

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PİN ON DİSK TEST DÜZENEGİ İLE AŞINMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN MODELLENMESİ**

Mehmet Tunç TUNÇEL

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon Programı

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF

Şubat, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PİN ON DİSK TEST DÜZENEGİ İLE AŞINMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN MODELLENMESİ**

Mehmet Tunç TUNÇEL tarafından hazırlanan tez çalışması 27.02.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Övün IŞIN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Deniz UZUNSOY, Üye
Bursa Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ferhat DİKMEN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Kenan Refah KUTLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Pin on Disk Test Düzeneği ile Aşınma Karakteristiklerinin Modellenmesi 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.

Mehmet Tunç TUNÇEL

İmza

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü' nün 2015-06-01-DOP02 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Sevgili eşim ve oğluma.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince bana değerli fikirleri ile yön gösteren ve destek olan tez danışmanım, hocam Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF' e ve bilgi ve tecrübelerini paylaştan Prof. Dr. Deniz UZUNSOY' a teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Tunç TUNÇEL

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xvi
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xix
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	9
1.3 Hipotez	9
2 MALZEME	10
2.1 Grafen	10
2.2 Alüminyum	10
2.3 Epoksi	11
2.4 Pin Malzemeleri	11
2.4.1 Alüminyum Nano Grafen (Metal Matrisli Kompozit)	11
2.4.2 Epoksi Nano Grafen (Polimer Matrisli Kompozit)	14
2.5 Disk Malzemeleri	15
2.5.1 Dökme Demir	15
2.5.2 Çelik	16
3 AŞINMA DENEYLERİ	20
3.1 Pin-on-Disk Test Düzeneği	20
3.2 Deneyin Yapılışı	20
3.3 Pin Numuneleri	24
3.4 Aşındırma Diski	25
3.5 Alüminyum ve Epoksi Matrislerin Aşınma Karakteristikleri	25

3.6	Kütle Ölçüm Ekipmanı	31
4	TANILAMA	32
4.1	Sistem Tanılama	32
4.2	Deney ve Tanılama Sonuçları	37
4.2.1	Al-GNP	37
4.2.2	Epoksi-GNP	62
5	SONUÇ VE ÖNERİLER	78
	Kaynakça	81
A	Kuvvet Ölçümünde Kullanılan Yük Hücresinin Teknik Özellikleri - Tede-Huntleigh 1022	85
B	Kütle Ölçümünde Kullanılan Hassas Terazinin Teknik Özellikleri - A&D GR-200	86
	Tezden Üretilmiş Yayınlar	87

SİMGE LİSTESİ

K_s	Aşınma oranı ($m^3N^{-1}m^{-1}$)
ΔV	Hacim kaybı (m^3)
F	Kuvvet (N)
Δm	Kütle kaybı (gr)
wt%	Kütle Yüzdesi
s	Laplace Operatörü
F_N	Normal Kuvvet (N)
Ra	Ortalama Pürüzlülük Değeri
u	Sistem Girişi
y	Sistem Çıkışı
F_S	Sürtünme Kuvveti (N)
μ	Sürtünme katsayısı
l	Sürtünme yolu (m)
K_p	Sürekli Rejim Kazanımı
F_T	Teğetsel Kuvvet (N)
$G(s)$	Transfer Fonksiyonu
ρ	Yoğunluk (mgm^{-3})
t	Zaman (s)
T_{p1}	Zaman Sabiti
T_d	Zaman Gecikmesi

KISALTMA LİSTESİ

3DGF	Üç Boyutlu Grafen
Al	Alüminyum
Al-GNP	Aluminum Graphene Nano Platelets
Al-CNT	Aluminum Carbon Nanotubes
AMCs	Aluminum Matrix Composites
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASTM G99-05	Pin-on-Disk Aparatı ile Aşınma Testi için Standart Test Yöntemi
ARX	Oto-regresif Eksojen
ARMAX	Oto-regresif Hareketli Ortalama Eksojen
CNT	Karbon Nano Tüp
DD	Dökme Demir
EP	Epoksi Reçine
GNP	Grafen Nano Plaka
GO	Grafen Oksit
HAMCs	Hybrid Aluminum Matrix Composites
HNT	Halloysit Nano Tüp
KIC	Kırılma Tokluğu
MMC	Metal Matris Kompozit
MWCNT	Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp
NARX	Doğrusal Olmayan Oto-Regresif Eksojen
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopisi
SISO	Tek Giriş Tek Çıkış
TRGO	Termal Olarak İndirgenmiş Grafen Oksit

TF	Transfer Fonksiyonu
VDI	Verein Deutscher Ingenieure - Elektro Erezyon Tezgahları İçin Yüzey Pürüzlülük standardı VDI3400

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Bilyalı planet değirmen ile öğütme işlemi	12
Şekil 2.2	Numune hazırlama prosesi akış şeması	13
Şekil 2.3	Epoksi nano grafen polimer matrisli kompozit üretimi (a) 1 [gr] grafen ve 100 [ml] aseton, (b) Grafenin aseton içinde ultrasonik prob ile çözdürülmesi, (c) Asetonun manyetik karıştırıcıda uçurulması, (d) Kalan asetonun vakum etüvünde uçurulması, (e) Serleştirici eklenmiş karışımın vakum mikserinde karıştırılması, (f) Epoksi pin kalıbı, (g) Epoksi-GNP pin numunesi [42]	14
Şekil 2.4	Epoksi grafen üretim prosesi şematik gösterimi	15
Şekil 2.5	Dökme demir disk	15
Şekil 2.6	Dökme demir diskin yüzey profili	16
Şekil 2.7	Dalma erozyon ile 20 VDI yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş çelik disk	16
Şekil 2.8	20 VDI çelik diskin yüzey profili	17
Şekil 2.9	Dalma erozyon ile 30 VDI yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş çelik disk	17
Şekil 2.10	30 VDI çelik diskin yüzey profili	18
Şekil 2.11	Dalma erozyon ile 45 VDI yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş çelik disk	18
Şekil 2.12	45 VDI çelik diskin yüzey profili	19
Şekil 3.1	Pin-on-Disk deney düzeneği şematik gösterimi	21
Şekil 3.2	Pin-on-Disk deney düzeneği görseli	21
Şekil 3.3	Şematik görünüş	22
Şekil 3.4	Pin-on-Disk deney yapılış şeması	23
Şekil 3.5	Aşınma testlerinde kullanılan alüminyum pin ölçüleri ve görseli	24
Şekil 3.6	Aşınma testlerinde kullanılan epoksi pin numunesi	24
Şekil 3.7	Aşınma testlerinde kullanılan aşındırma diski görseli ve ölçüleri	25
Şekil 3.8	Deney sonrası 20 VDI çelik	26
Şekil 3.9	Deney sonrası 30 VDI çelik	26
Şekil 3.10	Deney sonrası 45 VDI çelik	26
Şekil 3.11	Alüminyum metal matrisli kompozitin sürtünme kuvveti değişimi	27
Şekil 3.12	Epoksi polimer matrisli kompozitin sürtünme kuvveti değişimi	27
Şekil 3.13	Saf alüminyum aşınma oranı grafiği	29
Şekil 3.14	Saf epoksi aşınma oranı grafiği	29

Şekil 3.15 Aşınma hacmi ve standart aşınma katsayısının kayma mesafesine göre değişimi [32]	30
Şekil 3.16 Yang'ın aşınma karakteristiği model parametreleri [32]	30
Şekil 3.17 Hassas kütle ölçüm cihazı	31
Şekil 4.1 Tanılama işleminin aşamaları	33
Şekil 4.2 Tanılanacak sistem için giriş çıkış verisi	34
Şekil 4.3 Doğrusal olmayan ARX modeli blok diyagramı	35
Şekil 4.4 Tek nöronlu ve çift nöronlu ağ yapısı	35
Şekil 4.5 Sigmoid fonksiyonu	36
Şekil 4.6 Al-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: dökme demir disk, Ra 6.3)	39
Şekil 4.7 Al-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile dökme demir (Ra 6.3) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	39
Şekil 4.8 Al-GNP (Grafen oranı %0,5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: dökme demir disk, Ra 6.3)	40
Şekil 4.9 Al-GNP (Grafen oranı %0,5) malzemesi ile dökme demir (Ra 6.3) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	40
Şekil 4.10 Al-GNP (Grafen oranı %1) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: dökme demir disk, Ra 6.3)	41
Şekil 4.11 Al-GNP (Grafen oranı %1) malzemesi ile dökme demir (Ra 6.3) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	41
Şekil 4.12 Al-GNP (Grafen oranı %2) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: dökme demir disk, Ra 6.3)	42
Şekil 4.13 Al-GNP (Grafen oranı %2) malzemesi ile dökme demir (Ra 6.3) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	42
Şekil 4.14 Al-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 1.6)	44
Şekil 4.15 Al-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile çelik (Ra 1.6) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	44
Şekil 4.16 Al-GNP (Grafen oranı %0,5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 1.6)	45
Şekil 4.17 Al-GNP (Grafen oranı %0,5) malzemesi ile çelik (Ra 1.6) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	45
Şekil 4.18 Al-GNP (Grafen oranı %1) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 1.6)	46
Şekil 4.19 Al-GNP (Grafen oranı %1) malzemesi ile çelik (Ra 1.6) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	46

Şekil 4.20 Al-GNP (Grafen oranı %2) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 1.6)	47
Şekil 4.21 Al-GNP (Grafen oranı %2) malzemesi ile çelik (Ra 1.6) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	47
Şekil 4.22 Al-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 3.2)	49
Şekil 4.23 Al-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile çelik (Ra 3.2) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	49
Şekil 4.24 Al-GNP (Grafen oranı %0.5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 3.2)	50
Şekil 4.25 Al-GNP (Grafen oranı %0.5) malzemesi ile çelik (Ra 3.2) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	50
Şekil 4.26 Al-GNP (Grafen oranı %1) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 3.2)	51
Şekil 4.27 Al-GNP (Grafen oranı %1) malzemesi ile çelik (Ra 3.2) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	51
Şekil 4.28 Al-GNP (Grafen oranı %2) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 3.2)	52
Şekil 4.29 Al-GNP (Grafen oranı %2) malzemesi ile çelik (Ra 3.2) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	52
Şekil 4.30 Al-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 12.5)	54
Şekil 4.31 Al-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile çelik (Ra 12.5) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	54
Şekil 4.32 Al-GNP (Grafen oranı %0.5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 12.5)	55
Şekil 4.33 Al-GNP (Grafen oranı %0.5) malzemesi ile çelik (Ra 12.5) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	55
Şekil 4.34 Al-GNP (Grafen oranı %1) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 12.5)	56
Şekil 4.35 Al-GNP (Grafen oranı %1) malzemesi ile çelik (Ra 12.5) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	56
Şekil 4.36 Al-GNP (Grafen oranı %2) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 12.5)	57
Şekil 4.37 Al-GNP (Grafen oranı %2) malzemesi ile çelik (Ra 12.5) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	57
Şekil 4.38 Al-GNP pinlerin aşınma kayıpları	60
Şekil 4.39 Al-GNP pinler ile, karşı diskler arasındaki sürtünme katsayıları . . .	60
Şekil 4.40 Al-GNP kütle kayıplarının yüzey pürüzlülük değerlerine göre değişimi	61

Şekil 4.41 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: dökme demir, Ra 6.3)	64
Şekil 4.42 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile dökme demir (Ra 6.3) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	64
Şekil 4.43 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 1.6)	65
Şekil 4.44 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile çelik (Ra 1.6) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	65
Şekil 4.45 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 3.2)	66
Şekil 4.46 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile çelik (Ra 3.2) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	66
Şekil 4.47 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 12.5)	67
Şekil 4.48 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile çelik (Ra 12.5) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	67
Şekil 4.49 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: dökme demir, Ra 6.3)	69
Şekil 4.50 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) malzemesi ile dökme demir (Ra 6.3) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	69
Şekil 4.51 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 1.6)	70
Şekil 4.52 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) malzemesi ile çelik (Ra 1.6) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	70
Şekil 4.53 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 3.2)	71
Şekil 4.54 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) malzemesi ile çelik (Ra 3.2) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	71
Şekil 4.55 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 12.5)	72
Şekil 4.56 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) malzemesi ile çelik (Ra 12.5) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği	72
Şekil 4.57 Epoksi ve Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) pinlerin aşınma kayıpları	74
Şekil 4.58 Epoksi ve Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) pinler ile, karşı diskler arasındaki sürtünme katsayıları	74
Şekil 4.59 Sürtünme katsayısının yüzey pürüzlülük değerlerine göre değişimi .	74
Şekil 4.60 Kütle kayıplarının yüzey pürüzlülük değerlerine göre değişimi	75
Şekil 4.61 Dökme demir diskin deney sonrası elektronik mikroskop ile yüzey görüntüsü	75

Şekil 4.62 Dökme demir disk yüzeyindeki çatlakta biriken grafen kalıntısı . . .	76
Şekil 4.63 20 VDI çelik diskin deney sonrası elektronik mikroskop ile yüzey görüntüsü	76
Şekil 4.64 30 VDI çelik diskin deney sonrası elektronik mikroskop ile yüzey görüntüsü	77
Şekil 4.65 45 VDI çelik diskin deney sonrası elektronik mikroskop ile yüzey görüntüsü	77

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	Alüminyum kompozitlerin otomotiv sektöründe markalara göre kullanım alanları [21]	6
Tablo 2.1	Alüminyumun oda sıcaklığında sahip olduğu bazı mekanik özellikler [41]	11
Tablo 3.1	Pin-on-Disk testi parametreleri	22
Tablo 3.2	Alüminyum ve epoksi aşınma kayıpları	28
Tablo 3.3	Kütle ölçümünde kullanılan ekipmanın özellikleri	31
Tablo 4.1	Al-GNP metal matrisli kompozitlerin farklı yüzey pürüzlülük değerlerine sahip disklerle yapılan aşınma deneylerinin aşınma oranlarının tanımlanmış modelleri	37
Tablo 4.2	Al-GNP pin numunelerinin dökme demir ve çelik disklerle karşı aşınma kayıpları ve sürtünme katsayı değerleri	58
Tablo 4.3	Epoksi ve Epoksi-GNP numunelerinin farklı yüzey pürüzlülük değerlerine sahip disklerle yapılan aşınma deneylerinin aşınma oranlarının tanımlanmış modelleri	62
Tablo 4.4	Epoksi ve Epoksi-GNP (%0.5 Grafen) numunelerinin sürtünme katsayı ve kütle kayıpları	73

Pin on Disk Test Düzenegi ile Aşınma Karakteristiklerinin Modellenmesi

Mehmet Tunç TUNÇEL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF

Tribolojinin konularından biri olan sürtünme, yüzeyleri belli bir baskı altında temas halinde olan ve göreceli hareketli makina parçalarında aşınmaya neden olur. Makinalardaki hasarın büyük bölümü aşınma kaynaklıdır. Kuru sürtünmenin kaçınılmaz olduğu durumlarda makina elemanının ömrünün uzun olması için aşınma direnci yüksek malzemeler tercih edilir. Bunun yanında aşınmaya bağlı bir hasar meydana gelmeden önce bu durumun öngörülebilmesi ile alınacak önlemler ve yapılacak bakımlar ile parça ömrünün uzatılması söz konusudur. Aşınma hasarlarının öngörülmesi için aşınma deneylerine bağlı modeller üzerinden simülasyon çalışmaları yapılarak öngörü gerçekleştirmek mümkündür.

Literatürde özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe, metal ve polimer esaslı malzemelerden alüminyum ve epoksi kompozit malzemelerin, son yıllarda yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu malzemelerin ortak özelliği hafiflik, korozyon direnci yüksek ve kompozit olarak kolay üretilebilir olmasıdır. Ancak bu malzemelerin saf olarak kullanılması durumunda aşınma dirençleri düşüktür. Kendinden yağlama özelliğinden dolayı grafen, alüminyum ve polimer kompozitlerde, bu malzemelerin aşınma karakteristiklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Pin-on-disk testi, bu çalışma kapsamında hazırlanan alüminyum ve epoksi grafen örneklerinin aşınma davranışını ölçmek ve kuru sürtünmeli aşınma testlerini yapmak için kullanılan standart testlerden biridir. Elde edilen deney sonuçlarından malzeme çiftlerinin aşınma karakteristikleri oluşturulmuştur. Deneyler sırasında ölçülen sürtünme kuvveti ile sürtünme yolu uzunluğu başına ağırlık kaybından hesaplanan

aşınma oranı, tek giriş-tek çıkışlı aşınma prosesinin giriş ve çıkış değişkenleri olarak kabul edilmiş ve her bir pin-on-disk testi için sistem tanılama yöntemiyle üç farklı model elde edilmiştir. Elde edilen modellerin simülasyonu deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış, simülasyon ve deney sonuçlarının uyumu modelleme sonuçları ile birlikte verilmiştir.

Bu çalışma toplam beş bölümden oluşmuştur. İlk bölüm olan giriş bölümünde tez konusu ve literatür özetine yer verilmiştir. İkinci bölümde aşınma testlerinde kullanılacak olan ve son yıllarda literatürde yeni olan grafen katkılı alüminyum ve epoksi matrisli kompozitler hakkında bilgi verilmiş, test numuneleri ve aşınma disklerinin hazırlanması anlatılmıştır. Bölüm 3'te kuru sürtünmeli aşınma testlerinde standart olarak kullanılan pin-on-disk testi hakkında bilgi verilerek testin yapılışı anlatılmıştır. Tanılama çalışması Bölüm 4'te anlatılmış, tanılama sonucu elde edilen modellerin simülasyonu ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yine aynı bölümde verilmiştir. Bölüm 5 'te çalışmadan elde edilen sonuçlar ve değerlendirme yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: pin-on-disk, kuru sürtünme, aşınma, tanılama, grafen

Modelling Of Wear Characteristics Using Pin on Disc Test Apparatus

Mehmet Tunç TUNÇEL

Department of Mechanical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Dr. İlyas İSTİF

Friction, one of the subjects of tribology, causes wear on relatively moving machine parts whose surfaces come into contact under a certain pressure. Most of the damage to the machines is caused by wear. In the case of where dry sliding wear is unavoidable, materials with high wear resistance are preferred to extend the life of the machine element. In addition, it is possible to predict wear loss before wear-related damage occurs and to extend the service life of the parts with the measures to be taken and the maintenance to be performed. For the prediction of wear damage, it is possible to realize the prediction by simulation studies on the models based on the wear tests.

In the literature, especially in the automotive and aerospace industry, it is seen that aluminum and epoxy composite materials, which are metal and polymer-based materials, are widely used in recent years. The common feature of these materials is their lightness, high corrosion resistance and easy to produce as composite. However, when these materials are used purely, their wear resistance is low. Due to its self-lubricating properties, graphene is widely used in aluminum and polymer composites to improve the wear characteristics of these materials.

Pin-on-disc test is one of the standard tests used to measure the wear behaviour of aluminum and epoxy graphene samples prepared in this study and to perform dry friction wear tests. The wear characteristics of the material pairs were obtained from the experimental results. The friction force measured during the experiments and the wear rate calculated from the weight loss per sliding distance was accepted as the input and output variables of the single input-single output wear process and three different

models were obtained with the system identification method for each pin-on-disc test. The simulations of the obtained models were compared with the experimental results and the fit of the simulation and experimental results were given together with the modelling results.

This study consists of five chapters. In the first chapter, the introductory part, the thesis topic and the literature summary are introduced. In the second part, information about graphene reinforced aluminium and epoxy matrix composites which will be used in wear tests and which is new in literature in recent years are given and preparation of test samples and wear discs is explained. Chapter 3 provides information on the pin-on-disc test, a standard test used in dry-friction wear tests, and describes how to perform the test. The identification study is described in Chapter 4, and the simulation of the models obtained from the identification and the comparison with the experimental results are given in the same chapter. In Section 5, the results obtained from the study and the evaluation are made.

Keywords: pin-on-disc, dry friction, wear, identification, graphene

1.1 Literatür Özeti

Yüzeyleri temas halinde çalışan makine parçaları sürtünmeye ve aşınmaya maruz kalır. Sürtünmeye maruz kalan malzeme çiftinde oluşan aşınmalar malzemeye, yüzey pürüzlülüğüne, etki eden normal kuvvete, malzemenin sertliği gibi faktörlere bağlıdır. Aşınma, malzeme yüzeyinden mekanik etkenler sonucunda küçük parçacıkların ayrılması nedeniyle istenmeyen şekilde oluşan değişiklik olarak tanımlanır (DIN 50320). Aşınma belli bir değeri aştığında ise hasara neden olur. Makinalarda oluşan hasarın %50'si aşınmadan kaynaklanmaktadır [1–4]. Aşınmanın minimize edilerek aşınma hasarlarının azaltılması için uygulanan yöntemlerden biri yağlamadır. Aşırı sıcak ortamlarda ve bakım yapılamayacak ekstrem durumlarda kendinden yağlamalı malzemeler kullanılmaktadır. Son yıllarda nanoteknolojideki hızlı gelişme, yapısal mühendislik ve fonksiyonel cihazlar için yeni metal matris nanokompozitlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Grafit, karbon nanotüpler (CNT'ler) ve grafen gibi karbonlu malzemeler benzersiz elektriksel, mekanik ve termal özelliklere sahiptir. Yağlayıcı özelliğe sahip olan bu karbonlu malzemeler, otomotiv ve havacılık endüstrilerindeki çeşitli uygulamalar için üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip, hafif, kendi kendini yağlayan metal matris nanokompozitlerini sentezlemek için araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. Moghadam ve çalışma arkadaşları, CNT ve grafen gibi karbonlu nanomalzemelerle takviye edilmiş kendi kendini yağlayan metalik nanokompozitlerin mekanik ve tribolojik davranışlarını inceleyerek, kendi kendini yağlayan nanokompozitlerin gelişimini, işlenmeleriyle ilgili konuları, karakterizasyonlarını ve tribolojik davranışlarının araştırılmasını çalışmışlardır [5]. Bu çalışmanın sonuçları, metallere CNT ve grafen eklenmesinin hem sürtünme katsayısını hem de aşınma oranını azaltmasının yanı sıra gerilme mukavemetini de arttırdığını ortaya koymaktadır.

Karbon nanotüpler (CNT), metal matris kompozitlerin (MMC) mekanik mukavemetini ve sertliğini arttırmak için kullanılan en umut verici takviye adaylarından biridir. Uzunsoy ve diğerlerinin çalışmasında, kuru sürtünmeli aşınma davranışı incelenecek

farklı miktarlarda (ağırlıkça % 0, 0.5, 1 ve 2) CNT ile takviye edilmiş alüminyum (Al) matrisinin (MMC) üretimi için önce bilyalı öğütme işlemi uygulanmış, işlemi oda sıcaklığında sıkıştırma takip etmiştir ve 1 saat argon atmosferi altında 630 ° C'de basınçsız sinterleme ile test numuneleri hazırlanmıştır. Aşınma testleri, sabit yük ve kayma hızı altında oda sıcaklığında SAE 1040 çelik diske karşı pin-on-disk tribometresi ile yapılmıştır. Kompozitlerin aşınmış yüzeyleri, üretilen kompozit malzemelerin baskın aşınma mekanizmasını tanımlamak için taramalı elektron mikroskopisi (SEM) tekniği ile karakterize edilmiştir. Bu çalışmanın ilk sonucu, kompozitin, hafif aşınma koşulları altında takviyesiz alüminyum alaşımına kıyasla daha düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı sergilediğini göstermiştir [6].

Karbon nanotüp ile güçlendirilmiş alüminyum nano-kompozitler, genelde Al matrisine farklı ağırlık yüzdesine sahip CNT ilavesi ile toz metalurjisi tekniği kullanılarak üretilir. Abdullahi ve arkadaşları, Saf alüminyum (Al) ve farklı CNT içeriğine sahip karbon nanotüp ile güçlendirilmiş alüminyum nano-kompozitin (Al-CNT), AISI52100 çelik diske karşı olan aşınma davranışlarını tribometre ile incelenmiştir. Deneyler 0.5, 0.65 ve 0.79 m / s'lik farklı kayma hızları ve 5.5, 7.2 ve 10 N'luk normal yükler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen aşınma haritasından, kuru sürtünme sırasında, normal uygulanan yük veya kayma hızı gibi herhangi bir çalışma parametresindeki değişimin aşınma oranında ani bir değişikliğe neden olduğunu gözlemlenmiştir. Farklı aşınma oranlarında ortaya çıkan en basit aşınma türleri hafif (mild) ve şiddetli (severe) aşınmadır. Hafif aşınma, minimum plastik deformasyon ve oksit aşınma kalıntısı ile orijinal yüzeyden daha pürüzsüz bir yüzeye işaret eder. Al-CNT nano-kompozit, saf alüminyumdan daha düşük aşınma oranı göstermiştir ve test edilen tüm malzemelerin aşınma oranı, artan normal yük uygulaması ile artmıştır. Aşınma oranı, CNT içeriğinin ağırlıkça % 0-1.5'ten artması ve ağırlıkça % 1.5-2'den biraz artmasıyla azalmış, % 2 sonra hızla artmıştır. Aşınmış yüzeyin morfolojik görüntüsünden belirgin bir abrasiv ve adhesiv tipi aşınma gözlenmiştir [7].

Grafen, alüminyum matris nanokompozitlerinde takviye nano dolgu maddesi (nanofiller) olarak kullanılmasını ideal hale getiren mükemmel mekanik ve fiziksel özelliklere sahip bir malzemedir. Grafen takviyeli alüminyum metal matrisli kompozitler üzerine yapılan çalışmalarda, matris içerisinde grafen değişik oranlarda kullanılmaktadır. Al-Qutub ve arkadaşları tarafından, bilyalı öğütme ve plazma arkı sinterlemesi ile hazırlanan Al6061 monolitik alaşım ve ağırlıkça % 1 CNT takviyeli Al6061 kompozitin sürtünme ve aşınma davranışı araştırılmıştır. Hafif aşınma koşulları altında, kompozitin monolitik alaşıma kıyasla daha düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı sergilediği bulunmuştur. Bununla birlikte, aşırı aşınma koşulları için, bileşik monolitik alaşıma kıyasla daha yüksek aşınma oranı ve sürtünme katsayısı gösterdiği, aşınmış yüzeylerin analizi ile düşük yüklerde her iki malzeme

için abrasiv aşınmanın baskın aşınma mekanizması olduğununu ortaya çıkarmışlardır. Daha yüksek yüklerde, monolitik alaşım için adhezyon baskın olarak bulunurken, kompozit için aşır yüzey altı kırılma ve delaminasyon gözlenmiştir. Ayrıca, Al-CNT kompozitlerinin sürtünme ve aşınma davranışının uygulanan yükten büyük ölçüde etkilendiği ve bunun ötesinde CNT'lerin alüminyum alaşımının aşınma direncini olumsuz etkileyebileceği kritik bir yük olduğu açıklanmıştır [8].

Venkatesan ve Xavior çalışmasında grafen takviyeli 7050 alüminyum alaşımı metal matris kompozitlere pin-on-disk testi uygulamıştır. Kompozitlerin özelliklerini değerlendirmek için, kuru sürtünmeli aşınma testleri hem gelişmiş kompozitlere hem de Al alaşımı 7050 malzemeye pin-on-disk tribometresi ile uygulanmıştır. Deney yükü 10, 20 ve 30 N, kayma hızı 0.6, 1.2 ve 2.0 *m/s* ve kayma mesafesi 750, 1500 ve 2500 *m* olacak şekilde yrtlmştir. Aşınma parametrelerinin aşınma oranına etkilerini incelemişlerdir [9].

Meng ve arkadaşların çalışmalarında, bilyalı öğütme ile Al tozuna eşit olarak dağılış grafen kullanılarak farklı sıcaklıklarda sıcak pres sinterleme ile grafen takviyeli Al matris kompozitlerinin hazırlanışını çalışmıştır. Hazırlanan kompozit numuneler, x-ışını kırınımı, tarayıcı elektron mikroskopisi, enerji dağıtıcı x-ışını spektroskopisi ve transmisyon elektron mikroskopisi ile karakterize edilmiştir. Ek olarak, kompozit numunelerin mekanik özellikleri, oda sıcaklığında mikro sertlik ve aşınma testi ile değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, sıcak pres sinterleme işlemi sırasında Al ve grafen partikülleri arasında arayüzey reaksiyonlarının meydana gelmediği, 600 C'lik bir sinterleme sıcaklığında elde edilen kompozitin sıkı yapıda olduğu, grafenin düzgün bir şekilde dağıldığı ve kompozitin oda sıcaklığında iyi sertlik ve aşınma direnci sergilediği grlmştir. Kompozitin aşınma kaybı esas olarak mikro kesim aşınmasından kaynaklanır [10].

Günümüzde, aşınmaya bağlı hasarların önlenmesi için, yapılan tasarımlarda malzemelerin aşınma davranışlarının öngörülmesi önem taşımaktadır. Hasar oluşumunun öngörülmesi durumunda, bakım planlanması yapılarak aşınma hasarlarının etkisi azaltılabilir, böylece parça ömrü uzar, bakım ve işletme maliyetleri azalır [11]. Aşınmadan kaynaklanan hasarın öngörülmesi için yapılan çalışmalar genelde kontak mekanığına bağlı teorik hesaplamalar ile yapılabilir. Ancak belli kabuller ile yapılan bu hesaplar pratikte çok geçerli değildir. Bunun nedeni aşınma bir sistem zellidir ve malzeme çiftlerinin yüzey özellikleri, ortam sıcaklığı, sürtünme hızı, normal yük gibi birçok parametreye bağlıdır. Bununla birlikte aşınmalarda genellikle birden çok aşınma mekanizmasının (adhezif, abrasif, yorulma vs) gözlenmesi hesaplamaları daha güç duruma sokmaktadır.

Aşınma davranışları gerçek sistem üzerinde incelenebilir. Ancak gerçekte sistemler karmaşıktır ve aşınma davranışlarının incelenmesi maliyetli ve uzun sürelidir. Bu nedenlerden dolayı, laboratuvar testleri daha sık tercih edilmektedir. Laboratuvar testleri, parametrelerin kontrolünün kolay olması, düşük maliyetli olması nedeniyle avantajlıdır. Kuru sürtünmeli aşınma deneylerinde uygulanan standart testlerden biri de pin-on-disk deneyidir [12]. Jayashree ve çalışma arkadaşları, üç farklı martensitik çeliğe karşı Cu bazlı bir metal matris kompozit kullanarak kuru sürtünmeli aşınma davranışını incelemek için pin-on-disk testi uygulamıştır. Testler iki temas basıncında (0.5 ve 1 MPa) ve iki kayma hızında (1.57 ve 7 m/s) gerçekleştirilmiş ve sonuçlar, kayma sırasında pin ve disk yüzeylerinde oluşan sürtünme tabakalarının özellikleri dikkate alınarak açıklanmıştır. 7 m/s'de pin ve disk aşınmasının her koşulda çok az olduğu görülmüştür [13].

Pin ve disk malzemesi olarak ısıtılmış bir çelik ve geleneksel bir martensitik paslanmaz çelik kullanıldığında, düşük kayma hızında hafif aşınma olarak görülen tribo-oksidasyon oluşur. Paslanmaz çelik olarak kullanılan malzeme, çok yüksek krom ve çok düşük karbon içermesi, yani çok yüksek bir oksidasyon dirençli martensitik bir paslanmaz çelikdir. Pin ve disk aşınmasında 0.5 MPa'da yapışma / delaminasyon görülür. Burada sunulan sonuçlar, bir aşınma çifti olarak krom bazlı metal matris kompozitleri içeren tribolojik sistemlerin tribolojik optimizasyonunda uygun çelik karşı yüzeylerin seçilmesinin önemini açıkça ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra yeni malzemelerin ya da farklı proseslerle üretilen malzemelerin incelenmesi gibi spesifik amaçlara yönelik çalışmalara da elverişlidir. Bu nedenle aşınma davranışlarının incelenmesinde, testler büyük önem taşımaktadır [3, 14, 15].

Son yıllarda, alüminyum kompozit malzemeler, yüksek mekanik dayanımı, hafifliği, düşük ısıtılma katsayıları gibi özelliklerinden dolayı uzay ve havacılık sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak alüminyumun gelişmiş özelliklerine rağmen düşük aşınma direnci ve sertliğe sahip olması, özellikle tribolojik sistemlerde kullanımını kısıtlamaktadır [1]. Bu nedenle, takviye malzemeler üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle Al_2O_3 , SiC, B_4C ve TiC takviyelerinin ardından karbon nano-tüp (CNT) ve grafen nano plaka (GNP) takviyeleri ön plana çıkmaktadır [16]. Singh ve Chauhan, seramik takviyeli alüminyum kompozit malzemenin aşınma davranışlarını incelediklerinde, düşük yüklerde seramik takviyesinin aşınma performansını iyileştirdiğini ancak yüksek yüklerde gözle görülür bir etki yapmadığını bildirmiştir [17].

Son dönemlerde ise, mekanik özellikleri, elektrik ve ısıtılma iletkenliği özelliklerinden dolayı grafen yoğun ilgi görmektedir. Yapısal ve fonksiyonel uygulamalarda, kompozit malzemelere ilave edilmesiyle ilgili malzemenin mekanik ve tribolojik

özelliklerini iyileştirdiği, yapılan çalışmalarla da kanıtlanmıştır. Tabandeh-Khorshid ve arkadaşları, grafen nano-plaka takviyeli alüminyum matrisli nano kompozitin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Pin-on-disk tribometresinde gerçekleştirdikleri deneylerde, ağırlıkça %0,1 grafen takviyesinin önemli katkı sağlamadığını, buna karşılık, ağırlıkça %1 grafen takviyesinin sürtünme katsayısını önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir [1]. Bastwros ve arkadaşları, alüminyum (Al) –karbon nanotüp (CNT) kompozitleri, sürtünme ve aşınma uygulamaları için önermişlerdir. Ağırlıkça % 5'e kadar homojen dağılmış CNT'lere sahip Al-CNT kompozitlerinin aşınma davranışı, bu çalışmada incelenmiştir ve aynı teknik kullanılarak işlenmiş saf alüminyumunki ile karşılaştırılmıştır. CNT içeriğinin, kayma hızının ve uygulanan yükün, kompozitlerin aşınma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Aşınma yüzeylerinin morfolojileri taramalı elektron mikroskopisi (SEM) kullanılarak araştırılmıştır. CNT içeriği ile sertlik ve aşınma direncinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. % 5 CNT kompozitin aşınma oranı saf alüminyumdan % 78.8 daha az olduğu görülmüştür. Ağırlıkça % 5 CNT içeren numuneler için, kayma hızı arttıkça aşınma oranı ve sürtünme katsayısının azaldığı bulunmuştur. CNT'lerin, yüzeyi kaplayan ve aşınma davranışını önemli ölçüde arttıran katı bir yağlayıcı görevi gören ve kısmen veya tamamen ezilerek bir karbon filmi oluşturduğu gözlenmiştir [18]. El-Ghazaly ve arkadaşları, %3 ve %5 grafen takviyesinin, sırasıyla, sertliği %133 ve %102 artırdığını, aşınma oranını %34 ve %25 düşürdüğünü, sürtünme katsayısını ise %25 ve %9 azalttığını bildirmişlerdir [19]. Bastwros ve arkadaşları, Bilyalı öğütme tekniği ile grafen dispersiyonunun etkilerini araştırmak için ağırlıkça %1.0 grafen takviyeli alüminyum 6061 (Al6061) kompozit sentezlemişler, Al6061 tozu ve grafeni, farklı öğütme sürelerinde bilyalı değirmende öğütmüşlerdir. Kompozit Al6061'i yarı katı rejiminde sıcak presleyerek sentezlemişler, kompozitin mekanik özelliklerini karakterize etmek için üç noktalı bir bükme testi yapmışlardır. Bir saatlik öğütme ile en iyi sonucu elde etmişler, aynı koşulda işlenen referans Al6061 ile karşılaştırıldığında, bükülme mukavemetinde maksimum % 47'lik bir artış gözlemişlerdir [20]. Aynı şekilde Zhang ve arkadaşları, alüminyum-grafen nano plaka (GNP) kompoziti kuru aşınma testlerine tabi tutmuş ve hacimce %1 GNP takviyesinin aşınmayı %85, sürtünmeyi ise %39,1 azalttığını belirtmişlerdir [16]. Venkatesan ve Xavior ise, grafen takviyeli alüminyum alaşımının aşınma davranışlarını incelemişler ve aşınma karakteristiklerinin modellemişlerdir. Regresyon analizine göre yapılan modellemenin %95 oranında uyumlu olduğunu bildirmişlerdir.

Daha az hava kirliliği ve çevreye zarar oluşturan hafif ve çevre dostu araçlara ilginin artması, otomotiv sektörü için bir araştırma konusudur. Alüminyumun kendine has özellikleri, şu anda otomotiv sektöründe kullanılan önemli malzemelerin yerini alacak potansiyel bir malzeme haline getirmektedir. Srivyas ve Charoo çalışmasında, AMC ve

HAMC'lerin otomobil endüstrisi için kullanımını incelemiştir. Alüminyum kompozit malzemeler, gelişmiş fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikleri nedeniyle farklı uygulamalar için popüler malzeme olarak ortaya çıkmıştır. AMC'lerin ve HAMC'lerin bu çalışmadaki değerlendirmesi, bu materyallerin nerede kullanılabileceğini anlamaya yardımcı olur. AMC'lerin ve HAMC'lerin otomobil işinde birincil kullanımı, fren diski ve kampanaları, silindir gömlekleri, silindir, krank mili, bağlantı direği, fren makası, turbo sıcak eşanjörler ve benzeri otomobil uygulamaları için alüminyumdaki mevcut ve gelecekteki modeller bu çalışmada sunulmuştur [21].

Günümüzde otomotiv sanayinin hafif ve dayanıklı malzeme ihtiyacı alüminyum ve alaşımları alaşımları ile karşılanmaktadır. Otomotiv sektöründeki rekabet araç kütlesinin azaltılması, dayanımın artırılması ve yakıt tüketiminin azaltılması yönünde olduğundan, alüminyum ve alaşımlarının bu sektördeki kullanımı son yıllarda artmıştır. Tablo 1.1 da farklı otomotiv firmalarının değişik komponentlerde alüminyum ve kompozitlerinin kullanım örnekleri verilmiştir [21].

Üretici	Kompozit	Komponent
Duralcan, Martin Marietta, Lanxide	Al/SiCp	Pistonlar
Duralcan, Lanxide	Al/SiCp	Fren Diski, Balatası, Kaliperi
GKN, Duralcan	Al/SiCp	Pervane şaftı
Nissan	Al/SiCw	Piston Kolu
Dow Chemical	Mg/SiCp	Zincir dişlisi, Volan, Kapak
Toyota	Al/Al ₂ O ₃	Segman
Dupont, Chrysler	Al/Al ₂ O ₃	Piston Kolu
Hitachi	Cu/grafit	Akım Toplayıcı
Martin Marietta	Al/TiCp	Piston, Piston Kolu
Honda	Al/Al ₂ O ₃ -Cf	Motor Bloğu
Lotuse Elisse, Volkswagon	Al/SiCp	Fren Rotoru
Chrysler	Al/SiCp	Fren Rotoru
GM	Al/SiCg	Fren Kampanası, Tahrik Mili
MC-21, DiCompe, Manitou	Al/SiCp	Disk Fren Rotoru

Tablo 1.1 Alüminyum kompozitlerin otomotiv sektöründe markalara göre kullanım alanları [21]

Alüminyum alaşımları, otomotiv uygulamaları için çekici olan bazı mekanik ve fiziksel özelliklere sahiptir, ancak aşınmaya karşı oldukça zayıf direnç gösterirler. Alüminyum alaşımlarının katı yağlayıcılar, sert seramik parçacıkları, kısa elyaflar ile takviye edilmesi, mekanik, fiziksel ve tribolojik özelliklerin hassas dengeleri ile gelişmiş metal matrisli kompozitler (MMC) eldesi ile sonuçlanır. Net şekle yakın makina parçalarının üretilmesi için basınçlı infiltrasyon gibi gelişmiş üretim teknolojileri kullanılabilir. Fren rotorları, pistonlar, bağlantı çubukları ve entegre döküm MMC motor blokları, Al MMC'lerin otomotiv endüstrisindeki başarılı uygulamalarından bazılarıdır [22].

Otomotiv endüstrisinde korozyona karşı mükemmel dirençli, aşınmaya dayanıklı ve düşük ağırlık oranı ile yüksek mukavemete sahip malzemeler önemlidir. Alüminyum, nikel, titanyum, magnezyum ve bunların alaşımları çoğunlukla bu endüstride kullanılmaktadır. Motor silindirleri, pistonlar, disk ve kampanalı frenler, motor bağlantı çubukları ve kardan milleri gibi otomotiv bileşenlerinin tümü Alüminyum Matris Kompozitlerden (AMC) yapılmıştır. [23]

Epoksi, aşınma önleyici amaçlarla sıklıkla kullanılan, buna rağmen aşınma direnci hayli düşük bir polimer malzemedir. Bu nedenle uzay ve havacılık sanayisinde tribolojik uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Aşınma direncinin geliştirilmesi için genellikle takviye yöntemine başvurulmaktadır. Küçük boyutları, daha fazla yüksek alanı ve iri ara yüzey bağı gibi avantajları nedeniyle takviye olarak nano malzemeler ön plana çıkmaktadır. Krishnan ve arkadaşları, Halloysit nano tüp (HNT) ve nano silika hibrit takviyeli epoksinin aşınma davranışlarını araştırmış, aşınma oranı ve sürtünme katsayısını, test parametreleriyle ilişkilendirmek için tepki yüzey tekniğine dayalı matematiksel modeller geliştirmiştir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda çıkarılan modellerin %95 uyumlu olduklarını bildirmiştir [24]. Bobbili ve Madhu, çok karbonlu nanotüp takviyeli e-cam epoksinin sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarını incelemişlerdir. Analizlerin sonucunda, takviye oranının artmasıyla aşınma oranı ve sürtünme katsayısının düştüğünü bildirmişlerdir [25]. Chuang ve arkadaşları ise, epoksiye nano-silika dioksit ilavesi yapmışlar ve takviyenin sürtünme katsayısını %25 düşürdüğünü ve aşınma direncini %77 oranında iyileştirdiğini açıklamıştır [26].

Chandrasekaran ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, karbon nano dolgu maddelerinin üç farklı tipinin, epoksi esaslı polimer nano-kompozitlerin kırılma tokluğu (KIC) ve hasar mekanizması üzerindeki etkisini araştırmıştır. Karbon nano dolgu maddeleri, üç silindirik bir öğütücü kullanılarak epoksi matrisinde dağıtılmış ve bu deney için kullanılan üç nano dolgu maddesi (i) termal olarak indirgenmiş grafit oksit (TRGO); (ii) grafit nano plakalar (GNP); ve (iii) çok duvarlı karbon nano tüplerdir (MWCNT). Kırılma tokluğu, tek kenar çentikli üç noktalı eğilme testleri kullanılarak dolgu maddesinin ağırlık yüzdesinin bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür. TRGO'nun sertleştirme etkisi en önemli olanıdır ve dolgu maddesinin ağırlıkça % 0.5'i için KIC'de % 40 artış sağladığı görülmüştür. Diğer yandan, tokluktaki artışlar GNP / epoksi için % 25 ve MWCNT / epoksi için % 8 bulunmuştur. Kırık yüzeyindeki araştırmalar, TRGO ile çatlak sabitleme veya çatlaklanma ve TRGO'dan başlatılan çatlak yüz ayrılmasının kırık tokluğunun artmasına katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur. Gözlemlere dayanarak, grafit / epoksi kompozitinde çatlak yayılımını ve çatlak cephesinin grafit parçacıkları ile etkileşimini açıklayan bir şema önerilmiştir [27].

Zhang ve arkadaşları çalışmada, grafit nanoplakala takviyeli (GNP) epoksi

reçinesinin yanma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Farklı miktarlarda ve tiplerde GNP ile epoksi reçinesinin ısı yayılımının pik hızını azaltmada GNP'nin etkilerini ölçen sayısal bir modelleme metodolojisi geliştirmiştir. Sayısal simülasyon sonuçları ile test sonuçları arasındaki karşılaştırma, bu nicel yöntemin varsayımlarını doğrulamaktadır. Geliştirilen simülasyon modeli, grafen bazlı kompozitlerin malzeme tasarım sürecini iyileştirme ve bu kompozitlerin gerçekçi yangın koşullarında yangın davranışını tahmin etme potansiyeline sahiptir [28].

Zhou ve diğerleri üç boyutlu grafen dolgu maddesi (3DGF'ler) modifiyeli epoksi reçine (EP) kompozit üretmek için basit bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemle, 3DGF / EP kompozitlerinin termal iletkenliği, saf epoksininkinden 1.74 kat daha yüksek olan sadece % 0.14 (ağırlıkça % 0.27) grafen yüklemesi ile başarılı bir şekilde 0.52 W/mK'ye yükseltilmiştir. Grafen yüklemesi (yani termal iletkenlik artırıcı verimlilik) ile normalleştirilen bu dikkate değer gelişme, karbon bazlı nano dolgulu kompozitlerin bildirilen en yüksek değerleri arasındadır. Bu çalışmada ayrıca, kompozitlerin tribolojik performansının, 3DGF'lerin dahil edilmesiyle iyileştiği görülmüştür [29].

Grafen oksit, epoksi ile benzer özelliklerinden dolayı ideal takviye malzemesi olarak görülmektedir. Shen, grafen oksit (GO) takviyeli epoksinin tribolojik performansını ilk kez çok düşük GO değerlerinde (ağırlıkça %0,05-%0,5) incelemişler ve çelik karşı diskine karşı aşınma oranının saf epoksiye oranla %90-%94,1 oranında daha az olduğunu bildirmişlerdir [30]. Deng ve arkadaşları ise, grafen oksit ve ZrP (zirkonyum fosfat) malzemelerini iki katmanlı tabaka halinde üreterek fenolik reçineye ilave ettiler ve yaptıkları tribolojik çalışmada aşınma oranının %80'e yakın oranda azaldığını gözlemlemişlerdir [31].

Aşınma oranının deneysel verilerden yola çıkılarak modellenmesindeki ilk çalışmalardan biri Yang tarafından yapılmıştır. Yang tarafından entegre bir adhesiv aşınma modeli önerilmiş ve modelleme için üstel bir denklem kullanılmıştır. Geçici aşınma ve sabit durumdaki aşınmayı modellemek için Archard'ın aşınma denklemi kullanılmıştır. Aşınma katsayısı denklemleri, alümina (Al_2O_3) partiküllerinin farklı hacim fraksiyonu ile takviye edilmiş alüminyum bazlı matris kompozitler ile gerçekleştirilen pin-on-disk aşınma testlerinden elde edilen geçici aşınma verileri kullanılarak başarılı bir şekilde formüle edilmiştir. Sürekli rejim durumu aşınma katsayısını uygun bir üstel fonksiyon ile tahmin etmek için bir metodoloji geliştirilmiştir [32]. Bir sonraki çalışmada Yang standart aşınma katsayısını tahmin etmek için bu metodolojiyi genişletmiştir [33].

İstif ve arkadaşları kuru sürtünmeli aşınma deneylerinden elde edilen verileri kullanarak aşınma karakteristiklerini doğrusal ve non lineer tanılama yöntemleri ile modellemişlerdir [34–39].

1.2 Tezin Amacı

Pin-on-disk aşınma deneyinden elde edilen veriler kullanılarak tanılama yöntemleri ile aşınma karakteristiklerinin modellenmesi bu tezin temel amacıdır. Aşınma deneylerinde kullanılacak olan malzemeler literatürde son yıllarda yaygın çalışma konusu olan grafen katkılı alüminyum ve epoksi kompozitlerdir. Grafen katkısının malzeme içerisindeki oranının aşınma karakteristiklerine olan etkileri ayrıca bu çalışma kapsamında incelenecektir.

1.3 Hipotez

Aşınma karakteristiklerinin modellenmesi konusunda yapılan çalışmalar aşınma prosesinin karmaşık bir yapıya sahip olması nedeni ile sınırlıdır. Bu çalışmada pin-on-disk test sonuçları ile aşınma prosesinin modellenmesi doğrusal ve doğrusal olmayan model yapıları ve sistem tanılama yöntemi kullanılarak yapılacaktır. Elde edilen modeller içinden öngörü yeteneği yüksek olan model yapısı belirlenecektir.

2 MALZEME

Bu bölümde aşınma deneylerinde kullanılacak pin numunelerinin taşıyıcı matris ve katkı malzemeleri hakkında bilgi verilecek, deney numunelerinin imalat prosesi anlatılacaktır. Ayrıca karşı malzeme olarak kullanılan aşındırma diskleri ve disk yüzeylerine uygulanan işlemler hakkında bilgi verilecektir.

2.1 Grafen

Grafen karbon atomunun bal peteği örgüsü şeklindeki iki boyutlu planar yapısındadır. Grafen katlanabilir ve üstün mekanik özelliklerinden dolayı nanokompozit üretiminde karbon fibere üstünlük sağlamaktadır. Grafen kompozitlerin sağlamlık dışında elektrik iletkenliği, düşük gaz geçirgenliği, termal iletkenlik özellikleri ile otomotiv plastiklerinde çok geniş uygulama alanı sağlamaktadır. Örnek olarak grafenin iletkenlik ve gaz bariyer özelliği yakıt tankı tasarımında ve elektrostatik boyamada ideal çözüm sunmaktadır. İlaveten, grafen yakıt veriminin artması için lubrikant, uzun ömürlü ve hafif batarya ve akü üretiminde elektrot malzemesi ve uçak kanatlarının güçlendirilmesinde takviye malzemesi olarak kullanılabilir.

2.2 Alüminyum

Alüminyum, doğada oksijen ve silisyumdan sonra en çok rastlanan üçüncü elementtir ve dünya üzerinde, en çok bulunan metaldir. Alüminyum içeren cevherler yerkabuğunun yaklaşık kütle olarak %8'ini oluşturur [40]. Alüminyum genellikle doğada diğer elementlerle bileşik yapmış halde bulunur ve çok nadir olarak saf halde bulunabilir. Alüminyum içeren mineraller oldukça kararlı yapıdadırlar ve bu minerallerin indirgenmeleri için yüksek miktarlarda enerji ve sıcaklıklar gerekmektedir. Bu durum alüminyumun saf olarak elde edilebilmesinin ve ticari olarak üretiminin yapılabilmesinin neden diğer metallere göre daha geç zamanda başladığını açıklar. Alüminyum atom numarası 13 ve molar kütlesi 26.981 g/mol olan bir metaldir. Alüminyum kristalleri -269 °C' den ergime noktası olan 660

°C'e kadar olan sıcaklık aralığında yüzey merkezli kübik dizilimdedirler. Katı halde latis boşluklarına göre hesaplanan teorik yoğunluğu 2.699 g/cm^3 olan alüminyumun yoğunluğu; 700 °C' de sıvı halde 2.357 g/cm^3 , 900 °C'de ise 2.304 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Alüminyumun oda sıcaklığında sahip olduğu bazı mekanik özellikler Tablo 2.1'de saflık oranlarına göre verilmiştir [41].

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.

Alüminyumun Mekanik Özellikleri Saflık (%)	Çekme Dayanımı (mPa)	Çekme Dayanımı (ksi)	50 mm'de uzama miktarı (%)
99.99	45	6,5	50
99.8	60	8.7	45
99.6	70	10.2	43

Tablo 2.1 Alüminyumun oda sıcaklığında sahip olduğu bazı mekanik özellikler [41]

2.3 Epoksi

Epoksi, termosetler grubundan yapıştırıcı bir kimyasal reçinedir. Suya, aside ve alkaliye direnci çok iyidir, zamanla direnç özelliğini yitirmez. Çatlağa doldurulmuş epoksi yapıştırıcısı, çatlağın yarattığı süreksizlik ortamını sürekli duruma dönüştürür, çatlağın her iki yüzünü çatlak boyunca sürekli olarak birbirine bağlar ve gerilme birikimlerini önler. Genellikle iki bileşenli olan epoksiler, diğer termoset plastikler gibi belli süre sonra sıvı halden katı hale geçer ve takip eden bir iki hafta içinde olgunlaşarak nihai sertliğe ulaşır. Cam veya karbon elyafı ile epoksi kombinasyonu mükemmel mekanik dayanıklılığa sahiptir. Bu yüzden uzay ve havacılık teknolojilerinde ve denizcilik alanında çok kullanılır. Epoksi, inşaat alanında da yaygın kullanılan bir malzemedir. Onarım sırasında uygun çatlakların doldurulmasında, sonradan betonun içine eklenecek çelik donatıların yerleştirilmesinde kullanılır. Betonarme içine saplanan donatılar için çekme mukavemetleri oldukça yüksektir. Epoksi, aynı zamanda bir yüzey kaplama ürünüdür. Ayrıca, boya veya astar olarak da kullanılır.

2.4 Pin Malzemeleri

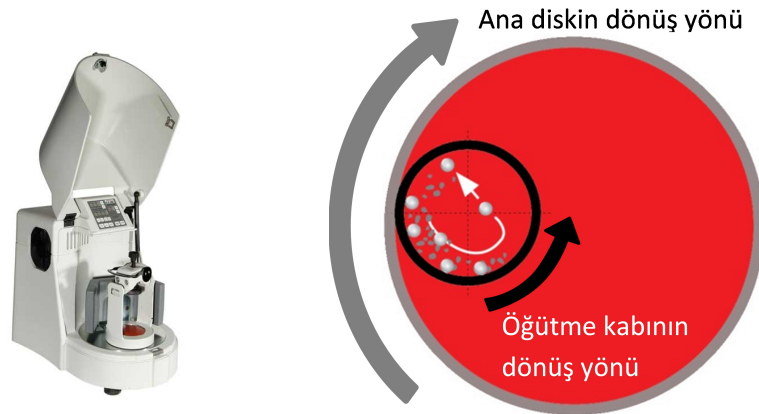
2.4.1 Alüminyum Nano Grafen (Metal Matrisli Kompozit)

Alüminyum metal matrisli aşınma numunelerin imalatında, öğütme süreleri ve grafen % wt katkı oranları farklı olan toplamda 10 adet numune hazırlanmıştır. Öğütme

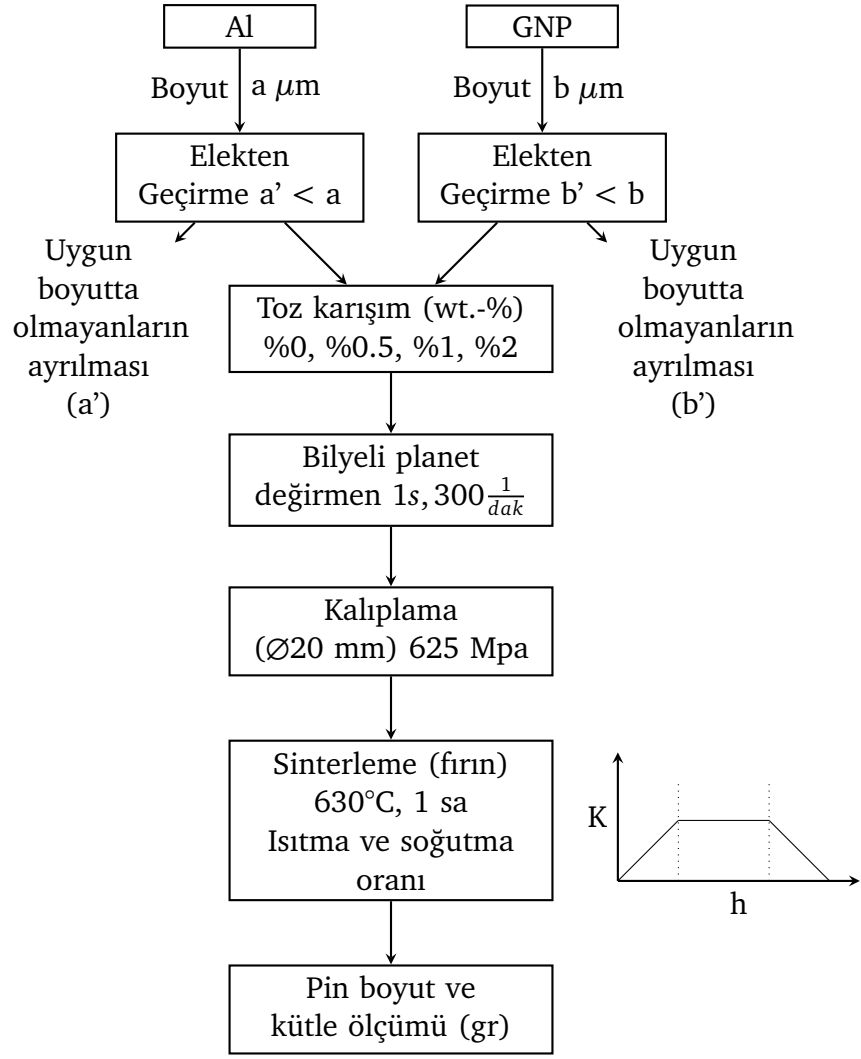
süresi 2 ve 4 saat olan numunelerin aşınma dayanımları 1 saatlik öğütmeye göre oldukça düşük çıkmıştır. Bu nedenle bu çalışmada öğütme süresi 1 saat olan numunelerin aşınma karakteristikleri modellenmiştir.

Bu bölüm kapsamında Alüminyum-grafen nano platelet kompozitleri toz metalürjisi yöntemleri ile üretilmiş ve ayrıntılı karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin üretimi sırasında öncelikle grafen partiküllerin alüminyum matris içerisinde homojen olarak dağıtılması için başlangıç tozlarına mekanik alaşımlama uygulanmıştır. Daha sonra mekanik olarak alaşımlanmış toz karışımları preslenerek ön şekillendirilmiş yaş numuneler elde edilmiş ve üretimin son kademesinde bu yaş numunelerin sinterleme işlemleri gerçekleştirilerek yığın yapıda kompozit numuneler elde edilmiştir. Sinterlenmiş numunelerin yoğunluk, mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Numune hazırlama prosesi Şekil 2.2' de akış şeması olarak verilmiştir. Prosesin başlangıcında grafen tanecikleri elekten geçirilmiştir. Uygun tanecik yapısına sahip grafen parçacıkları farklı oranlarda toz karışıma dahil edilerek (%0-%0.5-%1-%2), karışım 1 saat boyunca 300 d/dk hızla bilyalı planette öğütülmüştür. Öğütme işlemi Şekil 2.1' de şematik olarak gösterilmiştir. Homojen dağılan karışım daha sonra pres yardımıyla 625 MPa basınçta kalıplanmıştır. Kalıplamanın ardından 630 °C sıcaklıkta, Şekil 2.2' de verilen sıcaklık profilinde sinterlenmiştir. Son olarak elde edilen pin numunelerinin boyut ve kütle ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



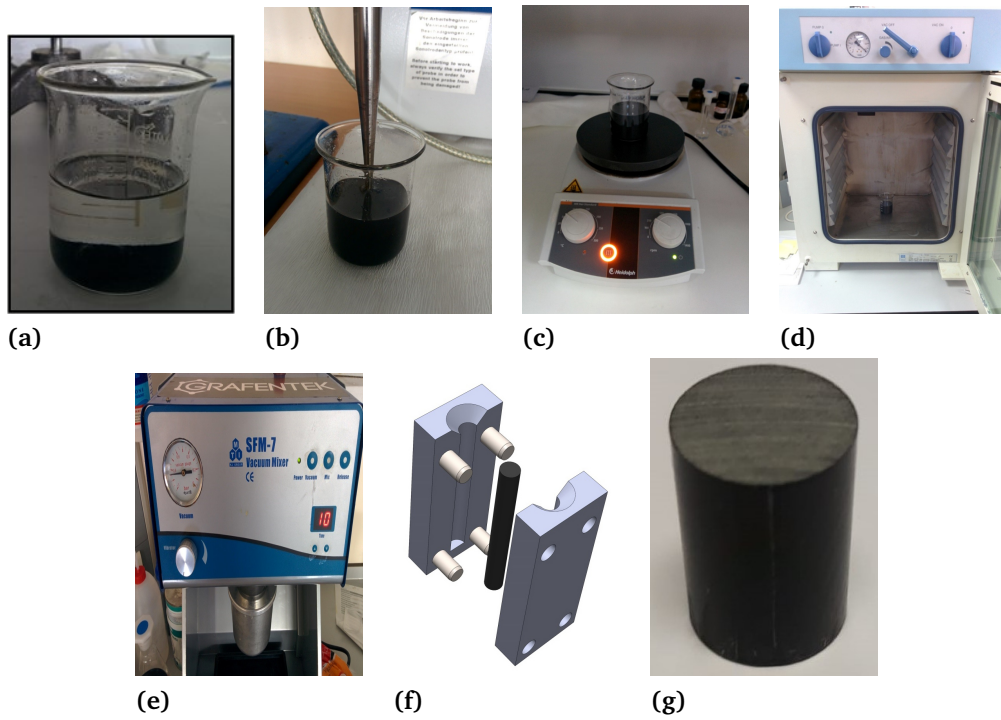
Şekil 2.1 Bilyalı planet değirmeni ile öğütme işlemi



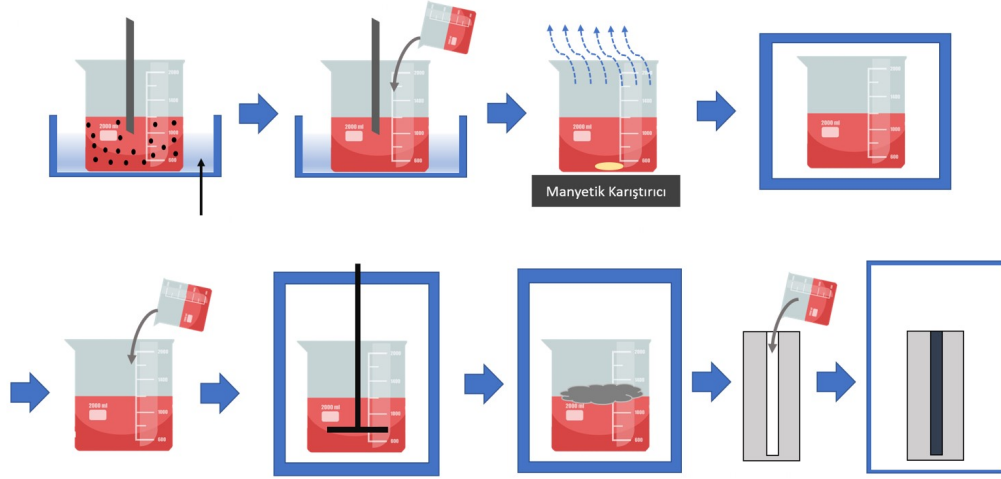
Şekil 2.2 Numune hazırlama prosesi akış şeması

2.4.2 Epoksi Nano Grafen (Polimer Matrisli Kompozit)

Grafen katkılı epoksi kompozit malzemenin laboratuvarındaki üretim aşamaları Şekil 2.3'te görülmektedir. İlk olarak grafen parçacıkları 100 ml aseton içinde, buz banyosu içinde ultrasonik prob yardımıyla 1.5 saat boyunca çözündürülmüştür. (%75-%80 amp) Daha sonra çözeltiye epoksi eklenerek 1.5 saat daha aynı işleme devam edilmiştir. Çözdürme işlemi tamamlandıktan sonra asetonu uçurmak amacıyla 3 saat boyunca ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda 70 °C sıcaklıkta karıştırılmıştır. Çözücünün tamamen uçurulduğundan emin olmak amacıyla 12 saat boyunca 70 °C sıcaklıkta vakum etüvünde bekletilmiştir. Karışım, etüvden çıkarıldıktan sonra soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra karışıma epoksi sertleştiricisi eklenerek 10 dakika boyunca vakum mikserinde karıştırılmıştır. Sonrasında, karıştırmadan kaynaklanan köpüklenmenin giderilmesi için 30 dakika boyunca vakum ortamında bekletilmiştir. Ardından, karışım alüminyum kalıba dökülerek 24 saat boyunca 60 °C sıcaklıkta kürlenmeye bırakılmıştır. Son kürlenme için 4 saat boyunca 90 °C sıcaklıkta etüvde bekletilmiştir [42]. Yukarıda anlatılan epoksi aşınma numunesi üretim prosesi Şekil 2.4 de ayrıca akış şeması olarak da verilmiştir.



Şekil 2.3 Epoksi nano grafen polimer matrisli kompozit üretimi (a) 1 [gr] grafen ve 100 [ml] aseton, (b) Grafenin aseton içinde ultrasonik prob ile çözündürülmesi, (c) Asetonun manyetik karıştırıcıda uçurulması, (d) Kalan asetonun vakum etüvünde uçurulması, (e) Serleştirici eklenmiş karışımın vakum mikserinde karıştırılması, (f) Epoksi pin kalıbı, (g) Epoksi-GNP pin numunesi [42]

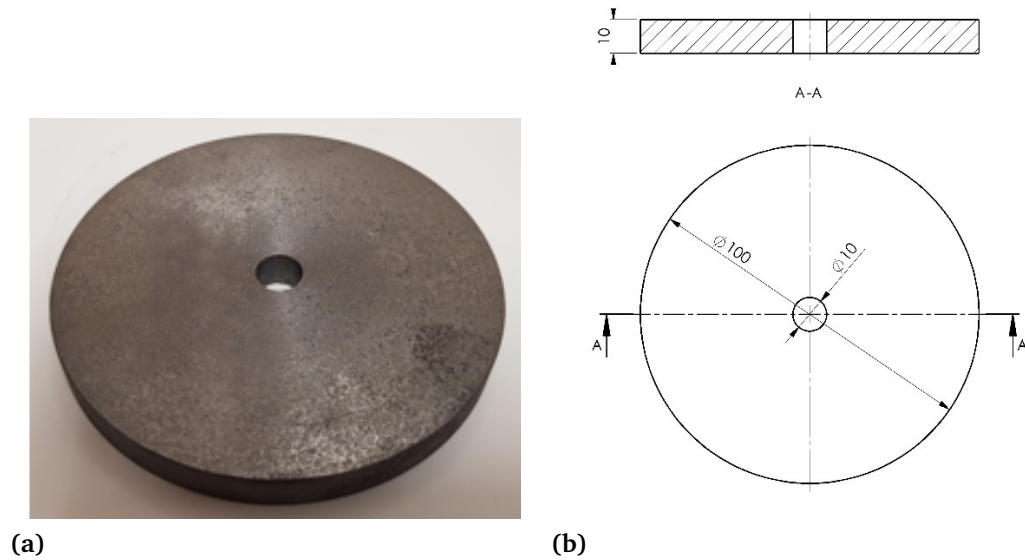


Şekil 2.4 Epoksi grafen üretim prosesi şematik gösterimi

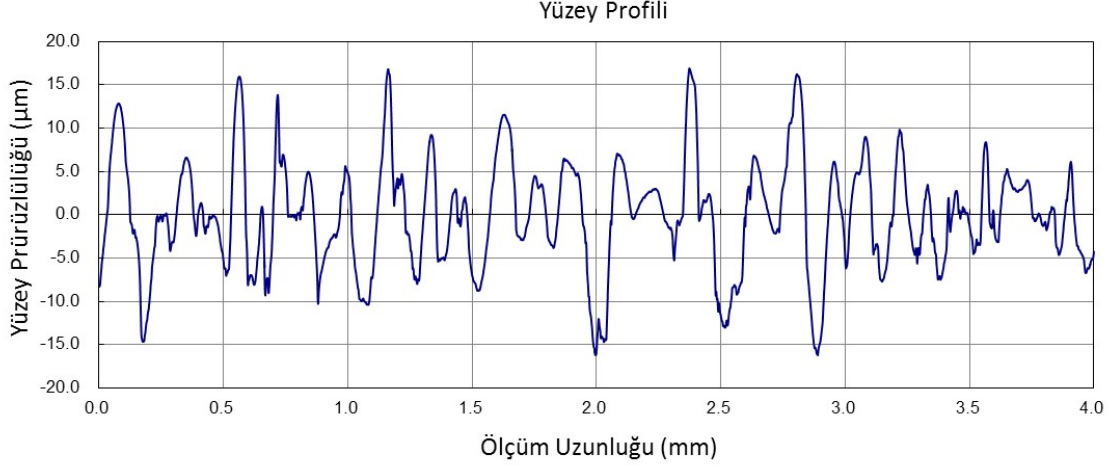
2.5 Disk Malzemeleri

2.5.1 Dökme Demir

100 mm çapında silindirik pig dökme demir kütükten, 10 mm kalınlığında diskler kesilmiştir. Daha sonra disklerin yüzeyi Ra 6.3 pürüzlülük değerine ulaşınca kadar taşlanmıştır. Diskin geometrik ölçüleri ve görüntüsü Şekil 2.5 'te verilmiştir. Yüzey ölçümleri, Mitutoyo SJ-310 ölçüm cihazı ile ISO 1997 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Diskin yüzey profili 2.6 'te verilmiştir.



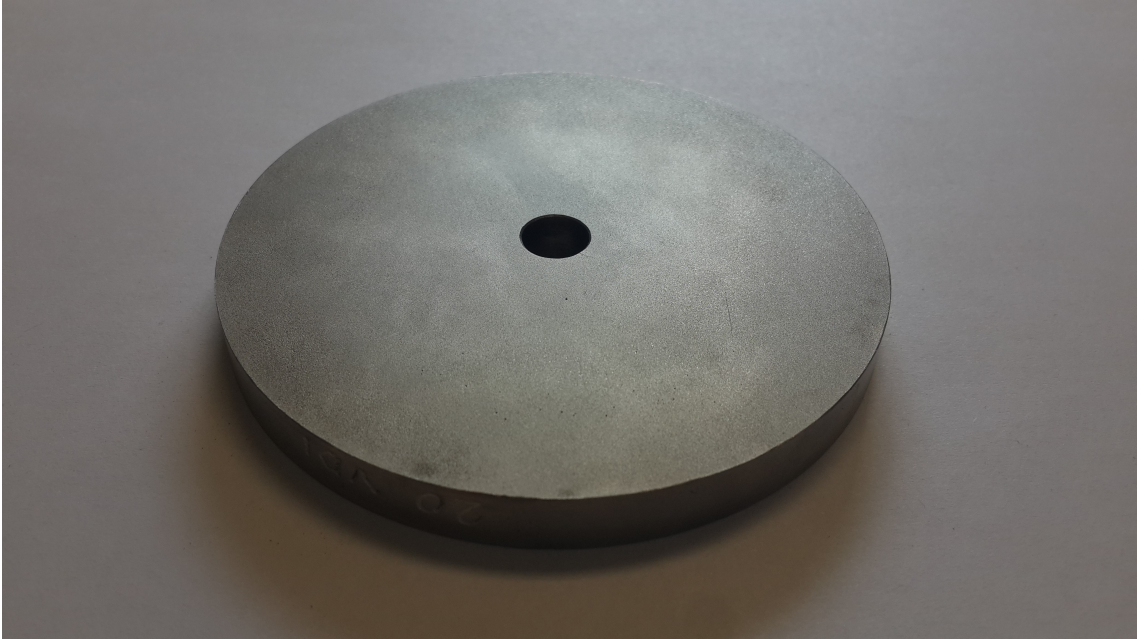
Şekil 2.5 Dökme demir disk



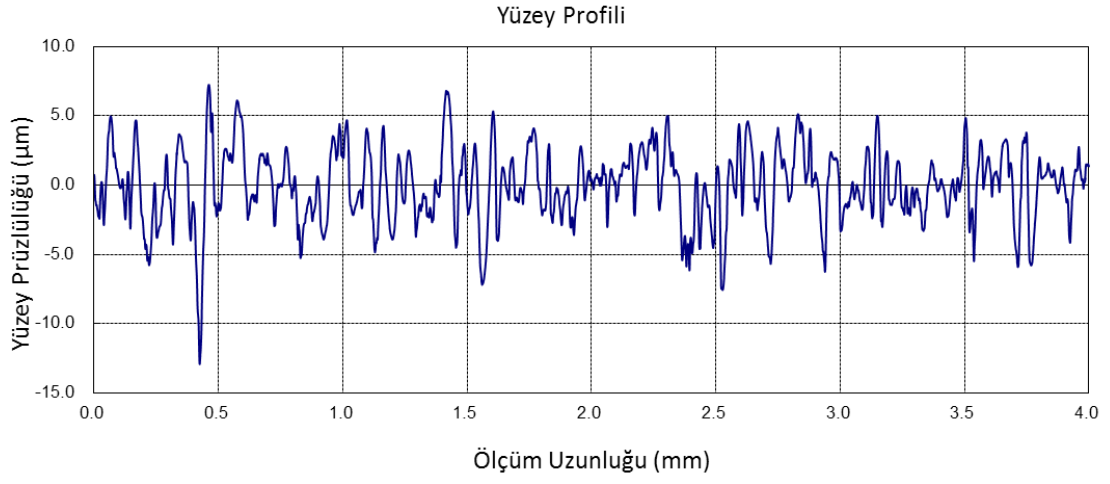
Şekil 2.6 Dökme demir diskin yüzey profili

2.5.2 Çelik

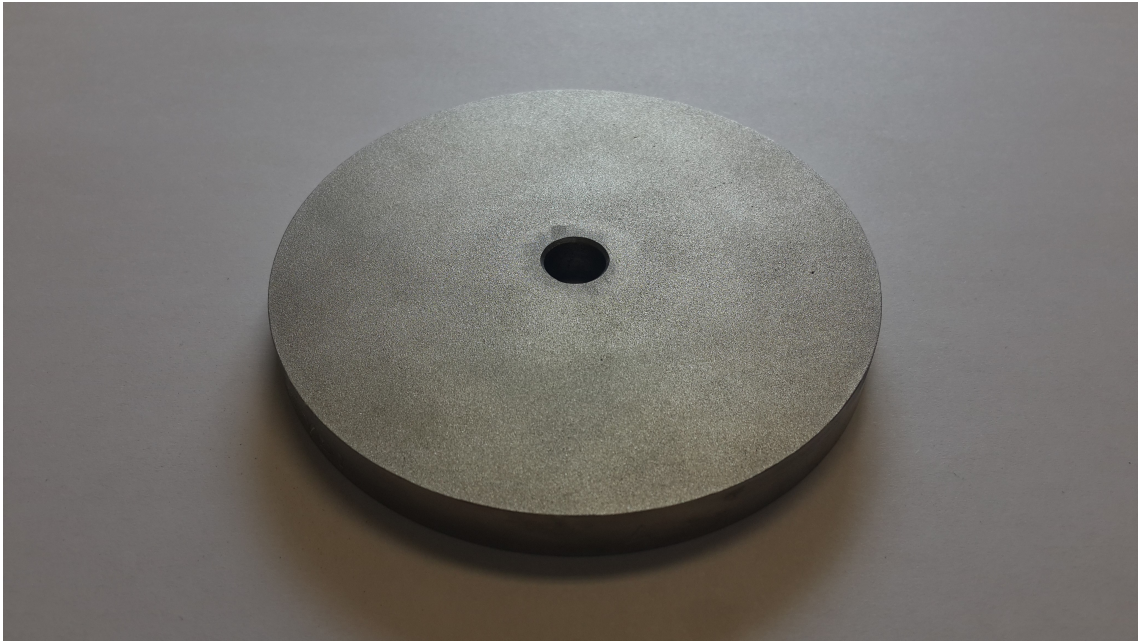
100 mm çapındaki silindirik C45 çelik kütükten, 10 mm kalınlığında diskler kesilmiştir. Daha sonra diskler, elektro erozyon yöntemi ile dalma erozyon tezgahında 20 VDI, 30 VDI ve 45 VDI yüzey pürüzlülük değerlerine sahip olana kadar erozyona maruz bırakılmıştır. Disklerin görüntüleri Şekil 2.7 , Şekil 2.9 ve Şekil 2.11 'de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü, Mitutoyo SJ-310 ölçüm cihazı ile ISO 1997 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yüzey profilleri Şekil 2.8, Şekil 2.10 ve Şekil 2.12 'de verilmiştir.



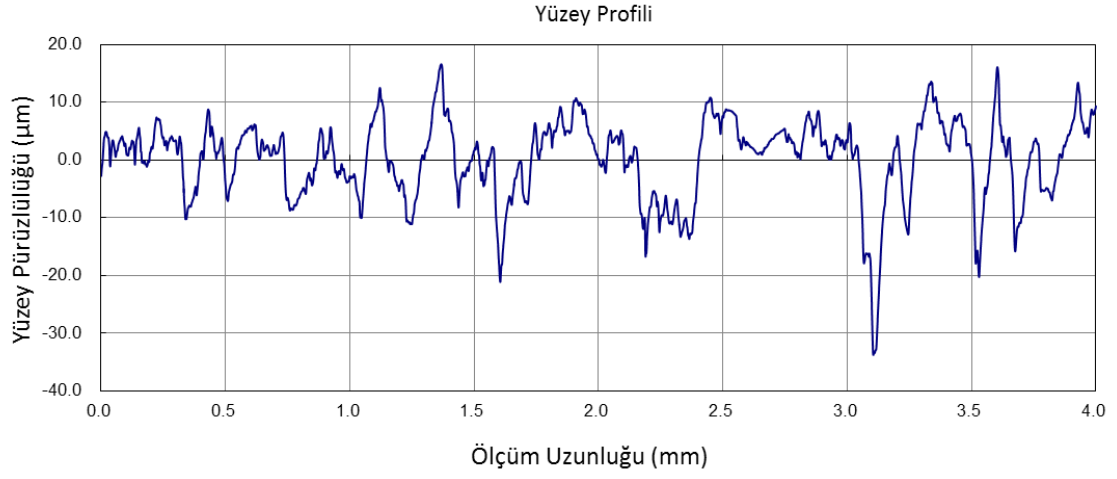
Şekil 2.7 Dalma erozyon ile 20 VDI yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş çelik disk



Şekil 2.8 20 VDI çelik diskin yüzey profili



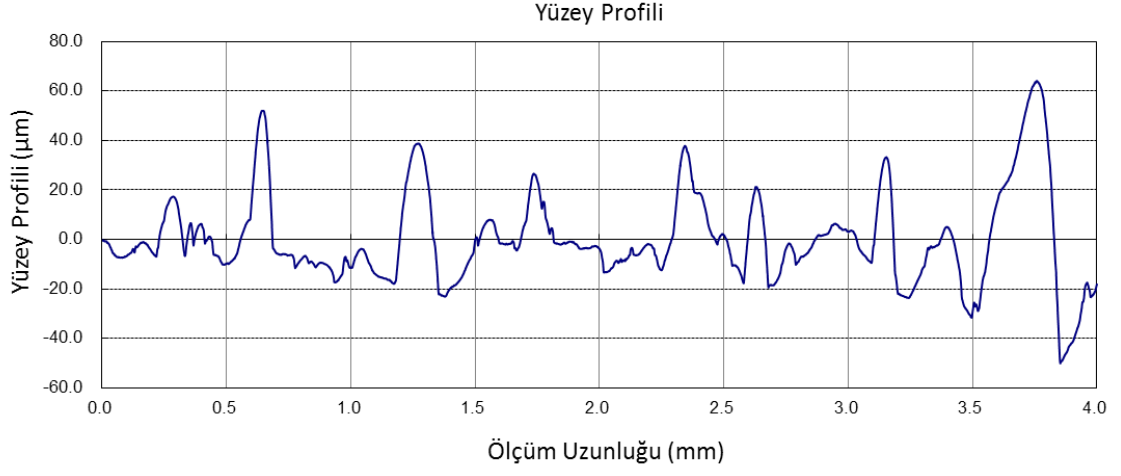
Şekil 2.9 Dalma erozyon ile 30 VDI yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş çelik disk



Şekil 2.10 30 VDI çelik diskin yüzey profili



Şekil 2.11 Dalma erozyon ile 45 VDI yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş çelik disk



Şekil 2.12 45 VDI çelik diskin yüzey profili

3

AŞINMA DENEYLERİ

3.1 Pin-on-Disk Test Düzenegi

Pin-on-Disk testi, aşındırıcı olan disk ve aşınan pin olacak şekilde malzeme çifti ile uygulanan standart bir testtir. Bu bölümde farklı malzeme çiftleri kullanılarak, kuru sürtünmeli aşınma testleri için ASTM G99-05 standardına uygun pin-on-disk test düzenegi kullanılmıştır.

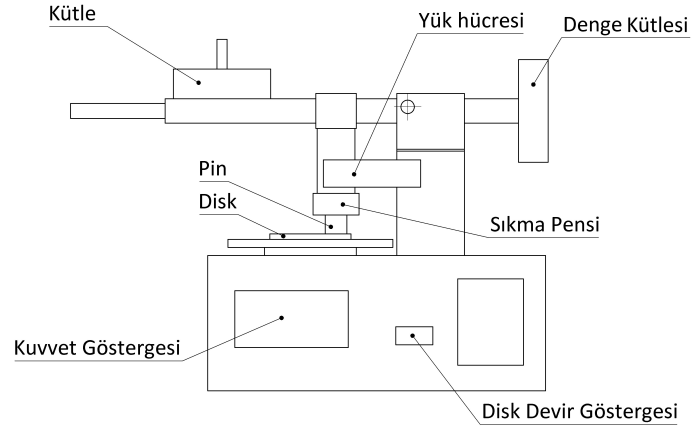
Test düzenegi temel olarak kuvvet göstergesi, devir seçici ve sayacı içeren gövde, disk ve disk tutucu tabla, pin ve kütle taşıyıcı yük kolundan oluşmaktadır.

Düzenek kalibre edilmiş yapısı sayesinde F_N normal kuvvet altındaki pin ile aşınma diski arasında oluşan F_T teğetsel kuvveti bir yük hücresi aracılığıyla okumakta, ethernet bağlantısı üzerinden bilgisayara göndermektedir. Bilgisayarda çalışan bir yazılım ile F_T teğetsel kuvveti periyodik olarak bir dosyaya kaydedilmektedir. Böylece deney süresince sürtünme kuvvetinin değişimi kaydedilmektedir.

Pin-on-disk testinde kullanılan parametreler, Tablo 3.1' de gösterilen, laboratuvarında yapılan aşınma deneyleri için standart test yöntemi (ASTM G99-05) uyarınca deneyler için belirlenmiş parametreler esas alınmıştır. Tablo 3.1 'de gösterilen parametreler, disk yüzey pürüzlülüğü hariç sabit tutulmuştur.

3.2 Deneyin Yapılışı

Deney, pin-on-disk test düzenegi kullanılarak oda şartlarında yapılmaktadır. İlk olarak temizliği yapılmış ve kurutulmuş olan test numunesi hassas terazi ile kütlesi ölçülerek kayıt edilir. Test numunesi olarak kompozit pinler yük taşıyıcı kol üzerine sıkma pensi, karşı malzeme olarak kullanılacak dökme demir disk ise döner tablaya bir cıvata vasıtasıyla bağlanır. Cihaz kontrol panelinden, test hızı ayarlanır. Taşıyıcı kolun yükleme bölümüne, pin üzerine uygulanacak normal kuvvete F_N karşılık gelen kütle yerleştirilir. Pin sıkma pensi ile tam olarak sabitlenmeden önce pinin aşınma



Şekil 3.1 Pin-on-Disk deney düzeneği şematik gösterimi



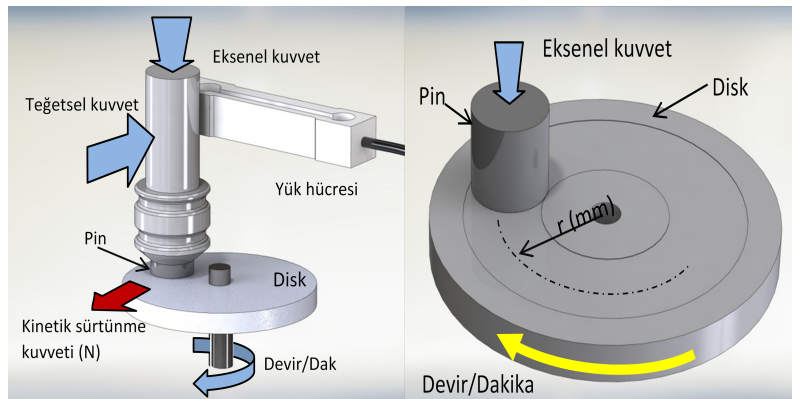
Şekil 3.2 Pin-on-Disk deney düzeneği görseli

Test Parametreleri	Değer
Disk malzemesi	DD/C45
Disk çapı (mm)	100
Disk genişliği (mm)	10
Disk yüzey pürüzlülüğü (mikron Ra)	3.6/1.6-3.2-12.5
Normal kuvvet (N)	10
Uygulanan yol (m)	500
Disk-pin temas noktasındaki dönme hızı (m/s)	0.22
Pin ölçüleri (çap x yükseklik) (mm)	10 x 30
Ortam	hava
Sıcaklık (° C)	23-25
Nem (% RH)	40-60
İz çapı (mm)	70-110

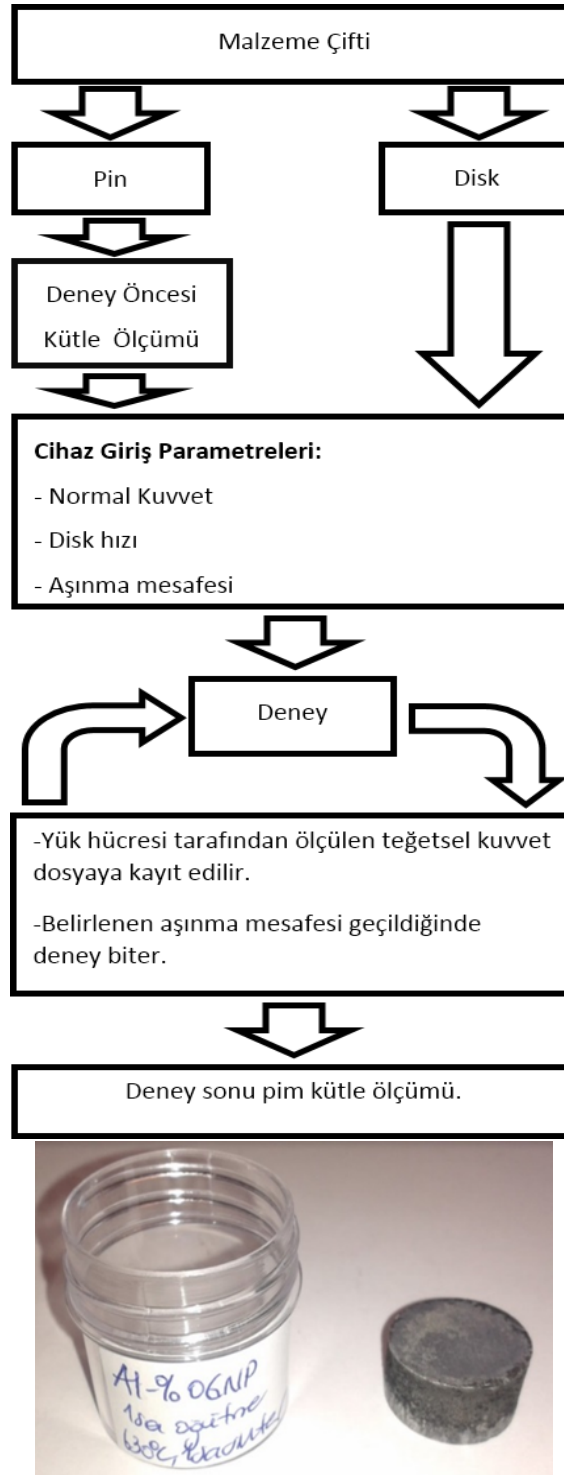
Tablo 3.1 Pin-on-Disk testi parametreleri

yüzeyi ile disk yüzeyi paralel olacak şekilde, pinin konumu ayarlanır. Aşınma yüzeyleri tam temas haline geldiğinde pens sıkılarak pin sabitlenir (Şekil 3.3). Sisteme etki eden sürtünme kuvveti F_s , cihaza entegre yük hücresi ile anlık olarak ölçülerek ethernet portu üzerinden bağlı olduğu bilgisayara aktarılır. Bilgisayarda çalışan yazılım aracılığıyla okunulan kuvvet değerleri bir dosyaya kayıt edilir. Deney yolu uzunluğuna karşılık gelen tur sayısında deney sonlandırılır. Sıkma penci gevşetilerek pin numunesi sökülür ve temizlendikten sonra kurutma işlemi uygulanır. Kuruyan test numunesi deney sonrası kütlesi ölçülerek kayıt edilir.

10 N'luk normal kuvvet saf Al-0.5 wt% GNP, 1 wt% ve 2 wt% GNP malzemeler ve farklı öğütme ve sinterleme parametreleri için test prosedürleri ayrı ayrı uygulanmıştır. Testin uygulanması Şekil 3.4 'te şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.3 Şematik görünüş

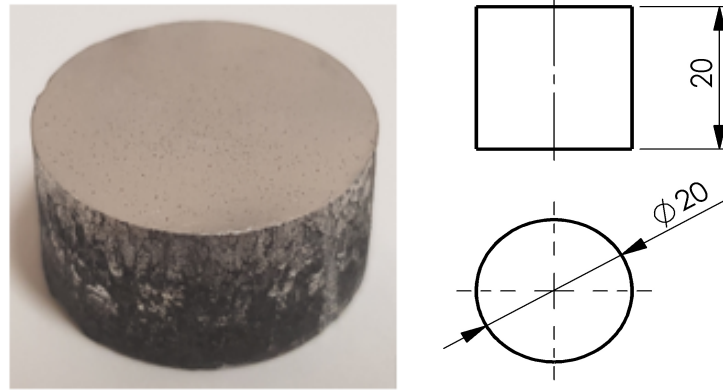


Şekil 3.4 Pin-on-Disk deney yapılış şeması

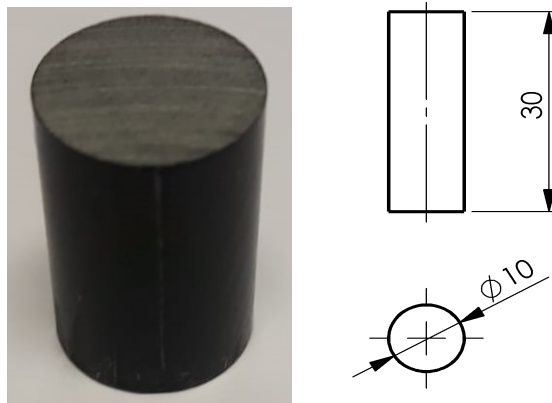
3.3 Pin Numuneleri

Pin deney malzemesi olarak kütlece %0, %0.5, %1 ve %2 oranında grafen içeren homojen tozlardan elde edilen Al-GNP kompozit numuneler ile %0, %0.5 grafen içeren epoksi nano grafen numuneler aşınma testleri için hazırlanmıştır. Al-GNP kompozit malzemede her bir karışım oranı için farklı öğütme sürelerine sahip numuneler test edilmiş, aşınma direnci bakımından en iyi sonucu veren bir saatlik öğütme süresine sahip numuneler deneylerde kullanılmıştır. Bir önceki bölümde hazırlanışı anlatılan metal ve polimer matrisli kompozitlerin aşınma testleri pin-on-disk deney düzeneği kullanılarak yapılmıştır.

Bu bölümde alüminyum metal matris ve epoksi polimerin aşınma deneyi sonuçları verilecektir. Grafen katkılı metal matris ve polimer kompozitlerin aşınma deneyi sonuçları bir sonraki tanılama bölümünde verilecektir. Aşınma testlerinde kullanılan pin boyutları ve fotoğrafları Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 'da gösterilmiştir.



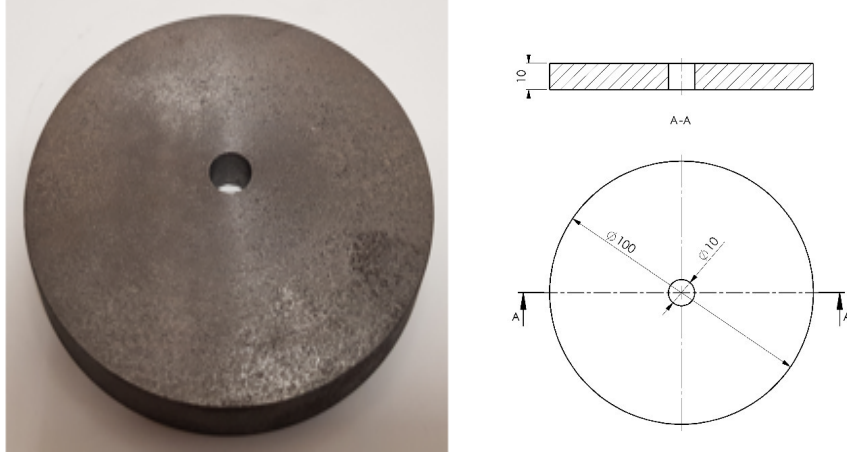
Şekil 3.5 Aşınma testlerinde kullanılan alüminyum pin ölçüleri ve görseli



Şekil 3.6 Aşınma testlerinde kullanılan epoksi pin numunesi

3.4 Aşındırma Diski

Dökme demir ve çelik diskler silindirik bloktan 10 mm kalınlığında olacak şekilde testere ile kesilmiştir. Çelik ve dökme demir diskler aynı boyutlara sahip olup disklerin ölçüsü ve dökme demir diskin görseli Şekil 3.7 'de verilmiştir.



Şekil 3.7 Aşınma testlerinde kullanılan aşındırma diski görseli ve ölçüleri

Deney sonrası çelik disklerin fotoğrafları Şekil 3.8 , Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 'da verilmiştir.

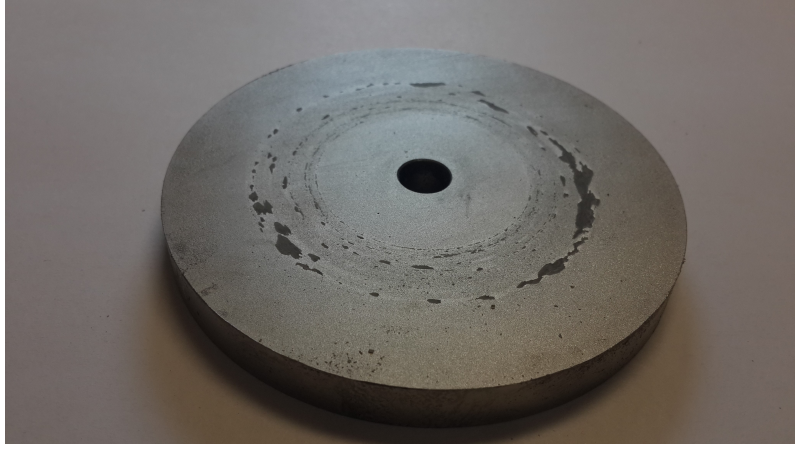
3.5 Alüminyum ve Epoksi Matrislerin Aşınma Karakteristikleri

Deneylerde kullanılan aşındırıcı çelik diskler 100 mm çapındaki çelik bloktan 10 mm kalınlıkta kesilmiş ve disk yüzeyleri elektro erezyon yöntemi kullanılarak üç farklı yüzey pürüzlülük değerinde olacak şekilde dalma erezyon yöntemi ile işlenmiştir. Elde edilen üç farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip çelik diskler ve bir yüzey pürüzlülüğüne sahip döküm disk ile tüm pin numunelerinin aşınma testleri yapılmıştır.

Pin numunesinin kontak bölgesi ile disk yüzeyinin her deneyde aynı olması için, pin numunesi cihaz üzerindeki tutucuya yerleştirilirken numunenin aşınma yüzeyi ile disk yüzeyi paralel temas edecek şekilde olmasına dikkat edilmiştir.

Deney sırasında yük hücresi ile anlık olarak ölçülen sürtünme kuvveti değeri iki saniyelik aralıklarla deney tesisatına ethernet üzeinden bağlı olan bilgisayar tarafından kayıt alınmıştır. Deneylerde aşınma mesafesi 500 metre olarak alınmış, testler süresince 1100 adet sürtünme kuvveti değeri kaydedilmiştir. 10 N yük altında test edilen malzemeler için sürtünme kuvveti-yol grafikleri Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 'de gösterilmiştir.

ASTM G99-05 test prosedürüne uygun olarak her test öncesinde ve sonrasında



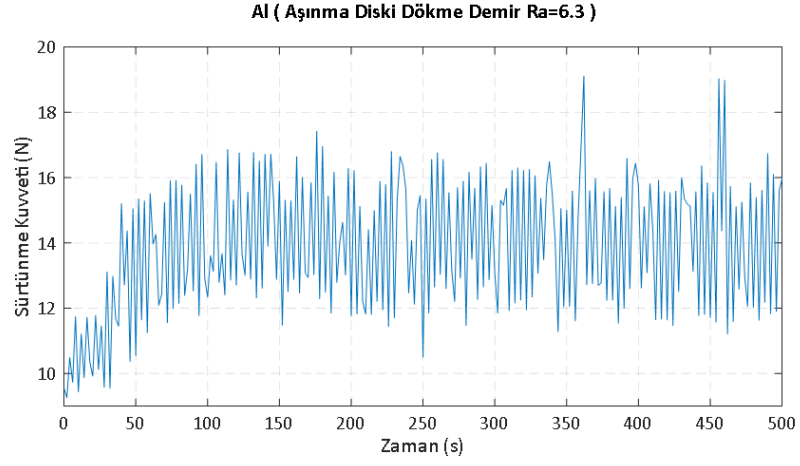
Şekil 3.8 Deney sonrası 20 VDI çelik



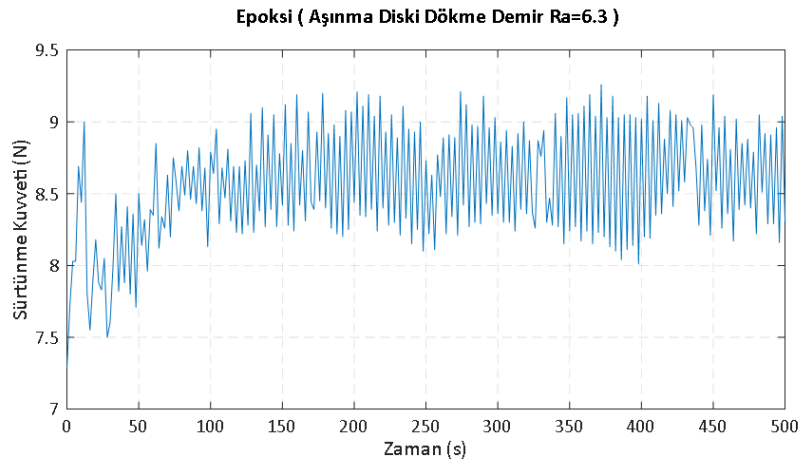
Şekil 3.9 Deney sonrası 30 VDI çelik



Şekil 3.10 Deney sonrası 45 VDI çelik



Şekil 3.11 Alüminyum metal matrisli kompozitin sürtünme kuvveti değişimi



Şekil 3.12 Epoksi polimer matrisli kompozitin sürtünme kuvveti değişimi

aşınma malzeme çifti etil alkol ile temizlenmiştir. Her temizleme sonrasında 2 dk boyunca sıcak havaya maruz bırakılarak kurutulmuş, ayrıca 2 dk boyunca soğuk hava tutulmuştur. Test öncesi ve sonrasında temizleme işlemlerinden sonra kütle ölçümleri yapılarak aşınma kaybı (Δm) hesaplanmıştır. Pin kütleleri her testin başlangıcında ve test bitiminde ölçülebildiği için pin aşınma kütle kaybı lineer olarak kabul edilmiştir. Saf alüminyum ve saf epoksi numunelerinin dökme demir ve çelik disklerle karşı aşınma kayıpları Tablo 3.2 'de verilmiştir.

Pin Malzemesi	Kütle Kaybı [gr]
Alüminyum	0.1149
Epoksi	0.0264

Tablo 3.2 Alüminyum ve epoksi aşınma kayıpları

Her bir pin numunesine disk yönünde dik olarak uygulanan 10 N'luk normal yük altında test edilmiştir. Kayma hızı deney boyunca 0.22 m/s 'dir ve ölçümler 500 m mesafe için gerçekleştirilmiştir. Sürtünme katsayısı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$\mu = \frac{F_s}{F_N} \quad (3.1)$$

μ : Sürtünme Katsayısı

F_s : Sürtünme Kuvveti [N]

F_N : Normal Kuvvet [N]

Aşınma oranı ise Denklem 3.2 ile hesaplanmıştır.

$$K_s = \frac{\Delta V}{F_N \cdot l} \quad (3.2)$$

K_s : Aşınma oranı [$m^3 N^{-1} m^{-1}$]

ΔV : Hacim kaybı [m^3]

F_N : Normal Kuvvet [N]

l : Alınan yol [m]

Aşınma oranında gerekli olan hacim kaybının (ΔV) hesabı için numunenin yoğunluğu hesaba katılarak Denklem 3.3 kullanılmıştır.

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (3.3)$$

ΔV : hacim kaybı [m^3]

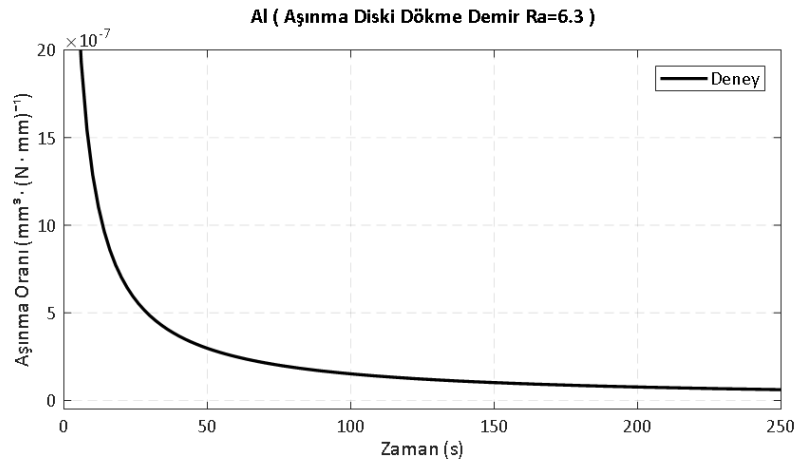
Δm : kütle kaybı [mg]

ρ : yoğunluk [mgm^{-3}]

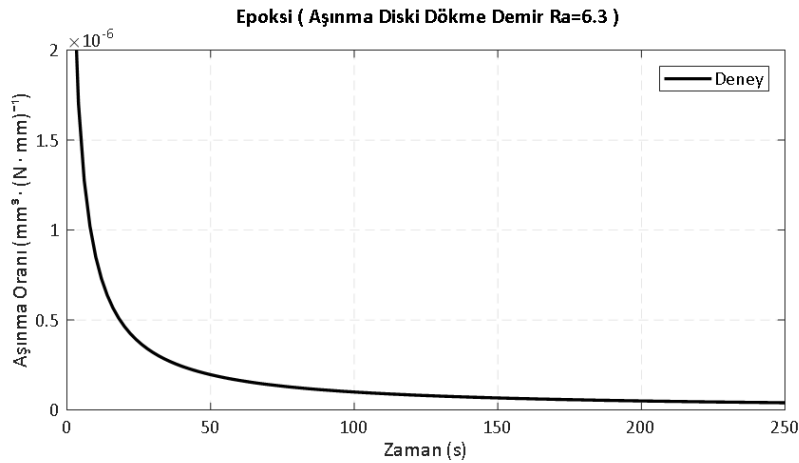
Denklem 3.3 'teki hacim kaybı ifadesi Denklem 3.2 'de yerine konulursa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$K_s = \frac{\Delta m}{F.l.\rho} \quad (3.4)$$

Saf alüminyum ve saf epoksi numunelerinin hesaplanan aşınma oranları Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 'te verilmiştir.



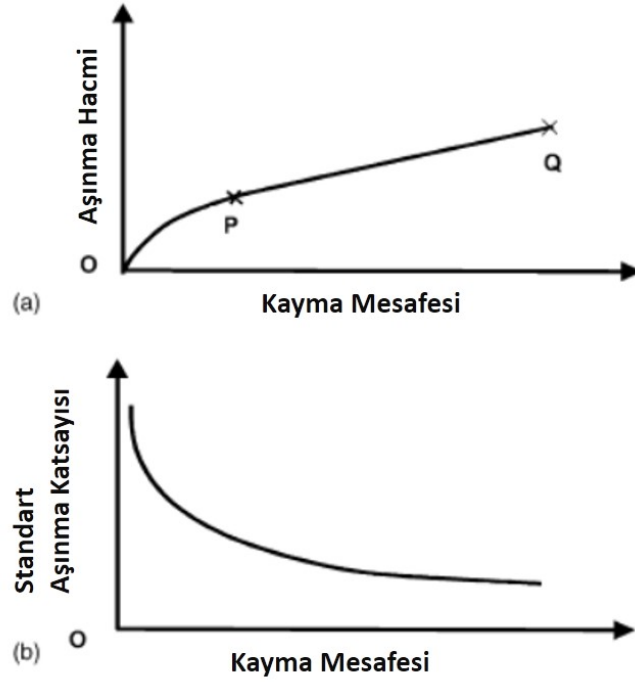
Şekil 3.13 Saf alüminyum aşınma oranı grafiği



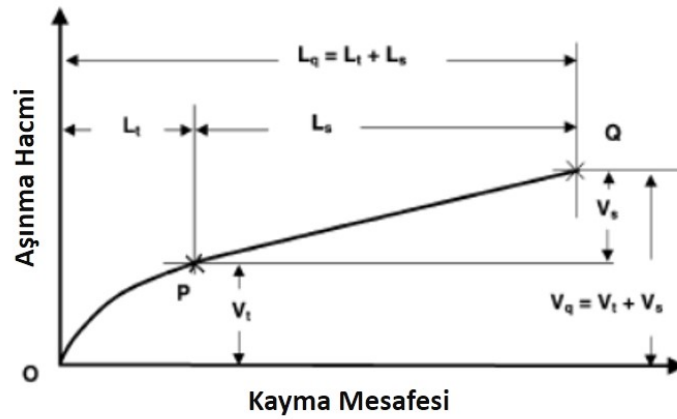
Şekil 3.14 Saf epoksi aşınma oranı grafiği

Yukarıda Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 ile verilen aşınma karakteristik eğrileri, 2003 yılında Yang tarafından yapılan çalışmadaki aşınma eğrileri ile benzer karakteristikte olduğu görülmektedir. Yang bu çalışmasında aşınma karakteristiğini Şekil 3.16 de verilen

p noktasını referans olarak iki farklı bölgeye ayırmış ve p noktasına kadar olan bölümü geçiş rejimi, p noktasından sonraki doğrusal bölümü ise sürekli rejim olarak tanımlamıştır. Bahsedilen her iki bölümü Şekil 3.16 de belirtilen parametrelerle iki farklı analitik formül geliştirerek modellemiştir [32].



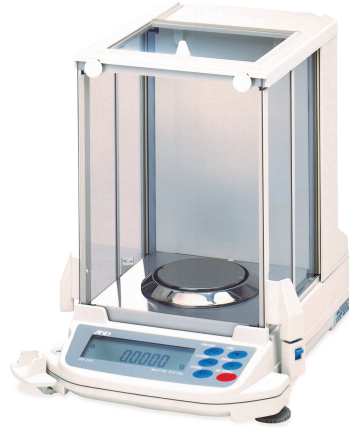
Şekil 3.15 Aşınma hacmi ve standart aşınma katsayısının kayma mesafesine göre değişimi [32]



Şekil 3.16 Yang'ın aşınma karakteristiği model parametreleri [32]

3.6 Kütle  l  m Ekipmanı

Test  ncesi ve sonrası numune kütle  l  m  ASTM G99-05 test standartlarında belirtildiği gibi ultra hassas ölçüm aletleri ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.17 ’te görülen ve  zellikleri Tablo 3.3 ’te verilen A&D GR-200 serisi 0.1 mg hassasiyetle mikro ölçüm yapabilen hassas terazi ile yapılan her teste ait numunelerin kütle ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.17 Hassas kütle ölçüm cihazı

Kütle �l��m Kapasitesi	42 g / 210 g
Minimum �l��m	0.01 mg / 0.1 mg
Yinelenebilirlik (Standart sapma)	0.02 mg / 0.1 mg
Doğrusallık	± 0.03 mg / ± 0.2 mg
Hassaslık Aralığı	± 2 ppm / $^{\circ}\text{C}$
�l�� Kefesi	$\varnothing 85$ mm

Tablo 3.3 Kütle  l  m nde kullanılan ekipmanın  zellikleri

4.1 Sistem Tanılama

Sistem tanılama kısaca, sistem üzerinden ölçülen giriş çıkış verilerini kullanarak, dinamik sistemlerin matematik modelini oluşturma olarak tanımlanır. Bu işlem esas olarak verilen bir model üzerinde parametrelerin sistem çıkışı ile uyşuncaya kadar ayarlanması ile yapılır. Elde edilen modelin geçerliliği için tanılama işleminde kullanılmamış olan veriler model çıkışı ile sınıanır. Bu teknik çok genelleşmiş modellere uygulanır. En çok kullanılan, fark denklemleri tanımlaması şeklinde olan ARX, ARMAX gibi zaman serisi modeller yanında, bütün doğrusal durum-uzay modeli tiplerine de uygulanır. Parametrik modelleme için model yapısının tanımlanması gereklidir. Bu işlem basitçe model mertebesinin belirlenmesi ile yapılır. Dinamik sistemlerin giriş-çıkış verilerinden faydalanarak tanılama yapmak için üç temel şeye ihtiyaç vardır:

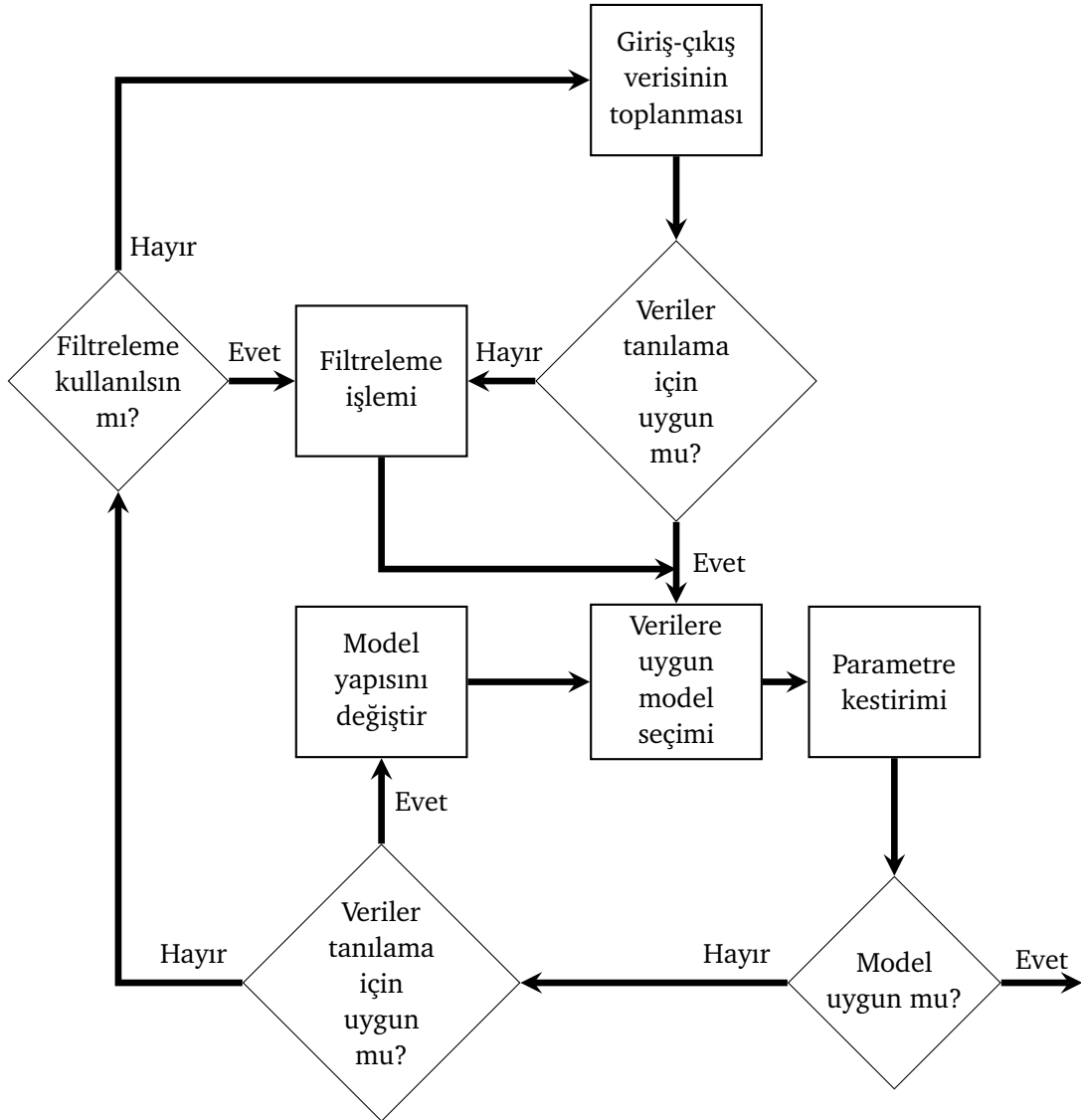
- Sistem giriş-çıkış verisi
- Belirli model yapılarından birinin seçimi
- Tanılama yöntemi

Tanılama işlemi esnasında model yapılarının hemen hepsi denenerek sisteme en uygun olan yapı belirlenmelidir. Tanılama işleminin aşamaları Şekil 4.1 'deki akış diyagramı ve aşağıdaki sıra ile verilebilir:

- Tanılanacak sistemin deney tesisatının tasarlanarak, giriş çıkış verisinin elde edilmesi
- Veriler incelenerek gerekiyorsa filtreleme yapılması
- Bir model tipi seçilerek yapısının tanımlanması
- Giriş-çıkış değerlerine bakarak, en uygun modelin verilen bir eğri uydurma kriterine göre hesaplanması

- Model özelliklerinin incelenmesi

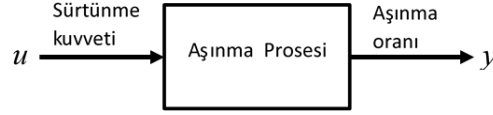
Eğer model yeterli ise tanılama işlemi bitmiştir, aksi takdirde 3. adıma geri dönülerek diğer bir model denenir. Bunun yanında 4. aşamaya dönülerek başka bir yöntem tercih edilebilir ya da 1 ve 2. adımlara dönülerek giriş-çıkış verileri üzerinde gerekli çalışmalar yapılabilir [43].



Şekil 4.1 Tanılama işleminin aşamaları

Aşınma prosesini lineer ve non-lineer yapıda modelleyebilmek için tanılama yöntemi kullanılmış ve aşınma prosesi tek giriş-tek çıkış (SISO: Single input-single output) kabul edilmiştir. Deney sırasında ölçülen teğetsel kuvvet aşınma prosesinde giriş olarak, malzeme kaybına bağlı olarak hesaplanan aşınma oranı değişimi ise sistem çıkışı olarak alınmış ve Şekil 4.2 'de gösterilmiştir.

Doğrusal modelleme için transfer fonksiyonu modeli, proses modeli ve doğrusal



Şekil 4.2 Tanılanacak sistem için giriş çıkış verisi

olmayan ARX model yapıları kullanılmıştır [44]. Birinci mertebe sürekli zaman transfer fonksiyonunun ve proses modelinin yapısı Denklem 4.1 ve Denklem 4.2 'deki gibidir.

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + T_{p1}s} \quad (4.1)$$

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + T_{p1}s} e^{-T_d s} \quad (4.2)$$

Her iki doğrusal modelde $G(s)$ prosesin transfer fonksiyonunu, K_p sürekli rejim kazancını, T_{p1} zaman sabitini, s laplace operatörünü ve T_d zaman gecikmesini ifade etmektedir. Üçüncü model yapısı olarak seçilen NARX (nonlinear autoregressive network with exogenous inputs) modeli, zaman serisi modellemesinde yaygın olarak kullanılan lineer ARX modeline dayanmaktadır. Doğrusal ARX model yapısı ise aşağıdaki gibi verilebilir:

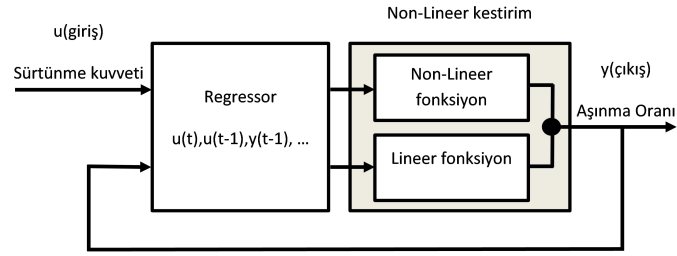
$$\begin{aligned} y(t) + a_1 y(t-1) + a_2 y(t-2) + \dots + a_{na} y(t-na) \\ = b_1 u(t) + b_2 u(t-1) + \dots + b_{nb} u(t-nb+1) + e(t) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Bu yapı, mevcut çıkış $y(t)$ 'nin, geçmiş çıkış değerleri, güncel ve geçmiş giriş değerleri ağırlıklı toplamı olarak tahmin edildiğini gösterir. Yukarıdaki Denklem yeniden düzenlenirse, yeni ifade aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\begin{aligned} y_p(t) = [-a_1, -a_2, \dots, -a_{na}, b_1, b_2, \dots, b_{nb}] \\ * [y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-na), u(t), u(t-1), \dots, u(t-nb-1)]^T \end{aligned} \quad (4.4)$$

Doğrusal ARX modeli, güncel çıkışı y_p , regresör olarak adlandırılan gecikmeli giriş ve çıkış değerlerinin ağırlıklı toplamı olarak tahmin eder. Öte yandan NARX modeli, aşağıdaki Denklem 4.5 'te gösterilen daha esnek doğrusal olmayan bir haritalama işlevine sahiptir:

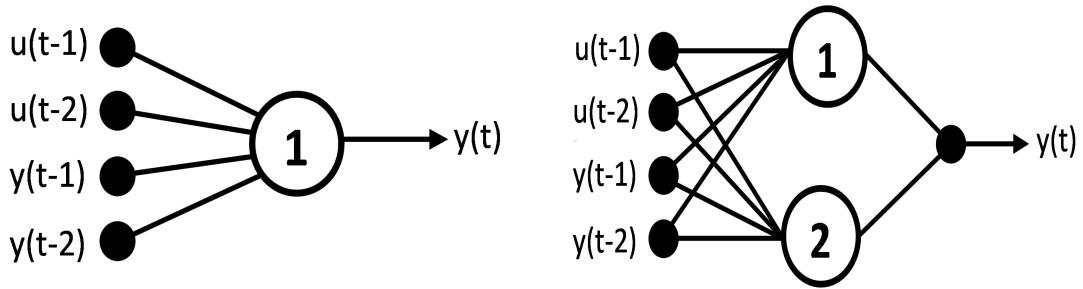
$$y_p(t) = f(y(t-1), y(t-2), y(t-3), \dots, u(t), u(t-1), u(t-2), \dots) \quad (4.5)$$



Şekil 4.3 Doğrusal olmayan ARX modeli blok diyagramı

NARX regresörleri hem gecikmeli giriş değişkenleri hem de gecikmeli çıkış değişkenlerinin daha karmaşık, doğrusal olmayan ifadeleri olabilir. NARX modeli blok diyagramı Şekil 4.3'te verilmiştir.

Aşınma davranışını modellemek için gizli katmanda bir ya da iki üniteye sahip, Şekil 4.4 de gösterilen tek katmanlı NARX ağı, doğrusal olmayan Sigmoid fonksiyonu kullanılarak tasarlanmıştır.



Şekil 4.4 Tek nöronlu ve çift nöronlu ağ yapısı

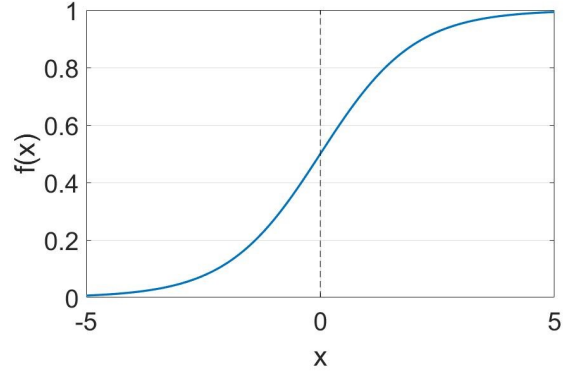
Burada $u(t-1)$ ve $u(t-2)$ geçmişe ait sistem girişini, $y(t-1)$ ve $y(t-2)$ ise geçmişe ait sistem çıkışını, $y(t)$ ise hesaplanan ağ çıkışını ifade etmektedir.

Tek katmanlı ağ yapısında kullanılan sigmoid fonksiyonu Denklem 4.6 ile aşağıda verilmiştir:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4.6)$$

Doğrusal olmayan sigmoid fonksiyonunun grafiği ayrıca Şekil 4.5 ile verilmiştir.

Tanılama çalışması için Matlab 'in tanılama modülü kullanılmıştır. Model parametrelerini ve ağ ağırlık katsayılarını hesaplamak için sayısal minimizasyon algoritması olarak Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır.



Şekil 4.5 Sigmoid fonksiyonu

4.2 Deney ve Tanılama Sonuçları

Deney numuneleri test öncesi ve sonrası, etil alkol ile temizlenmiş olup hassas kütle ölçüm cihazı ile kütleleri ölçülmüştür. Test cihazına bağlı yük hücresi vasıtası ile deney boyunca malzeme çiftleri arasında oluşan sürtünme kuvveti değerleri ölçülerek bilgisayara kaydedilmiştir. 500 m kayma mesafesi boyunca gerçekleştirilen test sonuçları, sürtünme kuvveti-zaman ve aşınma oranı-zaman grafikleri ile verilmiştir.

4.2.1 Al-GNP

Farklı grafen oranlarında takviyeye sahip alüminyum metal matrisli kompozitlerin, dökme demir (Ra 6.3) ve çelik (Ra 1.6-3.2-12.5) disklerle karşı aşınma oranlarının tanılanmış NARX, transfer fonksiyonu ve proses modelleri Tablo 4.1 'de verilmiştir.

Disk Malzemesi (Yüzey Pürüzlülüğü)	Pin Malzemesi (Grafen Oranı)	Doğrusal Transfer Fonksiyonu Modeli $G(s) = \frac{K_p}{1+T_{p1}s}$ Deney Datasına Uyum %	Proses Modeli $G(s) = \frac{K_p}{1+T_{p1}s} * e^{-\tau_d*s}$ Deney Datasına Uyum %	Doğrusal Olmayan NARX Modeli Deney Datasına Uyum %
Dökme Demir (Ra 6.3)	Al-GNP (%0)	$G_0(s) = \frac{-1.066*10^{-10}}{s+0.1927}$ %69.86	$G_0(s) = \frac{1.8895*10^{-9}}{1+16.552s} * e^{-9.361*10^{-6}s}$ %81.3	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %95.72
Çelik (Ra 1.6)	Al-GNP(%0)	$G_0(s) = \frac{9.2217*10^{-10}}{1+10000s}$ %90.1	$G_0(s) = \frac{9.818*10^{-10}}{1+9414.5s} * e^{-0.054s}$ %71.92	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %93.62
Çelik (Ra 3.2)	Al-GNP(%0)	$G_0(s) = \frac{5.3988*10^{-9}}{1+10000s}$ %89.73	$G_0(s) = \frac{2.4665*10^{-9}}{1+3050.7s} * e^{-0.016s}$ %72.37	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %95.32
Çelik (Ra 12.5)	Al-GNP(%0)	$G_0(s) = \frac{4.4441*10^{-10}}{1+10000s}$ %77.67	$G_0(s) = \frac{6.1869*10^{-8}}{1+9906.3s} * e^{-0.018s}$ %73.89	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %97.43
Dökme Demir (Ra 6.3)	Al-GNP(%0.5)	$G_0(s) = \frac{2.175*10^{-9}}{s+0.1927}$ %69.85	$G_0(s) = \frac{4.201*10^{-8}}{1+11.905s} * e^{-0.27433s}$ %83.85	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %95.1
Çelik (Ra 1.6)	Al-GNP(%0.5)	$G_0(s) = \frac{-5.9354*10^{-10}}{1+1.5588s}$ %83.74	$G_0(s) = \frac{5.0833*10^{-9}}{1+17.853s} * e^{-0s}$ %51.37	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %96.23
Çelik (Ra 3.2)	Al-GNP(%0.5)	$G_0(s) = \frac{2.9818*10^{-8}}{1+10000s}$ %72.51	$G_0(s) = \frac{1.2739*10^{-8}}{1+5.0193s} * e^{-0s}$ %74.01	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %94.87
Çelik (Ra 12.5)	Al-GNP(%0.5)	$G_0(s) = \frac{2.8881*10^{-7}}{1+4.3657s}$ %77.53	$G_0(s) = \frac{5.02*10^{-6}}{1+57.225s} * e^{-0s}$ %75.93	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %99.09
Dökme Demir (Ra 6.3)	Al-GNP(%1)	$G_0(s) = \frac{-1.849*10^{-10}}{s+0.1925}$ %69.98	$G_0(s) = \frac{3.4276*10^{-9}}{1+11.754s} * e^{-6.059*10^{-9}s}$ %82.45	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %98.98
Çelik (Ra 1.6)	Al-GNP(%1)	$G_0(s) = \frac{1.1329*10^{-9}}{1+10000s}$ %90.42	$G_0(s) = \frac{3.2715*10^{-9}}{1+732.7s} * e^{-0.028s}$ %75.93	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %93.9
Çelik (Ra 3.2)	Al-GNP(%1)	$G_0(s) = \frac{2.9959*10^{-8}}{1+10000s}$ %81.86	$G_0(s) = \frac{6.5729*10^{-9}}{1+909.41s} * e^{-0.102s}$ %81.86	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %95.35
Çelik (Ra 12.5)	Al-GNP(%1)	$G_0(s) = \frac{1.9211*10^{-7}}{1+10000s}$ %77.56	$G_0(s) = \frac{3.1648*10^{-7}}{1+3.4967s} * e^{-0.004s}$ %77.37	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %98.3
Dökme Demir (Ra 6.3)	Al-GNP(%2)	$G_0(s) = \frac{-2.139*10^{-10}}{s+0.1924}$ %69.95	$G_0(s) = \frac{3.6968*10^{-9}}{1+15.232s} * e^{-1.8575s}$ %81.62	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %97.32
Çelik (Ra 1.6)	Al-GNP(%2)	$G_0(s) = \frac{1.8599*10^{-9}}{1+10000s}$ %73.84	$G_0(s) = \frac{4.328*10^{-9}}{1+10000s} * e^{-0.016s}$ %71.39	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %99.21
Çelik (Ra 3.2)	Al-GNP(%2)	$G_0(s) = \frac{3.6227*10^{-8}}{1+10000s}$ %89.93	$G_0(s) = \frac{3.9724*10^{-8}}{1+10000s} * e^{-0s}$ %72.38	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %93.68
Çelik (Ra 12.5)	Al-GNP(%2)	$G_0(s) = \frac{-2.4484*10^{-7}}{1+10000s}$ %83.34	$G_0(s) = \frac{4.818*10^{-7}}{1+5.5595s} * e^{-0s}$ %75.08	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %99.97

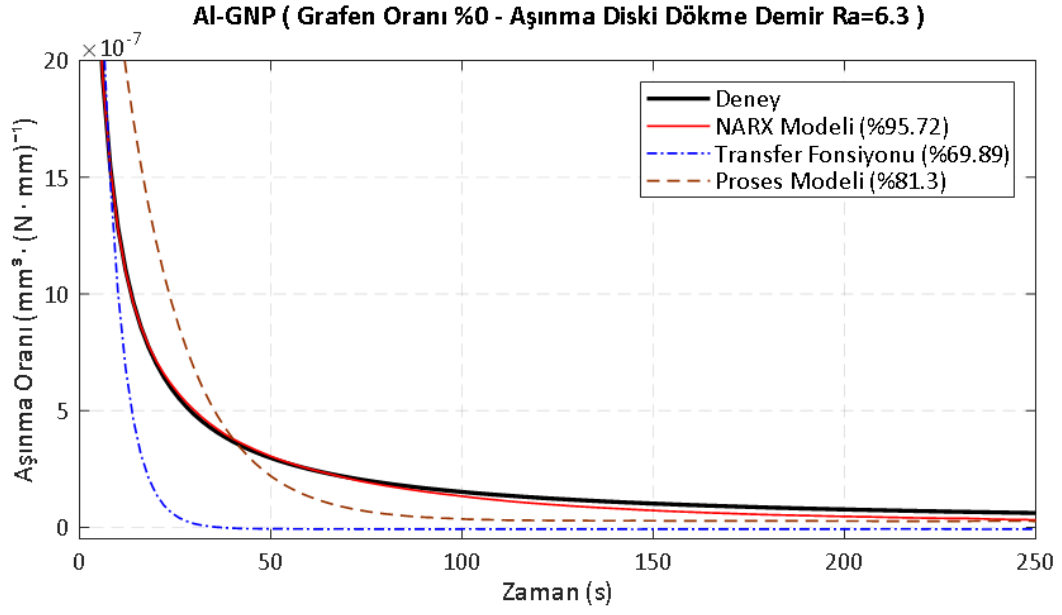
Tablo 4.1 Al-GNP metal matrisli kompozitlerin farklı yüzey pürüzlülük değerlerine sahip disklerle yapılan aşınma deneylerinin aşınma oranlarının tanılanmış modelleri

Şekil 4.6 'da grafen katkısız alüminyum pin numunenin, yüzey pürüzlülüğü Ra 1.6 olan dökme demir(DD) diske karşı gösterdiği aşınma davranışı aşınma oranı-zaman grafiği olarak verilmiştir. Aşınma prosesi tek giriş tek çıkışlı bir sistem olarak kabul edilerek tanılama yapılmıştır. Giriş değeri olarak bilgisayarda kayıt altına alınan teğetsel kuvvet değeri, çıkış değeri olarak da aşınma kaybına bağlı olarak hesaplanan aşınma oranı seçilmiştir. Deney verilerinden elde edilen değerlerle elde edilen NARX, Transfer fonksiyonu (TF) ve proses modellerinin benzetim sonuçları ve deney sonucu ile karşılaştırılması grafik olarak verilmiştir. Deney sonuçlarına en yakın model, %95.72 uyum ile NARX modelidir. En uzak model ise %69.89 uyum ile transfer fonksiyonu olmuştur. Şekil 4.7 'de ise grafen katkısız Al pin ile DD (Ra 6.3) karşı disk arasında oluşan sürtünme kuvvetinin zamana bağlı grafiği verilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı 1.5'tir.

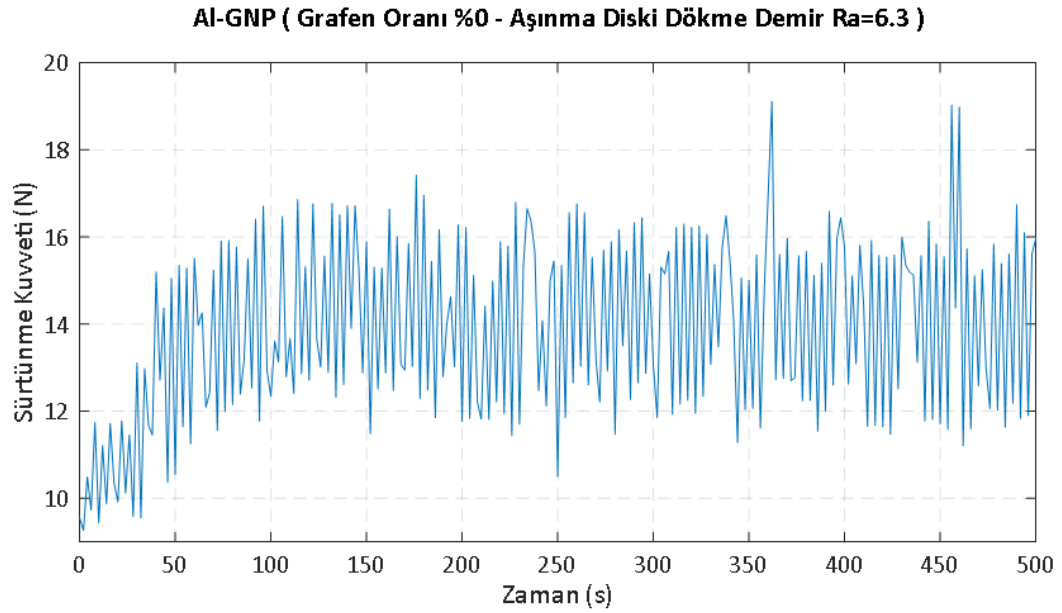
%0.5 grafen katkılı Al-GNP'nin DD (Ra 6.3) karşı diskine karşı gösterdiği aşınma oranı-zaman grafiği, model eğrileri ile birlikte Şekil 4.8 'de verilmiştir. Deney sonuçlarına en yakın model, %95.1 uyum ile NARX modelidir. En uzak model ise, %69.85 uyum ile transfer fonksiyonudur. İki numune arasında oluşan sürtünme kuvveti-zaman grafiği Şekil 4.9 'da verilmiştir. Sonuçlara göre ortalama sürtünme katsayısı 1.3 hesaplanmıştır.

Şekil 4.10 'da %1 grafen takviyeli alüminyum kompozitin, DD (Ra 6.3) diske karşı aşınma oranı-zaman grafiği ve NARX modeli, TF modeli ve proses modeli eğrileri verilmiştir. Deney sonuçlarına en yakın model, %98.98 uyum ile NARX modelidir. En uzak model ise, %69.85 uyum ile transfer fonksiyonudur. Disk ve pin arasında oluşan sürtünme kuvveti-zaman grafiği Şekil 4.11 'de verilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı 1.1 olarak hesaplanmıştır.

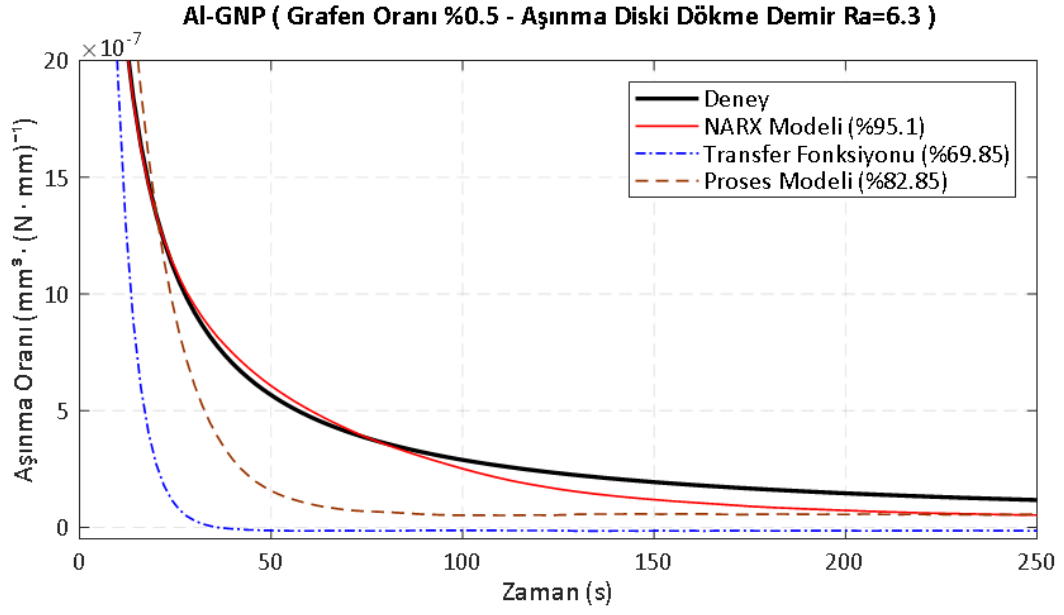
Şekil 4.12 'de %2 grafen katkılı Al-GNP pin numunenin, DD (Ra 6.3) karşı diske karşı aşınma oranının zamana bağlı grafiği ile NARX modeli, Transfer fonksiyonu ve proses modeli eğrileri verilmiştir. Deney sonuçlarına en yakın model %97.32 uyumlu NARX modelidir. En uzak model ise %69.95 uyumlu transfer fonksiyonudur. Numuneler arasında oluşan sürtünme kuvveti- zaman grafiği Şekil 4.13'te verilmiştir. Hesaplanan ortalama sürtünme katsayısı 1.5'tir.



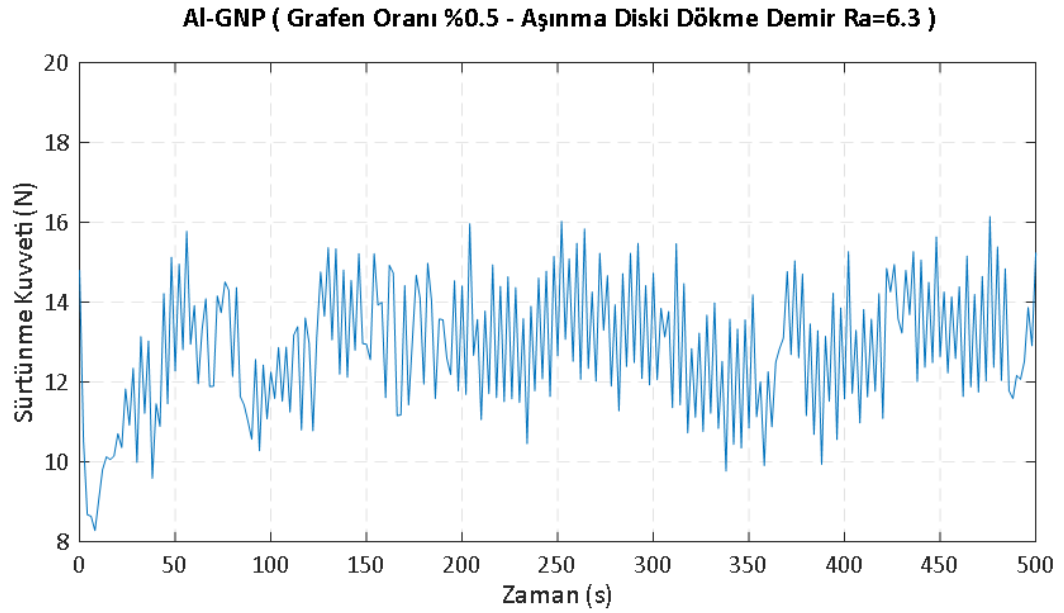
Şekil 4.6 Al-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: dökme demir disk, Ra 6.3)



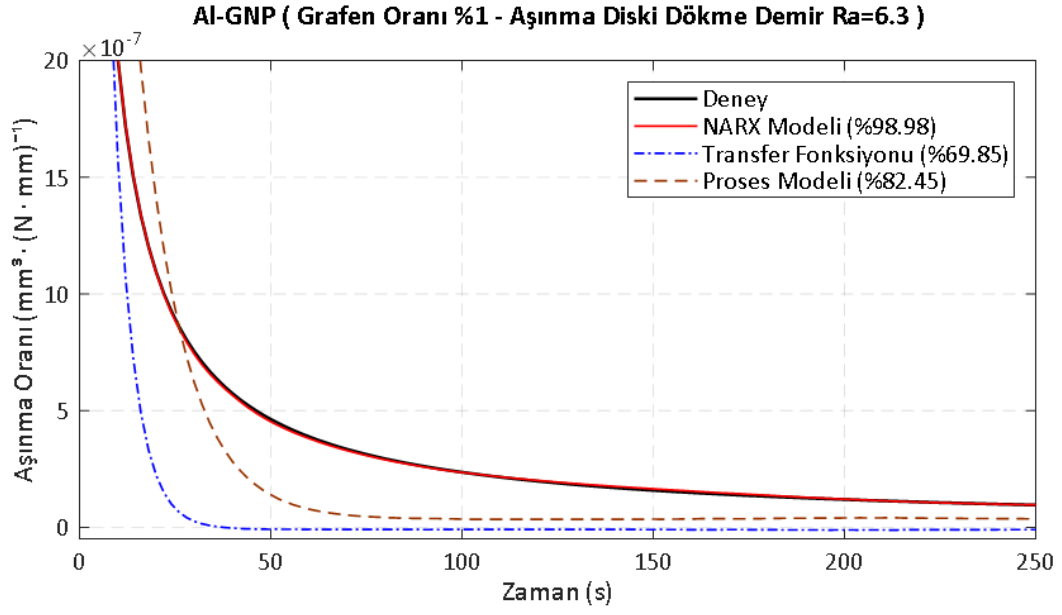
Şekil 4.7 Al-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile dökme demir (Ra 6.3) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



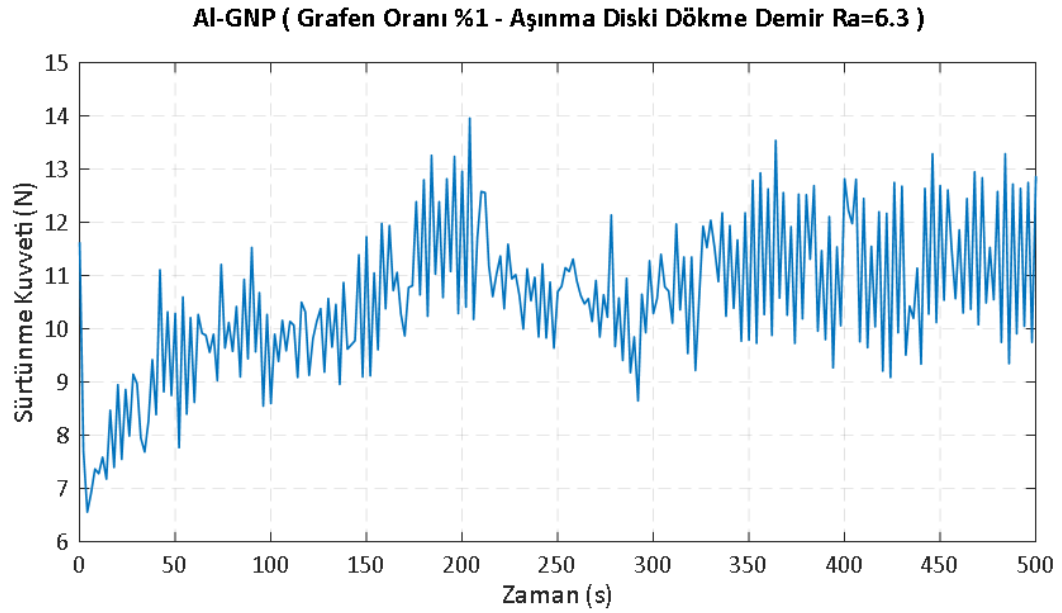
Şekil 4.8 Al-GNP (Grafen oranı %0,5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: dökme demir disk, Ra 6.3)



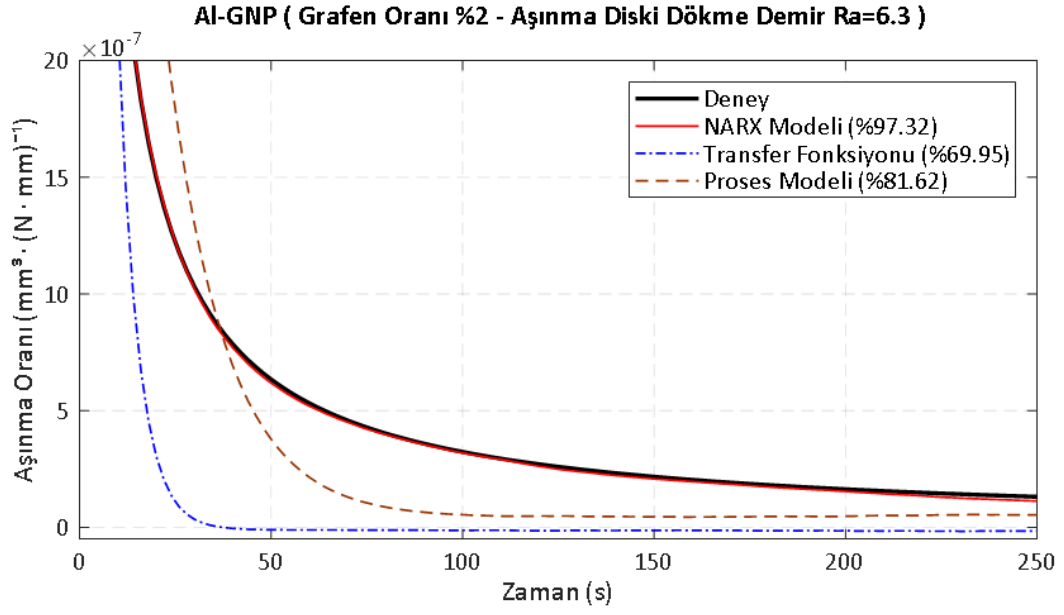
Şekil 4.9 Al-GNP (Grafen oranı %0,5) malzemesi ile dökme demir (Ra 6.3) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



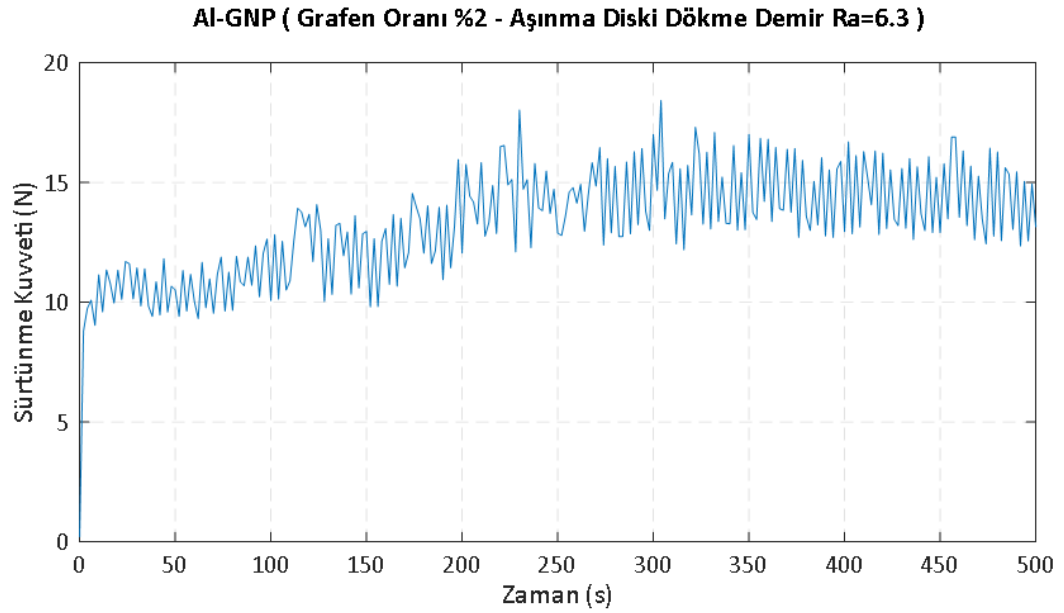
Şekil 4.10 Al-GNP (Grafen oranı %1) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: dökme demir disk, Ra 6.3)



Şekil 4.11 Al-GNP (Grafen oranı %1) malzemesi ile dökme demir (Ra 6.3) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



Şekil 4.12 Al-GNP (Grafen oranı %2) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: dökme demir disk, Ra 6.3)



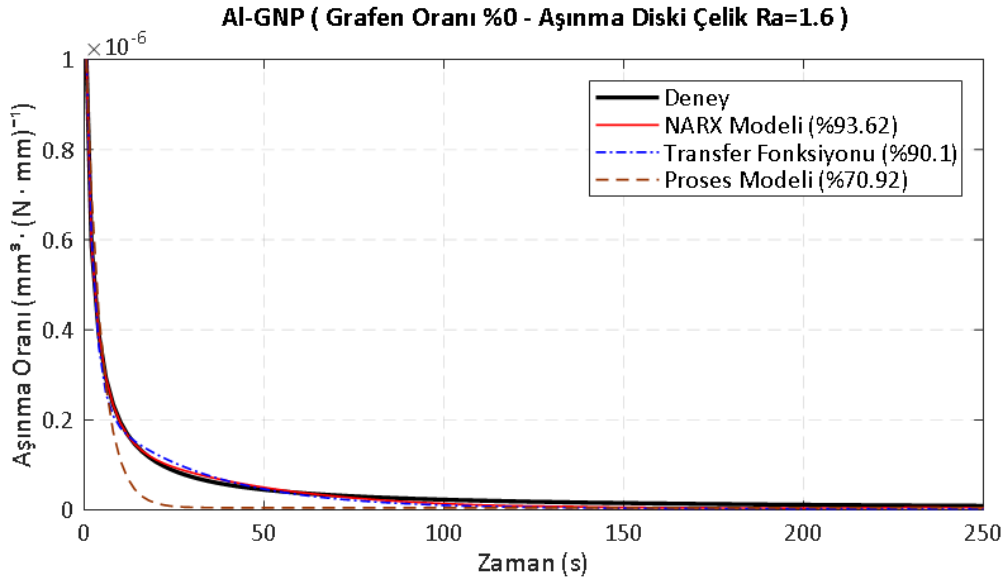
Şekil 4.13 Al-GNP (Grafen oranı %2) malzemesi ile dökme demir (Ra 6.3) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği

Grafen katkısız alüminyum pin numunenin, çelik (Ra 1.6) karşı diskine karşı aşınma oranı eğrisi Şekil 4.14 'te, proses modeli, transfer fonksiyonu ve NARX modeli eğrileriyle birlikte verilmiştir. En yakın model, %93.62 uyum ile NARX modelidir. Transfer fonksiyonu modeli, %90.1 uyum göstermiştir. En düşük model ise %70.92 uyum ile proses modelidir. Şekil 4.15 'te, pin ve disk arasındaki sürtünme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği verilmiştir. Hesaplanana sürtünme katsayısı 1.51'dir.

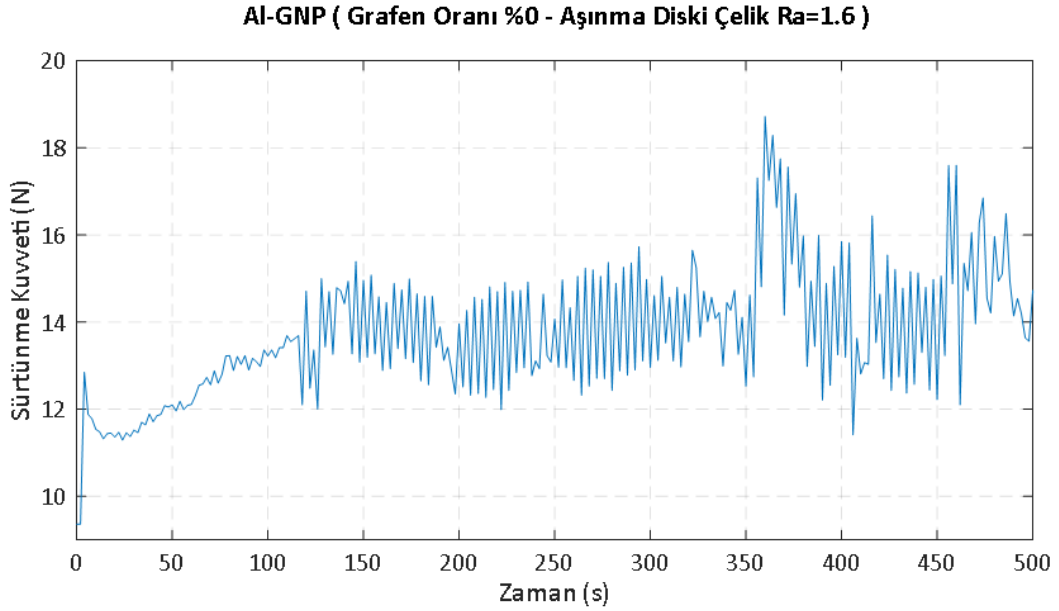
Şekil 4.16 'da %0.5 grafen takviyeli Al-GNP'nin çelik (Ra 1.6) karşı diskine karşı aşınma oranı eğrisi ile birlikte NARX modeli, transfer fonksiyonu modeli ve proses modeli eğrileri verilmiştir. %93.62 uyum ile en yakın model NARX modeli olmuştur. Transfer fonksiyonu modeli %90.1 uyumludur. En uzak model ise %70.92 uyum ile proses modelidir. Numuneler arasındaki sürtünme kuvvetinin zamana bağlı değişimi ise 4.17 'de verilmiştir. Hesaplanan ortalama sürtünme katsayısı 1.27'dir.

%1 grafen takviyeli Al-GNP'nin çelik (Ra 1.6) karşı diskine karşı aşınma oranı, Şekil 4.18 'de, NARX modeli, transfer fonksiyonu ve proses eğrileriyle birlikte verilmiştir. Grafik incelendiğinde en yakın modeller, sırasıyla %93.9 ve %90.42 uyum ile NARX modeli ve transfer fonksiyonu modelidir. Proses modeli ise %75.9 uyumludur. Şekil 4.19 'da ise iki numune arasındaki sürtünme kuvveti-zaman grafiği verilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı 1.54 hesaplanmıştır.

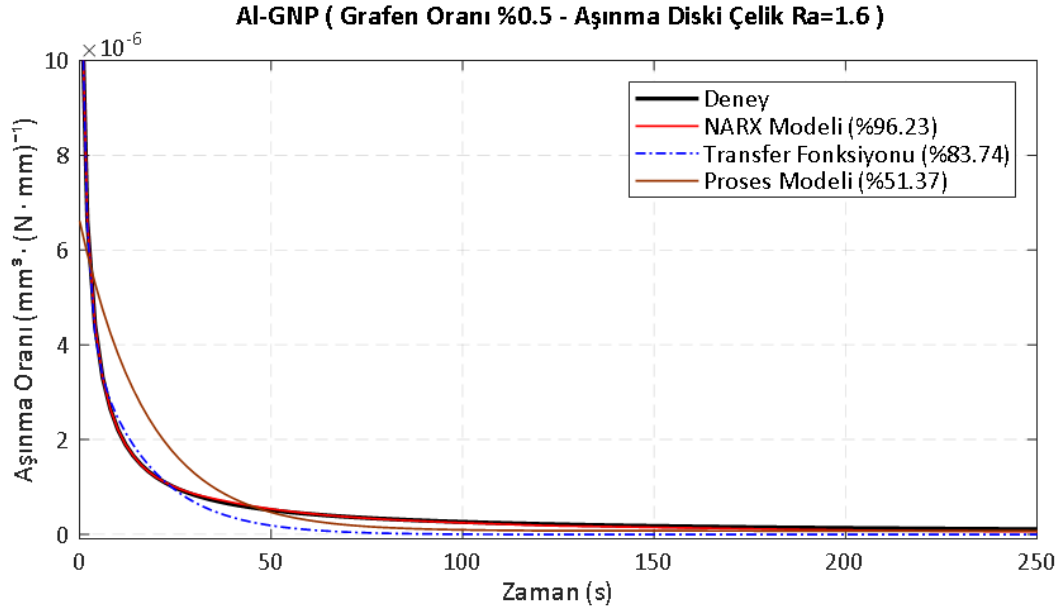
Şekil 4.20'de ise grafen takviyesi kütlece %2 olan alüminyum kompozitin, çelik (Ra 1.6) diskine karşı aşınma oranı, NARX modeli, proses modeli ve transfer modeli eğrileriyle birlikte verilmiştir. NARX modeli %99.21 uyum ile en yakın model olmuştur. Transfer fonksiyonu modeli ve proses modeli eğrileri sırasıyla %73.84 ve %71.39 uyum göstermiştir. İki numune arasındaki sürtünme zaman grafiği ise Şekil 4.21 'de verilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı 1.45 hesaplanmıştır.



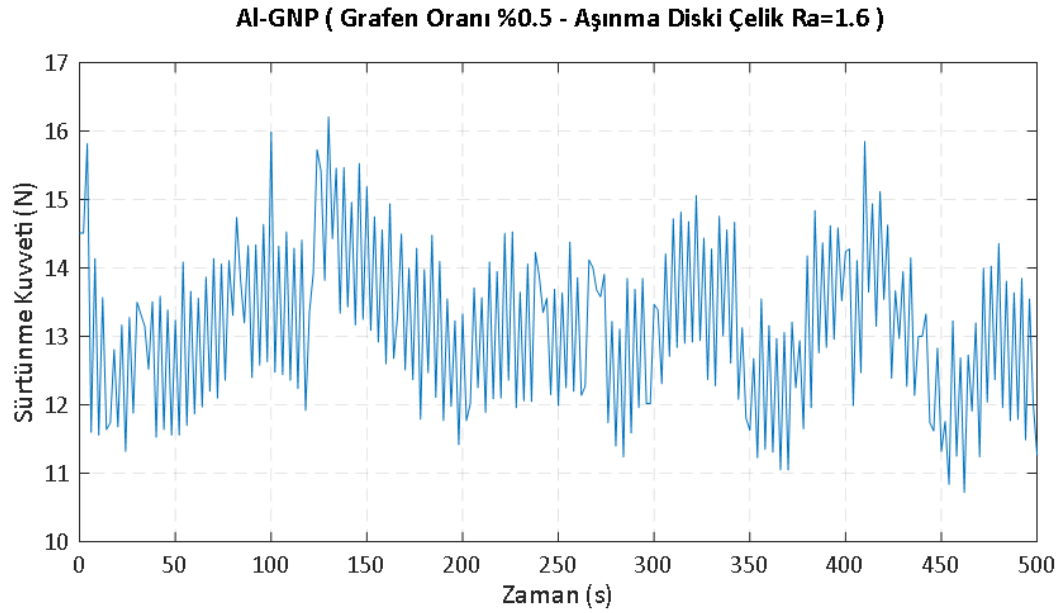
Şekil 4.14 Al-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 1.6)



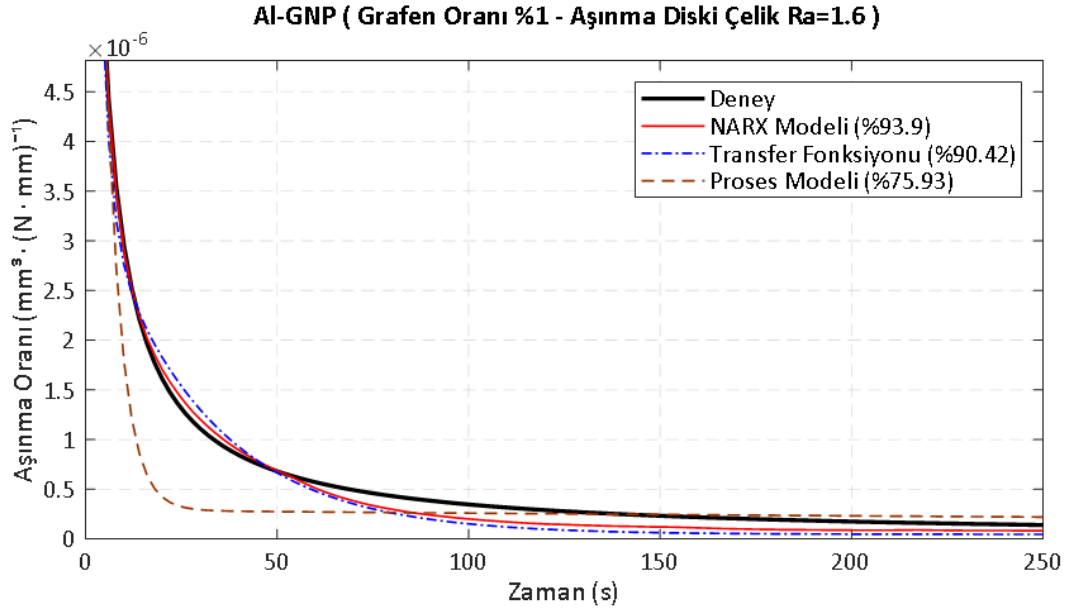
Şekil 4.15 Al-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile çelik (Ra 1.6) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



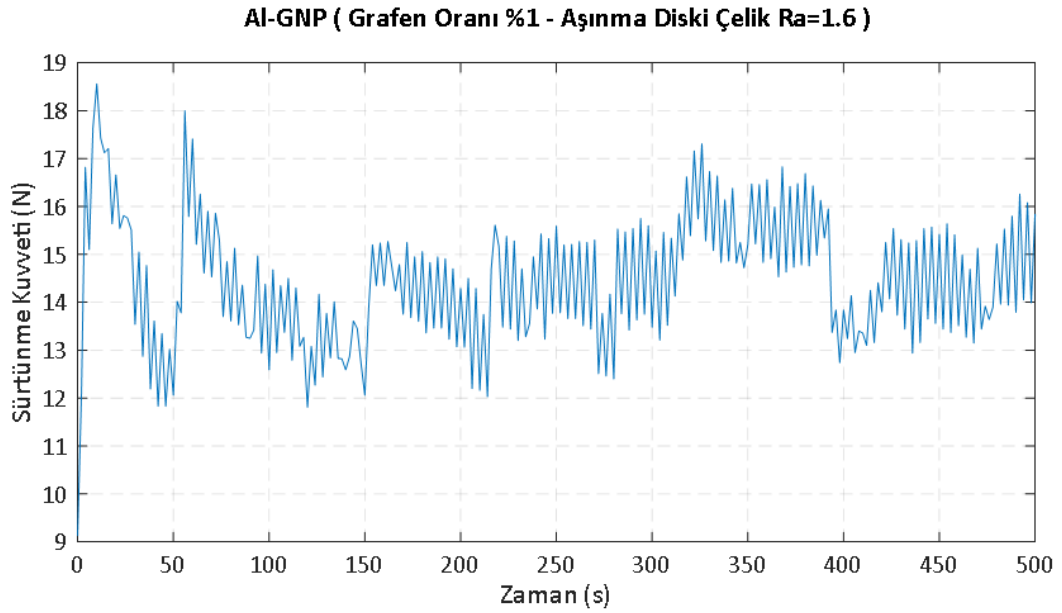
Şekil 4.16 Al-GNP (Grafen oranı %0,5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 1.6)



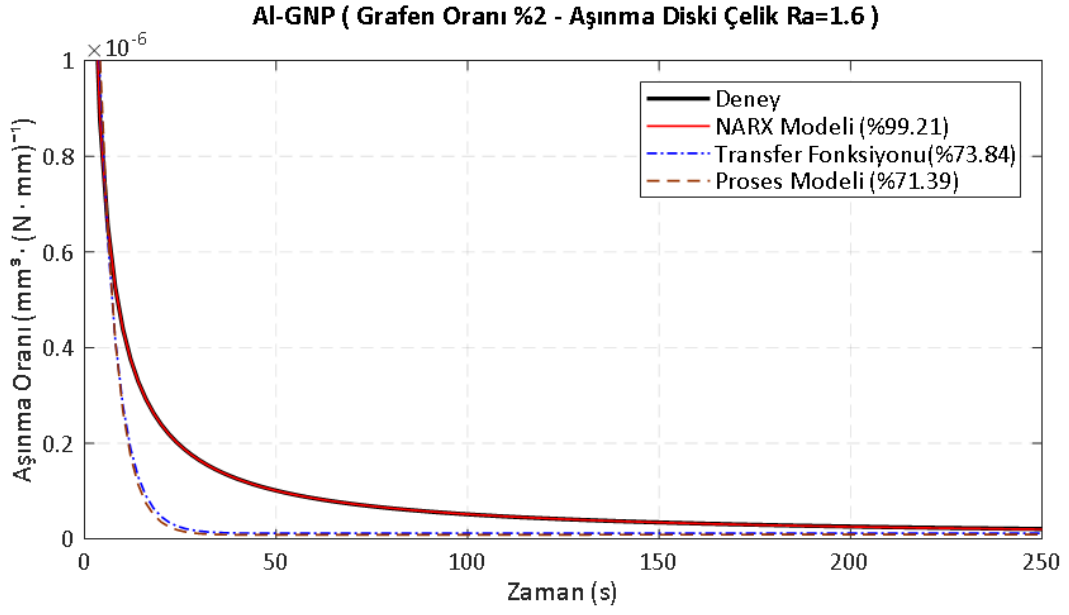
Şekil 4.17 Al-GNP (Grafen oranı %0,5) malzemesi ile çelik (Ra 1.6) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



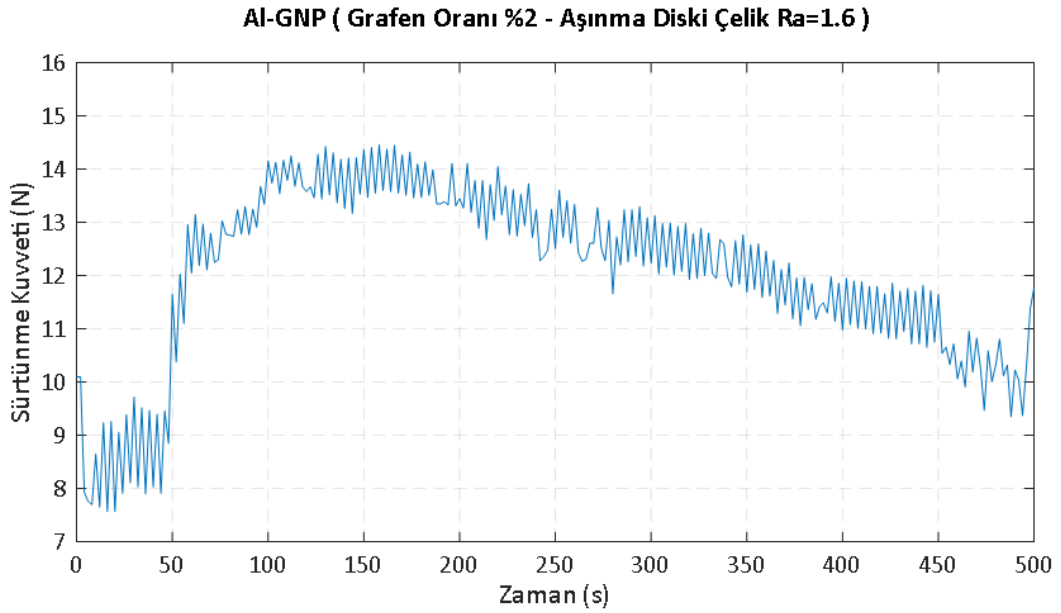
Şekil 4.18 Al-GNP (Grafen oranı %1) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 1.6)



Şekil 4.19 Al-GNP (Grafen oranı %1) malzemesi ile çelik (Ra 1.6) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



Şekil 4.20 Al-GNP (Grafen oranı %2) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 1.6)



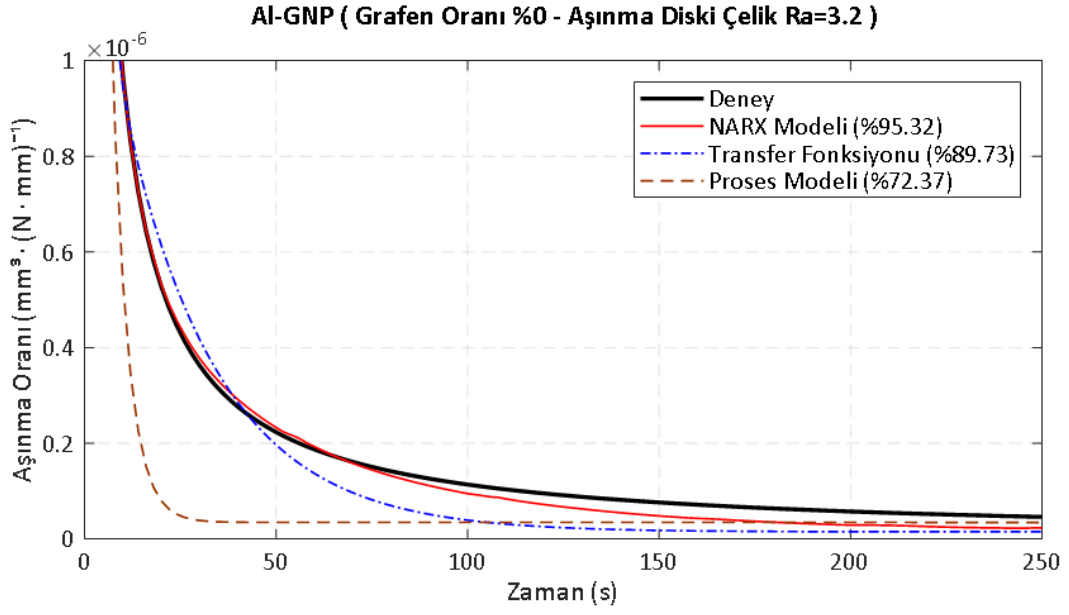
Şekil 4.21 Al-GNP (Grafen oranı %2) malzemesi ile çelik (Ra 1.6) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği

Pürüzlülük değeri Ra 3.2 olan çelik diske karşı, grafen katkısız alüminyumun aşınma oranı-zaman grafiği, NARX modeli, TF modeli ve proses modeli eğrileri ile birlikte Şekil 4.22 'de verilmiştir. Deney sonucuna en yakın model, %95.32 uyum ile NARX modeli olmuştur. TF ve proses modelleri sırasıyla, %89.73 ve %72.37 uyum göstermiştir. Şekil 4.23 'te ise iki numune arasındaki sürtünme kuvveti-zaman grafiği verilmiştir. Hesaplanan ortalama sürtünme katsayısı 1.25'tir.

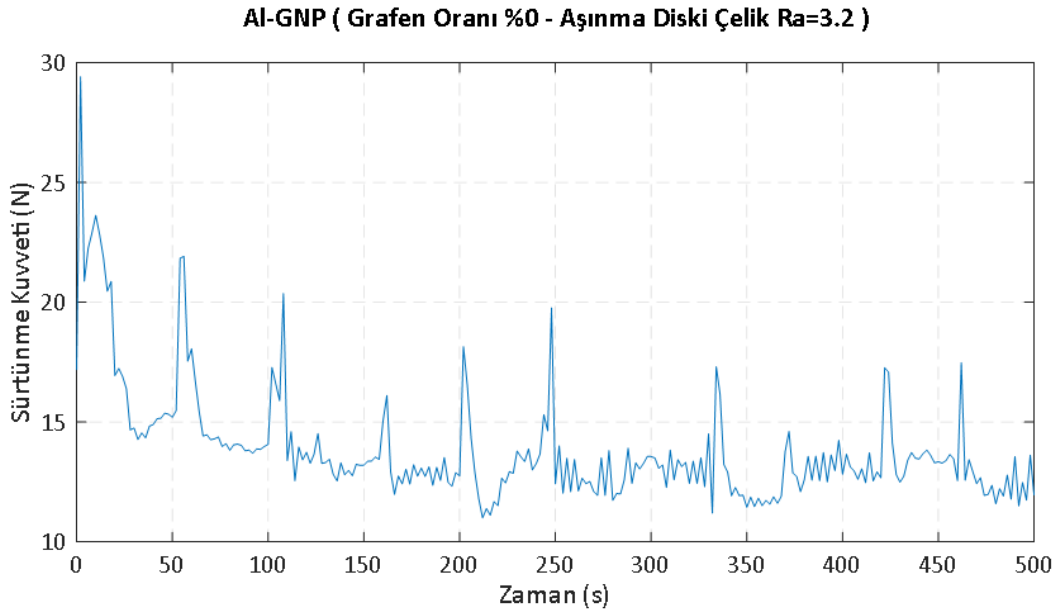
Şekil 4.24 'te ise grafen oranı kütlece %0.5 olan Al-GNP'nin çelik (Ra 3.2) diskine karşı aşınma oranı, NARX modeli, TF modeli ve proses modeli eğrileriyle birlikte verilmiştir. NARX modeli %94.87, TF modeli %72.51 ve proses modeli %74.01 uyum göstermiştir. Sürtünme kuvveti zaman- grafiği ise Şekil 4.25 'te verilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı 1.51 olarak hesaplanmıştır.

%1 grafen katkılı AL-GNP pin numunenin, çelik (Ra 3.2) diskine karşı aşınma oranı, NARX modeli, TF modeli ve proses modeli eğrileri Şekil 4.26 'da verilmiştir. Deney sonuçlarına en yakın model, %95.35 uyum ile NARX modelidir. En uzak model ise % 74.04 uyum ile proses modeli olmuştur. İki numune arasındaki sürtünme kuvveti-zaman grafiği ise Şekil 4.27 'de verilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı 1.79 olarak hesaplanmıştır.

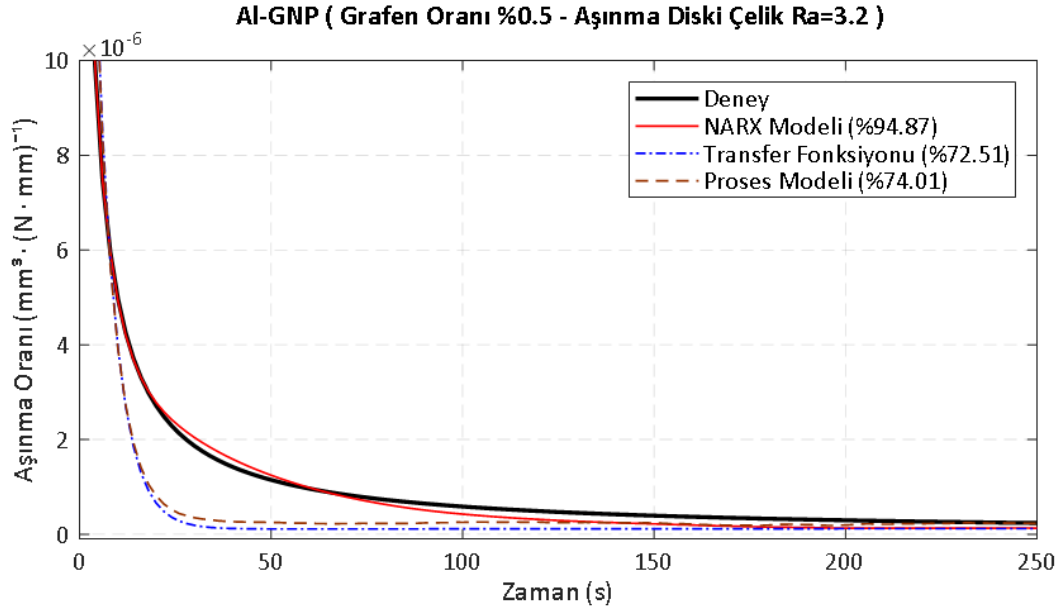
Şekil 4.28 'de verilen eğriler ise %2 grafen katkılı Al-GNP pin numunenin, çelik (Ra 3.2) diskine karşı aşınma oranına, NARX, TF ve proses modellerine aittir. Aşınma karakteristiğine en yakın model, %95.35 uyum ile NARX modeli olmuştur. Şekil 4.29 'da ise pik ile disk arasında oluşan sürtünme kuvveti-zaman grafiği verilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı 2.09 hesaplanmıştır.



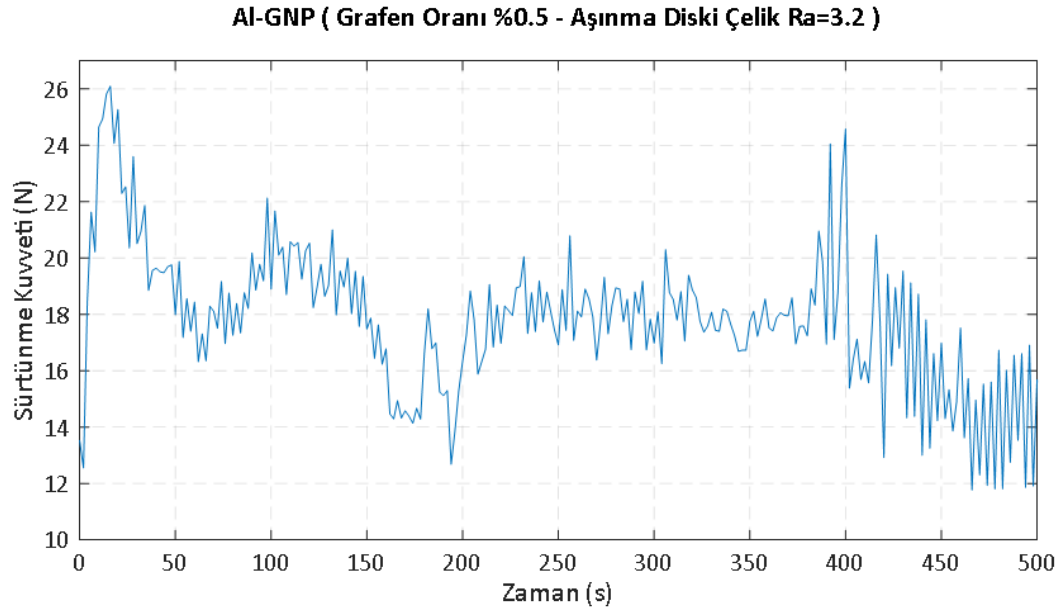
Şekil 4.22 Al-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 3.2)



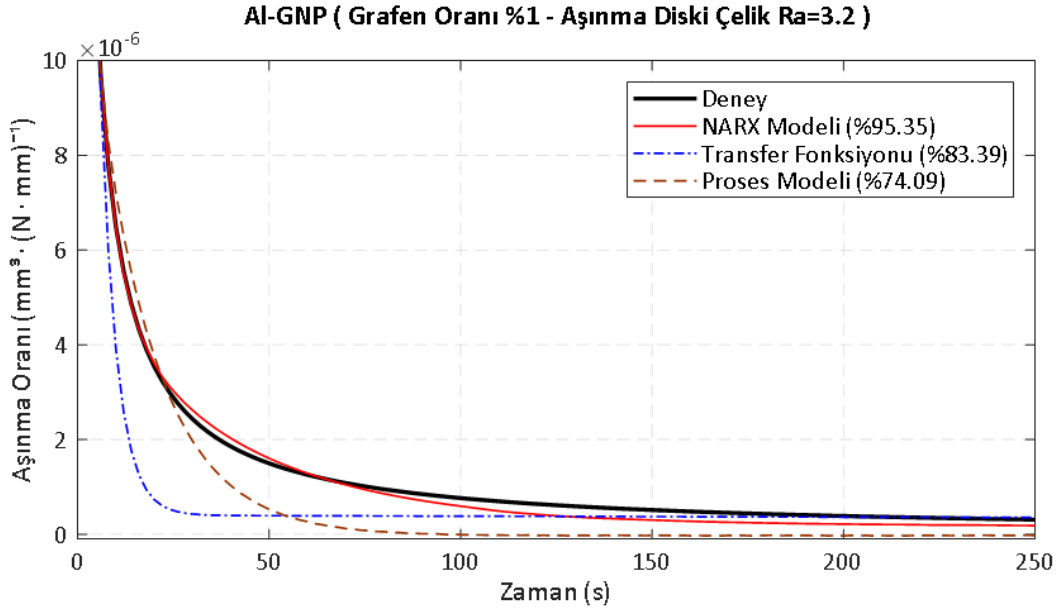
Şekil 4.23 Al-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile çelik (Ra 3.2) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



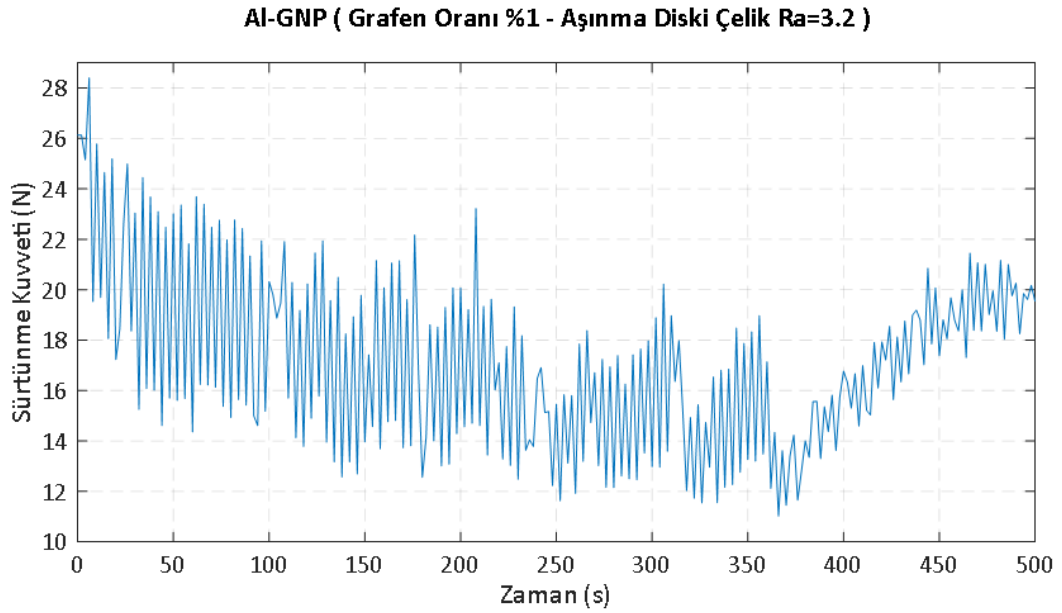
Şekil 4.24 Al-GNP (Grafen oranı %0.5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 3.2)



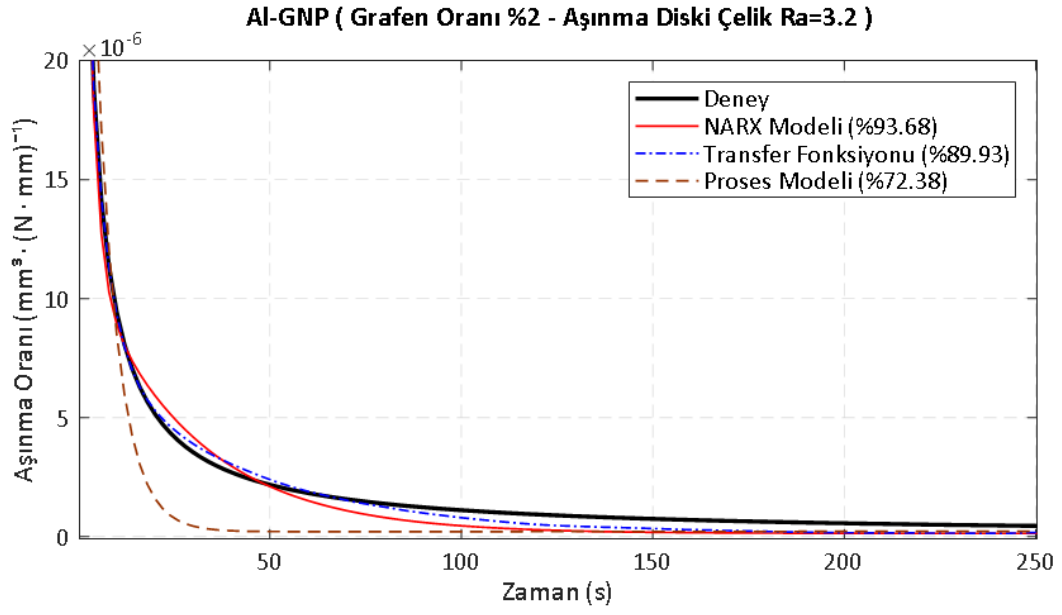
Şekil 4.25 Al-GNP (Grafen oranı %0.5) malzemesi ile çelik (Ra 3.2) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



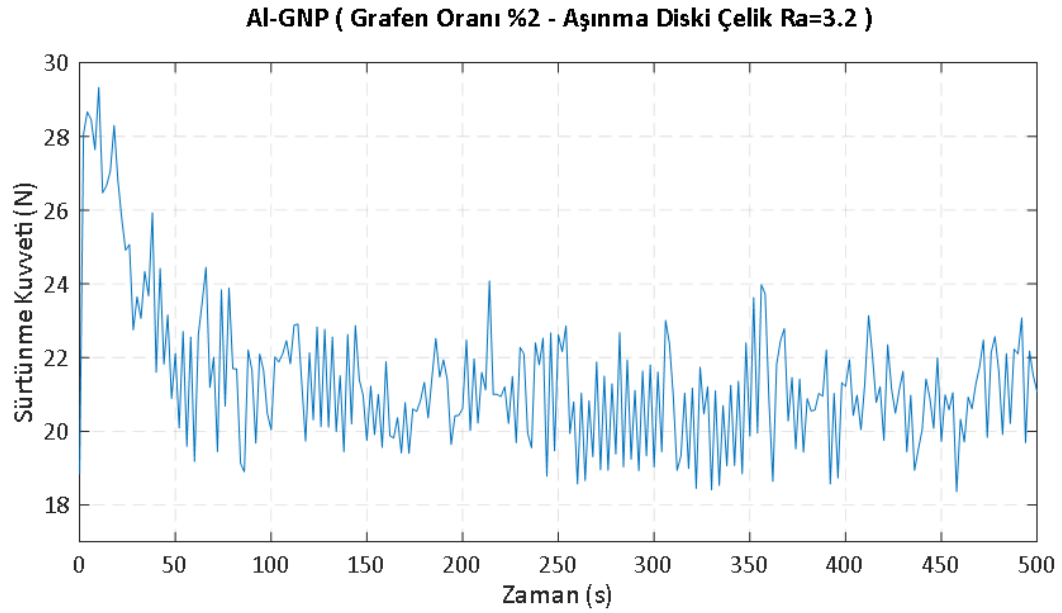
Şekil 4.26 Al-GNP (Grafen oranı %1) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 3.2)



Şekil 4.27 Al-GNP (Grafen oranı %1) malzemesi ile çelik (Ra 3.2) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



Şekil 4.28 Al-GNP (Grafen oranı %2) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 3.2)



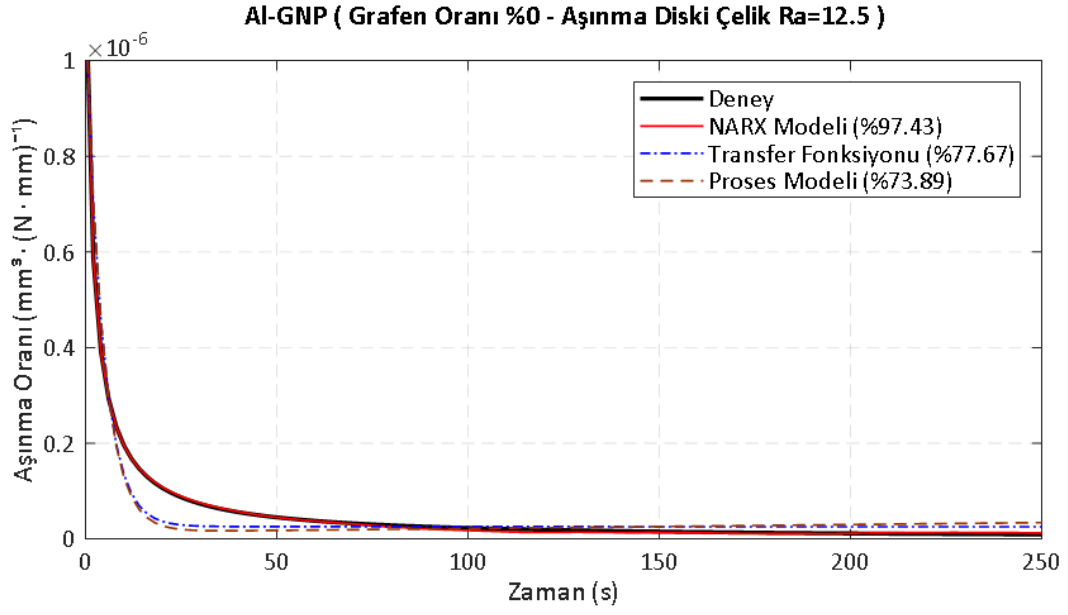
Şekil 4.29 Al-GNP (Grafen oranı %2) malzemesi ile çelik (Ra 3.2) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği

Şekil 4.30 'da, grafen katkısız alüminyum pin numunenin yüzey pürüzlülüğü Ra 12.5 olan çelik diske karşı aşınma oranı eğrisi, NARX modeli, TF modeli ve proses modeli eğrileriyle birlikte verilmiştir. Deneyde elde edilen aşınma karakteristiğine en yakın model, %97.43 uyum ile NARX modelidir. TF modeli ve proses modeli eğrileri sırasıyla, %77.67 ve %73.89 uyumludur. pin ve disk arasındaki sürtünme kuvvetinin zamana bağlı grafiği ise Şekil 4.31'de verilmiştir. Hesaplanan ortalama sürtünme katsayısı 1.71'dir.

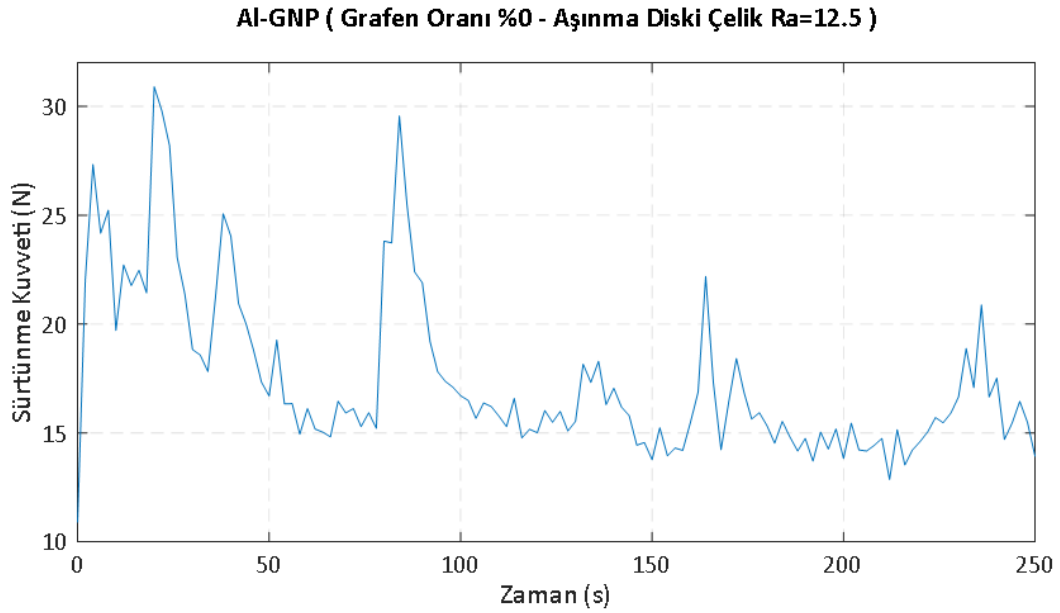
%0.5 grafen katkılı Al-GNP pin numunesinin, çelik (Ra 12.5) diske karşı aşınma oranı eğrisi, Şekil 4.32 'de NARX, TF ve proses modelleri eğrileri ile birlikte verilmiştir. NARX modeli %1'de az hata ile en yakın model olmuştur. TF ve Proses modelleri ise, sırasıyla %77.53 ve %75.93 uyumludur. Şekil 4.33 'te ise pin ve numune arasındaki sürtünme kuvvetinin zamana bağlı grafiği verilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı 1.72 hesaplanmıştır.

Şekil 4.34 'de ise, grafen oranı kütlece %1 olan alüminyum kompozit pin numunenin, yüzey pürüzlülük değeri Ra 12.5 olan çelik diske karşı aşınma oranı eğrisi, NARX modeli, TF modeli ve proses modeli eğrileri ile birlikte verilmiştir. Aşınma karakteristiğine en yakın model, %98.3 uyum ile NARX modelidir. TF modeli %77.56, proses modeli ise %77.37 uyumludur. Pin-disk arası sürtünme kuvvetinin zaman bağlı grafiği Şekil 4.35 'te verilmiştir. Hesaplanan ortalama sürtünme katsayısı 2.2'dir.

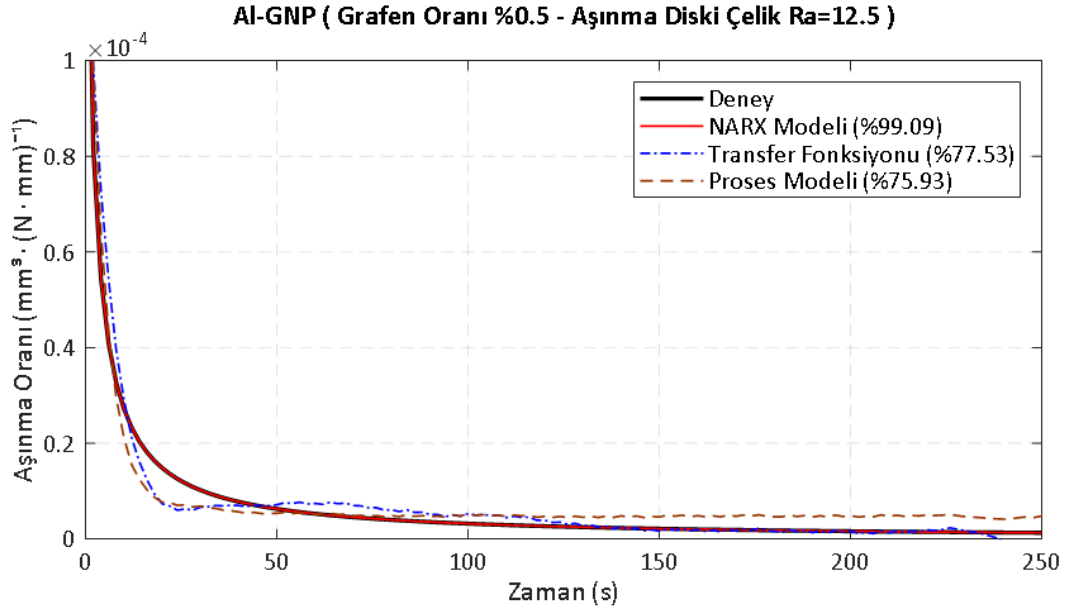
%2 grafen katkılı alüminyum kompozit pin numunesinin çelik (Ra 12.5) diske karşı aşınma oranının zamana bağlı değişimi, Şekil 4.36 'da, NARX modeli, TF modeli ve proses modeli eğrileri ile birlikte verilmiştir. NARX modeli, TF modeli ve proses modeli, gerçek değerlerle sırasıyla, %99.87, %83.34, %78.08 uyumludur. Şekil 4.37 'de verilen, ilgili pin-numune arasındaki sürtünme kuvvetinin zamana bağlı değişimi grafiğine göre ortalama sürtünme katsayısı 2.25 olarak hesaplanmıştır.



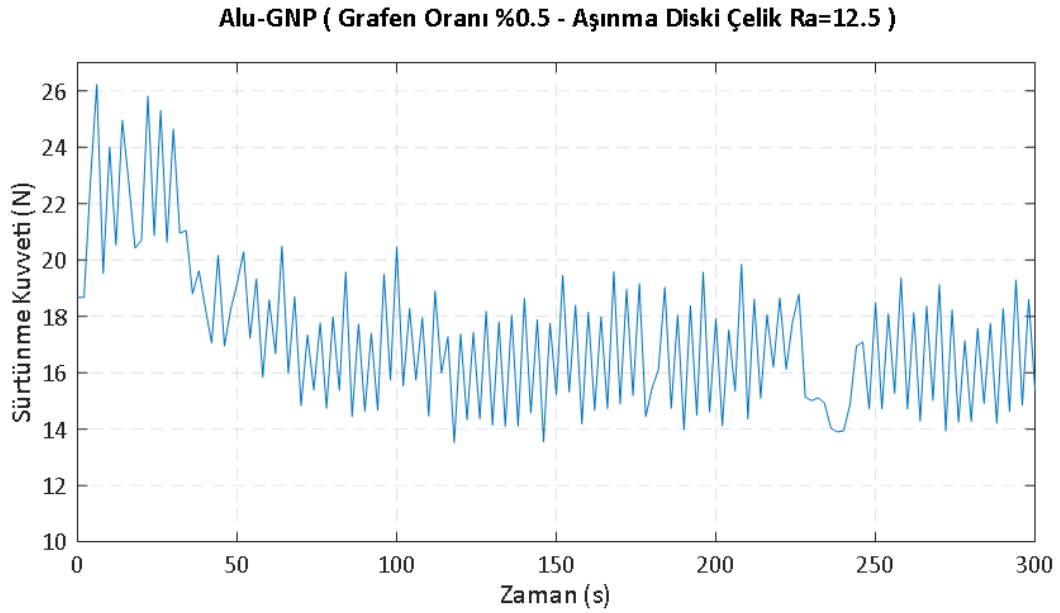
Şekil 4.30 Al-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 12.5)



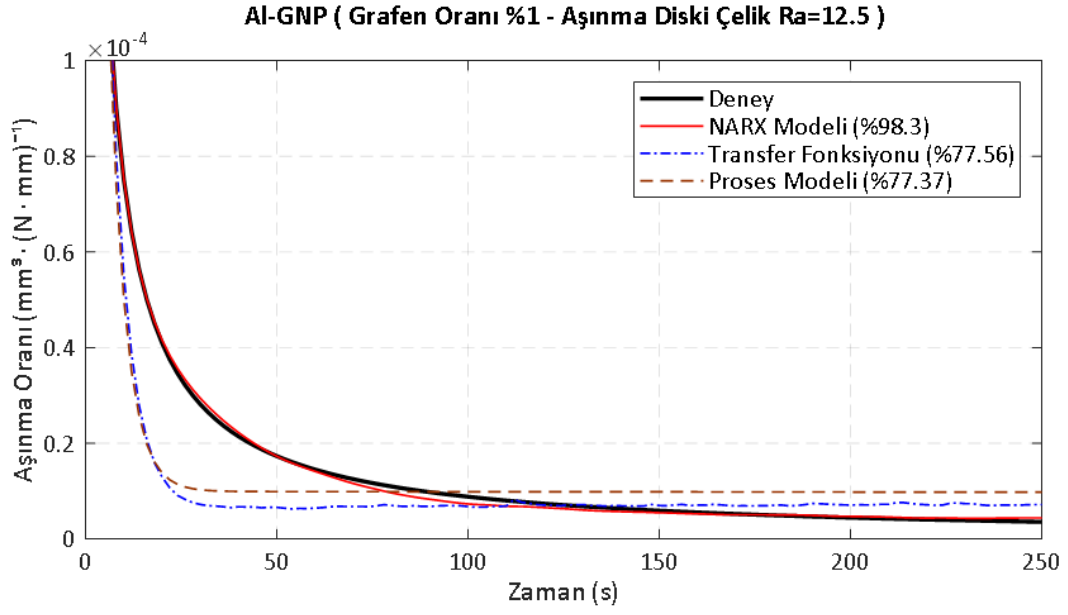
Şekil 4.31 Al-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile çelik (Ra 12.5) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



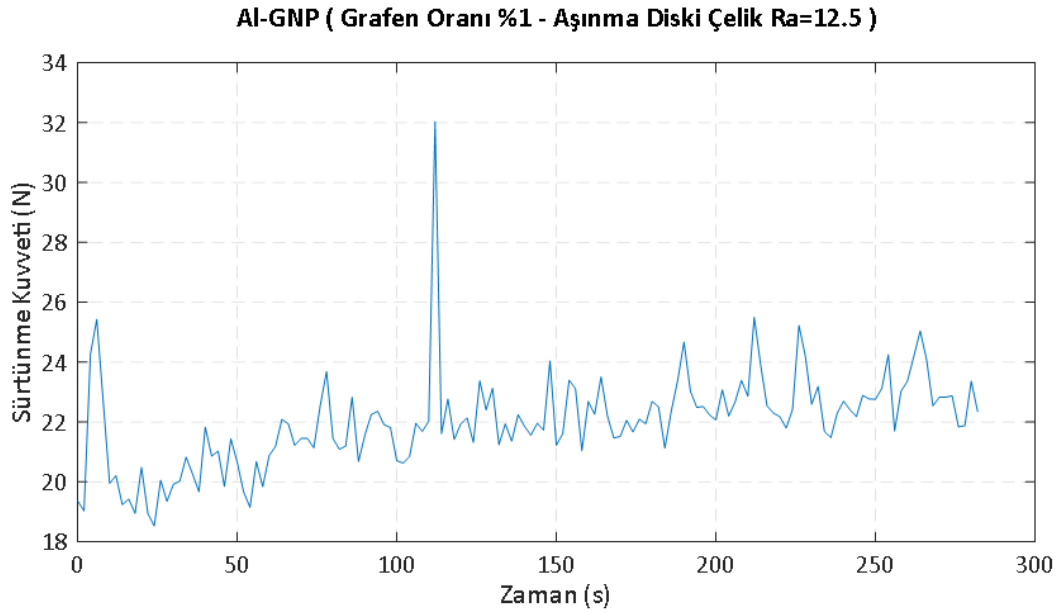
Şekil 4.32 Al-GNP (Grafen oranı %0.5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 12.5)



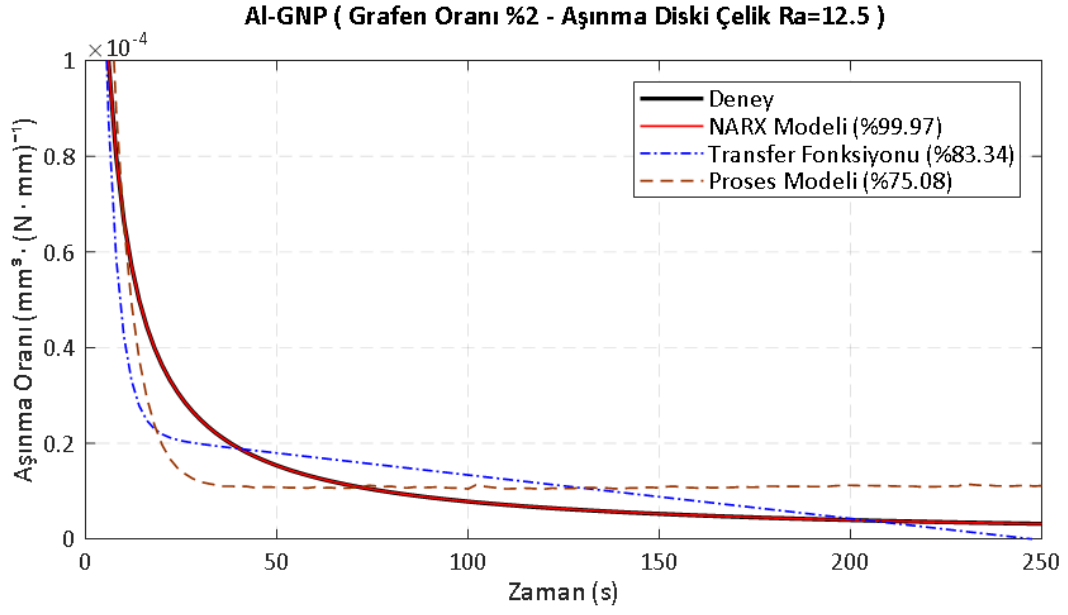
Şekil 4.33 Al-GNP (Grafen oranı %0.5) malzemesi ile çelik (Ra 12.5) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



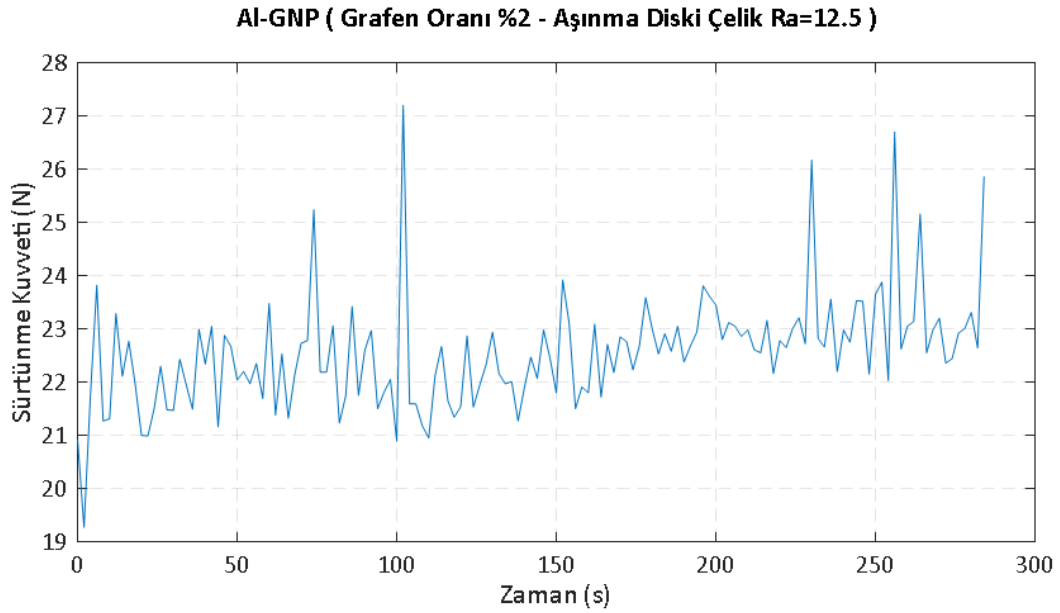
Şekil 4.34 Al-GNP (Grafen oranı %1) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 12.5)



Şekil 4.35 Al-GNP (Grafen oranı %1) malzemesi ile çelik (Ra 12.5) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



Şekil 4.36 Al-GNP (Grafen oranı %2) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 12.5)



Şekil 4.37 Al-GNP (Grafen oranı %2) malzemesi ile çelik (Ra 12.5) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği

Grafen katkısız, kütlece %0.5 %1 ve %2 grafen katkılı Al-GNP pin numunelerinin, dökme demir (Ra 6.3) ve yüzey pürüzlülük değerleri Ra 1.6, Ra 3.6, Ra 12.5 çelik diskler karşısında gösterdikleri aşınma kayıpları ve pin-disk arasındaki sürtünme katsayıları Tablo 4.2 'te verilmiştir. Aynı değerler, kıyaslama kolaylığı açısından Şekil 4.57 ve Şekil 4.58 'te bar grafikleri olarak verilmiştir.

Disk Malzemesi (Yüzey Pürüzlülüğü)	Pin Malzemesi (Grafen Oranı)	Sürtünme Katsayısı	Kütle Kaybı [gr]
Dökme Demir (Ra 6.3)	Al-GNP (%0)	1.5	0.1149
Çelik (Ra 1.6)	Al-GNP (%0)	1.51	0.0161
Çelik (Ra 3.2)	Al-GNP (%0)	1.25	0.0796
Çelik (Ra 12.5)	Al-GNP (%0)	1.71	0.1881
Dökme Demir (Ra 6.3)	Al-GNP (%0.5)	1.3	0.2225
Çelik (Ra 1.6)	Al-GNP (%0.5)	1.27	0.1733
Çelik (Ra 3.2)	Al-GNP (%0.5)	1.51	0.4024
Çelik (Ra 12.5)	Al-GNP (%0.5)	1.72	0.3177
Dökme Demir (Ra 6.3)	Al-GNP (%1)	1.1	0.1818
Çelik (Ra 1.6)	Al-GNP (%1)	1.54	0.239
Çelik (Ra 3.2)	Al-GNP (%1)	1.79	0.5252
Çelik (Ra 12.5)	Al-GNP (%1)	2.2	0.8231
Dökme Demir (Ra 6.3)	Al-GNP (%2)	1.5	0.2482
Çelik (Ra 1.6)	Al-GNP (%2)	1.45	0.0355
Çelik (Ra 3.2)	Al-GNP (%2)	2.09	0.5214
Çelik (Ra 12.5)	Al-GNP (%2)	2.25	0.735

Tablo 4.2 Al-GNP pin numunelerinin dökme demir ve çelik disklerle karşı aşınma kayıpları ve sürtünme katsayı değerleri

Şekil 4.57 'de Al-GNP pinlerin DD ve üç farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip çelik disklerle yapılan pin-on-disk deneylerinde pinlerin aşınma kayıplarının değişimleri kütle olarak verilmiştir.

Çelik disklerde üç farklı pürüzlülük değeri olarak Ra 1.6, Ra 3.2 ve 12.5 değerlerindeki aşınma miktarları her bir GNP %wt için yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Disk yüzeylerindeki pürüzlülük değeri arttıkça pindeki aşınan malzeme miktarı da artmaktadır.

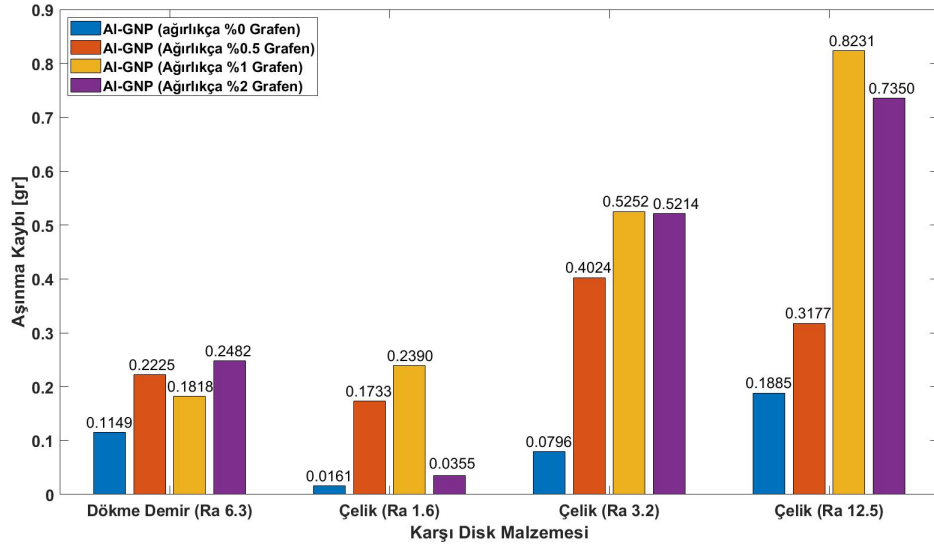
Yüzey pürüzlülüğü Ra 6.3 olan DD ile çelik diskler karşılaştırıldığında en yakın pürüzlülük değerine sahip olan çelik diskin pürüzlülük değeri Ra 3.2'dir. Bu iki diskin aşındırma miktarları karşılaştırıldığında; Al pindeki aşınma miktarının DD

diskte yaklaşık 1.44 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Buna karşın GNP katkılı alüminyum kompozit pinlerdeki aşınma miktarı ise çelik disklerle yapılan deneylerde daha fazla (yaklaşık 2 kat) olmaktadır.

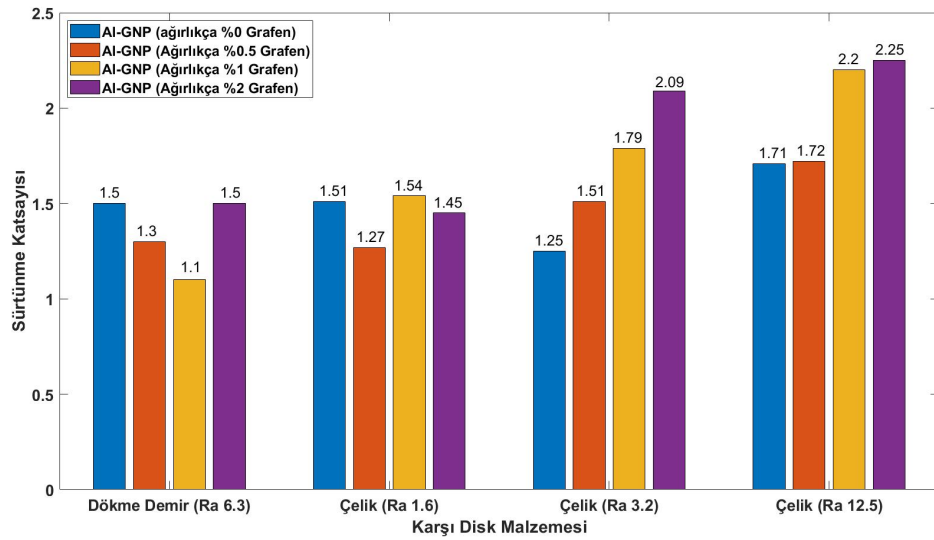
Bu durum yüzey pürüzlülük geometrisi ve aşındırıcı malzeme içeriğindeki karbon oranı ile ilgilidir. Dökme demirin gözenekli yapısından dolayı yüzeyindeki pürüzler derinlemesine olup gözenekler arasına GNP yağlayıcı tutmasıyla açıklanabilir.

Şekil 4.58 'te malzeme çiftlerinin sürtünme katsayıları karşılaştırılmıştır. Al için DD ve Ra 3.2 çelik disk ile karşılaştırıldığında çelikteki sürtünme katsayısı daha düşüktür. Ancak GNP katkısı olan Al kompozit pinlerde sürtünme katsayısının daha düşük pürüzlülüğe sahip olan çelik diskte daha yüksek olduğu görülmektedir. Yağlayıcının çelik yüzeydeki pürüzlülüklerde tutunamadığı ve GNP oranı arttıkça kompozit yapının dayanımının azaldığı şeklinde açıklanabilir. Yağlayıcı özelliği olan grafen tozlarının yüzeyde tutunabildiği durumlarda, sürtünme katsayısı yüzey pürüzlülüğüne bağlı olmadan düşmekte ve dökme demir karşı disklerle yapılan deneylerde görüldüğü gibi aşınan malzeme miktarları azalmaktadır.

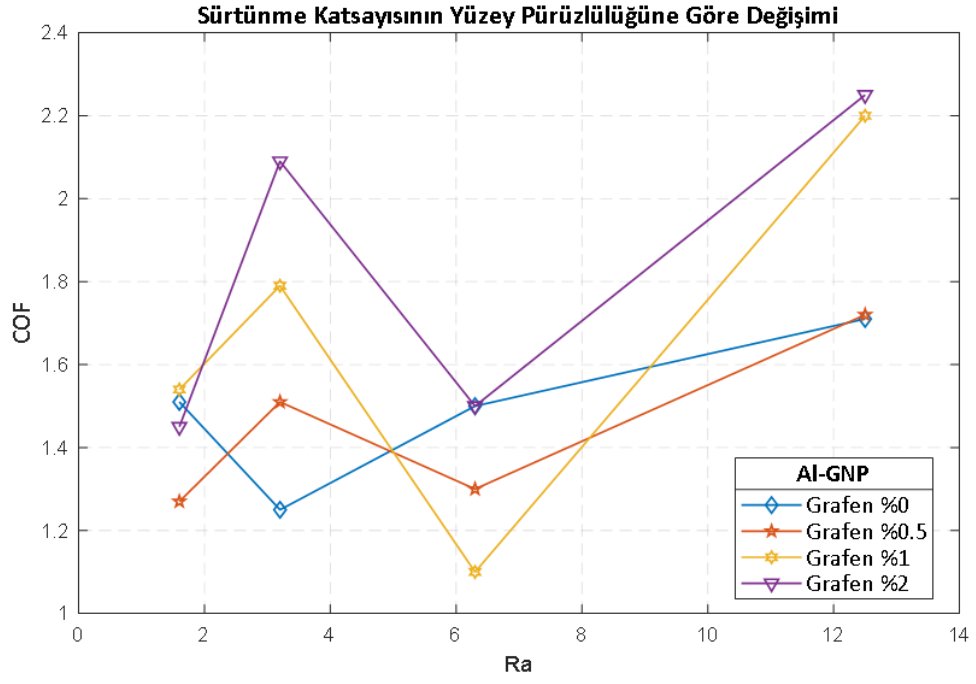
Ayrıca Al-GNP pin ile disk arasındaki sürtünme katsayılarının pürüzlülük değerlerine göre değişimi Şekil 4.40 'ta gösterilmiştir.



Şekil 4.38 AL-GNP pinlerin aşınma kayıpları



Şekil 4.39 Al-GNP pinler ile, karşı diskler arasındaki sürtünme katsayıları



Şekil 4.40 Al-GNP kütle kayıplarının yüzey pürüzlülük değerlerine göre değişimi

4.2.2 Epoksi-GNP

Epoksi ve GNP katkılı pin numuneler ile dökme demir ve çelik disklerle karşı yapılan pin-on-disk deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak tanımlanmış modeller ve bu modellerin deneysel veri ile yüzde uyum değerleri Tablo 4.3 ile verilmiştir.

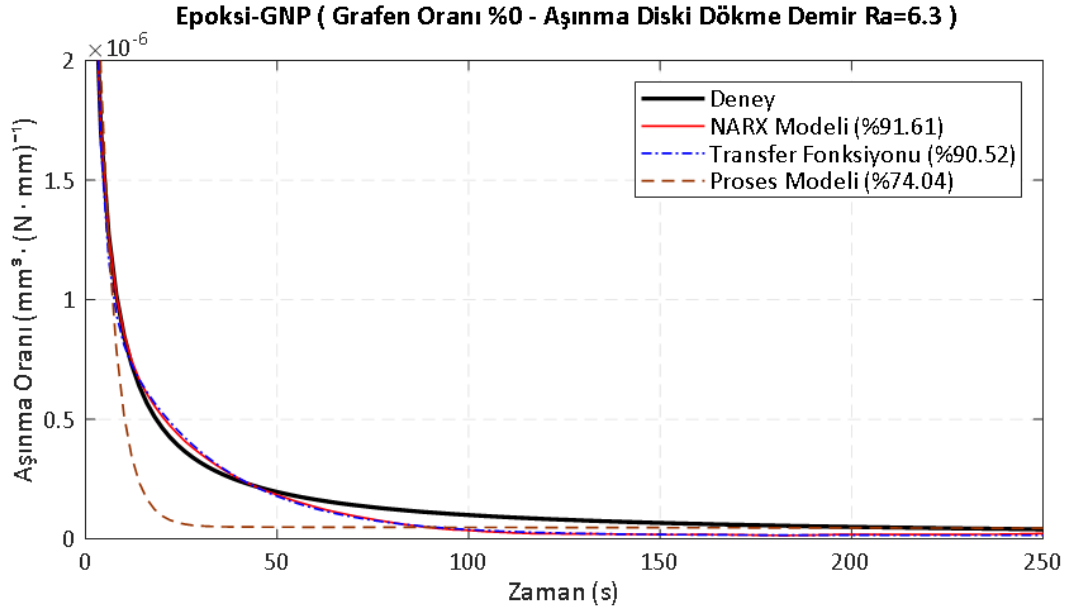
Disk Malzemesi (Yüzey Pürüzlülüğü)	Pin Malzemesi (Grafen Oranı)	Doğrusal Transfer Fonksiyonu Modeli $G(s) = \frac{K_p}{1+T_{p1}s}$ Deney Datasına Uyum %	Proses Modeli $G(s) = \frac{K_p}{1+T_{p1}s} * e^{-\tau_d s}$ Deney Datasına Uyum %	Doğrusal Olmayan NARX Modeli " Deney Datasına Uyum %
Dökme Demir (Ra 6.3)	Epoksi	$G_0(s) = \frac{3.8809 \times 10^{-9}}{1+10000s}$ %90.52	$G_0(s) = \frac{1.9692 \times 10^{-9}}{1+1340.9s} * e^{-0.036s}$ %74.04	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %91.66
Çelik (Ra 1.6)	Epoksi	$G_0(s) = \frac{2.298 \times 10^{-11}}{1+10000s}$ %91.5	$G_0(s) = \frac{3.3712 \times 10^{-10}}{1+269.3s} * e^{-0.01s}$ %81.26	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %96.48
Çelik (Ra 3.2)	Epoksi	$G_0(s) = \frac{-11.1132 \times 10^{-10}}{1+1.5642s}$ %84.29	$G_0(s) = \frac{1.6901 \times 10^{-9}}{1+3224.1s} * e^{-0.082s}$ %72.88	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %97.63
Çelik (Ra 12.5)	Epoksi	$G_0(s) = \frac{7.9613 \times 10^{-7}}{1+10000s}$ %77.32	$G_0(s) = \frac{1.0525 \times 10^{-6}}{1+4.3255s} * e^{-0.03s}$ %76.61	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %98.86
Dökme Demir (Ra 6.3)	Epoksi-GNP (%0.5 Grafen)	$G_0(s) = \frac{3.2791 \times 10^{-9}}{1+10000s}$ %87.91	$G_0(s) = \frac{2.8601 \times 10^{-10}}{1+10000s} * e^{-0.238s}$ %90.09	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %91.61
Çelik (Ra 1.6)	Epoksi-GNP (%0.5 Grafen)	$G_0(s) = \frac{1.2716 \times 10^{-10}}{1+10000s}$ %90.85	$G_0(s) = \frac{4.8566 \times 10^{-9}}{1+10000s} * e^{-0.016s}$ %71.05	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %93.67
Çelik (Ra 3.2)	Epoksi-GNP (%0.5 Grafen)	$G_0(s) = \frac{9.8397 \times 10^{-11}}{1+10000s}$ %91.53	$G_0(s) = \frac{1.2787 \times 10^{-9}}{1+2451s} * e^{-0.002s}$ %73.45	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %94.63
Çelik (Ra 12.5)	Epoksi-GNP (%0.5 Grafen)	$G_0(s) = \frac{-1.8257 \times 10^{-5}}{1+37.67s}$ %88.38	$G_0(s) = \frac{3.7761 \times 10^{-5}}{1+7227.7s} * e^{-0.03s}$ %72.6	2 Nöronlu Sigmoid Ağı %98.36

Tablo 4.3 Epoksi ve Epoksi-GNP numunelerinin farklı yüzey pürüzlülük değerlerine sahip disklerle yapılan aşınma deneylerinin aşınma oranlarının tanımlanmış modelleri

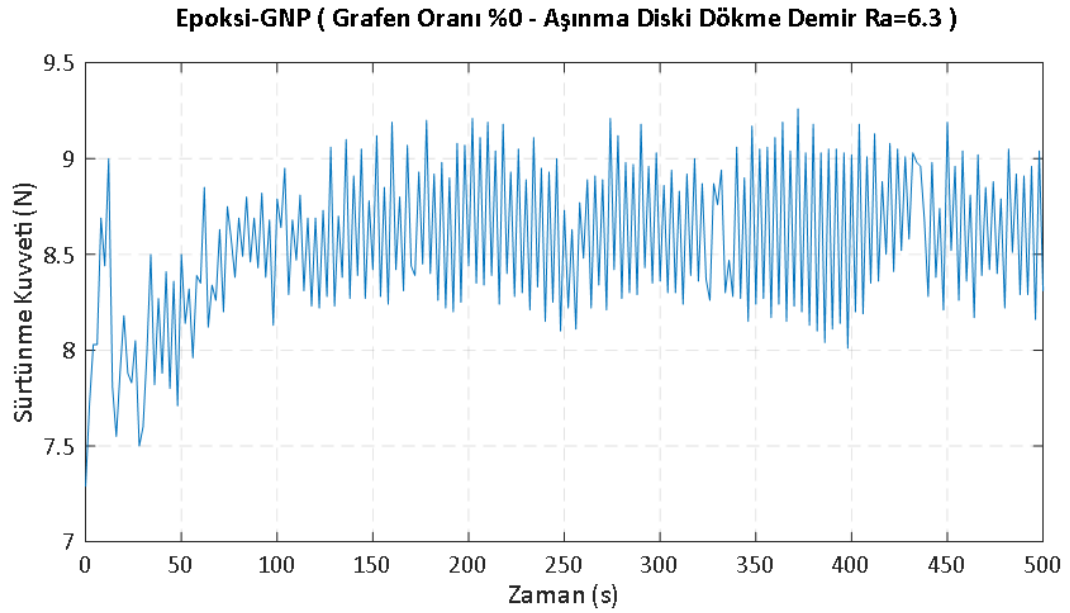
Saf epoksi ve grafen katkılı epoksi pin numunelerinin dökme demir (Ra 6.3) diske karşı olan aşınma oranı Şekil 4.41 'de verilmiştir. Aşınma oranı eğrisinin yanında NARX modeli, transfer fonksiyonu modeli ve proses modeli eğrileri de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara en yakın model %91,61 uyum ile NARX modelidir. TF modeli %90,52 uyumludur. %74.04 uyum ile en uzak model ise proses modelidir. Deney süresince iki numune arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği Şekil 4.42 'de verilmiştir. Elde edilen veriler neticesinde ortalama sürtünme katsayısı 0,88 olarak hesaplanmıştır. Aynı pin numunesinin yüzey pürüzlülük değeri Ra 1.6 olan çelik disk karşısında gösterdiği aşınma oranı grafiği Şekil 4.43 'te model eğrileri ile birlikte verilmiştir. Sonuçlar ile, NARX modelini %96.48 , TF modelini %91.5 ve proses modelini %81.26 uyumludur. Şekil 4.44 'te ise sürtünme kuvvetinin zamana bağlı verilmiş olup ortalama sürtünme katsayısı 0.87 olarak belirlenmiştir.

Yüzey pürüzlülük değeri Ra 3.2 olan çelik disk ile yapılan çalışmada saf epoksinin aşınma oranı Şekil 4.45 'te, model eğrileri ile birlikte verilmiştir. Sonuçlara en yakın model, %97.63 uyum il NARX modelidir. TF modeli %84.29, proses modeli %72.88 uyumludur. Pin ile disk arasındaki sürtün kuvvetinin zamana bağlı grafiği ise Şekil 4.46 'da verilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı 0.99 olarak hesaplanmıştır.

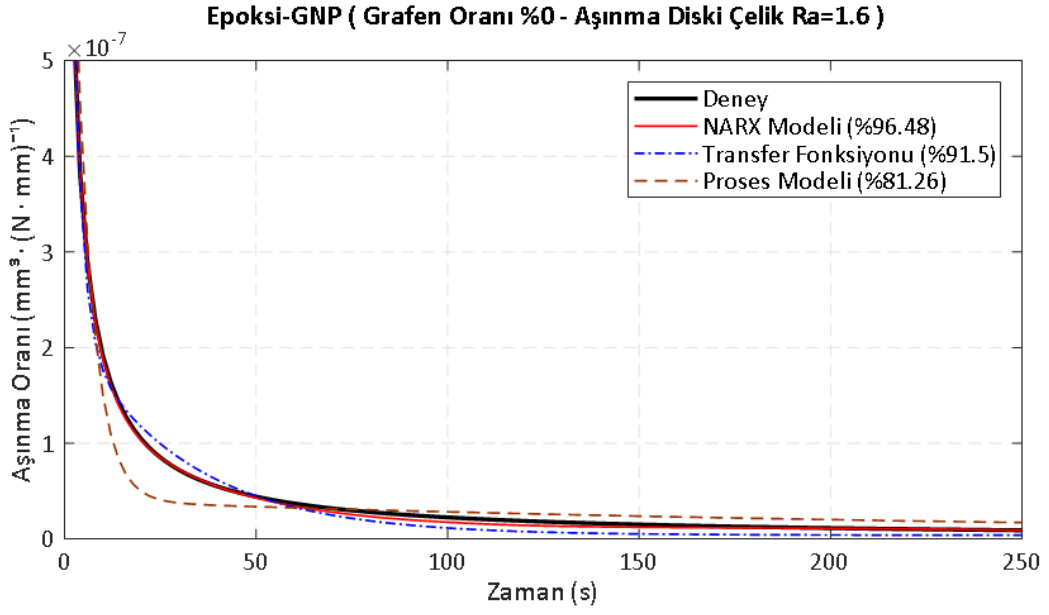
Yüzey pürüzlülük değeri Ra 12.5 olan çelik disk ile yapılan çalışmada ise epoksinin aşınma oranı, model eğrileri ile birlikte Şekil 4.47 'de verilmiştir. NARX modeli en yakın model olup %96.86 uyumludur. TF modeli %77.32 uyumlu, proses eğrisi ise %76.61 uyumludur. Şekil 4.48 'de ise iki numune arası sürtünme kuvvetinin zamanana bağlı değişimi verilmiştir. Hesaplanan ortalama sürtünme katsayısı 1.11'dir.



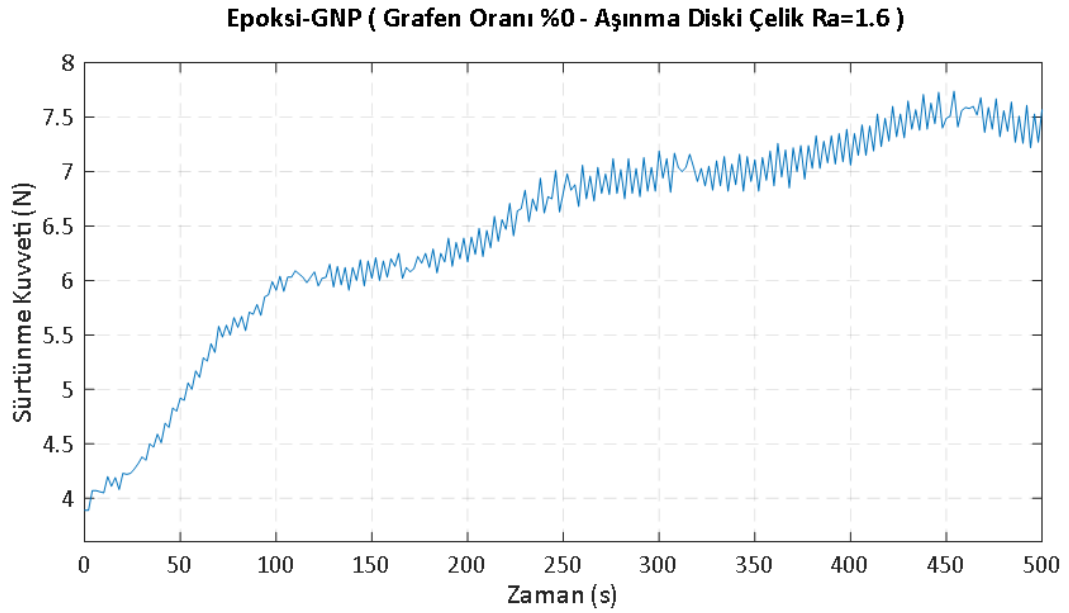
Şekil 4.41 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: dökme demir, Ra 6.3)



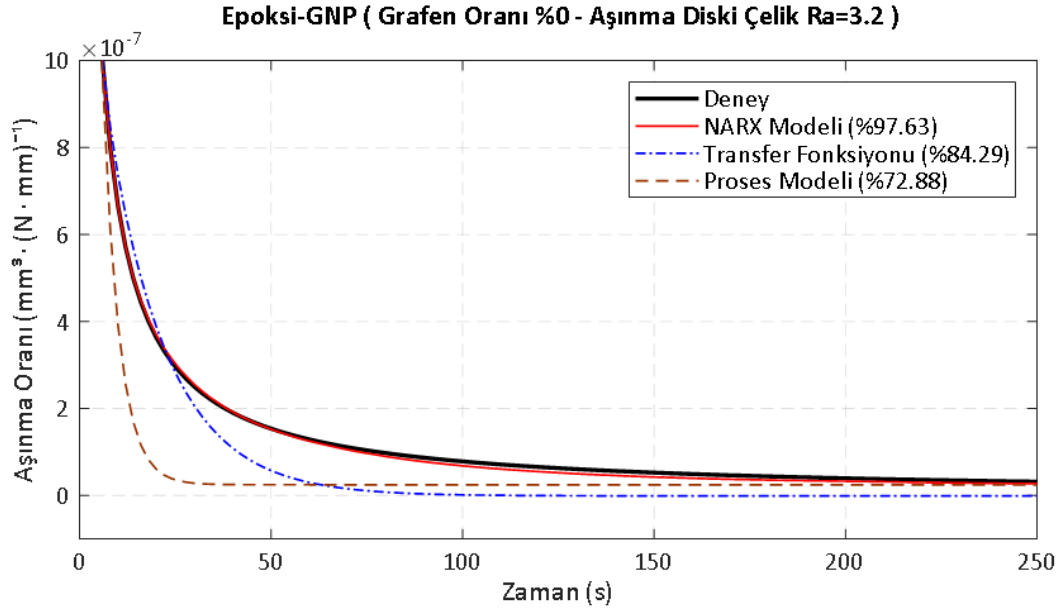
Şekil 4.42 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile dökme demir (Ra 6.3) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



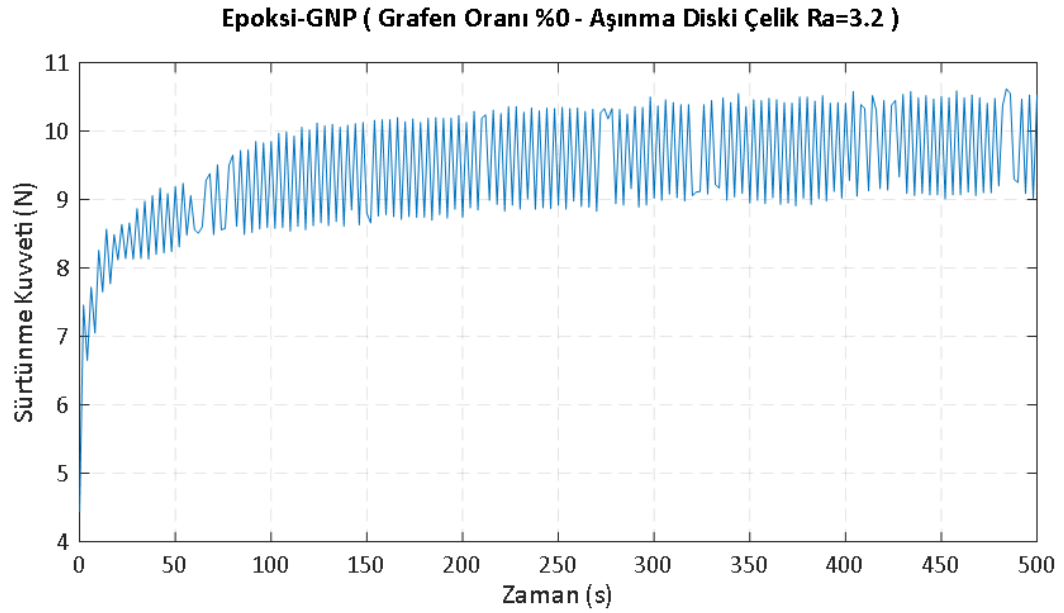
Şekil 4.43 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 1.6)



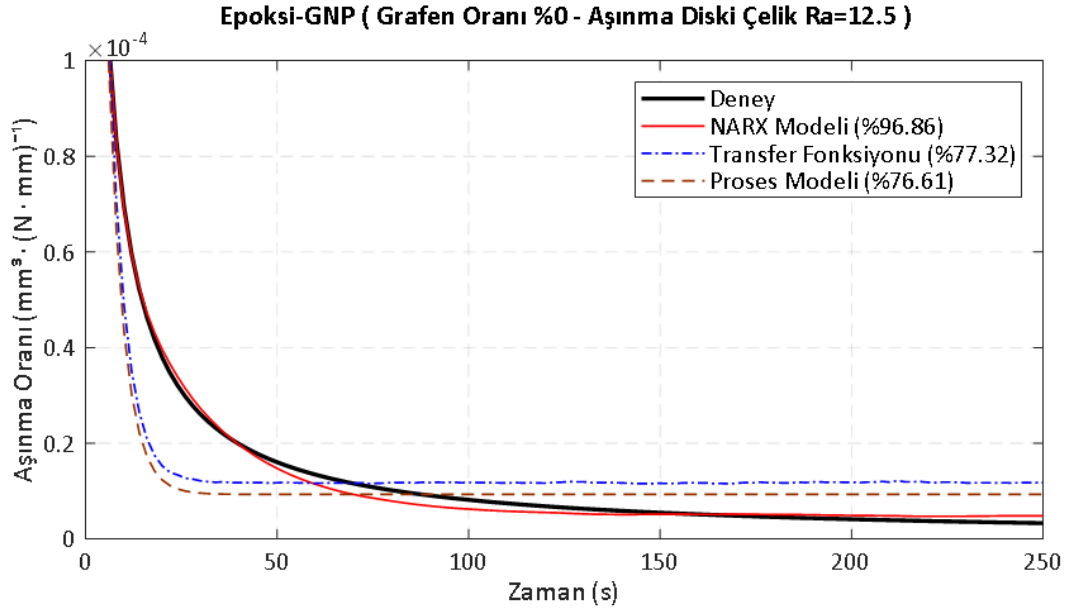
Şekil 4.44 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile çelik (Ra 1.6) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



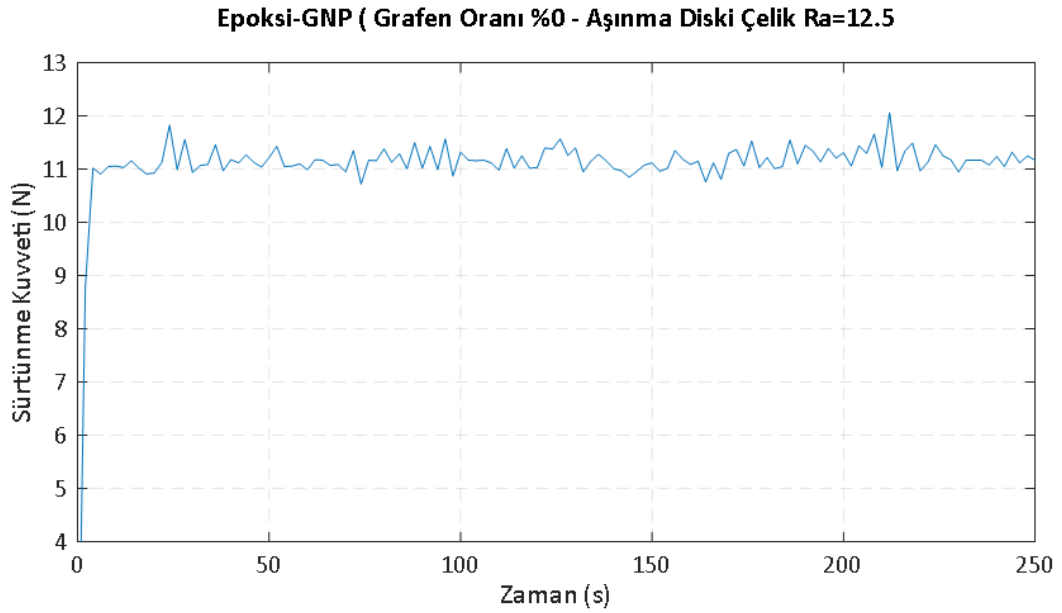
Şekil 4.45 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 3.2)



Şekil 4.46 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile çelik (Ra 3.2) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



Şekil 4.47 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 12.5)



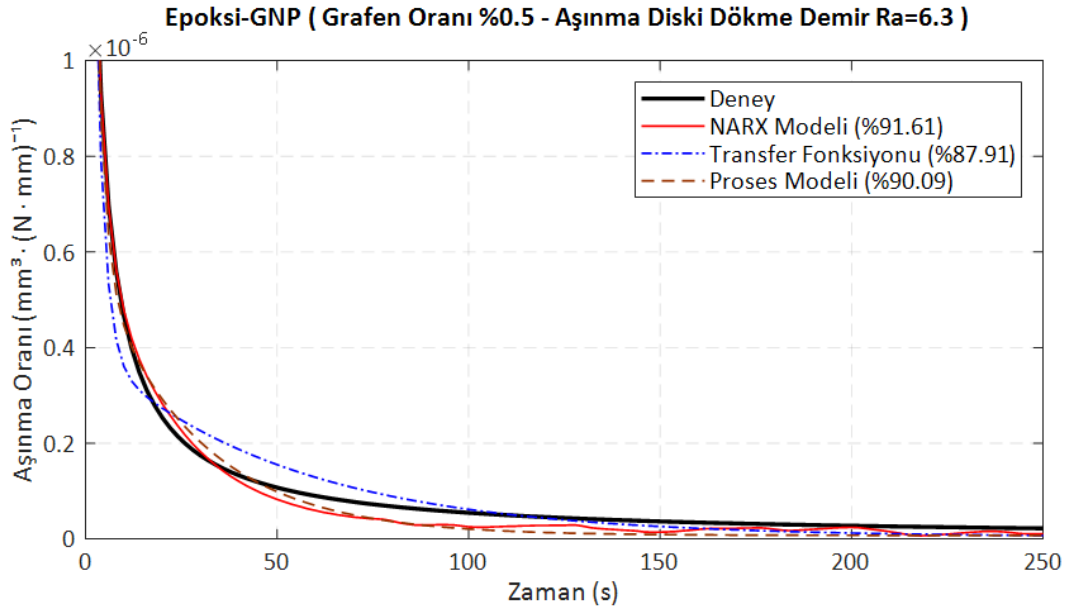
Şekil 4.48 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0) malzemesi ile çelik (Ra 12.5) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği

%0.5 grafen katkılı epoksi pin numunesinin, dökme demir (Ra 6.3) diske karşı aşınma oranı eğrisi Şekil 4.49 'da NARX, TF, ve proses model eğrileriyle birlikte verilmiştir. Deneysel sonuca en yakın model, %91.61 uyum ile NARX modelidir. TF modeli %87.91, proses modeli %90.09 uyumludur. Şekil 4.50 'de ise iki numune arası sürtünme kuvvetinin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı 0.99 olarak hesaplanmıştır.

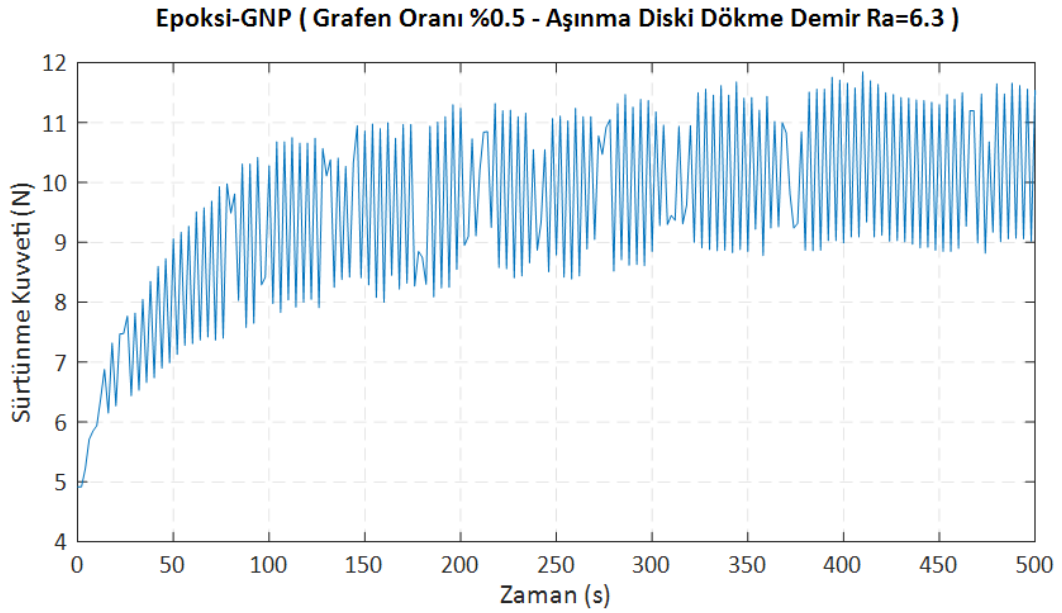
Yüzey pürüzlülük değeri Ra 1.6 olan çelik diske karşı, grafen katkılı epoksinin aşınma oranı 4.51 'de, NARX, TF ve proses modeli eğrileri ile birlikte verilmiştir. NARX modeli %93.67 uyum ile en yakın modeldir. TF ve proses modeli sırası ile, %90.85 ve %71.05 uyumludur. Pin-disk arasındaki sürtünme kuvvetinin zamana bağlı grafiği Şekil 4.51 'te verilmiştir. Hesaplanan ortalama sürtünme katsayısı 0.99'dur.

Çelik (Ra 3.2) diske karşı grafen katkılı epoksi pin numunesinin aşınma oranı grafiği, NARX, TF ve proses model eğrileri ile birlikte 4.53 'te verilmiştir. Deneysel sonuca en yakın model, %94.63 uyum ile NARX modelidir. TF ve proses modelleri sırası ile, %91.53 ve %73.45 uyumludur. İki numune arasındaki sürtünme kuvvetinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.54 'te verilmiş olup, sürtünme katsayısı 0.93 olarak hesaplanmıştır.

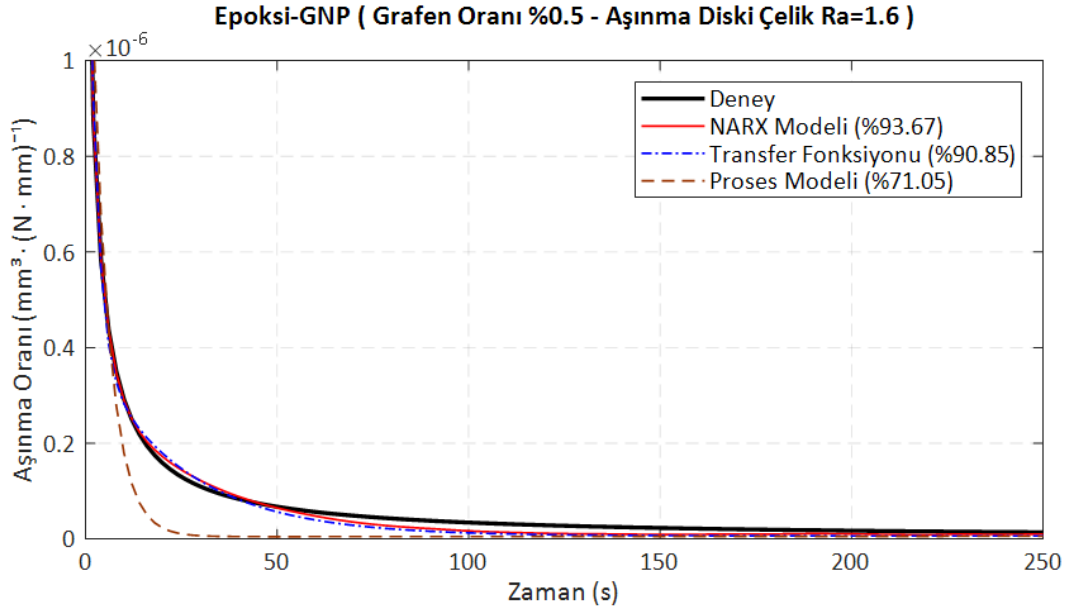
%0.5 grafen takviyeli epoksi pin numunesinin, yüzey pürüzlülük değeri Ra 12.5 olan çelik diske karşı aşınma oranı, NARX, TF ve proses model eğrileri ile birlikte Şekil 4.55 'te verilmiştir. %98.36 uyum ile NARX modeli, deneysel sonuca en yakın model olmuştur. TF modeli ve proses modelleri sırası ile, %88.38 ve %72.6 uyumludur. Pin ile disk arasındaki sürtünme kuvveti-zaman grafiği ise Şekil 4.56 'da verilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı 1.10 olarak hesaplanmıştır.



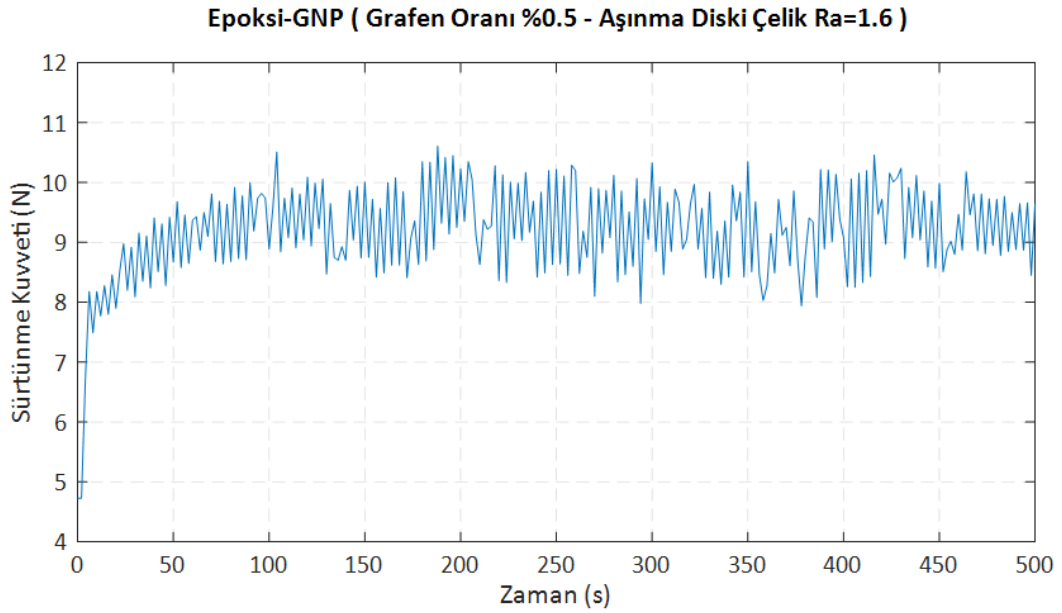
Şekil 4.49 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: dökme demir, Ra 6.3)



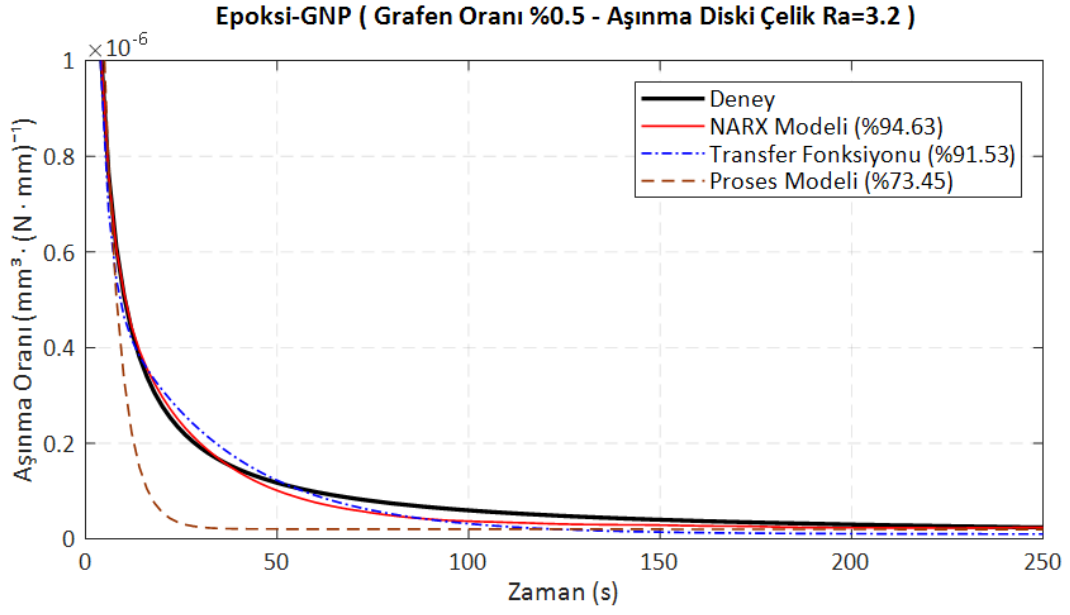
Şekil 4.50 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) malzemesi ile dökme demir (Ra 6.3) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



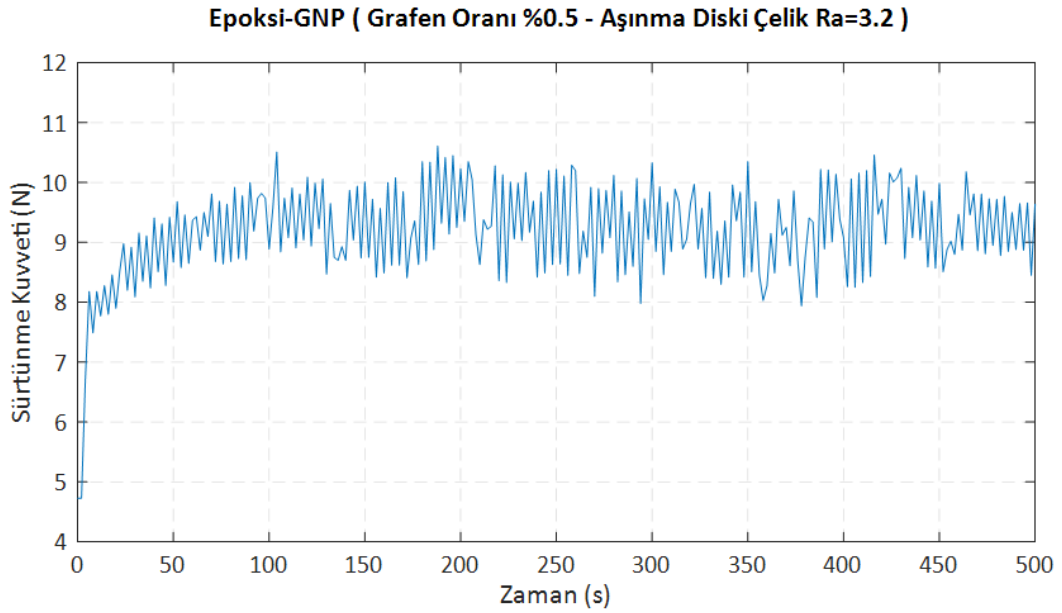
Şekil 4.51 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 1.6)



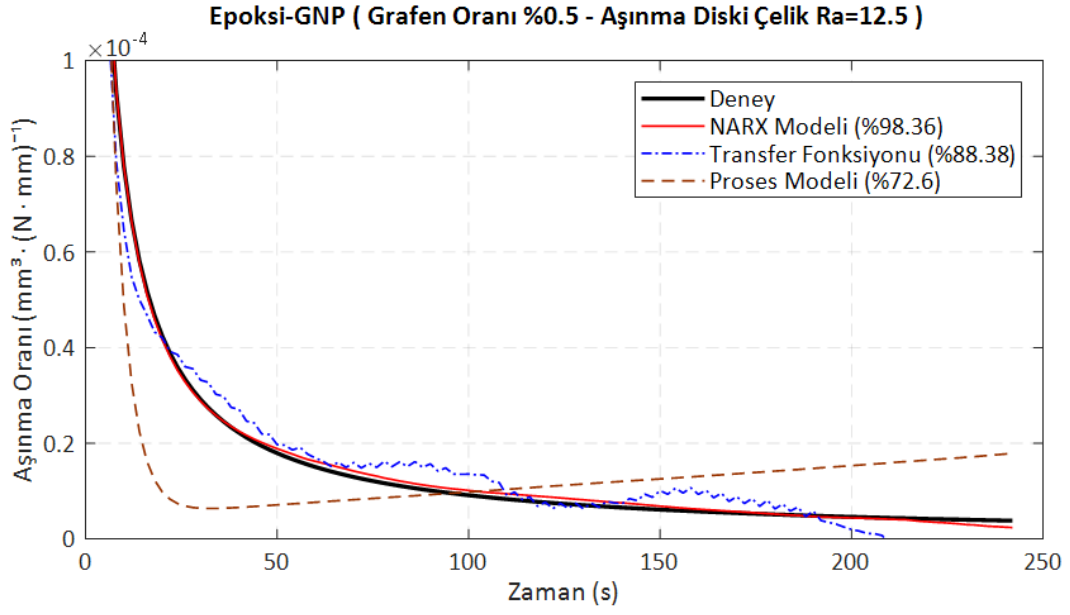
Şekil 4.52 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) malzemesi ile çelik (Ra 1.6) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



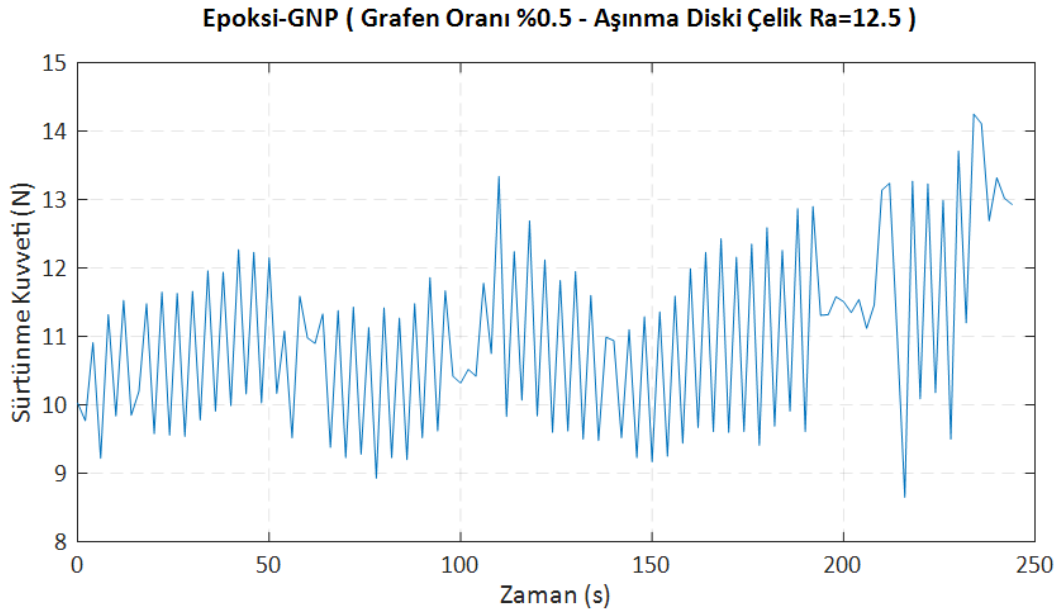
Şekil 4.53 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 3.2)



Şekil 4.54 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) malzemesi ile çelik (Ra 3.2) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği



Şekil 4.55 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) pin test numunesinin aşınma oranı-zaman grafiği (karşı malzeme: çelik disk, Ra 12.5)



Şekil 4.56 Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) malzemesi ile çelik (Ra 12.5) arasındaki sürtünme kuvveti- zaman grafiği

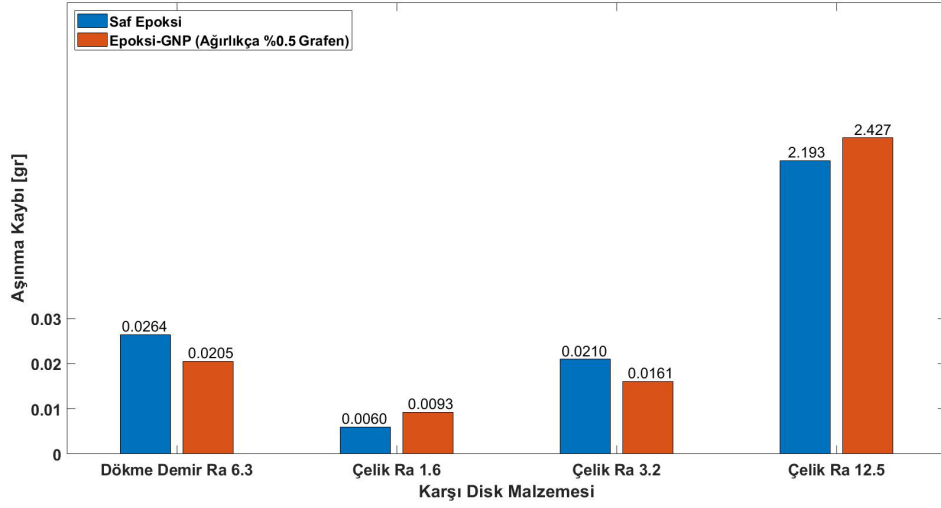
Grafen katkısız saf epoksi ve kütlece %0.5 grafen katkılı epoksi pin numuneleri ile dökme demir (Ra 6.3) ve çelik (Ra 1.6-3.2-12.5) karşı disklerle yapılan deneylerden elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma kütle kaybı değerleri Tablo 4.4 'te verilmiştir. Aynı zamanda sürtünme katsayıları ve aşınma kütle kayıpları, Şekil 4.57 ve Şekil 4.58 'te bar grafik cinsinden verilmiştir. Ayrıca epoksi ve kütlece %0.5 grafen katkılı epoksi polimer matrisli kompozitin, dökme demir (Ra 6.3) ve çelik (Ra 1.6-3.2-12.5) disklerle karşı gösterttikleri aşınma davranışının tanımlanmış NARX, transfer fonksiyonu ve proses modelleri Tablo 4.3 'te verilmiştir. Epoksi-GNP pinlerinin kütle kayıplarının ve disk pin arasındaki sürtünme katsayılarının yüzey pürüzlülük değerlerine göre değişimi Şekil 4.60 ve Şekil 4.59 'da görülmektedir.

Disk Malzemesi (Yüzey Pürüzlülüğü)	Pin Malzemesi	Sürtünme Katsayısı	Kütle Kaybı [gr]
Dökme Demir (Ra 6.3)	Epoksi	0.88	0.0264
Çelik (Ra 1.6)	Epoksi	0.87	0.0060
Çelik (Ra 3.2)	Epoksi	0.99	0.0210
Çelik (Ra 12.5)	Epoksi	1.11	2.1933
Dökme Demir (Ra 6.3)	Epoksi-GNP	0.99	0.0205
Çelik (Ra 1.6)	Epoksi-GNP	0.99	0.0093
Çelik (Ra 3.2)	Epoksi-GNP	0.93	0.0161
Çelik (Ra 12.5)	Epoksi-GNP	1.10	2.4278

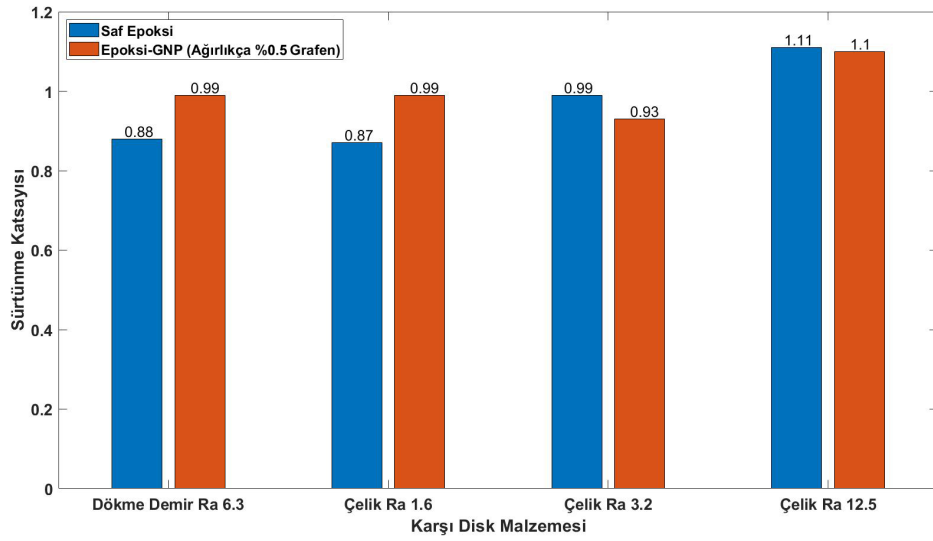
Tablo 4.4 Epoksi ve Epoksi-GNP (%0.5 Grafen) numunelerinin sürtünme katsayı ve kütle kayıpları

Dökme demir diskle yapılan deneylerde saf epoksi malzemenin epoksi GNP ye göre daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olmasına rağmen kütle kaybının Epoksi GNP de % 20 oranında daha az olduğu görülmektedir. Çelik disklerde ise kütle kaybı, saf epoksi ile karşılaştırıldığında epoksi kompozitin sürtünme katsayısı Ra 1.6 yüzey pürüzlülüğüne sahip disk için daha yüksek çıktığı, Ra 3.2 disk için daha düşük çıkarken, Ra 12.5 diskte yaklaşık aynı kaldığı görülmüştür. Benzer karşılaştırma kütle kayıpları için yapıldığında Ra 1.6 disk hariç Ra3.2 ve Ra12.5 disklerle yapılan testlerde epoksi GNP kompozitin daha düşük değerde kütle kaybına sahip olduğu görülmüştür. Kütle kayıpları genel olarak yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak artmıştır.

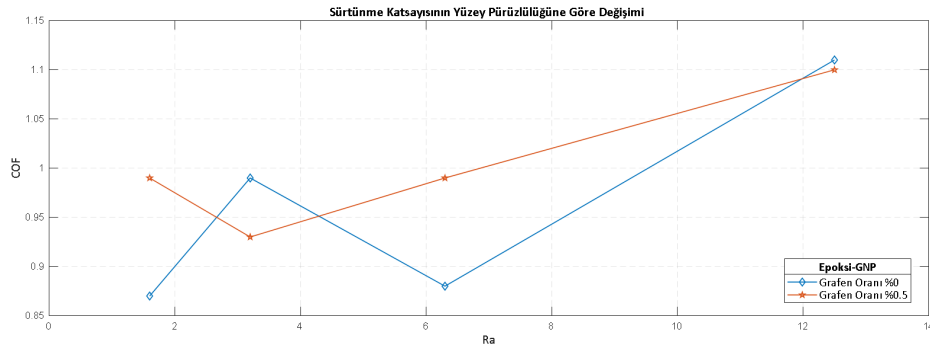
Şekil 4.61 de dökme demir aşındırma disk yüzeyinin deney sonrası elektronik mikroskop ile çekilmiş görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.62 ile büyütülmüş detay görüntüsünde dökme demir yüzeyinde bulunan mikro çatlakta grafen kalıntısının tutunmuş olduğu görülmektedir. Şekil 4.63, Şekil 4.64 ve Şekil 4.65 ile çelik disklerle ait deney sonrası mikroskobik görüntüler verilmiştir.



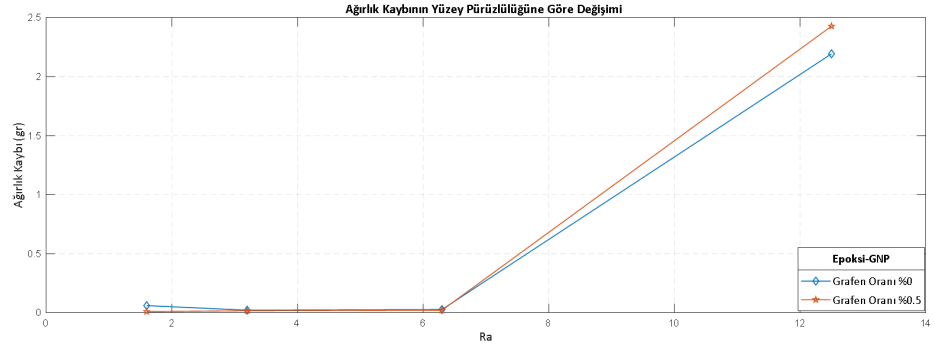
Şekil 4.57 Epoksi ve Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) pinlerin aşınma kayıpları



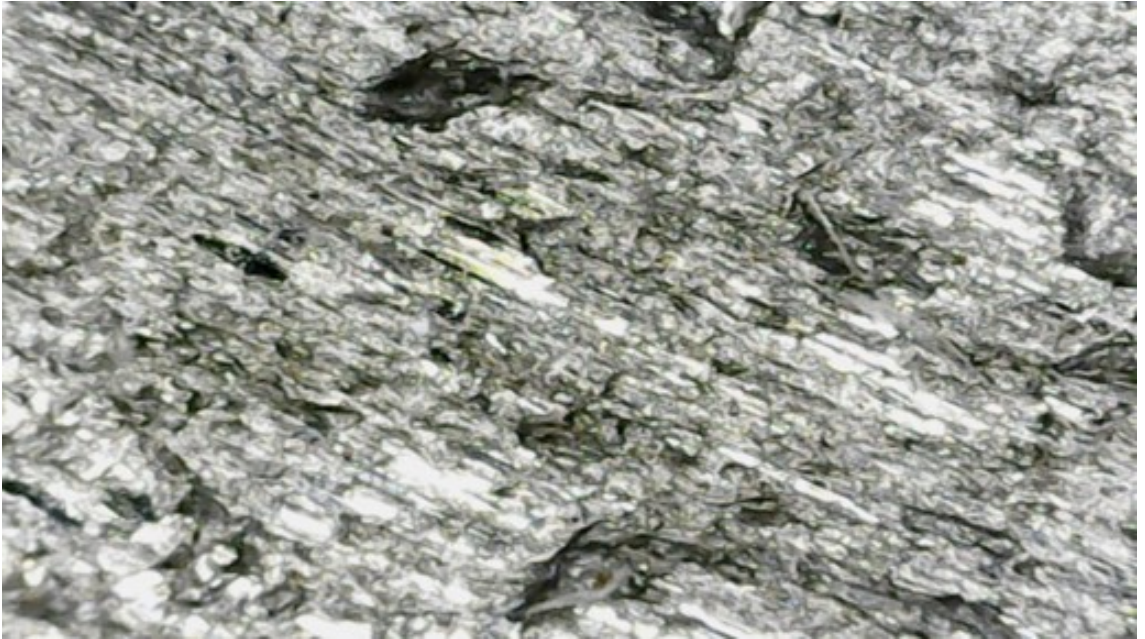
Şekil 4.58 Epoksi ve Epoksi-GNP (Grafen oranı %0.5) pinler ile, karşı diskler arasındaki sürtünme katsayıları



Şekil 4.59 Sürtünme katsayısının yüzey pürüzlülük değerlerine göre değişimi



Şekil 4.60 Kütle kayıplarının yüzey pürüzlülük değerlerine göre değişimi



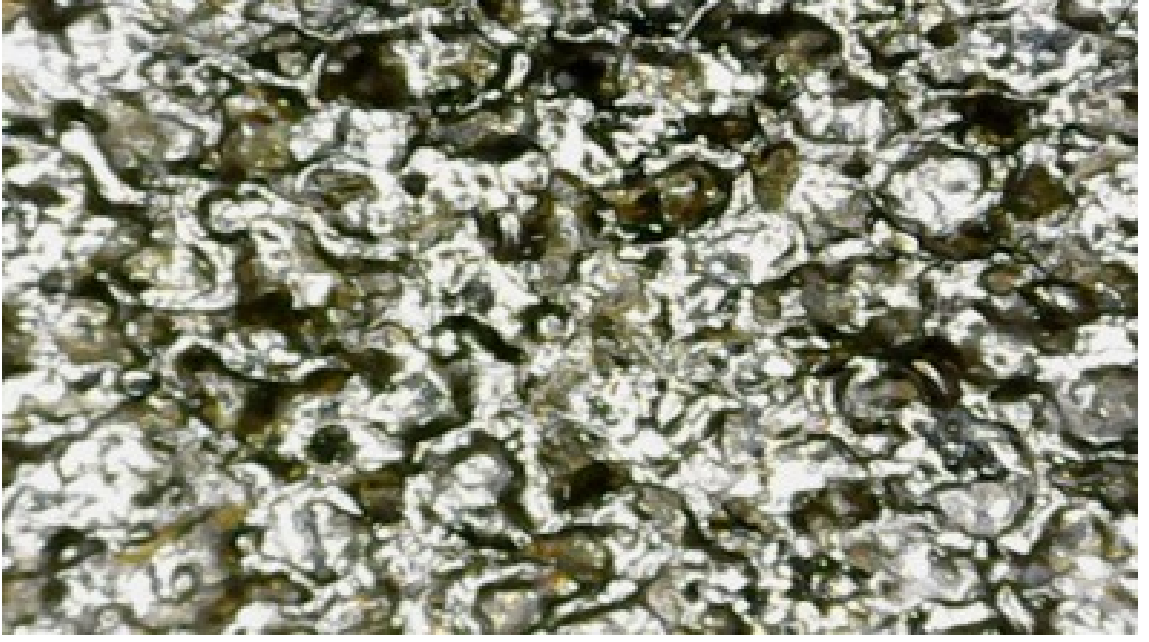
Şekil 4.61 Dökme demir diskin deney sonrası elektronik mikroskop ile yüzey görüntüsü



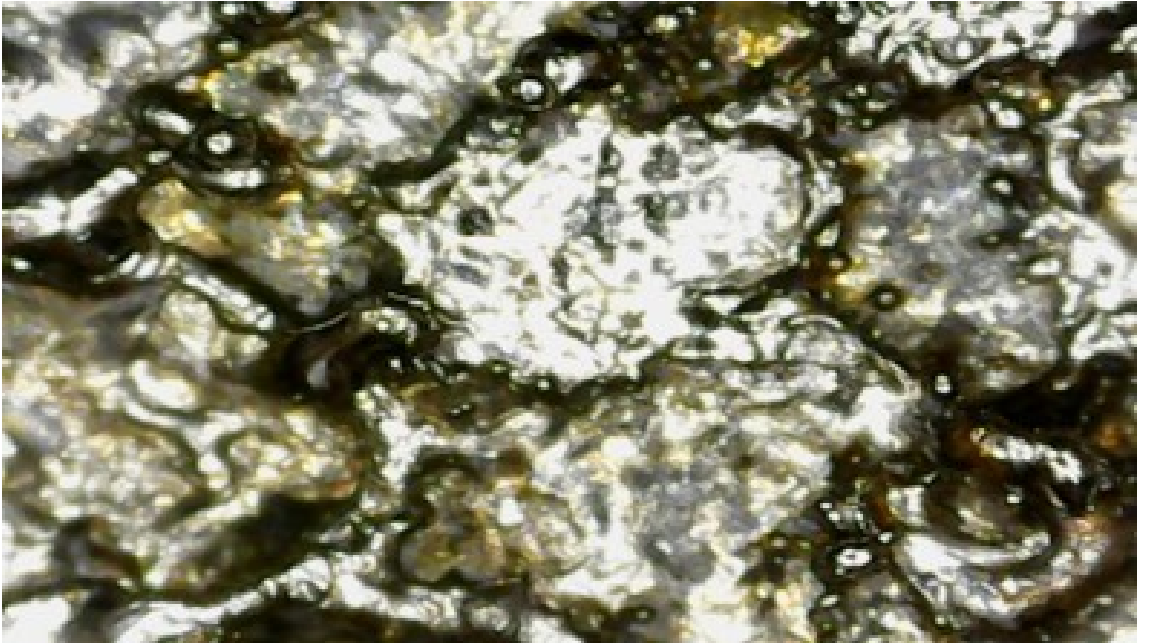
Şekil 4.62 Dökme demir disk yüzeyindeki çatlakta biriken grafen kalıntısı



Şekil 4.63 20 VDI çelik diskin deney sonrası elektronik mikroskop ile yüzey görüntüsü



Şekil 4.64 30 VDI çelik diskin deney sonrası elektronik mikroskop ile yüzey görüntüsü



Şekil 4.65 45 VDI çelik diskin deney sonrası elektronik mikroskop ile yüzey görüntüsü

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, aşınma testlerinde kullanılan pin-on-disk deney düzeneğinden elde edilen veriler kullanılarak kuru sürtünmeli aşınma prosesinin tanılaması yapılmıştır. Sistem tanılama için deneylerde ölçülen teğetsel kuvvet değişimi giriş, sürtünme yolu boyunca aşınma kaybı değişimi çıkış olacak şekilde tek giriş-tek çıkışlı aşınma prosesi üç farklı yapıda model kullanılarak tanılanmıştır. Aşınma karakteristiği olarak hesaplanan aşınma oranı değişimi nonlinear bir yapıdadır. Bu yapıya uygun olan modellerden ikisi proses modeli ve birinci mertebe transfer fonksiyonu modeli olup, model parametrelerinin kestiriminde Levenberg Marquart algoritması kullanılmıştır. Üçüncü model yapısı zaman serisi modellemesinde kullanılan ve yapay sinir ağı modeline dayanan NARX (Nonlinear autoregressive exogenous - Doğrusal olmayan otoregresif eksojen) modelidir. "Eksojen sistemin işleyişine dışarıdan doğru etki yaratan unsurları belirtmek üzere kullanılan bir tabirdir". NARX model yapısı gizli katmanda bir ve iki nöronlu olarak seçilmiştir. Aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonu seçilmiş, ağı eğitimi için Levenberg-Marquardt optimizasyon algoritması kullanılmıştır.

Aşınma karakteristiği modellenecek malzeme olarak, son yıllarda özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe yaygın kullanım alanı bulan Al-GNP ve Epoksi-GNP kompozitler kullanılmıştır. Aşınma testi numuneleri, kütlece %0.5 GNP katkılı epoksi ve kütlece %0,5-1-2 GNP katkılı Al-GNP kompozit malzemeleri, silindirik numune olarak laboratuvarında hazırlandıktan sonra, bu malzemelerin deneyleri pin-on-disk deney düzeneğinde ASTM standartlarına göre yapılmıştır. Pin-on-disk deneyinde aşındırıcı malzeme olarak döküm ve üç farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip çelik diskler kullanılmıştır.

Çelik disklerin pürüzlülüğü olarak Ra 1.6, Ra 3.2 ve 12.5 değerlerinde, bütün GNP katkı oranları için test numunelerindeki aşınma miktarlarının yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Disk yüzeylerindeki pürüzlülük değeri arttıkça pinlerdeki aşınan malzeme miktarı da artmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü Ra 6.3 olan DD ile çelik diskler karşılaştırıldığında, en yakın pürüzlülük değerine sahip olan çelik diskin pürüzlülük değeri Ra 3.2'dir. Bu iki diskin aşındırma miktarları karşılaştırıldığında; Al-GNP pindeki aşınma miktarının dökme demir diskte yaklaşık 1.44 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Buna karşın GNP katkılı alüminyum kompozit pinlerdeki aşınma miktarı ise çelik disklerle yapılan deneylerde daha fazla (yaklaşık 2 kat) olmaktadır. Bu durum yüzey pürüzlülük geometrisi ve aşındırıcı malzeme içeriğindeki karbon oranı ile ilgidir ve dökme demirin yüzeyindeki pürüzler çatlak şeklinde ve derinlemesine olup bu gözenekler arasında GNP yağlayıcının tutunmasıyla açıklanabilir.

Dökme demir diskle yapılan deneylerde saf epoksi malzemenin, epoksi-GNP'ye göre daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olmasına rağmen, kütle kaybının Epoksi-GNP'de % 20 oranında daha az olduğu görülmektedir. Çelik disklerde ise kütle kaybı, saf epoksi ile karşılaştırıldığında epoksi kompozitin sürtünme katsayısı Ra 1.6 yüzey pürüzlülüğüne sahip disk için daha yüksek çıktığı, Ra 3.2 disk için daha düşük çıkarken, Ra 12.5 diskte yaklaşık aynı kaldığı görülmüştür. Benzer karşılaştırma kütle kayıpları için yapıldığında Ra 1.6 disk hariç Ra3.2 ve Ra12.5 disklerle yapılan testlerde epoksi-GNP kompozitin daha düşük değerlerde kütle kaybına sahip olduğu görülmüştür. Kütle kayıpları genel olarak yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak artmıştır.

Al-GNP deneylerinden tanımlanmış modeller kullanılarak yapılan simülasyonlarda, simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlara uyumu transfer fonksiyonu modelinde %69-90, proses modelinde %70-84 ve NARX modelinde ise %92-99 aralığında gerçekleşmiştir. Bu çalışmada kullanılmış olan tüm model yapıları aşınma testleri sonucunda elde edilen aşınma karakteristiklerini kabul edilebilir düzeyde temsil etmektedir.

Epoksi-GNP deney verisi ile tanımlanmış modellerin simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlara uyumu transfer fonksiyonu modelinde %77-91, proses modelinde %71-90 ve NARX modelinde ise %91-98 aralığında olmuştur. Bu sonuçlara göre tüm malzeme çiftleri için öngörü yeteneği yüksek olan model yapısı NARX model yapısı olarak belirlenmiştir.

Nanografen takviyeli metal ve epoksi kompozitlerde, diğer iki modelle karşılaştırıldığında NARX modeli en iyi uyumu göstermiştir. Al-GNP metal matrisli kompozitlerde proses modeli, epoksi-GNP polimer matrisli kompozitlerde ise transfer fonksiyonu modeli ikinci yüksek performansı gösteren model yapıları olmuştur. Metal matrisli kompozitlerle karşılaştırıldığında, epoksi-GNP transfer fonksiyonu modelinin daha yüksek performansa sahip olması, epoksi-GNP deney sonuçlarının doğrusal bir yapıda olmasıyla açıklanabilir.

Aşınmaya maruz kalan sistem elemanlarının Pin-on-Disk test sonuçlarından elde edilen modeller kullanılarak yapılacak benzetim çalışmaları ile aşınmaya bağlı arızaların öngörülmesi ve bakım planlarının yapılması sağlanabilir, böylece makine ve parçalarının servis ömrü uzatılabilir.

- [1] M. Tabandeh-Khorshid, E. Omrani, P. L. Menezes, P. K. Rohatgi, "Tribological performance of self-lubricating aluminum matrix nanocomposites: Role of graphene nanoplatelets," *Engineering science and technology, an international journal*, vol. 19, no. 1, pp. 463–469, 2016.
- [2] G. Akgün, C. Özel, A. Bilgin, G. Yurtseven, "Pnömatik tip aşınma deney cihazının tasarımı ve imalatı," in 3. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir*, 29 - 30 Kasım 2012, pp. 545–555.
- [3] A. Devaraju, "A critical review on different types of wear of materials," *Int. J. Mech. Eng. Technol*, vol. 6, no. 11, pp. 77–83, 2015.
- [4] T. Aarthi, M. Karthi, M. Abinesh, "Detection and analysis of surface defects in metals using wavelet transform," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 3, no. 6, pp. 147–158, 2013.
- [5] A. D. Moghadam, E. Omrani, P. L. Menezes, P. K. Rohatgi, "Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (cnts) and graphene—a review," *Composites Part B: Engineering*, vol. 77, pp. 402–420, 2015.
- [6] D. Uzunsoy, T. Peng, I. Chang, I. Istif, "Investigation of wear behavior of aluminum alloy reinforced with carbon nanotubes," *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, vol. 7, no. 3, pp. 596–601, 2014.
- [7] U. Abdullahi, M. Maleque, U. Nirmal, "Wear mechanisms map of cnt-al nano-composite," *Procedia Engineering*, vol. 68, pp. 736–742, 2013.
- [8] A. Al-Qutub, A. Khalil, N. Saheb, A. Hakeem, "Wear and friction behavior of al6061 alloy reinforced with carbon nanotubes," *Wear*, vol. 297, no. 1-2, pp. 752–761, 2013.
- [9] S. Venkatesan M. A. Xavier, "Wear characteristics studies on graphene reinforced aa7050 based composite," *Materials Research Express*, vol. 6, no. 5, 2019.
- [10] J. Meng, X. Shi, M. Wang, S. Zhang, X. Kong, "Microstructure and wear resistance of graphene-reinforced aluminum matrix composites," *Materials Research Express*, vol. 6, no. 2, p. 026 517, 2018.
- [11] K. C. Ludema L. Ajayi, *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. CRC press, 2018.
- [12] I. Istif, M. Tunçel, A. Dalkılıç, "Pin on disk test for aluminum graphene metal matrix composites," in *Proceedings of 2nd international conference on mechanical and aeronautical engineering, Bangkok, Tayland*, 13 - 14 Temmuz 2016, pp. 58–61.

- [13] P. Jayashree, M. Federici, L. Bresciani, S. Turani, R. Sicigliano, G. Straffelini, "Effect of steel counterface on the dry sliding behaviour of a cu-based metal matrix composite," *Tribology Letters*, vol. 66, no. 4, p. 123, 2018.
- [14] B. Bhushan, *Introduction to tribology*. John Wiley & Sons, 2013.
- [15] G. Straffelini, *Friction and wear*. Springer, 2015.
- [16] J. Zhang, Z. Chen, H. Wu, J. Zhao, Z. Jiang, "Effect of graphene on the tribolayer of aluminum matrix composite during dry sliding wear," *Surface and Coatings Technology*, vol. 358, pp. 907–912, 2019.
- [17] J. Singh A. Chauhan, "Overview of wear performance of aluminium matrix composites reinforced with ceramic materials under the influence of controllable variables," *Ceramics International*, vol. 42, no. 1, pp. 56–81, 2016.
- [18] M. M. Bastwros, A. M. Esawi, A. Wifi, "Friction and wear behavior of al-cnt composites," *Wear*, vol. 307, no. 1-2, pp. 164–173, 2013.
- [19] A. El-Ghazaly, G. Anis, H. G. Salem, "Effect of graphene addition on the mechanical and tribological behavior of nanostructured aa2124 self-lubricating metal matrix composite," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 95, pp. 325–336, 2017.
- [20] M. Bastwros, G.-Y. Kim, C. Zhu, K. Zhang, S. Wang, X. Tang, X. Wang, "Effect of ball milling on graphene reinforced al6061 composite fabricated by semi-solid sintering," *Composites Part B: Engineering*, vol. 60, pp. 111–118, 2014.
- [21] P. D. Srivyas M. Charoo, "Application of hybrid aluminum matrix composite in automotive industry," *Materials Today: Proceedings*, vol. 18, pp. 3189–3200, 2019.
- [22] S. Prasad R. Asthana, "Aluminum metal-matrix composites for automotive applications: Tribological considerations," *Tribology letters*, vol. 17, no. 3, pp. 445–453, 2004.
- [23] A. Adetunla E. Akinlabi, "Fabrication of aluminum matrix composites for automotive industry via multipass friction stir processing technique," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 20, no. 6, pp. 1079–1088, 2019.
- [24] V. N. Krishnan, C. S. Kumar, G. Ganesan, "Investigation of wear behavior of hybrid polymer nanocomposite," *Materials Research Express*, vol. 5, no. 8, p. 085302, 2018.
- [25] R. Bobbili V. Madhu, "Sliding wear behavior of e-glass-epoxy/mwcnt composites: An experimental assessment," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 8–14, 2016.
- [26] W. Chuang, J. Geng-sheng, P. Lei, Z. Bao-lin, L. Ke-zhi, W. Jun-long, "Influences of surface modification of nano-silica by silane coupling agents on the thermal and frictional properties of cyanate ester resin," *Results in Physics*, vol. 9, pp. 886–896, 2018.
- [27] S. Chandrasekaran, N. Sato, F. Tölle, R. Mülhaupt, B. Fiedler, K. Schulte, "Fracture toughness and failure mechanism of graphene based epoxy composites," *Composites Science and Technology*, vol. 97, pp. 90–99, 2014.

- [28] Q. Zhang, Y. C. Wang, C. G. Bailey, R. K. Yuen, J. Parkin, W. Yang, C. Valles, "Quantifying effects of graphene nanoplatelets on slowing down combustion of epoxy composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 146, pp. 76–87, 2018.
- [29] H. Zhou, H. Wang, X. Du, Y. Zhang, H. Zhou, H. Yuan, H.-Y. Liu, Y.-W. Mai, "Facile fabrication of large 3d graphene filler modified epoxy composites with improved thermal conduction and tribological performance," *Carbon*, vol. 139, pp. 1168–1177, 2018.
- [30] X.-J. Shen, X.-Q. Pei, S.-Y. Fu, K. Friedrich, "Significantly modified tribological performance of epoxy nanocomposites at very low graphene oxide content," *Polymer*, vol. 54, no. 3, pp. 1234–1242, 2013.
- [31] X. Deng, J. Huang, C. Liu, L. Gan, J. Hong, W. Liu, L. Luo, Y. Wang, "Coupling hybrid of graphene oxide and layered zirconium phosphonate to enhance phenolic resin-based friction materials," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 135, no. 32, p. 46 543, 2018.
- [32] L. Yang, "Wear coefficient equation for aluminium-based matrix composites against steel disc," *Wear*, vol. 255, no. 1-6, pp. 579–592, 2003.
- [33] L. Yang, "A methodology for the prediction of standard steady-state wear coefficient in an aluminium-based matrix composite reinforced with alumina particles," *Journal of materials processing technology*, vol. 162, pp. 139–148, 2005.
- [34] I. Istif, O. Isin, E. Uzunsoy, D. Uzunsoy, "Linear model for pm brake lining material wear behaviour," *Materials Testing*, vol. 52, no. 11-12, pp. 795–799, 2010.
- [35] I. Istif, O. Isin, E. Uzunsoy, D. Uzunsoy, "Non-linear modelling of pm brake lining wear behaviour," *Materials Testing*, vol. 54, no. 1, pp. 45–48, 2012.
- [36] I. Istif M. T. Tuncel, "Dry sliding wear behavior of aluminum graphene nanoplatelet (gnp) composites," *Materials Testing*, vol. 58, no. 7-8, pp. 640–643, 2016.
- [37] I. Istif, O. Isin, D. Uzunsoy, T. Peng, I. Chang, "Prediction of wear behavior of aluminum alloy reinforced with carbon nanotubes using nonlinear identification," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2014.
- [38] I. Istif, O. Isin, E. Uzunsoy, D. Uzunsoy, "Identification of dry sliding wear behavior of b 4 c p particulate reinforced mg matrix composites for automobile disk brakes," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2013.
- [39] O. Isin, I. Istif, D. Uzunsoy, F. Guleryuz, "A comparison and identification study of dry sliding wear behaviour of al/b4cp and mg/b4cp composites for automobile disk brakes," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2014.
- [40] E. Car, *Alüminyum üretim süreçleri, tmmob metalurji mühendisleri odası*, 2011.
- [41] F. Habashi, "Handbook of extractive metallurgy, volume," *Light Metals*, vol. 19, no. 20, pp. 21–22, 1997.
- [42] A. Acar, "Modeling of polymer matrix composites using vbo model and finite element method formulations," *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul*, 2016.

- [43] İ. İstif, “Oransal valf ve hidrolik silindirden oluşan bir sistemin tanınması ve konum kontrolü,” *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*, 2003.
- [44] L. Ljung, “System identification,” *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, pp. 1–19, 1999.

A

Kuvvet Ölçümünde Kullanılan Yük Hücresinin Teknik Özellikleri - Tedea-Huntleigh 1022

Model 1022
Tedea-Huntleigh

VPG Transducers
Celtron • Revere • Sensortronics • Tedea-Huntleigh

Single-Point Aluminum Load Cell

SPECIFICATIONS					
PARAMETER	VALUE				UNIT
Rated capacity—R.C. (E_{max})	3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 35, 50, 100, 150, 200***				kg
NTEP/OIML accuracy class	NTEP	Non-Approved	C3*	C4	
Maximum no. of intervals (n)	5000 single**	1000	3000	4000	
$Y = E_{max}/V_{min}$	10000	1400	6000	10000	Maximum available 12000
Rated output—R.O.	2.0				mV/V
Rated output tolerance	0.2				±mV/V
Zero balance	0.1				±mV/V
Zero return, 30 min.	0.01	0.05	0.0170	0.0125	±% of applied load
Total error (per OIML R60)	0.0200	0.03	0.0200	0.0150	±% of rated output
Temperature effect on zero	0.0014	0.0100	0.0023	0.0014	±% of rated output/°C
Temperature effect on output	0.0010	0.0030	0.0010	0.00075	±% of rated output/°C
Eccentric loading error	0.0057	0.0085	0.0057	0.0042	±% of rated load/cm
Temperature range, compensated	-10 to +40				°C
Temperature range, safe	-30 to +70				°C
Maximum safe central overload	150				% of R.C.
Ultimate central overload	300				% of R.C.
Excitation, recommended	10				VDC or VAC RMS
Excitation, maximum	15				VDC or VAC RMS
Input impedance	415±15				Ω
Output impedance	350±3				Ω
Insulation resistance	>2000				MΩ
Cable length	0.5, other lengths available				m
Cable type	4 or 6 wire, PVC, single floating screen or grounded to element body				Standard
Construction	Aluminum				
Environmental protection	IP66				
Platform size (max.)	350 x 350				mm
Recommended torque	Up to 30 kg: 7.0 35 kg and up: 10.0				N*m

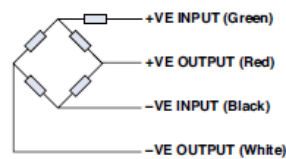
* 50% utilization

** Also available at 50% utilization

*** 150–200 kg are not approved by NTEP, 200 kg is not approved by OIML

All specifications subject to change without notice.

WIRING SCHEMATIC DIAGRAM****
(Unbalanced bridge configuration)



**** Balanced bridge available with 6 sense wires

B

Kütle Ölçümünde Kullanılan Hassas Terazinin Teknik Özellikleri - A&D GR-200

	GR-120	GR-200	GR-300	GR-202
Weighing capacity	120 g	210 g	310 g	210 g/42 g
Min. weighing value (1 digit)	0.1 mg	0.1 mg	0.1 mg	0.1 mg/0.01 mg
Repeatability (Standard deviation)	0.1 mg	0.1 mg	0.2 mg	0.1 mg/0.02 mg
Linearity	±0.2 mg	±0.2 mg	±0.3 mg	±0.2 mg/±0.03 mg
Stabilization time (approx.)	3.5 sec	3.5 sec	3.5 sec	3.5 sec/8 sec
Sensitivity drift (10°C ~ 30°C) Ambient temperature	±2 ppm/°C (Automatic Self Calibration is not used) 5°C ~ 40°C (41°F ~ 104°F), RH < 85% (Do not allow condensation)			
Min. unit weight	0.1 mg			
Min. 100% weight	0.01 g			
Interface	RS-232C			
Calibration weight	Built-in weight			
External calibration weight	100 g	200 g	200 g	200 g
	50 g	100 g	300 g	100 g
Weighing pan	ø85 mm			
Weighing room	178(W) x 160(D) x 233(H) mm			
External dimension	249(W) x 330(D) x 327(H) mm			
Power consumption	Approx. 11VA (supplied to AC adapter)			
AC adapter , Power supply	Please confirm that the AC adapter is correct for your receptacle type and voltage [factory preset].			
Net weight	Approx. 6.0 kg			

İletişim Bilgileri: mehmettunc.tuncel@gmail.com

Makale

1. İ. İstif and M.T. Tunçel, “Dry sliding wear behavior of aluminum graphene nanoplatelet (GNP) composites,” Materials Testing, vol. 58, no. 7-8, pp. 640–643, 2016.

Konferans Bildirisi

1. İ. İstif, M.T. Tunçel and D. Uzunsoy, "Non-Linear ARX Modelling of Wear Properties of Aluminum-graphene Composite", International Congress on Natural and Engineering Sciences, Saraybosna, Bosna-Hersek, p. 27, (Özet bildirisi), 09 Eylül 2015.
2. M.T. Tunçel, İ. İstif and D. Uzunsoy, "Linear Modelling of Wear Properties of Aluminum-Graphene Composite", International Congress on Natural and Engineering Sciences, Saraybosna, Bosna-Hersek, p. 40, (Özet bildirisi), 09 Eylül 2015.
3. İ. İstif, M. Tunçel and A. Dalkilic, “Pin on disk test for aluminum graphene metal matrix composites”, International Conference on Mechanical and Aeronautical Engineering, Bangkok, Tayland, pp. 58–61, 13 - 14 Temmuz 2016.