

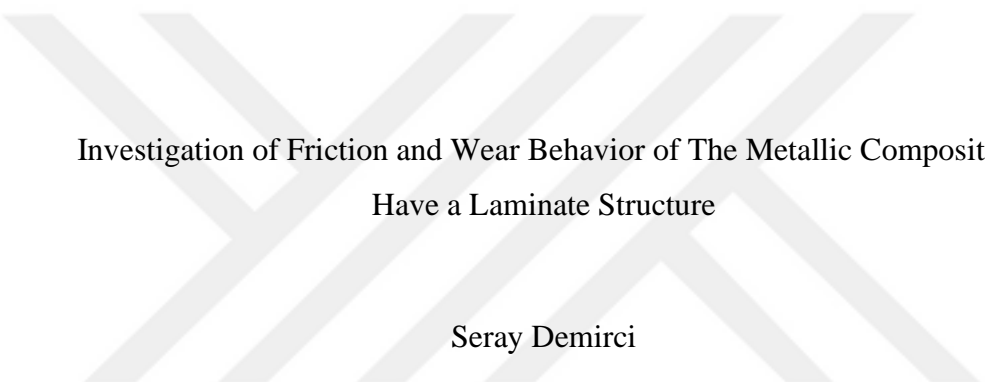
Lamine Yapılı Metalik Kompozitlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının  
Araştırılması

Seray Demirci

**DOKTORA TEZİ**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2024



Investigation of Friction and Wear Behavior of The Metallic Composites Which  
Have a Laminate Structure

Seray Demirci

**DOCTORAL DISSERTATION**

Department of Metallurgical and Materials Engineering

January 2024

Lamine Yapılı Metalik Kompozitlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının  
Araştırılması

Seray Demirci

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı  
Malzeme Bilimi Bilim Dalında  
DOKTORA TEZİ  
olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. İbrahim Çelikyürek

Ocak 2024

## ONAY

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Bilimi Bilim Dalı Doktora öğrencisi Seray Demirci'nin DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Lamine Yapılı Metalik Kompozitlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının Araştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. İbrahim ÇELİKÜREK

İkinci Danışman : —

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. İbrahim ÇELİKÜREK

Üye: Doç. Dr. Bedri BAKSAN

Üye: Doç. Dr. Ümit ER

Üye: Doç. Dr. Erhan AYAS

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Boğaç POYRAZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜRSEK

Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. İbrahim Çelikyürek danışmanlığında hazırlamış olduğum “Lamine Yapılı Metalik Kompozitlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının Araştırılması” başlıklı Doktora tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 22/01/2024

Seray Demirci

## ÖZET

Bu çalışmayla farklı karakterlerdeki metalik sürtünme malzemeleri döküm yoluyla katmanlar şeklinde birleştirilerek lamine kompozitlerin üretilmesi ve üretilen kompozitlerin değişik sürtünme koşullarındaki sürtünme ve aşınma davranışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla kurşunlu bronz alaşımı (Cu6Sn12Pb), GG25 ve Ni<sub>3</sub>Al metaller arası bileşiği kompozitin lamine katmanları olarak kullanılmıştır. Bu kompozitte bronz matris elemanı, Ni<sub>3</sub>Al aşınmayı kontrol eden eleman ve GG25 de sürtünmeyi kontrol eden eleman olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında farklı sürtünme karakterleri olan üç sürtünme malzemesi birbirine paralel ince lamineler şeklinde hazırlanmıştır. Öncelikle kompozitin her bir bileşeni ASTM G99 metoduna uygun olarak CSM Tribometer cihazı ile test edilmiş ve farklı sürtünme koşullar için sürtünme ve aşınma davranışları belirlenmiştir. Farklı kalınlıktaki lamine yapıları metalik kompozitler benzer koşullar altında test edilmiş, sürtünme ve aşınma davranışları incelenerek bileşenlerin sürtünme ve aşınma davranışlarıyla karşılaştırılmıştır. Tüm malzemelerin aşınma davranışlarının belirlenmesi için aşınma yüzeyleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskop ile analiz edilmiştir. Genellikle, fren balatalarının 0,35-0,55 değer aralığında sürtünme katsayısına sahip olması beklenir. Elde edilen sonuçlar göre kompozitlerin sürtünme katsayı değerleri en yüksek 0,79 ve en düşük 0,46 olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler, kompozit malzemelerin bileşen oranlarının değiştirilmesi ile sürtünme katsayısı değerinin istenilen değere ulaşabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kompozit, lamine, triboloji, balata

## SUMMARY

With this study, it is aimed to produce laminated composites by combining metallic friction materials with different characters in layers by casting and to determine the friction and wear behavior of the produced composites under different friction conditions. For this purpose, lead bronze alloy (Cu6Sn12Pb), GG25 and Ni<sub>3</sub>Al intermetallic compound were used as laminated layers of the composite. In this composite, bronze was used as the matrix element, Ni<sub>3</sub>Al was used as the wear-controlling element, and GG25 was used as the friction-controlling element. Within the scope of the study, three friction materials with different friction characters were prepared as thin laminates parallel to each other. Firstly, each component of the composite was tested with the CSM Tribometer device in accordance with ASTM G99 method and the friction and wear behaviors were determined for different friction conditions. Laminated metallic composites of different thicknesses were tested under similar conditions and their friction and wear behavior was examined and compared with the friction and wear behavior of the components. The wear surfaces were analyzed by optical microscope and scanning electron microscope to determine the wear behavior of all materials. Generally, brake pads are expected to have a coefficient of friction in the range of 0,35-0,55. According to the results obtained, the friction coefficient values of the composites were found to be 0,79 at the highest and 0,46 at the lowest. These values show that the friction coefficient value can be reached to the desired value by changing the component ratios of the composite materials.

**Keywords:** Composite, laminate, tribology, brake lining

## TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesinden tamamlanmasına kadar geçen süreçte değerli bilgi ve deneyimleri ile danışmanlık yapan Doç. Dr. İbrahim Çelikyürek hocama teşekkür ederim. Değerli zamanlarını ayırarak tez izleme komitesinde yer alan ve önerileri ile destek olan Doç. Dr. Bedri Baksan ve Doç. Dr. Ümit Er hocalarıma teşekkürlerimi sunarken aramızdan zamansızca ayrılan Prof. Dr. Osman Torun hocamı saygı ile anıyorum. Ayrıca, Gözde Ergün Ağdacı 'ya yardım ve desteği için teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca sevgisini, desteğini ve yardımlarını esirgemeyen ablam Şenay Demirci'ye teşekkür ederim. Son olarak hayata gözlerini kapatana kadar maddi ve manevi yanımda olan annem Perihan Demirci, babam H. İbrahim Demirci ve ablam Özay Demirci'yi saygıyla anıyorum.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	vi
<b>SUMMARY</b> .....	vii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xiv
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xv
<b>1. GİRİŞ ve AMAÇ</b> .....	1
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	3
<b>3.TRIBOLOJİ</b> .....	9
3.1. Sürtünme .....	10
3.2. Aşınma .....	12
3.3. Yağlama .....	15
3.4. Tribolojik Uygulama Alanları .....	16
<b>4. KOMPOZİTLER</b> .....	19
4.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .....	20
4.1.1 Matris malzemesi göre kompozitlerin sınıflandırılması .....	20
4.1.1.1. <u>Metal matrisli kompozitler (MMK)</u> .....	20
4.1.1.2. <u>Polimer matrisli kompozitler (PMK)</u> .....	22
4.1.1.3. <u>Seramik matrisli kompozitler (SMK)</u> .....	22
4.1.2. Takviye malzemesine göre kompozitlerin sınıflandırılması .....	23
4.1.2.1. <u>Elyaf (fiber) takviyeli kompozitler</u> .....	23
4.1.2.2. <u>Partikül takviyeli kompozitler</u> .....	23
4.1.2.3. <u>Tabakalı (Lamine) Kompozitler</u> .....	24
4.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Triboloji .....	24
4.3. Kompozit Malzemenin Bileşenleri .....	27
4.3.1. Nikel alüminat .....	27
4.3.2. Lamine grafitli dökme demir .....	28

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
4.3.3. Kurşunlu kalay bronzları .....	28
<b>5. FREN SİSTEMLERİ</b> .....	<b>29</b>
5.1. Frenlemeye Etki Eden Faktörler .....	30
5.2. Fren Sistemi Elemanları .....	31
5.2.1. Diskler .....	31
5.2.2. Kaliperler .....	32
5.2.3. Fren balataları .....	32
5.3. Fren Sistemlerinde Triboloji .....	34
5.3.1. Sürtünmeyi etkileyen faktörler .....	34
5.3.1.1. <u>Kayma hızı</u> .....	34
5.3.1.2. <u>Sıcaklığın etkisi</u> .....	35
5.3.1.3 <u>Basıncın etkisi</u> .....	35
5.3.1.4. <u>Balata yapısının etkisi</u> .....	35
5.3.1.5. <u>Disk yapısının etkisi</u> .....	36
5.3.1.6. <u>Frenleme süre ve sayısının etkisi</u> .....	36
5.3.1.7. <u>Temas alanının etkisi</u> .....	37
<b>6. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>38</b>
<b>7. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	<b>49</b>
7.1. Numunelerin Kümülatif Aşınması .....	50
7.2. Numunelerin Sürtünme Katsayısı .....	56
7.3. Numunelerin Aşınma Yüzeyleri İncelemesi .....	58
<b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>71</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ</b> .....	<b>72</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Diğer bilimlerle etkileşim halindeki tribolojinin grafiksel açıklaması .....	10
3.2. (a) Yuvarlanma ve (b) kayma sırasında gerçekleşen sürtünme kuvvetleri .....	11
3.3. Tribolojik sistemin şematik gösterimi.....	13
3.4. Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi .....	14
3.5. Stribeck eğrisinde yağlama rejimlerinin şematik gösterimi .....	16
4.1. Bazı metal, polimer ve seramik matrisli kompozit malzemelerin sıcaklık dayanımları .....	20
4.2. a) Fiber takviyeli, b) parçacık takviyeli ve c) lamine kompozitlerin şematik gösterimi .....	23
4.3. Tabakalı (lamine) kompozit .....	24
4.4. Al6061 esaslı MMK için kayma mesafesi aşınma oranı değişimleri (10N yük ve 1.85m/s kayma hızı) .....	26
4.5. Karbon elyaf takviyeli Al6061 kompozitler ile Al6061 alaşımının kayma hızına bağlı sürtünme katsayısı değerleri .....	26
4.6. Ni <sub>3</sub> Al'ın kristal yapısı .....	27
5.1. Otomobillerde kullanılan hidrolik fren sistemi .....	29
5.2. Frenleme esnasında oluşan kuvvetlerin taşıta etkisi.....	30
5.3. Fren sistemi .....	31
6.1. Kompozit üretimi için kalıp tasarımı ve laminelerin konumu .....	38
6.2. 1 mm'lik lamine kompozit üretimi için hazırlanan grafit kalıp .....	39
6.3. Döküm ile üretilmiş lamine kompozit şematik gösterimi .....	39
6.4. Bronz içine gömülmüş levhalar şeklinde üretilen lamine kompozit şematik gösterimi .....	40
6.5. 0.5 mm'lik levhalar ile hazırlanan lamine kompozit numune .....	40
6.6. Bakalite alınan numuneler .....	40
6.7. Optik Mikroskop .....	41
6.8. Dağlama öncesi bronza ait mikroyapı görüntüsü (50x) .....	42
6.9. Dağlama sonrası bronza ait mikroyapı görüntüsü (100x) .....	42

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.10. Dağlama sonrası GG25'e ait mikroyapı görüntüsü (100x) .....	43
6.11. Dağlama sonrasında Ni <sub>3</sub> Al'a ait mikroyapı görüntüsü (200x) .....	43
6.12. Kompozit numunedeki bronz-Ni <sub>3</sub> Al (50x) .....	44
6.13. Kompozit numunedeki bronz-GG25 (50x) .....	44
6.14. Future Tech. FV 800 serisi sertlik ölçüm cihazı .....	45
6.15. Sürtünme test geometrisi .....	46
6.16. Laminelerin sürtünme yönüne göre oryantasyonu .....	46
6.17. Aşınma cihazı (CSM Instruments Standart Tribometer) .....	47
6.18. Karşı cisim GGG60 numunesi .....	48
6.19. Soldan sağa doğru GG25, Ni <sub>3</sub> Al ve bronz test numuneleri .....	48
7.1. 3N yük ve 25 cm/s kayma hızında oluşan mesafeye bağlı aşınma miktarları .....	50
7.2. 5N yük ve 25 cm/s kayma hızında oluşan mesafeye bağlı kümülatif aşınma miktarları .....	52
7.3. 3N yük ve 50cm/s kayma hızında oluşan mesafeye bağlı kümülatif aşınma miktarları .....	53
7.4. 5N yük ve 50cm/s kayma hızında oluşan mesafeye bağlı kümülatif aşınma miktarları .....	54
7.5. Farklı iki yük ve farklı sürtünme hızında gerçekleştirilen testlerin kümülatif aşınma miktarları .....	56
7.6. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları .....	57
7.7. Bronza ait mikroyapılar (50x) .....	58
7.8. GG25'e ait mikroyapılar (50x) .....	59
7.9. Ni <sub>3</sub> Al'a ait mikroyapılar(50x) .....	60
7.10. 3N yük ve 50 cm/s hız altında tamamlanan test sonrası kompozit C'ye ait mikroyapı (200x) .....	61
7.11. 3N yük ve 50 cm/s hız altında tamamlanan test sonrası kompozit C'ye ait farklı bir mikroyapı (200x) .....	62

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.12. 5N yük ve 25 cm/s hız altında tamamlanan test sonrası kompozit D'ye ait bir mikroyapı (100x) .....	62
7.13. 5N yük ve 25 cm/s hız altında tamamlanan test sonrası kompozit D'ye ait farklı bir mikroyapı (100x) .....	63
7.14. 3N-25 cm/s ve 5N-50cm/s test koşullarındaki bronz ait SEM görüntüleri .....	64
7.15. 3N-25cm/s ve 5N-50cm/s test koşullarına Ni <sub>3</sub> Al'a ait SEM görüntüsü .....	64
7.16. 3N-25cm/s ve 5N-50cm/s test koşullarında GG25'e ait SEM görüntüsü .....	65
7.17. 5N-25cm/s test koşulunda kompozit D'ye ait SEM görüntüsü .....	65
7.18. 5N-25cm/s test koşullarında kompozit D'ye (bronz-Ni <sub>3</sub> Al) ait SEM görüntüsü .....	66
7.19. 5N-25cm/s test koşullarında kompozit D'ye (GG25- bronz) ait SEM görüntüsü .....	66
7.20. Bronz alaşımı EDS analizi (3N-25 cm/s ve 5N-50 cm/s test koşullarında) .....	67
7.21. Ni <sub>3</sub> Al alaşımı EDS analizi (3N-25 cm/s ve 5N-50 cm/s test koşullarında) .....	68
7.22. GG25 alaşımı EDS analizi (3N-25 cm/s ve 5N-50 cm/s test koşullarında) .....	69

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Triboloji uygulama alanları .....	18
4.1. Bazı MMK'lerin takviye malzemeleri ve kullanım alanları .....	21
4.2. Ni <sub>3</sub> Al bileşiklerinin bazı fiziksel özellikleri .....	27
6.1. Bakalite alınan numunelere uygulanan dağlama çözeltileri .....	41
6.2. Numunelere ait mikro sertlik değerleri .....	45
7.1. Kompozit numuneler ve bileşenlerine uygulanan sürtünme ve aşınma parametreleri ...	49
7.2. Sürtünme yönü ve lamine kalınlığına göre kompozitlerin adlandırılması .....	49
7.3. 3 N yük ve 25cm/s kayma hızında oluşan kümülatif aşınma miktarları .....	50
7.4. 5 N yük ve 25cm/s kayma hızında oluşan kümülatif aşınma miktarları .....	51
7.5. 3N yük ve 50cm/s kayma hızı altında oluşan kümülatif aşınma miktarları .....	52
7.6. 5N yük ve 50cm/s kayma hızı altında oluşan kümülatif aşınma miktarları .....	54
7.7. Toplam 10000 m sürtünme mesafesinde oluşan kümülatif aşınma miktarları .....	55
7.8. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları .....	56
7.9. EDS Bronz alaşımı ağırlıkça oranları (%) .....	67
7.10. EDS Ni <sub>3</sub> Al alaşımı ağırlıkça oranları (%) .....	68
7.11. EDS GG25 alaşımı ağırlıkça oranları (%) .....	69

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ****Simgeler****Açıklama**

F	Sürtünme kuvveti
$\mu$	Sürtünme katsayısı
$\mu_k$	Kinetik sürtünme katsayısı
$\mu_s$	Statik sürtünme katsayısı
W	Normal yükleme
$\theta$	Temas eden yüzeyler arasındaki açı

**Kısaltmalar****Açıklama**

DLC	Elmas benzeri karbon
EDS	Enerji dağılımı spektrometresi
HV	Vickers sertliği
MMK	Metal matrisli kompozit
PMK	Polimer matrisli kompozit
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SMK	Seramik matrisli kompozit
vd.	Ve diğerleri

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Teknolojinin yıllar içinde gelişmesiyle otomotiv sektörüne yapılan yatırımlar giderek artmaktadır. Otomotiv sektörünün büyümesi ve tüketimin artması, iç ve dış pazarda üreticiler arasında rekabet ortamını oluşturmaktadır. Bu sebeple, üreticiler devamlı araştırma ve geliştirme çalışmalarında bulunmak durumundadırlar. Bu çalışmaların önemli kısmını triboloji esaslı çalışmalardan oluşmaktadır.

Temas halinde hareket eden cisimler arasındaki sürtünme, çoğu zaman koşulların değişmesi ile değişiklik gösterir. Bu yüzden değişen sürtünme koşullarında kararlı bir sürtünme davranışı sergileyebilecek malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gereksinimi birçok durumda konvansiyonel malzemeler karşılayamadığından bu ihtiyaç kompozit malzemeler ile giderilmeye çalışılmaktadır.

Frenler, güvenlik ve performans açısından taşıtlarda önemli olan elemanlarından biridir. Taşıtlarda genel olarak fren sistemi disk, fren kaliperi ve balatalardan oluşur. Frenlerde, disk değişik dökme demirlerden yapılırken balatalar polimer matrisli kompozit şeklinde üretilmektedir. Genellikle fren balataları, fenolik reçineler ile bağlanmış içeriğinde 10'dan fazla değişik bileşenden oluşan kompozitlerden üretilmektedir. Fren balata malzemelerinde sürtünme katsayısının yüksek olması ve değişen sürtünme şartlarında (sıcaklıktaki değişimle, nemle, aşınma ve korozyon etkileriyle, yoldan sıçrayabilecek toz ve su ile vb.) değişmemesi beklenir. Bunlara ilaveten güvenlik için uzun ömürlü olması, konfor için titreşim ve cızırtıya neden olmaması, aşınma direncinin yüksek olması, karşı malzemeyi çizip hasara uğratmaması, mekanik mukavemetinin yeterli olması da gerekir. Ayrıca sertlik, basma mukavemeti ve yüksek sıcaklıklara direnç gibi mekanik özelliklerin iyi bir kombinasyonunu sağlamalıdır.

Bir fren malzemesinden beklentilerin fazla olması araştırmacıları farklı malzemeler üzerine araştırmalar yapmaya yöneltmiştir. Metal matrisli kompozitler iyi bir balata malzemesi olarak önerilmektedir. Metal esaslı balataların polimer esaslı balatalara göre enerjiyi daha hızlı absorblama, daha yüksek aşınma direnci, daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilme ve ısıyı daha hızlı iletme gibi üstünlükleri vardır.

Bu çalışmanın amacı az sayıda metalik bileşenden oluşan ve günümüzde kullanılan fren balatalarına rakip olabilecek bir sürtünme malzemesi üretmektir. Bir fren balatasından beklentiler çok fazladır. Bu beklentileri karşılayabilmek için çok sayıda bileşenden oluşan kompozitler kullanılmaktadır. Kullanılan kompozitlerin çok fazla bileşen içermesi ise sürtünme ara yüzeyindeki olayları net bir biçimde analiz etmeyi zorlaştırmaktadır. Daha az sayıda, aynı malzeme grubundan seçilmiş bileşenlerden oluşan bir kompozitte ise ara yüzey karakterizasyonu, dolayısıyla sürtünme ve aşınmanın kontrolü daha kolay olacaktır. Bu ise istenilen sürtünme ve aşınma davranışına sahip malzeme üretilebilmesini kolaylaştıracaktır.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son yıllarda, endüstriyel uygulamaların zaman geçtikçe artması daha iyi özelliklere sahip malzemelere ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda daha iyi özelliklere sahip kompozit malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesine neden olmaktadır.

Kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre dayanım/yoğunluk ve elastisite modülü/yoğunluk oranlarının yüksek olması bu malzemelere olan talebi arttırmıştır. Bu malzemelerin daha yüksek dayanım ve rijitliğe sahip olması, makine elamanının ağırlığının azalması anlamına gelmektedir. Endüstriyel uygulamalardaki malzeme seçiminde önemli bir etken olan bu durum ağırlıktaki azalmalar ile enerji tasarrufuna ve verimliliğin artmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, kompozit malzemelerdeki üretim son çeyrek yüzyılda büyük ölçüde artmıştır (Can, 2006)

Günümüz rekabet ortamında kalabilmek için otomotiv endüstrisi yenilikleri takip etmek ve geliştirmek zorundadır (Stone ve Ball, 2004). Bu nedenle, fren sistemi bileşenlerinden disk ve balata malzemeleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri bakır ve barit oranının balatanın sürtünme ve aşınma üzerindeki etkisi üzerine yapılan bir çalışmadır. Bu çalışma, bakır tozu eklenmesinin balatanın kayma direncini arttırırken ve aşınma miktarının azalmasına neden olduğunu göstermiştir (Handa ve Kato, 1996).

Österle ve Urban (2004), yaptıkları çalışma ile ticari bir fren balatasının mikro temas alanlarındaki yüzeysel katmanları karakterize etmişlerdir. Sürtünme malzemesi yaklaşık %50 metal içerikli polimer matris kompozit ve karşı cisim olarak dökme demir kullanmışlardır.

Ho vd. (2005), çelik, pirinç, seramik ve bakır gibi bileşenler kullanarak balata üreterek mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışma ile balatada yüksek oranlarda çelik, pirinç, seramik ve bakır kullanılmasının aşınma direncini arttırdığını saptamışlardır.

Boz ve Kurt (2006) yaptıkları araştırmada, takviyesiz bronz esaslı ve Zn tozu takviyeli fren balatalarını toz metalurjisi metodu ile üreterek sürtünme-aşınma performanslarını test etmişlerdir. Yaptıkları bir başka çalışmada ise Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli numunelerin sürtünme-aşınma özelliklerini incelenmişler ve bronz bazlı numunelerle karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar ile %2 ve %4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile güçlendirilmiş numunelerin en iyi sonuçları sergilediğini belirtmişlerdir. (Boz ve Kurt, 2007).

Blau vd. (2007), titanyum takviyesinin aşınma davranışları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Test edilen malzeme kombinasyonlarının birçoğu fren malzemeleri için tipik aralıkta (0,35-0,55) sürtünme katsayıları sağladığını belirtmişlerdir.

Ma vd. (2008) ise zirkonun metalik olmayan malzemelerin sürtünme davranışındaki etkilerini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar ile zirkonun sürtünme katsayısı artarken aşınma oranında azalma olduğu gözlemlenmiştir.

Cho vd. (2008) yaptıkları araştırma ile farklı boyutlara sahip ZrSiO<sub>4</sub> parçacık kullanarak ürettikleri balata malzemesinin tribolojik davranışları açısından aşındırıcı boyutunun etkisini araştırmışlardır. İri taneli parçacıkların numunenin temas yüzeyinde oluşturdukları kararlı sürtünme filmi sayesinde yüksek sürtünme ile düşük aşınma davranışı sergilerken ince taneli parçacıkların numune yüzeyinde geçici sürtünme filmi oluşturması nedeniyle yüksek aşınma ile düşük sürtünme davranışı gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Sugözü ve Mutlu (2009), karbon nano tüpün fren balatalarında kullanılabilirliği üzerine bir çalışma yapmışlar ve toz karıştırma süresinin sürtünme katsayısında ve sıcaklık artışında az da olsa etkisi olduğu sonucuna varmışlardır.

Ertan ve Yavuz (2010), yapısal bileşenleri bakır tozu, kaya yünü ve aramid lifler olan malzemelerden üretilen fren balatası numunelerinin sabit üretim koşullarında tribolojik ve fiziksel özelliklere etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır.

Kumar ve Bijwe (2010) yaptıkları çalışmada kompozite demir, bakır ve pirinç tozları ekleyerek aşınma davranışına ve fren performansına olan etkisini incelemişlerdir. Bakır

içeren kompozitin en iyi triboloji davranışı gösterirken metal tozu katılmayanın en zayıf triboloji davranışı gösterdiğini bildirmişlerdir.

Kolluri vd. (2010) tarafından yapılan bir çalışmada aynı ana bileşime sahip ancak ortalama doğal grafit parçacık boyutu (21, 41, 71 ve 137  $\mu\text{m}$ ) bakımından farklılık gösteren dört kompozit geliştirmişlerdir. Genel olarak, daha düşük grafit parçacık boyutuna sahip kompozitlerin daha yüksek parçacık boyutuna sahip olanlardan daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir.

Kim vd. (2011) yaptıkları çalışmada, farklı aşındırıcı partikül (silisyum karbür, zirkon, kuvars ve magnezya) içeren otomotiv fren sürtünme malzemeleri incelemişlerdir. Aşındırıcıların kırılma tokluğunun sürtünme seviyesini, aşınma kalıntısı oluşumunu ve yapışma-kaymayı belirlemede önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Ayrıca aşındırıcıların kırılma tokluğunun fren uygulamaları sırasında meydana gelen gürültü ve titreşim üzerinde önemli etkisi olduğu sonucuna varmışlardır.

Bijwe vd. (2012) ise alümina, SiC ve silika (%2) olmak üzere üç tip mikro ve nano aşındırıcı kullanılarak nano ve mikro kompozitler geliştirilerek çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikler açısından karakterize etmişlerdir. Tribolojik performans parametrelerinin nano dolgu maddeleri nedeniyle önemli ölçüde ve faydalı bir şekilde etkilendiği, nano-silika, SiC ve ardından alümina ile en yüksek aşınma direncini sağlarken, en iyi sürtünme özellikleri kombinasyonunun SiC ve ardından alümina ve ardından silika içeren kompozitler tarafından sergilendiği sonucuna varmışlardır.

Timur ve Kılıç (2012) yaptıkları çalışmada toz metalurjisi metodu ile atık mermer tozu ve çeşitli katkı maddeleri kullanılarak kompozit fren balataları üretmişler ve farklı firmaların balataları ile karşılaştırmışlardır. Mermer tozunun frenleme performansında olumlu sonuçlar verdiği belirtmişlerdir.

Shin vd. (2014) ise farklı boyutlarda zirkon parçacıkları (3, 50 ve 100  $\mu\text{m}$ ) ekledikleri fren sürtünme malzemeler ile gri demir disk arasındaki kayma arayüzünde tetiklenen sürtünmeyi incelemişlerdir. Elde ettikleri veriler doğrultusunda aşındırıcının boyutuyla sürtünme özellikleri arasında doğrudan ilişki olduğu sonucuna varmışlardır.

Kuş vd. (2016) yaptıkları çalışmada sıcak presleme metoduyla ürettikleri kütlece %6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesine ekledikleri farklı oranlardaki (%0.5-4) kolemanitin tribolojik davranışlara etkisini incelemişlerdir.

Sun vd. (2018) yaptıkları çalışmada farklı SiO<sub>2</sub> partikül boyutunun (10 µm, 80 µm, 180-700 µm, 700 µm-2.0 mm ve 3.0 mm) sürtünme mekanizmaları üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Sürtünme mekanizmalarının parçacık boyutuyla değiştiğini sonucuna varmışlardır. Ayrıca, 80 µm boyutuna sahip sürtünme malzemesinin sürtünme katsayısı diğerlerine göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

P. Topuz ve A. Topuz (2018) yaptıkları araştırmada farklı fren disk balatasının bileşenlerinin aşınma-sürtünme davranışları, mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca, fren disk balatalarının çevre ve kullanım açısından karşılaştırılmalarını yapmışlardır.

Pinca-Bretotean vd. (2019), orta performanslı küçük otomobillerin fren sistemleri için fren balataları yapmak üzere tasarlanmış bazı organik kompozit malzemelerin karakterize edilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Doğal lifli kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğal liflerin davranışı, konsantrasyonu, dağılımı ve oryantasyonuna bağlı olduğunu bildirmişlerdir. En yüksek aşınma direnci %10 hindistan cevizi lifi ile elde edildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, dökme demir disk aşınması kompozit malzemelere göre daha az aşındığını ve bu da aşınma direncinin metal miktarına çok bağlı olmadığını gözlemlemişlerdir.

Elzayady ve Elsoeudy (2021), gerçek otomotiv balatası ve üretilen iki farklı kompozit numunelerin aşınma mekanizmalarını anlamak ve aşınma-sürtünme özelliklerini iyileştirmek üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar ile grafit yağlayıcı içeren kompozit numunenin daha iyi aşınma ve sürtünme özellikleri gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Yavuz ve Bayrakçeken (2022), huntit minerali ve cam elyafı, kaolin, grafit, fenolik reçine ve kauçuk tozundan farklı karışım oranlarında fren balatası numuneleri ile ilgili bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar ile üretilen numunelerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin fren balatası standartlarına uygun olduğunu

bildirmişlerdir. Ayrıca, huntit minerali ile elde edilen tüm numunelerin fren balatası kullanımına uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Yılmaz (2022), fren balatası matrisinde alüminyum tozunu azaltarak %30, %35 ve %40 ağırlık oranlarında uçucu külün ilave ederek uçucu külün fren balatası bileşenleri üzerindeki tribolojik etkilerini incelediği bir çalışma yapmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, uçucu külün atmosfere daha az salınacağından üretim maliyetlerinin düşürülmesi, servis ömrünün uzatılması ve çevrenin korunması açısından fren balatası bileşenleri için uygun bir katkı maddesi olduğunu belirtmiştir.

Naidu vd. (2022) kenevir fiber takviyeli polimer fren balatası malzemesinin sürtünme ve aşınma davranışlarını üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. HF4P20, HF5P20 ve HF6P20 olmak üzere üç farklı biyo-kompozit numunelere testler yapılarak Taguchi yöntemi ve ANOVA ile doğrulama işlemleri gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre HF6P20 numunesi tutarlı bir sürtünme katsayısı ve düşük spesifik aşınma oranı gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Akar vd. (2023), kaju ve üleksit karışımlarından hazırlanan balata numunelerinin aşınma oranları gerçek değerleri ile simülasyon (Ansys) değerlerinin karşılaştırılması üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar ile simülasyon değerlerinin gerçek değerlere göre doğrusal olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, balata numunelerinin merkezinde aşınma meydana geldiğini ve bu aşınmanın balata yüzeyine uygulanan basıncın dağıtılması ile azaltılabileceği belirtmişlerdir.

Kindrachuk vd. (2023), farklı tipteki sürtünme balataları ve fren disklerinin frenleme sırasında yapılan testler ile elde edilen dinamik sürtünme katsayısı ve aşınmasına ilişkin bir araştırma yapmışlardır.

Praveenkumar vd. (2023), hafif fren balatası uygulamaları için toz metalurjisi metodu ile ürettikleri magnezyum metal matrisli kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışlarının belirlenmesi için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. AZ31 + %2 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompoziti, AZ31 + %0 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitine kıyasla yüksek sertlik, kararlı bir sürtünme katsayısı ve daha düşük bir aşınma oranı sergilediğini tespit etmişlerdir.

Günümüzde kompozit fren balataları ile ilgili yapılan çalışmalar genellikle kullanılan bileşenlerin oranları ile balatalar üzerindeki etkilerinin araştırılması üzerine olmuştur. Literatürde metallerin levhalar şeklinde birleştirilip sürtünme ve aşınmasının araştırıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tezin çıktıları literatürdeki bu boşluğu doldurabileceği gibi benzer birçok çalışmanın yapılmasına da öncülük edecektir.



### 3.TRİBOLOJİ

Sürtünme, yağlama ve aşınma olaylarıyla ilgilenen bilim ve teknoloji alanı triboloji olarak adlandırılır (Hutchings, 1992; Jahanmir, 1994; Açıkbaş vd.,2009). Triboloji, sürtünme çalışması veya sürtünme bilimi anlamına gelen Yunanca “tribos” ve “logos” kelimelerinden türetilmiştir.

Triboloji, 19. ve 20. yy'daki sanayi gelişimi ile ortaya çıktığı düşünülse de aslında insanoğlunun sürtünmeyi azaltmayı ve aşınmayı önlemenin yollarını araması daha eskilere dayanmaktadır. İlk çağlardan beri (M.Ö. 2000 yılından da eski) çömlek üretiminde kullanılan çarkın millerdeki sürtünmeyi azaltmak için zift kullanılmıştır. M.Ö. 2400 tarihli Mısır'da bulunan kabartma resimlerde ağır yüklerin taşınmasını kolaylaştırmada yağlayıcıların kullanıldığını göstermektedir. Ayrıca, resim ve heykeltıraşlık alanından tanıdığımız Leonarda de Vinci bir matematikçi olup mekanizma, makinalar ve sürtünme üzerindeki çalışmaları ölümünden iki yüzyıl sonra dahi kullanılmıştır. Triboloji kavramı ilk defa 1966 yılında İngiltere eğitim ve bilgi bakanlığı raporunda Prof. H. Peter Jost tarafından telaffuz edilmiştir (Kaleli, 2019).

Triboloji alanına Robert Hooke (yuvarlanma sürtünmesi ilişkileri), Isaac Newton (akışkanlardaki iç sürtünmenin tanımı, viskozite), Guillaume Amontons (deneysel çalışmalar ve sürtünme yasaları) ve Leonhard Euler (sürtünmeye analitik yaklaşım ve sürtünme katsayısı) başta olmak üzere bilim insanları yaptıkları çalışmalarla birlikte önemli katkılarda bulunmuşlardır. Tribolojinin önemi sanayi devrimleri ile birlikte sürekli bir şekilde arttı. Günümüze kadar olan süreçte sanayi ve triboloji alanlarında birbirleri ile uyumlu olarak önemli gelişmeler kaydedildi (Baydemir, 2021).

Triboloji birçok alandan (kimya, malzeme bilimi, matematik vd.) yararlanan disiplinler arası bilim dalıdır (Dowson,1979). Şekil 3.1'de diğer bilimlerle etkileşim halindeki tribolojinin grafiksel açıklaması gösterilmiştir.



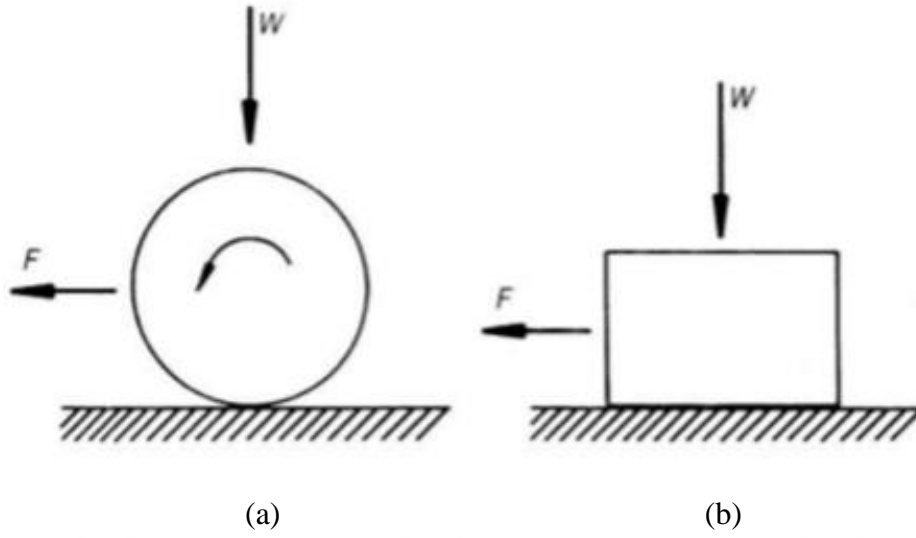
Şekil 3.1. Diğer bilimlerle etkileşim halindeki tribolojinin grafiksel açıklaması (Beşergil, 2023)

Mühendislik malzemelerinin mekanik özelliklerinden olan sürtünme ve aşınma davranışlarını tribolojik sistem olarak değerlendirmek gerekir (Odabaş ve Topal,1995). Triboloji biliminin ilgi alanları sürtünme, aşınma ve yağlama olarak üç gruptan oluşur.

### 3.1. Sürtünme

Sürtünme, birbiriyle temasta olan ve birbirine göre izafi hareket yapan ya da yapma eğiliminde olan iki cismin harekete karşı gösterdikleri dirençtir. Hareketin cinsine göre sürtünme kayma veya yuvarlanma şeklinde gerçekleşir. Şekil 3.2’de kayma veya yuvarlanma sırasında gerçekleşen sürtünme kuvvetleri şematik olarak gösterilmiştir.

Günlük yaşantımızda sürtünmenin önemli rolü vardır. Sürtünme olmaması durumunda hareket etmemiz, hayatımızı kolaylaştıran cihazları kullanmamız gibi eylemleri gerçekleştiremezdik. Sürtünme, hareket halindeki yüzeyler arasında yağlayıcı olup olmaması açısından temas yüzeylerinin durumuna göre iki koşulda meydana gelir. Bunlardan ilki kuru koşullar altında oluşan kuru (Coulomb) sürtünme ve diğeri yağlama koşulları altında oluşan sıvı sürtünmedir.



Şekil 3.2. (a) Yuvarlanma ve (b) kayma sırasında gerçekleşen sürtünme kuvvetleri (Hutchings, 1992)

Cisimler arasında hareket oluşturmak isteyen kuvvete karşı temas yüzeyleri arasında hareketi önleyen bir kuvvet meydana gelir ve sürtünme kuvveti olarak adlandırılır. Hareketin başlaması için yüzeydeki dirence karşı gerekli kuvvete statik sürtünme kuvveti, hareketin devam etmesi için gerekli kuvvete kinetik sürtünme kuvveti denir. Sürtünme kuvvetinin özellikleri;

- ❖ Hareket yönüne ters yönde etki eder.
- ❖ Hareketi önlemek için uygulanan kuvvete eşit değerler alır.
- ❖ Cisim ve yüzey kayganlığına göre değeri değişir (Hsu ve Shen, 2000; Bhushan, 2000).

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

Sürtünme katsayısı,  $\mu$  olarak adlandırılan ve sürtünmeyi karakterize eden önemli bir faktördür. Teğet sürtünme kuvvetinin (F) normal yük kuvvetine (W) oranı olarak tanımlanan değere sürtünme katsayısı denir. Sürtünme katsayısı kullanılan materyale göre değişir. Sürtünme katsayısı genellikle 0 ile 1 arasında değer alır. Sürtünme katsayısı, statik durumda  $\mu_s$  ve kinetik durumda ise  $\mu_k$  olarak ifade edilir.

Statik haldeki sürtünmenin kinetik sürtünmeden daha büyük olmasının sebebi temas başlangıcındaki yüzeylerdeki pürüzlerin birbirini tam kavramasına ve bu temasın bozulması için daha fazla sürtünme kuvveti gerektirmesine bağlanmaktadır. Kinetik sürtünmede pürüzler birbiri üzerinden sıçrayarak hareket ettiklerinden dolayı daha az sürtünme kuvveti gerektirir. Statik sürtünmeyi, bazı durumlarda hareket halindeki yüzeylerden birinin kaymaya başlayacağı maksimum açı olarak ifade edilir. Bu maksimum açı değerine sürtünme açısı denir. Denklem 3.2’de gösterildiği gibi  $\theta$  temas eden yüzeyler arasındaki yatay açı ve  $\mu_s$  cisimler arasındaki statik sürtünme katsayısı ile sürtünme açısı tanımlanır.

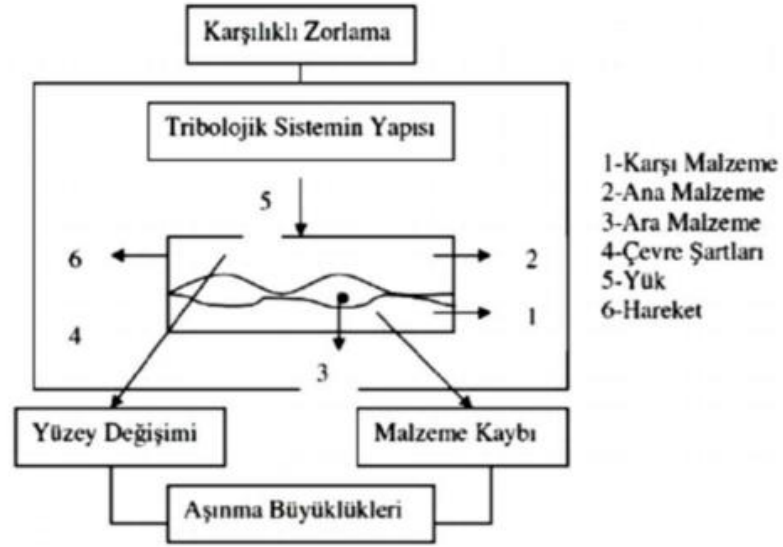
$$\tan \theta = \mu_s \quad (3.2)$$

Sürtünme bazı faktörlerden etkilenir. Bunları şu şekilde sıralayabiliriz;

- ❖ Yüzeyde oluşan aşınma ürünleri,
- ❖ Malzemelerin yapısal özellikleri,
- ❖ Malzeme sertlik farkı,
- ❖ Temas eden malzemelere gelen yük ve hareket mesafesi,
- ❖ Görünür temas alanı,
- ❖ Aşınma ürünlerin, oksidasyon ürünlerin film oluşturması,
- ❖ Yüzey topografyası
- ❖ Temas eden yüzeylerin kinematiği (hızın büyüklüğü, hareketin yönü vd.)

### 3.2. Aşınma

Aşınma olayı, birbirleri ile temasta bulunan ve hareket eden sürtünme durumundaki iki cismin yüzeylerinde oluşan malzeme kaybı şeklinde tanımlanır (Kurgan, 2022). Birbirleri ile temasta bulunan malzemelerin, sürtünmesi ile oluşan aşınma, çeşitli teçhizat ve makinenin kullanımını esnasında ekonomik kayıplara sebebiyet vermektedir. Aşınmaya uğrayan malzemelerde şekil bozuklukları, deformasyon ve sağlaması istenen özellikleri yerine getirememesi gibi durumlar meydana gelebilir. Bu yüzden aşınma tribolojide önemli bir parametredir.



Şekil 3.3. Tribolojik sistemin şematik gösterimi (Kayalı vd., 1997)

Aşınma sistemini meydana getiren aşınmanın temel unsurları; ana malzeme, karşı malzeme, ara malzeme, hareket, yük ve çevreden oluşmaktadır. Bu elemanlarının oluşturduğu sisteme tribolojik sistem (şekil 3.3) denir. Aşınmayı meydana getiren ana malzeme ile karşı malzeme arasında ara malzeme varken yük altında hareket sırasında aşınma başlar. Aşınmayı etkileyen faktörler;

I) Ana malzemeye bağlı faktörler

- Cinsi
- Mikroyapı
- Sertlik
- Elastiklik modülü
- Şekli ve boyutları
- Yüzye pürüzlülük durumu
- Isıl işlem
- Soğuk şekil vermenin etkisi

II) Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi

- Tane büyüklüğü
- Tane şekli
- Tane dağılımı

III) Çalışma koşullarına bağlı faktörler

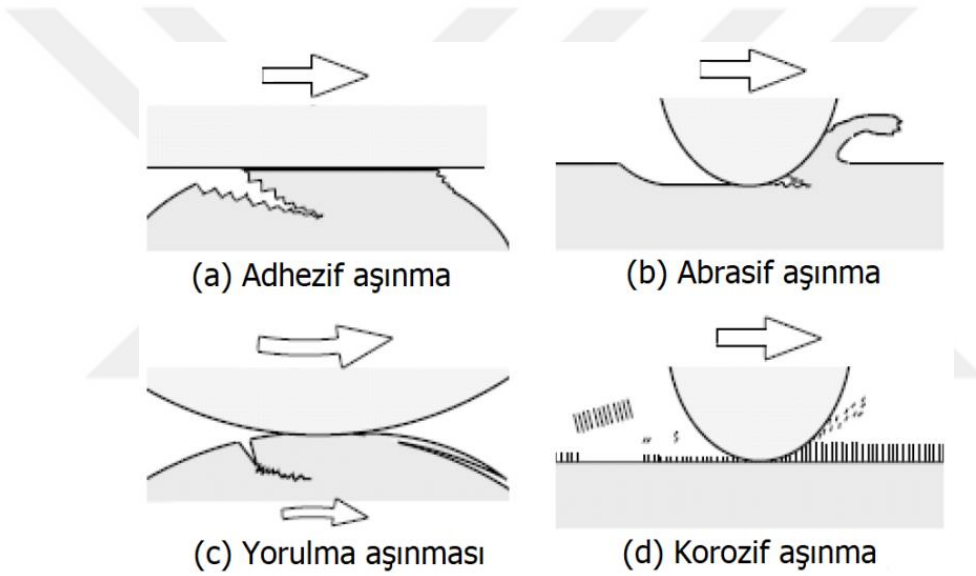
- Sıcaklık

- b) Atmosfer
- c) Nem

#### IV) Ortam etkisine bağı faktörler

- a) Hız
- b) Basınç
- c) Kayma mesafesi (Kurgan,2022)

Temel aşınma mekanizmaları; abrasif aşınma, adhesif aşınma, delaminasyon aşınması, yorulma aşınması, erozyon aşınması ve korozif aşınmadır. Şekil 3.4’de dört farklı aşınma mekanizmasının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.4. Dört farklı aşınma mekanizmasının şematik gösterimi

Abrasif aşınma, sürtünen cisimlerden sert olan yüzeyin yumuşak olan yüzeyine batarak parçalar kopması ile oluşur. Çizilme ya da yırtılma aşınması olarak da tanımlanan abrasif aşınma, hızlı hasara sebebiyet veren aşınma türüdür. Bu tür aşınmayı azaltmak için daha sert alaşım kullanılabilir, malzeme yüzeyi sert bir tabaka ile kaplanabilir ve sertlik arttırmak amacıyla ısıl işlem uygulanabilir.

Adhesif aşınma, temasta bulunan cisimlerin yüzeyleri, uygulanan kuvvet altında birbirlerine yapışmış ya da kaynamış yüzeydeki pürüzlerin kırılması ile meydana gelen

aşınma türüdür. Bu tür aşınmalar; yüzeye uygulanan yük, aşınan malzemenin yüzey sertliği ve kayma mesafesi ile orantılıdır.

Delaminasyon aşınması, bir cismin başka bir cisim üzerine uyguladığı yükün yüzey altında oluşturduğu gerilmeler o cismin gerilme direncinin üzerine çıkarak yüzey altında çatlakların oluşması ile gerçekleşir.

Yorulma aşınması, yüzeyler arasında tekrarlı yükler sonucunda yüzey ve yüzey altı çatlakların meydana gelmesi ile oluşan aşınma türüdür. Bu aşınmalar yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeyinde, dişli çarklarda ve rulmanlı yataklarda görülür.

Erozyon aşınması, bir sıvı içerisindeki sert partiküllerin malzeme yüzeyinden yüksek hızlarda yuvarlanması ya da kayması sırasında çok sayıda parça koparması neticesinde oluşan aşınma türüdür.

Korozif aşınma, kimyasal maddelerin (katı, sıvı veya gaz) katı cisimlerin yüzeyleri ile kimyasal etkileşim neticesi kütle kaybetmesi ile oluşan aşınma türüdür. Bu aşınma iki kademedede gerçekleşir.

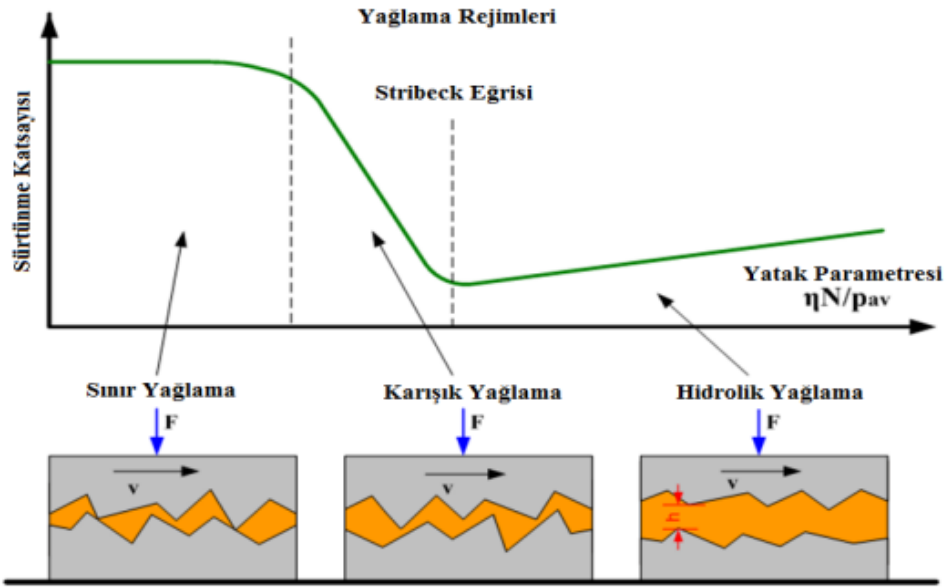
- ❖ Temas durumundaki yüzeyler ortamla reaksiyona girerek yüzeyde bir tabaka oluşur.
- ❖ Daha sonra temas noktasında çatlak oluşur ya da abrasif etkiden dolayı meydana gelen tabaka hasara uğrar (Kurgan, 2022).

Korozif aşınmada en önemli faktör pastır ve oksitlenmeye sebebiyet verir. Oksitlenmeyi önlemek için reaksiyona girmeyecek alaşım elemanları seçmek ya da kaplama yapmak gerekir.

### **3.3. Yağlama**

Yağlama, birbirleri ile temas halindeki hareketli yüzeyler arasındaki sürtünmeyi azaltan ve aşınmanın kontrol edilerek en aza indirgenmesi amacıyla yağlayıcı uygulanan işlemlerdir. Yağlama işleminin sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı önlemek, ısı ve kirleticileri uzaklaştırmak ve ekipmanı korozyondan korumak gibi faydaları vardır.

Tribolojide uygun yağlayıcının kullanılması için çalışmaya başlamadan önce sürtünme hareketi, malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, çalışma koşulları ve çalışma esnasında sistemde oluşabilecek sorunlar (ısı, kirlenme) gibi parametrelerin iyi analiz edilmesi gerekir.



Şekil 3.5. Stribeck eğrisinde yağlama rejimlerinin şematik gösterimi (Pıhtılı, 2012)

Tribolojik veriler genel olarak Stribeck eğrisi ile gösterilir. Şekil 3.5'de görüldüğü gibi Stribeck eğrisinde yağlama rejimleri üç bölgeden oluşur. Bunlar;

- ❖ İlk bölge sınır yağlama bölgesidir. Bu bölgede, yağlama filmi henüz oluşmadığından iki yüzey teması devam eder ve sürtünme katsayıları yüksektir.
- ❖ İkinci bölge karışık yağlama bölgesidir. Bu bölgede, hem yüzeyler arasında bir yağlayıcı film oluşması hem de sürtünme katsayılarında azalma başladığı görülür.
- ❖ Üçüncü ve son bölge hidrolik yağlama bölgesidir. Burada, yüzeyler yağlama filmi ile birbirinden ayrıldığı ve sürtünme katsayılarının tekrar artmaya başladığı görülür. (Baydemir, 2021).

### 3.4. Tribolojik Uygulama Alanları

Günlük yaşantımızın her alanında tribolojinin önemli rolü vardır. Elbiselerin yıpranması, taşıt tekerleklerinin aşınması, asfalt yolların aşınmaya uğraması, keskin aletlerin

körleşmesi, metallerin paslanması (korozyon), toprağın erozyona uğraması, insanların kaygan zeminde düşmeleri, karlı ya da ıslak yollarda taşıtların kazalara neden olmaları vd. tribolojiyi kapsayan gündelik problemler milli geliri büyük oranda etkilemektedir (Hutchings, 1992).

Tribolojik uygulamalarda, malzemenin maruz kalacağı durumlara göre değişen ve malzemedan istenen özellikler aşınma dayanımı, mukavemet, kırılma tokluğu, yoğunluk, korozyon direnci, sürtünme katsayısı, ısı iletkenlik ve kimyasal kararlılıktır. Ayrıca, kolay üretim ve maliyet de bu tür uygulamalarda önemli etkenlerdir. Çizelge 3.1'de triboloji uygulama alanları verilmiştir.

Tribolojik malzemeleri endüstriyel uygulama alanına göre şu şekilde sınıflandırabiliriz;

- ❖ Üretim tribolojisi
- ❖ Kağıt endüstrisi
- ❖ Otomotiv tribolojisi
- ❖ Biomedikal uygulamalar
- ❖ Tekstil endüstrisi
- ❖ Rulman yatakları
- ❖ Yüzey işlemleri (Hutchings, 1992; Jahanmir, 1994)

Çizelge 3.1. Triboloji uygulama alanları (Açıkbaş, 2009)

Uygulama Alanı	İstenen Özellikler	Parçalar	Ticari Seramik Malzemeler
Rulman yatakları	Mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek elastik modülü, düşük sürtünme katsayısı, düşük ısı genleşme katsayısı, iyi yüksek sıcaklık sertliği, korozyon direnci, yüksek elektrik direnci	Parça işleme milleri, Tekerlek ve vites kutusu (yarış arabalarında), dental hava turbin mil yatakları, turbo moleküler pompalar, merkezkaç pompaları, vakum pompaları, Bisiklet tekerlekleri, patenler, rüzgar türbinleri Vb.	$Si_3N_4$ , $Al_2O_3$ , $ZrO_2$ , SiC, $B_4C$
Biyomedikal uygulamalar	Aşınma dayanımı, korozyon direnci, yorulma dayanımı, sürtünme direnci	Kemikler, eklem yuvası, kemik eklem kaplaması, Biyo uyumlu kaplamalar	$Al_2O_3$ , $ZrO_2$ , $Si_3N_4$ , SiC, $B_4C$ , kuvars, biocamlar, hidroksi apatit
Üretim tribolojisi	Yüksek aşınma direnci, sıcak sertlik, kimyasal dayanım, yüksek tokluk, yüksek mukavemet, yüksek ısı şok direnci, erozyon dayanımı, ısı ve mekanik yorulma ve plastik deformasyona dayanıklılık	Kesici uçlar, metallerin şekillendirilmesi (forging), ekstrüzyon	$Si_3N_4$ , $Al_2O_3$ , $ZrO_2$ , SiC
Otomotiv tribolojisi	Yüksek aşınma direnci, sertlik, kimyasal dayanım, yüksek tokluk, yüksek mukavemet	pistonlar, tekerlekler, rulmanlar, transmistörler	$Si_3N_4$ , SiC, $Al_2O_3$ ,
Kâğıt endüstrisi	Yüksek tokluk, aşınma direnci, korozyon dayanımı	Kağıt hamurundan suyu uzaklaştırmak için kullanılan parçalar, Temizleme konileri, Kesiciler, şekillendirme parçaları, bıçaklar,	$Al_2O_3$ , $Si_3N_4$ , SiC, $ZrO_2$ , WC
Tekstil endüstrisi	Yüksek tokluk, aşınma direnci, korozyon dayanımı	hava jetleri, jet uçlar, sürtünme diskleri, iplik kılavuzu, silindirler, bıçaklar	$Al_2O_3$ , $Si_3N_4$ , sermet, safir, $ZrO_2$
Yüzey İşlemleri	Yüksek sertlik, tokluk, erozyon dayanımı, korozyon dayanımı	Nozüller	$Si_3N_4$ , SiAlON, $Al_2O_3$ , $ZrO_2$ , WC, $B_4C$

#### 4. KOMPOZİTLER

Son zamanlarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte tüketicilerin talepleri doğrultusunda endüstride üreticilerin rekabetin her geçen gün artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, endüstriyel uygulamalarda daha iyi özelliklere sahip malzeme ihtiyacı oluşmaktadır. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda daha iyi özelliklere sahip kompozit malzemeler geliştirilmektedir.

Fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı olan iki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesi ile oluşan daha iyi özelliklere sahip malzeme kompozit olarak tanımlanır. Kompozit malzemelere olan talebin atması, genellikle kendi başlarına elde edilmeyen bileşenlerinin en iyi özelliklerinin tek ve yeni malzemedeki toplanması en önemli faktördür.

Uygulama alanlarına göre bu yeni ve tek malzemenin hem avantajları hem de dezavantajları olabilmektedir. Kompozit malzemelerin avantajları şöyle sıralanabilir;

- ❖ Dayanım
- ❖ Rijitlik
- ❖ Düşük ağırlık
- ❖ Yüksek yorulma dayanımı
- ❖ İyi termal iletkenliği
- ❖ İyi ısı iletkenliği
- ❖ İyi korozyon direnci
- ❖ Yüksek sıcaklık kapasitesi
- ❖ Mükemmel aşınma direnci
- ❖ Estetiklik

Kompozit malzemelerin dezavantajları;

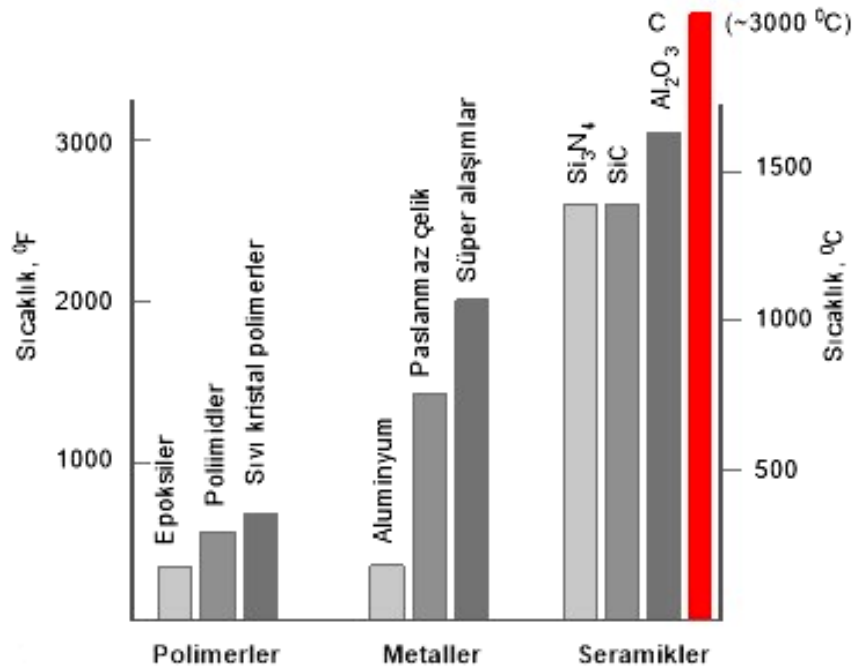
- ❖ Yüksek maliyet
- ❖ Üretim güçlüğü
- ❖ İşlenme güçlüğü
- ❖ Kırılma uzamasının az oluşu
- ❖ Geri dönüşümünün olmamasıdır.

## 4.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri, matris malzemesine ve takviye malzemesine göre iki gruba ayrılır.

### 4.1.1. Matris malzemesi göre kompozitlerin sınıflandırılması

Kullanılan matris malzemesine göre metal matrisli kompozit, polimer matrisli kompozit ve seramik matrisli kompozit olarak üç gruba ayrılırlar. Şekil 4.1’de bazı metal, polimer ve seramik matrisli kompozit malzemelerin sıcaklık dayanımları verilmiştir.



Şekil 4.1. Bazı metal, polimer ve seramik matrisli kompozit malzemelerin sıcaklık dayanımları (Beşergil, 2023)

#### 4.1.1.1. Metal matrisli kompozitler (MMK)

MMK’ler, metal matris ve takviye malzemelerden oluşan kompozit türüdür. MMK’lerde matris metal ya da metalik alaşımdan oluşurken takviye fazı metal ya da seramik malzemeden oluşmaktadır. Genellikle, matris oksidasyon ve korozyon direnci yüksek metallere seçilmektedir. Matris malzemesi olarak genellikle alüminyum, titanyum,

magnezyum, bakır, nikel ve çinko kullanılmaktadır. Fakat alüminyum ve alaşımları, titanyum ve magnezyum kullanımı daha fazladır. Çizelge 4.1’de bazı MMK’lerin takviye malzemeleri ve kullanım alanları verilmiştir.

Çizelge 4.1. Bazı MMK’lerin takviye malzemeleri ve kullanım alanları (Beşergil, 2023)

	<b>Kompozit türü</b>	<b>Tipik takviye malzemesi</b>	<b>Kullanım alanları</b>
<b>Alüminyum matris kompozitler</b>	Partikülat	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (alumina) veya SiC tanecikler	Otomotiv parçaları (piston, itici mil, fren komponentleri); hızlı trenlerde fren rotoru; bisiklet, golf, elektronik malzemeler; yüksek voltaik elektrik kablo sistemlerinde
	Uzun-fiber takviyeli	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiC, grafit, v.s. sürekli fiberlerdir	
	Kısa-fiber takviyeli	Süreksiz Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> fiberler	
<b>Magnezyum matris kompozitler</b>	Partikülat	SiC (silikon karbid) tanecikler (silikon karbon)	Yarış arabaları, hafif otomotiv fren sistemleri, uçak parçaları (dişli kutusu, transmisyon, kompresör ve motor)
<b>Titanyum matris kompozitler</b>	Partikülat	TiB <sub>2</sub> (titanyum borid) ve TiC (titanyum karbid) tanecikler	Bazı jet uçaklarının dişli sistemlerinde, türbin motoru komponentleri (fan kanadı, piston, senkronizasyon segmanı, bağlantı parçası, şaft, disk), otomotiv motor komponentleri, sürücü parçalar, genel makine parçaları
	Uzun-fiber takviyeli	Sürekli monofilament SiC fiberler	
<b>Bakır matris kompozitler</b>	Partikülat	SiC tanecikler	Hibrid modüller, elektronik röleler, elektrik iletici malzemeler ve diğer elektrik ve elektronik komponentler
	Uzun-fiber takviyeli	Sürekli C fiberler, SiC, W, paslanmaz çelik 304	

Metal alaşımlara göre MMK’lerin bazı avantajları aşağıdaki gibidir;

- ❖ Yüksek mukavemet,
- ❖ Yüksek elastik modül,
- ❖ Düşük özgül ağırlık,
- ❖ Yüksek aşınma direnci,
- ❖ Mükemmel boyutsal kararlılık
- ❖ Düşük ısı genleşme,

- ❖ Yüksek ısı kararlılık,
  - ❖ Yüksek korozyon direnci,
  - ❖ Yüksek yorulma dayanımı,
  - ❖ Estetik özelliklerdir (Groover, 2007).
- MMK'lerin dezavantajlarından bazıları şunlardır;
- ❖ Bazılarının üretim maliyetinin yüksek olması,
  - ❖ Üretim metotlarının karmaşık ve pahalı olması,
  - ❖ Geri dönüşüm, tamir ve bakım hizmetlerinin sınırlı olması (Şahin, 2006).

#### **4.1.1.2. Polimer matrisli kompozit (PMK)**

PMK'ler en çok fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılır. PMK'ler termoset plastikler ve termoplastikler diye iki gruptan oluşur. PMK'lerin gerilme kuvveti, kırılma ya da kırılma dayanıklılığı yüksektir. Ayrıca delinmeye, korozyona ve aşınmaya karşı dirençli kompozitlerdir. Bu kompozitlerin en önemli dezavantajları termal genleşmelerinin yüksek ve termal dirençlerinin düşük olmasıdır. Bu kompozitlerin üretiminde kullanılan yöntemler; sıvı akış tekniği, elle sıvama, enjeksiyon kalıplama, takviyeli reaksiyon, ekstrüzyon ve termo oluşum metotlarıdır. PMK'ler hafifliği nedeniyle otomotiv ve diğer taşımacılık endüstrileri, korozyon direnci nedeniyle denizcilik uygulamaları, yanmazlık özelliği nedeniyle otomotiv iç dekorasyonu gibi alanlarda kullanılırlar.

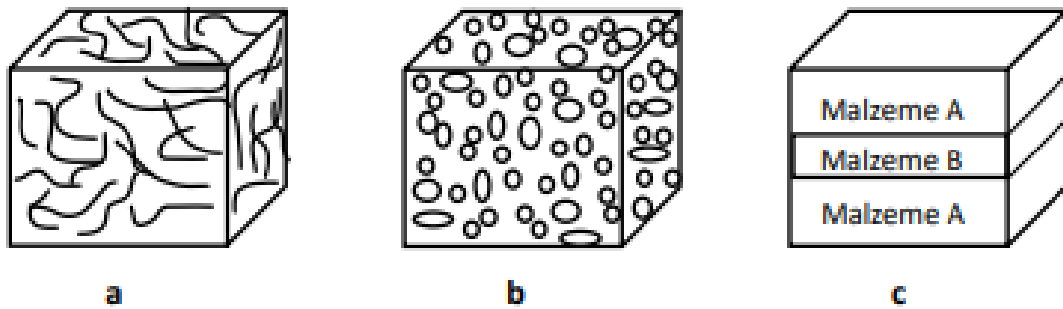
#### **4.1.1.3. Seramik matrisli kompozit (SMK)**

SMK'ler, seramik matris ile takviye fazların oluşturduğu iki ya da daha fazla bileşenin olduğu malzemelerdir. Yüksek sıcaklık dayanımları, termal şoklara karşı dayanımlarının yüksek olması, gevrek olmaları, çentik hassasiyetleri yüksek olması ve korozyona dayanıklılıklarının iyi olması gibi özellikler bu kompozitlerin özellikleri arasında yer alır. SMK'lerde yaygın olarak  $Al_2O_3$ ,  $Si_3N_4$ ,  $B_4C$  ve  $SiC$  matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu kompozitler; askeri araçlar, uzay araçları ve biomalzemeler gibi uygulama alanlarında kullanılırlar.

#### 4.1.2. Takviye Malzemesine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler kullanılan takviye elemanının şekline göre üç gruba ayrılır (şekil 4.2). Bunlar;

- ❖ Elyaf (fiber) takviyeli kompozitler,
- ❖ Partikül takviyeli kompozitler
- ❖ Tabakalı (lamine) kompozitlerdir.



Şekil 4.2. a) Fiber takviyeli, b) parçacık takviyeli ve c) lamine kompozitlerin şematik gösterimi

##### 4.1.2.1. Elyaf (fiber) takviyeli kompozitler

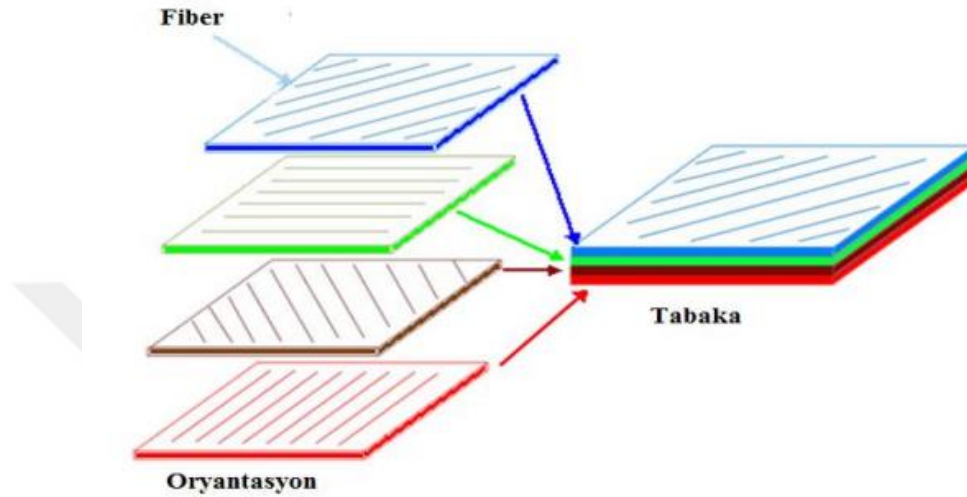
Matris yapıda ince elyafların yer almasıyla meydana gelen kompozit türüdür. Matris içindeki elyafların yerleşimi kompozit malzemenin mukavemetini etkiler. Yüksek özgül dayanımları nedeniyle bu kompozitler tercih edilmektedirler. Yapıda uzayan sürekli fiberler ya da uzun fiberlerin kesilmesi ile oluşan süreksiz fiberler ya da elyaflar şeklinde olabilirler. Cam elyafı, aramid elyafı, bor elyafı ve polyster elyafı kullanılan elyaf türleridir.

##### 4.1.2.2. Partikül takviyeli kompozitler

Matris yapıda başka bir malzemenin partiküller şeklinde bulunmasıyla meydana gelen kompozitlerdir. Partiküller yapının içinde tamamen rastgele dağılım gösterirler. Parçacıkların sertliği yapının mukavemetini belirler.

### 4.1.2.3. Tabakalı (lamine) kompozitler

Tabakalı (lamine) kompozitler, farklı özelliklere sahip tabakaların üst üste ya da yana yana dizilmesi sonucu oluşur (şekil 4.3). Tabakaların özelliklerine bağlı olarak kullanım amacına yönelik yüksek mekanik özelliklere sahip kompozit malzeme üretilebilir.



Şekil 4.3. Tabakalı (lamine) kompozit

## 4.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Triboloji

Metal matrisli kompozit malzemeler havacılık, denizcilik, spor ve otomotiv sektörlerindeki uygulamalar için tribolojik ve mekanik karakteristikleri sebebiyle tercih edilmektedir. Metalik olmayan partiküller, elyaflar ya da lifli ve katı yağlayıcılar ile doldurulmuş MMK'ler, mükemmel tribolojik ve mekanik karakteristiklere sahip olmasının yanı sıra performans esnasında bozulma, kırılma ya da deformasyon olmadan ağır yükleri desteklemek ve yüzey hatalarını minimuma indirmek gibi mükemmel tribolojik davranış göstermektedirler. Dolayısıyla bu malzemeler birçok araştırmaya konu olmaktadır.

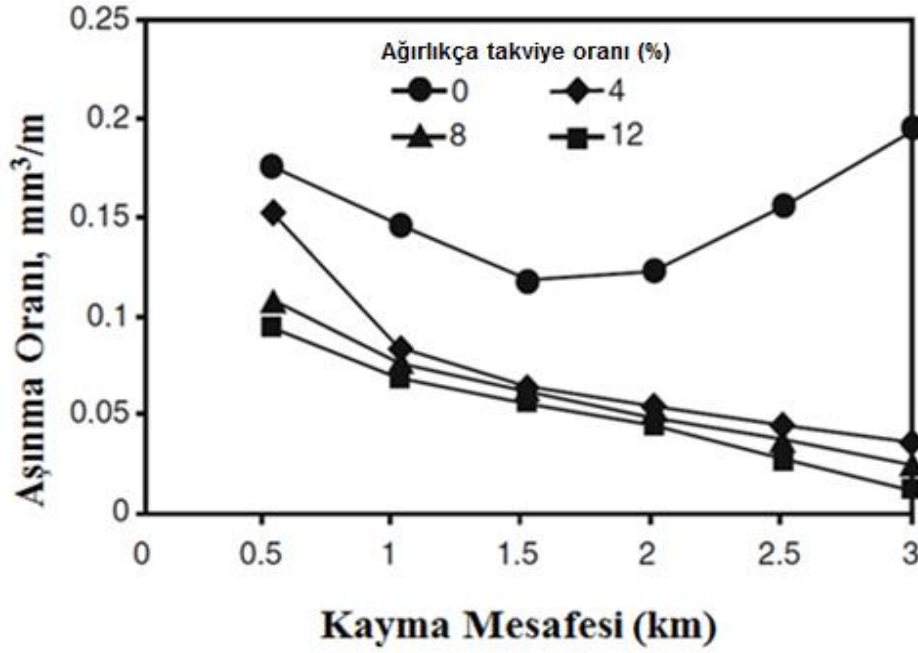
Katı yüzeylerin yuvarlanma ya da kayma hareketiyle gerçekleşen sürtünme ve aşınma davranışları enerji kaybı ya da malzeme bozulması ile sonuçlanmaktadır. Yüzeyler arasına yağlayıcı uygulandığında sürtünme ve aşınma derecesinde azalma görülmektedir. Uygulama esnasında bazı malzemeler düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı nedeni ile herhangi yağlayıcı kullanımına ihtiyaç duyulmamaktadır (Nosonovsky ve Rohatgi, 2012). Bu tür kompozitleri üretmek için çeşitli metotlar vardır. Örneğin, malzemeye molibden

disülfür ve grafit gibi katı yağlayıcıları kompozit matrisine yerleştirmek ya da elmas benzeri karbon (DLC) gibi kaplamalar uygulamaktır (Wu vd., 1997; Ted ve Tsao, 2000; Wei vd.,2011). Kaplanmış malzemelere kıyasla yağlayıcılar ile üretilen MMK'lerin korozyon direnci, tribolojik davranışları ve yorulma ömrü daha iyidir. Bundan dolayı, MMK uygulamaları kaplanmış malzemelere göre daha çok tercih edilir.

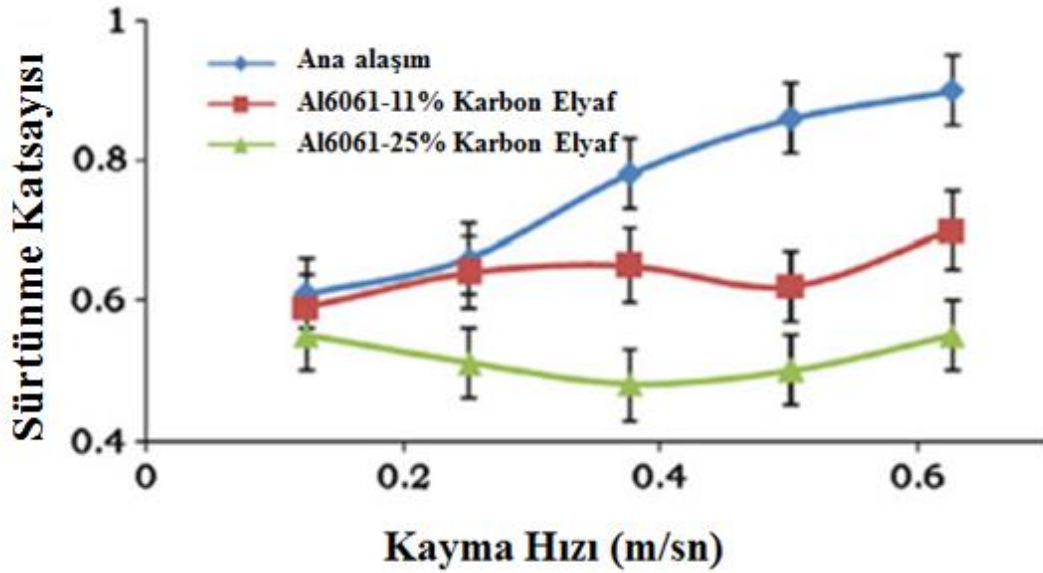
MMK'lerin tribolojik davranışlarını etkileyen parametreler; malzeme parametreleri (matrisin bileşimi ve mikroyapısının yanı sıra takviyelerin şekli, büyüklüğü, oranı ve dağılımı gibi), mekanik parametreleri (normal yük, kayma mesafesi ve kayma hızı gibi) ve fiziksel parametrelerdir (sıcaklık ve çevre koşulları gibi). Diğer önemli bir parametre ise takviyeler ve matrisler arasındaki yüzey bağıdır. Genellikle, MMK'lerdeki sert parçacıklar mukavemet ve aşınma direnci artırırken, sert parçacıkların miktarı sünekliliği azaltmaktadır. Diğer taraftan, yumuşak parçacıklar ise katı yağlayıcı gibi sürtünme katsayısını azaltmaktadır. Dolayısıyla, yağlayıcıların ve takviye malzemelerin özelliklerinin bilinmesi önemlidir (Kozma, 2003). Örneğin, SiCp / Al kompozitinin üretiminde grafit partiküllerinin takviyesi yapılan kompozit ile grafit takviyesi olmayan SiCp / Al kompozit karşılaştırıldığında grafit takviyeli olan kompozitlerin sürtünme katsayısı daha düşük ve aşınma direnci daha yüksektir (Ted ve Tsao, 2000; Riahi ve Alpas, 2001; Jinfeng vd.,2009).

Üretimleri sırasında meydana gelen gözenek ve boşluk gibi hatalar MMK'lerin tribolojik davranışlarını etkileyebilir. MMK'lerde abrasif, adhesif, korozif ve yorulma aşınmaları görülmektedir. MMK'lerin tribolojik özellikleri üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalarda, takviyeli olanların takviyesizlere kıyasla daha iyi aşınma performansları olduğu sonucuna ulaşılmaktadır (Sharma, 2001; Naplocha ve Granat, 2008; Ghasemi ve Kashani, 2012; Shafiei vd.,2009). Örneğin, Sharma'nın (2001) yaptığı bir çalışmada, SiC parçacıkları takviye edilen Al6061 kompozitin takviyesiz Al6061 alaşımına göre aşınma performansının daha iyi olduğu sonucuna varmıştır (şekil 4.4).

Literatürde metalik malzemelerin tribolojik davranışını iyileştirmek için uygulanan birçok metot bulunmaktadır. Örneğin, alüminyum gibi metallere DLC uygulandığında sürtünme katsayısı değeri 0,1'in altına düşmektedir. Karbon elyaf takviyeli Al6061kompozitler ile Al6061 alaşımının kayma hızına bağlı sürtünme katsayısı değerleri şekil 4.5 görülmektedir.



Şekil 4.4. Al6061 esaslı MMK için kayma mesafesi aşınma oranı değişimleri (10N yük ve 1.85m/s kayma hızı) (Sharma,2001)



Şekil 4.5. Karbon elyaf takviyeli Al6061kompozitler ile Al6061 alaşımının kayma hızına bağlı sürtünme katsayısı değerleri (Ramesh vd.,2013)

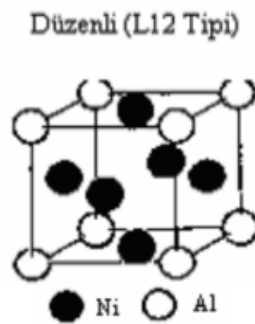
MMK'lere farklı türlerde takviyeler eklemek metallerin tribolojik davranışını iyileştirmek için kullanılan başka bir metottür. Literatürde  $Al_2O_3$ , SiC ve B4C MMK'lere yaygın olarak eklenen takviyelerdir. Bu takviyeler, aşınma direnci ve sürtünme katsayısını yükseltmek için genellikle metal matrise eklenmektedir (Hemath vd.,2010; Shafiei vd.,2009;

Natarjan vd., 2006). Genellikle, MMK'lerin sürtünme katsayısını düşürmek için molibden-disülfür, altıgen boron-nitrür ve grafit gibi yağlayıcı olarak tanımlanan takviyeler metal matrisde gömülüdür (Ghasemi ve Kashani, 2012; Shafei vd., 2009; Sharma,2001).

### 4.3. Kompozit Malzemenin Bileşenleri

#### 4.3.1. Nikel alüminat

Ni<sub>3</sub>Al bileşiği ymk yapının türevi olan L<sub>12</sub> kafes yapısına sahiptir. Kristal kafesinde, Ni atomları yüzey merkezlerinde ve Al atomları da küpün köşelerinde yer almaktadır. Kafes parametresi stokiyometrideki bir değişim ile 0.3565'ten 0.3580 m'ye dönüşmektedir. Düzenli yapıları yüksek sıcaklıklarda da (ergime noktasına yakın) devam etmektedir (Laassalmonie vd.,1988; Dimiduk vd.,1993).



Şekil 4.6. Ni<sub>3</sub>Al'ın kristal yapısı

Çizelge 4.2. Ni<sub>3</sub>Al bileşiklerinin bazı fiziksel özellikleri (Işık, 2007)

Elektriksel Direnç (10 <sup>-8</sup> m)	32,59
Isıl İletkenlik (W/m.K)	28,85
Isıl Genleşme Katsayısı (10 <sup>-6</sup> /K <sup>-1</sup> )	12,5
Kafes Parametresi (nm)	0,35
Young Modülü (MPa)	169
Spesifik Isı (J/g.K)	0,54
Ergime Sıcaklığı (°C)	1395
Bağ Yapısı	Kovalent/Metalik

Metaller arası bileşikler iyi sürtünme ve kırılma direnci gibi özelliklere sahiptirler. Ni<sub>3</sub>Al gibi metaller arası bileşikler sıcaklığın artmasıyla mukavemette bir dereceye kadar küçük kayıplara ve belirli yüksek modüllere sahiptir. Metaller arası bileşiklerinden biri olan

Ni<sub>3</sub>Al yüksek ergime sıcaklığına, düşük yoğunluğa ve iyi aşınma direncine sahiptir. Ni<sub>3</sub>Al düzenli metallere arası alaşımı iyi oksidasyon/korozyon direncine ve yüksek sıcaklık mukavemetine de sahip olmaktadır (Marchinovvski vd.,1975). Çizelge 4.2'de Ni<sub>3</sub>Al bileşiklerinin bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

#### **4.3.2. Lamine grafitli dökme demir**

Döküm sanayisinin en yüksek üretim kapasitesine sahiptir. Dökme demirlerde alaşım elementlerinin kullanılması; üretilecek ürünlerin yüksek korozyon direnci, yüksek aşınma direnci ve yüksek sertliğe sahip özelliklerde üretilebilmeleri gibi avantajlar sağlamaktadır.

Mekanik özellikleri, sahip oldukları mikroyapıya ve içerdiği alaşım elementlerinin oranına bağlı olmasının yanı sıra bu mikroyapıları oluşturan fazların şekline ve dağılımına da bağlıdır. Serbest halde bulunan grafit yapıları mikroyapı üzerinde önemli bir etkisi olan fazlardan biridir. Grafitlerin miktarı ve şekli dökme demirlerin sünekliliği ve mukavemetini etkilemektedir. Dökme demirlerin sertlik, mukavemet, işlenebilirlik, korozyon ve aşınma direnci gibi özelliklerini geliştirmek için tavlama, östenitleme, temperleme ve menevişleme gibi ısı işlemleri uygulanabilir. (Welding Handbook, 1984)

Dökme demirlerin sertlik, işlenebilirlik, mukavemet, aşınma ve korozyon direnci gibi mekanik özellikleri olmasının yanı sıra ekonomik ve kolay üretilebilir olması nedeniyle endüstride pek çok kullanım alanı (borular, silindir kafalar, vites kutuları, makineler, motor blokları vd.) bulunmaktadır (Campbell, 2008).

#### **4.3.3. Kurşunlu kalay bronzları**

Kurşunlu kalay bronzları, %5-28 Pb, %4-10 Sn az miktarda nikel, çinko, demir ve antimon içermektedir. Kurşun, yüksek sıcaklıklarda sıvı bakırda çözünürken oda sıcaklığında birbirleri içerisinde esas itibari ile çözünmezler (Erdoğan,2001).

Bronz alaşımları mekanik özellikleriyle düşük yükler altında bile tatmin edici düzeyde aşınma direnci, dayanıklılık ve yüksek malzeme ömrüne sahiptir (Alam ve Marshall, 1992).

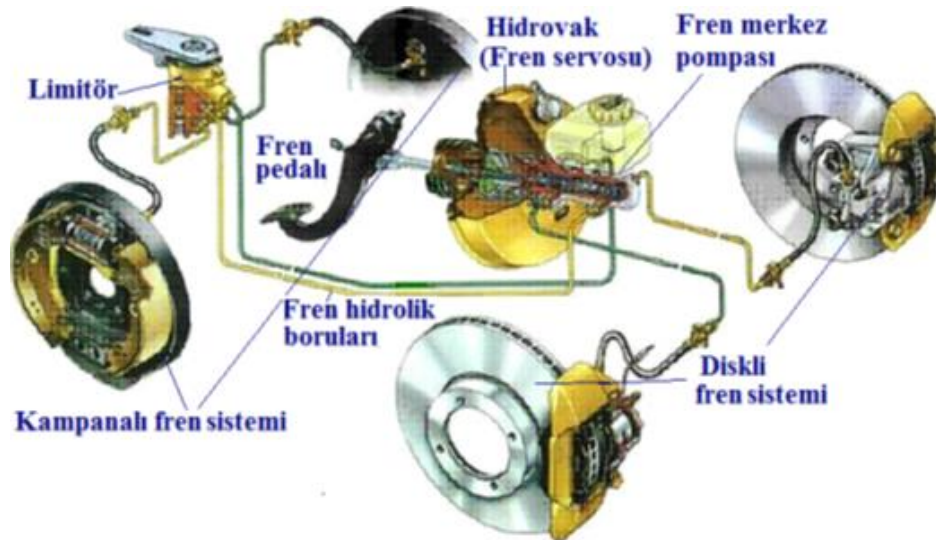
## 5. FREN SİSTEMLERİ

Günlük hayatımızın vazgeçilmez parçası olan taşıtlar farklı yapıda olmalarına rağmen fren sistemleri her taşıtta kullanılmaktadır. Taşıtlarda hızlanmak kadar güvenlik açısından yavaşlatmak ve durdurmakta önemlidir. Dolayısıyla, taşıtların en önemli parçalarından biri fren sistemleridir.

Frenler, taşıtların emniyetini ve güvenliğini sağlayan sistemlerdir. Bu sistemlerin görevleri;

- ❖ Taşıtların istenmeyen hızlanmayı önlemek ve yavaşlatmayı sağlamak,
- ❖ Taşıtı durdurmayı sağlamak,
- ❖ Duran taşıtı sabitlemektir.

Taşıt güvenliği açısından en önemli parametre frenleme performansıdır. Bu performansın en önemli göstergesi frenlerde oluşan durma mesafesine bağlı yüksek sıcaklıktır (Bayrakçeken ve Düzgün, 2005). Hız aşımı gibi sürücü hatalarının yanı sıra aracı zamanında durduramamak ya da kontrol altında tutamamak da trafik kazalarına sebebiyet vermektedir (Çetinkaya, 2000).

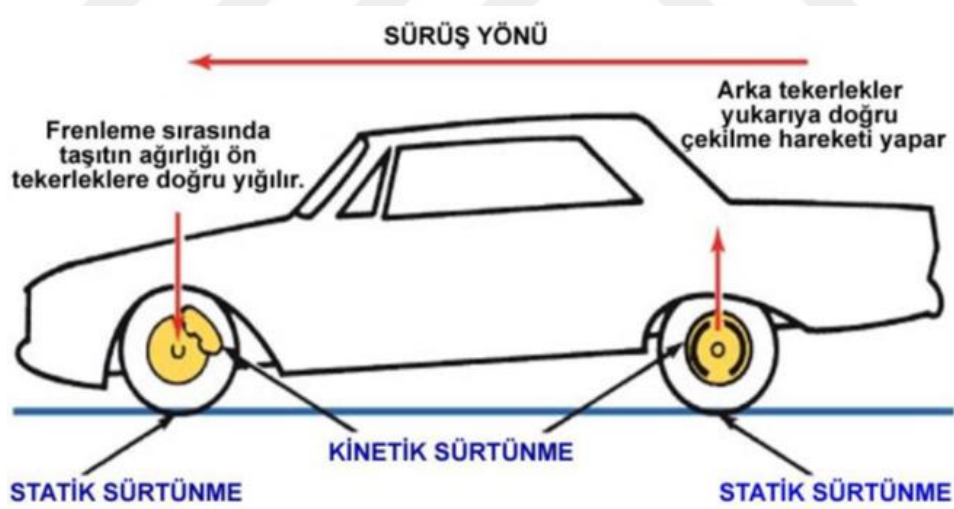


Şekil 5.1. Otomobillerde kullanılan hidrolik fren sistemi

Otomotiv endüstrisindeki gelişmelerin önemli bir kısmını fren performansındaki gelişmeler oluşturmaktadır. Zaman içinde taşıtların boyutlarındaki değişimler, araç ağırlığını etkilemekte ve bu nedenle daha işlevsel frenler ile sürtünme malzemelerinin kullanılması için çok çalışılır bir konu haline almıştır. Şekil 5.1’de otomobillerde kullanılan hidrolik fren sistemi şematik olarak gösterilmiştir.

### 5.1. Frenlemeyi Etkileyen Faktörler

Aracın hareket etmesi için motor ısı enerjisi kinetik enerjiye dönüştürür. Bu kinetik enerjiyi frenler aracı durdurmak amacıyla tekrar ısı enerjisine dönüştürür. Kinetik enerji, hareket halindeki araç hızının karesi ile kütesinin çarpımının yarısına eşittir. Aracın kütlesi ile bu enerji doğru orantılı olarak artmaktadır. Dolayısıyla, aracın hızı iki kat artarken bu enerji dört kat artar. Otomobil fren gücünün artan bu kinetik enerjiyi yenmesi için motor gücünden daha fazla olması gerekir. Şekil 5.2’de frenleme esnasında oluşan kuvvetlerin taşıta etkisi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 5.2. Frenleme esnasında oluşan kuvvetlerin taşıta etkisi

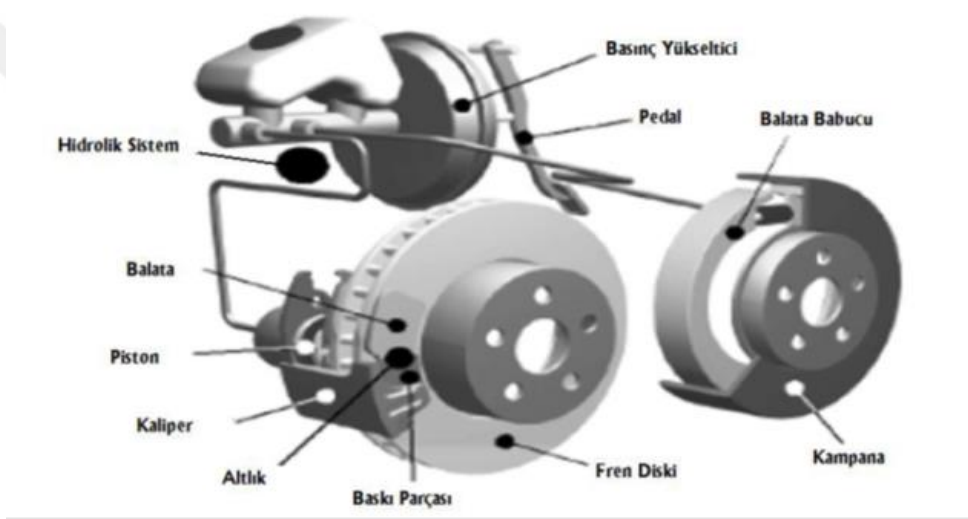
Ani frenlemede aracın durması için;

- ❖ Tehlikenin fark edilmesi,
- ❖ Sürücünün karar vermesi,
- ❖ Sürücünün harekete geçmesi,

- ❖ Sürücünün fren pedalına basması,
- ❖ Fren mekanizmasının çalışmaya başlaması,
- ❖ Fren kuvvetinin yüksek seviyeye ulaşması gibi aşamalar gerçekleşir.

## 5.2. Fren Sistemi

Motorlu taşıtların yavaşlaması ve durdurulmasını sağlayan en önemli sistem olarak tanımlanmaktadır. Fren sistemi (şekil 5.3) fren diski, kaliper ve fren balatalarından oluşmaktadır.



Şekil 5.3. Fren sistemi (Eriksson, 2000)

### 5.2.1. Diskler

Diskli frenler, küçük sürtünme yüzeylerine sahip olduklarından dolayı büyük frenleme kuvvetlerine ve basınçlarına ihtiyaç olabilmektedir. Diskli frenler kuru ve ıslak hava koşullarında rahatlıkla çalışmakta ve yüzeyindeki kir gibi yabancı maddelerden kolaylıkla kurtulmaktadır. Diskli fren balatasının kampanalı frene göre disk üzerindeki kuvvet dağılımı daha kararlı ve homojendir. Ani kavrama eğilimi, yüksek hızlardaki frenlemede daha düşüktür (Mutlu, 2002).

Hava kanallı disklerde meydana gelen sürtünme kuvveti normal disklerde meydana gelene göre daha büyüktür (Düzgün, 2009). Fren gücü yüksek olan taşıtlarda normal fren

disklerine göre frenleme performansı daha iyi olan seramik diskler (aşınmaları oldukça düşük ve kullanım ömürleri 300 bin km) de kullanılmaktadır.

Disk yüzeyindeki kalınlık farkı 35 µm değerinin altında olmalıdır. Nemli ortam koşullarında disk yüzeyinde korozyon oluşmaktadır. Ayrıca, yüzeyinde derin dairesel yarıklar ya da çatlaklar varsa değiştirilmelidir (Harper, 1998). Sürtünme elemanları değişen sıcaklık ve hızlarda çalışmaktadır. Bu yüzden, mekanik ve ısıl zorlamalara dayanıklı olmalıdır. Fren sistemlerinde, sürtünmeden kaynaklanan sıcaklık artışını sistemden uzaklaştırmak için karşı malzemenin ısı iletim katsayısı yüksek ve ısıl genleşme katsayısının küçük olması gerekmektedir. (Fenton, 1996).

### **5.2.2. Kaliperler**

Taşıtların durdurulmasını sağlayan fren sistemlerinin önemli parçalarından biri olan kaliperler, taşıtların ön ya da arka tekerleklerinde balataların disklere tutturulmasını sağlamaktadır. Pistonun uyguladığı baskı kuvvetiyle balatayı disk yüzeyine bastırarak frenleme işleminin gerçekleştirmektedir. Tek (yüzer ya da sürgülü) ve çift (sabit) pistonlu olmak üzere iki gruptan oluşmaktadır. Genellikle, tek pistonlu kaliper kullanımı tercih edilmektedir.

### **5.2.3. Fren balataları**

Fren balataları, uygulanan kuvvetin taşıtların tekerlekleriyle bağlantılı disk ya da kampanalara sürtünerek aktarılmasını sağlamaktadır. Pabuç ile disk ya da kampana arasındaki sürtünme işlemini yerine getiren fren balataları pabuca yapıştırma ya da perçinleme metoduyla tutturularak pabuca bağlı olarak çalışmaktadır (Mutlu, 2002).

Fren balataları yeterli mukavemete sahip olmalı, kolay ve sürekli üretime uygun olmalıdır. Sürtünme yüzeyleri arasındaki etkileşim malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını belirlemektedir. Dolayısıyla, bu etkileşimin derecesi; bileşim, yüzey enerjisi, yüzey geometrisi, yüzeyin fiziki ve mekanik özellikleri, kimyasal reaksiyonlar, yağlı, kumlu, yağ ve aşınma nedeniyle kirlenen yüzey ile çalışma şartlarındaki kayma hızı, sıcaklık, basınç

gibi faktörlere bağlıdır. Sürtünme esnasında meydana gelen sıcaklık artışı nedeniyle fren balataları oksitlenmeye, çatlama ve ısıl yorulmaya karşı dayanıklı olmalıdır (Bijwe, 1997).

Balatalardan;

- ❖ Sürtünme katsayısının basınç, sıcaklık ve hızdan bağımsız olması,
- ❖ Sabit sürtünme performansı,
- ❖ Yüksek ısı iletkenliği,
- ❖ Yüksek mekanik mukavemet,
- ❖ Yüksek sıcaklık direnci,
- ❖ Düşük gürültü seviyesi,
- ❖ Hava şartlarından etkilenmeme,
- ❖ İyi korozyon direnci,
- ❖ Sağlığa zararsız olması,
- ❖ Yüksek aşınma mukavemeti
- ❖ Karşı malzemenin düşük aşınması gibi özellikler istenmektedir (Timur ve Kılıç, 2012).

Otomotiv sektöründe sürtünme malzemelerini oluşturan maddeler;

- ❖ Takviye edici elyaflar; bor, cam, taş yünü, seramik, karbon, metal ve asbest gibi elyaflar,
- ❖ Bağlayıcılar; siyanat ester, fenolik ve epoksi gibi reçineler,
- ❖ Dolgu maddeleri; kalsiyum karbonat, barit, vermikülit, mika, kauçuk atıklar gibi maddeler,
- ❖ Sürtünme düzenleyici katkıları; metal sülfid, metal silikat, metal oksit ve grafit gibi malzemelerdir (Washabaugh, 1987).

Bağlayıcılar balata bileşenlerini bir arada tutan yapıştırıcılardır ve tek tek ya da birden fazla bağlayıcı birlikte kullanılabilir. Bağlayıcı malzeme olarak genellikle yüksek sıcaklık ve alevlenmeye karşı dayanıklı fenol reçine kullanılmaktadır (Mutlu vd., 2006).

### 5.3. Fren Sistemlerinde Triboloji

Dönen disk ile fren balatası arasındaki sürtünme fren sisteminin performansını etkilemektedir. Kullanılan sürtünme malzemelerin seçimi ve üretimi, aşınma, gürültü ve titreşim gibi frenleme performansını etkileyen konular üzerine yoğun olarak araştırmalar yapılmaktadır. Ayrıca, basınç, kayma hızı ve rotor yapısının tribolojik temas etkisi incelenmektedir. Fren sistemi; düşük aşınma, yüksek ve kararlı sürtünme, dayanıklılık, güvenlik, konfor, titreşimsiz ve gürültüsüz performans sağlamalıdır.

Fren balataları farklı özelliklere sahip bileşenlerden meydana gelen kompozit malzemedir. İçerisinde katı yağlayıcıların ve düşük sertliğe sahip reçinelerin yanı sıra yüksek sertliklere sahip lifler ve partiküller bulunmaktadır. Tribolojik temasın yapısı üzerinde, kayma esnasında sürtünme yüzeyleri arasında oluşan tabakanın büyük etkisi vardır. Balata ve disk arasında oluşan tribolojik temasın yapısı hem çalışma hem de konfor koşulları açısından öneme sahip parametrelerin belirlenmesinde etkilidir. Bu yüzden disk balata temasını sağlayan temas bölgeleri, gerçek temas alanları, makro ve mikro boyutta şekil adaptasyonu, yüzey özelliklerinin değişimi ve termal deformasyon gibi sürtünme kuvvetinin oluşumunda etkin kavramların anlaşılması gerekmektedir (Eriksson ve Jacobson, 2000).

#### 5.3.1. Sürtünmeyi etkileyen parametreler

Fren balataları en fazla aşınma tehlikesi olan parçalardır. Karşı sürtünme elemanı diskli sistemlerde disklerdir. Frenleme sırasında, balata ve karşı malzeme olan disk arasında sürtünme ve aşınma sonucunda sürtünme filmi oluşur. Genellikle, bu film balatanın abrasif etkilerine karşı diski koruyan önemli bir mekanizmadır. Frenleme esnasında, çevre koşulları da (toz, kir, su, hava koşulları gibi) tribolojik teması ve frenleme performansını önemli ölçüde etkilemektedir.

##### 5.3.1.1. Kayma hızı

Shorowordi vd. (2004) yaptıkları çalışma ile farklı malzeme çiftleri artan kayma hızı ile aşınmış partikül miktarı artarken sürtünme filmi meydana getiren bileşenlerin de arttığını

tespit etmişlerdir. Ayrıca, disk balata temasının azalması nedeniyle sürtünme katsayısının düştüğünü belirtmişlerdir.

#### **5.3.1.2. Sıcaklığın etkisi**

Sıcaklık artışı ile sürtünme katsayısındaki azalma frenleme esnasında sürtünme zayıflaması olarak tanımlanmaktadır. Sürtünme malzemeleri için yüksek sıcaklıklardaki sürtünme zayıflaması kritik bir özelliktir. Çevreye transfer edilen ısı miktarını arttırarak yüzeyler arası oluşan sıcaklığı azaltılmaktadır (Anderson, 1992). Frenlemelerde artan yük ile frenleme süresine bağlı olarak sürtünme yüzeylerinde sıcaklık artışı meydana gelir. Sürtünme malzemesinin mekanik özellikleri sıcaklığın etkisi ile olumsuz etkilendiği gibi aşınma mekanizmaları değişim gösterir. Ayrıca, aşınma oranı da sıcaklık artması ile artmaktadır. Gri dökme demir disk kullanımı ile sıcaklığın yükselmesi sürtünme katsayısı düşürmekte, aşınma artmakta ve yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır (Bergmann vd., 1999).

#### **5.3.1.3. Basıncın etkisi**

Eriksson vd. (2002) yaptıkları çalışmada, balataların ortalama sürtünme katsayısının değişen basınca göre düştüğünü, sürekli frenlemelerde artan basınç ile temas bölgelerinin büyüdüğünü ve dolayısıyla sıcaklığın ve aşınmış ürünlerin artmasının da ara yüzeydeki filmin kalınlığını arttırdığını tespit etmişlerdir. Böylece, ara yüzeydeki sürtünme katsayısının düştüğünü, disk balata temasının azaldığını ve basıncın düşük değerlerde tutulması durumunda yüzeyler arasında yeteri kadar temas sağlanmadığından sürtünme katsayısının düşük kaldığını fakat en yüksek sürtünme katsayısını belirli basınç değerleri aralığında elde edilebilir olacağını bildirmişlerdir.

#### **5.3.1.4. Balata yapısının etkisi**

Tüm şartlar sabit olsa da elde edilen sonuçlar farklılık gösterebilmektedir. Sürtünme katsayısı frenleme sayısına göre değişiklik gösterebilmektedir. Fren balatalarının sürtünme yerindeki küçük sapmalar geometrik açıdan sürtünme katsayısı etkilemektedir (Bergmann vd., 1999).

### **5.3.1.5. Disk yapısının etkisi**

Son zamanlarda fren rotorunun sürtünme performansını içeren araştırmalar yapılarak farklı disk malzemeleri geliştirilmiştir. Bunlar, alüminyum metal matrisli kompozitler, demir içermeyen bakır alaşımları ve karbon seramik kompozitlerdir (Shorowordi vd., 2004; Gültekin, 2007).

Gri dökme demir yüksek termal iletkenlik, yüksek sönümlenme kapasitesi, düşük maliyet ve kolay üretim gibi faktörlerden dolayı disk malzemesi olarak tercih edilmektedir. Gri dökme demir ihtiyaçlara göre farklı karbon oranlarında ve ısıl işlem şartlarında üretilmektedir. Yapısında bulunan grafit lamelleri sürtünme performansı üzerinde kullanılan balata malzemesine göre farklı etkilere sahiptir. Cho vd. (2003), çelik lif içerikli balata ile temasta bulunan diskte sürtünme katsayısının grafit oranına bağlı olarak arttığı, çelik içermeyen balata kullanıldığı ise herhangi bir etkiye sahip olmadığı tespit etmişlerdir. Ayrıca, sürtünme katsayısı üzerinde gri dökme demir içinde bulunan ferritin herhangi bir etkisi olmadığını bildirmişlerdir.

Eriksson vd. (1999) yaptıkları çalışmada, diskin belirli bir bölgesini partikül püskürterek testler yapmışlardır. Kayma esnasında bu bölgeden her geçişte sürtünme katsayısının azaldığını, bu bölgeyi geçtikten sonra eski değerini aldığını tespit etmişlerdir. Böylece, sürtünme katsayısının gerçek temas alanından etkilendiği sonucuna varılmıştır. Eriksson vd. (2002), yaptıkları başka bir araştırma ile disk yapısının yüzey geometrisi açısından da sürtünme katsayısı üzerinde etkili olduğunu sonucu bildirmişlerdir. Yeni diskin sürtünme katsayısı ilk kullanımında düşük olmasına rağmen ilk frenlemelerde kademeli olarak diskin yüzeyi aşınarak ve sürtünme katsayısının artmasına neden olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, pürüzlü yüzeyde oluşan temas alanı oranının %90 azaldığı ve sürtünme katsayısının da pürüzsüz duruma göre %25 azaldığını tespit edilmiştir.

### **5.3.1.6. Frenleme süre ve sayısının etkisi**

Sürtünme katsayısı frenleme süre ve sayısına bağlı olarak farklı değerler alabilmektedir. Sürtünme katsayısı, frenlemenin başlangıç aşamasında, zamanla yüzeylerin uyum sağlaması, pürüzlerin ortadan kaldırılması ve temas alanının artması gibi nedenlerden

dolayı artmaktadır. Basıncın sabit olmasına rağmen sürtünme katsayısı, belirli bir frenleme sayısından sonra temas bölgelerinin parçalanması, sıcaklığın yükselmesi gibi faktörlerden dolayı bir süre sonra yavaşça düşmektedir (Eriksson vd., 2002).

### **5.3.1.7. Temas alanının etkisi**

Temas alanı büyümesi, kayma hareketine bağlı olarak pürüz tepeliklerinde mikro deformasyon alanlarının kayma gerilmesi etkisi ile büyümesi şeklinde tanımlanmaktadır. Ayrıca, sürtünme katsayısının etkileyen başka önemli etken plastik sertleşme (pekleşme) oluşmasıdır (Deamaley, 1985).

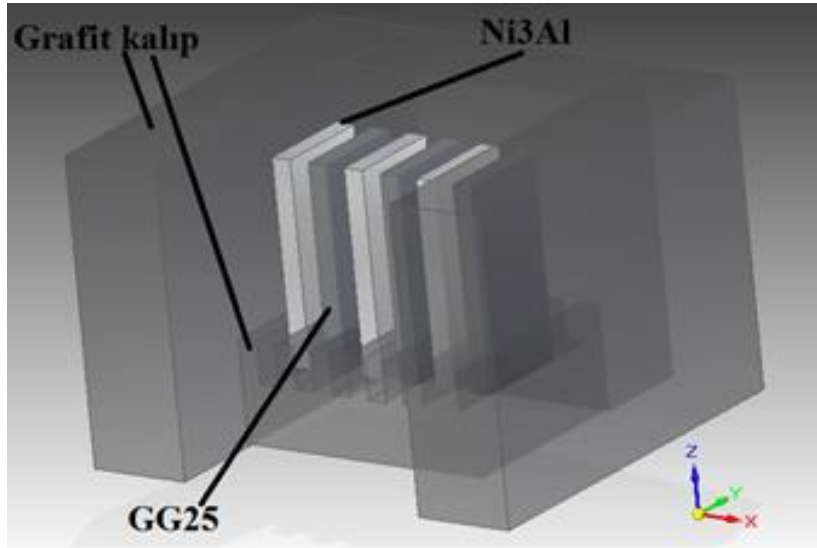
Eriksson vd. (2002), yaptıkları ölçümlerde temas bölgelerinin sertlik değerlerinin balata kompozisyonuna göre daha sert olduğunu tespit etmişlerdir (örneğin; 3000 MPa'a karşılık 200 MPa). Balatalara göre disk yüzeyindeki temas bölgelerinin hem yüksekliğinin hem de alanının çok küçük olduğunu, buna karşın, frenlerde gerçek temas alanları balata yüzeyinde oldukça geniş yer tuttuğunu (balata alanının %20'si) gözlemlemişlerdir.

Temas bölgelerinin birleşmesi ile boyutu büyür ve sayısı düşer. Küçük ve çok sayıda temas bölgesine sahip fren balatasında gürültü oluşturma eğilimi daha fazladır (Eriksson vd., 1999).

## 6. MATERYAL VE YÖNTEM

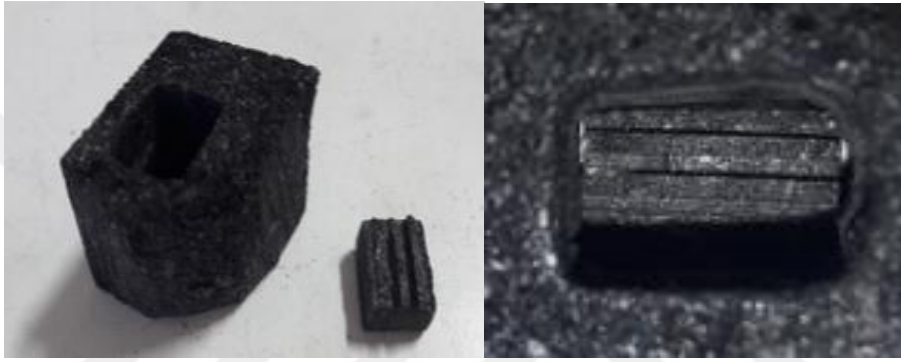
Farklı karakterlerdeki metalik sürtünme malzemeleri döküm yoluyla katmanlar şeklinde birleştirilerek lamine kompozitlerin üretilmesi ve üretilen kompozitlerin değişik sürtünme koşullarındaki sürtünme ve aşınma davranışlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla kurşunlu kalay bronzu (Cu6Sn12Pb), lamine grafitli dökme demir (GG25) ve Ni3Al metaller arası bileşiği kompozitin lamine katmanları olarak kullanılmıştır. Bu kompozitte bronz matris elemanı, Ni3Al aşınmayı kontrol eden eleman ve dökme demir de sürtünmeyi kontrol eden eleman olarak kullanılmıştır.

Bu çalışmada kompozit üretimi için toz metalurjisinden daha kolay ve ucuz bir yöntem kullanılmıştır. Ni3Al alaşımı vakumlu ark ergitme ocağında üretilmiştir. Lamine grafitli dökme demir (GG25) piyasadan temin edilmiştir. Kurşunlu kalay bronzu (Cu6Sn12Pb) ise vakumlu indüksiyon ocağında ergitilerek hazırlanmıştır. Kurşunlu kalay bronzları düşük sürtünme ve yüksek aşınma direncine sahip olduğu için endüstride sürtünmenin olduğu tüm alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

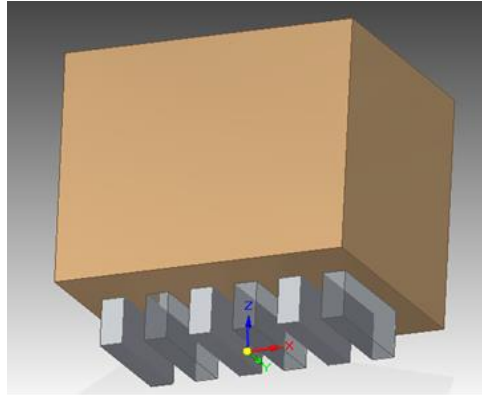


Şekil 6.1. Kompozit üretimi için kalıp tasarımı ve laminelerin konumu

Kompozitin lamine bileşenlerinden Ni<sub>3</sub>Al ve GG25 hassas kesme cihazında kesilerek 1 mm kalınlığında ve 10 x 5 mm ebatlarında levhalar elde edilmiştir. Bu levhalar şekil 6.1’de gösterildiği gibi grafitten yapılmış ve üzerinde 1 mm aralıklarla 1 mm genişliğinde kanallar bulunan kalıbın (şekil 6.2) kanallarına dik vaziyette yerleştirilmiştir. Daha sonra ergitilmiş bronz bu kalıba dökülerek sıvının boşluklara akıp lamineleri sarması sağlanmıştır. Aynı işlem 0.5 mm’lik lamine kompozit üretimi için de uygulanmıştır. Benzer yöntemle bimetal üretimi yapılmaktadır. Literatürde buna benzer şekilde üretilmiş bimetal malzemeler konusunda çalışmalar mevcuttur.

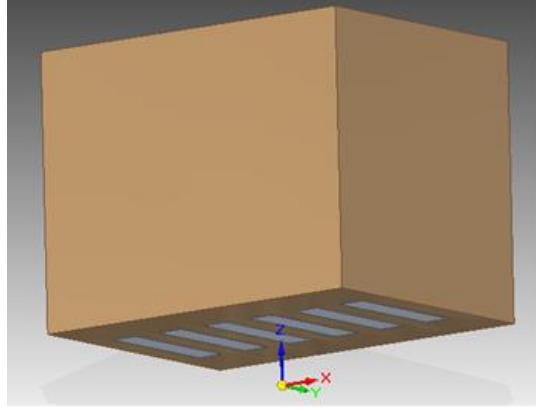


Şekil 6.2. 1 mm’lik lamine kompozit üretimi için hazırlanan grafit kalıp

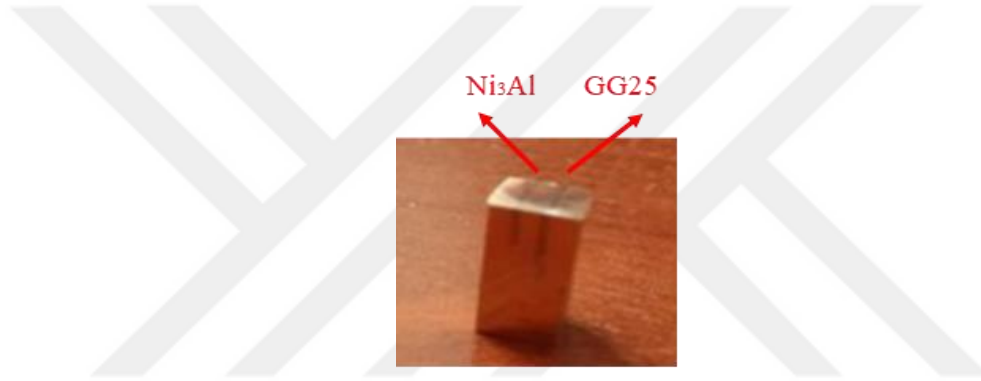


Şekil 6.3. Döküm ile üretilmiş lamine kompozit şematik gösterimi

Döküm işleminden sonra üretilen kompozit şekil 6.3’deki gibi olmaktadır. Laminelerin dışarıda kalan kısımları yine hassas kesme ile kesilerek kompozit elde edilmektedir (şekil 6.4). Bu kompozitten istenilen ölçülerde kesilerek sürtünme ve aşınma test numuneleri çıkarılmıştır (şekil 6.5).

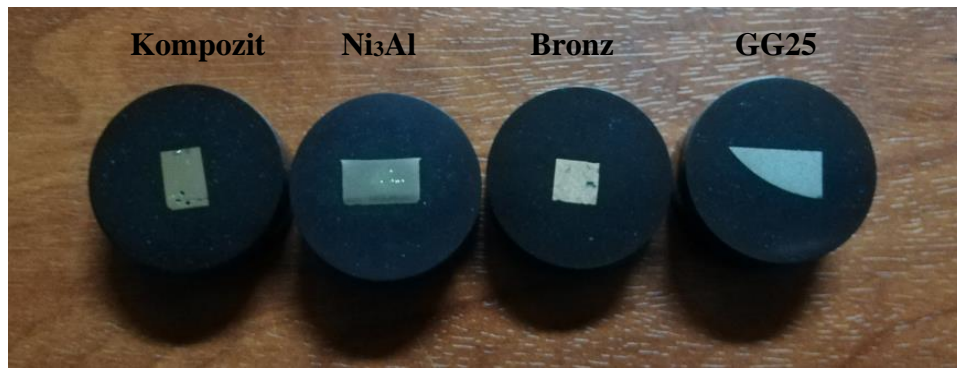


Şekil 6.4. Bronz içine gömülmüş levhalar şeklinde üretilen lamine kompozit şematik gösterimi



Şekil 6.5. 0.5 mm'lik levhalar ile hazırlanan lamine kompozit numune

Hazırlanan 1 mm kalınlıktaki lamine yapılı metalik kompozit ve bu kompoziti oluşturan bileşenlerin mikroyapılarının incelenmesi ve sertliklerin ölçülmesi için bakalite alma işlemi uygulanmıştır. Şekil 6.6'da zımparalama ve parlatma işlemleri ile hazırlanarak bakalite alınan numuneler verilmiştir.



Şekil 6.6. Bakalite alınan numuneler

Bakalite alınmış numunelerin yüzeyleri 6.7’de gösterilen optik mikroskop yardımı ile görüntüleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapıdaki fazlar dağlama işlemleri yapılmadan net olarak anlaşılamamaktadır. Dolayısıyla numunelere dağlama işlemi uygulanmıştır. Çizelge 6.1’de dağlama işleminde uygulanan çözeltiler verilmiştir. Lamine yapılı kompozit numuneye dağlama işlemi uygulanmamıştır.

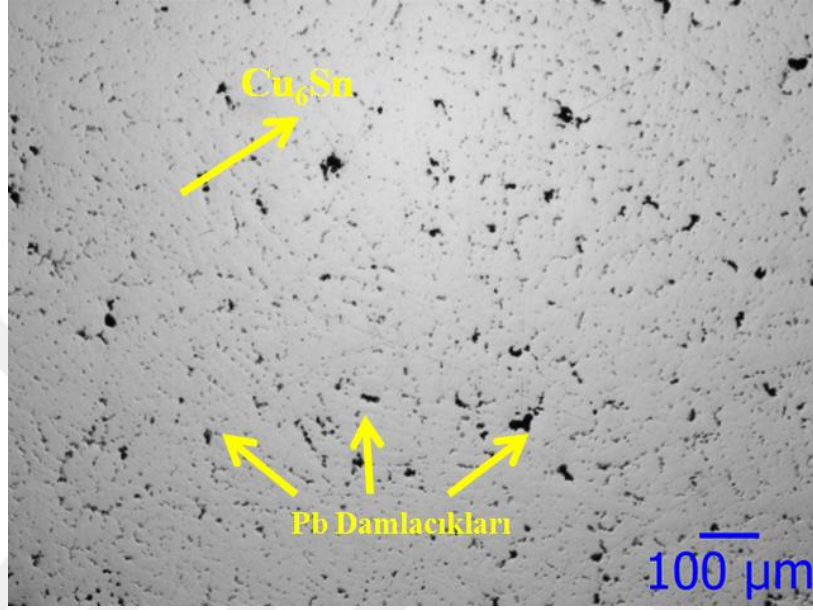


Şekil 6.7. Optik Mikroskop

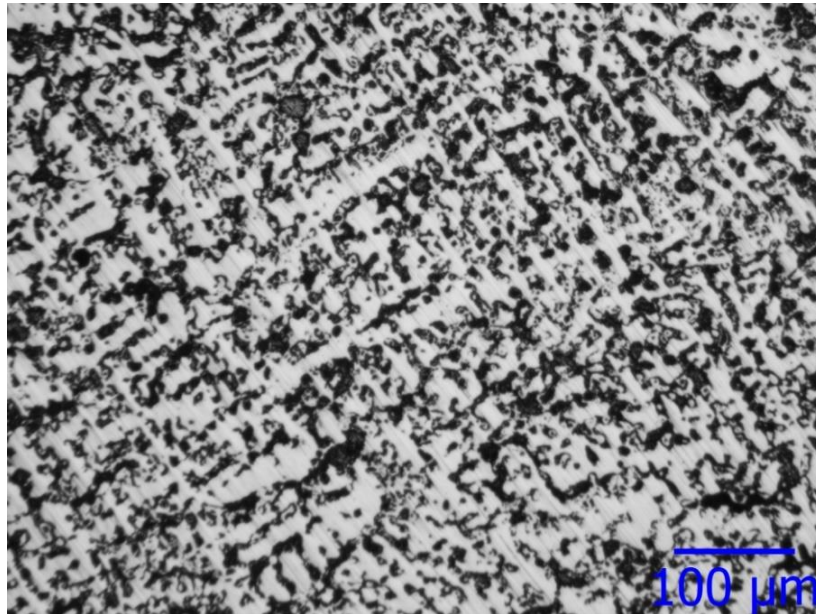
Çizelge 6.1. Bakalite alınan numunelere uygulanan dağlama çözeltileri

Numuneler	Dağlama Çözeltisi
Bronz	10 ml CuSO <sub>4</sub> + 50 ml HCl + 50 ml distile su
Ni <sub>3</sub> Al	20 ml HNO <sub>3</sub> + 3 ml HCl + 2 ml HF + 175 ml distile su
GG25	%6 Nital

Şekil 6.8’de verilen dağlama öncesinde bronz ait görüntüde, kurşun siyah noktalar şeklinde görülmektedir. Bronz içinde kurşunun çözülmediği ve homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Ayrıca, dağılan kurşunun şekli değişse de genellikle küçük ve benzer boyutlarda olduğu görülmektedir. Şekil 6.9’da dağlama sonrası bronz ait görüntü verilmiştir.

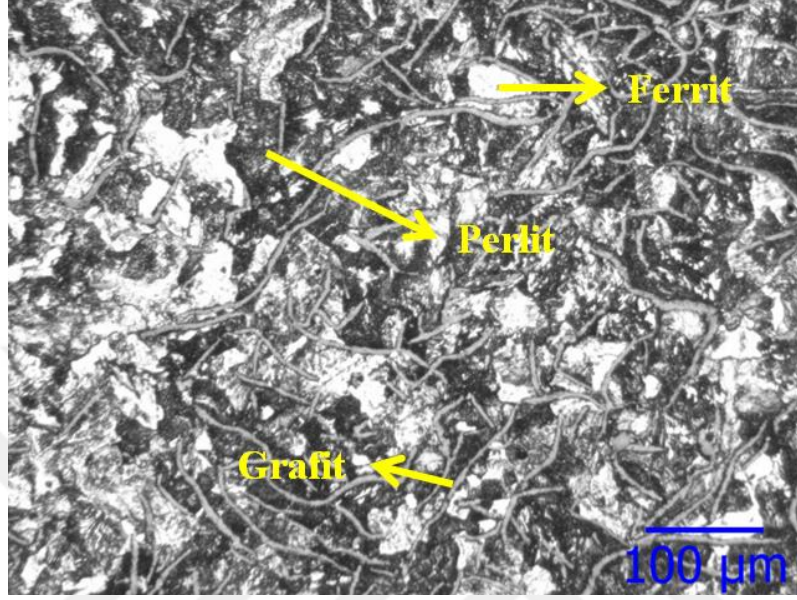


Şekil 6.8. Dağlama öncesi bronz ait mikroyapı görüntüsü (50x)

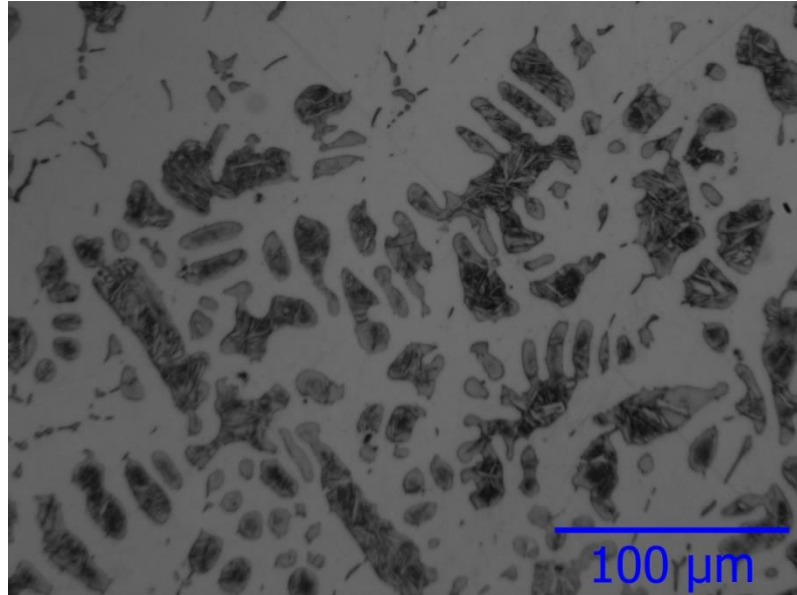


Şekil 6.9. Dağlama sonrası bronz ait mikroyapı görüntüsü (100x)

Dağlama işleminden sonra GG25'in mikroyapısında perlitik, ferritik ve lamelli grafit görülmektedir (şekil 6.10). Şekil 6.11'de dağlama sonrası Ni<sub>3</sub>Al'a ait mikroyapı görüntüsü verilmiştir.

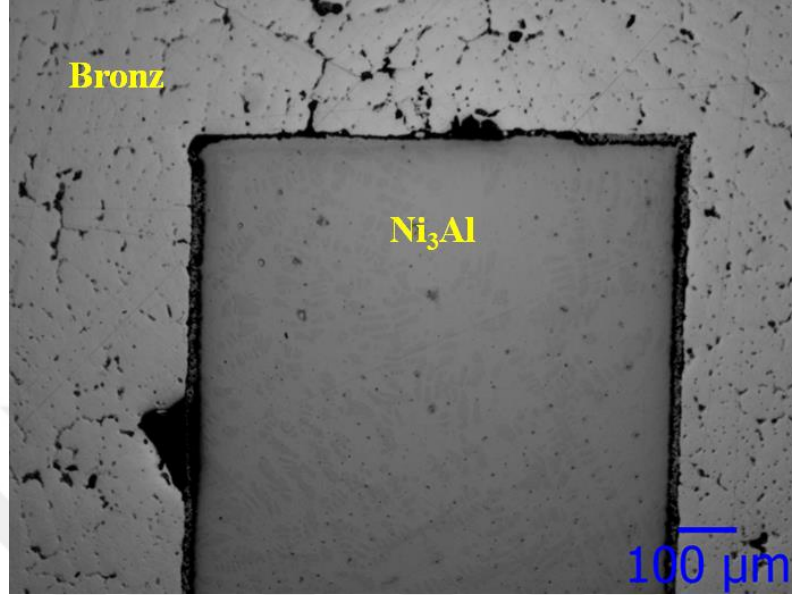


Şekil 6.10. Dağlama sonrası GG25'e ait mikro yapı görüntüsü (100x)

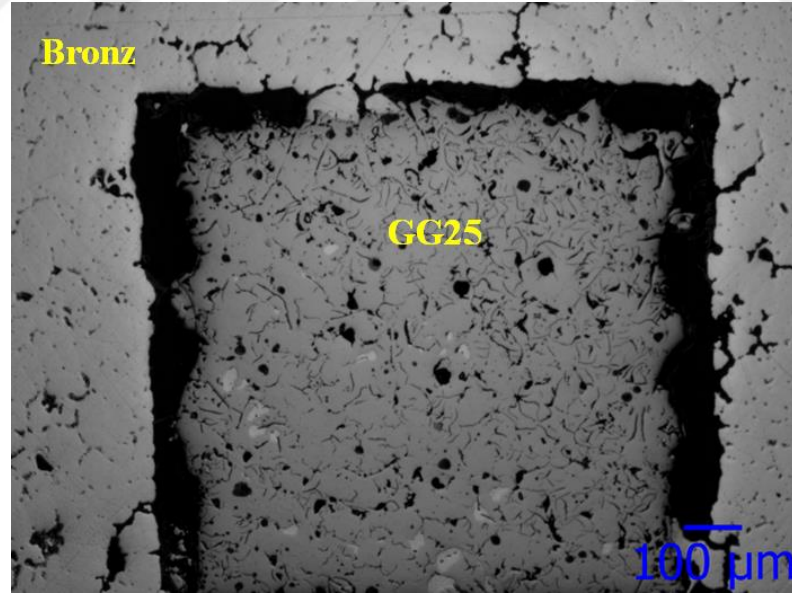


Şekil 6.11. Dağlama sonrasında Ni<sub>3</sub>Al'a ait mikroyapı görüntüsü (200x)

Kompozit numunedeki bronz-  $Ni_3Al$  hattı şekil 6.12’de ve bronz- GG25 hattı şekil 6.13’de gösterilmektedir.



Şekil 6.12. Kompozit numunedeki bronz- $Ni_3Al$  (50x)



Şekil 6.13. Kompozit numunedeki bronz-GG25 (50x)

Lamine yapılı metalik kompoziti oluşturan bileşenlerin (bronz,  $Ni_3Al$ , GG25) ve karşı cisimin (GGG60) yüzeylerinden sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri Vickers

ucu ile farklı beş yerden 10 kg yük 15 sn süre uygulanarak yapılmıştır. Sertlik ölçümleri Future Tech. FV800 serisi sertlik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür (şekil 6.14). Çizelge 6.2’de ölçümleri yapılan numunelerin sertlik değerleri verilmiştir.



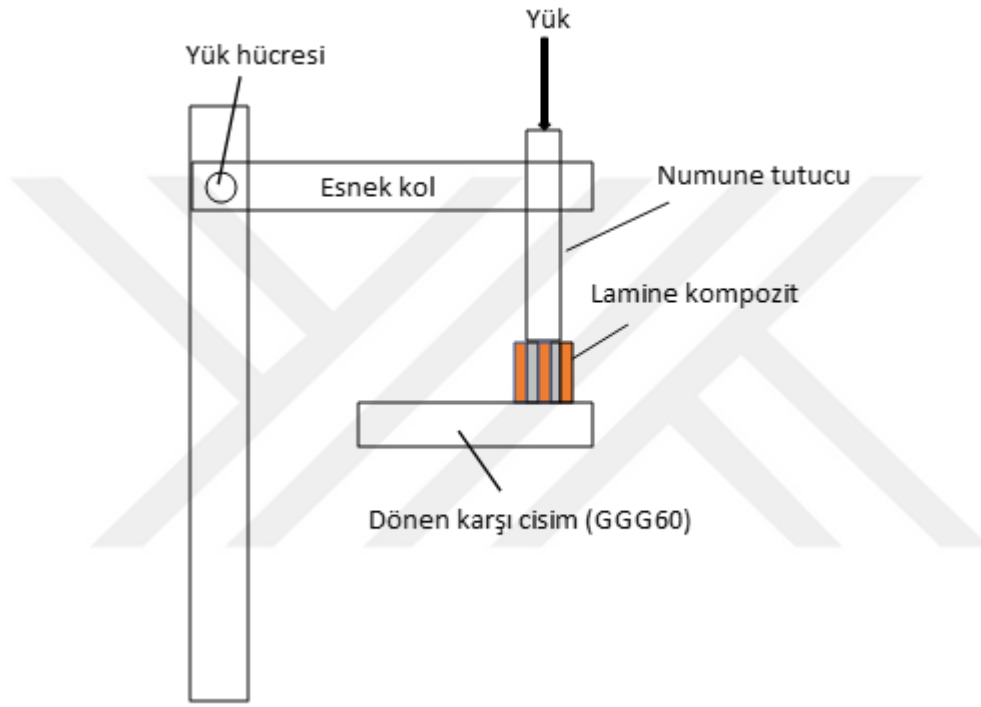
Şekil 6.14. Future Tech. FV800 serisi sertlik ölçüm cihazı

Çizelge 6.2. Numunelere ait mikro sertlik değerleri

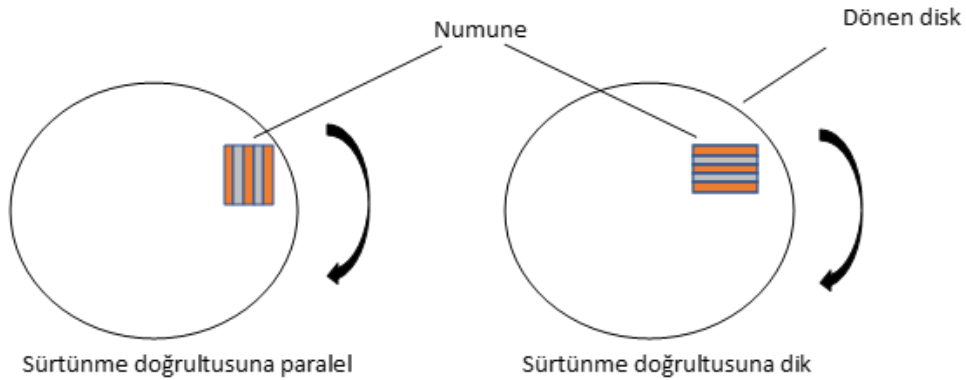
Numune	Mikro Sertlik değeri (HV)
Bronz	65
Ni3Al	389
GG25	250
GCG60	262

Lamine kalınlığı ile laminelerin sürtünme doğrultusuna göre oryantasyonu sürtünme katsayısı ve aşınma miktarına etkisini görebilmek için parametreler değiştirilerek de deneyler tekrarlanmıştır. Malzemeyle ilgili parametrelerin etkilerinin belirlenmesi için öncelikle kompoziti oluşturan bileşenlerin bireysel sürtünme ve aşınma davranışları her bir test parametresi için uygulanmıştır. Kullanılacak test geometrisi (yüzey üzerinde çubuk)

şematik olarak şekil 6.15’de ve kompozitin sürtünme yönüne göre oryantasyonu şematik görüntüsü şekil 6.16’da verilmiştir. Şekil 6.15 ve 6.16’de görüldüğü gibi tüm sürtünme testlerinde kompoziti oluşturan laminelerin hepsi aynı anda karşı cisim üzerinde kaymaktadır. Böylece yeni ve tek bir malzeme olan kompozit kendine has sürtünme ve aşınma davranışları sergilemektedir. Bu ise kompozit malzemenin sürekli ve kararlı sürtünme katsayısına ve aşınma direncine sahip olmasıyla sonuçlanmaktadır.



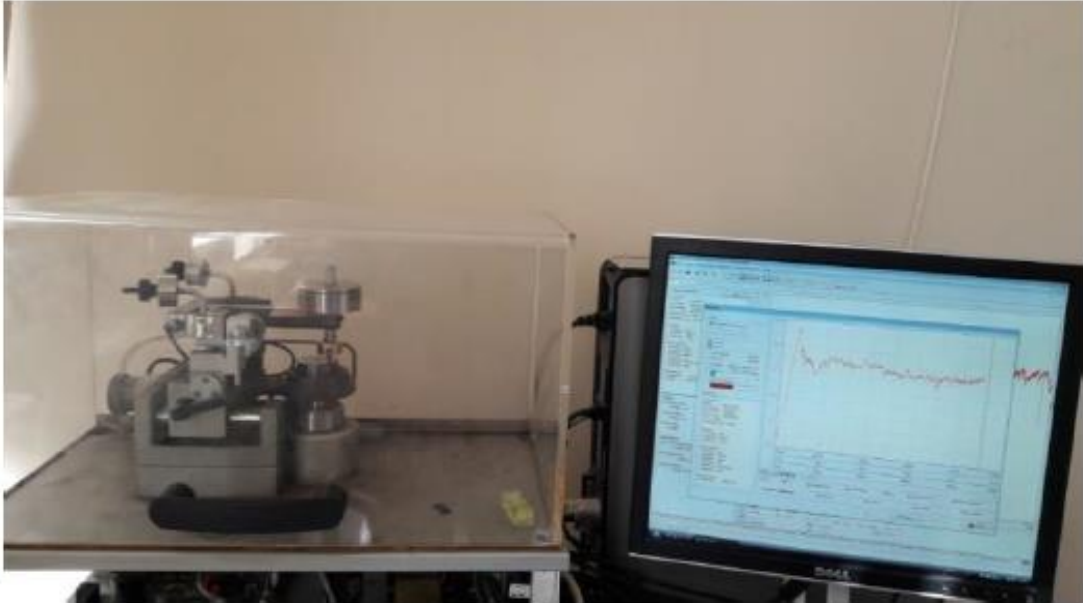
Şekil 6.15. Sürtünme test geometrisi



Şekil 6.16. Laminelerin sürtünme yönüne göre oryantasyonu

Lamine kalınlığının etkisini belirlemek için hazırlanan kompozit numunelere sürtünme ve aşınma testleri yapılmıştır. Kompozit numuneler Bronz-Ni3Al-Bronz-GG25-Bronz lamine kombinasyonunda üretilerek iki farklı sürtünme yükü ve hızında, iki değişik oryantasyonda testleri tamamlanmıştır.

Sürtünme ve aşınma testleri ASTM G99 test standardına uygun olarak aşınma cihazında (CSM Instruments Standart Tribometer) (şekil 6.17) yüzey üzerinde çubuk (pin-on-flat) geometrisinde yapılmıştır. Sürtünme testlerinde karşı cisim olarak GGG60 dökme demir kullanılmıştır. Karşı cisim olan GGG60 diskler şeklinde torna tezgahında hazırlanarak yüzeyi 320 mesh zımpara ile düzeltilmiştir (şekil 6.18). Her teste başlamadan önce yeni bir yüzey hazırlanmıştır. Böylece yük ve hızın sürtünme ve aşınma davranışlarına etkileri belirlenmiştir. Her bir test 2000 m mesafede yapılarak numunedeki ağırlık kaybı ölçülmüş, sonra aynı mesafede test tekrarlanmıştır. Toplam 10000 m'ye kadar testlere devam edilmiştir. Sonuç olarak her bir test şartındaki sürtünme mesafesi-aşınma kaybı eğrileri elde edilmiştir. Her sürtünme şartı için sürtünme katsayıları ise cihaz tarafından ölçülmektedir. Tekrarlanan 5 test sonucunda ölçülen sürtünme katsayılarının aritmetik ortalaması o malzemenin o sürtünme şartlarındaki sürtünme katsayısı olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.17. Aşınma cihazı (CSM Instruments Standart Tribometer)



Şekil 6.18. Karşı cisim GGG60 numunesi

Sürtünme ve aşınma testlerinde numunelerin davranışlarını doğru bir şekilde mukayese edebilmek için tüm numunelerin sürtünme yüzeyleri 6 x 6 mm ebatlarında hassas kesme ile kesilerek hazırlanmıştır. Sadece kompozitlerin değil yapıyı oluşturan tüm bileşenlerin (Bronz, GG25 ve Ni<sub>3</sub>Al) sürtünme ve aşınma davranışları da bireysel olarak aynı deney şartlarında tespit edilmiştir. Şekil 6.19'da bronz, GG25 ve Ni<sub>3</sub>Al numuneleri fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 6.19. Soldan sağa doğru GG25, Ni<sub>3</sub>Al ve bronz test numuneleri

## 7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Aşınma cihazında kompozit numuneler ve bileşenlerine (bronz, Ni<sub>3</sub>Al ve GG25) farklı iki yük ve farklı iki sürtünme hızında sürtünme ve aşınma testleri uygulanmıştır (çizelge 7.1). Kompozit numunelerin sürtünme yönüne ve lamellerin kalınlıklarına göre adlandırılması çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Kompozit numuneler ve bileşenlerine uygulanan sürtünme ve aşınma parametreleri

Numune	Yük(N)	Sürtünme Hızı (cm/s)	Mesafe (m)
Ni <sub>3</sub> Al	3	25	2000 x 5
		50	
	5	25	
		50	
GG25	3	25	
		50	
	5	25	
		50	
Bronz	3	25	
		50	
	5	25	
		50	
Lamine Kompozit	3	25	
		50	
	5	25	
		50	

Çizelge 7.2. Sürtünme yönü ve lamine kalınlığına göre kompozitlerin adlandırılması

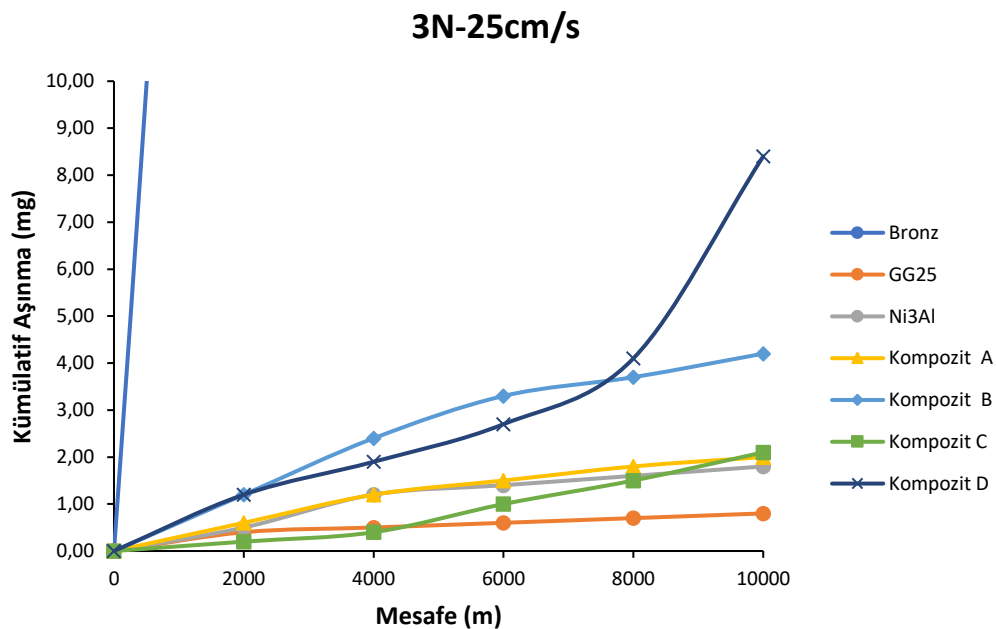
Kompozit	A	B	C	D
Kalınlık (mm)	0.5	0.5	1	1
Sürtünme Yönü	Dik	Paralel	Dik	Paralel

### 7.1. Numunelerin Kümülatif Aşınmaları

3N yük ve 25cm/s kayma hızı altında meydana gelen kümülatif aşına miktarları çizelge 7.3’de verilmiştir. Yapılan testlerden sonra toplamda bronz alaşımı 142,1 mg, GG25 0,8 mg, Ni<sub>3</sub>Al 1.8 mg, kompozit A numunesi 2 mg, kompozit B numunesi 4,2 mg, kompozit C numunesi 2,1 mg ve kompozit D numunesi 8,4 mg aşınmıştır.

Çizelge 7.3. 3 N yük ve 25cm/s kayma hızında oluşan kümülatif aşınma miktarları

Test	Mesafe (m)	3N-25cm/s						
		Kümülatif Aşınma (mg)						
		Bronz	GG25	Ni <sub>3</sub> Al	Kompozit			
				A	B	C	D	
Başlangıç	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2000	38,50	0,4	0,5	0,6	1,2	0,2	1,2
2	4000	65,70	0,5	1,2	1,2	2,4	0,4	1,9
3	6000	89,40	0,6	1,4	1,5	3,3	1	2,7
4	8000	112,70	0,7	1,6	1,8	3,7	1,5	4,1
5	10000	142,10	0,8	1,8	2	4,2	2,1	8,4



Şekil 7.1. 3N yük ve 25 cm/s kayma hızında oluşan mesafeye bağlı aşınma miktarları

3N yük ve 25cm/s kayma hızında oluşan mesafeye bağlı aşınma miktarları şekil 7.1’de verilmiştir. Ni<sub>3</sub>Al ve GG25 aşınma miktarı sürtünme mesafesine bağlı olarak neredeyse sabit bir artış gösterirken bronz hızlı bir şekilde artış göstermiştir. Kompozit numuneler ise hacimsel olarak çok az Ni<sub>3</sub>Al ve GG25 içermesine rağmen bu numuneler ile benzer aşınma davranışı göstermiştir.

Çizelge 7.4. 5 N yük ve 25cm/s kayma hızında oluşan kümülatif aşınma miktarları

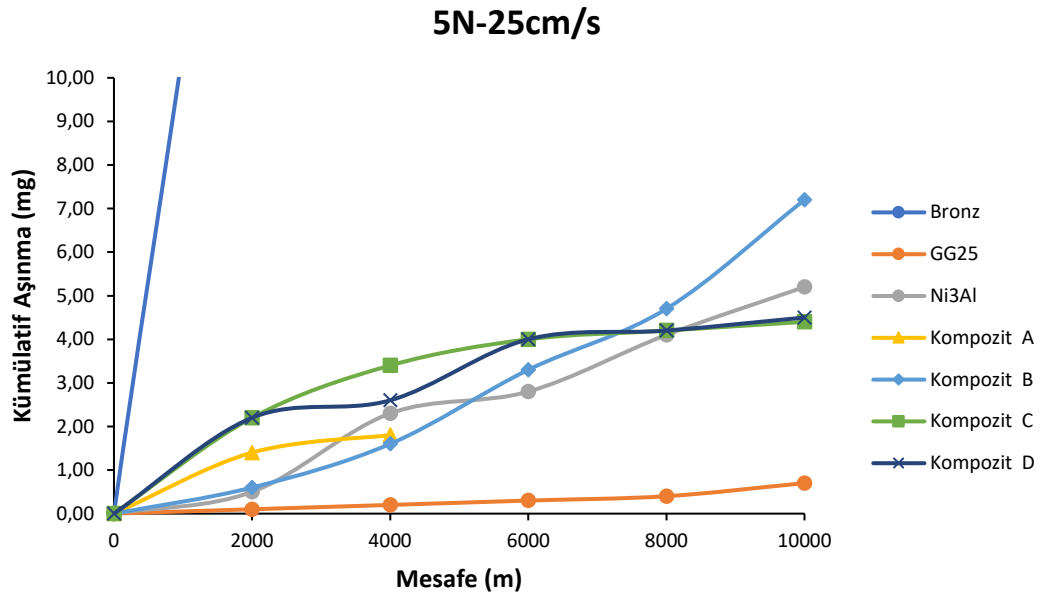
5N-25 cm/s								
Test	Mesafe (m)	Kümülatif Aşınma (mg)						
		Bronz	GG25	Ni <sub>3</sub> Al	Kompozit			
					A	B	C	D
Başlangıç	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2000	22,50	0,1	0,5	1,4	0,6	2,2	2,2
2	4000	55,00	0,2	2,3	1,8	1,6	3,4	2,6
3	6000	90,80	0,3	2,8	*	3,3	4	4
4	8000	129,10	0,4	4,1	*	4,7	4,2	4,2
5	10000	169,80	0,7	5,2	*	7,2	4,4	4,5

\*: Hata verdiği için tamamlanamadı.

5N yük ve 25 cm/s kayma hızı altında numunelerde oluşan kümülatif aşınma miktarları çizelge 7.4’de verilmiştir. Tamamlanan testler sonunda bronz 169,8 mg, GG25 0,7 mg, Ni<sub>3</sub>Al 5,2 mg, kompozit B 7,2 mg, kompozit C 4,4 mg ve kompozit D 4,5 mg aşınmıştır. Kompozit A, cihazın test esnasında hata vererek durması nedeni ile 5 tekrar yapılamamıştır. 2. tekrardan sonra kompozit A 0,8 mg aşındığı görülmüştür.

Çizelge 7.3 ve 7.4’e göre, yük arttığında sürtünme hızı sabit tutulduğunda bronz ve Ni<sub>3</sub>Al numunelerinde aşınma çok artarken GG25’in aşınmasında çok fazla değişmediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, kompozit numunelerden B ve C’de aşınma artarken D’de azalma gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, bu sürtünme şartlarında bronzun, Ni<sub>3</sub>A, kompozit numunelerden B ve C’nin aşınma direnci azalırken, GG25’in aşınma direncinde değişim olmadığı ve kompozit D’nin aşınma direnci ise yaklaşık iki katına çıktığı saptanmıştır.

Şekil 7.2’de 5N yük ve 25 cm/s kayma hızında oluşan mesafeye bağlı kümülatif aşınma miktarları gösterilmiştir. Şekil 7.2’e göre, yüksek yük ve düşük sürtünme hızında GG25 ve Ni<sub>3</sub>Al numuneleri bronzdan daha az aşındığı gözlemlenirken kompozit numunelerin aşınmalarının Ni<sub>3</sub>Al’a yakın olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.2. 5N yük ve 25 cm/s kayma hızında oluşan mesafeye bağlı kümülatif aşınma miktarları

3N yük ve 50cm/s kayma hızı altında oluşan kümülatif aşınma miktarları çizelge 7.5’de verilmiştir. Tamamlanan testler sonunda bronz alaşımı 20,7 mg, GG25 1,2 mg, kompozit A 2,9 mg, kompozit B 2,2 mg, kompozit C 2 mg aşınmıştır.

Çizelge 7.5. 3N yük ve 50cm/s kayma hızı altında oluşan kümülatif aşınma miktarları

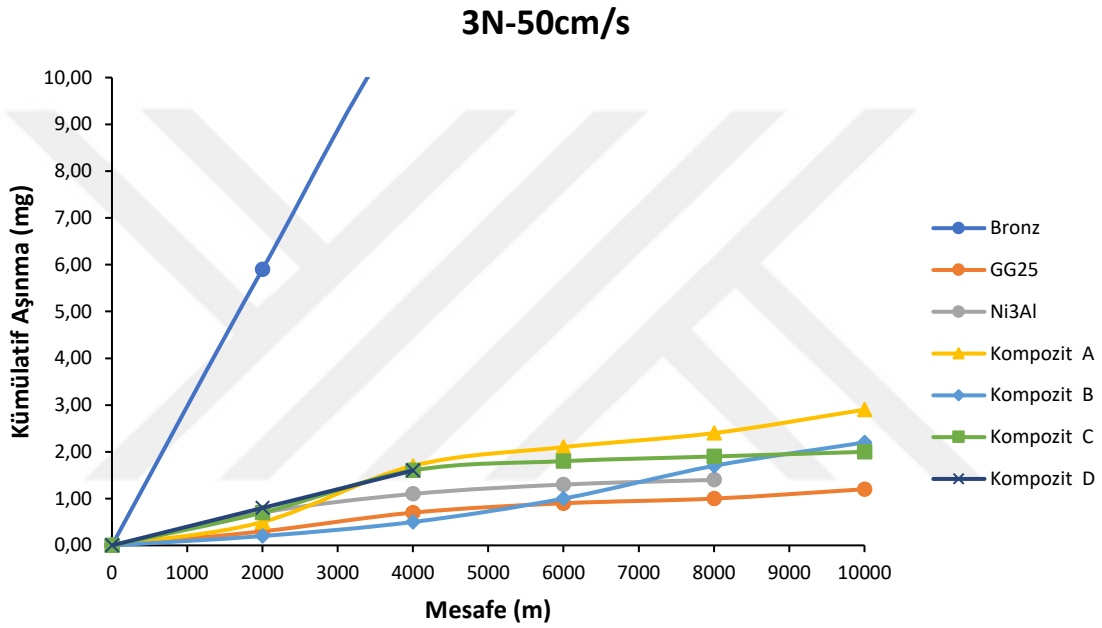
3N-50 cm/s								
Test	Mesafe	Kümülatif Aşınma (mg)						
		Bronz	GG25	Ni <sub>3</sub> Al	Kompozit			
					A	B	C	D
Başlangıç	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2000	5,90	0,3	0,7	0,5	0,2	0,7	0,8
2	4000	11,40	0,7	1,1	1,7	0,5	1,6	1,6
3	6000	13,50	0,9	1,3	2,1	1	1,8	*
4	8000	18,40	1	1,4	2,4	1,7	1,9	*
5	10000	20,70	1,2	*	2,9	2,2	2	*

\*: Hata verdiği için tamamlanamadı.

Aşınma direnci yüksek olan Ni<sub>3</sub>Al’ın 3 N yük ve 50cm/s kayma hızı altında 5. test yapılamamıştır ve 4. test sonunda Ni<sub>3</sub>Al 1,4 mg olarak aşındığı belirlenmiştir. Ayrıca kompozit D numunelerinin 3 N yük ve 50 cm/s kayma hızı altında sürtünme yönüne paralel

olarak uygulanan aşınma ve sürtünme testi cihaz hata verdiği için 5 tekrar yapılamamıştır. 2. tekrardan sonra kümülatif aşınma değeri 1,6 mg olarak ölçülmüştür.

Çizelge 7.3 ve 7.5'e incelendiğinde, sabit düşük yük ve artan sürtünme hızı altında uygulanan testler sonucunda bronzun aşınmasında aşırı azalma olurken GG25, kompozit A ve kompozit C'nin aşınmalarında pek değişim olmadığı ama kompozit B'de ise aşınmanın yaklaşık iki kat azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.3. 3N yük ve 50cm/s kayma hızında oluşan mesafeye bağlı kümülatif aşınma miktarları

Şekil 7.3'de 3N yük ve 50cm/s kayma hızında oluşan mesafeye bağlı kümülatif aşınma miktarı verilmiştir. Düşük yük ve yüksek sürtünme hızında mesafeye bağlı olarak bronz hızlı bir şekilde artarken, GG25 ve Ni<sub>3</sub>Al daha az aşındığı belirlenirken kompozit numuneler ise Ni<sub>3</sub>Al ve GG25 ile yakın aşınma davranışı gösterdiği saptanmıştır.

Çizelge 7.6'da yüksek yük ve yüksek kayma hızı altında oluşan kümülatif aşınma miktarları verilmiştir. Tamamlanan testler sonunda bronz alaşımı 9 mg, GG25 1,5 mg, kompozit A 2,6 mg, kompozit B 4 mg ve kompozit C 0,7 mg aşındığı tespit edilmiştir. Ni<sub>3</sub>Al'ın sürtünme ve aşınma testleri 1. testten sonra tamamlanamamıştır ve 1. test sonunda

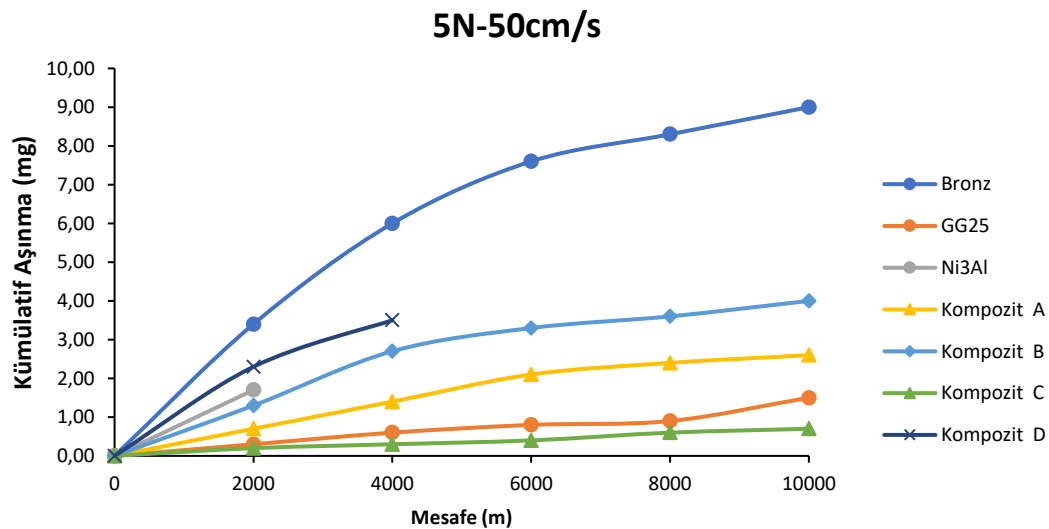
1,7 mg aşındığı belirlenmiştir. Ayrıca cihazın test esnasında hata vererek durması nedeni ile kompozit D malzemesinin 3,5 mg kümülatif aşınma değeri 2. tekrardan sonra ölçülmüştür.

Çizelge 7.6. 5N yük ve 50cm/s kayma hızı altında oluşan kümülatif aşınma miktarları

5N-50 cm/s								
Test	Mesafe(m)	Kümülatif Aşınma (mg)						
		Bronz	GG25	Ni <sub>3</sub> Al	Kompozit			
					A	B	C	D
Başlangıç	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2000	3,40	0,3	1,7	0,7	1,3	0,2	2,3
2	4000	6,00	0,6	*	1,4	2,7	0,3	3,5
3	6000	7,60	0,8	*	2,1	3,3	0,4	*
4	8000	8,30	0,9	*	2,4	3,6	0,6	*
5	10000	9,00	1,5	*	2,6	4	0,7	*

\*: Hata verdiği için tamamlanamadı.

Şekil 7.4’de yüksek yük ve yüksek kayma hızında oluşan mesafeye bağlı kümülatif aşınma miktarları verilmiştir. Şekil 7.4’de bronzun mesafeye bağlı olarak yüksek yük ve yüksek sürtünme hızında GG25 ve kompozit numunelere oranla daha fazla aşındığı görülmektedir.



Şekil 7.4. 5N yük ve 50cm/s kayma hızında oluşan mesafeye bağlı kümülatif aşınma miktarları

Çizelge 7.5 ve 7.6 karşılaştırıldığında, sabit yüksek hız altında normal yükün artması ile bronzun aşınmasının azaldığı, GG25, kompozit A ve kompozit C'nin aşınmalarının pek değişmediği ve kompozit B'nin ise yaklaşık iki kat daha fazla aşındığı saptanmıştır.

Çizelge 7.4 ve 7.6 incelendiğinde, sabit yüksek yük ve artan sürtünme hızı altında gerçekleşen testler sonunda bronzun ve kompozit B'nin aşınmaları azalırken GG25 ve kompozit C'nin aşınmalarında artış olduğu gözlenmiştir.

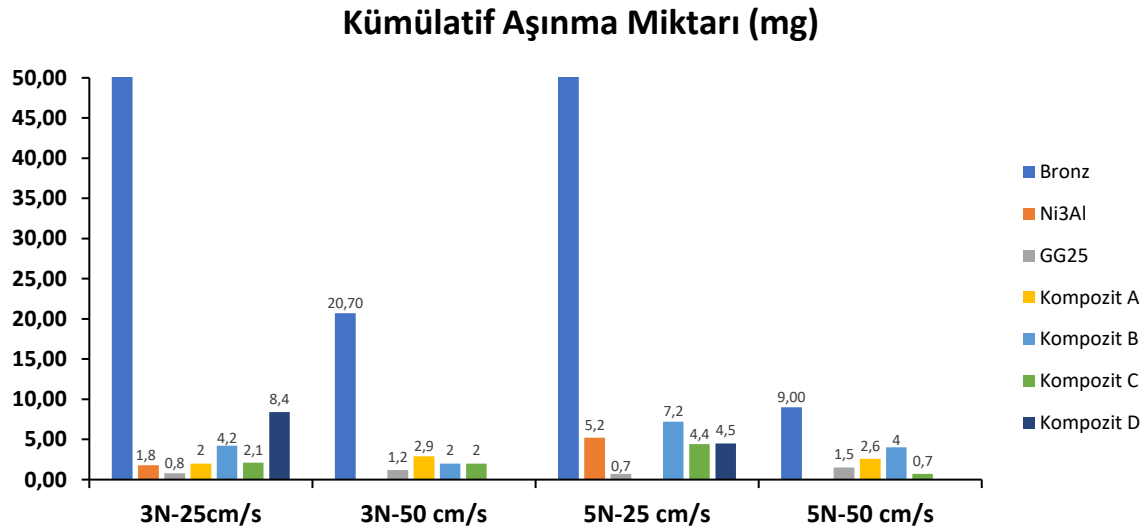
Toplam 10000 m sürtünme mesafesinde oluşan kümülatif aşınma miktarları çizelge 7.7'de ve bu değerler ile çizilen grafik şekil 7.5'de verilmiştir.

Çizelge 7.7. Toplam 10000 m sürtünme mesafesinde oluşan kümülatif aşınma miktarları

Yük - Hız (N) (cm/s)	Kümülatif Aşınma Miktarı (mg)						
	Bronz	Ni <sub>3</sub> Al	GG25	Kompozit			
				A	B	C	D
3N-25cm/s	142,10	1,8	0,8	2	4,2	2,1	8,4
3N-50 cm/s	20,70	*	1,2	2,9	2	2	*
5N-25 cm/s	169,80	5,2	0,7	*	7,2	4,4	4,5
5N-50 cm/s	9,00	*	1,5	2,6	4	0,7	*

\*: 5 tekrar yapılmadı.

Çizelge 7.7 'de görüldüğü gibi her iki uygulama yükü içinde sürtünme hızının artması ile kompozit malzemenin bileşenlerinden bronzun kümülatif aşınma miktarında çok fazla düşüş olduğu görülse de Ni<sub>3</sub>Al ve GG25'e göre yine de daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, lamine yapılı metalik kompozit numuneleri oluşturan Ni<sub>3</sub>Al ve GG25'in kompozit içerisinde bronzla oranla daha az miktarda bulunmalarına karşı kompozit numunelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını iyi yönde etkilediği sonucuna ulaşılabilir.



Şekil 7.5. Farklı iki yük ve farklı sürtünme hızında gerçekleştirilen testlerin kümülatif aşınma miktarları

## 7.2. Numunelerin Sürtünme Katsayıları

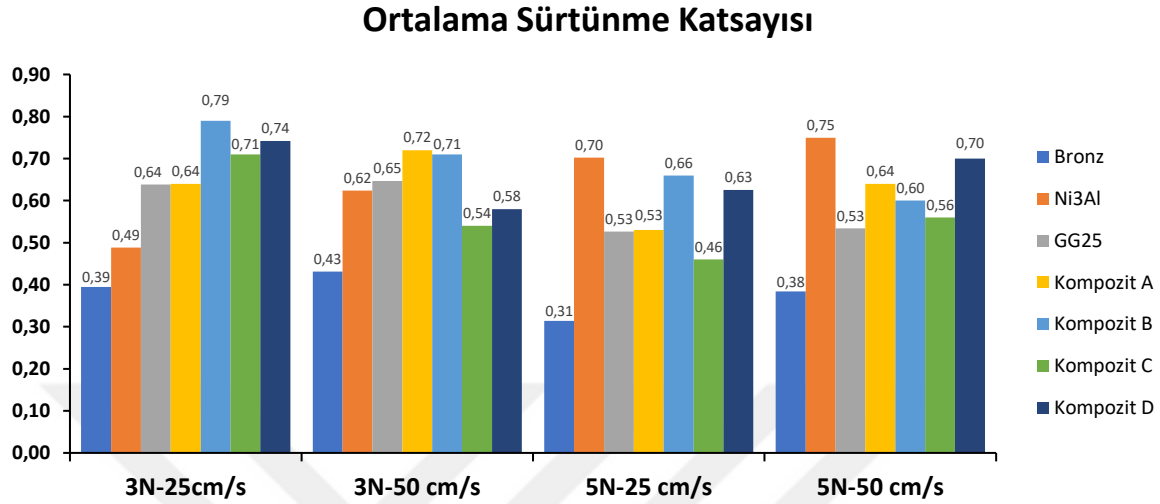
Farklı sürtünme yükleri ve farklı sürtünme hızlarında gerçekleştirilen 10000 m sonunda meydana gelen ortalama sürtünme katsayıları çizelge 7.8’de ve bu değerlerin grafiğe dönüştürülmüş hali şekil 7.6’da verilmiştir.

Çizelge 7.8. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları

Yük - Hız (N) (cm/s)	Ortalama Sürtünme Katsayısı						
	Bronz	Ni <sub>3</sub> Al	GG25	Kompozit			
				A	B	C	D
3N-25cm/s	0,39	0,49	0,64	0,64	0,79	0,71	0,74
3N-50 cm/s	0,43	0,62	0,65	0,72	0,71	0,54	0,58
5N-25 cm/s	0,31	0,70	0,53	0,53	0,66	0,46	0,63
5N-50 cm/s	0,38	0,75	0,53	0,64	0,60	0,56	0,70

Yapılan tüm testler sonunda numunelerin sürtünme katsayıları karşılaştırıldığında, en düşük sürtünme katsayılarına sahip olan bronz numunesidir. Bu numunenin ortalama sürtünme katsayıları, sabit yük altında sürtünme hızının artması ile artarken sabit sürtünme hızı altında yükün artması ile düştüğü görülmektedir. Bronzun düşük sürtünme katsayısı ile aşınma esnasında fazla aşınarak meydana gelen aşınma partikülleri iki yüzeyin temasını

önlereken bronzun içindeki kurşunda yüzeylere sıvanması ile sürtünme katsayılarını azaltmaktadır.



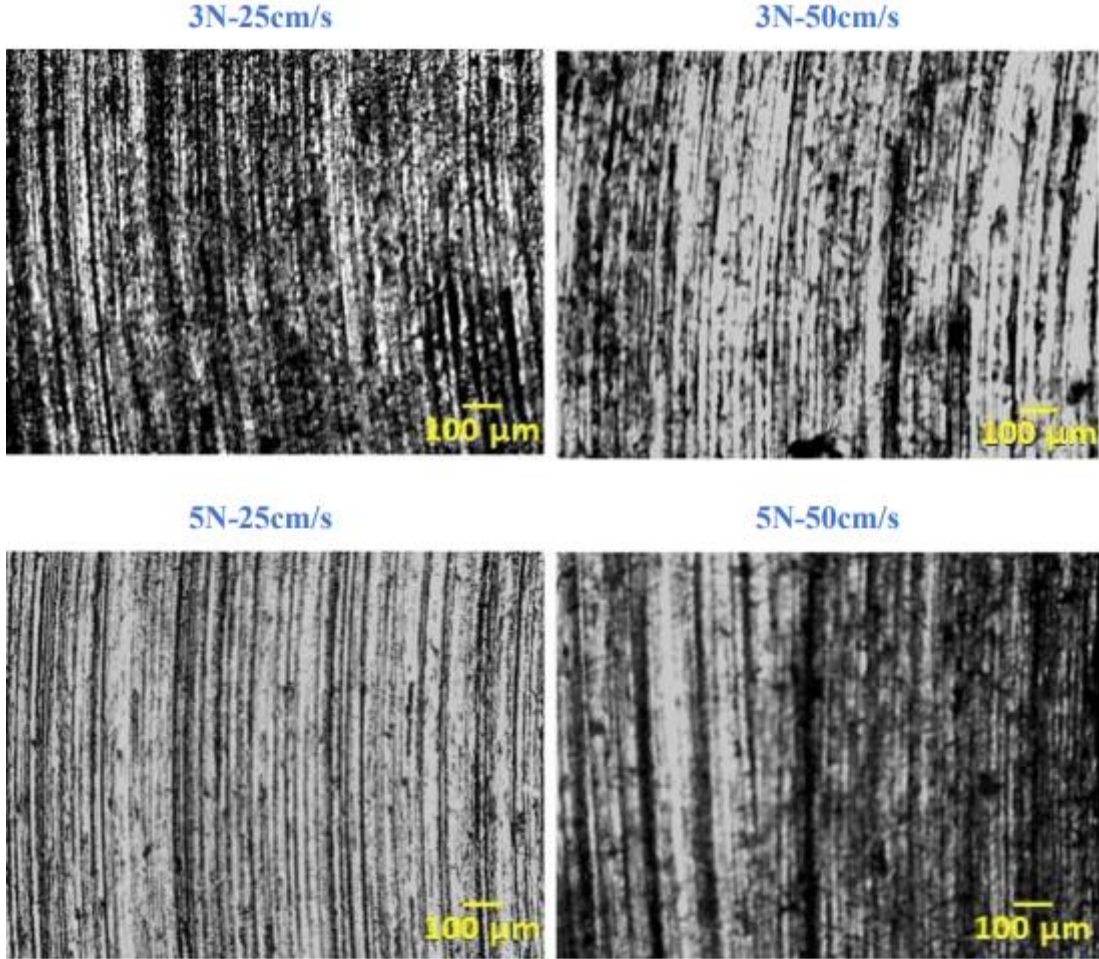
Şekil 7.6. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları

Uygulanan yük ve sürtünme hızının artması ile Ni<sub>3</sub>Al numunesinin sürtünme katsayısı artmaktadır. Böylece, GG25 numunesine göre sürtünme ve aşınma direnci daha yüksektir ve dolayısıyla kompozit numunenin en verimli bileşenidir. GG25 içerisindeki grafitin ara yüzeylere sıvanması ve oluşan bu grafit filmi uygulanan yük uzaklaştıracak kadar büyük olmadığından yüzeyleri ayırabilmiştir. Bundan dolayı GG25 numunesi düşük sürtünme ve yüksek aşınma direncine sahip olmaktadır. Ayrıca, sabit yük ve artan sürtünme hızı altında GG25'in sürtünme katsayısı değişmezken sabit hız ve artan yük altında düştüğü görülmüştür.

Lamine yapıli metalik kompozit numunelerin sürtünme katsayısı ise yapılan testlerden sonra bileşenlerinden bronzun sürtünme katsayısından daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Fren balatalarının 0,35-0,55 değer aralığında sürtünme katsayısına sahip olması beklenir (Blau vd., 2007). Tamamlanan testler sonucunda en düşük sürtünme katsayısı 0,46 olarak ölçülmüştür bu yüzden fren balatası malzemesi olarak tercih edilebilir.

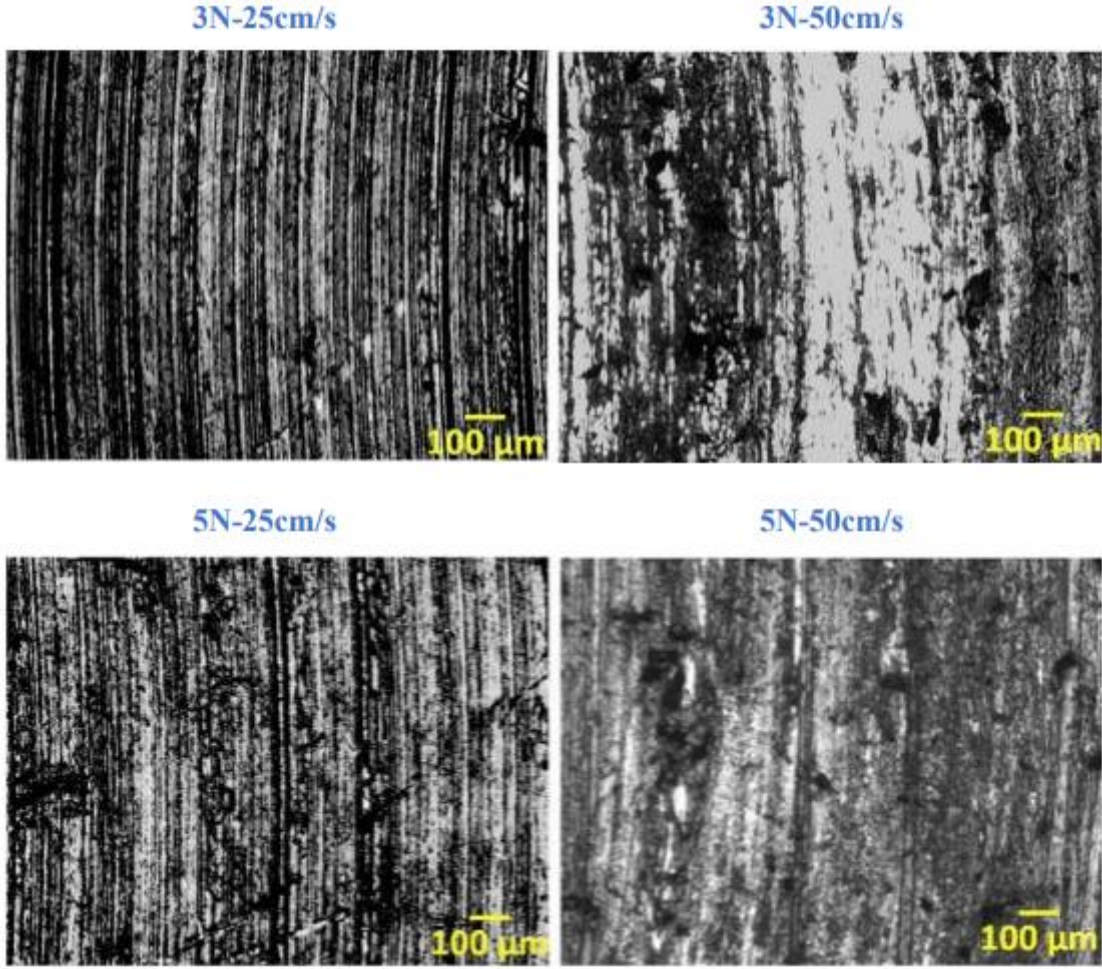
### 7.3. Numunelerin Aşınma Yüzeylerinin İncelemesi

Bronz, GG25, Ni<sub>3</sub>Al ve kompozit malzemeler için gerçekleştirilen her bir test parametresinden sonra yüzeyleri optik mikroskobu ile görüntülenmiştir.



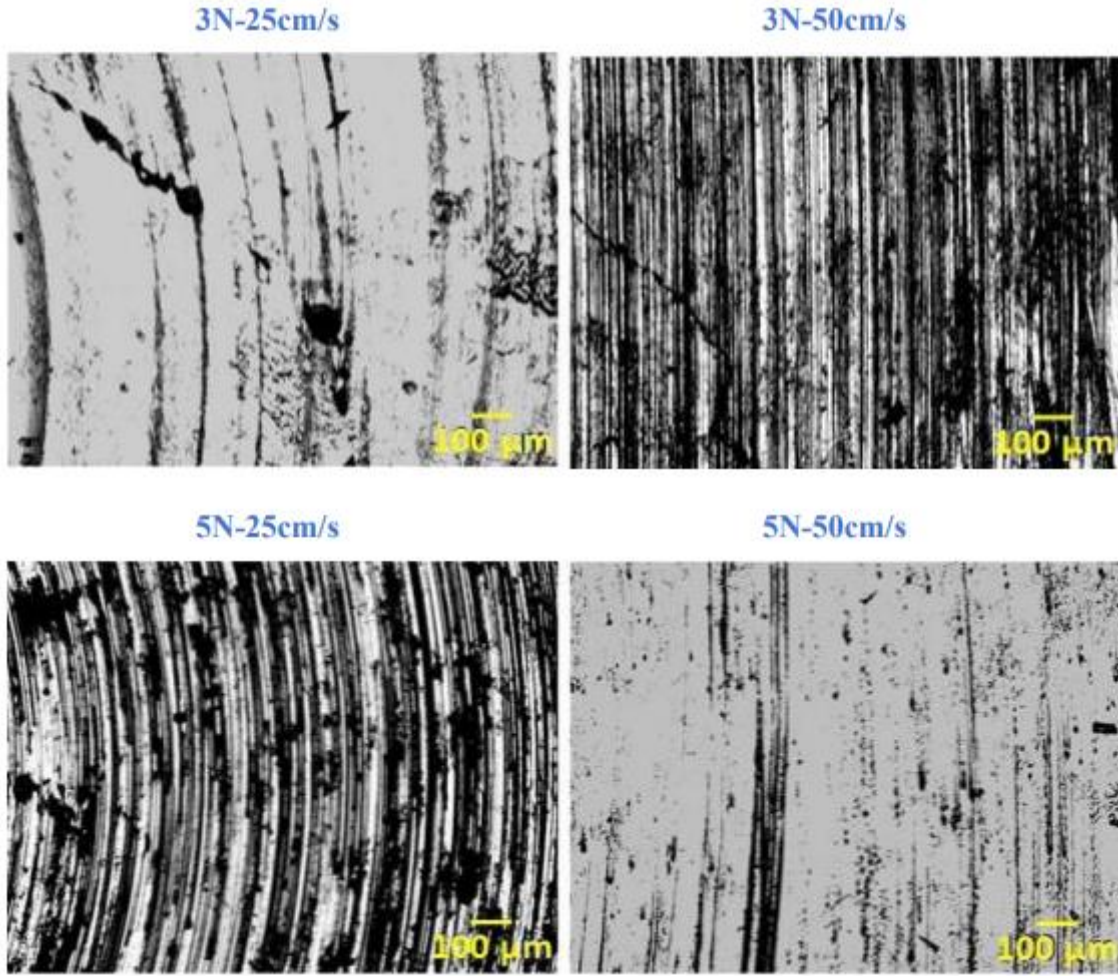
Şekil 7.7. Bronza ait mikroyapılar (50x)

Şekil 7.7’de yapılan testler sonunda bronza ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görüntülerden, bronzun aşınma mekanizması plastik deformasyon ile abrasif aşınma olduğu gözlenmektedir. Bronz numunesinin sertliği GGG60’ın sertliğinden düşüktür. Bu nedenle, GGG60 yüzeyindeki pürüzler bronza batmakta ve üzerinde oluklar açmaktadır. Uygulanan yükün ve hızın artması ile delaminasyon aşınmada başlamaktadır. 5N yük ve 50 cm/s sürtünme hızı koşullarında abrasif aşınma ile plastik deformasyon daha belirgin gözlenmektedir. Kurşunun yüzeye sıvandığı yüksek yük ve hız koşullarında gözlenmektedir.



Şekil 7.8. GG25'e ait mikroyapılar (50x)

Şekil 7.8'de görüldüğü gibi GG25 numunesinde düşük kayma hızlarında aşınma abrasiftir. Karşı cisim olarak kullanılan GGG60 sertliği GG25'e göre daha serttir. Bu yüzden, sert olan GGG60'ın pürüzleri GG25'in yüzeyine batması ile abrasif aşınma meydana gelmiştir. Abrasif aşınmanın etkisi uygulanan yüksek hızlar da azalma görülmektedir. Ara yüzeyde sıvayan grafit GG25'in yüzeyinin aşırı aşınmasını engellemektedir. Tamamlanan testler sonucunda GG25 numunesinin ölçülen aşınma miktarları ile daha az aşınma meydana geldiğini göstermektedir. Yüzeye sıvayan grafit uygulanan yüksek yük ve hız sürtünme koşullarında açıkça görülmektedir.

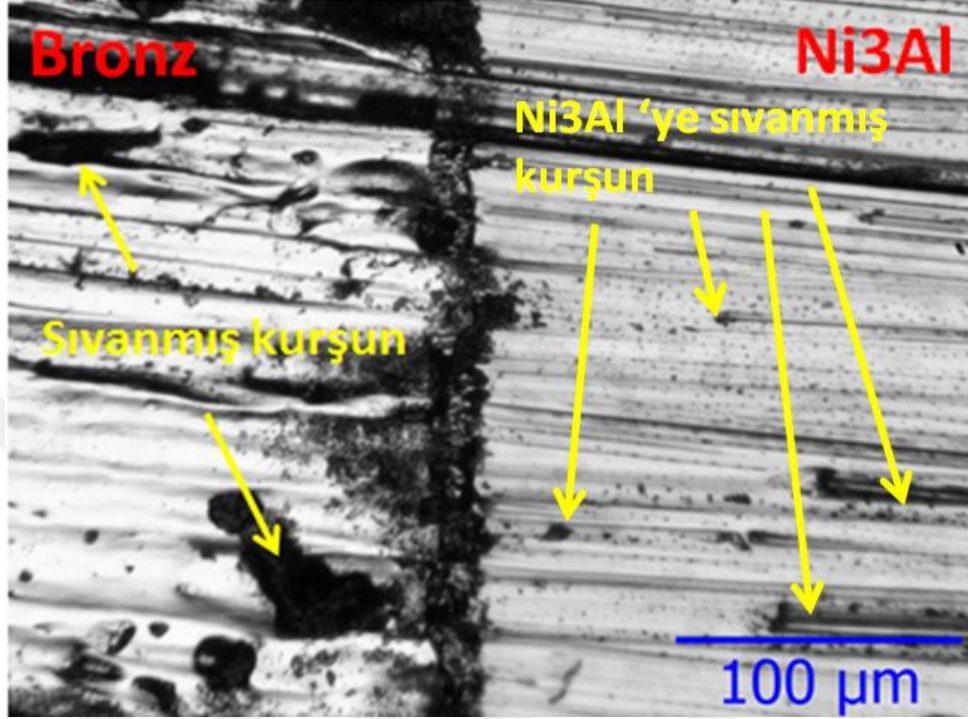


Şekil 7.9.  $Ni_3Al$ 'a ait mikroyapılar(50x)

Şekil 7.9'da  $Ni_3Al$  numunesinin yüzeyinde abrasif aşınmayı gösteren çizikler bulunmaktadır. Yapılan sertlik ölçümlerinde,  $Ni_3Al$  numunesinin sertliği karşı cisim olarak kullanılan GGG60'tan daha sert olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla, karşı cismin pürüzleri abrasif aşınma oluşturamaz.  $Ni_3Al$  numunesinin aşınma direncini yüzeyde oluşturduğu alüminyum oksit korumaktadır. Uygulanan yük ve kayma hızına bağlı olarak alüminyum oksit partikülleri yüzeyden ayrılırken bu çiziklere meydana getirmiş olabilir.

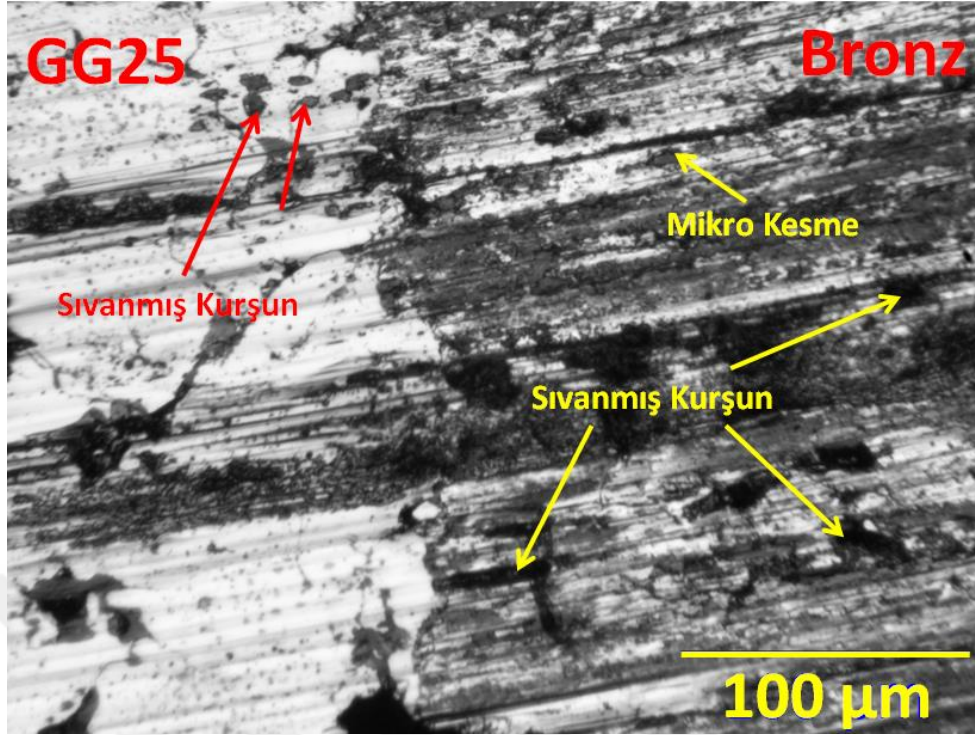
Şekil 7.10'da, 1mm kalınlığındaki laminelerden üretilmiş kompozit C'nin 3N normal yük ve 50 cm/s kayma hızında uygulanan test sonrası yüzey aşınmasının görüntüsü verilmiştir. Lamine yapılı metalik kompoziti oluşturan bileşenlerden bronzun aşınması önceden de bahsedildiği gibi abrasif ve adhesif aşınmadır ve 200 büyütme oranında bronzun üzerinde bulunan kurşun partikülleri daha iyi görülmektedir. Ayrıca,  $Ni_3Al$  numunesine ait

görüntüde aşınma miktarı çok net olmasa da diğer görüntüler de mikro ölçekte çatlaklar bulunduğu tespit edilmiştir.

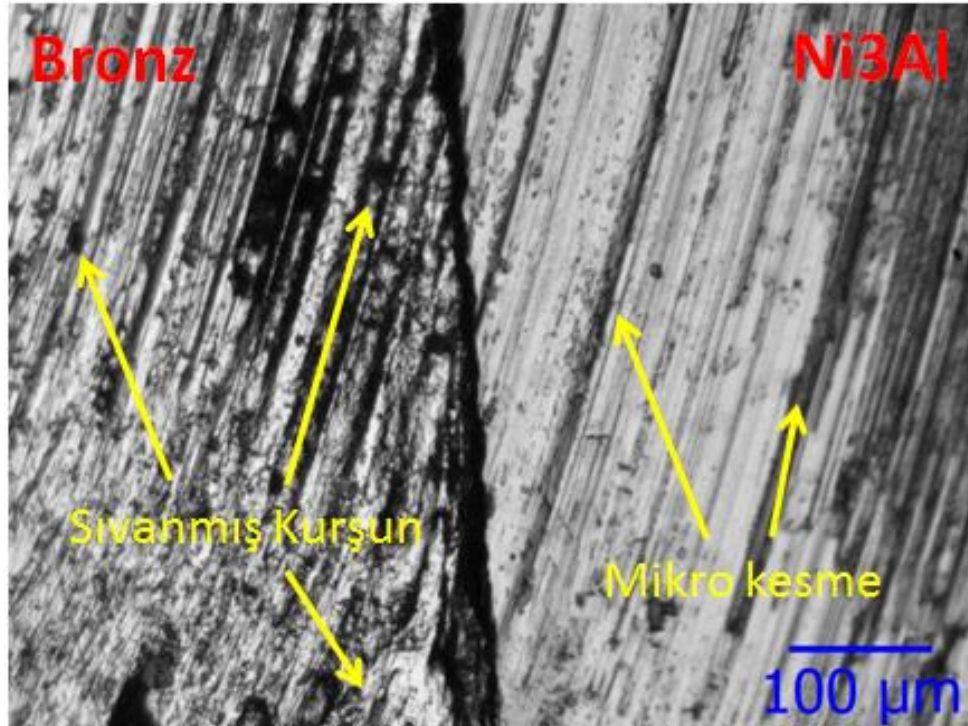


Şekil 7.10. 3N yük ve 50 cm/s hız altında tamamlanan test sonrası kompozit C'ye ait mikroyapı (200x)

Şekil 7.11'de kompozit C'nin bileşenlerinden bronz ve GG25'in bulunduğu kesite ait görsel verilmiştir. Bu görselde bronz ve GG25'in bulunduğu kompozitin yüzeyine sıvanmış kurşun partikülleri gözlenmektedir. Ayrıca, aşınma yüzeyinde mikro kesmeler olduğu görülmektedir.



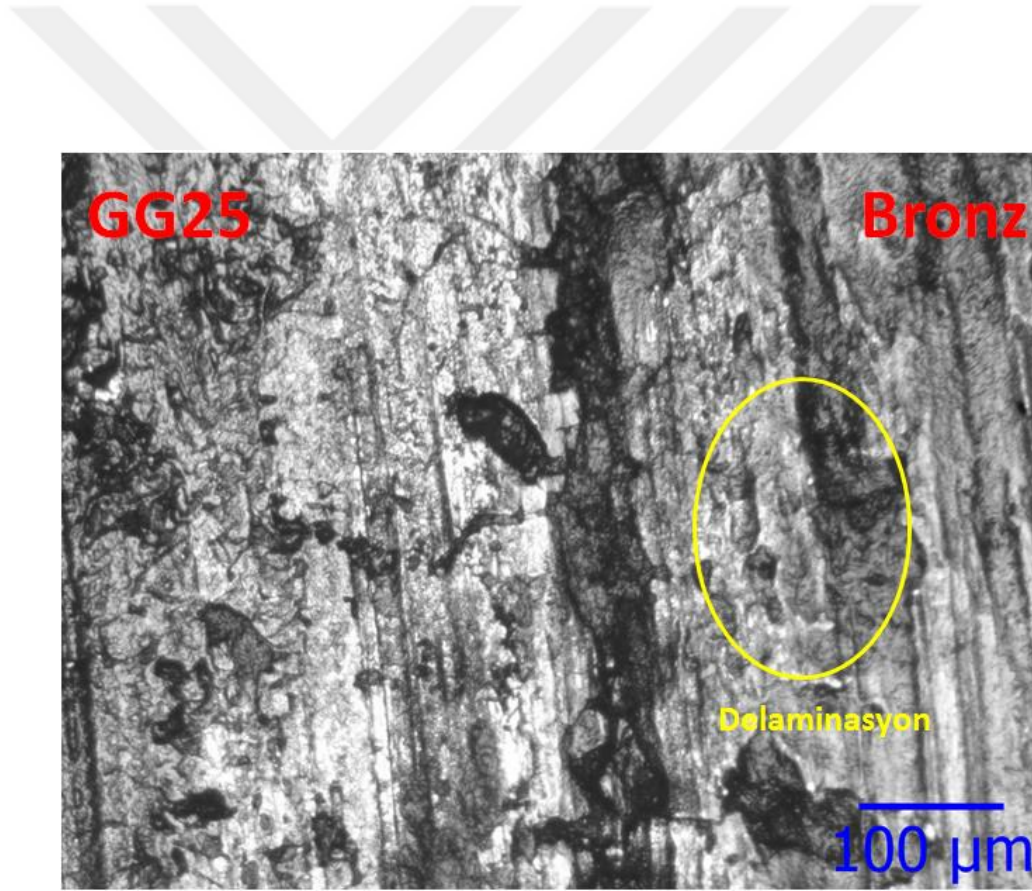
Şekil 7.11. 3N yük ve 50 cm/s hız altında tamamlanan test sonrası kompozit C'ye ait farklı bir mikroyapı (200x)



Şekil 7.12. 5N yük ve 25 cm/s hız altında tamamlanan test sonrası kompozit D'ye ait bir mikroyapı (100x)

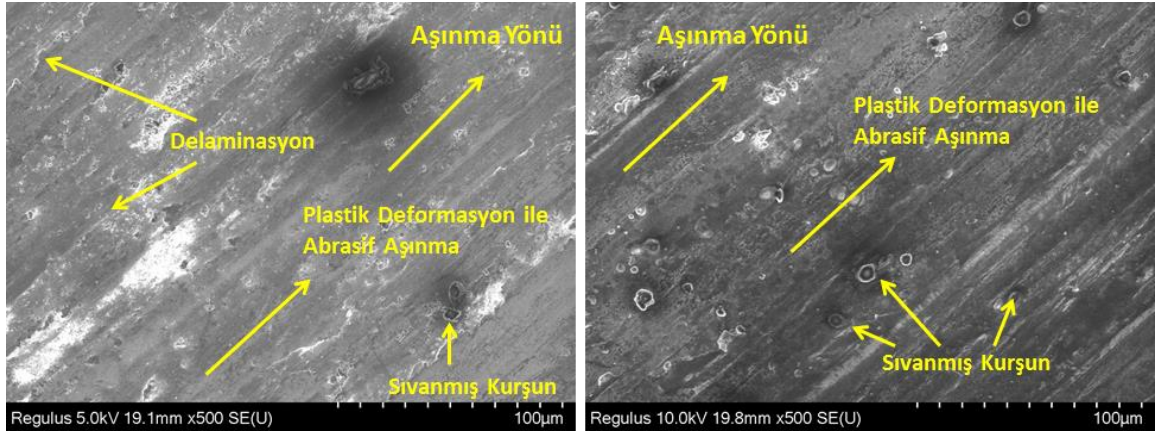
Şekil 7.12’de 1mm kalınlığındaki lamine yapılı kompozit D 5N yük ve 25 cm/s kayma hızında yapılan test sonrasında ait görsel verilmiştir. Kompozitin bileşenlerinden bronzun yüzeyinde sıvanmış kurşun partikülleri bulunurken  $Ni_3Al$ ’ın yüzeyinde ise mikro kesmeler görülmüştür. Uygulanan 5N yük ile bronzun yüzeyindeki kurşun partikülleri artarken boyutlarının daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Bronzun ve  $Ni_3Al$ ’ın aşınma yüzeyinde mikro kesmelerin arttığı görülmektedir.

Şekil 7.13’de kompozit D’nin bileşenlerinden bronz ve GG25’in bulunduğu kesite ait görsel paylaşılmıştır. Görsel incelendiğinde yüksek yük ile yapılan testler sonunda bronz ve GG25’in aşınma yüzeyinde delaminasyon sayısının arttığı görülmektedir.



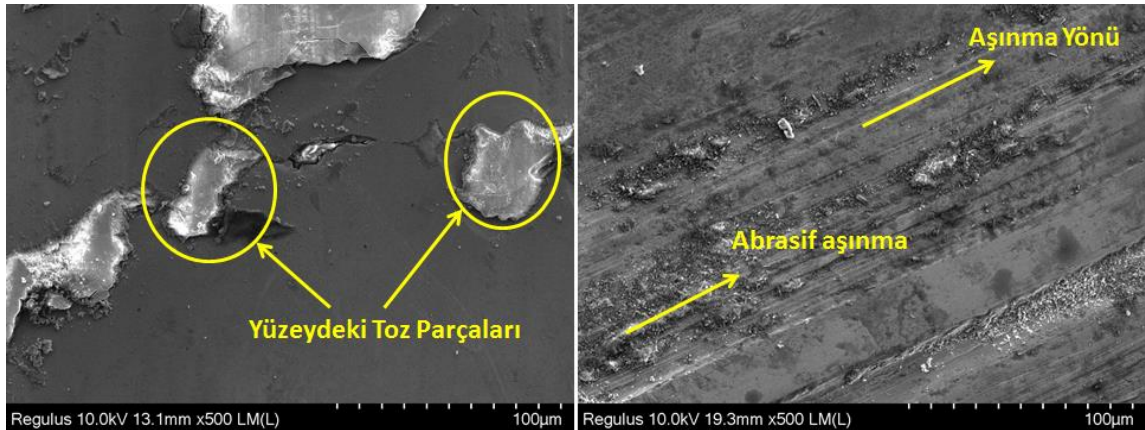
Şekil 7.13. 5N yük ve 25 cm/s hız altında tamamlanan test sonrası kompozit D’ye ait farklı bir mikroyapı (100x)

Kompozit C ve kompozit D’nin lamineleri farklı yönde yerleştirilmesi ve test koşullarının farklı olmasına rağmen benzer davranışlara sahip oldukları gözlenmektedir. Ayrıca, bronzun aşınma yüzeyindeki sıvanmış kurşun partikülleri artan sürtünme hızı ile artarken boyutlarının küçüldüğü tespit edilmiştir.



Şekil 7.14. 3N-25 cm/s ve 5N-50cm/s test koşullarındaki bronza ait SEM görüntüleri

Bronzun 3N yük ile 25 cm/s kayma hızı ve 5N yük ile 50 cm/s kayma hızında yapılan testler sonrasında ait SEM görüntüleri şekil 7.14'te paylaşılmıştır. Bronz, 3N yük ile 25 cm/s kayma hızında tamamlanan test sonrası plastik deformasyon ile abrasif aşınırken yükün ve hızın artması ile ayrıca delaminasyon aşınmada görülmektedir. Yüksek yük ve yüksek hız sürtünme koşullarında bronz yüzeyinde plastik deformasyon da belirgin olarak gözlenmektedir. Sıvanmış kurşun partikülleri de uygulanan yükün ve hızın artması ile arttığı tespit edilmiştir.

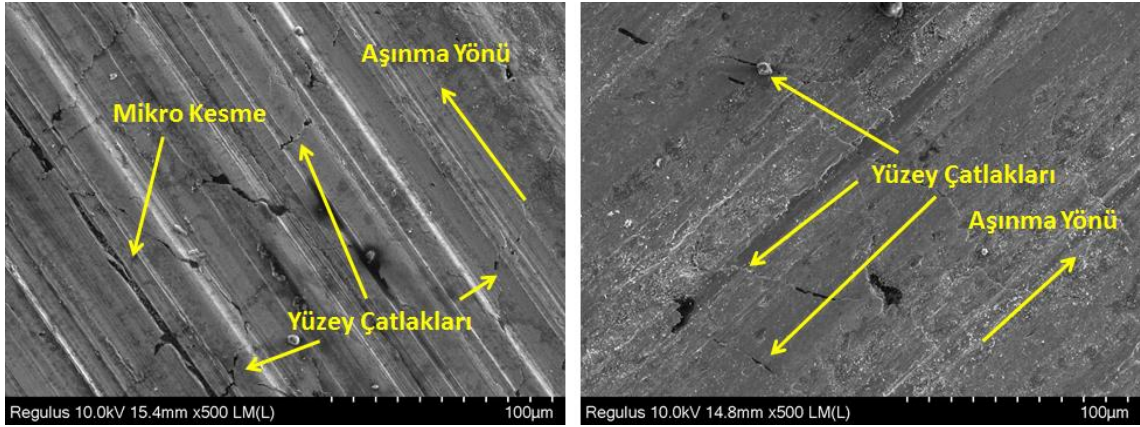


Şekil 7.15. 3N-25cm/s ve 5N-50cm/s test koşullarına Ni<sub>3</sub>Al'a ait SEM görüntüsü

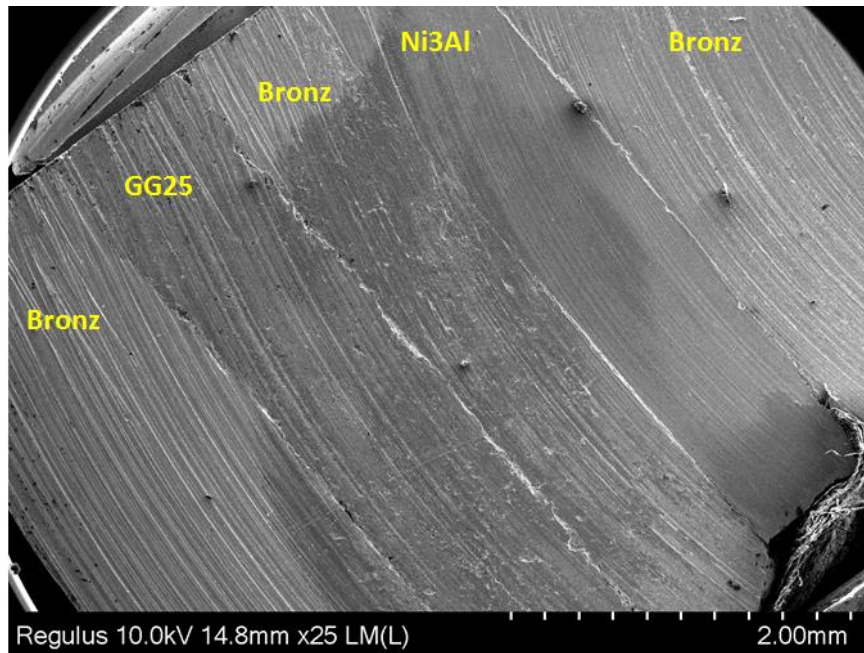
Ni<sub>3</sub>Al numunesinin 3N yük ile 25 cm/s kayma hızı ve 5N yük ile 50 cm/s kayma hızında yapılan testler sonrasında ait SEM görüntüleri şekil 7.15'de verilmiştir. 3N yük ile 25 cm/s kayma hızında Ni<sub>3</sub>Al numune yüzeyinde toz parçacıklarına rastlanırken aşınmanın pek

gerçekleşmediği görülmektedir. Ni<sub>3</sub>Al yüzeyinde 5N yük ile 50 cm/s sürtünme hızında gerçekleşen test sonrasında alüminyum oksit ve/veya demir oksit tabakası gözlenmiştir ve bu oksit tabakası abrasif aşınmıştır.

GG25 numunesinin 3N yük ile 25 cm/s kayma hızı ve 5N yük ile 50 cm/s kayma hızında yapılan testler sonrasına ait SEM görüntüleri şekil 7.16'da paylaşılmıştır. Görüntüde, GG25 yüzeyinde uygulanan test şartlarında mikro kesmeler ile yüzey çatlakları tespit edilmiştir. 5N yük ile 25 cm/s kayma hızında sürtünme ve aşınma testleri sonrası kompozit D'ye ait SEM görüntüsü (25x) şekil 7.17'de paylaşılmıştır.

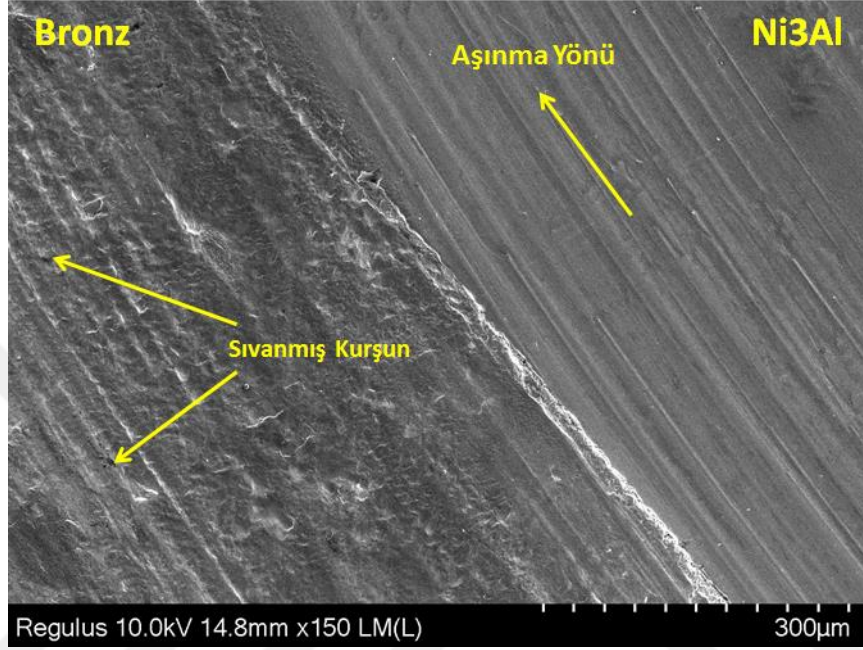


Şekil 7.16. 3N-25cm/s ve 5N-50cm/s test koşullarında GG25'e ait SEM görüntüsü

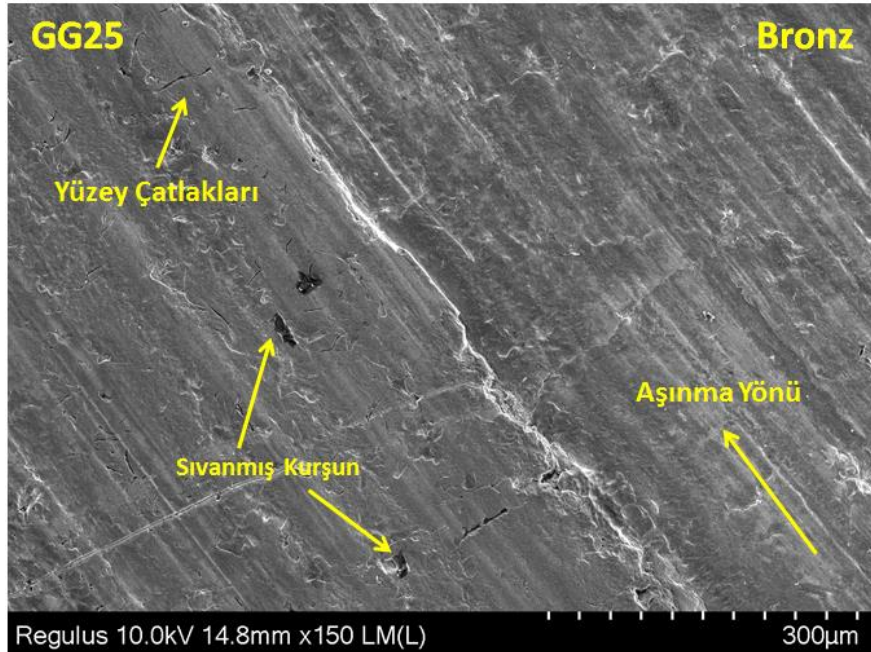


Şekil 7.17. 5N-25cm/s test koşulunda kompozit D'ye ait SEM görüntüsü

Şekil 7.18’de 5N yük ile 25 cm/s kayma hızında sürtünme ve aşınma testlerinden sonrası kompozit D’ye ait SEM görüntüsü (150x) paylaşılmıştır. Bu görüntüde Ni<sub>3</sub>Al’ın yüzeyinde aşınma belli belirsiz gözlenirken bronzun yüzeyinde sıvanmış kurşun partikülleri bulunmaktadır.

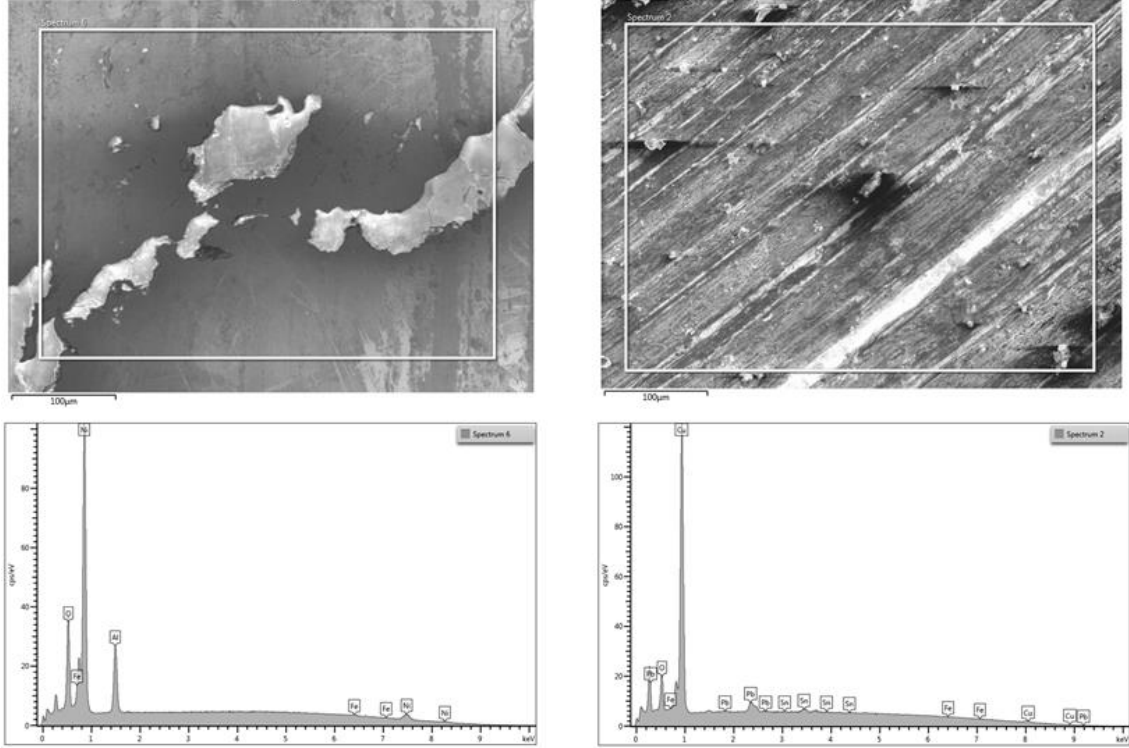


Şekil 7.18. 5N-25cm/s test koşullarında kompozit D’ye (bronz-Ni<sub>3</sub>Al) ait SEM görüntüsü



Şekil 7.19. 5N-25cm/s test koşullarında kompozit D’ye (GG25- bronz) ait SEM görüntüsü

Şekil 7.19’da 5N-25cm/s test koşullarında kompozit D’ye (GG25- bronz) ait SEM görüntüsü (150x) verilmiştir. Bu görüntüde bronzun yüzeyinde adhesif ve abrasif aşınma gerçekleşirken sıvanmış kurşun partiküllerinde bulunduğu gözlenmiştir. Görüntünün sol tarafında yer alan GG25’in aşınma yüzeyinde çatlaklara rastlanmıştır. Bunlara ilaveten bu alaşımlar arasında ara yüzey bileşimi görülmektedir.

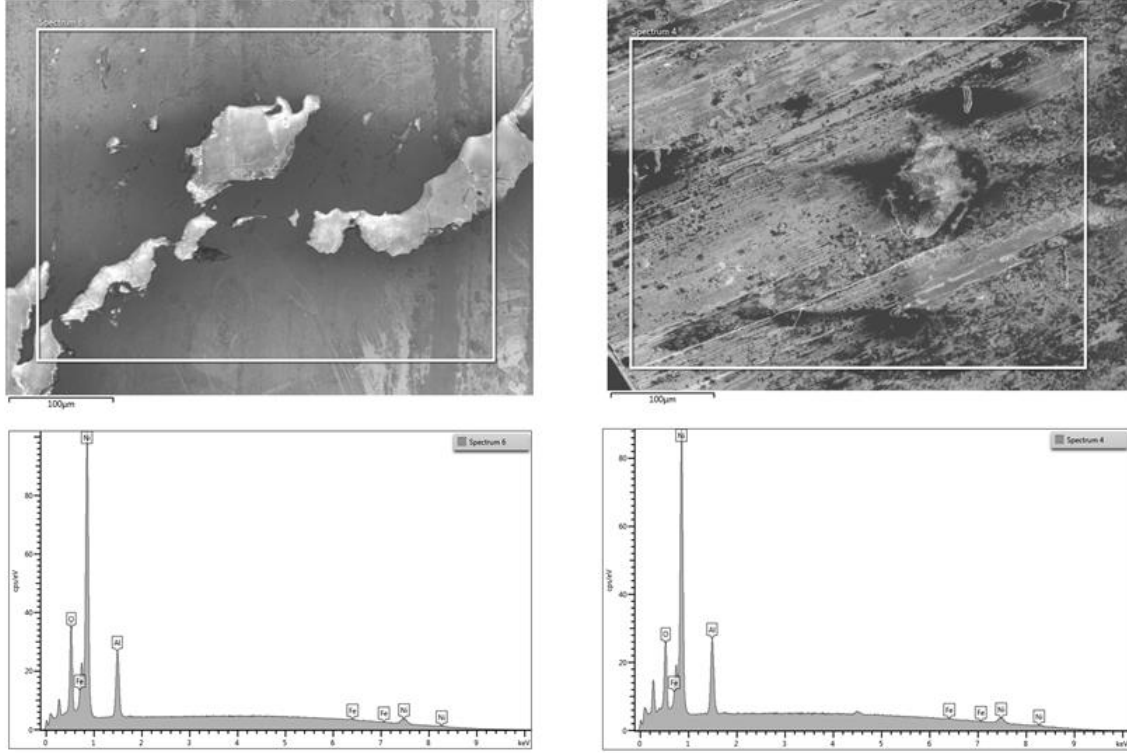


Şekil 7.20. Bronz alaşımı EDS analizi (3N-25 cm/s ve 5N-50 cm/s test koşullarında)

Çizelge 7.9. EDS Bronz alaşımı ağırlıkça oranları(%)

Bronz Alaşımı Ağırlıkça %		
Bronz	3N-25 cm/s	5N-50 cm/s
O	5.95	5.75
Fe	0	0.28
Cu	80.29	78.82
Sn	4.8	5.21
Pb	8.96	9.94
<b>Toplam</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Bronzun 3N yük ile 25 cm/s kayma hızı ve 5N yük ile 50 cm/s kayma hızında yapılan testler sonrasında ait EDS analiz sonucu şekil 7.20’de paylaşılmıştır. Bu analizden elde edilen ağırlıkça bronz alaşımı oranları (%) çizelge 7.9’da paylaşılmıştır. Bronz alaşım yüzeyinde oksit tabakası oldukça düşüktür.

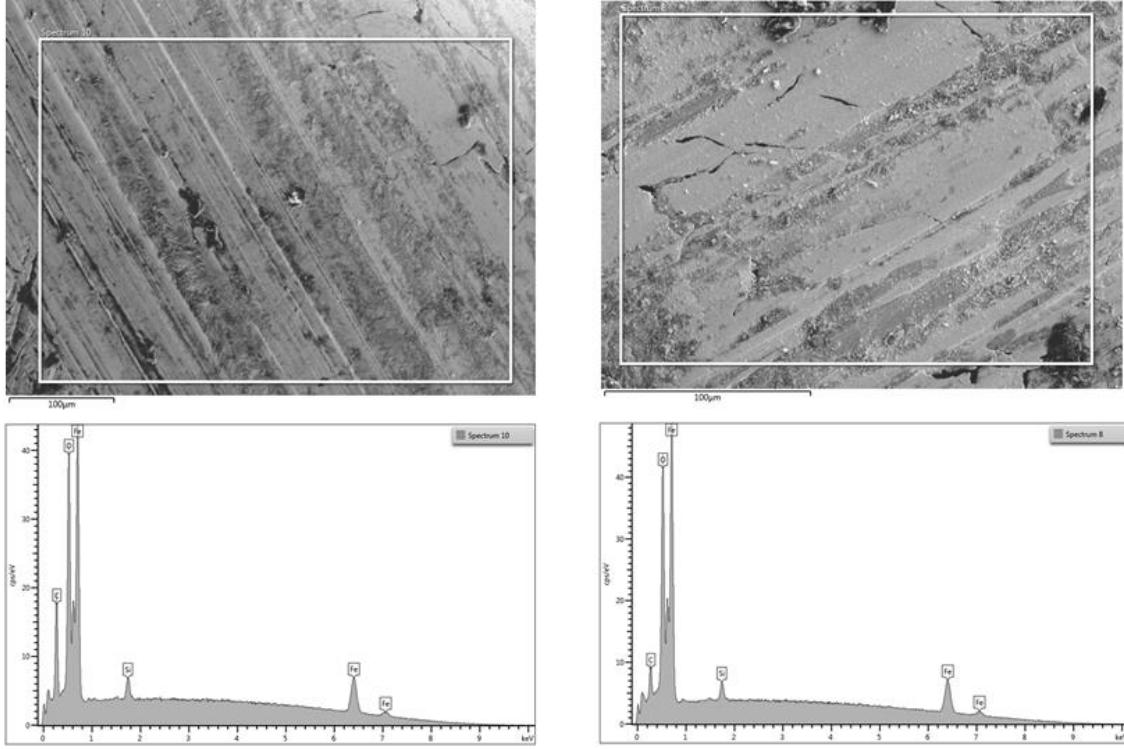


Şekil 7.21. Ni<sub>3</sub>Al alaşımı EDS analizi (3N-25 cm/s ve 5N-50 cm/s test koşullarında)

Çizelge 7.10. EDS Ni<sub>3</sub>Al alaşımı ağırlıkça oranları (%)

Ni <sub>3</sub> Al Alaşımı Ağırlıkça %		
Ni <sub>3</sub> Al	3N-25 cm/s	5N-50 cm/s
O	9.36	7.32
Al	11.49	12.89
Fe	3.48	3.14
Ni	75.67	76.65
<b>Toplam</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

$Ni_3Al$  alaşımının 3N yük ile 25 cm/s kayma hızı ve 5N yük ile 50 cm/s kayma hızında yapılan testler sonrasına ait EDS analiz sonucu Şekil 7.21'de ve 7.10'da EDS  $Ni_3Al$  alaşımı ağırlıkça oranları (%) paylaşılmıştır.  $Ni_3Al$  alaşımında ağırlıkça yaklaşık %10 oranında oksijen olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla, demir oksit ile alüminyum oksit  $Ni_3Al$  alaşımının yüzeyinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.22. GG25 alaşımı EDS analizi (3N-25 cm/s ve 5N-50 cm/s test koşullarında)

7.11. EDS GG25 alaşımı ağırlıkça oranları (%)

GG25 Alaşımı Ağırlıkça %		
GG25	3N-25 cm/s	5N-50 cm/s
<b>C</b>	18.61	8.31
<b>O</b>	12.58	13.17
<b>Si</b>	1.54	1.65
<b>Fe</b>	67.27	76.87
<b>Toplam</b>	100	100

GG25 alaşımının 3N yük ile 25 cm/s kayma hızı ve 5N yük ile 50 cm/s kayma hızında yapılan testler sonrasında ait EDS analiz sonucu Şekil 7.22’de ve izelge 7.11’de EDS GG25 alaşımı ağırlıkça oranları (%) verilmiştir. GG25 alaşımında ağırlıkça yaklaşık %10 oranında oksijen olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla, oksijen miktarı GG25 yüzeyinde demir oksit oluşturmaktadır.



## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, grafit kalıp içerisine GG25 ve Ni<sub>3</sub>Al levhaları (0.5mm ve 1mm kalınlığındaki) yerleştirilerek üzerine eritilen bronz alaşımı dökülerek lamine yapılı metalik kompozitler üretilmiştir. Farklı yük ve farklı sürtünme hızında hem lamine yapılı metalik kompozitlere hem de bu kompozitleri oluşturan bileşenlere sürtünme ve aşınma testleri uygulanmıştır.

Lamine yapılı metalik kompozitler, içerisinde düşük miktarda GG25 ve Ni<sub>3</sub>Al içermesine karşı sürtünme ve aşınma davranışları Ni<sub>3</sub>Al ve GG25'e yakın olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla, bu kompozitler sürtünme ve aşınma özellikleri nedeni ile fren balata malzemesi olarak bileşenlerindeki malzemelerin yerine kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Genellikle, fren balatalarının 0,35-0,55 değer aralığında sürtünme katsayısına sahip olması beklenir. Elde edilen sonuçlar göre kompozitlerin sürtünme katsayı değerleri en yüksek 0,79 ve en düşük 0,46 olduğu tespit edilmiştir. 5N yük ile 25cm/s sürtünme hızı altında ve 3N yük ile 50cm/s sürtünme hızı altında sürtünme yönüne dik olarak yerleştirilen 1mm'lik kompozit numunenin sürtünme katsayı değerleri sırasıyla 0,46 ve 0,54 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler, kompozit malzemelerin bileşen oranlarının ve oryantasyonu değiştirilmek suretiyle sürtünme katsayısı değerinin istenilen değere ulaşılabilceğini göstermektedir.

Lamine yapılı metalik kompozitlerin bileşenlerinden biri olan Ni<sub>3</sub>Al numunesinin sertlik değeri yapılan ölçümler sonucunda karşı cisim olarak kullanılan GGG60'ın sertlik değerinden yüksek olması sebebiyle Ni<sub>3</sub>Al numunesinin ve bazı kompozitlerin testleri tamamlanamamıştır. Bu yüzden, daha sonra yapılacak araştırmalarda karşı cisim olarak kullanılacak malzemenin sertliği, kompoziti oluşturan bileşenlerin sertlik değerinden yüksek olması önerilmektedir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Açıkbaş, N. Ç., Kara, F., Mandal, H., Kumar, R. & Basu, B. (2009). *Tribolojik Uygulamalara Yönelik SiAlON Seramiklerin Geliştirilmesi*. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. Özel Sayı 192-202
- Açıkbaş, N. Ç. (2009). *Tribolojik Uygulamalara Yönelik SiAlON Seramiklerinin Geliştirilmesi*. [Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Tribolojik uygulamalara yönelik SiAlON seramiklerinin geliştirilmesi (anadolu.edu.tr)
- Alam, S. & Marshall, R. I. (1992). *The testing performance of various bronze bushes*. Journal of Physics D: Applied Physics, 25(9), 1340–1344. doi:10.1088/0022-3727/25/9/010
- Akar, M. A., Sugözü, İ., Bilgi, G. & Kumlu, U. (2023). *Analysis of the wear and friction of brake pad added cashew and ulexite using ANSYS*. International Journal of Automotive Engineering and Technologies, 12(3), 83-91. DOI: 10.18245/ijaet.1302418
- Anderson, A.E. (1992). *Friction and wear of automotive brakes*, in: ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM International, Materials Park, OH, 18: 569-577.
- Baydemir, T. (2021). *Triboloji Enerji ve Doğal Kaynakları Daha Verimli Kullanmanın Yolu mu?* TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi. (s.36-49) triboloji.pdf (tubitak.gov.tr)
- Bayrakçeken, H. & Düzgün, M. (2005). *Vehicles brake efficiency and braking distance analysis*. Gazi University Journal of Polytechnic Vol: 8, No:2 pp.153-160
- Bergmann, F., Eriksson, M. & Jacobson, S. (1999). *A software based measurement system or test and analysis of automotive brake squeal*. TriboTest Journal, 5(3): 265-275

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Beşergil, B. (2023). Erişim: Prof. Dr. Bilsen Beşergil (bilsenbesergil.blogspot.com) Erişim Tarihi: 20.12.2023
- Bhushan, B. (2000). Modern tribology handbook. Bölüm 32-41. CRC, A.B.D.
- Bijwe, J. (1997). *Composites as a friction material: recent developments in non-asbestos fiber reinforced friction materials-A review*. Polymer Composites, 18: 378-396
- Bijwe, J., Aranganathan, N., Sharma, S., Dureja, N. & Kumar, R. (2012). *Nano-abrasives in friction materials-influence on tribological properties*. Wear, 296(1), 693-701
- Blau, P.J., Jolly, B.J., Qu, J., Peter, W.H. & Blue, C.A. (2007). *Tribological investigation of titanium-based materials for brakes*. Wear 263 1202–1211.
- Boz M. & Kurt A. (2006). *Toz metal fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma performansı üzerine çinkonun etkisi*. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 21(1):115-121.
- Boz, M. & Kurt, A. (2007). Theeffect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on thefrictionperformance of automotivebrakefrictionmaterials. Tribology International. 40(7), 1161-1169
- Can A.Ç. (2006). *Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi*. Birsen Yayınevi, İstanbul,
- Campbell, F. (2008). *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. Ohio: ASM International.
- Cho, M.H., Kim, S.J., Basch, R.H., Fash, J.W & Jang, H. (2003). *Tribological study of gray cast iron with automotive brake linings: The effect of rotor microstructure*. Tribology International. 36(7):537-545. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(02\)00260-8](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00260-8)

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Cho, K.H., Jang, H., Hong, Y.S., Kim, S.J., Basch, R.H. & Fasch, J.W. (2008). *The Size Effect of Zircon Particles on the Friction Characteristics of Brake Lining Materials*. Wear, 264, 291–297
- Çetinkaya, S. (2000). *Trafik güvenliği açısından taşıt güvenlik sistemleri*. Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi. 3(1):7-16
- Deamaley, I. (1985). *Adhesive, abrasive and oxidative wear in on ion imploanted metals*. Materials Science-Engineering. 69: 139-147
- Dimiduk, D.M., Thompson, A.W. & Williams, J.C. (1993) Phil.Mag.A. Vol.67, sayfa 675
- Dowson, D. (1979). *History of tribology*, LongmanInc, Newyork
- Düzgün, M. & Yıldız, Y. (2009). *Soğutma kanallı fren disklerinin frenleme kuvvetlerine ve ısı değişimine etkileri*. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu Karabük, Türkiye
- Elzayady, N. & Elsoeudy, R. (2021). *Microstructure and wear mechanisms investigation on the brake pad*. Journal of Materials Research and Technology 11: 2314-2335. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.02.045
- Erdoğan, M. (2001). *Mühendislik alaşımlarının yapı özellikleri demir dışı alaşımları*. Cilt 2. Nobel Yayınevi. Ankara. (s. 395-444)
- Eriksson, M., Bergman, F. & Jacobson, S. (1999). *Surface characterisation of brake pads after runing under silent and squeeling conditions*. Wear, 232: 163-167

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Eriksson, M. (2000). *Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal. Comprehensive Summaries Of Uppsala Dissertations From The Faculty Of Science And Technology*. Uppsala.
- Eriksson, M. & Jacobson S. (2000). *Tribological surfaces of organic brake pads*. *Tribology International*. 33: 817-827
- Eriksson, M., Bergman, F. & Jacobson, S. (2002). *On the nature of tribological contact in automotive brakes*. *Wear*, 252: 26-36
- Ertan, R. & Yavuz, N. (2010). *Balata Malzemelerinde Kullanılan Yapısalların Balatanın Tribolojik ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi*, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 15, Sayı 1
- Fenton, J. (1996). *Handbook of Vehicle Design Analysis*. Warrendale
- Ghasemi-Kahrizsangi A., Kashani-Bozorg S.F. (2012). *Microstructure and mechanical properties of steel/TiC nano-composite surface layer produced by friction stir processing*. *Surf Coat Technol* 209:15–22
- Groover, M.P. (2007). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. Upper Saddle River. NJ: Prentice-Hall.3rd Ed., ISBN: 978-0-471-74485-6
- Gültekin, D. (2007). *Metal Matrisli Kompozit Fren Diski Üretimi ve Karakterizasyonu*. [Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü] Sakarya.
- Handa, Y. & Kato, T. (1996). *Effects of Cu Powder, BaSO<sub>4</sub> and Cashew Dust on the Wear and Friction Characteristic of Automotive Brake Pads*. *Tribology Transactions*, Vol.39, pp. 346-353

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Harper, G.A. (1998). *Brakes and friction materials: The history and development of technologies*. Mechanical. Engineering Publications Limited, London, England.
- Hemath Kumar, G., Bapu, B.R., Sagar, R. & Mohit, H. (2010). *The abrasive wear behaviour of Al-SiCp composites for automotive parts In: Frontiers in automobile and mechanical engineering 2010*. Chennai, India. DOI:10.1109/FAME.2010.5714798
- Ho S.C., Lin J.H.C. & Ju C.P., (2005). *Effect of Fiber Addition on Mechanical and Tribological Properties of A Copper/Phenolic Based Friction Material*. *Wear*, 258: 861–869
- Hsu, S. & Shen, M. (2000). Wear maps (Chapter 9), “Modern Tribology Handbook”, Bhushan, B., CRC, A. B.D.
- Hutchings, I. M. (1992). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Butterworth-Heinemann Ltd, London. İngiltere
- Işık, F. M., (2007). *Titanyum alüminat intermetalik bileşiklerinin üretimi ve karakterizasyonu*. [Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]
- Jahanmir, S. (1994). *Friction and Wear of Ceramics*. Marcel Decker Inc, New York
- Jinfeng, L. (2009). *Effect of graphite particle reinforcement on dry sliding wear of SiC/Gr/Al composites*. *Rare Metal Mater Eng* 38(11):1894–1898
- Kaleli, H. (2019). *Triboloji Prensipleri ve Uygulama Örnekleri*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kısmi Ders Notları. Erişim: Triboloji Prensipleri ve Uygulamalar- TRĞBOLOJĞ PRENSĞPLERĞ ve UYGULAMA ÖRNEKLERĞ Kısmi Ders- Studocu, Erişim Tarihi: 24.12.2019

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Karamış, M.B. & Nair, F. (2008). *Effects of reinforcement particle size in MMCs on extrusion die wear*. *Wear* 265(11–12):1741–1750
- Karamış, M.B., Cerit, A.A., Selçuk, B. & Nair, F. (2012). *The effects of different ceramics size and volume fraction on wear behavior of Al matrix composites (for automobile cam material)*. *Wear* 289:73–81
- Kayalı, E.S., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y. & Çimenoglu, H. (1997). *Hasar Analizi Seminer Notları, TMMOB, İstanbul*
- Kim, S.S., Hwang, H.J., Shin, M.W. & Jang, H. (2011). *Friction and vibration of automotive brake pads containing different abrasive particles*. *Wear*, 271(7), 1194-1202
- Kindrachuk, M., Volchenko, D., Fidrovskaya, N., Dukhota, O., Zhuravlev, D., Ostashuk, M., Porokhovskiy, Y. & Kharchenko, V. (2023). *Wear-friction properties of friction pairs in disc-pad brakes*. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 4(12 (124)):56-61. DOI:10.15587/1729-4061.2023.285699
- Kolluri, D.K., Boidin, X., Desplanques, Y., Degallaix, G., Ghosh, A.K., Kumar, M. & Bijwe, J. (2010). *Effect of Natural Graphite Particle size in friction materials on thermal localisation phenomenon during stop-braking*. *Wear* 268 1472–1482.
- Kozma, M. (2003). *Friction and wear of aluminum matrix composites*. In: *3rd national tribology conference*, Galati, Romania
- Kumar, M. & Bijwe, J. (2010). *NAO friction materials with various metal powders: Tribological evaluation on full-scale inertia dynamometer*, *Wear* 269 826–837
- Kurgan, N. (2022). *Hasar Mekanizmaları Ders Notları*. Erişim: 05. Aşınma Hasarları (4).pdf  
Erişim Tarihi: 20.10.2022

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Kuş H., Altıparmak D. & Başar G. (2016). *Sıcak presleme yöntemi ile üretilmiş uçucu kül takviyeli bronz matrisli fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma özellikleri üzerine kolemanit miktarının etkisi*. Journal of Polytechnic. 19(4):537-546.
- Laassalmonie, A., Chena, I B., Hug, G. & Beauchamp, P. (1988). Phil. Mag. A. Vol.58. S.543
- Ma, Y., Martynková, G. S., Valášková, M., Matějka, V. & Lu, Y. (2008). Effects of ZrSiO<sub>4</sub> in nonmetallic brake friction materials on friction performance. Tribology International, 41(3), 166-174
- Marchinovski, M.J., Taylor, M.E. & Kayser, F.X. (1975). J. of Mat. Sci. 10. s.406
- Mutlu, İ. (2002). *Seramik katkıli asbestsiz otomotiv fren balatası üretimi ve frenleme karakteristiğinin deneysel incelenmesi*. [Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü] Sakarya
- Mutlu, İ., Öner, C., Özdin, K. & Yıldız, E. (2006). *Elyaf Katkıli Asbestsiz Disk Fren Balatalarında Sürekli Frenleme Veriminin İncelenmesi*. Doğu Bölgeleri Araştırılması
- Naidu, M., Bhosale, A., Munde, Y., Salunkhe, S. & Hussein, H. M. A. (2022). *Wear and friction analysis of brake pad material using natural hemp fibers*. Polymers 15(1):1-11. DOI:10.3390/polym15010188
- Naplocha, K. & Granat, K. (2008). *Dry sliding wear of Al/Saffil/C hybrid metal matrix composites*. Wear 265:1734–1740
- Natarajan, N., Vijayanangan, S. & Rajendran, I. (2006). *Wear behaviour of A356/25SiCp aluminium matrix composites sliding against automobile friction material*. Wear 261:812–822

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Nosonovsky, M. & Rohatgi, P.K. (2012). *Biomimetics in materials science*. Springer, New York
- Odabaş, D., Topal & E. S. (1995). *100Cr6 Çeliğinin İki Cisimli Abrasif Aşınma Davranışının Kuru veya Sıvı Sürtünme Şartlarında Deneysel Araştırılması*. 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Denizli, s. 396-405
- Österle, W. & Urban, I. (2004). *Friction layers and friction films on PMC brake pads*, *Wear* 257 215–226
- Pıhtılı, H. (2012). *Makine Elemanları Ders Notları*. Fırat Üniversitesi. Elazığ
- Pinca-Bretotean, C., Craciun, A.L., Josan, A.& Ardelean, M. (2019). *Friction and wear characteristic of organic brake pads material*. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 477:012009. DOI:10.1088/1757-899X/477/1/012009
- Praveenkumar, B., Darius Gnanaraj, S. & Ram Prabhu, T. (2023). *Friction, wear, and characterization of magnesium composite for automotive brake pad material*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications* 237(11):146442072311774.
- Ramesh, C.S. (2013). *Tribological characteristics of innovative Al6061–carbon fiber rod metal matrix composites*. *Mater Design* 50:597–605
- Riahi, A.R. & Alpas, A.T. (2001). *The role of tribo-layers on the sliding wear behavior of graphitic aluminum matrix composites*. *Wear* 251(1–12):1396–1407
- Shafiei-Zarghani, A., Kashani-Bozorg, SF. & Zarei-Hanzaki, A. (2009). *Microstructures and mechanical properties of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> surface nano-composite layer produced by friction stir processing*. *Mater Sci Eng A* 500:84–91

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Sharma, S.C. (2001). *The sliding wear behavior of Al6061–garnet particulate composites*. Wear 249:1036–1045
- Shin, M. W., Kim, Y. H. & Jang, H. (2014). *Effect of the abrasive size on the friction effectiveness and instability of brake friction materials: a case study with Zircon*. 55(3), 371-379. DOI:10.1007/s11249-014-0361-9
- Shorowordi, K.M., Haseeb, A.S.M.A. & Celis, J.P. (2004). *Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminum MMC sliding against phenolic brake pad*. Wear 256 (11–12):1176–1181
- Stone, R. & Ball, J.K. (2004). *Automotive Engineering Fundamentals*, SAE International.
- Sugözü, İ. & Mutlu, İ. (2009). *Fren Balatası Üretiminde Toz Karıştırma Süresinin Frenleme Karakteristiğine Etkisinin Araştırılması*. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09). 13-15 Mayıs, Karabük, Türkiye
- Sun, W., Zhou, W., Liu, J., Fu, X., Chen, G. & Yao, S. (2018). *The Size Effect of SiO<sub>2</sub> Particles on Friction Mechanisms of a Composite Friction Material*. Tribology Letters. 35, 66–75. DOI:10.1007/s11249-018-0987-0
- Şahin, Y. (2006). *Kompozit Malzemelere Giriş*. 2'ci Baskı, Seçkin Yayıncılık, 29–31, ISBN: 975 02 03283
- Ted Guo, M.L., Tsao, C-Y.A. (2000). *Tribological behavior of self-lubricating aluminium/SiC/ graphite hybrid composites synthesized by the semi-solid powder-densification method*. Compos Sci Technol 60(1):65–87
- Timur M. & Kılıç H. (2012). *Mermer atıkları kullanılarak üretilen otomotiv fren balatasının sürtünme katsayısının farklı fren balataları ile karşılaştırılması*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 19(1):10-14.

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Topuz, P. & Topuz, A. (2018). *Otomobil Disk Fren Balatalarının Deneysel Yöntemlerle Karakterizasyonu ve Karşılaştırılması*. Marmara Fen Bilimleri Dergisi. 3: 241-248  
DOI: 10.7240/marufbd.403700.
- Washabaugh, F. J. (1987). *EMCOR 66 Ultra-Short Fibers for Asbestos-Free Friction Materials*, SAE 860630. DOI:10.4271/860630
- Wei, Y. (2011). *Characterizations of DLC/MAO composite coatings on AZ80 Magnesium alloy*. Acta Metall Sin 47:1535–1540
- Welding Handbook (1984). (Cilt 4). United States: American Welding Society.
- Wu, Y. (1997). *A study of the optimization mechanism of solid lubricant concentration in Ni/MoS<sub>2</sub> self-lubricating composite*. Wear 205:64–70
- Yavuz, H. & Bayrakceken, H. (2022). *Investigation of friction and wear behavior of composite brake pads produced with huntite mineral*. International Journal of Automotive Science and Technology 6 (1): 9-16. DOI:10.30939/ijastech.1022247
- Yılmaz, A. C. (2022). *Effects of fly ash introduction on friction and wear characteristics of brake pads*. International Journal of Automotive Engineering and Technologies, 11(3), 96-103. <https://doi.org/10.18245/ijaet.1108124>