik sistem girdilerine bağlı kalınması ve yorumların bu şartlar da göz önünde bulundurularak yapılması kritik önem taşımaktadır. Bu yaklaşımlarla, ön tahminler ile baskın aşınma mekanizmasının yapabileceği hasarın tahmin edilmesi, laboratuvar testleri ile aynı sistemde malzeme örneklerinin belirlenmesi mümkündür.

Testlerde kullanılan malzemeler genellikle gerçek malzemelere göre çok daha küçük boyutludur. Bunun bir sonucu olarak test malzemeleri benzer test koşullarında genellikle çok daha yüksek kontak sıcaklığına daha kolay erişmektedir. Laboratuvar testlerinde kontrol edilmesi gereken en kritik şeylerden biri kontak yüzey sıcaklığıdır. Farklı yüzey sıcaklıkları farklı aşınma mekanizmaları oluşturur (örneğin, Adezyonda tribo-oksidatif aşınma). Bunun izlenmesi ve kontrolü (özel kuvvetli soğutma sistemleri, hava kompresörler vs.) oldukça önemlidir.

Farklı üretim yöntemleri ile üretilmiş, farklı destek malzemeleri ile alaşımlanmış veya farklı bir kaplama tekniği uygulanmış yeni bir malzemenin kullanımı tribolojik sistem açısından pek çok soru işaretini de beraberinde getirmektedir.

Laboratuvar testlerinden elde edilen veriler, direk olarak kuru yataklamalarda aşınma katsayısı hesabı ve dişli çarklardaki S-N (Stress – number of contacts) (Baskı – temas sayısı) eğrilerinin hazırlanması gibi gerçek tribolojik sistemlerin tasarımında ve konfigürasyonunda kullanılabilir. Çoğu durumda bununla birlikte belirli bir uygulama ve ilgili seçim kriterleri için farklı malzemeler arasında sıralama yapmak için kullanılmaktadır.

Çok fazla sayıda test makinesi (Tribometreler) çeşidi bulunmaktadır ve bunların bazıları için spesifik standartlar belirlenmemiştir. Farklı aşınma mekanizmalarının simüle edilebildiği basitleştirilmiş testlerin en önemlileri tablo 2.1'de gösterilmiştir. Tabloda test adı ile birlikte simüle edilen aşınma ve aşınma mekanizması belirtilmiştir. Hangi testin seçileceğine karar verebilmek için gerçek komponentlerin maruz kaldığı aşınma mekanizmalarının incelenmesi ve anlaşılması gerekmektedir. Bu simülatif testler gerçek komponentler için hata analizlerinin yapılmasında da kullanılmaktadır. Bir sonraki adım hangi testin uygulanacağının karar verilmesidir. [10]

Tablo 2.1 Basitleştirilmiş tribolojik testler, ilgili aşınma prosesleri ve simüle edilen aşınma mekanizmaları

Test Makinesi	**Simüle Edilen Test Prosedürü**	**Simüle Edilen Aşınma Mekanizması**
Pin-on disk	Kayma aşınması	Adhesiv aşınma – Korozif aşınma
Blok-on ring	Kayma aşınması	Adhesiv aşınma – Korozif aşınma
Disk-on disk	Yuvarlanma-kayma aşınması	Temas yorulması / Adhezyon – Korozif aşınma
4 Top	Yuvarlanma aşınması	Temas yorulması
PAT	Yüksek baskı abrazyon	Abrasif aşınma
Kuru-kum, kauçuk lastik / DSRW	Düşük baskı abrazyon	Abrasif aşınma

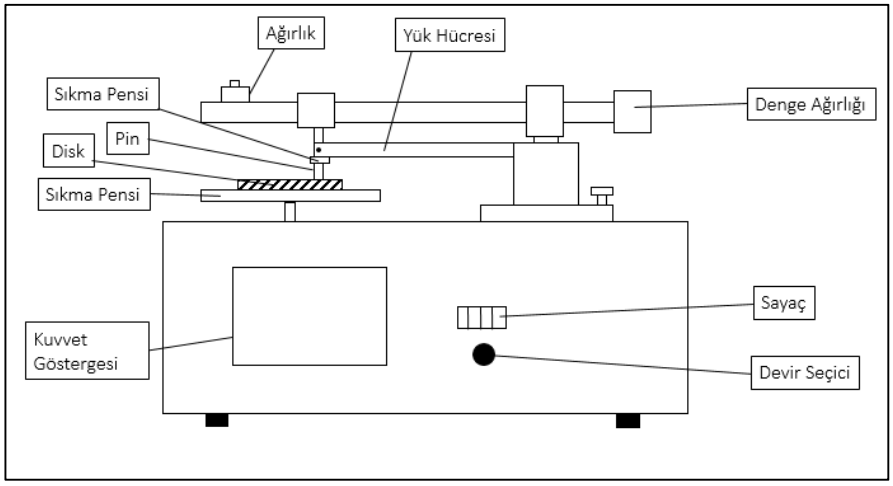
3
Pin-on-disk Testleri ve Sonuçları

3.1 Pin-on-Disk Test Düzeneği

Bu çalışmada aşınma testleri ve farklı parametreler ile ilgili data toplamak için ASTM G99 standardına uygun pin-on-disk test düzeneği kullanılmıştır. Cihaza entegre çalışan bilgisayar sayesinde sürtünme kuvveti anlık olarak takip edilebilmekte ve kaydedilebilmektedir.

Test düzeneği temel olarak kuvvet göstergesini, devir seçici ve sayacı içeren gövde, disk ve disk tutucu tabla, pin ve ağırlık taşıyıcı yük kolundan oluşmaktadır.

Düzenek kalibre edilmiş yapısı sayesinde F_n normal kuvveti altındaki pim ile aşınma diski arasında oluşan F_t teğetsel kuvvetini bir yük hücresi aracılığıyla okumakta ve eternet üzerinden bilgisayara göndermektedir. Bilgisayarda çalışan bir yazılım ile 2 sn lik aralıklarla F_t kuvveti bir dosyaya kaydedilmektedir. Böylece deney süresince sürtünme kuvvetinin değişimi kaydedilmektedir.



Şekil 3.1 Pin-on-disk deney düzeneği şematik gösterimi



Şekil 3.2 Pin-on-disk deney düzeneği görseli

3.2 Ağırlık Ölçüm Ekipmanı

Test sonrası numune ağırlık ölçümü ASTM G99-05 test standartlarında belirtildiği gibi ultra hassas ölçüm aletleri ile gerçekleştirilmiştir. A&D GR-202 serisi 0.01 mg hassasiyetle mikro ölçüm yapabilen terazi ile her test öncesinde ve sonrasında numunelerin ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bilgisayara bağlı cihaz ile ölçümler eşzamanlı olarak toplanmış ve kaydedilmiştir.



Şekil 3.3 Ağırlık ölçüm aleti

Tablo 3.1 Ağırlık ölçümünde kullanılan ekipmanın özellikleri

Ağırlık ölçüm kapasitesi	42 g / 210 g
Minimum ölçüm	0.01 mg / 0.1 mg
Yinelenebilirlik (Std sapma)	0.02 mg / 0.1 mg
Doğrusallık	±0.03 mg / ±0.2 mg
Hassaslık aralığı	±2 ppm / °C
Ölçü kefesi	Ø85 mm

3.3 Malzeme (Saf Alüminyum ve GNP)

Bu çalışmada %99 saflıkta ve -325 mesh partikül boyutunda Al tozları kullanılmıştır. Al tozları ZAG kimya firmasından temin edilmiştir. Takviye elemanı olarak OOO Zolotaya firmasından temin edilen, % 99,99 saflıkta Grafen nano plakalar (GNP) kullanılmıştır.

3.4 Deneysel Çalışma

Bu çalışmada 0,5 wt%, %1 wt% ve 2wt% oranında homojen kompozit tozlardan, farklı sinterleme parametreleri ile elde edilen Al-GNP kompozit pin numuneleri ve pik dökme demir malzemelerinin aşınma davranışları deneysel verilere dayanarak tanımlanmıştır.

Her bir pin malzemesi disk yönünde uygulanan 10 N'luk normal yük altında test edilmiştir. Kayma hızı deney boyunca 4.10^{-2} m/s'dir ve ölçümler toplam 500 m mesafe için gerçekleştirilmiştir. Sürtünme katsayısı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$\mu = F_S / F_n \qquad (3.1)$$

μ; Sürtünme Katsayısı

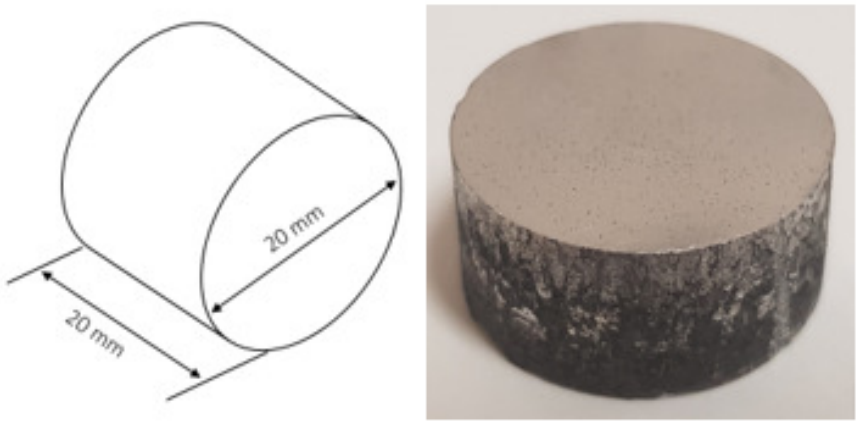
F_S; Statik Sürtünme Kuvveti (N)

F_n; Normal Kuvvet (N)

Aşınma testleri sırasıyla 0,5 wt%, %1 wt% ve 2wt% oranında homojen Al-GNP kompozit tozlardan farklı öğütme süresi ve sinterlemede farklı fırınlama süresi parametreleriyle üretilmiş numuneler ile eş malzeme olarak kullanılan pik dökme demir arasında gerçekleştirilmiştir. Sürtünme kuvveti ölçülmüş ve her iki saniyede bir kaydedilmiştir. 500 metrelik testler süresince 1100 adet sürtünme kuvveti kaydedilmiştir. 10 N yük altında test edilen malzemeler için sürtünme kuvveti-yol grafikleri Şekil 3.6, Şekil 3.9, Şekil 3.12, Şekil 3.15, Şekil 3.18, Şekil 3.21, Şekil 3.24, Şekil 3.27, Şekil 3.30, Şekil 3.33 ve Şekil 3.36'de gösterilmiştir. Aynı yükler altında sürtünme katsayısı-yol grafikleri Şekil 3.7, Şekil 3.10, Şekil 3.13, Şekil 3.16, Şekil 3.19, Şekil 3.22, Şekil 3.25, Şekil 3.28, Şekil 3.31, Şekil 3.34 ve Şekil 3.37'de gösterilmiştir. Pim ağırlık kaybı, pimler sadece testin başında ve sonrasında ölçüldüğü için lineer olarak kabul edilmiştir. ASTM G99-05 test prosedürüne uygun olarak her test öncesinde ve sonrasında aşınma malzeme çifti 10 dk boyunca ultrasonik banyoda asetonla temizlenmiştir. Her temizleme sonrasında 2dk boyunca sıcak havaya maruz bırakılarak kurutulmuş ayrıca 2 dk boyunca soğuk hava tutulmuştur.

3.5 Deney Numuneleri – Pim

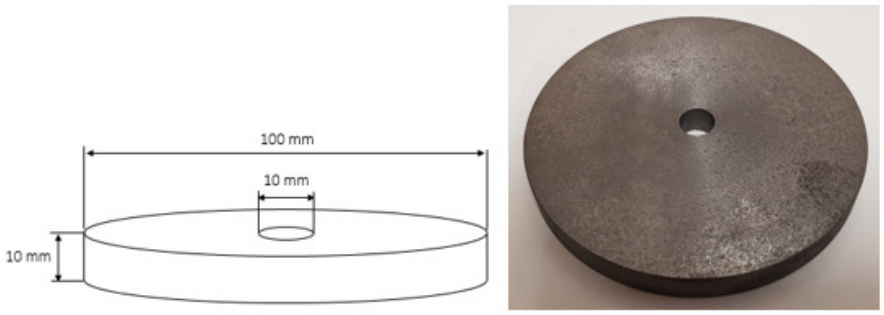
Pim deney malzemesi olarak 0,5 wt%, %1 wt% ve 2wt% oranında homojen kompozit tozlardan elde edilen Al-GNP kompozit kullanılmıştır. Her bir karışım oranı için farklı öğütme sürelerine sahip numuneler test edilmiştir. Aşınma testlerinde kullanılan pim boyutları ve fotoğrafı Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Aşınma testlerinde kullanılan pim ölçü ve görseli

3.6 Deney Numuneleri – Disk

Disk deney malzemesi olarak taşlama işlemi ile yüzey pürüzlülüğü alınmış pik dökme demir kullanılmıştır. Aşınma diskinin ölçüleri ve fotoğrafı Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5 Aşınma testlerinde kullanılan disk ölçü ve görseli

3.7 Deneyin Yapılışı

Deney pin-on-disk deney düzeneği kullanılarak oda şartlarında yapılmaktadır. Deney numunesi olarak Al-GNP kompozit pim ve karşı malzeme olarak dökme demir disk

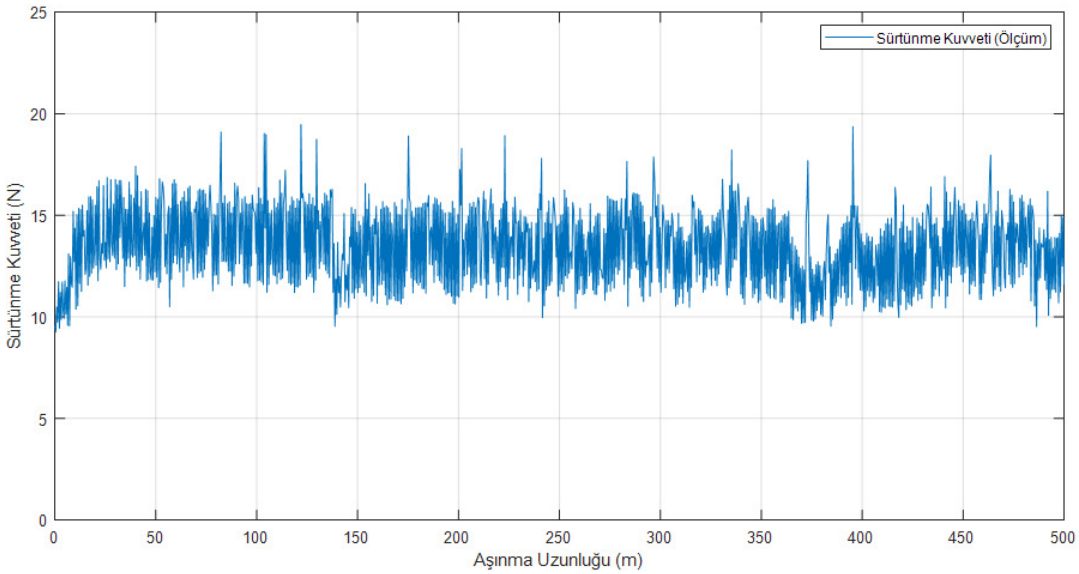
tezgaha bağlanmaktadır. Test devir hızı cihaz devir kontrol panelinden, uygulanacak normal kuvvet F_n karşı ağırlık üzerinden ayarlanmaktadır. Sisteme etki eden sürtünme kuvveti F_S cihaza entegre yazılım aracılığıyla okunmaktadır ve bilgisayarda kayıt altına alınmaktadır. Her bir malzeme test öncesinde ve sonrasında temizlenmekte ve kurumaya bırakılmaktadır. 10 N'luk normal kuvvet saf Al – 0,5 wt% GNP, 1 wt% GNP ve 2 wt% GNP malzemeler ve farklı öğütme ve sinterleme parametreleri için test prosedürleri ayrı ayrı uygulanmıştır.

3.8 Deney Sonuçları

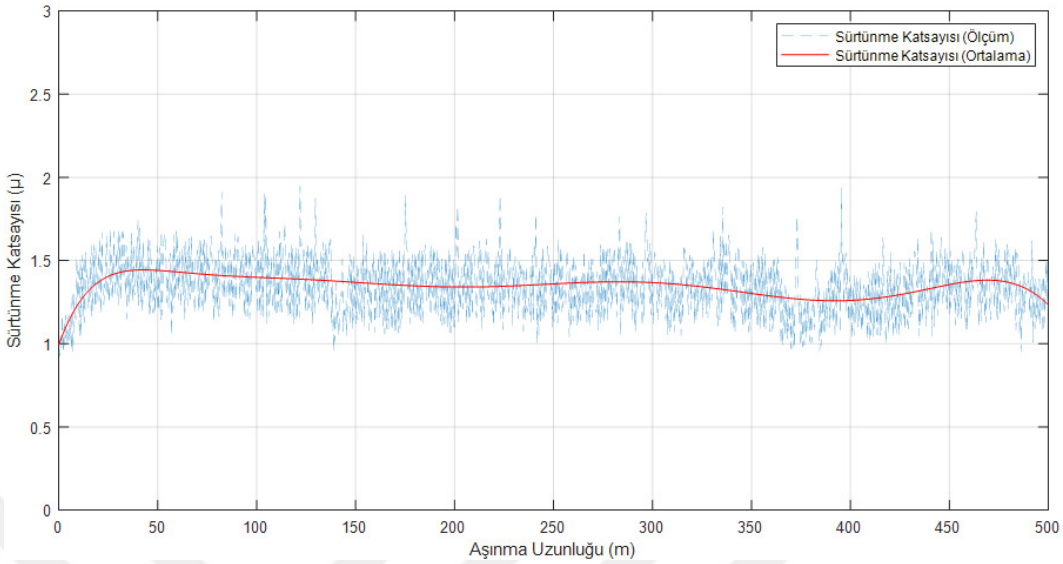
Test cihazında ağırlık olarak %0.5, %1 ve %2 grafen karışımlı alüminyum matrisli kompozit için, sadece öğütülmüş, 1, 2 ve 4 saat sinterlenmiş olarak farklı numuneler hazırlanması yoluyla 500 m mesafede 10 N yükte, sabit hızda aşınma deneyleri gerçekleşmiştir. Karşı malzeme olarak dökme demir diskler kullanılmıştır.

3.8.1 Test-1 / Saf Alüminyum

Testlerden elde edilen sonuçlar itibariyle saf alüminyum için sürtünme kuvvetinin ortalama 13,5 N mertebesinde, sürtünme katsayısının ortalama 1,35 seviyelerindeyken, ağırlık kaybının 0,11 gr olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Tablo 3.2)



Şekil 3.6 Saf alüminyum - dökme demir için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği



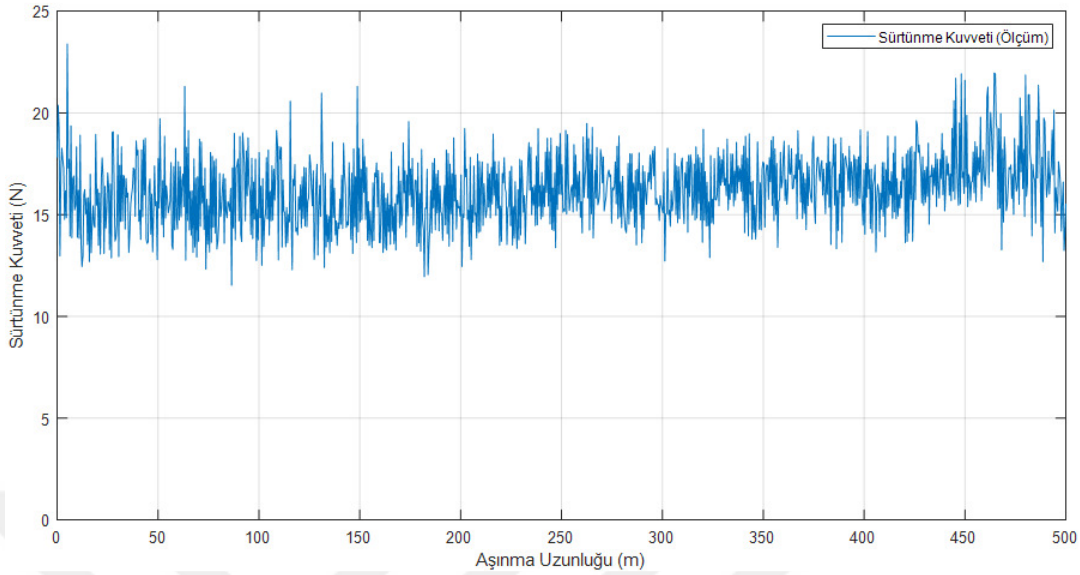
Şekil 3.7 Saf alüminyum - dökme demir için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği

3.8.2 Test-2 / 0,5 wt% GNP (Öğütme Yok, 1 Saat Sinterleme)

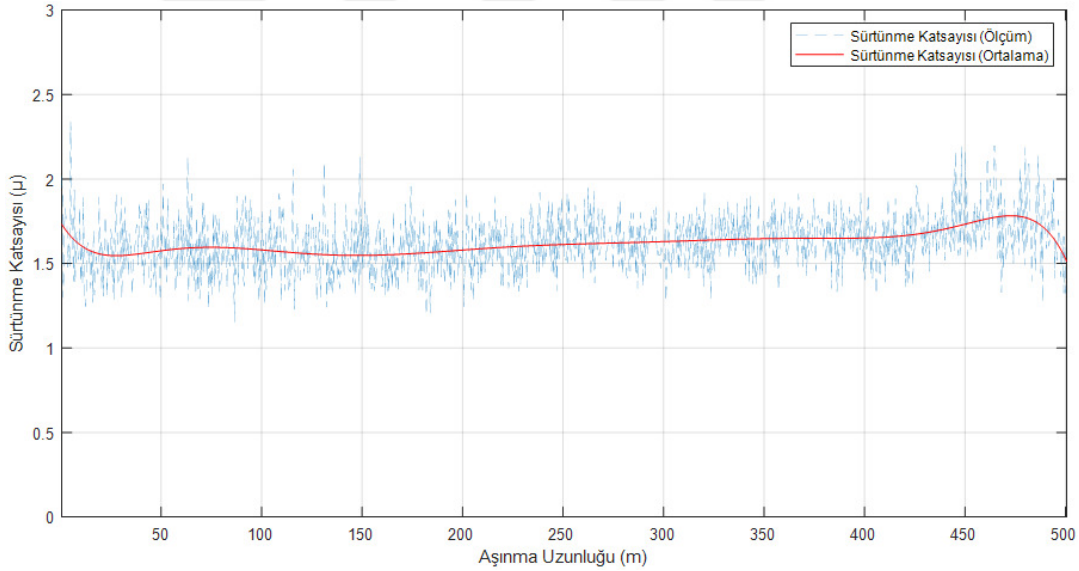
0,5 wt% GNP-Al'ın öğütme prosesinden geçmediği durumda sürtünme kuvveti 16 N, sürtünme katsayısı 1,6'ya yükselmiş, ancak malzeme kaybı da 0,48 gr'a yükselmiştir. Bunun sebebinin malzemelerin fırınlanma prosesinden önce yeterince homojen karışmaması olduğu yorumlanmıştır. (Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Tablo 3.2)



Şekil 3.8 0,5 wt% GNP, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi



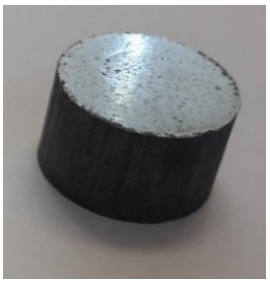
Şekil 3.9 0,5 wt% GNP (630 °C' de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvvet (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği



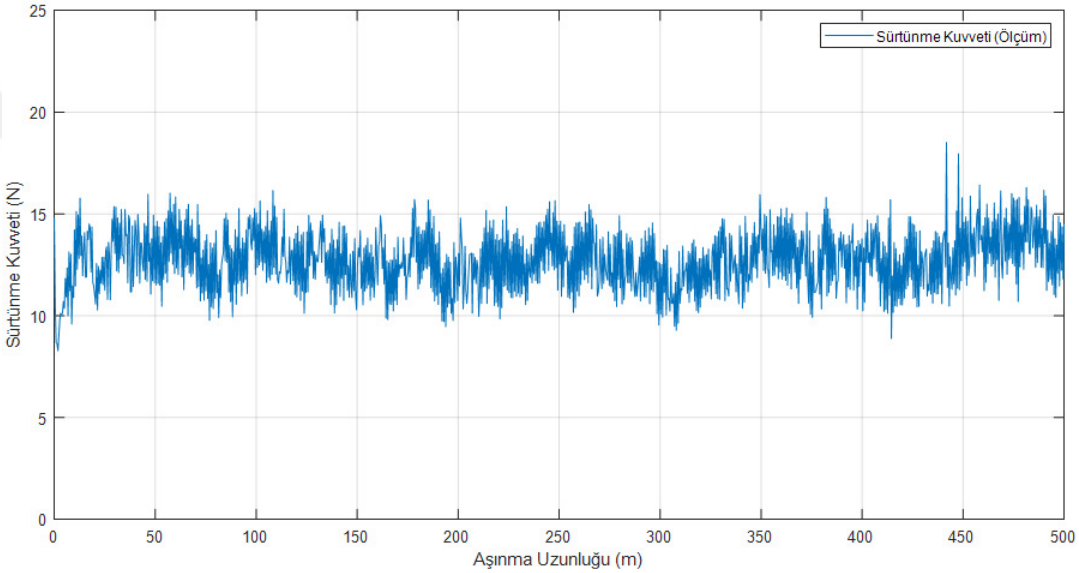
Şekil 3.10 0,5 wt% GNP (630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği

3.8.3 Test-3 / 0,5 wt% GNP (1 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme)

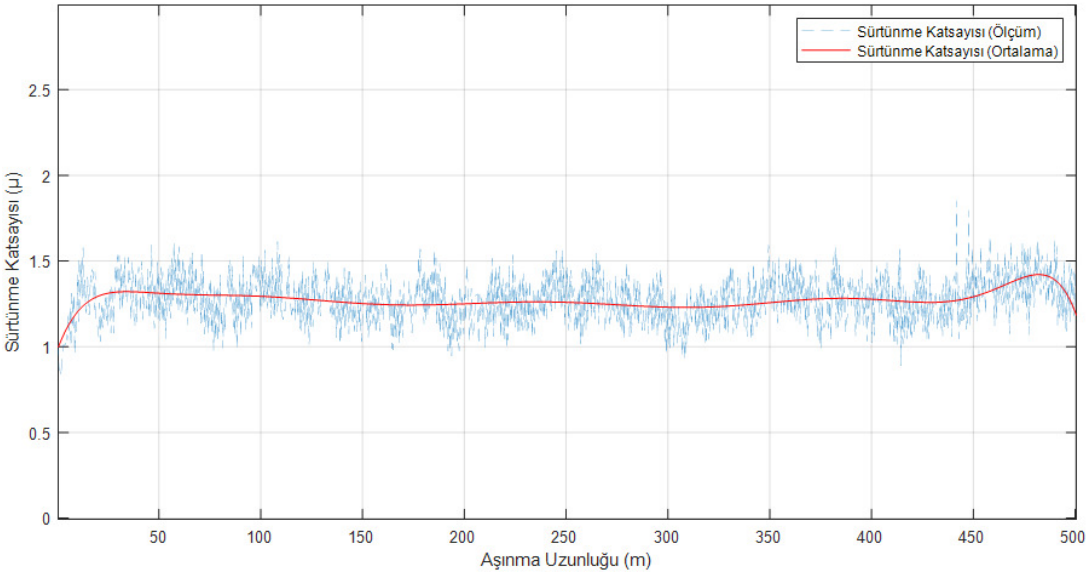
0,5 wt% GNP-Al'ın 1 saatlik öğütme prosesinden geçtiği üretim parametrelerinde sürtünme kuvveti 13 N'a, sürtünme katsayısı da 1,3'e düşmüşken, malzeme kaybı da 0,22 gr'a düşmüştür. (Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Tablo 3.2)



Şekil 3.11 0,5 wt% GNP, 1 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi



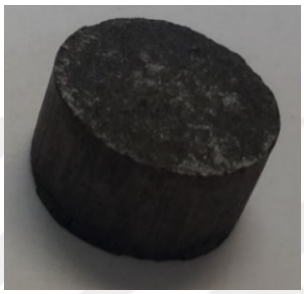
Şekil 3.12 0,5 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_s) / aşınma uzunluğu (l) grafiği



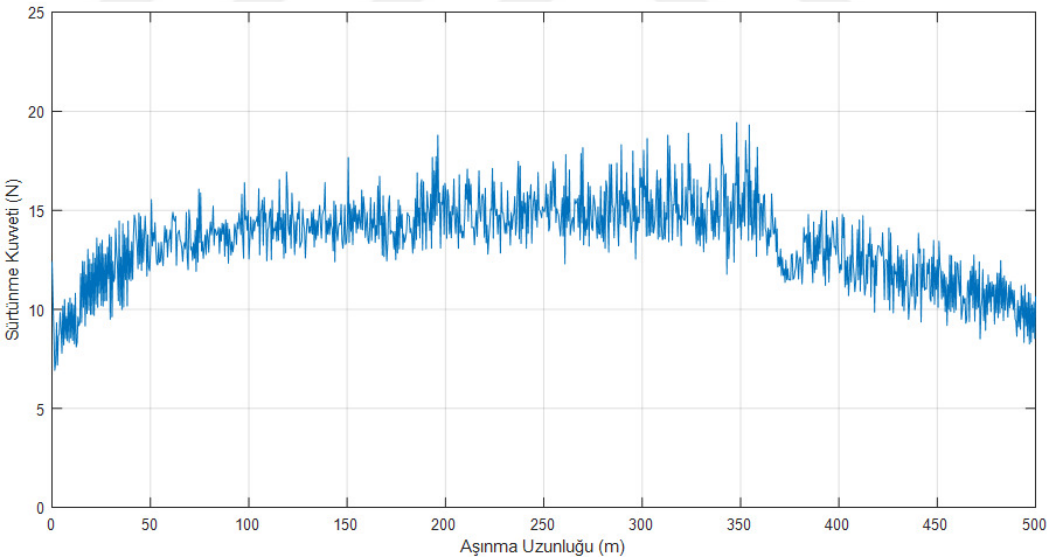
Şekil 3.13 0,5 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği

3.8.4 Test-4 / 0,5 wt% GNP (2 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme)

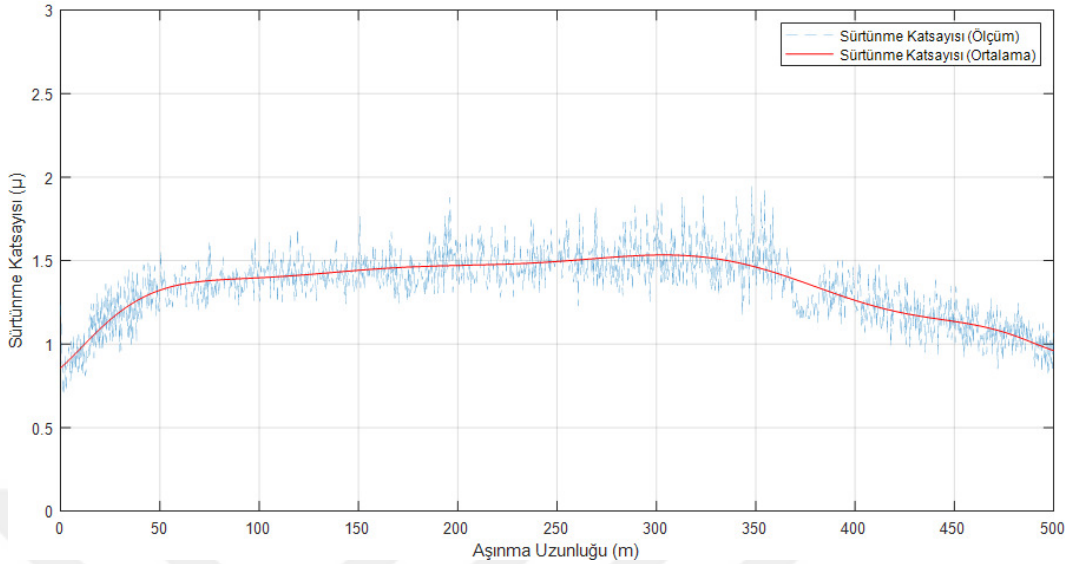
0,5 wt% GNP-Al'ın 2 saat öğütülmesi durumunda sürtünme kuvveti 15 N'a, sürtünme katsayısı 1,5'e düşmüş, malzeme kaybı 20 kat artarak 4 gr 'a yükselmiştir. (Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Tablo 3.2) Bu sıradışı artışta öğütmenin belli bir noktadan sonra test numunelerinde ufalanmaya ve büyük miktarda parça kopmasına yol açması neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.14 0,5 wt% GNP, 2 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunmesi



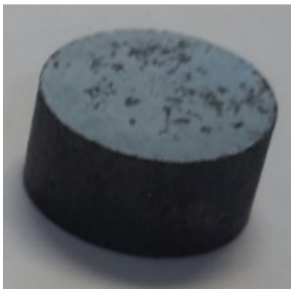
Şekil 3.15 0,5 wt% GNP (2 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_s) / aşınma uzunluğu (l) grafiği



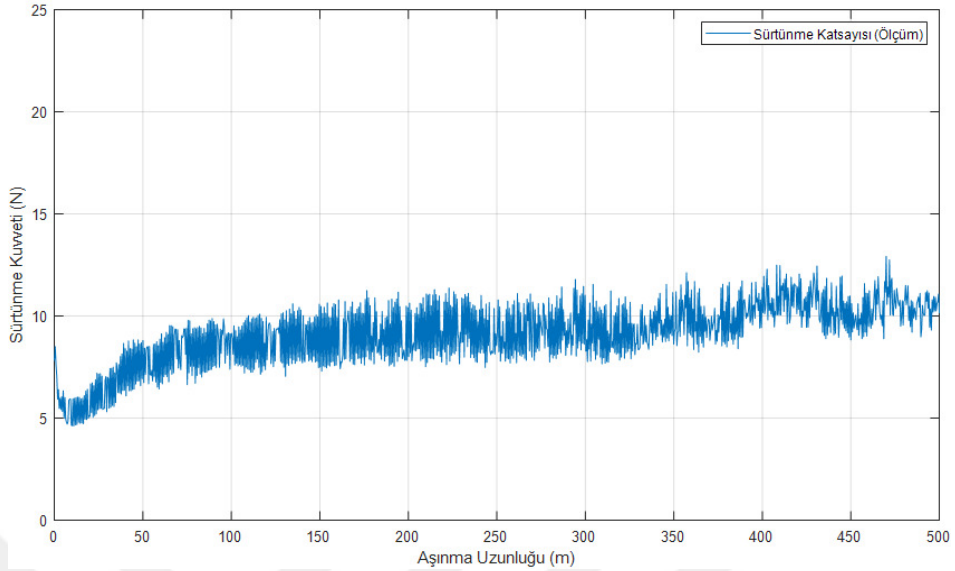
Şekil 3.16 0,5 wt% GNP (2 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı(μ) / aşınma uzunluğu(l) grafiği

3.8.5 Test-5 / 0,5 wt% GNP (4 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme)

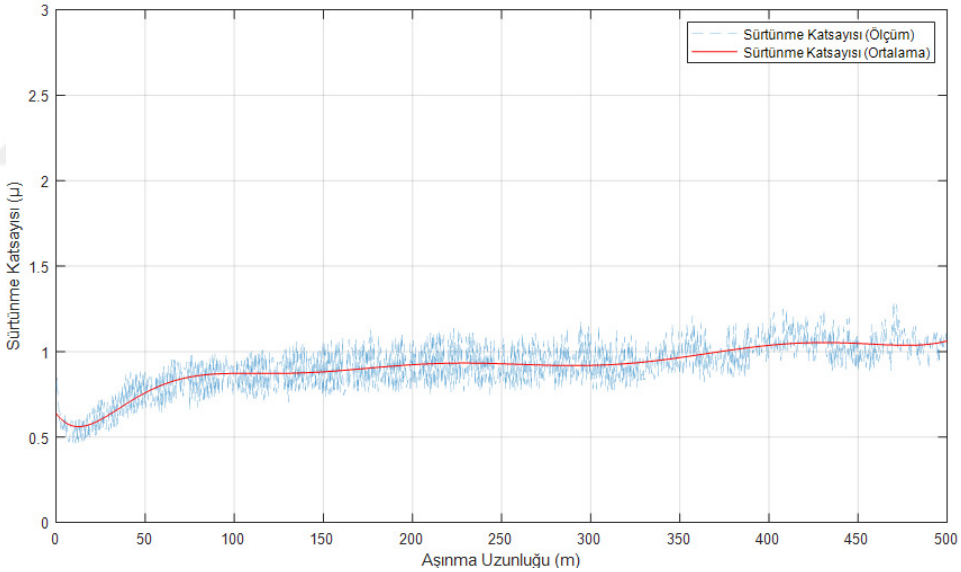
0,5 wt% GNP-Al'ın 4 saat öğütüldüğü üretim şartlarında sürtünme kuvveti 9 N'a, sürtünme katsayısı 0,9'a düşmüştür. Aşınmadan dolayı oluşan malzeme kaybı 4,02 gr gibi önceki test ile benzer bir seviyede seyretmiştir. (Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Tablo 3.2)



Şekil 3.17 0,5 wt% GNP, 4 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi



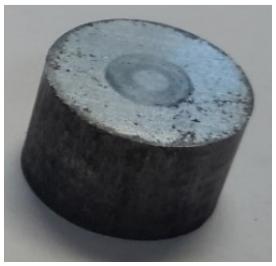
Şekil 3.18 0,5 wt% GNP (4 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_s) / aşınma uzunluğu (l) grafiği



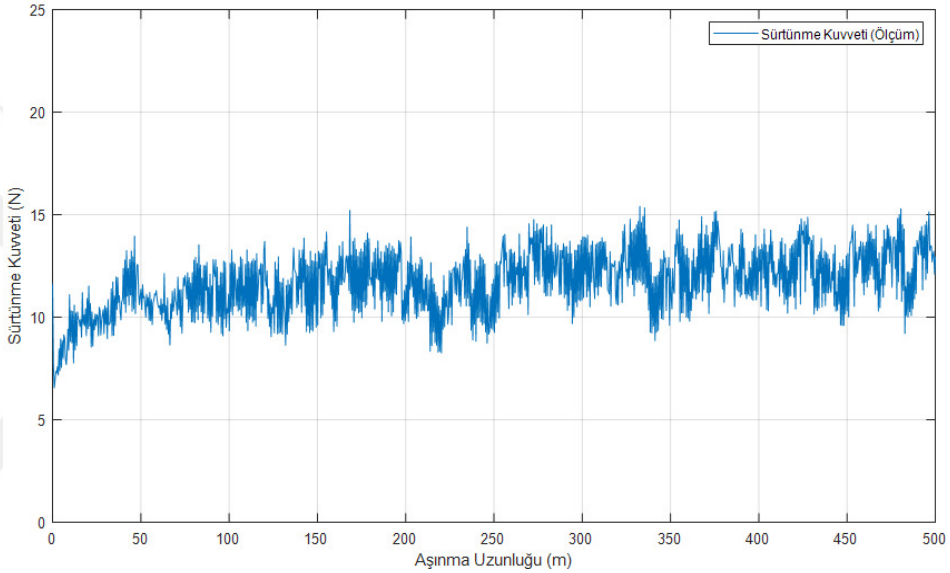
Şekil 3.19 0,5 wt% GNP (4 saat öğütme, 630 °c'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği

3.8.6 Test-6 / 1 wt% GNP (1 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme)

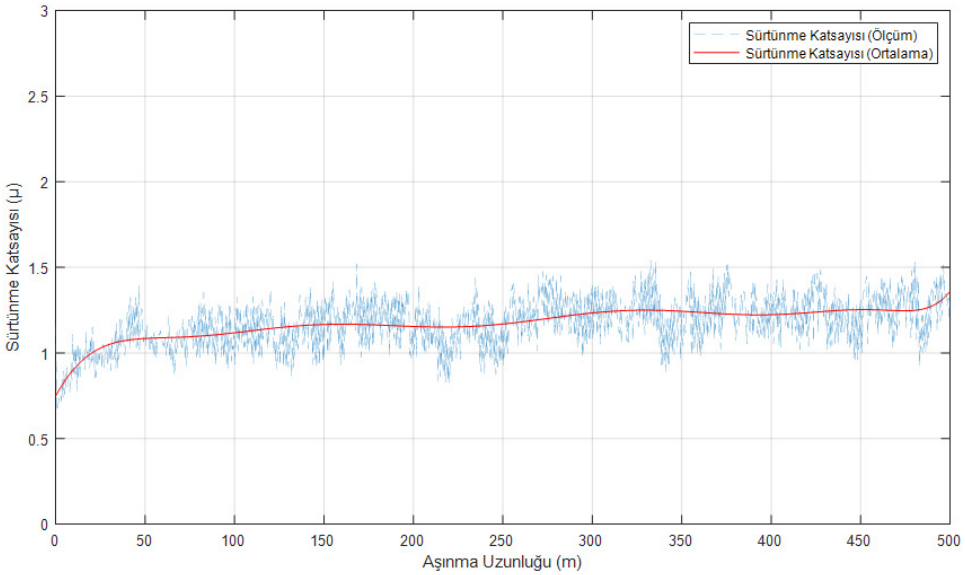
Grafen'in kompozitteki ağırlık olarak yüzdesi %1'e çıkarıldığı ve öğütme prosesinin 1 saat olarak uygulandığı durumda sürtünme kuvveti 12 N, sürtünme katsayısı 1,2 olmuş, aynı öğütme süresine sahip, 0,5 wt% GNP-Al'a göre yaklaşık %8'lik bir düşüş göstermiştir. Malzeme kaybı da 0,18 gr olarak 0,5 wt% GNP-Al'a göre %18'lik bir iyileşme olmuştur. (Şekil 3.21, Şekil 3.22 ve Tablo 3.2)



Şekil 3.20 1 wt% GNP, 1 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi



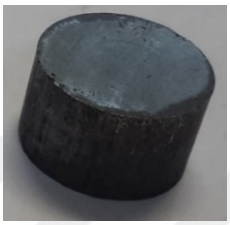
Şekil 3.21 1 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_s) / aşınma uzunluğu (l) grafiği



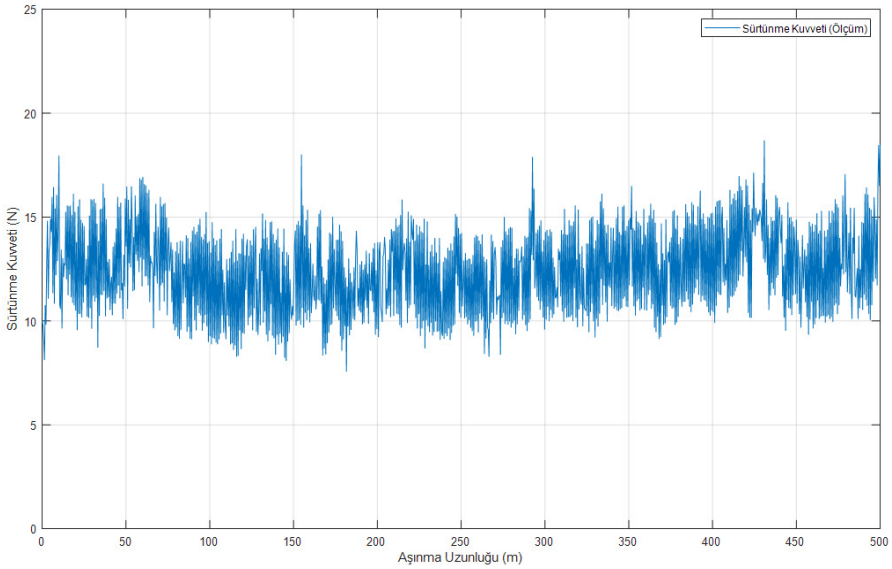
Şekil 3.22 1 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) Grafiği

3.8.7 Test-7 / 1 wt% GNP (2 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme)

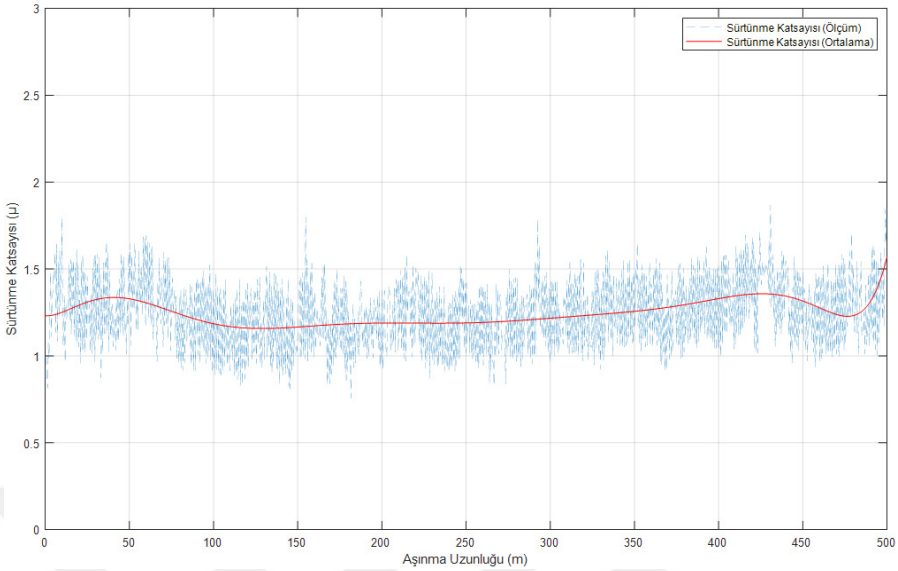
1 wt% GNP-Al'ın 2 saat öğütülmesi halinde sürtünme kuvveti 12 N, sürtünme katsayısı 1,2 olarak ölçülmüştür. Aşınmadan dolayı malzeme kaybı 0,23 gr'a çıkarak 1 saat öğütülen numuneye göre %27'lik bir artış olmuştur. (Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Tablo 3.2)



Şekil 3.23 1 wt% GNP, 2 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi



Şekil 3.24 1 wt% GNP (2 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği



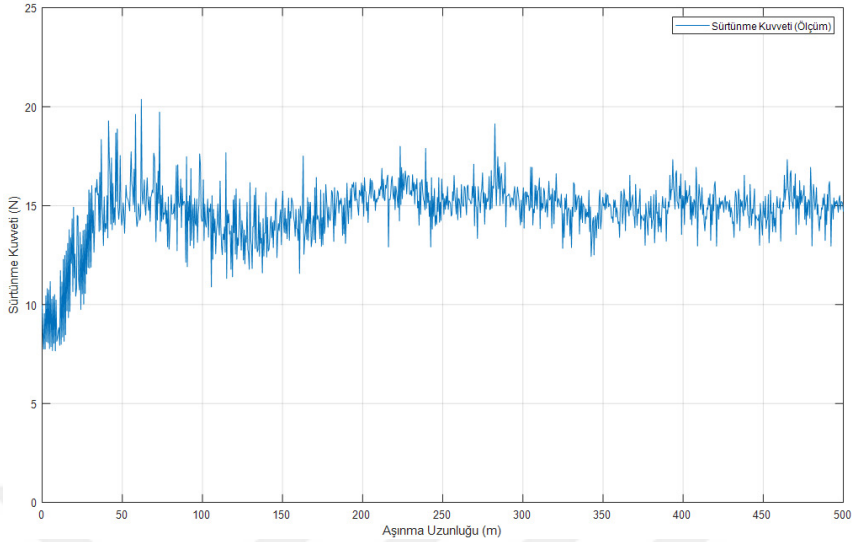
Şekil 3.25 1 wt% GNP (2 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği

3.8.8 Test-8 / 1 wt% GNP (4 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme)

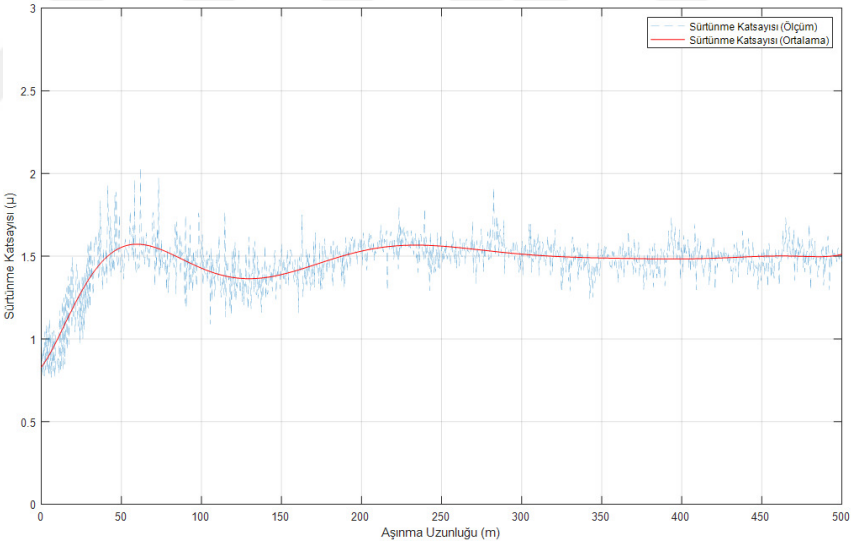
1 wt% GNP-Al'ın 4 saat öğütülmesi halinde ise sürtünme kuvveti 15,5 N, sürtünme katsayısı 1,55 olarak %29 artarken, malzeme kaybı 18 katlık bir artışla 4,51 gr'a çıkmıştır. (Şekil 3.27, Şekil 3.28 ve Tablo 3.2)



Şekil 3.26 1 wt% GNP, 4 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi



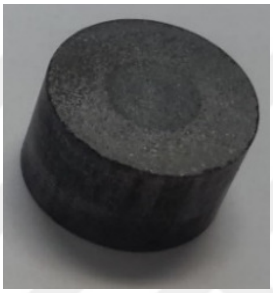
Şekil 3.27 1 wt% GNP (4 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği



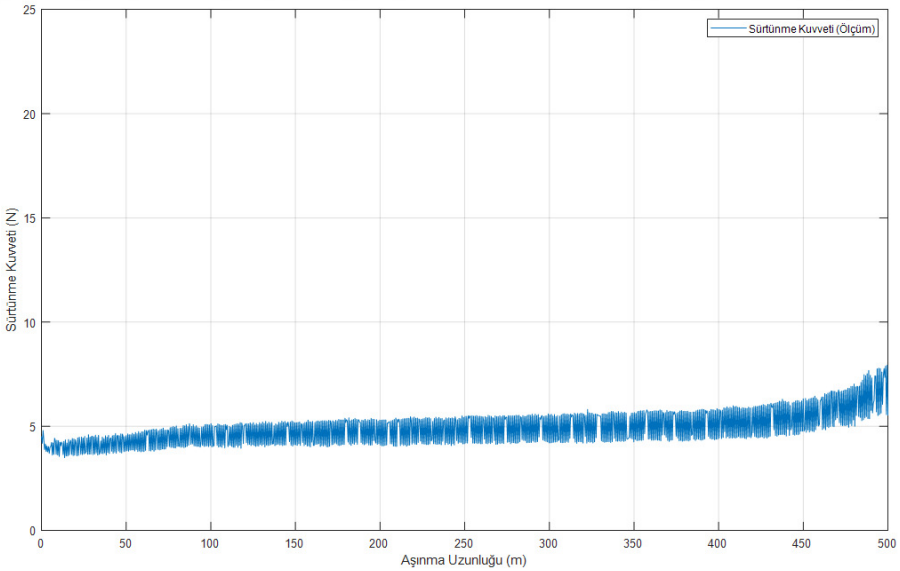
Şekil 3.28 1 wt% GNP (4 saat öğütme, 630 C'de 4 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği

3.8.9 Test-9 / 2 wt% GNP (1 Saat Öğütme , 1 Saat Sinterleme)

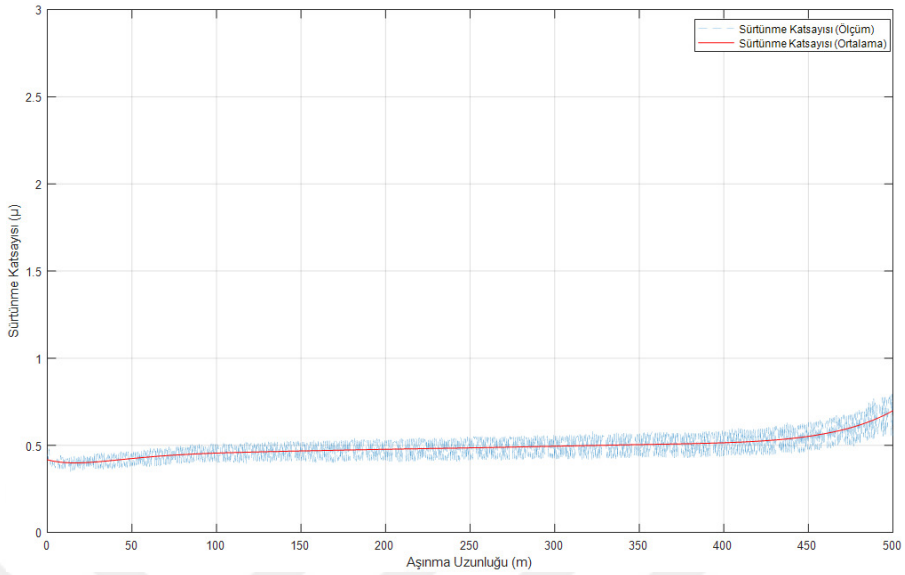
Grafen ağırlıkça oranı %2 seviyesine çıktığı zaman 1 saat öğütülme durumu için sürtünme kuvveti 4,9 N, sürtünme katsayısı 0,49 olmuştur. Bu sonuç aynı öğütme süresinde %1 oranında grafen içeren kompozit ile kıyaslandığında sürtünme kuvvetinin 1,6 kat azaldığını göstermektedir. Ağırlık kaybı 0,07 gr olmuş yine aynı öğütme süresinde %1 oranında grafen içeren kompozit ile kıyaslandığında %61 oranında daha az malzeme kaybı olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 3.30, Şekil 3.31 ve Tablo 3.2)



Şekil 3.29 2 wt% GNP, 1 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi



Şekil 3.30 2 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği



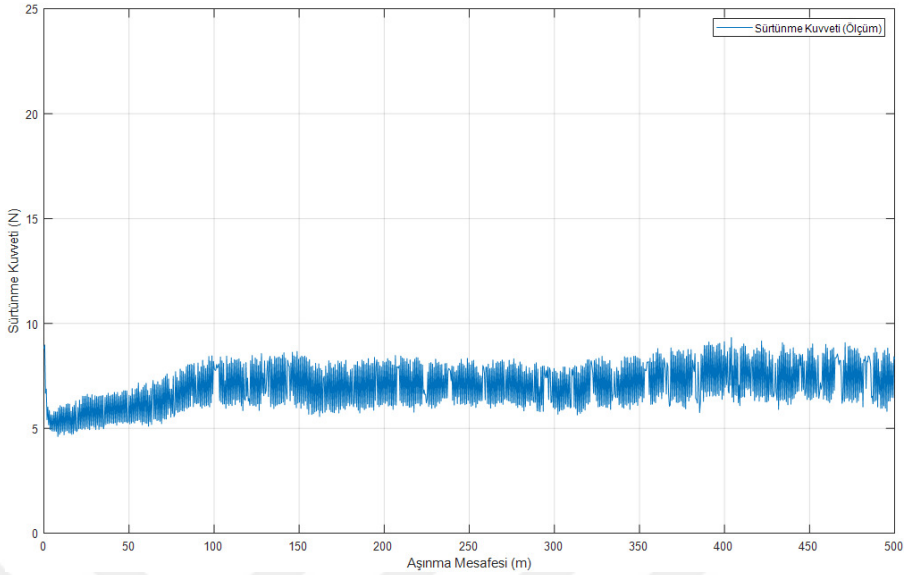
Şekil 3.31 2 wt% GNP (1 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği

3.8.10 2 wt% GNP (2 Saat Öğütme, 1 Saat Sinterleme)

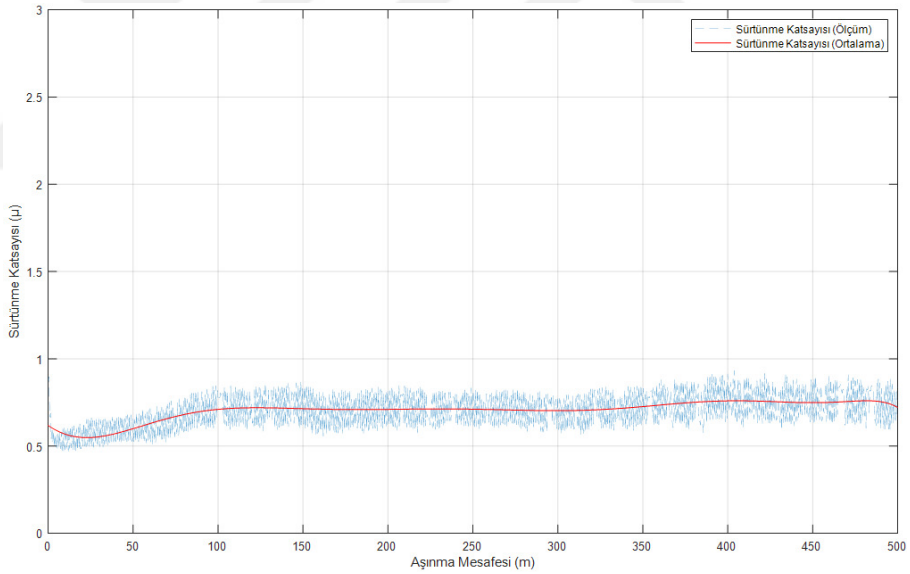
2 wt% GNP-Al'ın 2 saat öğütülmesi halinde sürtünme kuvveti 7 N, sürtünme katsayısı 0,7 olarak 1 saat öğütmeye göre artış eğilimi göstermiştir. Ağırlık kaybı da 0,92 gr olmuştur, yani 1 saat öğütme durumuna göre çok fazla artış gözlemlenmiştir. (Şekil 3.33, Şekil 3.34 ve Tablo 3.2)



Şekil 3.32 2 wt% GNP, 2 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi



Şekil 3.33 2 wt% GNP (2 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği



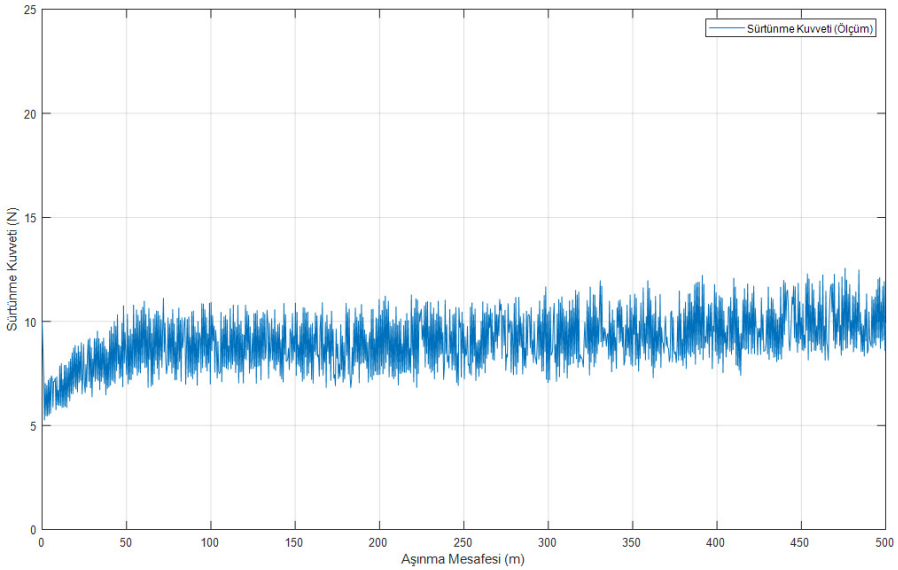
Şekil 3.34 2 wt% GNP (2 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği

3.8.11 2 wt% GNP (4 Saat Öğütme , 1 Saat Sinterleme)

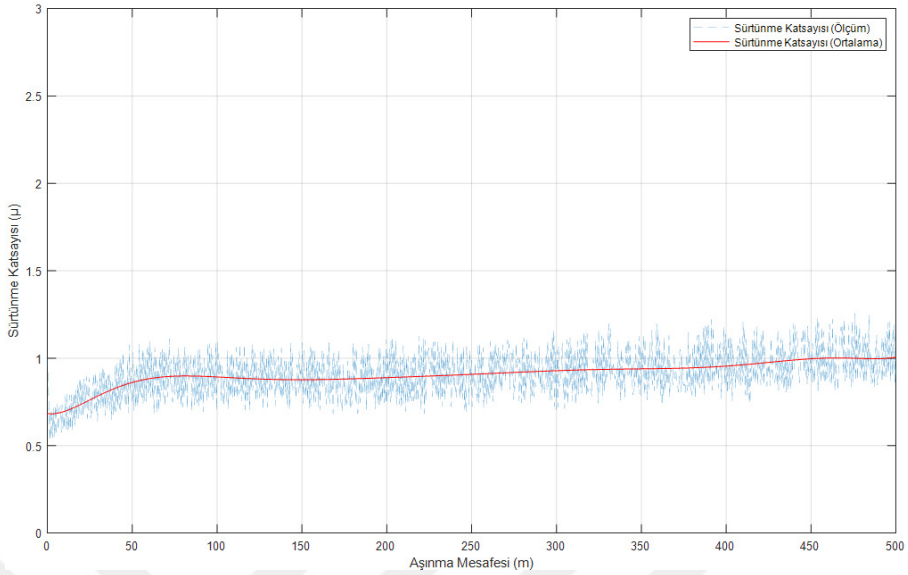
2 wt% GNP-Al'ın 4 saat öğütülmesi durumu için hem sürtünme kuvveti 9 N'a çıkmış, hem de malzeme kaybı 2,29 gr olarak gözlemlenmiştir. (Şekil 3.36, Şekil 3.37 ve Tablo 3.2)



Şekil 1.35 2 wt% GNP, 4 saat öğütülmüş, 630 °C'de 1 saat sinterlenmiş aşınma numunesi



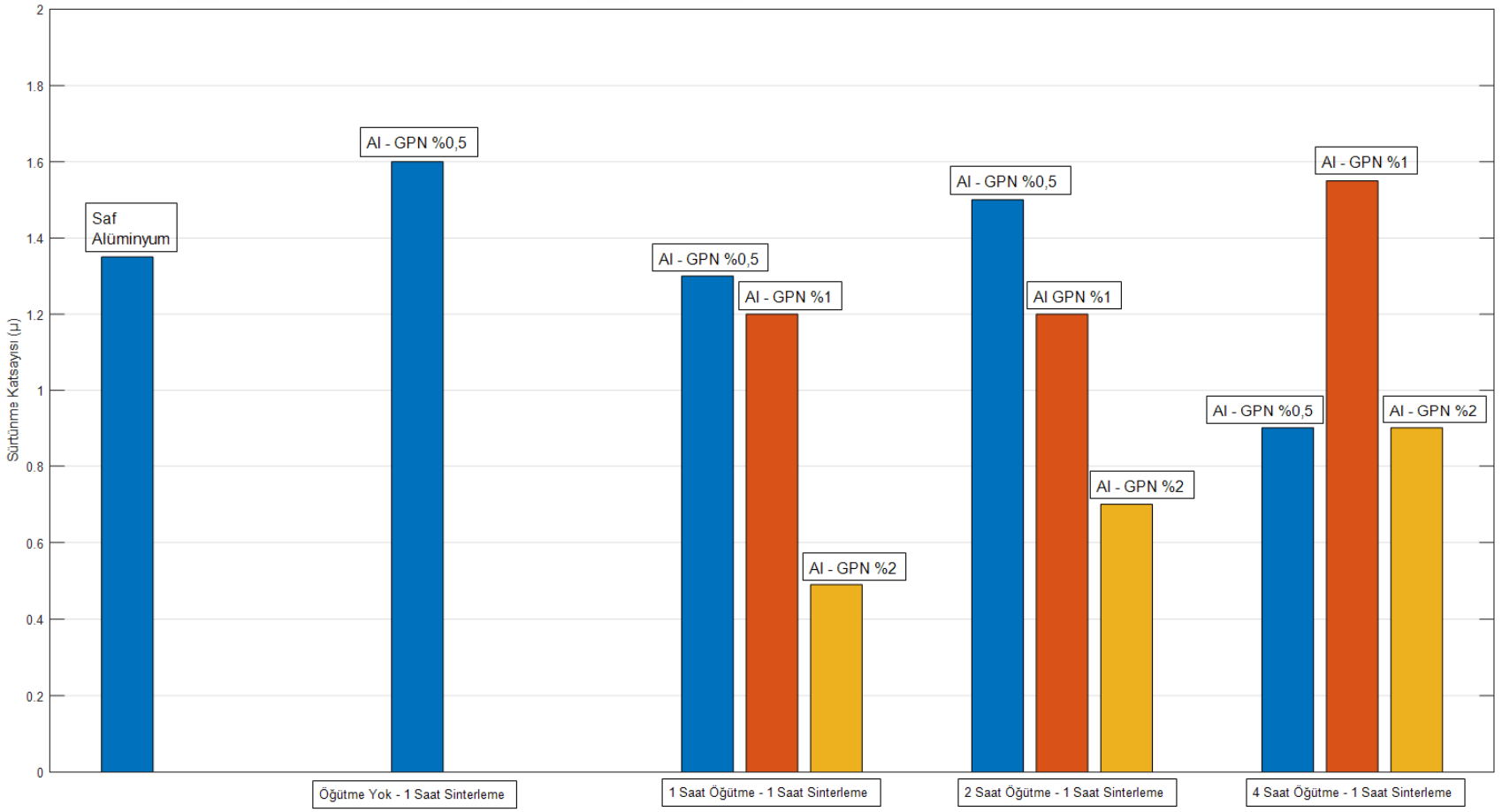
Şekil 2.36 2 wt% GNP (4 saat öğütme, 630 °C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme kuvveti (F_S) / aşınma uzunluğu (l) grafiği



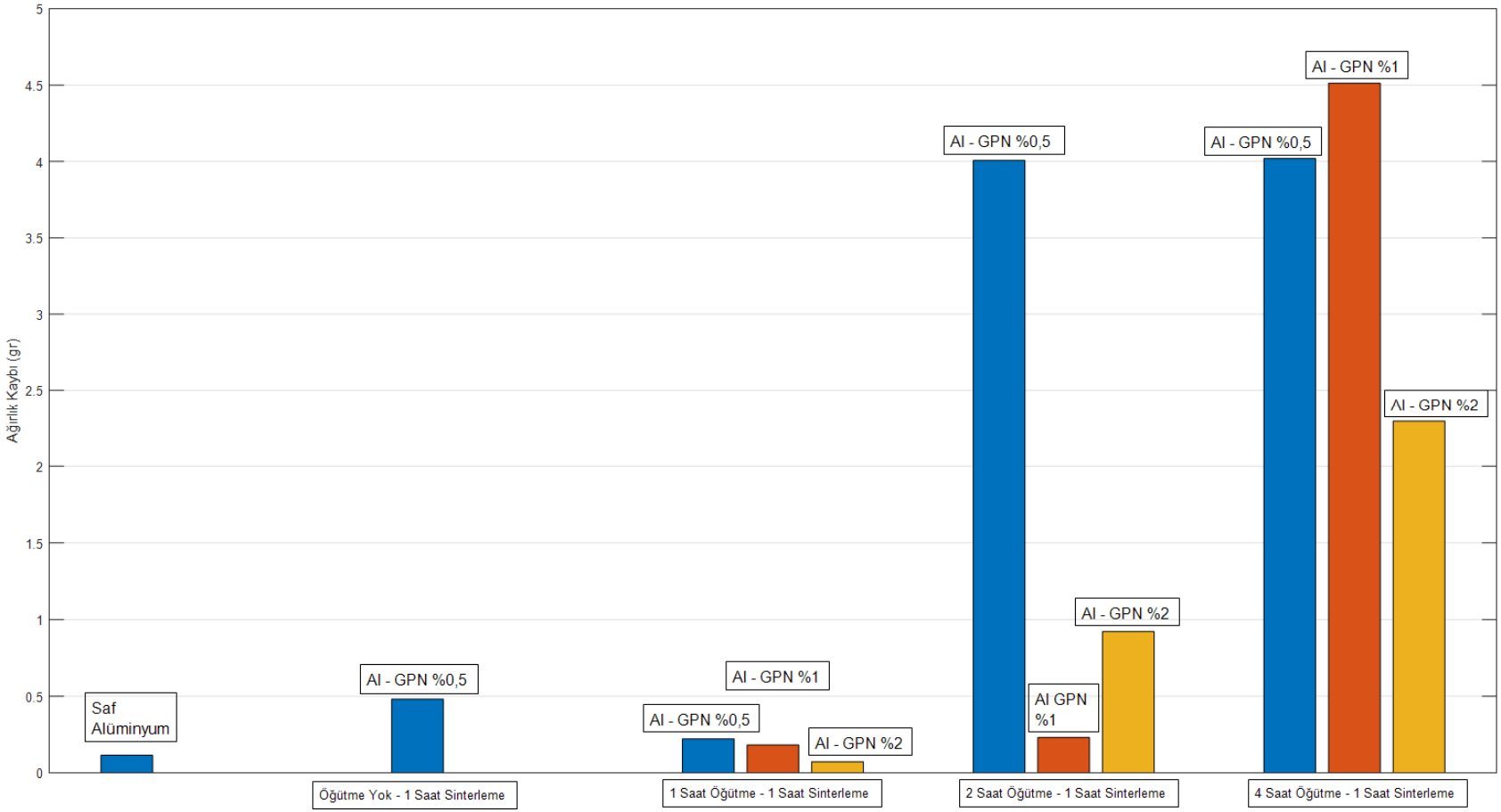
Şekil 3.37 2 wt% GNP (4 saat öğütme, 630 C'de 1 saat sinterleme) için sürtünme katsayısı (μ) / aşınma uzunluğu (l) grafiği

3.8.12 Farklı Malzeme Tipleri İçin Sürtünme Katsayısı ve Ağırlık Kaybı Özeti

Yapılan testler sonucunda farklı GNP karışım oranları ve farklı üretim parametreleri için sürtünme katsayısı ve ağırlık kayıpları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiş ve tek bir grafikte özet haline getirilmiştir.



Şekil 3.38 Farklı malzeme tipleri için sürtünme katsayısı (μ) özet grafiği



Şekil 3.39 Farklı malzeme tipleri için ağırlık kaybı (Δw) özeti

Tablo 3.2 Farklı malzeme tipleri için sürtünme katsayısı ve ağırlık değişimi test sonuçları

Deney Numarası	Malzeme Tipi	Öğütme Süresi (saat)	Fırınlama Süresi (saat)	Sürtünme Katsayısı (μ)	Aşınma Ağırlık Kaybı (gr)
0	Saf Al	-	-	1,35	0,1149
1	Al – 0,5 wt% GNP	0	1	1,60	0,4814
2	Al – 0,5 wt% GNP	1	1	1,30	0,2225
3	Al – 0,5 wt% GNP	2	1	1,50	4,0061
4	Al – 0,5 wt% GNP	4	1	0,90	4,0189
5	Al – 1 wt% GNP	1	1	1,20	0,1818
6	Al – 1 wt% GNP	2	1	1,20	0,2308
7	Al – 1 wt% GNP	4	1	1,55	4,5132
8	Al – 2 wt% GNP	1	1	0,49	0,0729
9	Al – 2 wt% GNP	2	1	0,70	0,9212
10	Al – 2 wt% GNP	4	1	0,90	2,2941

4
Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada alüminyum kompozit malzemeler, saf alüminyum, 0,5 wt%, 1 wt% ve 2 wt% grafen alaşımlı olarak toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilmiş, 1, 2 ve 4 saat öğütme ve 1 saatlik 630 °C sıcaklığında fırınlama ile farklı parametrede malzeme tipleri oluşturularak kuru sürtünme altında sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı ve yola bağlı değişimi gözlemlenmiştir. Karşılık malzeme olarak yüksek aşındırma karakterine sahip dökme demir disk kullanılmıştır. Aşınma testleri 10N yük altında, 500 m boyunca ve sabit kayma hızı altında zamana bağlı teğetsel kuvvet ölçen pin-on disk test ekipmanı kullanılarak tamamlanmıştır. Farklı malzeme parametreleri (saf alüminyum, 0,5wt%, 1wt% ve 2wt% grafen içeren alüminyum kompozitler) için sürtünme kuvveti grafikleri oluşturulmuş, sürtünme kuvveti kullanılarak sürtünme katsayısı hesaplanmış ve grafiklendirilmiştir.

Malzeme çiftinin karakteristiksel aşınma direncinin anlaşılmasında laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalar yüksek önem arz etmektedir. Deneylerden elde edilen veriler, Alüminyum matrisli grafen katkılı kompozit malzemelerin farklı parametreler altında sürtünme ve dolayısıyla aşınma davranışlarının belirlenmesinde kullanılabilir.

Testlerden elde edilen sonuçlar itibariyle saf alüminyum için sürtünme kuvvetinin ortalama 13,5 N mertebesinde, sürtünme katsayısının ortalama 1,35 seviyelerindeyken, ağırlık kaybının 0,11 gr olduğu gözlemlenmiştir. 0,5 wt% GNP-Al'ın öğütme prosesinden geçmediği durumda sürtünme kuvveti 16 N, sürtünme katsayısı 1,6'ya yükselmiş, ancak malzeme kaybı da 0,48 gr'a yükselmiştir. Bunun sebebinin malzemelerin fırınlanma prosesinden önce yeterince homojen karışmaması olduğu yorumlanmıştır. 0,5 wt% GNP-Al'ın 1 saatlik öğütme prosesinden geçtiği üretim parametrelerinde sürtünme kuvveti 13 N'a, sürtünme katsayısı da 1,3'e düşmüşken, malzeme kaybı da 0,22 gr'a düşmüştür. 0,5 wt% GNP-Al'ın 2 saat öğütülmesi durumunda sürtünme kuvveti 15 N'a, sürtünme katsayısı 1,5'e düşmüş, malzeme kaybı 20 kat artarak 4 gr 'a yükselmiştir. Bu sıradışı artışta öğütmenin belli bir noktadan sonra test numunelerinde ufalanmaya ve büyük miktarda parça kopmasına yol açması neden olduğu düşünülmektedir. 0,5 wt% GNP-Al'ın 4 saat öğütüldüğü üretim şartlarında sürtünme kuvveti 9 N'a, sürtünme katsayısı

0,9'a düşmüştür. Aşınmadan dolayı oluşan malzeme kaybı 4,02 gr gibi önceki test ile benzer bir seviyede seyretmiştir. Grafen'in kompozitteki ağırlık olarak yüzdesi %1'e çıkarıldığı ve öğütme prosesinin 1 saat olarak uygulandığı durumda sürtünme kuvveti 12 N, sürtünme katsayısı 1,2 olmuş, aynı öğütme süresine sahip, 0,5 wt% GNP-Al'a göre yaklaşık %8'lik bir düşüş göstermiştir. Malzeme kaybı da 0,18 gr olarak 0,5 wt% GNP-Al'a göre %18'lik bir iyileşme olmuştur. 1 wt% GNP-Al'ın 2 saat öğütülmesi halinde sürtünme kuvveti 12 N, sürtünme katsayısı 1,2 olarak ölçülmüştür. Aşınmadan dolayı malzeme kaybı 0,23 gr'a çıkarak 1 saat öğütülen numuneye göre %27'lik bir artış olmuştur. 1 wt% GNP-Al'ın 4 saat öğütülmesi halinde ise sürtünme kuvveti 15,5 N, sürtünme katsayısı 1,55 olarak %29 artarken, malzeme kaybı 18 katlık bir artışla 4,51 gr'a çıkmıştır. Grafen ağırlıkça oranı %2 seviyesine çıktığı zaman 1 saat öğütülme durumu için sürtünme kuvveti 4,9 N, sürtünme katsayısı 0,49 olmuştur. Bu sonuç aynı öğütme süresinde %1 oranında grafen içeren kompozit ile kıyaslandığında sürtünme kuvveti'nin 1,6 katı azaldığını göstermektedir. Ağırlık kaybı 0,07 gr olmuş yine aynı öğütme süresinde %1 oranında grafen içeren kompozit ile kıyaslandığında %61 oranında daha az malzeme kaybı olduğu gözlemlenmiştir. 2 wt% GNP-Al'ın 2 saat öğütülmesi halinde sürtünme kuvveti 7 N, sürtünme katsayısı 0,7 olarak 1 saat öğütmeye göre artış eğilimi göstermiştir. Ağırlık kaybı da 0,92 gr olmuştur, yani 1 saat öğütme durumuna göre çok fazla artış gözlemlenmiştir. 2 wt% GNP-Al'ın 4 saat öğütülmesi durumu için hem sürtünme kuvveti 9 N'a çıkmış, hem de malzeme kaybı 2,29 gr olarak gözlemlenmiştir.

Grafen katkısı artışının malzeme kaybını azalttığı ve 2 wt% grafen içeren alüminyum kompozit malzemenin en az malzeme kaybına uğradığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda tüm alaşım miktarlarında fırınlama öncesi öğütme işleminin olumlu katkı sağladığı, optimum öğütme süresinin 1 saat olduğu, sürenin artması ile malzemeden ufalanma şeklinde parça kopması olduğu sonucuna ulaşılmıştır. 2 wt% GNP-Al'ın 1 saat öğütüldüğü numune hem sürtünme kuvveti hem de malzeme kaybı miktarı olarak en düşük sonuçları vermiştir. En düşük sonuçları veren 2.malzeme tipi olan 1 wt% GNP-Al'ın 1 saat öğütülmesi durumuna göre sürtünme kuvveti olarak %59, malzeme kaybı olarak %60 daha iyi durumdadır.

Tribolojik sistemdeki malzeme dayanım gereksinimlerine göre grafen katkı oranı seçimi değerlendirilebilir. Ancak bu çalışmada ortaya konan sonuçlara göre ağırlıkça %1'lik grafen katkısı sürtünmeyi ve malzeme kaybını en düşük ve dolayısıyla tercih edilen

duruma getirmektedir. Ayrıca üretim prosesinde fırınlama öncesi öğütme süresi 1 saat civarında tutulmasının sisteme olumlu bir yansıması olacaktır.

Sıradışı termal, mekanik ve elektronik özellikleri, grafeni kompozit dünyasında çok önemli bir takviye elemanı haline getirmiştir. Üretim prosesinin basit olmasından dolayı kompoziti daha hafif hale getirmesinin yanı sıra, kompoziti çok fonksiyonlu uygulamalar için çok daha mukavim hale getirebilmektedir. Bu çalışmada da ortaya konduğu gibi grafenin üstün özelliklerinin kompozite sirayet etmesi matrisin içinde homojen dağılımıyla doğrudan alakalıdır. Dolayısıyla üretim yönteminde mekanik alaşımlama yada diğer bir deyişle öğütme malzeme özellikleri açısından oldukça önem arz etmektedir.

Aynı zamanda son yıllarda grafenin yağlayıcı özelliği de gerek işletme ve bakım maliyetleri, gerekse parça ömürü açısından ön plana çıkmakta ve sürtünmeyi düşüren, aşınma ile alakalı mekanik hataları azaltan bir malzeme olarak da tercih edilebilirliğini arttırmaktadır. Kendinden yağlama özelliği bu çalışmanın ve çıktılarının da odağında bulunmakla beraber grafenin alüminyum ile bir araya gelmesi durumunda hafiflik, Şekillendirebilirlik ve korozyon direnci gibi beklentileri üst seviyeye çekmektedir.

Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda alüminyum matrisli grafen katkılı kompozit malzemeler ileriki yıllarda otomotiv ve havacılık sanayinde önemli bir kullanım alanına sahip olabilir.

Kaynakça

[1] G. Straffelini, “Friction & Wear,” Springer International Publishing, Switzerland, 2015.

[2] I. İstif “Prediction of Wear Behavior of Aluminum Alloy Reinforced with Carbon Nanotubes Using Nonlinear Identification", SAE International - Technical Paper, vol. 2014, no. 947, pp.1-6, 2014.

[3] D.H. Buckley, “Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication,” Elsevier, Amsterdam, 1981.

[4] G.W.Stachowiak and A.W.Batchelor, “Engineering Tribology,” Elsevier, Amsterdam, 1993.

[5] F. Sirek, “Deneysel Aşınma Modeli Verileri için Uygun Parametre Seçimi,” Yıldız Teknik Üniversitesi, 2015.

[6] J.R. Davis, “Aluminum and Aluminum Alloys,” ASM Specialty Handbook, 2nd edition, ASM International, Materials Park, Ohio, 1993.

[7] B.V. Ramnath, Elanchezhian C., Annamalai R.M., Aravind S., Atreya T.S.A., Vignesh V., “Aluminum Metal Matrix Composites: A Review,” Rev Adv Mater Sci, vol. 38 no. 1, pp. 55-60, 2014.

[8] J.E. Hatch, “Aluminum Properties and Physical Metallurgy,” ASM ,Ohio,1984, pp 145-146.

[9] H. Kvande, “Production of Primary Aluminium,” Woodhead Publishing Limited, 2011.

[10] A Geim and K Novoselov, “Graphene: Scientific Background on The Nobel Prize in Physics,” 2010, pp. 505-508.

[11] W.W. Liu, S.P. Chai, A.R. Mohamed and U. Hashim, “Synthesis and Characterization of Graphene and Carbon Nanotubes: A Review on The Past and Recent Developments,” Journal of Ind. Eng. Chem., vol. 20, no. 4, pp 1171-1185, 2014.

[12] M. Erdoğan, “Çelik Takviyeli Alüminyum Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi,” Dumlupınar Üniversitesi, 2005.

[13] H.A. Cebeci, “Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile Üretilen SiC Takviyeli Alüminyum Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi,” Karabük Üniversitesi, 2008.

[14] H.G. Prashantha, M. Kumar and A. Xavior, “Graphene Reinforced Metal Matrix Composite (GRMMC): A Review,” Procedia Engineering, 2014, pp. 97.

[15] P. Sharma, S. Sharma, and D. Khanduja, “A Study on Microstructure of Aluminum Matrix Composites,” Journal of Asian Ceramic Societies, vol. 3, no.3, pp. 240-244, 2015.

[16] N. Akçamlı, H. Gökçe and D. Uzunsoy, “Processing and Characterization of Graphene Nano-Platelet (GNP) Reinforced Aluminum Matrix Composites, Component-Oriented Testing/Numerical Simulation,” vol. 58, no. 11-12, pp. 946-952, 2016.