



**TOZ METALURJİSİ İLE ÖZELLİKLERİ İYİLEŞTİRİLMİŞ DEMİRYOLU
KOLLEKTÖR PABUCUNUN TASARIMI VE İMALATI**

Şenol ERDOĞAN

DOKTORA TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şenol ERDOĞAN

18/05/2023

TOZ METALURJİSİ İLE ÖZELLİKLERİ İYİLEŞTİRİLMİŞ DEMİRYOLU
KOLLEKTÖR PABUCUNUN TASARIMI VE İMALATI

(Doktora Tezi)

Şenol ERDOĞAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2023

ÖZET

Kollektör pabucu, trenlerin çalışma güvenliğini etkileyen önemli bir bileşen olmakla birlikte sistemin yapısı, ara yüzdeki elektrik akımı nedeniyle malzemenin sürtünme ve aşınma davranışı üzerinde karmaşık bir etkiye sahip olmaktadır. Bu tezde, Ankara Metrosu trenlerinde kullanılan üçüncü ray ve kollektör pabuçları ara yüzünde meydana gelen etkileşim, bu etkileşim nedeniyle kollektör pabucunun aşınma davranışı, kullanılan mevcut pabuç malzemesinin yerine toz metalurjisi ile özellikleri iyileştirilmiş yeni parçanın nasıl davranacağıyla ilgili deneysel ve sonlu elemanlar analizine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunun için bakır-grafit malzeme çifti kullanılmış, farklı oranlarda karışımlar hazırlanarak performans testleri uygulanmıştır. Mevcut durumda kollektör pabucu olarak kullanılan GGG40 küresel grafitli dökme demir pabuçta sertlik ortalama 184 HB olarak iken üretilen bakır-grafit çiftinde ortalama 161 HB olarak ölçülmüştür. Kollektörler üzerinde akım yoğunluğu ve baskı kuvveti olmak üzere iki farklı parametre bulunduğundan numuneler üzerinde de aynıları test edilmiş, mevcut durumda kullanılan 150 N kuvvet değerinde sabit tutulmak suretiyle akım yoğunlukları değiştirilirken akım yoğunluğu da $0,033 \text{ A/mm}^2$ değerinde sabit tutulmak suretiyle kuvvet değiştirilmiştir. Gerçekleştirilen sonlu eleman analizi ve pin-on-plate testinden elde edilen sıcaklık ölçümlerine göre uygulanan kuvvet 150 N değerinde sabit tutularak kayma mesafesi 100 metreye ulaştığında temas yüzeyindeki sıcaklığın hızla arttığı ve sonraki artışların daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile pin-on-plate testinde gerçekleştirilen ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında ölçüm farklılığının %0,8 ile %10 arasında değiştiği görülmüştür. Ayrıca %5, %10 ve %15 grafit ilaveli bakır grafit çiftleri kıyaslandığında ise %10 grafit ilaveli bakır-grafit çiftinin daha az aşınma miktarına sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Baz değerlerde ($150 \text{ N}-0.033 \text{ A/mm}^2$) %10 grafit ilaveli bakır-grafit çiftinin aşınma miktarı $4,50 \text{ mg/m}$ olarak gerçekleşirken, bu rakam %15 ve %5 grafit ilaveli bakır grafit çifti için sırasıyla $4,98 \text{ mg/m}$ ve $5,45 \text{ mg/m}$ olarak gerçekleşmiştir. Mevcut GGG40'dan yapılmış kollektör pabucu için oluşan aşınma miktarı ise bakır-grafit çiftinden yapılmış kollektör pabucundaki aşınma miktarına göre artış göstererek 6.4 mg/m olarak meydana gelmiştir.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Toz metalurjisi, kollektör pabucu, üçüncü ray
Sayfa Adedi : 117
Danışman : Prof. Dr. Yusuf USTA

DESIGN AND MANUFACTURING OF RAILWAY COLLECTOR SHOES WITH IMPROVED PROPERTIES BY POWDER METALLURGY

(Ph. D. Thesis)

Şenol ERDOĞAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2023

ABSTRACT

The collector shoe is a crucial element that has an impact on how safely trains run. Due to the electric current at the contact, the system's structure has a complex impact on the material's wear and friction behavior. The interaction between the third rail and the collector shoes used in the Ankara Metro trains, the wear behavior of the collector shoe as a result of this interaction, and how the new part whose properties have been improved by powder metallurgy will behave in place of the existing shoe material used have all been studied experimentally and through finite element analysis in this thesis. Performance tests were conducted by creating mixes with various ratios using the copper-graphite material pair for this. The copper-graphite pair of the new production has an average hardness value of 161 HB compared to the GGG40 ductile cast iron, which is currently utilized as a collector shoe, which has an average hardness value of 184 HB. The current density and the force applied to the samples are two different parameters that change during the experimental tests. Here, the current densities were altered while maintaining a constant force of 150 N. In a similar manner, the current density was varied while remaining constant at 0.033 A/mm² to observe how different force values affected the system. According to the temperature measurements from the wear tests and finite element analysis, the applied force in the pin-on-plate test was kept constant at 150 N, and when the sliding distance reached 100 meters, the temperature at the contact surface increased quickly and the subsequent increases were lower. It was discovered that the measurement difference ranged between 0.8% and 10% when the results of the pin-on-plate test technique were compared to those obtained from the finite element analysis. The 10% graphite added copper-graphite pair had smaller wear amount when 5%, 10%, and 15% graphite added copper-graphite couples are compared. It was found that the wear amounts for copper-graphite couples with 10%, 15%, and 5% graphite additions are 4.50 mg/m, 4.98 mg/m, and 5.45 mg/m, respectively, for the base values (150 N-0.033 A/mm²). On the other hand, the wear rate for the collector shoe made of existing GGG40 increased in accordance with the rate of wear on the collector shoe made of a copper-graphite pair and occurred at 6.4 mg/m.

Science Code : 93008

Keywords : Powder metallurgy, collector shoe, third rail

Page Number : 117

Supervisor : Prof. Dr. Yusuf USTA

TEŞEKKÜR

Danışman hocam Prof. Dr. Yusuf USTA'ya, bu çalışmanın her aşamasındaki fikirleri ve önerileri ile beni yönlendirip sağladığı tüm destek ve imkânlar ile mühendislik bilgimin gelişmesine ve akademik olgunluğa erişmeme katkılarından dolayı ve yan yana çalışma fırsatı verip bilgi ve tecrübelerini benimle paylaştığı için teşekkür ederim.

Çalışmamın ortaya çıkması ve ilerlemesinde doğru tespit ve düşüncelerini paylaşip yönlendirmeleri ve sunduğu imkânları ile çalışmamın her anına destek veren hocam Prof. Dr. Can ÇOĞUN'a teşekkür ederim.

Tez izleme komitelerim boyunca çalışmamı takip ederek, yapıcı eleştirileri ve verdiği tavsiyeleri ile çalışmamı geliştirmeme sağladığı katkılardan dolayı hocam Prof. Dr. Rahmi ÜNAL'a teşekkür ederim.

Ali BACIK özelinde modelleme ve üretim için tecrübelerini, düşüncelerini ve test işlemlerinde desteğini esirgemeyen Ankara Metrosu'na teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmalarımda yardımı için Yusuf ŞAHİNKAYA'ya, numune incelemeleri için Merve TUĞYANOĞLU özelinde TCDD Demiryolu Araştırma ve Test Merkezi'ne teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde maddi ve manevi destek verip sevgilerini her an hissettiren kıymetli aileme teşekkür ederim.

Sevgili eşim Hilal Tuğyanoğlu ERDOĞAN'a ve oğlum Emir ERDOĞAN'a sonsuz sevgileri için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	5
3. AŞINMA VE METAL MALZEMLERDEKİ AŞINMA DAVRANIŞLARI.....	17
3.1. Aşınma Türleri.....	18
3.1.1. Adhezif aşınma	18
3.1.2. Abrazif aşınma.....	19
3.1.3. Eroziv aşınma	20
3.1.4. Yorulma aşınması	22
3.2. Kayma Aşınması.....	22
3.2.1. Archard aşınma teorisi	23
3.3. Metal Malzemelerdeki Aşınma Davranışları.....	28
3.3.1. Sertlik.....	28
3.3.2. Mikroyapı	29
4. TOZ METALURJİSİ İLE İMALAT	33
4.1. Tozun Kullanım Alanları.....	33
4.2. Toz Üretimi ve Özellikleri.....	34

	Sayfa
4.2.1. Tozun fiziksel özellikleri	34
4.2.2. Tozun kimyasal özellikleri	36
4.3. Toz Metalurjisi Kullanarak Parça Üretim Süreci	36
4.3.1. Örnek alma ve karıştırma.....	36
4.3.2. Tozların sıkıştırılması	37
4.3.3. Sinterleme	38
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	41
5.1. Mevcut Durum Analizi	41
5.1.1. Mevcut durum için analiz metodolojisi	41
5.1.2. Görsel muayene	43
5.1.3. Sertlik taraması	44
5.1.4. Kimyasal analiz	47
5.1.5. Mikro Yapı İncelemesi	48
5.1.6. Çekme deneyi	54
5.2. Deneysel Testler İçin Numune Üretimi	56
5.3. Sertlik Testleri	60
5.4. Mikroyapı Analizi.....	61
5.5. Pin-On-Plate Aşınma Testi Uygulaması.....	62
5.5.1. Parametreler	64
5.5.2. Sıcaklık ölçümleri.....	64
5.5.3. Aşınma ölçümleri.....	68
5.5.4. Deney kararlılığı	70
6. ÜÇÜN RAY-KOLLEKTÖR PABUCUNUN SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZİ	73
6.1. Kayma Temas Modeli.....	73
6.2. Analiz Sonucu Oluşan Sıcaklık Değerinin İrdelenmesi	77

	Sayfa
6.3. Analiz Sonucu Oluşan Aşınmanın İrdelenmesi	82
6.4. Çözüm Ağının (Mesh) Analize Olan Etkisi (Hassasiyet Analizi)	90
7. FARKLI ORANLARDAKİ BAKIR-GRAFİT KOMPOZİSYONU .	95
7.1. Sertlik, Gözeneklilik ve Darbe Tokluğu Ölçümleri	95
7.2. Aşınma Miktarı Ölçümleri	96
7.3. Mikroyapı İncelemeleri	100
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	103
KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	117

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Pabuç sertlik ölçüm tablosu	45
Çizelge 5.2. Üçüncü Ray Sertlik Ölçüm Tablosu	46
Çizelge 5.3. Eski tip üçüncü ray kimyasal analiz	47
Çizelge 5.4. Yeni tip üçüncü ray kesit kimyasal analiz	47
Çizelge 5.5. Yeni tip üçüncü ray üst kimyasal analiz	48
Çizelge 5.6. Sertlik taraması ve karşılaştırma.....	60
Çizelge 6.1. Uygulanan parametre değerleri.....	76
Çizelge 7.1. Sertlik, Gözeneklilik ve Darbe Tokluğu Ölçümleri.....	96

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Üçüncü ray çalışma prensibi.....	1
Şekil 3.1. Adhezif aşınmaya yol açan adımlar. (a) Mikro kontaklar. (b) Pürüzlerin deformasyonu ve yüzey filmlerinin çıkarılması. (c) Kesme ve malzeme transferi.....	19
Şekil 3.2. İki cisim aşınmasında (a) aşındırıcı parçacıklar yüzeye sabitlenmesi (b) parçacıklar yüzeyler arasında serbestçe hareket ettiğinden üçüncü cisim aşınması	20
Şekil 3.3. Eroziv aşınma mekanizmaları	21
Şekil 3.4. Kayar kontaklarda tek temasın gösterimi. (a)-temas alanı maksimum, (b)-y mesafesinden sonra kayma ve (c)-2a olarak kayma mesafesinden sonra temas alanı sıfır	24
Şekil 3.5. Farklı aşınma koşulları altında aşınma katsayısı olan K aralığı. EHL: elastohidrodinamik yağlama, HL: hidrodinamik yağlama	27
Şekil 3.6. Saf metaller ve çelikler için bağıl aşınma direnci.....	29
Şekil 3.7. Farklı mikro yapılara sahip çeliklerin sertliğinin bir fonksiyonu olarak aşınma direnci.....	30
Şekil 4.1. Değişik öğütme ve karıştırma makinaları: (a)dönen tambur, (b)dönen çift	37
Şekil 5.1. Mevcut durum analizi	41
Şekil 5.2. Pabuç sertlik değişimi.....	45
Şekil 5.3. Üçüncü ray sertlik değişimi	46
Şekil 5.4. TS EN ISO 945 grafit büyüklüğü referans diyagramı	51
Şekil 5.5. TS EN ISO 945 grafit büyüklüğü referans diyagramı	53
Şekil 5.6 Yeni tip üçüncü ray çekme dayanımı	55
Şekil 5.7 Eski tip üçüncü ray çekme dayanımı	56
Şekil 5.8. Sinterlemede kullanılan zaman-sıcaklık programı	58
Şekil 5.9. Karşılaştırmalı sertlik değişimi.....	60
Şekil 5.10. Test sistemi ve aparatları (a-şematik gösterim, b-polyamid iş parçası tutucu, c-DC güç kaynağı)	63

Şekil	Sayfa
Şekil 5.11. Akım-sıcaklık değişimi ($F=150$ N sabit)	65
Şekil 5.12. Kuvvet-sıcaklık değişimi ($J=0,033$ A/mm ² sabit).....	66
Şekil 5.13. Gerçek ölçüm ve pin-on plate testi karşılaştırması.....	67
Şekil 5.14. Döküm ve Bakır-Grafit malzemeleri karşılaştırması ($J=0,033$ A/mm ² sabit).....	68
Şekil 5.15. Döküm ve Bakır-Grafit malzemeleri karşılaştırması ($F=150$ N sabit)	69
Şekil 5.16. Aşınma testi ölçü hata oranları (kuvvet sabit)(Akım yoğunlukları; a)0,011 A/mm ² , b) 0,022 A/mm ² , c) 0,033 A/mm ² , d) 0,044 A/mm ²).....	71
Şekil 5.17. Aşınma testi ölçü hata oranları (akım yoğunluğu sabit) (Kuvvet; a) 50 N, b) 100 N, c) 150 N, d) 200 N).....	72
Şekil 6.1. Üçüncü ray-kollektör pabucu sistemi ve 3D sonlu elemanlar modeli.....	74
Şekil 6.2. Katedilen mesafeye göre sıcaklık değişimi ($F=150$ N ve $J=0,033$ A/mm ²) .	76
Şekil 6.3. Analiz sonucu ortaya çıkan sıcaklık dağılımı (kuvvet sabit).....	77
Şekil 6.4. Sabit kuvvet altında kollektör pabucundaki sıcaklık dağılımı.....	77
Şekil 6.5. Sabit kuvvet altında pin-on-plate testi ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırması.....	78
Şekil 6.6. Analiz sonucu ortaya çıkan sıcaklık dağılımı (akım yoğunluğu sabit).....	79
Şekil 6.7. Sabit akım yoğunluğu altında kollektör pabucundaki sıcaklık dağılımı	80
Şekil 6.8. Sabit akım yoğunluğu altında pin-on-plate testi ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırması.....	81
Şekil 6.9. Üç yöntemde elde edilen sıcaklık karşılaştırması.....	81
Şekil 6.10. Analiz sonucu ortaya çıkan aşınma (kuvvet sabit)	83
Şekil 6.11. Döküm ve bakır-grafit çiftinin sonlu elemanlar analizi aşınma miktarı karşılaştırması (kuvvet sabit)	84
Şekil 6.12. Döküm malzeme için aşınma miktarı karşılaştırması (kuvvet sabit).....	84
Şekil 6.13. Bakır-grafit çifti için aşınma miktarı karşılaştırması (kuvvet sabit).....	85
Şekil 6.14. Analiz sonucu ortaya çıkan aşınma (akım yoğunluğu sabit).....	86

Şekil	Sayfa
Şekil 6.15. Döküm ve bakır-grafit çiftinin sonlu elemanlar analizi aşınma miktarı karşılaştırması (akım yoğunluğu sabit)	87
Şekil 6.16. Döküm ve bakır-grafit çiftinin sonlu elemanlar analizi aşınma miktarı karşılaştırması (akım yoğunluğu sabit, 200-500 N kuvvet uygulanması durumu).....	88
Şekil 6.17. Döküm malzeme için aşınma miktarı karşılaştırması (akım yoğunluğu sabit).....	89
Şekil 6.18. Bakır-grafit çifti için aşınma miktarı karşılaştırması (akım yoğunluğu sabit).....	89
Şekil 6.19. Ağ yapısı görselleri ((a) 15 mm, b) 7 mm ve c) 3 mm).....	92
Şekil 6.20. Eleman sayısı karşılaştırması.....	92
Şekil 6.21. Analiz hassasiyeti karşılaştırması	93
Şekil 6.22. Analiz süresi ve eleman sayısı karşılaştırma	93
Şekil 7.1. Aşınma miktarı karşılaştırması (akım yoğunluğu sabit, %5 grafit ilaveli)...	96
Şekil 7.2. Aşınma miktarı karşılaştırması (akım yoğunluğu sabit, %15 grafit ilaveli ...	97
Şekil 7.3. Üç farklı oranda grafit içeren numunelerin sabit akım yoğunluğu altında pin-on plate testi karşılaştırması.....	97
Şekil 7.4. Aşınma miktarı karşılaştırması (kuvvet sabit, %5 grafit ilaveli).....	98
Şekil 7.5. Aşınma miktarı karşılaştırması (kuvvet sabit, %15 grafit ilaveli).....	99
Şekil 7.6. Üç farklı oranda grafit içeren numunelerin sabit kuvvet altında pin-on plate testi karşılaştırması	99
Şekil 7.7. Bakır-grafit çifti X-ışını kırınım grafiği	101

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Örnek bir pabuç görünümü.....	2
Resim 5.1. Eski tip pabuç resimleri (a-kullanılmamış pabuç, b-kullanılmış pabuç)	42
Resim 5.2. Yeni tip pabuç resimleri (a-kullanılmamış pabuç, b-kullanılmış pabuç)	42
Resim 5.3. Eski ve yeni tip üçüncü ray resimleri	43
Resim 5.4. Görsel muayene resimleri (a-eski tip pabuç, b-yeni tip pabuç)	44
Resim 5.5. Sertlik ölçümünden görseller	46
Resim 5.6. Eski tip kullanılmış pabuç mikro yapısı (E1)	49
Resim 5.7. Eski tip kullanılmış pabuç mikro yapı (Dağlanmış) (E1).....	49
Resim 5.8. Eski tip kullanılmamış pabuç mikro yapısı (E2)	50
Resim 5.9. Eski tip kullanılmamış pabuç mikro yapısı dağlanmış (E2).....	50
Resim 5.10. Eski tip kullanılmış pabuç mikro yapısı (Y1).....	52
Resim 5.11. Eski tip kullanılmış pabuç mikro yapısı (Dağlanmış)(Y1).....	52
Resim 5.12. Yeni tip kullanılmamış pabuç mikro yapısı (Y2)	52
Resim 5.13 Yeni tip kullanılmamış pabuç mikro yapısı (Dağlanmış) (Y2)	53
Resim 5.14 Eski tip üçüncü ray kalıntı incelemesi	54
Resim 5.15. Eski tip üçüncü ray mikro yapı incelemesi.....	54
Resim 5.16. Üçüncü ray çekme deney numuneleri.....	55
Resim 5.17. Toz basım işlemi.....	57
Resim 5.18. Kalıptan çıkarılan numuneler	57
Resim 5.19. Sinterleme sırasındaki su buharı oluşumu	58
Resim 5.20. Ayır toz sinterlemesi (a-grafit sinterleme, b-bakır toz sinterleme).....	59
Resim 5.21. Farklı bakır tozu uygulanırken oluşan su buharı	59
Resim 5.22. Sinterlenen numune	60

Resim	Sayfa
Resim 5.23. Mikroyapı resimleri	61
Resim 5.24. Kollektör pabucu üzerinden gerçek sıcaklık ölçümü.....	67
Resim 7.1. Farklı oranda grafit içeren bakır-grafit çiftleri (a-%5 grafit, b-%10 grafit, c-%15 grafit)	100
Resim 7.2. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) (a-%5 grafit, b-%10 grafit, c-%15 grafit).....	101



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
AC	Alternatif akım
$A_{gt(corr)}$	Çekme uzaması (toplam uzama)
A_p	Temas alanı
cm	Santimetre
Cu	Bakır
DC	Doğru akım
ϵ	Gerinim
F	Uygulanan kuvvet
F_m	Malzemenin dayandığı en yüksek kuvvet
GPa	Gigapaskal
h	Zaman (saat)
H₂	Hidrojen gazı
HBW	Brinel sertlik
HV	Vickers sertlik
I	Akım
J	Akım yoğunluğu
J	Joule
k	Aşınma oranı
kg	Kilogram
Km	Kilometre
kPa	Kilopaskal
m	Metre
m_E	Elastik modül
mg	Miligram
mm	Milimetre
mm²	Milimetrekare

Simgeler**Açıklamalar**

mm³	Milimetreküp
MPa	Megapaskal
N	Newton
Pa	Pascal
R	Direnç
R_m	Çekme mukavemeti
R_{p0.2}	%0.2 kalıcı uzama miktarındaki akma değeri
sn	Zaman (saniye)
t	Zaman (dakika)
T	Sıcaklık
V	Volt
σ	Gerilme
Ω	Ohm
°C	Santigrat derece
μm	Mikrometre

Kısaltmalar**Açıklamalar**

EHL	Elastohidrodinamik yağlama
EN	Avrupa Standardı
DATEM	Demiryolu Araştırma ve Teknoloji Merkezi
HL	Hidrodinamik yağlama
ISO	Taramalı elektron mikroskobu
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
TS	Türk Standartları

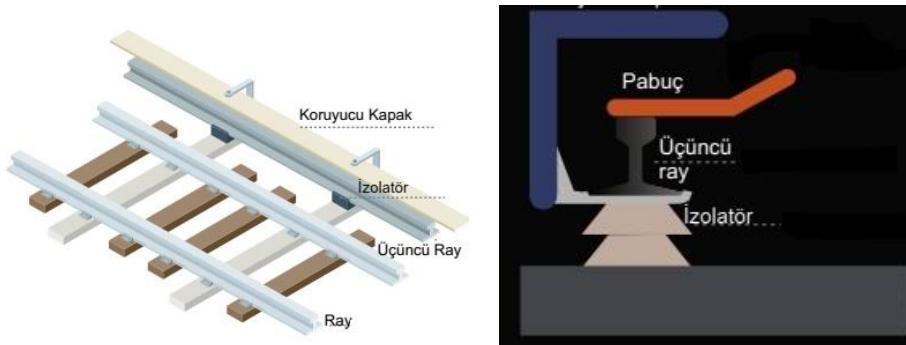
1. GİRİŞ

Elektrikli lokomotifler, metrolar ve tramvaylar hareket etmek için elektrik gücüne ihtiyaç duymaktadırlar. Güç aktarımı hareket için sabit modda güvenli ve güvenilir olması gerekmektedir. Güç iletimi, bir havai tel veya raylarla yapılabilir. Alternatif akım (AC) sistemlerinde çoğu zaman havai tel ve kablolar kullanılmakla birlikte direkt akım (DC) kullanan sistemlerde havai tel ve üçüncü bir ray kullanılabilmektedir.

Bahse konu bu güç iletimi için optimum bir sistem tasarlanarak çözülmesi gereken problemler çevre kirliliği, maliyet, kalite, dayanıklılık ve enerji olarak sıralanabilmektedir. Çözülmesi gereken bu problemler dikkate alındığında şehir içi verimli ulaşım araçları metro sistemleri hafif raylı ulaşım araçları ve tramvaylar olarak sıralanabilmektedir. Raylı sistem olarak ifade edilebilen bu ulaşım araçları 750 V, 1500 V ve 3000 V DC gerilim ile çalıştırılabilir [1, 2].

Konunun tanımı

Üçüncü ray tren içerisinde kullanılması gereken enerji yani trenin gittiği rayların haricinde hemen yanına ayrı bir enerji hattı olarak tanımlanabilmektedir. Üçüncü rayı avantajlı kılan özelliklerinden birisi 750 V DC olarak kullanılan düşük gerilimdir. Bunun yanı sıra yapısı itibarıyla direkt rayların kenarına kurulduğu için tünel yüksekliğini düşürerek hem daha kısa iş süresi hem de daha az maliyetli sistem elde edilebilecektir.



Şekil 1.1. Üçüncü ray çalışma prensibi

Şekil 1.1. mevcut rayın iki hareketli raya paralel olduğu DC üçüncü raylı çekiş sisteminin bir çalışma şemasıyla birlikte kollektör pabucunun üçüncü rayın üstünde kaydığı ve akımın kollektör pabucu vasıtasıyla trenle toplandığı üst kontak sistemini göstermektedir. Modern alüminyum-paslanmaz çelik kompozit iletken ray, ekstrüde edilmiş bir alüminyum gövdenin

üst kısmında paslanmaz çelikten haddelenmiş ince bir kesittir ve geleneksel tüm çelik iletken raylara göre yüksek elektrik iletkenliği, korozyon direnci, düşük yoğunluk gibi birçok avantaja sahiptir. vb. birçok ülkenin hızlı ulaşım sisteminde giderek daha fazla kullanılmasını sağlamaktadır.

Cer gücü için doğrultulan ve 750 V DC olarak elde edilen elektrik üçüncü raydan, araçların yan taraflarında bulunan akım pabuçları aracılığıyla raydan trene aktarılır. Bu pabuçlar (Resim 1.1) aracın her iki tarafında da bulunur. Aracın hareket etmesi için bu akım pabuçlarından en az birinin üçüncü ray ile temas hâlinde olması gerekir. Aksi takdirde araca güç aktarılamayacağından dolayı araç hareket etmeyecektir.



Resim 1.1. Örnek bir pabuç görünümü

Kollektör pabucunun maruz kaldığı 4 durum trenin sıklıkla durup kalkması, ivmelenme, rejeneratif frenleme ve yüksek toz etkileşimi olarak sıralanabilir. Bu durumlara göre kollektör pabucunun karşılaması gereken özellikler ise dayanım (mekanik olarak), kalkış ve duruş anında yüksek akım dayanım kabiliyeti, üçüncü raya tahribat vermemesi, iyi kayma özelliği ve elektriksel iletim olarak sıralanabilir. Kollektör pabucu, tüm trenin güvenliğini etkileyen önemli bir bileşendir. Kollektör pabuçlarının çoğu, özellikle kuru kayma koşullarında kayma aşınmasına karşı mükemmel dirence sahip farklı tipte gri dökme demirden yapılmıştır.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde literatür araştırması, üçüncü bölümünde malzemelerdeki aşınma ve aşınma davranışları, dördüncü bölümünde toz metalurjisi ile imalat, beşinci bölümünde deneysel çalışmalar, altıncı bölümünde sonlu elemanlar analizi ile üçüncü ray-pabuç ara yüzeyindeki aşınma miktarı ve sıcaklık tayini, yedinci bölümde

farklı oranlardaki bakır-grafit kompozisyonlarının davranışları, sekizinci ve son bölümde ise sonuç ve öneriler kısmı yer almıştır.

Araştırmanın amacı ve önemi

Bu tez kapsamında demiryolu araçlarında elektrik iletiminin sağlandığı ve sarf olarak değiştirilen kollektör pabucunun toz metalurjisi yöntemiyle dayanımı yükseltilmiş, elektrik iletkenliği optimum ve temas halindeki üçüncü raya zarar vermeyen malzeme kompozisyonu tasarlanarak doğrulama testlerinin yapılması amaçlanmaktadır. Bu durum yüksek bakım giderlerine sahip olan demiryolu araçlarındaki performansı artırılmış ürün tasarımı sağlanmış olacaktır.

Sürecin sonunda,

- Toz metalurjisi tekniğinin elektrik-elektronik-mekanik gibi multidisipliner yapıya sahip demiryolu alanında uygulamasının sağlanması,
 - Yerli, üretilebilir ve özellikleri iyileştirilmiş kollektör pabucu imalatının gerçekleştirilmesi,
 - Yeni nesil üretim teknikleri ile farklı malzeme gruplarının kullanımının sağlanması
- bu tezin önemi olarak sıralanabilir.



2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bu kısımda, kollektör pabucu ve üçüncü ray arayüzünde gerçekleşen tribolojik olaylar, kollektör pabucu olarak kullanılabilecek malzemelerin üretimi ve üretim sonrası elektriksel, mekanik ve termal yöndeki davranış biçimleri, özellikle bu tezin konusunu oluşturan bakır-grafit çiftinin toz metalurjisi yöntemiyle üretilerek kollektör pabucu ile kullanımı ve aşınma davranışları hususlarında literatürde gerçekleştirilen çalışmalar verilmektedir.

Zhang, yağlanmamış kayma teması sırasında sürtünme ile indüklenen oksit tabakası ile alt tabaka metali arasındaki yapışma mekanizmasını araştırmıştır. Buna göre, yağlanmamış tek yönlü kayma aşınması yoluyla uyarılan ve metalik yapı üzerine kaplanmış tribo-koruyucu oksit tabakasının kararsızlaşmasına sebep olan faktörler hakkındaki yaygın görüşler incelenmiştir [3].

Hase, grafit dökme demir ve küresel grafit dökme demir için tribolojik faktörleri yerinde gözlemler yoluyla görselleştirmeye ve aydınlatmaya çalışılmıştır. Ayrıca grafit, aşınma partikülleri ve yağlayıcıların sürtünme ve aşınmadaki davranışları henüz tam olarak anlaşılamadığı için çeşitli kıvamlarda greslerle deneyler yapılmış ve yağsız koşullarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır [4].

Prasad, gri bir dökme demirin, uygulanan bir yük aralığında farklı kayma hızlarında kayma aşınması davranışını incelemiştir. Bununla birlikte yağlama maddesinin aşınma üzerindeki etkisi de incelenmiştir [5].

Ayrıca Prasad, malzeme ve test parametrelerinin bir dökme demirin kayma aşınması özellikleri üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Malzeme parametreleri, grafit fazının şekli, ferrit ve perlit gibi matris bileşenlerinin değişen fraksiyonu açısından mikroyapısal özellikleri içermektedir. Çalışma için seçilen kayma aşınması koşulları ile ilgili faktörler, bir yağlayıcının varlığı ve yağda asılı duran iki farklı grafit partikülü konsantrasyonu açısından uygulanan basınç ve test ortamı özelliğini göstermektedir. özellikle birden fazla parametre söz konusu olduğunda, malzemenin kayma davranışı parametreleri ile bunların kontrol modları arasında net bir ilişki yoktur, çünkü bu faktörler malzemenin genel aşınma tepkisini bütünleştirici hale getirdiğini değerlendirmiştir [6].

Yang ve arkadaşları bir trenin çalışma mesafesine dayalı olarak kollektör pabucunda meydana gelen aşınmayla ilgili olarak tahmin yapmış ve gerçekleştirilen deneylere göre bu yöntemin etkinliğini test etmiştir. Buna göre, uygulanan elektrik akımı, kayan temas çiftlerinin sürtünme katsayısını azaltıcı etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur [7].

Kennedy ve Baker, kuru veya sınır yağlamalı pin-on-disk tribotestlerinde yüzey sıcaklığı artışlarını tahmin etmek için faydalanılabilecek en kullanışlı analitik ve sayısal yöntemlerden bazılarını sunmuştur. Pabuç ve üçüncü ray arasındaki temas sıcaklığında yerel bir artış yaşanabileceği gibi, bu durumun tribolojik davranışı önemli ölçüde etkilediği ve oksidasyonu desteklediğini ortaya koymuşlardır [8].

Milković ve Ban, kollektör pabucu ve üçüncü rayı oluşturan sürtünme çiftlerinde meydana gelen sürtünme katsayısının nasıl değiştiğini incelemiştir. Buna göre, deneysel analiz, darbe akım genliğindeki bir artışın, ara yüzdeki sürtünme katsayısında bir azalmaya yol açarak, toplayıcıdaki mekanik kayıpların azalmasına ve elektrik kayıplarının değişmesine neden olduğunu göstermiştir [9].

Stewart ve arkadaşları Birleşik Krallık'ın üçüncü ray sisteminin dinamik özelliklerini, araç bojisi ve monte edilmiş kollektör pabucu sensörü arasındaki ilişkiyi gerçek ölçüm yöntemleri kullanarak test etmiştir. Buna göre, alınan sonuçlar kollektör pabucunun genel olarak tasarım ilkeleri doğrultusunda çalıştığını göstermekle birlikte pabuç ve ray arasındaki temas kuvvetinin de tahmin edilebilir olduğunu göstermiştir [10].

Dong ve arkadaşları geleneksel pin-on-disk aparatlarının parçalarını ve kontrol sistemini modifiye ederek yeni bir test cihazı geliştirmişlerdir. Metro üçüncü raylı cer sisteminde kullanılan alüminyum-paslanmaz çelik kompozit bara ve kollektör pabucunun sürtünme ve aşınma özellikleri, kayan arayüz boyunca uygulanan bir elektrik akımı ile test cihazında incelenmiştir. Deney sonuçları, elektrik akımı ile sürtünme ve aşınmada normal gerilimin bir eşik değerinin var olduğunu, eşik değeri, sürtünme katsayılarının değişimi ve aşınma hacmi kayıplarının artan dereceleri ve malzeme kaybının ana mekanizması ile ilgili olduğunu ortaya koymuştur [11].

Dong ve arkadaşları başka bir çalışmada elektrik akımının polaritesinin alüminyum/paslanmaz çelik kompozit üçüncü raylar ve toplayıcı pabuçların tribolojik

özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bir metro trenine elektrik akımı verilmesi sürecinde, sürtünme yüzeyinin sıcaklık artışı, üçüncü ray ile kollektör pabucu arasındaki sürtünme ve aşınma özelliklerini etkileyen önemli bir faktör olduğu, sıcaklık artışı ile sürtünme çiftinin temas yüzeylerinin oksitlendiği, bağ kuvvetinin ve aşınma hacminin azaldığı gösterilmiştir [12].

Dong ve arkadaşları bir diğer çalışmada kompozit bir iletken rayın analiz programı kullanılarak bir metro üçüncü ray çekiş sisteminde kullanılan kollektör pabucunun elektrik akımı altında kayma sürtünme modeli oluşturmuştur. Kollektör pabucu ve üçüncü ray ara yüzünün temas noktaları sürekli değiştiğinden, akım taşıyan bu tarz bir sürtünme çifti arasındaki sıcaklığı sahada ve deneysel koşullar altında doğru bir şekilde ölçmek oldukça zordur. Akım taşıyan tribolojik olarak temas halindeki bölgelerde sıcaklık değişimi noktasında yapılan araştırmalarda özellikle meydana gelen sürtünme ve joule ısısının bir arada yapılan değerlendirilmesi nispeten azdır. Bununla birlikte, sıcaklık artışını kontrol etmek ve malzeme aşınmasını önlemek için, özellikle metro taşımacılığı olmak üzere endüstriyel uygulamalar için araştırmaların yapılması gerekli olduğu değerlendirilmiştir [13].

Zhao ve arkadaşları akımlı ve akımsız yüksek hızlı kaymada sürtünme katsayısı ve aşınma oranını ve aşınma kalıntılarını incelemişlerdir. Bu çalışmada 75 m/s kayma hızı ve 100A akım kapasiteli yüksek hızlı kayma test makinesi geliştirilmiştir. Elektrik akımı olan ve olmayan yüksek hızlı kaymada bir karbon-grafit malzemenin sürtünme ve aşınma davranışları gözlemlenmiştir. Elektrik akımı olmadan, yükün etkisi ve kayma-aşınma üzerindeki hız Archard'ın aşınma denklemi ile açıklanabildiğini, akımla birlikte, karbon grafit malzemenin sürtünme ve aşınma davranışları farklı ve karmaşık olduğunu, SEM analizi, akımlı ve akımsız yüksek hızlı kaymada farklı aşınma kalıntılarının meydana geldiğini göstermiştir [14].

Yaşar ve arkadaşları fırça testi amacıyla yeni bir pin-on-slip ring tipi sürtünme ve aşınma test makinesi tasarlamış ve üretmiştir. Ağırlıkça %90 bakır ve ağırlıkça %10 grafit içeren bakır-grafit bazlı elektrikli fırça, toz metalurjisi ile üretilmiş ve akımla 10–200 kPa'da farklı fırça yay basınçlarında tribolojik davranış ve voltaj düşüşü incelenmiştir. Buna göre, spesifik aşınma eğrisi, düşük, hafif ve yüksek gibi üç farklı aşınma oranı rejimi gösterdiği, 30 kPa'nın altında ve 120 kPa fırça yay basınçlarının (BSP) üzerinde (sırasıyla 3 ve 12N yükler) ciddi

bir aşınma olduğu, elektron mikroskopu gözlemlerinde ise düşük ve hafif aşınma rejimlerinde aşınma numunelerinin kayma yüzeylerinde sürekli bir yüzey tabakasının oluştuğu tespit edilmiştir [15].

Sil'man ve arkadaşları Fe-C-Cu sisteminin faz diyagramının parçaları (kesitler ve çıkıntılar) yardımıyla bakırın dökme demirin yapısı üzerindeki etkisini incelemiş, bakırın ana maddedeki çözünürlüğünü değerlendirmiştir. Buna göre, üç fazlı ötektoid karışımlar, özellikle bakır içeren perlit, bakır alaşımlı çeliklerde ve dökme demirde oluşmuştur. Bu tür perlit, sementit pulları ve ferrit tabakaları, karbon atomları için düşük difüzyon geçirgenliğine sahip olan ve dolayısıyla perlitin yüksek kinetik stabilizasyonunu sağlayan çok ince bir bakır içeren faz filmi ile ayrıldığı gösterilmiştir [16].

Cho ve arkadaşları sünek dökme demirlerin optimum alaşım tasarımı için deneysel veriler elde etmiş ve soğuk pres kalıp malzemesi kullanmak için alaşım elementlerinin döküm sonrası mikroyapılarını ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Burada, maksimum gerilme mukavemeti, %0,2 dayanıklılık mukavemeti, uzama ve çentiksiz Charpy darbe enerjisi ölçümleri, ağırlıkça yüzde 0,25 ila 0,75 aralığındaki alaşım miktarlarının bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Sertlik, kırılan çekme numuneleri üzerinde ölçülmüş ve Mo, Cu, Ni ve Cr elementlerinin küçük ilaveleriyle, döküm mekanik özelliklerini değiştirdiği gösterilmiştir [17].

Agunsoye ve arkadaşları bakır katkılarının gri dökme demirin aşınmasını ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Çalışma aynı zamanda gri dökme demirin tokluğunun artırılmasını da amaçlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre, gri dökme demir eriyiğinde bakırın (%99 saflık) varlığı sementit oluşumunu engellediği ortaya koyulmuştur. Bununla birlikte, gri dökme demirin darbe enerjisi, %ağırlık (wt) bakır ilavesi ile arttığı, bu nedenle geliştirilen Fe-Cu alaşımı özellikle amortisörde titreşim sönümleme uygulamasında kullanılabilecek mükemmel bir malzeme olduğunu göstermiştir [18].

Abdou ve arkadaşları ağırlıkça %0,00 ila %3,15 arasında farklı bakır katkılı gri dökme demir numunelerinin aşınma direncini araştırmak için deneysel bir çalışma sunmuştur. Deneysel denemeleri yürütmek ve aşınma süresi, dönme hızı ve normal yükün aşınma davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek için bir pin-on-disk aparatı tasarlanmış ve yapılmıştır. Buna göre sonuçlar morfoloji ve mikro yapının malzemenin sergilediği aşınma rejimi ile

ilgili olarak önemli parametreler olduğunu göstermiş, aşınma kayıplarının aşınma süresi, dönme hızı ve uygulanan basınç arttıkça arttığı doğrulanmıştır [19].

Dutkiewicz ve arkadaşları gerçekleştirdiği çalışmada kaba ve ince olmak üzere iki tip grafen plaketi ile güçlendirilmiş bakır matrisli kompozitler, grafen ilavelerinin dökme kompozitlerin elektriksel iletkenliği, sertliği ve mikro yapısı üzerindeki etkisini bulmak için incelemiştir. Sonuç olarak, ince grafenin eklenmesi, kaba grafen plaketsiz kompozite göre yaklaşık %50 daha yüksek sertlik ve yaklaşık %30 daha düşük elektrik direncine yol açtığını gösterilmiştir [20].

Celebi Efe ve arkadaşları SiC partikül boyutunun silisyum karbür partikül takviyeli bakır matrisli kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Bakır-SiC kompozitleri, herhangi bir inert ortam (gaz veya vakum) kullanılmadan, grafit tozlarının içine gömülen geleneksel toz metalurjisi yöntemiyle başarıyla üretilmiş, 5 µm parçacık boyutuna sahip SiC'ye sahip tüm Cu-SiC kompozitlerinin bağl yoğunlukları, sertliği ve elektriksel iletkenliği, 1 µm parçacık boyutuna sahip SiC'ninkinden daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur [21].

Celebi Efe ve arkadaşları bir diğer çalışmada, SiC parçacık takviyeli bakır matrisli kompozitleri toz metalurjisi tekniği ile üreterek, parçacık boyutunun ve SiC konsantrasyonunun bakırın mekanik ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, göreceli yoğunluk, sertlik ve elektriksel iletkenlik gibi Cu-SiC kompozitlerinin özellikleri, artan SiC parçacık boyutuyla iyileştiğini göstermiştir [22].

Kovacik ve arkadaşları, bakır matris içindeki artan grafit konsantrasyonunun, Cu-grafit kompozitlerin etkin termal iletkenliğini nasıl etkilediğini göstermiştir. Bu çalışmada, hacimce %0-40 grafit aralığında bakır grafit kompozitler toz metalurjisi yöntemi ile hazırlanmış, mikro yapı araştırmasıyla, her iki fazın da kompozit içinde homojen ve izotropik olduğunu doğrulanmıştır [23].

Rajkumar ve arkadaşları, yüksek sıcaklıkta pin-on-disk tribometre kullanarak hızlandırılmış aşınma testi metodolojisiyle mikrodalga olarak sinterlenmiş bakır-grafit kompozitin tribolojik performansını değerlendirmiştir. Mikrodalga ile sinterlenmiş bakır-grafit

kompozit, elektrografit kayan temas malzemesine göre üç buçuk kat daha yüksek ortalama ömür sergilediği ortaya konulmuştur [24].

Lier ve arkadaşları bir dizi kapalı, tek duvarlı nanotüp için elastiklik modülü ve poisson oranıyla ilgili bir çalışma sunmuştur. Elde edilen sonuçlar hem deneysel hem de teorik çalışmalarla karşılaştırılabilir düzeyde ve elastiklik modülünün grafen tabakası için 1 TPa'dan daha yüksek olduğunu tahmin etmiştir [25].

Liu ve arkadaşları tarafından alüminyum matris nanokompozitlerin (AMC'ler) indirgenmiş grafen oksit (rGO) ve grafen nano tabakalarının (GNS'ler) takviyesinin hazırlanması ve özellikleri hakkında bir çalışma sunulmuştur. Toz metalurjisi prosesi için ilgili faktörler (sıkıştırma basıncı, yoğunluk ve sinterleme koşulları) optimize edilmiş, aynı deneysel koşullar altında hazırlanan, sıkıştırılmış ve sinterlenmiş saf alüminyum numunelerine göre, ağırlıkça %0,3 oranında rGO-Al ve ağırlıkça %0,15 oranında GNSs-Al kompozitleri için sırasıyla %32 ve %43 oranında artan sertlik seviyeleri gösterilmiştir [26].

Berman ve arkadaşları nano ölçekten makro ölçeğe kadar grafene dayalı son tribolojik çalışmaların güncel bir araştırmasını, özellikle kendi kendini yağlayan bir katı olarak veya yağlama yağları için bir katkı maddesi olarak kullanımını hakkında bir çalışma yapmışlardır. Burada özellikle, grafit ve grafen okside kıyasla grafenin üstün tribolojik özelliklerini gösteren araştırmalar ele alınmış, ayrıca, yağlama yağları için bir katkı maddesi olarak ve kendi kendini yağlayan nano-kompozit malzemelerin üretimi için grafen ile ilgili son çalışmalar sunulmuştur [27].

Balandin ve arkadaşları tarafından konfokal mikro-Raman spektroskopisi yardımıyla gerçekleştirilen askıya alınmış tek katmanlı bir grafende ısı iletiminin ilk deneysel araştırması sunulmuştur. Termal iletkenliğin yüksek değeri, grafenin ısı iletiminde karbon nanotüplerden daha iyi performans sağlayabileceğini gösterdiği, grafenin üstün termal iletim özelliği, önerilen elektronik uygulamalar için faydalı olduğu ve grafenin termal yönetim için mükemmel bir malzeme olmasını sağladığı ortaya konulmuştur [28].

Allabergenov ve Kim, kıvılcım plazma sinterleme yöntemi kullanılarak yapılan gözenekli Cu-C kompozitlerinin mekanik ve elektriksel özellikleri üzerinde işleme parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, 700 °C'de 40 MPa'da sinterlenmiş,

ağırlıkça %2 karbon grafit ve ağırlıkça %12 sodyum klorür içeren bakır grafit kompozitte ve ağırlıkça %2 karbon-grafit ve ağırlıkça %10 sodyum içeren örneklerde yüksek gözeneklilik dağılımı elde edilmiştir [29].

Gao ve arkadaşları negatif yüklü grafen oksit sulu dispersiyonu modifiye edilmiş Hummers yöntemi ile pozitif yüklü alüminyum toz süspansiyonu elde edilmiştir. Sonuç olarak, grafen oksit levhalarının, alüminyum matrisinde grafenin homojen dağıldığını göstermiş ve grafen içeriğinin artmasıyla, kompozitlerin nihai gerilme mukavemetinin başlangıçta arttığı ve daha sonra azaldığı ortaya çıkmıştır [30].

Ma ve arkadaşları, maglev araçlarında ve yüksek hızlı tren trenlerinde kullanım için toz metalurjisi yöntemiyle hazırlanan, bir bakır-grafit kompozit malzemenin (CGCM) kayma aşınması davranışının incelemesini sunmuşlardır. Artan normal gerilim ve elektrik akımı ile aşınma kaybının arttığı, yapışma nedeniyle ortaya çıkan aşınma, abrasif aşınma ve elektrik erozyon aşınması, elektriksel kayma aşınması süreçlerinde baskın aşınma mekanizmaları olduğu tespit edilmiştir [31].

Cha ve arkadaşları üçüncü ray kullanan metro sistemlerindeki aşınma parçacıklarıyla ilgili aşınma mekanizmaları ve parçacık boyutuna bağlı aşınma parçacık kompozisyonu hakkında bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, artan kayma hızı, ultra ince parçacıkların daha fazla oluşmasına yol açtığı, baskın aşınma hafif oksidatif aşınmanın, daha yüksek kayma hızlarında devam ettiği, bununla birlikte düşük kayma hızlarında ciddi bir oksidatif aşınma rejimi olduğu anlaşılmıştır [32].

He ve arkadaşları tarafından hafif raylı sistemlerde kullanılan kontak tellerinin ve akım toplayıcıların aşınma ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, kontak tellerinin bakır şeritlere (pantograf toplayıcı) karşı yağlanmamış olarak gerçekleşen aşınması, araştırmanın diğer tüm kombinasyonları ile karşılaştırıldığında en kötü aşınma performansına yol açtığı, temas noktasında aşınma kalıntılarının varlığı, temas iletkenliğini etkili bir şekilde azalttığı ve gerçek uygulamada ulaşılan 200-550 aralığındaki sıcaklıklarda yağlama greslerinin kullanımının etkisiz hale geldiği görülmüştür [33].

Feng ve arkadaşları elektrik akımının karbon nanotüp-grafit-gümüş kompozitlerinde

sürtünme ve aşınma performansı üzerindeki etkilerini ve aşınmış yüzeyin incelenmesini araştırmıştır. Bu çalışmada, akımın serbest kalmasından kaynaklanan ilave ısı, karşı yüzeyin pürüzlenmesine, fırçanın yakın yüzey tabakasının mekanik olarak zayıflatmasına ve fırçadaki yüksek aşınma oranına neden olduğu görülmüştür [34].

Liu ve arkadaşları tarafından bakır ve farklı miktarlarda grafit (ağırlıkça %0-4) karıştırılmış ve sıcak presleme ile üretilmiştir. Elde edilen kompozitlerin mikrosertliği ve tribolojik özellikleri üzerine grafit içeriğinin etkisi bu çalışmada incelenmiştir. Buna göre, grafitin varlığı, mikrosertlik ve tribolojik özellikler üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu, numunelerin sertliği grafit ilavesiyle azaldığı, grafitin sürtünme katsayısını büyük ölçüde azalttığı görülmüştür. Ayrıca ağırlıkça %4 grafit içeren kompozit, saf bakırinkinden %68 daha düşük bir sürtünme katsayısı sergilediği, aşınma oranı ilk önce grafit içeriği ağırlıkça %1 olduğunda arttığı anlaşılmıştır [35].

Cheng ve arkadaşları tarafından yüksek akım yoğunluğu ve orta kayma hızı koşulları altında çalışan otomotiv marş motorları için uygulanan uzun ömürlü fırçalarla ilgili bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Reçine bağlı bakır-grafit fırçalar farklı sinterleme sıcaklıklarında hazırlanmış, sinterleme sıcaklığının malzemelerin mikro yapıları ve statik fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlara göre, 910 °C'de sinterlenen fırçalar, daha ciddi kümülatif oksidatif aşınma etkilerine yol açan daha yüksek gözenekliliğe sahip olduğu, sinterleme işlemi sırasında MoS₂ ayrışarak sürtünme sırasında nispeten zayıf bir yağlama etkisine sahip olduğu görülmüştür [36].

Xu ve arkadaşları yüksek kaliteli grafit-bakır bazlı pantograf sürgüleri üretmek için ucuz bir toz metalurjisi yöntemi denmişlerdir. Grafit/metal arayüzlerini azaltmak ve böylece sinterleme performansını iyileştirmek için sıradan grafit yerine büyük boyutlu grafit kümeleri kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, grafit içeriğinin artmasıyla sürtünme katsayısının azaldığı, aşınma oranının ise ters eğilim gösterdiği bulunmuştur [37].

Poljanec ve arkadaşları kayma hızının, normal yükün ve elektrik akımının kayan elektrik kontaklarının özellikleri ve davranışı üzerindeki etkisi, piyasada bulunan üç farklı grafit malzeme sınıfı kullanılarak incelemiştir. Sert karbonun, bu çalışmada tüm temas varyasyonları için en kötü tribolojik davranışı gösterdiği, elektrografitin, artan elektrik akımı dışında tüm temas koşulları için oldukça zayıf performans gösterdiği ve ayrıca son derece

kararsız olduğu anlaşılmıştır [38].

Benfoughal ve arkadaşları uygulanan yükün ve elektrik akımının, düşük kayma hızları için kuru kayma koşulları altında bakır-grafit çiftinin sürtünme ve aşınma davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuç olarak, düşük kayma hızı için sürtünme ve aşınma davranışı yüksek kayma hızlarına benzediği, elektrik akımının şiddeti arttığında sürtünme katsayısının azaldığı ifade edilebilir [39].

Muchammed ve arkadaşları küresel grafitli dökme demir için yağlama olmadan kayar temaslı sonucu oluşan aşınmanın özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır. Malzeme sertliğinin aşınma hacmini büyük ölçüde etkilediği, FCD 40 malzemesinde daha yüksek aşınma hacmi olduğu artan kayma mesafesi, aşınma hacmini, aşınma derinliğini ve aşınma genişliğini artırdığı anlaşılmıştır [40].

Mahdi ve arkadaşları toz metalurjisi tekniği ile itriya ve kalay parçacıkları ile güçlendirilmiş ağırlıkça %95 bakır – ağırlıkça %5 oranında hibrit grafit kompozitler hazırlanarak mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlar, kompozitlerin sertliğinin ve gerçek gözenekliliğinin artan itriya içeriği ile arttığını göstermiştir. Öte yandan, kompozitlerin hem termal hem de elektriksel iletkenliği artan itriya içeriği ile azalmıştır [41].

Mazloun ve arkadaşları kompozitin (bakır içeren grafit pullar) termal ve elektriksel iletkenliklerini ve termal genleşme katsayısını deneysel olarak değerlendirmiş ve söz konusu özellikler ve aralarındaki bağlantılar için mikromekanik model geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, kompozitlerin termal ve elektriksel özellikleri arasındaki çapraz özellik bağlantıları kurulmuş ve deneysel olarak doğrulanmıştır [42].

Altunpak, elektrik akımı altında Cu-Be alaşımının kayma sürtünmesini ve aşınma davranışını incelemiştir. Ayrıca alaşımın aşınma mekanizması ve elektriksel iletkenliği de tartışılmıştır. Buna göre, Cu-Be alaşımı için sertlik değerleri 330°C'de 3 saat yaşlandırma işleminden sonra tepe değerine ulaşmış ve daha yüksek sıcaklıklarda aşırı yaşlanma meydana gelmiştir. Ayrıca hem sürtünme katsayısı hem de aşınma kaybı, küçük elektrik akımı uygulandığında artmış ve elektrik akımı yoğunluğu arttıkça azalmıştır [43].

Argibay ve arkadaşları bakır-berilyum (UNS C17200) kullanımı, yüksek hızlı ve yüksek

akım yoğunluklu kayan elektrik kontaklarında çalışmak için metal fiber fırçaların yapımında iyi bir malzeme olduğunu ortaya koymuşlardır. Özellikle yorulma ve akma mukavemeti açısından malzeme seçiminin önemi, bu çalışmada fırça tasarımının iyileştirilmesinde ve yüksek akım yoğunluklu kayan elektrik kontaklarında gözlenen aşınma olaylarının anlaşılmasında kilit faktörler olarak vurgulanmıştır [44].

Jia ve arkadaşları tarafından Cu–Ag–Cr telinin kayma aşınması davranışının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Burada, bu kompozitin mekanik mukavemet ve elektriksel iletkenlik olarak uygun bir kombinasyona sahip olduğu, yüksek hızlı elektrikli demiryolları için umut verici bir temas teli olduğu anlaşılmıştır [45].

Tsujikawa ve arkadaşları akım yoğunluğunun, nominal yükün ve elektrik akımının polaritesinin sürtünme ve aşınma ile küresel grafitli dökme demirin mikro yapısı üzerindeki etkisini incelemiş ve sonuçları, kütle olarak %0,45 C çeliği ile karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda, dökme demirin aşınması, test edilen tüm temas yükleri altında elektrik akımındaki artışla birlikte arttığı, bununla birlikte, karbon çeliğinin aşınması, yüksek temas yükü altında (artan elektrik akımıyla) çok az artış gösterdiği anlaşılmıştır [46].

Orumwense ve arkadaşları toz parçacıklarının şeklinin bakır-grafit toz metalurjisi alaşımlarının sıkıştırılabilirliği ve öz direnci üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Küresele yakın tozlardan yapılan sinterlenmiş kompaktların elektriksel öz dirençleri pürüzlü, düzensiz veya iğnemsiz tozlardan yapılan kompaktlardan daha yüksek olduğu, küresele yakın tozlardan elde edilen kompaktların ya daha fazla parçacık deformasyonuna maruz kaldıklarını ya da aksi takdirde biraz daha yüksek bir gözeneklilik seviyesi sergiledikleri değerlendirilmiştir [47].

Song ve arkadaşları Cu/Cu yuvarlanma şeklindeki sürtünme çiftlerinin akım taşıma davranışını farklı ıslak ortamlarda incelemiştir. Çevresel su içeriğinin artmasıyla, akım taşıyan yuvarlanan çiftlerin sürtünme katsayısı büyük ölçüde arttığı görülmüştür [48].

Liu ve arkadaşları sırasıyla 450°C ve 910°C sinterleme sıcaklığında reçine dolgulı bakır grafit fırçalar hazırlamış, farklı ortam sıcaklıklarında akım taşıyan sürtünme işlemi sırasında fırçaların sürtünme ve aşınma mekanizmasını ele almıştır. Sonuçlar, ortam sıcaklığının artmasıyla sürtünme kararlılığının azaldığını, sürtünme ve aşınma mekanizmasının sürekli

değiştiğini göstermektedir. 450°C sinterlenmiş fırça ile karşılaştırıldığında, 910°C sinterlenmiş fırça daha büyük gözenek boyutuna ve daha yüksek gözenekliliğe sahip olduğu, yüksek sıcaklık koşullarında, kümülatif oksidatif aşınma meydana geldiği, düşük sıcaklık ortamında fırça, düşük gözenekliliğe ve oksidasyon direncine sahip olduğu görülmüştür [49].

Zhao ve arkadaşları bronz-matris/x-grafit ($x = 0, 1, 3$ ve %5) kompozitlerini sırasıyla Cu-kaplı grafit, Ni-kaplı grafit ve saf grafit kullanılarak toz metalurjisi yöntemiyle imal etmiştir. Bronz/Cu-kaplı grafit (BCG), bronz/Ni-kaplı-grafit (BNG) ve bronz/saf grafitin (BPG) mikro yapısı, mekanik özellikleri ve aşındırıcı davranışları karakterize edilmiş ve incelenmiştir. Sonuçlar, Cu kaplı ve Ni kaplı grafitin, bronz matris ve grafit arasındaki bağ kalitesini artırabileceğini göstermektedir. Genel olarak, bronz matris/grafit kompozitlerdeki grafit içeriğindeki artışla birlikte, BPG, BCG ve BNG kompozitlerinin sürtünme katsayıları, nihai yoğunluk ve aşınma oranlarının tamamının düştüğü görülmüştür [50].

Liao ve arkadaşları karbon grafit matrisinin içerisine nikel eklemiş ve ayrıca karbon/bakır kompozitleri basınçlı emprenye yöntemiyle hazırlanmıştır. Sonuçlar, nikel katkılı değiştirilmiş karbon matrisinin daha yoğun olduğunu ve nikel elementinin karbon matrisinde eşit şekilde dağılabileceğini göstermiştir. Modifiye edilmiş karbon/bakır kompozitlerinin gözenekliliği önemli ölçüde azaldığı görülmüştür [51].

Wei ve arkadaşları bir pantograf şeridinin karbon bileşimi üzerinde termal şok hasar deneyi gerçekleştirmiştir. Termal şok prosesleri, kül fırını ısıtma ve su soğutmanın uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Termal şok işlemlerinin karbon şerit gözenekliliği, basınç dayanımı, elektrik direnci ve yüzey topografyası üzerindeki etkisi incelenmiştir. Pantograf şeridindeki termal şok hasarının mekanizmasını doğrulamak için pantograf şeridinin gözenekliliği ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Sonuçlar, termal şok işleminin karbon şeridin gözenekliliğini arttırdığını ve basınç dayanımı ve elektrik direncinde azalmalara neden olduğunu göstermiştir. Çoklu termal şok işlemleri, pantograf şeridinde, gözeneklerdeki büyük miktarlarda su buharının taşmasına ve geri dönüşü olmayan hasara neden olduğu tespit edilmiştir [52].

Cui ve arkadaşları güçlendirilmiş bir karbon/karbon (C/C)-Cu kompozitini basınçsız sızma tekniği (PLI) ile imal etmiştir. Geliştirilen kompozitin mikro yapısı, taramalı elektron

mikroskobu, X-ışını kırınımı ve enerji dağılımlı spektroskopi ile karakterize edilmiştir. C/C-Cu kompozitinin mekanik, tribolojik ve elektriksel özellikleri, bir C/C kompoziti ve bir karbon/bakır (C/Cu) temas şeridi malzemesiyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, önerilen kompozitin mükemmel bir ağ iletim yapısı oluşturduğunu göstermiştir [53].

Li ve arkadaşları akım taşıyan çiftler için sürtünme ve aşınmanın temel özellikleri ve sınıflandırılmasını özetlemiş, çalışma parametrelerinin sürtünme ve aşınma performansı üzerindeki etkisini açıklamış ve sürtünmenin oluşum mekanizması, hata mekanizması ve faktörlerini açıklığa kavuşturmuştur. Çalışmada, sürtünme ve aşınma sıcaklığı alanının ve aşınma miktarının simülasyon ve tahmin sonuçları sunulmuştur [54].

Ren ve arkadaşları grafit pullarla güçlendirilmiş bakır (Cu) matris kompozitlerini kıvılcım plazma sinterleme yöntemiyle imal etmiştir. Grafit pullar ile Cu matris arasındaki ara yüzey bağını iyileştirmek için akımsız nikel kaplama gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin mikro yapıları ve morfolojileri taramalı elektron mikroskobu ve X-ışını kırınımı ile karakterize edilmiş ve kompozitlerin eğilme dayanımlarını elde etmek için üç nokta eğme testi yapılmıştır [55].

Kubota ve arkadaşları bakır emdirilmiş karbon fiber takviyeli karbon kompozitlerin (C/C kompozitler) aşınma davranışını, bir DC elektrik akımının uygulanması sırasında aşınma test cihazı kullanılarak incelemiştir. Üç tip C/C kompozit temas şeridi malzemesi test edilmiştir. Aşınma testi, 59 N normal yük ile 55,6 m/s sabit kayma hızında ve 100 ila 500 A arasında değişen elektrik akımlarında gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinin sonuçları, bakır emdirilmiş C/C kompozit kontak şeritlerinin aşınmasının, kontak voltajı ve elektrik akımı ölçümlerinden hesaplanabilen ark deşarj enerjisi ile orantılı olduğunu göstermiştir. Yüksek mukavemetli karbon fiber içeren C/C kompozit kontak şeritlerinin, yüksek ark deşarj enerjisi koşullarında aşınma olasılığı daha yüksek olduğu görülmüştür [56].

3. AŞINMA VE METAL MALZEMLERDEKİ AŞINMA DAVRANIŞLARI

Aşınma çok çeşitli endüstriyel prosesler ve uygulamalar için önemli bir olgudur. Aşınma, temel olarak, temas halindeki iki veya daha fazla bileşenin göreceli hareketlerinden kaynaklanan yüzey hasarı veya malzeme kaybı olarak tanımlanır. Malzemeler arasındaki sürtünme, temas alanında aşınma hasarları oluşturabilir. Aşınma hasarı, malzemelerin yaşam döngüsünü önemli ölçüde azaltabilir ve çalışma performanslarını etkileyebilir, hatta aşırı aşınma nedeniyle daha fazla malzeme kaybı meydana gelebilir. Aşınma hasarını önleyebilmek veya en aza indirebilmek için, belirli servis koşullarında malzeme ve malzeme çiftlerinin aşınma mekanizmaları belirlenmelidir.

Aşınma doğası gereği çok farklı parametrelere ve etkileyen faktörlere bağlı olan son derece karmaşık bir hasar türüdür. Yüzeylerin karmaşık yapısı, aşınma sırasında oluşan deformasyon bölgesi, sürtünme nedeniyle açığa çıkan ısı, yağlayıcı etkisi ve kontakların kimyasal etkileşimi, bu karmaşık hasar malzeme kaybı gibi ciddi sonuçlara yol açabileceğinden sıklıkla araştırmalara konu olmaktadır [57].

Aşınma ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar incelendiğinde sürtünme, sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetleri kavramlarının aşınma olgusu ile yakından ilişkili olduğu görülmektedir. Sürtünme kuvveti genel anlamda temas yüzeylerinin kaymaya veya birbirine karşı harekete karşı uyguladıkları direnç olarak özetlenebilir [58]. Sürtünme kuvvetinin (F) hareketli yüzeylere uygulanan normal kuvvete (N) oranına sürtünme katsayısı denir ve sürtünme katsayısı için eşitlik Eş. 3.1’de verilmiştir.

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (3.1)$$

Sürtünme katsayısı, farklı malzemeler, ıslak veya kuru kayma ortamları gibi farklı yağlama koşulları için farklı değerler alabilir. Sürtünme katsayısı değerleri genel olarak 0,1 ile 1 arasında değişmektedir. Genel olarak aşınma tanımları malzeme kaybına odaklanır. Ancak aşınma hasarı, bir yüzeyden diğerine malzeme transferi olarak görülebilir. Bu durumda toplam kütlede bir değişiklik olmaz ancak aşınma hasarları devam eder. Aktarılan malzeme daha sonra aşınma pulu veya birikintisi olarak yüzeyden düşebilir.

Aşınma sınıflandırılmasından bu yana tribolojide birçok çalışmaya konu olmuştur. Genel olarak, aşınma için belirli bir evrensel sınıflandırma yoktur. Bununla birlikte, aşınma mekanizmalarının sınıflandırılmasını belirlemek için kullanılan çeşitli yöntemler vardır. İlk yöntem aşınma izine göredir. Aşınma izinin incelenmesi için kullanılan terimler genellikle çukurlu, pul pul dökülmüş, çizik, cilalı vb. iken bu yöntem için adhezif, abrazif, oksidatif aşınma terimleri kullanılmaktadır. Bir diğer yöntem ise bu terimlerden ikisini veya daha fazlasını içeren, örneğin ıslak veya kuru aşınma (yağlanmış veya yağlanmamış), yuvarlanma aşınması, kayma aşınması veya karmaşık aşınma koşulları gibi aşınma ortamıdır. Bu konuda farklı türde yöntem ve yaklaşımlara sahip olmak, araştırmacıların karmaşık yapısı nedeniyle aşınmanın arkasındaki bilimi daha derinlemesine anlamalarına olanak tanır [59]. Bu tezde aşınma davranışları bölümünde bu terimler açıklanacaktır.

3.1. Aşınma Türleri

Aşınma mekanizması, aşınmadan kaynaklanan hasarların önlenmesi merkezinde yer almaktadır. Bir sistemdeki aşınma hasarlarından kaynaklanan ciddi kayıpların önceden tahmin edilebilmesi için aşınma mekanizmasının doğru belirlenmesi son derece önemlidir. Aşınmanın meydana geldiği sistemi analiz etmeden önce, sistemin elemanlarının tanımlanması gerekmektedir. “Sistem” terimi “tribolojik sistem”e atıfta bulunmak için kullanılmaya başlanmıştır. “Tribolojik sistem”, katı gövde, karşı gövde, yağlayıcılar ve varsa diğer ara yüz elemanlarından ve aşınmanın gerçekleştiği ortamdan (atmosfer, sıcaklık gibi) oluşmaktadır [60].

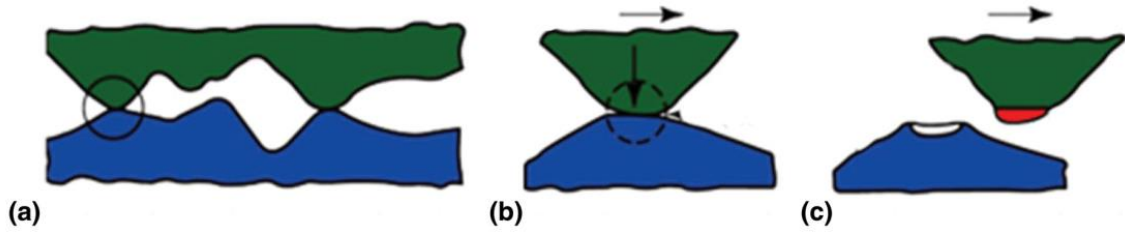
Aşınma mekanizmaları üzerine oldukça fazla yayın bulunmaktadır. Bu çalışmalar incelendiğinde genel olarak adhezif aşınma, abrazif aşınma, yorulma aşınması ve erozif aşınma şeklinde sınıflandırma yapılmaktadır. Aşınma bir kez başladıktan sonra başlangıçtaki mekanizma değişebilmekte ve süreç içerisinde değişmektedir. Mekanizmayı değiştirebilir ya da birden fazla mekanizma aynı anda gerçekleşebilir.

3.1.1. Adhezif aşınma

Adhezif aşınma, lokalize bağlanmanın neden olduğu bağıl hareket sırasında bir malzemenin bir temas yüzeyinden diğerine transferi ile karakterize edilir. Yüksek yük uygulaması, sıcaklık veya basınç, birbirine temas eden iki metal yüzeydeki pürüzlerin birbirine göre

deforme olarak birlikte nokta kaynağına yol açması, ardından metalin mikron düzeyde yapışması olarak küçük, ayrı alanlarda yırtılması ve teğetsel kesme oluştuğunda meydana gelmektedir [61].

Adhezif aşınmayı tanımlamak için kullanılan mühendislik terimleri arasında tutukluk, aşınma, çentiklenme ve sürtünme yer alabilmektedir. Adhezif aşınma, adhezif bağın temas çiftinin daha zayıf malzemesi içindeki kohezif bağdan daha güçlü olması nedeniyle oluşmaktadır [62]. Bir temas yüzeyi pürüzsüz gibi görünse de aslında “yüksek noktalar” olarak adlandırılan birçok vadi ve pürüzden oluşur. Temas yüzeylerine uygulanan yük bu yüksek noktalardan aktarılacak çok yüksek yerel basınçlara neden olur ve böylece metalden metale temas riskini artırarak adhezif aşınmasına yol açmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Adhezif aşınmaya yol açan adımlar. (a) Mikro kontaklar. (b) Pürüzlerin deformasyonu ve yüzey filmlerinin çıkarılması. (c) Kesme ve malzeme transferi [61]

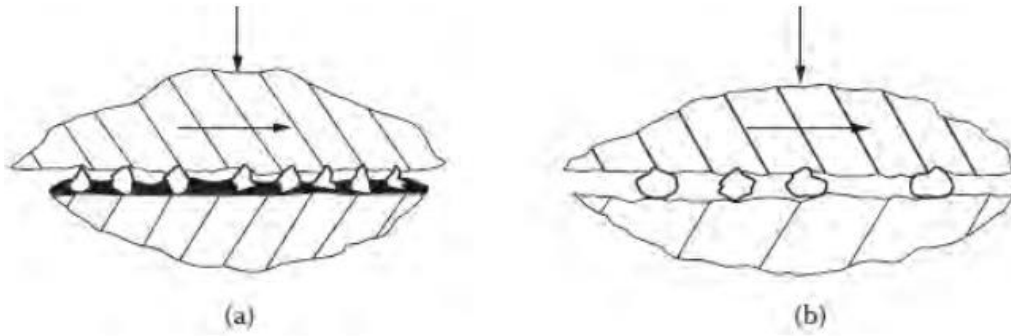
Adhezif aşınma mekanizması, tribolojik sistemdeki malzeme etkileşimleriyle güçlü bir şekilde ilişkilidir. İki yüzey temas ettiğinde, yüzeyler üzerindeki birleşim yerlerindeki etkileşim kuvvetlerinden dolayı bir çekim meydana gelir ve kuvvetler birleşim yerleri arasında bağlanmaya (yapışma) neden olur. Yüzeylerin bağıl hareketi sırasında, kaymanın neden olduğu kesme nedeniyle birleşimler kırılmaya başlar. Sonuç olarak, parçalar bir yüzeyden kopup diğerine geçebilir. Aşınma süreci boyunca, parçalar orijinal yüzeye geri dönebilir veya aşınma parçacıkları olarak serbest bırakılabilir [63].

3.1.2. Abrasif aşınma

Abrasif aşınma genel olarak yüzeyler arasındaki sert parçacıklar veya karşı yüzeydeki pürüzler gibi çıkıntılar tarafından yük altında iki yüzeyin nispi hareketi sırasında malzeme kaldırma olarak tanımlanır. Bunlar, aşınma sürecinde yumuşak malzemeden kopan veya dışarıdan tribosisteme gelen parçacıklar olabilir. Bu tip aşınmada yüzeyden malzeme kaybı

çok hızlı gelişir ve hasar şekli plastik deformasyon ve kırılma olarak görülebilir. Aşınma davranışını tanımlamak için kullanılan terimler, abrazif aşınma konusunun ele alınmasında önemli bir rol oynamaktadır. İki cisimli aşınma ve üç cisimli aşınma, aşınma mekanizmasını ayırt etmek için en yaygın terimlerdir. İki cisimli aşındırmada, sürtünme elemanlarının doğrudan birbirleriyle ve sert parçacıkların etkileşimi, yüzeylerden birinin elemanlarıdır. Zımpara kağıdı ve herhangi bir yüzey iki cismin aşınmasına örnek olabilir. Üç cisimli aşınma, sert parçacıkların yüzeylere yapışmamasından kaynaklanır, bu nedenle yüzeyler arasında yuvarlanma veya kayma gibi serbestçe hareket edebilirler. Sert parçacıkların bu hareketleri, aşınmayı yuvarlanma aşınması veya kayma aşınması olarak tanımlamak için de kullanılabilir [59].

İki cisimli aşınma, düşük gerilimli aşınma olarak da adlandırılır, çünkü malzeme kaybı düşük gerilim altında gerçekleşir, ancak aşınma süresi üç cisimli aşınmaya göre daha kısadır. Temel olarak, daha sert malzeme daha yumuşak yüzeyi çizer veya derin kesikler oluşturur (Şekil 3.2). Üç cisimli aşındırma durumu, yüzeyler arasında sert parçacıkların olması yüksek stres seviyelerine neden olur, bu nedenle her iki yüzeyde de malzeme kaybıyla karşılaşılır [63].

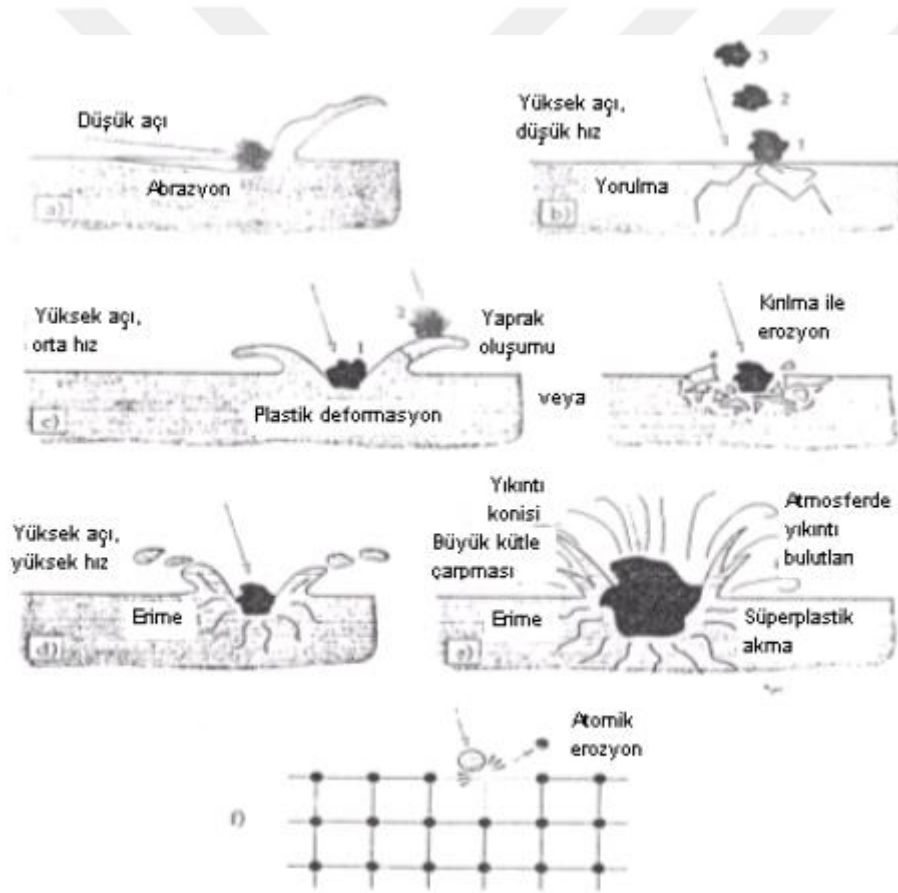


Şekil 3.2. İki cisim aşınmasında (a) aşındırıcı parçacıklar yüzeye sabitlenmesi (b) parçacıklar yüzeyler arasında serbestçe hareket ettiğinden üçüncü cisim aşınması [64]

3.1.3. Eroziyon aşınma

Eroziyon aşınma, katı veya sıvı partiküllerin çarpması nedeniyle yüzeyden malzeme kaybına neden olur. Çarpan parçacıklar katı ise genellikle "katı parçacık erozyonu" olarak adlandırılır. Genel olarak, bu tip aşınma açık tribo sistemlerden kaynaklanır, yani karşı gövde değişir veya değiştirilebilir [60]. Eroziyon aşınmanın mekanizmaları abrazif aşınmaya benzer şekilde kırılma ve plastik deformasyon olarak tanımlanabilir. Bununla birlikte, bu iki

aşınma türü arasında bazı belirgin farklılıklar vardır. Katı cisim erozyonu sırasında, yüzey, parçacıklar tarafından saldırıya uğrar ve parçacıklar malzemeye kuvvet uygular. Aşınmada, yüzeyler sabit ve dış bir kuvvet altında göreceli olarak hareket ederken, sert parçacıklar iki yüzey arasında kaymaktadır. Erozyon aşınmasını etkileyen ana faktörler, farklı başlıklara ayrılmakta ve bun göre mekanizmaları değişmektedir (Şekil 3.3). Çarpışma değişkenleri altında parçacığın hızı, geliş açısı ve parçacık konsantrasyonu incelenmektedir. Parçacıkların boyut, şekil ve sertlik gibi diğer özellikleri de etkileyen faktörler olarak çok geniş bir şekilde incelenir. Son olarak, malzemenin sertlik, mikroyapı ve elastik modül özellikleri sıklıkla değerlendirilmektedir.



Şekil 3.3. Eroziv aşınma mekanizmaları [65]

Malzemenin sünekliği eroziv aşınma için önemli bir özelliktir. Sünek malzemeler için çarpma açısı ne kadar düşükse aşınma kaybı o kadar yüksek olur. 20°'lik bir çarpma açısında, sünek malzemenin eroziv aşınması, parçacık yüzeyi kestiğinden ve malzeme kaybına neden olduğundan maksimum değerine ulaşmaktadır. Açı daha yüksekse, parçacıklar herhangi bir kesme hasarı olmadan yüzeyden geri çarpar. Malzeme kırılırsa, daha yüksek çarpma

açısında aşınma kaybı daha yüksek olacaktır. Kırılğan erozyonda, yüksek hızlı parçacıkların etkisiyle oluşan yüzey çatlakları olarak ortaya çıkar. Daha sonra, parçacıkların kinetik enerjisinden dolayı çatlaklar büyüyecek ve kırık aşınma segmentleri olarak görülen malzeme kaybı ile sonuçlanacaktır [66, 67]. Bu nedenle, parçacıkların hızı kırılğan erozyon için önemli faktörlerden biridir.

3.1.4. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, periyodik yükler altında çalışma nedeniyle yüzeyde oluşan çatlaklarla karakterize edilen aşınma mekanizması olarak tanımlanmaktadır. Yorulma aşınmasının etkisi ile yüzeyden ayrılan kırılmış parçacıklara pul (aşınma pulları) adı verilir. Yorulma aşınmasının ana mekanizmaları çatlak başlangıcı, çatlak büyüme ve kırılma gibi ifade edilebilmektedir. Çatlak başlangıcı döngüsel yükleme altında başlar ve artan plastik gerinim çatlak büyümesine neden olur. Çatlak yüzeye ulaştığında kırılma meydana gelir ve aşınma partikülü yüzeyden sıyrılır. Yüzeydeki çatlaklar yuvarlanma yönüne dik ise aşınma döküntülerini oluştururlar. Öte yandan, yorulma ve yorulma aşınma mekanizmaları arasında önemli bir fark bulunmaktadır. Yorulma durumunda, o gerilme seviyesinde kırılma meydana gelmeyecek malzemeler için bir dayanım sınırı vardır. Ancak yorulma aşınmasında stres veya yük için böyle bir sınır yoktur. Bu mekanizmalara en iyi bilinen örnekler elbette ki tren rayları ve rulmanlar olarak verilebilir.

Döngüsel gerilimin kaynağı, yuvarlanan, kayan veya katı veya sıvıların çarpan temasları olabilir. Kontak, tekrarlanan yükler altında yuvarlanıyorsa, yüzeyde çukurlar oluşturan çatlaklara neden olabilir. Bu aşınma şekli çok şiddetlidir ve başarısızlıkla sonuçlanır ve yuvarlanma-temas yorgunluğu olarak adlandırılır. Bu arızayı önlemenin en uygun yolu uygun yağlamadır. Bununla birlikte, sistemin tasarımı ve yükleme koşulları da yorulma aşınması arızalarını önlemek için önemli faktörler olarak kabul edilir.

3.2. Kayma Aşınması

Kayma aşınması terimi, iki yüzey birbirine karşı kaydığında ve bu kayma aşınmaya neden olduğunda kullanılmaktadır. Ara yüzey olarak kullanılan herhangi bir yağlayıcı varsa kuru kayma aşınması olmadığı sürece yağlanmış kayma aşınması olarak adlandırılmaktadır. Kayma aşınmasının kendisi karmaşık bir mekanizmaya sahiptir. Ancak kayma aşınması,

yapışma, kimyasal reaksiyonlar vb. gibi aynı anda birden fazla aşınma sürecine sahip olabilir. Kayma teması sırasında aşınma mekanizmasını etkileyen birçok faktör vardır.

Sertlik, kristal yapı veya temas yüklemesi, sürtünme katsayısı, temas alanı, elastik/plastik deformasyon özellikleri gibi malzeme özellikleri, kayma aşınmasını güçlü bir şekilde etkiler. Sürtünme, iki metal kayan temas halinde olduğunda ve sistem yeterince yağlanmadığında meydana gelmektedir. Kayma hareketinin yönü olarak yüzey değişikliklerini gözlemlemek mümkündür. Kayma yönünde çizikler veya aşınma olukları varsa bunlara çentik denilmektedir. Yüzeyler arasında aktarılan ancak genellikle yağlanmamış sistemlerde görülen büyük aşınma parçaları nedeniyle aşınma hasarı çok şiddetli olduğundan, sürtünme sürtünmeden daha şiddetli olmaktadır. Hasarlar, kaymanın göreceli hareketinden kaynaklanan gerilmelerin neden olduğu plastik deformasyon veya kırılma ile sonuçlanmaktadır [58].

3.2.1. Archard aşınma teorisi

Aşınma ile ilgili en basit teoriler, elektrik kontakları için önce Holm [68] tarafından, ardından yaklaşık 70 yıl önce Archard [69] tarafından açıklanmıştır. Bununla birlikte, teori ve denklem hala çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Teori ilk başta metal-metal aşınma çiftine odaklansa da daha sonra denklem diğer malzemeler için incelenmiştir.

İlk olarak Holm, malzeme kaybını bulmak için her türlü aşınmaya uygulanabilen Eş. 3.2'i bulmuş ve aşınmanın atomik bir mekanizma olduğunu varsaymıştır.

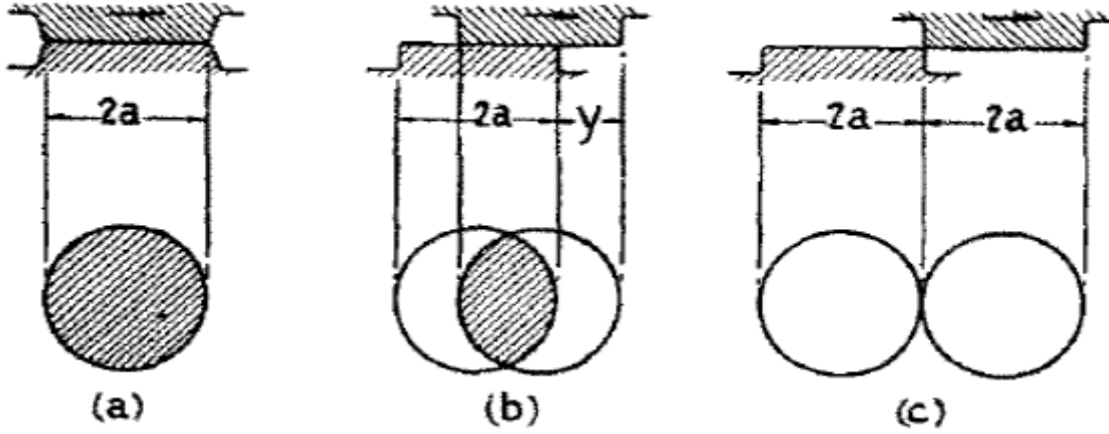
$$W = Z * \frac{PS}{H} \quad (3.2)$$

Burada, W hacim kaybı, P yük, S kayma mesafesi, H ise daha yumuşak malzemenin sertliği olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte, Z'nin boyutsuz bir sayı olduğunu ve kayan geçiş sırasında oluşturulan temas üzerindeki hayali film den atomik aralık başına çıkarılan atomların sayısını temsil etmektedir [68].

Buradan hareketle daha birçok çalışma basit aşınma yasalarını açıklamaya çalışmıştır. Holm'un teorisinde, atomlar atomik temas noktalarında uzaklaştırıldığı için aşınmayı atomik süreçlerle ilişkilendirmektedir. Bununla birlikte, Burwell ve Strang, aşınmanın temas halindeki pürüzlerde aşınma parçacıkları şeklinde meydana gelmesi nedeniyle teoriyi

yeniden şekillendirmeyi önermişlerdir [70]. Rabinowicz ve Tabor ise daha geniş bir bakış açısı benimsemiş ve çalışmalarında basit bir aşınma modeli fikrine katılmış, artan yük ile temas alanlarının sayısının arttığını öne sürmüşlerdir [71].

Model için ilk varsayımda, temas alanı, yük altındaki iki yüzey için temastaki pürüzlerin toplamı olacağı şeklindedir. Artan yük ile temas alanlarının sayısı ve boyutu artmaktadır. Diğer bir varsayım ise sürgü hareketi sırasında tek bir dairesel pürüzün konumu ile ilgilidir. Archard'ın teorisinde Şekil 3.4'de görüldüğü gibi, pürüzler $2a$ çapında ve tam temas halindedir, bu nedenle temas alanı maksimumda olmaktadır. Burada yüzeyler birbirini üzerinde y mesafesi kadar kaymaya başladıktan sonra pürüzler kısmen temas halinde ve hareket devam ederken pürüzlerin teması da sona ermiş durumdadır.



Şekil 3.4. Kayar kontaklarda tek temasın gösterimi. (a)-temas alanı maksimum, (b)- y mesafesinden sonra kayma ve (c)- $2a$ olarak kayma mesafesinden sonra temas alanı sıfır [69]

Şekil 3.4'de maksimum temas alanı δA olarak ifade edilir ve

$$\delta A = \pi a^2 = \delta W / H \quad (3.3)$$

şeklinde tanımlanır. Eş. 3.3'de, δW yalnızca bulunduğu pürüz için maksimum yük desteği ve H daha yumuşak malzemenin sertliği olarak tanımlanmıştır. Burada, meydana gelen temas, malzemenin çıkarılmasına neden oluyorsa, aşınma parçacığının şeklinin temas alanı ile orantılı olması beklenmektedir.

Şekil 3.4(a)'da temas maksimum değere ulaşmasından dolayı taşınan normal kuvvet Eş. 3.4 ile verilmiştir.

$$\delta F_N = p_{pl} * \pi * a^2 \quad (3.4)$$

Burada, p_{pl} : plastik akma basıncı, batma sertliğine (HV) çok yakın bir değerdir. Eş.3.4'de tek bir pürüz için gösterilen durum, yüzey genelinde pek çok pürüzde söz konusu olacaktır. Bu durumda birçok pürüz teması ve kopması olacaktır. Aşınma ise bu temas eden pürüzlerden malzemenin ayrılması sonucunda meydana gelecektir. Aşınan malzeme hacmi doğal olarak temas halindeki pürüzlerin boyutuna bağlı olacaktır.

$$\delta V = \frac{2 * \pi * a^3}{3} \quad (3.5)$$

Eş. 3.5'de aşınma sonucu pürüz tepelerinden ayrılan malzeme hacminin (δV) pürüz yarıçapı a 'nın küpü ile orantılı olduğu gösterilmiştir. Aşınan hacim, yarıçapı a olan bir yarı küre olduğunda bütün pürüz temas yüzeylerinden bir aşınma meydana gelmesinin mümkün olmadığını ifade etmek doğru olacaktır. Aşınma olan temas yüzeyi sayısının, tüm temas yüzeyine oranı K olduğunda:

$$\delta Q = \frac{K * \delta V}{2 * a} = \frac{K * \pi * a^2}{3} \quad (3.6)$$

Eş.3.6'de sadece bir pürüz çifti temasında $2a$ kadarlık bir kayma mesafesinde, birim kayma mesafesi için ortalama olarak aşınan malzeme hacmi δQ ile gösterildiğinde, toplam aşınma hızı, bütün temas tepeleri teması dikkate alındığında,

$$Q = \sum \delta Q = \frac{K}{3} * \sum \pi * a^2 \quad (3.7)$$

şeklinde Eş.3.7 elde edilecektir. Eş.3.4 ve Eş.3.7 tanımlanan alanların eşitliği yazıldığında Eş.3.8 elde edilecektir:

$$Q = K * \frac{F_N}{H} \quad (3.8)$$

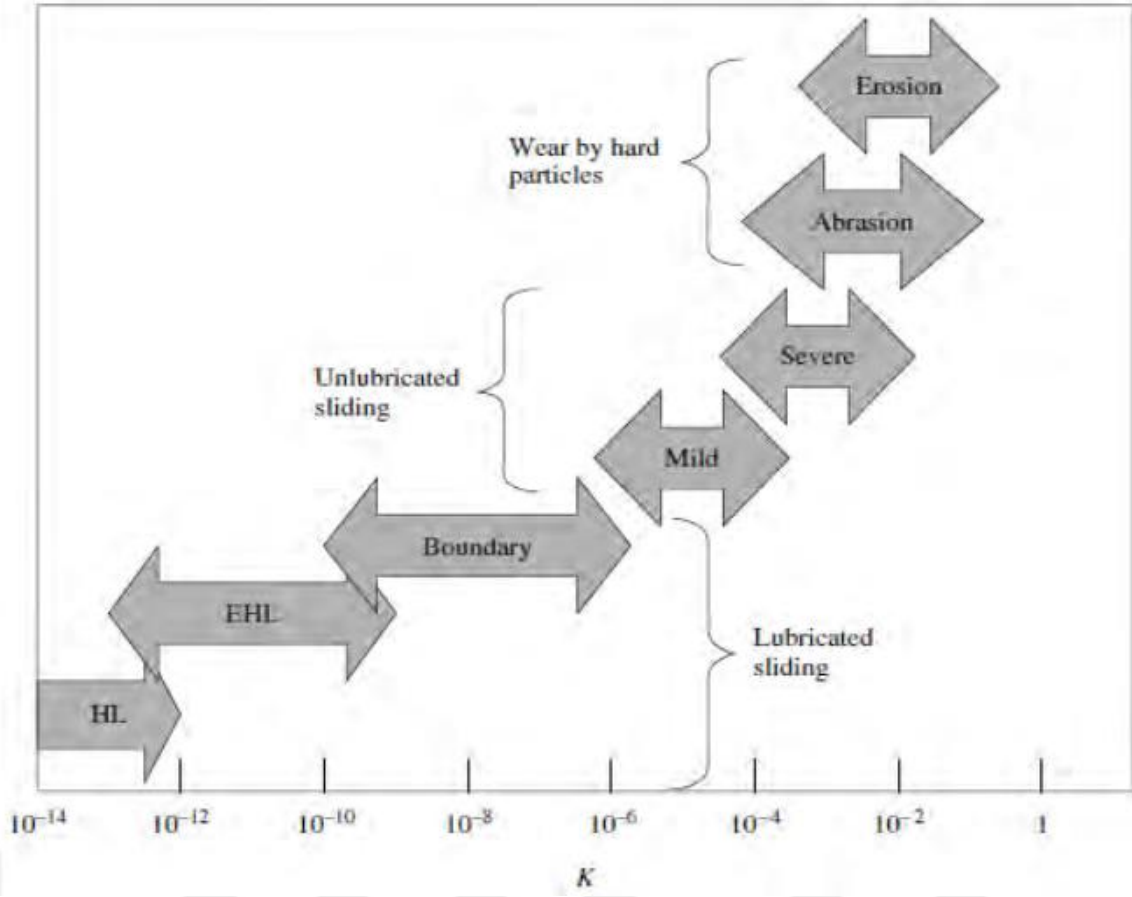
Eş.3.8 denklemi birim kayma mesafesi için aşınan malzeme hacminin (Q), normal kuvvet (F_N) ve yumuşak malzemenin sertliğine (H) bağlı olduğunu ifade etmekte ve Archard Aşınma Denklemi olarak bilinmektedir. Buradaki K sabiti ise boyutsuz ve aşınma katsayısı olarak adlandırılmaktadır.

Aşınma katsayısı

Aşınma katsayısı K kısaca, aşınma parçacıkları oluşturabilen pürüzlerin olasılığı olarak tanımlanmaktadır. Aşınma, kayma mesafesi, sertlik ve uygulanan yük ile orantılıdır. Genel olarak K , aşınmanın şiddetini ifade etmek için kullanılır. Aşınma denklemi hem adhezif hem de abrazif aşınma için geçerli olduğundan tüm aşınma mekanizmalarını tanımlamak için K aşınma katsayısının kullanılabileceğini söylemek doğru olmayacaktır.

K değerlerinin deneysel koşullara bağlı değişken bir aralıkta olduğunu bugüne kadar birçok çalışma göstermiştir. Aşınma hasarını tahmin etmek için K kullanmak önemli olmakla birlikte kayma sırasındaki karmaşık aşınma mekanizmaları nedeniyle kesin bir açıklama bulunmamaktadır. K 'nın küçük değerlerinde, aşınmada meydana gelen yapışma şansının daha düşük olmaktadır. Ayrıca K yağlama, uygulanan yük, yüzey uyumluluğu gibi farklı parametrelerden etkilenebilen bir faktör olabilmektedir.

Aşınma katsayısı K ilk kez Archard tarafından bir faktör olarak tanımlandıktan sonra birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Araştırmacılar, K 'nin fiziksel anlamı ve aşınma mekanizması veya aşınma modu için bir gösterge olarak nasıl kullanılabileceği konusunda K ile ilgili ilk çalışmaları incelemek önemli olduğu değerlendirilmektedir. Şekil 3.5 daha yüksek K değerlerinin genellikle yağlanmamış kayma aşınmasında görüldüğünü göstermektedir. Yine sert parçacıkların neden olduğu aşınmanın daha yüksek K değerlerine sahip olduğunu söylemek mümkündür. Yağlanmış durumda, yağlayıcının oluşturduğu filmin kalınlığı arttığında, yağlayıcı aşınma hasarlarını engellediği için K değerleri düşmektedir [58].



Şekil 3.5. Farklı aşınma koşulları altında aşınma katsayısı olan K aralığı. EHL: elastohidrodinamik yağlama, HL: hidrodinamik yağlama

Spesifik aşınma oranı (k)

Bazen mühendislik uygulamalarında aşınma katsayısı K yerine K/H oranı kullanılmaktadır. Bu ifade spesifik aşınma oranı olarak adlandırılır ve k olarak gösterilmektedir. Birim kayma mesafesi ve uygulanan normal yük başına aşınma ile sonucu ortaya çıkan malzeme hacmi olarak tanımlanmaktadır. Burada k için birim genellikle mm^3/Nm olarak verilmektedir. Farklı malzeme türleri için aşınma oranlarını karşılaştırmak faydalı olabilmektedir.

Venkatesan, AISI 1045 çeliğinin hava ve vakumda kayma aşınmasını etkileyen faktörleri incelediklerinde aşınma yüzeylerindeki yükler arttıkça aşınma partiküllerinin yapısı manyetit ve hematit ve manyetitle birlikte $\alpha\text{-Fe}$ 'ye dönüştüğünü görmüşlerdir [72]. Ayrıca, spesifik aşınma oranı daha hafif yükler için 10^{-7} ila $10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ arasında değişirken, daha yüksek yükler için $10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ civarındadır. Bu sonuçlara göre aşınma modlarını şiddetli veya hafif aşınma olarak sınıflandırmak mümkündür. Spesifik aşınma oranı $k < 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ise 'hafif aşınma' olarak tanımlanmakta ve aşınma oksidatif olarak gerçekleşmektedir.

$k > 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ise genellikle abrazif veya adhezif mekanizmalardan kaynaklanan ve “şiddetli aşınma” olarak adlandırılan aşınma türü olarak tanımlanmaktadır.

3.3. Metal Malzemelerdeki Aşınma Davranışları

Bir tribosistemdeki aşınma mekanizmalarına bağlı olarak değişen aşınma malzemelerinin fiziksel özellikleri ve mikro yapıları oldukça önemlidir. Ancak daha iyi bir görüş için metallerin kayma aşınması yakından incelenmesi gerekmektedir. Metal aşınması için ilk konsept, aşınma şiddetinin belirlenmesidir. Çok sayıda çalışma, aşınmanın şiddetli veya hafif olduğunu tanımlamaya odaklanmıştır. Aşınma katsayısı ve aşınma oranı bu ayrımı yapmak için kullanılabilecek araçlar olarak belirtilebilir. Şiddetli aşınmayı, malzemenin erimesine kadar ciddi plastik hasarlar izleyebileceğinden, hafif ile şiddetli aşınma geçişi tanımlanmalıdır. Geçiş etkilediği tespit edilen faktörler, kayma mesafesi, kayma hızı, uygulanan yük, plastik akıştan itibaren oksit yüzey filmlerinin kırılması ve ark sıcaklığı gibi birçok çalışmada araştırılmıştır [73].

Lim ve Ashby literatürdeki aşınma verilerini gözden geçirmiş, aşınmayı etkileyen tüm parametrelerin çok karmaşık (kayma hızı, temas basıncı vb.) ve aşınma mekanizmaları arasında değişken olması nedeniyle evrensel bir diyagramın olmadığını ortaya koymuşlardır [74]. Bu çalışmada yük (F), hız (v) ve aşınma oranı (w) normalize edilmiş ve toplanan tüm bilgiler grafiğe aktararak termal özellikleri içeren bir dizi hesaplamadan sonra aşınma mekanizması haritası oluşturulmuştur.

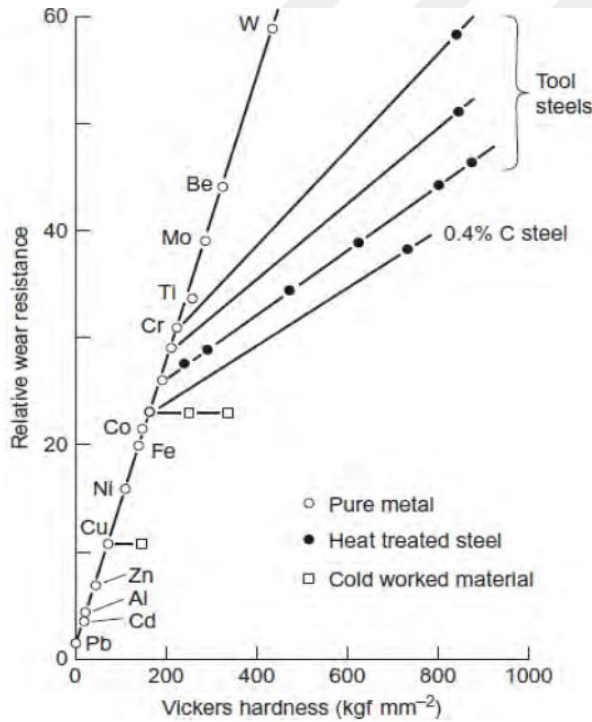
Yeni bir aşınma modeli haritası oluşturmak veya aşınma verilerini mevcut bir aşınma modeline uydurmak için, uygulanan yük, sertlik vb. aşınma mekanizmasını etkileyebilecek etkileyen faktörler açıkça tanımlanmalıdır. Öte yandan sertlik, malzeme tipine bağlı olan temel özelliklerden biridir. Ayrıca malzemelerin mikro yapısının etkisi, kristal yapısı, bileşimi malzemeye bağlı olan ve aşınma geçişlerinde oldukça etkili olan özelliklerdir.

3.3.1. Sertlik

Aktif aşınma mekanizmasının değişken olma durumundan dolayı sertliğin aşınmaya etkisinin ne olacağı noktasında bir kesinlik bulunmamaktadır. Sertlik, aşınma oranını artırabileceği gibi azaltabileceği ve hatta aşınmaya etkisi olmayacağı da dikkate alınması

gerekmektedir. Bu tezde bahsedilen Archard aşınma teorisi hem aşınma testleri hem de sayısal analiz için ana aşınma modelidir. Archard denkleminde göre, aşınma malzemesinin sertliği arttıkça sertlik ve aşınma oranı arasındaki ilişki azalmaktadır. Ancak saf metallerin ve alaşımların aşınma davranışları farklı olabilmektedir. Khrushov tarafında konuyla ilgili önemli bir analiz ve tartışma olarak, sabit aşındırıcı tanelere karşı saf metaller, ısıtılmış çelikler, soğuk işleme sertleştirilmiş malzemeler, sert aşınmaya dayanıklı malzemeler üzerinde abrazif aşınma testlerinin sonuçlarını ortaya konulmuştur [75].

Aşınma testi sonuçları Şekil 3.6’da incelendiğinde saf metallerin malzemenin sertliğine karşı lineer bir rejim oluşturduğu açıkça görülmektedir. Çeliklerin ise bu rejime uymadığı, ısıtılmış işlem ve soğuk şekillendirme gibi işlemlere göre farklı eğimlerde hatlar oluşturduğu görülmüştür. Plastik şekil değişiminin sertlik üzerinde bir artışa neden olacağı burada dikkate alınmamıştır. Diğer taraftan, alaşımlama ile aşınma direncinde iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

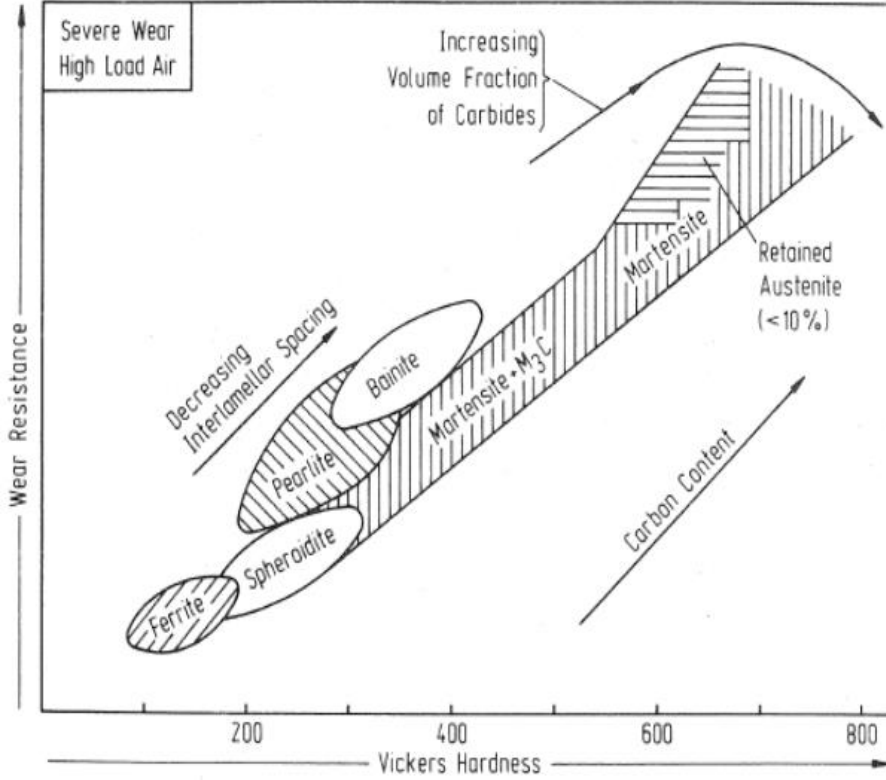


Şekil 3.6. Saf metaller ve çelikler için bağıl aşınma direnci

3.3.2. Mikroyapı

Metaller aşınma dikkate alındığında kullanılan en yaygın malzemelerdir. Bu malzemelerin temel özelliklerden biri, bileşimlerine bağlı olan mikro yapıdır. Fiziksel ve mekanik

özelliklerin çoğu iç yapısından kaynaklanmaktadır. Mikroyapılar Şekil 3.7’de görüldüğü gibi sertliklerine göre özetlenmiştir [60].



Şekil 3.7. Farklı mikro yapılar sahip çeliklerin sertliğinin bir fonksiyonu olarak aşınma direnci

Aynı sertlik değerlerine rağmen bey nitik ve martenzitik yapıların aşınma direnci farklıdır. Bey nitik yapı martenzite göre aşınmaya karşı daha dirençlidir. Bu martenzit yapıdaki karbon içeriği ile ilgili olabileceği değerlendirilmiştir [76]. Ayrıca martenzitik yapılar için sertlik arttıkça aşınma direnci de artmaktadır. Ancak aynı sertlikte perlit de martenzitik yapıya göre daha yüksek aşınma direncine sahiptir. Perlitli çeliklerde perlitin hacim fraksiyonundaki artış, aşınma direncinde de artışa neden olur. Artışın ana nedeni, perlitlerin yapıdaki ferrit tanelerine göre aşınmaya dirençli sert parçacıklar gibi davranması olarak açıklanmaktadır [77]. Benzer yapıya sahip metalleri karşılaştırmak için, aşınma direncinin bir parametresi olarak sertliği kullanmak anlamlı olabilir.

Endüstriyel uygulamalarda oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olan dökme demir söz konusu olduğunda, bu durum özellikle büyük ölçüde mikro yapıya bağlı olduğu değerlendirilmektedir. Karbon içeriğinin şekli mikro yapı için ana belirleyici faktördür. Gri dökme demirde grafit, karbon, pul veya katmanlı olarak bulunabilir. Aksi takdirde, karbonlar

küresel formdadır ve sfero dökme demir olarak adlandırılır. Grafit tribo sistem için katı bir yağlayıcı olarak görünmektedir, dolayısıyla aşınma direncini etkilemektedir. Gri dökme demir için grafit pulları, kuru kayma koşulları altında grafit bir film oluşturur. Yüzeyindeki bu film sayesinde gri dökme demir, kendi kendini yağlayan bir metal olarak kabul edildiğinden çok iyi aşınma direncine sahiptir [78].

Mikroyapıda fazların boyutu ve hacim oranı gibi özellikleri mekanik ve aşınma davranışları ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle, mikroyapı analizi, aşınma mekanizmasının ve aşınma rejiminin gözlemlenmesi için çok önemlidir. Ancak, sürtünme sıcaklığı ve plastik deformasyon etkileri nedeniyle kayma aşınması sırasında, temas yüzeylerinde malzemelerin mikro yapısında değişiklikler görülmesi mümkündür.



4. TOZ METALURJİSİ İLE İMALAT

Toz metalurjisi, özel olarak üretilmiş tozların şekillendirilip ısıtma işlemi (sinterleme) mukavemet kazandırılması olarak tanımlanabilir. Alaşımsız veya alaşımlı tozların belirlenen oranlarda karıştırılması, homojen olarak karıştırılan tozların uygun bir kalıp yardımıyla sıkıştırılması ve daha sonra tozların metalurjik özelliklerinin kazanılması için kontrollü atmosferde sinterlenmesi işlemiyle tamamlanmaktadır. Homojen parçaların üretimi kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin kontrol edilebilmesini gerektirmektedir.

Geçmiş M.Ö. 3000 yıllarına kadar uzanan toz metalurjisi, insanlık tarihinin büyük bir bölümünde önemli faydalar sağlamıştır. Eski Mısırlılar demir oksidi indirgeyerek sünger demir elde etmişlerdir. 400 yılına gelindiğinde 6.5 ton ağırlığındaki Delhi Sütunu, Hindistan'da günümüzün yöntemine benzer şekilde toz metalurjisi ile elde edilmiştir. 1826 yılına gelindiğinde ise Rusya'da üretilen platin paranın toz metalurjisinin ilk endüstriyel uygulaması olduğu söylenebilir. 1892'de W.H. Wolaston, toz metalurjisi yöntemiyle platin elde ederek ilk resmi toz metalurjisi uygulamasını başlatan kişi olarak bilinmektedir.

Periyodik tablodaki metal sayılan 86 elementten 8000 alaşım ortaya çıkmıştır. Esasen bahsedilen 86 elementten ikili, üçlü ve dörtlü gibi farklı karışımlarla 1025 civarında alaşım üretmek mümkündür. Bunu mümkün kılacak yöntemlerden en önemlisi ise toz metalurjisi yöntemidir. Günümüzde, toz metalurjisi yöntemi ile parça üretiminin tercih edilmesi, maliyet kısmı dikkate alındığında giderek gelişen ve kendini yenileyen bir teknoloji olarak tanımlanabilir. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmesi planlanan parçalar üretildikten hemen sonra kullanılabilecek özellikte olması veya isteğe bağlı olarak ikincil işlemlere bırakılabilmesi önemli bir avantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Klasik üretim ve döküm yöntemi ile üretilmeyen malzemelerin üretimi toz metalurjisi yöntemi ile gerçekleştirilebilmektedir.

4.1. Tozun Kullanım Alanları

Toz metalurjisi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bunlar, süper alaşımlar, tungsten ve molibden gibi refrakter malzemeler, takım çelikleri, paslanmaz çelikler, bakır alaşımları, manyetik alaşımlar, alüminyum ve titanyum alaşımları, sermetler ve nükleer malzemeler kullanılarak üretilen aşınmaya dayanıklı parçaların imalatı olarak sıralanabilir. Bu bağlamda

özellikle otomotiv sektörü ön plandadır. Ayrıca jet motoru parçaları, tungsten lamba filamanları, ortopedik ekipmanlar, dişli çarklar, yağsız yataklar, yüksek sıcaklık filtreleri, elektrik kontakları, uçak fren balataları, kaynak elektrotları, katalizörler, lehim aletleri, yüksek sıcaklık filtreleri, nükleer enerji yakıt elemanları, devre kartları, diş hekimliği, boyalar, patlayıcılar, kaynak elektrotları gibi uygulama alanları bulunmaktadır [79].

4.2. Toz Üretimi ve Özellikleri

Metal tozlarının üretiminde kullanılan yöntemler tozların birçok özelliğini belirlemektedir. Tozun geometrik formu üretim yöntemine bağlı olarak karmaşık şekilden küresel şekle kadar çok farklı olabilir. Toz partikülünün yüzey durumu da üretim yöntemine göre değişmektedir. Malzemelerin çoğu özelliklerine uygun bir teknikle toz haline getirilebilir. Toz üretim teknikleri arasında ticari olarak kullanılanlar da bulunmaktadır. Toz üretim teknikleri genel olarak mekanik (öğütme), kimyasal, elektroliz, atomizasyon, buharlaştırma ve diğer üretim teknikleri olarak sıralanabilmektedir [80].

Şekil, boyut, tozun bileşimi, yağlayıcı tipi, presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi gibi birçok değişken toz metalin özelliklerini etkilemektedir. Tozların sıkıştırılma yolu boyunca tozlara eklenen yağlayıcılar, kalıptaki toz basıncı, sıkıştırma hızı ve titreşim toz üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu bileşenler aynı zamanda üretilen ürünün nitelikleri bakımından da önemlidir.

4.2.1. Tozun fiziksel özellikleri

Parçacık boyutu

Metal tozlarında tane boyutu çoğunlukla elek analiz yöntemi ile belirlenir. Tüm tozun boyutlarının aynı olduğu söylenememekle birlikte ancak ortalama parçacık boyutundan söz edilmesi mümkündür. Boyut analizi ile her aralıktaki tozun % miktarı ve ortalama parçacık boyutu belirlenir. Tane boyutunun belirlenmesinde tozun şekli diğer önemli bir husustur [81].

Toz şekli

Tozların en önemli özelliklerinden biri olarak kabul edilen tane şekli, toz parçacıklarının görünür yoğunluk, akışkanlık, sıkıştırılabilirlik ve ham mukavemet gibi özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür.

Görünür yoğunluk

Rastgele seçilen bir tozun görünür yoğunluğu, tozların preslenmesi için tasarlanan kalıptaki boşlukların boyutlarını belirleyen en önemli faktördür. Görünür yoğunluğun tespiti için, belirlenen hacimdeki birbirine yapışmamış metalik toz, bilinen kaba tamamen doldurulur ve oluşan kütle ölçülür. Görünen yoğunluk daha sonra kütlenin hacme oranı ile hesaplanır. Demir tozu parçacıklarının görünür yoğunlukları gözlemlenebilir, ancak farklılıklar göstermektedirler.

Teorik yoğunluk

Ergitilmiş ve sonrasında dökülmüş malzemenin yoğunluğu teorik yoğunluk olarak adlandırılmaktadır. Tozlardan parça üretimi yapılmak istendiğinde titreşim önemli bir faktör olduğundan vurgu yoğunluğunun bilinmesi gerekmektedir. Vurgu yoğunluğu hacim ölçekli bir kap içerisinde toz, kaba doldurulup titreşime maruz bırakılmaktadır. Böylece tozla sıkışmaktadır. Kaptaki tozun son halinin hacim olarak karşılığı okunur ve tartım işlemi gerçekleştirilir. Tartılan toz kütesi, hacim değerine bölünerek tozun yoğunluğu tespit edilir.

Yoğunluğu yüksek olan parçaların gözenek oranı genellikle %10'dan azdır. Bu parçalar özellikle mukavemeti yüksek olan parçalardır. Dişliler bu parçalar için örnek olarak verilebilir [82].

Toz Akışı

Tozların hızlı ve kolay bir şekilde akması üretimi için oldukça önemlidir. Tozların akış hızı ne kadar kısa olursa görünür yoğunluk o derece yüksek olmaktadır. Akış hızı zamanı kısaltmakta böylece üretim seri olabilmektedir.

4.2.2. Tozun kimyasal özellikleri

Kimyasal özellik tozun bileşimi ve saflığı hakkında bilgi vermektedir. Konuyla ilgili analiz işlemleri gerçekleştirilerek tozun yapısı, bileşimi ve istenmeyen maddeler tanımlanmaktadır. Burada en önemli faktör tozun saflığının derecesidir. Saflık, tozun sonraki üretim tekniklerine ve parçanın sağlıklı bir şekilde elde edilmesinde büyük bir etkisi bulunmaktadır. Karbon, grafit, karbür veya farklı solüsyon halleriyle bulunabilmektedir. Bakır tozunun elektrolizle hazırlanması sonrasında kırmızı bir renk olduğu halde oksitlenmesi sonucu kahverengi bir renk halini almaktadır.

Toz metal parça üreten firmalarda üretim sırasında tozların kolay akması önem arz eder. Çünkü üretimin hızlı ve seri olabilmesi için tozların kaplardan kalıplara, dolayısıyla kalıplar içinde kolay akması gerekir. Tozların akış hızı zamanı da kısaltacağından görünür yoğunlukla akış hızı arasında da bir ilişki mevcuttur. Görünür yoğunluğu yüksek tozlar kısa akış süresine sahiptir. Yüksek yoğunluklu parçalarda (az gözenekli) gözenek oranı %10'dan azdır ve dayanımı yüksek olan parçalardır. Dişliler, kavramalar, kamalar, kilit parçaları gibi çok çeşitli makine parçaları bu malzemelerden imal edilebilmektedir.

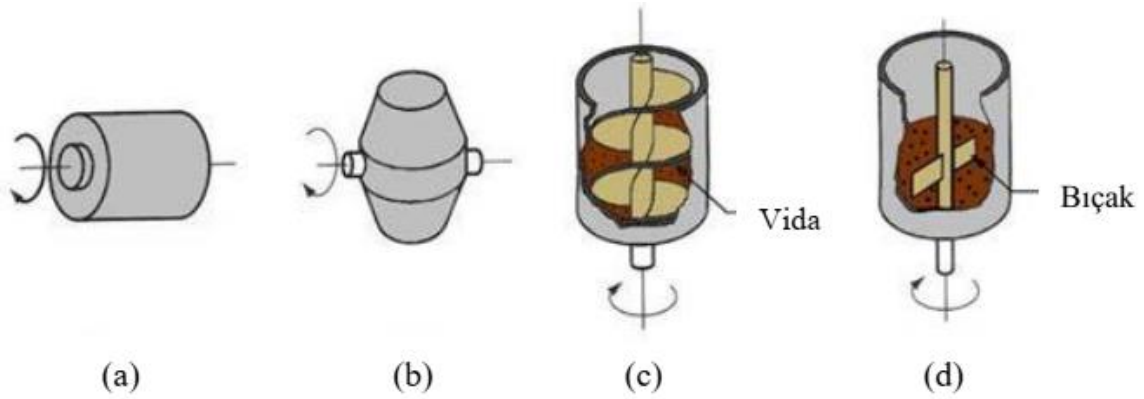
Metal tozlarından parça üretimi sırasında tozlar titreşime maruz kaldıkları için tozlara ait vurgu yoğunluğunun bilinmesinde fayda vardır. Tozların vurgu yoğunluğunun bulunması hacim ölçekli bir kap içinde yapılır. Kaba toz doldurulur ve sonra bu kap herhangi bir titreşimli cihazla titreştirilir veya kaba dışarıdan vurularak tozun kap içinde titreşim sonucu sıkışması sağlanır. Daha sonrada son durumdaki tozun kap içindeki gösterge karşılığı hacmi okunarak toz ağırlığı tartılır. Tartılan toz kütle, okunan hacme bölünerek tozun vurgu yoğunluğu tespit edilir.

4.3. Toz Metalurjisi Kullanarak Parça Üretim Süreci

4.3.1. Örnek alma ve karıştırma

Toz örnekleme, çeşitli yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Yaygın olarak kullanılan yöntem, birçok farklı noktadan küçük numuneleri harmanlamaktır. Taneciklerin genel şekli kohezif olduğundan birbirine yapışma eğilimi yüksektir. Sonunda parçacıkların topaklaşmasına neden olabilecektir. Yüzey nemi nedeniyle yüksek topaklanma meydana

gelebilir. Çoğu parçacık için, mekanik ve ultrasonik titreşim yöntemleri, yüzey aktif madde sıvıları, parçacıkların dağılmasında ve akabinde özelliklerin belirlenmesinde aktif rol oynamaktadır. Mekanik karıştırma veya ultrasonik titreşim, topaklanma oluşumunu dağıtmak için sıklıkla tercih edilen yöntemlerdir. Tozlar, genellikle çift konili karıştırıcılarda belirlenen süre içerisinde, tane boyu şekline göre topaklaşmayı önlemek için karıştırılmaktadır. Burada, karıştırma süresi oldukça önemlidir (Şekil 4.1). Bu sürenin uzun tutulması durumunda toz tanecikleri kırılarak tozların sıkıştırılabilirlik özelliğini azaltacaktır.



Şekil 4.1. Değişik öğütme ve karıştırma makinaları: (a) dönen tambur, (b) dönen çift koni, (c) vidalı mikser ve (d) bıçaklı mikser [83]

4.3.2. Tozların sıkıştırılması

Üretilmiş parçaların mukavemet özellikleri tozların yapısı ve preslenme basıncına bağlıdır. Parçanın şekli ve boyutu, kullanılan toz karışımıyla birlikte presleme basıncını hangi değer olacağıyla bir ilişkisi bulunmaktadır. Örneğin, toz parçacıklarının düzenli bir simetriye sahip olması, küresel veya düz olması presleme basıncını ve üretim sonu ürün yoğunluğunu etkilemektedir. Yüzeyi düz ve birçok noktadan temas edebilecek tozların preslenmesi sonucunda yüksek yoğunluğa sahip ürünler edilebilecektir. Presleme sırasında boşluklu halde bulunan tozlar öncelikle yaklaşır, sonrasında tozlar arasında elastik ve plastik deformasyonlar meydana gelmektedir. Farklı tozların özelliklerine göre elastik ve plastik deformasyonların süreci değişkenlik gösterebilmektedir.

Tozların kalıp içerisinde sıkıştırılması, tozların geometrik bir formda preslenmesi anlamını taşımaktadır. Presleme genellikle oda sıcaklığında gerçekleştirilmektedir. Preslenmiş parçanın mukavemeti (ham mukavemet) sıkıştırılabilirliğe bağlıdır, sıkıştırılabilirliği artırmak için ise bağlayıcılar kullanılabilir. Preslenmiş parça elle kırılabilir, ancak aynı

zamanda nazikçe tutulacak kadar güçlüdür. İhtiyaç duyulan toz miktarı nihai parçadaki malzeme miktarına bağlı olacaktır. Üretim sürecine başlamak için, bir kalıba belirli miktarda toz doldurulur. Kalıp doldurma hızı, büyük ölçüde tozun akışkanlığına bağlıdır. Kolayca akan tozlar daha yüksek oranlarda dökülebilir. Kalıp dolduğunda, zımba toza doğru hareket eder. Toza basınç uygulanarak geometriye sıkıştırılır. Tozların sıkıştırılmasını

- Kalıpta sıkıştırma
- İzostatik sıkıştırma
- Yüksek enerjili sıkıştırma
- Ekstrüzyonla sıkıştırma
- Titreşimle sıkıştırma

şeklinde sınıflandırmak mümkündür.

4.3.3. Sinterleme

Toz sinterleme ham parçanın (preslenmiş toz) sıcaklığının belirli bir seviyeye yükseltilmesi ve belirli bir süre bu sıcaklıkta tutulmasını içerir. Sinterleme sıcaklığı genellikle toz metalin erime noktasının %70 ila %90'ı arasındadır. Böylece birbirine bastırılan toz parçacıkları arasında bağlanma mekanizmalarının oluşmasına neden olacaktır. Ham parça içindeki bağ zayıftır ve bu parça genellikle sadece tutulacak kadar yapısal bütünlüğe sahiptir. Sinterleme sırasında oluşan bağlanma, parçaya büyük ölçüde mukavemet kazandırmaktadır.

Sinterleme sırasında bireysel parçacık yapıları kaybolur ve malzeme bir bütün olarak ortaya çıkmaktadır. Konvansiyonel sinterleme ile parçadaki tüm gözenekliliği ortadan kalkmaz, ancak parçanın gözenekliliği daha da azaltılmış olmaktadır. Sinterleme daha önceki işleme aşamaları için gerekli olan tozdaki katkı maddelerinin yakılmasıyla karakterize edilmektedir. Yağlayıcılar, bağlayıcılar ve topaklanma önleyiciler gibi artık ihtiyaç duyulmayan bileşenlerin ortadan kaldırılması, nihai ürünün malzemesinin saflığını korumak için önemlidir. Sinterleme parça malzemesinin mukavemetini ve yoğunluğunu artırmanın yanı sıra sünekliliği, termal iletkenliği ve elektrik iletkenliğini de artırır.

Sinterleme sırasında bağlanmaya neden olan mekanizmalar çeşitli ve karmaşıktır. Yapışmanın meydana geldiği ana mekanizmanın difüze olduğu kabul edilir. Bu mekanizmalar, üretim süreci faktörlerine ve toz özelliklerine göre değişiklik gösterecektir. Difüzyonla birlikte meydana gelebilecek plastik akış, yeniden kristalleşme, tane büyümesi, sıvı fazda malzeme taşınması ve buhar fazında malzeme taşınması diğer bazı mekanizmalar olarak adlandırılmaktadır. Sinterleme

- Klasik sinterleme
- İndüksiyon sinterleme
- Plazma sinterleme
- Lazer sinterleme
- Mikrodalga sinterleme

olarak sınıflandırılabilmektedir.



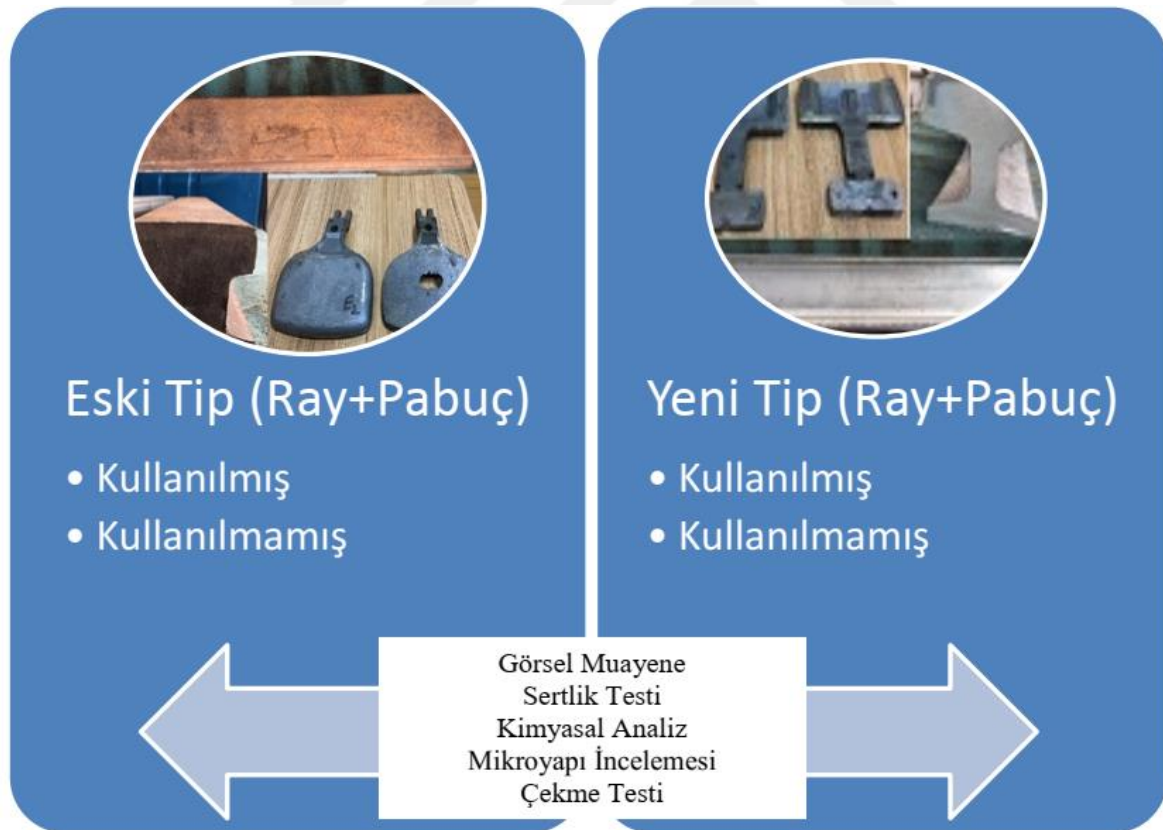
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Mevcut Durum Analizi

Kollektör pabucu-üçüncü ray temas ilişkisini tanımlamak ve gerekli deneysel çalışmaları yapmak için mevcut durumun belirlenebilmesi amacıyla kollektör pabucu numunelerinin temin edilmesi sağlanmıştır. Buna göre Ankara Metrosunda şu anda kullanımda olan eski tip ve yeni tip kollektör pabucu-üçüncü ray ilişkisini ortaya koyabilmek için her iki tip uygulamadan numuneler alınmıştır.

5.1.1. Mevcut durum için analiz metodolojisi

Alınan numuneler (Resim 5.1, Resim 5.2 ve Resim 5.3) üzerinde numaralandırma yapılarak bir takım testlere tabi tutulmuştur. Buna göre;



Şekil 5.1. Mevcut durum analizi

Alınan numuneler (Şekil 5.1) üzerinde mekanik özelliklerin belirlenmesi için;

- Görsel Muayene
- Sertlik Taraması
- Kimyasal Spektrometre Analizi
- Mikro ve Makro Yapı İncelemeleri
- Ray Numuneleri İçin Çekme Testi

testleri gerçekleştirilmiştir.



Eski Tip Kullanılmamış Pabuç (E2)

(a)



Eski Tip Kullanılmış Pabuç (E1)

(b)

Resim 5.1. Eski tip pabuç resimleri (a-kullanılmamış pabuç, b-kullanılmış pabuç)



Yeni Tip Kullanılmamış Pabuç (Y2)

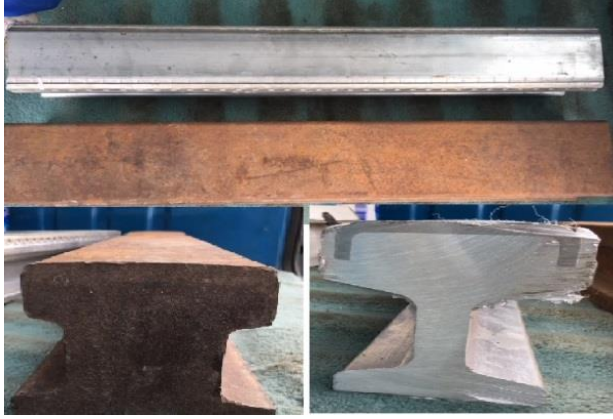
(a)



Yeni Tip Kullanılmış Pabuç (Y1)

(b)

Resim 5.2. Yeni tip pabuç resimleri (a-kullanılmamış pabuç, b-kullanılmış pabuç)



Resim 5.3. Eski ve yeni tip üçüncü ray resimleri

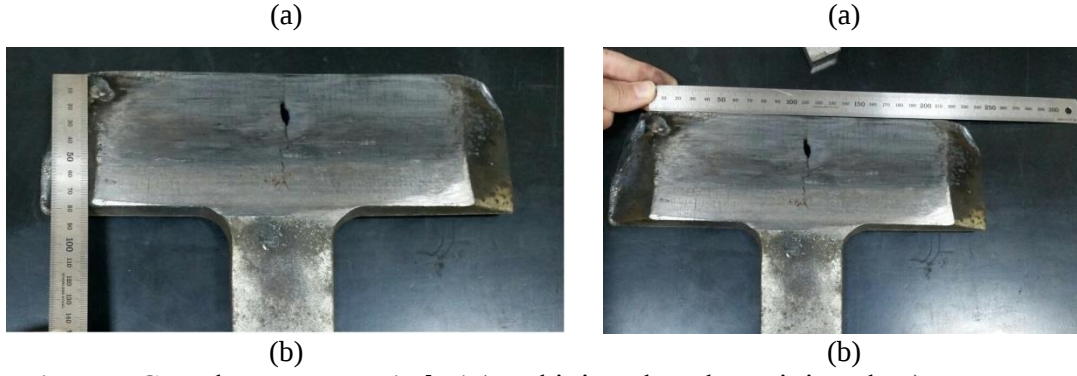
5.1.2. Görsel muayene

Kullanılmış olarak temin edilen numuneler üzerinde detaylı olarak TS EN 13018 Tahribatsız Muayene - Gözle Muayene - Genel Kurallar standardına göre görsel olarak muayene işlemine tabi tutulmuştur [84]. Ankara Metrosu trenlerinde kullanılan bu eski ve yeni tip kollektör pabuçları üzerinde yapılan inceleme sonucunda,

- Eski tip numune (E1) üzerinde oluşan elektriksel arkların yeni tipe nazaran daha az olduğu,
- Eski tip numune (E1) üzerinde aşınma nedeni ile oluşan açıklığın yaklaşık 25x40 mm olduğu,
- Yeni tip numunenin (Y1) üzerinde birçok kılcal çatlak içerdiği,
- Yeni tip numune(Y1) üzerinde aşınma nedeni ile oluşan açıklığın yaklaşık 5x15 mm olduğu

gözlemlenmiştir (Resim 5.4).





Resim 5.4. Görsel muayene resimleri (a-eski tip pabuç, b-yeni tip pabuç)

5.1.3. Sertlik taraması

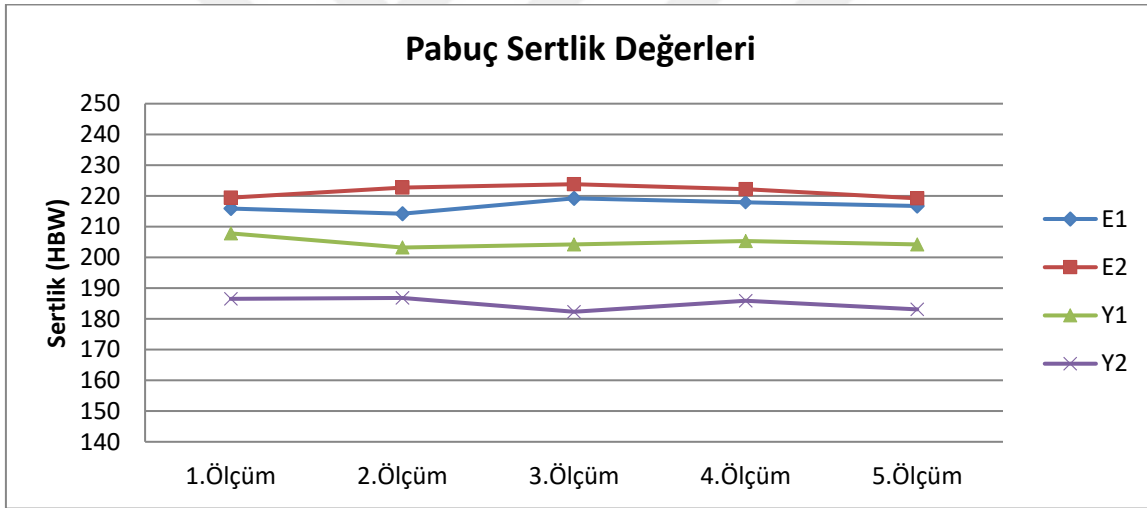
Görsel muayene sonrasında ilgili numunelerin sertliklerinin tayin edilmesi amacıyla tüm numuneler üzerinde sertlik taraması gerçekleştirilmiştir. Buna göre pabuçlar üzerindeki testler döküm numune olması nedeni ile 10-3000 kg-f yük aralığına sahip Brinell sertlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Raylar için Qness 250 kN'luk makro sertlik ölçüm cihazı kullanılarak eski tip için 2,5/187.5 kN yük aralığı ve yeni tip alüminyum alaşım numune için 2,5/62,5 kN seçilerek sertlik taramaları yapılmıştır (Resim 5.5).

Buna göre yapılan pabuç sertlik taramasında mevcut durumda kullanılan eski tip pabuçlar için kullanılıp kullanılmama durumuna göre sertlik değerinde dikkate değer bir değişim görülmemiştir. Ancak hali hazırda kullanılan yeni tip pabuç için kullanılıp kullanılmama durumuna göre bir değişim görülmektedir. Buna göre mevcut durumda kullanılan yeni tip bir pabucun sertlik değeri (205 HBW), kullanıldığı haline göre (185 HBW) sertlik kazandığı görülmüştür (Çizelge 5.1 ve Şekil 5.2).

Çizelge 5.1. Pabuç sertlik ölçüm tablosu

HBW	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Ort
E1 (Eski Tip Mevcut Kullanılan)	215,9	214,2	219,2	217,9	216,7	216,78
E2 (Eski Tip Mevcut Kullanılmamış)	219,4	222,7	223,8	222,2	219,2	221,46
Y1 (Yeni Tip Mevcut Kullanılan)	207,8	203,2	204,2	205,3	204,2	204,94
Y2 (Yeni Tip Mevcut Kullanılmamış)	186,5	186,8	182,3	185,9	183,1	184,92

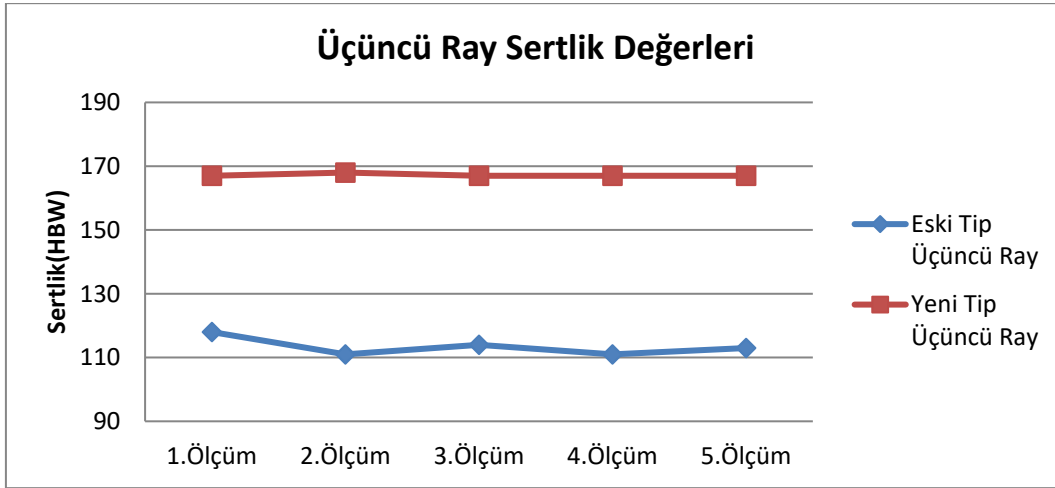


Şekil 5.2. Pabuç sertlik değişimi

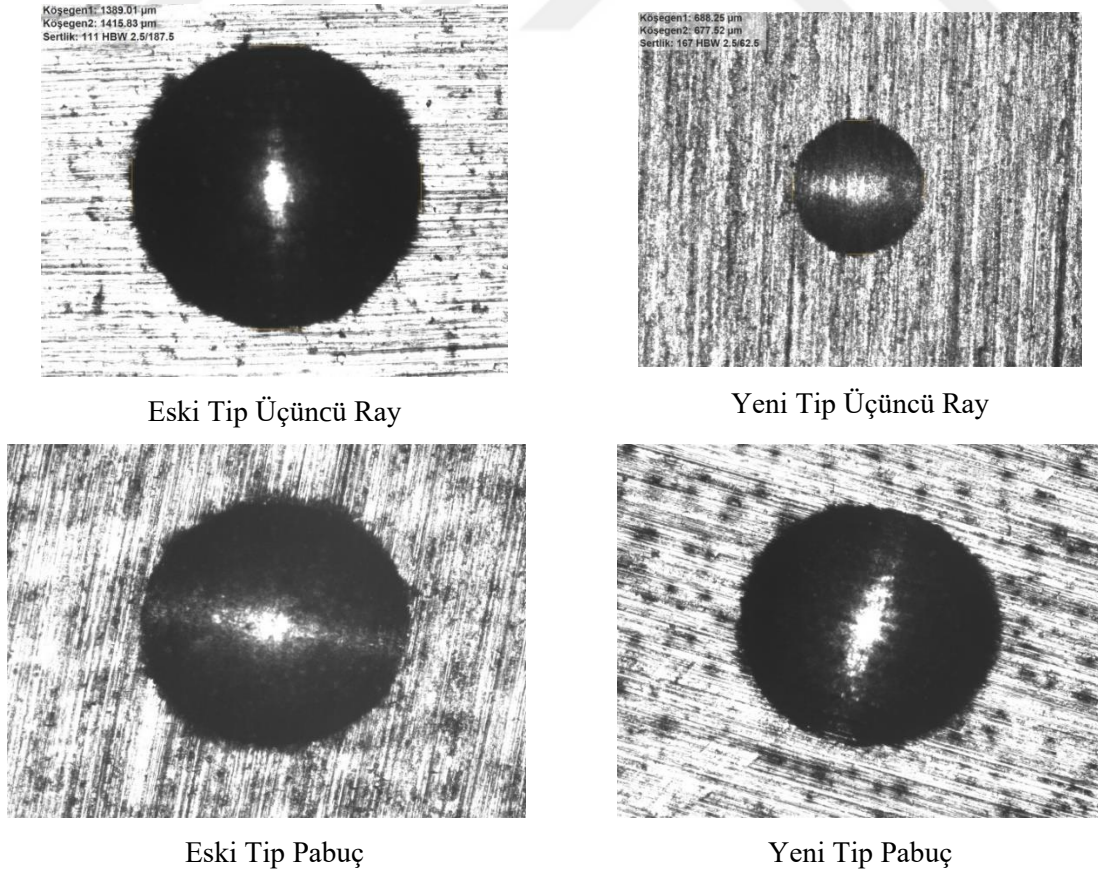
Eski ve yeni tip üçüncü ray üzerinde yapılan sertlik taramalarında (Çizelge 5.2 ve Şekil 5.3) yeni tip ray sertliğinin eski tipe oranla daha yüksek sertliğe sahip olduğu görülürken dikkat çeken diğer bir husus ise her iki tip ray sertlik değerlerinin pabuç sertlik değerlerine oranla daha düşük olmalarıdır.

Çizelge 5.2. Üçüncü Ray Sertlik Ölçüm Tablosu

HBW	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Ort
Eski Tip Üçüncü Ray	118	111	114	111	113	113,4
Yeni Tip Üçüncü Ray	167	168	167	167	167	167,2



Şekil 5.3. Üçüncü ray sertlik değişimi



Resim 5.5. Sertlik ölçümünden görseller

5.1.4. Kimyasal analiz

Küresel grafitli dökme demir olan pabuçların dağınık şekilde bir mikroyapısı olması sebebiyle doğru sonuçlar alınamamıştır. Ancak sıvı halde alınacak döküm numune üzerinden yapılacak bir kimyasal analiz ile mümkün olabilecektir. Eski tip ve yeni tip üçüncü raylar üzerinde yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.3’de verilmektedir.

Çizelge 5.3. Eski tip üçüncü ray kimyasal analiz

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Co	Cu	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0,006	0,001	0,21	0,008	0,007	0,017	0,013	0,005	0,003	0,025	99,7
2	0,006	0,002	0,21	0,007	0,007	0,016	0,012	0,004	0,003	0,022	99,7
3	0,005	0,001	0,22	0,008	0,007	0,015	0,013	0,002	0,003	0,024	99,7
4	0,005	0,002	0,22	0,008	0,008	0,019	0,012	0,006	0,003	0,027	99,7
5	0,005	0,001	0,22	0,008	0,009	0,018	0,012	0,005	0,003	0,026	99,7
Mean	0,005	0,001	0,22	0,008	0,008	0,017	0,013	0,004	0,003	0,025	99,7
SD	0,000	0,0004	0,005	0,0004	0,0010	0,002	0,0005	0,001	0,0002	0,002	0,011
RSD	5,567	30,65	2,29	5,75	12,94	9,49	3,97	28,19	7,99	8,28	0,011

Eski tip üçüncü ray kimyasal analiz (Çizelge 5.4) sonuçlarına göre %C oranının oldukça düşük olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.4. Yeni tip üçüncü ray kesit kimyasal analiz

	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	B	Be	V	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0,35	0,11	0,002	0,51	0,0005	0,0007	0,003	0,011	0,001	0,0000	0,010	99,0
2	0,35	0,10	0,002	0,51	0,0005	0,0008	0,003	0,012	0,001	0,0000	0,010	99,0
3	0,35	0,10	0,002	0,50	0,0005	0,0010	0,004	0,012	0,002	0,0000	0,010	99,0
4	0,34	0,097	0,002	0,51	0,0002	0,001	0,004	0,012	0,001	0,0000	0,010	99,0
5	0,34	0,097	0,002	0,51	0,0003	0,001	0,004	0,012	0,001	0,0000	0,010	99,0
Mean	0,35	0,10	0,002	0,51	0,0004	0,0009	0,004	0,012	0,001	0,0000	0,010	99,0
SD	0,004	0,004	0,0000	0,003	0,0002	0,0002	0,0004	0,0003	0,0002	0,0000	0,0002	0,009
RSD	1,23	4,08	2,25	0,58	38,84	19,21	12,02	2,82	13,82	8,23	1,56	0,009

Yeni tip üçüncü rayın kesitinden alınan kimyasal analiz sonuçlarına göre %99 Al bazlı Si, Fe ve Mg içeren bir alaşım yapısı olduğu görülmektedir (EN AW6060). Yeni tip üçüncü rayın üst kısmına farklı yapıda bir malzemenin giydirildiği ve bu kısımda yapılan kimyasal analiz (Çizelge 5.5) sonuçlarına göre %17 Cr içeren paslanmaz çelik (430d) bir yapısı olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.5. Yeni tip üçüncü ray üst kimyasal analiz

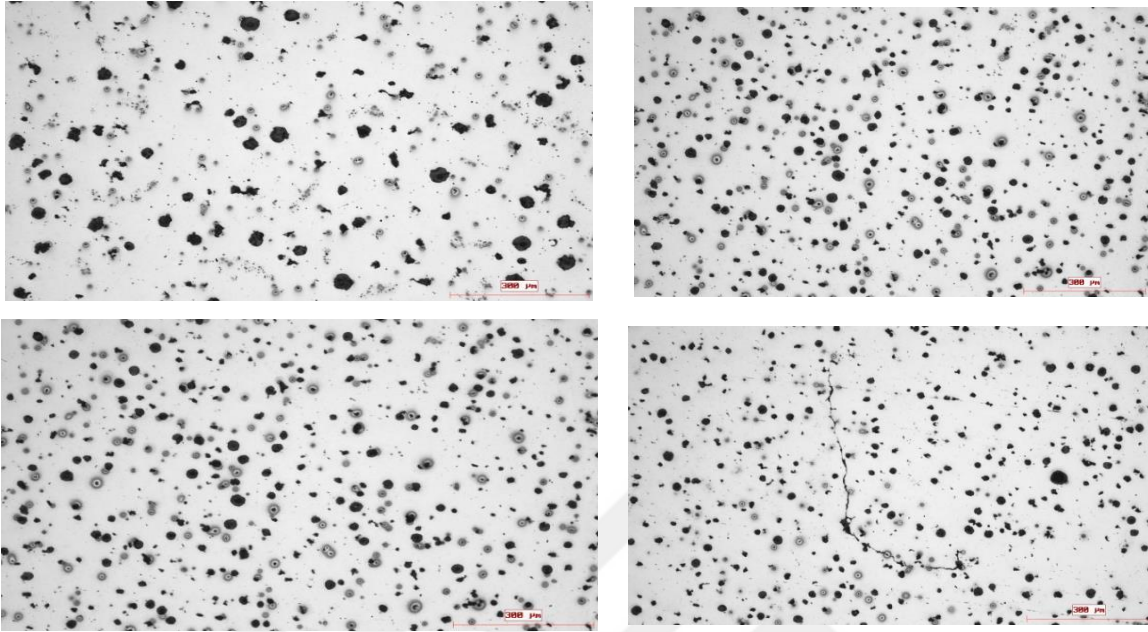
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Co	Cu	V	N	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0,057	0,35	0,34	0,042	0,011	16,78	0,017	0,20	0,021	0,059	0,097	0,043	82,0
2	0,063	0,35	0,34	0,041	0,012	17,04	0,017	0,20	0,021	0,061	0,098	0,048	81,7
3	0,062	0,35	0,34	0,040	0,013	17,39	0,016	0,20	0,020	0,062	0,10	0,044	81,3
4	0,057	0,34	0,33	0,033	0,012	17,15	0,015	0,18	0,019	0,058	0,099	0,040	81,7
Mean	0,060	0,35	0,34	0,039	0,012	17,09	0,016	0,20	0,020	0,060	0,099	0,044	81,7
SD	0,003	0,006	0,008	0,004	0,0010	0,25	0,001	0,007	0,0007	0,001	0,002	0,003	0,26
RSD	5,380	1,73	2,38	10,73	8,48	1,47	6,51	3,74	3,53	2,49	2,41	7,14	0,32
Rep	0,060	0,35	0,34	0,039	0,012	17,09	0,016	0,20	0,020	0,060	0,099	0,044	81,7

5.1.5. Mikro Yapı İncelemesi

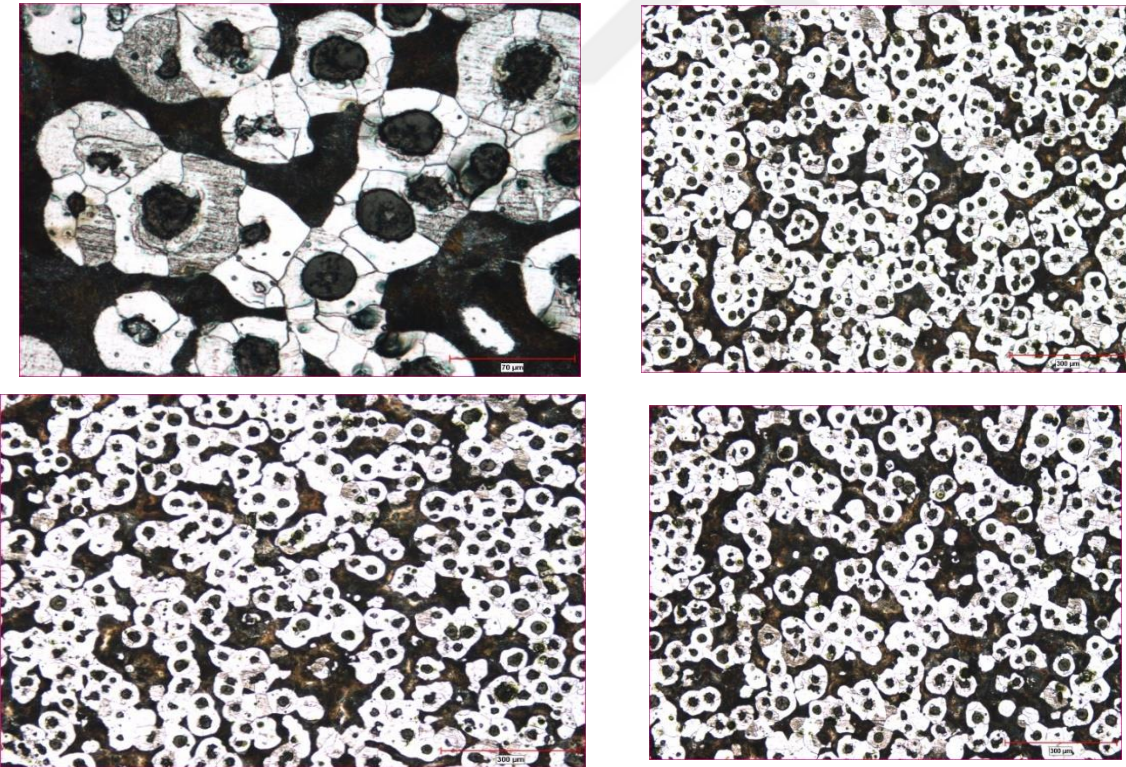
Pabuç mikro yapı incelemesi

Yeni ve eski tip pabuçların kullanılmış ve kullanılmamış durumları optik mikroskop kullanarak 100X büyütme altında ve %4 nital ile dağlanarak mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir (Resim 5.6, Resim 5.7, Resim 5.8 ve Resim 5.9).

- Eski Tip Kullanılmış (E1):

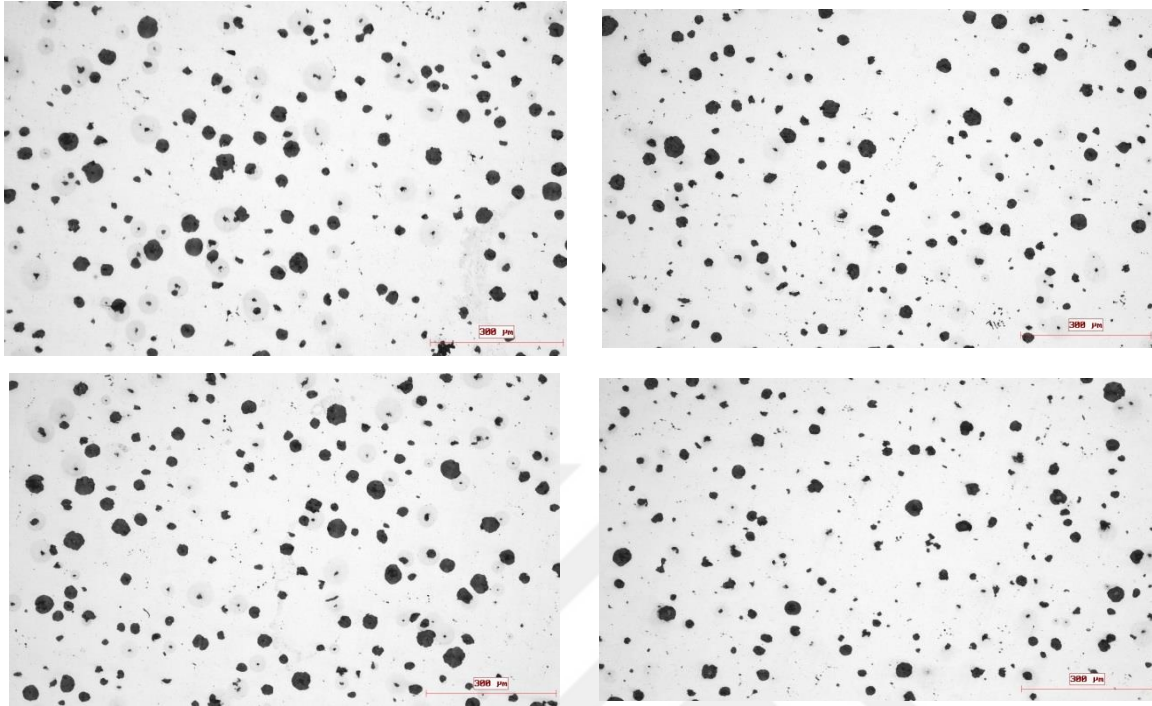


Resim 5.6. Eski tip kullanılmış pabuç mikro yapısı (E1)

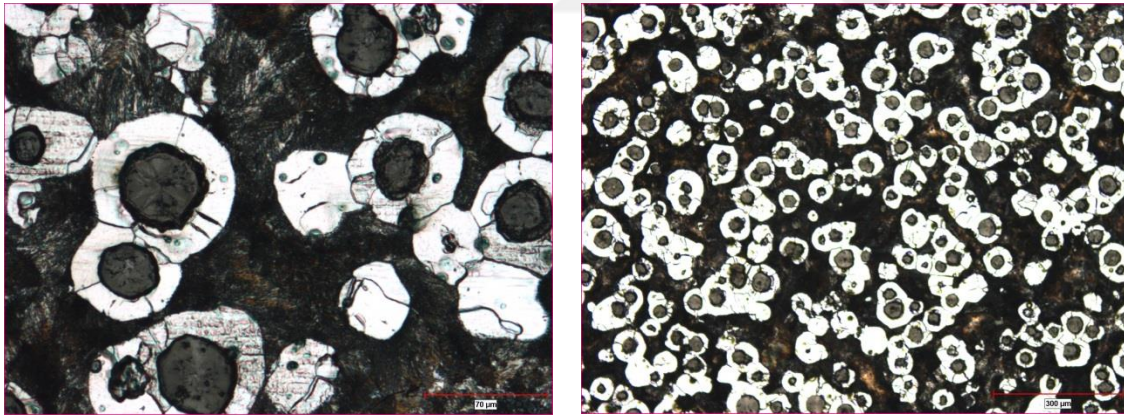


Resim 5.7. Eski tip kullanılmış pabuç mikro yapı (Dağlanmış) (E1)

- Eski Tip Kullanılmamış (E2):



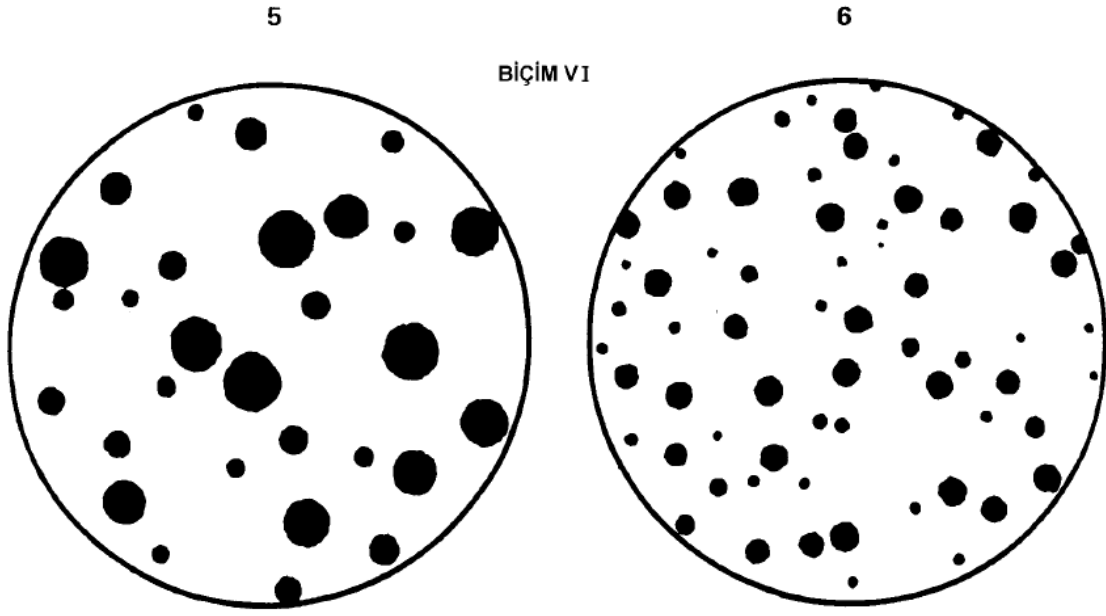
Resim 5.8. Eski tip kullanılmamış pabuç mikro yapısı (E2)



Resim 5.9. Eski tip kullanılmamış pabuç mikro yapısı dağlanmış (E2)

- E1 ve E2 Değerlendirme:

İlgili mikroyapı görüntüleri TS EN ISO 945 standardı kullanılarak grafiti tanımlamak için grafit parçacıklarının biçim, dağılım ve büyüklükleri belirlenmiştir.



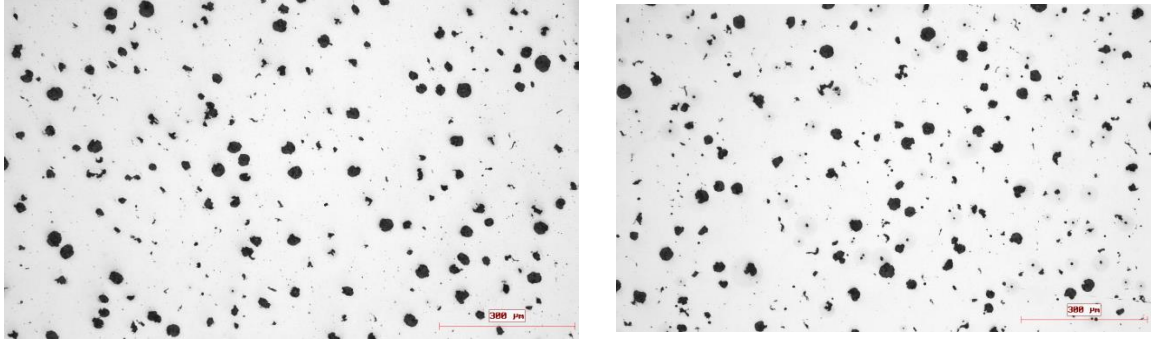
Şekil 5.4. TS EN ISO 945 grafit büyüklüğü referans diyagramı

Buna göre referans görüntüler (Şekil 5.4) ile karşılaştırıldığında Biçim VI ve 6 referans numarasına tekabül ettiği görülecektir. Gerçek küre büyüklükleri 0.03-0.06 mm aralığında değiştiği anlaşılmaktadır.

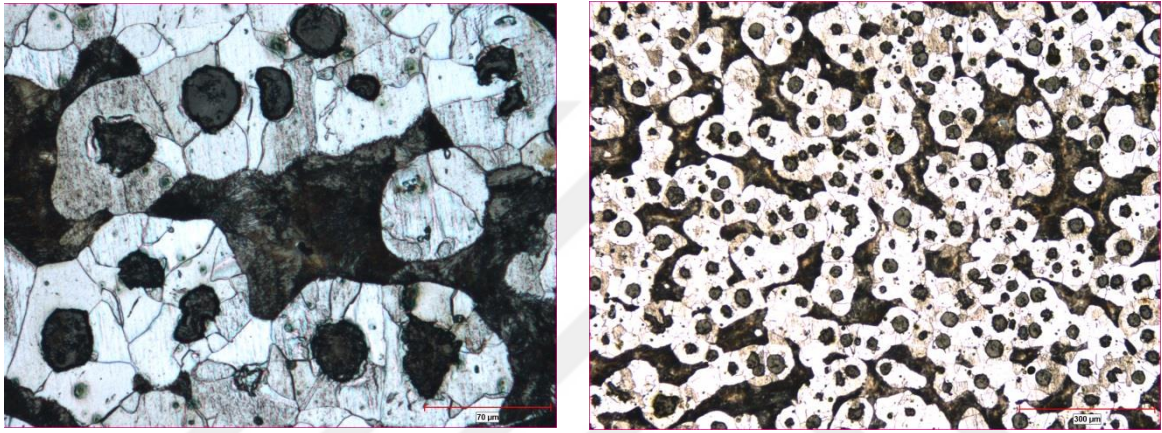
Burada dikkat çeken husus kullanılmış numunenin ferrit oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Sertlik testinden de anlaşılabacağı üzere bu numune daha yumuşak olduğu görülecektir. Ayrıca ilgili numunede mikro çatlak tespit edilmiştir.

Buna göre elde edilen görüntüler (Resim 5.10, Resim 5.11, Resim 5.12 ve Resim 5.13) referans görüntüler (Şekil 5.5) ile karşılaştırıldığında Biçim VI ve 7 referans numarasına tekabül ettiği görülecektir. Gerçek küre büyüklükleri 0.015-0.03 mm aralığında değiştiği anlaşılmaktadır. Eski tip yapı ile kıyaslandığında küre çaplarının daha düşük olduğu görülmektedir. Kullanılmış numunede yeni tip pabuçlarda daha yüksek oranda ferrit olduğu değerlendirilmiştir.

- Yeni Tip Kullanılmış (Y1):

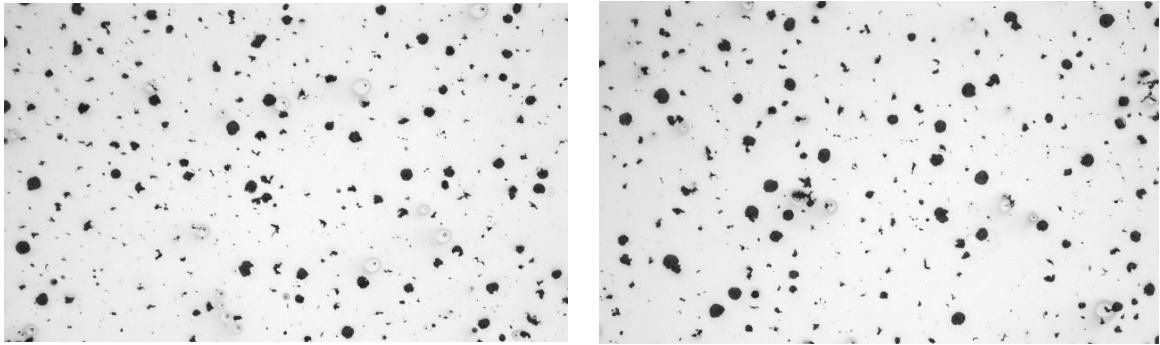


Resim 5.10. Eski tip kullanılmış pabuç mikro yapısı (Y1)

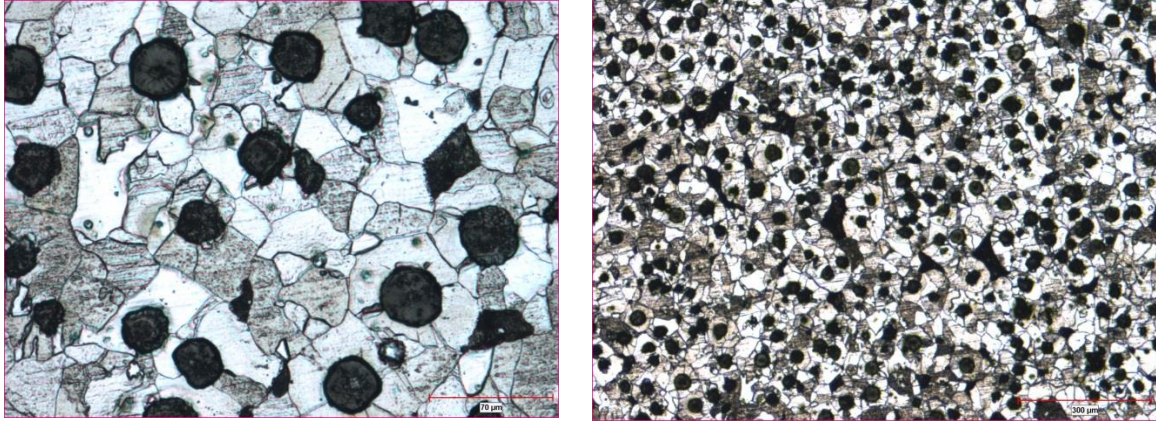


Resim 5.11. Eski tip kullanılmış pabuç mikro yapısı (Dağlanmış) (Y1)

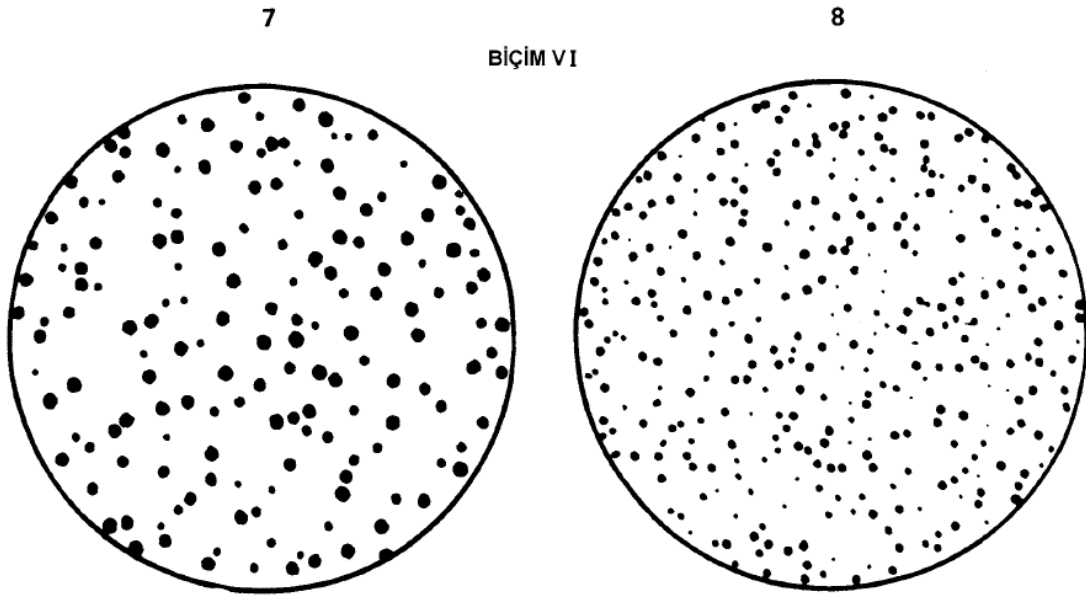
- Yeni Tip Kullanılmamış (Y2):



Resim 5.12. Yeni tip kullanılmamış pabuç mikro yapısı (Y2)



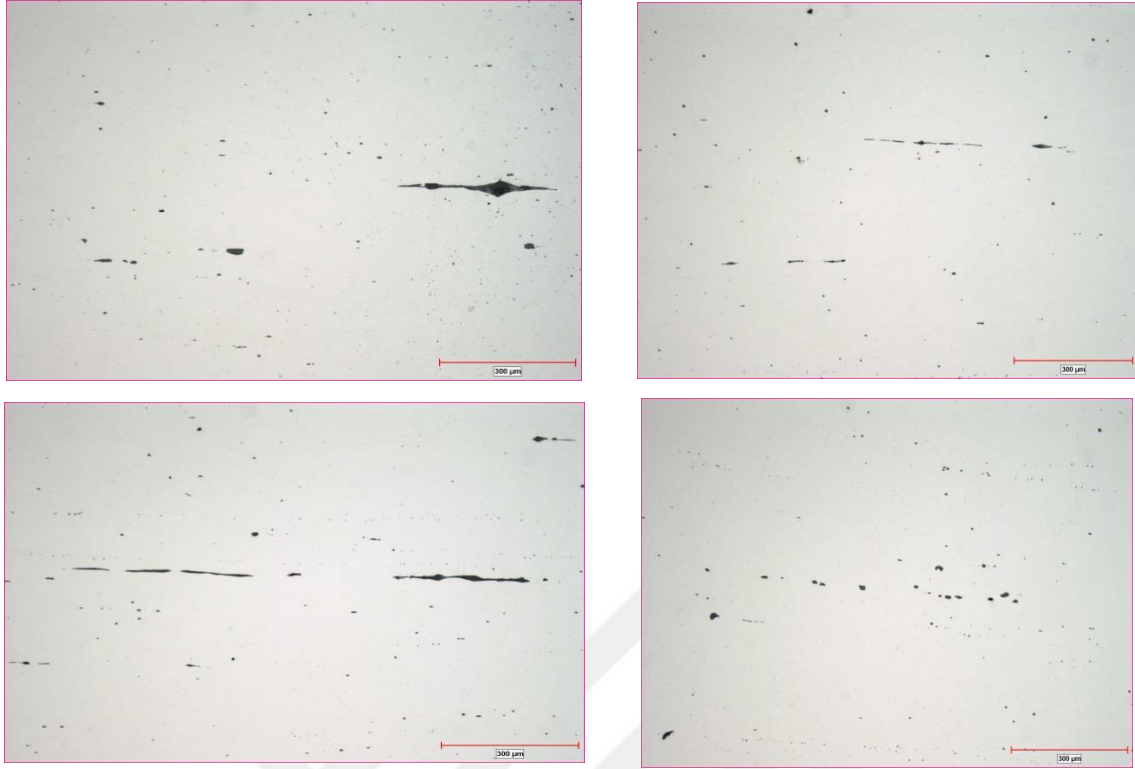
Resim 5.13. Yeni tip kullanılmamış pabuç mikro yapısı (Dağlanmış) (Y2)



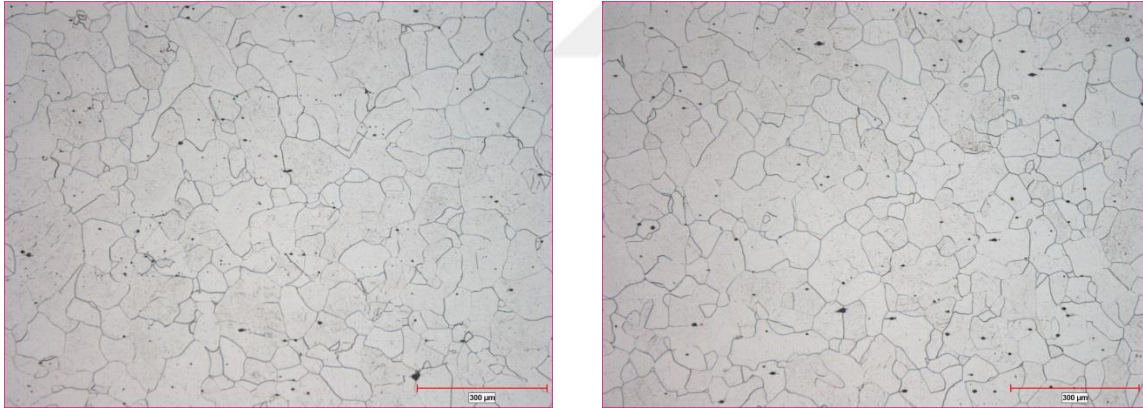
Şekil 5.5. TS EN ISO 945 grafit büyüklüğü referans diyagramı

Üçüncü ray mikro yapı incelemesi

Eski tip üçüncü ray optik mikroskop kullanarak 100X büyütme altında ve %4 nital ile dağlanarak mikro yapı incelemeleri ve ayrıca kalıntı durumu (Resim 5.14 ve Resim 5.15) incelemesi gerçekleştirilmiştir. Buna göre eski tip üçüncü rayın %100 ferritik bir yapıda, oksit ve silikalar nedeniyle üçüncü ray üretimi sırasında oksitlenme meydana geldiği anlaşılmıştır.



Resim 5.14. Eski tip üçüncü ray kalıntı incelemesi



Resim 5.15. Eski tip üçüncü ray mikro yapı incelemesi

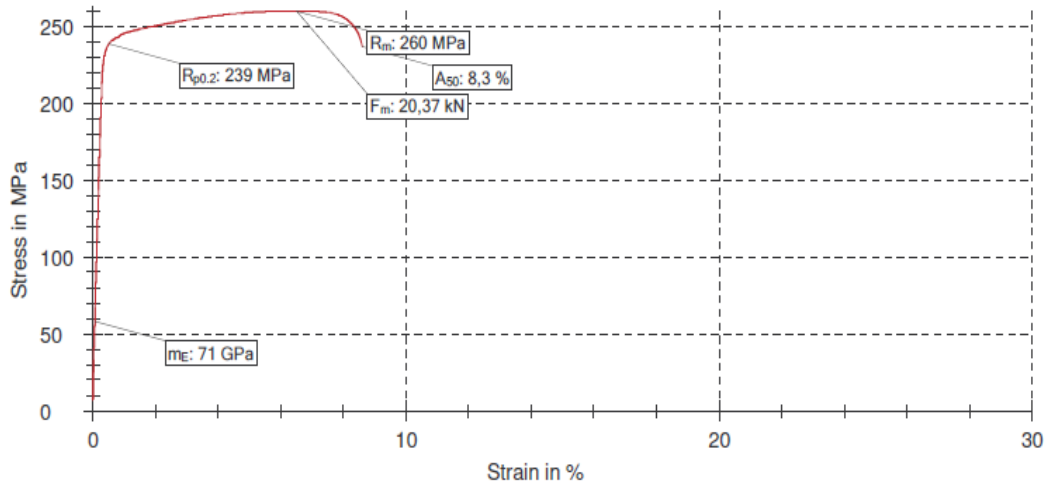
5.1.6. Çekme deneyi

Üçüncü rayın mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla çekme numuneleri (Resim 5.16) hazırlanarak çekme testleri yapılmıştır.



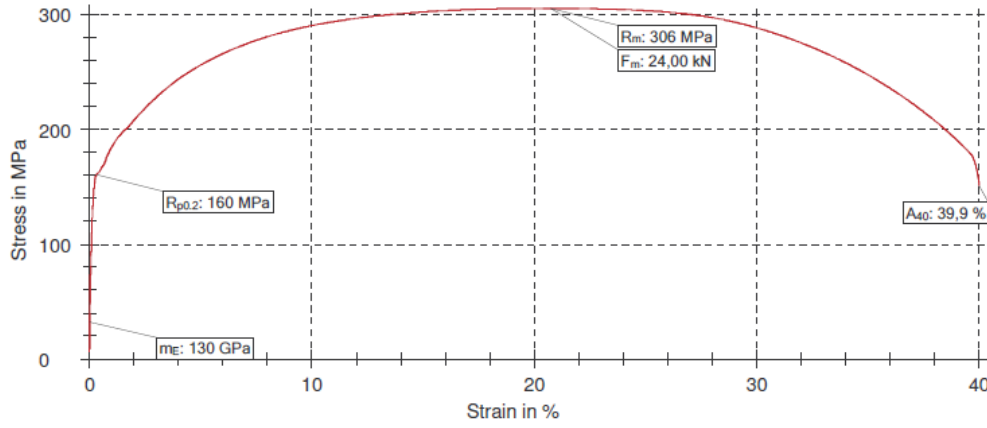
Resim 5.16. Üçüncü ray çekme deney numuneleri

Yapılan deney sonucunda Al bazlı üçüncü rayın elastiklik modülü 71 GPa, maksimum çekme dayanımı ise 260 MPa olarak ölçülmüştür. Eski tip üçüncü rayda ise elastik modülü 130 GPa olarak, maksimum çekme dayanımı da 306 MPa'dır. Eski tip üçüncü ray yaklaşık %40'luk bir uzama göstermiş ve oldukça sünek olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 5.6 ve Şekil 5.7).



No.	m_E GPa	$R_{p0.2}$ MPa	R_m MPa	F_m kN	A_{50} %	L_0 mm	S_0 mm ²
1	71	239	260	20,37	8,3	50,00	78,38

Şekil 5.6. Yeni tip üçüncü ray çekme dayanımı



No.	m_E GPa	$R_{p0.2}$ MPa	R_m MPa	F_m kN	A_{40} %	L_0 mm	S_0 mm ²
1	130	160	306	24,00	39,9	40,00	78,54

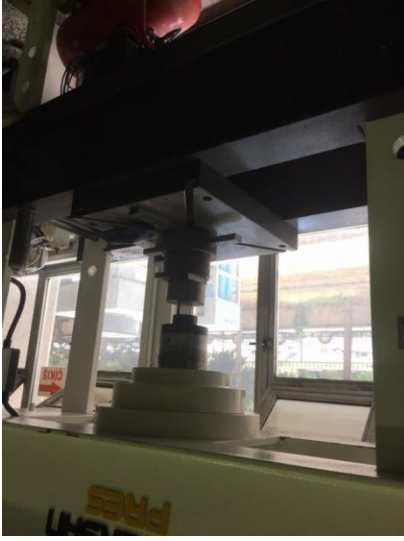
Şekil 5.7. Eski tip üçüncü ray çekme dayanımı

5.2. Deneysel Testler İçin Numune Üretimi

Bu tezin amacına uygun olarak, elektrik akımı hızlı bir şekilde iletmesinin yanı sıra mekanik özellikleri de yeterli derecede uygun olabilecek sürtünme çiftlerinden olan bakır-grafit çiftinin toz metalurjisi yöntemiyle üretilerek üzerinde meydana gelen sıcaklık ve aşınma oranları mevcut durumla kıyaslanacaktır. Bu nedenle, ağırlıkça %10 grafit içeren bakır-grafit çiftlerinin üretimi sağlanmıştır.

Tozların karıştırılması sonrası ilk aşamada 12x55 mm boyutlarında numune üretmek için piyasadan kalıbın zımba ve çıkartma aparatları ile birlikte imal ettirilerek ilk numunenin basılma işlemi gerçekleştirilmiştir (Resim 5.17.).

- Karışım kompozisyonu: %90 Cu-%10 grafit
- Uygulanan basınç: 600 MPa
- Numune boyutları: 12x55 mm
- Bakır yoğunluğu: 7.978 g/cm³
- Grafit yoğunluğu: 2.23 g/cm³
- Numuneye göre kullanılacak toz miktarı: 58 gr



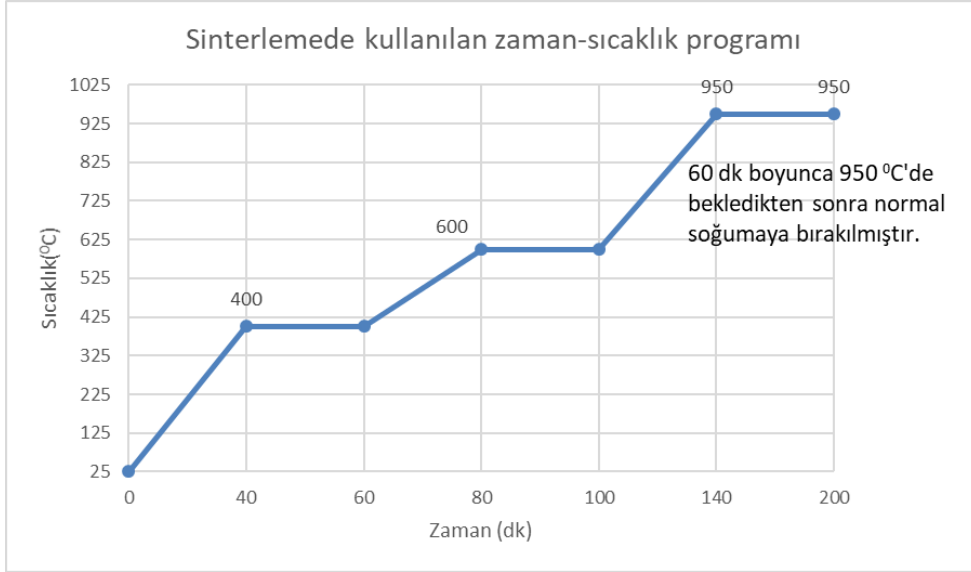
Resim 5.17. Toz basım işlemi

Kalıptan çıkan numuneler daha sonra sinterleme fırınına alınmış ve sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işleminde %95 N₂ ve %5 H₂ içeren karışım gazı kullanılmıştır.



Resim 5.18. Kalıptan çıkarılan numuneler

Sinterleme fırını için Şekil 5.8’da belirtilen program cihaza girilerek sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir.



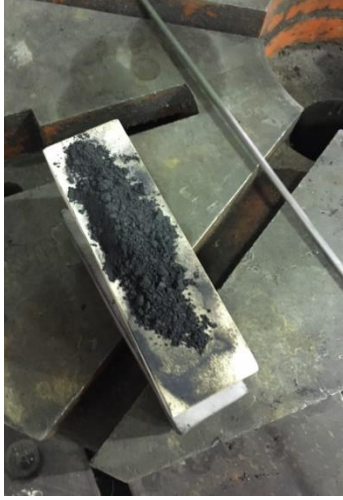
Şekil 5.8. Sinterlemede kullanılan zaman-sıcaklık programı

Ancak sinterleme sırasında oksidasyon meydana gelmiş ve aşırı miktarda su buharı oluşmuştur (Resim 5.19). Bu sorunun çözümü ve öncelikle fırına dışarıdan bir hava girişi olup olmadığını belirlemek için toz olmaksızın sinterleme aşamaları uygulanmış ve herhangi bir su buharı oluşmamıştır.



Resim 5.19. Sinterleme sırasındaki su buharı oluşumu

İkinci aşamada tozlar kalıpta basılmaksızın ayrı ayrı olacak şekilde fırına atılmıştır (Resim 5.20). Öncelikle grafit tozu kullanılarak bir işlem gerçekleştirilmiş ve su buharı gözlenmemiştir. Sonrasında bakır tozu kullanılarak yeni bir işlem gerçekleştirilmiş ve su buharının oluştuğu tespit edilmiştir.



a-Grafit sinterleme



b-Bakır toz sinterleme

Resim 5.20. Ayrı toz sinterlemesi (a-grafit sinterleme, b-bakır toz sinterleme)

Üçüncü aşamada farklı bir bakır tozu kullanılarak benzer sinterleme parametresi uygulanmış ve su buharının öncekilere kıyasla oldukça az oluştuğu anlaşılmıştır (Resim 5.21).



Resim 5.21. Farklı bakır tozu uygulanırken oluşan su buharı

Yeni bakır tozu kullanılarak preslenen yeni numuneye sinterleme işlemi 950°C 'de 1 saat bekletilerek uygulanmış ve sıcaklık bu aşamaya kadar kademeli olarak yükseltilmiştir (Resim 5.22).



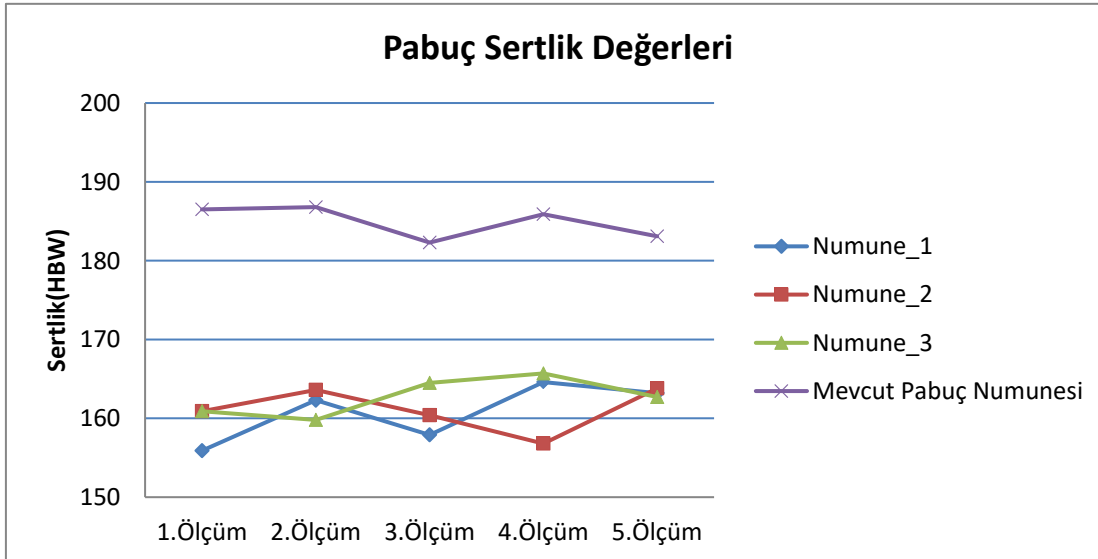
Resim 5.22. Sinterlenen numune

5.3. Sertlik Testleri

Sertlik testi için sinterlenmiş üç farklı numune Qness 250 kN'luk makro sertlik ölçüm cihazı kullanılarak 2,5/62,5 kN seçilerek sertlik taramaları yapılmıştır (Çizelge 5.6).

Çizelge 5.6. Sertlik taraması ve karşılaştırma

HBW	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Ort
Numune_1	155,9	162,3	157,9	164,6	163,2	160,78
Numune_2	160,9	163,6	160,4	156,8	163,8	161,1
Numune_3	160,9	159,8	164,5	165,7	162,7	162,72
Mevcut Pabuç Numunesi	186,5	186,8	182,3	185,9	183,1	184,92



Şekil 5.9. Karşılaştırmalı sertlik değişimi

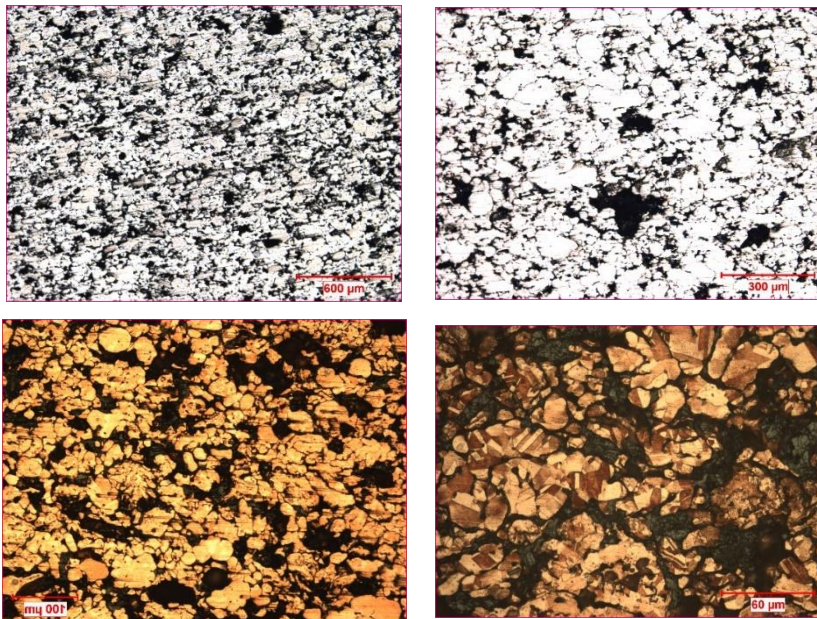
Şekil 5.9'de görüldüğü üzere eski tip GGG40 dökme demirden imal edilen pabuç üzerinden alınana numunelerin sertlik değeri ortalama 184 HB olarak gerçekleşirken, bakır ve grafit

tozlarından elde edilen sinterlenmiş numune üzerinden alınan sertlik ölçümleri değeri ortalama 161 HB olarak ölçülmüştür.

Cu-Grafit çifti daha yumuşak özellik göstermesine rağmen elektriksel ve ısı iletkenlik noktasında daha iyi bir özellik göstereceği sonraki testlerle anlaşılmaktadır. Pabucun hedeflenen özellikleri arasında mekanik dayanım, kalkış ve duruş anında yüksek akım kabiliyeti, iyi kayma özelliği ve elektriksel iletimin yanı sıra temas halinde olduğu üçüncü raya zarar vermemesi gerektiğinden sertlik değeri mevcut duruma göre düşük olması avantaj olabileceği değerlendirilmiştir.

5.4. Mikroyapı Analizi

Bakır-grafit sinterlenmiş numunenin optik mikroskop altındaki görüntüleri incelendiğinde bakır matris içerisinde grafit partiküllerinin genel olarak homojen bir dağılım gösterdiği söylenebilir. Burada karanlık alanlar grafit parçacıklarını, parlak alanlar ise bakır matrisi göstermektedir (Resim 5.23). Grafit partiküllerinin bir kısmı bakır matrise gömülürken, kalan partiküller bakır matrisin tane sınırında gözlenmektedir. Ancak bazı bölgelerde artan grafit miktarına göre bakırın tane sınırlarında grafit partiküllerinin kümeleşme gösterdiği görülmektedir. Bakır ve grafit tozları arasındaki tane boyutu farklılığı nedeniyle matris içerisinde kolay bir şekilde topaklanma olabileceği değerlendirilmektedir. Grafit bakır yapı içerisinde yapısal bütünlüğü korurken malzemeyi güçlendirmektedir.



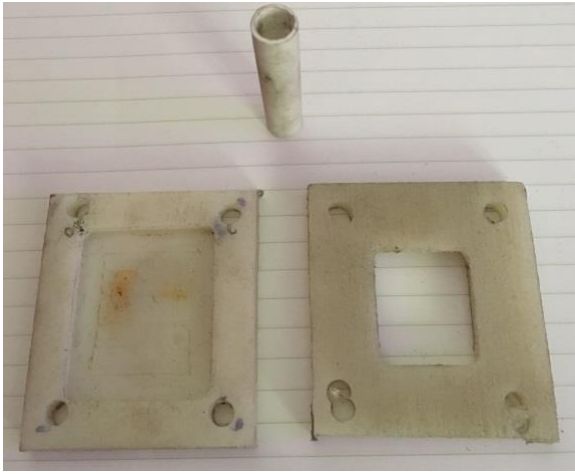
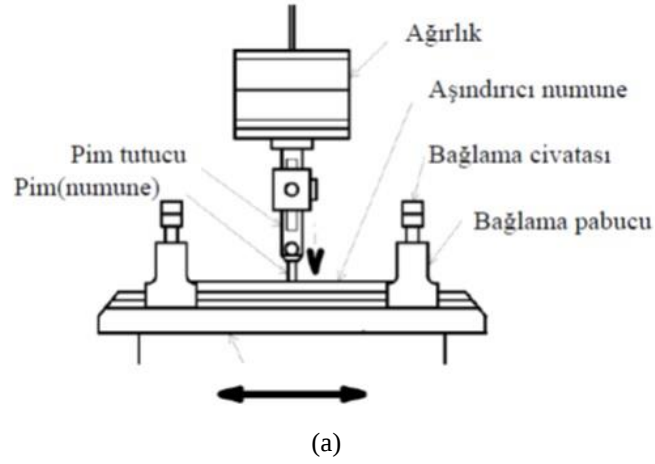
Resim 5.23. Mikroyapı resimleri

5.5. Pin-On-Plate Aşınma Testi Uygulaması

Tez kapsamında elektrik akımı uygulayabilmek için mevcut bir pin-on plate test cihazı üzerinde bazı modifikasyonlar yapıldıktan sonra test işlemi gerçekleştirilerek sıcaklık ve aşınma oranları ölçülmüştür. Konuyla ilgili birçok araştırmacı benzer nitelikte kayar vaziyetteki elektriksel temas içeren numuneler için test cihazlarında değişiklikler yapmışlardır ([38, 85, 86]). İlgili deneyler, Demiryolu Araştırma ve Teknoloji Merkezi (DATEM) laboratuvarında ve Ankara Metrosu'nda olası test ekipmanları araştırılarak ve bulunabilirliği göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri polyamid malzeme içerisine gömülmüş ve elektrik beslemesi doğru akım (0-5 A) aralığında sağlanmıştır (Şekil 5.10). Pin-on-plate cihazının teknik özellikleri

- Maksimum kuvvet: 200 N
- Maksimum lineer hız: 140 mm/s.
- Pin çapı: 3 – 12 mm

olarak verilebilir.



Şekil 5.10. Test sistemi ve aparatları (a-şematik gösterim, b-polyamid iş parçası tutucu, c-DC güç kaynağı)

Cihaz alt ve üst numune tutucular kullanılarak polyamid materyal olarak izole edilmiştir. Alt numune olarak üçüncü ray malzemesinden 40x35 mm ebadında bir dikdörtgen çıkarılmış ve üst numune ise pabuç malzemesinden 10 mm çapında ve 40 mm uzunluğunda olacak şekilde işlenmiştir.

Deney kuru koşullar altında ve 23-26°C hava sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her iki temas yüzeyinin ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,6 μm olarak ölçülmüştür. Uygulanan kuvvet değerleriyle birlikte uygulanan akım değiştirilerek parametrik bir çalışma yapılmıştır.

Seçilen baz değerler ise

- Hız (v): 140 mm/s
- Uygulanan kuvvet (F): 150 N

- Ortam sıcaklığı (T): 300 K
- Uygulanan Akım (I): 0.8A, 1.7A, 2.6A ve 3.4A
- Test süresi: 1 saat (500 m)

şeklindedir. Değişken amper değerleri mevcut sistem üzerinde pabuç malzemesinden geçen akım yoğunluğuna göre uygulanmaktadır. Özetle, kollektör pabucu temas yüzey alanı

$$A_p = 150 \times 90 = 13500 \text{ mm}^2$$

$$J_p = 450\text{A}/13500 = 0.033 \text{ A / mm}^2$$

olarak uygulama gerçekleştirilmiştir. Burada deney numuneleri polyamid malzeme içerisine takılacak şekilde hazırlanmış ve pin-on-plate test tezgahından izole edilmiştir. Böylece sistem üzerine uygun akım yoğunluğunda güç sağlanırken aynı zamanda aşınma testi için kayma işlemi uygulanabilmektedir. Deney sırasında belirli parametreler sabit tutulmuş ve değişken parametrenin etkisi gözlemlenmiştir.

5.5.1. Parametreler

Parametrik çalışmada üç farklı değişken aşağıdaki şekilde uygulanmıştır. Buna göre,

- Kuvvet-F (N): 50, 100, 150 ve 200 (Değerler Ankara Metro sistemi esas alınarak seçilmiştir)
- Akım yoğunluğu J (A/mm²): 0.011, 0.022, 0.033 ve 0.044 (Değerler Ankara Metro sistemi esas alınarak seçilmiştir)
- Kayma mesafesi (m): 100, 200, 300 ve 500

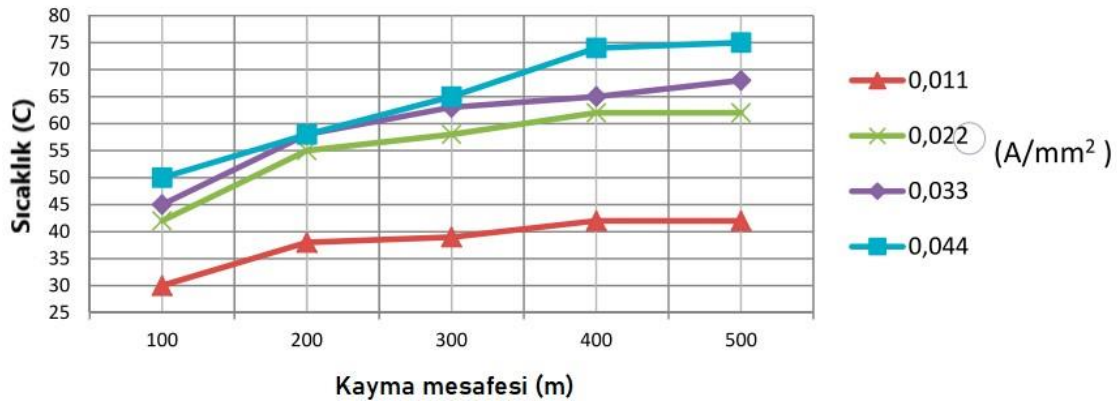
parametrelerinden kuvvet 150 N, akım yoğunluğu 0,033 A/mm² değeri sabit tutularak diğer parametrelerin değiştirilmesi suretiyle bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

5.5.2. Sıcaklık ölçümleri

Kollektör pabucu ve üçüncü ray arasında meydana gelen temas ara yüzündeki sınır koşulları, tüm termomekanik araştırmalarda ve kayan temasların termal analizinde kritik öneme

sahiptir. Çoğu durumda, temas bölgesinin boyutu ve temas basıncının (ve sürtünme ısısının) dağılımı hakkında varsayımlar gerektirmektedir. Pin-on-plate testlerinde uygulanan kuvvet 150 N baz değerinde sabit tutularak çeşitli akım yoğunluk değerlerinin uygulanmasıyla ölçülen sıcaklık değerleri not edilmiştir. Temas yüzeyinde her 100 m'de oluşan sıcaklıklar toplam 500 m kayma mesafesine ulaşıldığında deney tamamlanmıştır.

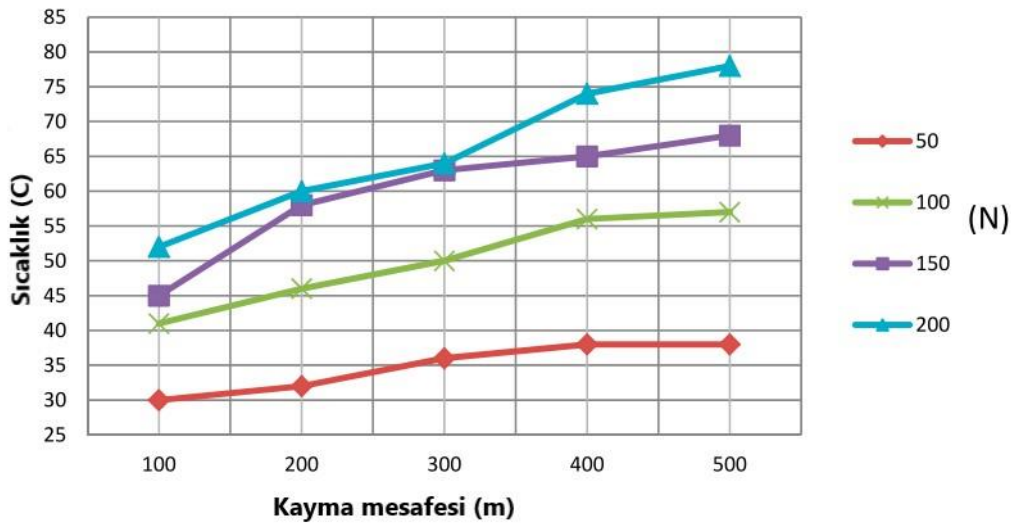
Şekil 5.11 incelendiğinde pabuç üzerindeki en düşük sıcaklık diğer akım yoğunluğu değerleriyle kıyaslandığında $0,011 \text{ A/mm}^2$ akım yoğunluğunda meydana gelmiştir. Sıcaklıklar $0,022 \text{ A/mm}^2$, $0,033 \text{ A/mm}^2$ ve $0,044 \text{ A/mm}^2$ akım yoğunluğu değerlerinde ise 500 m boyunca benzer bir model oluşturmuştur.



Şekil 5.11. Akım-sıcaklık değişimi (F=150 N sabit)

Burada dikkat çeken diğer bir husus ise pabuç üzerinde $0,033 \text{ A/mm}^2$ ve $0,044 \text{ A/mm}^2$ akım yoğunluklarında, 200 m sonundaki sıcaklığın aynı olmasıdır. Katedilen mesafe 400 m'ye ulaştığında sıcaklıkta 5°C 'lik bir fark ölçülmüştür. 500 metrelik bir mesafeden sonra pabuç üzerindeki tüm akım yoğunluk seviyelerinde sıcaklık dağılımı sabit hale gelmektedir. Akım yoğunluğuna bağlı olarak pabuç üzerindeki sıcaklıklar 500 m sonunda en yüksek noktasına ulaşmakta ve sabit kalmaktadır. En yüksek sıcaklık $0,044 \text{ A/mm}^2$ akım yoğunluğunda 75°C ve en düşük sıcaklık da $0,011 \text{ A/mm}^2$ akım yoğunluğunda 42°C olarak kaydedilmiştir. $0,022 \text{ A/mm}^2$ ve $0,033 \text{ A/mm}^2$ akım yoğunluklarında ise sıcaklık dağılımı yaklaşık olarak benzer eğilim göstermektedir. Grafiğin dikkat çeken bir diğer özelliği ise pabuç sıcaklığının ilk 200 metreye kadar ne kadar hızlı yükseldiği durumudur. Buna karşılık, $0,022 \text{ A/mm}^2$ ve $0,033 \text{ A/mm}^2$ akım yoğunlukları için artış 13°C iken, $0,011 \text{ A/mm}^2$ ve $0,044 \text{ A/mm}^2$ akım yoğunlukları için artış sadece 8°C olmuştur.

Şekil 5.12 akım yoğunluğu $0,033 \text{ A/mm}^2$ değerinde sabit tutularak kollektör pabucunda uygulanan kuvvetteki artışın pabuç üzerindeki sıcaklık değişimine olan etkisi hakkında bilgi vermektedir. Buna göre pabuç üzerine 50 N'luk bir kuvvet uygulandığında 500 m sonundaki maksimum sıcaklık 38°C olarak ölçülürken, bu değerler 100 N, 150 N ve 200 N için sırasıyla 57°C , 68°C ve 78°C olarak ölçülmüştür. Grafiğin göze çarpan bir diğer sonucu ise 250 m sonunda 150 N ve 250 N kuvvetleri için kaydedilen sıcaklığın benzer olmasıdır. Tüm kuvvet uygulamaları birlikte değerlendirildiğinde grafiğin eğimlerinin tutarlı bir sonuç verdiği düşünülmektedir.



Şekil 5.12. Kuvvet-sıcaklık değişimi ($J=0,033 \text{ A/mm}^2$ sabit)

Tren üzerinden alınan gerçek sıcaklık ölçümü

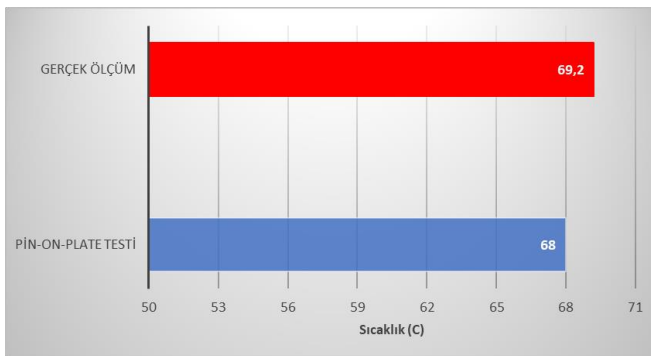
Sürtünme nedeniyle ortaya çıkan ısı ve buna eşlik eden temas sıcaklıklarındaki artışın, kayan bileşenlerin tribolojik davranışını önemli ölçüde etkilediği iyi anlaşılmıştır. Tren üzerine bir termometre kollektör pabucuna yapıştırılarak araçta sıcaklık ölçümleri yapılmıştır (Resim 5.24). Burada trenin hızı 54 km/h (15 m/s), uygulanan yük 150 N ve çekilen akım 450 A olarak ($0,033 \text{ A/mm}^2$) gerçekleşmiştir.



Resim 5.24. Kollektör pabucu üzerinden gerçek sıcaklık ölçümü

Kollektör pabucu üzerindeki aşınma temas sıcaklıklarından önemli ölçüde etkilenebilmektedir. Birçok malzeme yüksek sertliğe ve düşük ısı iletkenliğine sahip olduğundan, kayan bileşenlerin gerçek temas yüzeyleri genellikle nispeten küçük olmakta ve bu bölge önemli derecede ısınmaktadır. Ölçüm sonucunda kollektör pabucu üzerindeki maksimum sıcaklık 69,2°C olarak kaydedilmiştir.

Şekil 5.13’de mevcut kollektör pabucu üzerinden okunan maksimum sıcaklık değeri ile 150 N kuvvet ve 0,033 A/mm² akım yoğunluğu değerinde gerçekleştirilen pin-on-plate testinin karşılaştırması bulunmaktadır. Oluşan sıcaklık değerlerinin nispeten benzer olduğu söylenebilmektedir.



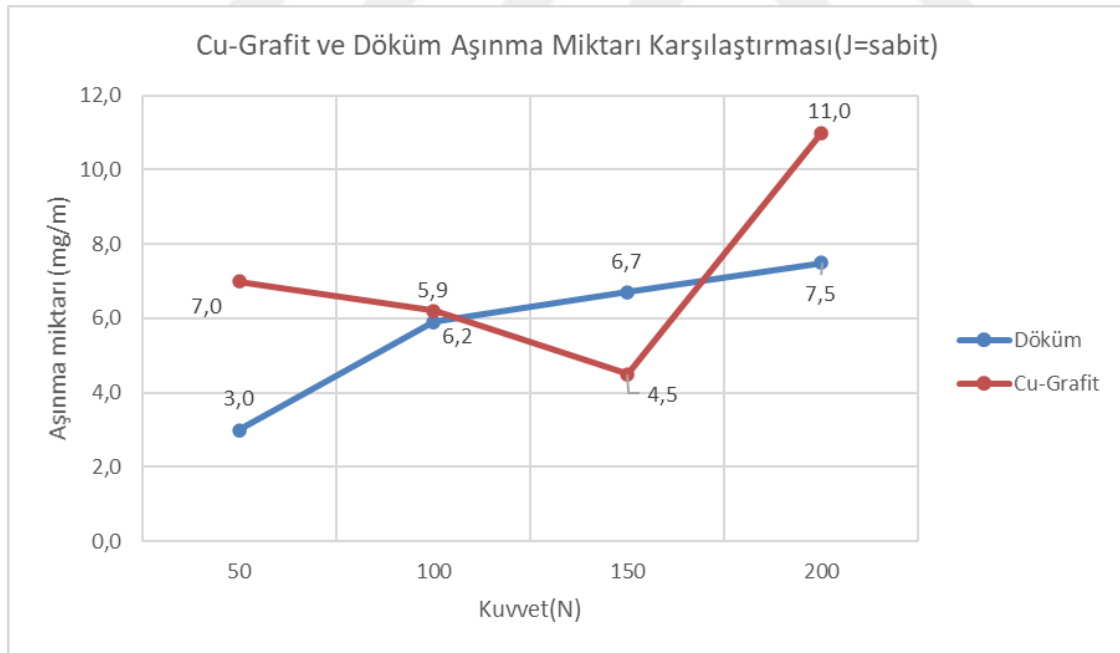
Şekil 5.13. Gerçek ölçüm ve pin-on plate testi karşılaştırması

5.5.3. Aşınma ölçümleri

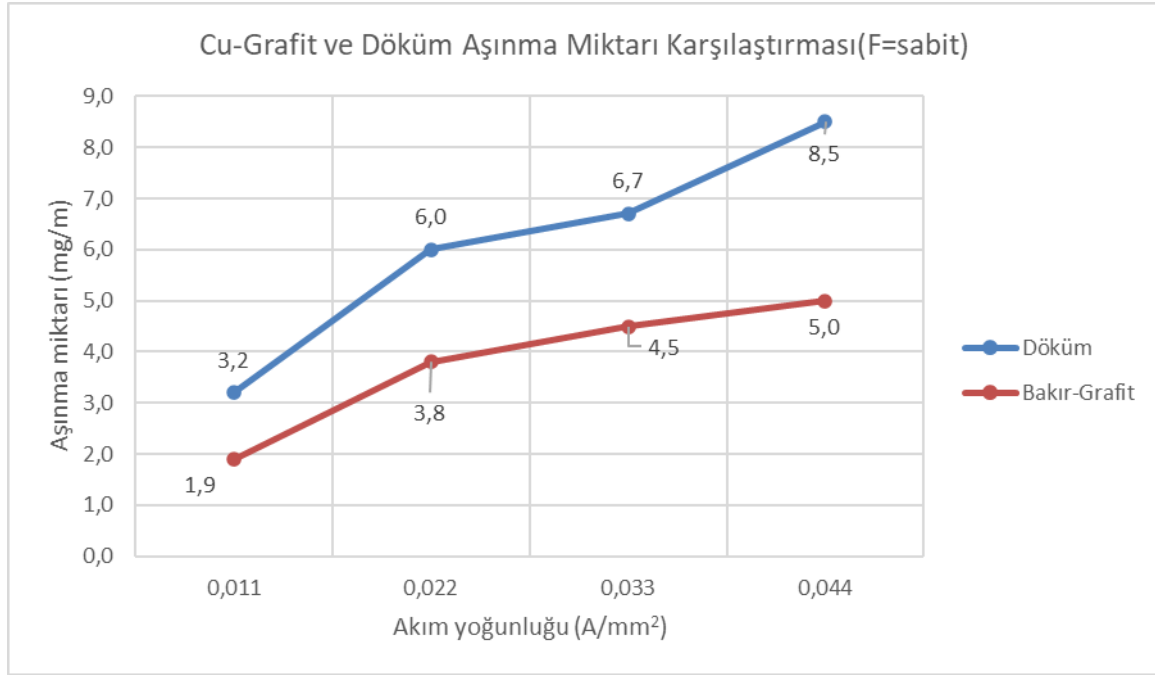
Çalışmanın bu kısmındaki amaç uygulanan yük ve elektrik akımının, tribolojik bakır-grafit çiftinin kuru kayma koşullarında küresel grafitli dökme demir malzemeye göre aşınma oranları bakımından etkisinin araştırılmasıdır.

Üçüncü ray-pabuç temas ara yüzeyindeki akım ve sürtünme etkisi nedeniyle pabuç üzerinde meydana gelecek aşınma miktarlarının sonuçları, toz metalurjisi ile üretilmiş pabuç numuneleri pin-on-plate ile deneysel olarak teste tabi tutulmak suretiyle ve mevcut durumla karşılaştırma sağlanarak değerlendirme yapılabilecektir. Bu inceleme için pin-on-plate ile aşınma oranları üzerinden bir değerlendirme yapılmıştır.

Akım yoğunluğunun sabit tutulması suretiyle kuvvetin değişiminin aşınma miktarı üzerindeki etki Şekil 5.14'te verilmektedir. Diğer bir durum olan kuvvetin sabit tutularak akım yoğunluğunun aşınma miktarı üzerindeki etkisi ise Şekil 5.15'de gösterilmektedir.



Şekil 5.14. Döküm ve Bakır-Grafit malzemeleri karşılaştırması (J=0,033 A/mm² sabit)



Şekil 5.15. Döküm ve Bakır-Grafit malzemeleri karşılaştırması (F=150 N sabit)

Burada baz değerler için ($150 \text{ N} \cdot 0.033 \text{ A/mm}^2$) bakır-grafit çiftinde daha az aşınma meydana geldiği anlaşılmıştır. Akım yoğunluğu arttıkça bakır grafit çiftinde nispeten daha az bir aşınma değeri oluşmaktadır. Pabuç üzerine uygulanan 50 ile 100 N'luk kuvvetler kıyaslandığında döküm malzemede aşınma miktarı artarken bakır grafit çiftinin aşınma miktarında düşüş meydana gelmiştir. Her iki malzeme türünde de pabuç üzerine uygulanan 200 N ile birlikte aşınma miktarındaki artışın da hızlandığı görülmektedir. Bunun yanı sıra akım yoğunluğu arttıkça malzeme meydana gelen aşınma miktarı da artmaktadır.

Burada, bakır grafit kompozit çifti ve dökme demir malzeme arasındaki aşınma davranışındaki farklılıkların nedeni, bu malzemelerin farklı fiziksel özellikleri ve yapılarıyla ilgili olduğu düşünülmektedir.

Bakır grafit kompozit çifti, bakırın yüksek iletkenliği ve grafitin yüksek aşınma direnci nedeniyle genellikle yüksek akım yoğunluğu ve yüksek sürtünme kuvvetleri altında aşınma direnci göstermektedir. Ancak, malzemede grafitin düşük sertliği nedeniyle yüksek kuvvetler altında hızla aşınmakta ve bu durum, 200 N kuvvetinde ani bir aşınma artışına neden olmaktadır.

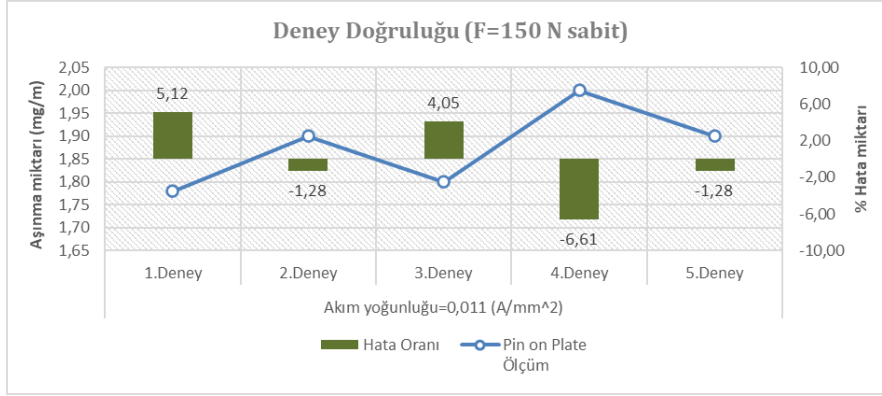
Dökme demir malzeme ise daha homojen ve sert bir yapıya olduğundan daha düzgün bir aşınma davranışı sergilemektedir. Bu malzemenin yüksek sertliği, yüksek sürtünme kuvvetleri altında daha az aşınmaya yol açabilir. Ancak, malzemenin daha düşük elektriksel iletkenliği nedeniyle elektrik akımı altında aşınma direnci daha az olmaktadır.

Sonuç olarak, bakır grafit kompozit çifti ve dökme demir malzeme arasındaki farklı aşınma davranışı, malzemelerin farklı fiziksel özelliklerine ve yapılarının homojenitesine bağlı olarak değişmektedir. Bakır grafit kompozit çifti, yüksek akım yoğunluğu ve yüksek sürtünme kuvvetleri altında genellikle daha yüksek aşınma direnci gösterirken, dökme demir malzeme daha yüksek sertlik ve düşük elektrik iletkenliği nedeniyle daha düzgün bir aşınma davranışı sergilemektedir.

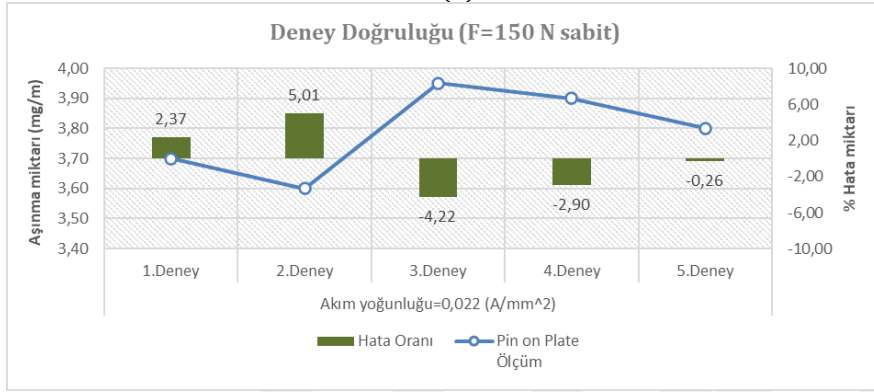
5.5.4. Deney kararlılığı

Tezin bu kısmında gerçekleştirilen pin-on-plate aşınma testlerinin ne kadar tutarlı olduğunun tespiti için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, %10 grafit içeren bakır-grafit numuneleri beş kez aşınma deneyine tabii tutulmak suretiyle gerçekleşen aşınma miktarlarıyla ilgili yapılan işlemlerin hassasiyeti noktasında kararlı olup olmadıkları durumu analiz edilmiştir. Buna göre baz değerlerimiz olan $0,033 \text{ A/mm}^2$ akım yoğunluğu sabit tutularak farklı kuvvet (50N, 100N, 150N ve 200N) değerlerindeki aşınma oranları ve % hata miktarları, 150N kuvvet değeri sabit tutularak farklı akım yoğunluğu ($0,011 \text{ A/mm}^2$, $0,022 \text{ A/mm}^2$, $0,033 \text{ A/mm}^2$ ve $0,044 \text{ A/mm}^2$) değerlerindeki aşınma değerleri ve % hata miktarları kıyaslanmıştır.

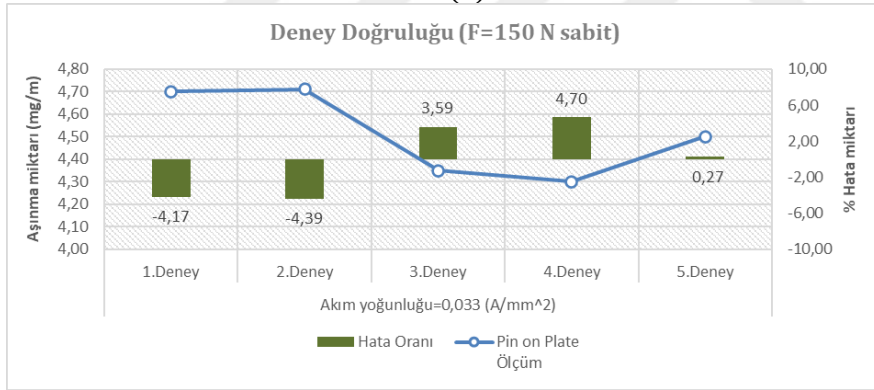
İlk aşamada uygulanan baskı kuvveti 150 N değerinde sabit tutulduğunda farklı akım yoğunlukları için gerçekleşen aşınma miktarları ve oluşan hata yüzdeleri Şekil 5.16'de verilmektedir. Buna göre hata oranı en fazla $0,011 \text{ A/mm}^2$ değerinde %6 oranında gerçekleşmiştir.



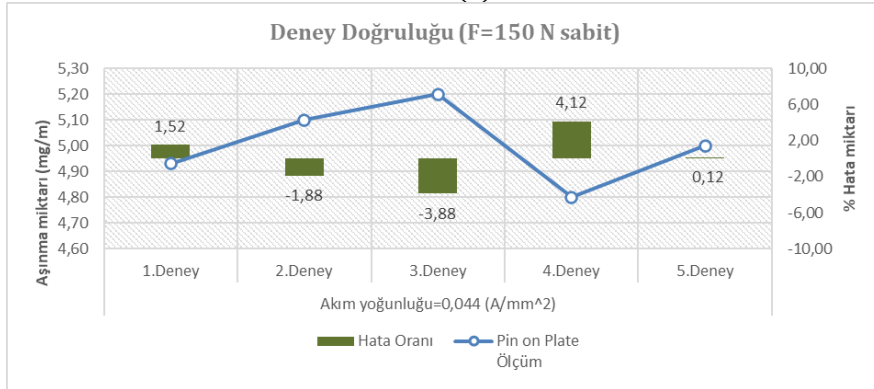
(a)



(b)



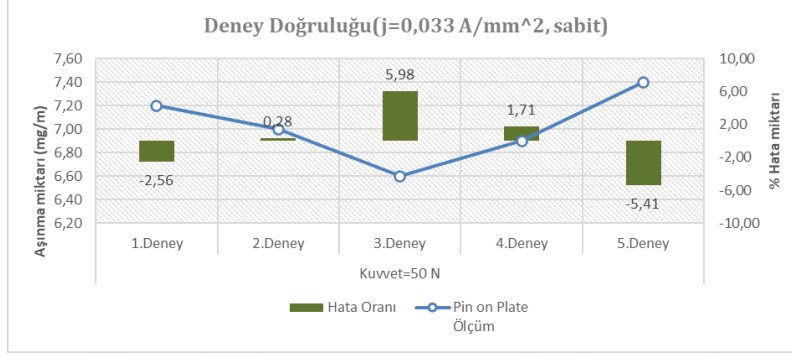
(c)



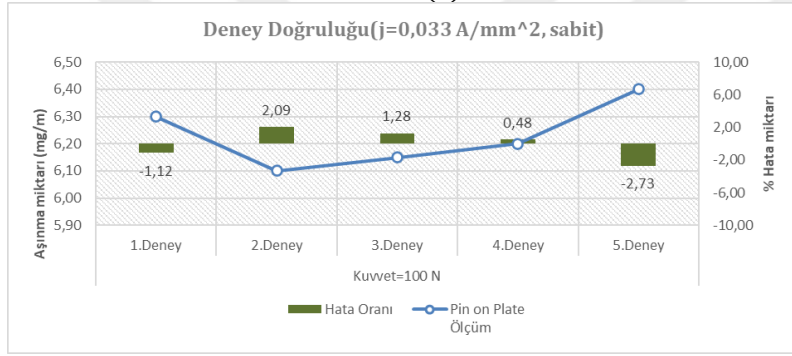
(d)

Şekil 5.16. Aşınma testi ölçü hata oranları (kuvvet sabit)(Akım yoğunlukları; a) 0,011 A/mm², b) 0,022 A/mm², c) 0,033 A/mm², d) 0,044 A/mm²)

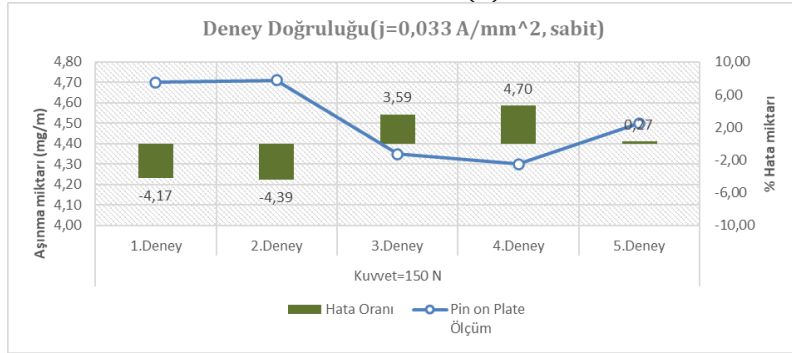
İkinci aşamada akım yoğunluğu değerimiz $0,033 \text{ A/mm}^2$ olarak sabit tutulduğunda farklı kuvvetler için gerçekleşen aşınma oranları ve oluşan hata yüzdeleri Şekil 5.17’de verilmektedir. Buna göre hata oranı en fazla 200 N değerinde %7 oranında gerçekleşmiştir.



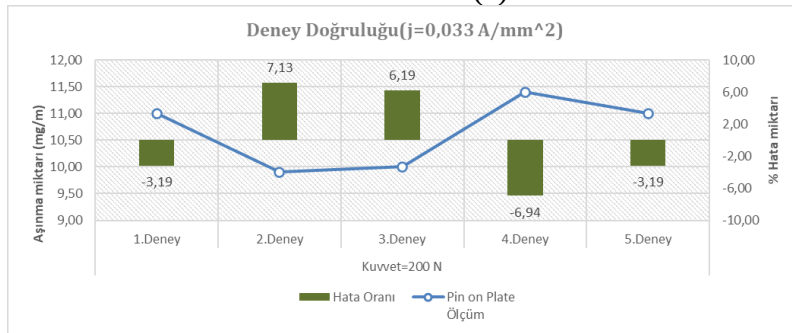
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.17. Aşınma testi ölçü hata oranları (akım yoğunluğu sabit) (Kuvvet; a) 50 N, b) 100 N, c) 150 N, d) 200 N)

6. ÜÇÜNCÜ RAY-KOLLEKTÖR PABUCUNUN SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZİ

Tez kapsamında bu bölümde, deneysel verilerden ortaya çıkan sonuçlar Comsol Sonlu Elemanlar Analizi Programı kullanılarak üçüncü ray ve pabuç ilişkisi tanımlanmış ve analizi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda kayma sırasında oluşacak senaryolar belirlenmiş program vasıtasıyla uygulanmış ve analiz modeli kurgulanmıştır. Buna göre program üzerinde aşağıdaki değişken parametre sonuçlarına tanımlanmıştır.

- Baskı kuvveti
- Hız
- Elektrik akımı

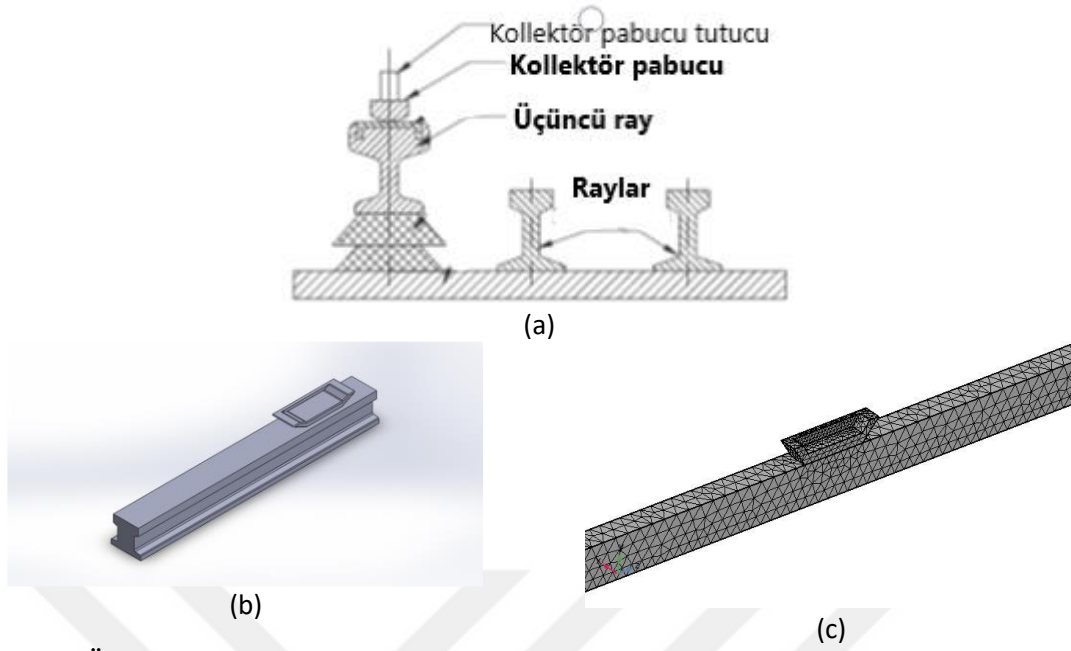
olarak belirlenen parametreler sonlu elemanlar analizi ile oluşturulan matematiksel ve fiziksel model program üzerinde oluşturulmuştur.

6.1. Kayma Temas Modeli

Üçüncü ray ve kollektör pabucunun kullanıldığı trenler, özellikle havai hatların kullanılmayacağı durumlar olan metro ağlarında genellikle tercih edilmektedir.

Şekil 6.1a, üçüncü ray-kollektör pabucu arasındaki tren çekiş sistemini göstermektedir. Burada, iletken üçüncü ray, iki hareketli raya paralel ve izolatörler üzerine monte edilmiştir. Kollektör pabucu üçüncü rayın üzerinde kaymakta ve bu sayede akımı toplamaktadır.

Şekil 6.1b ve Şekil 6.1c’de COMSOL sonlu elemanlar modelinde ise kollektör pabucu-üçüncü ray sürtünme çiftine dayanan bir kayan sürtünme teması kurgulanmıştır.



Şekil 6.1. Üçüncü ray-kollektör pabucu sistemi ve 3D sonlu elemanlar modeli

Programda termal bağlantı için ısı transfer modülü kullanılmıştır. Serbest bir tetrahedral ağ yapısıyla birlikte bağıl hareket için, toplayıcı pabucun merkez eksenine sabitlenmiş hareketli bir koordinat sistemi tanımlanmıştır. Sonrasında, üçüncü ray ile kollektör pabucu arasındaki nispi sürtünme hareketi gerçekleştirilmiştir. Problemi gerçekleştirilebilir hale getirmek için çeşitli varsayımlar yapılmıştır. Buna göre:

- Malzeme parametreleri her noktada izotropiktir.
- Işıma nedeniyle oluşan ısı kaybı ihmal edilmiştir.
- Eddy akımları nedeniyle oluşan güç kaybı ihmal edilmiştir.
- Yüzey kalıntıları nedeni ile oluşacak ısı oluşumu ihmal edilmiştir.
- Elektriksel arkların oluşmadığı varsayılmıştır.

Yapılan varsayımlar ve enerjinin korunumuna göre ısı transfer denklemi Eş.6.1. şeklinde oluşacaktır.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \cdot V \cdot \nabla T = Q + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (6.1)$$

Burada sınır şartları:

- Üçüncü ray bütün noktalarda sabit
- Başlangıç sıcaklığı 27 °C
- Pabuç üzerinden kuvvet uygulanmış

şeklindedir. Buna göre temas yüzeyinde oluşacak sınır şartı Eş.6.2.'de verilmiştir.

$$-r.(-k\nabla T) = \dot{Q}_F + \dot{Q}_J \quad (6.2)$$

Burada k: termal iletim katsayısı, $\dot{Q}_F$: sürtünme nedeniyle oluşacak ısı akısı, $\dot{Q}_J$: elektrik akımı sonucu oluşan ısı akısı, r: üçüncü ray uzunluğu, T: sıcaklık olarak ifade edilmektedir.

Sürtünme sonucu oluşacak ısıyı hesaplayacak olursak Eş.6.4. kullanılması gerekmektedir.

$$Q_F = E_{cf}\mu F_n V l \text{ (J)} \quad (6.3)$$

Burada E_{cf} : enerji korunum faktörü, μ :Sürtünme katsayısı, F_n : Normal kuvvet, l: Kayma mesafesi olarak ifade edilmektedir.

Buna göre sürtünme nedeni ile oluşacak ısı akısı ise Eş.6.4.'de verilmektedir.

$$\dot{Q}_F = \frac{E_{cf}\mu F_n V}{A_r} \text{ (Wm}^{-2}\text{)} \quad (6.4)$$

Burada, A_r : gerçek temas yüzeyi(m²) ve V: Hız(m/s) olacaktır.

Elektriksel akım nedeni ile oluşacak ısıнын hesaplanması için kullanılacak denklem Eş.6.5.'de verilmektedir.

$$Q_J = I^2 R_c t \quad (6.5)$$

Burada; I: elektrik akımı, R_c :Temas direnci, t:Kayma zamanı olarak ifade edilmektedir. Oluşacak ısı akısı ise Eş.6.6.'da verilmektedir.

$$\dot{Q}_J = \frac{I^2 R_c}{A_c} \quad (6.6)$$

Burada A_c :: elektriksel temas alanını ifade etmektedir.

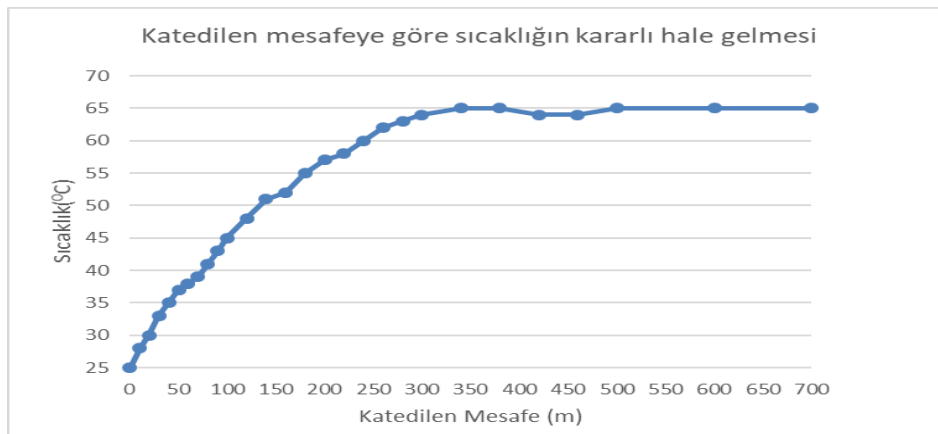
Tanımlanan üç değişken olan baskı kuvveti, hız ve elektrik akımı Çizelge 6.1’de belirtilen şekilde model içerisinde uygulanacaktır.

Çizelge 6.1. Uygulanan parametre değerleri

Elektrik Akımı	150A	300A	450A	600A
Kuvvet	50N	100N	150N	200N
Hız	4 m/s	8 m/s	12 m/s	16 m/s

Yukarıdaki bilgiler ışında COMSOL yazılımında malzeme özellikleri tanımlamaları ve fiziksel modellemesi yapılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Her kurgulanan model üzerinden oluşan hatalar dikkate alınarak model tekrar tekrar yenilenmiş ve en son halini almıştır. Yapısal, elektriksel ve termal analizin bir arada yapılması modeli oldukça karmaşık hale getirdiği ve çözüme ulaşmasını zorlaştırdığının tespiti ile model ayrı ayrı bölümler halinde kurgulanmış, hatanın nereden kaynaklanabileceği üzerinde birçok farklı tasarımlar üzerinde ayrı ayrı çalışılmıştır. Ayrıca, model çizimleri aynı analiz programı içerisindeki modül üzerinde yapılmıştır.

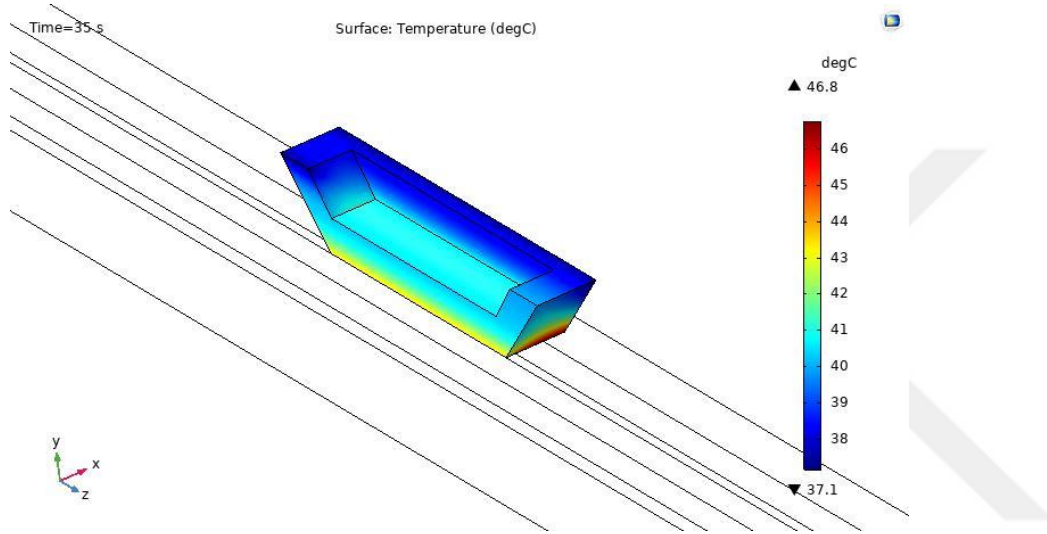
Kayma mesafesi olarak pin-on-plate testinde yapıldığı üzere 500 m seçilmiştir. Yapılan ön sonlu elemanlar analizi çalışmalarında ve pin-on-plate testinden elde edilen sonuçlara göre özellikle katedilen mesafe 300 m’yi geçtikten sonra sıcaklık belirli düzeyde kararlı hale gelmesi nedeniyle kayma mesafesinin 500 m olarak seçilmiştir (Şekil 6.2).



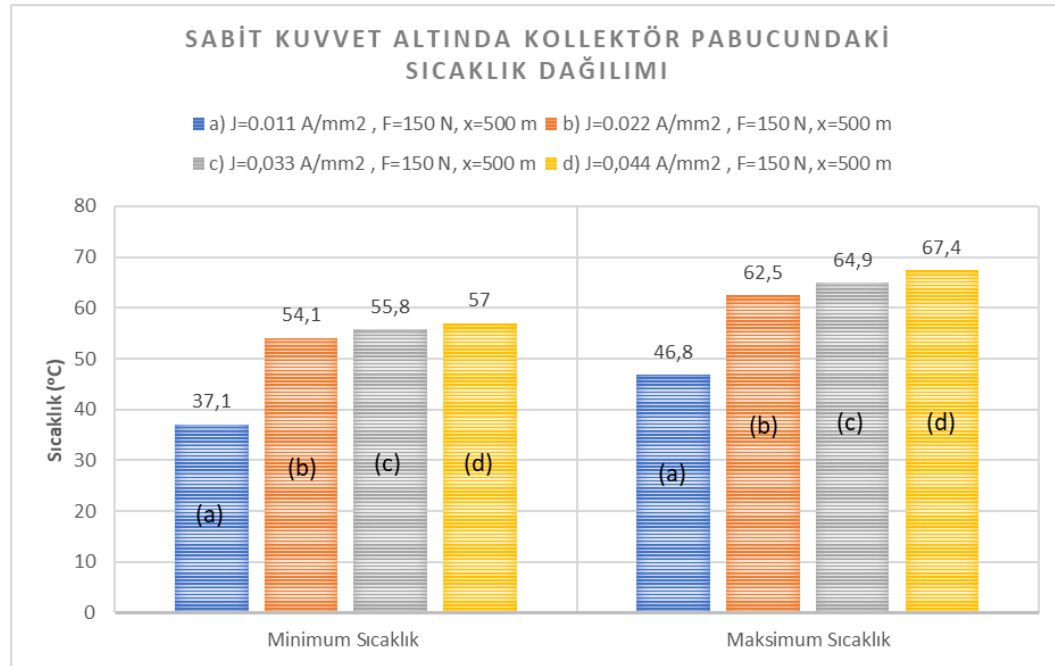
Şekil 6.2. Katedilen mesafeye göre sıcaklık değişimi ($F=150$ N ve $J=0,033$ A/mm²)

6.2. Analiz Sonucu Oluşan Sıcaklık Değerinin İrdelenmesi

İlk aşamada model üzerinde 500 m’lik kayma mesafesi dikkate alınarak 150 N’luk sabit kuvvet altında, akım yoğunluğunun farklı değerleri için kollektör pabucu üzerindeki sıcaklık dağılımı ortaya çıkarılmıştır. Örnek olarak 0,011 A/mm² akım yoğunluğundaki sıcaklık dağılımı Şekil 6.3’de gösterilmektedir. Şekil 6.4’de ise her bir farklı akım yoğunlukları durumunda maksimum ve minimum sıcaklık dağılımları verilmektedir.

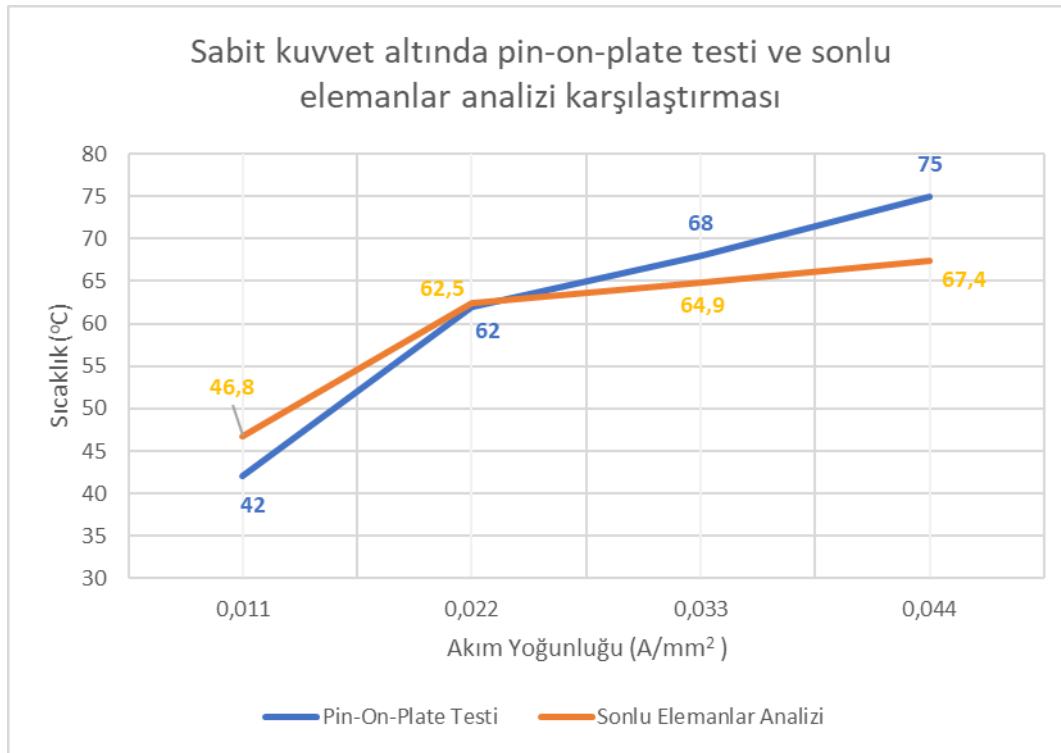


Şekil 6.3. Analiz sonucu ortaya çıkan sıcaklık dağılımı (kuvvet sabit)



Şekil 6.4. Sabit kuvvet altında kollektör pabucundaki sıcaklık dağılımı

Sabit kuvvet (150 N) altında ve 500 m sonunda (Şekil 6.4) pabuç üzerindeki sıcaklık dağılımı, 0.011 A/mm² akım yoğunluğunda yaklaşık 37 ila 47°C aralığında, 56 - 65 °C aralığında değişmiştir. 0,022 A/mm², 0,033 A/mm² için 55 - 65 °C ve 0,044 A/mm² için 57 - 67°C aralığında sıcaklık dağılımları oluşmuştur. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre maksimum sıcaklıkların temas yüzeylerinde görüldüğü görülmektedir. 500 m'lik kaymadan sonra yüzeyde oluşan sıcaklıklar 46,9, 62,5, 64,9 ve 67,4 °C olarak hesaplanmıştır. Bu sıcaklıklar pin-on-plate deneyleri ile karşılaştırıldığında (Şekil 6.5), farklı akım yoğunluğu parametreleri için sırasıyla %10, %0,8, %4,5 ve %10 farklılık göstermiştir.



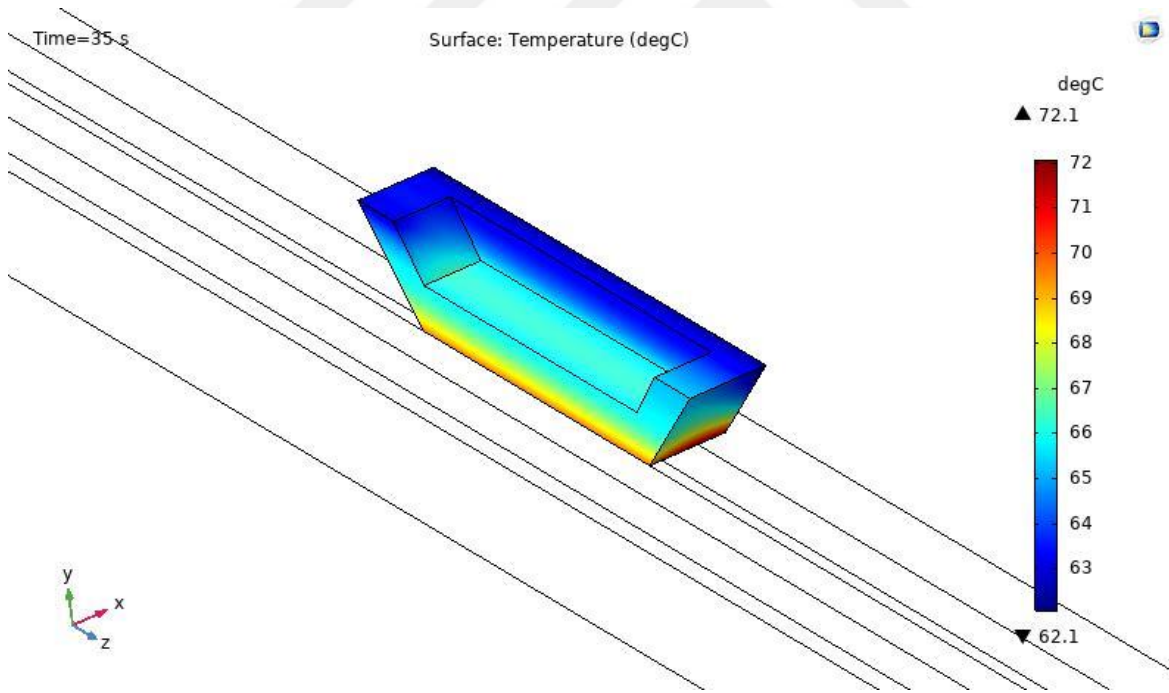
Şekil 6.5. Sabit kuvvet altında pin-on-plate testi ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırması

Elektrik akımı varlığında temas sıcaklığı önemli ölçüde artmakta ve testlerde sürtünme çiftinin ara yüzeyinde kıvılcımlar görülebilmektedir. Temas sıcaklığındaki hızlı bir artış Joule ısısı, sürtünme ısısı ve oluşan arkın birleşiminden kaynaklanmaktadır. Burada elektrik kayma teması durumunda, ultra ince bir oksit kaplama oluşturmak sürtünme katsayısını düşürmek için kritik öneme sahiptir [87]. Sonlu elemanlar analizi modelinde oksidasyon, aşındırıcı döküntüler ve elektrik arkları gibi tüm parametreler göz ardı edilmeden tanımlanabilirse gerçek çalışma koşullarında sıcaklık artışı ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarının oldukça yakınsak olabileceği değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, elektrik

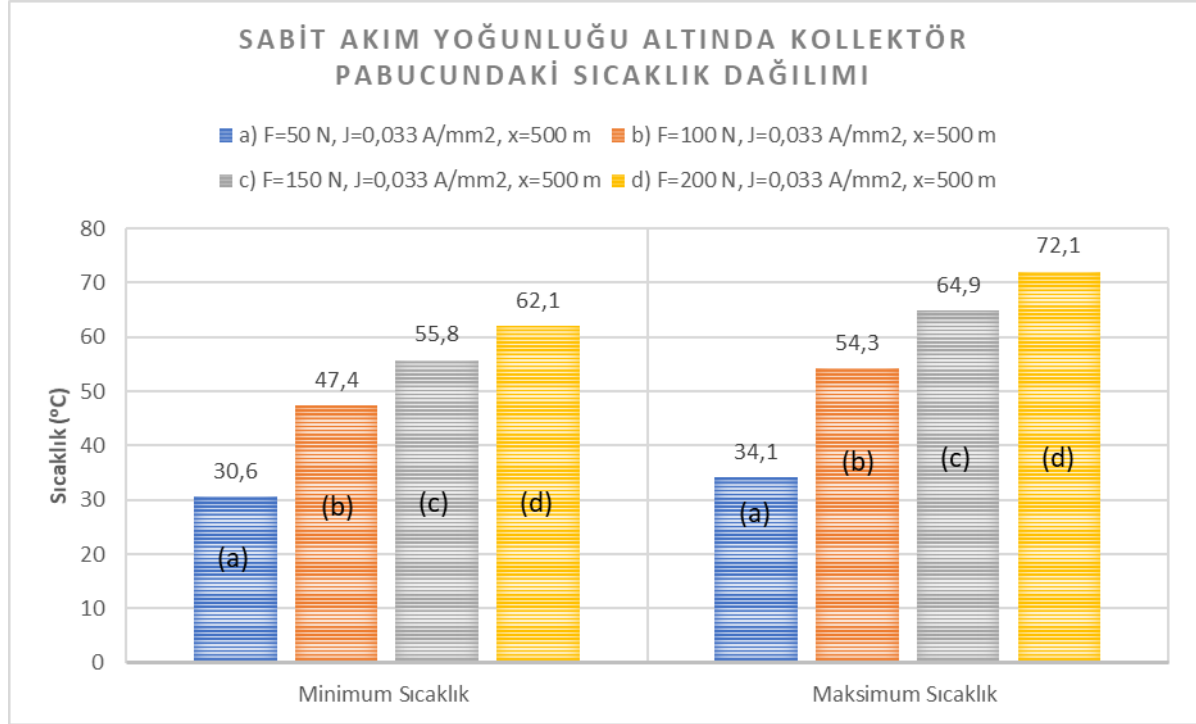
akımı ve sürtünmenin aşınma hacmi kayıpları üzerindeki etkisini kontrol etmede sonlu elemanlar analizi temel olabilecektir [13].

Sonuçlar kayma mesafesi ve normal kuvvet sabit olduğunda artan elektrik akımı ile maksimum sıcaklığın arttığını ortaya koymaktadır. Sıcaklık dağılımı, elektrik temas alanına daha yakın olan daha yüksek sıcaklık gradyanları ile temas bölgesi çevresinde düşen bir modelde genişlemektedir.

İkinci aşamada model üzerinde 500 m'lik kayma mesafesi dikkate alınarak $0,033 \text{ A/mm}^2$ sabit akım yoğunluğu altında, uygulanan baskı kuvvetinin farklı değerleri için kollektör pabucu üzerindeki sıcaklık dağılımı ortaya çıkarılmıştır. Örnek olarak 200 N kuvvet değeri için sıcaklık dağılımı Şekil 6.6'de gösterilmektedir. Şekil 6.7'da ise her bir farklı kuvvet durumunda maksimum ve minimum sıcaklık dağılımları verilmektedir.



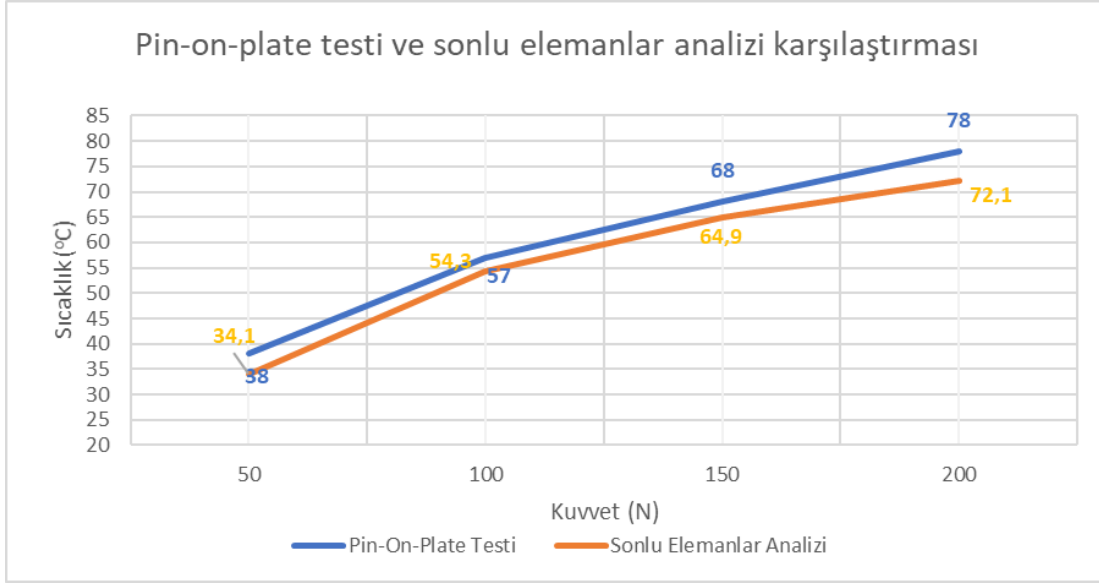
Şekil 6.6. Analiz sonucu ortaya çıkan sıcaklık dağılımı (akım yoğunluğu sabit)



Şekil 6.7. Sabit akım yoğunluğu altında kollektör pabucundaki sıcaklık dağılımı

Sabit akım yoğunluğunda ($0,033\text{ A/mm}^2$) pabuç üzerindeki sıcaklık dağılımı 500 m sonunda (Şekil 6.7) 50 N için 30-34°C, 100 N için 47-54°C aralığında dalgalanmıştır. 150 N için 55-65°C ve 200 N kuvvet uygulandıktan sonra ise 62-72°C aralığında hesaplanmıştır. 500 m kayma sonucunda kollektör pabucu yüzeyinde oluşan sıcaklıklar 34,1, 54,3, 64,9 ve 72,1°C olarak hesaplanmıştır.

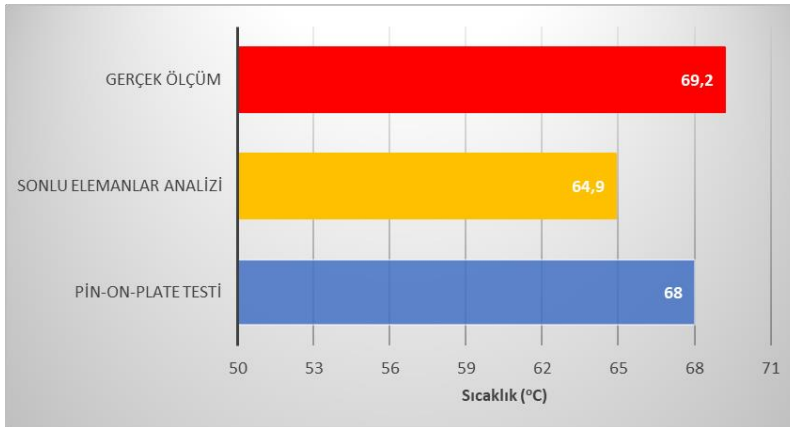
Analiz sonucu ortaya çıkan sıcaklık değerleri pin-on-plate testiyle kıyaslandığında (Şekil 6.8), tüm değerler için testlerden elde edilen sıcaklıkların sonlu elemanlar analizinden bulunanlardan biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. Oluşan maksimum sıcaklık değeri, pin-on plate tekniği ve sonlu elemanlar analizi bulguları özelinde karşılaştırıldığında %10, %4,7, %4,5 ve %7,5 olarak farklılık meydana geldiği anlaşılmıştır.



Şekil 6.8. Sabit akım yoğunluğu altında pin-on-plate testi ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırması

Üçüncü aşamada, daha önce Şekil 5.13’de verilen pin-on-plate testi ve gerçek ölçüm sonuçlarına, sonlu elemanlar analizi yöntemiyle elde edilen sıcaklık verisi eklenerek bir kıyaslama gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.9’de, mevcut metro trenleri üzerinde bulunan kolektör pabucu üzerinden alınan maksimum sıcaklık ölçümü, sonlu elemanlar analizi ve 150 N ve 0,033 A/mm²’de gerçekleştirilen pin-on-plate testinin karşılaştırması bulunmaktadır. Maksimum seviyede oluşan sıcaklıkların nispeten benzer olduğu söylenebilmektedir. Bu açıdan, sonlu elemanlar analizi tahmini ve kurgusunun yeterli olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 6.9. Üç yöntemde elde edilen sıcaklık karşılaştırması

Bir metro trenine elektrik akımı sağlarken kollektör pabucunun temas yüzeyindeki sıcaklık artışı, üçüncü ray ile pabuç arasındaki sürtünmeyi ve aşınma özelliklerini etkileyen önemli bir unsurdur. Akım yoğunluğu ve kuvvet altındaki aşınma davranışı, sıcaklık değişimleri tarafından etkilenebilir. Bu nedenle, akım yoğunluğu ve kuvvet altında aşınma davranışını değerlendirirken sıcaklığın da dikkate alınması önemli olduğu değerlendirilmiştir.

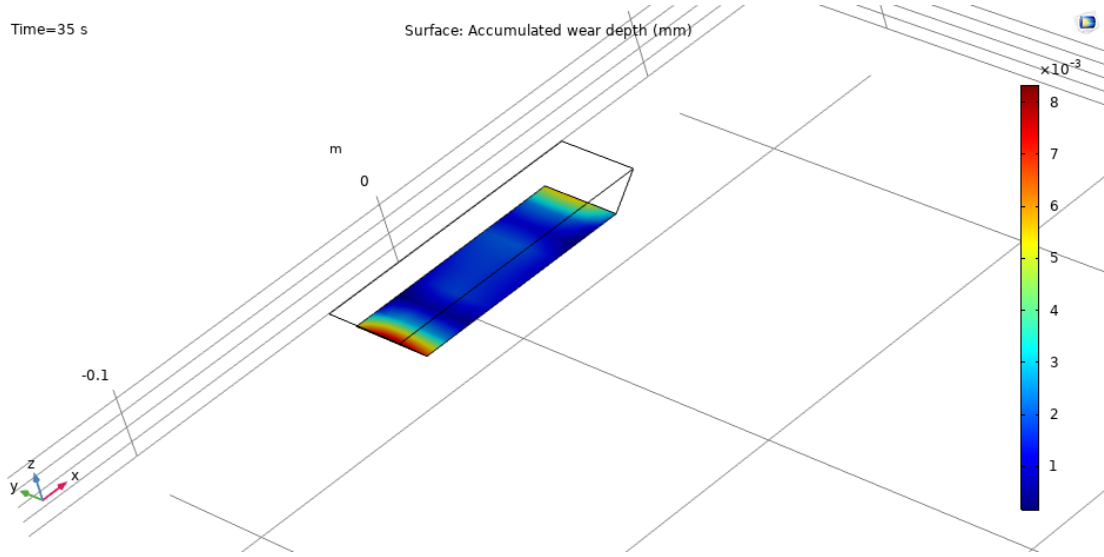
Muhtemel tribo-malzemeler için sürtünme ve aşınma testi tasarlarken ve bu tür testlerin sonuçlarını değerlendirirken temas sıcaklıklarını tahmin etme yeteneği oldukça önemlidir. Sonlu elemanlar analizi gerçek çalışma koşullarında sıcaklık artışının kontrolünün değerlendirmesi için önemli bir yaklaşım olarak görülmektedir. Ayrıca elektrik akımı ile birlikte sürtünme ve aşınma sürecindeki aşınma hacmi kayıplarının yönetimi için faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

6.3. Analiz Sonucu Oluşan Aşınmanın İrdelenmesi

Bakır-grafit çifti, elektrik motorları ve jeneratörler gibi özellikle elektrikli sürgülü temas uygulamalarında kullanılan önemli bir tribolojik malzeme kombinasyonudur. Tezin bu kısmındaki amaç uygulanan yük ve elektrik akımının, tribolojik bakır-grafit çiftinin kuru kayma koşullarında küresel grafitli dökme demir malzemeye göre aşınma miktarları bakımından etkisinin araştırılmasıdır.

Üçüncü ray-pabuç temas ara yüzeyindeki akım ve sürtünme etkisi nedeniyle pabuç üzerinde meydana gelecek aşınma miktarlarının sonuçları, toz metalurjisi ile üretilmiş pabuç numuneleri pin-on-plate ile testleri ve mevcut durumla karşılaştırma sağlanarak değerlendirme yapılabilecektir.

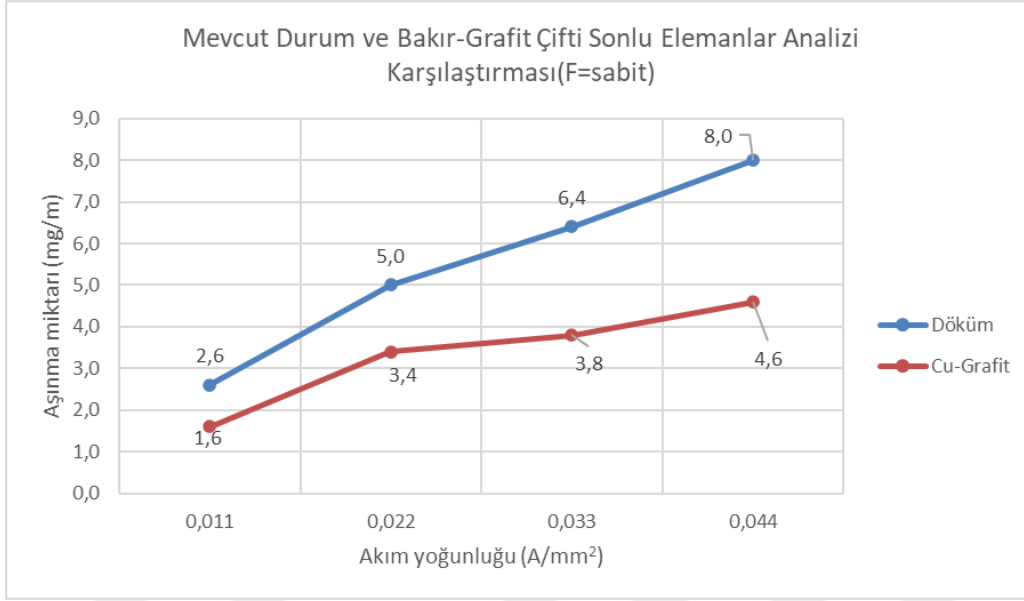
İlk aşamada model üzerinde 500 m'lik kayma mesafesi dikkate alınarak 150 N'luk sabit kuvvet altında, akım yoğunluğunun farklı değerleri için kollektör pabucu üzerindeki kümülatif aşınma derinlikleri ortaya çıkarılmıştır. Örnek olarak 0,011 A/mm² akım yoğunluğundaki aşınma derinliği dağılımı Şekil 6.10'da gösterilmektedir.



Şekil 6.10. Analiz sonucu ortaya çıkan aşınma (kuvvet sabit)

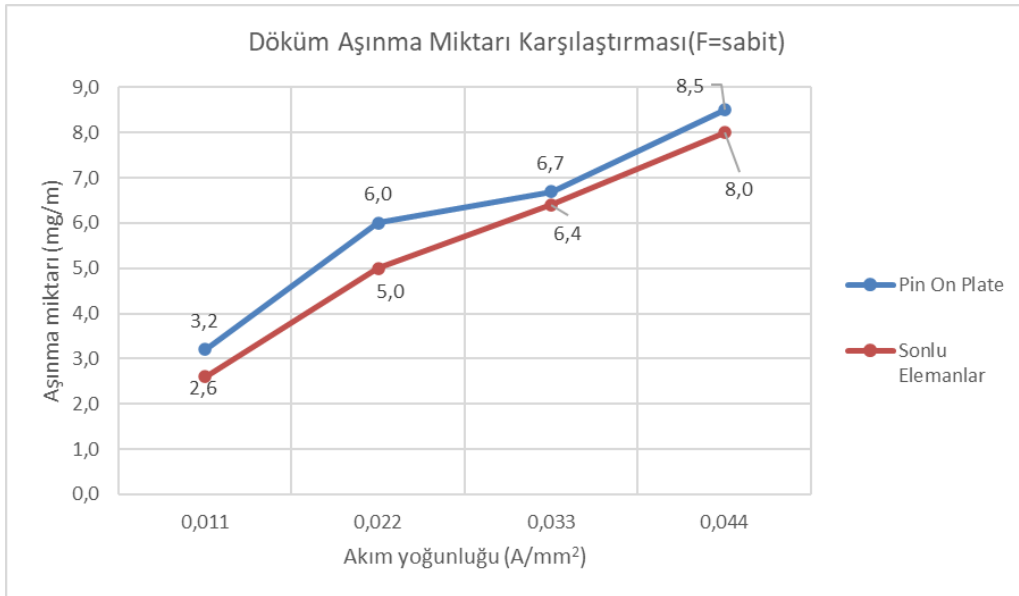
Gerçekleştirilen analiz, diğer üç farklı akım yoğunlukları değerleri için de oluşturulmuştur. Analizler mevcut malzeme olan döküm ve bu çalışmadaki yeni malzeme olan bakır-grafit çifti için ayrı ayrı kurgulanmış ve pin-on-plate testinden elde edilen değerlerle kıyaslanmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen kümülatif aşınma derinliği değerleri pin-on-plate testinden elde edilen verilerle karşılaştırılabilmesi için “mg/m” cinsine dönüştürülmüştür.

Şekil 6.11’de mevcut durumda kullanılan döküm malzeme ile bakır-grafit çiftinin sabit kuvvet altında sonlu elemanlar analizi yöntemiyle elde edilen aşınma miktarlarındaki karşılaştırma grafiği verilmektedir. Buradan elde edilen sonuçlara göre bakır grafit çiftinin mevcut duruma göre daha az miktarda aşındığı görülmektedir. Akım yoğunluğu arttıkça döküm malzemenin aşınma miktarı giderek artmakta ve yaklaşık %40 seviyelerine varmaktadır.

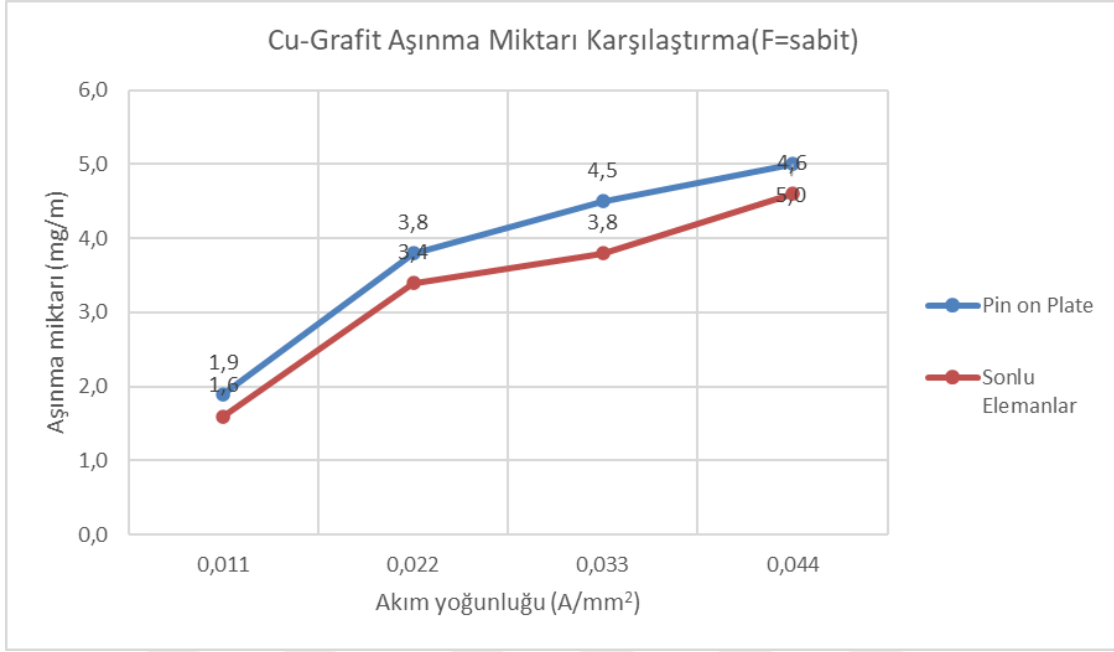


Şekil 6.11. Döküm ve bakır-grafit çiftinin sonlu elemanlar analizi aşınma miktarı karşılaştırması (kuvvet sabit)

Şekil 6.12 ve Şekil 6.13 ‘de mevcutta kullanılan döküm malzemesi ile bakır grafit çifti için sonlu elemanlar analizi ve pin-on-plate testinden elde edilen değerlerin karşılaştırılmış grafikleri verilmektedir.



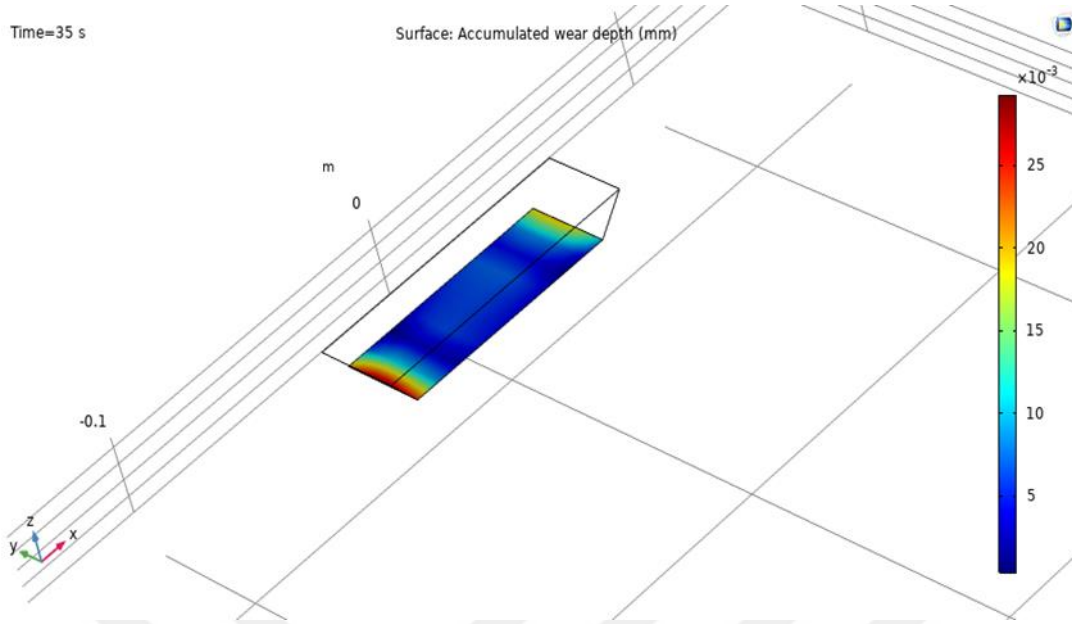
Şekil 6.12. Döküm malzeme için aşınma miktarı karşılaştırması (kuvvet sabit)



Şekil 6.13. Bakır-grafit çifti için aşınma miktarı karşılaştırması (kuvvet sabit)

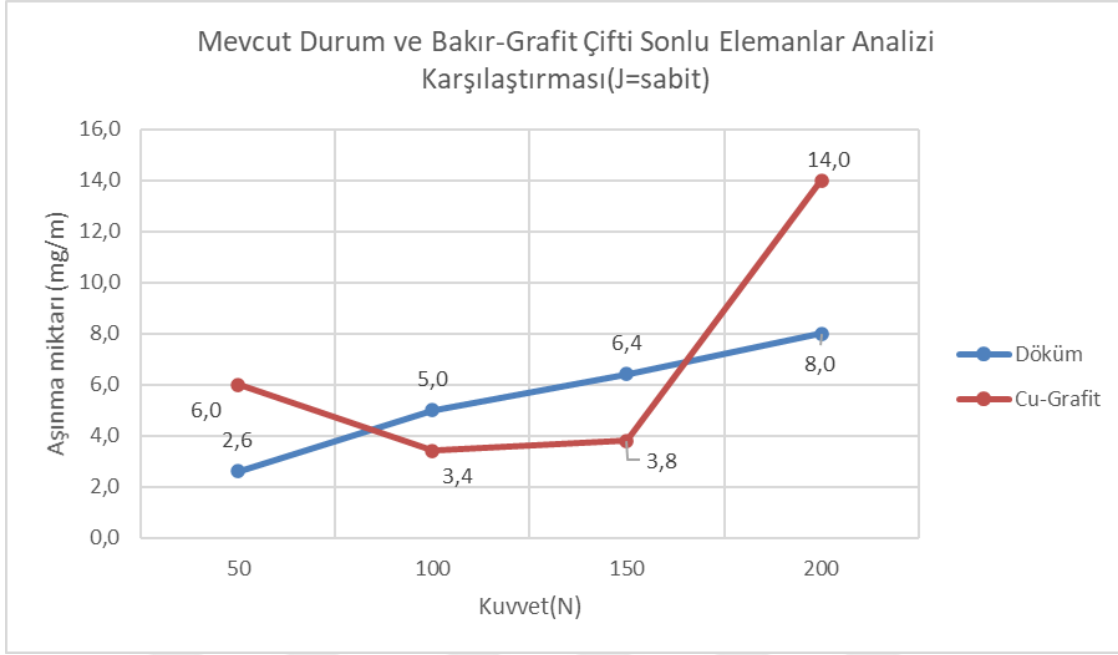
Buradan elde edilen sonuçlara göre sonlu elemanlar analizi ile pin-on-plate testi sonrası oluşan aşınma miktarları birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen aşınma miktarları pin-on-plate testine göre her iki durum (döküm ve bakır grafit çifti) için daha düşük olduğu, her bir parametre için oluşan veriler arasındaki farkın ortalama %4 ila %12 aralığında değiştiği anlaşılmıştır. Özetle, gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi ile kurgulanan modelin, pin-on-plate testlerindeki sonuçlara oldukça yakın değerler hesapladığı anlaşılmıştır.

Sonraki aşamada model üzerinde 500 m'lik kayma mesafesi dikkate alınarak 0,033 A/mm² sabit akım yoğunluğu altında baskı kuvvetinin farklı değerleri için kollektör pabucu üzerindeki kümülatif aşınma derinlikleri ortaya çıkarılmıştır. Örnek olarak 50 N baskı kuvvetindeki aşınma derinliği dağılımı Şekil 6.14'de gösterilmektedir. Gerçekleştirilen analiz, diğer üç farklı kuvvet değerleri için de oluşturulmuştur. İlk aşamada olduğu gibi analizler mevcut malzeme olan döküm ve yeni malzeme olan bakır-grafit çifti için ayrı ayrı kurgulanmış ve pin-on-plate testinden elde edilen değerlerle kıyaslanmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen kümülatif aşınma derinliği değerleri pin-on-plate testinden elde edilen verilerle karşılaştırılabilmesi için “mg/m” cinsine dönüştürülmüştür.



Şekil 6.14. Analiz sonucu ortaya çıkan aşınma (akım yoğunluğu sabit)

Şekil 6.15’de mevcut durumda kullanılan döküm malzeme ile bakır-grafit çiftinin sabit akım yoğunluğu altında sonlu elemanlar analizi yöntemiyle elde edilen aşınma miktarlarındaki karşılaştırma grafiği verilmektedir. Buradan elde edilen sonuçlara göre bakır grafit çiftindeki aşınma miktarı kuvvetin özellikle 200 N değerine gelmesiyle birlikte hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Akım yoğunluğunun $0,033 \text{ A/mm}^2$ değerinde sabit tutulurken, kollektör pabucu ve üçüncü ray arasındaki ilk temasın 50 N değeriyle birlikte zayıf olması nedeniyle bakır-grafit çiftine aşınma miktarının döküm malzemesine kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Uygulanan baskı kuvveti arttıkça döküm malzemenin aşınma miktarı doğrusal bir eğim gösterirken bakır-grafit çifti için bu durum 150 N değerine kadar düşüş eğiliminde, 200 N değeriyle birlikte hızlı bir artış göstermektedir.

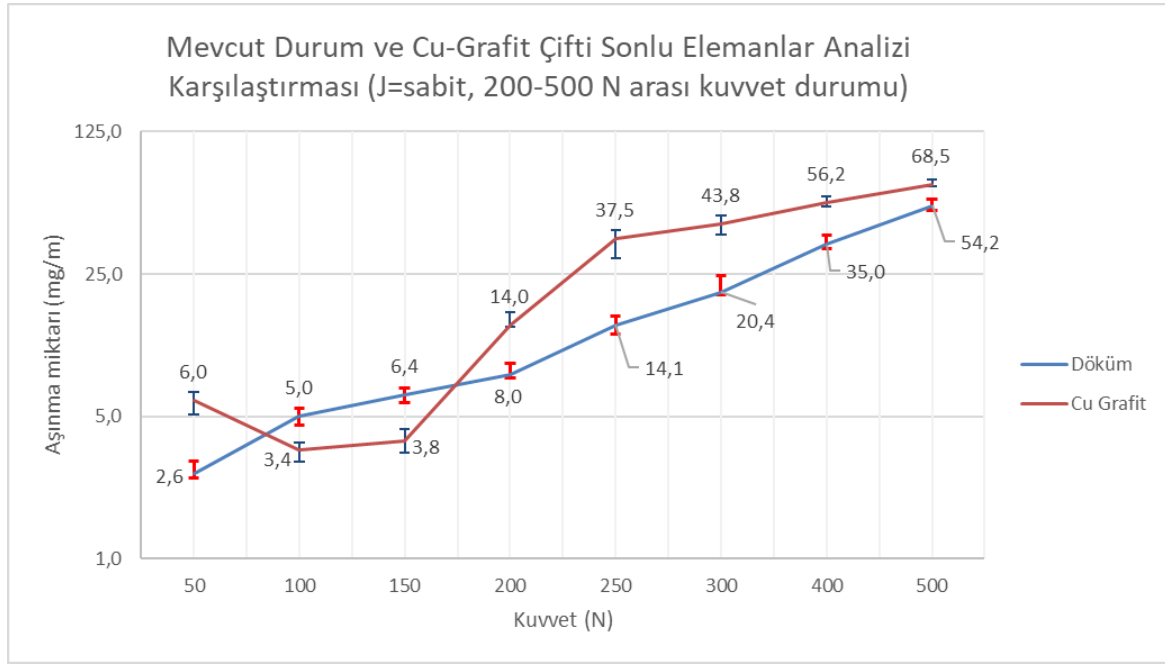


Şekil 6.15. Döküm ve bakır-grafit çiftinin sonlu elemanlar analizi aşınma miktarı karşılaştırması (akım yoğunluğu sabit)

Şekil 6.15’de 150 N kuvvet durumunda bakır-grafit çiftindeki meydana gelen aşınma miktarındaki düşüşün, benzer şekilde döküm malzeme için uygulanacak yüksek kuvvet değerlerinde gerçekleşip gerçekleşmeyeceğinin tespiti için sonlu elemanlar analizinde uygulanan kuvvet değerleri artırılmış ve analiz tekrarlanmıştır.

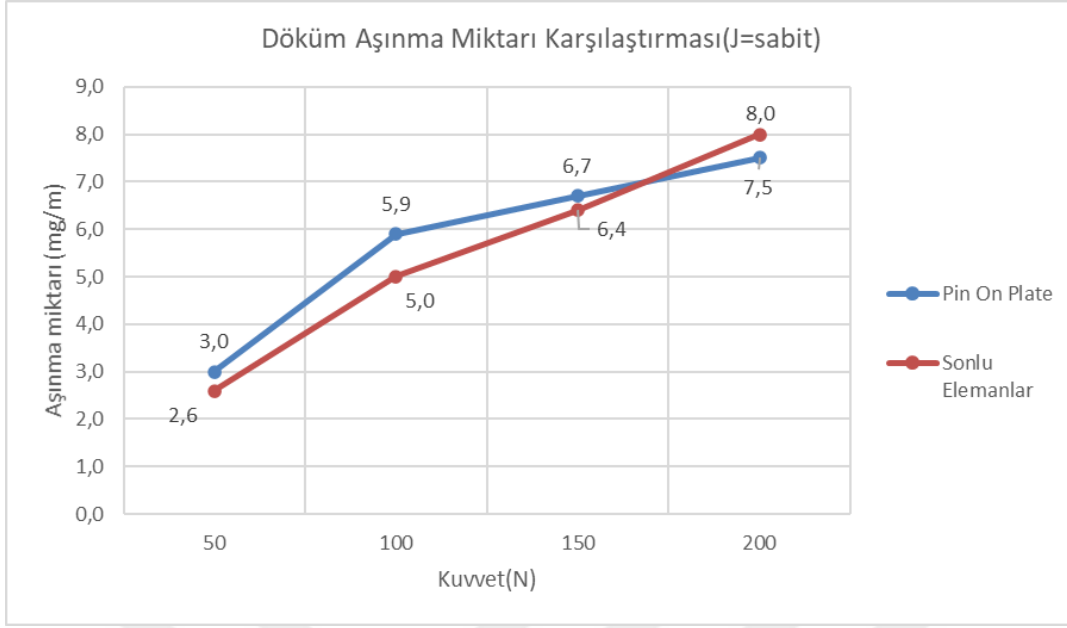
Şekil 6.16’da, 200 N sonrası uygulanan kuvvetler için de her iki malzeme türü aşınma miktarları karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Burada, 200 N üzerindeki değerlerde hem döküm hem kompozit malzeme için bir artış olduğu görülmektedir. 200 N değerine kadar olan kısımdaki özellikle bakır-grafit çiftinde yaşanan düşüş sonucu oluşan aşınma davranışındaki farklılığın nedeni, bu malzemelerin farklı yapıya sahip olmalarından kaynaklanabilmektedir. Zira dökme demir, kristalin bir yapıya sahiptir ve sertliği yüksektir. Bakır-grafit kompozit ise, grafit parçacıklarının bakır matrisinde homojen olarak dağıldığı bir yapıya sahiptir ve daha düşük sertliğe sahiptir. Dökme demir, yüksek sertliği nedeniyle, düşük kuvvet değerleri altında aşınmaya daha az eğilimli olabileceğinin yanı sıra bakır-grafit kompozit çifti daha düşük sertliğe sahip olduğu için, düşük kuvvet değerleri altında daha yüksek aşınmaya maruz kalabileceği değerlendirilmiştir. Bakır grafitin daha iyi bir iletken özelliği göstermesi, aşınma miktarı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olabilecektir. Özetle, bu durum iki madde ile açıklanması muhtemeldir. Birinci olarak malzemenin mikro yapısındaki farklılıkları, yani dökme demirin sferoid grafit yapıya sahip olması ve bakır-

grafit kompozitinin ise grafit parçacıklarını bakır matrise gömülü olarak içermesi gibi farklılıklar malzemelerin aşınma özelliklerinde farklılıklara neden olmaktadır. İkincisi ise, bakır-grafit kompozit çifti, yüksek akım yoğunluğu ve sürtünme kuvvetleri altında, bakırın iyi iletkenliği ve grafitin yüksek aşınma direnci nedeniyle genellikle iyi bir aşınma direnci göstermektedir. Ancak, grafit malzemenin düşük sertliği nedeniyle yüksek kuvvetler altında hızlı bir şekilde aşınmaktadır.

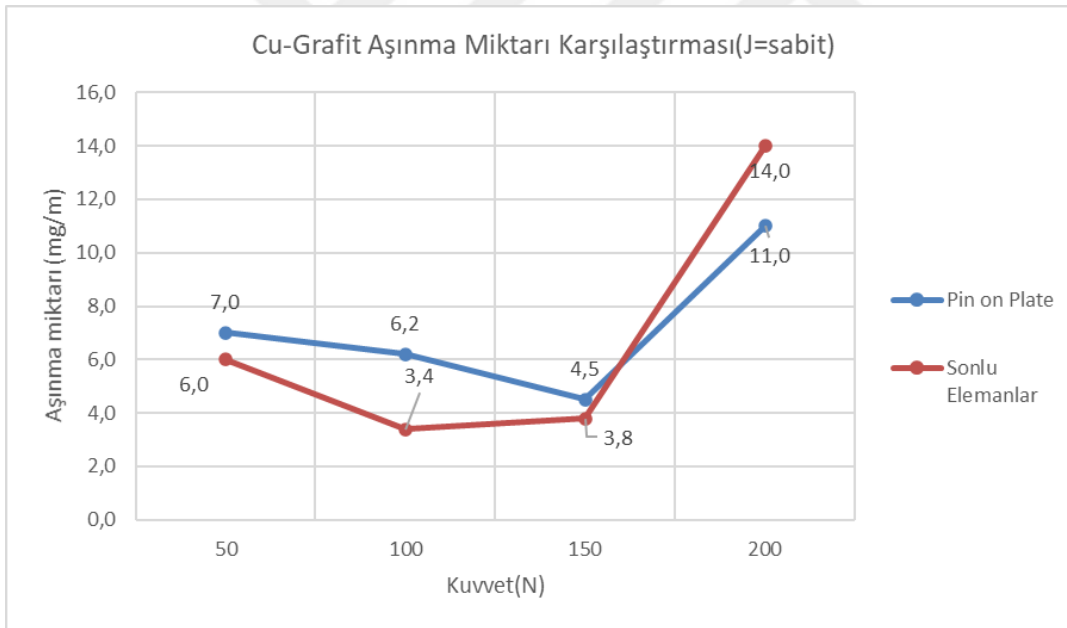


Şekil 6.16. Döküm ve bakır-grafit çiftinin sonlu elemanlar analizi aşınma miktarı karşılaştırması (akım yoğunluğu sabit, 200-500 N kuvvet uygulanması durumu)

Şekil 6.17 ve Şekil 6.18’de mevcutta kullanılan döküm malzemesi ile bakır grafit çifti için sonlu elemanlar analizi ve pin-on-plate testinden elde edilen değerlerin karşılaştırılmış grafikleri verilmektedir. Buradan elde edilen sonuçlara göre, sonlu elemanlar analizi ile pin-on-plate testi sonrası oluşan aşınma miktarları birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 6.17. Döküm malzeme için aşınma miktarı karşılaştırması (akım yoğunluğu sabit)



Şekil 6.18. Bakır-grafit çifti için aşınma miktarı karşılaştırması (akım yoğunluğu sabit)

Sonlu elemanlar analizinden elde edilen aşınma miktarları pin-on-plate testine göre her bir parametre için oluşan veriler arasındaki fark, bakır grafit çifti için ortalama %20 civarında iken, döküm malzeme için bu fark ortalama %6 olarak gerçekleşmiştir. Özetle, gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi ile kurgulanan modelin, döküm malzemesi için pin-on-plate testlerindeki sonuçlara oldukça yakın değerler hesapladığı, buna karşın bakır-grafit

çifti için özellikle kuvvetin değiştiği durumlarda yapılan sonlu elemanlar hesaplamasının gerçek değerlerden uzaklaştığı görülmüştür.

6.4. Çözüm Ağının (Mesh) Analize Olan Etkisi (Hassasiyet Analizi)

Sonlu elemanlar analizinin en önemli sonuçlarından bir tanesi gerçekleştirilen tahminlerin ne kadar doğru olduğudur. Yapılan analiz çalışmaları sonucunun deneysel verilere ne kadar yakınsak olduğu, gerçekleştirilen analizin eleman boyutuyla çok yakın bir ilişkisi bulunmaktadır. Bu nedenle sonlu elemanlar analizlerindeki yapılan varsayımlar ve sınır koşulları gerçek hayattaki duruma ne kadar yakınsa o bağlamda sonuçlarda yakın olmaktadır.

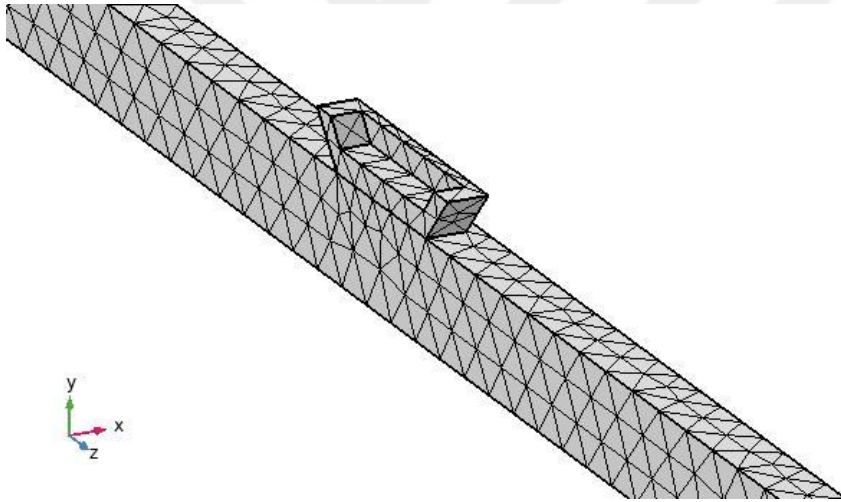
Sonlu elemanlar analizi yapılırken gerçekleştirilen modelleme sırasındaki sınır koşulları, başlangıç şartları, varsayımlar ve geometriyi temsil eden eleman boyut ve bilgileri simülasyon hassasiyetine doğrudan etki etmektedir [88]. Konuyla ilgili yapılan çalışmalar dikkate alındığında kurgulanan parametrelerin gerçekleştirilen analiz hassasiyetine etkisinin oldukça fazla olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen simülasyon ve analizlerde özellikle eleman boyutunun etkileri irdelenmiştir [89], [90].

Tezin bu kısmında sonlu elemanlar analizinin hangi hassasiyette olduğunun belirlenebilmesi, analiz sonuçlarının ne kadar yakınsadığının gösterilmesi hakkında bilgi verilecektir.

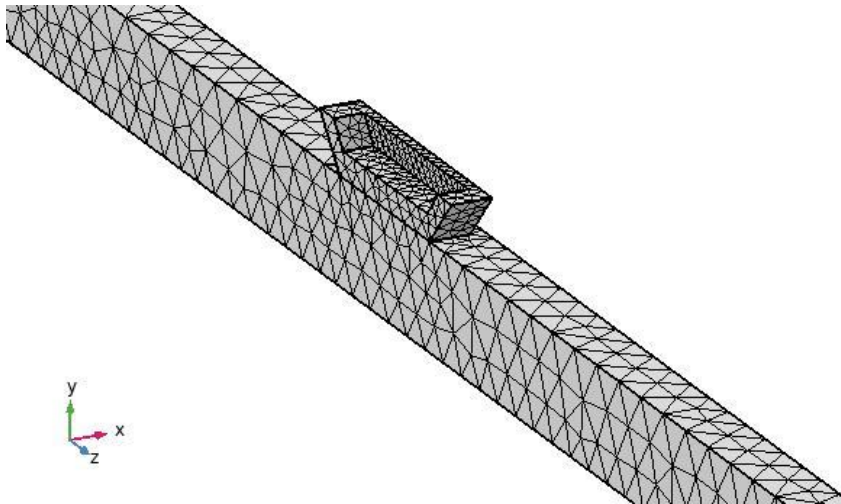
Bir sonlu elemanlar analizinde tasarım programları vasıtasıyla elde edilmiş katı model geometrilere genellikle uygulanan ilk işlem genellikle ağ yapısının oluşturulmasıdır. Sonlu elemanlar analizinde gerçekleştirilen ağ yapısı eleman ve düğüm noktalarından meydana gelmektedir. Burada, her bir eleman geometriyi temsil eden en küçük parçacığı, düğüm noktası ise bu parçacıkların uç ve köşe noktalarını temsil etmektedir. Analizlerde tasarım sonrası oluşan geometrileri temsil eden elemanların en önemli özelliği ise boyutudur. Tasarımı oluşturan sistemi temsil eden eleman sayısının artması çözülecek denklem sayısını arttırdığından bu durumun sonucunda çözüm süresi de artmaktadır. Konuyla ilgili yapılan analiz çalışmaları incelendiğinde, eleman boyutunun küçük seçilmesi durumunda gerçekleşen çözümün o derece hassas olacağı bilinmektedir [91], [92].

Bu kapsamda sonlu elemanlar analizi sırasında oluşturulan ağ yapısının eleman sayısı artırılmıştır. Birim eleman boyunun küçülmesi, daha hassas çözüm yapmamızı sağlarken, denklem sayısını arttırdığı için işlem süresini uzatmaktadır.

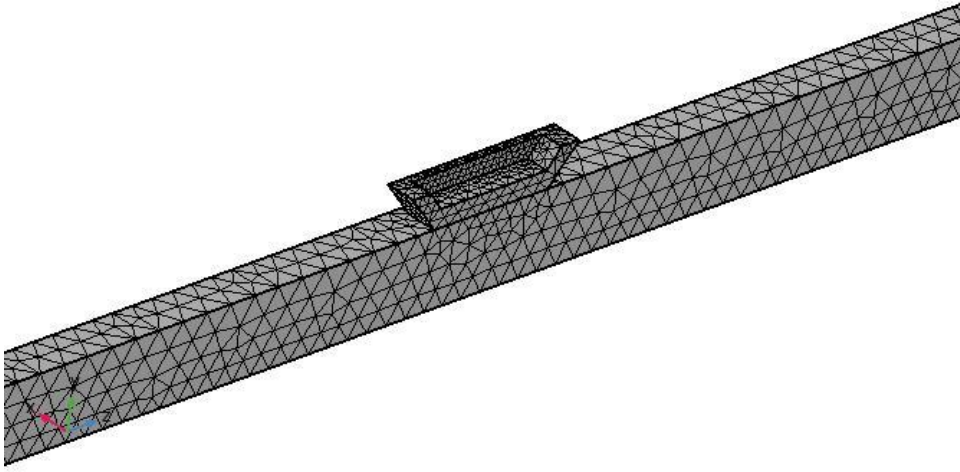
Şekil 6.19’de oluşturulan ağ yapısındaki eleman boyutları ortalama olarak 15 mm, 7 mm ve 3 mm olarak kullanılmış ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneysel olarak elde edilen sıcaklık ölçümlerine göre de karşılaştırılmıştır. Şekil 6.20’de farklı eleman boyutuna göre oluşan toplam eleman sayısı görülmektedir. Burada, en küçük eleman boyutu olan 3 mm’lik ağ yapısında yaklaşık 2 milyon eleman oluşmaktadır. En büyük eleman büyüklüğü olan 15 mm’lik değerde ise en küçük eleman boyutuna nazaran 5 kat daha az sayıda eleman sayısı oluşmaktadır.



a) Ağ yapısı-15 mm

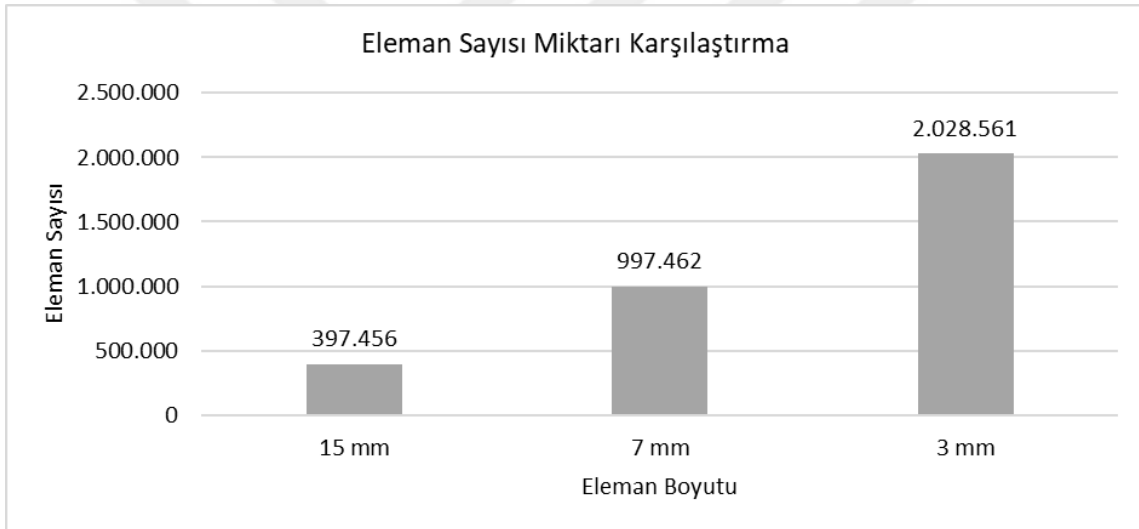


b) Ağ yapısı-7 mm



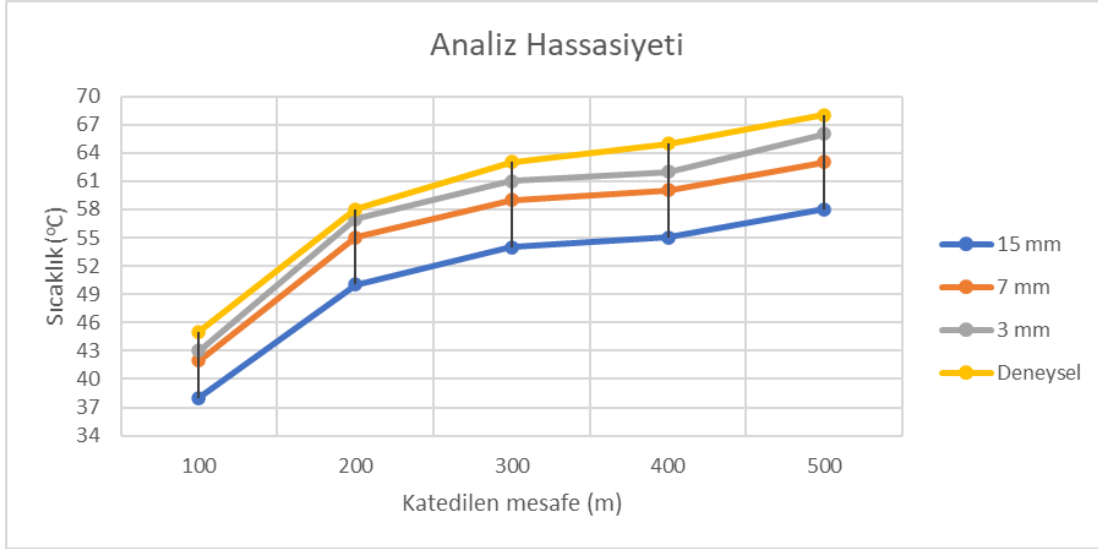
c) Ağ yapısı-3 mm

Şekil 6.19. Ağ yapısı görselleri ((a) 15 mm, b) 7 mm ve c) 3 mm)



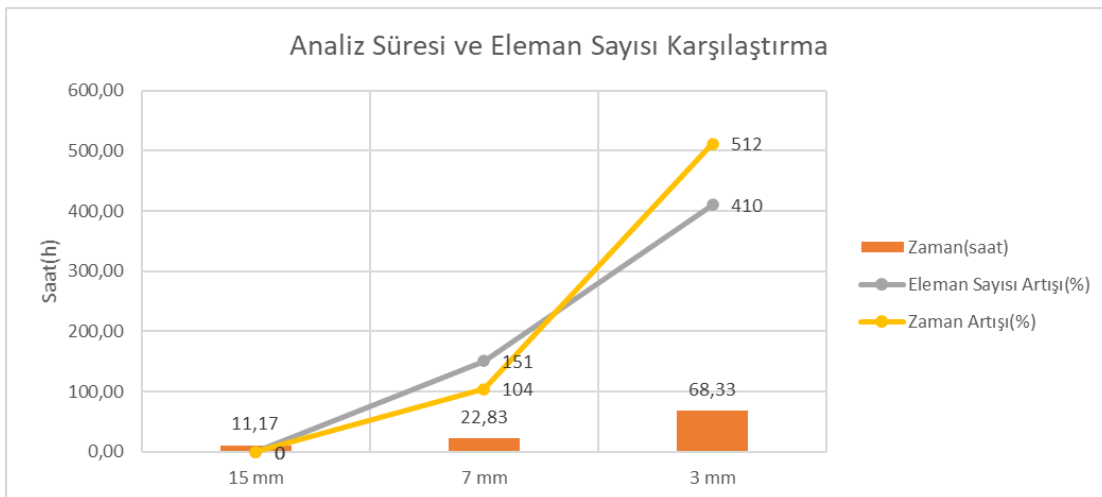
Şekil 6.20. Eleman sayısı karşılaştırması

Gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi farklı boyutlardaki eleman sayıları ile oluşturulmuş ağ yapısı ile koşturulmuş ve Şekil 6.21’de verilen karşılaştırmalı grafik elde edilmiştir. Eleman boyutu olarak seçilen 15 mm değerinde elde edilen sıcaklıklar, deneysel çalışmaya göre uzaksak bir sonuç ortaya koyarken, 3 mm’lik eleman boyutu deneysel çalışmaya göre en yakın sonuçları ortaya koymuştur.



Şekil 6.21. Analiz hassasiyeti karşılaştırması

Eleman sayısındaki artış, analiz sırasındaki çözömlenmesi gereken denklem sayısını artırmakta ve analiz süresi uzamaktadır. Şekil 6.22 eleman sayısı ve analiz süresiyle ilgili karşılaştırmayı göstermektedir. Birim eleman boyunun küçölmesi, daha hassas çözüm yapmamızı sağlarken, denklem sayısını arttırdığı için işlem süresini uzatmaktadır. Çözüm ağındaki hassasiyetle ilgili olarak, özellikle düşük kuvvet ve akım yoğunluklarında sonuçların hemen aynı olduğu ancak kuvvet ve akım yoğunluğunun artması durumlarında ise sonlu elemanlar analizi ile gerçek ölçüm sonuçlarının birbirinden uzaklaştığı görölmektedir. Çözüm ağındaki hassasiyet durumu için çözüm süresi ve eleman sayısı açısından bu tez kapsamında gerçekleştirilen analizler optimum koşturma seçeneğı olan ortalama 7 mm’lik eleman boyutu tercih edilmiştir.



Şekil 6.22. Analiz süresi ve eleman sayısı karşılaştırma



7. FARKLI ORANLARDAKİ BAKIR-GRAFİT KOMPOZİSYONU

Bir elektriksel temas malzemesi olarak bakır-grafit çifti yük koşulları altında (yüksek voltaj veya yüksek hız) elektriksel ve termal iletkenlik gereksinimlerini karşılamaktadır. Malzemelerin mekanik özelliklerinde, kayan temas sırasında herhangi bir problemli davranışının oluşmamasını gerekmektedir. Bu yapıdaki çiftlerin özellikleri, kompozitlerin yapısına, yoğunluğuna, arayüzey bağına, grafit dağılımına ve bileşimine bağlıdır. Bununla birlikte, grafit içeriğinin ve dağılımının kompozitlerin özellikleri üzerindeki etkisini, mikro yapı dağılımının bakır-grafit çifti üzerindeki sürtünme ve aşınma sürecindeki rolünü açıklayan çok sayıda özel çalışma bulunmamaktadır.

Genel olarak çalışmalar daha ince parçacık boyutlarına ve daha iyi dağılıma sahip bakır-grafit kompozitlerin, temas yüzeyinde oluşan kalın bir grafit tabakası nedeniyle daha yüksek yük dayanma kapasitesi ve daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı gösterdiğini göstermiştir [93]. Bu bağlamda tezin bu kısmında bakır-grafit kompozisyonu farklılaştırılarak daha önce belirlenen bakır-grafit çifti için %10 grafit ilavesinin ne kadar etkili olduğu hakkında çalışmalar gerçekleştirilecektir. Buna göre bakır-grafit çifti için ağırlıkça grafit oranını %5 ve %15 olarak farklılaştırmak suretiyle bakır-grafit oranının kollektör pabucu olarak kullanılabilirlik noktasında nasıl etkin olacağı incelenecektir.

7.1. Sertlik, Gözeneklilik ve Darbe Tokluğu Ölçümleri

İlk olarak, farklı oranda grafit içeren numuneler üretilerek, teorik ve deneysel yoğunlukları, gözeneklilik değerleri, sertlik ve darbe tokluğu değerleri ölçülerek %10 grafit içeren numunelerle karşılaştırılmıştır.

Farklı oranlarda grafit içeren bakır-grafit çiftlerine ait gerçekleştirilen ölçüm sonuçları Çizelge 7.1’de verilmektedir. Bakır-grafit çiftinin uygulamalarda elektrik yükü altında kayma performansı sertlikten önemli ölçüde etkilenmektedir. Grafit iyi bilinen yumuşak bir malzemedir ve bu nedenle grafitin bakır matrise ilavesi belirli bir orana kadar sertliği artırırken %10’u geçen grafit oranlarında sertlik azalmaya başlamaktadır. Darbe tokluğu ise karışıma grafit eklendikçe azalma göstermiştir. Bu bağlamda, birim alandaki grafit sayısının darbe dayanımı üzerinde etkili olduğu değerlendirilmiştir.

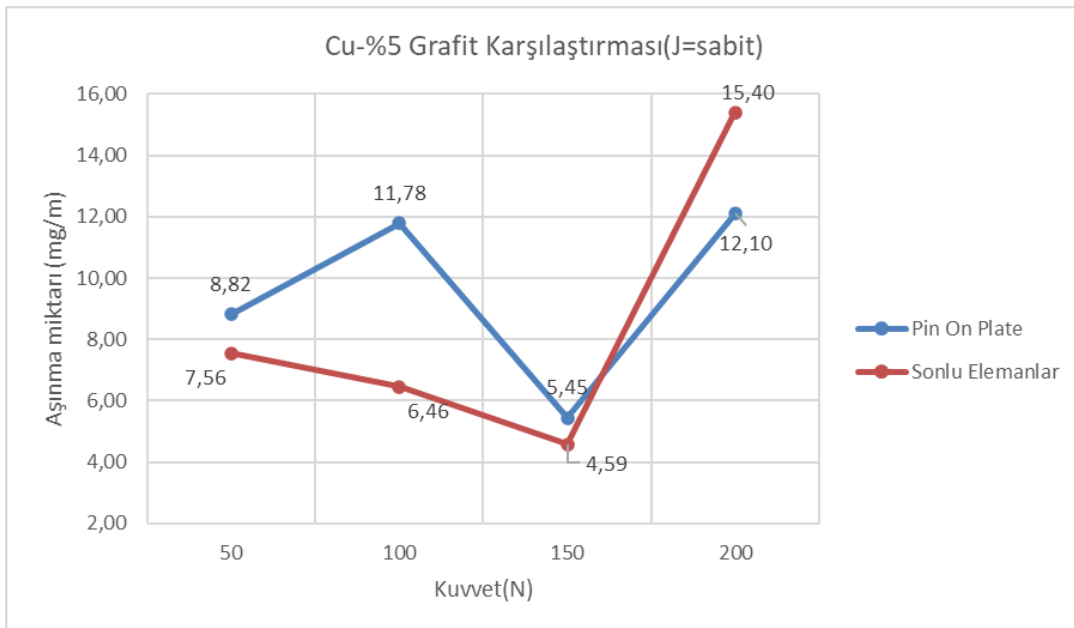
Çizelge 7.1. Sertlik, Gözeneklilik ve Darbe Tokluğu Ölçümleri

Numune	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Deneyisel Yoğunluk (g/cm ³)	Gözeneklilik (%)	Sertlik (HB)	Darbe tokluğu (J/cm ²)
Cu-%5 grafit	8,622	7,6	11,8	136	7,6
Cu-%10 grafit	8,284	7,5	9,4	161	6,5
Cu-%15 grafit	7,946	7,4	6,8	148	5,2

7.2. Aşınma Miktarı Ölçümleri

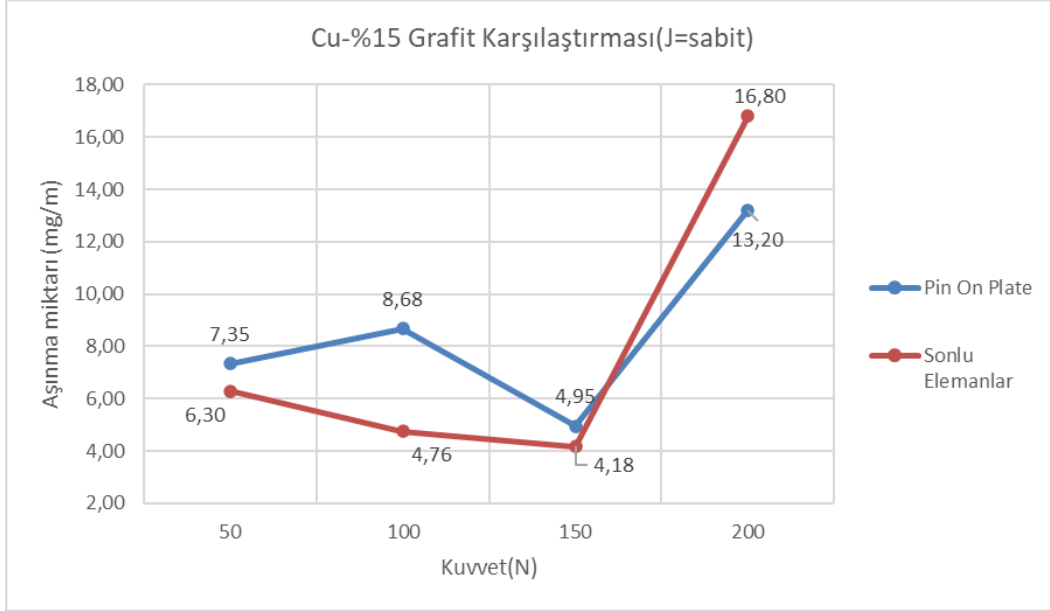
Bölüm 5.5.3’de %10 grafit ilaveli durum için pin-on-plate testi sonuçları, Bölüm 6.3’de ise sonlu elemanlar metoduyla elde edilen sonuçların pin-on-plate test çıktılarıyla karşılaştırmalı olarak elde edilen aşınma miktarlarının incelenmesi verilmiştir. Bu bölümde ise %5 ve %15 grafit ilaveli bakır-grafit çifti için sonlu elemanlar analizi ve pin-on-plate testinden elde edilen verilen karşılaştırılarak sunulacaktır.

İlk aşamada, akım yoğunluğunun 0,033 A/mm² değerinde sabit tutulmasıyla birlikte kollektör pabucuna uygulanan baskı kuvvetinin aşınma miktarı üzerindeki etkisi değerlendirilecektir. Şekil 7.1’de %5 grafit ilaveli bakır grafit çifti için gerçekleştirilen pin-on-plate ve sonlu elemanlar analizi metoduyla elde edilen aşınma miktarları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



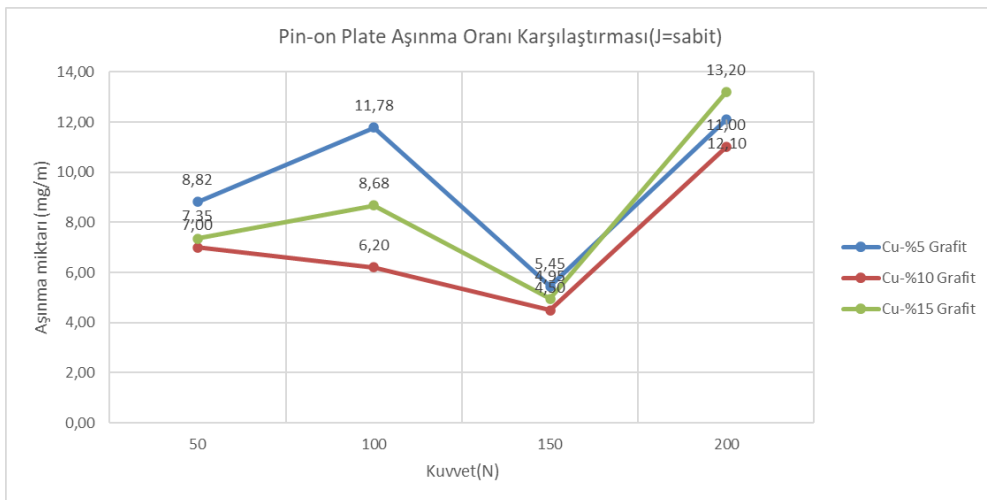
Şekil 7.1. Aşınma miktarı karşılaştırması (akım yoğunluğu sabit, %5 grafit ilaveli)

Burada 50 N ve 150 N değerlerinde değerlerimiz birbirlerine yakınlaşırken 100 N ve 200 N değerlerinde ise birbirlerinden uzaklaşmaktadır. Şekil 7.2’de ise %15 grafit ilaveli bakır grafit çifti için gerçekleştirilen pin-on-plate ve sonlu elemanlar analizi metoduyla elde edilen aşınma miktarları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 7.2. Aşınma miktarı karşılaştırması (akım yoğunluğu sabit, %15 grafit ilaveli)

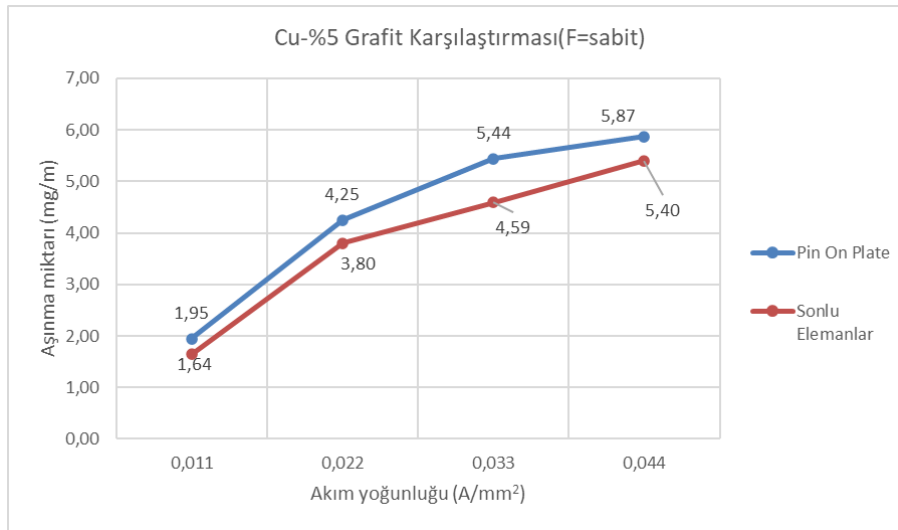
Burada da %5 ilaveli duruma benzer bir grafik eğilimi görülmektedir. Üç farklı oranda grafit içeren numuneleri pin-on-plate testinden elde edilen sonuçlar bazında kıyaslanacak olursa Şekil 7.3’deki gibi bir grafik elde edilecektir.



Şekil 7.3. Üç farklı oranda grafit içeren numunelerin sabit akım yoğunluğu altında pin-on plate testi karşılaştırması

Buradaki grafikten anlaşılaçağı üzere %10 grafit içeren numunelerde aşınma miktarı, diğere farklı oranda grafit içeren numunelere göre daha az olarak gerçekleşmektedir. Grafik eğilimleri benzer olsa da 200 N değeriine gelindiğinde özellikle %15 oranında grafit içeren numunenin aşınma miktarı diğereğine göre daha fazla olmaktadır.

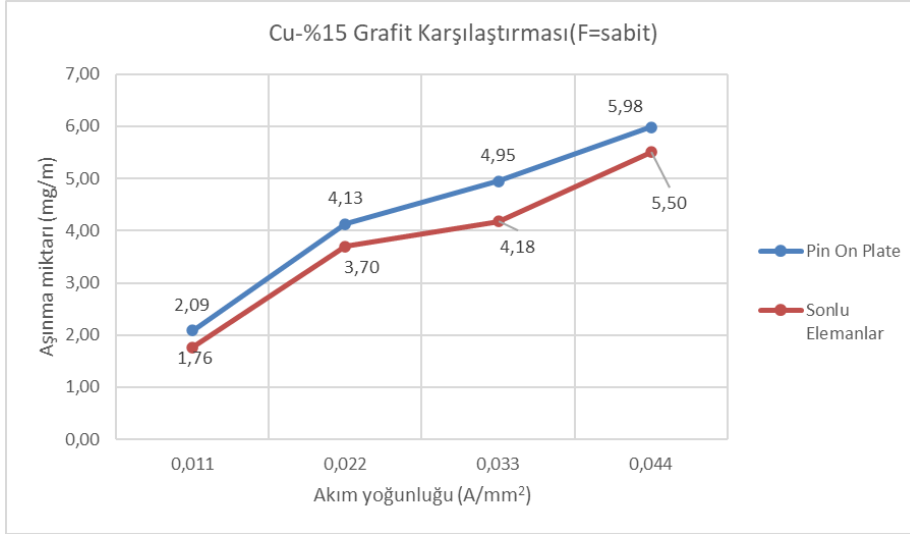
İkinci aşamada, kuvvetin 150 N değeriinde sabit tutulmasıyla birlikte kollektör pabucuna uygulanan akım yoğunluğunun aşınma miktarı üzerindeki etkisi değeriendirilecektir. Şekil 7.4’de %5 grafit ilaveli bakır grafit çifti için gerçekleştirilen pin-on-plate ve sonlu elemanlar analizi metoduyla elde edilen aşınma miktarları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 7.4. Aşınma miktarı karşılaştırması (kuvvet sabit, %5 grafit ilaveli)

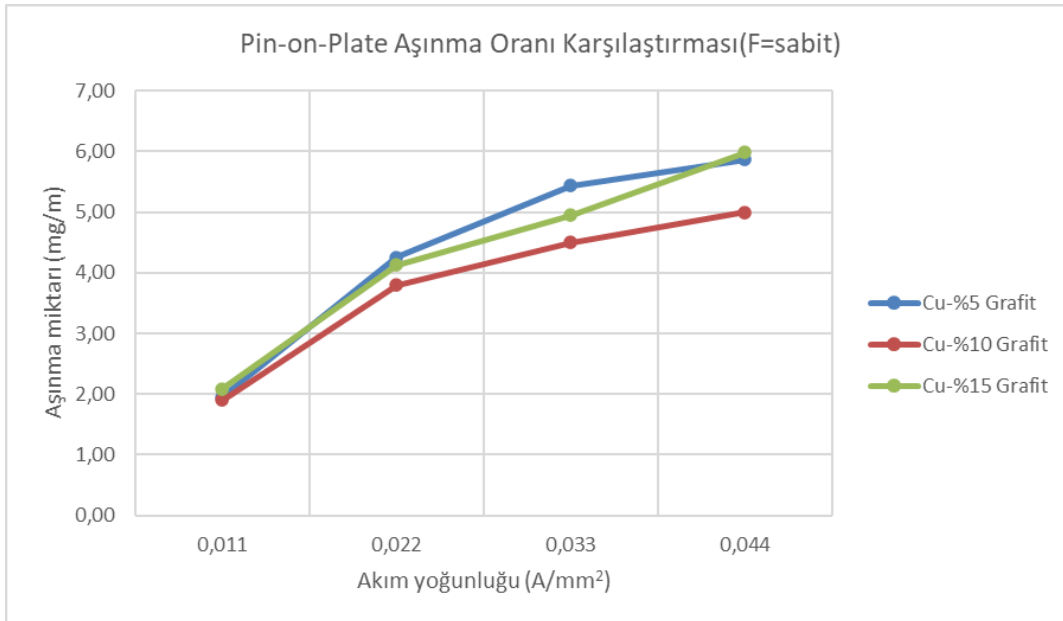
Burada her iki yöntemde de akım yoğunluğu arttıkça aşınma oranının benzer eğilimde arttığı görülmektedir. 0,033 A/mm² değeriinde aradaki fark en fazla olduğu anlaşılmaktadır.

%15 grafit ilaveli durum için pin-on-plate ve sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçların karşılaştırılması durumunda, yukarıda bahsedilen diğere durumla benzer bir davranış görülmektedir (Şekil 7.5). Özetle, her üç farklı durumda sonlu elemanlar analizi ile yapılan aşınma deneyleri benzer özellikler göstermiştir.



Şekil 7.5. Aşınma miktarı karşılaştırması (kuvvet sabit, %15 grafit ilaveli)

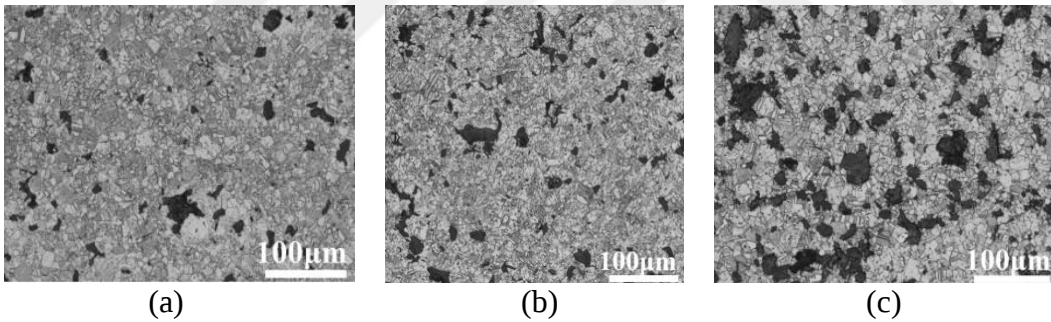
Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’de verilen grafiklerde aşınma deneyi sonuçları aynı grafik üzerinde kıyaslandığında (Şekil 7.6), %10 grafit ilavesi durumunun daha az aşınma miktarına sahip olduğu, düşük akım yüklemelerinde grafit takviyesinin değiştirilmesi aşınma direncine katkıda bulunmadığı, yüksek akım yüklemelerinde (0,044 A/mm²) ise %5 ve %15 grafit ilavesi yaklaşık olarak benzer aşınma miktarına sahipken %10 grafit ilavesinde daha düşük aşınma miktarı gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 7.6. Üç farklı oranda grafit içeren numunelerin sabit kuvvet altında pin-on plate testi karşılaştırması

7.3. Mikroyapı İncelemeleri

Bakır-grafit çiftleri elektriksel temas malzemelerinin hazırlanmasında yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir [94]. Ancak grafitin bakır arasında kimyasal bir reaksiyon gerçekleşmediği için grafitin bakır içerisindeki çözünürlüğü çok düşük olmaktadır. Bununla birlikte bakır-grafit çifti arasında boşluk ve çatlaklar oluştuğundan dolayı ara yüz bağı genellikle zayıflamaktadır. Diğer metal elementlerin (titanyum/vanadyum/krom) eklenmesiyle, ara yüz bağı iyileştirilebilir, ancak bu durum bakır-grafit çiftinin elektriksel ve termal iletkenliği üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmaktadır [95], [96]. Bu kapsamda, farklı oranlardaki grafit içeren bakır-grafit çiftinin mikro yapısal olarak analizi, gerçekleştirilen sertlik ve aşınma ölçümlerinin yorumlanmasına katkı sunacağı değerlendirilmiştir. %10 grafit içeren bakır-grafit çiftinin mikro yapı incelemeleri bölüm 5.4’de daha önce sunulmuştur. Bu bölümde ise karşılaştırmalı olarak %5 ve %15 grafit içeren bakır-grafit çiftlerinin mikro yapı incelemelerine yer verilecektir. Resim 7.1’de farklı oranlarda grafit içeren bakır-grafit çiftleri için mikro yapı resimleri verilmektedir.



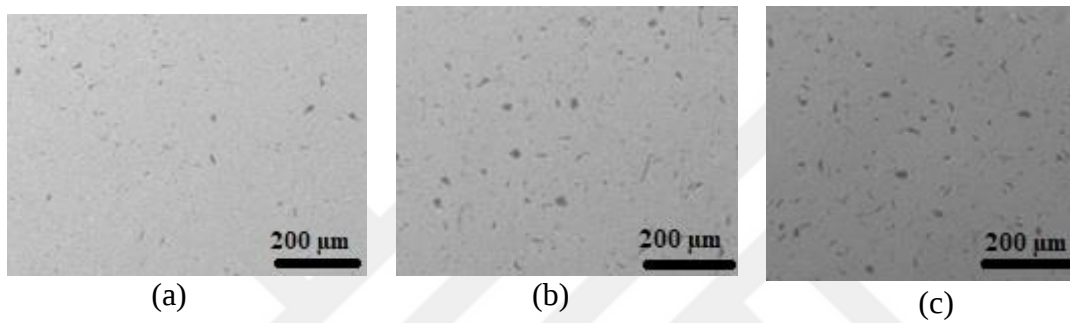
Resim 7.1. Farklı oranda grafit içeren bakır-grafit çiftleri (a-%5 grafit, b-%10 grafit, c-%15 grafit)

Farklı oranlarda grafit içeren bakır-grafit çiftlerin kesişme yöntemiyle saf bakırın tane boyutu 28 μm olarak ölçülmüştür. Grafit, tanelerin içinde ve tane sınırlarında dağılmış olmakla birlikte özellikle %15 grafit içeren bakır-grafit çiftindeki topaklanmalarında daha fazla olduğu görülmektedir. Bu topaklaşmanın boyutları yaklaşık 10 μm ’den başlayıp 100 μm ’ye kadar artmaktadır.

%15 oranındaki grafit ilavesiyle birlikte bakır-grafit çiftlerindeki sertlik değerinin düşmesinin nedeni büyük olasılıkla sinterleme sonucu meydana gelen topaklaşmadaki artış ve dolayısıyla sinterleme tekniğine büyük ölçüde bağlı olan numunelerin tane büyüklüğüyle

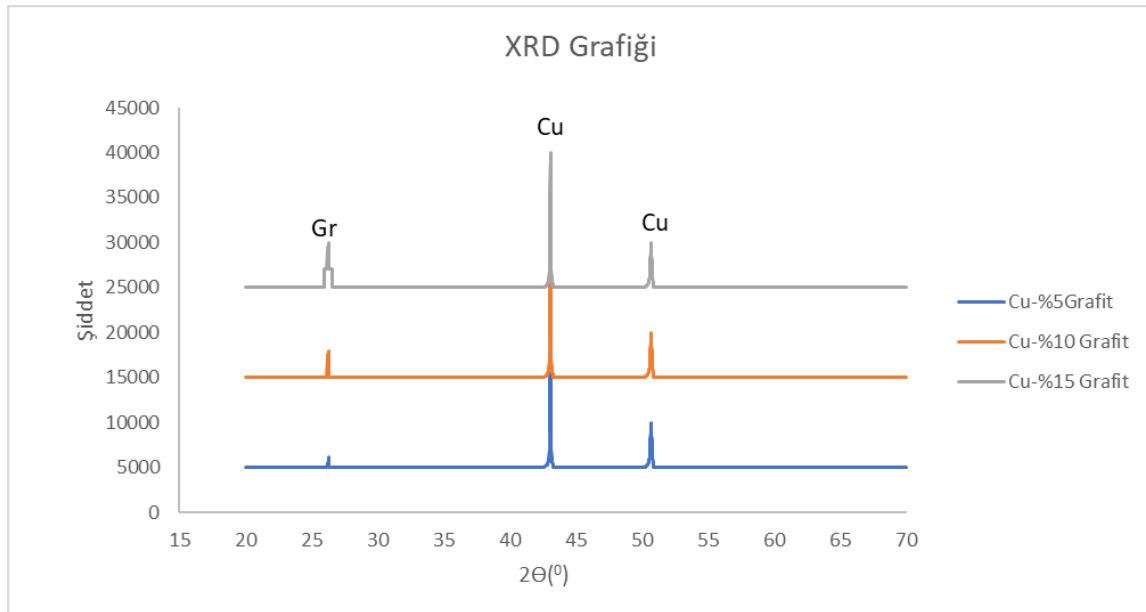
ilgili olabileceği değerlendirilmiştir. Zira yapılan çalışmalarda özellikle mikrodalga yoluyla gerçekleştirilmiş sinterleme işleminde daha ince bir mikroyapı oluşarak sertliğin azalmasının giderilmesi sağlanmıştır [97].

Farklı oranlarda grafit içeren numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) altındaki görüntüleri (Resim 7.2) incelendiğinde numunelerde gözeneklilik durumuna rastlanmamıştır. Burada koyu gri kontrasta grafit karşılık gelmektedir. Mikroyapı resimlerinde olduğu gibi SEM görüntülerinde de topaklanmaların olduğu görülmektedir.



Resim 7.2. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) (a-%5 grafit, b-%10 grafit, c-%15 grafit)

X ışını kırınım çalışmalarının sonuçları Şekil 7.7’de gösterilmektedir. Cu_2O , CuO veya diğer ilgili piklerin olmaması, numunelerde oksidasyon olmadığını göstermektedir.



Şekil 7.7. Bakır-grafit çifti X-ışını kırınım grafiği



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kollektör pabucu ve üçüncü ray yapısı günümüzde kentsel demiryolu trenlerinin önemli bir güç kaynağı olarak ifade edilebilmektedir. Kollektör pabucu, trenlerin çalışma güvenliğini etkileyen önemli bir bileşen olmakla birlikte dinamik özelliklere sahip malzeme yüzeyinin lokal deformasyonu aşınma ile sonuçlanmaktadır. Ancak temas eden üçüncü ray ve kollektör pabucu sisteminin yapısı, ara yüzdeki elektrik akımı nedeniyle malzemenin sürtünme ve aşınma davranışı üzerinde karmaşık bir etkiye sahip olmaktadır. Bu tez çalışmasında, Ankara Metrosu trenlerinde kullanılan üçüncü ray ve kollektör pabuçları ara yüzünde meydana gelen etkileşim, bu etkileşim nedeniyle kollektör pabucunun aşınma davranışı, kullanılan mevcut pabuç malzemesinin yerine toz metalurjisi ile özellikleri iyileştirilmiş yeni parçanın nasıl davranacağıyla ilgili deneysel ve sonlu elemanlar analizine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında öncelikli olarak mevcut sistem üzerinde kullanılan kollektör pabuç malzemesinin özellikleri belirlenmiş, sonrasında elektriksel iletim özelliği çok daha iyi olan ve elektrik akımının olduğu temas eden yüzeylerde yaygın olarak kullanılan bakır-grafit çiftinin kullanılmasının ne gibi avantaj ve dezavantajları olacağı irdelenmiştir. Bu tez çalışmasıyla birlikte toz metalurjisi tekniğinin elektrik-elektronik-mekanik gibi multidisipliner yapıya sahip demiryolu alanında uygulaması sağlanmış, üretilebilir ve özellikleri iyileştirilmiş kollektör pabucunun yeni nesil üretim teknikleri ile farklı malzeme gruplarının kullanımı ortaya çıkarılmıştır.

Bakır-grafit çifti için %10 grafit içeren numuneler toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde sertlik, pin-on-plate aşınma, aşınma sırasındaki sıcaklık ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre mevcut durumda kollektör pabucu olarak kullanılan GGG40 küresel grafitli dökme demir sertlik değeri ortalama 184 HB, yeni üretilen bakır-grafit çifti için sertlik değeri ise ortalama 161 HB olarak ölçülmüştür. Bakır-grafit çifti daha yumuşak özellik göstermesine rağmen elektriksel ve ısı iletkenlik noktasında daha iyi bir özellik sergilemektedir. Kollektör pabucunun hedeflenen özellikleri arasında mekanik dayanım, kalkış ve duruş anında yüksek akım kabiliyeti, iyi kayma özelliği ve elektriksel iletimin yanı sıra temas halinde olduğu üçüncü raya zarar vermemesi gerektiğinden sertlik değeri mevcut duruma göre düşük olması avantaj olabileceği değerlendirilmiştir. Ancak 200 HB sertliğe kadar elektriksel iletkenlik ve iyi kayma

özelliklerinden taviz verilmeden yapılacak mekanik dayanımın artırılması çok daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir.

Numunelere uygulanan akım yoğunluğu ve kuvvet olmak üzere iki farklı parametre bulunmaktadır. Burada kuvvet değeri mevcut durumda kullanılan 150 N değerinde sabit tutulmak suretiyle akım yoğunlukları değiştirilmiştir. Benzer şekilde akım yoğunluğu da 0,033 A/mm² değerinde sabit tutulmak suretiyle kuvvet değerleri sistem üzerinde etkisini görmek üzere değiştirilmiştir. Buna göre elde edilen aşınma testi sonuçlarında;

- Baz değerler için (150 N-0.033 A/mm²) bakır-grafit çiftinde daha az aşınma meydana geldiği,
- Akım yoğunluğu arttıkça döküm malzemeye göre bakır-grafit çiftinde daha az bir aşınma oluştuğu,
- Kollektör pabucu üzerine uygulanan 50 N kuvvet ile 100 N kuvvet kıyaslandığında döküm malzemedeki aşınma miktarı artarken bakır-grafit çiftinin aşınma oranında düşüş meydana geldiği,
- Kollektör pabucu uygulanan 200 N ile birlikte aşınma miktarındaki artışın da hızlandığı,
- Akım yoğunluğu arttıkça her iki tip numune için malzemedeki aşınma miktarının da arttığı,

anlaşılmıştır.

Kollektör pabucu ve üçün ray arasındaki kayma hızı, temas eden malzemelerin termal ve elektriksel özellikleri, temas alanının büyüklüğü ve uygulanan kuvvet temas bölgesindeki sıcaklık dağılımını yöneten en kritik faktörlerdir. Gerçekleştirilen sonlu eleman analizinden ve aşınma testlerinden elde edilen sıcaklık ölçümlerinin sonuçlarıyla;

- Pin-on-plate testine uygulanan kuvvetin 150 N değerinde sabit olduğu şart altında, akım yoğunluğunun 0,011 A/mm²'den 0,022 A/mm²'ye yükseldiği durumda (akım yoğunluğunun 0,022 A/mm²'den 0,033 A/mm²'ye ve 0,033 A/mm²'den 0,044 A/mm²'ye yükselmesine nazaran) maksimum sıcaklık değeri ile sonuçlandığı,
- Pin-on-plate testinde uygulanan kuvvet 150 N'de sabit tutularak kayma mesafesi 100 metreye ulaştığında temas yüzeyindeki sıcaklığın hızla arttığı ve sonraki artışların daha düşük olduğu, temas eden yüzeylerin birbirine alışma sonrasında, ilk aşamada yüzeyden

meydana gelen kopmaların sonrasında yüzeyden uzaklaşmasının bu duruma neden olabileceği,

- Temas eden yüzeylerin alışması ve hızın artması sonucu yüzeyden kopan partiküllerin hızla uzaklaşmasıyla beraber kararlı sıcaklık bölgesine ulaşıldığı,
- Sonlu elemanlar analizi sonuçları ile pin-on-plate testinde gerçekleştirilen ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında ölçüm farklılığının %0,8 ile %10 arasında değiştiği, sonlu elemanlar analizinin yapılması öncesinde belirlenen varsayımlardan girdap akımlarından kaynaklanan güç kaybının ihmal, radyasyondan kaynaklanan ısı kaybının ihmal, temas yüzeyinde ark oluşmadığı gibi hususlar ölçüm sonuçları arasındaki farkın nedeninin açıklaması olabileceği,
- Ağırlık olarak %90 bakır ve %10 grafit içeren bakır-grafit çiftinin sonlu elemanlar analizinde ortaya çıkan sonuçlara göre, mevcut durumda kullanılan döküm malzemesi ile karşılaştırıldığında ortaya çıkan sıcaklık değerinde yaklaşık %50 oranında düşüş olduğu,
- Sonlu elemanlar analizinin gerçek çalışma ortamlarındaki sıcaklık artışını değerlendirmek için önemli bir yaklaşım olduğu, elektrik akımının olduğu temas eden malzeme çiftlerinde, sürtünme ve aşınma sürecindeki aşınma hacmi kayıplarını kontrol etmeye yardımcı olacağı,

değerlendirilmiştir.

Gerçekleştirilen mikroyapı incelemeleri neticesinde;

- Bakır matris içerisinde grafit partiküllerinin genel olarak homojen bir dağılım gösterdiği,
- Grafit partiküllerinin bir kısmı bakır matrise gömülürken, diğer partiküllerin bakır matrisin tane sınırında olduğu,
- Bazı bölgelerde artan grafit miktarına göre bakırın tane sınırlarında grafit partiküllerinin kümeleşme gösterdiği,
- Grafit bakır yapı içerisinde yapısal bütünlüğü korurken malzemeyi güçlendirdiği,

sonucuna varılmıştır.

Kollektör pabucu ve üçüncü ray arasındaki temas etkileşim süreci tüm boyutlarda ele alınırken, uygulanan sonlu elemanlar analizi ve pin-on-plate testindeki ölçüm sonuçları ayrıca hassasiyet analizi ve deney kararlılığı anlamında irdelenmiştir. Buna göre sonlu

elemanlar analizinde gerçekleştirilen çözüm ağının (mesh) analize olan etkisi (hassasiyet analizi) ile;

- Birim eleman boyutunun küçülmesi, daha hassas çözüm yapmamızı sağlarken, denklem sayısını arttırdığı için işlem süresini uzattığı,
- Çözüm ağındaki hassasiyetle ilgili olarak özellikle düşük kuvvet ve akım yoğunluklarında sonuçların hemen hemen aynı olduğu ancak kuvvet ve akım yoğunluğunun artması durumlarında ise sonlu elemanlar analizi ile gerçek ölçüm sonuçlarının birbirinden uzaklaştığı,
- Çözüm süresi ve eleman sayısı açısından optimum koşturma seçeneği olan ortalama 7 mm'lik eleman boyutu tercih edildiği,

görülmüştür. Diğer taraftan, pin-on-plate testinin kararlılığı noktasında ise;

- Akım yoğunluğunun $0,033 \text{ A/mm}^2$ değerinde sabit tutulması durumunda, hata oranının en fazla 200 N değerinde ve %7 olarak gerçekleştiği,
- Kuvvet değerinin 150 N olarak sabit tutulması durumunda hata oranının en fazla $0,011 \text{ A/mm}^2$ değerinde ve %6 olarak gerçekleştiği,

anlaşılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmada bakır-grafit çifti için %10 grafit ilaveli hali esas olarak değerlendirmeye alınırken ağırlıkça grafit oranını %5 ve %15 olarak farklılaştırmak suretiyle bakır-grafit oranının kollektör pabucu olarak kullanılabilirlik noktasında nasıl etkin olacağı ayrıca incelenmiştir. Buna bağlamda farklı grafit ilaveli numuneler üretilerek yoğunluk, gözeneklilik, sertlik, darbe tokluğu ve aşınma miktarı sonlu elemanlar analiziyle birlikte karşılaştırılmıştır. Buna göre;

- Bakır-grafit çiftinde artan grafit oranıyla birlikte gözeneklilik azalırken sertlik değeri %10 grafit ilavesi durumunda artmış ancak %15 grafit ilaveli durum için düşüş sergilediği, yapılan çalışmalarda bu durumun mikrodalga sinterleme yoluyla daha ince bir mikroyapı oluşturularak sertlikteki azalmanın giderildiği,
- Darbe tokluğu değerinin, karışıma grafit eklendikçe azalma gösterdiği, bu duruma darbe dayanımı üzerinde birim alandaki grafit sayısının etkili olduğu,

- %5 ve %15 grafit ilaveli durum için akım yoğunluğu arttıkça aşınma miktarının da arttığı,
- %5, %10 ve %15 grafit ilaveli durum kıyaslandığında %10 grafit ilaveli bakır-grafit çiftinin daha az aşınma miktarına sahip olduğu,
- Düşük akım yoğunluğu ($0,011 \text{ A/mm}^2$) değerinde grafit takviyesinin değiştirilmesinin aşınma miktarındaki değişime katkıda bulunmadığı,
- Yüksek akım yoğunluğunda ($0,044 \text{ A/mm}^2$), %5 ve %15 grafit ilaveli bakır-grafit çifti yaklaşık olarak eşit aşınma miktarı değerine sahipken, %10 grafit ilaveli bakır-grafit çiftinde daha düşük aşınma miktarı gerçekleştiği,

sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma sonrasında üçüncü ray kollektör pabucu ilişkisiyle birlikte kollektör pabucunun üretimi ve tercih edilebilmesi dikkate alınarak yapılacak çalışmalara ait öneriler;

- Kollektör pabucu olarak kullanılan bakır-grafit çiftine uygulanan düşük kuvvet değerindeki yüksek akım sonucu malzemede gerçekleşen aşınma miktarının azaltılabilmesi için sonlu elemanlar analizindeki varsayımlar neticesinde ortaya çıkan ihmal durumları modele eklenerek daha detaylı bir model kurgulanması,
- Kollektör pabucunun mekanik dayanım, kalkış ve duruş anında yüksek akım iletim kabiliyeti, iyi kayma özelliği üçüncü raya zarar vermeme gibi hedeflenen özellikler dikkate alındığında bakır-grafit çiftine başka tozların eklenmesi suretiyle elde edilen numune özelliklerinin iyileştirilmesi,
- Bakır-grafit çiftinden üretilen kollektör pabucu numunelerinin farklı sinterleme metodlarıyla sinterlenerek özellikle daha uygun bir mikroyapı dağılımı edilmesi sonucu sertlik değerinin artırılması,
- Kollektör pabucunda istenen özelliklerden biri olan iyi elektriksel iletim noktasında, elektrik iletkenliği yüksek farklı tozların bir araya getirilmesiyle kurgulanan modelin ve deneysel çalışmaların tekrarlanması,

şeklinde sıralanabilir.

Kollektör pabucunun hedeflenen özellikleri, mekanik dayanım, yüksek akım kabiliyeti kalkış ve duruş anında, iyi kayma özelliği, elektriksel iletim ve temas halinde olduğu üçüncü raya zarar vermemesi şeklinde belirlenmiştir. Bu nedenle, üretilen bakır-grafit çiftinin

kollektör pabucu olarak seçilmesi ve sertlik değerin mevcut duruma göre düşük olması bir anlamda avantajlı olarak nitelendirilebilecektir. Böylece, pabuç hem yüksek performans hem de üçüncü raya zarar vermeden işlevini yerine getirebilmesi mümkün olabilecektir.

Aşınma, oldukça karmaşık bir hasar türü olmakla birlikte birçok farklı parametreye ve etkileyen faktöre bağlı olduğu yapılan bu tez çalışmasıyla görülebilmektedir. Yüzeylerin karmaşık yapısı, aşınma sırasında meydana gelen deformasyon bölgesi, sürtünmeden kaynaklanan ısı, temas bölgesindeki elektriksel iletim veya yalıtım, malzemelerin sertliği gibi faktörler aşınma miktarını oldukça etkilediği görülmektedir. Benzer şekilde literatürde yapılan araştırmalarda da, artan normal gerilim ve elektrik akımının aşınma kaybını arttırdığı ve buna bağlı olarak yapışma, abrasif aşınma, elektrik erozyon aşınması ve elektriksel kayma aşınması gibi baskın aşınma mekanizmalarının ortaya çıktığı tespit edilmiştir[31].

Bakır grafit kompozit malzemelerin tribolojik davranışı, sürtünmeden kaynaklanan ısı ve temas sıcaklıklarındaki artışa bağlı olduğu da bu tez çalışmasıyla ortaya koyulmuştur. Gerçekleşen sıcaklık artışının malzemenin aşınma direncini önemli ölçüde etkilediği anlaşılmaktadır. Muhtemel tribomalzemeler için sürtünme ve aşınma testi tasarlarken ve bu tür testlerin sonuçlarını değerlendirirken, temas sıcaklıklarını tahmin etme yeteneği çok önemli olduğu düşünülmektedir. Sonlu elemanlar analizi, gerçek çalışma koşullarında sıcaklık artışının kontrolü dikkate alındığında değerlendirme için önemli bir yaklaşım olmalıdır. Böylece elektrik akımı ile birlikte temas kuvvetleri sonucu oluşan sürtünme ve doğal sonuç olarak aşınma sürecindeki malzeme hacmi kayıplarının yönetimi için faydalı olacaktır. Metronun güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için, uygun pabuçların seçilerek aşınma kaybı seviyesinin azaltılmasıyla birlikte bakım periyot süreleri artarak maliyet noktasında avantajlı hale geçebilecektir.

Genellikle, bakırın yüksek iletkenliği ve grafitin yüksek aşınma direnci, yüksek akım yoğunluğu ve sürtünme kuvvetleri altında aşınmayı azaltıcı etkilere sahiptir. Mevcut durumda kullanılan dökme demir malzemenin homojen ve sert yapısı, daha stabil bir aşınma davranışıyla sonuçlanabilecektir. Bu malzemenin bakır-grafit çiftine nispeten yüksek sertliği, yüksek sürtünme kuvvetleri altında daha az aşınmaya neden olabilecektir. Sonuç olarak, farklı fiziksel özelliklere sahip bakır grafit kompozit çifti ve dökme demir malzemenin aşınma davranışı, malzemelerin yapılarının homojenliğine ve özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

KAYNAKLAR

1. Şengör, I., Tanrıöven, M. ve Başegmez, Y. (2015, 18-19 Nisan). *Direct Current Traction Power System Analysis in Electrical Railway Systems*. Proceedings of the Second international conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering konferasında sunuldu, Roma.
2. Rahman, F. A. A., Kadir, M. Z. A. A., Osman, M. ve Amirulddin, U. A. U. (2020). Review of the AC Overhead Wires, the DC Third Rail and the DC Fourth Rail Transit Lines: Issues and Challenges. *IEEE Access*, 8, 213277–213295.
3. Zhang, Q. (2011). *Study on the sliding wear response of cast iron*. Yüksek Lisans Tezi, University of Wollongong, Wollongong.
4. Hase, A. (2019). Visualization of the tribological behavior of graphite in cast iron by in situ observations of sliding interfaces. *Tribology International*, 138, 40–46.
5. Prasad, B. K. (2011). Sliding wear response of a grey cast iron: Effects of some experimental parameters. *Tribology International*, 44(5), 660–667.
6. Prasad, B. K. (2007). Sliding wear response of cast iron as influenced by microstructural features and test condition. *Materials Science and Engineering A*, 456(1–2), 373–385.
7. Yang, C., Cai, G., Li, X. ve Bo, J. (2016, 24-26 Temmuz). *Study on third rail current collector shoes wear of metro trains*. International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS) konferansında sunuldu, Sydney.
8. Kennedy, F. E., Lu, Y. ve Baker, I. (2015). Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting. *Tribology International*, 82(PB), 534–542.
9. Milković, M. ve Ban, D. (1996). Influence of the pulsating current amplitude on the dynamic friction coefficient of electrographite brushes. *Carbon*, 34(10), 1207–1214.
10. Stewart, E., Weston, P., Hillmanssen, S. ve Roberts, C. (2011). Using bogie-mounted sensors to understand the dynamics of third rail current collection systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225(2), 219–227.
11. Dong, L., Chen, G. X., Zhu, M. H. ve Zhou, Z. R. (2007). Wear mechanism of aluminum-stainless steel composite conductor rail sliding against collector shoe with electric current. *Wear*, 263(1-6), 598–603.
12. Dong, Lin, Zhong, W., Chen, G. X. ve Lewis, R. (2014). Effects of polarity on the friction and wear of collector shoes deployed in a metro traction system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(3), 323–330.

13. Dong, Lin, Lewis, R., Li, C. X., Zhu, W. B. ve Wang, H. S. (2015). Finite element assessment of the temperature field couple under joule heat and friction heat between a third rail and collector shoe. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 229(9), 1086–1094.
14. Zhao, H., Barber, G. C. ve Liu, J. (2001). Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current. *Wear*, 29(1-6), 409-414.
15. Yasar, I., Canakci, A. ve Arslan, F. (2007). The effect of brush spring pressure on the wear behaviour of copper-graphite brushes with electrical current. *Tribology International*, 40(9), 1381–1386.
16. Silman, G. I., Kamynin, V. V., ve Goncharov, V. V. (2007). On the mechanisms of copper effect on structure formation in cast iron. *Metal Science and Heat Treatment*, 49(7–8), 387–393.
17. Cho, G. S., Choe, K. H., Lee, K. W. ve Ikenaga, A. (2007). Effects of alloying elements on the microstructures and mechanical properties of heavy section ductile cast iron. *Journal of Materials Science and Technology*, 23(1), 97–101.
18. Agunsoye, J. O., Bello, S. A., Hassan, S. B., Adeyemo, R. G. ve Odii, J. M. (2014). The Effect of Copper Addition on the Mechanical and Wear Properties of Grey Cast Iron. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 02(05), 470–483.
19. Abdou, S., Elkaseer, A., Kouta, H. ve Abu Qudeiri, J. (2018). Wear behaviour of grey cast iron with the presence of copper addition. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(10), 1-8.
20. Dutkiewicz, J., Ozga, P., Maziarz, W., Pstruś, J., Kania, B., Bobrowski, P. ve Stolarska, J. (2015). Microstructure and properties of bulk copper matrix composites strengthened with various kinds of graphene nanoplatelets. *Materials Science and Engineering A*, 628, 124–134.
21. Celebi Efe, G., Zeytin, S. ve Bindal, C. (2012). The effect of SiC particle size on the properties of Cu-SiC composites. *Materials and Design*, 36, 633–639.
22. Celebi Efe, G., Ipek, M., Zeytin, S. ve Bindal, C. (2012). An investigation of the effect of SiC particle size on Cu-SiC composites. *Composites Part B: Engineering*, 43(4), 1813–1822.
23. Kováčik, J., Emmer, Š. Ve Bielek, J. (2015). Thermal conductivity of Cu-graphite composites. *International Journal of Thermal Sciences*, 90, 298–302.
24. Rajkumar, K., Aravindan, S. ve Kulkarni, M. S. (2012). Wear and life characteristics of microwave-sintered copper-graphite composite. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(11), 2389–2397.

25. Van Lier, G., Van Alsenoy, C., Van Doren, V. ve Geerlings, P. (2000). Ab initio study of the elastic properties of single-walled carbon nanotubes and graphene. *Chemical Physics Letters*, 326(1–2), 181–185.
26. Liu, J., Khan, U., Coleman, J., Fernandez, B., Rodriguez, P., Naher, S. ve Brabazon, D. (2016). Graphene oxide and graphene nanosheet reinforced aluminium matrix composites: Powder synthesis and prepared composite characteristics. *Materials and Design*, 94, 87–94.
27. Berman, D., Erdemir, A. ve Sumant, A. V. (2014). Graphene: A new emerging lubricant. *Materials Today*, 17(1), 31–42.
28. Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F. ve Lau, C. N. (2008). Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters*, 8(3), 902–907.
29. Allabergenov, B. ve Kim, S. (2013). Investigation of electrophysical and mechanical characteristics of porous copper-carbon composite materials prepared by spark plasma sintering. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(7), 1177–1183.
30. Gao, X., Yue, H., Guo, E., Zhang, H., Lin, X., Yao, L. ve Wang, B. (2016). Preparation and tensile properties of homogeneously dispersed graphene reinforced aluminum matrix composites. *Materials and Design*, 94, 54–60.
31. Ma, X. C., He, G. Q., He, D. H., Chen, C. S. ve Hu, Z. F. (2008). Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system. *Wear*, 265(7–8), 1087–1092.
32. Cha, Y., Hedberg, Y., Mei, N. ve Olofsson, U. (2016). Airborne Wear Particles Generated from Conductor Rail and Collector Shoe Contact: Influence of Sliding Velocity and Particle Size. *Tribology Letters*, 64(3), 40-60.
33. He, D. H., Manory, R. R. ve Grady, N. (1998). Wear of railway contact wires against current collector materials. *Wear*, 215(1–2), 146–155.
34. Feng, Y., Zhang, M. ve Xu, Y. (2005). Effect of the electric current on the friction and wear properties of the CNT-Ag-G composites. *Carbon*, 43(13), 2685–2692.
35. Liu, Q., Castillo-Rodríguez, M., Galisteo, A. J., de Villoria, R. G. ve Torralba, J. M. (2019). Wear behavior of copper–graphite composites processed by field-assisted hot pressing. *Journal of Composites Science*, 3(1), 29-40.
36. Cheng, K., Liu, R., Xiong, X., Lin, X. ve Chen, J. (2019). The Effect of Sintering Temperature on the Microstructures and Properties of Resin-Bonded Copper–Graphite Brush Materials. *Tribology Letters*, 67(3), 77-87.

37. Xu, E., Huang, J., Li, Y., Zhu, Z., Cheng, M., Li, D., Zhong, H., Liu, J. ve Jiang, Y. (2019). Graphite cluster/copper-based powder metallurgy composite for pantograph slider with well-behaved mechanical and wear performance. *Powder Technology*, 344, 551–560.
38. Poljanec, D., Kalin, M. ve Kumar, L. (2018). Influence of contact parameters on the tribological behaviour of various graphite/graphite sliding electrical contacts. *Wear*, 406–407, 75–83.
39. Benfoughal, A., Bouchoucha, A. ve Mouadji, Y. (2018). Effect of electrical current on friction and wear behavior of copper against graphite for low sliding speeds. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 80(3), 117–130.
40. Muchammad, Syafa'at, I., Hilmy, F., Tauviqirrahman, M. ve Jamari. (2018). Wear analysis of spherical graphite cast iron using pin-on disc tribotester. *Journal of Physical Science*, 29, 15–26.
41. Mahdi, F. M., Eaqoob, J. A. ve Muhialdeen, F. R. (2017). Mechanical and Physical Properties of Hybrid Cu-Graphite Composites Prepared via Powder Metallurgy Technique. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 24(1), 11–24.
42. Mazloun, A., Kováčik, J., Emmer, Š. ve Sevostianov, I. (2016). Copper–graphite composites: thermal expansion, thermal and electrical conductivities, and cross-property connections. *Journal of Materials Science*, 51(17), 7977–7990.
43. Altunpak, Y. (2010). Wear behaviour of aged Cu-Be alloy under electrical sliding. *Scientific Research and Essays*, 5(19), 2997–3002.
44. Argibay, N., Bares, J. A., Keith, J. H., Bourne, G. R. ve Sawyer, W. G. (2010). Copper-beryllium metal fiber brushes in high current density sliding electrical contacts. *Wear*, 268(11–12), 1230–1236.
45. Jia, S. G., Liu, P., Ren, F. Z., Tian, B. H., Zheng, M. S. ve Zhou, G. S. (2007). Sliding wear behavior of copper alloy contact wire against copper-based strip for high-speed electrified railways. *Wear*, 262(7–8), 772–777.
46. Tsujikawa, M., Demizu, K., Hino, M. ve Kawamoto, M. (2003). The effects of an electric current on the sliding wear of cast iron. *International Journal of Cast Metals Research*, 16(1–3), 263–268.
47. Orumwense, F. F. O., Okorie, B. A., Okeakpu, E. O., Obiora, E. N., ve Onyeji, L. I. (2001). Sintered copper-graphite powder compacts for industrial applications. *Powder Metallurgy*, 44(1), 62–66.
48. Song, C., Sun, Y., Zhang, Y., Pang, X., Chen, T., Sun, C., ve Zhang, Y. (2021). Current-carrying property and damage mechanism of rolling contact pairs in different water conditions: From vapor to liquid. *Wear*, 477, 203857.

49. Liu, R., Cheng, K., Chen, J., Xiong, X., ve Lin, X. (2020). Friction and wear properties of high temperature and low temperature sintered copper-graphite brushes at different ambient temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 7288–7296.
50. Zhao, J. hua, Li, P., Tang, Q., Zhang, Y. qing, He, J. sheng, ve He, K. (2017). Influence of Metal-Coated Graphite Powders on Microstructure and Properties of the Bronze-Matrix/Graphite Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(2), 792–801.
51. Liao, Q., Wei, W., Zuo, H., Li, X., Yang, Z., Xiao, S., ve Wu, G. (2021). Interfacial bonding enhancement and properties improvement of carbon/copper composites based on nickel doping. *Composite Interfaces*, 28(6), 637–649.
52. Wei, W., Song, Y., Yang, Z., Gao, G., Xu, P., Lu, M., Tu, C., Chen, M., ve Wu, G. (2019). Investigation of the impacts of thermal shock on carbon composite materials. *Materials*, 12(3), 1–9.
53. Cui, L., Luo, R., Wang, L., Luo, H., ve Deng, C. (2018). Novel copper-impregnated carbon strip for sliding contact materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 1846–1853.
54. Li, S., Yang, X., Kang, Y., Li, Z., ve Li, H. (2022). Progress on Current-Carry Friction and Wear: An Overview from Measurements to Mechanism. *Coatings*, 12(9), 1345.
55. Chen, J., Ren, S., He, X., ve Qu, X. (2017). Properties and microstructure of nickel-coated graphite flakes/copper composites fabricated by spark plasma sintering. *Carbon*, 121, 25–34.
56. Kubota, Y., Nagasaka, S., Miyauchi, T., Yamashita, C., ve Kakishima, H. (2013). Sliding wear behavior of copper alloy impregnated C/C composites under an electrical current. *Wear*, 302(1–2), 1492–1498.
57. Williams, J. A. (1999). Wear modelling: Analytical, computational and mapping: A continuum mechanics approach. *Wear*, 225–229(I), 1–17.
58. Hutchings, I., ve Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and wear of engineering materials*. (2. Baskı). Oxford: Butterworth-Heinemann, 1–388.
59. Bayer, R. G. (2004). *Mechanical wear fundamentals and testing*. (2. Baskı). New York: Marcel Dekker, 50-248.
60. Gahr, K.-H. Z. (1987). *Microstructure and Wear of Materials*. (1. Baskı). Siegen: Elsevier, 159-347.
61. Podgornik, B. (2022). Adhesive Wear Failures. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 22(1), 113–138.

62. Devaraju, A. (2015). A Critical Review on Different. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 6(11), 77–83.
63. Bhushan, B. (2013). *Introduction to Tribology*. (2. Baskı). New Jersey: John Wiley ve Sons, 1-744.
64. Budinski, K. G. (2017). *Friction, Wear and Erosion Atlas*. (1. Baskı). London: CRC Press, 17-58.
65. İnternet: Erdem, V. E., Arisoy, C. F., Başman, G., ve Şeşen, M. K. (2007). SAE 1060 Çeliğinin Erozif Aşınma Özelliklerinin Aşınmaya Dirençli Ticari Çelik Plakalarla Karşılaştırılması. *MMO*, 1-6. Web: <https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/P14.pdf> / Son Erişim Tarihi: 16.05.2023.
66. Sheldon, G. L. (1970). Similarities and differences in the erosion behavior of materials. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 92(3), 619–626.
67. Finne, I. (1960). Erosion of surfaces. *Wear*, 3, 87–103.
68. Holm, R. (1967). *Electric Contacts*. (4. Baskı). New York:Springer-Verlag, 197-306.
69. Archard, J. F. (1953). Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981–988.
70. Burwell, J. T. ve Strang, C. D. (1952). On the empirical law of adhesive wear. *Journal of Applied Physics*, 23(1), 18–28.
71. Rabinowicz, E. ve Tabor, D. (1951). Metallic transfer between sliding metals: an autoradiographic study. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 208(1095), 455–475.
72. Venkatesan, B. S. (1991). Sliding Friction And Wear Of Plain Carbon Steels in Air and Vacuum. *Wear*, 153(1), 163-178.
73. Wilson, S. ve Alpas, A. T. (1999). Thermal effects on mild wear transitions in dry sliding of an aluminum alloy. *Wear*, 225–229(1), 440–449.
74. Lim, S. C. ve Ashby, M. F. (1987). Overview no. 55 Wear-Mechanism maps. *Acta Metallurgica*, 35(1), 1–24.
75. Khrushchov, M. M. (1974). Principles of abrasive wear. *Wear*, 28(1), 69–88.
76. Moore, M. A. (1974). The relationship between the abrasive wear resistance, hardness and microstructure of ferritic materials. *Wear*, 28(1), 59–68.

77. Larsen-Badse, J., ve Mathew, K. G. (1969). Influence of structure on the abrasion resistance of a 1040 steel. *Wear*, 14(3), 199–205.
78. Sugishita, J., ve Fujiyoshi, S. (1981). The effect of cast iron graphites on friction and wear performance I: Graphite film formation on grey cast iron surfaces. *Wear*, 66(2), 209–221.
79. Akoral, E. (2003). *Toz Metalürjisi Yöntemi ile Al-SiC Kompozit Malzeme Üretimi ve İşlenebilirliğinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 55-170.
80. Sarıtaş, S., Türker, M, Durlu, N. (Editörler). (2005). *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri*, Ankara: Türk Toz Metalurjisi Yayınları, 124-347.
81. Bocchini, G. (1991). Filling effects on density and surface micro-geometry of metal powder parts. *Metallurgia Italiana*, 83(5), 1-11.
82. Şimşek, İ., Özyürek, D. Ve Şimşek, D. (2019). Farklı Presleme Basınçları İle Üretilen Toz Metal Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 54-62.
83. Ayata, A. (2014). *Toz Metal Alüminyum Malzemelerin Mikrodalga Enerjisi İle Sinterlenebilirliğinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
84. Sevim, M. A., Çelt, A. C. ve Kabar, S. (2020). Demiryollarında Raylara Uygulanan Tahribatsız Muayene Yöntemleri. *Demiryolu Mühendisliği Dergisi*, 11, 60–74.
85. Marshall, R. A. (1976). The mechanism of current transfer in high current sliding contacts. *Wear*, 37(2), 233–240.
86. Casstevens, J. M., Rylander, H. G. ve Eliezer, Z. (1978). Influence Of High Velocities And High Current Densities On The Friction And Wear Behavior Of Copper- Graphite Brushes. *Wear*, 48(1), 121–130.
87. Bouchoucha, A., Benfoughal, A. ve Mouadji, Y. (2018). Effect of electrical current on friction and wear behavior of copper against graphite for low sliding speeds. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 80(3), 1-14.
88. Dahale, P. S., Pawar, P. D. ve Patil, V. G. (2018). Assessment of Boundary Conditions for FEA of Mounting Bracket Using Co-relation with Experimental Results. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 13290–13300.
89. He, B., Yang, W. ve Liu, F. (2019). The material parameter design and finite element simulation of the quadrilateral thermal cloak device. *Applied Mathematics Letters*, 94, 99–104.

90. Chen, K., Ma, H., Che, L., Li, Z. ve Wen, B. (2019). Comparison of meshing characteristics of helical gears with spalling fault using analytical and finite-element methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 121, 279–298.
91. Parthasarathy, V. N. ve Kodiyalam, S. (1991). A constrained optimization approach to finite element mesh smoothing. *Finite Elements in Analysis and Design*, 9(4), 309–320.
92. Crawford, R. P., Rosenberg, W. S. ve Keaveny, T. M. (2003). Quantitative computed tomography-based finite element models of the human lumbar vertebral body: Effect of element size on stiffness, damage, and fracture strength predictions. *Journal of Biomechanical Engineering*, 125(4), 434–438.
93. Nayak, D. ve Debata, M. (2014). Effect of composition and milling time on mechanical and wear performance of copper-graphite composites processed by powder metallurgy route. *Powder Metallurgy*, 57(4), 265–273.
94. Grandin, M. ve Wiklund, U. (2018). Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact. *Tribology International*, 121, 1–9.
95. Zou, C., Chen, Z., Guo, E., Kang, H., Fan, G., Wang, W., Li, R., Zhang, S. ve Wang, T. (2018). A nano-micro dual-scale particulate-reinforced copper matrix composite with high strength, high electrical conductivity and superior wear resistance. *The Royal Society of Chemistry Advances*, 8(54), 30777–30782.
96. Wu, J. Y., Zhou, Y. C., ve Wang, J. Y. (2006). Tribological behavior of Ti₂SnC particulate reinforced copper matrix composites. *Materials Science and Engineering A*, 422(1–2), 266–271.
97. Rajkumar, K., ve Aravindan, S. (2009). Microwave sintering of copper-graphite composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(15–16), 5601–5605.



Gazili olmak ayrıcalıktır