T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

AlMg3/SiCp KOMPOZİT MALZEMELERİN OTOMOTİV FREN SİSTEMLERİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

EMRE GÜNÖZEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi NİLHAN ÜRKMEZ TAŞKIN

EDİRNE - 2022

Emre GÜNÖZEN'in hazırladığı '**AlMg3/SiCp Kompozit Malzemelerin Otomotiv Fren Sistemlerinde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi'** başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında bir **Yüksek lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Ünvan, Ad, Soyad):	İmza
Prof. Dr. İbrahim SEVİM	……
Doç. Dr. Gürkan İRSEL	……
Dr. Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN	……

Tez Savunma Tarihi: ...../……/……

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Dr. Öğr. Üyesi NİLHAN ÜRKMEZ TAŞKIN
Tez Danışmanı ……

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

……

Prof. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

20 / 12 / 2022

Emre GÜNÖZEN

İmza

Yüksek Lisans Tezi

AlMg3/SiCp Kompozit Malzemelerin Otomotiv Fren Sistemlerinde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

ÖZET

Otomotiv sektöründe fren sistemlerinden değişik çalışma ve ortam koşullarında hayati önem taşıyan yavaşlatma veya durdurma görevini yerine getirmesi beklenir.

Parçacık takviyeli alüminyum kompozit malzemeler üstün mekanik özellikleri ve sıcaklık mukavemeti ile fren malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Disk malzemesi olarak kullanımı ile dökme demire göre yarıdan fazla ağırlık azalması sağlanabilir. Ağırlıkta azalma aracın daha kolay hızlanabilmesine, fren mesafelerinin kısalmasına, yakıt tüketiminin ve emisyonların azalmasını sağlamaktadır. Araç emisyonlarının azalması ülkelerin sıfır CO_2 emisyonu hedeflerine ulaşmasına yardımcı olmaktadır.

Bu çalışmada farklı SiCp takviye oranlarına sahip AlMg3 alaşımı kompozitlerin değişik yük, hız ve sıcaklık parametreleri altında sürtünme katsayısı, aşınma oranları ve aşınma türleri belirlenmiştir. Çıkan sonuçların JS661 ve TS 555 standardına göre fren sistemlerinde kullanıma uygunluğu ve son ürüne dönüşmesi için gerekli olan iyileştirmeler belirlenmiştir.

Yıl : 2022

Sayfa Sayısı : 143

Anahtar Kelimeler : Metal matrisli kompozitler, fren diskleri ve fren balataları, aşınma testi

Master of Science Thesis
Investigation of Usability of Particle Reinforced Aluminum Composite Materials in Automotive Brake Systems
Trakya University Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Department

ABSTRACT

In the automotive industry, brake systems are expected to perform the vital task of slowing down or stopping in different operating and environmental conditions.

Particle-reinforced aluminum composite materials are widely used as brake materials with their superior mechanical properties and temperature resistance. With its use as a disc material, more than half a weight reduction can be achieved compared to cast iron. The reduction in weight enables the vehicle to accelerate more easily, shorten the braking distances, and reduce fuel consumption and emissions. Reducing vehicle emissions helps countries reach their zero CO2 emission targets.

In this study, friction coefficient, wear rates and wear types of AlMg3 alloy composites with different SiCp reinforcement ratios were determined under different load, speed and temperature parameters. According to the JS661 and TS 555 standards, the results were determined to be suitable for use in brake systems and the necessary improvements to turn them into the final product.

Year : 2022

Number of Pages : 143

Keywords **:** Metal matrix composites, brake disc and brake pads, friction test

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince güven ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve önerileriyle beni yönlendiren değerli hocam, tez danışmanım, Dr. Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN'a, tavsiyeleri ile bana yardımcı olan hocam Doç. Dr. Vedat TAŞKIN'a, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Biriminin, araştırmacılar için sunduğu proje (Proje Numarası: 2021/151) olanağından yararlandığım, tezimin gerçekleşmesinde maddi kaynak sağlayan değerli kurumum TRAKYA ÜNİVERSİTESİ'ne, test çalışmalarımda bana yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Harun YANAR 'Karadeniz Teknik Üniversitesi' hocama, sabır ve sevgisi ile bana güç veren, her zaman en büyük destekçim ve motivasyon kaynağım olan eşim İrem GÜNÖZEN'e, beni bugünlere getiren annem Sevim GÜNÖZEN ve babam Mesut GÜNÖZEN'e, çalışmalarım süresince sevgisini esirgemeyen, benim ile oynayacağı vakitten fedakarlık eden canım oğlum Cevher GÜNÖZEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT v
İÇİNDEKİLER vii
SİMGELER DİZİNİ x
KISALTMALAR DİZİNİ xii
BÖLÜM 1 1
GİRİŞ 1
BÖLÜM 2 5
METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER 5
2.1. Matris Malzemeleri 7
2.1.1. Matris Olarak Al Alaşımları 8
2.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviyeler 10
2.2.1. SiC Takviye Malzemesi 12
BÖLÜM 3 15
FREN SİSTEMLERİ 15
3.1. Fren Sistemlerine Giriş 15
3.2. Frenleme Kuvveti ve Frenleme Verimi 18
3.3. Diskli Frenlerde Frenleme 19
BÖLÜM 4 22
SÜRTÜNME VE AŞINMA 22
4.1. Sürtünme 22
4.1.1 Sürtünmeye Etki Eden Faktörler 24

4.2. Aşınma 24
4.2.1. Aşınmaya Etki Eden Faktörler 25
4.2.2. Aşınma Mekanizmalarına Göre Aşınma Türleri 25
4.2.3. Aşınma Kaybı Ölçüm Yöntemleri 29
BÖLÜM 5 31
FREN BALATALARI VE ÖZELLİKLERİ 31
5.1. Balata Çeşitleri 32
5.1.1. Metalik Balatalar 33
5.1.2. Metal İçermeyen Balatalar 33
5.1.3. Seramik Balatalar ve Karbon Lifli Balatalar 34
5.2. Balata Üretiminde Kullanılan Malzemeler 34
5.2.1. Takviye Malzemeleri 34
5.2.2. Dolgu Malzemeleri 35
5.2.3. Bağlayıcılar 35
5.2.4. Sürtünme Malzemeleri 35
5.2.5. Yağlayıcılar 35
BÖLÜM 6 36
FREN DİSK VE BALATA MALZEMESİ OLARAK METAL ESASLI KOMPOZİT MALZEMELER 36
BÖLÜM 7 39
LİTERATÜR TARAMASI 39
BÖLÜM 8 44
MATERYAL ve METOD 44
8.1. Malzeme 44
8.1.1. Kompozit Üretim Yöntemi 45
8.1.2. Sertlik Değerleri 47

8.1.3. Çekme Dayanımı Performansı 48
8.2. Numunelerin Hazırlanması 49
8.3. Test Aşaması 50
8.3.1. Ağırlık Ölçümü 50
8.3.2. Yoğunluk Ölçümü 51
8.3.3. Aşınma Testi 51
8.3.4. SEM Görüntüleme 52
BÖLÜM 9 54
BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER 54
9.1. Test Sonuçlarının ve SEM Analizlerinin Değerlendirilmesi 54
9.2. Test Sonuçlarının TS 555 ve SAE J661 Standartlarına Göre Değerlendirilmesi 110
9.3. SEM Analizinde Ölçülen Aşınma Çaplarının Değerlendirilmesi 115
BÖLÜM 10 118
SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR 118
KAYNAKLAR 121
ÖZGEÇMİŞ 125

SİMGELER DİZİNİ

Al	Alüminyum
Al_2O_3	Alumina
B	Boron
B_4C	Bor karbür
Co	Kobalt
Cu	Bakır
d	Yoğunluk
E_k	Kinetik Enerji
F	Kuvvet
H	Sertlik
m	Ağırlık
Mg	Magnezyum
Ni	Nikel
O	Oksijen
R	Yarıçap
s	Saniye
Sb	Antimon
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
SiCp	Silisyum karbür parçacık
Sn	Kalay
T_B	Frenleme torku
Ti	Titanyum
Zn	Çinko
V	Hız
W	Normal yük

Ws	Özgül aşınma miktarı
η_f	Frenleme verimi
μ	Sürtünme katsayısı

KISALTMALAR DİZİNİ

Al-MMK	Alüminyum metal matrisli kompozit
C-C	Karbon karbon
EX	Hadde oranı
MMK	Metal matris kompozit
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TX	Takviye oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Fren sistemlerini çeşitleri 2
Şekil 1.2. Disk ve kampanalı frenlerin üretiminde kullanılan malzemelerin dağılımı 3
Şekil 1.3. Balata üretiminde kullanılan malzemeler 4
Şekil 2.1. Endüstriyel genel olan metal matris malzemeleri 10
Şekil 2.2. MMK üretiminde kullanılan takviye elemanı türlerinin oranları 11
Şekil 2.3. MMK üretiminde endüstriyel firmalar tarafından kullanılan takviye fazlarının kullanım oranları 14
Şekil 3.1. Otomotiv hidrolik fren sistemi 16
Şekil 3.2. Diskli fren sistemleri ve sistemi oluşturan elemanlar 20
Şekil 4.1. Statik, kayma ve yuvarlama sürtünmesi a) statik sürtünme, b) kayma sürtünmesi, c) yuvarlanma sürtünmesi 22
Şekil 4.2. Kayma veya yuvarlanma sırasında hareketin gerçekleşmesi için gerekli olan sürtünme kuvvetleri 23
Şekil 4.3. Hidrodinamik yağlamada oluşan sürtünme tabakaları 24
Şekil 4.4. Tribolojik sistemin şematik gösterimi 25
Şekil 4.5. Aşınma çeşitleri 26
Şekil 4.6. Adhesif Aşınma 27
Şekil 4.7. Abrasif Aşınma 28
Şekil 8.1. Sıkıştırma döküm metodu 46
Şekil 8.2. AlMg3/%20SiCp kompozit malzemesinin a) %20 haddeleme uygulanmış b) haddelenmemiş SEM mikro yapı fotoğrafları 47
Şekil 8.3. Takviyesiz alaşım ve %20 SiC içeren kompozit malzemenin haddeleme oranlarına göre yüzey sertlik artışı 48
Şekil 8.4. Farklı takviye ve hadde oranlarında çekme dayanımları 48
Şekil 8.5. Takviye oranına göre kopma uzamasının değişimi 49
Şekil 8.6. Excetek V650G Plus tel kesme (EDM) tezgahı 50

Şekil 8.7. Yüzey parlatma cihazı.....50
Şekil 8.8. UTS Tribolog çok fonksiyonlu tribometre 51
Şekil 8.9. Taramalı Elektron Mikroskobu.....53
Şekil 9.1. Takviye içermeyen, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında sürtünme katsayısı değişimleri.....55
Şekil 9.2. Takviye içermeyen, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında aşınma oranları.....59
Şekil 9.3. Takviye içermeyen numunelerin 15 N yükte (0,2 m/s hız, 25°C sıcaklıkta) test sonrası numune a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş.....60
Şekil 9.4. Takviye içermeyen numunelerin 0,4 m/s hızda (10N yükte, 25°C sıcaklıkta) test sonrası numune a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş 60
Şekil 9.5. Takviye içermeyen numunelerin 150°C sıcaklıkta (10N yükte, 0,2 m/s hızda) test sonrası numune ve bilye a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş 60
Şekil 9.6. Kayma mesafesine göre sürtünme katsayısı değişimi 61
Şekil 9.7. T0E0 0,2 m/s hızda mesafeye bağlı sürtünme katsayısı değişimi 61
Şekil 9.8. T0E0 numunesinin hız – zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 62
Şekil 9.9. T0E20 numunesinin hız – zamana göre sürtünme katsayısı değişimi 62
Şekil 9.10. T0E0 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....63
Şekil 9.11. T0E20 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....64
Şekil 9.12. T0E0 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 64
Şekil 9.13. T0E20 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi ..65
Şekil 9.14. T0E0 SEM İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c)0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150^{o}C sıcaklıkta.....66
Şekil 9.15. T0E20 SEM İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c) 0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150^{o}C sıcaklıkta.....67
Şekil 9.16. %10SiC takviyeli, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında sürtünme katsayısı değişimleri.....69

Şekil 9.17. %10SiC Takviyeli, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında aşınma oranları 72
Şekil 9.18. %10 SiC takviye içeren numunelerde 15 N yükte (0,2 m/s hız, 25°C sıcaklıkta) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş 74
Şekil 9.19. %10 SiC takviye içeren numunelerde 0,4 m/s hızda (10N yük, 25°C sıcaklıkta) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş 74
Şekil 9.20. %10 SiC takviye içeren numunelerde 150ºC sıcaklıkta (10N yük, 0,2 m/s hızda) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş 74
Şekil 9.21. T10E0 numunesinin hız – zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 75
Şekil 9.22. T10E20 numunesinin hız - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 75
Şekil 9.23. T10E0 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 76
Şekil 9.24. T10E20 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 77
Şekil 9.25. T10E0 numunesinin sıcaklık – zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi .. 77
Şekil 9.26. T10E20 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 78
Şekil 9.27. T10E0 SEM İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c)0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°Csıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta 79
Şekil 9.28. T10E20 SEM İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c) 0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta 80
Şekil 9.29. %15 SiC takviyeli, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında sürtünme katsayısı değişimleri 82
Şekil 9.30. %15 SiC Takviyeli, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında aşınma oranları 86
Şekil 9.31. %15 SiC takviye içeren numunelerde 15 N yükte (0,2 m/s hız, 25°C sıcaklıkta) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş 87
Şekil 9.32. %15 SiC takviye içeren numunelerde 0,4 m/s hızda (10N yükte, 25°C sıcaklıkta) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş 88
Şekil 9.33. %15 SiC takviye içeren numunelerde 150°C sıcaklıkta (10N yükte, 0,2 m/s hızda) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş 88
Şekil 9.34. T150E0 numunesinin hız - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 89

Şekil 9.35. T15E20 numunesinin hız - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 89
Şekil 9.36. T15E0 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 90
Şekil 9.37. T15E20 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 91
Şekil 9.38. T15E0 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi .. 91
Şekil 9.39. T15E20 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 92
Şekil 9.40. T15E0 İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c) 0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta 93
Şekil 9.41. T15E20 SEM İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c) 0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta 94
Şekil 9.42. %20 SiC takviyeli, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında sürtünme katsayısı değişimleri 96
Şekil 9.43. %20 SiC Takviyeli, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında aşınma oranları 99
Şekil 9.44. %20 SiC takviye içeren numunelerde 15 N yükte (0,2 m/s hız, 25°C sıcaklıkta) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş 100
Şekil 9.45. %20 SiC takviye içeren numunelerde 0,4 m/s hızda (10N yük, 25°C sıcaklıkta) test sonrası görselleri a) Haddelenmemiş, b) Haddelenmiş 101
Şekil 9.46. %20 SiC takviye içeren numunelerde 25°C sıcaklıkta (10N yük, 0,2 m/s hızda) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş 101
Şekil 9.47. T20E0 numunesinin hız - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 102
Şekil 9.48. T20E20 numunesinin hız – zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 102
Şekil 9.49. T20E0 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 103
Şekil 9.50. T20E20 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 104
Şekil 9.51. T20E0 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 104
Şekil 9.52. T20E20 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 105
Şekil 9.53. T20E0 SEM incelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c) 0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta 106
Şekil 9.54. T20E20 SEM İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c) 0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta 107

Şekil 9.55. T35E0 numunesinin hız – zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 108
Şekil 9.56. T35E0 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi.....109
Şekil 9.57. T35E0 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi 109
Şekil 9.58. Haddelenmemiş numunelerde sürtünme katsayılarının TS 555 standartlarına göre değerlendirilmesi.....111
Şekil 9.59. %20 oranında haddelenmiş numunelerde sürtünme katsayılarının TS 555 standartlarına göre değerlendirilmesi.....113
Şekil 9.60. Aşınma iz genişliği karşılaştırılması a) T0E0 15N yükte, b) T0E20 15N yükte, c) T0E0 0,4 m/s hızda, d) T0E20 0,4 m/s hızda, e) T0E0 150°C sıcaklıkta, f) T0E20 150°C sıcaklıkta 116
Şekil 9.61. Aşınma iz genişliği karşılaştırılması a) T20E0 15N yükte, b) T20E20 15N yükte, c) T20E0 0,4 m/s hızda, d) T20E20 0,4 m/s hızda, e) T20E0 150°C sıcaklıkta, f) T20E20 150°C sıcaklıkta 117

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Matris/takviye kombinasyonları 7
Çizelge 2.2. Farklı takviye malzemelerine ait mekanik özellikleri 12
Çizelge 2.3. Takviye oranına göre mmk balata disklerinin mekanik özellikleri 13
Çizelge 8.1. AA5754 alaşımın fiziksel özellikleri 44
Çizelge 8.2. Kompozit malzemenin kimyasal bileşimi 45
Çizelge 8.3. Kompozit üretimine takviye malzemesi olarak kullanılabilen seramik takviye malzemelerinin özellikleri 45
Çizelge 8.4. Deney numunelerinin teorik ve ölçülen özgül ağırlıkları ile gözeneklilik 46
Çizelge 8.5. SAE J661 standartlarına göre balataların sınıflandırılması 52
Çizelge 9.1. Takviyesiz haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin ağırlık kayıpları ve sürtünme katsayısı 57
Çizelge 9.2. SiC takviye oranı %10 olan haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin ağırlık kayıpları ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri 70
Çizelge 9.3. SiC takviye oranı %15 olan haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin ağırlık kayıpları ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri 84
Çizelge 9.4. SiC takviye oranı %20 olan haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin ağırlık kayıpları ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri 97
Çizelge 9.5. Tip 1 balataların sürtünme karakteristikleri 110
Çizelge 9.6. Tip 2 balataların sürtünme karakteristikleri 110
Çizelge 9.7. Tip 3 balataların sürtünme karakteristikleri 111
Çizelge 9.8. Tip 4 balataların sürtünme karakteristikleri 111
Çizelge 9.9. Sürtünme katsayılarının SAE J661 standartına göre değerlendirilmesi ... 114

BÖLÜM 1

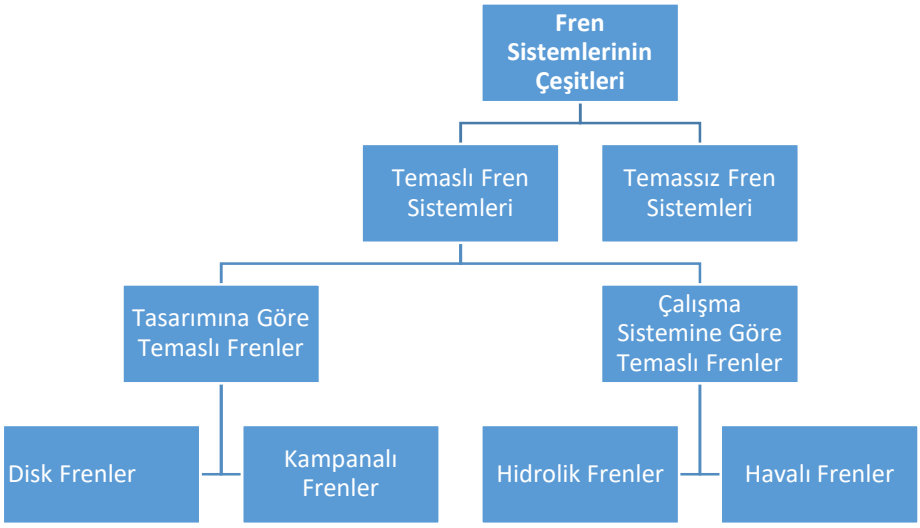
GİRİŞ

Hareket halindeki, dönen ve yürüyen sistemlerde gerektiğinde hareketin durdurulması için fren sistemlerine ihtiyaç vardır. Frenleme sistemlerinin malzeme veya tasarımında yapılacak en ufak bir hata can kayıplarına yol açabileceği için dikkatle tasarlanması gereken sistemlerdir.

Gelişen teknoloji ile seyahat sürelerinin kısalması için taşıt hızları artmaktadır. Artan araç çekiş güçleri sayesinde taşınabilen yük ağırlıkları da artmakta bu da fren sistemlerinde şartları ağırlaşmaktadır. Araçlarda ortaya çıkan zor çalışma koşullarına uygun sürtünme malzemelerinin geliştirilmesine acil ihtiyaç duyulmaktadır.

Fren sistemleri, hız, yük, yüksek çalışma sıcaklıkları gibi çalışma koşullarından etkilenir. Olumsuz hava ve arazide ortaya çıkabilecek; su, toz ve çamur gibi sürtünme elemanları arasında sürtünme katsayısını değiştirebilecek ortam koşulları da malzeme tercihlerini etkileyen diğer parametrelerdir.

Günümüzde kampana fren ve disk fren sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler temaslı fren sistemleri olup bunlar dışında az da olsa temassız elektro-manyetik olarak çalışan sistemlerde mevcuttur.

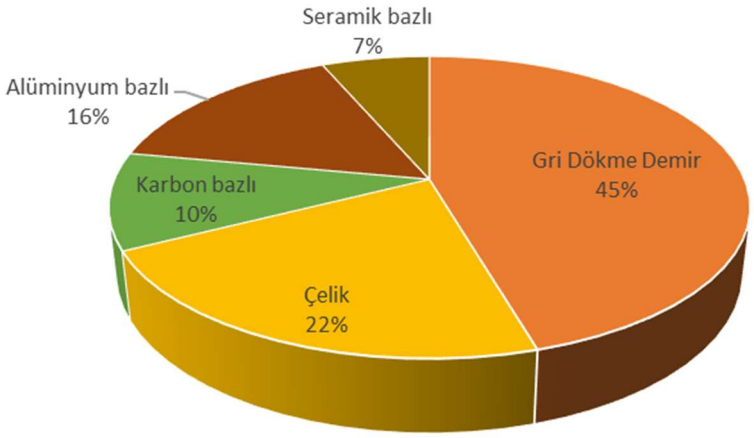


Şekil 1.1. Fren sistemlerini çeşitleri (Kumar, Bharti, Goyal, & Patel, 2021)

Enerjinin korunması prensibi ile çalışan fren sistemlerinde aracın kinetik enerjisi sürtünme malzemesi ile ısı enerjisine dönüşmektedir. Hareket eden cihazın hareket yönüne karşı bir sürtünme kuvveti vardır. Bu karşıt kuvvet, aracın yavaşlamasından sorumludur. Hareket eden aracın tüm kinetik enerjisi sürtünme ısısına dönüştüğünde araç durur.

Temaslı bir fren sisteminin iki ana bileşeni vardır. Bunlar; fren balatası ve hareketli aracın tekerleği ile dönen disk veya kampanadır.

Fren diski veya kampana malzemesi; yüksek mukavemete, yüksek aşınma direncine, yüksek termal iletkenliğe, düşük termal genleşmeye ve yüksek termal dayanıma sahip olmalıdır. Bugün fren diskleri ve fren kampanaları yapmak için kullanılan pek çok farklı malzeme vardır. En çok kullanılan malzemeler, gri dökme demir, çelik, karbon bazlı malzemeler, alüminyum bazlı malzemeler ve seramik bazlı malzemeler olmak üzere beş farklı kategoride sınıflandırılabilir. Şekil 1.2'de disk ve kampanalı frenlerin üretiminde kullanılan malzemelerin dağılım yüzdeleri gösterilmiştir.



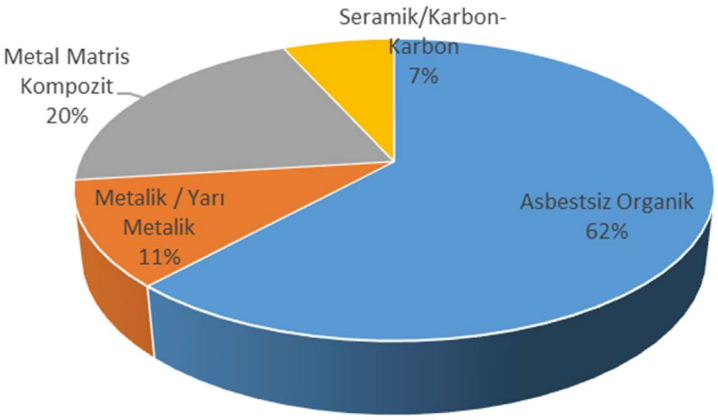
Şekil 1.2. Disk ve kampanalı frenlerin üretiminde kullanılan malzemelerin dağılımı (Kumar vd., 2021)

Fren balatası; dönen fren diskine veya fren kampanasına sürtünen sabit sürtünme malzemesidir. Bir fren balatası için gerekli özelliklerden bazıları hafiflik, korozyon direnci, sıcaklık dayanımı, düşük aşınma oranı, düşük gürültü, uzun ömür ve düşük maliyettir.

Fren balatası üretiminde farklı malzemeler kullanılmış olup, uzun yıllar boyunca mekanik özellikleri ve sürtünme katsayısı uygunluğu sebebiyle asbest en yaygın kullanılan malzemelerden biri olarak tercih edilmiştir. Asbestin hem çevresel etkileri hemde temas eden bakım personellerinde kanserojen etkiye sahip olması sebebiyle Çevre Koruma Ajansı tarafından 1986 yılında kullanımı yasaklanmış ve alternatif malzemelere yönelme ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Günümüzde demir ve çelik malzemelerin kullanımı hala yaygın olsa da zorlaşan şartlar ile birlikte çevresel, ortam ve sağlık etkenleri göz önüne alındığında seramik ve alüminyum içerikli malzemelerin kullanımı da yaygınlaşmaktadır.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan dört farklı fren balata malzemesi; metalik veya yarı metalik fren balataları, asbestsiz organik fren balataları, metal matris kompozit (MMK) fren balataları ve seramik veya karbon-karbon fren balatalarıdır. Fren balataları veya fren balatalarının yapımında en çok kullanılan malzemeler Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Balata üretiminde kullanılan malzemeler (Kumar vd., 2021)

Hem disk, hem balata malzemesi olarak kullanılan dökme demir ve çelik yüksek yoğunluk ve ağırlık sebebiyle düşük dinamik özellikler göstermektedir.

Asbest içermeyen organik fren balatalarının düşük maliyetli ve çevre dostu olmaları nedeniyle günümüzde en yaygın şekilde kullanıldığı görülmektedir. Bu tip malzemeler hafif şartlarda çalışan araçlar için tercih edilmektedir. Demiryolu ve havayolu uygulamalarında hız ve sıcaklıkların arttığı araçlarda MMK ve seramik fren balataları daha uygun olmaktadır. Antimon (Sb), Bakır (Cu) ve ağır metallerde frenleme esnasında çevreye zararlı kül bileşenleri ortaya çıkmaktadır. Euro 7 normları ile birlikte doğa dostu malzeme kullanımı daha da önemli hale gelmiştir.

Metal matrisli kompozit malzemelerin fren sistemlerinde kullanılabilirliğinin araştırılması aşamalarında farklı matris (alüminyum ve magnezyum gibi) ve farklı takviye (Silisyum karbür, Grafit v.b) malzemeleri kullanılarak çalışmalar yapılmış ve yapılan testlerde fiziksel, termal, kimyasal, mekanik özelliklerde iyileşme ve fren sistemlerinde ağırlık azalması ile birlikte yakıt ekonomisi sağlanacağı görülmüştür. (Shanker, 2018). Bu sebeple, alüminyum matrisli kompozit malzemelerin düşük ağırlıkları, yüksek dayanım ve yüksek aşınma direnci ile bu çalışmalarda giderek artan bir şekilde kullanılacağı aşikârdır.

Alüminyum matrisli kompozit malzemeler düşük ağırlıkları, yüksek dayanım ve yüksek aşınma direnci ile artan bir kullanım alanına sahiptir.

BÖLÜM 2

METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Metal matrisli kompozit malzemeler, ihtiyaç duyulan özellikleri sağlamak üzere en az biri metal olan iki veya daha fazla farklı malzemenin sistematik bileşimiyle elde edilen yeni malzemelerdir (Kılıçkap, Çakır, & İnan, 2003). Bir kompozit malzemede matris malzemesi metal olup, içerisinde takviye şekline göre sürekli fiber, kısa fiber ve partikül fazında bulunur.

Metal matrisli kompozit malzeme üretilmesinde, farklı üretim proseslerinde matris ve takviye malzemesi beraber karıştırılır. Farklı bileşenlerden kompozit elde edilmektedir. Metal matris malzemeleri genelde saf olarak değil alaşım halinde bulunurlar. (Akdoğan Eker, 2014).

MMK'ler yapısal malzeme olarak kullanması için sahip olduğu avantajlar aşağıda sıralanmıştır.

- Mekanik dayanım,
- Yüksek elastisite modülü,
- Yüksek sağlamlık ve darbe özellikleri,
- Termal şok veya değişen sıcaklıkları karşı düşük hassasiyet,
- Yüksek yüzey dayanıklılığı
- Yüzey hatalarına karşı düşük hassasiyet,
- Yüksek elektrik ve ısıl iletkenlik,
- Yüksek çevresel vakum direnci

Üretilen kompozit malzemelerde tüm özelliklerin aynı anda sağlanması mümkün olmadığı gibi böyle bir gereksinimde yoktur. Uygun matris/takviye elemanı seçiminin, sistemin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi büyüktür. İstenilen özellikleri elde etmek için üretimde metot ve kullanılan malzeme özellikleri kompozit malzemenin performansı için çok önemli rol oynamaktadır.

Metal matrisli kompozitlerin döküm ve reaksiyonla üretim tekniklerinin ucuz ve pratik olması sebebiyle toz metalürjisine alternatif olarak kullanımı artmaktadır.

Seramiklerin yüksek elastisite modül ve metallerin yüksek süneklik özelliklerini birleştiren bu malzemeler, havacılık, otomotiv ve savunma sanayisinde kullanılmaya başlanmıştır. MMK'ların elastisite modülü ve mukavemeti geniş bir sıcaklık aralığında fren balatalarında yaygın kullanımı olan reçine matrisli malzemelerden daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklardaki performansları açısından cam fiber takviyeli plastikler ile kıyaslandığı zaman çok daha üstündür.

Kompozitler ile uygulamadaki ihtiyaçlara karşılık verebilmek için en iyi matris ve elyaf çifti tercih edilmelidir.

Kompozit malzemelerin dezavantajları ise;

- Üretim güçlüğü,
- Bazı türlerinin üretim maliyetlerinin yüksek olması,
- Bazı durumlarda yüzey kalite problemleri,
- Geri dönüşümünün olmayışı,
- Kırılma uzamasının az oluşudur. (Kılıçkap vd., 2003)

Metal matrisli kompozit malzemeler üzerine ilk çalışmalar sürekli fiber takviyeli kompozitler üzerine olmuştur. Son ürüne dönüşme maliyeti ve üretim kolaylığı kullanım için önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. Sürekli fiberlerin üretim ve maliyet problemleri sebebiyle alternatif olarak süreksiz fiberler ve viskerler ticari olarak kullanım alanı bulmuşlardır.

Partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler; yüksek aşınma direnci, yüksek elastisite modülü ve mukavemete sahiptir. Kolay ve düşük maliyetli olarak farklı çeşitlerde üretilmesi mümkündür. Bu avantajlar kullanım için önem taşımaktadır.

Takviye çeşidinin ve üretim yöntemlerinin fazla olması partikül takviyeli kompozitlere geniş çalışma alanları sağlamaktadır.

2.1. Matris Malzemeleri

Metal matrisli kompozitler için matris malzemesi olarak genellikle hafif metaller tercih edilmektedir. Kullanımda en çok tercih edilen alüminyum, saf ve alaşım olarakta kullanılmaktadır. Yüksek aşınma dayanımı ve düşük sürtünme değerleri için Al-Si alaşımları, düşük yoğunluk ve yüksek termal iletkenlik için Al-Mg ve Al-Cu alaşımları matris alaşımı olarak kullanılabilmektedir.

Çizelge 2.1. Matris/takviye kombinasyonları (Ürkmez, 2004).

MATRİS \ TAKVİYE MALZEMESİ	Alümina	Alümina/Silika	Boron	Grafit	Molibden	Niobyum	SiC	Si3C4	Çelik	Titanyum	TiB2	TiC	Tungsten	Yitrium	Zr
Alüminyum	*	*	*	*			*	*				*		*	*
Berilidler		*				*	*	*		*	*	*		*	*
Bakır				*			*				*		*		
Demir									*						
Demir Alüminat						*	*			*					
Kurşun	*									*					
Magnezyum	*			*				*							
Nikel Alüminat		*			*	*		*		*	*	*		*	*
Süper Alaşımlar					*	*			*				*		
Titanyum				*			*			*	*	*			
Titanyum Alüminatlar		*				*	*	*		*	*	*		*	*

Kompozit malzemelerde yüksek performans elde etmek için üretim aşamalarında matris malzemesi, takviye malzemelerini iyi ıslatabilmeli, ara yüzey bağı kuvvetli şekilde oluşturmalı, en düşük basınç ve sıcaklıkta hızlı olarak katılaşabilmelidir. Metal matrisli kompozit malzemelerde, Al matris malzemesi dışında genellikle Ti, Mg, Ni, Cu, Co ve Zn gibi metaller ve alaşımları kullanılır (Akdoğan Eker, 2014).

2.1.1. Matris Olarak Al Alaşımları

Al alaşımlarının avantajları;

- Düşük elektrik iletkenliği,
- Düşük yoğunluk,
- Elastisite modülünün yüksek olması,
- Yüksek korozyon direncine sahip,
- İyi termal dayanım,
- İyileştirilmiş aşınma ve abrasif özellikleri,
- Nispeten ucuz ve kolay üretilebilir olmasıdır (Şahin, 2006)

MMK malzemelerin üretiminde yaygın kullanım alanı bulan diğer bir malzeme de magnezyum alaşımlarıdır. Magnezyum MMK'ler;

- Yüksek dayanırlık,
- Uzama,
- Şekil verilebilirlik,
- Kaynaklanabilirlik,
- Düşük genleşme katsayısı
- Yüksek korozyon direnci özellikleriyle otomotiv ve havacılık gibi farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Başçı, 1999).

Dövme ve döküm metotları alüminyum alaşım üretimde yaygın olarak kullanılan iki alandır. EN 573'e göre standart gösterimleri verilen alüminyum ve alüminyum alaşımları içinde, Çizelge 2.2'de yer alan alüminyum alaşımları kompozit üretiminde en çok kullanılanlardır. Isıl işlem uygulanmayan alaşımlarda soğuk şekillendirme yoluyla sertlik ve mukavemeti arttırılarak mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir. Magnezyum, katı eriyik mukavemetinin artmasını sağladığı için bu serinin ana alaşım elementi olarak alaşım içerisindeki miktarı %5 e kadar çıkabilir.

Al-Mg alaşımlarından AA5754 (AlMg3), AA5052 (AlMg2,5) ve AA5182 (AlMg5Mn) bu grubun tipik ve en yaygın kullanılan alaşımlarıdır. Magnezyum içeriği

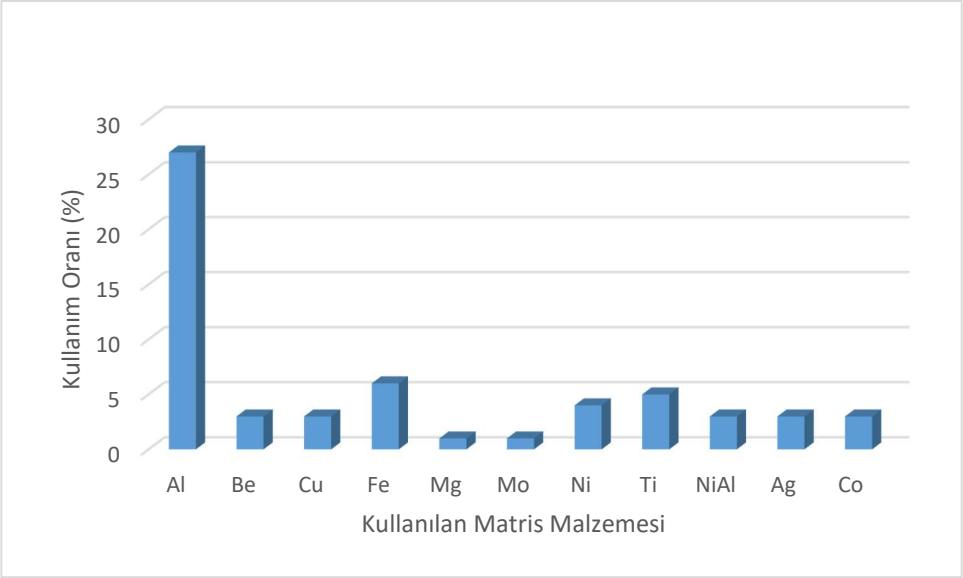
sayesinde alaşım yüksek şekillendirilebilirlik özelliği kazanırlar. Mg atomlarının katı çözeltide Al atomları yer değiştirmesi ile mekanik deformasyon esnasındaki dislokasyon hareketi engellenir. Yüksek uzama değerlerine kadar çalışma sertleşmesi geciktirilir ve erken yırtılmalar engellenir (Dündar, İnel, & Akkurt, Assan Arge Yayınları).

Çizelge 2.2. Biçimlenebilir ve dökme alüminyum alaşımlarının gösterilişleri (Ürkmez, 2004)

ALAŞIMLARIN GÖSTERİLİŞLERİ		
BİÇİMLENEBİLİR	DÖKÜM	İÇERDİĞİ ALAŞIM ELEMENTLERİ
1XXX	1XX	---
2XXX	1XX	Cu
3XXX	---	Mn
	3XX	Si+Mg; Si+Cu; Si+Mg+Cu
4XXX	4XX	Si
5XXX	5XX	Mg
6XXX	---	Mg+Si
7XXX	7XX	Zn
8XXX	---	Diğer
	8XX	Sn

Al-Cu-Mg (2xxx) ve Al-Zn-Mg-Cu (7xxx) alaşımları, mukavemet ve geniş hasar aralığı sayesinde ticari alanlarda kullanılmaktadır. Al-Mg-Cu-Si (6xxx) alaşımları yüksek korozyon direnci ve kolay üretilebilirlik avantajı sebebiyle tercih edilmektedir (Başçı, 1999).

Alüminyum metal matrisli kompozitler (Al-MMK) için üretim teknikleri: Sıvı faz, katı faz, gaz fazı üretim yöntemleri olarak genellenebilir. Parçacık katkılı Al-MMK'ler sıvı faz yoluyla daha kolay üretilmektedirler. Matris, katkı fazlarını birbirine bağlar, iletir ve bireysel katkı fazlarına dış yükleri dağıtır. (Gül & Acılar, 2007). Kompozitlere mekanik özellikleri iyileştirmek ve şekil vermek için; ekstrüzyon, haddeleme ve dövme işlemleri gibi sertleştirme prosesleri uygulanabilir. Ergitme karıştırma kalıp metodu daha ekonomiktir. Fiber takviyeli Al-MMK'ler ile çelikten yarı yarıya hafif olmasına rağmen benzer ve bazen daha üstün dayanımda kompozitler üretilebilir.



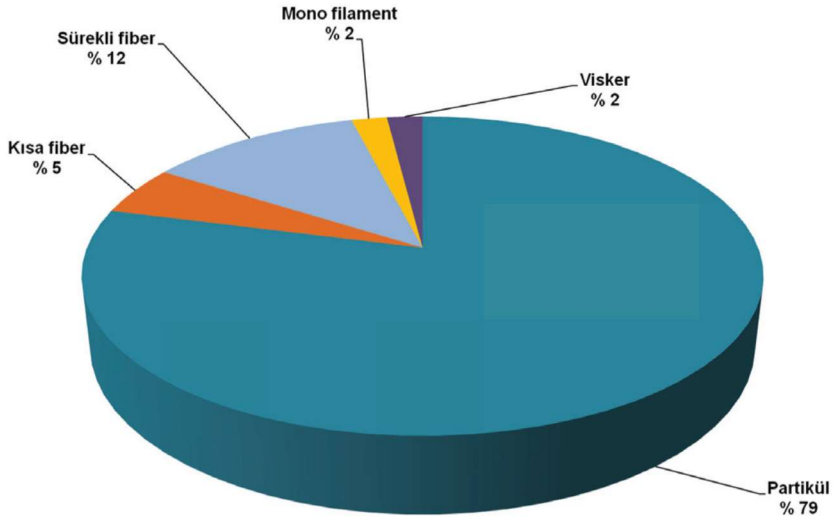
Şekil 2.1. Endüstriyel genel olan metal matris malzemeleri (Kalemtaş, 2014).

2.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviyeler

Metal matris kompozit malzemelerde takviye malzemeleri genelde seramik olup yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma dayanımı özelliklerine sahip malzemelerdir. İleri teknoloji seramikler; oksitler, karbürler ve nitrürler olarak üç gruba ayrılırlar.

Metal matris kompozit üretiminde takviye malzemeleri en-boy oranına göre sınıflandırılır ve çoğunlukla sürekli fiber, kısa fiber, visker yada partikül formlarında kullanılır.

Seramik takviyeli malzemeler yüksek sıcaklık yeteneği, yüksek mukavemet ve elastisite modülüne sahiptirler.



Şekil 2.2. MMK üretiminde kullanılan takviye elemanı türlerinin oranları (Daoud & AbouEl-khair, 2010).

Farklı takviye oranı veya takviye formuna göre farklı özellikler sağlanabilmektedir. Örnek çalışmalarda, saf alüminyum içinde fiber takviye oranı %60'a çıkartıldığında elastisite modülü 70 GPa dan 240 GPa kadar artırılabilir. Saf alüminyum içinde alümina takviye oranı %60'a çıkarıldığında ise genleşme katsayısını 24 ppm/°C'den 7 ppm/°C'e düştüğü görülmüştür. Benzer şekilde Al-%9Si-%20 SiC kompozitin aşınma direnci gri dökme demirin özelliğinden daha iyi olabilmektedir. Bu örneklere göre; uygun takviye fazları ile desteklendiğinde alüminyum veya alüminyum alaşımı özelliklerinin iyileştirilmesi mümkün olmaktadır.

Maliyetleri değerlendirildiğinde; sürekli seramik fiberlerin maliyeti, seramik partikül takviye malzemelerden daha yüksektir.

Çizelge 2.2. Farklı takviye malzemelerine ait mekanik özellikleri (Ürkmez, 2004).

Parçacık Cinsi	Boyut (µm)	Özgül ağırlık (gr/cm^3)	Çekme dayanımı (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Grafit	40-250	1,6-2,2	20	910
SiC	15-340	3,2	3	480
SiO_2	53	2,3	4,7	70
MgO	40	2,7-3,6	-	-
Si_3N_4	46	3,2	3-6	360
TiC	46	4,9	-	320
BN	46	2,25	0,8	100-500
ZrO_2	75-180	5,65-6,15	0,14	210
B_4C	40-340	2,5	6,5	480
TiO_2	20	3,9-4,3	-	-
Al_2O_3	40-340	3,97	8	460
Cam	30-120	2,55	3,5	110

2.2.1. SiC Takviye Malzemesi

SiC parçacıklar, MMK malzeme üretiminde matris içine sürekli fiber, kısa fiber, visker veya partikül formlarında katılabilir. Takviye elemanı olarak Al_2O_3 ve AlN sıvı alüminyum tarafından daha iyi ıslatılabilme özelliği ve üretim maliyetlerinin düşük olması sebebiyle çok fazla tercih edilmektedir.

SiCp takviyeli alüminyum kompozit, yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü, düşük termal genleşme katsayısı ve düşük yoğunluk özelliklerine sahiptir. Aşınma ve mekanik özelliklerin önemli olduğu havacılık, otomotiv, inşaat gibi sektörlerde kullanılabilmektedir (Gül & Acılar, 2007).

SiC seramik takviyeleri, Al_2O_3'den daha sert ve ısıya daha dayanıklıdır. Ayrıca korozyona karşı yüksek dayanım gösterir. Bu yüzden yaygın olarak hem aşındırıcı hem de refrakter olarak kullanılır. SiC fiberlerin oksidasyon direnci, sıcaklık dayanımı, rijitliğini koruma özelliği ve ergimiş halde yüzey pürüzsüzlüğü olarak bor fiberlerden daha iyidir.

Metal matris malzemelere, SiC viskerleriyle takviyesi ile toz metalürjisi tekniğiyle üretimi sayesinde mukavemet artışı sağlanabilmektedir. Bu viskerslerle güçlendirilmiş alüminyumun işlenebilirlik özelliği, sürekli SiC, bor ve alümina fiberle güçlendirilmiş esaslı kompozitten daha iyidir (Gül & Acılar, 2007).

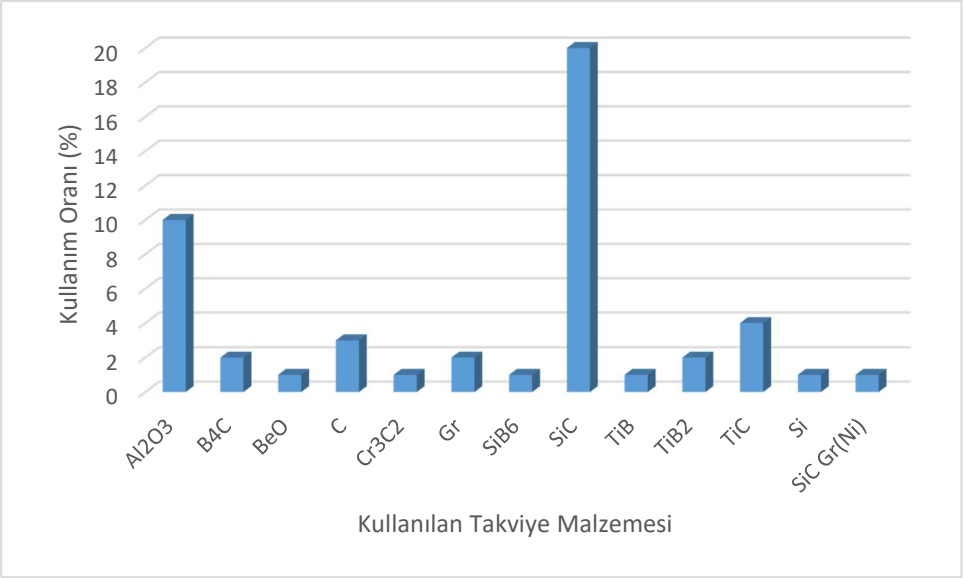
Takviye türü, takviye yapısı ve matris içerisindeki takviye oranı malzeme özelliğini etkileyen ana parametrelerdir (Wojciechowski & Sobczak, 2001).

Çizelge 2.3. Takviye oranına göre mmk balata disklerinin mekanik özellikleri

Matris Alaşımı	(Al-Si)	(Al-Si)	Gri dökme demir grafit içeren
Takviye malzemesi	SiC	SiC	-
Takviye Malzemesinin Oranı (%)	30	20	-
Yoğunluk [g/cm^3]	2.89	2.77	6.9-7.4
Çekme mukavemeti [MPa]	225	220	100-400
Elastisite modülü [GPa]	127	100	80-150
Termal genleşme katsayısı [μm/mK]	14.8	17.5	9-11
Termal iletkenlik [W/mK]	156	150	50
Özgül ısı [J/kg·K]	820	820	460-840
Maksimum çalışma sıcaklığı [°C]	480	300	800

Çizelge 2.4'e göre aynı alaşım malzemelerine farklı oranlarda SiC takviyesi yapılmış olup takviye oranı yüksek olan disklerde mekanik ve termal dayanım daha yüksek olmuştur. Dökme demirin sahip olduğu yüksek yoğunluk sebebiyle kullanıldığı fren sistemlerinde ağırlıklar fazla olmakta bu da yakıt tüketimini arttırmaktadır.

Son yıllarda SiC takviyeli Al-MMK'lar otomotiv sektöründe tribolojik özelliklerin önemli olduğu alanlarda kullanımı gittikçe artmaktadır (Özdin, 2006, Çanakçı 1998).



Şekil 2.3. MMK üretiminde endüstriyel firmalar tarafından kullanılan takviye fazlarının kullanım oranları (Kalemtaş, 2014).

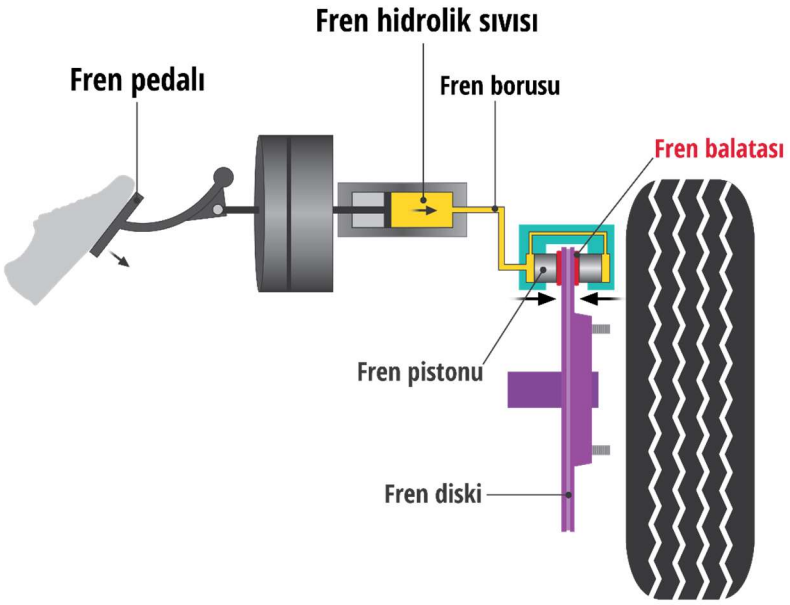
BÖLÜM 3

FREN SİSTEMLERİ

3.1. Fren Sistemlerine Giriş

Frenlemede aracı yavaşlatmak, kontrolsüz hızlanmanın ve aracın kendiliğinden harekete geçmesinin önlenmesi ana amaçtır. Sürüş konforu ve emniyeti anlamında fren sistemleri hayati önem taşımaktadır. Bir taşıtın hızını düşürmek ya da hareketini sonlandırmak için kullanılan mekanizmadır. Fren sistemi aracın emniyetle durmasının yanında yokuş yukarı ve yokuş aşağı gibi sürüş şartlarına göre sürüş kolaylığı sağlamaktadır.

Otomobillerin çoğunda disk fren sistemleri kullanılmakta olup Şekil 3.1'de görüldüğü üzere bir fren sisteminde çalışma anında fren pedalına basıldığında piston vasıtasıyla hidrolik yağı hareketi balatalara iletilir. Araç, balataların disk üzerindeki sürtünme kuvvetinin etkisiyle yavaşlamaya başlar. Uygulanan güce orantılı olarak hidrolik yağın etkisi ile balataların baskısı disk üzerinde artar ve buna bağlı olarak araç hızı düşerek yavaşlar veya durur.



Şekil 3.1. Otomotiv hidrolik fren sistemi

Bugün otomotiv endüstrisinde, bir aracın fren performansı güvenlik anlamında en çok araç freninin sürtünme sisteminden etkilenir. Fren balatasının lastik ile birlikte dönen diske karşı güvenlik, frenleme konforu (gürültü, araç titreşimi, pedal hissi, duman oluşturma, vb.) ve uzun ömür sağlaması önem kazanmaktadır (Aleksandric & Duboka, 2006). Bu talepler sürtünme sistemi ve özellikle fren balataları üzerindeki ihtiyaçları arttırmaktadır.

Frenleme verimi;

- Yataklanma süresinin kısa olmasına,
- Sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısının kararlılığına,
- Hıza bağlı sürtünme katsayısının kararlılığına,
- Basınç aktarım oranlarına bağlı sürtünme katsayısı kararlılığına,
- Statik ve dinamik sürtünme katsayısına,
- Çevresel koşullara bağlı sürtünme katsayısına,
- Mekanik özelliklere (sıkıştırılabilirlik, kesme mukavemeti, eğilme mukavemeti vb.) bağlıdır.

Fren disklerinin mekanik özelliklerini tanımlamak için elastisite modülü, yorulma gerilmesi, malzeme dövülebilirliği ve yorulma indeksinin tanımlanmasına ihtiyaç vardır (Shanker, 2018).

Aracın hareketi esnasında mevcut kinetik enerjisi frenleme durumunda fren sistemindeki sürtünmenin etkisi ile ısı enerjisine dönüşerek kullanılamaz hale gelir (Doğan, Erfidan, & Bilgin, 2016). Fren sistemlerinde balata ve fren diski mevcuttur. Arada, bir sürtünme yüzeyi oluşur, balata karşı yöndeki disk üzerine baskısı ile kontrollü bir şekilde aracın hızını azaltıp yavaşlamaya ya da tamamen durdurmaya çalışır. Artan hız ve sıcaklık gibi zor çalışma şartlarına uyum sağlayacak fren sistemlerinde malzeme seçimleri büyük önem kazanmaktadır.

Frenlerin fonksiyonu, hareket enerjisini yutarak, ısıya çevirmek ve bu ısıyı da atmosfere yaymaktır. Yeni nesil araç sistemlerinde ve özellikle elektrikli araçlarda frenleme esnasında ortaya çıkan ısı enerjisi rejenaratif sistem ile kayıp enerjinin %70 oranında tekrar enerji sistemine aktarımı da mümkün olmaktadır. Frenleme esnasında balatanın taşıyabileceğinden daha fazla ısı verilirse balatalardaki sürtünme katsayısı düşmekte, fren sisteminin yavaşlatma performansını azalmaktadır. Bu durumda balata yumuşaması terimi kullanılır. Aşırı sıcaklıkların sürekli olması durumunda, frenlerin performansında azalma, balataların çabuk aşınması, fren sisteminin hatalı çalışmasına neden olur. Balata yüzeylerinde çatlama ve fren esnasında ses meydana gelir.

Fren performansının en önemli göstergesi kısa durma mesafesidir. Bu maksimum yavaşlama ivmesi ile mümkündür. Balata kalitesi frenleme kuvvetini etkileyen parametrelerden biridir. (Sarıyerli Domaç, 2006).

Sürtünme elemanları sürekli değişebilen geniş sıcaklık aralığında, ağır yük ve yüksek hızlarda çalışmaktadır. Fren elemanlarının tercihinde bu zor çalışma koşulları göz önünde bulundurulmalıdır. Temas noktasında ortaya çıkan ısının balata veya disk tarafından alınıp dışarıya verilerek sistemden uzaklaştırılması için ısı iletim katsayısının ve özgül ısısının yüksek olması; fren sisteminde kullanılan malzemelerin minimum deformasyon göstermesi ve malzeme formunun korunması için ısıl genleşmenin düşük olması istenir (Fenton, 1996).

Fren balatasının iyi bir sürtünme çifti oluşturması, karşı malzemeye hasar vermemesi, zor termal ve mekanik etkiler altında yüksek sürtünme katsayısı sergilemesi

ve bunu koruması istenir. Fren diskleri kullanım sırasında, frenleme işlemi yapılmadığı zaman sadece merkezkaç kuvvetine, frenleme işlemi başladığında ise fren kaliperinden gelen ve sürtünme sonucu yükten gelen iki ek kuvvet daha etki eder. (Ünal & Kandil, 2020).

Fren sistemlerinde zor şartlar ve kritik öneme sahip olan ısıya karşı mukavemeti sebebiyle asbest esaslı ürünler kullanılmıştır. Asbestin sağlık problemlerine neden olması sebebiyle birçok ülkede olduğu gibi Türkiye'de de 31.12.2010 tarihinden itibaren yasaklanmıştır. Mevcut şartlarda asbestin yerine yeni kompozit balatalar geliştirilmesi ihtiyacı doğmuş ve bu çalışmalar otomotiv fren sistemlerinin bileşenlerinde büyük değişikliklere neden olmuştur. Yeni malzemeler ile birlikte balataların sıcaklık dayanımı, sürtünme ve aşınma özellikleri iyileşmiştir.

Araç kazaları ıslak, buzlu, kuru hava şartlarına, farklı yol şartlarına, aracın boş veya dolu olmasına bağlı yük şartlarına, yeni veya yıpranmış fren ve sürtünme elemanlarına, farklı sürücü sürüşünde, güvenlik sınırlarının aşıldığı durumlardaki sürtünme temasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle fren sistemi içerisindeki parçaların birbiri ile uyumlu ve verimli çalışması önemlidir.

3.2. Frenleme Kuvveti ve Frenleme Verimi

Fren, hareket halinde olan aracı en kısa mesafede, en az zamanda güvenli şekilde yavaşlatma veya durdurma işlemidir. Frenleme kuvveti, bu uygulamayı gerçekleştiren kuvvettir. Hareket eden yüzey üzerine sürtünme kuvvetinin etkisi uygulanarak araç kontrollü olarak yavaşlar veya durur. Hareket halinde bulunan her cisim kinetik enerjiye sahiptir. Kinetik enerji hareket halindeki cismin hızının karesi ile ağırlığının çarpımının yarısına eşittir.

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \tag{3.1}$$

Aşağıda hesaplandığı üzere taşıt hızı iki katına çıkarsa kinetik enerji dört kat artar. Bu dört kat artan enerjiyi absorbe etmek için frenleme enerjisinin de hızın karesi ile artacak şekilde düzenlenmesi gerekir. Örnek olarak V hızı yerine 2V alınırsa;

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot (2v)^2 = \frac{1}{2} m \cdot 4v^2 = 2\, m \cdot v^2 \tag{3.2}$$

Hızın kinetik enerjiye etkisini göz önüne alındığında, buna karşı oluşturulacak frenleme enerjisini sağlayacak fren sistemi ve elemanlarının; yukarıda belirtilen çalışma, çevre ve sürüş şartlarında en kısa ve aracı direksiyon kontrolü kaybolmadan, tüm yol durumu ve trafik şartlarında, en kısa sürede ve güvenle durdurabilecek şekilde tasarlanmalıdır (Anlaş, 1998).

Frenleme sisteminde kinetik enerji yenmek üzere bir kuvvet oluşturulur. Aracı durdurmak için yaratılan bu kuvvete frenleme kuvveti olarak bilinir. Fren verimi; sürtünen yüzey, disk ve balata arasında meydana gelen sürtünme kuvvetinin normal yüklere oranıdır (Ayar, 1991).

Fren verimi;

$$\eta_f = \left(\frac{F}{G}\right) . 100 \quad (3.3)$$

η_f = Frenleme verimi

F = Ortalama fren kuvveti (N)

G = Taşıt ağırlığı (N)

Sürtünme katsayısı;

$$\mu = \frac{Fs}{W} \quad (3.4)$$

μ = Sürtünme katsayısı

F_s = Sürtünme kuvveti (N)

W= Normal yük (N)

3.3. Diskli Frenlerde Frenleme

Diskli frenlerde ısı iletiminin kolay olması ve aracın gidiş yönünden bağımsız olarak frenleme kuvvetinin her yönde sağlanabilmesi dolayısıyla otomotiv sektöründe en çok tercih edilen sistemlerdir (Göktan, Güney, & Ereke, 1995). Diskler yüzeydeki kirlilik ve aşınma metallerini üzerinden kolaylık atabilir. Kampanalı fren sistemlerine göre diskli sistemlerde, disk üzerindeki kuvvet dağılımı kararlı ve homojendir. Yüksek hızlardaki frenlemede, ani kavrama eğilimi daha düşüktür. Diskli frenlerde iki yüzeyde de sürtünme olduğu için, sürtünme kuvveti;

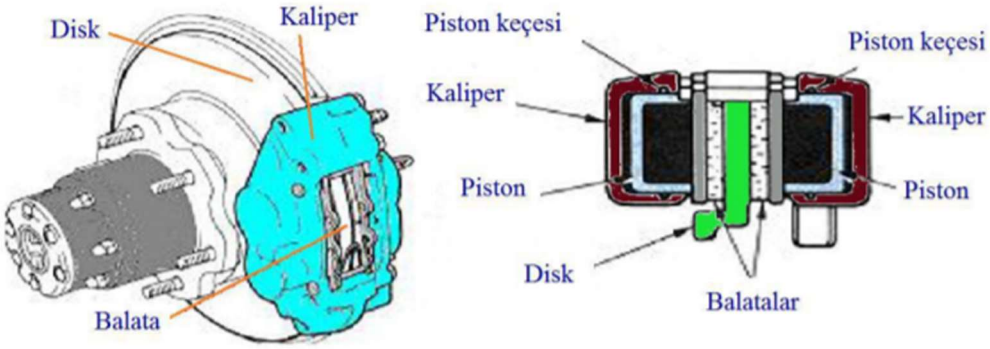
F = 2 μ N olur. Buradan; (3.5)

$R_0 = \frac{R2+R1}{2}$ olacağından frenleme torku; (3.6)

T_B = 2 μ N R_0 olur. (3.7)

T_B = Frenleme torku (Nm)

Fren sistemlerinde olması gereken sürtünme katsayıları standartlar ile belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı 0,2 – 0,7 arasında değişmekte olup fren basınçları 600N/m^2'den başlayıp 1200 N/m^2 basınca kadar çıkabilir. Diskli frenlerde tekerlek torkunu hesaplamak için aşağıdaki formüllerden yararlanılabilir (Altıparmak, 1998).



Şekil 3.2. Diskli fren sistemleri ve sistemi oluşturan elemanlar

Literatürde R0/R = 0,4 kabulü yapılır.

Buna göre;

$T_B = 2 \mu N R_0 = F_t R_0$ (3.8)

$Tw = 2 \mu_a G R$ (3.9)

$T_B = T_W \Rightarrow 2\mu N R_0 = \mu_a G R$ (3.10)

$R/R_0 = 2,5$

$N = \left(\frac{G\ x\ \mu a}{2\mu}\right)\ x\ \left(\frac{R}{R0}\right)$ olur (Altıparmak, 1998). (3.11)

Burada;

T_B = Frenleme torku (Nm)

T_w = Tekerlek yavaşlatma torku (Nm)

N = Normal reaksiyon tepki kuvveti (N)

μ = Sürtünme katsayısı

R_0 = Balata ortalama yarıçapı (cm)

R = Tekerlek yarıçapı (cm)

R_2 = Balata dış yarıçapı (cm)

F_t = Çevresel kuvvet (N)

G = Taşıt ağırlığı (N)

μ_a = Tutunma faktörü (yol ile tekerlek arasındaki), olarak tanımlanmaktadır.

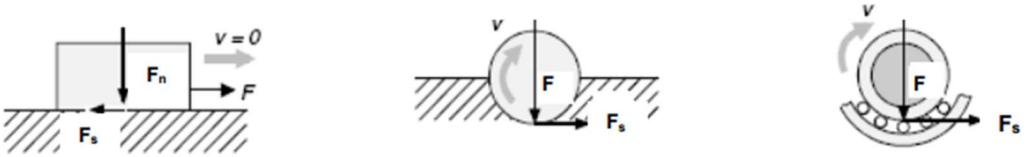
BÖLÜM 4

SÜRTÜNME VE AŞINMA

Aşınma, malzemelerin (katı, sıvı veya gaz) birbirine temasında yüzeyden parça ayrılması ve yüzey deformasyonu oluşması olarak tanımlanabilir. Sürtünme ve aşınma çok eski tarihlerden beri gözlenen; hareketin kolaylaşması, malzemelerin korunması için azaltılması gereken ve önlemler alınan konulardır.

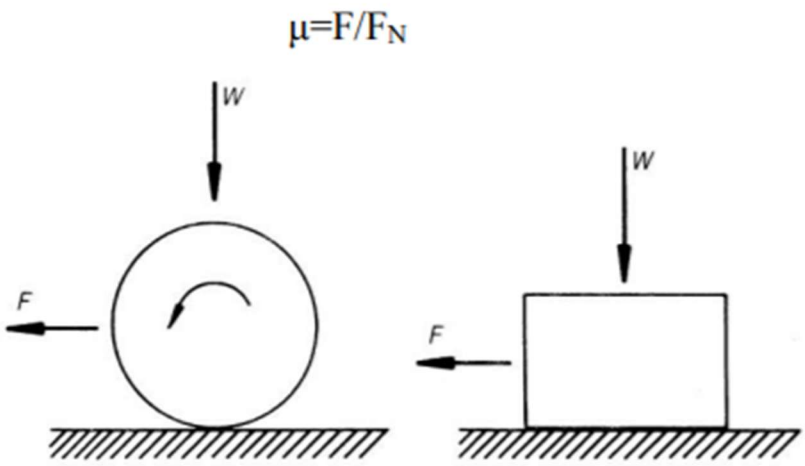
4.1. Sürtünme

Birbiri ile kayma ve yuvarlanma hareketi esnasında temas halinde bulunan ve yüzeyler arasında temas oluşur. İki katı yüzey arasında hareket esnasında temas noktasında ortaya çıkan dirence sürtünme denir. Sürtünmenin sayısal değeri çok küçük olsa bile her şartta mevcuttur. Sürtünme; statik, kayma ve yuvarlanma sürtünmesi olarak üçe ayrılır.



a) b) c)

Şekil 4.1. Statik, kayma ve yuvarlama sürtünmesi a) statik sürtünme, b) kayma sürtünmesi, c) yuvarlanma sürtünmesi (Kayalı vd., 1997)



Şekil 4.2. Kayma veya yuvarlanma sırasında hareketin gerçekleşmesi için gerekli olan sürtünme kuvvetleri (Hutchings, 1992).

Hareket doğrultusunda ve zıt yönde olan bu dirence sürtünme kuvveti denir. Hareketin başlaması için yüzeydeki dirence karşı gerekli kuvvete statik sürtünme kuvveti, hareketin devam etmesi için gerekli kuvvete dinamik (kinetik) sürtünme kuvveti denir.

Sürtünme katsayısı μ, sürtünmeyi karakterize eden, önemli bir faktördür. Statik durumda statik, dinamik durumda ise dinamik sürtünme katsayısı olarak tanımlanır. Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından biraz daha büyüktür. Deneyler göstermiştir ki; dinamik sürtünme katsayısı kayma hızına bağlıdır. Hızın artması halinde azda olsa değerinde bir düşme görülür (Bowden & Tabor, 1950). Statik sürtünme katsayısı temas süresine bağlıdır. Temas süresinin artmasıyla, sürtünme katsayısı da artar. Sürtünme katsayısı tanım olarak sürtünen yüzey disk ve balata arasında meydana gelen sürtünme kuvvetinin normal yüklere oranıdır (Ayar, 1991).

$$\mu = \frac{Fs}{Fn} \qquad (4.1)$$

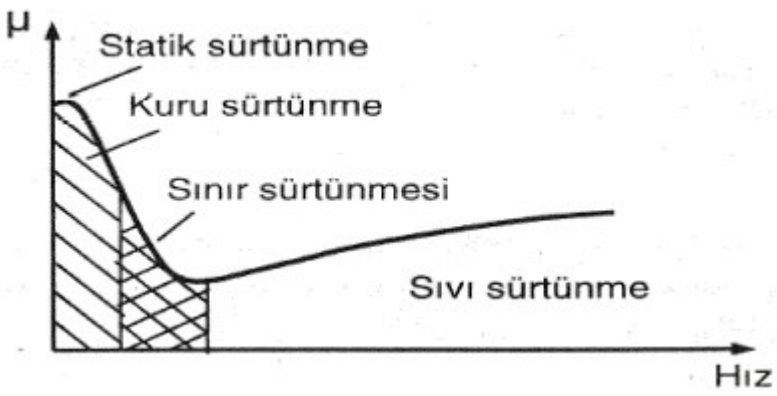
μ = Sürtünme katsayısı

F_s = Sürtünme kuvveti (N)

Fn= Normal yük (N)

Yüzeyler arasında hareketi kolaylaştırmak ve sürtünmenin azaltılması için yağlayıcı özelliği olan maddeler kullanılabilmektedir. Metal-metale teması azaltan veya önleyen film tabakası oluşur. Temas durumuna göre sıvı veya yarış sıvı sürtünmesi olarak

iki şekilde adlandırılır. Bazı durumlarda sıcaklık kaynaklı oksidasyon ürünleri veya sünek metallerde yüzeyde yağlayıcı görevi görebilir.



Şekil 4.3. Hidrodinamik yağlamada oluşan sürtünme tabakaları (Hutchings, 1992).

4.1.1 Sürtünmeye Etki Eden Faktörler

Toplam sürtünme direnci en genel halde aşağıdaki faktörlerden etkilenir:

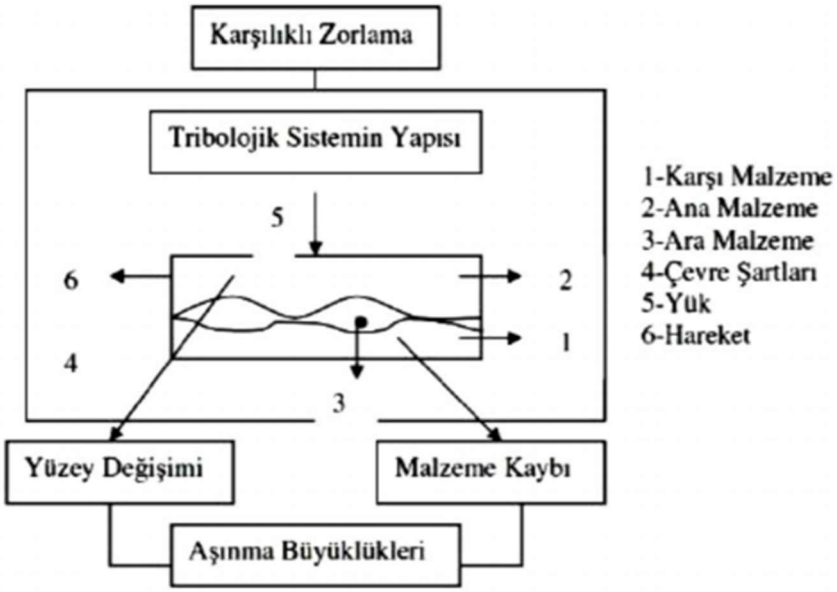
- Yüzeyde meydan gelen aşınma ürünleri ve harici kirleticiler,
- Malzeme sertlik farkı,
- Temas eden malzemelere gelen yük ve kayma/hareket mesafesi,
- Oksidasyon ürünleri, aşınma ürünleri ve harici kirleticilerin yağlayıcı etki göstermesi/film oluşturması,
- Yüzey topografyası
- Malzemelerin yapısal özellikleri,
- Görünür temas alanı
- Temasta bulunan yüzeylerin kinematiği (hareketin yönü, hızın büyüklüğü vb.)

4.2. Aşınma

Malzemelerin birbirlerine sürtünmesi neticesinde meydana gelen aşınma, malzeme kayıpları nedeniyle kullanılan makine ve teçhizat üzerinde önemli ekonomik kayıplara sebep olabilmektedir. Aşınmaya uğrayan cisimlerin şekilleri bozulur, malzeme deformasyona ve zamanla sağlaması istenen özellikleri yerine getiremeyecek duruma gelebilirler (Kayalı vd., 1997).

Aşınma sistemini oluşturan temel unsurlar;

- Ana malzeme (Aşınan),
- Karşı malzeme (Aşındıran),
- Ara malzeme,
- Çevre koşullar
- Yük,
- Harekettir.



Şekil 4.4. Tribolojik sistemin şematik gösterimi (Kayalı vd., 1997)

4.2.1. Aşınmaya Etki Eden Faktörler

Aşınmayı tetikleyen veya arttıran bir çok etken vardır. Bu etkenler;

- Aşınan malzemenin mekanik özelliklerine (pürüzlülük, topografya, mikro yapı, elastisite modülü, mukavemet)
- Karşı malzemeye (sertlik, pürüzlülük).
- Çalışma ve ortam şartlarına bağlıdır.

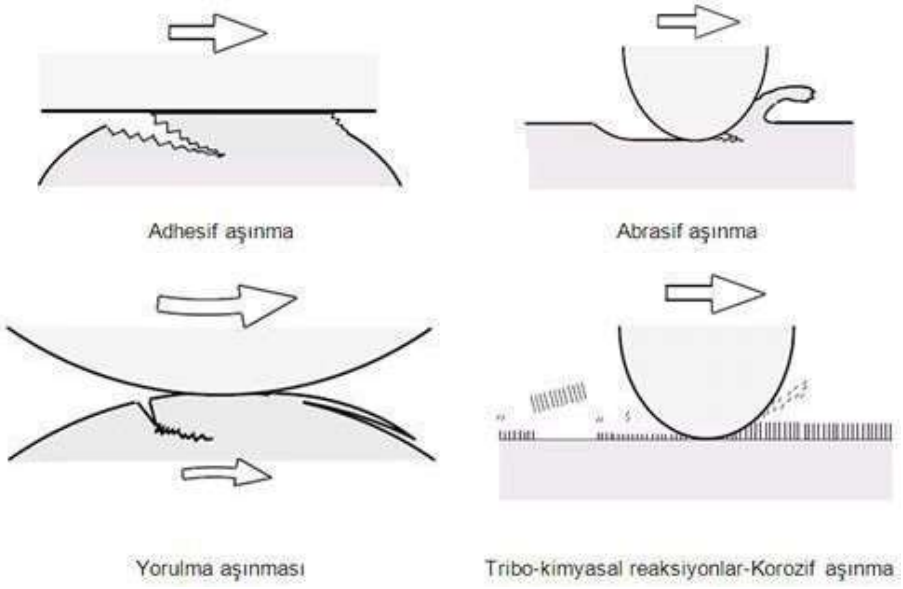
4.2.2. Aşınma Mekanizmalarına Göre Aşınma Türleri

1- Adhesif Aşınma
2- Abrasif Aşınması

3- Yorulma Aşınması

4- Korozif Aşınma

5- Erezyon Aşınması (Mimaroğlu, Çalışkan, & Çallı, 2001).



Şekil 4.5. Aşınma çeşitleri (Mimaroğlu vd., 2001)

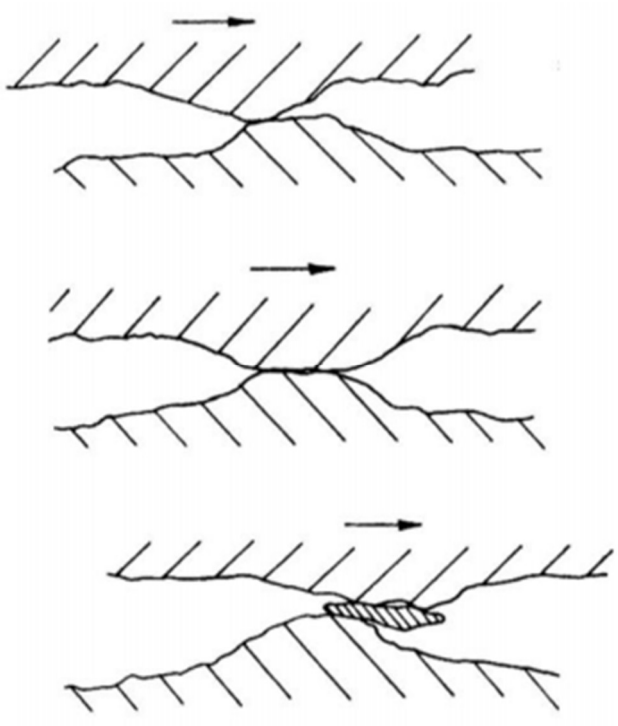
Çalışma şartlarına göre tüm aşınma türleri fren sistemlerinde gözlemlenebilmekte olup en fazla adhesif ve abrasif aşınma ortaya çıkmaktadır.

Adhesif aşınma; yapışma, ovalanma ve kavrama olarak da bilinen, birbirine temas eden cisimlerin temas yüzeylerinin, bir normal kuvvet etkisi altında izafi hareket yapmaları sırasında görülebilen bir aşınma türüdür.

Birbirleriyle kayma sürtünmesi yapan yüzeylerde soğuk kaynak ya da bölgesel bağlanmalar sonucu bir yüzeyden diğerine malzeme transferi ve daha sonra kayma hareketi sonucunda malzeme kaybı şeklinde gerçekleşmektedir

Aşınma anında önce temas noktasında parçacık deformasyona uğrar, kaynaklaşma meydana gelir sonrasında hareket ile birlikte yerinden kopma olur yüzeyden malzeme transferi olur. Bu tür aşınma genellikle iki safhada oluşur. İlk safhada temas yerindeki parçacık, yerinde deformasyona uğrar. İkinci safhada yerinden kopar ve malzeme yüzeyinden ayrılır. Adhesif aşınma için güçlü bir temas olmalıdır. Teması oluşmasını sağlayan kuvvetlere de adhezyon kuvveti olarak bilinir.

Adhezyon sebebiyle oluşan bağ kuvvetinin pürüz mukavemetine oranına göre malzeme kaybı olur yada olmaz (Odabaş, 1991).



Şekil 4.6. Adhesif Aşınma (Ashby, Jones, 1996).

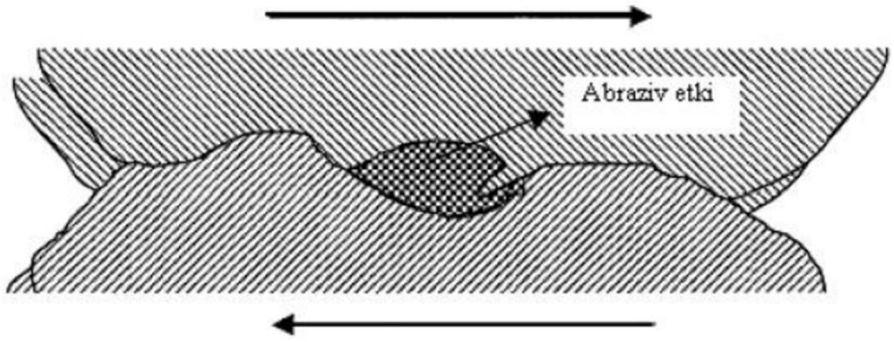
Adhesif aşınmanın engellenmesine yönelik önlemler:

- Bir yağlayıcı yardımıyla yüzeyden ısı transferi ile adhesif aşınmaya neden olan bölgesel sıcaklıkların önüne geçilip, metal-metale temasa neden olacak mikro-kaynak oluşumu engellenebilir (Wulpi, 1999).
- Farklı kristal yapıda, kimyasal olarak birbiri içerisinde çözünmeyecek malzemelerin seçimi ile yapışma ve mikro kaynaklaşma neticesinde oluşan adhesif aşınmanın önlenmesi sağlanabilir (Bhushan & Gupta, 1991), (Wulpi, 1999).
- Adhesif aşınma riskinin azaltılması için pürüzsüz ve düzgün mikro yapıya sahip malzemeler ile mikro boyuttaki çıkıntı temasını en aza indirilebilir (Bhushan & Gupta, 1991).
- Kimyasal film tabakaları ve kaplamalar ile metal – metal temasının engelleyerek adhesif aşınma önlenir. Fakat fren sistemleri için bu şekilde yağlayıcı özellik

gösterecek önlemler sürtünme katsayısının ve dolayısıyla fren performansının düşmesine neden olacaktır (Wulpi, 1999).

Abrasif aşınma, birbiri üzerine çalışan katı yüzey boyunca, katı yüzeye karşı hareket eden sert parçacık ya da sert yükseltilerin oluşturduğu aşınma türüdür. Ayrıca, birbiri üzerinde hareket eden iki yüzey arasına dışarıdan giren ya da iki yüzey arasında oksitlenmeden veya aşınmadan dolayı oluşan daha sert bir parçacığın yüzeylerde yaptığı hasar olarakta tanımlanır. Şekil 4.7'de tipik bir abrasif aşınma görülmektedir.

Kayma aşınmasının ilerlemesine bağlı olarak abrasif duruma göre değişik bir aşınma boyutuna geçebilir. Örneğin, kaymanın ilk aşamalarında oluşan aşınma veya oksitlenmeden kaynaklı parçacıklar her iki kayma bileşenini de aşındırabilir (Godet, 1984). Bu şekilde oluşan üç cisimli aşınmada yüzeyler arasındaki sert tanecikler tam bir kayma hareketi yapmaz, bazen de yuvarlanırlar. Bu nedenle aşınma daha yavaş olur. Metalin (aşınan malzeme) sertliği (Hm) ve aşındırıcının sertliği (Ha) olmak üzere Hm/Ha bir kriter olarak kullanılır. Hm/Ha 0.8 ise kazıma aşınması düşüktür. Bu değer 1'in üstünde olduğunda aşınma olmadığı kabul edilir (Ashby, Jones, 1996).



Şekil 4.7. Abrasif Aşınma (Ashby & Jones, 1996).

Abrasif aşınmanın engellenmesi veya hızının azaltılmasına yönelik olarak aşağıdaki yöntemlere başvurulabilir:

- Malzeme sertliği arttığı sürece abrasif aşınmasının önüne geçilebilir. Burada kritik olan gevrek kırılma olmaması için tokluk değerinin de göz önünde bulundurulmasıdır. Sünek malzemelerde tokluk değerini arttırmak için kaplama uygulanabilir (Wulpi, 1999).

- Ara yüzeyde bulunan hava, su yağ gibi maddeler yabancı parçacıkların toplanması, yüzeyden temizlenmesi ve sistemden uzaklaştırılmasına yardımcı olarak abrasif aşınma riskini azaltırlar (Wulpi, 1999). Ayrıca ara yüzeyin en sert partiküllerden daha kalın bir film tabakası ile yağlanması da aşınmayı azaltıcı rol oynar (Bhushan & Gupta, 1991).
- Pratikte en çok kullanılan yöntemlerden biri de aşınan parçaların değiştirilmesi ve parçanın kolay şekilde değiştirilmesine olanak sağlayacak tasarımların yapılmasıdır (Bhushan & Gupta, 1991).

4.2.3. Aşınma Kaybı Ölçüm Yöntemleri

4.2.3.1. Ağırlık Farkı Metodu

Ağırlıkların kayıplarının ekonomik ve hassas olarak belirlenmesi için en çok tercih edilen yöntem başlangıçta ve çalışmadan sonra ağırlıklarının farkının ölçülmesidir. Hassas terazilerde 10^{-3} veya 10^{-4} hassasiyetle ölçümler yapılabilmektedir. Ağırlık ölçümü yaparak aşınma miktarı gram veya miligram olarak belirlenir. Aşınma miktarı hacimsel olarak hesaplanmak istendiğinde ise malzemenin yoğunluğu ve numune üzerine uygulanan yük dikkate alınarak, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybı kullanılarak ağırlık kaybı belirlenebilir. Özgül aşınma miktarı aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir (Karabaşoğlu, 2008);

$$Ws = \Delta m/dFnS = \Delta v/FnS \quad (4.2)$$

Burada;

Ws: Özgül aşınma miktarı (mm3 /Nm),

Δm: Ağırlık kaybı (mgr),

d: yoğunluk (mgr/mm3),

Fn: Uygulanan normal kuvvet (N) ve

S: Aşınma mesafesi (m)'ni ifade etmektedir.

4.2.3.2. Kalınlık Farkı Metodu

Bu yöntemde aşınma miktarı, aşınma sonucunda meydana gelen boyut değişikliğinin ölçülmesi ve ilk değerler ile karşılaştırılması suretiyle belirlenmektedir. (Karabaşoğlu, 2008).

4.2.3.3. İz Değişim Metodu

Brinell veya Vickers sertlik ölçme uçları kullanılırak plastik deformasyon ile iz oluşur. İz boyutlarının değişimi mikroskop vasıtasıyla ölçülerek değerlendirilir (Karabaşoğlu, 2008).

BÖLÜM 5

FREN BALATALARI VE ÖZELLİKLERİ

Taşıtların durmasına sağlayan mekanizmalar fren sistemleri olarak tanımlanmaktadır. Direk temaslı ve temassız olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Temassız fren sistemlerinde elektro-manyetik kuvvet kullanılmaktadır. Direk temaslı / kuru frenler ise, fren hidrolik kuvvet iletimi ile balatanın bir disk veya kampana yüzey üzerine uyguladığı karşı sürtünmesi sayesinde hareketin yavaşlamasını ve durmasını sağlamaktadır.

Kampanalı fren sisteminde; levha üzerine bir yay geometrisinde çakılan şerit halindeki balata ile buna karşı bir tambur yani kampana bulunmaktadır. Arada sürtünme kuvveti yaratarak aracın yavaşlamasına ve durması sağlanır (Ertan & Yavuz, 2010).

Diskli fren sisteminde; hidrolik basınç ile pedaldan gelen baskıyı tekerlekle birlikte disk üzerinde yer alan ve diskin iki yüzeyine kaliper yardımıyla kuvvet uygulayan fren balatası bulunmaktadır. Aracın yavaşlaması için balatalar vasıtasıyla diske uygulanan kuvvet ile bir sürtünme kuvveti oluşturur. Bu çevrimde sönümlenen kinetik enerji ısı enerjisine dönüşmektedir (Barros, 2016).

Balata malzemelerinden çalışma ve ortam şartları göz önünde bulundurularak seçim yapılmalıdır. Temas yüzeyinde uygulan yük kaynaklı basınç, hız ve sürtünmeden kaynaklı ortaya çıkan yüksek sıcaklıklar oluşur. (Gemalmayan, 1986).

Balatalardan çalışma şartlarında temel istenen özellikler;

- Değişken çalışma şartında sürtünme verimliliğini koruması,
- Çalışma şartları ne olursa olsun yüksek ve kararlı sürtünme katsayısı,
- Geniş çalışma şartları içerisinde aşınma ve sürtünmeye karşı yüksek direnç,
- Geniş çalışma sıcaklık aralığında yüksek termal direnç,

- Yüksek mekanik dayanım,
- Düşük hidroskopsite (gözenekli bir ortamın atmosferik nemi absorbe etme kapasitesi)
- Düşük termal genleşme
- Yüksek ısı iletkenliği,
- Fren sesi oluşmaması,
- Çevresel etkilere karşı dayanım göstermesi,
- Daha düşük emisyon ve olumsuz çevresel etkilerin azaltılması,
- Daha hafif olması ve yakıt tasarrufuna yardımcı olması
- Yüksek aşınma mukavemeti ve karsı disk malzemesine daha az aşındırıcı etkide bulunması istenmektedir (Shanker, 2018).

Kuru sürtünme kuvvetlerinin büyüklüğünü etkileyen iki tür etki vardır. Bunlar, temas yüzeyleri arasında aşınma bağlarının etkileşimi ve mikrotemas yüzeyindeki direnç gösteren bileşenlerin deformasyonudur. İlk bileşen temas eden yüzey elemanlarının fiziksel ve kimyasal uyumudur. İkincisi ise plastik deformasyondur. Tribolojik sistem elemanlarının karşılıklı hareketleri; malzeme uçlarında mikro düzensizlikler, plastik deformasyon ve üçüncü malzemelerin ezilmesine neden olur.

5.1. Balata Çeşitleri

Yaklaşık 1980'lere kadar bütün fren balatalarının ana üretim malzemesi sürtünme özellikleri, mekanik dayanımı ve sıcaklık dayanımı sebebiyle asbest olmuştur. Yapılan çalışmalarda fabrika üretimi balatalar, asbest ile karşılaştırılmış olup fabrika üretimi balataların mekanik özellikleri daha iyi olsa da sürtünme katsayısının asbestlilerde daha yüksek olduğu görülmüştür.

Ucuz ve çalışma ömrünün uzun olması göz önüne alındığında asbestin kullanım oranı % 40-60 civarında olmuştur. Sonrasında aşınma sonucunda ortaya çıkan asbest tozlarının kanserojen etkisi ile çevre ajansları tarafından yasaklanmış bu da alternatif malzemeler üstüne araştırmaların artmasına neden olmuştur.

5.1.1. Metalik Balatalar

Metalik balata, uzun yıllar ağır şartlarda çalışan taşıtlar ve yarış araçlarında kullanılmıştır. Fazla pedal basıncına ihtiyaç duyar. Kampana ve balata aşınmaları fazladır. Yüksek sıcaklık uygulamalarına uygun oldukları halde, soğukta oldukça yetersizdir (Gilles, 2005). Sinterlenmiş alaşımlı fren balataları dökme demir balatalara göre %80 daha fazla sürtünme verimine sahiptir. Daha az pürüzlülük ortaya çıkar ve gürültü oluşumu sinterlenmiş balatalarda daha azdır (Kumar vd., 2021).

Yarı – metalik malzemelerden demir, bakır, pirinç ve kalay geniş kullanım alanı bulmaktadır. Demir veya çelik bazlı metalik balatalar denizyolu ve havacılık alanlarında ağır yük uygulamalarında tercih edilir.

Yarı metalik balatalar, birçok ekipman üreticisi tarafında araç orijinal parçası olarak kullanılmaktadır. Takviye malzemesi olarak kullanılan demir tozu ve çelik yünü lifleri mukavemet ve sıcaklık direncini arttırmaktadır. Yarı metalik balatalar yüksek ısı iletim özelliği sayesinde sürtünme yüzeyinden ısının hızlıca uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Bu ısı iletim verimi sayesinde balatanın kullanım ömrü de uzamaktadır. Fren sesinin azaltılması için çelik içeriği düşük yarı metalik balataların Avrupa'da kullanımı yaygındır. (Gilles, 2005).

Yarı metalik balatalarda ömür tamamlandığında ön tekerlerde koyu kahverengi bir toz meydana gelir. Çevreye zararlı metal oksit atıklar ortaya çıkmaktadır. Gürültü yapmaya eğilimleri yüksektir. Disk veya kampanalar aşınmaya yatkındırlar.

Islak yol şartlarında frenleme performansı düşmekte olup bu da sürüş güvenliğini tehlikeye atmaktadır.

5.1.2. Metal İçermeyen Balatalar

Bu balatalar asbest, demir ve çelik gibi metal malzemeleri içermezler. Bunlar yerine yapısında aramid lifleri ve cam yünü bulunur. Bu tür malzeme NAO (Asbest içermeyen organik) olarak isimlendirilirler. Çok fazla türü olması sebebiyle üretimi zorlaşmaktadır. Sıcaklık performansı sınırlı olduğu için organik balatalar daha hafif şartlar için tercih edilmektedir (Gilles, 2005).

Termal iletkenliği yüksek metalik fiberlerler ile takviye edildiğinde sıcaklık dayanımı artmıştır. Çelik fiberli balatalar ile alüminyum diskler kullanıldığında balatanın

disk malzemesine göre sertliğinin fazla olması, diskte fazlaca metal transferine ve düzensiz sürtünmeye neden olmaktadır. Yüksek baryum ve demir içeren fren balataları ile karşılaştırıldığında sürtünme katsayısı daha yüksek olmuş ve aşınma kayıplarının daha az olduğu gözlemleniştir. Ayrıca üretim süreçleri, takviye oranları ve boyutu, yüzey karakterizasyon ve resin etkisi ile farklı performanslar gözlemlenmiştir. Çevreye duyarlı ürünler elde edilmesi de mümkün olmaktadır. (Kumar vd., 2021).

5.1.3. Seramik Balatalar ve Karbon Lifli Balatalar

Seramik balatalar ilk olarak 1985 yılında kullanılmalarına karşın günümüzde otomobillerin neredeyse yarısında orijinal ve yedek ekipman olarak yer almaktadır. Çelik yününden ziyade seramik balatalarda ısıyı kontrol etmek için seramik ve bakır lifleri kullanılır. Seramik malzemesi yarı metalik balatanın doğasında var olan gürültüyü ve vibrasyonu azaltma eğilimindedir. Kararlı sürtünme karakteristiğine sahiptirler. Sıcaklık artışına bağlı olarak frenleme performansını olumsuz etkileyecek sürtünme katsayısında anlık düşüş meydana gelmez. Frenleme esnasında aşınma sonucu oluşan tozları açık renklidir ve çelik gibi paslanmaz. Üretim prosesi ve malzemelerin yüksek maliyeti dezavantajdır.

Karbon lifli balatalar, yükün kritik olduğu, zor şartlar ve yüksek performansın istendiği, ürün üretim maliyetlerin ikinci derece önem taşıdığı savunma sanayi ve motor sporlarında sıklıkla kullanılmaktadır (Gilles, 2005).

5.2. Balata Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Sürtünme malzemeleri; organik, metalik ve asbestsiz balatalar olmak üzere üçe ayrılır. Tüm bu çeşitlerde performans karakteristikleri dikkate alınırken onların içindeki maddelerin benzerlikleri ile gruplanırlar. Sürtünme veriminin arttırmak için özellik ve kullanım amacına göre takviye malzemeleri, dolgu maddeleri, bağlayıcı maddeler, sürtünme ayarlayıcı ve yağlayıcı maddeler olarak beş gruba ayrılmaktadır (Washabaugh, 1987).

5.2.1. Takviye Malzemeleri

Yapısal malzemeler balatada mekaniksel dayanım, sertlik, termal stabilite, aşınma direnci ve kararlı bir sürtünme üretir. Genellikle çelik yünü, Cu lifleri, Al lifleri, kaya

yünü, cam yünü, seramik lifler ve aramid (kevlar) lifler tek başına veya farklı kombinasyonlarda kullanılır**.**

5.2.2. Dolgu Malzemeleri

Dolgu malzemeleri istenen sürtünme özelliklerini bozmadan balatayı geliştirmek, hacim doldurmak, üretilebilirliğini iyileştirmek ve maliyeti düşürmek amacıyla kullanılır. İşletme şartlarında balatalarda meydana gelebilecek aşınma kaynaklı yüzeyden kopmalar, oluşan ısının homojen bir şekilde dağılması ve sürtünme katsayısının ayarlanması gerekir. Mukavemetin ve korozyon direncinin artırılması, balatanın renklendirilmesi dolgu maddelerinin yardımıyla sağlanmaktadır (Ayar, 1991).

5.2.3. Bağlayıcılar

Bağlayıcılar, tüm bileşenleri bir arada tutmak ve kararlı bir matris oluşturmak için kullanılır. Bu malzemeler polimer esaslı olduğundan, yüksek sıcaklıklara dayanıksızdırlar. Sürtünme malzemesinin içinde değişimi en az tahmin edilebilen bileşenlerdir. Genel olarak termoset veya novalac tipte fenolik reçine yer alır. Sönümlemeyi arttırmak için lastik tozu ile birlikte kullanılır (Anlaş, 1998).

5.2.4. Sürtünme Malzemeleri

Sürtünme katsayısının düzenlenmesi için alümina, grafit gibi katı yağlayıcılar ile sürtünme yüzeyinde sürtünmeyi düzenleyecek malzemeler kullanılabilmektedir. Çok sürtünme ayarlayıcı malzeme çeşidi bulunmaktadır.

Metalik tozlar ısı iletimini artırdığı gibi fren performans sürekliliğinin sağlanmasında faydalı olduğu da bilinmektedir.

5.2.5. Yağlayıcılar

Fren sistemlerinde yağlayıcı olarak genellikle grafit, farklı metal sülfitler, antimonite (SbS) gibi katı yağlayıcılar tercih edilmektedir. Katı yağlayıcılar oluşturdukları sürtünme filmi sayesinde yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısını koruma, balata-disk aşınmasını önleme, ses ve vibrasyonu azaltma gibi çeşitli faydaları bulunmaktadır (Sugözü, Mutlu, & Öner, 2011).

BÖLÜM 6

FREN DİSK VE BALATA MALZEMESİ OLARAK METAL ESASLI KOMPOZİT MALZEMELER

Fren, bir taşıtın hızını yavaşlatmak ve durdurmak için kullanılmakta olup, her şartta güvenli bir şekilde çalışmalı, uzun ömürlü ve düşük maliyetli olmalıdır. Bu sebeple sistem tasarlanırken aracın durumu göz önünde bulundurulur ve fren sistemi araca en uygun ve en dengeli şekilde eklenir.

Ayrıca balatalar aşınmaya maruz kalmaları sonucu, ortama zararlı parçacık yayar, emisyonların artmasına ve sera gazı etkisine neden olur, çevre ve insan sağlığını etkiler. Bireysel etkisi dışında taşıt sürüş güvenliği ve toplum sağlığı yönünden balataların etkisinin net bir şekilde ortaya konularak açıklanması, bu konunun denetim ve çözümüne yardımcı olacaktır (Sugözü vd., 2011).

MMK, üstün mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı mühendislik uygulamalarında geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlar yüksek mukavemet/ağırlık oranı, daha hafif olması, daha düşük maliyeti nedeniyle otomobil ve havacılık alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok çalışmada metal matrisli kompozit ve SiC'nin mekanik ve aşınma davranışı incelenmiştir.

Fren Balatası, düşük maliyeti, yüksek hacimli üretim, kullanım kolaylığı ve sürdürebilirlik nedeniyle yaygın olarak tercih edilen toz metalurjisi yöntemiyle üretilmektedir.

- Sıcaklık, basınç ve hızdan bağımsız olarak sürekli bir sürtünme performansı ve sürtünme katsayısı sağlayabilmesi,
- Sıcaklık dayanımı
- İyi ısı transferi,
- Korozif aşınmalara direnç,

- İyi mekanik dayanım sağlamalı,
- Ötme şikayetlerinin önüne geçilmesi,
- Çevresel koşullara dayanım,
- Asbest gibi sağlığa zararlı içerikler olmaması
- Düşük aşınma oranı ile daha uzun mesafeler yapılması
- Yeni fren sistemleri ile uyumlu çalışma rejeneratif döngüye yardımcı olması gibi performans beklentileri alüminyum matrisli kompozit malzemelerin yapısal ve mekanik özellikleri sayesinde karşılanabilmektedir.

Araç üreticileri aşınma ile ilgili ana ihtiyacı, sürtünme esnasında ortaya çıkan fren tozlarının ortadan kaldırılmasıdır. Al-SiC MMK frenler, daha düşük üretim maliyetleri ile uzun kullanım ömrüne sahiptirler. Fren balata malzemesi olarak dökme demir balatalara göre neredeyse yarı yarıya daha az aşınma görülmektedir. (Kumar vd., 2021)

Fren balataları farklı grupta bileşenlerden meydana gelen kompozit bir sürtünme malzemesidir. Bu bileşenler, mekaniksel dayanımını, sertliğini, termal kararlılığını, aşınma direncini ve sürtünme kararlığı gibi özellikleri büyük oranda etkilemektedir. Yapısal malzemeler öncelikle sürtünme malzemesi içindeki diğer komponentleri kuvvetlendirmek için kullanılırlar (Uyyuru, Surappa, & Brusethaug, 2006). Genellikle takviye malzemesi olarak çelik yünü, bakır tozları, karbon, cam yünü, kaya yünü ve aramid lifler kullanılır. Nadiren farklı mineraller ve seramik lifler de tercih edilir. Metal matris olarakta bakır, çelik, demir, pirinç, bronz ve alüminyum gibi malzemeler lifler veya partiküller şeklinde sürtünme malzemesi içerisinde kullanılmaktadır.

Fren sistemlerinde araç ağırlıklarının azaltılması için daha hafif malzemeler istenmekte MMK'ler ile alışılmış döküm malzemelerden çok daha hafif sistemler üretilebilmektedir. Fiziksel ve arttırılmış mekanik özellik sağlar. Yüksek sıcaklık dayanımına sahip olan takviye malzemeleri ile güçlendirildiklerinde diğer kompozit malzemelere göre geniş sıcaklık aralıklarında yüksek verim sağlarlar. Yüksek korozyon dirençleri, mekanik kararlılıklar, iyi ısı iletimi fren sistemlerinde MMK'lerin avantajlarındandır.

Asbest kullanımının yasaklanması ile birlikte kullanılan organik balataların düşük sıcaklık dayanımları sebebiyle ağır hizmet uygulamaları için MMK balataların kullanımı yaygındır.

BÖLÜM 7

LİTERATÜR TARAMASI

Ağırlık tasarrufu, çok daha düşük maliyetli malzeme ve süreçlerle performans iyileştirmeleri elde etme ihtiyacı otomotiv uygulamalarında da önemlidir. Özelliklerin ve maliyetin kombinasyonunun belirli bir ihtiyacı karşıladığı çeşitli otomotiv uygulamalarında MMK'lerin başarılı uygulamaları olmuştur.

Otomotiv uygulamalarında, MMK'ların fark yarattığı bir örnek olarak fren rotorları tutulmuştur. Ağırlık açısından, MMK rotor tasarımları, dökme demir ile karşılaştırıldığında %60'a varan azalma sağlar. Ayrıca alüminyum MMK rotorlar, mekanik özellikleri ve pratik kullanımları açısından demir muadillerinden daha iyi performans gösterir.

Bruski yaptığı çalışmada bir alüminyum MMK fren rotoru ile bir demir fren rotoru karşılaştırıldığında, demir bileşenin satın alma fiyatı, satın alma sonrası işleme ve bakım kolaylığı açısından daha yüksek değeri olacağını ancak MMK bileşenin performans ve pazarlanabilirlik açısından galip geleceğini belirtmiştir (Bruski, 2000).

Farklı matris malzemeleri kullanılarak elde edilen MMK'larda matris malzemesinin fren sistemine etkileri önemli sayıda çalışmada incelenmiştir:

Gyimah ve arkadaşları, Al, SiO_2, Fe, grafit, Sn, Mn gibi elementlerden ve SiO_2 ile takviye edilmiş diğer elementlerden oluşan yeni Cu esaslı kompozit tren balata malzemesini toz metalürjisi yöntemiyle işlemişlerdir. Bu malzemelerin tribolojik davranışlarını yağsız pin-on-disk yöntemiyle incelemişler. Sinterleme sıcaklığının esas malzeme kompozisyonu üzerindeki etkilerini belirlemek için sürtünme katsayısı, aşınma oranı araştırmışlardır. Sürtünme katsayısı 3,13 MPa basınç ve kuru koşullarda ortalama

değerleri 950 °C, 900 °C ve 850 °C derecede sürtünme katsayıları sırasıyla 0,404, 0,343 ve 0,336 olarak elde etmişlerdir (Gyimah, Guo, Huang, & Chen, 2017).

Yaygın olarak tercih edilen kullanılan dökme demir (pik) balataları raylı taşıtlarda ilk kullanılan balata tipidir. Fakat bu tip balatalar çabuk ısınmakta ve hızlı aşınmaktadır. Maliyetleri yüksektir. Kompozit fren balataları yüksek sıcaklıklara çıkmadığı için sürtünme katsayısı daha istikrarlıdır. Sinterli balataların kullanım ömrü uzundur. Yoğun frenlemede daha dayanıklıdır. Fakat ilk maliyeti çok yüksek olduğu için çok tercih edilmezler ve 1950'lerden sonra kullanılmaya başlanan kompozit balatalar avantajları nedeniyle kullanımı yaygınlaşmaktadır. Kompozit balatalar sinterli ve pik balatalardan daha hafiftir (Kahraman & Küçük, 2019).

Al-bazlı MMK'ler, yüksek özgül güçleri, sertlik ve çekici tribolojik özellikleri ile bilinirler. MMK'ler, kayma sırasında metallere ve aşındırıcılara karşı güçlendirilmemiş alaşımlardan daha iyi aşınma direnci sergilediği birçok çalışmada gözlemlenmiştir. Uygulanan normal yük, aşınma performansında en önemli parametredir ve uygulanan normal yüke göre değişen yük arttırıldığında, sürtünme katsayısı değerleri azalır.

Gültekin ve arkadaşları yaptıkları araştırmalarda; genel olarak tüm kompozitlerde ve uygulanan farklı yüklerde stabil sürtünme katsayısı değerleri gözlemlenmiştir. Grafit içeriğine bağlı olarak, uygulanan normal yük ve kayma mesafesine göre sürtünme katsayısı standartlar ile belirlenen limitlerin içerisinde kalmıştır.

Al-MMK malzemelerde içindeki sert SiC takviyelerin yük taşıyıcı olarak görev yapması ve aşındırıcı yapısı sebebiyle aşınmalar daha düşük ölçülmüştür. Karşı diskteki SiC parçacıklarının aşındırıcı etkisi sebebiyle bakır kompozit fren balatasında ise aşınma oranı yüksek olmuştur (Gültekin vd., 2010).

MMK'lerde farklı matris yapıları olabildiği gibi mukavemet arttırmak, daha güvenli frenleme ve daha uzun kullanım ömrüne sahip olmak için farklı takviye malzemeleri de kullanılmaktadır.

Zhang ve Wang çalışmalarında; iki farklı Al-MMK'e karşı aynı fren malzemeleri ve fren kampanaları aynı şartlar altında Chase test cihazında test etmişlerdir. Daha büyük boyutlu SiCp takviye kullanılan fren malzemelerinin küçük boyutlu takviyeliler ile karşılaştırıldığında daha iyi performans gösterdiği ölçümlenmiştir. Sürtünme katsayısının 0,3'ten küçük olan balata malzemelerinin gerçekte kullanımı uygun olmamaktadır.

Sürtünme performanslarının güçlü bir şekilde SiCp ‘nin boyutuna ve tribofilm üzerindeki aşınma direncine bağlıdır. Küçük boyutlu SiCp içeren Al-MMK'lerin fren balata sistemleri için üretim için uygun olmadığı belirlenmiştir.

Ayrıca testlerde yükün ve hızın artmasıyla birlikte kademeli olarak 177◦C ve 316◦C' iki sıcaklıkta testler yapılmış sürtünme katsayısı incelenmiştir. Her durumda, sürtünme katsayısı sürekli azalmıştır. Yükteki artışların sürtünme katsayısına etkisi artan hızlardan daha fazla olmuştur. Çalışmada; özgül aşınma oranı, sürtünme katsayısında olduğu gibi yük ve hız ile düşmüştür. Aşınma oranı ile birlikte sıcaklıkta yükselmiştir (Zhang & Wang, 2007).

Daoud ve AbouEl-khair’e göre; A359 ve hacimce %20 SiC takviyeli kompozit malzemeye uygulanan yükün 30’dan 50 N’a yükseltilmesiyle ilk başta aşınma oranı düşmüş, yük 50’den 100 N’a yükseltilmesiyle testin devamında aşınma oranı artmıştır. Aşınma oranının hız arttıkça düştüğü görülmüştür.

3 ila 9 m/s hız aralığında farklı yüklerde kompozit malzeme ile dökme demir malzemelerin aşınma oranları karşılaştırıldığında kompozit malzemelerde aşınma oranı dökme demire göre daha fazla olup yük arttıkça farkta artmıştı.

Kompozite karşı kayan sürtünme malzemesinde uygulanan 30’dan 50 N’a yükseldiğinde olduğu gibi aşınma oranı düşmekte, yük 50’den 100’e yükseldikçe aşınma oranı kompozit malzemede olduğu gibi artmaktadır. Fakat hız arttıkça aşınma oranın düştüğü görülmüştür bu da geliştirilmiş aşınma direnci sağlandığını gösterir. Dökme demire kaşı sürtünme malzemesinde aşınma oranı 5 mm SiC parçacık kullanılan kompozite göre nispeten daha düşüktür.

Tüm kayma hızlarında kompozit ve karşı kayan sürtünme malzemesinde yük arttıkça sürtünme katsayısı düşmüştür. 50 ila 100 N aralığında yüklerde kompozitin sürünme katsayısında belirgin düşüş görülmemiştir. Tüm testlerde kompozit malzemenin sürtünme katsayısı dökme demirden daha yüksek olmuştur. Dökme demirin sürtünme ısı katsayısı kompozit malzemeye göre 3 kat fazla olup bir başka deyişle kompozit malzemeler daha soğuk çalışmıştır.

A359 ve hacimce %20 SiC takviyeli kompozit malzeme dökme demir malzemenin sonuçları karşılaştırıldığında kompozit malzemenin yüksek aşınma direnci, yüksek ısı iletkenliği, daha hafif ağırlık ve daha düzgün sürtünme katsayısı sağladığı

gözlemlenmiş olup bu avantajlar daha azaltılmış fren mesafesi ve daha düşük fren gürültüsü sağlamaktadır (Daoud & AbouEl-khair, 2010).

Ülkemiz zengin rezerv kapasitesine sahip olması sebebiyle dünyadaki kritik madenlerden biri olan borun üretiminde ilk sıralarda yer almaktadır. Başta otomotiv sektörü olmak üzere her türlü hareketli makinenin kontrolünde kullanılan fren balatalarının bir türevi olan bor karbür takviyesinin fren balata performansına etkileri, kazandırdığı özellikleri ve katkıları Kurt tarafından araştırılmıştır. 10 µm ve 100 µm tane büyüklüklerinde bor karbür takviye malzemesine sahip numune gruplarına yapılan testler sonucunda parçacık boyutu arttıkça numune yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir. Yoğunluğun fazla olduğu numune de sürtünme katsayısı da yüksek çıkmıştır. Sertliğin en düşük çıktığı numunede sürtünme katsayısı en yüksek, sertliğin en fazla olduğu numune de sürtünme katsayısı en düşük çıkmıştır. Buna göre sertlik ile sürtünme katsayısının ters orantılı olduğu değerlendirilebilir. Bor karbür takviye malzemesinin miktarı arttıkça aşınma oranları düşmektedir. Sonuçta bazı numunelerin ticari olarak kullanılan balatadan üstünlüğü TS 555 ve TS 9076 standartları kapsamında ortaya konmuş olup bu içeriklerin ticari kullanıma uygun olduğu belirlenmiştir (Kurt, 2019).

Boz ve Kurt çalışması için değişik oranlarda Çinko (Zn) tozu ilave edilerek toz metalürjisi yöntemi ile bronz esaslı balata üretmiş ve üretilen balataların sürtünme ile aşınma özellikleri incelenmiştir. Balata malzemesine ilave edilen Zn tozunun ergime derecesinin düşük olması nedeni ile ilave Zn oranı arttıkça numunelerin sinterleme yoğunluğunun düştüğü görülmüştür. Aşınma sonrası ana malzemenin sertliği yaklaşık % 100 artarken, Zn ilaveli sürtünme malzemelerinin sertliklerinde bir değişim olmamıştır. Sürtünme ile ara yüzey sıcaklığının artmasına bağlı olarak en kararlı sürtünme katsayını 0,222 ile % 2 Zn ilave edilmiş balata malzemesi vermiştir. En yüksek aşınma ana malzemede olurken, en düşük aşınmanın % 0,5 ve % 1 Zn ilave edilmiş balata malzemelerinde olduğu tespit edilmiştir. Takviye oranı arttıkça aşınma oranı da artmıştır. Takviye malzemesi sertliğinin aşınma oranı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. SAE J661 standardına göre, üretilen balata malzemeleri debriyaj balatası olarak kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir (Boz & Kurt, 2006).

Isı iletkenliği balata ömründe önemli bir rol oynar. Çok yüksek ısı iletkenliği, fren hidroliği üzerinde, yani süngersi frenleme üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Düşük ısı

iletkenliği ise, organik iç kısımların daha fazla parçalanmasını neden olur. Buna göre daha iyi performans için termal iletkenlik optimize edilmelidir. Termal stabilite durumunda termal dayanım ne kadar yüksek olursa, kilo kaybı o kadar düşük olur. Termal stabilite düşük olursa, bu fren bileşenlerin bozulmasına bağlı olarak daha fazla enerji kaybı neden olacak ve güvenli frenleme performansını olumsuz etkileyecektir. Optimum performans için uygun termal iletkenlik ve termal kararlılık değerlerine ulaşmak gerekeceğini belirtmişlerdir (Ünal & Kandil, 2020).

Uyyuru ve arkadaşları, Al–Si–SiCp kompozit malzemelerin fren balata sistemlerinde aşınma ve sürtünme davranışları incelemiş olup normal yükün aşınma performansındaki en önemli parametre olduğu gözlemlenmiştir. Aşındırıcı oranı ve hızın etkisi malzemenin bileşimine bağlıdır. SiCp takviye dağılımı değerlendirildiğinde daha büyük boyutlu dağılımda aşınma oranı ve sürtünme katsayıları, tek boyutlu takviye içeren matrise göre daha yüksek bulunmuştur.

Tribo tabakası aşınma testi esnasında pin malzemesi üzerinde koruyucu ince bir tabaka, matris malzemesi içinse koruyucu katman görevi görebilir. Bu tribo katman oluşumu Al–Si/SiCp MMK ve fren balatasından oluşan tribolojik çiftin aşınma performansında önemli bir etken olabilir (Uyyuru , Surappab, & Brusethaugc, 2007).

Üretim proseslerindeki değişimler malzemelerin mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Bu sebepler fren malzemesi tasarımında ve çeşidinde malzeme özellikleri ve üretim yöntemleri bir bütün olarak incelenip araştırılmalıdır.

BÖLÜM 8

MATERYAL ve METOD

8.1. Malzeme

Aşınma özellikleri incelenen malzemenin bileşimi Çizelge 8.1'de ve Çizelge 8.2'de verilmiştir (Ürkmez, 2004). Deneysel çalışmada matris malzemesi olarak Al-Mg alaşımlarından 5XXX serisindeki AA 5754 kullanılmıştır.

AA5754 ısıl işlem ile sertleştirilme özelliği olmayan, yüksek dayanımlı ve kolay şekil verilebilme özelliğine sahip bir alaşımdır. Genel fiziksel özellikleri Çizelge 8.1'de yer almaktadır.

Çizelge 8.1. AA5754 alaşımın fiziksel özellikleri (Ürkmez, 2004)

Özgül Ağırlık	2,66	g/cm^3
Elastisite Modülü	68-72	GPa
Kayma Modülü	27	GPa
Akma Dayanımı	80-100	MPa
Çekme Dayanımı	190-215	MPa
Ergime Aralığı	600-620	^oC
Özgül Isı (0-100^oC)	0,97	
Lineer Genleşme Katsayısı (20-100^oC)	$24x10^{-6}$	/^oK
Termal İletkenlik (100-400^oC)	147-168	W/m^oK
Direnç(20^oC)	$0,049x10^{-6}$	Ωm

Takviye olarak ortalama 13 μm boyutunda SiC parçacık takviye edilmiştir. Çizelge 8.2'de kompozit malzemenin içeriği verilmiştir.

Çizelge 8.2. Kompozit malzemenin kimyasal bileşimi (Ürkmez, 2004)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,4	0,4	0,1	0,5	2,6-3,6	0,2	0,3	0,15	0,15	Kalan

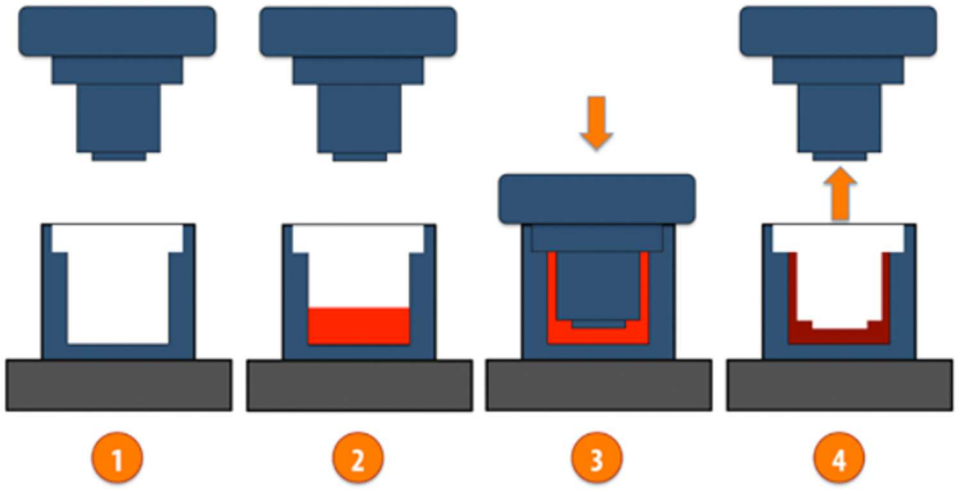
5xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ısıl işlem uygulanamadığı için yalnızca şekil değişimiyle sertleştirilebilirler. Bu alaşımlara sertlik ve mukavemet kazandırmak için haddeleme ile soğuk şekillendirme uygulanmaktadır. Takviye malzemesi olarak iyi ıslatılabilirlik ve düşük maliyet sebebiyle SiC seçilmiştir. (Gül & Acılar, 2007).

Çizelge 8.3. Kompozit üretimine takviye malzemesi olarak kullanılabilen seramik takviye malzemelerinin özellikleri (Ürkmez, 2004)

Parçacık Cinsi	Boyut (μm)	Özgül ağırlık (gr/cm^3)	Çekme dayanımı (GPa)	E-Modülü (GPa)
SiC	15-340	3,2	3	480

8.1.1. Kompozit Üretim Yöntemi

Numunelerin hazırlanacağı plakalar daha önceden modifiye edilmiş sıkıştırma döküm yöntemiyle yarı katı karıştırma arkasından sıcaklığı yükseltilerek sıvı halde döküm yöntemiyle üretilmiştir (Ürkmez Taşkın & Taşkın, 2017), (Ürkmez Taşkın & Taşkın, 2016). Sıkıştırma döküm yöntemi Şekil 8.1'de verilmiştir. Bu yöntem ile her tür takviye malzemesi kullanılarak MMK malzeme üretilmesi mümkündür.



Şekil 8.1. Sıkıştırma döküm metodu

Döküm sonrası elde edilen farklı takviye oranlarına sahip kompozit numunelerin deneysel olarak yoğunluk ölçümleri, Arşimed prensibine göre yapılmış yoğunluk ve gözenek ölçüm sonuçları Çizelge 8.4'te verilmiştir.

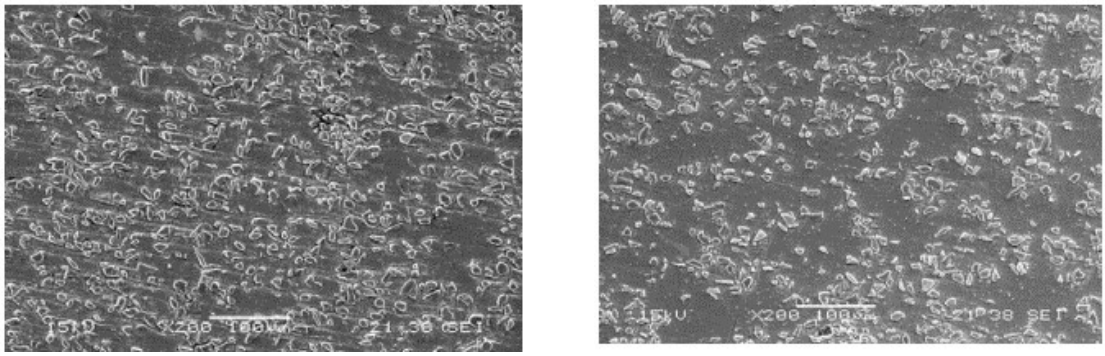
Çizelge 8.4. Deney numunelerinin teorik ve ölçülen özgül ağırlıkları ile gözeneklilik (Ürkmez, 2004).

Malzeme	SiC (Hacimce)	Teorik Yoğunluk (gr/cm^3)	Deneysel Yoğunluk (gr/cm^3)	Yoğunluk (%)	Gözenek (%)
AA5754	----	2,66	2,62	98,5	1,5
AA5754	+%10 SiC	2,71	2,68	98,9	1,1
AA5754	+%15 SiC	2,74	2,72	99,2	0,8
AA5754	+%20 SiC	2,77	2,74	98,8	1,2
AA5754	+%35 SiC	2,85	2,72	95,5	4,5

Hacimsel takviye oranlarının artması ile kompozit malzemenin yoğunluğu artmıştır. Yoğunluklar kontrol edildiğinde üretim metodunun da etkisi ile takviye oranının %20'ye kadar olan bölümünde gözeneklilik yani yapısal boşluk daha düşükken, %20'nin üzerindeki takviye oranlarında yapısal boşluğun (porozite) arttığı gözlemlenmiştir.

%20 oranında haddeleme ile soğuk şekillendirme uygulanmış; hem takviyesiz Al-Mg alaşımına hem de SiC takviyeli Al-Mg kompozitlerden numuneneler hazırlanarak aşınma üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Haddeleme işlemleri ile birlikte numunelerde yapısal boşluklar azalırken haddelenmemiş numunelerde boşluklar daha fazla olmaktadır.



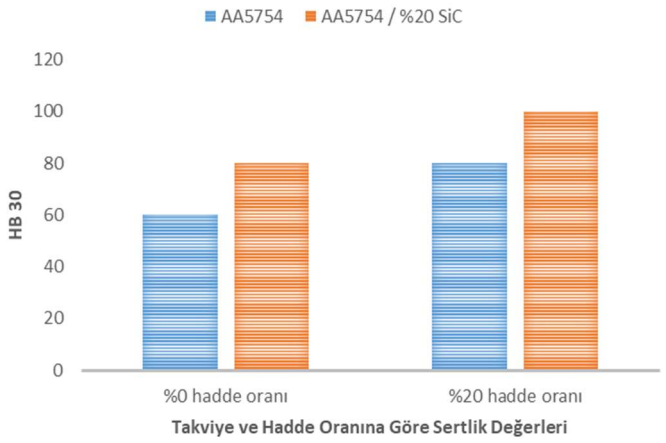
(a) (b)

Şekil 8.2. AlMg3/%20SiCp kompozit malzemesinin a) %20 haddeleme uygulanmış b) haddelenmemiş SEM mikro yapı fotoğrafları (Ürkmez, 2004).

Takviyesiz ve %10, %15 ve %20'ye kadar takviye oranında SiC içeren malzemelere farklı oranlarda değişen haddeleme işlemi uygulanmış malzemelerden numuneler hazırlanmış olup, bu çalışma da hem haddesiz hemde %20 oranında haddelenmiş numuneler üzerinde incelemeler yapılmıştır.

8.1.2. Sertlik Değerleri

Kompozit malzeme içerisinde takviye malzemesi SiC'e ait oranın toplam hacimsel oranda artması ile malzemenin sertliğinin artması beklenmektedir. Örneğin %20 SiC takviye malzemesi ile kompozitin sertlik değerinin takviyesiz alaşım ile karşılaştırıldığında artış %39 olmuştur. Artan SiC takviye oranları ile birlikte sertlik değerinin arttığı Şekil 8.3'te görülmektedir.

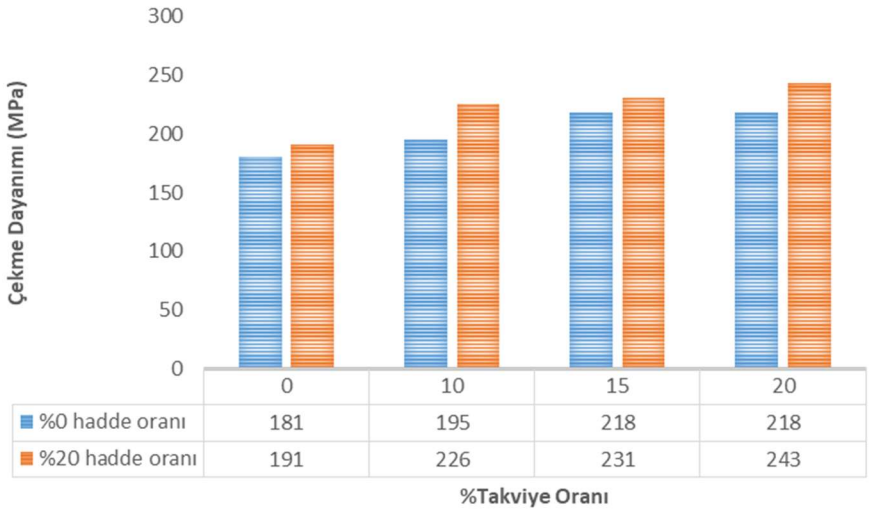


Şekil 8.3. Takviyesiz alaşım ve %20 SiC içeren kompozit malzemenin haddeleme oranlarına göre yüzey sertlik artışı (Ürkmez, 2004).

Hadde işleminin tüm malzemenin sertliğine etkisi düşünüldüğünde yüzeydeki sertlik değişimleri ile malzemenin kalınlığı boyunca sertliklerin farklılık gösterebileceği ve yüzeylerde sertlik değerlerinin daha yüksek ölçülmesi beklenmektedir.

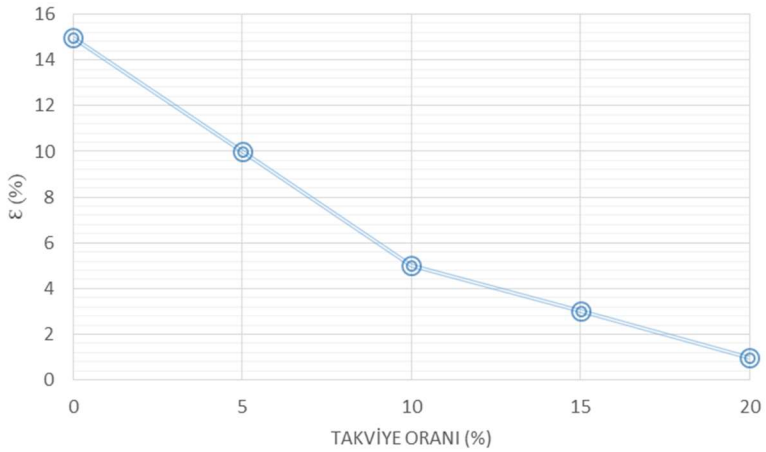
8.1.3. Çekme Dayanımı Performansı

Yarı – katı karıştırma işleminden sonra basınç altında hızlı katılaşan numunelerin haddeleme işlemi sonrasında sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Sabit sıcaklık ve hız şartlarında çekme dayanımı ve kopma uzamaları Şekil 8.4 ve 8.5'te verilmiştir.



Şekil 8.4. Farklı takviye ve hadde oranlarında çekme dayanımları (Ürkmez, 2004)

Bir malzeme her iki ucundan çekildiğinde, kalıcı şekil değişiminin başladığı noktadaki çekme gerilmesi o malzemenin çekme dayanımıdır. Çekme dayanımı, çekme deneyi ile bulunur. Takviye oranı ve hadde oranı artarken bunlara bağlı olarak çekme dayanımları da doğru orantılı olarak artmıştır.



Şekil 8.5. Takviye oranına göre kopma uzamasının değişimi (Ürkmez, 2004)

Çekme deneyinde numune, bir süre uzadıktan sonra kopar. Kopma anında malzemenin uzama oranı yine malzemenin sertliğine bağlıdır. Sünek malzemeler daha çok uzarken sertlik arttıkça malzeme gevrekleşir ve uzamadan kopma gerçekleşir. Takviye oranı veya haddeleme oranı daha düşük malzemelerde uzamalar fazla iken bu oranlar arttıkça malzeme gevrekleşmeye ve uzamadan kopmaya başlar.

8.2. Numunelerin Hazırlanması

Döküm karışım metodu ile önceden hazırlanmış plakalardan (Ürkmez, Taşkın, 2017), (Ürkmez, Taşkın, 2016) takviye oranı ve haddeleme oranına göre olmak üzere iki farklı numune grubu testler için kullanılmıştır. %0, %10, %15, %20 ve %35 SiC takviyesi yapılan numunelere ayrıca %20 oranında haddeleme prosesi uygulanmış (Ürkmez, 2004) plakalardan takviye ve haddelemenin sürtünme katsayısına etkisinin belirlenmesi için numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 8.6. Excetek V650G Plus tel kesme (EDM) tezgahı

Hız, yük ve sıcaklık gibi değişen çalışma şartlarında testler yapılabilmesi için 20x20x6mm boyutundaki numuneler tel erezyon tezgahında çıkartıldıktan sonra pürüzlülük giderilmesi için zımparalanmıştır. Numune yüzeyinde meydana gelen pürüzlükleri gidermek için FORCIPOL 2V marka cihaz kullanılmıştır.



Şekil 8.7. Yüzey parlatma cihazı

8.3. Test Aşaması

8.3.1. Ağırlık Ölçümü

Testler öncesi ve sonrasında hassas terazi ile her numuneye ait ağırlıklar ölçülmüştür. Elde edilen veriler numunelere ait aşınma oranının belirlenmesinde kullanılmıştır.

$$W\alpha = \frac{\Delta G}{D.M.S} \tag{8.1}$$

Wα= Aşınma Oranı ($mm^3.N^{-1}.m^{-1}$)

ΔG= Ağırlık Kaybı (g)

D= Malzeme Yoğunluğu (gr/cm^3)

M= Yükleme Ağırlığı (N)

S= Kayma Mesafesi (m)

8.3.2. Yoğunluk Ölçümü

Arşimed Prensibi ile hassas terazide test öncesi ve sonrasında aynı özelliklere sahip numunenin saf su içerisindeki ve havadaki ağırlık değerleri belirlenip yoğunluk değerleri hesaplanmıştır.

$$D = \frac{m1}{m1.m2} \text{ x } \rho \qquad (8.2)$$

D = Numune Yoğunluğu (g/cm^3)

m_1 = Numunenin Havadaki Ağırlığı (g)

m_2 = Numunenin Saf Sudaki Ağırlığı (g)

ρ = Saf Suyun Yoğunluğu (0,9977 g/cm^3)

8.3.3. Aşınma Testi

Pin on disc aşınma test cihazında Ball on disk metodu ile kuru şartlarda sürtünme ve aşınma testleri yapılmıştır. UTS Tribolog Yazılım ve Mühendislik Hizmetleri Trabzon laboratuvarında ASTM G99 standartlarına uygun olarak UTS Tribolog Çok Fonksiyonlu Tribometre cihazı ile kullanılmıştır.



Şekil 8.8. UTS Tribolog çok fonksiyonlu tribometre

Deneyler 5N, 10N ve 15N yükte; 0.1 m/s, 0.2 m/s ve 0.4 m/s hızlarda; 25°C, 100°C ve 150°C ortam sıcaklıklarında yapılarak aşağıda yer alan denklem 8.3'e göre sürtünme katsayıları hesaplanmış ve grafikler oluşturulmuştur.

$$\mu = \frac{L1.m2}{L0.m1} \quad (8.3)$$

μ = Sürtünme Katsayısı

L0= Mafsal ile Uygulanan Yük Arası Uzaklık (mm)

L1= Mafsal ile Loadcell Arası Uzaklık (mm)

m1= Uygulanan Yük (g)

m2= Loadcell'den Okunan Yük (g)

Hesaplanan sürtünme katsayıları SAE J661 ve TS 555'te (bölüm 9.2) yer alan referans değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 8.5. SAE J661 standartlarına göre balataların sınıflandırılması

SINIF	SÜRTÜNME KATSAYISI
C	0,15'e kadar
D	0,15 – 0,25
E	0,25 – 0,35
F	0,35 – 0,45
G	0,45 – 0,55
H	0,55'ten yukarı

8.3.4. SEM Görüntüleme

Numunelerde testler sonrasında Trakya Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (TUTAGEM) Laboratuvarı'nda aşınma izlerinin belirlenmesi için Zeiss EVO® LS 10 marka cihazda Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülemesi ile yapılmıştır.



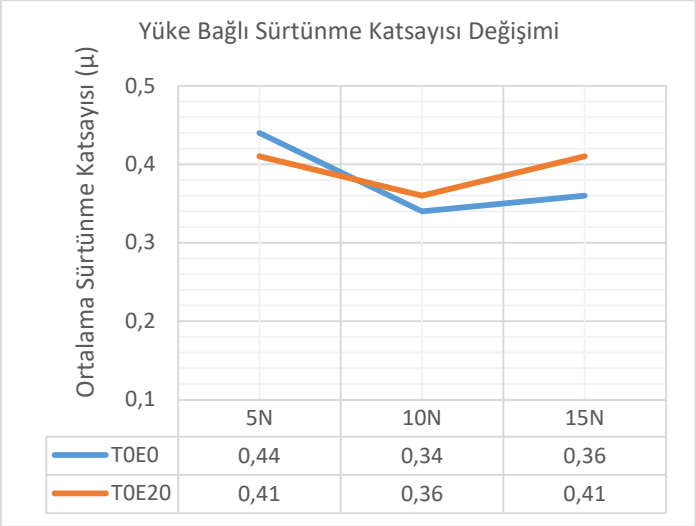
Şekil 8.9. Taramalı Elektron Mikroskobu

BÖLÜM 9

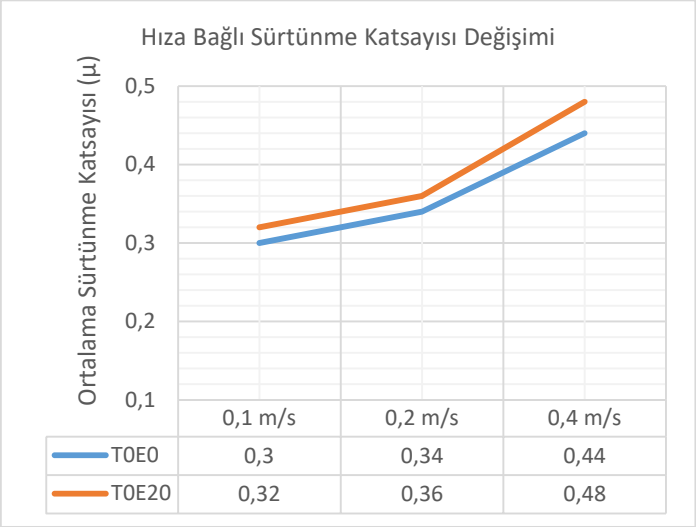
BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

9.1. Test Sonuçlarının ve SEM Analizlerinin Değerlendirilmesi

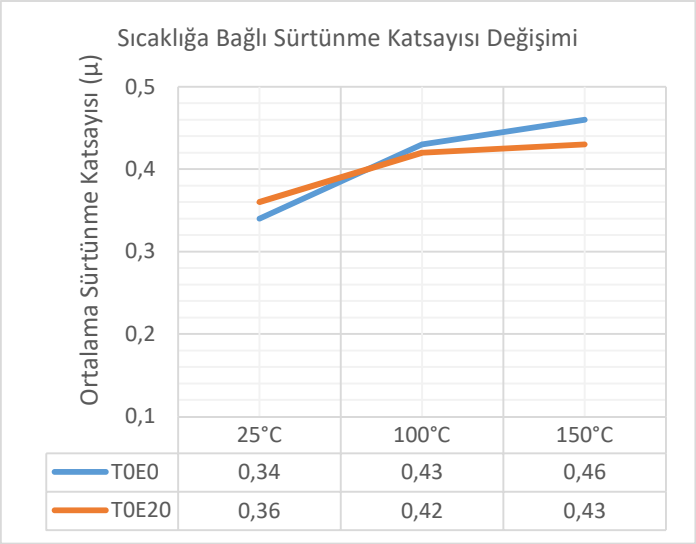
UTS Tribolog Çok Fonksiyonlu Tribometre cihazında hız, yük ve sıcaklık gibi değişkenler altında 500 m kayma mesafesinde sürtünme kuvvetleri ölçülmüş buna göre de sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Çıkan sonuçlar TS 555 ve SAE J661 standartlarında yer alan referans değerler ile karşılaştırılmıştır.



a)



b)



c)

Şekil 9.1. Takviye içermeyen, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında sürtünme katsayısı değişimleri

Şekil 9.1'de yük değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 5N yük sürtünme katsayısı 0,44 iken 10N'da %22,73 azalarak 0,34, 15N'da %5,88 artarak ve 0,36 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 5N yükte sürtünme katsayısı 0,41 iken 10N'da %12,20 azalarak 0,36, 15N'da ise %13,88 artarak ile 0,41 değerini almıştır.

Hız değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 0,1 m/s hızda sürtünme katsayısı 0,3 iken 0,2 m/s hızda %13,33 artarak 0,34, 0,4m/s hızda ise %29,41 artarak 0,44 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 0,1 m/s hızda sürtünme katsayısı 0,32 iken 0,2 m/s hızda %12,5 artarak 0,36, 0,4 m/s hızda %33,33 artarak 0,48 değerini almıştır.

Sıcaklıklar değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 25ºC sıcaklıkta sürtünme katsayısı 0,34 iken 100ºC'de %26,47 artarak 0,43, 150ºC'de %6,98 artarak 0,46 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 25ºC sıcaklıkta sürtünme katsayısı 0,36 iken 100ºC'de %16,67 artarak 0,42, 150ºC'de ise %2,38 artarak 0,43 değerini almıştır.

Takviyesiz ve haddelenmemiş AA5754 AlMg3 alaşımının farklı numunelerde 0,2 m/s hız ve 25ºC sıcaklık şartlarında yük değişimleri ile birlikte sürtünme katsayısının, başlangıçtaki 5N yükünden 15N'a çıktığında sürtünme katsayısının düştüğü görülmüştür. Sabit 10N yük ve 25ºC sıcaklık altında 0,1 m/s hızdan 0,4 m/s'a yükseldiğinde ise sürtünme katsayının hız ile birlikte arttığı görülmüştür. Sıcaklığın sürtünme katsayısına etkisi incelendiğinde ise hızda olduğu gibi sıcaklık arttıkça sürtünme katsayısının da yükseldiği ölçülmüştür.

Takviyesiz ve %20 oranında haddelenmiş AA5754 AlMg3 alaşımında ise 0,2 m/s hız ve 25ºC sıcaklık şartlarında, yük değişimlerinde sürtünme katsayısı 5N ve 15N'da aynı ölçülmüş olup 10N'da diğerlerine göre daha düşük ölçümlenmiştir. Sıcaklık değerleri ve hız değerlerinin artması ile sürtünme katsayıları da artmıştır.

Takviyesiz numunelerde test şartlarına göre benzer değişimler görülmüş olup daha yüksek sürtünme kuvveti sebebiyle haddelenmiş numunelerde sürtünme katsayısının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

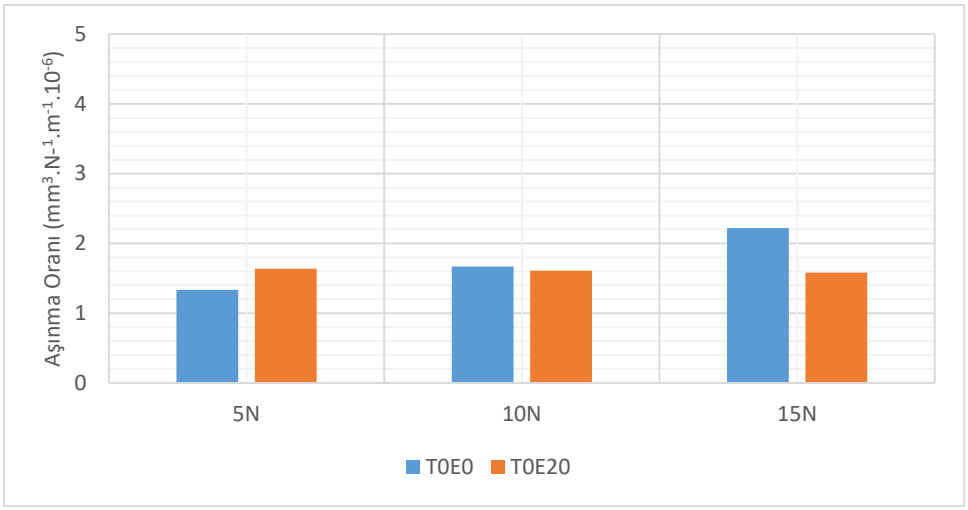
Çizelge 9.1 incelendiğinde; uygulama yükü ile birlikte sürtünme kuvveti de artmakta ve yükün etkisiyle ara yüzey sıcaklığı artmaktadır. Artan yüzey sıcaklıkları ile birlikte oluşan oksit film veya tabakalar düşük yükte iki metal yüzeyi etkili bir şekilde ayırmakta ve metal-metal temasına olmaktadır (Stott, 1998). Ayrıca, yüksek hız ve sıcaklıklarda, hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçiş olabildiğinden sürtünme katsayısı artmaktadır. Malzemelerin yüzey sıcaklığının artması ile yüzey ve yüzey altı plastik akış görülebilmektedir (Gomez-del Rio, Poza, Garrido, & Rodríguez, 2010).

Takviyesiz numunelerde 10N'da görülen daha düşük sürtünme katsayısının sebebinin, benzer çalışmalarda da görülen aşınma yüzeylerinde meydana gelen oksit tabakasının katı yağlayıcı gibi davranmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

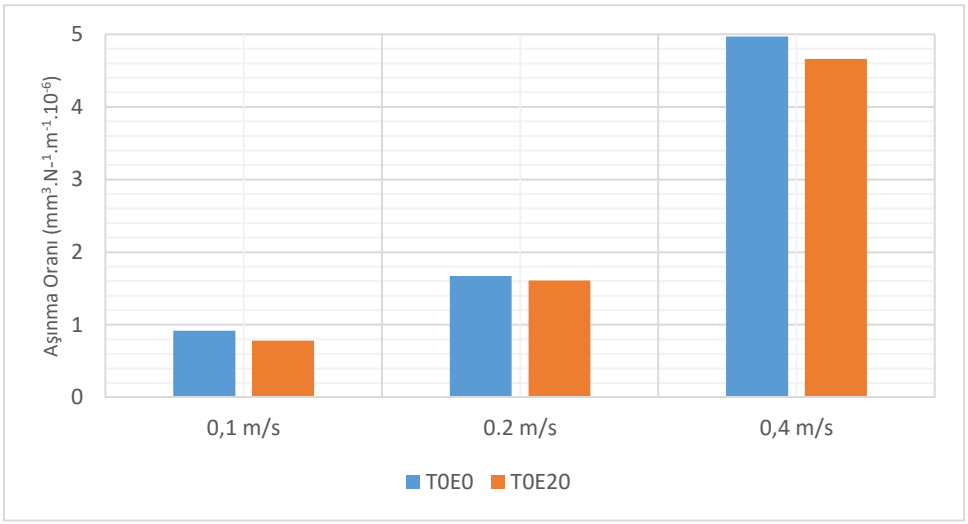
Çizelge 9.1. Takviyesiz haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin ağırlık kayıpları ve sürtünme katsayısı

Test Adı		**Test Parametreleri**				**Başlangıç Ağırlığı (gr)**	**Bitiş Ağırlığı (gr)**	**Ağırlık Farkı (gr)**	**Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)**
		Yük (N)	**Mesafe (m)**	**Hız (m/s)**	**Sıcaklık (°C)**				
T0E0	T0E0-5N	5	500	0,2	25	7,353	7,344	0,009	0.44
	T0E0-10N	10	500	0,2	25	7,017	6,994	0,023	0.34
	T0E0-15N	15	500	0,2	25	7,354	7,309	0,045	0.36
	T0E0-0,1 m/s	10	500	0,1	25	7,024	7,012	0,012	0.30
	T0E0-0,2 m/s	10	500	0,2	25	7,017	6,994	0,023	0.34
	T0E0-0,4 m/s	10	500	0,4	25	7,345	7,279	0,066	0.44
	T0E0-25°C	10	500	0,2	25	7,017	6,994	0,023	0.34
	T0E0-100°C	10	500	0,2	100	7,290	7,286	0,004	0.43
	T0E0-150°C	10	500	0,2	150	7,005	7,001	0,004	0.46
T0E20	T0E20-5N	5	500	0,2	25	6,765	6,754	0,011	0.41
	T0E20-10N	10	500	0,2	25	6,765	6,743	0,022	0.36
	T0E20-15N	15	500	0,2	25	6,758	6,727	0,031	0.41
	T0E20-0,1 m/s	10	500	0,1	25	6,764	6,754	0,010	0.32
	T0E20-0,2 m/s	10	500	0,2	25	6,765	6,743	0,022	0.36
	T0E20-0,4 m/s	10	500	0,4	25	6,752	6,689	0,063	0.48
	T0E0-25°C	10	500	0,2	25	6,765	6,743	0,022	0.36
	T0E0-100°C	10	500	0,2	100	6,742	6,739	0,003	0.42
	T0E0-150oC	10	500	0,2	150	6,745	6,743	0,002	0.43

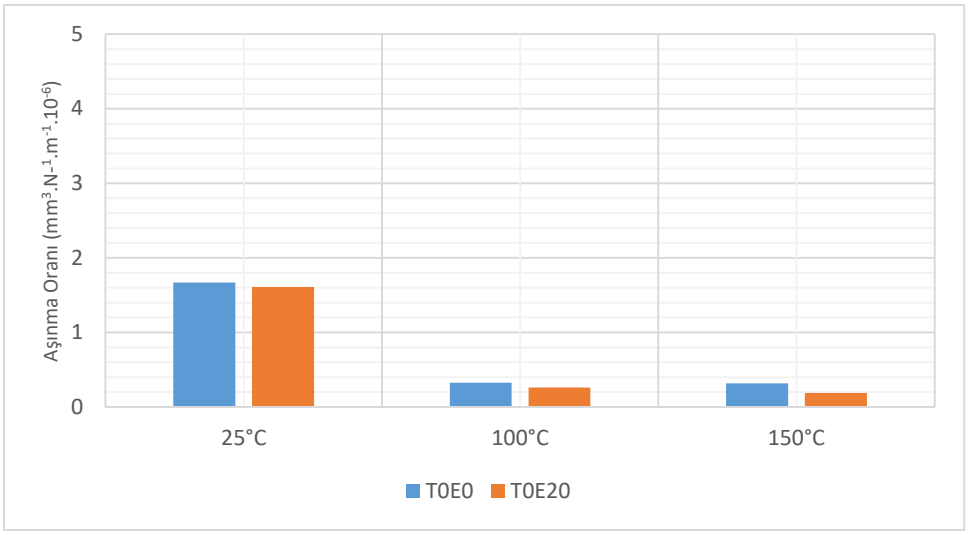
Numunelerin ağırlık kayıplarına baktığımızda çok az farklılıklar görülmüş olup artan yük ve hız ile birlikte hem haddesiz hem haddeli numunelerde ağırlık kayıpları da artmıştır. Sıcaklık arttığında ise aşınmadan çok yüzeyde sıvama olduğu için aşınma kayıpları düşmüştür.


Aşınma Oranı (mm³.N⁻¹.m⁻¹.10⁻⁶)
5
4
3
2
1
0
5N
10N
15N
T0E0
T0E20

a)


Aşınma Oranı (mm³.N⁻¹.m⁻¹.10⁻⁶)
5
4
3
2
1
0
0,1 m/s
0.2 m/s
0,4 m/s
T0E0
T0E20

b)



c)

Şekil 9.2. Takviye içermeyen, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında aşınma oranları

Şekil 9.2'de yük değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 5N yük aşınma oranı 1,37 iken 10N'da %21,9 artarak 1,67, 15N'da %32,9 artarak ve 2,22 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 5N yükte aşınma oranı 1,64 iken 10N'da %1,8 azalma 1,61, 15N'da ise %9,3 azalma ile 1,58 değerini almıştır.

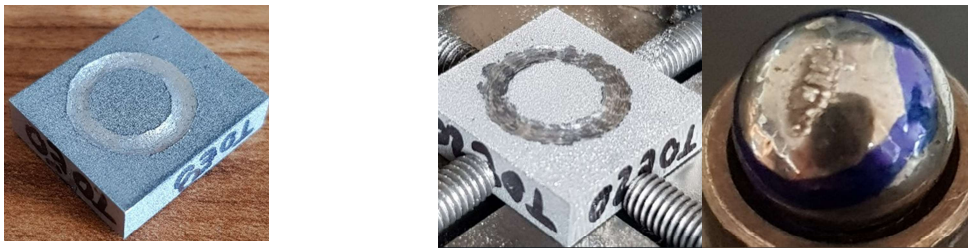
Hız değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 0,1 m/s hızda aşınma oranı 0,92 iken 0,2 m/s hızda %81,5 artarak 1,67, 0,4 m/s hızda ise 2,9 kat artarak 4,97 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 0,1 m/s hızda aşınma oranı 0,78 iken 0,2 m/s hızda 2,1 kat artarak 1,61 0,4 m/s hızda 2,9 kat artarak ile 4,66 değerini almıştır.

Sıcaklık değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 25ºC sıcaklıkta sürtünme katsayısı 1,67 iken 100ºC'de %80,2 azalarak 0,33, 150ºC'de %12,1 azalarak 0,37 değeri belirlenmiştir. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 25ºC sıcaklıkta sürtünme katsayısı 1,61 iken 100ºC'de %83,9 azalarak 0,26, 150ºC'de ise %26,9 azalarak 0,19 değerini almıştır.

Haddelenmemiş numunelerde yük değerleri arttıkça hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçildiği görülmüş olup haddeli numunelerde ise yüzeyde gerçeklesen ısı ile oluşan oksitlenme; katı yağlayıcı görevi görmüş ve metal-metale teması azaltmıştır. Haddeli numunelerin sertliği aşınma direnicini arttırmış ve karşı bilyenin aşınmasına neden olmuştur.

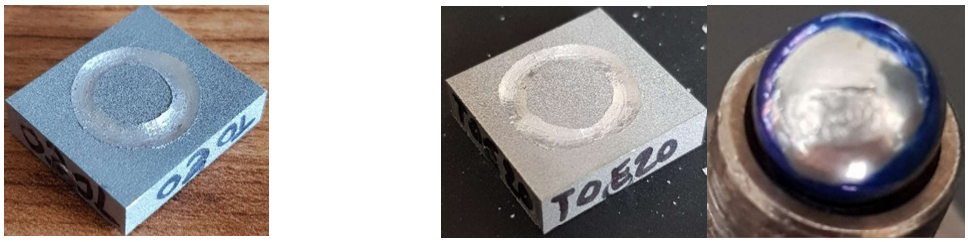
Hız değeri arttıkça tüm numunelerde aşınma kayıpları artmış olup sürtünme ile birlikte yüzey sıcaklıklarındaki artış şiddetli aşınmaya neden olmuştur. Haddelenmiş numunelerde yüksek aşınma direnci ile aşınma kayıpları haddelenmemiş numunelere göre daha az olmuştur.

Sıcaklık değerlerindeki artış ile birlikte plastik deformasyon olmuş sürtünme artmış fakat aşınma metalleri yüzeye sıvandığı için sıcaklık artarken aşınma oranları düşmüştür.



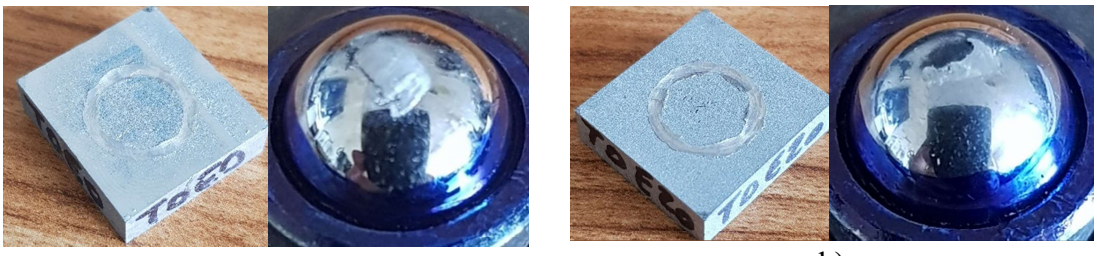
a) b)

Şekil 9.3. Takviye içermeyen numunelerin 15 N yükte (0,2 m/s hız, 25°C sıcaklıkta) test sonrası numune a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş



a) b)

Şekil 9.4. Takviye içermeyen numunelerin 0,4 m/s hızda (10N yükte, 25°C sıcaklıkta) test sonrası numune a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş

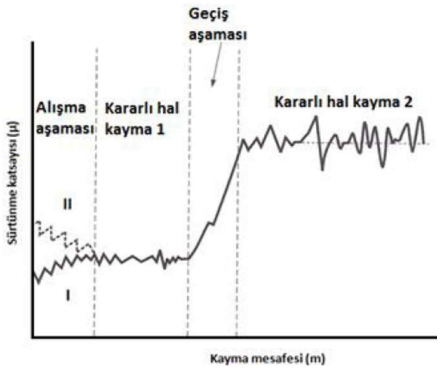


a) b)

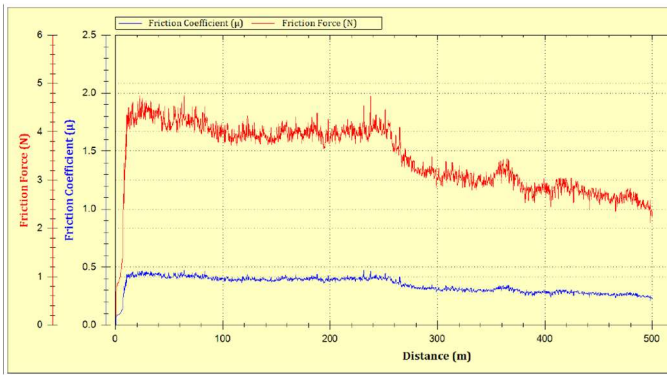
Şekil 9.5. Takviye içermeyen numunelerin 150°C sıcaklıkta (10N yükte, 0,2 m/s hızda) test sonrası numune ve bilye a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş

Aşınma oranları tüm şartlarda haddelenmiş numunelerde daha düşük çıkmış olup bunun sebebi hadde işlemi sırasında malzemenin sertliğinin ve mukavemetinin artmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Haddelenmiş numunelerde aşınma direnci beklenirken karşı malzeme olan bilyenin daha çok aşındığı görülmüştür. Aşınma çapları da en yüksek 15N yükte ve 0.4 m/s'de gözlemlenmiştir. Takviye içermeyen malzemenin sıcaklık direncinin daha düşük olması sebebiyle deney şartlarında sıcaklık ile birlikte aşınan yüzeylerin yüzeye sıvandığı görülmüştür.

Her bir test esnasında zamana bağlı olarak sürtünme katsayılarını değerlendirildiğinde; sürtünme katsayılarının zamana bağlı olarak düştüğü bunun sebebinin de takviye malzemesi olmaması sebebiyle yüzeyde sıcaklık kaynaklı oksitlenme olması ve aşındırıcının yüzeyde bir iz oluşturmasıdır.



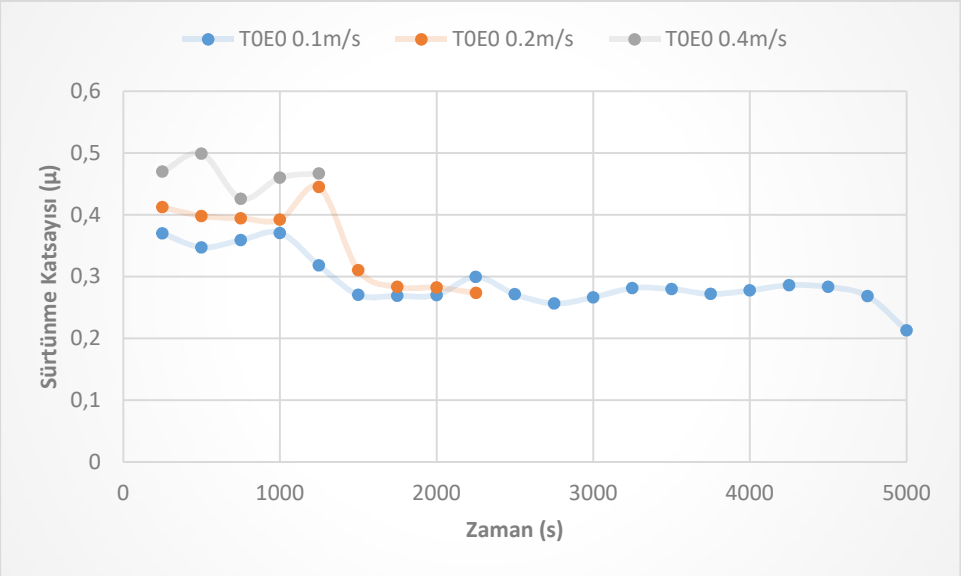
Şekil 9.6. Kayma mesafesine göre sürtünme katsayısı değişimi (Bhushan & Gupta, 1991)



Şekil 9.7. T0E0 0,2 m/s hızda mesafeye bağlı sürtünme katsayısı değişimi

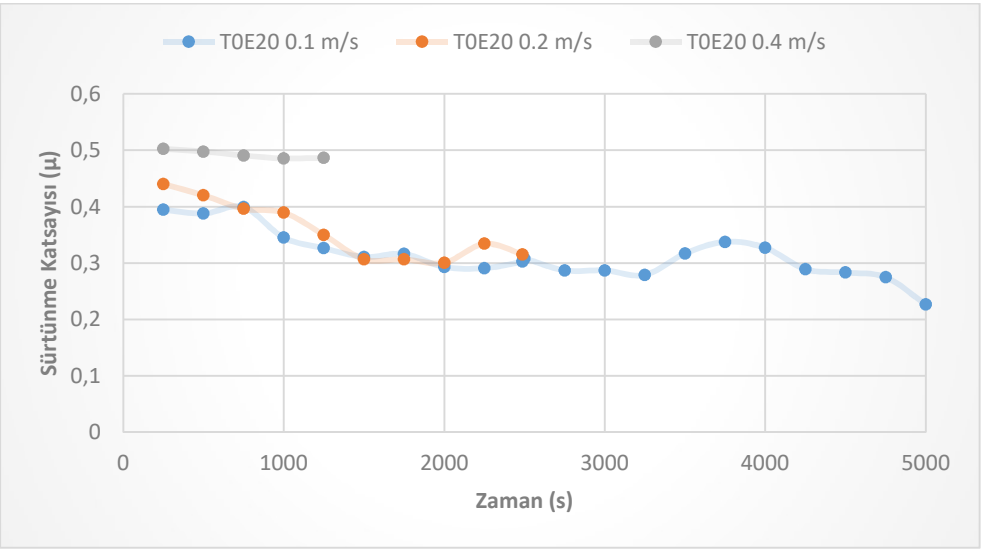
Kaymaya başlanan ilk metrelerden sonra alışma aşınması tamamlanıp kararlı hal kayma bölgesine geçilmekte olup yüzeydeki oksitlenme, plastik deformasyon veya aşındırıcı bilyeden gelen aşınmalar sebebiyle ilerleyen metrelerde yüzeye etkiyen sürtünme kuvveti düşmektedir.

Adhesif aşınmalar olması sebebi ile yırtılma şeklinde kopmalar görülmüş olup bunlarında yüzeyde test süresinin sonuna doğru bir film tabaka oluşturduğu; sürtünme ve aşınmanın azaldığı görülmüştür.



Şekil 9.8. T0E0 numunesinin hız – zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

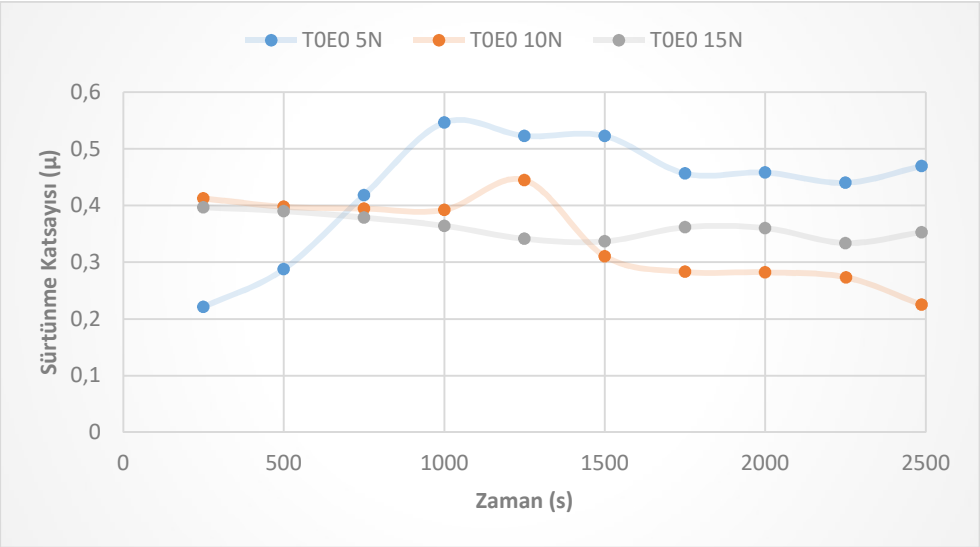
T0E0 numunelerinde hız artarken sürtünme katsayıları da artmıştır. Benzer çalışmalarda (Uyyuru vd., 2006) hız artarken sürtünme katsayısının düştüğü görülmüştür.



Şekil 9.9. T0E20 numunesinin hız – zamana göre sürtünme katsayısı değişimi

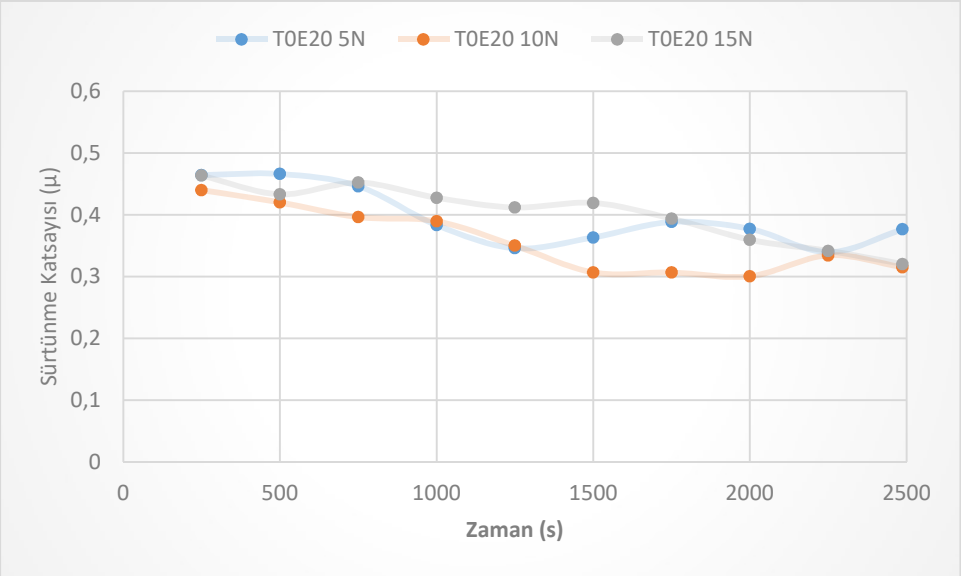
T0E20 numunelerinde hız arttıkça sürtünme katsayıları haddesiz numunelerde ve benzer çalışmaların, (Uyyuru vd., 2007) aksine artmıştır. Test süresi içerisinde ise başlangıçtan daha yüksek sürtünme katsayısı ile testlere başlanmış olup test devam ettikçe

bilyenın üzerinin kaplanması, yüzey sıcaklığı kaynaklı oksitlenme ya da malzemede üretim esnasında meydana gelen boşluklu yapı gibi nedenlerden sürtünme katsayılarının düştüğü görülmüştür.



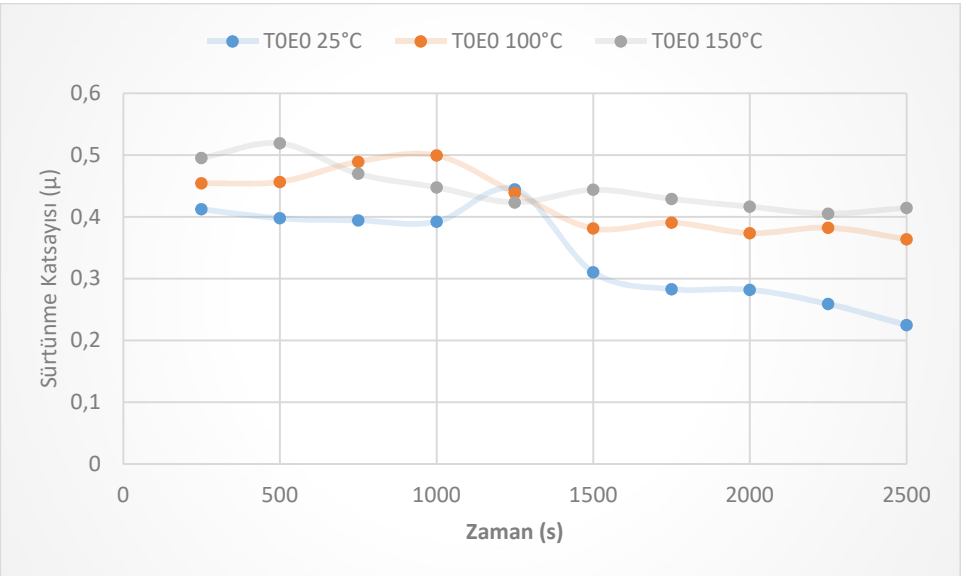
Şekil 9.10. T0E0 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

T0E0 numunelerde yapılan testlerde 5N yükte en yüksek ortalama sürtünme katsayısı çıkmış olup yük değerleri arttığında sürtünme katsayısı düşmüştür. Test anında sürtünme katsayındaki artışın sebebinin malzeme yapısından kopan aşındırıcı parçaların yüzeyi çizmesi ve aşınmayı arttırmasıdır. Ara yüzeydeki serbest kalan aşınmış parçacıkların meydana getirdiği "üç cisimli" abrasif aşınma mekanizması olarak bilinmektedir.



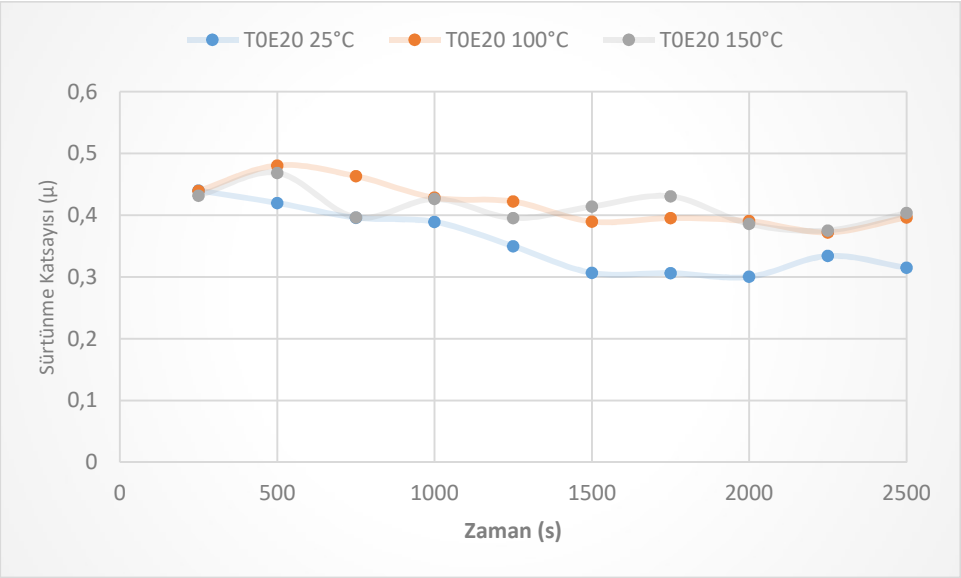
Şekil 9.11. T0E20 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

T0E20 numunelerinde 5N ve 15N'da benzer sürtünme katsayısı değerleri görülmüş olup hem haddelenmiş hemde haddelenmemiş numunelerde en düşük sürtünme katsayıları 10N yükte test yapılan numuneler de çıkmıştır. Benzer çalışmalarda (Daoud & AbouEl-khair, 2010), (Gültekin vd., 2010) yük değerleri artarken sürtünme katsayısının düştüğü görülmüştür. Testler esnasında da zaman ilerledikçe sürtünme katsayısı düşmüştür.



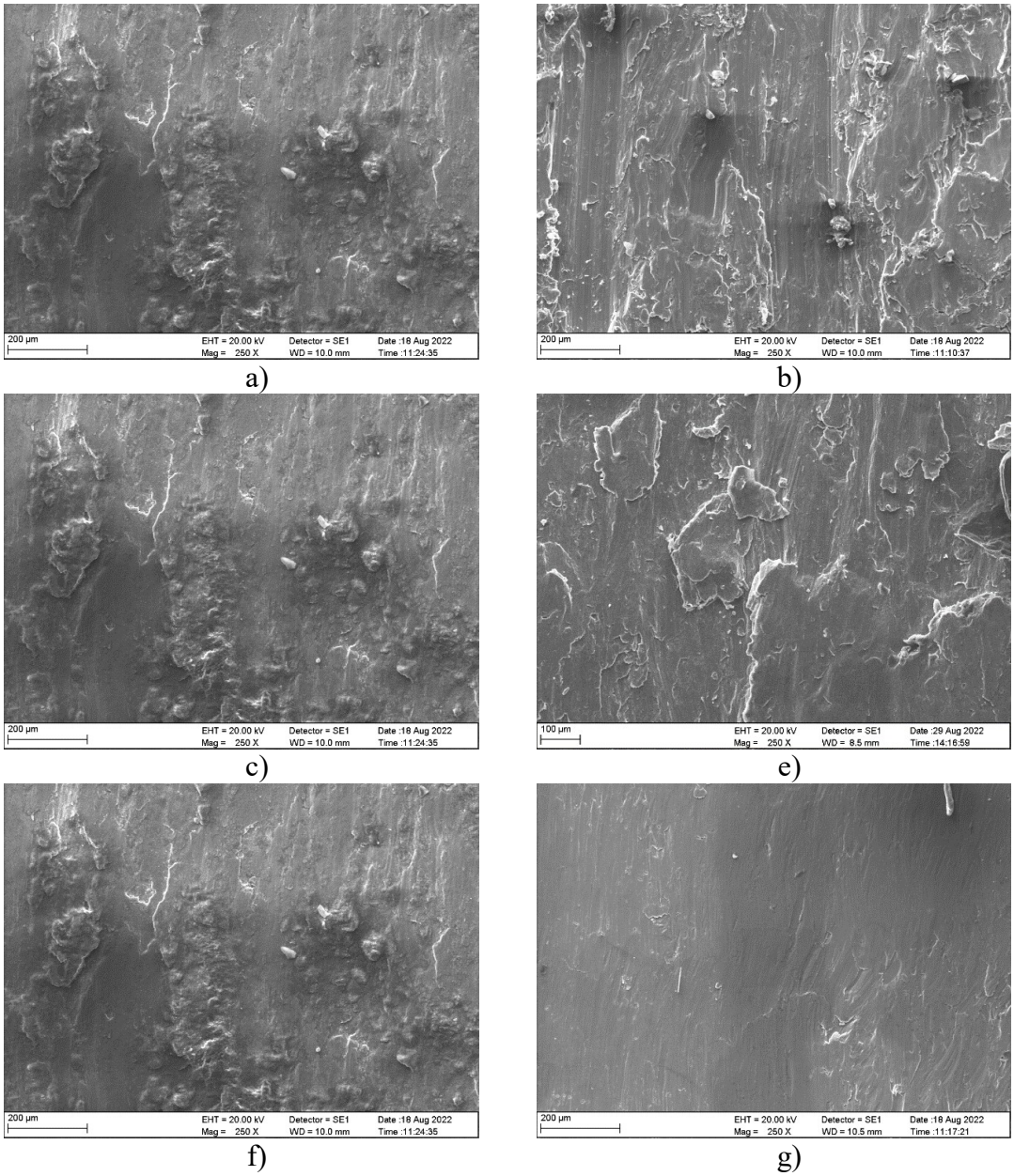
Şekil 9.12. T0E0 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

Takviye yapılmamış numunelerde sıcaklık artarken sürtünme katsayısı artmış olup bunun sebebi sıcaklık ile birlikte bazı bölgelerde malzeme topaklanmaları görülmüş bu da yüzeyler arası teması ve sürtünme katsayısını arttırmıştır. Üç şartta da geçen zamanla yüzeyde oluşan sıvama ya da oksidasyon kaynaklı film tabakası sebebiyle sürtünme katsayıları düşmüştür.



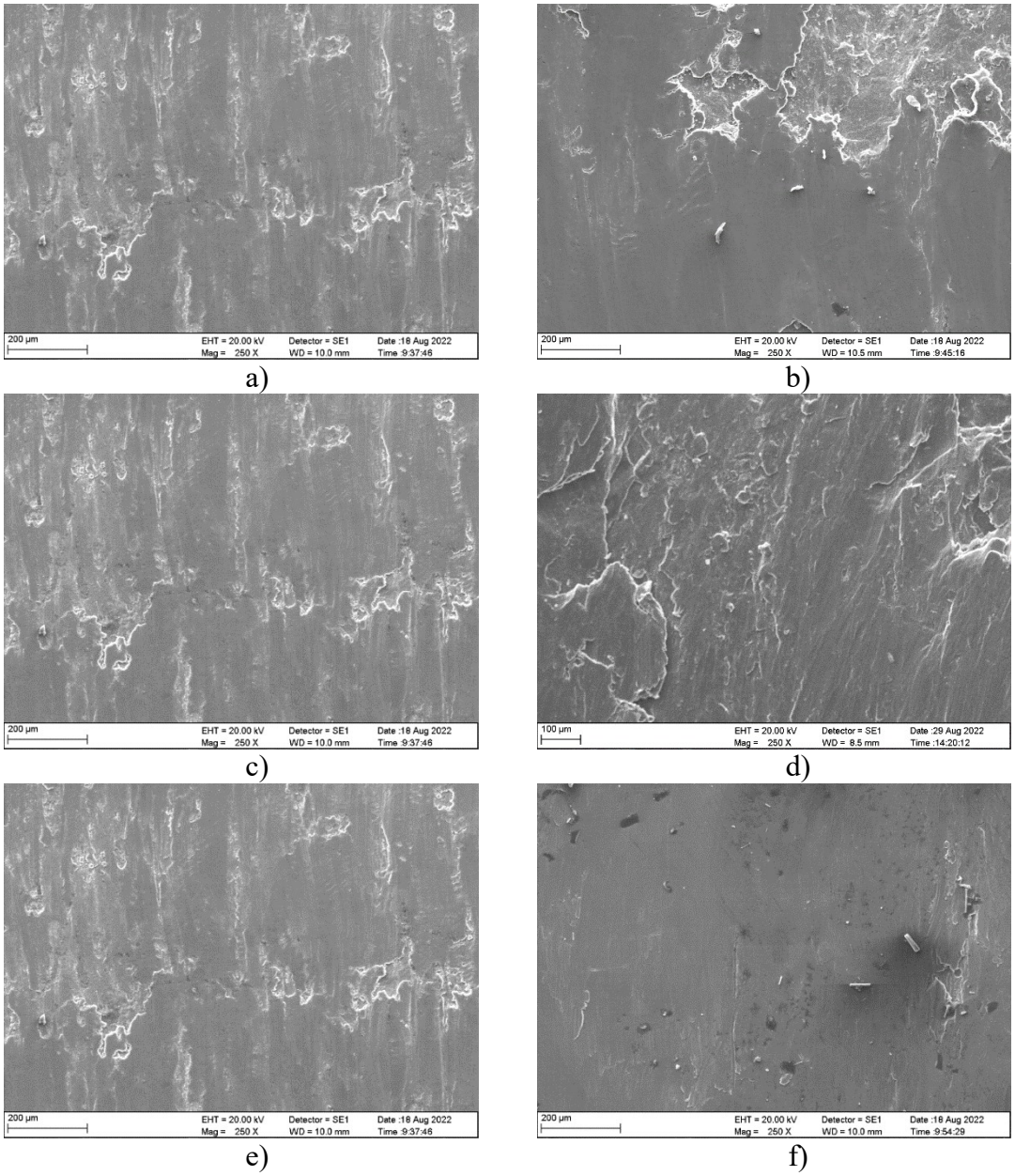
Şekil 9.13. T0E20 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

Sıcaklık değişkenlerinde yapılan testlerde başlangıç anında sürtünme katsayısı yüksekten başlayıp sıvanma kaynaklı film oluşumu ile ilerleyen zamanda düşüş göstermiştir. Özellikle takviye içermeyen numunelerde bu beklenen bir gelişme olup takviyesiz numunelerde haddelemenin sürtünme ve aşınma performansına belirgin olumlu bir etkisi gözlemlenmemiştir.



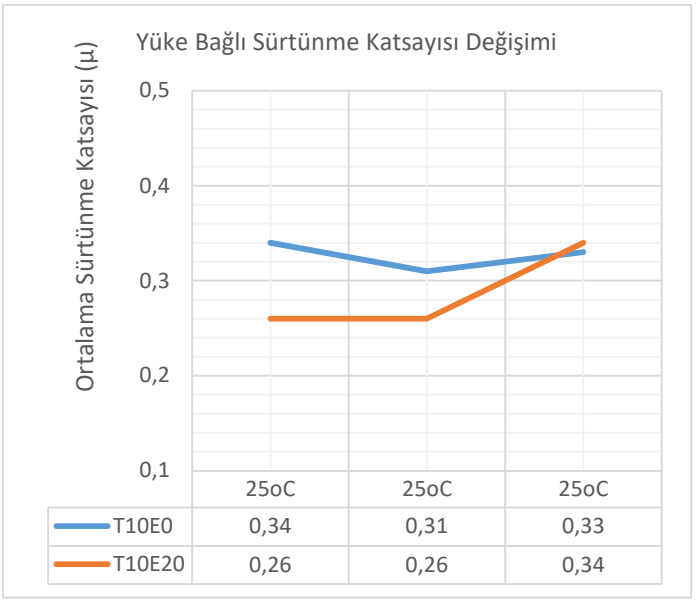
Şekil 9.14. T0E0 SEM İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c)0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta

T0E0 numunelerinde değişik hız, yük ve sıcaklık çalışma şartları değerlendirildiğinde en belirgin aşınmalar yüksek yük altında 15N'da görülmüştür. Sürtünme anında noktasal sıcaklıklar ile birlikte yüzeyde topaklanma ve aşınma ürünlerinin birikimleri oluşmuştur. 150ºC sıcaklıkta ise yüzeyde sıvama görülmektedir.

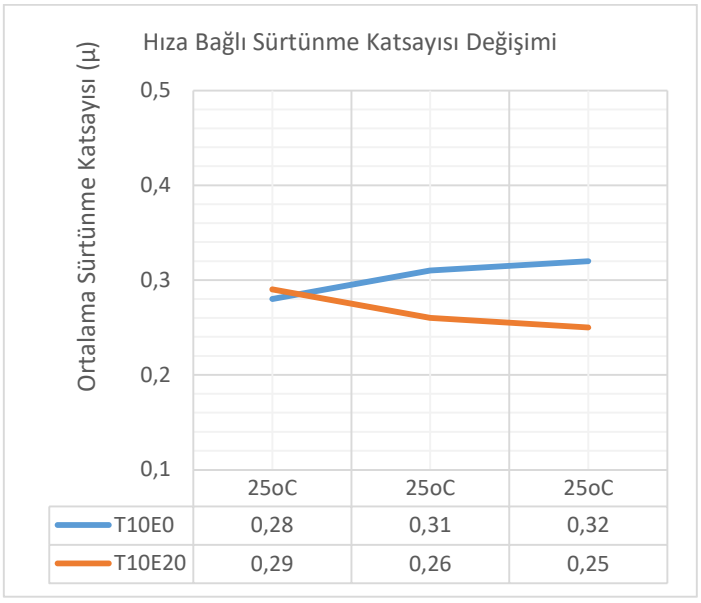


Şekil 9.15. T0E20 SEM İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c) 0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta

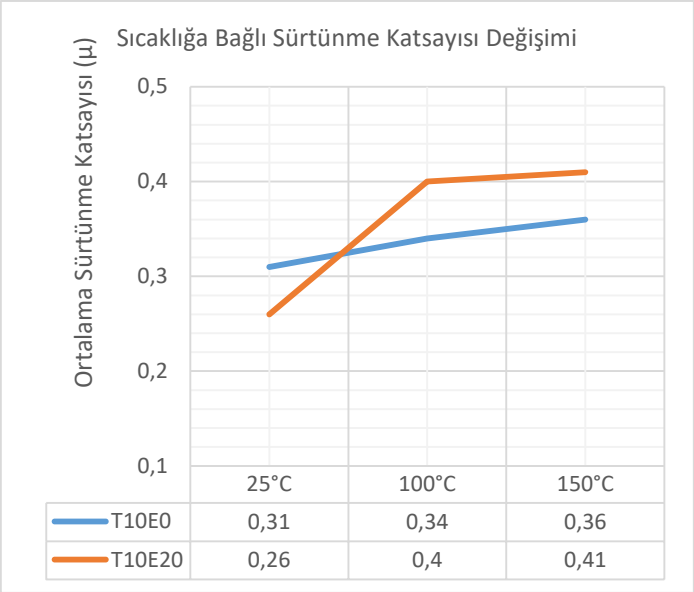
T0E20 numunelerinde aşınma izleri daha belirgin olup aşınma izleri bilyenin hareket yüzeyine paralel olmuş ve adhesif aşınmalar gözükmektedir. 150ºC'de yapılan testlerde ise sürtünme esnasında noktasal hızlar 250ºC'ye kadar çıktığı için sıcaklık ile birlikte yüzeyde bir sıvama ve pürüzsüz yüzey görülmektedir.


Yüke Bağlı Sürtünme Katsayısı Değişimi
Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
25oC
25oC
25oC
T10E0
0,34
0,31
0,33
T10E20
0,26
0,26
0,34

a)


Hıza Bağlı Sürtünme Katsayısı Değişimi
Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
25oC
25oC
25oC
T10E0
0,28
0,31
0,32
T10E20
0,29
0,26
0,25

b)



c)

Şekil 9.16. %10SiC takviyeli, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında sürtünme katsayısı değişimleri

Şekil 9.16'da yük değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 5N yükte sürtünme katsayısı 0,34 iken 10N'da %8,82 azalarak 0,31, 15N'da %6,45 artarakken 0,33 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 5N yükte sürtünme katsayısı 0,26 iken 10N'da aynı değerde 0,26, 15N'da ise %30,77 artarak 0,37 değerini almıştır.

Hız değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 0,1 m/s hızda sürtünme katsayısı 0,28 iken 0,2 m/s hızda %10,71 artarak 0,31, 0,4m/s hızda ise %3,23 artmış ve 0,32 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 0,1 m/s hızda sürtünme katsayısı 0,29 iken 0,2 m/s hızda %10,34 azalarak 0,26, 0,4m/s hızda da %3,84 azalarak 0,25 değerini almıştır.

Sıcaklık değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 25°C sıcaklıkta sürtünme katsayısı 0,31 iken 100°C'de %9,68 artarak 0,34, 150°C'de %5,88 artarak 0,36 değeri belirlenmiştir. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 25°C sıcaklıkta sürtünme katsayısı 0,26 iken 100°C'de %53,85 artış ile 0,4, 150°C'de ise %2,5 artış ile 0,41 değerini almıştır.

Uygulama yük değerlerindeki artış sürtünme kuvvetinin de artmasına neden olur. Bu yüzden ara yüzey sıcaklığı artar. Bu oksit film veya tabaka düşük yükte yüzeyler

arasında metal - metal temasına büyük ölçüde engel olur. Haddelenmemiş numunelerde 10N'da görülen daha düşük sürtünme katsayısının sebebinin aşınma yüzeylerinde meydana gelen oksit tabakasının katı yağlayıcı gibi davranarak sürtünme katsayısının düşmesine nedeni olabilmektedir.

Haddelenmemiş numunelerin testlerinde hız değeri atarken hız ile birlikte sürtünme katsayısı da yükselmiştir. Hız değerindeki artış ile kompozit malzemelerin yüzey sıcaklığı artmıştır. Bu durum yüzey ve yüzey altı plastik akışa neden olmaktadır. Hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçilmiş olabileceği gibi yüzeyde biriken aşınma ürünleri de üç cisimli aşınmaya neden olabilmekte bu da sürtünme katsayısını arttırmaktadır. Haddeli numunelerde ise hız arttıkça sürtünme katsayısının düşmesindeki sebep artan sertlik ile birlikte aşınma direncinin artması ve yüzeyde ortaya çıkan sıcaklıktan kaynaklı oksitlenmeden olabilmektedir.

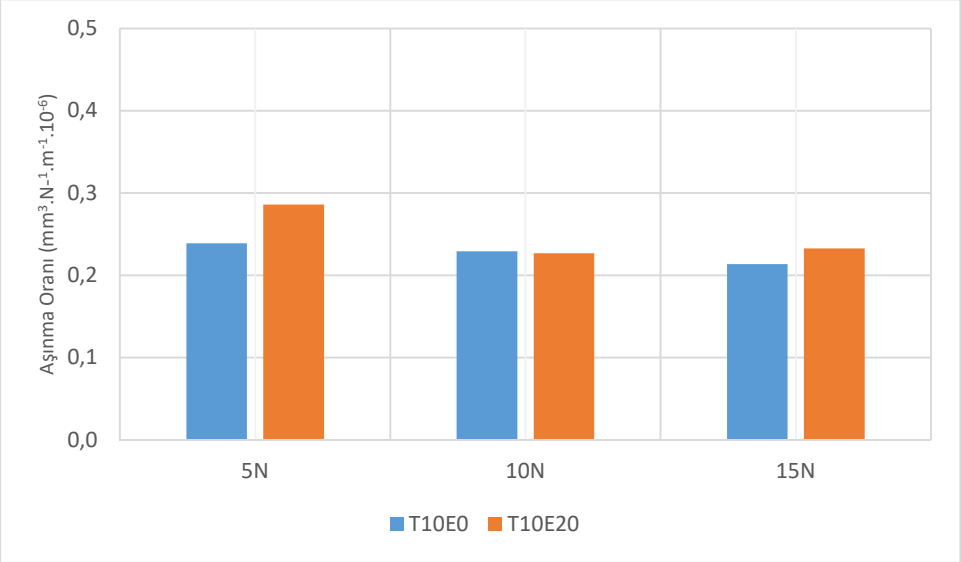
Ara yüzey sıcaklığının yanı sıra ortam sıcaklığının da sürtünme ve aşınma davranışları üzerine etkisi bulunmaktadır. Sıcaklık artışıyla metal matris kompozitlerde hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçişler meydana gelmektedir (Gomez-del Rio vd., 2010; Kumar, 2021). Şiddetli aşınma sonucu aşınmalar artmış, ortaya çıkan aşınma ürünleri kayma mesafesi içerisinde pik artışlara neden olmuştur. Hem haddeli hemde haddesiz numunelerde sürtünme katsayıları; şiddetli aşınma fazında çalışılması ve plastik deformasyon sebebiyle artmıştır.

Çizelge 9.2. SiC takviye oranı %10 olan haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin ağırlık kayıpları ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri

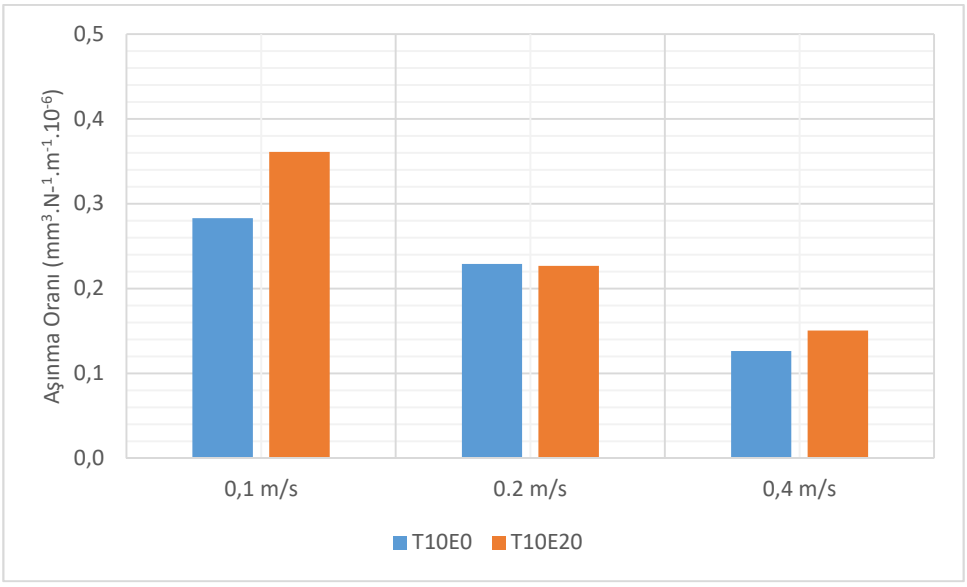
Test Adı		**Test Parametreleri**				**Başlangıç Ağırlığı (gr)**	**Bitiş Ağırlığı (gr)**	**Ağırlık Farkı (gr)**	**Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)**
		Yük (N)	**Mesafe (m)**	**Hız (m/s)**	**Sıcaklık (°C)**				
T10E0	T10E0-5N	5	500	0,2	25	8,364	8,362	0,002	0.34
	T10E0-10N	10	500	0,2	25	8,446	8,442	0,002	0.41
	T10E0-15N	15	500	0,2	25	8,369	8,364	0,005	0.33
	T10E0-0,1 m/s	10	500	0,1	25	8,376	8,371	0,005	0.28
	T10E0-0,2 m/s	10	500	0,2	25	8,446	8,442	0,004	0.41
	T10E0-0,4 m/s	10	500	0,4	25	8,396	8,394	0,002	0.32
	T10E0-25°C	10	500	0,2	25	8,446	8,442	0,004	0.41
	T10E0-100°C	10	500	0,2	100	8,391	8,390	0,001	0.34
	T10E0-150°C	10	500	0,2	150	8,367	8,364	0,003	0.36

T10E20	T10E20-5N	5	500	0,2	25	7,015	7,013	0,002	0.26
	T10E20-10N	10	500	0,2	25	6,979	6,976	0,003	0.26
	T10E20-15N	15	500	0,2	25	6,964	6,960	0,004	0.34
	T10E20-0,1 m/s	10	500	0,1	25	7,016	7,011	0,005	0.29
	T10E20-0,2 m/s	10	500	0,2	25	6,979	6,976	0,003	0.26
	T10E20-0,4 m/s	10	500	0,4	25	7,019	7,017	0,002	0.25
	T10E20-25°C	10	500	0,2	25	6,979	6,976	0,003	0.26
	T10E20-100°C	10	500	0,2	100	6,941	6,938	0,003	0.41
	T10E20-150°C	10	500	0,2	150	7,042	7,039	0,003	0.33

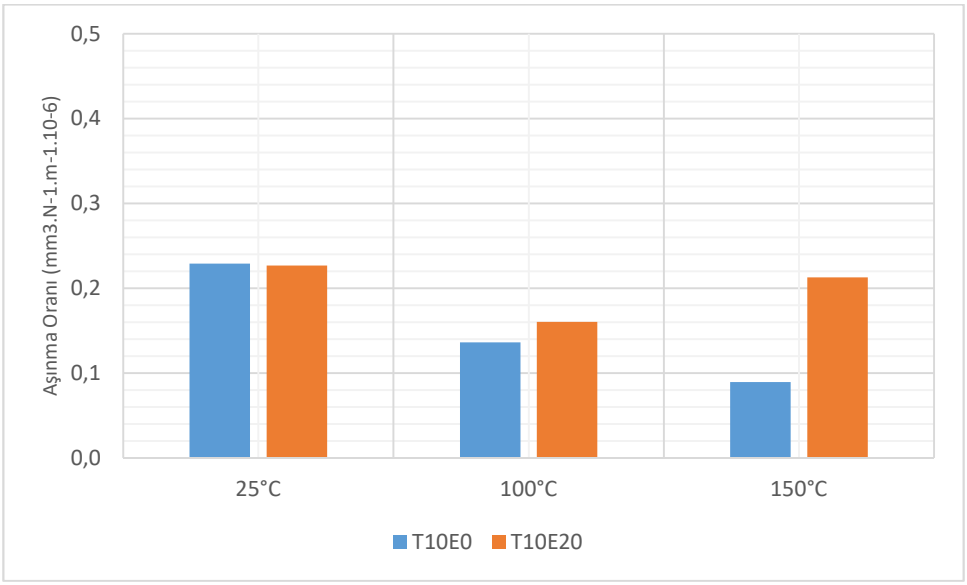
Çizelge 9.2'de %10 SiC takviyeli numunelerde test öncesi ve sonrasında ağırlık ölçümlerinde ağırlık kayıpları oldukça az olmuştur. Artan yük ile birlikte ağırlık kaybı artarken; artan hız ve sıcaklıkta ağırlık kayıpları düşmüştür. Takviye miktarındaki artıştan kaynaklı artan sertlik ile numunelerin karşı bilyeleri aşındırdığı görülmüştür.



a)



b)



c)

Şekil 9.17. %10SiC Takviyeli, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında aşınma oranları

Şekil 9.17'de yük değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 5N yükte aşınma oranı 0,24 iken 10N'da %4,2 azalarak ile 0,23, 15N'da %4,3 azalarak ve 0,22 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 5N yükte aşınma oranı 0,29 iken 10N'da %20,7 azalarak 0,23, 15N'da ise 10N'da belirlenen değerden %2,4 artmıştır.

Hız değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 0,1 m/s hızda aşınma oranı 0,24 iken 0,2 m/s hızda %4,2 azalarak 0,23, 0,4m/s hızda ise %43,5 azalarak 0,13 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 0,1 m/s hızda aşınma oranı 0,36 iken 0,2 m/s hızda %36,1 kat azalarak 0,23, 0,4 m/s hızda %34,8 azalarak 0,15 değerini almıştır.

Sıcaklık değişimlerinde; haddesiz numunelerde 25ºC sıcaklıkta aşınma oranı 0,23 iken 100ºC'de %39,1 azalarak 0,14, 150ºC'de %35,7 azalarak 0,09 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 25ºC sıcaklıkta sürtünme katsayısı 0,23 iken 100ºC'de %30,4 azalarak 0,16, 150ºC'de ise %31,25 artarak 0,21 değerini almıştır.

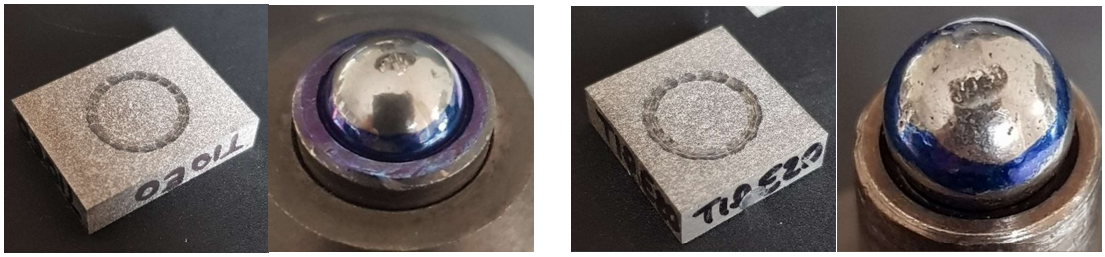
Haddelenmemiş numunelerde yük değeri arttıkça yüzeyde oluşan ısı ile oluşan oksitlenme katı yağlayıcı görevi görmüş ve metal-metale teması azalmıştır. Haddeli numunelerde 10N'da aşınma oranı düşmüş olup 15N'da yükselmiştir. Kopan parçaların kayan yüzeyler arasında aşındırıcı etki yaratması sürtünme katsayısının artmasına neden olabilmektedir.

Hız değişimleri ile birlikte tüm numunelerde aşınma kayıpları düşmüş olup bunun sebebi artan yüzey sıcaklıkları ile plastik deformasyon olması, aşınmalar artsa da aşınan malzemelerin yüzeyde sıvama yapmasıdır. Sürtünme ile birlikte yüzey sıcaklıkları şiddetli aşınmaya neden olmuştur. Haddeli numunelerde sertlik değerinin yüksek olması sebebiyle aşınma direnci artarak aşınma kayıpları haddesiz numunelere göre daha az olmuştur.

Sıcaklık değişimleri ile birlikte plastik deformasyon oluşmuş, sürtünme artmış fakat aşınma metalleri yüzeye sıvandığı için sıcaklık arttıkça aşınma oranları düşmüştür. Haddeli 150ºC sıcaklıkta aşınma kaybı yüksek olup bunun sebebi sıcaklık ile birlikte bilye üzerine malzeme transferinden kaynaklı olabilir.

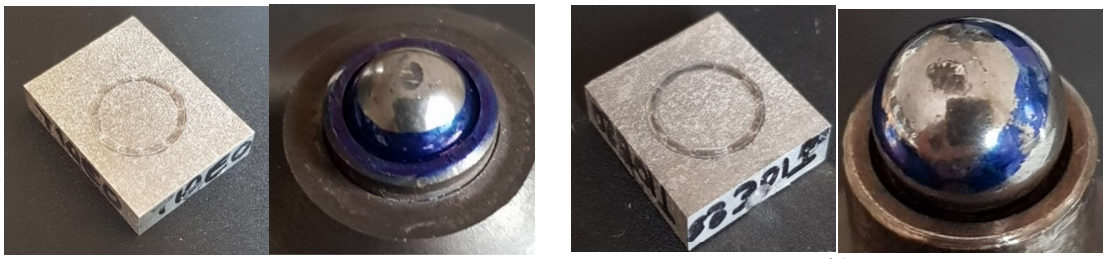
Aşınma oranları benzer çalışmaların (Daoud & AbouEl-khair, 2010), (Gültekin vd., 2010) aksine haddelenmiş numunelerde, haddelenmemiş numunelere göre test değerleri yükseldikçe artmıştır. Hadde işlemi sırasında malzemenin sertliğinin ve mukavemetinin artması sebebiyle aşınmaların daha az olması beklenirken; sürtünme esnasında kopan takviye malzemelerinin arada aşındırıcı etkisi yapması veya yüksek boşluklu yapının etkisiyle aşınmanın artmasına neden olabilmektedir. Sıcaklık

değişimleri altında ise haddelenmemiş numunelerde sıvama gözlemlenmişken haddeli numunelerde adhesif aşınma kaynaklı aşınma oranı yüksek ölçümlenmiştir.



a) b)

Şekil 9.18. %10 SiC takviye içeren numunelerde 15 N yükte (0,2 m/s hız, 25°C sıcaklıkta) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş



a) b)

Şekil 9.19. %10 SiC takviye içeren numunelerde 0,4 m/s hızda (10N yük, 25°C sıcaklıkta) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş

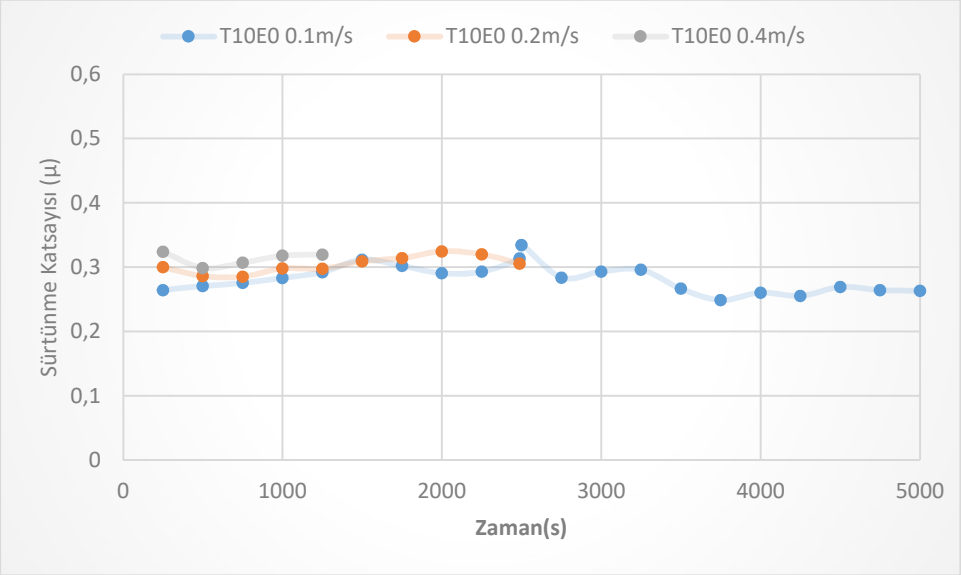


a) b)

Şekil 9.20. %10 SiC takviye içeren numunelerde 150ºC sıcaklıkta (10N yük, 0,2 m/s hızda) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş

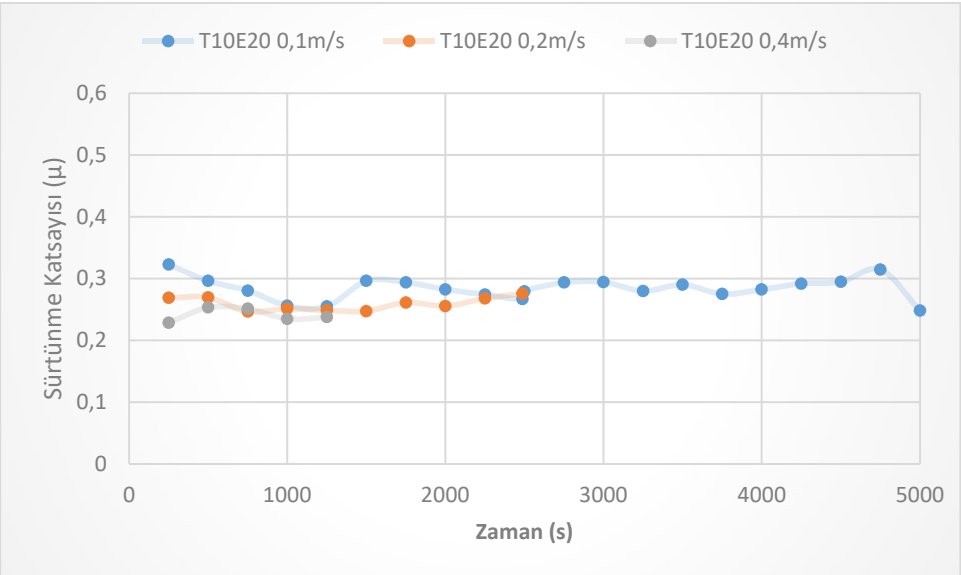
Şekil 9.20 a ve b'de yükün etkisi ile aşınma izinin daha derin olduğu ve ağırlık kaybının daha fazla olduğu belirgin şekilde görülmektedir. Yine bilye üzerindeki izler

karşılaştırıldığında haddelemenin etkisi ile numunenin daha aşındırıcı etki kazandığı görülmüştür.



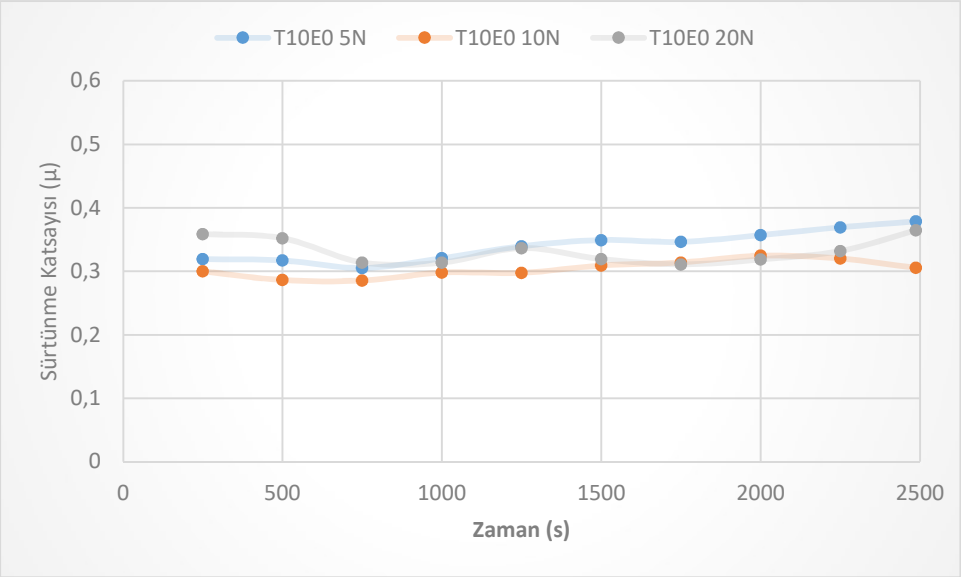
Şekil 9.21. T10E0 numunesinin hız – zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

T10E0 numunelerinde hız arttıkça sürtünme katsayıları da artmıştır. Test süresi boyunca tüm numunelerde sürtünme katsayıları korunmuştur.



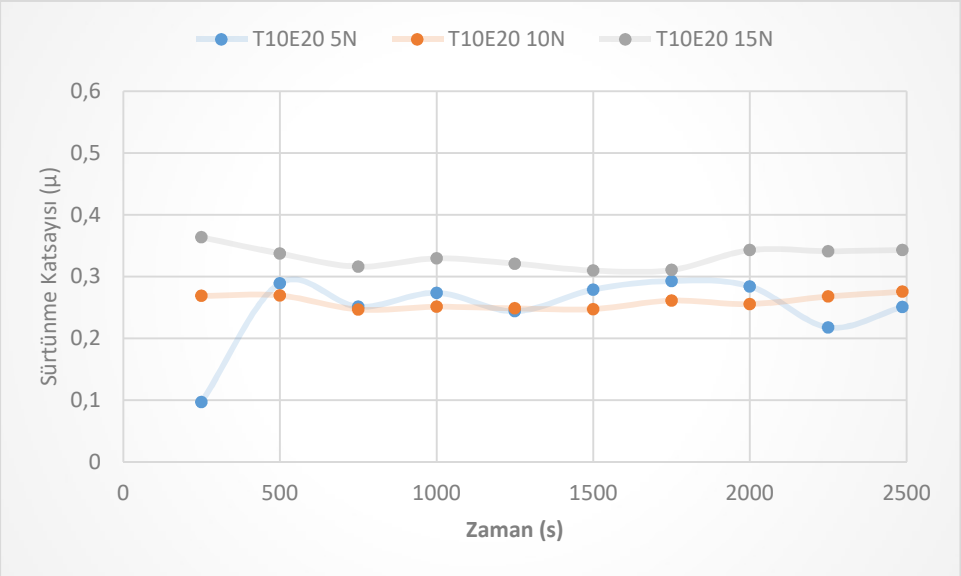
Şekil 9.22. T10E20 numunesinin hız - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

T10E20 numunelerinde hız değişimleri test değerleri artarken sürtünme katsayıları haddelenmemiş numunelerin aksine düşmüştür. Benzer çalışmalarda (Daoud, AbouEl-khair, 2010), (Gültekin vd., 2010) hız değerleri artarken sürtünme katsayısının düştüğü görülmüştür. Testler esnasında da zaman ilerledikçe sürtünme katsayısı korunmuştur.



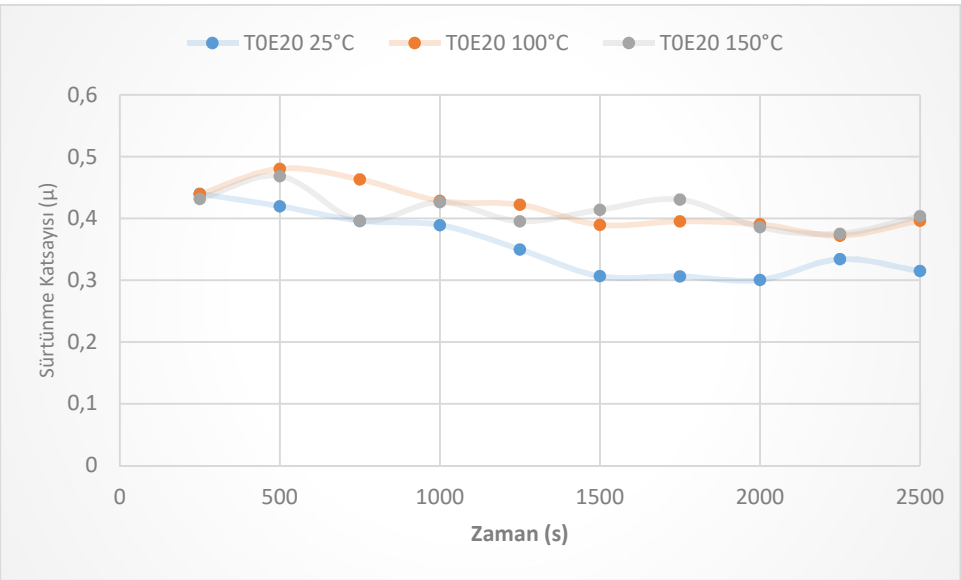
Şekil 9.23. T10E0 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

T10E0 numunelerinde 5N ve 15N'da sürtünme katsayıları yakın ölçülmüş olup en yüksek sürtünme katsayısı 10N'da ölçülmüştür.



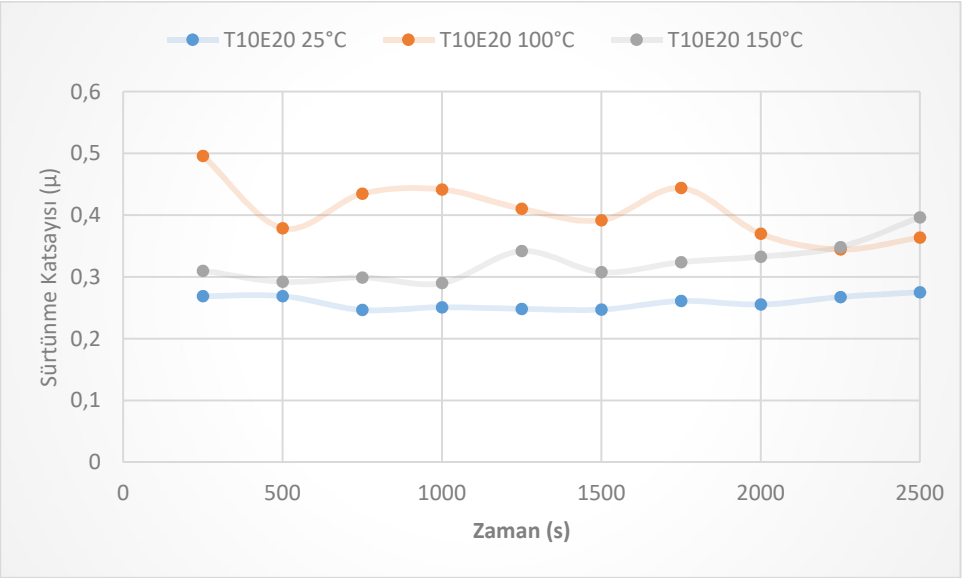
Şekil 9.24. T10E20 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

T10E20 haddelenen numunelerde ise yük değeri ile birlikte sürtünme katsayısı da artmıştır. Hem haddelenmemiş hem haddelenmiş %10 SiC takviyesine sahip numunelerde; takviyesiz numuneler ve benzer çalışmaların aksine yük değeri artarken sürtünme katsayısı da artmıştır.



Şekil 9.25. T10E0 numunesinin sıcaklık – zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

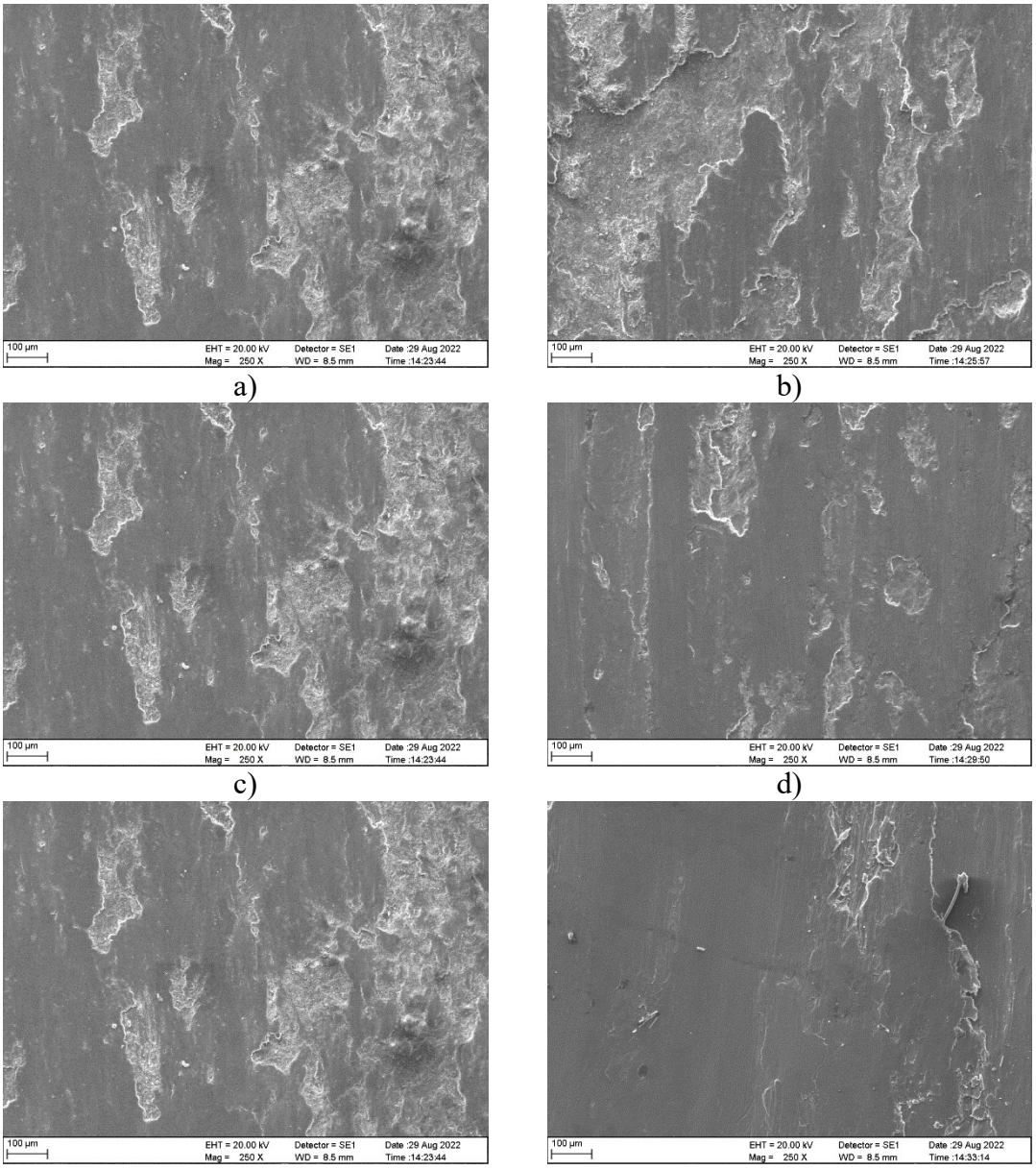
Sürtünme katsayıları her üç şartta yakın olsa da 100ºC'de yapılan testlerde yüzeyler arasına giren parçacık sebebiyle test esnasında sürtünme katsayısı artmıştır. Diğer noktalarda zamana bağlı olarak sürtünme katsayısı değeri korunmuştur.



Şekil 9.26. T10E20 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

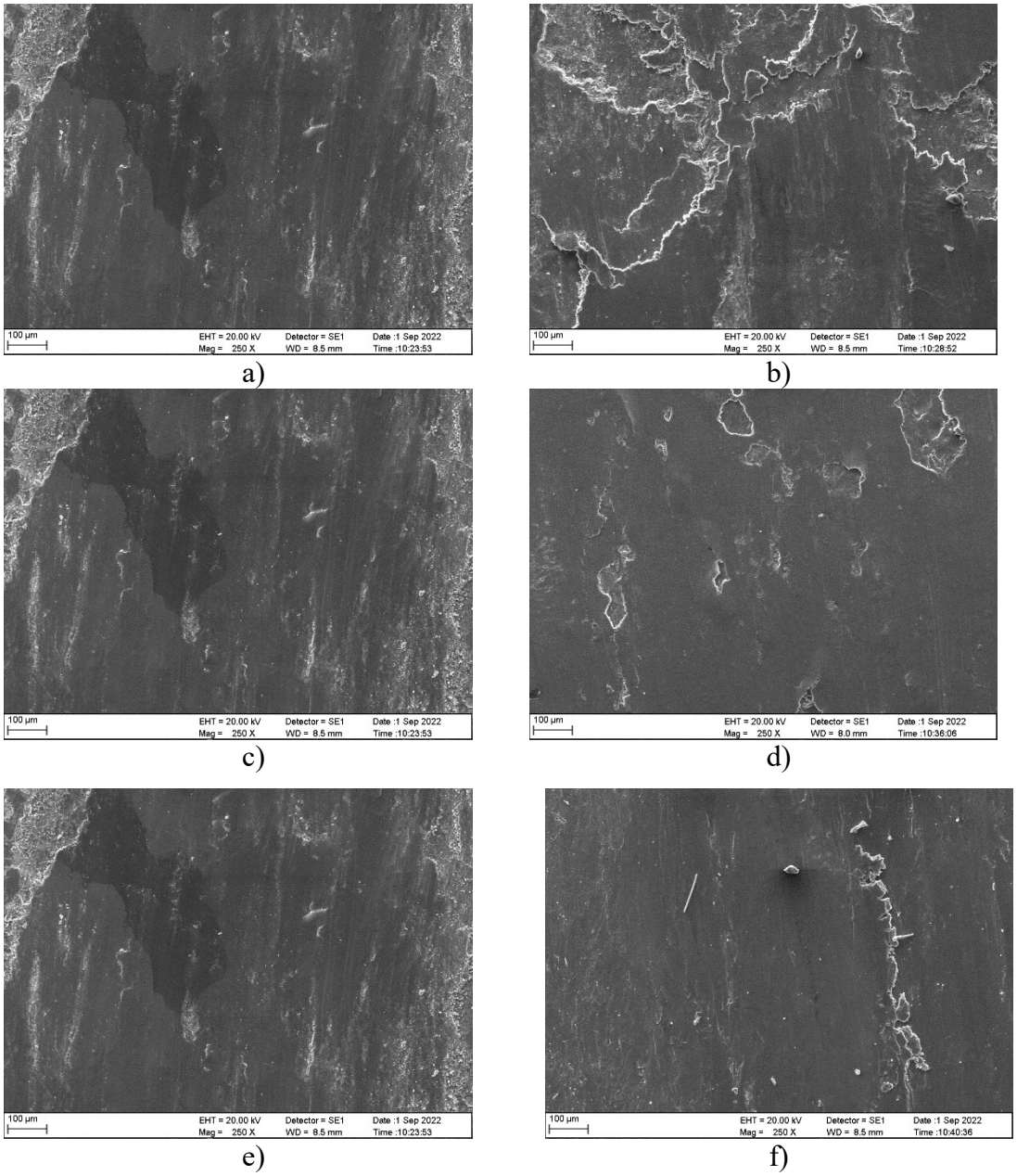
Haddelenmiş numunelerde genelde yüzeyde sıvama görülmüş olup 100ºC'de yapılan ölçümlerde sürtünme katsayısı yüksek başlayıp düşmüştür. Bunun sebebi yüzeyde sıcaklık kaynaklı bir sıvama oluşmasından veya yapısal boşluklardan kaynaklanabilmektedir.

Test süresi esnasında her bir numunenin sürtünme katsayıları değişimi değerlendirildiğinde alıştırma döneminde hızlı bir artış olup sonrasında kararlı hal kaymasına geçildiği görülmüştür. Bu da numune ve aşındırıcı bilye birbirine alıştıktan sonra arada oksit tabaka veya plastik deformasyon kaynaklı olarak sürtünme katsayısında belirgin değişimler olmamıştır. Sadece yüksek sıcaklık testlerinde zamanla belirgin düşüş ve artışlar görülmüştür.



Şekil 9.27. T10E0 SEM İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c)0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°Csıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta

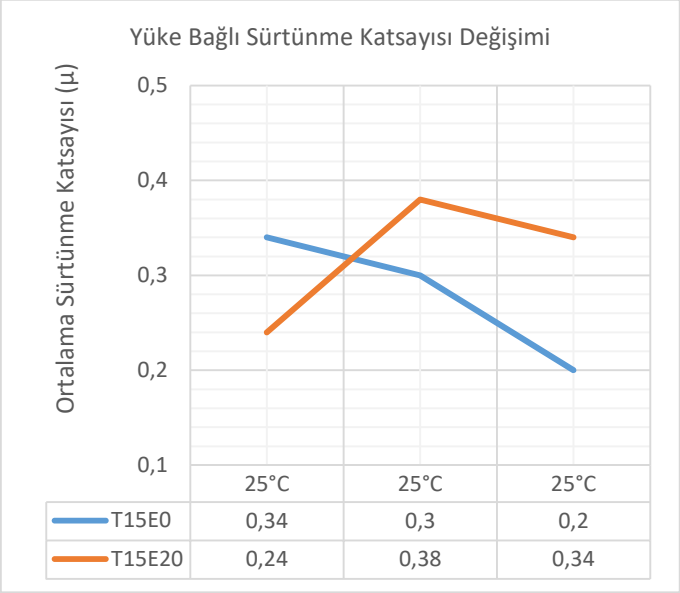
Numunelere ait x250 oranında yapılan SEM incelemelerinde yüzeyle adhesif aşınmalar kaynaklı kopmalar görülmüştür. Yük değerleri artarken aşınmalar derinleşmiş ve aşınma çapının büyüdüğü olarak görülmektedir. Hız değerleri artarken yüzeysel aşınmalar oluşmuştur. Sıcaklık değerleri arttıkça sıcaklığın etkisi ile yüzeyde sıvama ortaya çıkmıştır. Bu durum plastik deformasyon veya malzeme transferinden kaynaklanabilmektedir.



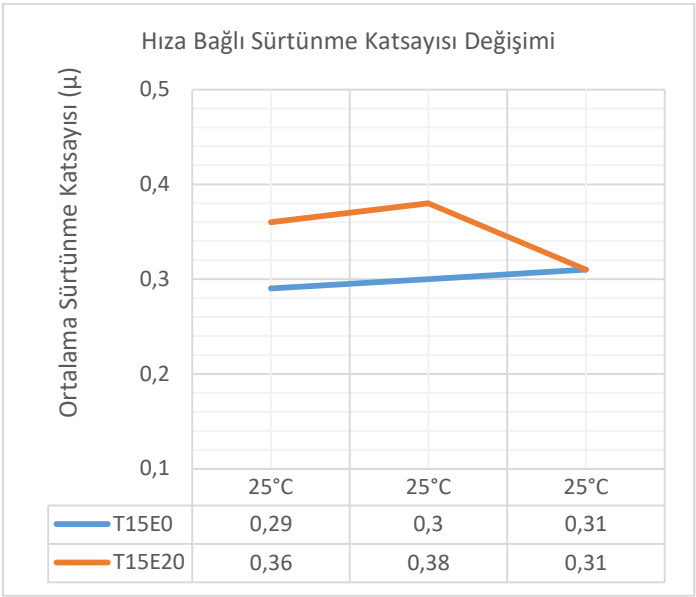
Şekil 9.28. T10E20 SEM İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c) 0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta

Haddelenmiş numunelerde genelde belli bölgelerde adhesif aşınmalar kaynaklı yüzeyde kopmalar olmuştur. Ayrıca abrasif aşınmalar ile parlatma ve hareket yönüne dik izler görülmüştür. Yük değeri artarken adhesif aşınma yanında plastik deformasyonda görülmektedir. Hız değeri arttıkça aşınmaların azaldığı görülmüş bunun kaynağı aşındırıcı bilye ile numune arasında film etkisi görecek bir etken ya da yapısal boşluğun temas oranını azaltmasından olabilmektedir. Sıcaklık artarken diğer farklı numunelerde

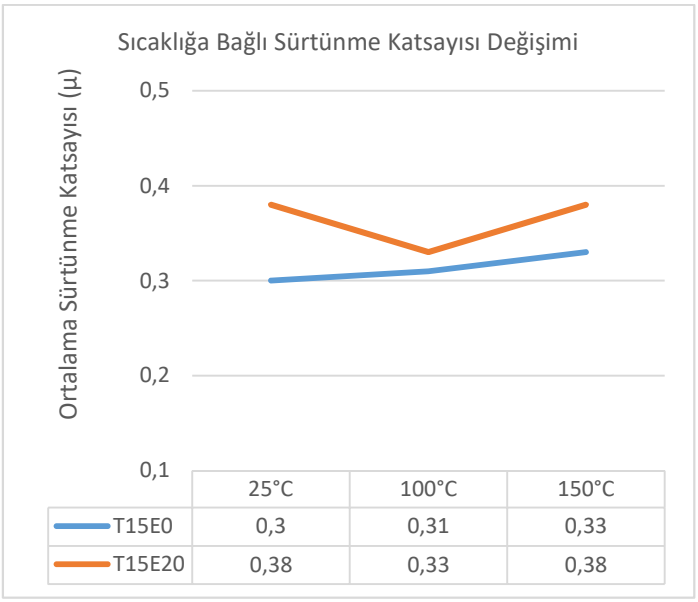
olduğu gibi sıvama ve malzeme aktarımı mevcuttur. Aşınan yüzeylerin aşındırıcı bilye üzerinde biriktiği belirlenmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 9.29. %15 SiC takviyeli, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında sürtünme katsayısı değişimleri

Şekil 10.29'da yük değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 5N yükte sürtünme katsayısı 0,34 iken 10N'da %11,76 azalarak 0,30, 15N'da %33,33 azalarak 0,20 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 5N yükte sürtünme katsayısı 0,24 iken 10N'da %58,33 artarak 0,38, 15N'da ise %10,53 azalarak 0,34 değerini almıştır.

Hız değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 0,1 m/s hızda sürtünme katsayısı 0,29 iken 0,2 m/s hızda %3,45 artarak 0,3, 0,4m/s hızda ise %3,33 artarak 0,31 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 0,1 m/s hızda sürtünme katsayısı 0,36 iken 0,2 m/s hızda %5,55 artarak 0,38, 0,4m/s hızda ise %18,42 azalarak ile 0,31 değerini almıştır.

Sıcaklık değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 25ºC sıcaklıkta sürtünme katsayısı 0,3 iken 100ºC'de %3,33 artarak 0,31, 150ºC'de %6,45 artarak ile 0,33 değeri belirlenmiştir. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 25ºC sıcaklıkta sürtünme katsayısı 0,38 iken 100ºC'de %13,16 azalarak 0,33, 150ºC'de ise %15,16 artarak 0,38 değerini almıştır.

%15 SiC takviye oranına sahip haddelenmemiş numunelerde sürtünme katsayısı değişimleri, haddeli numunelere göre daha az değişim göstermiştir. Sürtünme katsayısı; hafif aşınma döneminde oksitlenme kaynaklı düşmüş, artan yüzey sıcaklıkları ile aşırı aşınma döneminde plastik deformasyon etkisi ile de artmıştır.

Haddelenmiş numunelerde sürtünme sonrası numune izleri ve aşındırıcı bilyelere incelendiğinde, geçiş sıcaklıklarının daha yüksek olması sebebiyle sürtünme katsayısı daha yüksek olsa da yüzeyde biriken aşınma ürünleri daha az olmuştur. Bu da aşındırıcı malzemenin korunmasına yardımcı olmuştur. Haddelenmiş numunelerde sertlik ve çekme dayanımına artmasının yük değişimlerinde aşınma performansını olumlu yönde etkilediği gözlemlenmektedir.

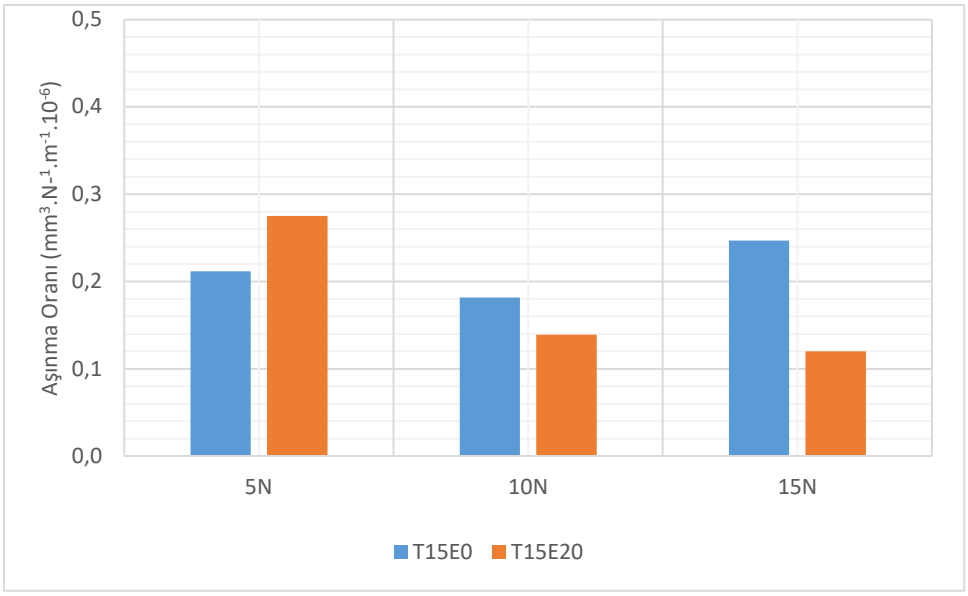
%15 SiC takviye edilmiş ve haddelenmemiş AA5754 AlMg3 alaşımının 0,2 m/s sabit hızda yük değişimleri ile birlikte sürtünme katsayısının (Daoud, AbouEl-khair, 2010), (Gültekin vd., 2010)'da olduğu gibi düştüğü belirlenmiştir. Yük altındaki sürtünme katsayısının düşüş nedeni bir plastik deformasyon veya yapısal boşluk sebebiyle numune ve bilyenin birbirine temasının azalmasından kaynaklanmaktadır. Sabit 10N yük altında hız ve sıcaklık değerlerinin artması ile birlikte sürtünme katsayısı da artmıştır.

%15 SiC takviye edilmiş ve %20 oranında haddelenmiş AA5754 AlMg3 alaşımında ise sabit hız altında yük değerleri 5N'dan 10N'a yükselince sürtünme katsayısı artmış, 15 N da ise 10N'a göre düşmüştür. 10N sabit yük altında hız değerlerinin artması ile birlikte sürtünme katsayıları haddelenmeyen numunelerin aksine düşmüştür. Haddelenen numunelerde sürtünme katsayılarının düşük olmasının sebebi takviye oranı arttıkça ve haddenin etkisi ile malzeme mukavemetinin artması ve SiC takviyelerin film etkisi göstermesinden kaynaklanmaktadır.

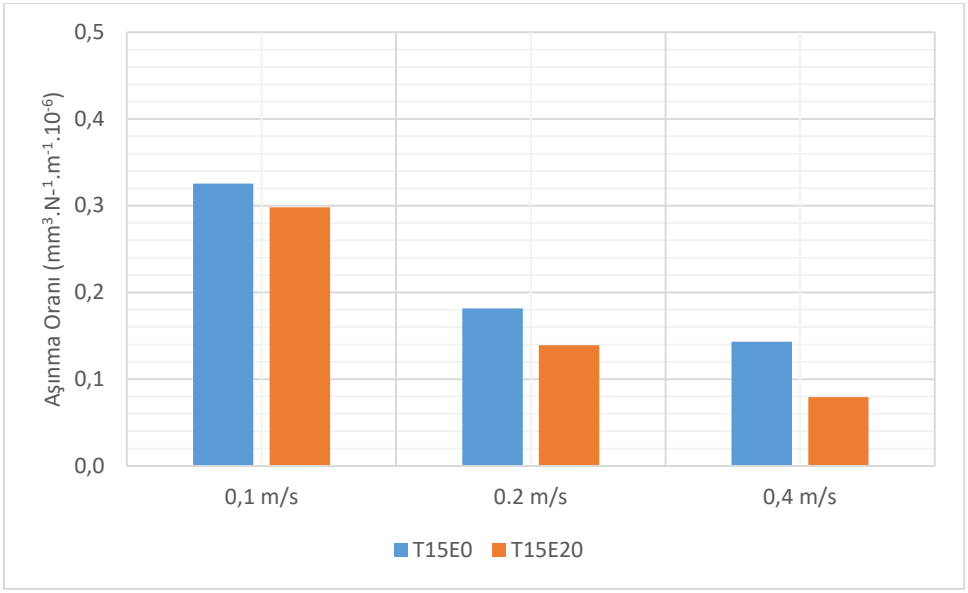
Çizelge 9.3. SiC takviye oranı %15 olan haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin ağırlık kayıpları ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri

Test Adı		Test Parametreleri				Başlangıç Ağırlığı (gr)	Bitiş Ağırlığı (gr)	Ağırlık Farkı (gr)	Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)
		Yük (N)	Mesafe (m)	Hız (m/s)	Sıcaklık (°C)				
T15E0	T15E0-5N	5	500	0,2	25	8,257	8,255	0,002	0,34
	T15E0-10N	10	500	0,2	25	8,254	8,251	0,003	0,30
	T15E0-15N	15	500	0,2	25	8,252	8,248	0,004	0,20
	T15E0-0,1 m/s	10	500	0,1	25	8,245	8,241	0,004	0,29
	T15E0-0,2 m/s	10	500	0,2	25	8,254	8,251	0,003	0,30
	T15E0-0,4 m/s	10	500	0,4	25	8,278	8,276	0,002	0,31
	T15E0-25°C	10	500	0,2	25	8,254	8,251	0,003	0,30
	T15E0-100°C	10	500	0,2	100	8,270	8,269	0,001	0,31
	T15E0-150°C	10	500	0,2	150	8,236	8,235	0,001	0,33
T15E20	T15E20-5N	5	500	0,2	25	6,964	6,962	0,002	0,24
	T15E20-10N	10	500	0,2	25	6,890	6,888	0,002	0,38
	T15E20-15N	15	500	0,2	25	6,990	6,987	0,003	0,34
	T15E20-0,1 m/s	10	500	0,1	25	6,933	6,929	0,004	0,36
	T15E20-0,2 m/s	10	500	0,2	25	6,890	6,888	0,002	0,38
	T15E20-0,4 m/s	10	500	0,4	25	6,988	6,987	0,001	0,31
	T15E20-25°C	10	500	0,2	25	6,890	6,888	0,002	0,38
	T15E20-100°C	10	500	0,2	100	6,949	6,947	0,002	0,33
	T15E20-150°C	10	500	0,2	150	6,920	6,919	0,001	0,38

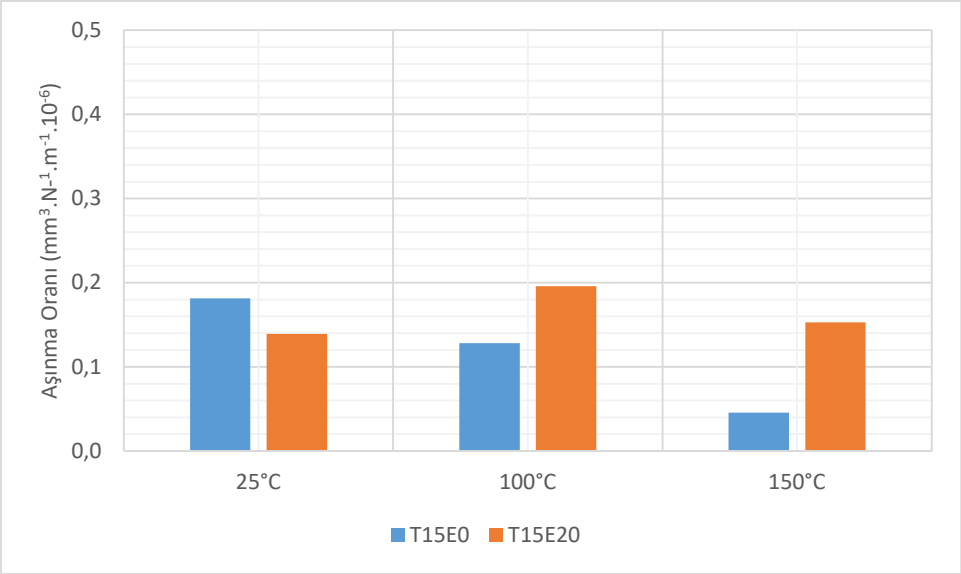
Çizelge 9.3'te %15 SiC takviyeli numunelerde test öncesi ve sonrasında yapılan ağırlık ölçümlerinde ağırlık kayıpları oldukça az olmuştur. Yük değerlerindeki artış ile birlikte ağırlık kaybı da artmış; hız ve sıcaklık değerleri artarken ağırlık kayıpları düşmüştür. SiC takviye oranındaki artış ile birlikte malzemenin mukavemeti artarken numunelerin karşı bilyeleri aşındırdığı görülmüştür.


0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
Aşınma Oranı (mm³.N⁻¹.m⁻¹.10⁻⁶)
5N
10N
15N
T15E0
T15E20

a)


0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
Aşınma Oranı (mm³.N⁻¹.m⁻¹.10⁻⁶)
0,1 m/s
0.2 m/s
0,4 m/s
T15E0
T15E20

b)



c)

Şekil 9.30. %15 SiC Takviyeli, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında aşınma oranları

Şekil 9.30'da yük değişimleri ile haddelenmemiş numunelerde 5N yük aşınma oranı 0,212 iken 10N'da %14,6 azalarak 0,181, 15N'da %36,5 artarak ve 0,247 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 5N yükte aşınma oranı 0,275 iken 10N'da %49,5 azalarak 0,139, 15N'da ise %13,7 azalarak 0,120 değerini almıştır.

Hız değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 0,1 m/s hızda aşınma oranı 0,325 iken 0,2 m/s hızda %44,30 azalarak 0,181, 0,4m/s hızda ise %20,99 azalarak 0,143 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 0,1 m/s hızda aşınma oranı 0,298 iken 0,2 m/s hızda %53,4 kat azalarak 0,139, 0,4 m/s hızda %43,2 azalma ile 0,079 değerini almıştır.

Sıcaklık değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 25°C sıcaklıkta aşınma oranı 0,181 iken 100°C'de %29,3 azalarak 0,128 150°C'de %64,1 azalarak 0,046 değeri belirlenmiştir. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 25°C sıcaklıkta sürtünme katsayısı 0,139 iken 100°C'de %41 artarak ile 0,196, 150°C'de ise %21,9 azalarak 0,153 değerini almıştır.

Haddesiz numunelerde yük artarken yüzeyde oluşan ısı etkisiyle yüzeydeki oksitlenme, katı yağlayıcı görevi görmüş ve metal-metale temas azalmış 10N'da aşınma

oranı düşmüş olup 15N'da yükselmiştir. Bunun sebebi kopan parçaların kayan yüzeyler arasında aşındırıcı etki yaratmasından kaynaklanmaktadır.

Hız artarken tüm numunelerde aşınma kayıpları düşmüş olup bunun sebebi artan yüzey sıcaklıkları ile plastik deformasyon olması, aşınmalar artsa da aşınan malzemelerin yüzeyde sıvama yapmasıdır. Haddelenmiş numunelerde aşınma kayıpları haddelenmemiş numunelere göre daha az olmuştur.

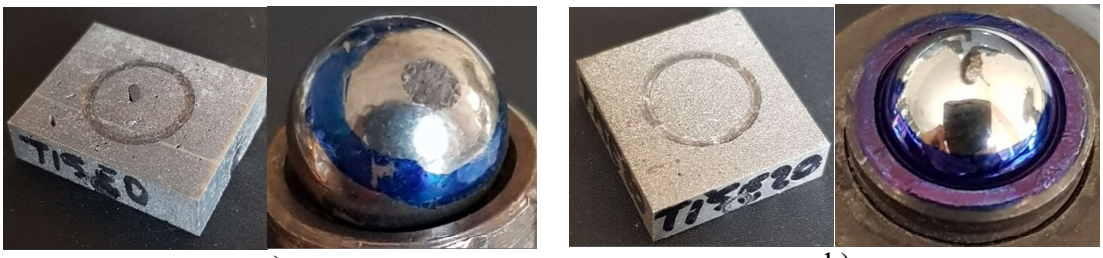
Sıcaklık değişimleriyle birlikte plastik deformasyon olmuş, sürtünme artmış fakat aşınma metalleri yüzeye sıvandığı için sıcaklık arttıkça aşınma oranları düşmüştür. Haddelenmiş numunelerde artan ortam sıcaklıkları ve ara yüzey sıcaklıkları ile birlikte metal matris kompozitlerde hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçiş olduğu görülmüştür. Yüzeyde sıcaklık kaynaklı adhesif aşınmalar ile birlikte bilye üzerine malzeme transferinden kaynaklı olarak aşınma kaybı yüksek olmuştur.

Aşınma oranları değişken değerleri arttıkça benzer çalışmaların (Daoud & AbouEl-khair, 2010), (Gültekin vd., 2010) aksine haddelenmiş numunelerde, haddelenmemiş numunelere göre değişken değerleri arttıkça yükselmiştir. Hadde işlemi sırasında malzemenin sertliğinin ve mukavemetinin artması sebebiyle aşınmaların daha az olması beklenirken sürtünme esnasında kopan takviye malzemelerinin arada aşındırıcı etki yapmasından kaynaklı aşınma oranları yüksek olmuştur. Sıcaklık etkisi altında ise haddelenmemiş numunelerde sıvama gözlemlenmişken, haddelenmiş numunelerde adhesif aşınma kaynaklı aşınma oranı yüksek ölçümlenmiştir.



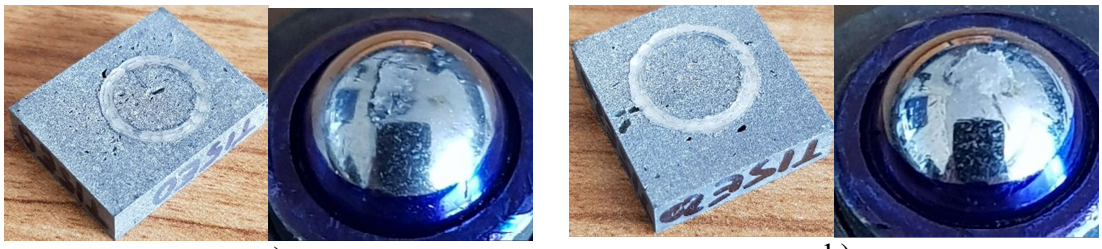
a) b)

Şekil 9.31. %15 SiC takviye içeren numunelerde 15 N yükte (0,2 m/s hız, 25°C sıcaklıkta) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş



a) b)

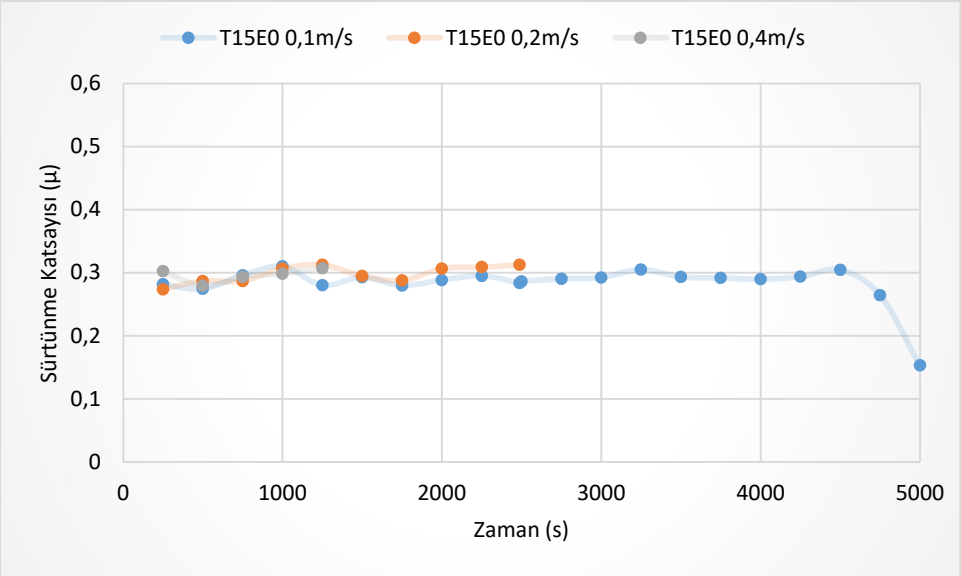
Şekil 9.32. %15 SiC takviye içeren numunelerde 0,4 m/s hızda (10N yükte, 25°C sıcaklıkta) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş



a) b)

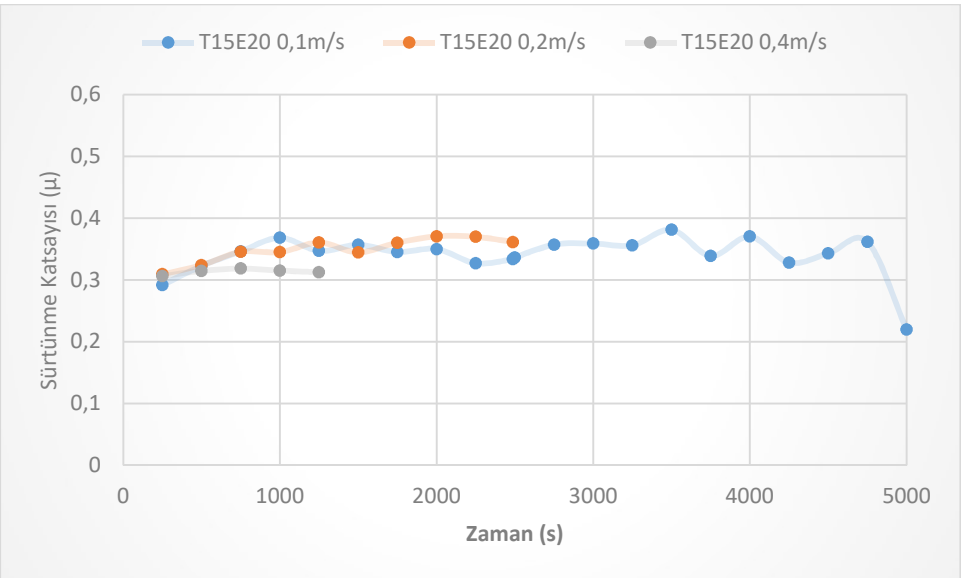
Şekil 9.33. %15 SiC takviye içeren numunelerde 150°C sıcaklıkta (10N yükte, 0,2 m/s hızda) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş

%15 SiC takviye içeren numunelerde takviye oranının artması ile sertlik ve çekme dayanımı da artmıştır. Haddelenmemiş numunelerde yük ve sıcaklık değişimleri ile birlikte yüzeyde şiddetli aşınma safhasına geçilmiş ortaya çıkan aşınma ürünlerinden kaynaklı olarak hem numune hemde aşındırıcı bilyede belirgin aşınmalar ortaya çıkmıştır. Haddelenmiş numunelerde daha yüksek sürtünme kuvvetleri ortaya çıksa da hafif aşınma safhasında kalınmış ve yüzeyde oluşan oksitlenme kaynaklı katı yağlayıcı tabaka sayesinde hem yüzeyde hem bilyede aşınmalar daha az olmuştur. Artan sıcaklık değişkenlerinde ise haddelenmemiş numunelerde aşınma, haddeli numunelerde ise plastik deformasyon ve yüzeyde sıvama belirgindir.



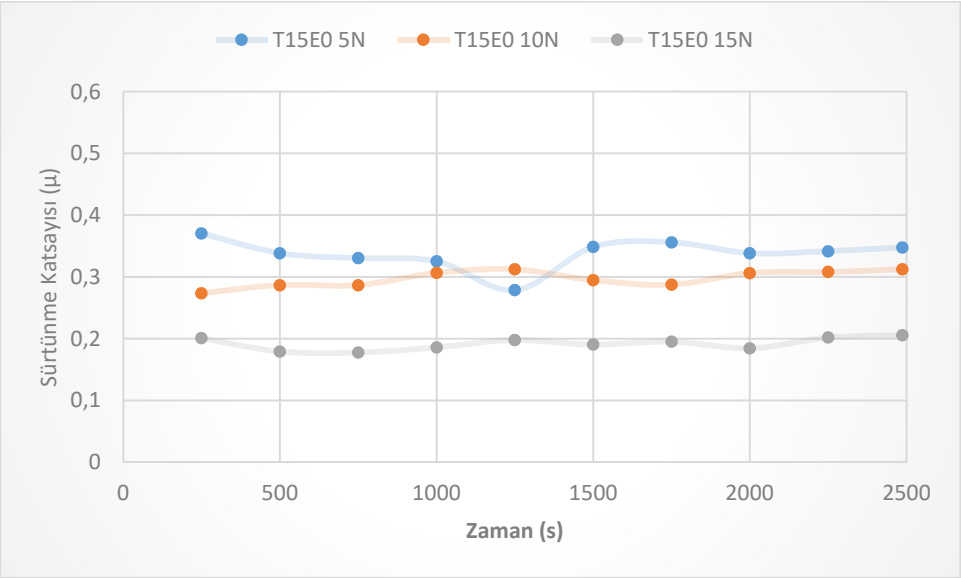
Şekil 9.34. T150E0 numunesinin hız - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

T15E0 numunelerinde değişken hızlar altında sürtünme katsayısı 0,3 civarında çıkmış olup hız ile birlikte sürtünme katsayıları da artmıştır. Genelde test süresi boyunca doğrusal bir değişim sürtünme katsayısı korunmuştur.



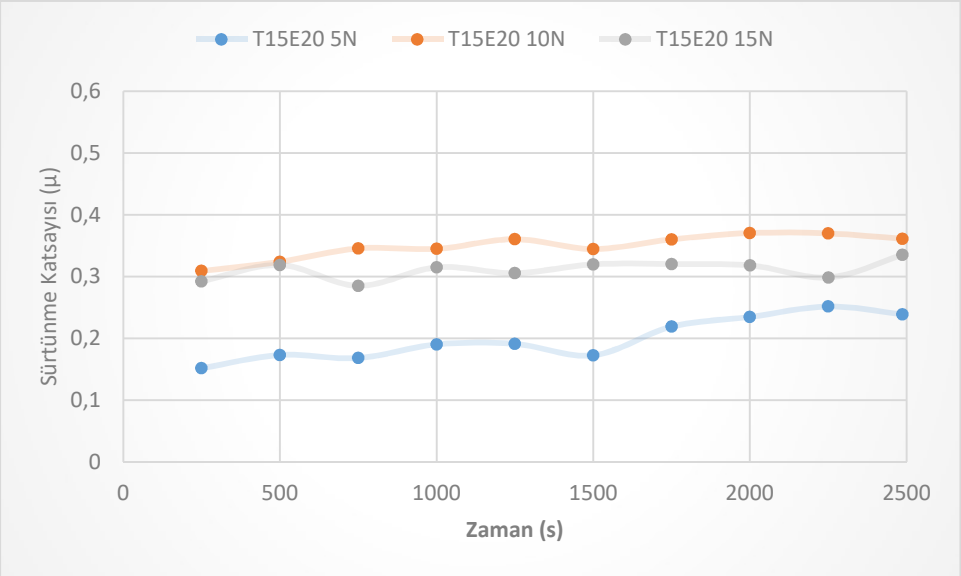
Şekil 9.35. T15E20 numunesinin hız - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

T15E20 numunelerinde sürtünme katsayısı 0,2 m/s hızda artarken, sonrasında 0,4 m/s hızda benzer çalışmalarda görüldüğü üzere diğer hızlara göre düştüğü görülmüştür. Test süresince tüm hızlarda sürtünme katsayıları paralel ilerlemiştir.



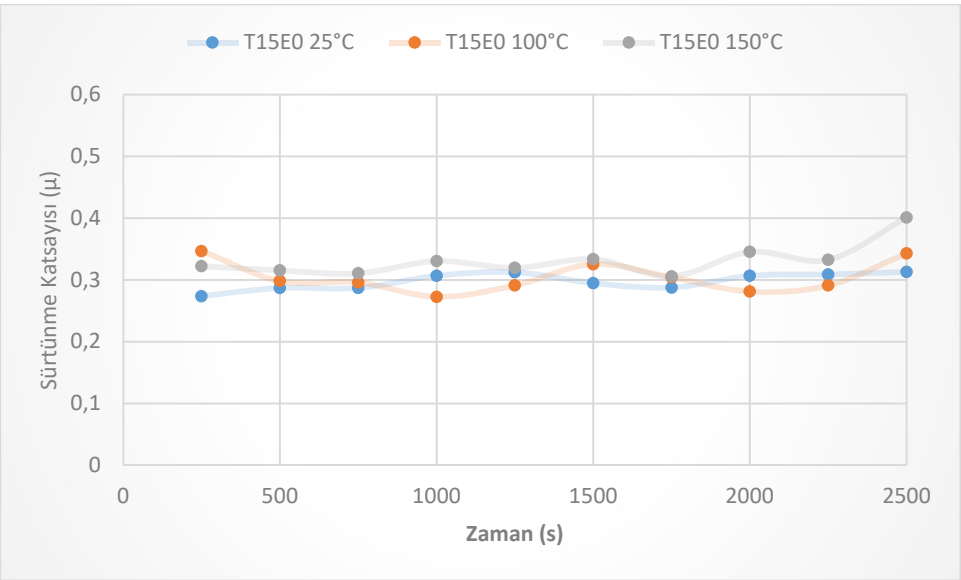
Şekil 9.36. T15E0 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

T15E0 numunelerinde yük değeri artarken sürtünme katsayısı düşmüştür. En düşük sürtünme katsayısı değeri 15N yük altında 0,2 olarak ölçülmüştür. Benzer çalışmalarda da (Uyyuru vd., 2006), (Daoud, AbouEl-khair, 2010), (Gültekin vd., 2010) yükler arttıkça sürtünme katsayılarının da düştüğü görülmüştür.



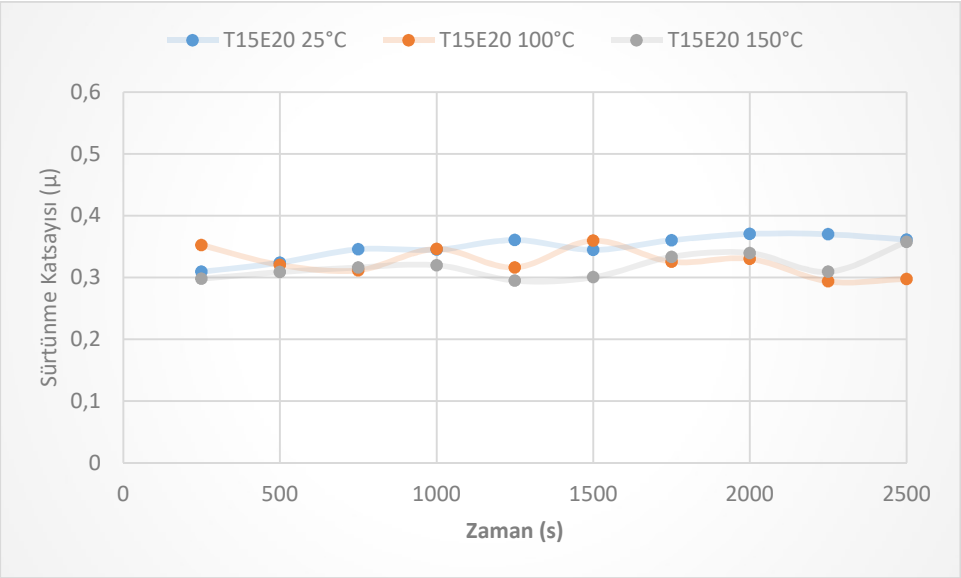
Şekil 9.37. T15E20 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

Haddelenmiş numunelerde ise yük artarken sürtünme katsayıları da yükselmiş ve en yüksek değer 10N yük altında görülmüştür. Bunun sebebi üç cisimli aşınma olacağı gibi ortaya çıkan sıcaklıklar ile şiddetli aşınma fazına geçilmesi olabilir.



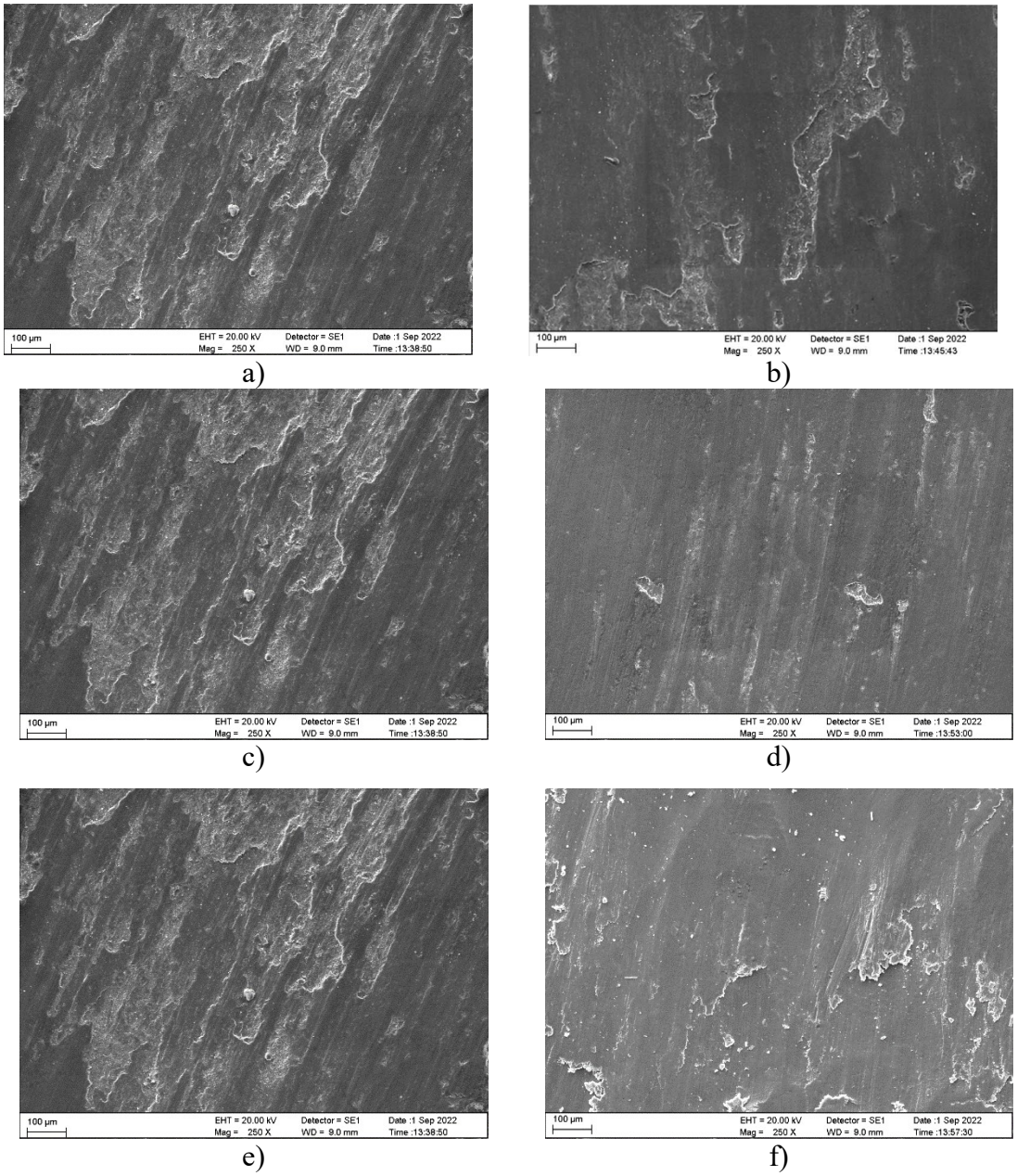
Şekil 9.38. T15E0 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

Haddelenmemiş %15 SiC takviyeli numunelerde en yüksek sürtünme katsayısı 150ºC'de belirlenmiş olup testlerin devam ettiği sürece artan yüzey sıcaklığı ile plastik deformasyon kaynaklı sürtünme katsayısı artmış fakat pik bir artış gözlemlenmemiştir.



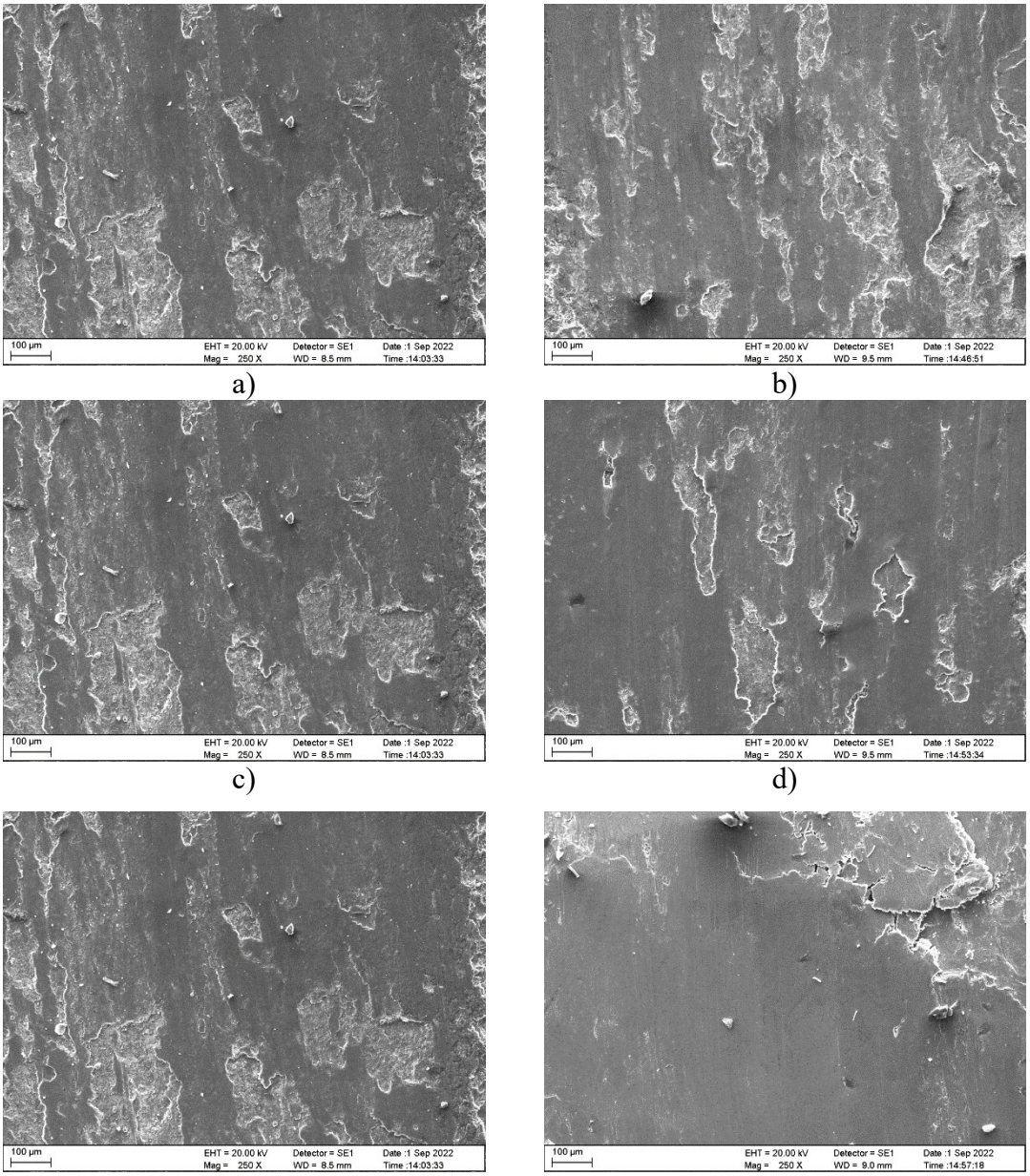
Şekil 9.39. T15E20 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

Haddelenmiş numunelerde ise yüzeyde oluşan film veya aşındırıcı malzemeler kaynaklı test süresi içerisinde değişimler olsa da sürtünme katsayıları korunmuştur. Alışma aşınmasından sonra genelde kararlı hal kayması görülmüştür.



Şekil 9.40. T15E0 İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c) 0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta

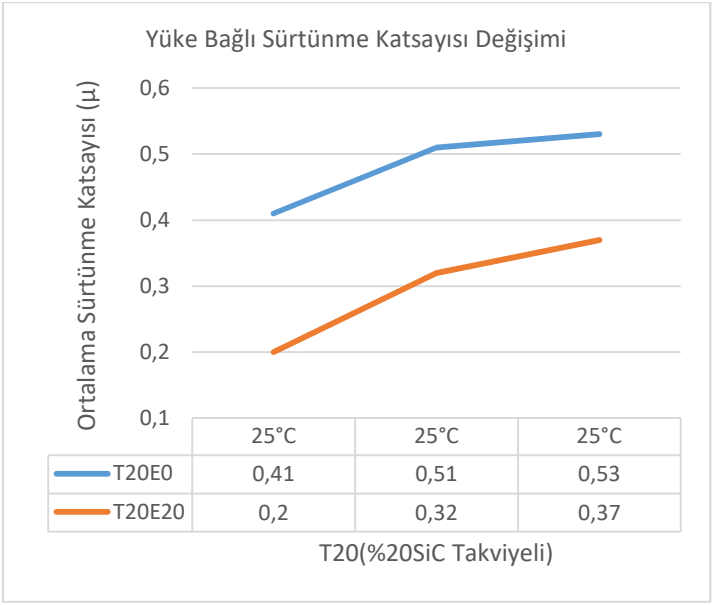
Numunelere ait x250 oranında yapılan SEM incelemelerinde yüzeyde adhesif aşınmalar kaynaklı kopmalar görülmüştür. Yüzeyde biriken aşındırıcı maddelerin birikimi ile çizilmeler ve abrasif aşınmalarda görülmüştür. Bu aşınmalar numune ve aşındırıcı bilyede karşılıklı olarak meydana gelmiştir. Yüzey sıcaklıkları ve yük değişken değerleri arttıkça parça kopmaları ve adhesif aşınma; hız değeri arttıkça abrasif aşınma, sıcaklık değeri artışı ile de topaklanmalar görülmüştür.



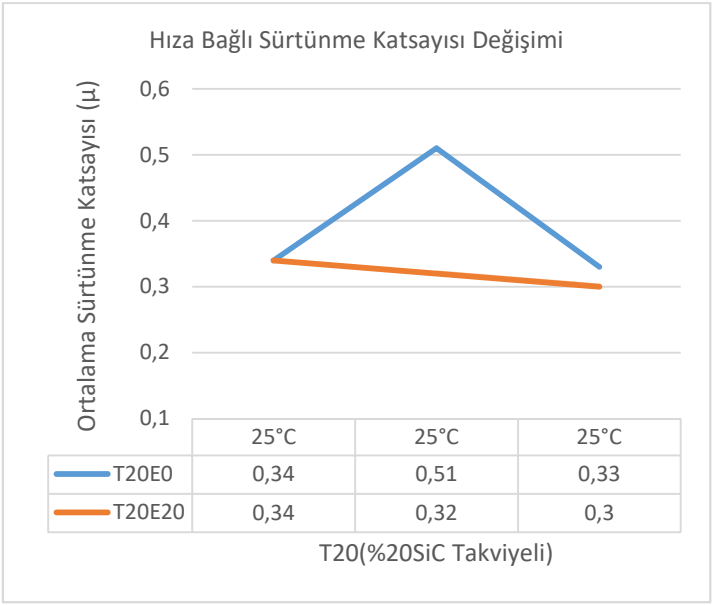
Şekil 9.41. T15E20 SEM İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c) 0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta

Haddelenmiş numunelerde daha düşük hız, yük ve sıcaklık şartlarında belli bölgelerde adhesif aşınmalar yüzeyde parlatma olarak kalmışken bazı noktalarda kopmaya kadar gitmiştir. Yük arttıkça adhesif aşınma yanında plastik deformasyonda görülmektedir. Hız arttıkça aşınmaların azaldığı görülmüş bunun kaynağı aşındırıcı bilye ile numune arasında film etkisi görecek bir etken ya da yapısal boşluğun temas oranını azaltmasından olabilmektedir. Sıcaklık arttıkça diğer farklı numunelerde olduğu

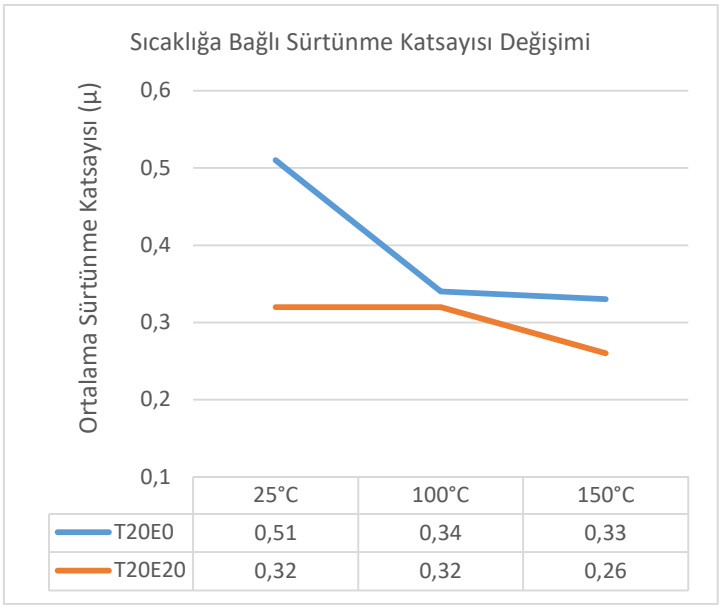
gibi sıvama ve malzeme aktarımı mevcuttur. Aşınan yüzeylerin numune üzerinde biriktiği belirlenmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 9.42. %20 SiC takviyeli, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında sürtünme katsayısı değişimleri

Şekil 9.42'de yük değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 5N yükte sürtünme katsayısı 0,41 iken 10N'da %24,39 artarak 0,51, 15N'da %3,93 artarak ve 0,53 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 5N yükte sürtünme katsayısı 0,2 iken 10N'da %60 artarak 0,32, 15N'da ise %15,63 azalarak ile 0,37 değerini almıştır.

Hız değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 0,1 m/s hızda sürtünme katsayısı 0,34 iken 0,2 m/s hızda %50 artarak 0,51, 0,4m/s hızda ise %35,29 azalarak 0,33 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 0,1 m/s hızda sürtünme katsayısı 0,34 iken 0,2 m/s hızda %5,88 azalarak 0,32, 0,4m/s hızda ise %6,25 azalarak 0,3 değerini almıştır.

Sıcaklık değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 25°C sıcaklıkta sürtünme katsayısı 0,51 iken 100°C'de %33,33 artarak 0,34, 150°C'de %2,94 artarak 0,33 değeri belirlenmiştir. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 25°C sıcaklıkta sürtünme katsayısı 0,32 iken 100°C'de 0,32 ile aynı gözlemlenmiştir. 150°C'de ise %18,75 artarak 0,26 değerini almıştır.

%20 SiC takviye oranına sahip haddelenmemiş numunelerde yük değeri artarken sürtünme katsayıları da artmış, takviye miktarının artması ile yüzeyde artan

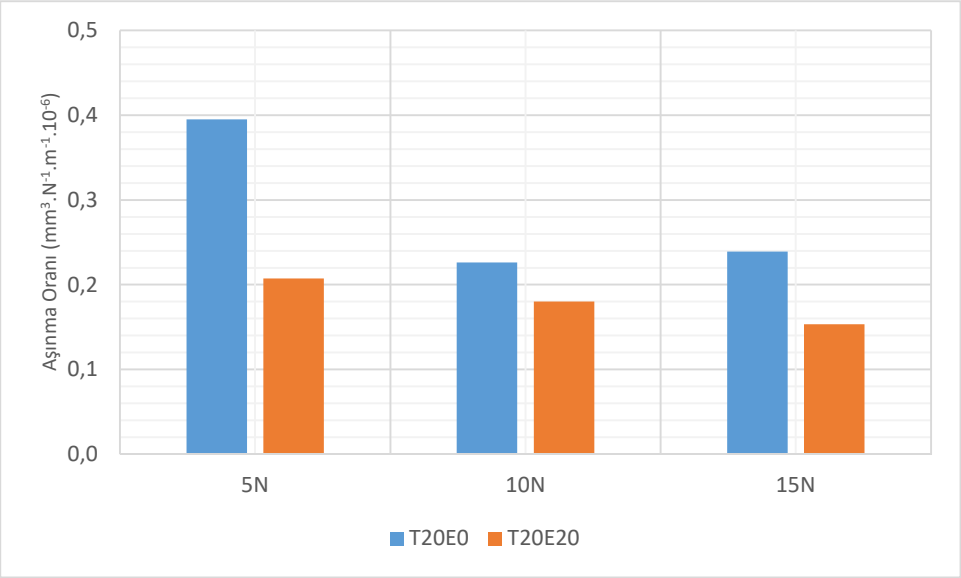
sıcaklıklardan kaynaklı hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçiş olmuştur. Haddelenmiş numuneler de benzer davranışlar görülmüş fakat sürtünme katsayıları değerlendirildiğinde şiddetli aşınmaya geçiş olmadığı oksit tabakanın tamamıyla yüzeyden kalkmadığı görülmektedir.

Haddelenmiş numunelerde hız değeri 0,2 m/s'de pik meydana geldiği görülmekte olup bunun sebebinin ara yüzeyde biriken veya yapıdan ayrılan takviye malzemesinin yüzeyler arasında aşındırıcı görevi gösterdiği düşünülmektedir. Artan hızlar ile birlikte haddelenmiş numunelerde yüzeyde oluşan film tabakanın etkisi ile sürtünme katsayılarının düştüğü belirlenmiştir. Artan sıcaklıklar ile birlikte malzeme yüzeyinde plastik deformasyon ve sıvamanın etkisi ile sürtünme kuvvetinin dolayısıyla sürtünme katsayılarının düştüğü görülmüştür.

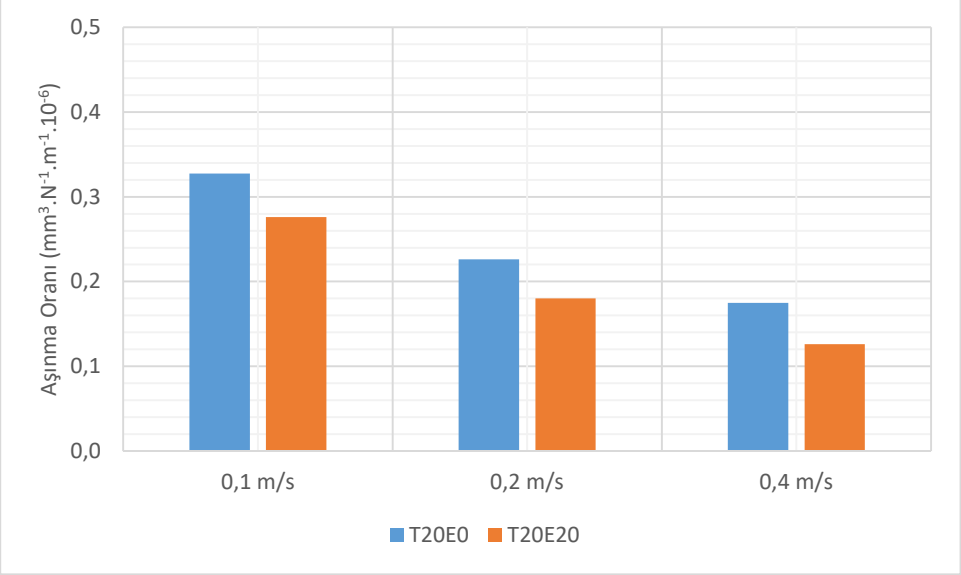
Çizelge 9.4. SiC takviye oranı %20 olan haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin ağırlık kayıpları ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri

Test Adı		Test Parametreleri				Başlangıç Ağırlığı (gr)	Bitiş Ağırlığı (gr)	Ağırlık Farkı (gr)	Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)
		Yük (N)	Mesafe (m)	Hız (m/s)	Sıcaklık (C)				
T20E0	T20E0-5N	5	500	0,2	25	7,874	7,872	0,002	0,41
	T20E0-10N	10	500	0,2	25	7,889	7,886	0,003	0,51
	T20E0-15N	15	500	0,2	25	7,867	7,862	0,005	0,53
	T20E0-0,1 m/s	10	500	0,1	25	7,918	7,913	0,005	0,34
	T20E0-0,2 m/s	10	500	0,2	25	7,889	7,886	0,003	0,51
	T20E0-0,4 m/s	10	500	0,4	25	7,909	7,906	0,003	0,33
	T20E0-25^{o}C	10	500	0,2	25	7,889	7,886	0,003	0,51
	T20E0-100^{o}C	10	500	0,2	100	7,827	7,825	0,002	0,34
	T20E0-150^{o}C	10	500	0,2	150	7,865	7,864	0,001	0,33
T20E20	T20E20-5N	5	500	0,2	25	6,808	6,807	0,001	0,20
	T20E20-10N	10	500	0,2	25	6,718	6,715	0,003	0,32
	T20E20-15N	15	500	0,2	25	6,800	6,796	0,004	0,37
	T20E20-0,1 m/s	10	500	0,1	25	6,756	6,753	0,003	0,34
	T20E20-0,2 m/s	10	500	0,2	25	6,718	6,715	0,003	0,32
	T20E20-0,4 m/s	10	500	0,4	25	6,791	6,789	0,002	0,30
	T20E20-25^{o}C	10	500	0,2	25	6,718	6,715	0,003	0,32
	T20E20-100^{o}C	10	500	0,2	100	6,801	6,800	0,001	0,32
	T20E20-150^{o}C	10	500	0,2	150	6,802	6,801	0,001	0,26

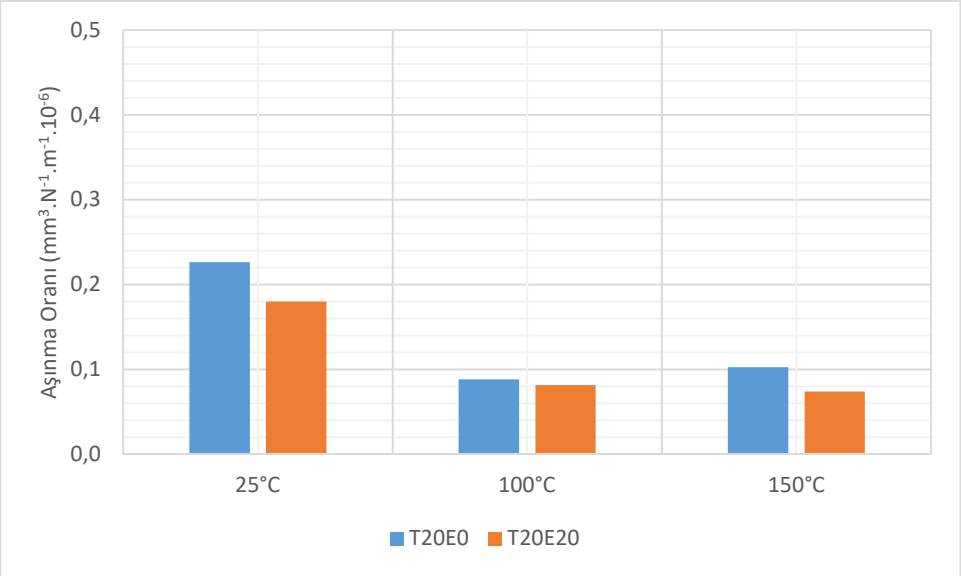
Hem haddelenmiş hem haddelenmemiş numunelerde değişen şartlarda benzer ağırlık değişim davranışları görülmüş olup yük değerleri arttıkça ağırlık kayıpları daha fazla olmuş, sıcaklık ve hız değerleri arttıkça ağırlık kayıpları düşmüştür. Davranışlar aynı olsa da aynı şartlarda aşınma sebebiyle ağırlık kayıpları haddelenmemiş numunelerde daha fazla olmuştur.



a)



b)



c)

Şekil 9.43. %20 SiC Takviyeli, haddelenmemiş ve %20 haddelenmiş numunelerin a) yük (0,2 m/s hız ve 25°C sıcaklık), b) hız (10N yük ve 25°C sıcaklık), c) sıcaklık (10N yük ve 0,2 m/s hız) değişkenleri altında aşınma oranları

Şekil 9.43'te yük değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 5N yük aşınma oranı 0,395 iken 10N'da %57,2 azalarak 0,226, 15N'da %5,8 artarak 0,239 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 5N yükte aşınma oranı 0,207 iken 10N'da %13,0 azalarak 0,180, 15N'da ise %15,0 azalarak 0,153 değerini almıştır.

Hız değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 0,1 m/s hızda aşınma oranı 0,327 iken 0,2 m/s hızda %30,9 azalarak 0,226, 0,4m/s hızda ise %22,6 azalarak 0,175 değerini almıştır. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 0,1 m/s hızda aşınma oranı 0,276 iken 0,2 m/s hızda %34,8 azalarak ile 0,180, 0,4 m/s hızda %30,0 azalarak ile 0,126 değerini almıştır.

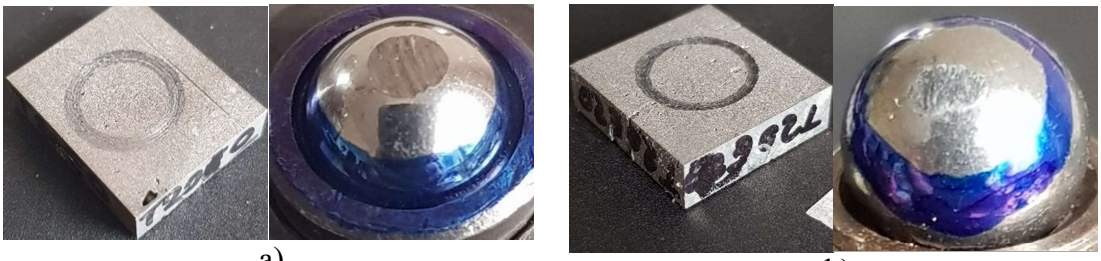
Sıcaklık değişimlerinde; haddelenmemiş numunelerde 25ºC sıcaklıkta aşınma oranı 0,226 iken 100ºC'de %61,1 azalarak 0,088 150ºC'de %17,0 artarak 0,103 değeri belirlenmiştir. %20 oranında haddelenmiş numunelerde 25ºC sıcaklıkta sürtünme katsayısı 0,180 iken 100ºC'de %54,4 azalarak 0,082, 150ºC'de ise %9,8 azalarak 0,074 değerini almıştır.

Haddeleme sonucu yüzey sertliği artan numunelerde yük değeri arttıkça yüzeyde oluşan ısı ile oluşan oksitlenme katı yağlayıcı görevi görmüş ve metal-metale teması

azaltmıştır. Haddelenmemiş numunelerde 10N yükte aşınma oranı düşmüş olup 15N'da yükselmiştir. Bunun sebebinin kopan parçaların kayan yüzeyler arasında aşındırıcı etkisi yaratmasından kaynaklanmaktadır.

Hız değerindeki artış ile birlikte tüm numunelerde aşınma kayıpları düşmüş olup bunun sebebi artan yüzey sıcaklıkları ile plastik deformasyon olması, aşınmalar artsa da aşınan malzemelerin yüzeyde sıvama yapmasıdır. Haddelenmiş numunelerin sahip olduğu sertliği sayesinde aşınma direnci artmış ve aşınma kayıpları haddelenmemiş numunelere göre daha az olmuştur.

Sıcaklık değerindeki artış ile birlikte plastik deformasyon olmuş sürtünme artmış fakat aşınma metalleri yüzeye sıvandığı ve yüzeyde teması azaltan bir film tabaka oluştuğu için sıcaklık arttıkça aşınma oranları düşmüştür. Haddelenmemiş numunelerde artan ortam sıcaklıkları ve ara yüzey sıcaklıkları ile birlikte metal matrisli kompozitlerde hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçiş olduğu görülmüş; buna bağlı olarak yüzeyde sıcaklık kaynaklı adhesif aşınmalar ile birlikte bilye üzerine malzeme transferinden kaynaklı aşınma kaybı yüksek olmuştur.



a) b)

Şekil 9.44. %20 SiC takviye içeren numunelerde 15 N yükte (0,2 m/s hız, 25°C sıcaklıkta) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş



a) b)

Şekil 9.45. %20 SiC takviye içeren numunelerde 0,4 m/s hızda (10N yük, 25°C sıcaklıkta) test sonrası görselleri a) Haddelenmemiş, b) Haddelenmiş



a) b)

Şekil 9.46. %20 SiC takviye içeren numunelerde 25°C sıcaklıkta (10N yük, 0,2 m/s hızda) test sonrası görselleri a) haddelenmemiş, b) haddelenmiş

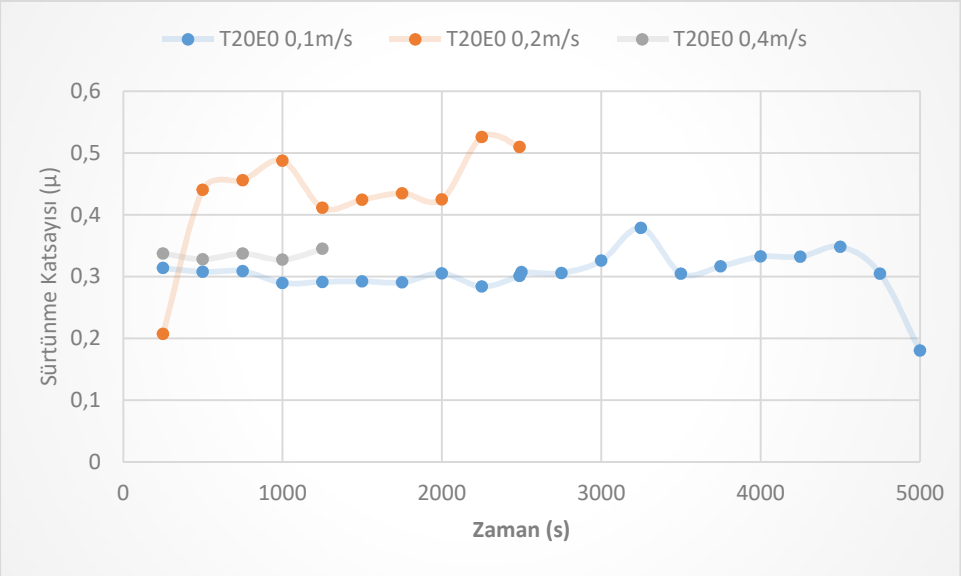
Haddelenmemiş numunelerde takviye oranın artması ve SiC miktarının artması ile numunelerin aşındırıcı etkisi olduğu ve yük değerleri arttıkça bilye üzerinde aşınmaların arttığı görülmüştür. Haddelenmemiş numunelerde olası karışım hatalarından kaynaklı takviye malzemelerinin sürtünme yüzeyinde aşındırıcı olarak etki gösterdiği, numune ve bilyede haddelenmiş numunelere göre daha fazla aşınma görülmüştür.

Düşük hızlarda veya düşük ortam sıcaklıklarında eriyik film oluşmaz ve sürtünme katı cisimlerin etkileşimiyle kontrol edilir (Buckley, 1981). Buna göre düşük hızlarda yüzey sıcaklıklarının daha düşük olması sebebiyle daha derin aşınma izleri görülmüşken hız ile birlikte yüzey sıcaklıkları artmış, eriyik film oluşumları sebebiyle plastik deformasyonlar ve yüzeyde sıvanmalar görülmüştür.

Ara yüzey sıcaklık artışının bir diğer etkisi ise yüzeylerde oksit oluşumunu teşvik etmesidir. İki yüzey arasında oksit tabakanın oluşması metal-metal teması azaltır. Oksit film tabakası malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını etkiler. Sürtünme katsayısı ve aşınma oranının düşmesine neden olur (Stott, 1998).

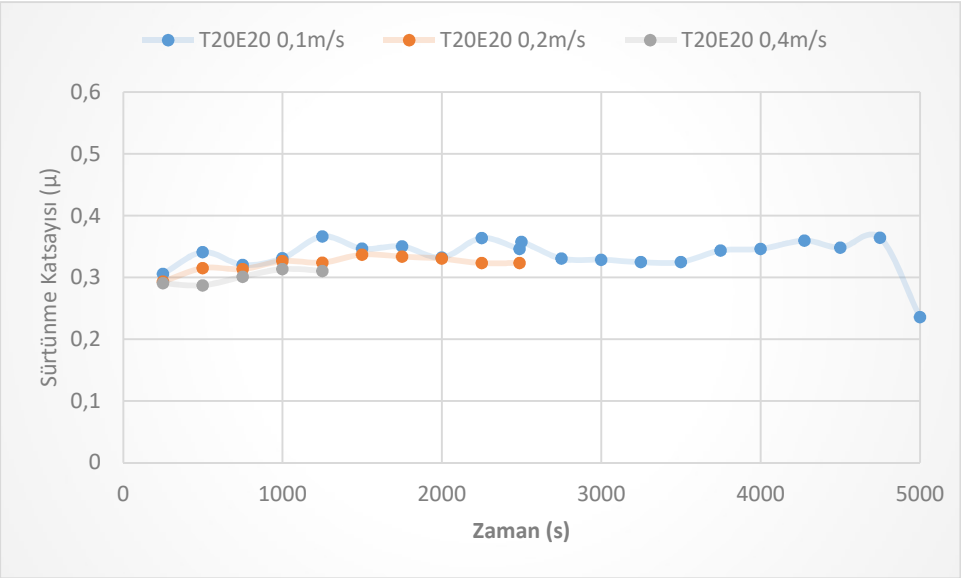
Artan ortam sıcaklıkları ile birlikte yüzeylerde oksit film ve eriyik film oluşumu artmıştır. Bu da sürtünme kuvvetlerinin düşmesine; sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarının düşmesine neden olmuştur.

Haddelenmemiş ve %20 oranında haddelenmiş numunelerin çalışma şartlarına göre zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimlerini gösteren grafikler oluşturulmuştur.



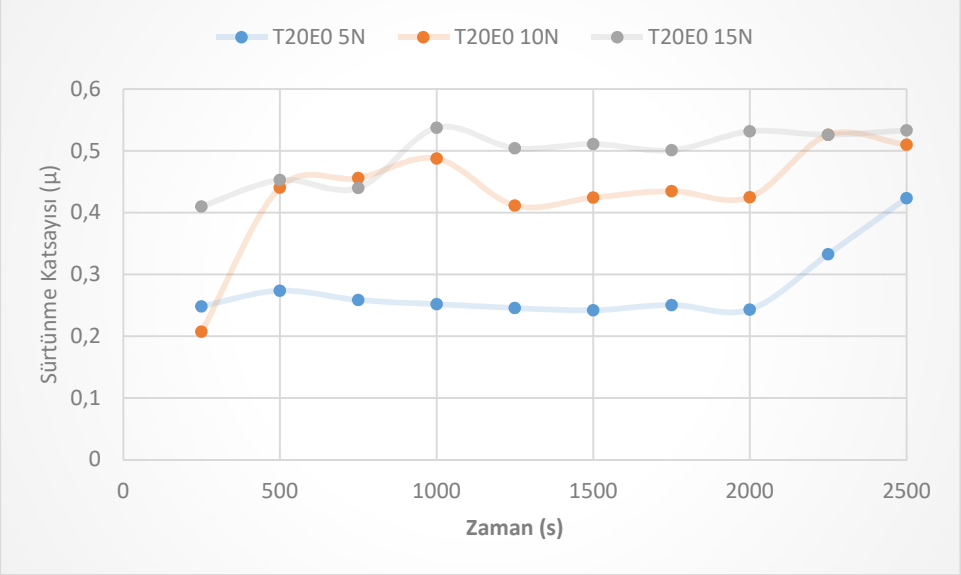
Şekil 9.47. T20E0 numunesinin hız - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

%20 SiC oranında takviye içeren numunelerde hız ile birlikte sürtünme katsayısı yükselmiştir. Özellikle 0,2 m/s'de test süresi içerisinde sürtünme katsayısı pik yapmıştır. Bu numunede bulunan takviye malzemesi bilye ve numune arasında bir aşındırıcı gibi davranmasından kaynaklanmaktadır.



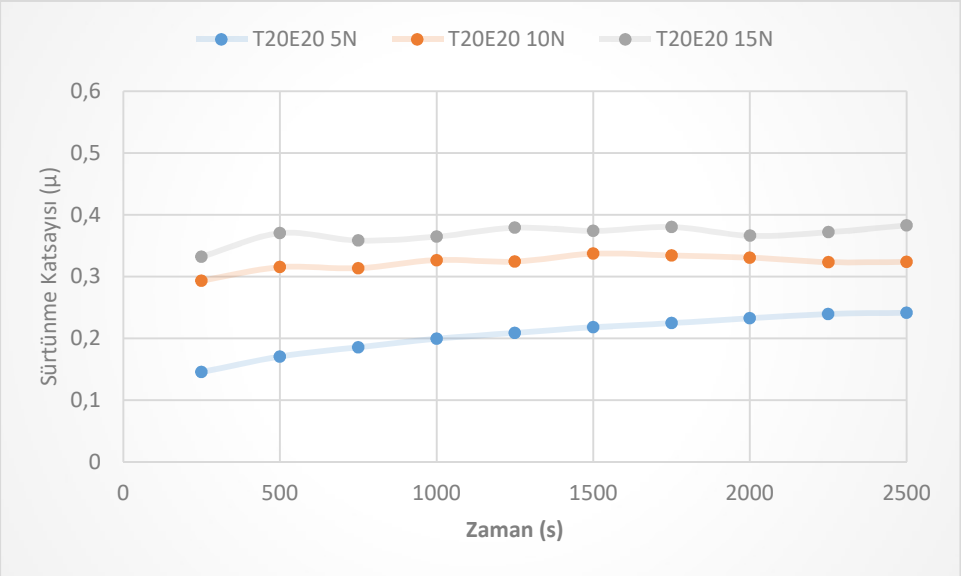
Şekil 9.48. T20E20 numunesinin hız – zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

Haddelenmiş numunelerde hız değişimleri ile birlikte haddelenmemiş numunelerin aksine sürtünme katsayısı düşmüştür.



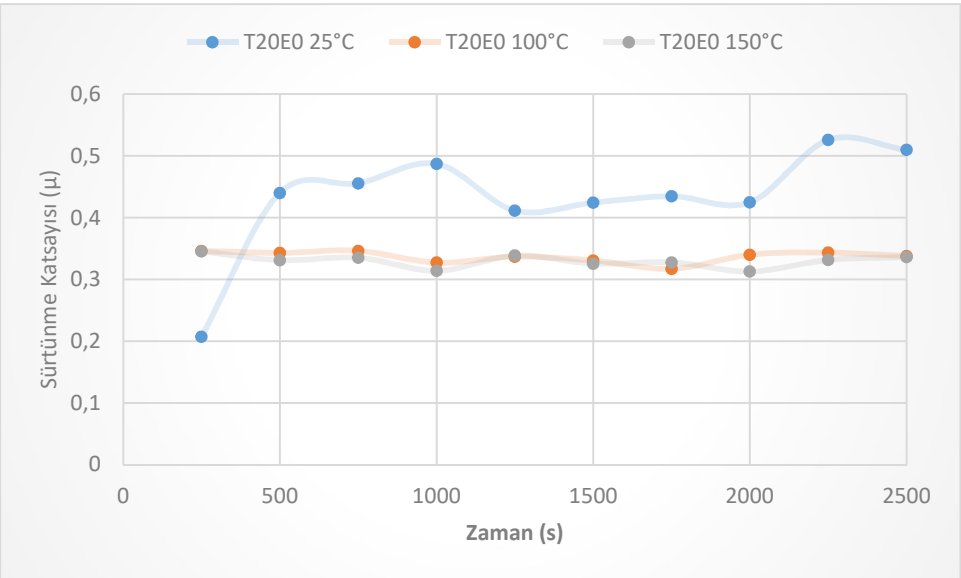
Şekil 9.49. T20E0 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

%20 SiC takviyeli haddelenmemiş numunelerde yük artarken sürtünme katsayısı da artmıştır. Testler süresi içinde sürtünme katsayılarının artış eğrisi gösterdiği belirlenmiştir. Sürtünme katsayılarındaki değişimler; artan SiC takviye miktarı sebebiyle yük arttıkça artan yüzey sıcaklıkları ile birlikte takviye malzemelerinin yüzeyde üç cisimli aşınmaya neden olmasından kaynaklanmaktadır. Bunun bir nedeni porozite ve yük etkileşiminden kaynaklı temas basıncı artması ile takviye fazının yerinden ayrılmasının kolaylaşmasından da kaynaklanmaktadır (Vardavoulias, Jouanny-Tresy, & Jeandin, 1993).



Şekil 9.50. T20E20 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

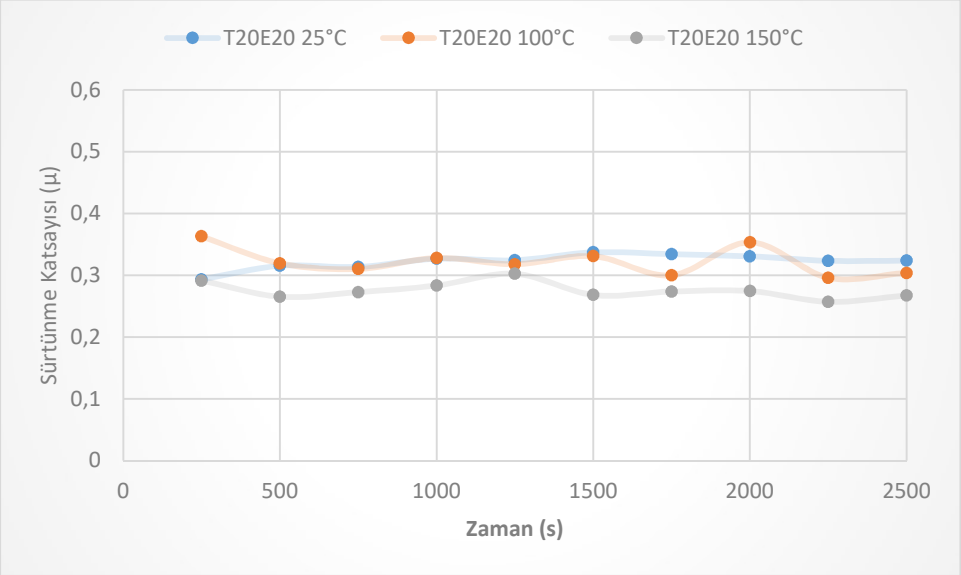
Haddelenmiş numunelerde de haddelenmemiş numunelerde olduğu gibi yük artarken sürtünme katsayıları da artmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalarda genelde yük ile katsayılar düşmüştür. %20 SiC içeren numunelerde bunun aksi değerler görülmüştür. Haddeli numunelerde test süresi içerisinde sürtünme katsayıları korunmuştur.



Şekil 9.51. T20E0 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

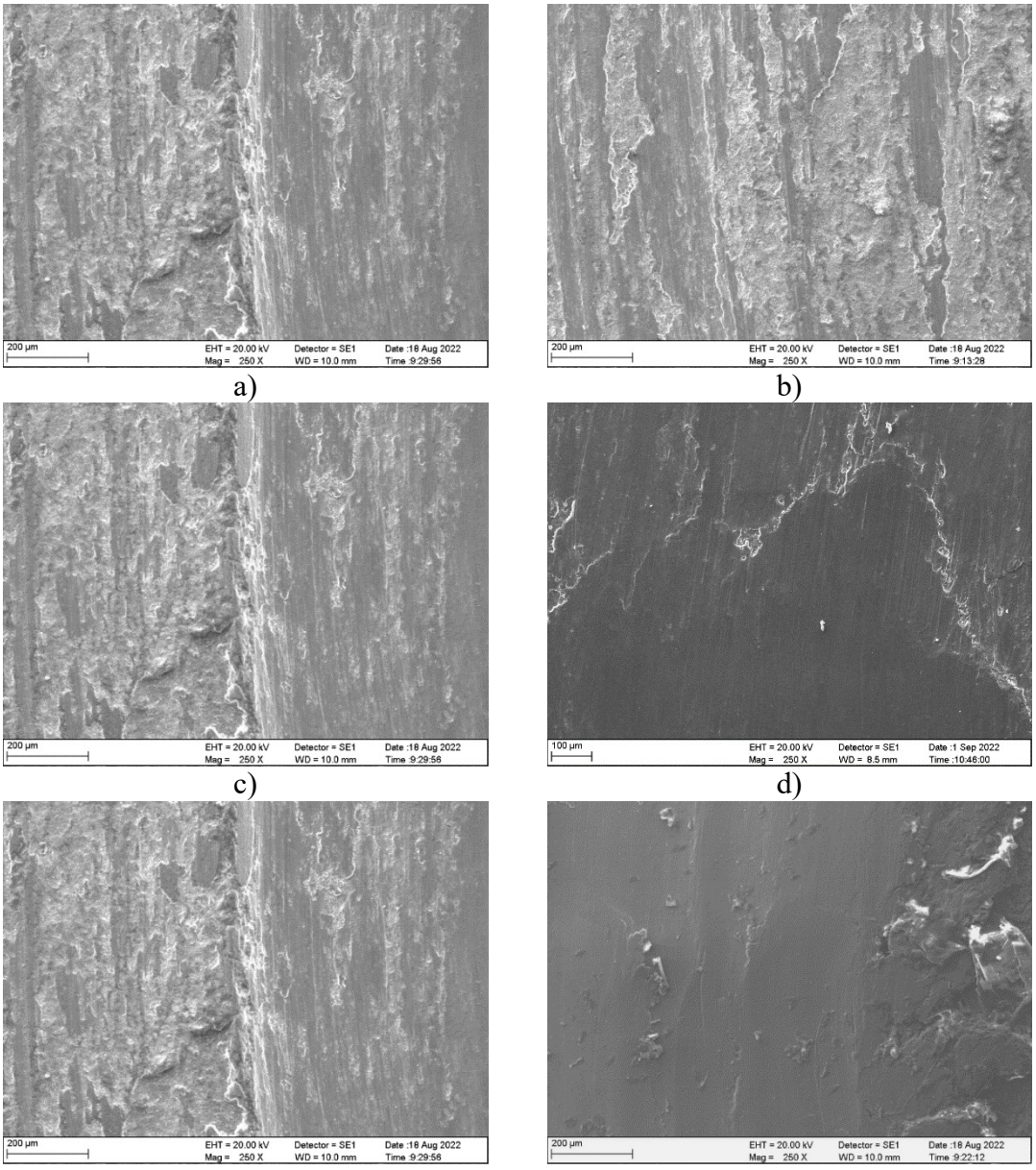
Düşük ortam sıcaklıklarında yüzeyler arasında sürtünmeyi azaltacak bir film oluşumu olmadığı için düşük sıcaklıklarda sürtünme katsayısı daha fazla olmuştur.

Takviye oranın fazla olmasından kaynaklı test süresi içerisinde üç cisimli aşınmalar oluşmakta sürtünme katsayısı artmaktadır. Ortam sıcaklığının artması ile eriyik film tabakası oluşmakta bu da test süresi boyunca sürtünme katsayısının korunmasını sağlamıştır.



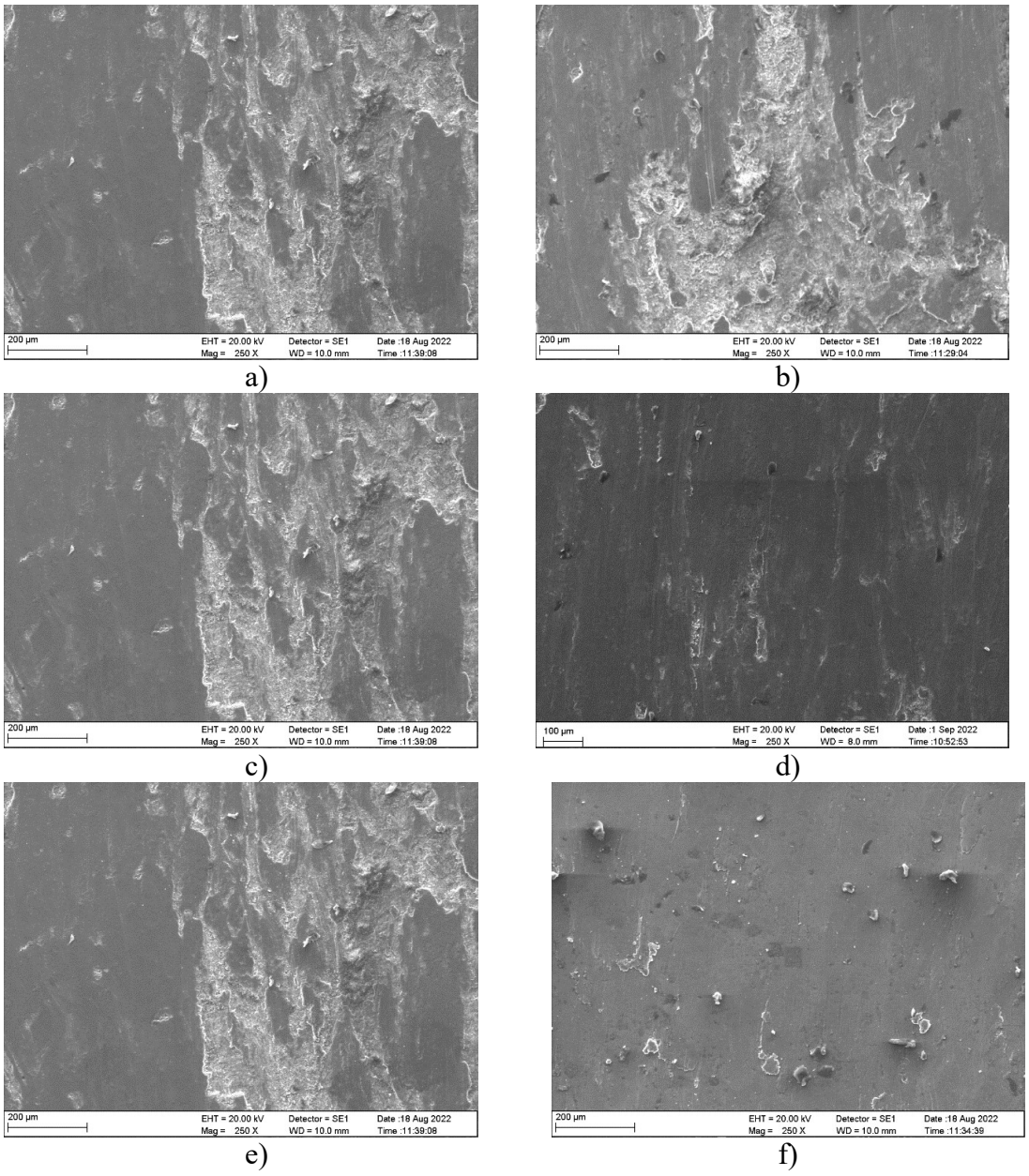
Şekil 9.52. T20E20 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

Haddelemenin etkisi ile sertlik ve mukavemet kazanan numunelerde sıcaklık veya diğer değişkenler altında SiC takviyelerinin malzeme yapısında korunduğu; test süresi içerisinde yüzeyde aşındırıcı etkisi oluşturmadığı, kararlı hal aşınması olduğu görülmektedir. Ortam ve yüzey sıcaklığı değerleri arttıkça sürtünme katsayısı azalmıştır.



Şekil 9.53. T20E0 SEM incelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c) 0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta

Haddelenmemiş numunelere ait x250 oranında yapılan SEM incelemelerinde daha düşük değerdeki değişkenlerde sürtünme olan ve olmayan yüzeyler karşılaştırıldığında yüzeyde hareket yönünde aşınma izleri görülmüş olup yüzeyden kopmalar başlamıştır. Yük artarken yüzeyde adhesif aşınmalar kaynaklı kopmaların boyutlarının büyüdüğü görülmüştür. Hız değeri arttıkça abrasif aşınma izleri; sıcaklık değeri arttıkça da plastik deformasyon ve yüzeyde malzeme birikmesi görülmektedir.

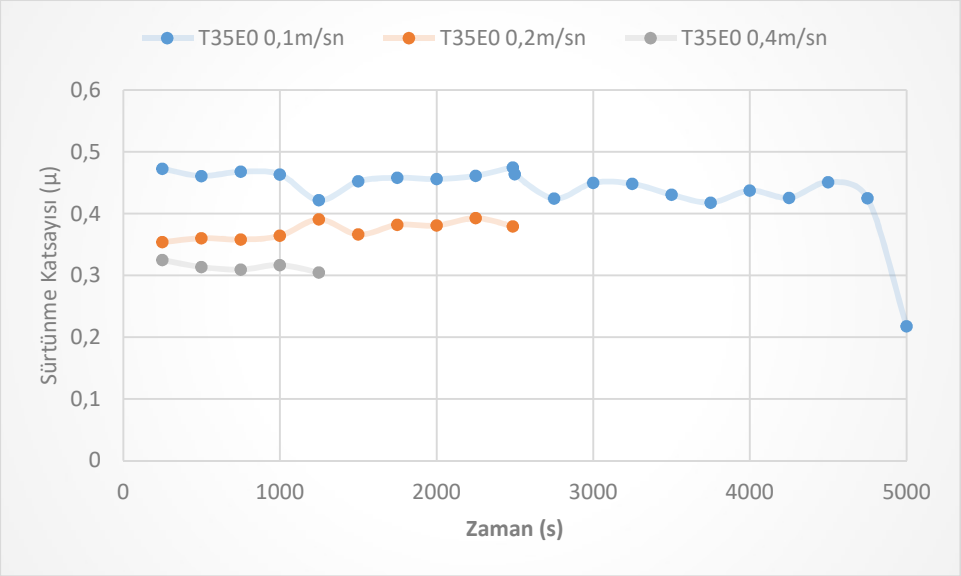


Şekil 9.54. T20E20 SEM İncelemeleri x250 a)10 N yük, b) 15 N yük, c) 0,2 m/s hızda, d) 0,4 m/s hızda, e) 25°C sıcaklıkta, f) 150ºC sıcaklıkta

Haddelenmiş numunelerde daha düşük değere sahip hız, yük ve sıcaklık şartlarında belli bölgelerde adhesif aşınmalar yüzeyde parlatma olarak kalmışken bazı noktalarda kopmaya kadar gitmiştir. Yük değeri arttıkça adhesif aşınmaların boyutunun büyüdüğü görülmüştür. Hız değeri arttıkça aşınmaların azaldığı görülmüş bunun kaynağı artan yüzey sıcaklığı ile birlikte eriyik ve oksit film oluşumundan kaynaklanmaktadır.

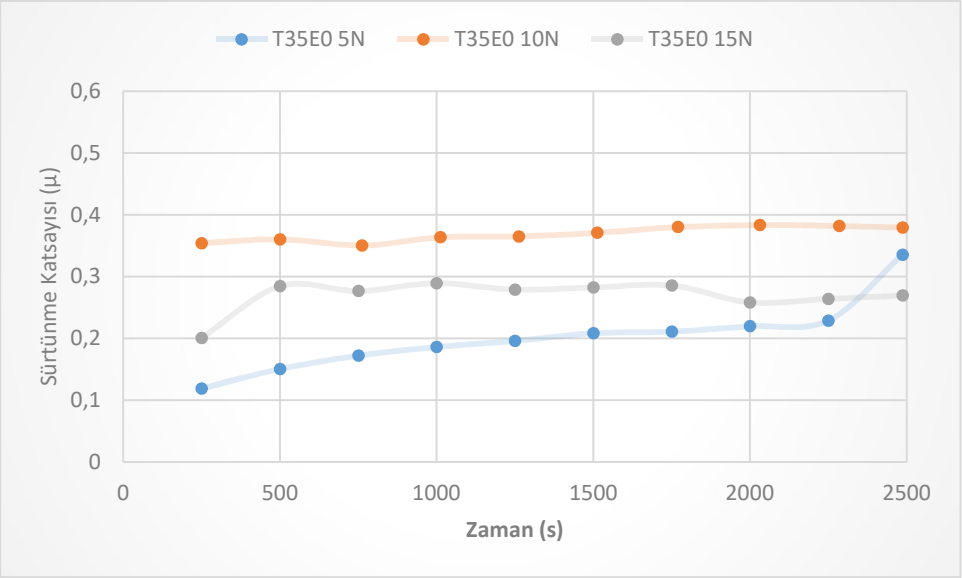
Sıcaklık değeri arttıkça diğer farklı numunelerde olduğu gibi sıvama ve malzeme aktarımı mevcuttur. Aşınan yüzeylerin numune üzerinde biriktiği belirlenmiştir.

Takviye oranının malzemenin mekanik, fiziksel dürütnme özelliklerine etkisinin gözlemlenmesi %35 SiC oranına sahip numuneler hız, yük, sıcaklık gibi çalışma şartlarına uygun olarak test edilmiştir.



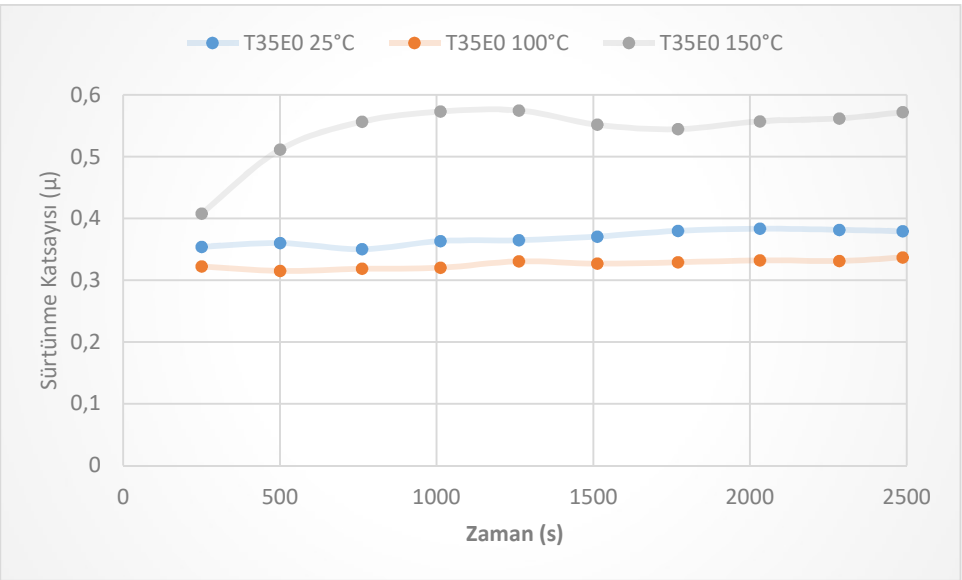
Şekil 9.55. T35E0 numunesinin hız – zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

Zamana bağlı olarak test süresi boyunca yapılan ölçümlerde T35E0 numunelerinde hız değeri arttıkça sürtünme katsayısının düştüğü görülmüştür. Daha düşük değerdeki hızlarda metal-metale temasa neden olacak yüzeye etkiyen kuvvet daha fazla olduğu için düşük hızlarda sürtünme katsayıları daha yüksek belirlenmiştir.



Şekil 9.56. T35E0 numunesinin yük - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

Yükler değerleri arttıkça yapılan testlerde en yüksek sürtünme katsayısı 10 N'da ölçülmüştür. Test süresi boyunca korunan yüksek sürtünme katsayısını, yüksek takviye içeriğinden kaynaklı parça kopması ve yüzeyler arasında bir aşındırıcı olarak davranmasından kaynaklanabilmektedir.



Şekil 9.57. T35E0 numunesinin sıcaklık - zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

Seramik bazlı olan SiC takviye malzemesinin oranının fazla olması sebebiyle numunenin sıcaklık mukavemetinin arttığı görülmüş olup 150°C sıcaklıkta en yüksek

sürtünme katsayısı ölçülmüştür. 25ºC ve 100ºC'de test süresi boyunca sürtünme katsayısı korunurken, 150ºC'de test başında belirgin bir artış mevcut olup sürtünme katsayısını etkileyecek şiddetli aşınma bölgesine geçilmesinden ve üç cisimli aşınma olmasından kaynaklanmaktadır.

9.2. Test Sonuçlarının TS 555 ve SAE J661 Standartlarına Göre Değerlendirilmesi

Aynı parça üzerinde, birbirinden ayrı olarak yapılacak deneylerde elde edilen sürtünme katsayıları Çizelge 10.5 ila Çizelge 10.8'de verilen değerlere uygun olmalıdır. Bu özellik disk ve kampana frenlere uygulanır. TS 555 standart kapsamına giren balatalar kullanımlarına göre dört tiptir.

Tip 1: Sadece park freni için kullanılan balata (merkezi fren, diskli frende kampanalı fren vb.).

Tip 2: Hafif yük için kullanılan kampana fren balatası (ön motorun ve önden çekişli taşıtın vb. arka freni).

Tip 3: Ağır yük için kullanılan kampana fren balatası.

Tip 4: Diskli frenler için kullanılan balata.

Çizelge 9.5. Tip 1 balataların sürtünme karakteristikleri

Özellik	**Deney sıcaklığı** [1]		
	100 °C	150 °C	200 °C
Sürtünme katsayısı [2]	0,30 ila 0,70	0,25 ila 0,70	0,20 ila 0,70
Sürtünme katsayısı toleransı [3]	± 0,10	± 0,12	± 0,12
Aşınma oranı (10^{-7} cm³/Nm)	1,0 veya daha az	2,0 veya daha az	3,0 veya daha az
[1] Deney sıcaklığı deney tertibatı diskinin sürtünme yüzeyinin sıcaklığıdır.			
[2] Sürtünme katsayısı aralığı toleransnıı içermesi gereklidir.			
[3] Katsayı ilgili taraflar tarafından varılan anlaşmaya uygun olmalıdır.			

Çizelge 9.6. Tip 2 balataların sürtünme karakteristikleri

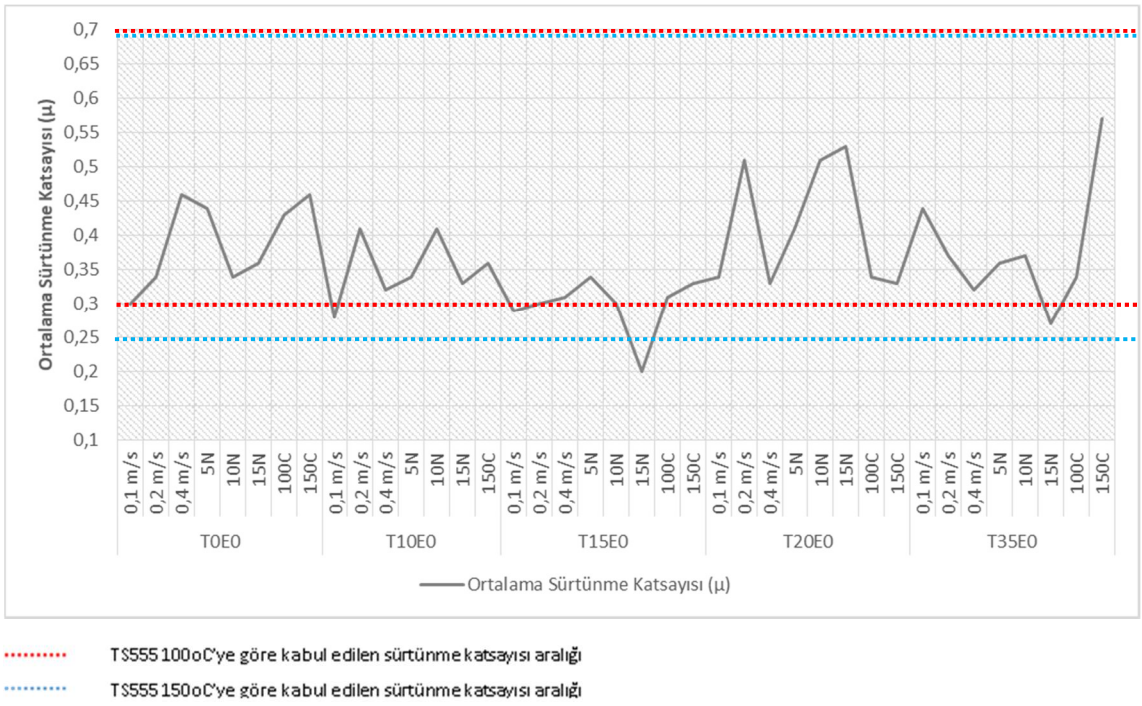
Özellik	**Deney sıcaklığı** [1]			
	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C
Sürtünme katsayısı [2]	0,25 ila 0,65	0,25 ila 0,70	0,20 ila 0,70	0,15 ila 0,70
Sürtünme katsayısı toleransı [3]	± 0,08	± 0,10	± 0,12	± 0,12
Aşınma oranı (10^{-7} cm³/Nm)	0,5 veya daha az	0,7 veya daha az	1,0 veya daha az	2,0 veya daha az

Çizelge 9.7. Tip 3 balataların sürtünme karakteristikleri

Özellik	Deney sıcaklığı [1]				
	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C
Sürtünme katsayısı [2]	0,25 ila 0,65	0,25 ila 0,70	0,25 ila 0,70	0,20 ila 0,70	0,15 ila 0,70
Sürtünme katsayısı toleransı [3]	± 0,08	± 0,10	± 0,12	± 0,12	± 0,14
Aşınma oranı (10^{-7} cm^3/Nm)	0,5 veya daha az	0,7 veya daha az	1,0 veya daha az	1,5 veya daha az	3,0 veya daha az

Çizelge 9.8. Tip 4 balataların sürtünme karakteristikleri

Özellik	Deney sıcaklığı [1]					
	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C
Sürtünme katsayısı [2]	0,25 ila 0,65	0,25 ila 0,70	0,25 ila 0,70	0,25 ila 0,70	0,25 ila 0,70	0,20 ila 0,70
Sürtünme katsayısı toleransı [3]	± 0,08	± 0,10	± 0,12	± 0,12	± 0,14	± 0,14
Aşınma oranı (10^{-7} cm^3/Nm)	0,5 veya daha az	0,7 veya daha az	1,0 veya daha az	1,5 veya daha az	2,5 veya daha az	3,5 veya daha az



Şekil 9.58. Haddelenmemiş numunelerde sürtünme katsayılarının TS 555 standartlarına göre değerlendirilmesi

Haddelenmemiş numunelerde hız, yük ve ortam sıcaklıkları için değişik şartlarda yapılan testlerde; yapısal boşluk oluşumu, sertlik değerleri gibi değişkenler sebebiyle test süresi boyunca sürtünme katsayıları farklı şartlarda farklı değerler ölçülmüştür.

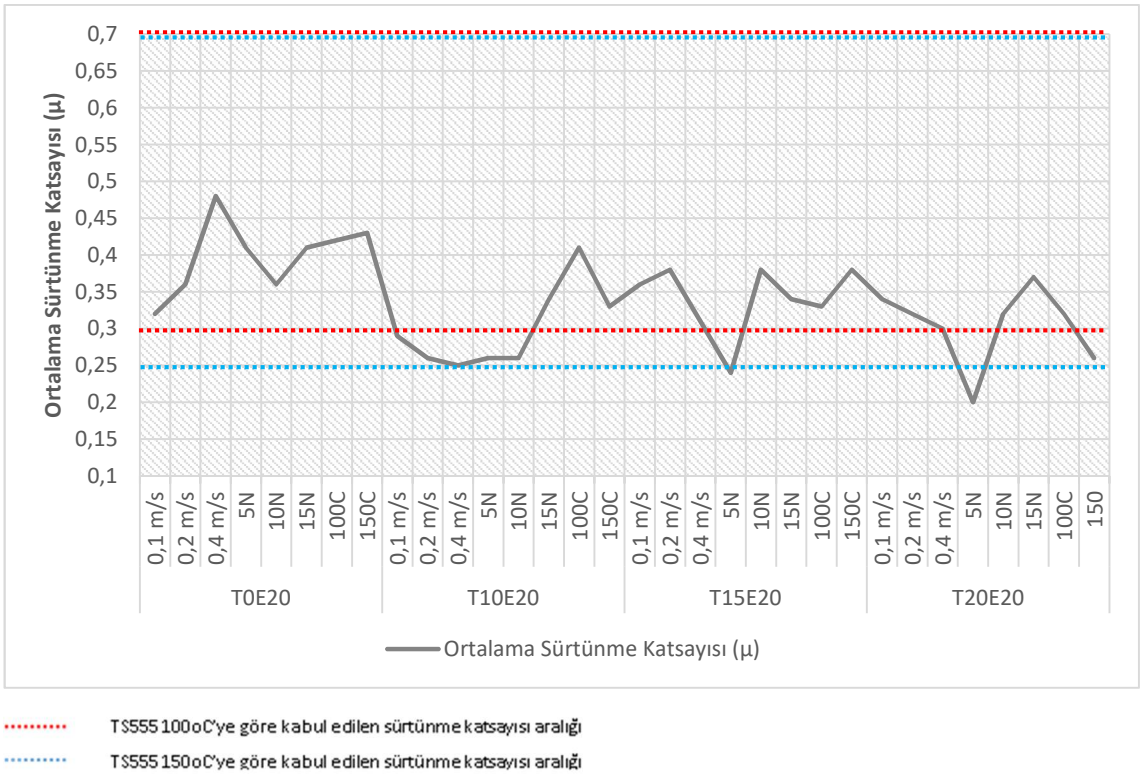
Yüzeyde oluşan oksit tabaka, eriyik tabaka ve plastik deformasyon gibi etkenler metal-metale teması azaltmış bu da sürtünmenin dolayısıyla sürtünme katsayısının düşmesine neden olmuştur.

Bazı testlerde ise takviye malzemelerinden, numune veya aşındırıcı bilyeden, sürtünme yüzeyinde biriken aşınma ürünlerinden kaynaklı aşınmaların arttığı gözlemlenmiştir. Yük, hız ve sıcaklık değerleri artarken hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçilmesinden kaynaklı test süresi içinde aşınmalar ve sürtünme katsayısı artmıştır.

Sürtünme eğrilerine paralel olarak bazı testlerde de alışma aşınması döneminde aşınmalar başlangıçta çok hızlı olurken sonrasında yüzey alışması, arada tabakaların oluşumu gibi nedenlerden kayma haline geçilmiş sürtünme katsayısı sabit kalmıştır.

Farklı çalışma ve ortam şartlarından kaynaklı farklı davranışlar ortaya çıksa da T15E0-15N dışında her şartta sürtünme katsayıları TS 555 standardında yer alan limit değerler; ortam sıcaklığı, 100^{o}C'de arasında 0,3 – 0,7 arasında kalmıştır. Ortam sıcaklığı 150^{o}C'de olduğunda TSE 555 standardına göre sürtünme katsayılarının 0,25 - 0,7 arasında olması istenmektedir.

Sınır değerin altına kalan T15E0-15N ise alıştırma aşınması periyodu çok kısa sürede aşılıp kayma aşınmasına geçilmiş bu da yüzeyde oluşan oksit veya eriyik tabakanın oluşumundan veya ağırlık kaybının daha fazla olmasına neden olan takviye kopmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 9.59. %20 oranında haddelenmiş numunelerde sürtünme katsayılarının TS 555 standartlarına göre değerlendirilmesi

%20 oranında haddelenmiş numunelerde haddelenmemiş numunelerde olduğu gibi farklı test şartlarında benzer sebeplerden farklı davranışlar görülmüştür. Genel olarak haddelemenin malzeme sertliği ve aşınma direncini olumlu yönde arttırması ile sürtünme katsayıları ve ağırlık kayıpları daha düşük olmuştur. Numunelerden çok karşı malzeme olan bilyelerin aşındığı görülmüştür. Artan takviye oranları ile birlikte T15E20-5N, T20E20-5N numunelerinde ve T10E20-0.4 m/s hız şartlarında sürtünme katsayısı TS 555 standardının altında kalmıştır.

Aşınma oranları değerlendirildiğinde ise TS 555'e göre en yüksek toleranslar Tip 1'de mevcut olup en düşük kabul edilen 0,5 10^{-7} cm^3/Nm ve aşağısı iken yapılan hesaplamalar her bir değer 10^{-9} cm^3/N'in altında belirlenmiştir. Haddelenmiş ve haddelenmemiş olarak tüm numunelerde aşınma oranı değerleri standartların içerisinde yer kalmıştır.

Test sonuçlarında elde edilen sürtünme katsayıları SAE J661 standardında yer alan limitler ile karşılaştırıldığında tüm değerlerin bir harf karşılığı olmakta ve limitler içerisinde yer almaktadır.

Çizelge 9.9. Sürtünme katsayılarının SAE J661 standartına göre değerlendirilmesi

Test Adı			Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)	SAE J661 Değerlen-dirme	Test Adı			Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)	SAE J661 Değerlen-dirme
T0E0	Yük Taraması	T0E0-5N	0.44	F	T10E0	Yük Taraması	T10E0-5N	0.34	E
		T0E0-10N	0.34	E			T10E0-10N	0.41	F
		T0E0-15N	0.36	F			T10E0-15N	0.33	E
	Hız Taraması	T0E0-0.1m/s	0.3	E		Hız Taraması	T10E0-0.1m/s	0.28	E
		T0E0-0.2m/s	0.34	E			T10E0-0.2m/s	0.41	F
		T0E0-0.4m/s	0.44	F			T10E0-0.4m/s	0.32	E
	Sıcaklık	T0E0-100C	0,43	F		Sıcaklık	T10E0-100C	0,34	E
		T0E0-150C	0,46	G			T10E0-150C	0,36	F

Test Adı			Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)	SAE J661 Değerlen-dirme	Test Adı			Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)	SAE J661 Değerlen-dirme
T15E0	Yük Taraması	T15E0-5N	0.34	E	T20E0	Yük Taraması	T20E0-5N	0.41	F
		T15E0-10N	0.3	E			T20E0-10N	0.51	G
		T15E0-15N	0.2	D			T20E0-15N	0.53	G
	Hız Taraması	T15E0-0.1m/s	0.29	E		Hız Taraması	T20E0-0.1m/s	0.34	E
		T15E0-0.2m/s	0.3	E			T20E0-0.2m/s	0.51	G
		T15E0-0.4m/s	0.31	E			T20E0-0.4m/s	0.33	E
	Sıcaklık	T15E0-100°C	0,31	E		Sıcaklık	T20E0-100°C	0,34	E
		T15E0-150°C	0,33	E			T20E0-150°C	0,33	E

Test Adı			Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)	SAE J661 Değerlen-dirme	Test Adı			Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)	SAE J661 Değerlen-dirme
T0E20	Yük Taraması	T0E20-5N	0.41	F	T10E20	Yük Taraması	T10E20-5N	0.26	E
		T0E20-10N	0.36	F			T10E20-10N	0.26	E
		T0E20-15N	0.41	F			T10E20-15N	0.34	E
	Hız Taraması	T0E20-0.1m/s	0.32	E		Hız Taraması	T10E20-0.1m/s	0.29	E
		T0E20-0.2m/s	0.36	F			T10E20-0.2m/s	0.26	E
		T0E20-0.4m/s	0.48	G			T10E20-0.4m/s	0.25	E
	Sıcaklık	T0E20-100°C	0,42	F		Sıcaklık	T10E20-100°C	0,41	F
		T0E20-150°C	0,43	F			T10E20-150°C	0,33	E

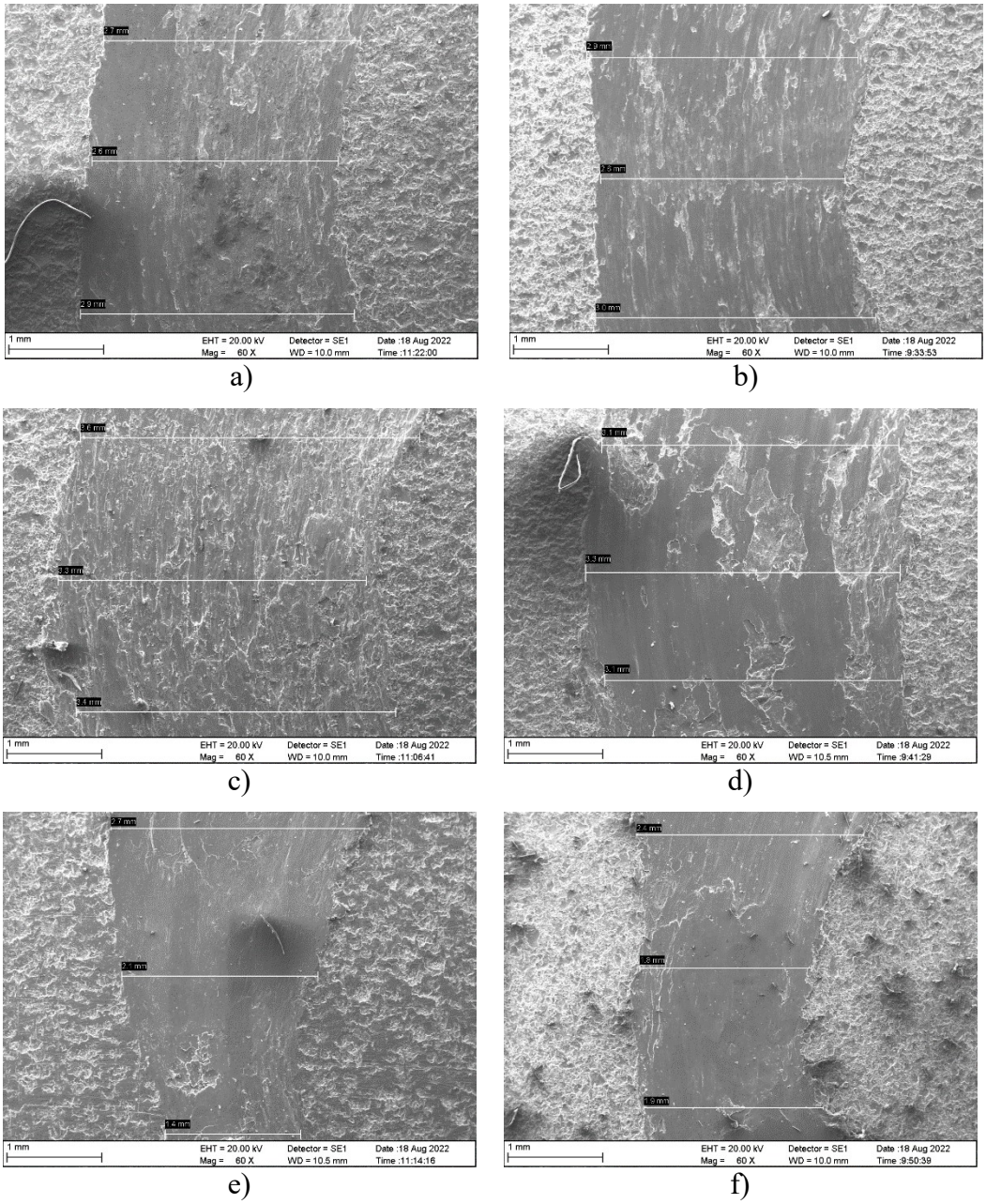
Test Adı			Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)	SAE J661 Değerlen-dirme	Test Adı			Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)	SAE J661 Değerlen-dirme
T15E20	Yük Taraması	T15E20-5N	0.24	D	T20E20	Yük Taraması	T20E20-5N	0.2	D
		T15E20-10N	0.38	F			T20E20-10N	0.32	E
		T15E20-15N	0.34	E			T20E20-15N	0.37	F
	Hız Taraması	T15E20-0.1m/s	0.36	F		Hız Taraması	T20E20-0.1m/s	0.34	E
		T15E20-0.2m/s	0.38	F			T20E20-0.2m/s	0.32	E
		T15E20-0.4m/s	0.31	E			T20E20-0.4m/s	0.3	E
	Sıcaklık	T15E20-100°C	0,33	E		Sıcaklık	T20E20-100°C	0,32	E
		T15E20-150°C	0,38	F			T20E20-150°C	0,26	E

Test Adı			Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)	SAE J661 Değerlen-dirme
T35E0	Yük Taraması	T35E0-5N	0.36	F
		T35E0-10N	0.37	F
		T35E0-15N	0.27	E
	Hız Taraması	T35E0-0.1m/s	0.44	F
		T35E0-0.2m/s	0.37	F
		T35E0-0.4m/s	0.32	E
	Sıcaklık	T35E0-100°C	0,34	E
		T35E0-150°C	0,57	H

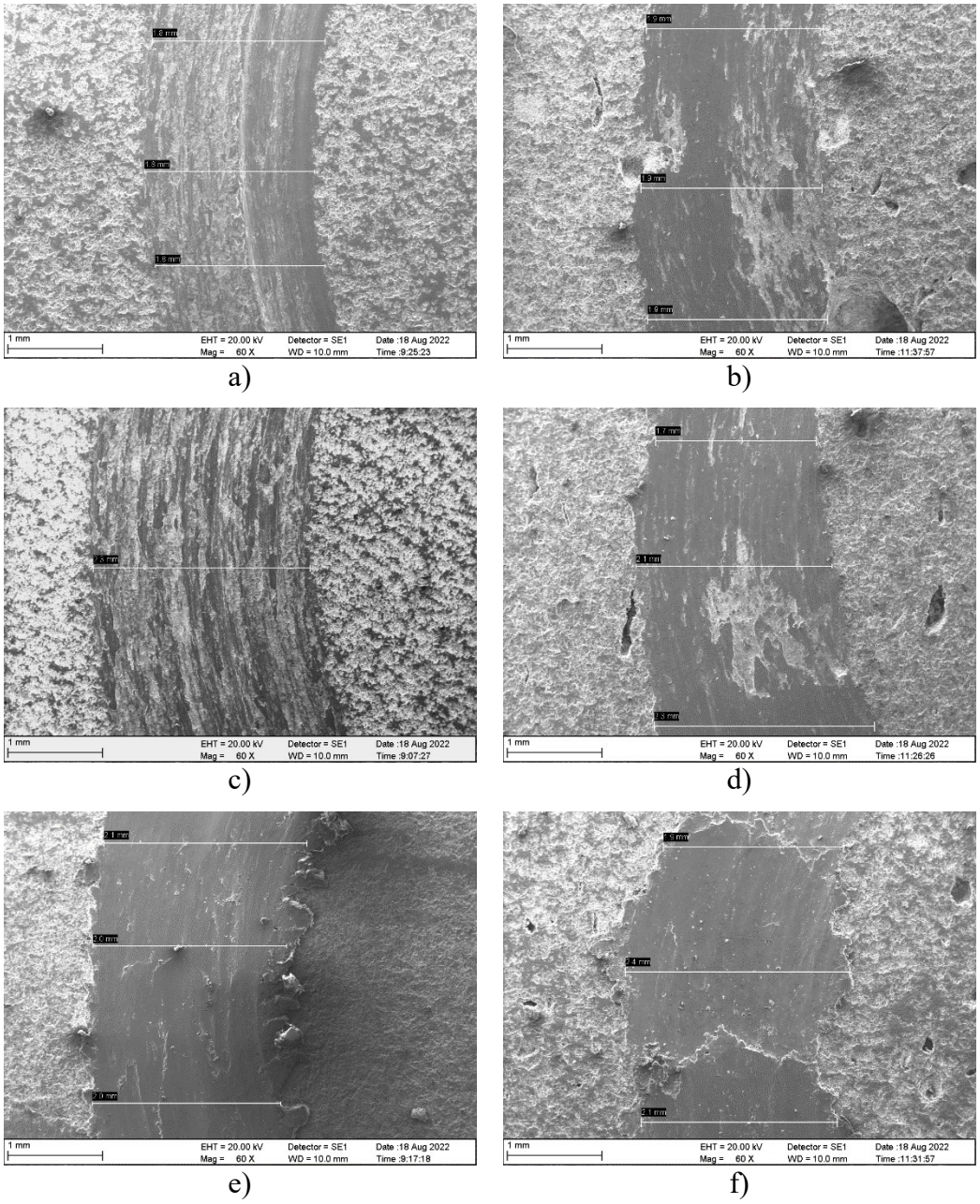
9.3. SEM Analizinde Ölçülen Aşınma Çaplarının Değerlendirilmesi

Yapılan SEM incelemelerinde testler sonrasında aşınma çapları ölçülmüş ve aşınma çapları sürtünme katsayısında olduğu gibi yüzeyde oluşan bileşenler ve sıcaklıklar sebebiyle farklı davranışlar göstermiş olup haddenin etkisi bazı numunelerde olumlu iken bazı numunelerde tersine daha farklı performans göstermiştir.

Farklı numuneler üzerinde aynı çapta bilyeler ile testler yapılmış olup her numunede farklı aşınma çapları ortaya çıkmıştır.



Şekil 9.60. Aşınma iz genişliği karşılaştırılması a) T0E0 15N yükte, b) T0E20 15N yükte, c) T0E0 0,4 m/s hızda, d) T0E20 0,4 m/s hızda, e) T0E0 150°C sıcaklıkta, f) T0E20 150°C sıcaklıkta



Şekil 9.61. Aşınma iz genişliği karşılaştırılması a) T20E0 15N yükte, b) T20E20 15N yükte, c) T20E0 0,4 m/s hızda, d) T20E20 0,4 m/s hızda, e) T20E0 150°C sıcaklıkta, f) T20E20 150°C sıcaklıkta

Takviyesiz ve takviyeli numuneler incelendiğinde ise; takviye oranı ne olursa olsun takviyesiz numunelerden daha küçük aşınma izleri ortaya çıkmıştır. Bu da takviyenin aşınma performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Genelde en yüksek aşınma izleri sıcaklık ve yükün en yüksek olduğu numunelerde ölçülmüştür.

BÖLÜM 10

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada ball on disc yöntemi ile yapılan testlerde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

1) Testler esnasında artan hız, yük ve ortam sıcaklığı gibi değişkenlerde sürtünme yüzeyinde oluşan oksit veya eriyik tabaka ile aşındırıcı bilyeden gelen demir tozlarının sürtünme katsayının düşmesine; üç cisimli aşınmalar ve şiddetli aşınma fazına geçilmesinin sürtünme katsayısının yükselmesine neden olmuştur.

2) Takviye oranı arttıkça yüzey sertliği artarken bununda aşınma kayıplarını azalmıştır. Haddelenmiş %15 SiC takviye oranına sahip numunelerde aşınma kayıpları diğer numunelerden daha az olmuştur. Sürtünme katsayısı değişimleri daha az olup karşı malzemeyi aşındırıcı etkisinin de düşük olduğu gözlemlenmiştir. Fren malzemelerinden beklenti aşınmaların az olması ve malzeme ömrünün uzun olmasıdır. Fren sistemlerinde kullanıma en uygun haddelenmiş numune %15 SiC takviyeli olandır.

3) Haddesiz numunelerde %10 SiC takviye bulunan numunelerde en yüksek sürtünme katsayıları ve haddeli numunelere göre düşük aşınma oranı ölçülmüştür. Karşı malzemeyi aşındırıcı etkisinin de düşük olması sebebiyle balata malzemesi olarak kullanıma en uygun haddesiz %10 SiC takviyeli numunenin olduğu görülmüştür.

4) Haddeli numunelerde takviyesiz şartlarda en yüksek değerler hesaplanmışken takviye ile birlikte sürtünme katsayılarının daha düşük olduğu görülmüştür. Aşınma mukavemeti, sürtünme katsayısının korunması ve dökme demire göre ağırlık avantajı sağlayacak olması sebebiyle haddelenmiş numunelerin disk ve kampana malzemesi olarak kullanıma daha uygun olduğu görülmüştür.

5) SEM incelemelerine göre; testler esnasında oluşan yüksek yüzey sıcaklıklarından kaynaklı yüzeyde yapışma kaynaklı kopmalar ve eriyik filmleri ortaya çıkmıştır. Takviye oranı arttıkça yüzeyler arasında üç cisimli aşınmaya neden olduğu; adhesif aşınma ile birlikte abrasif aşınma olduğu görülmüştür.

6) Sürtünme katsayısı için SAE J661'e göre değerlendirdiğimiz de tüm numuneler, TS 555 standardına göre değerlendirdiğimiz de birkaç değişken şartı dışında tüm numunelerde belirlenen limitler içerisinde sonuçlar gözlemlenmiştir. Standart dışında çıkan sonuçlar yüzeyde biriken kirlilik ve porozite oranından kaynaklanmaktadır.

7) Tüm numuneler için hesaplanan aşınma oranı değerlerinin TS 555 standartlarına uygun olduğu belirlenmiştir. Sürtünme-aşınma testlerinden elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu ve TS 555'e uygun olduğu görülmüştür.

8) TS 555 standardındaki test koşullarına bakıldığında ortam sıcaklık test şartlarına göre değerlendirildiğinde mevcut numunelerin Tip 1 - Sadece park freni için kullanılan balata (merkezi fren, diskli frende kampanalı fren vb.). için kullanıma uygun olduğu görülmektedir.

9) Üretilen numunelerinin tümünün asbestli geleneksel balatalara alternatif olarak asbest içermeyen, çevre dostu malzemeler olarak kullanılabilirliği mümkündür. Kompozit malzemenin daha hafif olması sebebiyle yakıt tasarrufu potansiyeli de mevcuttur.

Bu çalışmanın geliştirilmesi ve ilerletilmesi için öneriler;

1) Yapılan testlerde sıcaklık etkisi ile özellikle yüzeyde eriyik oluşumu; aşınma oranını ve sürtünme katsayısını etkilemekte olup, bu etkinin önüne geçmek için sıcaklık mukavemeti daha yüksek olacak alüminyum esaslı metal matrisli kompozitler ile yeni numuneler oluşturulabilir.

2) Mevcut numunelerde ile TS 555'e göre Tip 1 tipi fren elemanları için değerlendirme yapılabilmiş olup, daha ağır şartlarda çalışma performansının kontrol edilmesi için ortam sıcaklığı daha yüksek şartlarda testler yapılabilir.

3) Dinamometre test düzeneğinde daha yüksek yük, sıcaklık ve hız şartlarında sürtünme katsayısı, aşınma oranı ölçümleri tekrarlanabilir.

4) Alüminyum yapısı gereği döküm balatalara göre hafif olması sebebiyle araçta ağırlık azalmasına ve dolayısıyla yakıt tüketimlerinin düşmesine yardımcı olacaktır. Alüminyum malzemelerin ısı transferi ile rejenaratif enerji sistemlerinde kullanımı, emisyon ölçümleri yapılarak verimlilik ve çevresel etkileri ile Euro 7 normlarına uygunluğu gözlemlenebilir.

5) SAE J2521: Disk ve Kampanalı Fren, Dinamometre Cırıltı Ses Matrisi testi ile sıcak ve soğuk frenlemede sürüş konforu için gürültü değerlendirmesi yapılabilir.

KAYNAKLAR

Akdoğan Eker, A. (2014). *Kompozit Malzemeler Ders Notu*. https://docplayer.biz.tr/13799836-Kompozit-malzemeler-04-04-2014-prof-dr-aysegul-akdogan-eker.html

Aleksandric, D., Duboka, C. (2006). Prediction of automotive friction material characteristics using artificial neural networks-cold performance. *Wear, 261*, 269–282.

Altıparmak, D. (1998). *Şasi Donanımları-Fren Sistemleri*, Ders Notları, Ankara.

Anlaş, İ. (1998). *Şasi Temel Ders Kitabı*, İstanbul : M.E.B. Yayınları.

Ashby, M.F., Jones, H. (1996). *Engineering materials* 1, 2nd edition, Butterworth, Heineman.

Ayar, H.H. (1991). *Disk Fren Balatalarında Bileşimin Performansa Etkilerinin Deneysel İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Başçı, Ü.G. (1999). *Al203 Parçacık Takviyeli Al-Cu Esaslı Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Barros, L. Y., Neis, P. D., Ferreira, N. F., Pavlak, R. P., Masotti, D., Matozo, L. T., Sukumaran, J., De Baets, P., Andó, M., (2016). Morphological analysis of pad – disc system during braking operations. *Wear, 352–353*, 112–121.

Bhushan, B., Gupta, B.K. (1991). *Handbook of Tribology: Materials, Coatings and Surface Treatments*, McGraw-Hill, New York.
Bowden, F.P.,Tabor D. (1950). *Frictional Lubrication of Solid*. Part-I Oxford Un. Pres.

Boz, M., Kurt, A. (2006). Toz metal fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma performansı üzerine çinkonun etkisi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 21, No 1,* 115-121.

Bruski, R. (2000). Justify aluminium metal matrix composite in an era of cost reduction. *Modern Casting*, *90(2)*: 58-60.

Çanakçı, A. (1998). *AA 2014 Matrisli B4C Parçacık Takviyeli Kompozit Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Daoud, A., AbouEl-khair, M.T. (2010). Wear and friction behavior of sand cast brake rotor made of A359-20 vol% SiC particle composites sliding against automobile friction material, *Tribology International, 43* 544–553.

Doğan, U., Erfidan, T., Bilgin, M.Z. (2016). Elektrikli Araçlarda Faydalı Frenleme Enerjisini Depolanması. *Journal of Advanced Technology Sciences, 5(2)*, 41-50.

Dündar, M., İnel, C., Akkurt, S., *Otomotiv Sektöründe Kullanılmak Amacıyla Sürekli Döküm Tekniğiyle Üretilmiş 5XXX Serisi Al-Mg Alaşımlarının Mekanik Karekterizasyonu*, ASSAN Alüminyum, Tuzla, İstanbul, https://www.assanaluminyum.com/~/media/files/arge/yayinlar/p3.ashx?la=tr-tr

Ertan, R., Yavuz, N.(2010). Balata malzemelerinde kullanılan yapısalların balatanın tribolojik ve fiziksel özelliklerine etkisi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 15,* 169-177.

Fenton, J., (1996), *Handbook of Vehicle Design Analysis*, Warrendale.
Gemalmayan, N. (1986). *Asbestsiz Sürtünme Malzemelerinin (Balataların) Yapımı ve Uygulanması*, 2. Ulusal Makine Tasarımı ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara.

Gilles, T. (2005). Automotive Chassis; Brakes, Steering & Suspension. *Thomson Delmar Learning, USA*, ISBN: 1-4018-5630-6, 164-170.

Godet, M. (1984). The third-body approach. A mechanical view of wear, *Wear, 100*, 437-52.

Gomez-del Río, T., M.A. Poza, Garrido, P., Rodríguez, J. (2010). Temperature and velocity transitions in dry sliding wear of Al–Li/SiC composites, *Wear, 268*, 700–707

Göktan, A. G., Güney, A., Ereke, M. (1995). *Taşıt Frenleri*, İstanbul.

Gül, F., Acılar, M. (2007). Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretilen Al- SiCp Kompozitlerde Parçacık Boyutunun Abrasif Aşınma Davranışına Etkisi. *Gazi Üniv. Müh. / Mim. Fak. Der.. Cilt 22, No 2,* 323-327.

Gültekin, D., Uysal, M., Aslan, S.,Alaf, M., Guler, M.O., Akbulut, H. (2010). The effects of applied load on t. he coefficient of friction in Cu-MMC brake pad/Al-SiCp MMC brake disc system. *Wear, 270,* 73-82.

Gyimah, G. K., Guo, Z., Huang, P., Chen, D. (2017). Application of powder metallurgy methods for production of a novel cu-based composite frictional train brake material. *In Powder metallurgy-fundamentals and case studies.* IntechOpen.

Hutchings, I. M. (1992). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Edward Arnold, London.

Kahraman, F., Küçük, M. (2019). Raylı taşıtlarda kullanılan fren balataları üzerine bir inceleme. *2. Uluslararası Mersin Sempozyumu 23-25 Mayıs 2019, Mersin* 128-140
Kalemtaş, A. (2014). Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış. *Putech & Composites, Ekim-Aralık 2014,* 18-30.

Karabaşoğlu, M.(2008). *Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı.* Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Kayalı, E.S., Eruslu,, N., Ürgen, M., Taptık, Y. ve Çimenoğlu, H., (1997). *Hasar Analizi Seminer Notları,* TMMOB, İstanbul.

Kılıçkap, E., Çakır, O., İnan, A. (2003). *%5 SiCp Metal Matriksli Kompozitin Tornalanmasında Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi*. Dicle Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü.

Kumar, N., Bharti A., Goyal, H.S., Patel, K.K. (2021). The Evolution Of Brake Friction Materials: A Review. *Materials Physics and Mechanics, 47,* 796-815

Kurt, H.A. (2019). *Bor karbür takviyeli fren balatalarının mekanik özelliklerinin incelenmesi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi), Balıkesir Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

Mimaroğlu, A., Çalışkan, M., Çallı, I.,(2001). Evaluation of sintering temperature and tribological properties of ceramic materials with Cr2O3, SiO2 and MnO2 additive compounds. *Industrial Lubrication and Tribology*, *53*, 192-197.

Odabaş, D. (1991). *Kuru Sürtünme Şartlarında Termomekanik Faktörlerin AISI 3315 Çeliğinin Aşınma Davranışına Olan Etkilerinin Teorik ve Deneysel Araştırılması*. Doktora Tezi. Ege Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Özdin, K. (2006). *Alüminyum Esaslı SiC Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması*. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Sarıyerli Domaç, G.S. (2006), *Disk frenlerin tasarım ve tribolojik açıdan incelenmesi.* (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Shanker, P.S. (2018). A Review On Properties Of Conventional And Metal Matrix Composite Materials In Manufacturing Of Disc Brake, *Materials Today: Proceedings, 5*, 5864–5869.

Stott, F.H. (1998). The role of oxidation in the wear of alloys, *Tribology International, 31*, 61-71

Sugözü, İ., Mutlu, İ., Öner, C. (2011). Fren balatası üretiminde sıcak presleme süresinin frenleme karakteristiğine etkisinin araştırılması. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011,* Elazığ, Turkey.

Uyyuru, R.K. , Surappab, M.K., Brusethaugc, S. (2007). Tribological behavior of Al–Si–SiCp composites/automobile brake pad system under dry sliding conditions. *Tribology International, 40,* 365–373.

Uyyuru, R.K., Surappa, M.K., Brusethaug, S. (2006). Effect of reinforcement volume fraction and size distribution on the tribological behavior of Al-composite/brake pad tribo-couple, *Wear, 260*, 1248-1255.

Ünal, A., Kandil, S.T. (2020). Tren setlerinde fren dinamiği ve fren pedlerinde oluşan aşınmaların haritalandırılmış basınç sensörü yardımıyla incelenmesi. *Mimar ve Mühendis Dergisi, 111*, 50-53.

Ürkmez Taşkın, N., Taşkın, V. (2017). Continuous Composite Metal Foam Production and Method and Device for Stirring Particle Reinforced Composite Metal. *Patent No. WO2015094139*.

Ürkmez Taşkın, N., Taşkın, V. (2016). Sürekli kompozit metal köpük üretimi ve parçacık takviyeli kompozit metal karıştırma için usul ve cihaz. *Patent No. 2013/14802*.

Ürkmez, N. (2004). *AlMg3 / SiC_p Kompozitlerinin Üretimi ve Mekanik Özelliklerdeki Değişimlerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Vardavoulias, M., Jouanny-Tresy, C. and Jeandin, M. (1993) Sliding-Wear Behaviour of Ceramic Particle-Reinforced High-Speed Steel Obtained by Powder Metallurgy. *Wear, 165*, 141-149.

Washabaugh, F. J. (1987). *EMCOR 66 Ultra-Short Fibers for Asbestos-Free Friction Materials*, SAE 860630.

Wojciechowski, A., Sobczak, J. (2001). Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdow drogowych, *Instytut Transportu Samochodowego*, Warszawa.

Wulpi, D.J. (1999). *Understanding How Components Fail*, ASM, Materials Park.

Zhang, S., Wang, F. (2007). Comparison of friction and wear performances of brake material dry sliding against two aluminum matrix composites reinforced with different SiC particles, *Journal of Materials Processing Technology 182,* 122–127.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emre Günözen

1986 yılında Kırklareli ilinin Vize ilçesinde doğdu. İlkokulu; Pınarhisar Mehmet Akif Ersoy İlkokulu'nda; Ortaokulu Pınarhisar Anadolu Lisesi'nde, Liseyi ise Pınarhisar Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nde okudu. Lisans öğrenimini İstanbul Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2011 yılından bu yana Bayraktarlar Akaryakıt Petrol Ürünleri Ltd. Şti. firmasında Makine Mühendisi olarak çalışmaktadır.