

Dökme Demir-Nikel Alüminat-Bronz Tabakalı Kompozitin Sürtünme ve Aşınma
Davranışları

Gözde Ergün Ağdacı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2019

Friction and Wear Behavior of Cast Iron-Nickel Aluminide-Bronze Laminate Composite

Gözde Ergün Ağdacı

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Metallurgical and Materials Engineering

August 2019

Dökme Demir-Nikel Alüminat-Bronz Tabakalı Kompozitin Sürtünme ve Aşınma
Davranışları

Gözde Ergün Ağdacı

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Malzeme Bilimi Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. İbrahim Çelikyürek

Ağustos 2019

ONAY

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Güzde Ergün Ağdacı'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Dökme Demir-Nikel Alüminat-Bronz Tabakalı Kompozitin Sürtünme ve Aşınma Davranışları" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. İbrahim Çelikyürek

İkinci Danışman : ---

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. İbrahim Çelikyürek

Üye : Prof. Dr. Osman Torun

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Bedri Baksan

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

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. İbrahim ÇELİKÜREK danışmanlığında hazırlamış olduğum ‘Dökme Demir-Nikel Alüminat-Bronz Tabakalı Kompozitin Sürtünme ve Aşınma Davranışları’ başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik 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. 26/08/2019

Gözde Ergün Ağdacı

ÖZET

Bu tez çalışması kapsamında döküm yöntemi ile elde edilmiş GG-25 ve Ni₃Al, kurşunlu bronz alaşımı (Cu6Sn12Pb) ile bu malzemelerden elde edilmiş lamine yapılı kompozit malzemenin sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. İlk olarak GG-25, Ni₃Al ve Bronz malzemesinin ayrı ayrı CSM Tribometre cihazı ile ASTM G99 test standardına uygun olarak test edilmiş ve sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Daha sonra döküm yöntemi ile elde edilmiş lamine yapılı kompozit malzeme benzer standartlarda test edilerek sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiş ve bileşenlerini oluşturan malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca tez çalışmasına konu olan tüm malzemelerin yüzeyleri optik mikroskobu yardımı ile incelenmiş ve sonuçlar raporlanmıştır. Üretilen kompozit malzeme konvansiyonel fren balatalarında kendisini oluşturan bileşenlerindeki malzemeler yerine tercih edilebilir sürtünme ve aşınma özelliklerine sahiptir. Fren balatalarında sürtünme katsayısının 0.5 değerini geçmemesi istenir. Lamine yapılı bu kompozit malzemenin fren balatası olarak kullanılabilmesi için sürtünme katsayısı 0.5 değerinin altına indirilmelidir. Yapılan çalışmalar kompozit malzemenin bileşen oranlarının değiştirilerek sürtünme katsayısının istenilen değerde sağlanabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Triboloji, fren balataları, kompozit malzeme, sürtünme ve aşınma davranışı.

SUMMARY

Within the scope of this master thesis, friction and wear behavior of GG-25 and Ni₃Al, bronze alloy and composite materials which is obtained from these materials were investigated. First, GG-25, Ni₃Al and bronze materials were tested in accordance with ASTM G99 test standard with separate CSM Tribometer and the friction and wear behavior were investigated. The composite material obtained by the casting method was tested in similar standards and the friction and wear behavior were examined and compared with the friction and wear behavior of the materials forming the components. In addition, the surfaces of all the materials subject to the thesis study were examined by scanning electron microscopy and / or light microscopy and the results were reported. The composite material produced has preferable friction and wear properties in conventional brake pads instead of the components in its constituent components. In brake pads, it is requested that the coefficient of friction does not exceed 0.5. In order to use this laminated composite material as brake lining, the coefficient of friction must be reduced to less than 0.5. The studies show that the component ratio of the composite material can be changed and the friction coefficient can be achieved at the desired value.

Keywords: Tribology, brake pads, composite material, friction and wear behavior

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım sırasında, derslerimde ve tez aşamasında bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren, desteğini ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. İbrahim ÇELİKÜREK 'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca sağladıkları olanaklar ve sürekli yardımları için, TEI Malzeme ve Proses Geliştirme Müdürlüğü çalışanlarına, doktora çalışmalarına devam eden Seray DEMİRCİ'ye, değerli Eşime ve son olarak bugünlere gelmemi sağlayan Anne ve Babama teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Sürtünme	4
2.1.1. Sürtünme Katsayısı	4
2.1.2. Statik sürtünme	5
2.1.3. Kinetik sürtünme	5
2.1.4. Sürtünme açısı	5
2.1.5. Yapışma-kayma olayı	6
2.1.6. Gerçek temas alanı	6
2.2. Aşınma	7
2.2.1. Aşınma mekanizmaları	7
3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDE TRİBOLOJİ	9
3.1. Aşınma ve Sürtünme Özellikleri	11
3.2. Hacimsel Oran	14
3.3. Partikül Boyutu	24
3.4. Partikül Şekli	28
3.5. Normal Yükleme	29
3.6. Kayma Hızı	33
3.7. Sıcaklık Etkisi	34
4. FREN SİSTEMLERİ	37
4.1. Kampanalı Frenler	37
4.2. Disk Frenler	38

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5. MATERYAL VE YÖNTEM	40
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	48
6.1. Kümülatif Aşınma.....	48
6.2. Sürtünme Katsayısı	55
6.3. Aşınma Yüzeyleri İncelemesi	57
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Yapışma kayma olayı	6
2.2. Gerçek temas alanı.....	7
3.1. 10 N uygulamalı yükte Al6061-esaslı MMK için kayma mesafesi ve 1.85 m / s kayma hızı ile aşınma oranı değişimleri (Sharma,2001)	12
3.2. Al6061 alaşımı ve karbon elyafı ile güçlendirilmiş kompozitler için kayma hızı ile sürtünme katsayısının değişimi (Ramesh vd.,2013).....	13
3.3. Sünek matrisi aşınmaya karşı koruyan sert ikinci faz parçacıklarının şematik gösterimi (Vencl vd., 2004).....	15
3.4. SiC hacminin alüminyum metal matrisli kompozitin aşınma oranına etkisi (Mondal ve Das, 2006).....	15
3.5. Alüminyum kompozit ağırlık kaybının % SiC takviyesi ile oranı (Cerit vd., 2008)....	16
3.6. KNT hacim oranının, 30 N yük altında 0.1571 ms^{-1} kayma hızında KNT/Al kompozitinin aşınma oranı üzerindeki etkileri (Zhou vd., 2007).....	18
3.7. ÇDKNT'lerin hacim oranı ile aşınma oranının değişimi (Choi vd., 2010).....	19
3.8. Takviye fraksiyonunun kompozitlerin aşınma oranına etkisi (Miyajima ve Iwai, 2003; Prasad ve Rohatgi, 1987; Uyyuru vd., 2007; Karamış vd., 2012).....	21
3.9. 30 N yük altında 0.15 ms^{-1} kayma hızında KNT hacim fraksiyonunun, CNN / Al kompozitinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi, (Zhou vd., 2007).....	22
3.10. Bileşikteki ÇDKNT hacim fraksiyonu ile sürtünme katsayısının değişimi (Choi vd., 2010).....	22
3.11. Mikro ve nano-partiküller ile güçlendirilmiş çeşitli metal matris kompozitler için sürtünme katsayıları (Rohatgi vd., 2011)	23
3.12. Farklı baz alaşımlara sahip kompozitler için grafit içerikli sürtünme katsayısının değişimi (Rohatgi vd., 1992)	24
3.13. Çeşitli SiC partikül büyüklüğünün (% 12% hacim fraksiyonu) magnezyum metal matrisli kompozitin aşınma oranı üzerine etkisi (Zhang vd., 2008).....	26
3.14. Takviye partikül boyutunun kompozitin aşınma oranına etkisi (Karamış vd. 2012). 26	26

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.15. Parçacık boyutunun kompozitlerin sürtünme katsayısına etkisi (Natarajan vd., 2006; Uyyuru vd., 2007; Maleque ve Karim, 2009; Korkut, 2004; Shorowordi vd., 2006; Tyagi, 2005; Zhang vd., 1995; Habibnejad vd., 2010; Rodíguez vd., 2007; rehman vd., 2012).....	27
4.16. Parçacık boyutunun, aşınma oranı (a) ve Al -15% hacim Al ₂ O ₃ metal matrisli kompozitlerin sürtünme katsayısı (b) ile karşılaştırılması (Jun vd., 2006)	27
3.17. Normal yük ve grafit şeklinin, 0.8, 1.2 ve 1.5 MPa yüzey basınçlarındaki aşınma davranışına etkisi (Naplocha ve Granat, 2008)	28
3.18. İnce parçacıklar (F) ve kaba parçacıklar (C) ile güçlendirilmiş metal matrisli kompozitlerin aşınma direncinde iyileşme gösteren çubuk grafik (Mondal ve Das, 2006).....	29
3.19. Normal yük uygulanmış MMK'lerin aşınma oranının değişimi (Natarajan vd., 2006)	30
3.20. Düşük ve yüksek yüklerde aşınma oranının değişimi (Natarajan vd., 2006).....	31
3.21. (a) Sürtünme kuvveti ve (b) Sürtünme katsayısının uygulanan kuvvete göre değişimi (Natarajan vd., 2006).....	32
3.22. (a) Al-Fe kompozitleri (Srivastava ve Mohan, 2011) ve (b) alüminyum matrisli kompozit (Kozma,2003) için kayma hızı ile aşınma oranının değişimi.....	33
3.23. (a) SiC ve B4C (Soy vd., 2011) ile güçlendirilmiş alüminyum metal matrisli kompoziti ve (b) CNT (Choi vd., 2010) ile güçlendirilmiş alüminyum metal matris kompoziti için kayma hızı ile sürtünme katsayısının değişimi.....	34
3.24. Çeşitli MMK'ler ve monolitik alaşımını için test sıcaklığına bağlı sürtünme (a) ve aşınma (b) değerlerindeki değişim (Singh ve Alpas, 1996)	35
3.25. (A) sürtünme katsayısı ve aşınma oranındaki (b) sıcaklığa bağlı değişimleri, (Mousavi vd., 2010)	36
4.1. Kampanalı fren sistemi ve elemanları	37
4.2. Disk fren sistemi ve elemanları	38

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**Sekil****Sayfa**

6.13. Kompozit malzeme 5N-25 cm/sn sürtünme ve aşınma testi sonrası mikro yapılar (Sol GG25- Sağ Bronz)	62
6.14. Bronz alaşımına ait SEM görüntüsü (Sol 3N-25 cm/sn ve Sağ 5N-50cm/sn)	62
6.15. Ni ₃ Al alaşımına ait SEM görüntüsü (Sol 3N-25cm/sn ve Sağ 5N-50cm/sn).....	63
6.16 GG25 Alaşımına ait SEM görüntüsü (Sol 3N-25cm/sn ve Sağ 5N-50cm/sn)	64
6.17. 5N-25cm/sn deki kompozit alaşımına ait SEM görüntüsü.....	64
6.18. 5N-25cm/sn deki kompozit alaşıma ait SEM görüntüsü (Sol Bronz ve Sağ Ni ₃ Al). 65	
6.19. 5N-25cm/sn deki kompozit alaşıma ait SEM görüntüsü (Sol GG25 ve Sağ Bronz). 65	
6.20. 3N-25 cm/sn ve 5N-50 cm/sn Bronz Alaşımı EDS Analizi	66
6.21 3N-25 cm/sn ve 5N-50 cm/sn Ni ₃ Al Alaşımı EDS Analizi.....	67
6.22. 3N-25 cm/sn ve 5N-50 cm/sn GG25 Alaşımı EDS Analizi	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.1. Numune sertlik değerleri	45
5.2. Numunelere uygulanan yük, sürtünme hızı ve mesafe	47
6.1 3N-25 cm/sn numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı	48
6.2 3N-50 cm/sn numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı	50
6.3 5N-25 cm/sn numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı	51
6.4 5N-50 cm/sn numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı	53
6.5 Numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı	54
6.6 Ortalama sürtünme katsayıları	55
6.7. EDS Ağırlıkça Bronz alaşımı oranları (%)	66
6.8. EDS Ağırlıkça Ni ₃ Al alaşımı oranları (%)	67
6.9. EDS Ağırlıkça GG25 alaşımı oranları (%)	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Simgeler**

μ	Sürtünme Katsayısı
F	Sürtünme Kuvveti
P	Normal Yükleme

Açıklama**Kısaltmalar**

ÇDKNT	Çok Duvarlı Karbon Nano-Tüpler
DLC	Elmas Benzeri Karbon
KNT	Karbon Nano-Tüpler
MMK	Metal Matrisli Kompozit
MMNK	Metal Matrisli Nano Kompozitler
PMK	Polimer Matrisli Kompozit
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Dağılımı Spektrometresi)

Açıklama

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Triboloji bilimi, bağıl bir hareket altında birbirleri ile etkileşimde bulunan yüzeylerin bilimi ve teknolojisi ve ilgili uygulamaları içeren çok yönlü bir disiplin olup kelime anlamı Yunanca 'da yıpranma ve sürtünme anlamına gelen 'tribos' kelimesinden türetilmiştir. Triboloji temel olarak sürtünme yağlama ve aşınma konuları ile ilgilenir. (Çelikyürek, Biçer 2016)

Triboloji tarihte ilk olarak milattan önce 3500'li yıllarda sürtünme kuvvetini azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Mısırlı zanaatkarlar büyük taş bloklarını daha kolay bir şekilde taşıyabilmek amacıyla su ile kayganlaştırılmış kızaklar kullandılar. Benzer şekilde Çin 'de milattan önce 1500 ila 400 yılları arasında üretilen porselen kapları taşımak amacıyla kullanılan tekerlekli arabalar resmedilmiştir. (Bhushan, 2011)

Tribolojiye ilk bilimsel yaklaşım Leonardo Da Vinci (1452-1519) tarafından öne sürülmüştür. Leonardo Da Vinci dikdörtgen blok yataklarının düz bir yüzey üzerinde hareketini düzenleyen yasalar hazırladı ve sürtünme katsayısı kavramını oluşturuldu. Ne yazık ki Leonarda Da Vinci'nin çalışmaları uzun süre yayınlanmadan kaldı. İlerleyen zamanlarda Fransız fizikçisi Guillume Amontons, 1699 yılında sürtünme kurallarını yeniden oluşturdu. Fransız fizikçi Guillume Amontons sürtünme kuvvetinin birbirleri ile etkileşimde olan ve aralarında bağıl olan iki yüzey arasındaki normal yük ile doğru orantılı olduğunu ve bu kuvvetin görünür temas alanına bağılı olmadığını ileri sürmüştür. Bu çalışma yine Fransız bir fizikçi Charles-Augustin Coulomb tarafından doğrulanmıştır. Charles-Augustin Coulomb, Amontons'un ileri sürdüğü bu iki kurama ilave olarak sürtünme kuvvetinin hızdan bağımsız olduğunu kuramını eklemiştir. Leonardo Da Vinci'nin temelini attığı Guillume Amontons tarafından geliştirilen ve son olarak Charles-Augustin Coulomb tarafından tamamlanan kanunlar günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. (Bhushan, 2011)

1500'lü yıllarda, özellikle yatak malzemelerinin kullanımında birçok başka gelişme yaşanmıştır. 1684 yılında, Robert Hooke, çelik mil ve bu milleri destekleyen piriç burçların ahşap ve demir rulmanlardan elde edilen yataklar yerine kullanılması gerektiğini

söylemiştir. 1668'de Sir Isaac Newton, tribolojik ile ilgili kayda değer bir gelişme olarak viskoz akış temel yasalarını ortaya koymuş olmasına rağmen yağlama işleminin bilimsel olarak tamamlanması 19. yüzyılın sonlarına kadar devam etti. (Bhushan, 2011)

19. yüzyılın ortalarına gelindiğinde, insanlar kayan yataklardaki çelik-çelik temasının yeteri kadar iyi olmadığını fakat yuvarlanma için yeterli olduğunu düşünüyorlardı. Bu nedenle, bu tip yatak yapılarında Isaac Babbitt 'in geliştirdiği kurşun bazlı alaşımı kullanarak sürtünmeyi iyileştirdiler. 19. Yüzyılın sonlarına doğru buhar makinelerinin ve elektrik jeneratörlerinin geliştirilmesi ile birçok mühendisi günümüzde de bilinen rulmanların geliştirilebilmesi için çalışmalar yapmaya yöneltti. 1890'a gelindiğinde, sıvı film yağlaması, sıvı mekaniği konularına önem verilmeye başlandı. Reynolds, yağlanmış yatağın fiziksel özelliklerini araştırdı ve böylece hidrodinamik teorisi ortaya çıktı. 1937 yılında hidrodinamik teorisine yüksek temas basıncı denklemi de dâhil edilerek elastohidrodinamik teorisi oluşturuldu. İlerleyen yıllarda triboloji konusunun derinliklerine inilerek bir gereksinimi karşılamak amacıyla malzeme aramak yerine, malzeme, kaplama ve yağlama maddeleri geliştirmek için çabalar harcanmaya başlandı. (Bhushan, 2011)

Gelişen teknoloji ve akademik çalışmalar ile beraber triboloji bilimi, ihtiyaçları önceden tahmin etmeye ve bu ihtiyaçlara yönelik yeni malzemeler geliştirmeye başladı. Bunun yanında, yapışma ve sürtünme üzerine bazı eski sorular atomların ve atom altı parçacıkların davranışları açısından incelenmiştir.

20. yüzyıldaki triboloji, yüzey bilimi, yağlama kimyası, makine tasarımı ve davranışı, malzeme bilimi, reoloji, akışkanlar mekaniği, vb. gibi bir çok disiplinin birleşiminden oluşmaktadır. Tıpkı 19 uncu yüzyılda buhar makinelerinin ve elektrik jeneratörlerinin gelişmesiyle beraber hali hazırda kullanılan yatak tiplerininin yetersiz olması nedeniyle rulmanların gelişmesi gibi, günümüzde de gelişen teknolojiye ayak uydurmak amacıyla yeni malzemeler geliştirmek veya var olan malzemelerin tribolojik özelliklerini iyileştirmek ciddi bir önem kazanmıştır. Bu nedenle araştırmacılar malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını iyileştirmek amacıyla konvansiyonel malzemeler kullanmak yerine matris yapısına sahip kompozit malzemeler kullanmak üzere çalışmalar gerçekleştirmeye başlamıştır.

Bu tez çalışması kapsamında döküm yöntemi ile elde edilmiş GG-25 ve Ni₃Al, bronz alaşımı ile bu malzemelerden elde edilmiş kompozit malzemenin sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. İlk olarak GG-25, Ni₃Al ve bronz malzemesinin ayrı ayrı CSM Tribometre cihazı ile ASTM G99 test standardına uygun olarak test edilmiş ve sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Daha sonra döküm yöntemi ile elde edilmiş lamine yapılı kompozit malzeme benzer standartlarda test edilerek sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiş ve bileşenlerini oluşturan malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları ile karşılaştırılmıştır.

Tez çalışması kapsamında otomotiv sektöründe kullanılan disk-fren mekanizmalarındaki fren balatalarda alternatif olabilecek bir kompozit malzemenin üretilmesi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Sürtünme

Sürtünme günlük yaşantımızda büyük rol oynar. Sürtünme olmadan yürümek, araç kullanmak gibi günlük faaliyet imkânsız olurdu. Çeşitli durumlarda, düşük veya yüksek sürtünme arzu edilebilir. Örneğin, taşıt frenleri, kavramalar ve sürtünmeli güç aktarım organları gibi bazı makine elemanları uygulamalarında yüksek sürtünme gerekli olmasına rağmen yatak ve contalar gibi çoğu kayar bileşenlerde sürtünme istenmeyen bir duruma dönüşebilir.

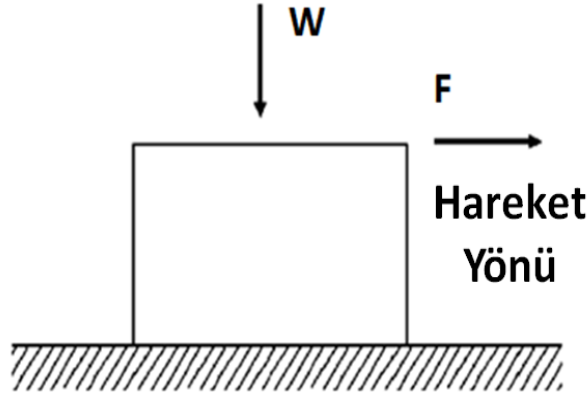
Sürtünme temas halindeki iki cismin göreceli hareketine karşı dirençtir. Sürtünme doğrudan doğruya bir malzeme özelliği değildir. Esas olarak sürtünme olayı birbirleri ile temas halinde bulunan ve çevre ile etkileşim gerçekleştiren en az iki gövdenin tribolojik sisteminin bir özelliğidir. Yaygın olarak kuru ve sıvı sürtünmesi olmak üzere iki çeşit sürtünme türü vardır. Kuru sürtünme aynı zamanda “Coulomb” sürtünmesi olarak da bilinir. Kuru sürtünme, kuru koşullar altında temas sırasında meydana gelirken, sıvı sürtünme, yağlama koşulları altındaki temas sırasında meydana gelir.

2.1.1 Sürtünme Katsayısı

Sürtünme katsayısı, μ olarak adlandırılan nicel bir parametre ile tanımlanabilir. Sürtünme katsayısı, teğet sürtünme kuvvetinin (F) normal yük kuvvetine (P) oranı olarak tanımlanan boyutsuz bir değerdir.

$$\mu = \frac{F}{P} \quad (2.1)$$

Şekil 2.1 'de de gösterildiği gibi, üst hacmi sabit bir yüzey üzerinde hareket ettirmek için teğetsel bir kuvvet (F) gereklidir. Yukarıda açıklandığı gibi, bu iki kuvvet arasındaki oran sürtünme katsayısı olarak bilinir.



Şekil 2.1. Bir yüzeyde kayan bir cismin şematik diyagramı

2.1.2 Statik sürtünme

Statik sürtünme, birbirine göre hareket etmeyen iki katı nesne arasındaki sürtünmedir. Örneğin, statik sürtünme, bir nesnenin eğimli bir yüzeyden aşağı kaymasını önleyebilir. Genellikle μ_s olarak ifade edilen statik sürtünme katsayısı genellikle kinetik sürtünme katsayısından daha yüksektir. Statik sürtünme olayı kaymanın olmadığı durumda gerçekleşir. Çünkü yüzeyler, aralarındaki yapışkan bağlar nedeniyle birbirlerine “yapışma” eğilimindedir. Statik sürtünme kuvveti, bir nesnenin hareket etmeden önce, uygulanan bir kuvvet ile aşılması gerekir. Kayma anında meydana gelir, statik sürtünme artık uygulanabilir değildir ve kinetik sürtünme uygulanabilir hale gelir.

2.1.3 Kinetik sürtünme

Kinetik (veya dinamik) sürtünme, iki gövde birbirine göre hareket ettiğinde ve birbirine sürtündüğünde meydana gelir. Kinetik sürtünme katsayısı tipik olarak μ_k olarak ifade edilir ve genellikle statik sürtünme katsayısından daha azdır.

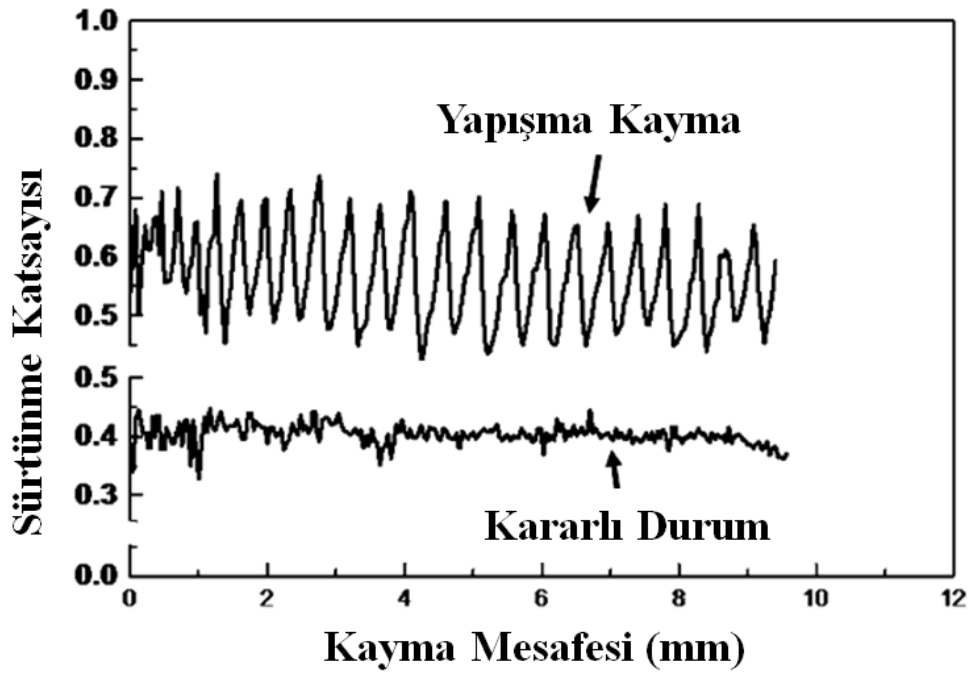
2.1.4 Sürtünme açısı

Bazı durumlarda, statik sürtünmeyi, birbirleri ile temas halinde bulunan iki yüzeyden birinin kaymaya başlayacağı maksimum açı olarak tanımlamak daha faydalı olacaktır. Tanımlanan bu maksimum açı değerine sürtünme açısı denir. θ temas eden yüzeyler arasındaki yatay açı ve μ nesnelere arasındaki statik sürtünme katsayısı olmak üzere sürtünme açısı aşağıdaki denklem yardımı ile tanımlanabilir.

$$\tan \theta = \mu \quad (2.2)$$

2.1.5 Yapışma-kayma olayı

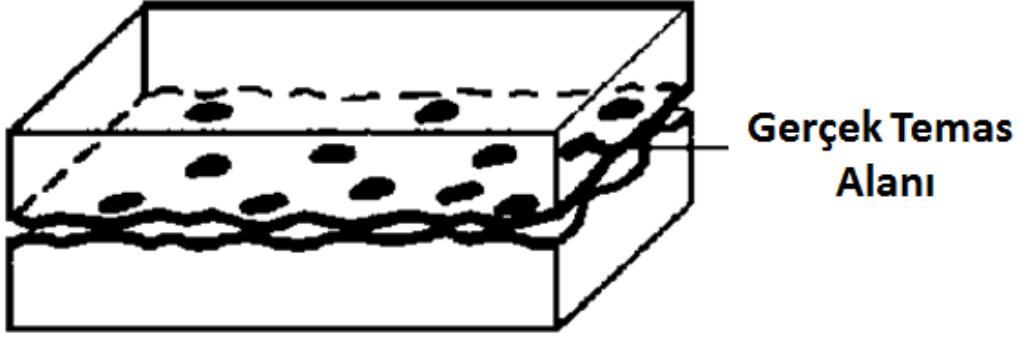
Kayma sırasındaki önemli bir olayda yapışma-kayma hareketidir. Yapışma-kayma hareketi sırasında sürtünme kuvveti sabit kalmaz, kayma mesafesinin veya zamanın bir fonksiyonu olarak belirgin şekilde salınır. Yapışma fazı sırasında, sürtünme kuvveti kritik bir değer oluşturur. Kritik kuvvet elde edildikten sonra (statik sürtünmenin üstesinden gelmek için), ara yüzde kayma meydana gelir ve sürtünme kuvvetinin azalması için enerji serbest bırakılır. Bu yapışma-kayma olgusu, statik sürtünme katsayısının kinetik sürtünme katsayısından büyük olması durumunda ortaya çıkabilir. Şekil 2.2 de örnek bir yapışma kayma olayı gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Yapışma kayma olayı

2.1.6 Gerçek temas alanı

Mükemmel bir şekilde işlenmiş düz yüzeyler bile kusursuz bir şekilde pürüzsüz değildir. İki yüzey temas geçtiğinde, temas sadece belirsizliklerin tepelerinde meydana gelir ve yük temas eden belirsizliklerin deformasyonu ile desteklenir. Gerçek temas alanı genellikle basınca bağlı olarak değişir ve görünür temas alanına kıyasla çok küçüktür. Şekil 2.3 de temsili bir gerçek temas alanı gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Gerçek temas alanı

2.2. Aşınma

Aşınma, bir yüzey ile temas eden madde veya maddeler arasındaki bağıl hareket neticesinde oluşan malzeme ve kütle kaybı olarak tanımlanabilir. Aşınma çoğu durumda yüzeylerdeki yüzey etkileşimleri nedeniyle oluşur. Aşınma, birim zaman veya kayma mesafesi başına çıkarılan malzemenin kütle, hacim veya yükseklik kaybı olarak tanımlanan “aşınma oranı” ile ölçülür.

2.2.1 Aşınma mekanizmaları

Önemli aşınma mekanizmaları, adhesif aşınma, abrasif aşınma, delaminasyon aşınması, erozyon aşınması, yorulma aşınması ve korozif / oksidatif aşınmadır.

Adhesif aşınma, uygulanan yük altında birbirleri ile temasta olan iki pürüzsüz metal yüzey arasında oluşan bir aşınma türüdür. Normal basınç yükü altında, iki metal yüzey arasındaki küçük pürüzlerdeki yerel basınç yükselerek malzemenin akma dayanımının üzerine çıkar ve uygulanan yükü karşılayabilmek için plastik deformasyona maruz kalır. Plastik deformasyon neticesinde ortaya çıkan karşılıklı kuvvetler pürüzsüz metal yüzeylerini yapıştırma eğilimindedir. Bağıl hareket neticesinde, plastik deformasyon sebebiyle yapışma eğiliminde olan yüzeyler temas yüzeylerin kesilir. “Adhesif” tanımlaması, temas eden malzemelerin yüzeylerindeki pürüzler arasında güçlü metalik bağların oluşması nedeniyle belirlenir.

Abresif aşınma, sert bir yüzey, kendisinden daha yumuşak bir yüzey boyunca kaydığına meydana gelen bir aşınma türüdür. Birbirleri ile temasta olan ve bağıl harekete

maruz kalan iki yüzey arasında sıkışan sert parçacıklar temas halindeki yüzeylere karşı aşındırıcı etkiye neden olur. Abresif aşınma hem metalik hem de metalik olmayan parçacıklar nedeniyle oluşabilmesine rağmen çoğu durumda metalik olmayan parçacıkların MMK'lerde aşınmaya neden olmaktadır.

Korozif aşınma Çevre ile etkileşen malzeme yüzeyleri arasındaki dinamik etkileşimler, Korozif aşınma sürecinde önemli bir rol oynar. Korozif aşınmada, temas yüzeyleri çevre ile reaksiyona girer ve böylece reaksiyon ürünleri temas yüzeylerinde oluşur. Kayma etkileşimleri sırasında, reaksiyon ürünlerinin aşınması, çatlak oluşumu ve / veya korozyonun bir sonucu olarak ortaya çıkar. Korozif aşınma, malzemelerin yüzeylerindeki tepkime ürünleri temas halindeki iki yüzeyin fiziksel etkileşimi yoluyla giderildiğinde meydana gelir. Bu nedenle, Korozif aşınma korozyon ve sürtünmeyi gerektirir.

Yorulma aşınması çevrimsel yüklemelere maruz malzemelerin yüzeyinde meydana gelir. Örneğin, rulmanlar ve dişliler çalışma koşulları sırasında çevrimsel yüklemelere maruz kaldıkları için sıklıkla yorulma aşınması yaşarlar.

3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDE TRİBOLOJİ

Kompozit malzemeler, farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip iki veya daha fazla malzeme içeren tasarlanmış veya doğal olarak oluşmuş malzemelerdir. Belirli bir amaca yönelik tasarlanmış veya doğal olarak oluşmuş olan kompozit malzemelerin özellikleri genellikle monolitik bileşenlerinin özelliklerinden daha üstündür. Literatürde kompozit malzemeler için farklı sınıflandırmalar mevcut olmasına rağmen en çok kabul gören ve oluşturulan matrisinin doğasına dayanan sınıflandırmaya göre, üç çeşit kompozit türü vardır. Bunlar (a) Metal Matrisli Kompozitler (MMK), (b) Polimer Matris Kompozitler (PMK) ve (c) Seramik Matris Kompozitlerdir. (SMK).

MMK'ler havacılık, spor, denizcilik ve otomotiv endüstrilerindeki bir takım özel uygulamalar için üstün mekanik ve tribolojik özelliklerinden dolayı umut vaat eden ve dünya çapında büyük ilgi görmüş malzemelerdir. Metalik olmayan fiberler, partüküller veya lifli ve katı yağlayıcılarla doldurulmuş MMK'ler, mükemmel mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olabilmelerinin yanı sıra performans sırasında bozulma, deformasyon veya kırılma olmadan ağır yükleri destekleyebilme ve yüzey hasarları en aza indirerek iyi tribolojik davranış sergileyebilmelerinden dolayı ilgi çekmektedirler.

Sürtünme ve aşınma, katı yüzeylerin kayması veya yuvarlanması sırasındaki evrensel olaylardır ve genellikle enerji kaybına ve malzeme bozulmasına neden olur. Genel olarak, sürtünme ve aşınma derecesi, katı yüzeyler arasında yağlayıcının uygulanmasıyla kayda değer bir biçimde azalır. Bazı malzeme türleri, uygulamalar sırasında düşük bir sürtünme katsayısına ve aşınma oranına sahiptir ve harici bir yağlayıcı gerektirmez. Bu tür malzemeler kendi kendini yağlayan malzemeler olarak bilinir (Nosonovsky ve Rohatgi, 2012). Kendi kendini yağlayan malzemeleri üretmek için farklı yöntemler vardır. Bu yöntemler, malzemeye elmas benzeri karbon (DLC) (Wei Y vd.,2011) gibi kaplamalar uygulamak ve grafit (Ted ve Tsao, 2000) ve molibden disülfür (Wu Y vd., 1997) gibi katı yağlama maddelerini bir kompozit malzemenin matrisine yerleştirmek. Katı yağlayıcıların katılmasıyla üretilen MMK'ler, kaplanmış malzemelere göre mükemmel tribolojik özellikler, iyi bir korozyon direnci ve daha yüksek yorulma ömrüne sahiptir. Bu nedenle,

kaplanmış malzemelere kıyasla MMK uygulamalarının tercih edilmesine neden olmaktadır.

MMK'ler içine gömülmüş olan liflerin, sert veya yumuşak parçacıkların miktarı, büyüklüğü, şekli ve dağılımı, MMK'lerin aşınma ve sürtünme performansı önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca, takviyeler ve matrisler arasındaki yüzey bağı, MMK'lerin mekanik ve tribolojik özelliklerini etkileyen bir başka önemli faktördür. Genellikle, MMK'lerdeki sert parçacıkların MMK'lerin mukavemetini ve aşınma direncini arttırdığı kabul edilir. Fakat MMK'lerdeki sert parçacıkların miktarı MMK'lerin süneklikleri azaltmaktadır. Öte yandan, MMK'lerdeki yumuşak parçacıklar MMK'lerde katı bir yağlayıcı görevi görür ve bu nedenle MMK'lerin sürtünme katsayısını azaltır. Bu nedenle MMK uygulamasında kullanılan takviyelerin ve yağlayıcı malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyi bilinmesi ve MMK içerisindeki etkilerinin iyi incelenmesi önem teşkil etmektedir. MMK'lerdeki takviyeler ve yağlayıcıların MMK'ler üzerinde istenmeyen etkilere neden olabileceğini ve MMK'lerde beklenmedik özelliklere yol açacağı unutulmamalıdır (Kozma, 2003).

Örneğin SiCp / Al (Al matrisine gömülü SiC partikülleri) kompozitinin üretimi esnasında SiCp / Al kompozit yapısına grafit partiküllerinin takviye edilmesi ile elde edilen grafit gömülü SiCp / Al kompozit malzemesi, grafit takviyesi olmayan SiCp / Al kompozit malzemesi le mukayese edildiğinde grafit takviyeli SiCp / Al kompozit malzemesinin grafit takviyesi olmayan SiCp / Al kompozit malzemesine göre daha iyi aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı gösterdiği belirlenmiştir (Ted ve Tsao, 2000; Jinfeng vd.,2009; Riahi ve Alpas, 2001).

MMK'lerin performansını belirleyebilecek üç önemli faktör vardır: Bunlardan birincisi MMK'lerin bileşimi ve mikro yapısı, ikincisi metal matrislerdeki büyüklük, hacim oranı ve parçacık dağılımları, üçüncü ve son olarak metal matrisler ve takviyeler arasındaki ara yüzey özellikleri.

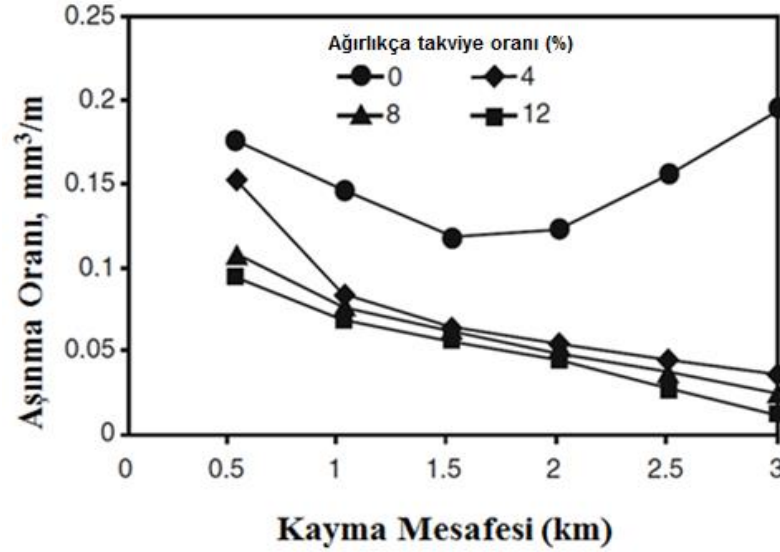
MMK'lerin imalat işlemleri sırasında, boşluklar ve gözenekler dâhil olmak üzere farklı tipte kusurlar oluşabilir. Bu kusurlar, kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma gibi tribolojik özelliklerini etkileyebilir. Kompozit malzemelerdeki gözeneklilik içeriğinin

arttırılmasının, MMK'lerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin azalmasına yol açtığı gösterilmiştir. Ek olarak, kayma hızı, uygulanan yük, kayma süresi ve yüzey pürüzlülüğü gibi tribolojik test parametreleri MMK'lerin aşınma ve sürtünme davranışını etkilemektedir.

3.1. Aşınma ve Sürtünme Özellikleri

Aşınma, bir yüzey ile temas eden madde veya maddeler arasındaki bağıl hareket neticesinde oluşan malzeme ve kütle kaybı olarak tanımlanabilir. MMK'lerin tribolojik özellikleri çeşitli araştırmacılar tarafından yoğun bir şekilde ele alınarak araştırılmıştır (Ted ve Tsao, 2000; Jinfeng vd.,2009; Riahi ve Alpas, 2001; Sannino ve Rack,1995; Choi vd.,2010; Naplocha ve Granat, 2008; Akhlaghi ve Pelaseyyed, 2004; Kim ve Lee 2011; Toptan vd., 2012; Natarjan vd., 2006). Bu araştırmaların sonucu olarak takviyeli MMK'lerin aşınma performansının, takviyesiz MMK'lerden daha yüksek olduğunu göstermiştir (Naplocha ve Granat, 2008; Shafiei vd.,2009; Ghasemi ve Kashani, 2012; Sharma,2001).

Örneğin SiC parçacıkları ile takviye edilmiş Al6061 MMK, Al6061 alaşımından daha iyi aşınma özelliklerine sahiptir (Sharma,2001) Şekil 3.1 de güçlendirilmemiş ve belirli yüzdelerde takviyelinmiş Al6061 MMK'lerin kayma hızı ve aşınma oranı grafiği gösterilmiştir.

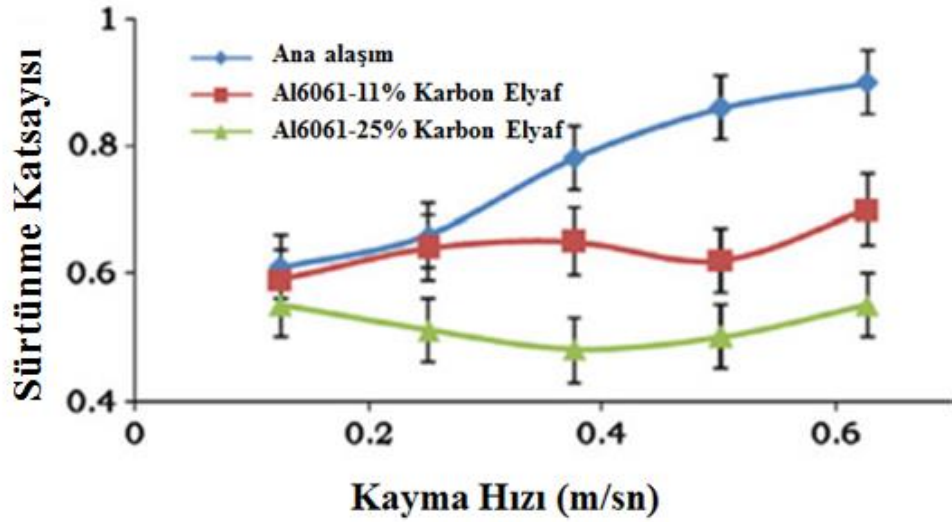


Şekil 3.1. 10 N uygulamalı yükte Al6061-esaslı MMK için kayma mesafesi ve 1.85 m / s kayma hızı ile aşınma oranı değişimleri (Sharma,2001)

Bağıl hareket sırasında farklı türlerde aşınma mekanizmaları oluşabilir. Bu mekanizmalar adhesif aşınma, abrasif aşınma, delaminasyon aşınması, erozyon aşınması, titreşimli aşınma, yorulma aşınması ve korozif / oksidatif aşınma bulunur. MMK'lerdeki yaygın aşınma mekanizmaları ise adhesif aşınma, abrasif aşınma, yorulma aşınması ve korozif / oksidatif aşınmasıdır.

Sürtünme, iki temas yüzeyi arasında bağıl hareket neticesinde meydana gelen ve yüzeylerin birbirlerine karşı gösterdikleri direnç kuvvetidir. Sürtünme katsayısı, iki hacim arasındaki sürtünme kuvveti (F) ile bu hacimler arasındaki normal kuvvet (P) oranını temsil eden boyutsuz bir skaler değerdir. Sürtünme katsayısı için genellikle μ sembolü kullanılır.

Literatürde metalik malzemelerin aşınma ve sürtünme davranışını iyileştirmek için uygulanan birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlere örnek verecek olursak DLC alüminyum gibi farklı metallere uygulandığında sürtünme katsayısını 0,1'in altına düşüren uygun bir kaplamadır. Şekil 3.2 de Al6061 alaşımı için uygulanan karbon elyafı takviyesi ile güçlendirilmiş kompozitteki kayma hızı ve sürtünme katsayısı arasındaki etkileşim gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Al6061 alaşımı ve karbon elyafı ile güçlendirilmiş kompozitler için kayma hızı ile sürtünme katsayısının değişimi (Ramesh vd.,2013)

Metallerin tribolojik davranışını iyileştirmek amacıyla kullanılan diğer bir yöntemde, MMK'lere uygun takviyeler yerleştirmektir. MMK'lere farklı türlerde takviyeler eklenebilir. Literatürde MMK'lere yaygın olarak eklenen bazı takviyeler Al_2O_3 , SiC ve B₄C'dür. Bu takviyeler MMK'lerin mekanik özelliklerini geliştirmek için genellikle metal matrisine eklenirler. Bu tür takviyeler sürtünme katsayısını ve kompozitlerin aşınma direncini arttırmaktadır (Natarjan vd., 2006; Shafiei vd.,2009; Hemath vd.,2010). Grafit, molibden-disülfür ve altıgen boron-nitrür gibi katı yağlayıcı olarak bilinen başka takviye tipleri de vardır. Bu parçacıklar, MMK'lerin tribolojik davranışını geliştirmek için metal matrislere gömülüdür. Bu tür takviyeler genellikle kompozitlerin sürtünme katsayısını önemli ölçüde azaltmaktadır (Li ve Xiong, 2008). Fakat genellikle, takviye partikülleri kompozitlerin sürtünme katsayısını arttırmaktadır (Shafei vd., 2009; Ghasemi ve Kashani, 2012; Sharma,2001).

MMK'lerin aşınma ve sürtünme davranışını farklı faktörler etkileyebilir. MMK'lerin aşınma ve sürtünme davranışını kontrol edebilen temel tribolojik parametreler üç kategoride sınıflandırılabilir.

1. Takviye tipi, takviye boyutu, takviye şekli, takviye hacimsel oran ve matrisin mikro yapısı gibi malzeme faktörleri (yüzey etkileşimi geçiren malzemeye özgü).

2. Normal yük, kayma hızı ve kayma mesafesi gibi mekanik faktörler (yüzey etkileşimi geçiren malzemeye özgü).

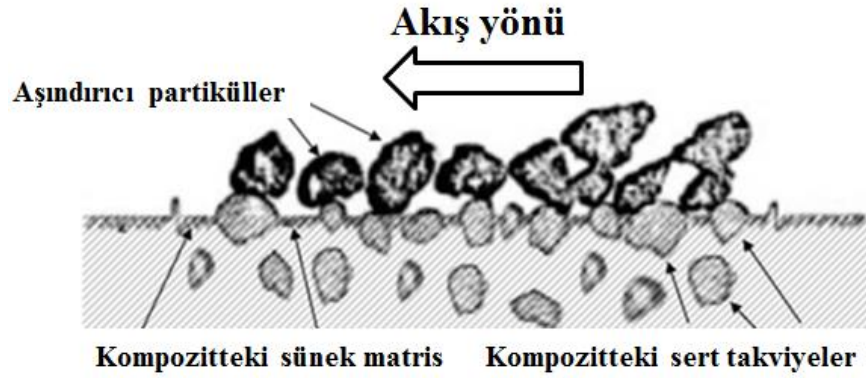
3. Sıcaklık ve çevre koşulları gibi fiziksel faktörler (yüzey etkileşimi yapılan malzemeye özgü).

Bu bölümde, bu parametrelerin bir kısmının MMK'lerin tribolojik davranışlarına etkisi tartışılmıştır.

3.2. Hacimsel Oran

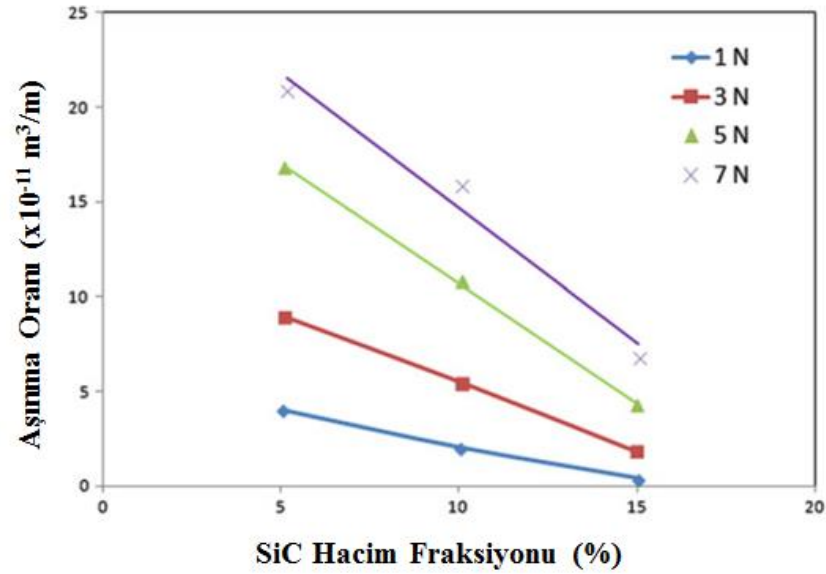
Partiküllerin hacimsel oranı MMK'lerin aşınma direnci üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir (Tu ve Yang, 2000; Bindumadhavan vd., 2001). Genellikle, takviye içeriğinin artırılması, kompozit malzemelerin aşınma direncini de arttırmaktadır (Kozma, 2003; Alpas ve Zhang, 1994; Gul ve Acilar, 2004; Prasad ve Asthana, 2004; Kumar vd., 2012; Purohit vd., 2002; Hemath vd., 2003; Das vd., 2000; Das vd., 2001). Bunun temel nedeni, MMK'lerin sertliği ve mukavemeti gibi mekanik özelliklerinin, takviyelerin hacimsel oranıyla doğru orantılı olacak şekilde artmasıdır (Das vd., 2000). Bu eğilim, Al-Fe kompoziti (Srivastava ve Mohan, 2011), Al_2O_3 kısa lifleri ve grafit (Zhang vd., 2010) ile güçlendirilmiş AZ91D -% 0,8 Ce alaşımı, grafit ve MoS₂ (Li ve Xiong, 2008) ile güçlendirilmiş nikel matrisli kompozit ve (W, Ti) C parçacıkları ile güçlendirilmiş çelik matris gibi farklı MMK'lerde gözlenmiştir (Degnan ve Shipway, 2002).

Kayma sırasında, sert ikinci faz parçacıkları metal matrisin aşınmasına karşı direnç gösterir. Bazı durumlarda ikinci faz parçacıkları matristen ayrılır ve ikinci faz parçacıklarının aşınmasına bağlı olarak matris malzemesinin de aşınma hızı artar. Takviyenin belirli bir kritik hacim payında olması durumunda, metal matris azami ölçüde korunmaktadır.



Şekil 3.3. Sünük matrisi aşınmaya karşı koruyan sert ikinci faz parçacıklarının şematik gösterimi (Vencl vd., 2004)

Şekil 3.3, sünük bir matrisin sert ikinci faz parçacıkları tarafından aşındırıcı parçacıklara karşı korunma mekanizmasını şematik olarak göstermektedir. Takviye malzemesinin hacmindeki artış, aşınmış yüzeyin altındaki plastik deformasyonu azaltır, bu nedenle kompozitin adhesif aşınmasını da azaltmaktadır.



Şekil 3.4. SiC hacminin alüminyum metal matrisli kompozitin aşınma oranına etkisi (Mondal ve Das, 2006)

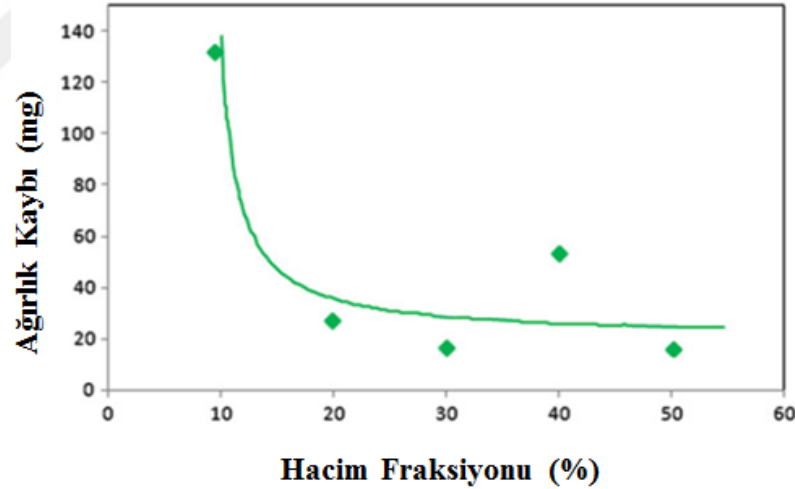
Şekil 3.4, farklı normal yüklerde SiC parçacıklarının hacim fraksiyonunun bir fonksiyonu olarak mikron boyutundaki SiC parçacıkları ile takviye edilmiş alüminyum MMK'in aşınma oranını göstermektedir. SiC partikülünün hacim fraksiyonu arttığında,

kompozitin aşınma oranının doğrusal olarak azaldığı görülebilir. Bu, takviye hacim oranının kompozitin aşınma direnci ile orantılı olduğunu ortaya koymaktadır.

Kompozitlerin bir alaşıma göre aşınma direncindeki yüzde iyileşmesi, aşağıdaki denklem (Mondal ve Das, 2006) kullanılarak ölçülen aşınma oranı değerlerinden hesaplanabilir:

$$IWR_{ca}(\%) = \left(\frac{W_a - W_c}{W_a} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

IWR_{ca} , alaşıma göre kompozitin aşınma direncindeki yüzde iyileşme, W_a alaşımın aşınma oranı ve W_c ise kompozitin aşınma oranıdır. Kompozitin aşınma oranındaki iyileşme, mikron büyüklüğündeki takviyelerin hacim fraksiyonu 20%'nin üzerine çıkartıldığında önemli ölçüde azalmaktadır.



Şekil 3.5. Alüminyum kompozit ağırlık kaybının % SiC takviyesi ile oranı (Cerit vd., 2008)

Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, 20 μ m partikül büyüklüğü ile 10-50% SiC hacim fraksiyonuyla takviye edilmiş alüminyum alaşımı (Al-1080), SiC partiküllerinin hacim fraksiyonunu artırarak ağırlık kaybının azaldığını göstermektedir. Takviye malzemesinin 20%'sine kadar kütle kaybı önemli ölçüde azalmaktadır. Bununla birlikte, 20%'nin üzerinde kütle kaybı, parçacıkların artan hacim fraksiyonu ile ihmal edilebilir bir miktarda azalmaktadır (Cerit vd., 2008). Bu eğilim literatürde diğer araştırmacılar tarafından da

gösterilmiştir (Prasad ve Asthana, 2004; Vencl vd., 2004; Uyyuru vd., 2006). Ayrıca, yapısal uygulamalarda seramik partiküllerle takviye edilmiş MMK'ler için seramik hacim hacminin 30%'dan fazla olmaması gerektiği yaygın olarak önerilmektedir (Miserez vd., 2004).

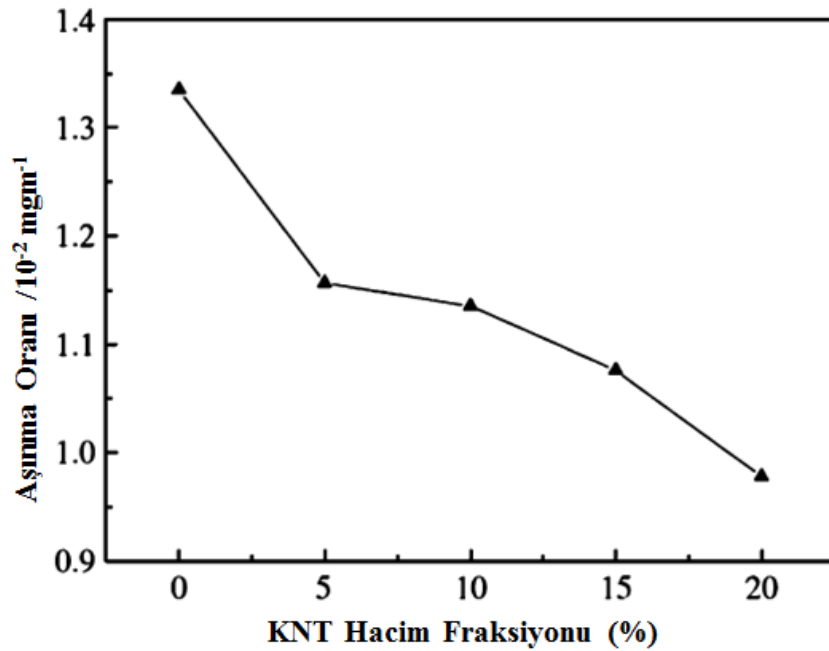
Benzer şekilde Nano-kompozitler için de deneyler gerçekleştirilmiştir. Bir nano-kompozitler, fazlarından ya da bileşenlerinden birinin boyutunu, yada en azından bir boyutu, 100 nm'den az olan veya nano tanecikler içeren bir yapıya sahip olduğu çok fazlı bir katı malzemelerdir (Ajayan vd., 2006). Metal matrisli nano-kompozitler (MMNK'ler) genellikle mikron büyüklüğünde partiküllerle takviye edilmiş MMK'lerden daha iyi mekanik ve tribolojik özelliklere sahiptir (Yesil vd.,2008; Kim vd., Tu vd., 2003; Shi vd., 2006; Tabandeh vd., 2010; Derakshandeh vd., 2012).

MMNK'lerin özellikleri etkileyen iki önemli faktör vardır. Bunlar; nano partiküllerin metal matristeki dağılımı ve nano partiküllerin topaklaşmasıdır. Literatürde araştırmacılar (Tabandeh vd., 2010; Derakshandeh vd., 2012; Torralba vd., 2003; Prabhu vd., 2006; Suryanarayana, 2001), matristeki iyi bir nano parçacık dağılımına sahip olarak ve matris içinde nano parçacıkların topaklaşmasını önleyerek MMNK'lerin özelliklerinin geliştirilebileceğini göstermiştir.

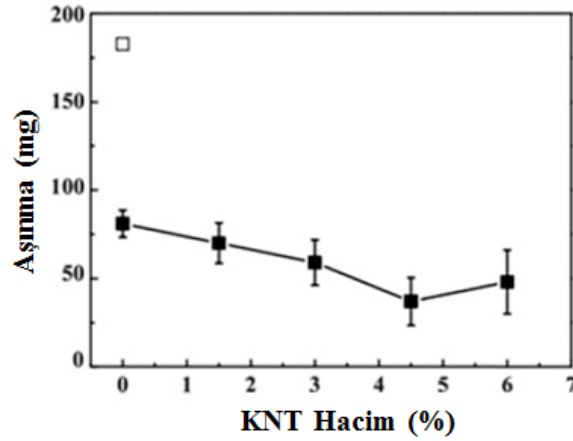
Al_2O_3 ve SiC gibi farklı nano takviyeleri arasında, karbon nano tüpleri (KNT'ler) gibi yeni geliştirilen nano takviyeler, mükemmel mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı araştırmacıların önemli ilgi odağıdır. Çok duvarlı karbon nano tüplerin (ÇDKNT) kullanımının, endüstriyel uygulamalarda maliyetlerinden dolayı artması beklenmektedir. Bu nedenle, çeşitli imalat yöntemleri kullanılarak ÇDKNT'lerle takviye edilmiş MMNK'lerin geliştirilmesi için birçok araştırma yapılmıştır. KNT'lerin matrislerde dağılması için en iyi yöntemlerden biri, sıkça kullanılan toz metalürjisi işlemidir (Choi vd., 2010; Li ve Xiong, 2008).

Bazı çalışmalar, MMNK'lerde takviye olarak KNT'lerin hacim fraksiyonunun bu kompozitlerin aşınma oranına etkisini araştırmıştır (Zhou vd., 2007; Dong vd., 2001 Wang vd., 2003). Sonuçlar, Şekil 3.6'da takviye hacimlerinin 20% 'sine kadar artış ile aşınma oranının azaldığını gösterilmektedir. Nano boyutlu parçacıklar, mikron boyutlu parçacıklar

ile karşılaştırıldığında, hacminden daha fazla yüzey alanına sahiptir. Sonuç olarak, nano-partiküller bir araya gelme ve yüzey enerjilerini azaltmak için topaklanma eğilimindedir. Bu nedenle, nano-kompozitler üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir ve nano-kompozitlerin özelliklerinin bozulmasına neden olmaktadır. Nano-partiküllerin matriste iyi dağılması ve nano-partiküllerin topaklanmasının önlenmesi, nano-kompozitlerin sentezlenmesi sırasında iki önemli zorluktur. Bu zorluklar, matriste nano boyutlu parçacıkların daha büyük hacimli kısımlarında çok daha zordur. ÇDKNT'ler ile takviye edilmiş alüminyum matrisli kompozitler üzerinde yapılan bir çalışmada 4.5% hacim fraksiyonundaki KNT'lere sahip kompozitin, 30 N uygulanmış bir yükte 30 dakikalık kaymadan sonra minimum aşınma oranına ve Şekil 3.7 'de gösterildiği gibi 0.12 mm/sn kayma hızına sahip olduğunu göstermiştir (Choi vd., 2010).



Şekil 3.6. KNT hacim oranının, 30 N yük altında 0.1571 ms^{-1} kayma hızında KNT/Al kompozitinin aşınma oranı üzerindeki etkileri (Zhou vd., 2007)



Şekil 3.7. ÇDKNT'lerin hacim oranı ile aşınma oranının değişimi (Choi vd., 2010)

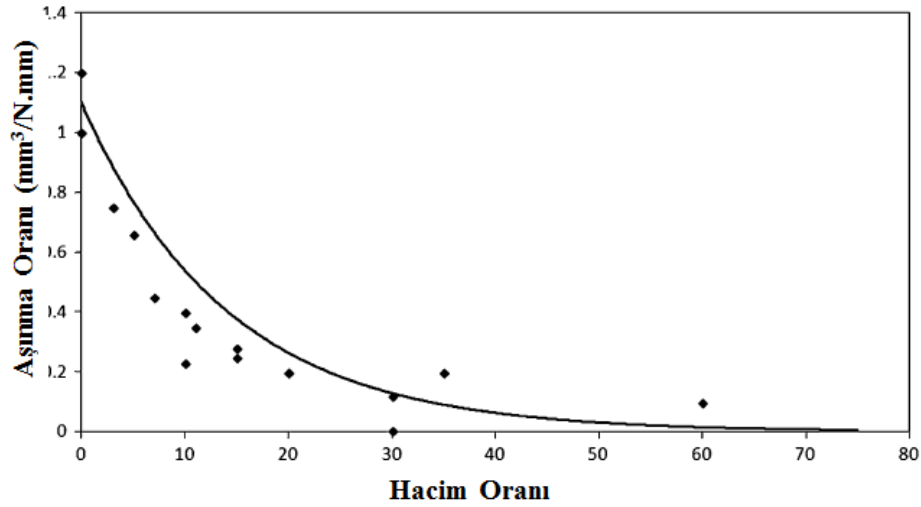
Şekil 3.7'ye göre, ÇDKNT'lerin hacim oranını 4,5%'e kadar kompozitlerin aşınma kaybı azalmakta ve kompozitlerin aşınma direnci artmaktadır. Bununla birlikte, ÇDKNT'lerdeki hacim oranı 4.5% den fazla olduğunda, kompozitin aşınma direnci azalmaktadır. ÇDKNT'lerin daha yüksek hacim fraksiyonunu içeren kompozitlerin aşınma direncindeki azalma eğilimi, boşlukların, çatlakların ve nano-partiküllerin topaklaşmasına bağlı olabilir. Bu tür kusurlar, kompozitlerin zayıflama kaynağı olarak hareket edebilir ve sonuç olarak kompozitin aşınma direnci azaltıcı yönde etkilemektedir. (Choi vd., 2010). Üstelik, birçok araştırmada (Tabandeh vd., 2010; Kang ve Chan, 2004), kompozit içerisindeki nano-parçacıkların hacim fraksiyonunun 4% den fazla olduğu durumlarda, kompozitin mekanik özelliklerinin nano-parçacıkların topaklaşması nedeniyle azaldığını göstermiştir.

Hibrit metal matrisli kompozitler (HMMK'ler), iki veya daha fazla farklı tipte takviyelerden oluşan bir kombinasyonla güçlendirilmiş mühendislik malzemeleridir. Bu kompozitler her bir takviyenin özelliklerini birleştirerek, kompozitlerin fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerinde bir iyileştirmeyi amaçlamaktadır (Dolata ve Wieczorek, 2007). Hibrit kompozitlerin, sadece bir tür takviye ile takviye edilmiş kompozitlerden daha düşük bir aşınma oranına sahip oldukları ve tribolojik özellikleri kompozitlerdeki takviye miktarının artırılmasıyla artırılabilir (Mahendra ve Radhakrishna, 2010; Basavarajappa vd., 2006).

Daha önce de belirtildiği gibi grafit, metal matrislerde takviye olarak kullanılan katı bir yağlayıcıdır. Grafit genellikle kayma sırasında malzemelerin iki temas yüzeyi arasında koruyucu bir tabaka oluşturarak kompozitlerin aşınma direncini artırır (Riahi vd Alpas, 2001; Radhika vd., 2011). Ek olarak, matrise Al_2O_3 veya SiC gibi sert bir seramik parçacık eklenerek kompozitlerin mekanik özelliklerini arttırmak mümkündür (Tabandeh vd., 2010; Derakhshandeh vd., 2012). Ayrıca, sert seramik partikülü ve grafitle güçlendirilmiş bir HMMK'lerin aynı anda sentezlenmesinin mekanik özellikleri ve aşınma direncini aynı anda arttırdığı gözlemlenmiştir (Gul ve Acilar, 2004). Bu bağlamda, mekanik ve aşınma davranışını incelemek için iki alüminyum matris kompoziti üzerine çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonucu olarak SiC ve grafit (20% SiC -3% ve 10% Gr-Al) ile güçlendirilmiş hibrit alüminyum alaşımlı matris kompozitin, SiC (20% SiC - A356) ile güçlendirilmiş alüminyum alaşımlı matris kompozitinden daha iyi mekanik özelliğine ve aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir (Jinfeng vd., 2009).

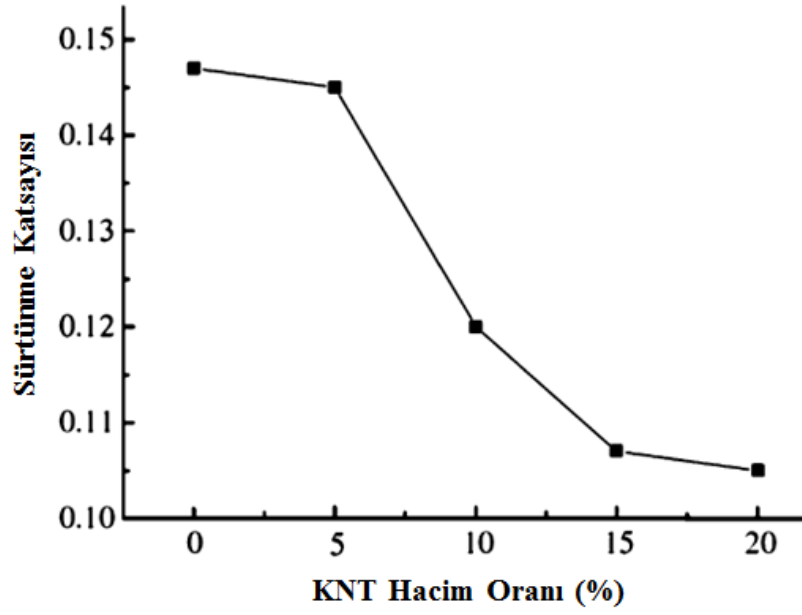
SiC ve Al_2O_3 ile güçlendirilmiş hibrit bir alüminyum matris kompozitinin aşınma davranışı da incelenmiştir. Sonuçlar, SiC ve Al_2O_3 ile takviye edilmiş hibrit kompozitlerin aşınma direncinin, yalnızca SiC veya Al_2O_3 ile takviye edilmiş alüminyum matrisli kompozitten daha yüksek olduğunu göstermiştir (Kozma, 2003; Dolata ve Wieczorek, 2007; Seyed, 2006; Anandkumar vd., 2007; Fu vd., 2004). Magnezyum alaşımlı hibrit kompozitlerde de benzer sonuçlar gözlemlenmektedir. Saffil kısa elyafları ve SiC parçacıkları ile güçlendirilmiş magnezyum alaşımlı hibrit kompozit, sadece Saffil kısa elyafları ile güçlendirilmiş magnezyum alaşımından daha düşük aşınma oranına sahiptir. Hibrit kompozitte, SiC partikülleri yük taşıma kapasitelerini korurken bozulmadan kalmakta ve saffil kısa liflerinin dolayı daha yüksek yüklerde kırılmayı geciktirmekte ve hibrit kompozitlerin aşınma direncinde kayda değer bir artışa neden olmaktadır (Mondal ve Kumar, 2009).

Şekil 3.8, kompozitlerdeki takviye hacim fraksiyonu ile birlikte aşınma oranının genel bir değişimini göstermektedir (Miyajima ve Iwai, 2003; Prasad ve Rohatgi, 1987; Uyyuru vd., 2007; Karamış vd., 2012). Daha önce de belirtildiği gibi kompozitin aşınma oranı, takviye parçacıklarının artan hacim fraksiyonuyla azalmaktadır.



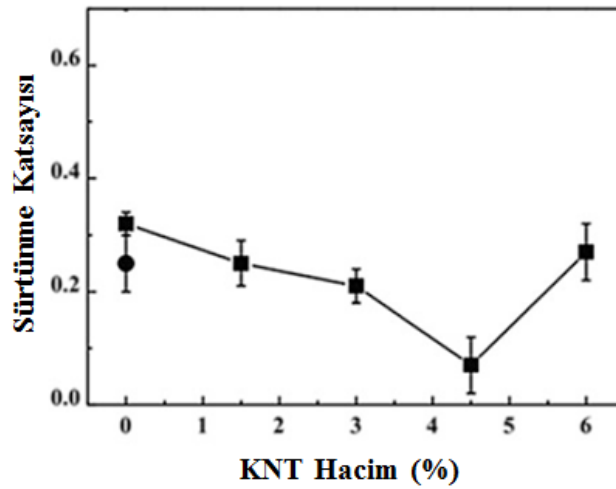
Şekil 3.8. Takviye fraksiyonunun kompozitlerin aşınma oranına etkisi (Miyajima ve Iwai, 2003; Prasad ve Rohatgi, 1987; Uyyuru vd., 2007; Karamış vd., 2012)

Kompozitlerin sürtünme katsayısının, takviye hacim fraksiyonundaki artışla azaldığı gösterilmiştir (Zou vd., 2003; Zhan ve Zhang, 2004). KNT'lerle takviye edilmiş alüminyum matrisli kompozitin sürtünme katsayısı, Şekil 3.9' da gösterildiği gibi kompozitteki KNT'lerin artan hacim fraksiyonuyla azalmaktadır. Temas yüzeylerinde KNT'lerin artan bir hacim fraksiyonunun, metal matris ile karşı yüzey arasında doğrudan temasını azalttığı belirtilmiştir (Zhou vd., 2007; Wang vd., 2003). KNT'ler tüp şekline sahiptir ve ayrıca kendi kendini yağlama özelliklerine sahiptir. Bu özelliklerden dolayı KNT'ler kendisi ile eşleşen metal yüzeyler arasında kolayca kayabilir veya yuvarlanabilirler bu nedenle KNT'lerle takviye edilen MMK'lerin sürtünme katsayısı azalır.



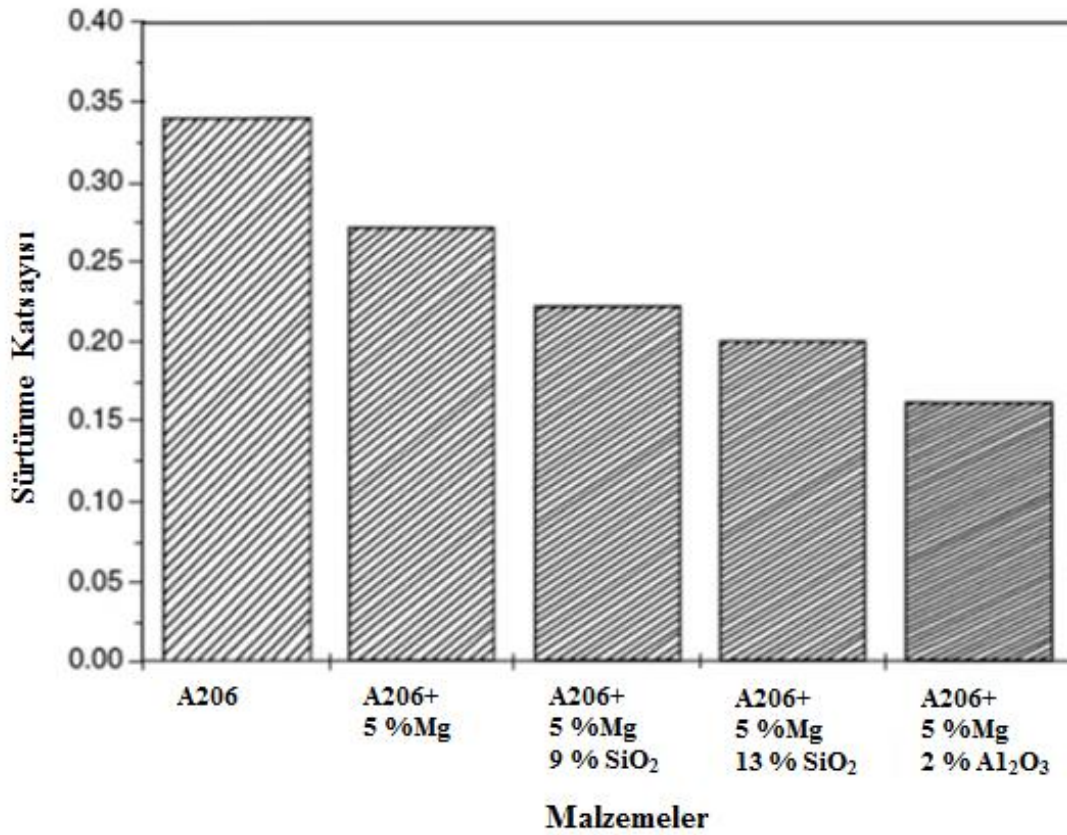
Şekil 3.9. 30 N yük altında 0.15 ms^{-1} kayma hızında KNT hacim fraksiyonunun, CNN / Al kompozitinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi, (Zhou vd., 2007)

ÇDKNT'ler ile takviye edilmiş saf alüminyum ve alüminyum matrisin sürtünme değerleri katsayısı, Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Kompozitin sürtünme katsayısı, yağlama nedeniyle ÇDKNT'lerin hacimce 4.5%'e kadar artmasıyla önemli ölçüde azalmaktadır. Kompozitin sürtünme katsayısı, ÇDKNT'lerin artan hacim fraksiyonu ile artmaktadır. 4.5% hacimce ÇDKNT içeren kompozit, en düşük sürtünme katsayısına (yaklaşık 0,1) sahiptir (Choi vd., 2010).



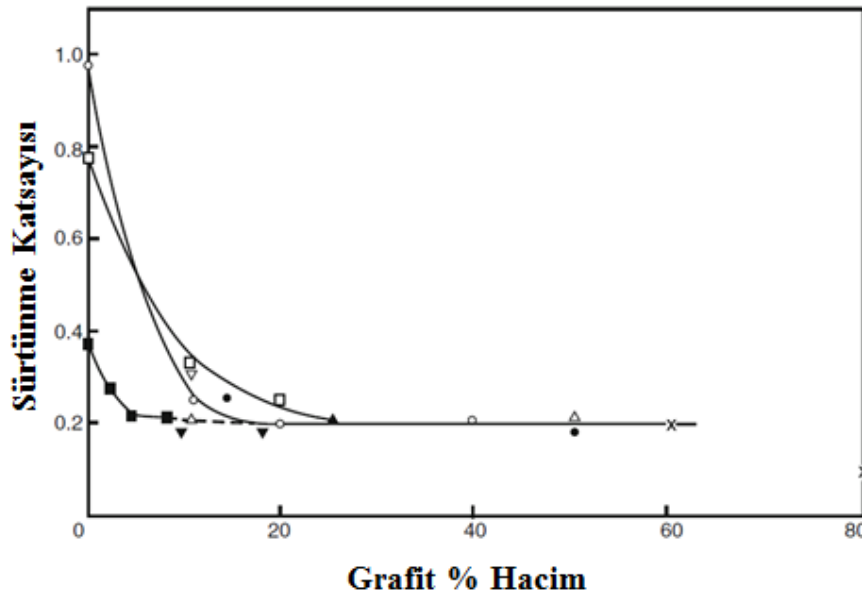
Şekil 3.10. Bileşikteki ÇDKNT hacim fraksiyonu ile sürtünme katsayısının değişimi (Choi vd., 2010)

Daha önce de belirtildiği gibi nano boyutlu takviyelerle takviye edilen MMK'ler, genellikle mikron boyutlu partiküllerle takviye edilmiş MMK'lerden daha iyi aşınma direncine sahiptir. Benzer şekilde, MMNK'ler genellikle mikron kompozitlerden daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Şekil 3.11, alüminyum alaşımları ve kompozitleri için sürtünme katsayılarını göstermektedir. A206 alaşımının diğer malzemeler arasında en yüksek sürtünme katsayısı değerini gösterdiği görülmektedir. A206 alaşımına ağırlıkça 5% magnezyum ilavesi, sürtünme katsayısını düşürmüştür. Mikro kompozitlerin sürtünme katsayısının alüminyum alaşımlarına göre daha düşük olduğu da gözlemlenebilir. Sonuç olarak, mikro kompozitlerde takviye miktarını (SiO₂) ağırlıkça 9% 'dan 13% 'e yükselterek, kompozitlerin sürtünme katsayısının azaldığını gösterilmiştir. Ayrıca, bileşikte mikro-SiO₂ yerine ağırlıkça 2% nano-alümina kullanılarak, nano-kompozitin sürtünme katsayısının test edilen malzemeler arasında en düşük değerlere düştüğü gösterilmiştir. Bu hususta nano kompozitin diğer mikro kompozitlere ve takviye edilmemiş matris malzemelere kıyasla en düşük sürtünme katsayısını gösterdiği tekrar belirtmek önemlidir (Rohatgi vd., 2011).



Şekil 3.11. Mikro ve nano-partiküller ile güçlendirilmiş çeşitli metal matris kompozitler için sürtünme katsayıları (Rohatgi vd., 2011)

Şekil 3.12, farklı baz alaşımları kullanılarak hazırlanan kompozitlerde sürtünme katsayısının grafit hacim fraksiyonuyla değişimini göstermektedir. Bu şekil, sürtünme katsayısının, kompozitlerdeki grafit miktarını 20%'nin üzerinde artırarak 0.2'ye yakın sabit bir değere ulaştığını ve bunun farklı kompozitler için de geçerli olduğunu göstermektedir. Bu, sürtünme katsayısının, 20%'nin üzerinde neredeyse matris ve grafit içeriğinden bağımsız olduğu anlamına gelmektedir. Element grafitinin sürtünme katsayısı yaklaşık 0.18'dir ve emilen edilmiş buharların geri bırakılması ile artar. Bu nedenle, kompozitlerdeki grafit içeriği 20%'yi aştığında, hem grafitle takviye edilmiş kompozit hem de çelik gibi karşı yüzey malzemesi dahil olmak üzere her iki eşleşme yüzeyinin tamamı grafit ile kaplanır ve 0.2'lik bir sürtünme katsayısı, kendisine karşı saf grafitinkine yakın olan (yani, 0.18), matris malzemesinden bağımsız olarak gözlemlenir (Rohatgi vd., 1992).



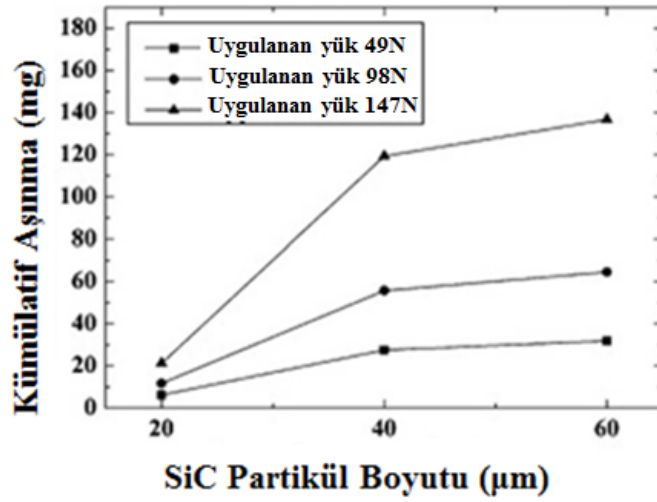
Şekil 3.12. Farklı baz alaşımlara sahip kompozitler için grafit içerikli sürtünme katsayısının değişimi (Rohatgi vd., 1992)

3.3. Partikül Boyutu

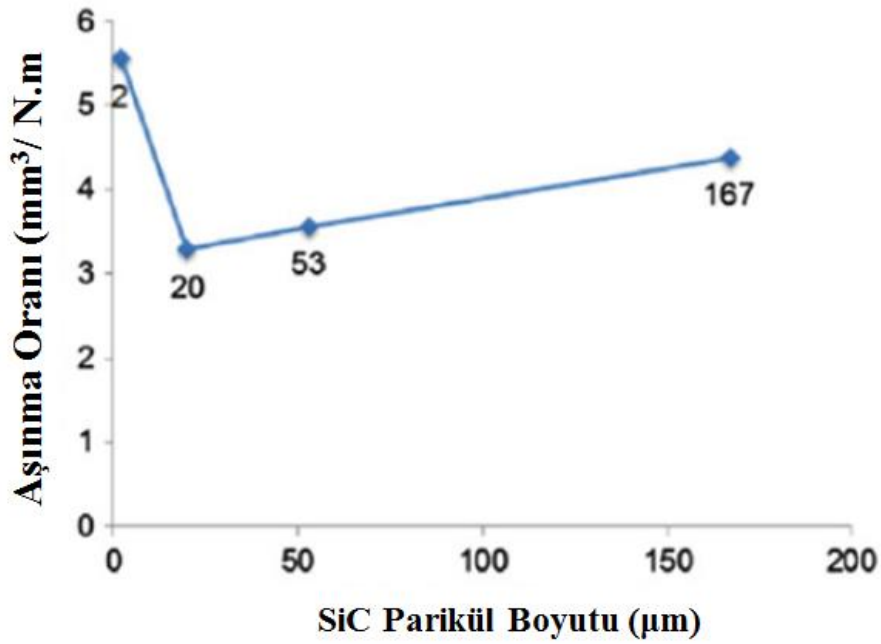
Sertlik, kopma dayanımı, süneklik, tokluk, aşınma direnci ve sürtünme katsayısı gibi MMK'lerin mekanik ve tribolojik özellikleri takviye parçacıklarının boyutuna bağlıdır (Montoya vd., 2007; Deng vd., 2012; Cocen ve Onel, 2002; Gong vd., 2001; Matějka vd., 2010; Zhang ve Wang, 2007). MMK'lerin aşınma direncini sağlayan takviye, takviye ile matris arasında iyi bir ara yüzey bağının oluşması koşuluyla önemli bir parametredir.

MMK malzemeleri genellikle, parçacıkların matrislere gömülmüş takviye malzemelerinden dolayı takviye edilmemiş alaşımlardan daha düşük aşınma oranı gösterir. Parçacıklar, kompozit malzemelerde yük taşıyıcı bileşenler olarak görev yapar ve takviyeli olmayan alaşımlara kıyasla parçacıklar tarafından takviye edilmiş metal matrislerin aşınma direncinde bir artışa neden olurlar. (Habibnejad vd., 2010).

Nano-parçacık takviyeli MMK'lerin, mikro parçacık takviyeli MMK'lerden daha iyi aşınma direnci gösterdiği bilinmektedir. Mikro kompozitler içerisindeki partikül boyutunun MMK'lerin aşınma oranı üzerindeki etkisi açık değildir. Bazı araştırmacılar, MMK'lerin yıpranma oranlarında bir düşüş olduğunu ve takviyelerin parçacık boyutunda bir artış olduğunu belirtmişlerdir (Zhang vd., 2008; Toshiro vd., 2005; Jo vd., 2012). SiC ile takviye edilmiş 2014Al matrisli kompozitin farklı partikül ebatlarında aşınma oranlarının incelenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Sonuçlar, 15,8 µm SiC partikül boyutuyla takviye edilmiş Al matrisli kompozitin, aynı hacimde 2,4 µm SiC partikül büyüklüğüne sahip kompozitten daha yüksek bir aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir (Alpas ve Zhang, 1994). Şekil 3.13, SiC parçacıkları ile takviye edilmiş AA7075 Al matris kompozitinin aşınma oranını göstermektedir. Şekil 3.13 ten de anlaşılacağı gibi, MMK'lerin aşınma oranı ile takviye elemanlarının ağ boyutu ile orantılı olduğunu göstermektedir (ağ büyüklüğünün arttırılması, parçacık boyutunu küçültmek anlamına gelir.) (Kumar ve Balasubramanian, 2010). Bununla birlikte, diğer araştırmalar, takviye boyutundaki artış ile MMK'lerin aşınma oranında da artış olduğunu göstermiştir (Kumar ve Balasubramanian, 2010; Zhang vd., 2008). Bununla birlikte, literatürdeki bazı çalışmalar kompozitlerin aşınma oranının önemli ölçüde değiştiği kritik bir takviye boyutunu olduğunu göstermektedir (Karamış vd., 2012; Karamış ve Nair, 2008). Şekil 3.14 de SiC partikülleri (2-167 µm) ile güçlendirilmiş alüminyum matrisli kompozitlerin aşınma oranını göstermektedir. Bu çalışmada kompozitlerin aşınma oranı partikül büyüklüğü 20 µm'ye kadar düştüğü ve daha sonra partikül büyüklüğü arttıkça 167 µm'ye kadar aşınma oranının arttığını göstermektedir. Bu nedenle kompozitlerin aşınma davranışını belirlemek için kritik partikül boyutunun önemli olduğu görülmüştür. 20 µm SiC partikül büyüklüğü, minimum aşınma oranının elde edildiği bu kompozit için kritik boyuttur (Karamış vd., 2012).



Şekil 3.13. Çeşitli SiC partikül büyüklüğünün (% 12% hacim fraksiyonu) magnezyum metal matrisli kompozitin aşınma oranı üzerine etkisi (Zhang vd., 2008)

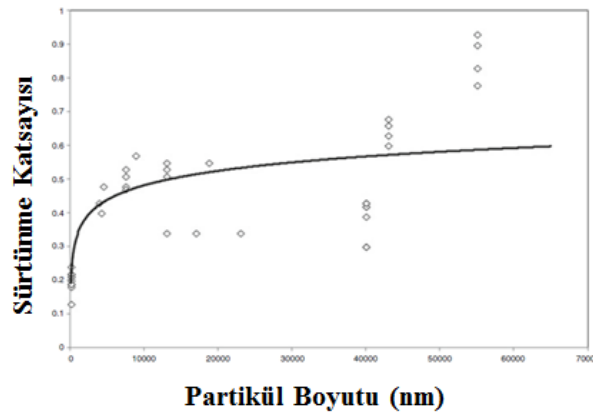


Şekil 3.14. Takviye partikül boyutunun kompozitin aşınma oranına etkisi (Karamış vd. 2012)

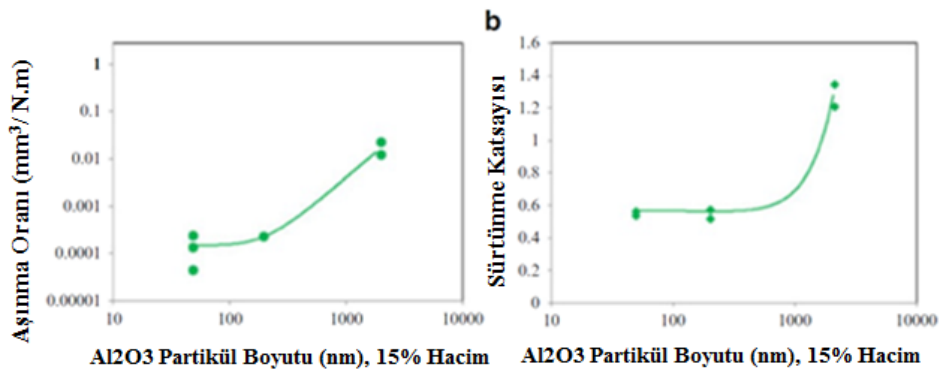
Takviye partikül büyüklüğünün sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 3.15'de, sürtünme katsayısının parçacık büyüklüğündeki değişimi gösterilmektedir. Burada sunulan veriler farklı kaynaklardan ele alınmıştır (Natarajan vd., 2006; Uyyuru vd., 2007; Maleque ve Karim, 2009; Korkut, 2004; Shorowordi vd., 2006; Tyagi, 2005; Zhang

vd., 1995; Habibnejad vd., 2010; Rodríguez vd., 2007; rehman vd., 2012). Sonuçlar, sürtünme katsayısının, takviye parçacık büyüklüğü arttıkça arttığını göstermektedir.

Yukarıdaki bilgiler ışığında, farklı boyutlardaki mikro boyutlu partiküllerle takviye edilmiş mikro kompozitin aşınma davranışını tahmin etmek zordur. Bununla birlikte, mikro ve nano kompozitler arasındaki tribolojik özellikleri karşılaştırırken net bir eğilim gözlemlenmiştir. Şekil 3.16a ve Şekil 3.16b, 15% hacim nano ve mikron Al_2O_3 parçacıkları ile takviye edilmiş alüminyum matrisli kompozitinin aşınma oranını ve sürtünme katsayısını göstermektedir. Sonuçlar, partikül büyüklüğü 1 μm altına düştüğünde sürtünme katsayısında ve alüminyum kompozitlerin aşınma oranında önemli bir düşüş olduğunu göstermektedir (Jun vd., 2006).



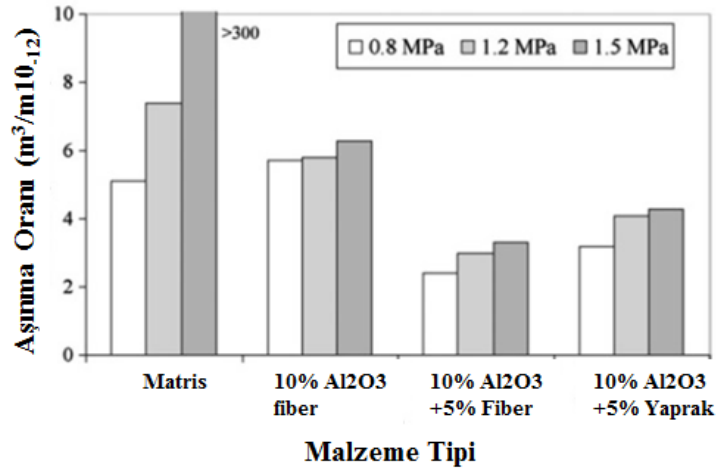
Şekil 3.15. Parçacık boyutunun kompozitlerin sürtünme katsayısına etkisi (Natarajan vd., 2006; Uyyuru vd., 2007; Maleque ve Karim, 2009; Korkut, 2004; Shorowordi vd., 2006; Tyagi, 2005; Zhang vd., 1995; Habibnejad vd., 2010; Rodríguez vd., 2007; rehman vd., 2012).



Şekil 4.16. Parçacık boyutunun, aşınma oranı (a) ve Al -15% hacim Al_2O_3 metal matrisli kompozitlerin sürtünme katsayısı (b) ile karşılaştırılması (Jun vd., 2006)

3.4. Partikül Şekli

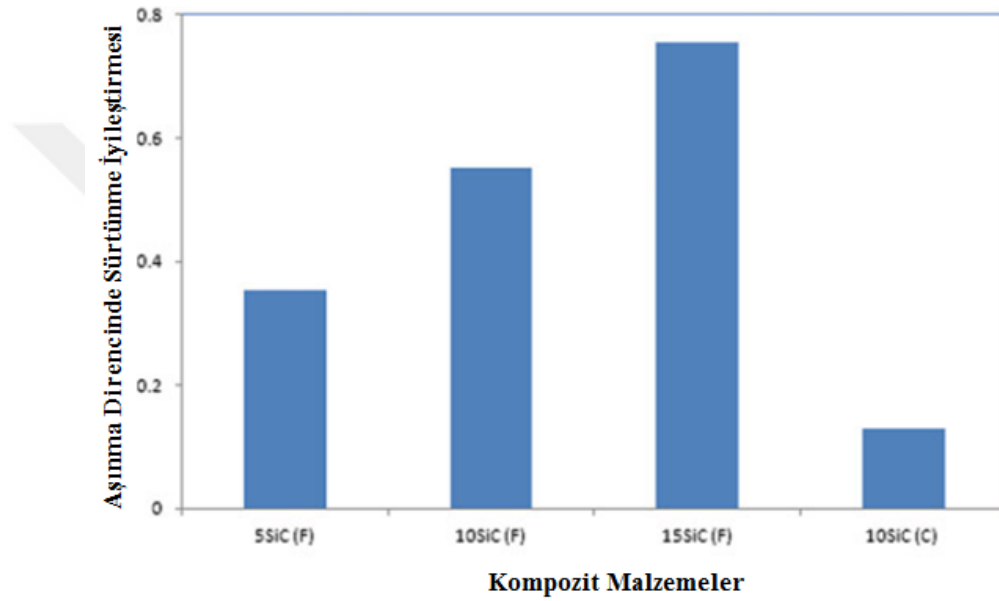
Takviye parküllerinin şekli, MMK'lerin tribolojik davranışını etkileyebilecek başka bir faktördür. Şekil 3.17'de 10% Saffil elyafı ve 5% grafit elyafı ile takviye edilmiş hibrit alüminyum matrisli kompozit, 10% Saffil elyafı ve 5% grafit levhası ile güçlendirilmiş hibrit alüminyum matrisli kompozit, 10% Saffil lifleri ve güçlendirilmemiş alüminyum alaşımının farklı kontak basınçları altındaki aşınma oranları karşılaştırılmıştır (Naplocha ve Granat, 2008). Sonuçlar, alüminyum elyaflarla takviye edilmiş alüminyum matrisli kompozitlerin, özellikle 1 MPa 'dan daha yüksek basınçlarda yapışmayı ve tutunmayı önlediğini göstermektedir.



Şekil 3.17. Normal yük ve grafit şeklinin, 0.8, 1.2 ve 1.5 MPa yüzey basınçlarındaki aşınma davranışına etkisi (Naplocha ve Granat, 2008)

Alümina elyaf ve grafit (hibrit kompozitler) ile güçlendirilmiş alüminyum matrisli kompozitler, Al / Saffil kompozitlere kıyasla daha az oranda aşınma göstermiştir. Ayrıca, grafitin şekli hibrit kompozitlerin aşınma oranı üzerinde de bir etkiye sahip olduğu aşikârdır. Deneysel sonuçlar grafit liflerinin grafit gevreğinden daha etkili olduğunu göstermiştir. Bu fark, kompozitlerde alümina lifinin düşük hacimli fraksiyonunda ve yüksek basınçta açık bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Ek olarak, alümina liflerinin yönelimi, özellikle yüksek basınçta kompozitlerin aşınma davranışını etkilemektedir. Fiberlerin sürtünme yüzeyine paralel olarak yerleştirilmesi, dik yerleştirilmesine göre (Naplocha ve Granat, 2008) daha düşük aşınma oranına sahiptir.

Şekil 3.18 ince parçacıklar ile güçlendirilmiş üç farklı kompozit ve kaba parçacıklar ile güçlendirilmiş kompozitin aşınma direncini karşılaştırmaktadır. Kompozitlerin alaşıma göre aşınma direncindeki yüzde iyileşmesinin sırasıyla 5%, 10% ve 15%'lik ince SiC takviyeleri için sırasıyla 26%, 55% ve 75%'tir. Öte yandan, 10% hacimli SiC partikül takviyeli kompozitin aşınma direncindeki yüzdelik düzelleme miktarı, 10% hacimli 15%'lik ince SiC partikül takviyeli kompozitteki 55%'lik iyileşmeye kıyasla 15% oranında daha iyi olduğu gözlemlenmektedir. (Mondal ve Das, 2006).

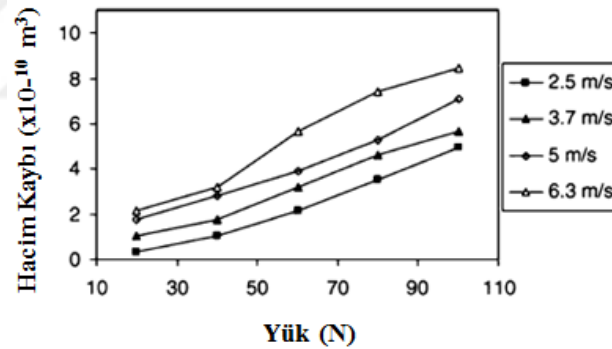


Şekil 3.18. İnce parçacıklar (F) ve kaba parçacıklar (C) ile güçlendirilmiş metal matrisli kompozitlerin aşınma direncinde iyileşme gösteren çubuk grafik (Mondal ve Das, 2006)

3.5. Normal Yükleme

Normal yük, MMK'lerin aşınma oranını ve sürtünme katsayısını etkileyen önemli bir mekanik faktördür. Uygulanan normal yükün artmasıyla, matris içindeki takviye parçacıklarının kırılması meydana gelebilir. Sonuç olarak, kompozitin mekanik özellikleri düşer ve kompozitlerin aşınma oranı, takviyesiz metalik matrisinler ile karşılaştırılabilir seviyelere yükselir. Genel olarak, MMK'lerin aşınma oranının, Şekil 3.19'da da gösterildiği gibi kayma esnasındaki normal yüklerin artmasıyla arttığı kabul edilir (Umanath vd., 2011; Sahin, 2003). Bu eğilim, Al-Fe kompozit (Srivastava ve Mohan, 2011), Saffil kısa elyaf (çap 3–8 µm ve uzunluk 200 µm) ve SiC partikülleri (40 µm) (Mondal ve Kumar, 2009) ile güçlendirilmiş Mg alaşımlı hibrit kompozit ve Al₂O₃ kısa elyaf ve grafit (Zhang

vd., 2008) ve Cu / WC kompozitleri ile güçlendirilmiş (Deshpande ve Lin, 2006) AZ91D–0.8% Ce alaşımlı hibrit kompozitlerde de gözlemlenmiştir. Artan normal yüklerle birlikte aşınma oranının artmasına ek olarak, kompozitlerin aşınma mekanizması normal yük ile birlikte değişir. Kompozitlerin aşınma mekanizmasının genellikle düşük normal yüklerde oksidasyon sonucu gerçekleştiği bilinmektedir. Bununla birlikte, kompozit malzemelerin daha yüksek normal yüklerdeki aşınma mekanizmaları adhesif aşınma ve delaminasyon aşınmasına dönüşebilmektedir (Gul ve Acilar, 2004). Literatürdeki çalışmalar MMK'lerin aşınma testi sırasında kritik bir normal yükünün olacağı bildirilmiştir (Wang vd., 2001). Kritik normal yük değerinin altında, aşınma oranı genellikle düşük ve hemen hemen sabit bir değerdedir. Bununla birlikte, Kritik normal yükün üzerindeki yüklemelerde aşınma oranı artar ve kayma sırasında ciddi bir aşınma meydana gelebilir. Bu fenomene ilave olarak unutulmamalıdır ki literatürdeki çalışmalarda temas yüzeyi sıcaklığının kritik normal yük miktarını etkileyebileceği ve yüksek sıcaklıkta kritik normal yükün de azaldığı da gösterilmiştir (Yu vd., 1997).

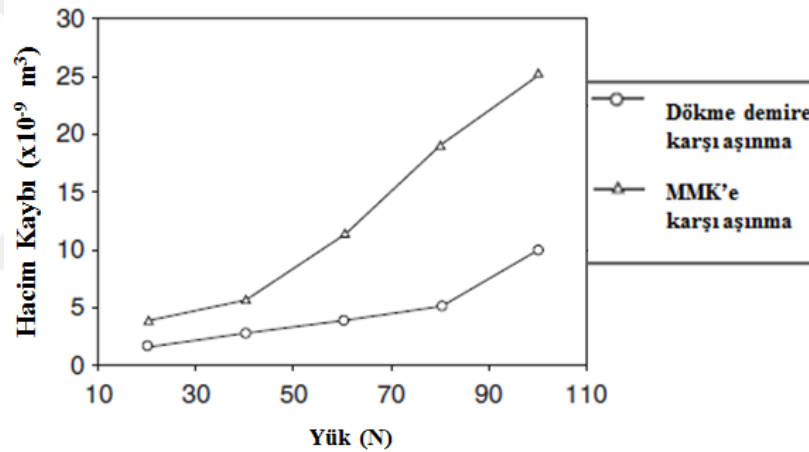


Şekil 3.19. Normal yük uygulanmış MMK'lerin aşınma oranının değişimi (Natarajan vd., 2006)

Tüm düz yüzeyler parlatılmış olsalar bile atomik boyutta kusursuz bir şekilde düz değildir. Atomik boyutta tüm yüzeylerde pürüzler ve / veya yüzey çıkıntıları bulunur. İki düz yüzey temas ettiğinde, bu iki yüzey yalnızca en yüksek noktalarından temas ederler. Dolayısı ile etkileşimde bulunan yüzeylerin temas alanlarını tanımlayabilmek için görünür temas alanı ve gerçek temas alanı kavramlarını kullanmak gerekmektedir. Gerçek temas alanı, birbirleri ile temasta olan pürüzlerin toplam temas alanını oluşturur. Görünür temas alanı ise temasta olan iki yüzeyin makro ölçekte kabul edilen temas alanıdır. Dolayısıyla gerçek temas alanı daima görünür temas alanından daha küçüktür. Yüzeyler normal yüke

maruz kaldığında, yüzeylerdeki pürüzlerde plastik deformasyon meydana gelir ve gerçek temas alanı, normal yükünde artmasıyla görünür temas alanına yaklaşır. İki yüzey arasındaki gerçek temas alanının artmasıyla, kayma esnasında bu iki yüzey arasındaki aşınma oranı ve sıcaklıkta artmaktadır.

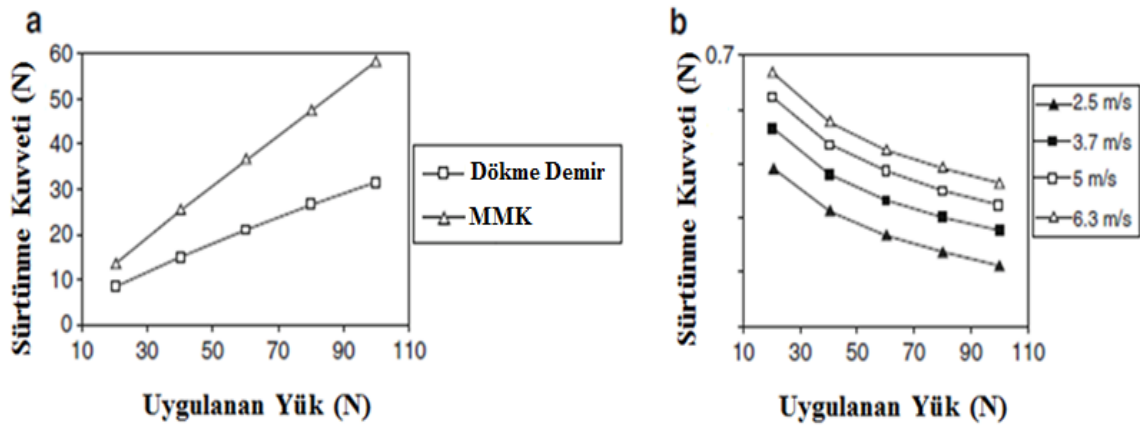
Daha önce belirtildiği gibi, ciddi aşınmaların meydana geldiği kritik bir normal yük değeri vardır ve bunun nedeni gerçek temas alanındaki artıştır. Gerçek temas alanının artması ve görünür temas alanına yaklaşması, temas eden iki yüzeyin birbirini üzerinde kaymasını zorlaştırır. Tribolojide bu durum tutunma olarak adlandırılır. Tutunma hem takviyesiz hem de takviyeli kompozitler için geçerlidir. Tutunma olayını genellikle aşınma oranı, ağır gürültü ve titreşimdeki ani bir artış eşlik etmektedir (Daoud vd., 2004).



Şekil 3.20. Düşük ve yüksek yüklerde aşınma oranının değişimi (Natarajan vd., 2006)

Bazı çalışmalar düşük normal yüklerde, farklı hacim fraksiyonundaki takviyeler içeren kompozit malzemeler ile takviye içermeyen matrislerin birbirleri ile karşılaştırılabilir olduğunu göstermiştir (Natarajan v., 2006; Zhang vd., 2010). Düşük normal yüklerde hem takviyeli ve hem de takviyesiz matrisler uygulanan yükü tolere edebildikleri için aşınma oranları düşük olmaktadır. Bununla birlikte takviyesiz matrislerin pürüzleri takviyeli matrislere göre daha hızlı bir plastik deformasyona maruz kaldığı için ve gerçek temas alanları da daha hızlı bir şekilde artar. Buna bağlı olarak şekil 3.20 de de gösterildiği gibi uygulanan yüke karşılık aşınma oranında ciddi bir artışta gözlemlenebilir. Takviyeli matrislerin mekanik özellikleri takviyesiz matrislerin mekanik özelliklerinden

genellikle daha iyi olduğu için aşınma testleri sırasında takviyeler tarafından da bir miktar normal yük taşır. Böylece takviyeli matrislerin mekanik özellikleri plastik deformasyonu geciktirir ve bu nedenle takviyeli matrislerin daha düşük aşınma oranının olmasına neden olur. Örneğin daha önceden Şekil 3.17 de gösterildiği gibi takviyesiz alüminyum alaşımının aşınma oranı 1.5 MPa gibi yüksek bir kontak basıncında tutunma olayı gerçekleştiğinden test tamamlanamamıştır.



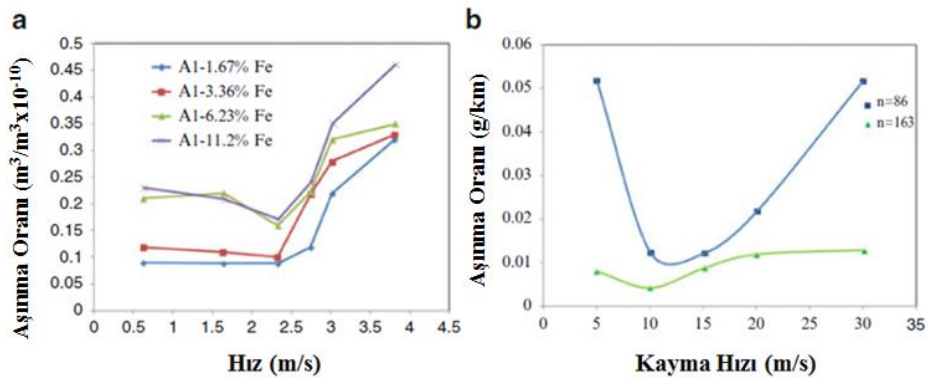
Şekil 3.21. (a) Sürtünme kuvveti ve (b) Sürtünme katsayısının uygulanan kuvvete göre değişimi (Natarjan vd., 2006)

Şekil 3.21a da da görüldüğü gibi genellikle, uygulanan normal kuvvetteki artış sürtünme kuvvetini de artırır. Literatürdeki çalışmalarda MMK'lerdeki sürtünme katsayısının, Şekil 3.21b 'de gösterildiği gibi normal yükün artmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. (Natarjan vd. 2006; Hemath vd., 2010; Hemath vd., 2003; Radhika vd., 2011); Zhang vd., 2008; Umanath vd., 2011). Bu hususta örnek verilecek olursa, grafit takviyeli nikel matrisli kompozitlerin sürtünme katsayısı sisteme uygulanan normal yükün artırılmasıyla yaklaşık 0,3'e düştüğünü gözlemlenmiştir. (Li ve Xiong, 2009). Kayma sırasında grafik takviyesinin sistemde bir transfer filmi görevi görmesi ve transfer filminin daha uzun süre ve çok çeşitli normal yüklerde kararlı olmasından dolayı sürtünme katsayısında bir düşüş gözlemlenmektedir. Unutulmamalıdır ki, uygulanan normal yükün çok yüksek olması, transfer filmini tahrip edebilir ve sürtünme katsayısı artabilir (Natarjan vd., 2006).

3.6. Kayma Hızı

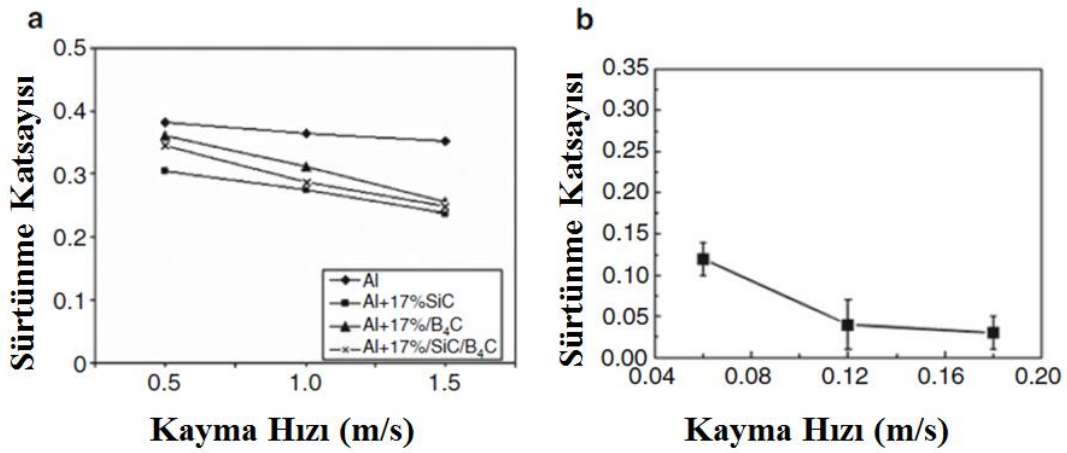
Kayma hızı, MMK'lerin tribolojik davranışını etkileyen önemli bir parametredir. Kayma hızındaki artış, MMK'lerin (Natarjan vd., 2006; Kumar vd., 2012; Sahin, 2003; Ranganat vd., 2001) aşınma oranında bir artışa ve aşınma direncinde bir azalmaya neden olur. Literatürde aşınma oranı ile kayma hızı arasında genellikle doğrusal bir oran olduğu rapor edilmiştir (Chaudhury vd., 2005; Hamid vd., 2008). Kayma hızı arttıkça, ara yüz sıcaklığı da artar, bunun bir sonucu olarak matris malzemesinin (Qin vd., 2008) mikro-termal yumuşaması, temas bölgesinde (Menezes vd., 2012) oksit oluşumu ve malzemedeki gerilme akımında azalma ile sonuçlanır. Ek olarak, mikro yapıda, aşınma davranışına da yansıtacak olan çökeltilerin çözülmesi gibi bazı değişiklikler de gözlemlenebilir. Farklı matrislerin farklı kompozitlerindeki fiziksel ve mekanik özellikleri aynı olmadığından, farklı malzemeler için mikro-termal yumuşama, oksidasyon ve akış gerilimi farklı sıcaklıklarda ortaya çıkar. Sonuç olarak, kayma hızının farklı matrislere sahip kompozitler üzerinde farklı etkileri olabilir.

Literatürdeki birçok çalışma, kayma hızındaki artışın, özellikle yüksek kayma hız aralıklarında, aşınma oranındaki bir artışa yol açtığını göstermiştir. Örneğin, Al – Fe ve Al-SiC kompozit, düşük kayma hızlarında aşınma oranındaki ilk düşüşü göstermektedir; bununla birlikte, bu kompozitler daha yüksek kayma hızlarında aşınma oranında keskin bir artış şekil 3.22 de göstermiştir (Kozma, 2003; Srivastava ve Mohan, 2011).



Şekil 3.22. (a) Al-Fe kompozitleri (Srivastava ve Mohan, 2011) ve (b) alüminyum matrisli kompozit (Kozma, 2003) için kayma hızı ile aşınma oranının değişimi

MMK'lerin sürtünme katsayısı genellikle artan kayma hızı ile azalmaktadır (Choi vd.,2010;Toptan vd., 2012; Natarajan vd., 2006, Hemath vd., 2010; Zhang ve Wang, 2007; Soy vd., 2011). Şekil 3.23 a ve b, farklı kayma hızlarında 17% SiC ve B₄C (Soy vd., 2011) ve ayrıca 4.5% hacimli KNT'ler (Choi vd., 2010) ile güçlendirilmiş sürtünme katsayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Kayma hızının artmasıyla sürtünme katsayısının azaldığı açıktır. Şekil 3.22b'de sürtünme katsayısının KNT'lerle takviye edilmiş alüminyum matrisli nano-kompozit için artan kayma hızı ile 0.05'ten daha düşük bir değere ulaştığı gözlenmektedir.

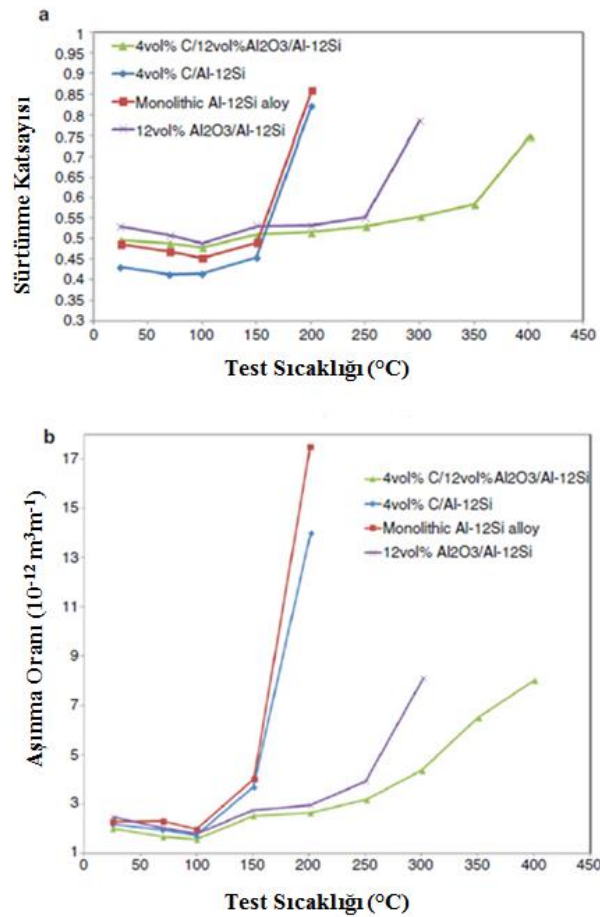


Şekil 3.23. (a) SiC ve B₄C (Soy vd., 2011) ile güçlendirilmiş alüminyum metal matrisli kompoziti ve (b) CNT (Choi vd., 2010) ile güçlendirilmiş alüminyum metal matris kompoziti için kayma hızı ile sürtünme katsayısının değişimi

3.7. Sıcaklık Etkisi

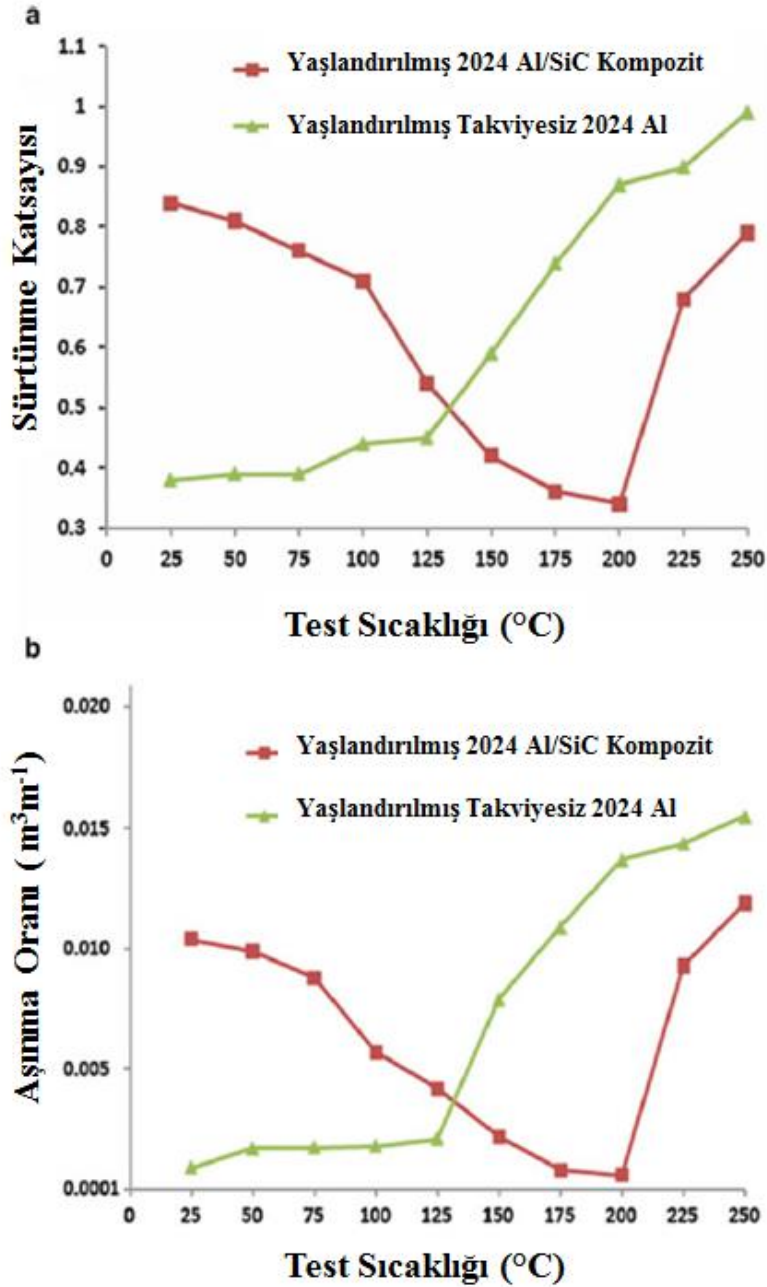
Sıcaklık, MMK'lerin aşınma davranışını etkileyen bir diğer önemli parametredir. Sıcaklığın, normal yüklerdeki ve kayma hızlarındaki değişimine bağlı olarak MMK'lerin tribolojik davranışları üzerindeki etkisi önceki bölümlerde tartışılmıştır. Araştırmalar, MMK'lerin aşınma oranının başlangıçta artan sıcaklıkla azaldığını ve ardından artan sıcaklıkla arttığını göstermiştir (Li ve Xiong,2008; Martin vd., 1996; Martin vd., 1999). Matrislerin termal iletkenliği ve kompozitlerdeki takviyelerin termal özellikleri, MMK'lerin farklı sıcaklıklarda aşınma direncini etkileyebilir. Literatürde MMK'ler içindeki takviyelerin daha yüksek termal iletkenliğine sahip olmasının, kompozitlerin aşınma direncinde de bir iyileşmeye yol açabileceği bildirilmiştir (Vissutipitukul ve Aizawa, 2005).

Sıcaklık değişimleri MMK'lerin aşınma oranı ve sürtünme katsayısı önemli ölçüde etkiler. Bu değişimler MMK'lerdeki malzeme türlerine bağlıdır. Bazı çalışmalar, MMK'lerin aşınma oranını ve sürtünme katsayısını değiştiren kritik bir sıcaklığın olduğunu bildirmiştir (Singh ve Alpas, 1996; Yao vd., 2004). Bu kritik sıcaklık değerinin altında, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı neredeyse sabit olup bazı durumlarda artan sıcaklık değeriyle birlikte düşmektedir. Bu kritik sıcaklığın üstünde ise, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı, sıcaklık arttıkça önemli ölçüde artar. Bu değişiklikler, yüksek sıcaklıklarda sertlik gibi mekanik özelliklerinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Kritik sıcaklık değeri, monolitik alaşımlara kıyasla, MMK'ler için genellikle daha yüksektir. Şekil 3.24a ve b farklı alüminyum matrisli kompozitler ve monolitik alüminyum alaşımları için aşınma oranı ve sürtünme katsayısının sıcaklıktaki değişimini göstermektedir (Singh ve Alpas, 1996; Yao vd., 2004).



Şekil 3.24. Çeşitli MMK'ler ve monolitik alaşımları için test sıcaklığına bağlı sürtünme (a) ve aşınma (b) değerlerindeki değişim (Singh ve Alpas, 1996)

Bazı kompozitlerde, aşınma hızının ve sürtünme katsayısının kritik sıcaklığın değerinin altında önemli ölçüde azaldığı Şekil 3.25 de bildirilmiştir (Mousavi vd., 2010). Bu nedenle, MMK'lerin sıcaklık ile tribolojik davranışlarındaki değişimin, yüksek sıcaklıklarda malzemelerin mekanik özellikleri gibi malzemelerin özelliklerine bağlı olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 3.25. (A) sürtünme katsayısı ve aşınma oranındaki (b) sıcaklığa bağlı değişimleri, (Mousavi vd., 2010)

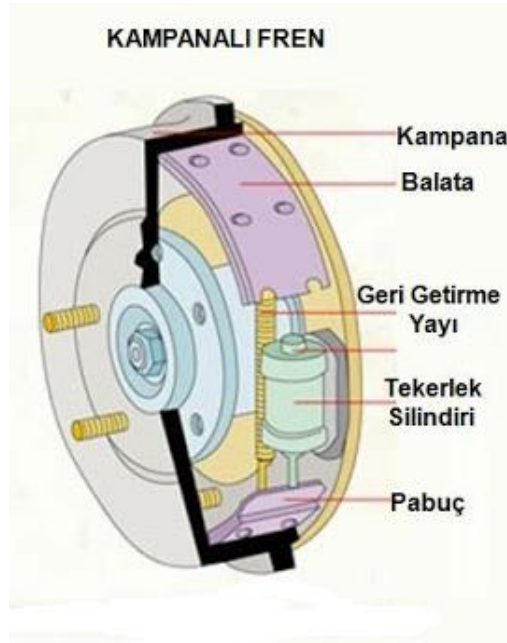
4. FREN SİSTEMLERİ

Frenler, herhangi bir araçtaki en önemli mekanizmalardan biri olup ortalama bir araçta frenlerin yılda 50.000 kez uygulandığı düşünüldüğünde araçta sürüş yapanların güvenliği ve yaşamı, fren sisteminin doğru şekilde çalışmasına bağlıdır. Günümüzdeki taşıtların büyük bir çoğunluğunda ön tekerleklerde disk fren sistemleri arka tekerleklerde ise kampanalı fren sistemleri kullanılmaktadır. Araçlarda bulunan disk fren sisteminin asıl amacı, fren diski ve fren balataları arasındaki sürtünmeyle aracın kinetik enerjisini ısı enerjisiye dönüştürerek aracı yavaşlatmaktır. Bir fren sisteminin üç temel görevi vardır.

- Aracın hızında istenmeyen ivmelenmeyi engellemek ve yavaşlamayı sağlamak
- Aracı güvenli bir şekilde durdurmak
- Duran aracı yerine sabitlemek

Frenlemenin verimli bir şekilde gerçekleşmesi fren diski ile fren balatası arasındaki yüzeylerin minimum aşınmayı ve maksimum kararlı sürtünme katsayısı sağlamasıyla mümkündür. Bu kriterleri sağlayabilmek bu tezinde konusu olan için balata malzemesinin kompozisyonu ve mikroyapısında yapılacak iyileştirmeler ile mümkündür.

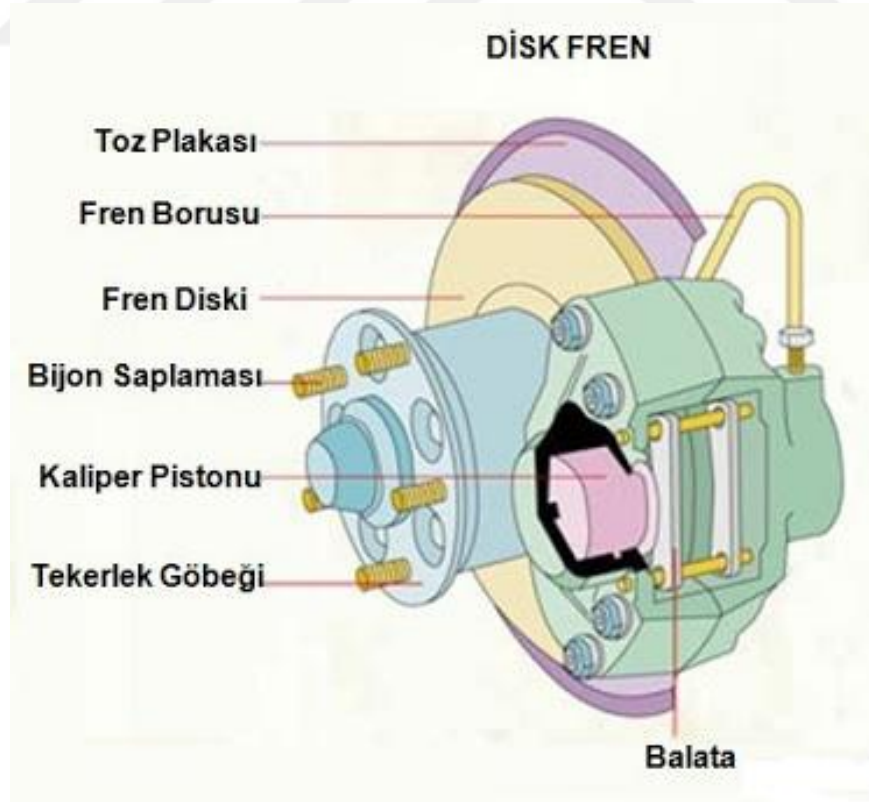
4.1. Kampanalı Frenler



Şekil 4.1. Kampanalı fren sistemi ve elemanları

Kampana frenlerde fren yüzeyi silindirikdir. Fren yüzeyini, duran parça (pabuç) ile dönen parçanın (kampana) birbirlerine temas ettikleri yüzey oluşturmaktadır. Çeşitli tipleri olmakla birlikte karayolu taşıtlarının tekerlek frenlerinde içten pabuçlu olanlar kullanılmaktadır. Frenleme gerçekleşmeden önce tekerlek ile birlikte dönmekte olan kampana, frenleme ile birlikte kampanaya içten sürtünerek frenlemeyi sağlayan bir çift pabuç, pabuçların dışarıya doğru açılarak kampanaya bastırılmasını sağlayan hidrolik sistem temel elemanlardır. Kampana frenler genel olarak sabit mafsallı ve kayar tabanlı fren olarak ikiye ayrılır. Mafsallı frenlerde fren tablası üzerinde bağlı bulunan ve üzerinde sürtünme yüzeyini taşıyan pabuçların tabanları sabit bir mafsal noktasına dayanmakta olup, pabuçlar bir mafsal eksenini etrafında dönme serbestisine sahiptir. Kayar tabanlı frende ise; fren pabucu tabanı sabit bir yüzeye dayanmaktadır. Bu düzendeki pabuç dayandığı yüzey doğrultusunda iki yönde kayma serbestisine sahiptir. Bu özellik pabuçların frenleme olayı sırasında kendi kendilerini merkezlenebilme ve düzgün basınç dağılımına sebep olmaktadır.

4.2. Disk Frenler



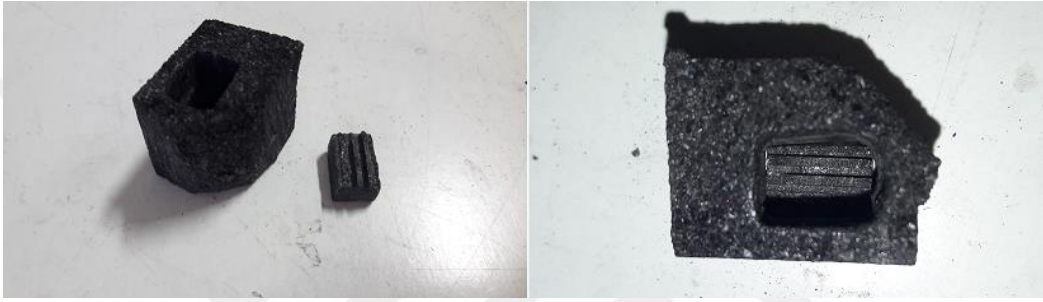
Şekil 4.2. Disk fren sistemi ve elemanları

Diskli fren sistemi sabit bir kaliper ile bu kaliper üzerine yerleştirilen fren balata ve pabuçları ile fren hidrolik silindir ve pistonlarından oluşur. Fren pedalına basılmasıyla, fren merkez silindirinden gelen basınçlı hidrolik sıvı, fren hidrolik hortumuyla, kaliper üzerindeki bağlantı rekoruna gelir. Rekorun kaliper silindirinin içerisine giren hidrolik yağ, silindirin içerisindeki pistonu ileri iter, pistonun ileri hareket etmesiyle hemen önünde bulunan balata fren diskine bastırılır. Balatanın diske sürtünmesiyle tekerlek yavaşlar ve durur. Diskli fren sistemi de pascal prensibine dayanır. Fren pedalında oluşturulan mekanik kuvvet, fren ana merkezinde hidrolik basınca dönüştürülür, bu hidrolik basınç kaliperde tekrar mekanik kuvvete dönüştürülür. Aracın hareket enerjisi, diske sürtün balatalar sayesinde ısı enerjisine dönüştürülür.



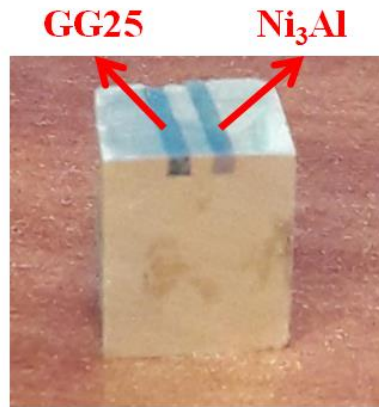
5. MATERYAL VE YÖNTEM

Metal matrisli kompozitin üretilmesi için şekil 5.1 de gösterilen grafit kalıp hazırlanmıştır. Grafit kalıbın tabanına birer milimetrelik kanallar açılarak bu kanallara birer milimetrelik GG25 ve Ni₃Al plakalar yerleştirilmiştir. Bu plakalar elde edilmeden önce bronz alaşımı (Cu₆Sn₁₂Pb) indüksiyon ocağında dökülerek üretilmiştir. Ni₃Al alaşımı ise vakumlu ark ocağında dökülmüştür.



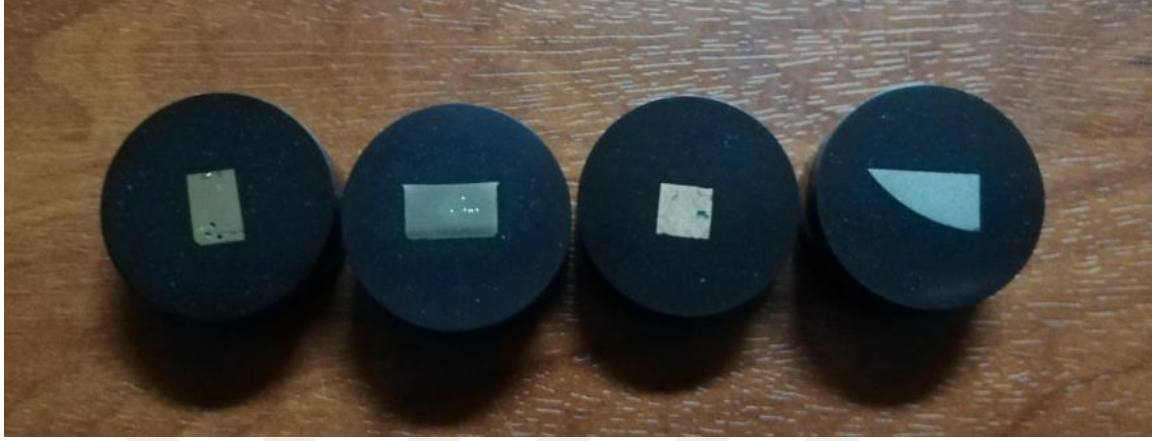
Şekil 5.1 Grafit Kalıp

Kalıba yerleştirilmiş plakalar üzerine katı halde Bronz alaşımı(Cu₆Sn₁₂Pb) konulmuştur ve indüksiyon ocağında bronz alaşımı eriyik hale gelene kadar ısıtılmıştır. Yaklaşık beş dakikalık bir ısıtma işleminin ardından ergimiş olan bronz alaşımı kalıbın boşluklarına sızarak boşlukları doldurmuştur. Bu yöntemle şekil 5.2 de gösterilen kompozit malzeme elde edilmiştir. Bronz alaşımına gömülü birer milimetrelik Ni₃Al ve GG25 plakaları şekil 5.2 gözükmemektedir. Kompozit malzemenin boyutu 6x6 mm'dir.



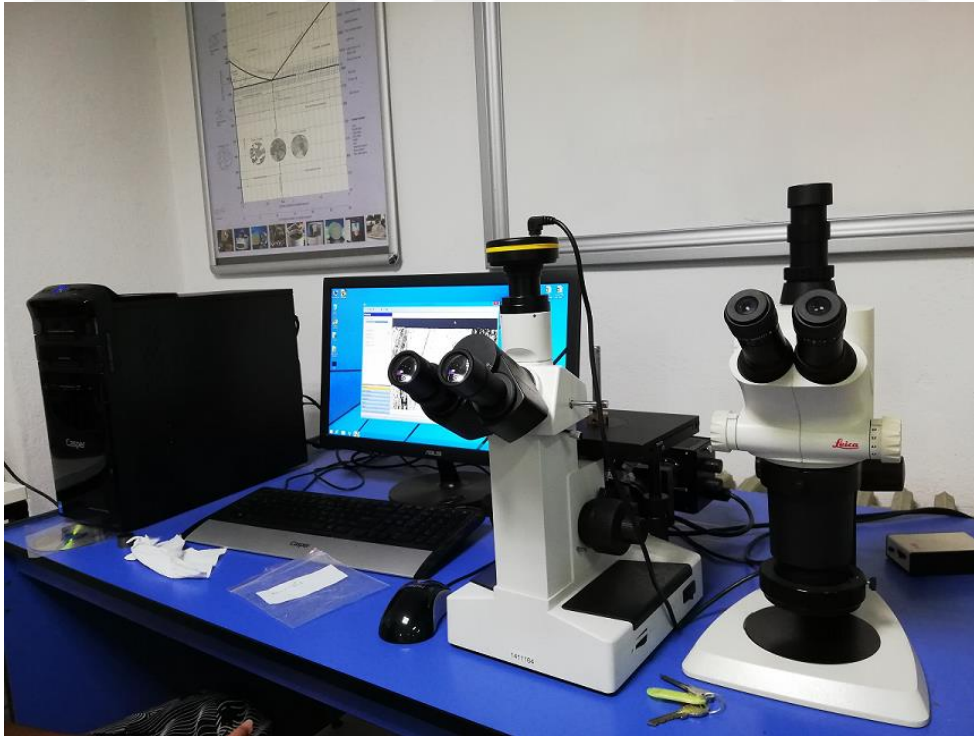
Şekil 5.2. Hazırlanan Kompozit Malzeme

Sürtünme ve aşınma testlerine başlamadan önce ayrıca üretilen kompozit malzeme ve kompozit malzemeyi oluşturan her bir bileşen şekil 5.3 de gösterildiği gibi bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler, zımparalama ve parlatma işlemleri ile hazırlanmıştır.



Şekil 5.3 Soldan sağa Kompozit, Ni₃Al, Bronz ve GG25 Bakalitleri

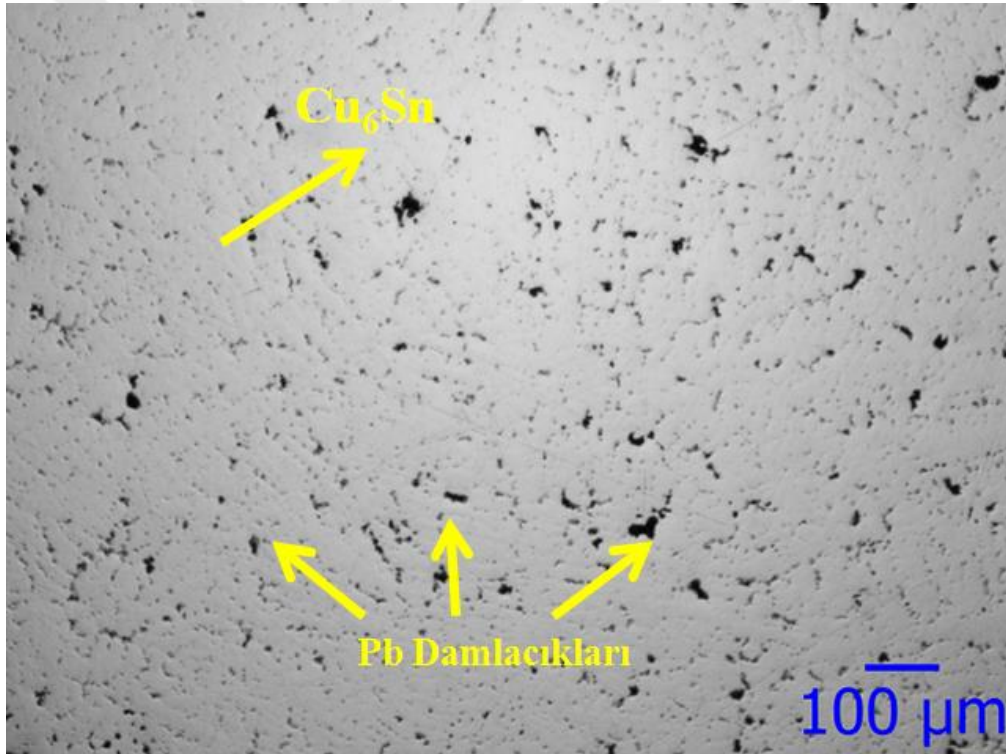
Üretilen kompozit malzeme ve kompozit malzemeyi oluşturan her bir bileşen için şekil 5.3 de gösterilen optik mikroskop yardımı ile mikro yapı incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 5.4 Optik Mikroskop

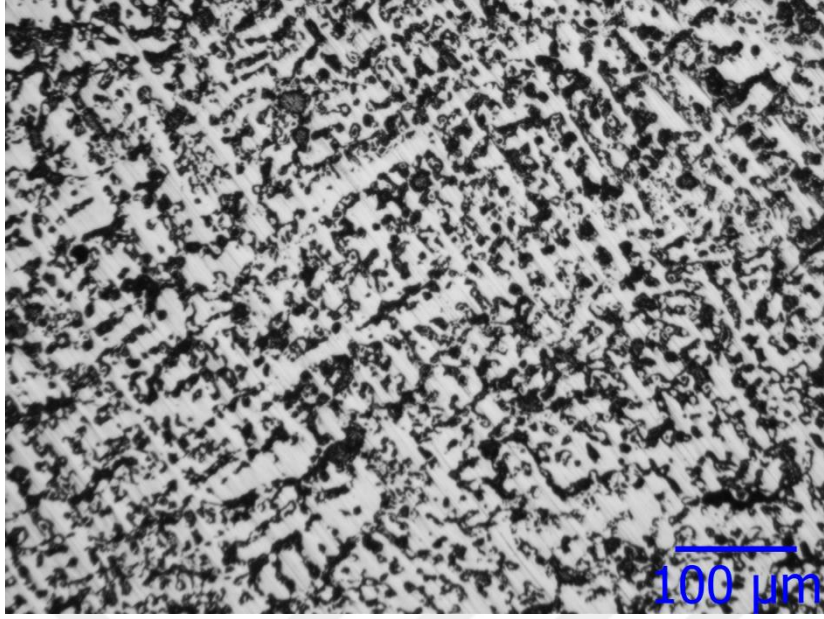
Optik mikroskopta bakalite alınmış kompozit malzeme ve kompozit malzemeyi oluşturan Cu₆Sn₁₂Pb, GG25, Ni₃Al dağlama işlemleri yapılmadan ve yapıldıktan sonra görüntüleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemleri yapılmadan mikro yapıdaki fazlar net bir şekilde anlaşılammaktadır. Cu₆Sn₁₂Pb (bronz alaşımı), GG25 ve NiAl alaşımı dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Dağlama işleminde GG25 alaşımı %6 Nital, Ni₃Al alaşımı 175 ml distile su, 20 ml HNO₃, 3 ml HCl, 2 ml HF çözeltisiyle, Cu₆Sn₁₂Pb alaşımı ise 10 ml CuSO₄, 50 ml HCl, 50 ml distile su çözeltisi ile dağlanmıştır. Kompozit malzemeye herhangi bir dağlama işlemi gerçekleştirilememiştir.

Şekil 5.5 de dağlama öncesi Bronz, 5.6 da dağlaması sonrası Bronz, 5.7 de GG25 ve , 5.8 de Ni₃Al alaşımlarının dağlama sonrası mikro yapı incelemeleri gösterilmiştir.

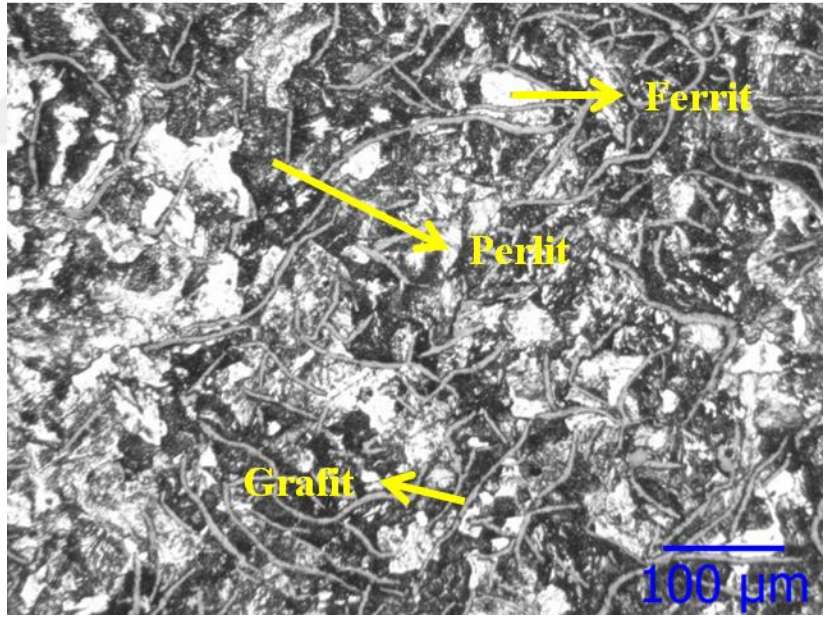


Şekil 5.5 Bronz 50x ölçekteki mikro yapısı

Bronz alaşımındaki (Cu₆Sn₁₂Pb) kurşun metalleri dağlama öncesinde siyah noktacıklar halinde gözükmektedir. Mikro yapıdan Kurşun 'un bronz içinde çözülmediği ve homojen bir dağılım gösterdiği görölmektedir. Dağılan kurşun damlacıklarını boyutu değişse de çoğunluğunun küçük ve yaklaşık aynı boyutta olduğu kabul edilebilir.

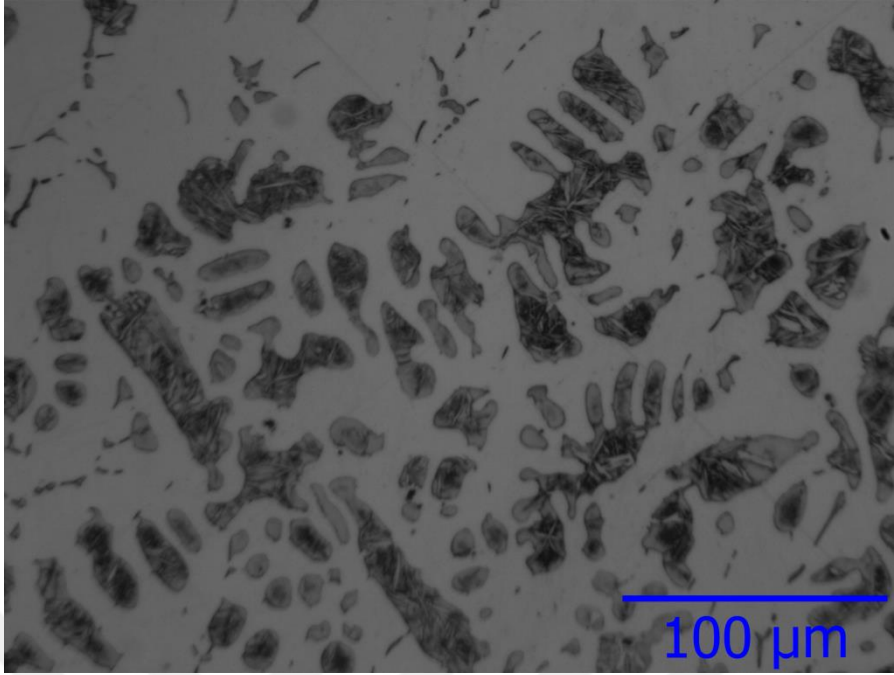


Şekil 5.6. Bronz 100x ölçekteki dağlama sonrasındaki mikro yapısı



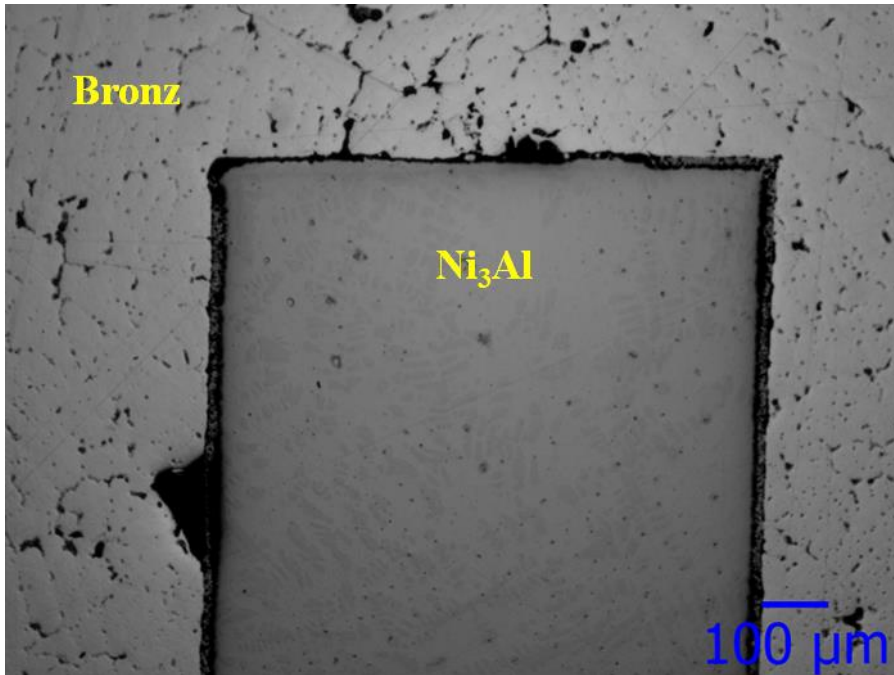
Şekil 5.7. GG25 100x ölçekteki dağlama sonrasındaki mikro yapısı

GG25 grafit dökme demir yapısındaki dağlanmış fotoğrafta perlitik ve ferritik fazlar ve lamelli grafit yapılar gözükmektedir.

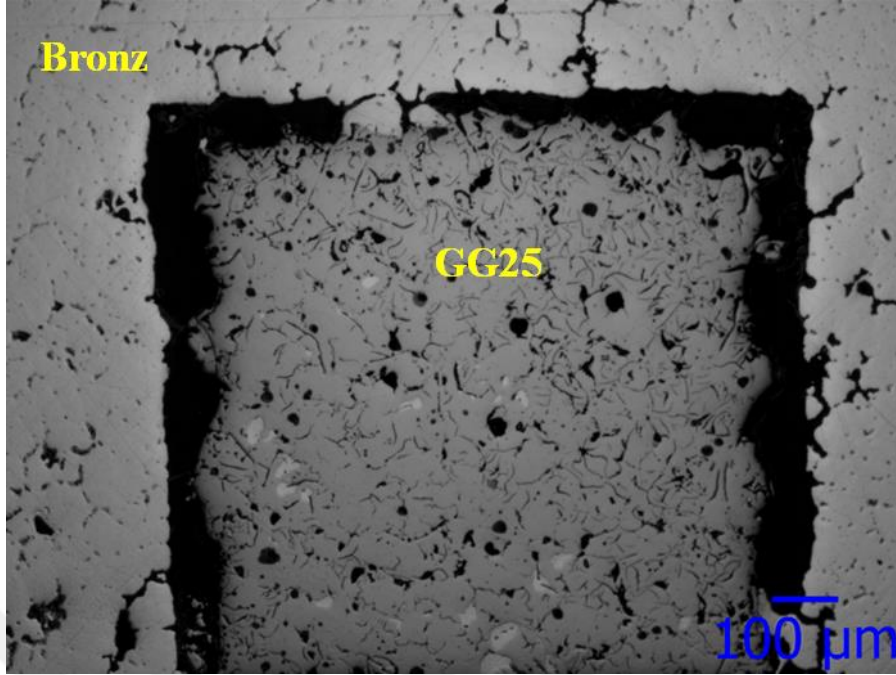


Şekil 5.8. Ni₃Al 200x ölçekteki dağlama sonrasındaki mikro yapısı

Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler optik mikroskopta incelendikten sonra grafit kalıp içinde üretilen kompozit malzeme incelenmiştir. Şekil 5.9 da kompozit malzemedeki bronz ve Ni₃Al hattı şekil 5.10 da ise kompozit malzemedeki bronz alaşımı ve GG25 hattı gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Kompozit malzemedeki Bronz ve Ni₃Al 50x ölçek



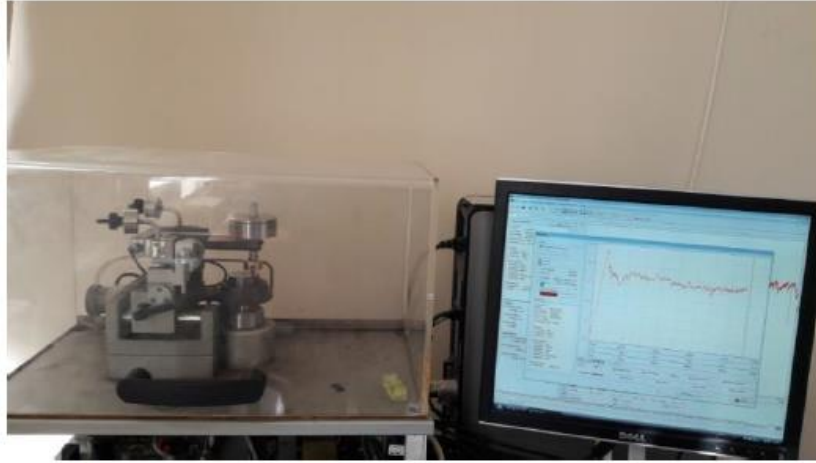
Şekil 5.10. Kompozit malzemedeki Bronz ve GG25 hattı 50x ölçek

Sürtünme ve aşınma testlerinde sertlik değerinin önemli bir yeri olduğu bilinmektedir. Bu nedenle optik mikroskopla gerçekleştirilen görüntüleme işlemi tamamlandıktan sonra Bronz, GG25, Ni₃Al ve karşı cisim olarak kullanılan GGG60 alaşımlarının yüzeylerinden beş farklı yerden sertlik değeri ölçülmüş ve hesaplanan ortalama sertlik değerleri çizelge 5.1 de verilmiştir. Sertlik ölçümünde Vickers ucu kullanılarak 10kg yük 15 sn süreyle uygulanarak ölçümler yapılmıştır.

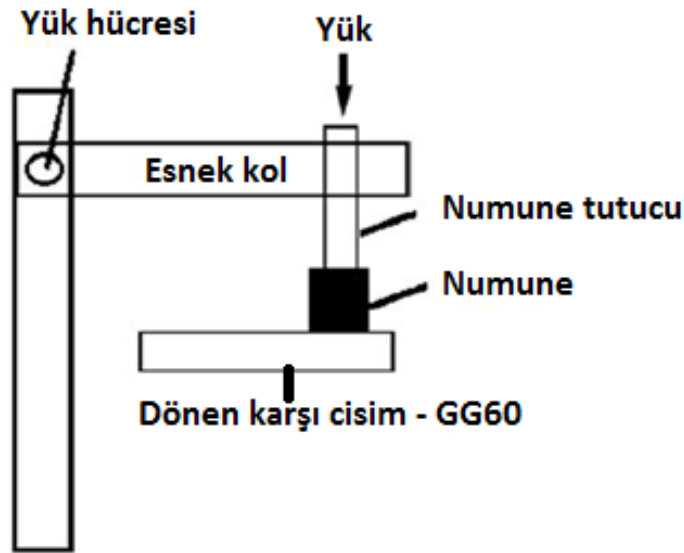
Çizelge 5.1. Numune sertlik değerleri

Numune	Mikro Sertlik değeri (HV)
Bronz	65
GG25	250
Ni ₃ Al	389
GGG60	262

Sürtünme ve aşınma testlerinde şekil 5.11 de gösterilen ve ASTM G99 standardına uygun CSM Instruments Standart Tribometer model tribometre cihazı kullanılmıştır. Bu cihaza ait temsili görüntü şekil 5.12 de verilmiştir.



Şekil 5.11. CSM Tribometre



Şekil 5.12. CSM Tribometre cihazı temsili görsel

Sürtünme ve aşınma testlerinde parametre olarak 3N ve 5N olmak üzere iki farklı yük, 25cm/sn ve 50cm/sn olmak üzere iki farklı sürtünme hızı belirlenmiştir. Ayrıca toplam sürtünme mesafesi 10000 metre olacak şekilde 2000 metrelik 5 tekrar gerçekleştirilmiştir. Her 2000 metrelik mesafede deney durdurulmuş ve numuneler tartılarak aşınma miktarları miligram cinsinden kayıt altına alınmıştır. Ayrıca her yeni test parametresine başlamadan önce numuneler yüzey hazırlama işlemine tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma testlerinde karşı cisim olarak GGG60 dökme demirin kullanılmasına ve kompozit malzemedeki GG25 ve Ni₃Al plakalarının sürtünme yönüne paralel olarak yerleştirilmesine karar verilmiştir. Gerçekleştirilen tüm sürtünme testlerinde hazırlanan Ni₃Al alaşımı, lamine grafitli dökme demir (GG25), bronz alaşımı (Cu6Sn12Pb)

ve kompozit malzeme numuneleri sürtünme yüzeyine dik gelecek şekilde yerleştirilmiş ve kuru sürtünme testlerine tabi tutulmuştur. Sürtünme testleri oda sıcaklığında ve %40 nem oranında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.2 de numunelere uygulanan yük miktarları, sürtünme hızı ve mesafe bilgileri verilmiştir.

Çizelge 5.2. Numunelere uygulanan yük, sürtünme hızı ve mesafe

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

Kompozit malzeme içindeki Ni₃Al ve GG25 plakalarının sürtünme yönüne paralel olarak gerçekleştirilen 3N-50cm/sn ve 5N-50cm/sn testlerinde kullanılan CSM Tribometer cihaz kapasitesini aşıldığı ve hata alındığı için yeni bir kurgu geliştirilmiş ve kompozit malzeme numune tutucuya 90 derece döndürülerek bağlanmıştır. Bu şekilde Ni₃Al ve GG25 plakalarının sürtünme yönüne dik olması sağlanmıştır. Kompozit malzemedeki diğer test parametrelerin testleri sürtünme yönüne paralel yönde gerçekleştirilmiştir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

CSM Tribometre cihazında ASTM G99 standardına göre gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma testleri Çizelge 5.2 de gösterildiği gibi 3N ve 5N olacak şekilde iki farklı yük ve 25 cm/sn ve 50 cm/sn olacak şekilde iki farklı sürtünme hızında uygulanmıştır.

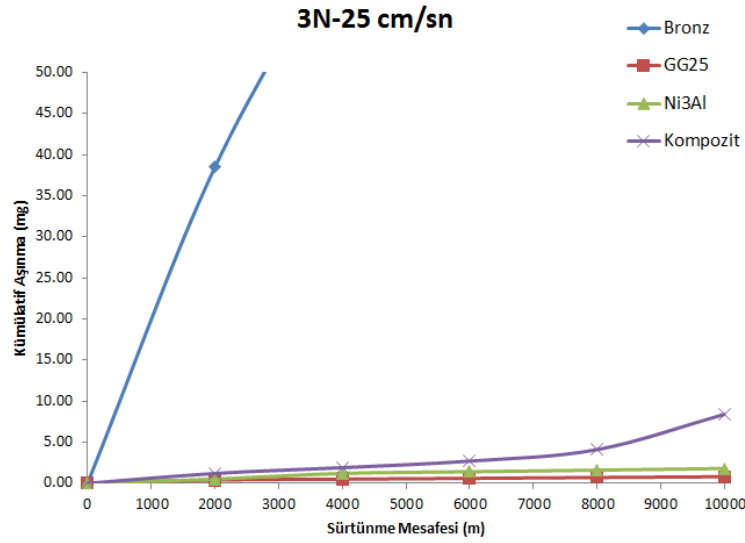
6.1 Kümülatif Aşınma

Çizelge 6.1 de 3N yük ve 25 cm/sn sürtünme hızı altında numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı verilmiştir. Yapılan ölçümlerde 3N yük ve 25 cm/sn kayma hızı altında 5. Test sonunda toplamda bronz alaşımı 142.1 mg, GG25 0.8 mg, Ni₃Al 1.8 mg ve bu alaşımlardan elde edilen kompozit malzeme 8.4 mg aşınmıştır.

Çizelge 6.1 3N-25 cm/sn numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı

3N-25 cm/sn					
		Bronz	GG25	Ni ₃ Al	Kompozit
	Mesafe (m)	Kümülatif Aşınma (mg)	Kümülatif Aşınma (mg)	Kümülatif Aşınma (mg)	Kümülatif Aşınma (mg)
Test Başlangıcı	0	0	0	0	0
1. Test	2000	38.5	0.4	0.5	1.2
2. Test	4000	65.7	0.5	1.2	1.9
3. Test	6000	89.4	0.6	1.4	2.7
4. Test	8000	112.7	0.7	1.6	4.1
5. Test	10000	142.1	0.8	1.8	8.4

3N yük ve 25 cm/sn deki aşınma miktarları kullanılarak malzemelerde meydana gelen mesafeye bağlı kümülatif aşınma miktarı Şekil 6.1 de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. 3N-25cm/sn malzemelerde meydana gelen mesafeye bağlı aşınma miktarı

Şekil 6.1 de de görüldüğü gibi 3N ve 25 cm/sn Bronz malzemesindeki aşınma miktarı sürtünme mesafesine bağlı olarak hızlı bir şekilde artarken GG25 ve Ni₃Al malzemeleri neredeyse sabit bir artış göstermiştir. Bu bileşenlerden elde edilen kompozit malzeme ise hacimsel olarak 2/5'i Ni₃Al ve GG25 ve 3/5'i bronz olmasına rağmen Ni₃Al ve GG25 ile yakın aşınma miktarına sahiptir.

Çizelge 6.2 de 3N yük ve 50 cm/sn kayma hızı altında numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı verilmiştir. Yapılan ölçümlerde 3N yük ve 50 cm/sn kayma hızı altında 5. test sonunda toplamda bronz alaşımı 20.7 mg, GG25 1.2 mg, 4. test sonunda Ni₃Al 1.4 mg ve 5. Test sonunda bu alaşımlardan elde edilen kompozit malzeme 2 mg aşınmıştır.

Daha önce çizelge 5.1 de de gösterildiği gibi Ni₃Al malzemesinin sertlik değeri 389 HV olarak yapıdaki diğer malzemelerden epeyce yüksek bir değerdir ve aşınmaya karşı direnci yüksek olması sebebiyle 50 cm/sn kayma hızı altında 5. tekrar tamamlanamamıştır. Cihazda test sırasında hata alınmıştır ve durmuştur. Bu nedenle verilen 1.4 mg'lık kümülatif aşınma değeri 4. tekrar sonunda ölçülmüştür.

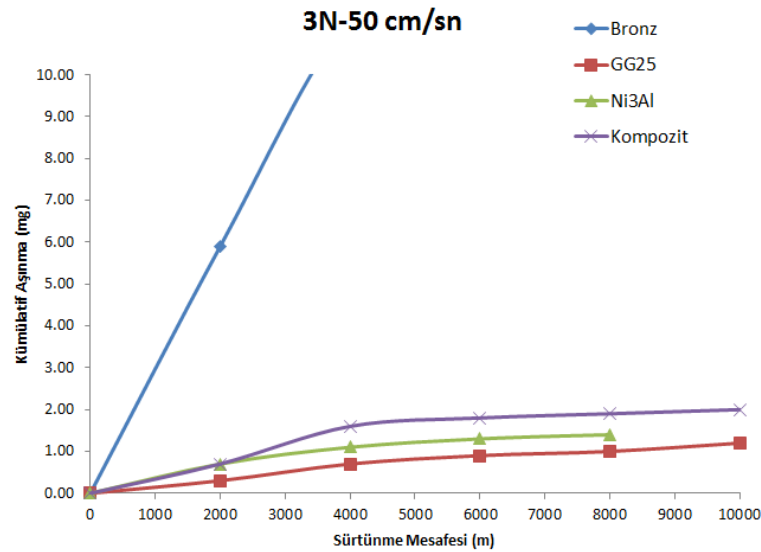
Çizelge 6.1 ve 6.2 incelendiğinde 3N yük için sürtünme hızı arttırıldığında bronzdaki aşınmanın ciddi biçimde azaldığı GG25'de arttığı Ni₃Al de pek değişmediği ve

kompozit için ise azaldığı görülmektedir. Düşük sürtünme yüklerinde sürtünme hızının artmasıyla hem bronzun hem de kompozitin aşınma direnci artmaktadır.

Çizelge 6.2 3N-50 cm/sn numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı

3N-50 cm/sn					
		Bronz	GG25	Ni3Al	Kompozit
	Mesafe (m)	Kümülatif Aşınma (mg)	Kümülatif Aşınma (mg)	Kümülatif Aşınma (mg)	Kümülatif Aşınma (mg)
Test Başlangıcı	0	0.00	0	0	0
1. Test	2000	5.90	0.3	0.7	0.7
2. Test	4000	11.40	0.7	1.1	1.6
3. Test	6000	13.50	0.9	1.3	1.8
4. Test	8000	18.40	1	1.4	1.9
5. Test	10000	20.70	1.2	Tamamlanmadı	2

3N yük ve 50 cm/sn deki aşınma miktarları kullanılarak malzemelerde meydana gelen mesafeye bağlı kümülatif aşınma miktarı Şekil 6.2 de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. 3N-50cm/sn malzemelerde meydana gelen mesafeye bağlı aşınma miktarı

Şekil 6.2 de de görüldüğü gibi 3N ve 50 cm/sn Bronz malzemesindeki aşınma miktarı sürtünme mesafesine bağlı olarak hızlı bir şekilde artarken GG25 ve Ni₃Al malzemeleri bronz malzemesine göre daha az aşınmıştır. Bu bileşenlerden elde edilen kompozit malzeme ise hacimsel olarak çok az Ni₃Al ve GG25 ihtiva etmesine rağmen bu malzemeler ile yakın aşınma davranışı göstermiştir.

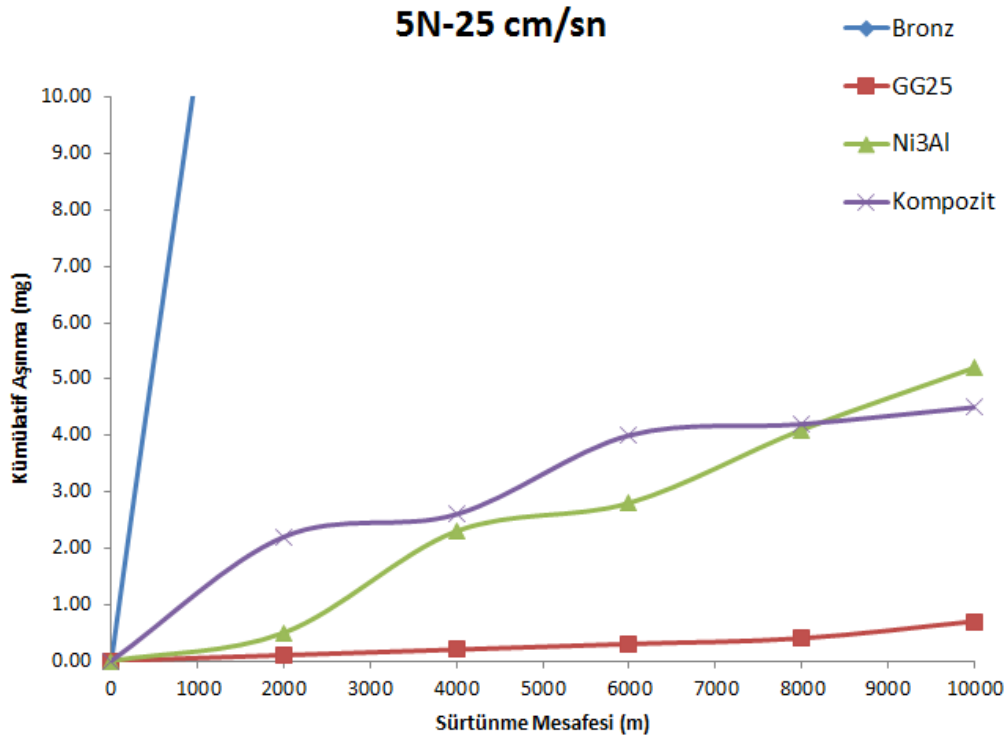
Çizelge 6.3 de 5N yük ve 25 cm/sn kayma hızı altında numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı verilmiştir. Yapılan ölçümlerde 5N yük ve 25 cm/sn kayma hızı altında 5. Test sonunda 169.8 mg, GG25 0.7 mg, Ni₃Al 5.2 mg ve bu alaşımlardan elde edilen kompozit malzeme 4.5 mg aşınmıştır.

Çizelge 6.3 5N-25 cm/sn numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı

5N-25cm/sn					
		Bronz	GG25	Ni ₃ Al	Kompozit
	Mesafe (m)	Kümülatif Aşınma (mg)	Kümülatif Aşınma (mg)	Kümülatif Aşınma (mg)	Kümülatif Aşınma (mg)
Test Başlangıcı	0	0.00	0	0	0
1. Test	2000	22.50	0.1	0.5	2.2
2. Test	4000	55.00	0.2	2.3	2.6
3. Test	6000	90.80	0.3	2.8	4
4. Test	8000	129.10	0.4	4.1	4.2
5. Test	10000	169.80	0.7	5.2	4.5

Çizelge 6.1 ve 6.3 karşılaştırıldığında düşük sürtünme hızlarında normal yük arttırıldığında bronzdaki aşınmanın arttığı, GG25 de pek değişmediği, Ni₃Al de çok arttığı ve kompozitte ise azaldığı görülmektedir. Düşük sürtünme hızlarında normal yükün artmasıyla bronzun ve Ni₃Al alaşımının aşınma direnci azalırken GG25'in aşınma direnci değişmemekte fakat kompozitin aşınma direnci yaklaşık iki kat artmaktadır.

5N yük ve 25 cm/sn deki aşınma miktarları kullanılarak malzemelerde meydana gelen mesafeye bağlı kümülatif aşınma miktarı Şekil 6.3 de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. 5N-25cm/sn malzemelerde meydana gelen mesafeye bağlı aşınma miktarı

Şekil 6.3 de de görüldüğü gibi 5N ve 25 cm/sn Bronz malzemesindeki aşınma miktarı sürtünme mesafesine bağlı olarak hızlı bir şekilde artarken GG25 ve Ni₃Al malzemeleri bronz malzemesine göre daha az aşınmıştır. Bu bileşenlerden elde edilen kompozit malzeme ise hacimsel olarak çok az Ni₃Al ve GG25 ihtiva etmesine rağmen kayma mesafesi arttıkça Ni₃Al malzemesine göre daha az aşınmaya başlamıştır.

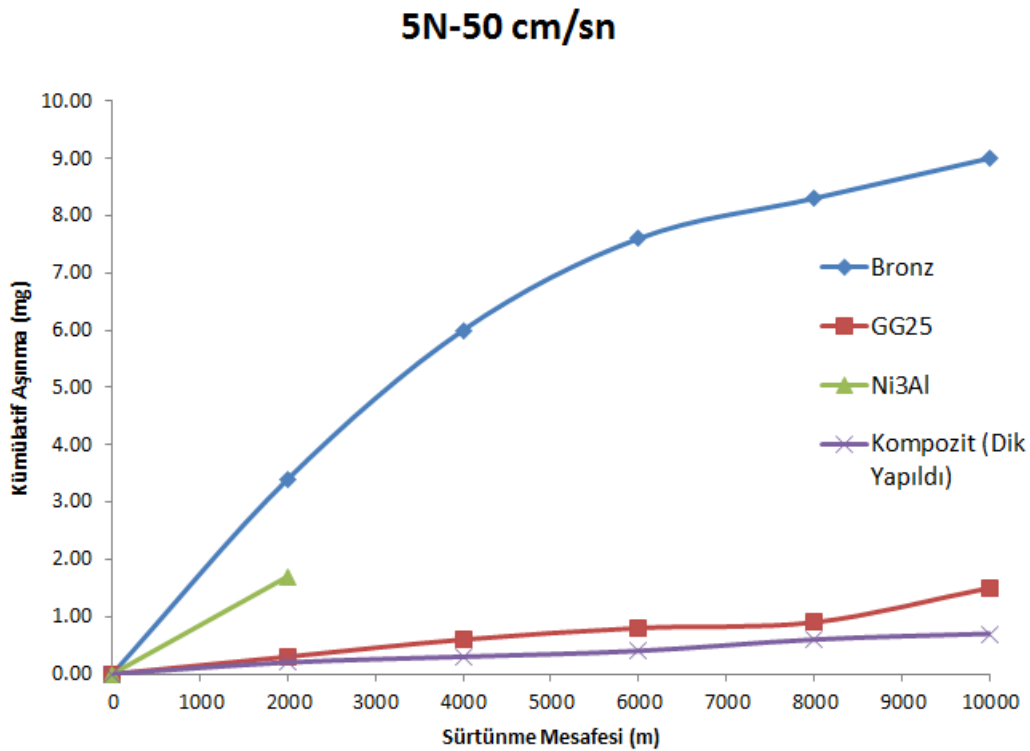
Çizelge 6.4 de 5N yük ve 50 cm/sn kayma hızı altında numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı verilmiştir. Yapılan ölçümlerde 5N yük ve 50 cm/sn kayma hızı altında 5. test sonunda bronz alaşımı 9 mg, GG25 1.5 mg, 1. test sonunda Ni₃Al 1.7 mg ve 5. Test sonunda bu alaşımlardan elde edilen kompozit malzeme 2 mg aşınmıştır.

Daha önce çizelge 5.1 de de gösterildiği gibi Ni₃Al malzemesinin sertlik değeri 389 HV gibi oldukça yüksek bir değer olmasından dolayı 50 cm/sn kayma hızı altında 5. tekrar tamamlanamamıştır. Bu nedenle verilen 1.7 mg'lık kümülatif aşınma değeri 1. tekrar sonunda ölçülmüştür.

Çizelge 6.4 5N-50 cm/sn numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı

	5N-50 cm/sn				
	Mesafe (m)	Bronz	GG25	Ni ₃ Al	Kompozit
		Kümülatif Aşınma (mg)	Kümülatif Aşınma (mg)	Kümülatif Aşınma (mg)	Kümülatif Aşınma (mg)
Test Başlangıcı	0	0.00	0	0	0
1. Test	2000	3.40	0.3	1.7	0.2
2. Test	4000	6.00	0.6	Tamamlanamadı	0.3
3. Test	6000	7.60	0.8	Tamamlanamadı	0.4
4. Test	8000	8.30	0.9	Tamamlanamadı	0.6
5. Test	10000	9.00	1.5	Tamamlanamadı	0.7

5N yük ve 50 cm/sn deki aşınma miktarları kullanılarak malzemelerde meydana gelen mesafeye bağlı kümülatif aşınma miktarı Şekil 6.4 de gösterilmiştir.



Şekil 6.4. 5N-50cm/sn malzemelerde meydana gelen mesafeye bağlı aşınma miktarı

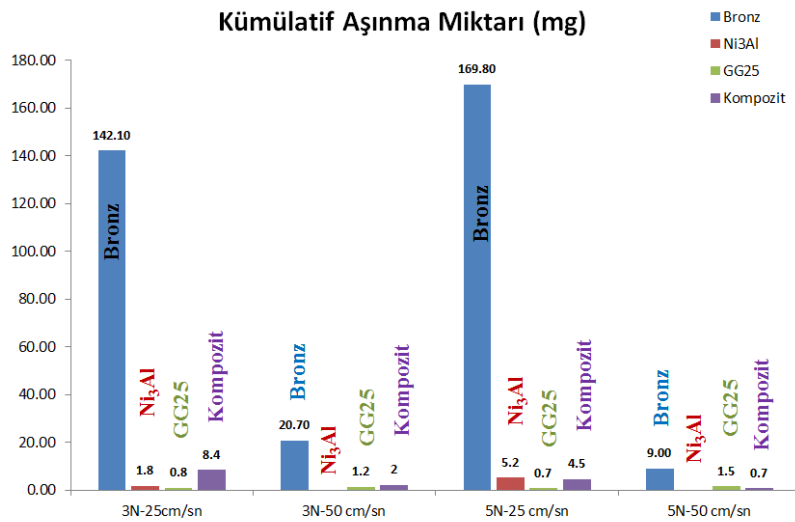
Şekil 6.4 de de görüldüğü gibi 3N ve 50 cm/sn Bronz malzemesindeki aşınma miktarı sürtünme mesafesine bağlı olarak hızlı bir şekilde artarken GG25 ve Ni₃Al malzemeleri bronz alaşımına göre daha az aşınmıştır. Bu bileşenlerden elde edilen kompozit malzeme ise hacimsel olarak çok az Ni₃Al ve GG25 ihtiva etmesine rağmen bu malzemelerden daha iyi bir aşınma davranışı göstermiştir.

Çizelge 6.3 ve 6.4 incelendiğinde 5N sürtünme yükünde sürtünme hızının artmasıyla bronzun aşınma direncinin çok arttığı, GG25'in iki kat arttığı ve kompozitin de yaklaşık 7 kat arttığı görülmektedir. Yüksek sürtünme yükleri için sürtünme hızının artmasıyla bronzun ve kompozitin aşınma direncinde ciddi artış görülmektedir.

Çizelge 6.5 de 10000m sürtünme mesafesinden sonra elde edilen aşınma miktarları özetlenmiştir. Şekil 6.5'de ise çizelge 6.5 de gösterilen değerlerin grafiği oluşturulmuştur.

Çizelge 6.5 Numunelerde meydana gelen kümülatif aşınma miktarı

	Kümülatif Aşınma Miktarı (mg)			
	Bronz	Ni ₃ Al	GG25	Kompozit
3N-25cm/sn	142.10	1.8	0.8	8.4
3N-50 cm/sn	20.70	5 Tekrar Tamamlanamadı	1.2	2
5N-25 cm/sn	169.80	5.2	0.7	4.5
5N-50 cm/sn	9.00	5 Tekrar Tamamlanamadı	1.5	0.7



Şekil 6.5. Tüm testlerdeki kümülatif aşınma miktarları

3N ve 5N uygulama yüklerinin her ikisi içinde kayma hızının artmasıyla bronz malzemesindeki kümülatif aşınma oranında kayda değer bir düşüş gözlemlenmiştir. Yine de bronz malzemesinde meydana gelen aşınma oranları Ni₃Al ve GG25 alaşımlarına göre daha yüksek olduğu ve düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu için bu bileşendeki etkisi en düşük alaşım olduğu çıkarımına varılabilir. Yapıda bulunan bronz miktarı kompozit malzemenin aşınma miktarını arttırmasına rağmen çok az miktarda bulunan Ni₃Al ve GG25 alaşımları kompozit malzemenin sürtünme ve aşınma davranışını oldukça iyi bir noktaya getirdiği açıkça görülmüştür.

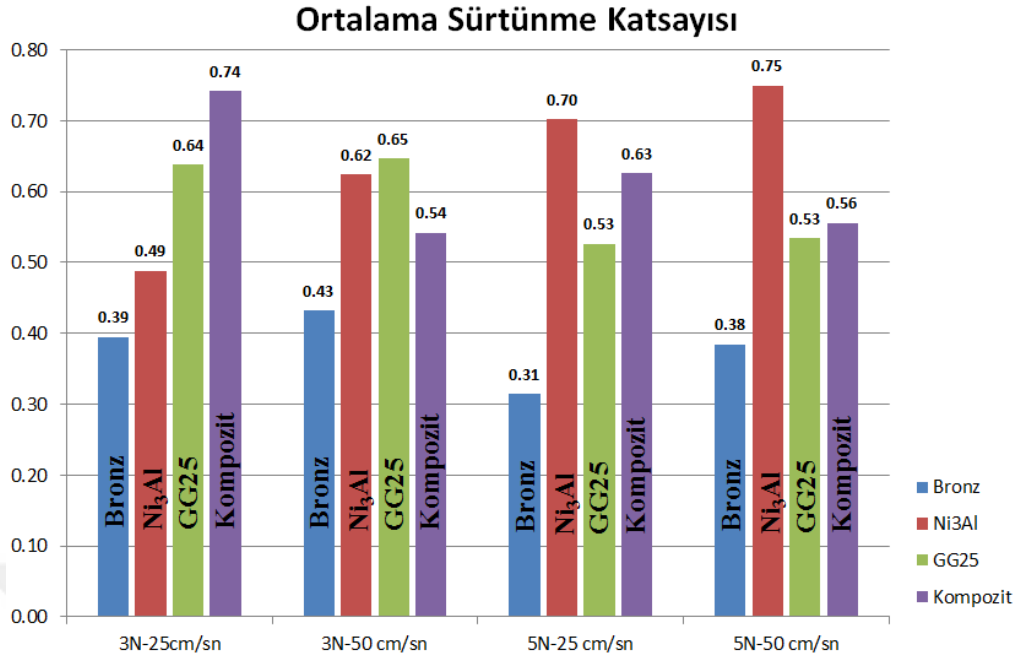
Kompozit malzemede 3N ve 5N grafikleri karşılaştırıldığında sabit yük altında kayma hızının artmasıyla kümülatif aşınma miktarının epeyce düştüğü gözlemlenmektedir. Benzer şekilde 25cm/sn ve 50cm/sn grafikleri karşılaştırıldığında sabit kayma hızı altında uygulanan yük arttıkça kompozit malzemedeki kümülatif aşınma miktarları düşmüştür. Yüksek yük ve yüksek hız parametresi olarak çalışılan 5N-50 cm/sn koşulunda kompozit malzeme, bileşenlerini oluşturan Bronz, GG25 ve Ni₃Al malzemelerinden aşınmaya karşı daha yüksek direnç göstermiştir.

6.2 Sürtünme Katsayısı

Sürtünme yükü ve sürtünme hızına bağlı olarak her bir test için 5 tekrar sonucu oluşan ortalama sürtünme katsayısı çizelge 6.6 da özetlenmiş ve şekil 6.6 da grafiğe dökülmüştür.

Çizelge 6.6 Ortalama sürtünme katsayıları

	Ortalama Sürtünme Katsayısı			
	Bronz	Ni ₃ Al	GG25	Kompozit
3N-25cm/sn	0.39	0.49	0.64	0.74
3N-50 cm/sn	0.43	0.62	0.65	0.54
5N-25 cm/sn	0.31	0.70	0.53	0.63
5N-50 cm/sn	0.38	0.75	0.53	0.56



Şekil 6.6. Ortalama sürtünme katsayıları

Tüm testlerde Bronz, GG25, Ni₃Al ve Kompozit malzeme karşılaştırıldığında bronz malzemesinin sürtünme katsayıları en düşüktür. Bronz malzemesinin sürtünme katsayısı sabit yük altında kayma hızının artmasıyla artmaktadır. Fakat sabit kayma hızı altında uygulanan yükün artmasıyla sürtünme katsayısı düşmektedir. Kümülatif aşınma başlığı altında bronz malzemesi için yapılan yorumlar göz önünde bulundurulduğunda bronz malzemesinin düşük sürtünme katsayısına sahip olmasının ana nedeni yüksek aşınma nedeniyle ara yüzeyde oluşan aşınma partikülleri ve bu partiküllerin ara yüzeyden kolaylıkla uzaklaştırılmasıdır. Oluşan aşınma partikülleri yuvarlanarak iki yüzeyin birbirleri ile net temasını engellemektedir. Ayrıca bronz içindeki kurşun sürtünme ara yüzeyine sıvanarak sürtünme katsayısını düşürmektedir.

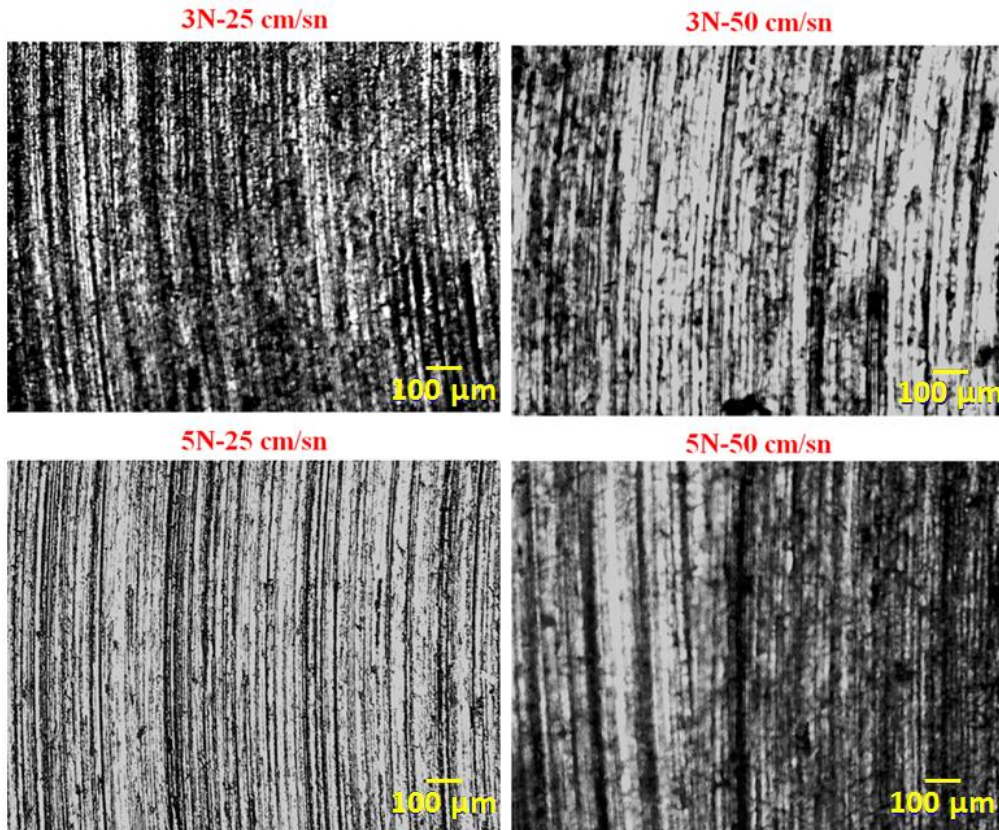
Ni₃Al malzemesinin sürtünme katsayısı hem uygulanan yükün artması hem de kayma hızının artmasıyla artmaktadır. Yüksek yük ve kayma hızı altında GG25 malzemesinden daha iyi sürtünme ve aşınma direnci davranışı göstermektedir. Bu nedenle Kompozit malzemenin en verimli elemanı olduğu söylenebilir. GG25 deki düşük sürtünme ve yüksek aşınma direncinin nedeni ara yüzeye sıvanan grafitir. Uygulanan yük ara yüzeydeki bu filmi kırıp uzaklaştıracak kadar büyük değildir. Ara yüzeydeki grafit filmi sürtünen iki yüzeyi etkili bir biçimde ayırabilmiştir.

GG25 malzemesinin sabit yük altında kayma hızının artmasıyla sürtünme katsayısının değişmediği gözlemlenmiştir. Sabit hız altında yapılan incelemede uygulanan yükün artmasıyla sürtünme katsayısının kayda değer bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir.

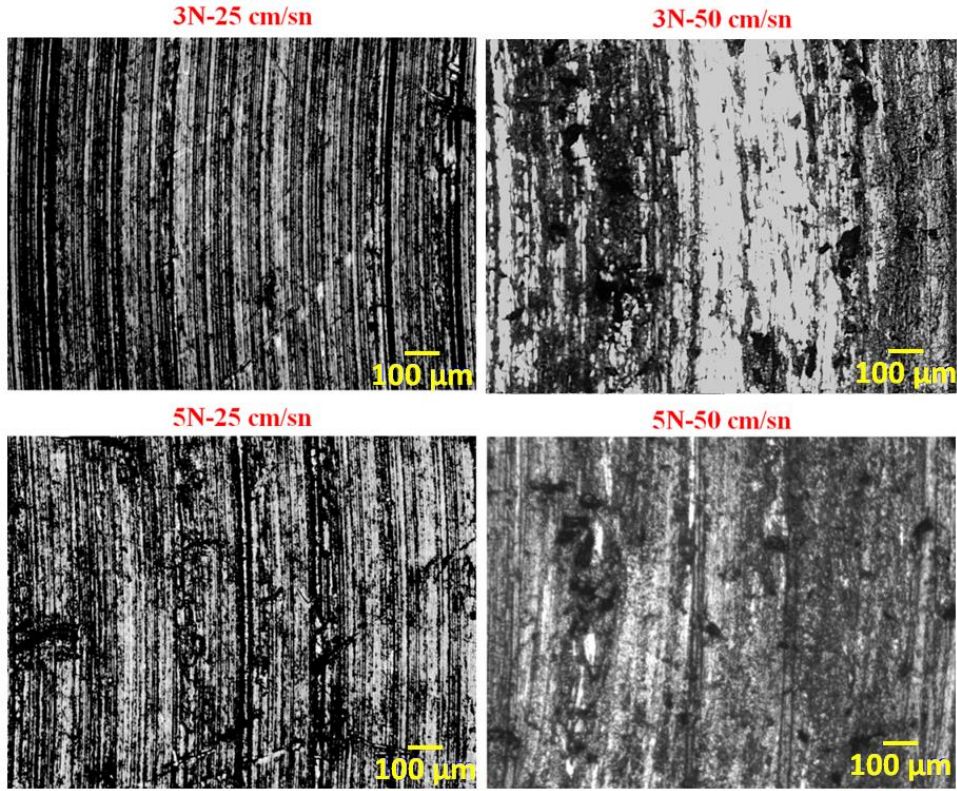
Kompozit malzemenin sürtünme katsayısı ise bileşenlerini oluşturan Bronz, Ni₃Al ve GG25 den farklı bir şekilde hem kayma hızının artması hem de uygulanan yükün artmasıyla azalmıştır. Yine de tüm testlerde oluşan en düşük sürtünme katsayısı 0.5 değerinden yüksek olup uygulanan yükün ve kayma hızının artmasıyla aşınma miktarı ciddi bir şekilde düştüğü için tercih edilebilir.

6.3 Aşınma Yüzeyleri İncelemesi

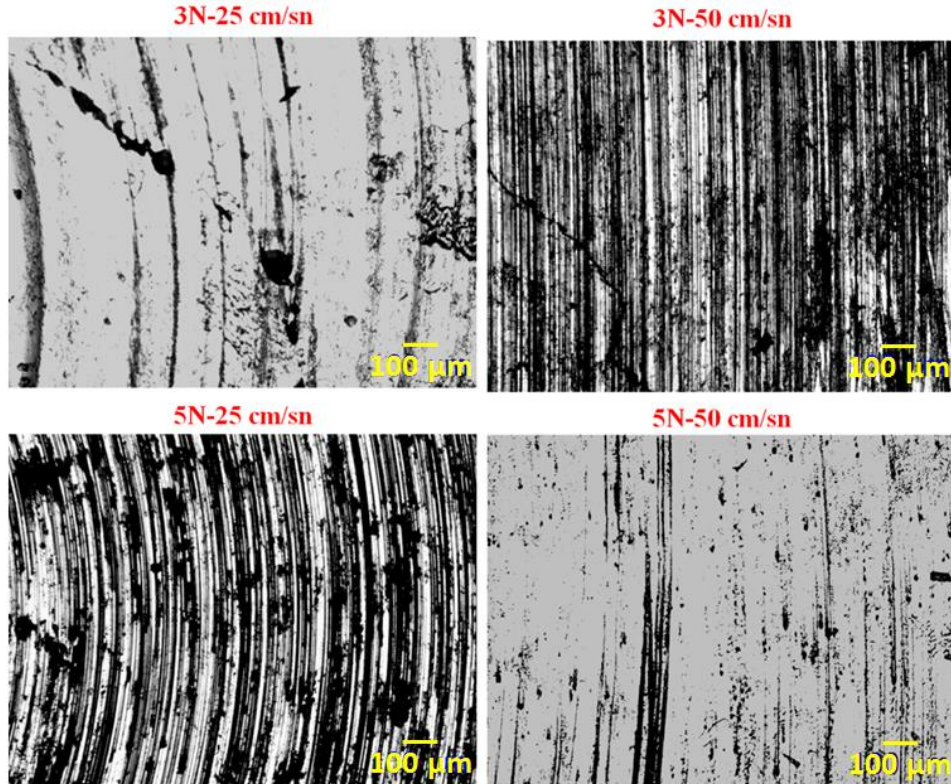
Gerçekleştirilen her bir test parametresinden sonra Bronz, GG25, Ni₃Al ve Kompozit malzeme için optik mikroskop yardımı ile aşınma yüzeyleri incelenmiştir. Şekil 6.7, 6.8 ve 6.9 da sırasıyla Bronz, GG25 ve Ni₃Al malzemeleri için 3N ve 5N yük altında alınan 25cm/sn ve 50cm/sn optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.7. Bronz sürtünme ve aşınma testi sonrası mikro yapılar (50x)



Şekil 6.8. GG25 sürtünme ve aşınma testi sonrası mikro yapılar (50x)



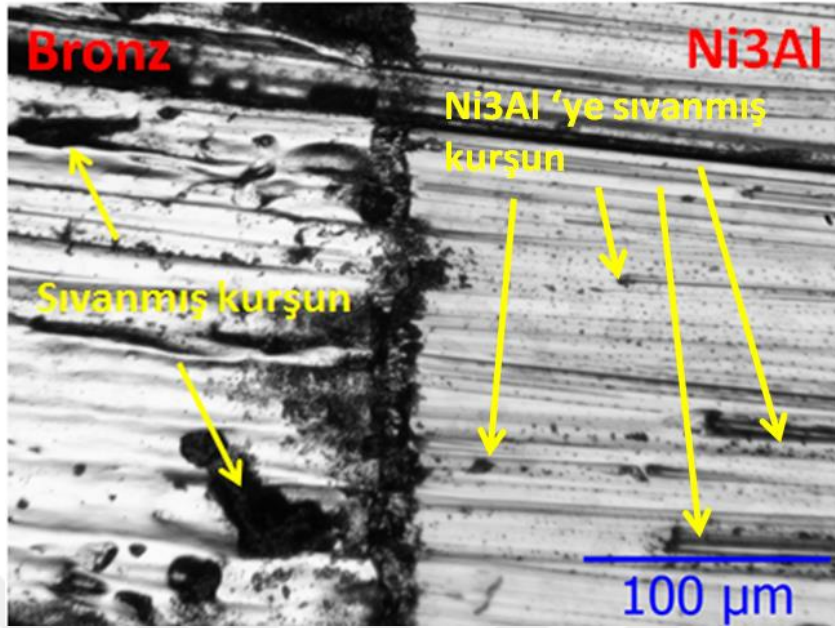
Şekil 6.9. Ni₃Al sürtünme ve aşınma testi sonrası mikro yapılar(50x)

Şekil 6.7 de görüldüğü gibi bronz da hakim aşınma mekanizması plastik deformasyonla abrasif aşınmadır. Karşı cisim olan GGG60 ın sertliği bronzdan çok fazladır. GGG60 yüzeyindeki pürüz uçları bronzla rahatlıkla bataabilmekte ve onun üzerinde oluklar açabilmektedir. Hem yükün artması hem de hızın artmasıyla abrasif aşınmaya ilaveten delaminasyon ile aşınmada başlamaktadır. 5N-50 cm/sn sürtünme şartlarında abrasif aşınmayla birlikte bronz üzerindeki plastik deformasyon da daha belirgin şekilde görülmektedir. Ayrıca yüksek yük ve hız şartlarında kurşununda yüzeye sıvandığı görülebilmektedir.

Şekil 6.8 de görüldüğü gibi GG25 malzemesinde düşük sürtünme hızlarında aşınma abrasiftir. GG25 ve GGG60 dökme demirlerinin sertlikleri çok farklı değildir. Yine de GGG60 daha serttir. Sert olan malzemenin pürüzleri daha yumuşak olan malzemeye batabilmiş ve abrasif aşınmaya neden olmuştur. Yüksek hızlarda ise abrasif aşınmanın etkisi azalmaktadır. Ara yüzeyde bulunan grafit, GG25 malzemenin yüzeyinin çok fazla aşınmasını önlemiştir. GG25 in aşınma miktarları zaten aşınmanın çok az olduğunu göstermektedir. 5N-50cm/sn şartlarında yüzeye sıvanmış olan grafit açıkça görülmektedir.

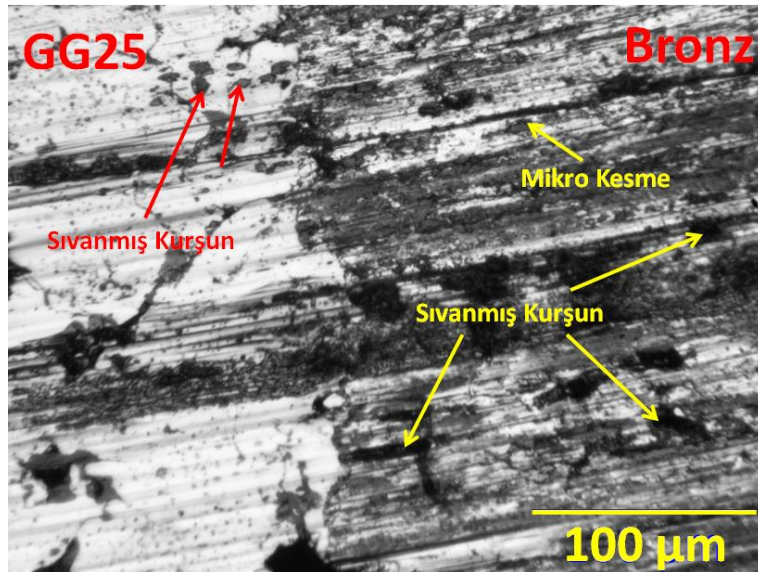
Şekil 6.9 da görüldüğü gibi Ni₃Al malzemesinde de sürtünme yönünde abrasif aşınmayı gösteren çizikler mevcuttur. Ni₃Al GGG60 dan daha sert bir malzemedir. Bu nedenle GGG60 pürüzleri abrasif aşınmaya neden olamaz. Ni₃Al nin aşınma direncini yüzeyde oluşturduğu alüminyum oksit ile sağlamaktadır. Sürtünme sırasında yüzeyden ayrılan alüminyum oksit partikülleri bu çiziklere neden olmuş olabilir.

Şekil 6.10 da GG25 ve Ni₃Al plakaları kayma yönüne dik yerleştirilmiş kompozit malzemenin 3N-50 cm/sn testine ait 200 büyütme oranında optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Daha öncede belirtildiği gibi bronz malzemesinde meydana gelen aşınma mekanizması abrasif ve adhesif aşınma mekanizmasıdır. Ayrıca bronz malzemesi üzerindeki sıvanmış kurşun partikülleri 200 büyütme altında çekilmiş görüntülerde tespit edilmiştir. Görselin sağ tarafında yer alan Ni₃Al malzemesinde ise aşınma miktarı belirli belirsiz olmasına rağmen yapılan diğer görsellerle de yapılan incelemelerde mikro ölçekte çatlaklara rastlanmıştır. Ni₃Al mekanizmasındaki aşınma oranının düşük olmasının sebebi olarak GGG60 malzemesinin sertlik değerinin Ni₃Al malzemesine göre daha düşük olması ve yüzeyde aşınmaya dirençli alüminyum oksit üretmesi söylenebilir.



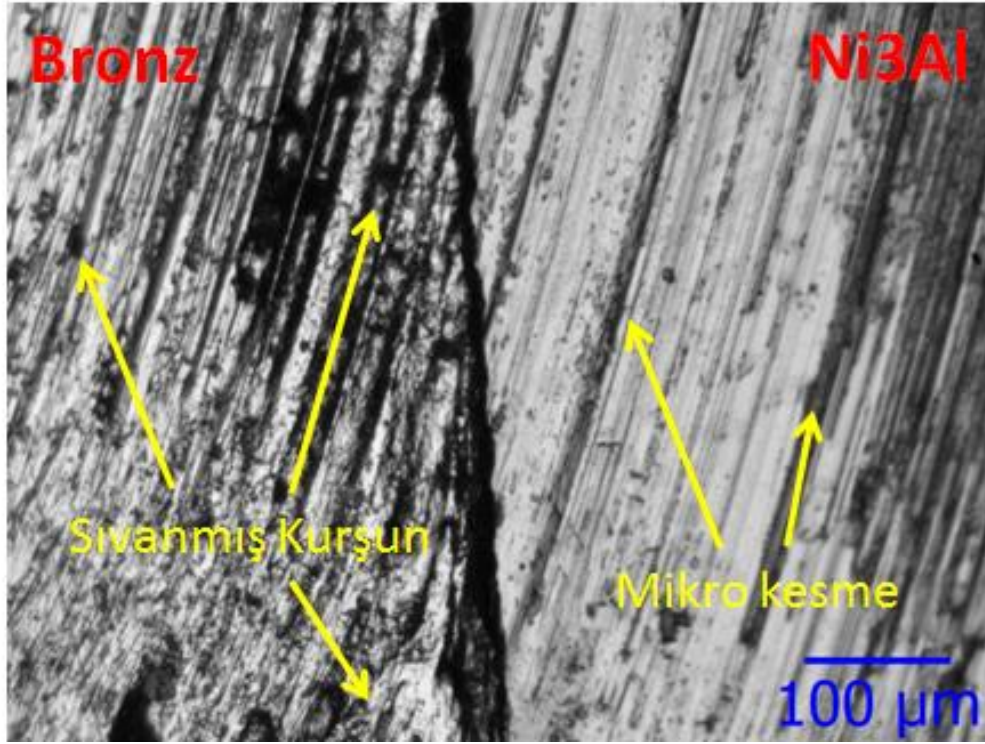
Şekil 6.10. Kompozit malzeme 3N-50 cm/sn sürtünme ve aşınma testi sonrası mikro yapılar (Sol Bronz – Sağ Ni₃Al)

Şekil 6.11 de yine aynı 3N-50 cm/sn test koşuluna ait bir başka 200 büyütme oranında optik mikroskop görseli paylaşılmıştır. Görselin sol tarafında GG25 alaşımı sağ tarafında ise Bronz alaşımı yer almaktadır. Bronz ve GG25 malzemesi üzerinde sıvanmış kurşun partikülleri ve mikro kesmeler meydana gelmiştir.



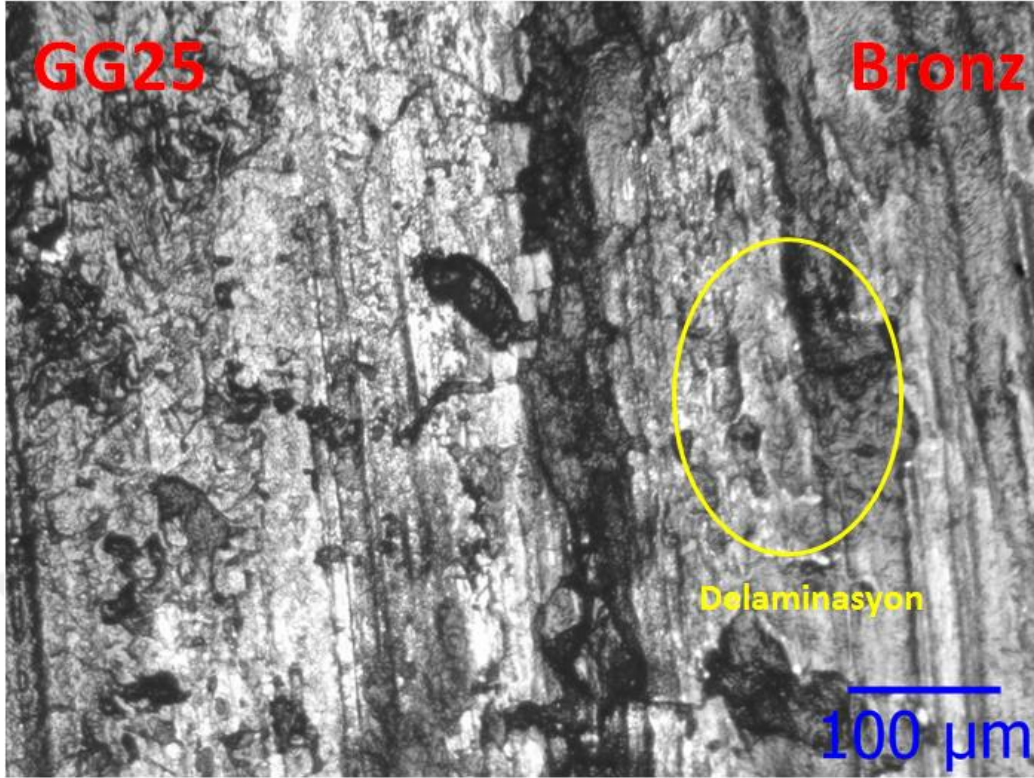
Şekil 6.11. Kompozit malzeme 3N-50 cm/sn sürtünme ve aşınma testi sonrası mikro yapılar (Sol GG25- Sağ Bronz)

Şekil 6.12 de GG25 ve Ni₃Al plakaları kayma yönüne paralel yerleştirilmiş kompozit malzemenin 5N-25 cm/sn testine ait 100 büyütme oranında optik mikroskop görüntüsü paylaşılmıştır. Görselin sol tarafında yer alan bronz malzemesinde sıvanmış kurşun partiküllerine rastlanmıştır olup görselin sağ tarafında yer alan Ni₃Al malzemesinde ise mikro kesmelere rastlanmıştır. Uygulama yükünün artmasıyla Bronz malzemesi üzerindeki sıvanmış kurşun partiküllerinin sayısı artmış olup bu partiküllerin daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca şekil 6.12 deki görsel ve yapıda yapılan diğer incelemelerde Ni₃Al ve Bronz malzemesi üzerinde mikro kesmelerin sayısının arttığı gözlemlenmiştir.



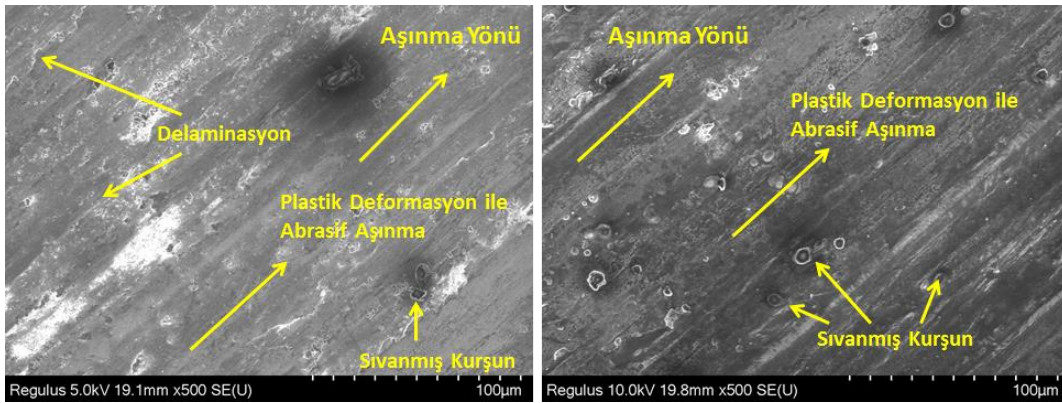
Şekil 6.12. Kompozit malzeme 5N-25 cm/sn sürtünme ve aşınma testi sonrası mikro yapılar (Sol Bronz- Sağ Ni₃Al)

Şekil 6.13 de de yine aynı 5N-25 cm/sn test koşuluna ait bir başka 100 büyütme oranında optik mikroskop görseli paylaşılmıştır. Görselin sol tarafında GG25 sağ tarafında ise bronz alaşımı yer almaktadır. Uygulama yükünün artmasıyla birlikte GG25 ve bronz malzemesi üzerindeki delaminasyon sayısı artmıştır.



Şekil 6.13. Kompozit malzeme 5N-25 cm/sn sürtünme ve aşınma testi sonrası mikro yapılar (Sol GG25- Sağ Bronz)

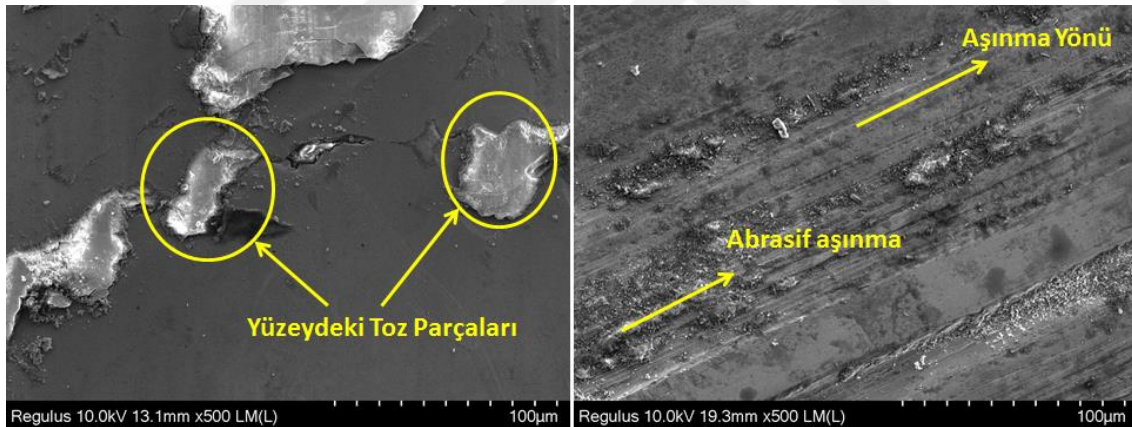
GG25 ve Ni₃Al plakaları kayma yönüne paralel yerleştirildiği kompozit malzemenin 3N-25 cm/sn ve GG25 ve Ni₃Al plakaları kayma yönüne dik yerleştirildiği kompozit malzemenin 5N-50 cm/sn testinde de benzer davranışlar gözlemlenmiş olup kayma hızının artmasıyla bronz malzemesi üzerindeki sıvanmış kurşun partiküllerinin sayısı artarken partikül boyutları küçülmektedir.



Şekil 6.14. Bronz alaşımına ait SEM görüntüsü (Sol 3N-25 cm/sn ve Sağ 5N-50cm/sn)

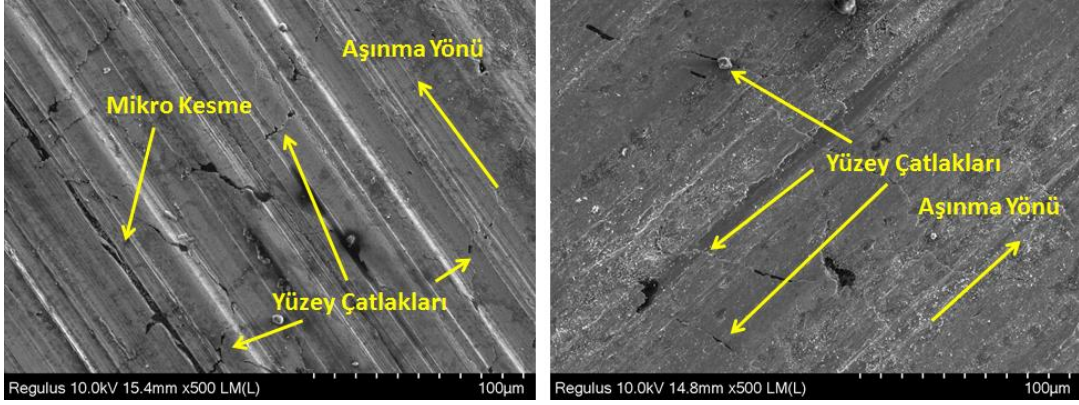
Şekil 6.14 de Bronz alaşımının 3N-25 cm/sn ve 5N-50 cm/sn test koşullarına ait SEM görüntüleri verilmiştir. 3N-25 cm/sn test koşulunda bronz alaşımı plastik deformasyon ile abrasif aşınmıştır. Hem yükün artması hem de hızın artmasıyla abrasif aşınmaya ilaveten delaminasyon ile aşınmada başlamaktadır. 5N-50 cm/sn sürtünme şartlarında abrasif aşınmayla birlikte bronz üzerindeki plastik deformasyon da daha belirgin şekilde görülmektedir. Ayrıca yüksek yük ve hız şartlarında sıvanmış kurşun partiküllerinin sayısının arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 6.15 de Ni_3Al alaşımının 3N-25 cm/sn ve 5N-50 cm/sn test koşullarına ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.15 den de anlaşılacağı gibi Ni_3Al alaşımında düşük yük ve düşük kayma hızında yüzeyde toz parçacıkları tespit edilmiştir. Ayrıca bu test koşulunda Ni_3Al alaşımının yüzeyinde aşınma neredeyse yoktur. 5N-50 cm/sn test koşulunda ise Ni_3Al yüzeyinde alüminyum oksit ve veya demir oksit tabakası tespit edilmiştir. Ayrıca Ni_3Al alaşımı bu oksit tabakası abrasif aşınma davranışı göstermiştir.



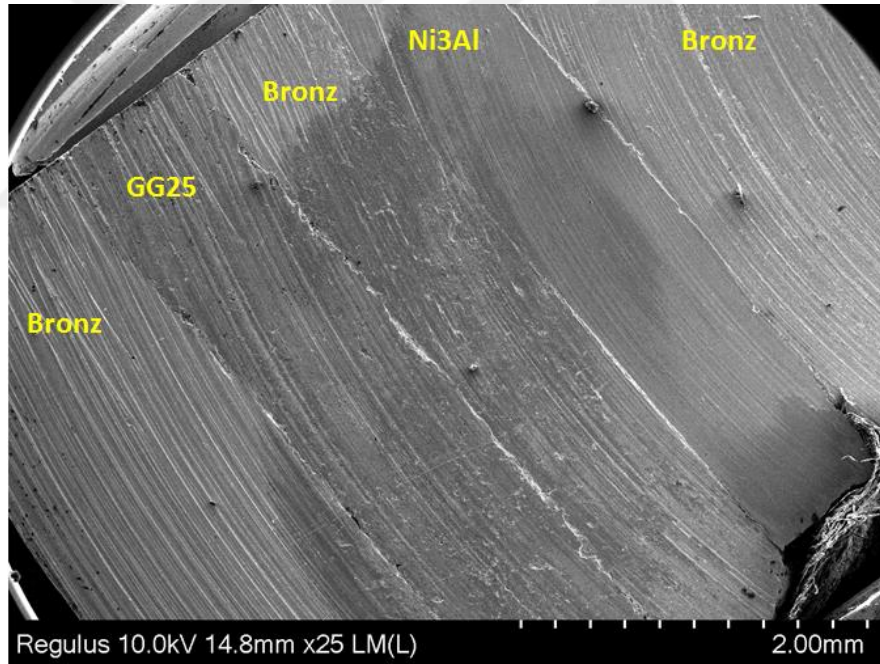
Şekil 6.15. Ni_3Al alaşımına ait SEM görüntüsü (Sol 3N-25cm/sn ve Sağ 5N-50cm/sn)

Şekil 6.16 da GG25 alaşımının 3N-25 cm/sn ve 5N-50 cm/sn test koşullarına ait SEM görüntüleri verilmiştir. 3N-25 cm/sn ve 5N-50 cm/sn test koşullarında GG25 alaşımında mikro kesmeler ve yüzey çatlakları görülmüştür.



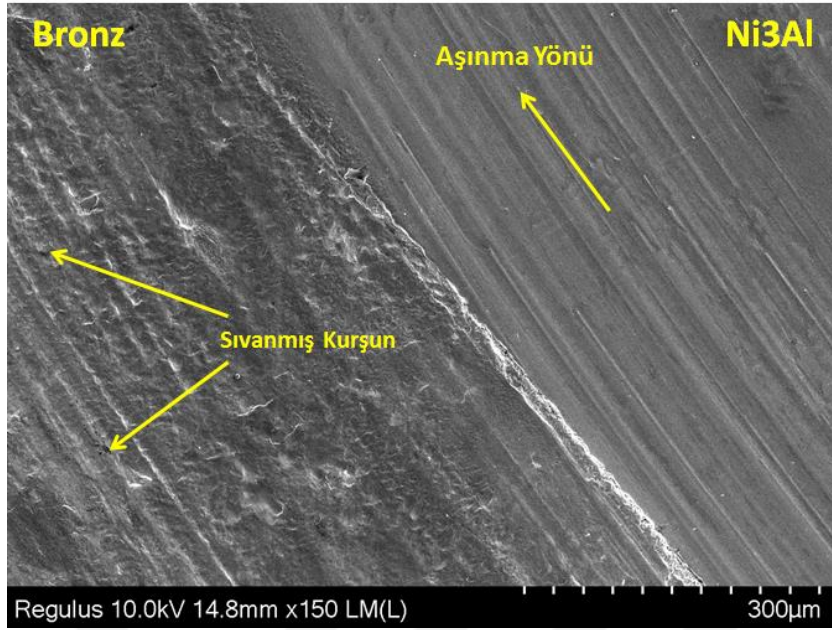
Şekil 6.16 GG25 Alaşımına ait SEM görüntüsü (Sol 3N-25cm/sn ve Sağ 5N-50cm/sn)

Şekil 6.17 de 25 büyütme oranında 5N-25 cm/sn test koşulundaki kompozit alaşımına ait SEM görüntüsü verilmiştir.



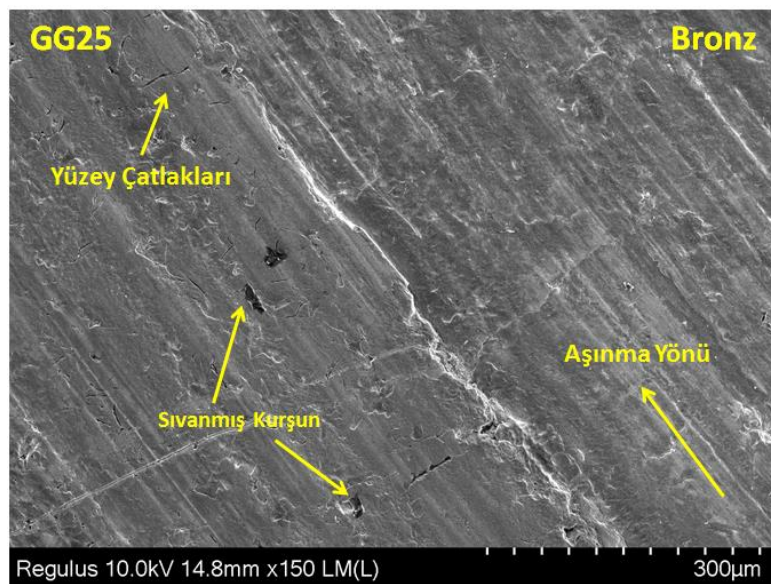
Şekil 6.17. 5N-25cm/sn deki kompozit alaşımına ait SEM görüntüsü

Şekil 6.18 de kompozit alaşımının 150 kat büyütme oranında 5N-25 cm/sn test koşuluna ait SEM görüntüsü verilmiştir. Görselin sol tarafında bronz alaşımı sağ tarafında ise Ni₃Al alaşımı yer almaktadır. Şekil 6.18 den de anlaşılacağı gibi Ni₃Al alaşımındaki aşınma belirli belirsiz olup bronz alaşımında aşınmaya bağlı olarak sıvanmış kurşun partikülleri mevcuttur.



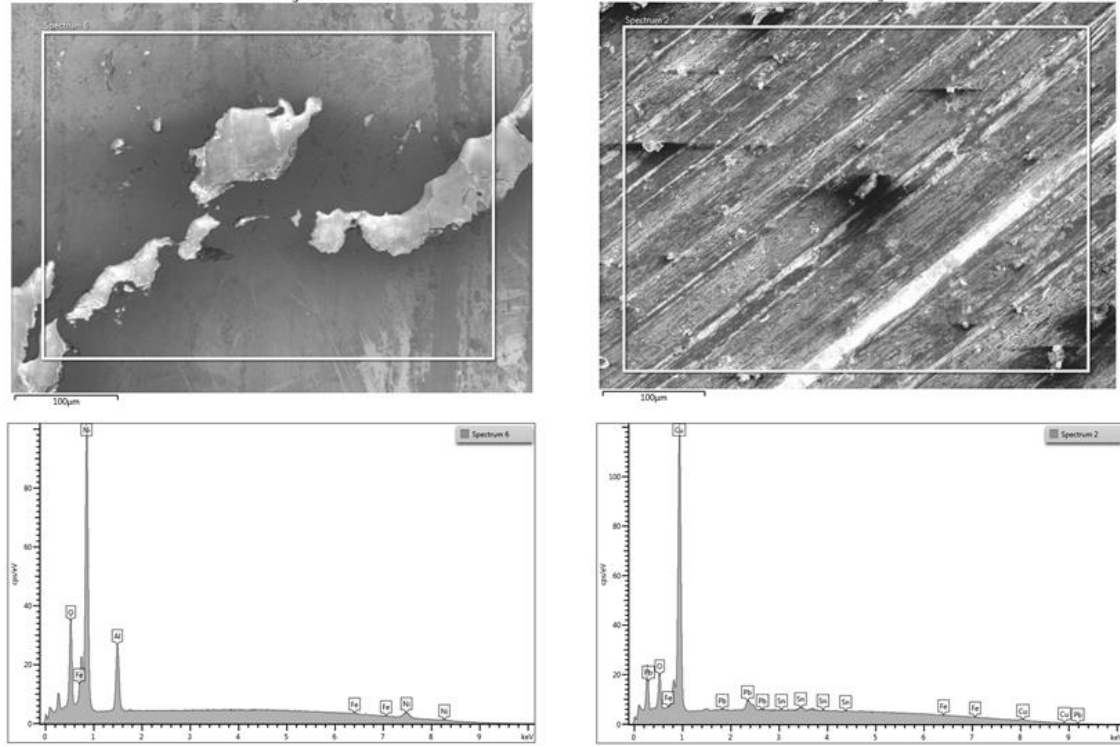
Şekil 6.18. 5N-25cm/sn deki kompozit alaşıma ait SEM görüntüsü (Sol Bronz ve Sağ Ni₃Al)

Şekil 6.19 de kompozit alaşımının 150 kat büyütme oranında 5N- 25 cm/sn test koşulunda bronz alaşımındaki aşınma mekanizması adhesif ve abrasif aşınma mekanizması olup sıvanmış kurşun partikülleri tespit edilmiştir. GG25 malzemesinin yüzeyinde çatlaklar tespit edilmiştir. Ayrıca Bronz ve GG25 alaşımları arasında ara yüzey bileşimi gözlemlenmiştir.



Şekil 6.19. 5N-25cm/sn deki kompozit alaşıma ait SEM görüntüsü (Sol GG25 ve Sağ Bronz)

Şekil 6.20 de 3N-25 cm/sn ve 5N-50 cm/sn test koşulları altındaki bronz alaşımının EDS analiz sonucu gösterilmiştir. Ayrıca Çizelge 6.7 de bu analizden elde edilen ağırlıkça bileşen olanları yüzdesel olarak verilmiştir. Testler sonucunda bronz alaşımında düşük miktarda oksijen tespit edilmiştir. Dolayısıyla yüzeyde oluşan oksit tabakası oldukça düşüktür.



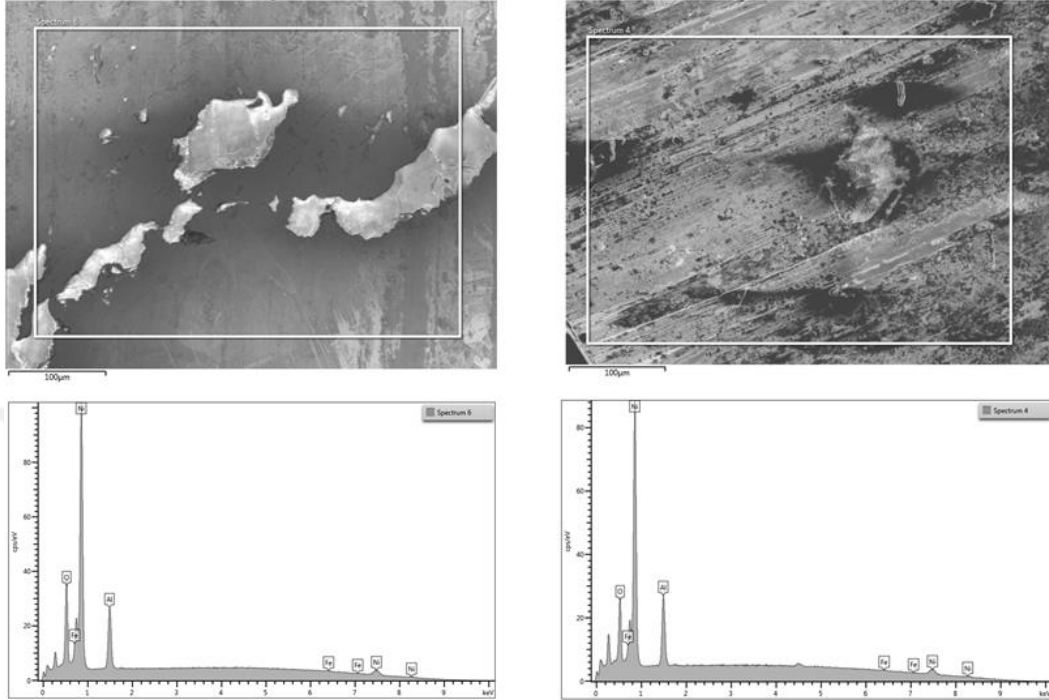
Şekil 6.20. 3N-25 cm/sn ve 5N-50 cm/sn Bronz Alaşımı EDS Analizi

Çizelge 6.7. EDS Ağırlıkça Bronz alaşımı oranları(%)

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

Şekil 6.21 de 3N-25 cm/sn ve 5N-50 cm/sn test koşulları altındaki Ni₃Al alaşımının EDS analiz sonucu gösterilmiştir. Ayrıca Çizelge 6.8 de bu analizden elde edilen ağırlıkça bileşen olanları yüzdesel olarak verilmiştir. Testler sonucunda Ni₃Al alaşımında yaklaşık

%10 oranında oksijen tespit edilmiştir. Bu oksijen miktarı yüzeyde demir oksit ve alüminyum oksit tabakalarının oluşumuna bir kanıttır.

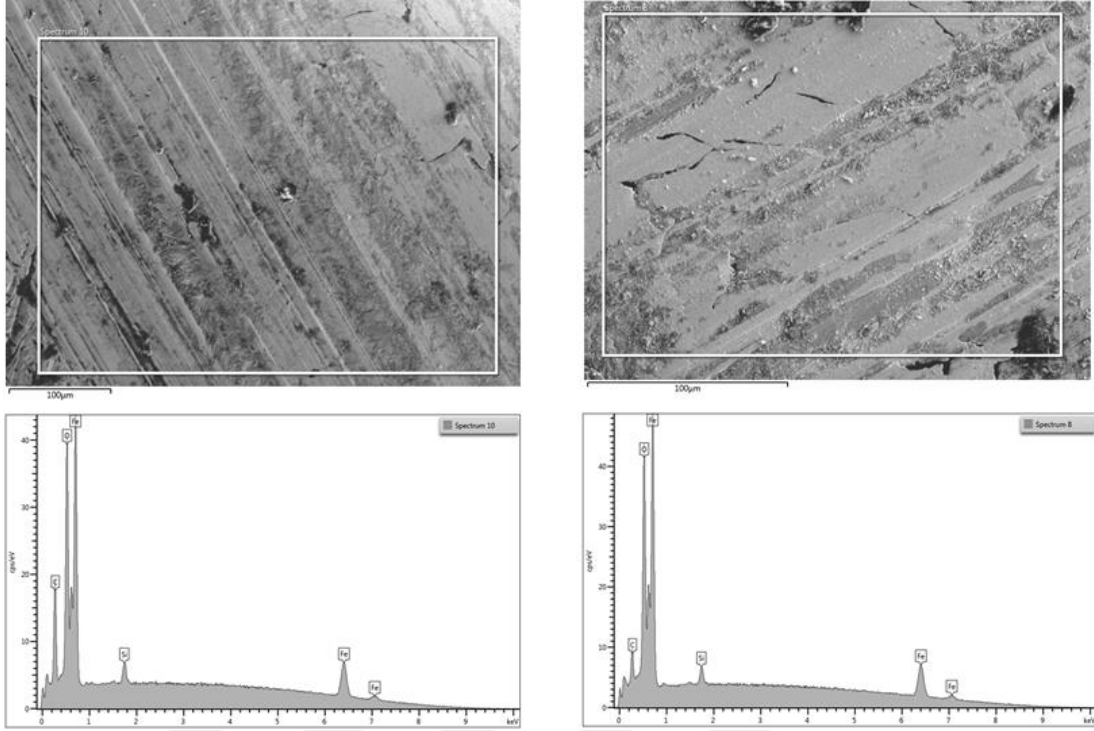


Şekil 6.21 3N-25 cm/sn ve 5N-50 cm/sn Ni₃Al Alaşımı EDS Analizi

Çizelge 6.8. EDS Ağırlıkça Ni₃Al alaşımı oranları (%)

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

Şekil 6.22 de 3N-25 cm/sn ve 5N-50 cm/sn test koşulları altındaki GG25 alaşımının EDS analiz sonucu gösterilmiştir. Ayrıca Çizelge 6.9 de bu analizden elde edilen ağırlıkça bileşen oranları yüzdesel olarak verilmiştir. Testler sonucunda GG25 alaşımında yaklaşık %12 oranında oksijen tespit edilmiştir. Bu nedenle oksijen miktarı yüzeyde demir oksit tabakalarının oluşumuna bir kanıttır.



Şekil 6.22. 3N-25 cm/sn ve 5N-50 cm/sn GG25 Alaşımı EDS Analizi

Çizelge 6.9. EDS Ağırlıkça GG25 alaşımı oranları (%)

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

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada eriyik Bronz malzeme içerisine birer milimetrelik GG25 ve Ni₃Al den oluşan plakalar yerleştirilerek lamine yapıli kompozit malzeme üretilmiştir.

Üretilen kompozit malzemenin temas yüzeyi alanında oransal olarak oldukça düşük GG25 ve Ni₃Al içermesine rağmen Ni₃Al ve GG25 e yakın sürtünme ve aşınma davranışı göstermiştir. Bu nedenle üretilen kompozit malzeme konvansiyonel fren balatalarında kendisini oluşturan bileşenlerindeki malzemeler yerine tercih edilebilir sürtünme ve aşınma özelliklerine sahiptir.

Fren balatalarında sürtünme katsayısının 0.5 değerini geçmemesi istenir. Üretilen bu kompozit malzemenin fren balatası olarak kullanılabilmesi için sürtünme katsayısı 0.5 değerinin altına indirilmelidir. Yapılan çalışmalar kompozit malzemenin bileşen oranlarının değiştirilerek sürtünme katsayısının istenilen değerde sağlanabileceğini göstermektedir.

Deneyde kullanılan Ni₃Al malzemesinin sertlik değerinin GGG60 karşı cisim malzemesinden daha yüksek olması nedeniyle Ni₃Al malzemesindeki aşınma miktarları tam olarak hesaplanamamıştır. Bu nedenle ileriki çalışmalarda karşı cisim olarak kompoziti oluşturan bileşenlerden daha sert bir malzeme seçilmesi önerilmektedir.

Yatak malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan Bronz, Dökme demir ve Ni₃Al pekiştirilerek aşınma direnci arttırılırken sürtünme katsayısı kontrol edilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ajayan PM, Schadler LS, Braun PV (2006) Nanocomposite science and technology. Wiley, New York
- Akhlaghi F, Pelaseyyed SA (2004) Characterization of aluminum/graphite particulate composites synthesized using a novel method termed “in-situ powder metallurgy”. *Mater Sci Eng A* 385:258–266
- Alpas AT, Zhang J (1994) Effect of microstructure (particulate size and volume fraction) and counterface material on the sliding wear resistance of particulate-reinforced aluminum matrix composites. *Metall Mater Trans A* 25(5):969–983
- Anandkumar R (2007) Microstructure and wear studies of laser clad Al-Si/SiC(p) composite coatings. *Surf Coat Technol* 201(24):9497–9505
- Baki Karamçs, M, Nair F (2008) Effects of reinforcement particle size in MMCs on extrusion die wear. *Wear* 265(11–12):1741–1750
- Basavarajappa S (2006) Dry sliding wear behavior of Al 2219/SiCp-Gr hybrid metal matrix composites. *J Mater Eng Perform* 15(6):668–674
- Bhushan B. 2011, *Introduction to Tribology*, Second Edition, McGraw-Hill Education
- Bindumadhavan PN, Wah HK, Prabhakar O (2001) Dual particle size (DPS) composites: effect on wear and mechanical properties of particulate metal matrix composites. *Wear* 248 (1–2):112–120
- Cerit AA (2008) Effect of reinforcement particle size and volume fraction on wear behaviour of metal matrix composites. *Tribol Ind* 30(3–4):31–36
- Chaudhury SK (2005) Wear and friction behavior of spray formed and stir cast Al–2 Mg–11 TiO₂ composites. *Wear* 258:759–769

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Choi HJ, Lee SM, Bae DH (2010) Wear characteristics of aluminum-based composites containing multi-walled carbon nanotubes. *Wear* 270:12–18
- Çelikyürek, İ. ve Biçer, A. (2016). Dry sliding friction and wear behavior of bronze matrix composites reinforced with Ni 3 Al particles: Comparison with conventional brake lining. *International Journal of Materials Research*, 107(9), 835–841. doi:10.3139/146.111406
- Cocen U, Onel K (2002) Ductility and strength of extruded SiCp/Aluminium-alloy composites. *Comput Sci Technol* 62:275–282
- Daoud A, Abou-Elkhair MT, Rohatgi P (2004) Wear and friction behavior of near eutectic Al–Si + ZrO₂ or WC particle composites. *Compos Sci Technol* 64(7–8):1029–1040
- Das S (2000) Influence of load and abrasive size on the two body abrasive wear of Al–SiC composites. *Aluminum Trans* 2:27–36
- Das S (2008) Synergic effect of reinforcement and heat treatment on the two body abrasive wear of an Al–Si alloy under varying loads and abrasive sizes. *Wear* 264:47–59
- Das S, Mondal DP, Dixit G (2001) Mechanical properties of pressure die cast Al hard part composite. *Metall Mater Trans A* 32(3):633–642
- Degnan CC, Shipway PH (2002) Influence of reinforcement volume fraction on sliding wear behaviour of SHS derived ferrous based metal matrix composite. *Mater Sci Technol* 18 (10):1156–1162
- Deng KK, Wang XJ, Wu YW, Hu XS, Wu K, Gan WM (2012) Effect of particle size on microstructure and mechanical properties of SiCp/AZ91 magnesium matrix composite. *Mater Sci Eng A* 543:158–163

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Derakhshandeh Haghghi R et al (2012) A comparison between ECAP and conventional extrusion for consolidation of aluminum metal matrix composite. *J Mater Eng Perform* 21 (9):1885–1892
- Deshpande PK, Lin RY (2006) Wear resistance of WC particle reinforced copper matrix composites and the effect of porosity. *Mater Sci Eng A* 418:137–145
- Dolata-Grosz A, Wiczorek J (2007) Tribological properties of hybrid composites containing two carbide phases. *Arch Mater Sci Eng* 28(3):149–155
- Dong SR, Tu JP, Zhang XB (2001) An investigation of the sliding wear behavior of Cu matrix composite reinforced by carbon nanotubes. *Mater Sci Eng A* 313(1–2):83–87
- Fu HH, Han KS, Song J (2004) Wear properties of Saffil/Al, Saffil/Al₂O₃/Al and Saffil/SiC/ Al hybrid metal matrix composites. *Wear* 256(7–8):705–713
- Ghasemi-Kahrizsangi A, Kashani-Bozorg SF (2012) Microstructure and mechanical properties of steel/TiC nano-composite surface layer produced by friction stir processing. *Surf Coat Technol* 209:15–22
- Gong J, Miao H, Zhao Z (2001) The influence of TiC-particle-size on the fracture toughness of Al₂O₃-30 wt.% TiC composites. *Journal of the European Ceramic Society* 21(13):2377–2381
- Gul F, Acilar M (2004) Effect of the reinforcement volumefraction on the dry sliding wear behaviour of Al–10Si/SiCp composites produced by vacuum infiltration technique. *Compos Sci Technol* 64(13–14):1959–1970
- Gurcan AB, Baker TN (1995) Wear behaviour of AA6061 aluminium alloy and its composites. *Wear* 188(1–2):185–191

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Habibnejad-KorayemMet (2010) Tribological behavior of pure Mg and AZ31 magnesium alloy strengthened by Al₂O₃ nano-particles. *Wear* 268:405–412
- Hamid AA (2008) The influence of porosity and particles content on dry sliding wear of cast in situ Al(Ti)–Al₂O₃(TiO₂) composite. *Wear* 265(1–2):14–26
- Hemath Kumar G (2003) Abrasive friction and wear behaviour of Al-SiCp composite for Valve guide. In: International conference, Delhi, India
- Hemath Kumar G (2010) The abrasive wear behaviour of Al-SiCp composites for automotive parts In: *Frontiers in automobile and mechanical engineering 2010*. Chennai, India
- 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
- Jo SK (2012) Effect of SiC particle size on wear properties of Al₂O₃. SiO₂/SiC/Mg hybrid metal matrix composites. *Tribol Lett* 45:101–107
- Jun Q, Linan A, Blau PJ (2006) Sliding friction and wear characteristics of Al₂O₃-Al nanocomposites. In: *STLE/ASME IJTC*
- Kang YC, Chan SL (2004) Tensile properties of nanometric Al₂O₃ particulate-reinforced aluminum matrix composites. *Mater Chem Phys* 85:438–443
- Karam MB (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
- Kim I-Y, Lee Y-Z (2011) Tribological behavior of aluminum-CNT coated metal composite under dry and water lubricated conditions. *J Nanosci Nanotechnol* 11:335–338

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kim KT, Cha S, Hong SH (2007) Hardness and wear resistance of carbon nanotube reinforced Cu matrix nanocomposites. *Mater Sci Eng A* 449–451:46–50
- Korkut MH (2004) Effect of particulate reinforcement on wear behaviour of aluminium matrix composites. *Mater Sci Technol* 20(1):73–81
- Kozma M (2003) Friction and wear of aluminum matrix composites. In: 3rd national tribology conference, Galati, Romania
- Kumar KR (2012) Effect of particle size on mechanical properties and tribological behaviour of aluminium/fly ash composites. *Sci Eng Compos Mater* 19(3):247–253
- Kumar S (2008) Tensile and wear behaviour of in situ Al–7Si/TiB₂ particulate composites. *Wear* 265(1–2):134–142
- Kumar S, Balasubramanian V (2010) Effect of reinforcement size and volume fraction on the abrasive wear behaviour of AA7075 Al/SiCp P/M composites—a statistical analysis. *Tribol Int* 43(1–2):414–422
- Li J, Xiong D (2009) Tribological behavior of graphite containing nickel-based composite as function of temperature, load and counterface. *Wear* 266:360–367
- Li JL, Xiong DS (2008) Tribological properties of nickel-based self-lubricating composite at elevated temperature and counterface material selection. *Wear* 265:533–539
- Mahendra KV, Radhakrishna K (2010) Characterization of Stir Cast Al—Cu—(fly ash + SiC) Hybrid Metal Matrix Composites. *J Compos Mater* 44(8):989–1005
- Mahmoud ERI (2010) Wear characteristics of surface-hybrid-MMCs layer fabricated on aluminum plate by friction stir processing. *Wear* 268(9–10):1111–1121

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Maleque MA, Karim MR (2009) Wear behavior of as-cast and heat treated triple particle size SiC reinforced aluminum metal matrix composites. *Ind Lubr Tribol* 61(2):78–83
- Mandal A, Chakraborty M, Murty BS (2007) Effect of TiB₂ particles on sliding wear behaviour of Al–4Cu alloy. *Wear* 262(1–2):160–166
- Martin A, Martinez MA, Llorca J (1996) Wear of SiC-reinforced Al matrix composites in the temperature range 20-200. *Wear* 193:169–179
- Martin A, Rodriguez J, Llorca J (1999) Temperature effects on the wear behavior of particulate reinforced Al-based composites. *Wear* 225–229:615–620
- Matejka V, Lu Y, Jiao L, Huang L, Simha Martynkova' G, Toma's'ek V (2010) Effects of silicon carbide particle sizes on friction-wear properties of friction composites designed for car brake lining applications. *Tribol Int* 43(1):144–151
- Menezes PL, Rohatgi PK, Lovell MR (2012) Self-Lubricating Behavior of Graphite Reinforced Metal Matrix Composites. In: *Green tribology*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 445–480
- Miserez A (2004) Particle reinforced metals of high ceramic content. *Mater Sci Eng A* 387–389:822–831
- Miyajima T, Iwai Y (2003) Effects of reinforcements on sliding wear behavior of aluminum matrix composites. *Wear* 255(1–6):606–616
- Mondal AK, Kumar S (2009) Dry sliding wear behavior of magnesium alloy based hybrid composites in the longitudinal direction. *Wear* 267:458–466

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mondal DP, Das S (2006) High stress abrasive wear behaviour of aluminium hard particle composites: effect of experimental parameters, particle size and volume fraction. *Tribol Int* 39:470–478
- Montoya-Da'vila M, Pech-Canul MA, Pech-Canul MI (2007) Effect of bi-and trimodal size distribution on the superficial hardness of Al/SiCp composites prepared by pressureless infiltration. *Powder Technology* 176(2):66–71
- Mousavi Abarghouie S, Seyed Reihani S (2010) Investigation of friction and wear behaviors of 2024 Al and 2024 Al/SiCp composite at elevated temperatures. *J Alloys Compd* 501 (2):326–332
- 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
- Nosonovsky M, Rohatgi PK (2012) *Biomimetics in materials science*. Springer, New York
- Prabhu B (2006) Synthesis and characterization of high volume fraction Al–Al₂O₃ nanocomposite powders by high-energy milling. *Mater Sci Eng A* 425:192–200
- Prasad SV, Asthana R (2004) Aluminum metal–matrix composites for automotive applications: tribological considerations. *Tribol Lett* 17(3):445
- Prasad SV, Rohatgi PK (1987) Tribological properties of Al alloy particle composites. *JOM* 39(11):22–26

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Purohit R, Hemathkumar G, Sgar R (2002) Fabrication and wear testing of Aluminum based metal matrix composite automotive parts. In: National seminar on emerging trends in manufacturing, Varanasi, India
- Qin QD, Zhao YG, Zhou W (2008) Dry sliding wear behavior of Mg₂Si/Al composites against automobile friction material. *Wear* 264(7–8):654–661
- Radhika N, Subramanian R, Venkat Prasat S (2011) Tribological behaviour of Aluminium/ Alumina/Graphite hybrid metal matrix composite using taguchi's techniques. *J Miner Mater Character Eng* 10(5):427–443
- Ramesh CS (2013) Tribological characteristics of innovative Al6061–carbon fiber rod metal matrix composites. *Mater Design* 50:597–605
- Ranganath G, Sharma SC, Sharma SC (2001) Dry sliding wear of garnet reinforced zinc/ aluminium metal matrix composites. *Wear* 251:1408–1413
- Reddy GM, Rao KS, Mohandas T (2009) Friction surfacing: novel technique for metal matrix composite coating on aluminium–silicon alloy. *Surf Eng* 25(1):25–30
- Rehman A, Das S, Dixit G (2012) Analysis of stir die cast Al–SiC composite brake drums based on coefficient of friction. *Tribol Int* 51:36–41
- Riahi AR, Alpas AT (2001) The role of tribo-layers on the sliding wear behavior of graphitic aluminum matrix composites. *Wear* 251(1–12):1396–1407
- Rodríguez J (2007) Dry sliding wear behaviour of aluminium–lithium alloys reinforced with SiC particles. *Wear* 262(3–4):292–300
- Rohatgi P, Ray S, Liu Y (1992) Tribological properties of metal matrix-graphite particle composites. *Int Mater Rev* 37:129–149

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rohatgi PK (2011) Tribological behavior of aluminum micro-and nano-composites. *Int J Aerospace Innov* 3(3):153–162
- Sahin Y (2003) Wear behaviour of aluminium alloy and its composites reinforced by SiC particles using statistical analysis. *Mater Des* 24(2):95–103
- Sannino AP, Rack HJ (1995) Dry sliding wear of discontinuously reinforced aluminum composites: review and discussion. *Wear* 189:1–19
- Seyed Reihani SM (2006) Processing of squeeze cast Al6061–30vol% SiC composites and their characterization. *Mater Design* 27(3):216–222
- Shafiei-Zarghani A, Kashani-Bozorg SF, Zarei-Hanzaki A (2009) Microstructures and mechanical properties of Al/Al₂O₃ surface nano-composite layer produced by friction stir processing. *Mater Sci Eng A* 500:84–91
- Sharma SC (2001) The sliding wear behavior of Al6061–garnet particulate composites. *Wear* 249:1036–1045
- Shi L (2006) Mechanical properties and wear and corrosion resistance of electrodeposited Ni–Co/SiC nanocomposite coating. *Appl Surf Sci* 252(10):3591–3599
- Shorowordi KM, Haseeb ASMA, Celis JP (2004) Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminum MMC sliding against phenolic brake pad. *Wear* 256 (11–12):1176–1181
- Shorowordi KM, Haseeb ASMA, Celis JP (2006) Tribo-surface characteristics of Al–B₄C and Al–SiC composites worn under different contact pressures. *Wear* 261(5–6):634–641

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Singh J, Alpas A (1996) High-temperature wear and deformation processes in metal matrix composites. *Metall Mater Trans A* 27(10):3135–3148
- Soy U, Demir A, Findik F (2011) Friction and wear behaviors of Al-SiC-B4C composites produced by pressure infiltration method. *Industrial Lubrication and Tribology* 63(5): 387–393
- Srivastava S, Mohan S (2011) Study of wear and friction of Al-Fe metal matrix composite produced by liquid metallurgical method. *Tribol Industry* 33(3):128–137
- Suryanarayana C (2001) Mechanical alloying and milling. *Prog Mater Sci* 46:1–184
- Tabandeh Khorshid M, Jenabali Jahromi SA, MoshksarMM(2010) Mechanical properties of tri-modal Al matrix composites reinforced by nano- and submicron-sized Al₂O₃ particulates developed by wet attrition milling and hot extrusion. *Mater Design* 31(8):3880–3884
- Ted Guo ML, Tsao C-YA (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
- Toptan F, Kerti I, Rocha LA (2012) Reciprocal dry sliding wear behavior of B4C reinforced aluminum alloy matrix composites. *Wear* 290–291:74–85
- Torralba JM, da Costa CE, Velasco F (2003) P/M aluminum matrix composites: an overview. *J Mater Process Technol* 133:203–206
- Toshiro M, Tomomi H, Yoshiro I (2005) Effect of particle diameter and volume fraction on wear behaviour of SiC-particle reinforced aluminum matrix composites. *Trans Jpn Soc Mech Eng C* 71(710):3054–3060

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tu JP (2003) Dry sliding wear behavior of in situ Cu–TiB₂ nanocomposites against medium carbon steel. *Wear* 255(7–12):832–835
- Tu JP, Yang YZ (2000) Tribological behaviour of Al18B4O33-whisker-reinforced hypoeutectic Al–Si–Mg-matrix composites under dry sliding conditions. *Compos Sci Technol* 60(9):1801–1809
- Tyagi R (2005) Synthesis and tribological characterization of in situ cast Al–TiC composites. *Wear* 259(1–6):569–576
- Umanath K, Selvamani TS, Palanikumar K (2011) Friction and wear behaviour of Al6061 alloy (SiCP + Al₂O₃P) hybrid composites. *Int J Eng Sci Technol* 3(7):5441–5451
- Uyyuru RK, Surappa MK, Brusethaug S (2006) Effect of reinforcement volume fraction and size distribution on the tribological behavior of Al-composite/brake pad tribocouple. *Wear* 260:1248–1255
- Uyyuru RK, Surappa MK, Brusethaug S (2007) Tribological behavior of Al–Si–SiCp composites/automobile brake pad system under dry sliding conditions. *Tribol Int* 40(2):365–373
- Venci A, Rac A, Bobic I (2004) Tribological behaviour of Al-based MMCs and their application in automotive industry. *Tribol Ind* 26(3–4):31–38
- Vissutipitukul P, Aizawa T (2005) Wear of plasma-nitrided aluminum alloys. *Wear* 259:482–489
- Wang LY et al (2003) Friction and wear behavior of electroless Ni-based CNT composite coatings. *Wear* 254:1289–1293
- Wang Y (2001) Dry wear behaviour and its relation to microstructure of novel 6092 aluminium alloy–Ni₃Al powder metallurgy composite. *Wear* 251(1–2):1421–1432

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wei Y (2011) Characterizations of DLC/MAO composite coatings on AZ80 Magnesium alloy. *Acta Metall Sin* 47:1535–1540
- Wu Y (1997) A study of the optimization mechanism of solid lubricant concentration in Ni/MoS₂ self-lubricating composite. *Wear* 205:64–70
- Yao-hui L (2004) High temperature friction and wear behaviour of Al₂O₃ and/or carbon short fibre reinforced Al–12Si alloy composites. *Wear* 256(3):275–285
- Yesil ZD (2008) Evaluation of the wear resistance of new nanocomposite resin restorative materials. *J Prosthet Dent* 99(6):435–443
- Yu SY (1997) Temperature dependence of sliding wear behavior in SiC whisker or SiC particulate reinforced 6061 aluminum alloy composite. *Wear* 213(1–2):21–28
- Zhan Y, Zhang G (2004) Friction and wear behavior of copper matrix composites reinforced with SiC and graphite particles. *Tribol Lett* 17(1):91–98
- Zhang M-J (2008) Effect of graphite particle size on wear property of graphite and Al₂O₃ reinforced AZ91D-0.8%Ce composites. *Trans Nonferrous Met Soc China* 18:273–277
- Zhang M-J (2010) Effect of graphite content on wear property of graphite/Al₂O₃/Mg-9Al-1Zn-0.8Ce composites. *Trans Nonferrous Metals Soc China* 20:207–211
- Zhang S, Jiang F, Ding W (2008) Microstructure and mechanical performance of pulsed current gas tungsten arc surface engineered composite coatings on Mg alloy reinforced by SiCp. *Mater Sci Eng A* 490(1–2):208–220

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zhang S, Wang F (2007) Comparison of friction and wear performances of brake material dry sliding against two aluminum matrix composites reinforced with different SiC particles. *J Mater Process Technol* 182(1-3):122-127
- Zhang ZF, Zhang LC, Mai YW (1995) Particle effects on friction and wear of aluminium matrix composites. *J Mater Sci* 30(23):5999-6004
- Zhiqiang S, Di Z, Guobin L (2005) Evaluation of dry sliding wear behavior of silicon particles reinforced aluminum matrix composites. *Mater Des* 26(5):454-458
- Zhou S-M et al (2007) Fabrication and tribological properties of carbon nanotube reinforced Al composites prepared by pressureless in filtration technique. *Compos Part A Appl Sci Manufact* 38(2):301-306
- Zou XG (2003) Sliding wear behaviour of Al-Si-Cu composites reinforced with SiC particles. *Mater Sci Technol* 19(11):1519-1526