

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DEMİR YOLU TAŞITLARI İÇİN ASBEST İÇERMEYEN ORGANİK ESASLI KOMPOZİT BALATA
BİLEŞİMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Harun YANAR

**ARALIK 2020
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DEMİR YOLU TAŞITLARI İÇİN ASBEST İÇERMEYEN ORGANİK ESASLI KOMPOZİT
BALATA BİLEŞİMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Harun YANAR

ORCID : 0000 -0001 -5797 - 885x

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 / 11 /2020

Tezin Savunma Tarihi : 18 / 12 /2020

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK
ORCID : 0000 -0002 -4726 - 2257

Trabzon 2020

ÖNSÖZ

Demir yolu taşımacılığının tüm dünyada yolcu ve yük taşımacılığındaki kullanımının giderek yaygınlaşması ülkemiz açısından da bu alana olan ilginin artmasına neden olmuştur. Gün geçtikçe ülkemizde de hızlı trenleri yaygınlaştırmaya, demir yolu ağlarını genişletmeye yönelik çabaların arttığı görülmektedir. Ancak bu durumun ithal olarak temin edilen pek çok ekipman ve donanımlardan dolayı yurtdışına önemli bir döviz çıkıtısına sebep olduğu görülmüştür. Bu kapsamda 07.11.2017 tarihinde yayınlanan bir genelge ile kurulacak raylı sistemlerde yerli katkı zorunlu hale getirilmiş ve bu yerli katkının %51 oranının üzerinde olması için büyük çaba sarf edildiği görülmüştür. Bu kapsamda demiryolu taşıtları için sürekli ihtiyaç olan kompozit esaslı balataların yerli olarak temin edilmesinin ülkemiz açısından önemli bir kazanım olacağı ve ciddi miktarda ithal ikame sağlayacağı açıktır. Ayrıca geliştirilecek ürünlerin ihraç edilebilme potansiyeline sahip olmasından dolayı önemli döviz girdisi sağlama ihtimali yüksektir.

Bu çalışmada, yerli katkı bileşenleri kullanılarak demir yolu uygulamaları için kabul edilebilir sürtünme ve aşınma performansına sahip K tipi bir kompozit balata bileşimi geliştirilmeye çalışıldı. Bu kapsamda söz konusu katkıların matris yapı içerisindeki katkı miktarları değiştirilerek farklı balata numuneleri hazırlandı. Bu numuneler hem farklı tribolojik testlere tabi tutularak hem de mekanik açıdan kapsamlı bir şekilde incelenerek doğru katkı bileşenleri ve kullanım miktarları ortaya koyulmaya çalışıldı.

Bu konuyu seçmeme vesile olarak önemli bir bilgi birikimine sahip olmamı sağladığı ve çalışmalarım sırasında bilgilerini ve tecrübelerini paylaştıkları için danışman hocam Prof. Dr. Gençağa PÜRÇEK'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarına sağladığı katkılardan dolayı başta Hasan Hüseyin AYAR olmak üzere Metisafe firması Ar-Ge çalışanları Bora ORAL ve Murat ÇİL'e çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca, desteklerini esirgemeyen ve yanımda olduklarını her an hissettiğim kıymetli eşim Özlem'e ve sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Harun YANAR
TRABZON, 2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “ Demir Yolu Taşıtları İçin Asbest İçermeyen Organik Esaslı Kompozit Balata Bileşimlerinin Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 18/12/2020

Harun YANAR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Balatalar.....	4
1.2.1. Balata Çeşitleri.....	7
1.2.1.1. Organik Polimer Esaslı Balatalar.....	8
1.2.1.2. Metalik Esaslı Balatalar.....	9
1.2.1.3. İnorganik Balatalar.....	9
1.2.2. Fren Balata Malzemelerinin Sınıflandırılması.....	10
1.2.2.1. Takviye Malzemeleri (Fiberler).....	10
1.2.2.2. Bağlayıcı Malzemeleri.....	13
1.2.2.3. Dolgu Malzemeleri.....	14
1.2.2.4. Sürtünme Düzenleyici Malzemeler.....	15
1.2.3. Balata Performansına Etki Eden Faktörler.....	16
1.2.3.1. Frenleme Koşullarının Sürtünme Performansı Üzerindeki Etkisi.....	17
1.2.3.1.1. İlk Frenleme Hızının Etkisi.....	17
1.2.3.1.2. Uygulama Basıncının Etkisi.....	18
1.2.3.1.3. Sıcaklığının Etkisi.....	19
1.2.3.2. Yüzey Koşullarının Sürtünme Performansı Üzerindeki Etkisi.....	20
1.2.3.3. Çevresel Koşulların Sürtünme Performansı Üzerindeki Etkisi.....	22
1.2.4. Balatalardan Beklenen Performans Çıktıları.....	23
1.2.5. Balataların Demir Yolu Taşıtı Uygulamalarında Kullanımı.....	24
1.3. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	28
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	33
2.1. Kullanılan Balata Bileşenleri.....	33

2.2.	Balata Numunesi Üretimi	34
2.2.1.	Küçük Boyutlu Numune Üretimi	36
2.2.2.	Gerçek Boyutlu Balata Üretimi	40
2.3.	Uygulanan Deneyler	43
2.3.1.	Sertlik.....	43
2.3.2.	Elastisite Modülü.....	44
2.3.3.	Sıkıştırılabilirlik.....	46
2.3.4.	Basma Dayanımı.....	47
2.3.5.	Sürtünme ve Aşınma Deneyleri.....	48
2.3.5.1.	Pin-on-Disk Tipi Cihazla Yapılan Deneyler	48
2.3.5.2.	Dinamometre ile Blok-on-Ring Tipi Sürtünme ve Aşınma Deneyleri.....	52
2.3.6.	Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi.....	53
2.3.7.	Isı İletim Katsayısının Belirlenmesi	54
3.	BULGULAR VE İRDELEME	56
3.1.	Optimum Fiber Oranının Belirlenmesi.....	56
3.1.1.	Fiber Katkı Oranları.....	56
3.1.2.	Fiber Oranının Temel Balata Bileşiminin Mekanik Özelliklerine Etkisi	56
3.1.2.	Fiber Oranının Temel Balata Bileşiminin Tribolojik Özelliklerine Etkisi	60
3.1.2.1.	Aralıklı Frenleme.....	60
3.1.2.2.	Sürekli Frenleme.....	62
3.1.3.	Optimum Fiber Oranı Belirlemeye Yönelik Genel Değerlendirme	69
3.2.	Optimum Sürtünme Düzenleyici Oranının Belirlenmesi	70
3.2.1.	Sürtünme Düzenleyici Oranının Balata Numunelerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi	71
3.2.2.	Sürtünme Düzenleyici Oranının Balata Numunelerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi	74
3.2.2.1.	Aralıklı Frenleme.....	74
3.2.2.2.	Sürekli Frenleme.....	80
3.2.3.	Optimum Sürtünme Düzenleyici Oranını Belirlemeye Yönelik Genel Değerlendirme	81
3.3.	Optimum Reçine Oranının Belirlenmesi	82
3.3.1.	Reçine Oranının Balata Numunelerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi	84
3.3.2.	Reçine Oranının Balata Numunelerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi	87
3.3.2.1.	Aralıklı Frenleme.....	87
3.3.2.2.	Sürekli Frenleme.....	88

3.3.3.	Optimum Reçine Oranını Belirlemeye Yönelik Genel Değerlendirme.....	92
3.4.	Optimum Çelik Fibri Oranının Belirlenmesi	93
3.4.1.	Çelik Fibri Oranının Balata Numunelerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi	95
3.4.2.	Çelik Fibri Oranının Balata Numunelerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi	99
3.4.2.1.	Aralıklı Frenleme.....	99
3.4.2.2.	Sürekli Frenleme.....	101
3.4.3.	Optimum Çelik Fibri Oranını Belirlemeye Yönelik Genel Değerlendirme ...	105
3.5.	Hegzagonal Bor Nitrür (h-BN) Oranının Belirlenmesi	107
3.5.1.	Hegzagonal Bor Nitrür Oranının Balata Numunelerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi	109
3.5.2	Hegzagonal Bor Nitrür Oranının Balata Numunelerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi	110
3.5.2.1	Aralıklı Frenleme.....	110
3.5.2.2.	Sürekli Frenleme.....	113
3.5.3.	Optimum h-BN Oranını Belirlemeye Yönelik Genel Değerlendirme.....	116
3.6.	Dinamometre Benzetim Testleri.....	117
3.6.1.	H-BN Katkısı İçermeyen Bileşim Üzerinden Yapılan Dinamometre Testleri .	117
3.6.2.	H-BN Katkısı İçeren Bileşim Üzerinden Yapılan Dinamometre Testleri	125
4.	GENEL SONUÇLAR.....	134
5.	ÖNERİLER	142
6.	KAYNAKLAR.....	143

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

DEMİR YOLU TAŞITLARI İÇİN ASBEST İÇERMİYEN ORGANİK ESASLI KOMPOZİT BALATA BİLEŞİMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Harun YANAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Genççağ PÜRÇEK
2020, 166 Sayfa

Bu çalışmada, demiryolu taşıtlarına yönelik hegzagonal bor nitrür (h-BN) katkılı ve katkısız K-tipi kompozit balata bileşimlerinin tabandan tavana bir yaklaşımla geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu geliştirme sürecinde iki aşamalı tribolojik testler uygulanmıştır. İlk aşamada bileşimler pin-on-disk tipi bir balata malzemesi test sisteminde NF F 11-291 standardına göre aralıklı ve sürekli frenleme testlerine tabi tutulmuştur. Bu kapsamda belirlenen başlangıç bileşimi üzerinden sırasıyla; fiber (taş yünü), sürtünme düzenleyici (CNSL), reçine ve çelik fiberi oranı optimizasyonu yapılarak optimum özellik çıktıları açısından h-BN içermeyen optimum bir balata bileşimi geliştirilmiştir. Bu bileşim üzerine farklı oranlardaki h-BN katkısı yine aynı yaklaşımla incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, taş yünü fiberi miktarının artırılması bileşimin sürtünme katsayısını düşürmüş ve daha stabil bir değişim karakteri kazandırmıştır. Devamında katılan kaju meyvesi kabuk sıvısı (cashew nut shell liquid (CNSL)) bileşimin aşınma direncini artırırken, sürtünme katsayısını düşürmüştür. Yapıdaki fenolik reçine oranının azaltılması bileşimin mekanik özelliklerini olumsuz etkilerken, sürtünme katsayısını artırmıştır. Yapıya eklenen çelik fiberi ise bileşimin ısı iletkenliğini ve sürtünme katsayısını artırırken, sertlik ve basma dayanımını düşürmüştür. Bu çıktılar üzerinden optimize edilen bu temel bileşim (SF-3) üzerine ilave edilen %1,5 oranındaki h-BN katkısı (BN-2) optimum özellik çıktısı açısından en iyi bileşim olarak belirlenmiştir. Daha sonra h-BN içermeyen ve içeren optimize bileşimlerden gerçek boyutlu demir yolu araç balataları üretildi ve bunlardan çıkarılan numuneler düşük ölçekli (1/10) dinamometre testlerine tabi tutuldu. Bu testlerden elde edilen sonuçlarla küçük numune bazlı pin-on-disk esaslı çalışmalardan elde edilen sonuçların uyumu ortaya konularak nihai bileşimler geliştirilmiş oldu.

Anahtar Kelimeler: Demir yolu araç fren balataları, Balata ve sürtünme malzemeleri, Kompozit fren balataları, Balata testleri, Hegzagonal bor nitrür (h-BN)

PhD. Thesis

SUMMARY

DEVELOPMENT OF NON-ASBESTOS ORGANIC BASED COMPOSITE BRAKE LINING COMPOSITIONS FOR RAILWAY VEHICLES

Harun YANAR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Gençağa PÜRÇEK
2020, 166 Pages

In this study, it is aimed to develop new K-type composite brake lining (pad) compositions with and without hexagonal boron nitride (h-BN) for railway vehicles with a bottom-up approach. In this context, tribological tests were performed in two stages. In the first stage, the samples were subjected to intermittent and continuous braking tests according to NF F 11-291 standard with using a pad-on-disk type brake pad material testing system. First of all, fiber (rock wool), friction modifier (CNSL), resin and steel fiber content optimization has been made on the starting brake pad material composition and an optimum brake pad composition without hexagonal boron nitride (h-BN) has been developed in terms of property outputs. The effect of different amount of h-BN on this composition was investigated with the same approach. In general, increasing the amount of rock fiber in the matrix decreased the average coefficient of friction of the samples, while improved the stability of the friction coefficient. The subsequently added cashew nut shell liquid (CNSL) improved the wear resistance of the sample and decreased the friction coefficient value. Decreasing the content of phenolic resin in the matrix structure increased the friction coefficient while it affected the mechanical properties of the samples adversely. On the other hand, adding the steel fiber to the structure increased the thermal conductivity and friction coefficient of the sample and decreased its hardness and compressive strength. The 1.5 % h-BN ingredient (BN-2) that was added on this developed composition (SF-3) was determined as the best composition giving the optimum properties. At the final stage of the study, full-size brake linings were produced from these optimum compositions and the samples extracted from them were subjected to low-scale (1/10) dynamometer tests to verify the results obtained from pad-on-disk based studies.

Key Words: Railway vehicle brake linings, Brake friction materials, Composite friction material, Tests for brake material, Hexagonal boron nitride (h-BN)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Sürtünme esaslı bir kavrama ve bir fren mekanizmasının şematik bir görünümü: (a) Sürtünme esaslı kavrama ve (b) fren mekanizması [16].	5
Şekil 2.	Tek lamelli bir kavramanın şematik görünümü [16].	6
Şekil 3.	Tercih edildiği uygulamalara göre balataların sönümlemesi gereken enerji seviyeleri [12].	7
Şekil 4.	Balataların kullanılan katkı maddelerinin türüne göre sınıflandırılması [5].	8
Şekil 5.	Balata yüzeyinde oluşan birincil ve ikincil temas alanlarının şematik görünümü [98].	21
Şekil 6.	Sürtünme ara yüzeyinde oluşan temas alanlarının şematik gösterimi: (a) Tüm balata yüzeyi, (b) gerçek temas alanlarının dağılımı (tüm balata yüzeyinin %15-%20) ve (c) gerçek temas yüzeyi (birincil ve ikincil platoların oluşturduğu) içerisindeki birincil platoların anlık görünümü [98].	22
Şekil 7.	K tipi fren balatalarının sürtünme katsayısının frenleme hızı ve kuvvetine göre değişimi [104].	27
Şekil 8.	LL tipi fren balatalarının sürtünme katsayısının hız ve fren kuvvetine göre değişimi [104].	27
Şekil 9.	Tren balatalarının sürtünme katsayısının hızla bağlı değişim karakteri [104].	28
Şekil 10.	Çalışma kapsamında kullanılan katkı bileşenlerinin SEM görüntüleri ve genel görünümleri: (a) Çelik yünü, (b) taş yünü, (c) kevlar, (d) barit, (e) manyetit, (f) grafit, (g) h-BN, (h) toz fenolik reçine ve (i) CNSL.	33
Şekil 11.	Çalışma kapsamında kullanılan katkı bileşenlerinin kütlelerinin sıcaklığa bağlı değişimlerini gösteren TG eğrileri	34
Şekil 12.	Küçük boyutlu numune hazırlama aşamaları	38
Şekil 13.	Tribolojik ve mekanik testler için gerekli küçük boyutlu numunelerin üretilmesinde kullanılan presleme kalıbının genel görünümü	39
Şekil 14.	Silindirik küçük boyutlu numunelerin üretilmesinde kullanılan presleme kalıbının detay görünümü	40
Şekil 15.	Büyük boyutlu numune hazırlama aşamaları ve deney prosedürünü gösteren şematik akış diyagramı.	42
Şekil 16.	(a) Gerçek boyutlu balata üretiminde kullanılan 400 ton kapasiteli pres ve (b) balataların kalıplanmasında kullanılan kalıp	42
Şekil 17.	(a) Dinamometre testlerinde kullanılacak olan blok tipi numunelerin çıkarıldığı gerçek boyutlu balata geometrisi ve boyutları (b) blok tipi numune geometrisi ve boyutları.	43
Şekil 18.	Sertlik deneyinin uygulandığı Rockwell sertlik ölçüm cihazının genel görünümü ve testin yapılışını gösteren şematik resimler	44

Şekil 19.	(a) Elastisite modülünün belirlendiği çekme/basma cihazının deney kısmına ait görünümü ve (b) Basma elastisite modülünün tayininde kullanılan yükleme eğrileri.....	45
Şekil 20.	Sıkıştırılabilirlik testlerinin yapıldığı çekme/basma cihazının deney kısmına ait görünüm ile test ortamı ve numunenin konumunu gösteren şematik resim	46
Şekil 21.	Farklı basınçlar altında sıkıştırılan numunede meydana gelen kuvvete bağlı boyca kısalma miktarlarını gösteren eğriler	47
Şekil 22.	Kullanılan pin-on-disk esaslı balata malzemesi sürtünme ve aşınma test sisteminin ve test bölgesini gösteren şematik resimler	50
Şekil 23.	Kullanılan pin-on-disk esaslı balata malzemesi sürtünme ve aşınma test sisteminin genel ve detay resimleri	50
Şekil 24.	Aralıklı frenleme testlerinde sürtünme katsayısının uygulanan frenleme ve boşta bekleme sürelerine göre değişimini gösteren bir periyotluk kesit	51
Şekil 25.	Sürekli frenleme (drag) testlerinde elde edilen sürtünme katsayısının disk sıcaklığına göre değişimini göstermek için verilen örnek bir eğri	51
Şekil 26.	Testlerde kullanılan 1/10 ölçekli dinamometrenin genel bir görünümü ile bu sistem üzerine ilave edilen blok-on-ring tipi sürtünme ve aşınma test sisteminin şematik resmi	53
Şekil 27.	Sürtünme yüzeylerinin üç boyutlu taranmasında kullanılan 3D optik profilometre cihazı ve bu cihazla yapılabilen bazı ölçümler	54
Şekil 28.	Isı iletim katsayısının belirlenmesini gösteren şematik resimler	55
Şekil 29.	(a) Farklı fiber oranlarına bağlı olarak değişen basma elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılan yükleme eğrileri. (b) Fiber oranına bağlı olarak ortalama sertlik değerleri ve teorik hacimsel boşluk değerlerinde meydana gelen değişimler	58
Şekil 30.	(a) Farklı fiber oranına sahip bileşimlerden elde edilen gerilme – kısalma eğrileri. (b) Farklı fiber oranlarında farklı basınçlar altında elde edilen ortalama sıkıştırılabilirlik değerleri.....	59
Şekil 31.	Farklı fiber oranlarına sahip balata bileşimlerinin frenleme periyot sayısına göre sürtünme katsayılarının değişimi	61
Şekil 32.	Farklı fiber oranlarına sahip balata bileşimlerinin frenleme periyot sayısına göre ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarlarının değişimi	62
Şekil 33.	(a) Farklı fiber oranlarına sahip balata bileşimlerinin sürekli frenleme (drag) testi sırasında sürtünme katsayılarının zamana bağlı olarak değişimini gösteren eğriler. Fiber oranına bağlı olarak yapılan sürekli frenleme testlerinin son aşamasında gözlenen kıvılcım oluşumu: (b) TYO-1, (c) TYO-2, (d) TYO-3 ve (e) TYO-4.....	64
Şekil 34.	Farklı fiber oranlarına sahip balata bileşimlerinden sürekli frenleme sonrası elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değişimleri ile boyca kısalma değerleri	65
Şekil 35.	Sürekli frenleme testi sonrası başlangıç bileşimi olan TYO-1'den üretilen numuneden elde edilen SEM ve optik mikroskop görüntüleri: (a) Sürtünme yüzeyinin genel görünümü, (b)-(c) yoğun aşınma etkilerinin olduğu bölge, (d)-(f) geçiş bölgesi ve (g)-(h) yoğun sıvanmaların olduğu bölge	67

Şekil 36.	Sürekli frenleme testi sonrası TYO-2 bileşiminden üretilen numuneden elde edilen SEM ve optik mikroskop görüntüleri: (a) Sürtünme yüzeyinin genel görünümü, (b)-(c) yoğun aşınma etkilerinin olduğu bölge, (d)-(f) geçiş bölgesi ve (g)-(h) yoğun sıvanmaların olduğu bölge.....	68
Şekil 37.	Sürekli frenleme testi sonrası TYO-3 bileşiminden üretilen numuneden elde edilen SEM ve optik mikroskop görüntüleri: (a) Sürtünme yüzeyinin genel görünümü, (b)-(c) aşınma etkilerinin olduğu bölge, (d)-(f) geçiş bölgesi ve (g)-(h) yoğun sıvanmaların olduğu bölge	68
Şekil 38.	Sürekli frenleme testi sonrası TYO-4 bileşiminden üretilen numuneden elde edilen SEM ve optik mikroskop görüntüleri: (a) Sürtünme yüzeyinin genel görünümü, (b)-(c) aşınma etkilerinin olduğu bölge, (d)-(f) geçiş bölgesi ve (g)-(h) yoğun sıvanmaların olduğu bölge	69
Şekil 39.	(a) Farklı CNSL oranlarına bağlı olarak değişen basma elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılan yükleme eğrileri. (b) CNSL oranına bağlı olarak balata bileşimlerinin ortalama sertlik değerlerinde meydana gelen değişim.....	73
Şekil 40.	(a) Farklı CNSL oranına sahip bileşimlerden elde edilen basma gerilmesi – basma şekil değişimi eğrileri. (b) Farklı CNSL oranlarında farklı basınçlar altında elde edilen ortalama boyca kısalma (sıkıştırılabilirlik) değerleri	73
Şekil 41.	Farklı oranlarda CNSL içeren balata bileşimlerinin sahip oldukları sürtünme katsayılarının frenleme periyot sayısına göre değişimi	76
Şekil 42.	Farklı oranlarda CNSL içeren balata bileşimlerinin aralıklı frenleme testinde elde edilen ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri.....	77
Şekil 43.	Farklı oranlarda CNSL içeren balata bileşimlerinin aşınma yüzeylerinden alınan SEM ve 2D profilometre görüntüleri: (a)-(c) CN-0, (d)-(f) CN-1, (g)-(i) CN-2, (j)-(l) CN-3, (m)-(o) CN-4 ve (p)-(s) CN-5	79
Şekil 44.	Farklı oranlarda CNSL içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme testinde elde edilen sürtünme katsayılarının disk yüzey sıcaklığıyla değişimi	81
Şekil 45.	(a) Farklı reçine oranına bağlı olarak değişen ortalama sertlik değerleri. (b) Reçine oranlarına bağlı olarak değişen basma elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılan yükleme eğrileri	85
Şekil 46.	(a) Farklı reçine oranlarında ve farklı basınçlar altında elde edilen ortalama boyca kısalma (sıkıştırılabilirlik) değerleri ve (b) farklı reçine oranına sahip bileşimlerden elde edilen basma gerilmesi – basma şekil değişimi eğrileri.....	86
Şekil 47.	Farklı oranlarda reçine içeren balata bileşimlerinin sahip oldukları sürtünme katsayısının frenleme periyot sayısına göre değişimi	88
Şekil 48.	Farklı oranlarda reçine içeren balata bileşimlerinin aralıklı frenleme testinde elde edilen ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri.....	88
Şekil 49.	Farklı oranlarda reçine içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme testinde elde edilen sürtünme katsayılarının disk yüzey sıcaklığıyla değişimi	90
Şekil 50.	Farklı oranlarda reçine içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme sonrasında aşınma yüzeylerinden alınan SEM ve 2D profilometre görüntüleri: (a)-(c) RC-1, (d)-(f) RC-2, (g)-(i) RC-3 ve (j)-(l) RC-4.....	92
Şekil 51.	(a) Farklı çelik fiberi oranına bağlı olarak değişen ortalama sertlik değerleri. (b) Çelik fiberi oranlarına bağlı olarak değişen basma elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılan yükleme eğrileri	98

Şekil 52.	(a) Farklı çelik fiberi oranlarında farklı basınçlar altında elde edilen ortalama boyca kısalma (sıkıştırılabilirlik) değerleri ve (b) farklı çelik fiberi oranına sahip bileşimlerden elde edilen basma gerilmesi – basma şekil değişimi eğrileri.....	98
Şekil 53.	Farklı oranlarda çelik fiberi içeren balata bileşimlerinin sahip oldukları sürtünme katsayılarının frenleme periyot sayısına göre değişimi	100
Şekil 54.	Farklı oranlarda çelik fiberi içeren balata bileşimlerinin aralıklı frenleme testinde elde edilen ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri	101
Şekil 55.	Farklı oranlarda çelik fiberi içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme testinde elde edilen sürtünme katsayılarının disk yüzey sıcaklığıyla değişimi	102
Şekil 56.	Farklı oranlarda çelik fiberi içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme sonrasında aşınma yüzeylerinden alınan farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a)-(c) RC-3 (SF-0), (d)-(f) SF-1, (g)-(i) SF-2, (j)-(l) SF-3 ve (m)-(o) SF-4	104
Şekil 57.	(a) Farklı oranlarda h-BN içeren balata bileşimlerinin sahip oldukları sürtünme katsayısı ve (b) disk sıcaklıklarının frenleme periyot sayısına göre değişimi	112
Şekil 58.	Farklı oranlarda h-BN içeren balata bileşimlerinin aralıklı frenleme testinde elde edilen ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri.....	113
Şekil 59.	Farklı oranlarda h-BN bileşiği içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme testinde elde edilen sürtünme katsayılarının disk yüzey sıcaklığıyla değişimi	115
Şekil 60.	Farklı oranlarda h-BN bileşiği içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme sonrasında aşınma yüzeylerinden alınan farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a)-(c) BN-0 (Bor katkısız), (d)-(f) BN-1, (g)-(i) BN-2 ve (j)-(l) BN-3.....	116
Şekil 61.	70 km/sa ilk frenleme hızı, 0,95 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m ² başlangıç atalet yükü altında gerçekleştirilen dinamometre testlerinde h-BN içermeyen optimum balata bileşimine (SF-3) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızına göre değişimi	121
Şekil 62.	0,22 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m ² başlangıç atalet yükü altında farklı ilk frenleme hızlarında gerçekleştirilen dinamometre testlerinde h-BN içermeyen optimum balata bileşimine (SF-3) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızı ile değişimi	121
Şekil 63.	0,95 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m ² başlangıç atalet yükü altında farklı ilk frenleme hızlarında gerçekleştirilen dinamometre testlerinde h-BN içermeyen optimum balata bileşimine (SF-3) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızı ile değişimi	122
Şekil 64.	0,60 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m ² başlangıç atalet yükü altında farklı ilk frenleme hızlarında gerçekleştirilen dinamometre testlerinde h-BN içermeyen optimum balata bileşimine (SF-3) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızı ile değişimi	122
Şekil 65.	H-BN içermeyen optimum balata bileşiminin (SF-3) 0,22 MPa sabit frenleme basıncı, 32 kg.m ² atalet yükü ve 100 km/sa sabit frenleme hızı altında gerçekleştirilen frenleme testi (Drag Test): (a) Sürtünme katsayısının sıcaklık ve alınan yola bağlı değişimi, (b)-(i) disk ve balata temas yüzeyinin belirli bir noktasından belirli periyotlarla alınan termal kamera görüntüleri; (b) 30 sn, (c) 60 sn, (d) 90 sn, (e) 150 sn, (f) 210 sn, (g) 270 sn, (h) 330 sn ve (i) 349 sn	125

Şekil 66.	70 km/sa ilk disk frenleme hızı, 0,95 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m ² başlangıç atalet yükü altında iki kez tekrarlanan dinamometre testlerinde h-BN katkılı optimum balata bileşimine (BN-2) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızına göre değişimi	129
Şekil 67.	0,22 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m ² başlangıç atalet yükü altında farklı ilk frenleme hızlarında gerçekleştirilen dinamometre testlerinde h-BN katkılı optimum balata bileşimine (BN-2) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızı ile değişimi	129
Şekil 68.	0,60 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m ² başlangıç atalet yükü altında farklı ilk frenleme hızlarında gerçekleştirilen dinamometre testlerinde h-BN katkılı optimum balata bileşimine (BN-2) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızı ile değişimi	130
Şekil 69.	H-BN katkılı bileşimden (BN-2) üretilen balatlardan çıkarılan numunelere 0,22 MPa sabit frenleme basıncı, 32 kg.m ² atalet yükü ve 100 km/sa sabit frenleme hızı altında gerçekleştirilen frenleme testi (Drag Test): (a) Sürtünme katsayısının sıcaklık ve alınan yola bağlı değişimi, (b)-(k) disk ve balata temas yüzeyinin belirli bir noktasından belirli periyotlarla alınan termal kamera görüntüleri: (b) 5 sn (c) 30 sn, (d) 60 sn, (e) 90 sn, (f) 150 sn, (g) 210 sn, (h) 270 sn, (i) 330 sn, (j) 390 sn ve (k) 450 sn	133

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Başlangıç (temel) balata bileşimi ve fiber katkı oranları.	35
Tablo 2.	Farklı oranlarda fiber katkısı içeren balata bileşimlerinden üretilen numunelerin sahip olduğu bazı mekanik özellikler	59
Tablo 3.	Fiber oranı optimize edilmiş balata bileşimi ve bu bileşime katılan CNSL oranları.....	71
Tablo 4.	Farklı oranlarda CNSL katkısı içeren balata bileşimlerinden üretilen numunelerin sahip olduğu bazı mekanik özellikler	74
Tablo 5.	Farklı oranlarda reçine içeren balata bileşimleri	83
Tablo 6.	Farklı oranlarda reçine katkısı içeren balata bileşimlerinden üretilen numunelerin sahip olduğu bazı mekanik özellikler	86
Tablo 7.	Geliştirilen balata malzemesi bileşimine katılan çelik fiberi oranları	95
Tablo 8.	Farklı oranlarda çelik fiberi katkısı içeren balata bileşimlerinden üretilen numunelerin sahip olduğu bazı mekanik özellikler	99
Tablo 9.	Geliştirilen balata bileşimine katılan h-BN ve grafit katkı oranları	109
Tablo 10.	Farklı oranlarda h-BN içeren balata bileşimlerinden üretilen numunelerin sahip olduğu bazı mekanik özellikler	110
Tablo 11.	h-BN içermeyen balata numunesine, farklı hızlarda ve farklı frenleme basınçlarında uygulanan dinamometre testlerinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı, durma mesafesi, durma süresi ve maksimum disk sıcaklığı değerleri	123
Tablo 12.	h-BN katkılı bileşime sahip balata numunesine, farklı hızlarda ve farklı frenleme basınçlarında uygulanan dinamometre deneylerinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı, durma mesafesi, durma süresi ve maksimum disk sıcaklığı değerleri	131

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Otomobiller, toplu taşıma araçları ve yük taşıtları talep edilen yüksek performansı sağlamak amacıyla hem daha yüksek hızlarda hem de daha yüksek kapasitelerde taşıma yapabilecek şekilde dizayn edilmektedir. Sektördeki bu gelişmeler bazı güvenlik problemlerini de beraberinde getirmektedir. Hız ve kapasite değerlerinin sürekli artırılmasına bağlı olarak taşıtların sahip oldukları kinetik enerji değerleri de sürekli artmakta olup, bu durum söz konusu taşıtların emniyetli bir şekilde yavaşlatılabilmesi veya durdurulabilmesi için daha fazla enerjinin sönmülmesini zorunlu hale getirmektedir. Bu görev taşıtlarda fren sistemleri tarafından yerine getirilmektedir. Fren sistemleri, hareketli bir makine elamanına karşı sürtünme direnci oluşturarak taşıtın yavaşlatılmasını ve emniyetli bir şekilde durdurulmasını sağlayan mekanik sistemlerdir. Frenleme esnasında hareketli sistemin sahip olduğu kinetik enerji fren mekanizmaları tarafından sürtünme yolu ile ısı enerjisine dönüştürülerek sönmülmemektedir.

Yük veya yolcu taşıma amacıyla yapılan ilk taşıtların dizayn edilmesinden bu yana, taşıtlardaki teknolojik gelişmelere paralel olarak fren sistemlerinde de önemli gelişmeler olmuştur. 1800'lü yılların ilk yarısında özellikle atlar tarafından sürülen veya buharla çalışan taşıtlarda kollu bir mekanizma yardımıyla çelik çerçeve kaplı bir tekerleğe bastırılan ahşap tipi sürtünme elemanlarından oluşan fren sistemleri kullanılmıştır [1]. Sürücü tarafından manuel olarak kontrol edilebilen bu sistem oldukça basit bir teknolojik ürün olarak ortaya koyulmuştur. Tozlu ve ıslak çalışma şartlarında etkin bir frenleme performansı ortaya koyamaması bu balata sisteminin en büyük dezavantajı olmuştur. Aynı yüzyılın ikinci yarısına gelindiğinde bu sistemlerin yerine daralan bir bant üzerine yerleştirilen sürtünme elemanları (ahşap bloklar) yardımıyla frenlemenin yapıldığı sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Bu mekanizmalar ilk geliştirilen taşıt modellerinde de tercih edilmiştir. 20. yüzyılın başlarına gelindiğinde Louis Renault tarafından ilk mekanik kampana fren sistemi geliştirilmiş olup, bu keşif modern fren sistemlerinin temelini oluşturmuştur [1]. Mekanik veya hidrolik olarak çalıştırılabilen bu sistemler her türlü hava koşullarında rahatlıkla kullanılabilir. Bu sistemde, içten dışa sıkıştırma yöntemini kullanmak suretiyle sürtünme elemanı kampananın iç yüzeyine bastırılmakta ve bu sayede aracın hızı azaltılarak

durdurulması sağlanmaktadır. Ancak, söz konusu sistemde sürtünme ortamının atmosfere doğrudan açık olmaması, sürtünme nedeniyle oluşan ısının ortamdaki uzaklaştırılmasını güçleştirmekte ve sürtünmede sıcaklığa bağlı ani düşüşler (feyd olayı) oluşabilmektedir. Yine de bu fren sistemi 1960'lı yıllara kadar etkin olarak taşıtlarda kullanılmış ve bu yıllardan sonra ise öncelikli olarak araç ön tekerleklerinde yerini disk fren sistemlerine bırakmıştır. Disk frenlerin keşfi aslında 1902 yılında İngiliz otomotiv tasarımcısı William Lanchester tarafından yapılmış olsa da 1960'lı yıllara kadar kullanımı yaygınlaşmamıştır [1]. 20. yüzyılın ortasından itibaren otomobil endüstrisinin hızlı gelişmelerle birlikte hız ve kapasite değerlerinin sürekli artması, kampana frenlerle kıyaslandığında daha iyi ısı dağılımı sağlayan, bakım maliyeti düşük ve hafif olan disk frenlere olan ilginin artmasına sebep olmuştur. Zaman içerisinde bu tip fren sistemleri araçların arka tekerleklerinde de kullanılmaya başlanmış olup, bugün hala etkin olarak kullanılmaktadır.

Fren sistemlerindeki gelişmelere paralel olarak fren pabuçlarında da bir değişimden söz etmek mümkündür. Fren sisteminin ortaya koyacağı performans fren pabucunun ortaya koyacağı performansla doğrudan ilişkilidir. Nitekim 1960'lı yıllardan sonra kampana frenlerin yerine disk tipi frenlerin tercih edilmesi, kampana tipi frenlerde fren pabuçlarının özellikle yüksek sıcaklıklarda etkin bir performans ortaya koyamamasıyla ilişkilidir. İlk fren sistemlerinde ahşap esaslı pabuç bloklar veya deri esaslı sürtünme malzemeleri tercih edilirken, kampana frenlerin keşfiyle birlikte daha iyi nitelikli fren balatalarının geliştirilme ihtiyacı doğmuştur. 20. yüzyılın başlarından günümüze kadar taşıtlarda görülen çok hızlı değişim balatalardan talep edilen çıktılarını da sürekli artırmıştır. Nitekim taşıtların ilk konseptlerinde kullanılan balatalardan sabit bir sürtünme katsayısı ve ekonomiklik talep edilirken, günümüzde her türlü çalışma koşulunda etkin ve sürdürülebilir bir frenleme performansı ortaya koymasının yanında; düşük aşınma oranı, yüksek mekanik mukavemet, yüksek termal kararlılık, ekonomiklik ve düşük ses ve gürültü oluşumu gibi pek çok özelliğe de sahip olması talep edilmektedir [2].

Ahşap ve deri esaslı tekil malzemelerden üretilen ilk balatalarla talep edilen bütün bu çıktıların sağlanması pek mümkün olmamıştır. Bunların yerine zaman içerisinde birkaç katkının bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozit türü balatalar üretilmeye başlanmıştır. 20. yüzyılın başlarında lif ve ziftin birbiri ile kombine edildiği balatalar üretilmiş, ancak ilk dikkate değer balatalar asbestin sahip olduğu üstün özellikleri göz önünde bulundurularak 1908 yılında İngiliz kaşif Herbert Froot tarafından geliştirilmiştir. Bu balatlar takviye elamanı olarak pirinç tel ve reçine ile asbestin bir kompozisyondan oluşmuştur [3]. Kolay

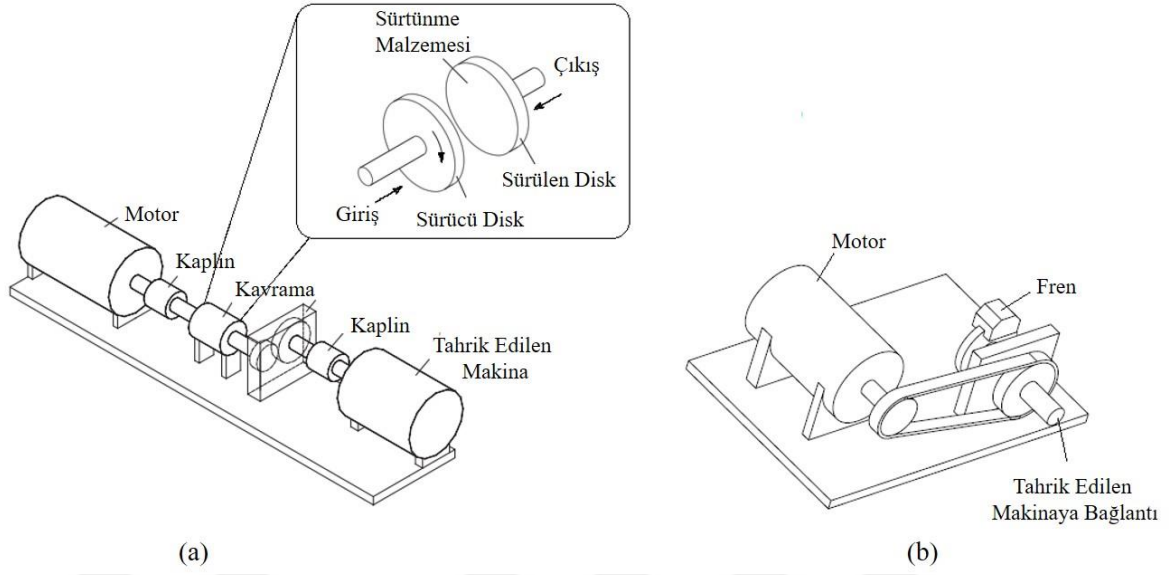
temin edilebilirliğinin yanında yüksek sıcaklıklarda mükemmel termal kararlılığı asbestin balatalarda takviye elamanı olarak tercih edilmesini artırmıştır [4]. 1970’li yıllara gelinceye kadar asbest esaslı bu balatalar yaygın olarak sürtünme elamanı olarak tercih edilmiştir. Ancak 1970’li yıllarda asbestin insan sağlığına olan zararları ve kanserojen etkisinin ortaya koyulmasıyla birlikte asbestin kullanımında hızlı bir şekilde kısıtlamalara gidilmiş ve 1990’lı yıllara gelindiğinde kullanımı pek çok ülkede tamamıyla yasaklanmıştır. Bu durum fren pabuçlarında asbest kullanımı yerine alternatif malzeme arayışını artırmıştır. Bu kısıtlamalardan sonra asbest içermeyen balata bileşimi geliştirme üzerine yoğun araştırma çalışmaları yürütülmüştür. Nitekim bazı firmalar geliştirdikleri asbestsiz bileşimleri patentlendirerek ticari ürün olarak piyasaya sürmüştür. Bu alandaki çalışmalar sadece asbeste alternatif malzeme arayışı üzerine yoğunlaşmamıştır. Nitekim kompozit formda üretilen bu balatalarda; takviye, dolgu, bağlama ve sürtünme düzenleme işlevlerinin yerine getirilmesi amacıyla kullanılan farklı fonksiyonel bileşenler bir arada kullanılmaktadır [5]. Bu bileşenlerin niteliği ve sürtünme pabucundaki katkı oranları genel olarak frenleme performansı üzerinde etkili olmaktadır [2]. Bu nedenle literatürdeki çalışmalarda ağırlıklı olarak kompozit fren pabuçlarındaki bileşenlerin türü ve katkı oranlarının sürtünme katsayısı ve aşınma gibi performans parametrelerine etkileri de incelenmiştir [6-10].

Fren sistemlerindeki bu gelişme tren ve metro taşımacılığındaki hızlı gelişmeye paralel olarak demiryolu taşımacılığında kendini daha fazla hissettirmektedir. Nitekim 20. yüzyılın başlarında demir yolu araçları için dökme demirden üretilmiş blok tipi balatalar kullanılmaktayken, zaman içerisinde balatalarda görülen gelişmelere paralel olarak kompozit esaslı balataların kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır [11]. Günümüzde de bütün dünyada uzun ömürlü ve çevre dostu yeni nesil kompozit fren pabuçlarının geliştirilmesi ve uygulamaya aktarılması konusunda yoğun bir çaba harcanmaktadır. Ancak, demir yolu taşımacılığının, hem şehir içi insan taşımacılığında hem de şehirlerarası insan ve yük taşımacılığında her geçen gün yaygın olarak kullanıldığı düşünüldüğünde bu taşıtlarda kullanılacak balataların daha ağır yüklere maruz kalacağı söylenebilir. Bu durum otomobillerle kıyaslandığında demir yolu taşıtlarında daha fazla enerjinin sönmelenmesini de zorunlu hale getirmektedir [12]. Bu sebeple demir yolu uygulamaları için geliştirilecek balataların daha fazla ısı ve mekanik dayanıma sahip olması gerektiği söylenebilir. Otomobiller için geliştirilen balatalar ile demir yolu araçlarından istenilen çıktılarının sağlanması pek mümkün değildir. Bu yüzden farklı uygulamalara göre kompozit yapıyı oluşturacak katkı maddelerinin türleri değiştirilerek farklı bileşimlere sahip balatalar

üretilmiş ve bu sayede sektörlere göre talep edilen farklı özellik çıktıları sağlanmaya çalışılmıştır [13]. Bu tez çalışmasında da benzer bir yaklaşım kurgulanmış ve demir yolu taşıtları için; çevre dostu, az gürültülü, düşük maliyetli, uzun ömürlü, yüksek aşınma direncine sahip asbestsiz, hegzagonal bor nitrür (h-BN) katkılı ve katkısız K-tipi yeni nesil kompozit fren pabuçlarının geliştirilmesi, laboratuvar ölçekli testlerinin yapılarak uygulama aşamasına hazır hale getirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla ilk olarak kapsamlı bir literatür taraması yapılarak esas katkı bileşenlerini içeren bir temel (başlangıç) bileşim oluşturulmuş ve bu bileşim üzerinde katkı maddelerinin türü ve miktarları değiştirilerek yeni bir optimum balata bileşimleri geliştirilmiştir. Daha sonra bu bileşime farklı oranlarda hegzagonal bor nitrür (h-BN) ilavesi yapılarak en iyi özellik çıktısı veren yeni BN'lü bileşim geliştirilmiştir.

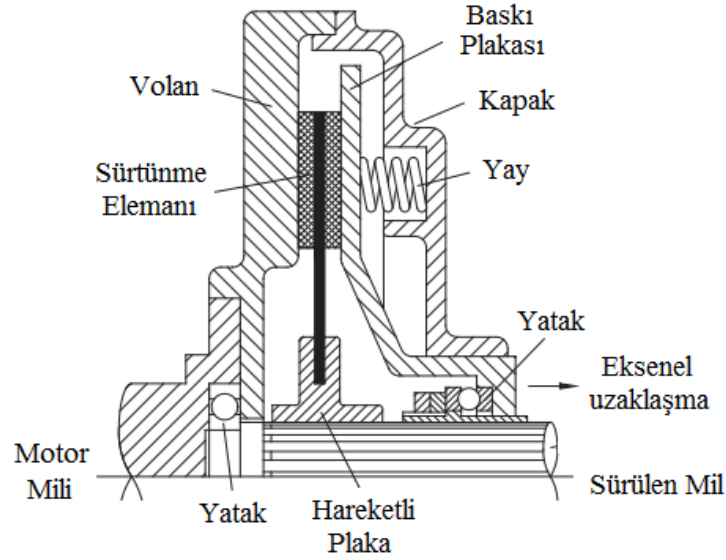
1.2. Balatalar

Kendisi ve birlikte çalıştığı karşı yüzey arasındaki sürtünme kuvveti sayesinde aracın veya sistemin kontrollü bir şekilde yavaşlatılması ve nihayetinde durdurulması amacıyla kullanılan eleman balata olarak tanımlanmaktadır [14]. Literatürde ve teknik dokümanlarda, balata yerine, fren pabucu ve/veya sürtünme elamanı terimleri de kullanılmaktadır [15]. Balatalar genel olarak fren balataları ve sürtünme esaslı kavramalarda kullanılan balatalar olmak üzere iki farklı kategoride incelenebilir. Bu uygulamaların her ikisinde de sürtünme etkilerinden yararlanılarak bir iş yapma eylemi gerçekleştirilmektedir. Şekil 1'de fren ve kavrama mekanizmasına ait genel şematik bir görsel verilmiştir. Her iki sistem de genel olarak metal disk ve balata olarak ifade edilen sürtünme elamanından oluşmaktadır. Sürtünme etkisiyle iş yapan benzer sistemler olmasına rağmen aralarında çalışma mantığı açısından farklılık vardır. Eğer bileşenlerden birisi sabit diğeri dönüyorsa bu sistem fren olarak ifade edilirken her iki bileşen de dönüyorsa bu sistem kavrama olarak adlandırılmıştır [16].



Şekil 1. Sürtünme esaslı bir kavrama ve bir fren mekanizmasının şematik bir görünümü:
(a) Sürtünme esaslı kavrama ve (b) fren mekanizması [16].

Kavramalar, motor milinden elde edilen gücü kullanıcının isteğine göre dişli kutusuna veya iletim şaftına ileterek yüksek tork gerektiren sistemlerin kademli olarak devreye alınması veya hızlı bir şekilde devre dışı bırakılması için tercih edilen sistemlerdir. Sürtünme esaslı kavrama türleri taşıtların debriyaj sistemlerinde, inşaat makinalarında ve takım tezgahları gibi uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu kavramaların, diskli, konik, lamelli ve bantlı gibi farklı tasarımları mevcuttur [17]. Tek lamelli sürtünme esaslı bir kavramaya ait genel bir şematik resim Şekil 2’de verilmiştir. Söz konusu sistemde motor tarafından hareketlendirilmiş bir volan yüzeyine mekanik bir sistem tarafından sağlanan aksenal bir kuvvet yardımıyla bastırılan bir sürtünme elamanı ile volan arasında oluşan sürtünme momenti vasıtasıyla iki mil arasında kademli olarak güç aktarım işlevi gerçekleştirilmektedir. Sürtünmeli kavramalarda balata olarak; çelik ve sinter bronz gibi metalik esaslı bileşenlerin kullanılmasının yanında özellikle son yıllarda cam elyaf, karbon elyaf veya seramik elyaf takviyeli kompozit formda balataların kullanımı da mevcuttur [17].

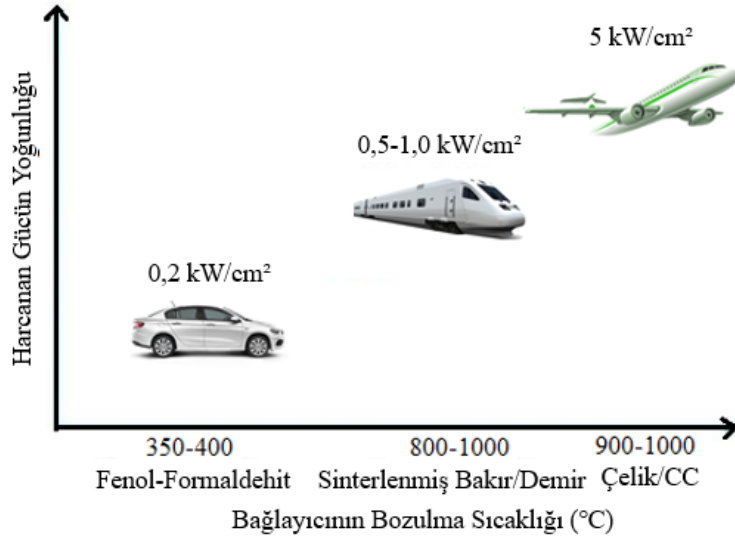


Şekil 2. Tek lamelli bir kavramanın şematik görünümü [16].

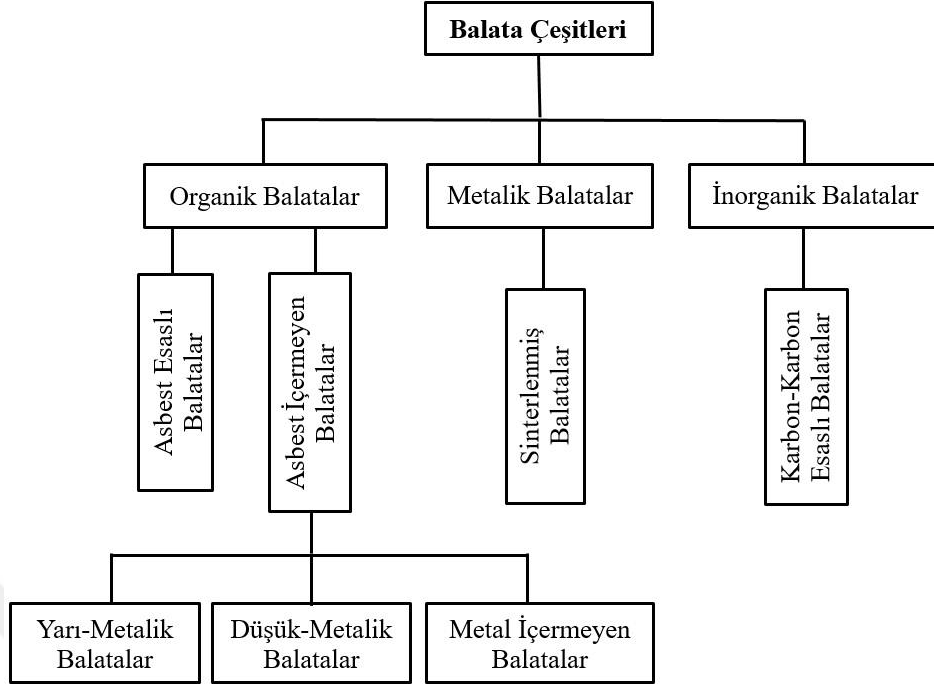
Frenler, bir sistemin hızını azaltmak veya kontrol etmek ya da sistemi tamamen durdurmak için kullanılan mekanizmalardır [16]. Neredeyse hayatın her alanında pek çok sistemde fren sistemleri farklı formlarıyla kullanılmaktadır. Frenlerde kullanılan sürtünme elemanları (balatalar) oldukça önemli bir göreve sahiptir. Balatalar frenleme sırasında hareketli (dönen) bir makine elemanı yüzeyine mekanik, hidrolik veya pinomatik bir mekanizma yardımıyla bastırılarak sürtünme oluşturulmaktadır. Bu sayede sistemin kinetik enerjisi sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüştürülerek sönmelenir ve sistemin emniyetli bir şekilde yavaşlatılması veya durdurulması sağlanır. Taşıtların tarihsel gelişimi süresince bakıldığında; ahşap, deri ve dökme demir gibi öncü farklı tekil malzemeler balata olarak tercih edilmiştir [1]. Ancak taşıtlardan talep edilen beklentilerin sürekli artması bu balataların sürekli olarak iyileştirilmesini zorunlu kılmıştır. Günümüzde bu balataların yerini; takviye elemanı, dolgu bileşeni ve sürtünme düzenleyici olarak ifade edilen ve bazen 10'dan fazla bileşenin bir reçine yardımıyla bağlanmasıyla oluşturulan kompozit formdaki balatalar almıştır. Balatalar günümüzde, disk ve kampana gibi farklı fren sistemlerine veya uygulamalara göre farklı formlarda üretilerek kullanıma sunulmaktadır.

1.2.1. Balata Çeşitleri

Günümüzde ulaşım sektörü hızla gelişen ve bu gelişmelere bağlı olarak yeni ve güvenilir teknolojik ihtiyaçları beraberinde getiren bir alan haline gelmiştir. Fren balataları da bu kapsamda sürekli geliştirilmeye ve yeni malzemelerle performanslarının iyileştirilmesine ihtiyaç duymaktadır. Örneğin günümüzde hızlı trenlerin geliştirilmesi, havacılık sektörünün yaygınlaşması, kullandığımız araçların hız, taşıma kapasiteleri ve boyutlarının artırılması gibi gelişmeler balatalardan farklı uygulamalarda farklı performanslar ortaya koymasını zorunlu kılmaktadır. Bu yüzden tek türde bir balata ile farklı uygulamalarda talep edilen performansların karşılanması mümkün olmamaktadır. Kullanılan uygulamalara bakıldığında balataların sektörlere göre farklı seviyelerde enerjileri sönümlemesi gerektiği net bir şekilde gözlemlenebilmektedir (Şekil 3). Karşılanması beklenen bu talepler ancak farklı bileşimlere sahip farklı türlerde balatalarla mümkün olabilmektedir. Bu balatalar da genel olarak kullanılan katkı malzemelerin türüne ve göstermiş oldukları sürtünme karakteristiğine göre organik (reçine bağlı), inorganik ve metalik esaslı olmak üzere temelde üç sınıfa ayrılmaktadır (Şekil 4).



Şekil 3. Tercih edildiği uygulamalara göre balataların sönümlemesi gereken enerji seviyeleri [12].



Şekil 4. Balataların kullanılan katkı maddelerinin türüne göre sınıflandırılması [5].

1.2.1.1. Organik Polimer Esaslı Balatalar

Organik esaslı balatalar; takviye elemanı, bağlayıcı, dolgu maddeleri ve sürtünme düzenleyici olarak ifade edilen katkılardan oluşmaktadır. Balataların tercih edildiği uygulamalara göre bu temel katkıların oranları ve bileşenleri değişebilmektedir. Organik kökenli balatalar asbest esaslı ve asbest içermeyen olmak üzere 2 ayrı kategoride değerlendirilmektedir [2]. Asbest, çevreye ve sağlığa olan zararlı etkileri nedeniyle 1989 yılında tamamıyla yasaklanmasından önce balata yapılarında da yaygın olarak kullanılmıştır. Asbest esaslı bu organik balatalar genel olarak %30 - %40 arasında organik bileşenlerle (bağlayıcı, dolgu maddesi, sürtünme düzenleyici ve takviye edici) birlikte asbest ve diğer inorganik katkılardan oluşmaktadır [18]. Asbestin kullanımıyla ilgili kısıtlamalar bu takviye elemanının yerine alternatif elyaflar (cam elyaf, metal elyaf, seramik elyaf, selülozik elyaf ve aramit elyaf (kevlar) gibi) kullanılarak yeni asbestsiz organik balataların geliştirilmesine katkı sağlamıştır. Bu balatalarda genel olarak üç gruba ayrılmış ve yarı-metalik, düşük metal katkılı ve metal katkısı içermeyen organik balatalar olarak isimlendirilmiştir [5]. Yarı metal katkılı organik balatalar 1960'lı yıllarda kullanılmaya başlanmış olup özellikle yolcu ve yük

taşıyıcı araçlarda tercih edilmiştir. Bu balatalar yapılarında %50 den fazla demir katkı bileşen veya çelik fiberi bulunmakta olup bileşenlerin bağlanması fenolik reçinelerle sağlanmıştır. Yapılarında bulunan yüksek orandaki metal katkı içeriği balataların kararlı bir sürtünme davranışı ortaya koymasına ve feyd (sıcaklığa bağlı ani sürtünme katsayısı düşüşü) dayanımlarının artmasına önemli katkı sağlamıştır [5, 18]. Yapı içerisindeki demir esaslı bileşenlerin oranı %10 - %30 arası olduğu durumda balatlar düşük metal katkılu organik balatalar olarak ifade edilirken balata yapısında çelik katkısının bulunmadığı durumda ise metal katkısız organik balata olarak isimlendirilmiştir [5, 18].

1.2.1.2. Metalik Esaslı Balatalar

Metal esaslı balatalar sinterlenmiş balatalar olarak da ifade edilmektedir. Özellikle yüksek termal kararlılık gerektiren yüksek hızlı trenler ve uçaklar gibi yüksek enerji sönmölen fren uygulamaları için geliştirilmiş olup, son yıllarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu balatalar bakır esaslı ve demir esaslı olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Bu grupta ifade edilen balataların organik balatalardan temel farkı içerdikleri bağlayıcılarıdır. Organik balatalarda fenolik esaslı bağlayıcılar tercih edilirken, metal esaslı balatalar ergime sıcaklığının altında azot atmosferinde sinterlenmesiyle bileşenlerin bağlanması sağlanmaktadır. Bakırın ve demirin ergime sıcaklığının 1000°C'nin üzerinde olması bu balatalara yüksek termal kararlılık kazandırmaktadır [5].

1.2.1.3. İnorganik Balatalar

Karbon-karbon esaslı sürtünme malzemeleri olarak da ifade edilen inorganik balatalar, sinterlenmiş metal esaslı ağır balataların yerine yüksek performansın istendiği uçaklar ve yarış arabalarında tercih edilmektedir. En önemli avantajı sahip oldukları düşük yoğunluk ve yüksek ısıl kapasiteleridir. Üretim süreçlerinin yavaş olması söz konusu balataların maliyetlerini artırmaktadır. Ancak kullanıldığı uygulamalar göz önünde bulundurulduğunda bu tür balatalarda maliyet ikinci planda tutulmaktadır. Karbon-karbon sürtünme malzemeleri, karbon elyaflarının amorf karbonla bağlanmasıyla elde edilmektedir [2, 5]. Hacimlerinin %50'den fazlası karbon esaslı bileşenlerden oluşmaktadır. Sahip oldukları

sürtünme katsayıları neme ve sıcaklığa bağlı olarak önemli oranda değişiklik göstermekte olup bu durum sürtünme katsayısı kararsızlığını da beraberinde getirmektedir. [2, 5].

1.2.2. Fren Balata Malzemelerinin Sınıflandırılması

Gelişen teknolojiyle birlikte günümüzde yük veya yolcu taşımacılığında kullanılan vasıtalarda ortaya çıkan çeşitlilik ve gereksinim her geçen gün artmaktadır. Gerek sürekli tüketim maliyetlerinin azaltılmak istenmesi gerekse de sektörün gelişmesine bağlı olarak güvenlik tedbirlerinin sürekli iyileştirmeye çalışılması taşıtlardaki pek çok bileşenin de beraberinde geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bunlardan birisi de taşıtın güvenli bir şekilde yavaşlaması veya durdurulmasını sağlayacak olan fren pabuçlarıdır. Söz konusu sürtünme elemanları özellikle 1900'lü yılların öncesinde deri, ahşap, dökme demir gibi tekil malzemelerden imal edilirken, 20. yüzyılın başlarından itibaren baskın olarak kompozit malzemelerden üretilmeye başlamıştır. Kompozit yapılı bu ticari balataların oluşturulmasında kullanılan katkı bileşenleri genel olarak sahip oldukları benzer özelliklere ve yapı içerisindeki kullanım amaçlarına göre dört grup altında toplanmış olup takviye bileşenleri, dolgu bileşenleri, bağlayıcılar ve sürtünme düzenleyiciler olarak isimlendirilmiştir [5]. Ancak, söz konusu kompozit malzemelerde kullanılan pek çok katkının zamanla gerek talep edilen kriterleri karşılayamaması gerekse de zamanla ortaya çıkan çevreye olan zararlı etkileri nedeniyle sürekli olarak aynı veya daha iyi işlevselliği karşılayacak muadilleriyle değiştirilmesine gerek duyulmuştur. Bu yüzden etkin olarak kullanılan bu sürtünme elemanları üzerine yoğun araştırma çalışmaları sürdürülmektedir. Bu anlamda bu tez çalışmasının da ana konusunu oluşturan kompozit esaslı balatalar genel anlamda; takviye malzemeleri, bağlayıcılar, dolgu bileşenleri ve sürtünme düzenleyici bileşenlerden oluşmaktadır. Bu katkı maddeleri ve bu gruplar altında verilebilecek bileşenler aşağıdaki kısaca özetlenmiştir.

1.2.2.1. Takviye Malzemeleri (Fiberler)

Fren pabuçlarındaki takviye bileşenleri, farklı ısı ve mekanik etkiler altında yapının bütünlüğünün korunması ve pabucun ana geometrik yapısının ya da gövdesinin oluşturulmasında katkı sağlaması amacıyla kullanılmaktadır. Bu amaçla en yaygın

kullanılan malzeme grubu elyaflar ya da fiberlerdir. Söz konusu takviye bileşenleri farklı uzunluk ve farklı çaplarda lif halinde üretilmektedirler. Fren pabucu imalatında sahip olduğu düşük ısıl iletkenlik, yeterli esneklik ve mukavemet, ateşe ve ısıya dayanıklılık ve düşük maliyet gibi özellikleri sayesinde 20. yüzyılın başlarından itibaren en yaygın kullanılan elyafların başında asbest gelmektedir. Söz konusu elyafın 650°C'ye kadar sahip olduğu özelliklerini koruması fren pabuçlarındaki kullanımını artırmıştır [4]. Ancak endüstriyel ürünlerde asbest kullanımı, söz konusu elyafın yapılan pek çok çalışma ile insan sağlığı üzerindeki kanıtlanmış olumsuz etkileri nedeniyle, kademeli olarak kullanımı kısıtlanmış ve 1970'li yıllardan sonra pek çok kurum ve Dünya Sağlık Örgütü tarafından tamamıyla yasaklanmıştır. Bu kararların neticesinde takip eden yıllarda pek çok ülke asbest kullanımını sınırlandırmış veya tamamıyla sonlandırmıştır. Bu durum fren pabuçlarında kullanılan bu takviye elemanına alternatif takviye katkılarının araştırılmasını gerekli kılmıştır [19-21] Özellikle 1980'li yıllardan sonra bu gerekliliğin ortaya çıkmasıyla birlikte asbeste alternatif elyaf türleri ile oluşturulan balatalara ait pek çok patent alınmıştır [22]. Ancak halen günümüzde de bu alternatif fiber arayışı son bulmuş değildir. Asbestin yerine kullanılmış ve katkıları nedeniyle alternatif olarak değerlendirilebilecek takviye elemanları ve genel özellikler aşağıdaki gibi verilebilir.

Cam yünü (Cam elyafı): Asbeste alternatif olarak düşünülen fiberlerden bir tanesi de cam elyaftır. Farklı sınıflarda üretilen bu elyaf türünün özellikle E-sınıfının takviye elemanı olarak kabul edilebilir performanslar gösterdiği yapılan çalışmalarla ortaya koyulmuştur [23, 24]. Alümina-kireç ve borosilikat gibi ana malzemelerden üretilen E-cam elyafının sahip olduğu yüksek elektriksel direnci, korozyona karşı yüksek dayanımı, yoğunluğuna göre sahip olduğu yüksek mukavemet ve nispeten düşük maliyeti sayesinde balata bileşimlerinde takviye elemanı olarak kullanımı yaygındır. Ayrıca E-Sınıf fiberin sahip olduğu 1200-1300 °C aralığındaki ergime sıcaklığı değeri asbestin ergime sıcaklığından daha yüksektir. Bu sayede iyi bir termal kararlılığa sahiptir [25] . Ancak cam elyafın termal iletkenliğinin asbeste göre daha düşük olması ve kırılğan bir yapıya sahip olması balatalarda takviye elemanı olarak kullanımını sınırlamaktadır [26-28]. Öte yandan, gerek balataların üretim aşamasında cam elyafının kuru olmasından kaynaklı karşılaşılan problemler [29], gerekse de yapısal ve termal yükleri karşılayabilmesine rağmen kullanımda belli oranda gürültü ve titreşime neden olması bu tür elyafların diğer eksiklikleri olarak göze çarpmaktadır [30].

Aramid Elyaf: Söz konusu elyaf ilk olarak 1973 yılında DuPont firması tarafından üretimi yapılmış ve kevlar olarak isimlendirilmiştir. Ancak farklı ticari firmalar tarafından farklı isimlerle de ifade edilmektedir. Sahip olduğu mükemmel termal kararlılığı, hafifliği, yüksek mukavemeti, rijitliği ve esnekliği gibi pek çok üstün özellikleri sayesinde; tekstil, denizcilik, havacılık ve uzay gibi pek çok sektörde kullanımı yaygınlaşmıştır. Ayrıca, aşınmaya, neme ve korozyona karşı mükemmel direnci [31] ve 500 °C seviyesinin üzerinde olan ergime sıcaklığı sayesinde fiber formunda asbeste alternatif olarak değerlendirilebilecek takviye elemanları arasında sayılmaktadır. Söz konusu elyaf, 425°C çalışma sıcaklığı mertebelerine kadar sahip olduğu mekanik özellikleri büyük oranda korumaktadır [32]. Ancak sahip olduğu yumuşak yapısı nedeniyle balata yapısı içerisinde takviye elemanı olarak yalnızca aramid elyafın kullanımının güç olduğu ve bu yüzden de daha çok taş yünü ve çelik yünü gibi daha sert takviye elemanlarıyla birlikte kullanımının faydalı olacağı belirtilmiştir [33].

Mineral Elyaf: Fren pabucu yapısına takviye elemanı olarak katılan fiberlerden birisi de özünde volkanik kayalar olan mineral elyaflardır. En yaygın bilinen türlerinden birisi de Basalt elyaf olup ilk defa Deutsche Basaltsteinwolle GmbH firması tarafından tescil edilmiştir. 1280 °C civarında olan ergime sıcaklığı sayesinde 1000°C gibi çok yüksek sıcaklık seviyelerine kadar fiziksel özelliklerini koruyabilmektedir. Sahip olduğu termal kararlılık, mukavemet, hafiflik ve ucuz maliyeti sayesinde asbestin yerine kullanılabilir takviye elemanları arasında sayılmaktadır. Termal iletkenliği 0,031-0,038 w/mK aralığında olup bu değer asbestle kıyaslandığında yaklaşık 5 kat daha düşüktür [27]. Düşük termal iletkenliğinden ötürü yaygın olarak yalıtım malzemesi olarak tercih edilmektedir.

Metalik Fiberler: Balata yapısına katılan ve takviye elemanı olarak kabul gören elyaflar arasında sayılabilir. Çelik, demir, bakır, pirinç ve bronz gibi pek çok farklı türlerinin olması çeşitli en-boy ve farklı geometrilerde temin edilebilmesi, ekonomik olmaları ve aşınmaya karşı göstermiş oldukları direnç gibi özellikleri sayesinde kompozit fren pabuçlarının yapısında sıklıkla tercih edilmektedir [6, 34, 35]. Metalik fiberlerin sahip olduğu yüksek ısı iletkenlik değeri, sürtünme yüzeyinde oluşan ısının balata üzerinden atılmasına önemli oranda katkı sağlarken yüksek sıcaklıklarda sürtünmenin kararlı bir şekilde sürdürülmesine de katkıda bulunurlar. Ancak söz konusu elyafların yapı içerisindeki kullanım oranları büyük önem arz etmektedir. Yapı içerisine yüksek oranlarda kullanılması karşı disk aşınmasına (tekerlek aşınmasına) sebep olarak geometrik boyutların değişmesine neden olduğu bilinmektedir [36].

Seramik Fiberler: Genel olarak alümina ve silika bazlı yapıya sahip olan bu elyaflar diğer takviye elemanlarıyla karşılaştırıldığında balata bileşimi içerisinde nispeten daha sonraları kullanılmaya başlanmıştır. 2000 °C'nin üzerinde olan ergime sıcaklığı sayesinde çok yüksek sıcaklıklarda bile termal olarak kararlı kalabildikleri için balatalara geniş bir sıcaklık aralığında çalışma imkanı sunmaktadır [37-39]. Diğer taraftan sahip oldukları yüksek sertlik, mukavemet ve hafiflik sayesinde metalik fiberlere göre daha kullanışlı olduğu söylenebilir.

Karbon Fiber: Balata yapısına takviye elemanı olarak kullanımı gittikçe artan diğer bir elyaf grubudur. Sahip olduğu hafiflik ve yüksek dayanımı sayesinde özellikle uçak ve roket gövdelerinin imalatında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu özelliklerinin yanı sıra termal iletkenliğinin yüksek olması ve yapısının ısıl bozulmaya karşı dirençli olması sayesinde özellikle uçak balatası olarak kullanılan karbon-karbon balatalarında kullanımı mevcuttur [40].

1.2.2.2. Bağlayıcı Malzemeleri

Bağlayıcı adı altında balata yapısına katılan katkı bileşenlerinin temel amacı; sürtünme ve termo-mekanik gerilmelere karşı koyarak zorlu şartlar altında kompozitin yapısal bütünlüğünü korumak ve bütün katkıları bir arada tutarak onların yapıdan uzaklaşmamasını sağlamaktır. Balatalarda bağlama işlevi daha çok termoset reçinelerle sağlanmaktadır. Üretim maliyetlerinin düşük olması sebebiyle balatalarda bağlayıcı olarak fenolik reçineler tercih edilmektedir. Fenolik reçine, fenol ve formaldehitin asidik veya bazik katalizör ile yoğunlaştırılması reaksiyonu sonucunda Novalak ve Resol olmak üzere iki farklı türde elde edilmektedir [41, 42]. Söz konusu reçinelerin sıcaklıkla birlikte kürlenmesi ve bu sayede çapraz bağlanma ile termoplastikten termosete dönüşmesi, bu tür reçinelerin fren pabucu imalatında kullanılmaları açısından önemli bir avantajdır. Ancak fenolik reçineler sıcaklığın belirli bir seviyenin üzerine çıkması durumunda termal oksidasyona uğrayarak bozulmakta ve karbonize olmaktadır [43, 44]. Bu durum fenolik reçinelerin özellikle yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılan yüksek enerjili fren uygulamalarında kullanımını kısıtlamaktadır. Fenolik reçinelerin yapısal bozulma sıcaklığı yaklaşık 450 °C civarındadır [45]. Bu yüzden bağlayıcı olarak tercih edildiği uygulamalar göz önüne alındığında, bu sıcaklık değerlerinin aşılmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Öte yandan, balata yapısındaki reçine

konsantrasyonunun düşük olması, zayıf bağlanma nedeniyle fiziksel özelliklerin zayıflamasına, yüksek konsantrasyonu ise artan sıcaklıkla birlikte sürtünme katsayısının düşmesine (feyd oluşumu) sebep olmaktadır [46, 47]. Bu durum balata içerisindeki optimum reçine miktarının doğru bir şekilde belirlenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Öte yandan, fenolik reçinelerin yapısının kırılğan ve darbe direncinin düşük olması kullanımını kısıtlayan önemli etkenlerden birini oluşturmaktadır. Kısıtlayıcı bu durumların giderilmesi (esneklik kazandırılması) veya termal olarak bozulmasının geciktirilmesi için fenolik reçine yapılarına epoksi [48] silisyum [49] bor [50] ve fosfor gibi farklı bileşenler katılarak modifiye edilmektedirler [51].

1.2.2.3. Dolgu Malzemeleri

Dolgu adı altında belirli hacimlerde balata bileşimine eklenen bu katkıların temel amacı; hacmi artırarak üretilebilirliği iyileştirmek ve bu sayede fren pabuçlarının üretim maliyetlerini azaltmaktır [30, 52, 53]. Balata yapısındaki diğer bileşenlerle (takviye elemanları, bağlayıcılar ve sürtünme düzenleyici) kıyaslandığında dolgu malzemelerinin balatanın sürtünme karakteristiği üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı düşünülmektedir. Ancak yapılan çalışmalar, uygun dolgu malzemelerinin seçilmesi ile fren pabucunun ağır yük koşullarında çalışması durumunda ortaya çıkan ısıl etkilerin sebep olacağı hasarların azaltılmasına, kütle mukavemet ve sertlik değerlerinin artırılmasına ve fren pabucunun korozyon direncinin artırılmasına olumlu katkılar sağladığı görülmüştür [30, 54]. Yapıya katılacak dolgu bileşenlerinin seçiminde belirli kriterler dikkate alınmalıdır. Bu kapsamda aranan en temel kriter maliyettir. Bunun yanında çalışma şartlarından etkilenmeyecek kimyasal ve fiziksel yapıda (su ve yağlar ile reaksiyona girmemeli) olması, yüksek sıcaklıklarda dolgu özelliğini etkileyecek mertebelerde hacimsel değişimler sergilememesi, alevlenmeye karşı dirençli olması gibi özellikler de aranmaktadır [30]. Organik ve inorganik kökenli olabilen bu katkılar arasında en çok bilineni yüksek yoğunluğa sahip barit minerali [5, 55] termal kararlılık amacıyla yapıya katılırken, kalsiyum karbonat (CaCO_3) [5, 56] ise barit mineraline alternatif olarak düşünülmektedir. Mika, magnezyum, alüminyum ve silikat minerallerini içeren vermikulit gibi bileşenler ise genellikle yoğunluğu veya frenleme sırasında ortaya çıkan sesi ve gürültü seviyesini azaltmak için kullanılan dolgu maddeleridir [57-60]. Bunların dışında talk ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), kizelgur (Diatomit) ve kil [61],

molibdentrioksit ve kauçuk tozu [33] gibi katkıları da dolgu bileşenlerine örnek olarak verilebilir.

1.2.2.4. Sürtünme Düzenleyici Malzemeler

Kompozit fren pabuçlarında, sürtünme katsayısının ve aşınma miktarlarının ayarlanması için kullanılan katkı malzemeleri genel olarak sürtünme düzenleyici olarak isimlendirilmektedir. Bu katkı malzemeleri genel olarak abrasif etkili olanlar ve yağlayıcı olanlar diye iki grup altında incelenmiştir [5]. Sürtünme düzenleyici malzemeler, balataların performans çıktılarını direkt olarak etkiler niteliktedir. Yağlayıcı olarak yapıya katılan bileşenler kompozitin sürtünme katsayısını azaltarak aşınma miktarlarını optimize etmek amacıyla yapıya eklenirken abraziv etkili olanlar ise sürtünme katsayısının düştüğü veya uygulamalara göre düşük kaldığı durumlarda artırıcı etki sağlaması amacıyla katılmaktadırlar [5].

Yağlayıcılar: Sürtünme ve aşınma özelliklerinin optimizasyonu için katı yağlayıcı olarak molibdendisülfür (MoS_2), tungstendisülfür (WS_2), antimonitrisülfür gibi metal sülfitlerin yanında grafit, bor nitrür, kadmiyum klorür (CdCl_2) kurşun iyodür (PbI_2) gibi katmanlı (lamelli) yapıları katı yağlayıcılar yaygın olarak kullanılmaktadır [62]. Bunun yanında AgCN , CuCl , AgI gibi katmanlı olmayan mineral yağlayıcılar tercih edilmektedir [63]. Bu katkıların yağlayıcı olarak tercih edilmesindeki temel şart, düşük kayma gerilmesi göstermeleri ve bu sayede düşük sürtünme katsayısına sahip olmalarıdır [64]. Lamelli yapıya sahip bütün katı yağlayıcılar aynı şekilde yağlama derecesine sahip değillerdir. Burada yağlayıcı etkisinin iyi olması, aşınma yüzeylerine yapışma derecesiyle ilişkilendirilmektedir [63]. Grafit, Molibden disülfür (MoS_2) ve antimonitrisülfür (Sb_2S_3) en çok tercih edilen katı yağlayıcılardır. Molibden disülfür grafitte göre daha düşük sıcaklıklarda yağlayıcı olarak tercih edilirken, antimonitrisülfür ise daha yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı olarak tercih edilmektedir [65]. Grafit sahip olduğu yüksek ısı iletim katsayısı, ısı ve şoklara karşı dayanımı ve nispeten korozyon dayanımının iyi olması sayesinde daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [66]. Ancak grafitin yağlayıcılık derecesi ortam şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Nemli ortamda sahip olduğu sürtünme katsayısı değeri vakum ve kuru atmosferlerde sahip olduğu sürtünme katsayısı değerinden daha düşüktür [63, 67]. Bu durum ortam şartlarına göre farklı sürtünme ve aşınma karakterlerinin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

Abrazifler: Sürtünme katsayısını artırmak ve sürtünme yüzeyinde oluşan istenmeyen sürtünme filminin uzaklaştırılması amacıyla balata yapısına katılan bileşenler sürtünme düzenleyici adı altında abrazifler olarak isimlendirilmektedir. Bu katkılara genel olarak zirkonyum oksit (ZrO_2), zirkonyum silikat ($ZrSiO_4$), alüminyum oksit (Al_2O_3), krom oksit (Cr_2O_3), silisyum oksit (SiO_2) ve manyetit (Fe_3O_4) gibi sert metal oksitler ve silikat parçacıkları verilebilir [18, 68]. Abrazifler kullanılan katkılara oldukça duyarlıdır bu yüzden doğru abrazif katkısının seçimi oldukça önem arz etmektedir. Aksi durumda frenleme sırasında ses ve titreşim oluşumunun artmasına ve rotor (karşı disk) aşınmasının daha belirgin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır [69]. Öte yandan yapı içerisindeki abrazif etkili katkıların oranının artması sürtünme katsayısında saçılımlara da sebep olmaktadır [33]. Bu yüzden bu katkıların hacimsel oranının hassas bir şekilde tayin edilmesi oldukça önemlidir.

1.2.3. Balata Performansına Etki Eden Faktörler

Fren sistemi taşıtlar üzerinde en kritik sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Gerek yolcu güvenliği gerek se aracın güvenliği açısından son derece önemli bir göreve sahiptir. Aracın sahip olduğu kinetik enerji fren sistemleri sayesinde ısı, ses ve titreşim gibi farklı enerji formlarına dönüştürülerek sönmelenmekte ve aracın güvenli bir şekilde yavaşlatılması ve durdurulması sağlanmaktadır [18]. Bu yüzden frenleme sırasında ortaya koyulacak performansın hayati bir öneme sahip olduğu söylenebilir. Farklı frenleme koşullarında sürdürülebilir bir performans ortaya koyması sürtünme malzemelerinden beklenen en önemli çıktıdır. Bu performansın değerlendirilmesinde kullanılan en önemli kriter ise sürtünme katsayısı olarak ifade edilmiştir [15, 70]. Sürtünme katsayısı malzemenin karakteristik bir özelliği olmayıp pek çok etkiden doğrudan etkilenebilmektedir [71, 72]. Bu kapsamda frenleme performansını dolayısı ile balata malzemesinin sürtünme ve aşınma davranışını etkileyen pek çok faktörden bahsetmek mümkündür. Bu yüzden son yıllarda bu alanda yoğun çalışmalar yürütülmekte olup, balata malzemesinin sürtünme ve aşınma performansını etkileyen yapısal ve çevresel faktörlerle birlikte uygulama koşullarının etkileri net olarak ortaya koyulmaya çalışılmaktadır [73-77]. Bu etkiler aşağıda verildiği gibi belirli gruplara ayrılarak incelenmiştir [71, 78, 79]. Bunlar:

- Sürtünme malzemesinin karakteristiği: Fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerine bağlı ortaya çıkan etkiler.
- Frenleme koşulları: İlk frenleme hızı, frenleme basıncı ve frenleme sırasında ortaya çıkan ısıya bağlı olarak gelişen etkiler.
- Yüzey koşulları: Temas yüzeyinin durumu ve yüzey pürüzlülüğü.
- Çevresel koşullar: Ortam sıcaklığı, nemi ve hava akışına bağlı olarak ortaya çıkan etkiler.

Tercih edilen katkı maddelerinin sahip olduğu fiziksel ve mekanik özellikler sürtünme performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kullanılan bu katkı maddeleri takviye elemanları, bağlayıcılar, dolgu bileşenleri ve sürtünme düzenleyici olarak gruplara ayrılmış olup her malzeme grubunda birbirine göre üstün özelliklere sahip veya alternatif olabilecek katkı bileşenleri mevcuttur. Literatür çalışmaları incelendiğinde oldukça fazla katkı maddesinin balata bileşimi optimizasyonunda kullanıldığı göze çarpmaktadır [18]. Ancak balatalardan beklenen temel özelliklerin sağlanabilmesi için bu bileşenler arasından doğru bileşenlerin seçilmesi ve uygun oranlarda kullanılmasıyla uygun bir balata bileşimi ortaya koyulabilmektedir. Kullanılan bu bileşenlerin türü ve miktarı üretilen balataların karakteristik özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Bu kapsamda literatürde farklı karakteristik özelliklere sahip balataların sürtünme ve aşınma performansının incelendiği oldukça fazla çalışmaya rastlamak mümkündür [8-10, 21, 24, 34, 47, 49-51, 62, 66]. Diğer taraftan sürtünme malzemelerinin karakteristik özelliklerinin yanı sıra çalışma koşullarının da (frenleme şartlarının) sürtünme performansını önemli oranda etkilediği belirtilmiştir [80]. Bu kapsamda da çalışma şartlarının (frenleme hızı, frenleme basıncı ve sıcaklık gibi) frenleme performansı üzerindeki etkileri yoğun bir şekilde araştırılmıştır [75, 76, 81]. Bu kapsamdaki çalışmalar ve değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir.

1.2.3.1. Frenleme Koşullarının Sürtünme Performansı Üzerindeki Etkisi

1.2.3.1.1. İlk Frenleme Hızının Etkisi

İlk frenleme hızının balata malzemesinin sürtünme ve aşınma davranışı üzerindeki etkisi dikkate alınması gereken bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu etki doğrudan olmasa da dolaylı olarak sürtünme malzemesinin aşınma davranışı üzerinde

önemli bir etkiye sahiptir. Genel olarak bakıldığında sürtünme katsayısı ile frenleme hızı arasında düşük frenleme hız değerlerinde paralel bir ilişki olduğu gözlemlense de hız değerinin belirli bir seviyenin üzerine çıkması durumunda ters bir ilişkinin olduğu yapılan çalışmalarla ortaya koyulmuştur [74, 82]. Ancak ilk frenleme hızının artması aracın sahip olduğu kinetik enerji miktarının artmasına dolayısı ile de sürtünme yüzeyinde ulaşılan sıcaklık değerlerinin önemli oranda yükselmesine neden olmaktadır [76, 81, 83]. Ortaya çıkan bu ısının büyük bir kısmı fren sistemi elemanları (disk ve balata) tarafından sönmülenererek ortamdaki uzaklaştırılmaktadır. Sıcaklığın sürtünme yüzeyinde belirli bir eşik değerin üzerine çıkması balata malzemesinin yüzey yapısının bozulmasında önemli bir etkiye sahiptir. Bu durumun balata bileşimi içerisinde bulunan organik kökenli bileşenlerin termal olarak bozulmasına yol açarak yüzey özelliklerinin değişmesine ve dolayısı ile sürtünme katsayısında bir düşüşe ve aşınma miktarında ise bir artışa neden olduğu belirtilmektedir [74].

1.2.3.1.2. Uygulama Basıncının Etkisi

Coulomb tarafından ortaya koyulan temel sürtünme kanununa göre, sürtünme ara yüzeyinde elde edilen sürtünme kuvveti uygulanan normal kuvvetle lineer orantılı bir şekilde değişmektedir. Ancak yapılan çalışmalar sürtünme kanununun; normal kuvvet, kayma hızı, uygulama sıcaklığı, frenleme sayısı ve süresi gibi pek çok parametreye bağımlı olduğunu ortaya koymuştur [73, 84, 85]. Sürtünme katsayısı ile söz konusu bu parametreler arasında tam olarak belirlenmiş bir korelasyon bulunamamıştır [86]. Ancak, balata üzerindeki basıncın artmasının balata ve disk yüzeyi arasındaki etkin temas alanında bir değişime neden olduğu belirlenmiştir [87-89]. Etkin temas alanı ve uygulama basıncının sürtünme katsayısı ile arasındaki ilişki Ying ve arkadaşları [73] tarafından yapılan bir çalışmada aşağıda verilen eşitlikte olduğu gibi ifade edilmiştir. Bu eşitliğe göre, sürtünme katsayısı ile etkin temas alanı arasında doğrusal, ancak uygulama basıncı ile ters bir korelasyondan söz edilmektedir. Eğer basınç artışı etkin temas alanında önemli bir artışı sebep oluyorsa bu sürtünme katsayısını artırıcı etki yaparken, yük artışının temas alanına göre daha etkin olduğu durumda ise sürtünme katsayısını azaltıcı bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

$$\mu = \frac{A_o \times \mathcal{T}}{P \times A} \quad (1)$$

Burada:

μ : Sürtünme katsayısını

\mathcal{T} : Kayma gerilmesi (MPa)

P: Uygulama basıncı (MPa)

A_o : Etkin temas alanı (mm²)

A: Balatanın kesit alanı (mm²)

Öte yandan balata üzerindeki basıncın artmasının etkin aşınma mekanizmasının değişiminde [85] ve sürtünme ara yüzeyinde ulaşılan maksimum sıcaklık değerlerinin artmasında [90] önemli bir etken olduğu da ortaya koyulmuştur. Jang ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada ise sürtünme filmi oluşumunun uygulanan frenleme basıncından etkilendiğini ve basıncı artmasına bağlı olarak yüzeyde daha etkin bir sürtünme filmi oluştuğunu ve bu film tabakasının yağlayıcı bir etki yaparak balata malzemesinin sürtünme katsayısını düşürdüğü belirtilmiştir [91]. Uygulanan frenleme basıncına bağlı olarak ortaya çıkan bu etkilerin sürtünme malzemesinin frenleme performansı üzerindeki etkisi, dikkate alınması gereken bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.2.3.1.3. Sıcaklığının Etkisi

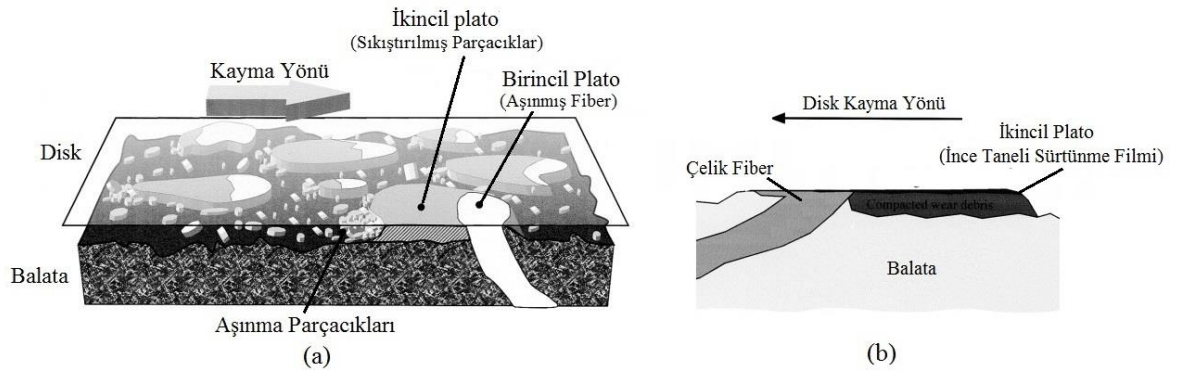
Sıcaklık, balataların sürtünme ve aşınma performansını etkileyen önemli parametrelerden birisidir. Bu etki dış kaynaklı olmayıp taşıtın kinetik enerjisinin sürtünme yoluyla birlikte sürtünme elemanları (balata ve disk) tarafından ısıya dönüştürülmesiyle oluşmaktadır. Fren sistemlerinin otomobil, tren ve uçak gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılıyor olması sönmünecek enerjinin de uygulamadaki çeşitliliğe bağlı olarak farklı olacağını göstermektedir [12]. Fren sistemleri tarafından ısıya dönüştürülen bu enerjinin çoğunluğu balata ve disk tarafından sönmülenirken bir kısmı da çevreye yayılarak ortamdaki uzaklaşmaktadır. Bu durum balata ara yüzeyinde çok hızlı bir sıcaklık artışına sebep olmaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte taşıtların kapasite ve hız değerlerinin sürekli

artırılması söz konusu uygulamalarda kullanılacak olan sürtünme elemanlarının daha fazla süre veya daha yüksek ısı etkilere maruz kalacağı anlamını taşımaktadır. Bu yüzden uygulamalara göre farklı türlerde balatalar geliştirilerek katagorilere ayrılmış ve ısı etkilerinin oluşturacağı olumsuz durumların önüne geçilmeye çalışılmıştır [5]. Diğer taraftan sıcaklık artışı aracın kinetik enerjisinin yanında uygulanan frenleme basıncından da doğrudan etkilenmektedir [92]. Frenleme şartlarına göre sürtünme ara yüzeyinde ulaşılacak ortalama sıcaklık değerleriyle ilgili bir öngörü yapılabilir olsa da, yapılan çalışmalar oluşan ısının sürtünme yüzeyinin tamamında homojen bir şekilde dağılmadığını ve lokal yüksek sıcaklık bölgelerinin oluştuğunu ortaya koymuştur [93, 94]. Bu durumun balata malzemesinin termofiziksel özelliklerinden kaynakladığı ifade edilmiştir [95, 96]. Ara yüzeyde sıcaklık artışı matriks yapıda bağlayıcı vazifesi gören reçinenin yumuşamasına ve bağlayıcılık özelliklerinin zayıflamasına neden olmaktadır. Ayrıca sıcaklık artışına bağlı olarak katkı bileşenlerinin yapıdan ayrılarak veya koparak ara yüzeyde belirli noktalarda birikerek sürtünme filmi oluşturduğu ve bu durumun balatanın sürtünme davranışı üzerinde etkili olduğu ifade edilmiştir [70, 80]. Diğer taraftan sıcaklık artışı film tabakasının yapısal olarak bozulmasına, kırılarak uzaklaşmasına ve buna bağlı olarak zamanla sürtünme stabilitesinin bozulmasına neden olmaktadır. Yine aynı çalışmada, sürtünme filminin bozulmasının titreşim ve yüksek ses oluşturabileceği vurgulanmıştır [80]. Başka bir çalışmada ise sıcaklığın balata bileşenlerinin kimyasal olarak reaksiyona uğradığı (dekompoze olduğu) sıcaklık değerinin üzerine çıkması durumunda bileşenlerin termal bozulmaya uğrayarak sürtünme katsayısında bir düşüşe (feyd) sebep olduğu belirtilmiştir [96]. Organik esaslı balata bileşenlerinin sıcaklık etkisiyle bozulmasının da gaz oluşumuna neden olabileceği ve bu durumun yüzeyde bir gaz-filmi tabakası oluşturabileceği ve frenlemenin büyük oranda zayıflamasına sebep olabileceği ifade edilmiştir [80].

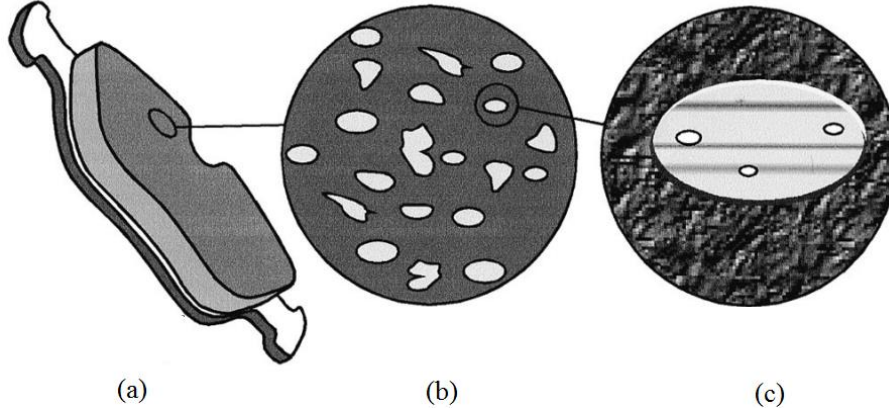
1.2.3.2. Yüzey Koşullarının Sürtünme Performansı Üzerindeki Etkisi

Balataların sürtünme ve aşınma performansını etkileyen diğer bir parametre de yüzey koşullarıdır. Frenleme öncesi sürtünme yüzeylerinin pürüzlülük durumu sürtünme katsayısı ve aşınma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [97]. Yüzey pürüzlülüğünün artması sürtünme yüzeyleri arasındaki etkin temas alanlarının değişimine, dolayısıyla birim yüzeye etkileyen kuvvetin artmasına ya da azalmasına neden olabilmektedir. Diğer yandan, sürtünme

yüzeyleri arasındaki etkin temas alanı balatanın ihtiva etmiş olduğu katkı maddelerine göre de değişkenlik gösterebilmektedir. Özellikle 1950'lerden sonra taşıt balataları kompozit formda üretilmeye başlanmıştır. Kompozit formdaki bu balatalar sürtünme performansı üzerine farklı etkileri olan çok sayıdaki katkı maddesinin basınç ve sıcaklık altında sıkıştırılmasıyla üretilmektedirler. Söz konusu balatalar yapısında reçine ve yağlayıcılar gibi yumuşak katkıların yanı sıra abrazif etkili sürtünme düzenleyiciler ve fiberler gibi sert katkı bileşenleri de ihtiva etmektedir. Farklı fiziksel yapıları sahip bu bileşenler neticesinde frenleme süresince disk ve balata ara yüzeyinde birincil ve ikincil plato olarak ifade edilen kesintili temas alanları oluşmaktadır [98]. Uygulanan yük ilk olarak sert ve aşınmaya karşı daha dirençli olan abrazif etkili katkılar veya fiberler gibi bileşenler tarafından taşınmaktadır. Bu temas alanları birincil plato (birincil temas alanları) olarak ifade edilmektedir ve gerçek temas alanıyla kıyaslandığında oldukça küçüktür. Sürtünme sırasında aşınarak yüzeyden kopan aşınma parçacıklarının hareketi birincil platolar tarafından engellenerek çevresinde birikmesi sağlanır ve diğer ikincil temas alanları oluşturulur (Şekil 5) [98]. İkincil temas alanlarının da eklenmesiyle birlikte sürtünme yüzeyleri arasında gerçek temas alanı ortaya çıkar. Bu alan balata yüzeyinin yaklaşık %15-%20'sine tekabül etmektedir (Şekil 6). İkincil temas alanları genel olarak sürtünme malzemesine mekanik olarak zayıf bağlandıkları için kolayca dağılıbilir ve tekrardan başka bir noktada ikincil plato oluşumunda görev alabilir veya yüzeyden uzaklaşabilirler. Bu yüzden frenleme süresince gerçek temas alanı sürekli olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Temas alanında ortaya çıkan bu değişkenlik balata malzemesinin sürtünme karakterinin değişiminde de doğrudan etkilidir [98].



Şekil 5. Balata yüzeyinde oluşan birincil ve ikincil temas alanlarının şematik görünümü [98].



Şekil 6. Sürtünme ara yüzeyinde oluşan temas alanlarının şematik gösterimi: (a) Tüm balata yüzeyi, (b) gerçek temas alanlarının dağılımı (tüm balata yüzeyinin %15-%20'si) ve (c) gerçek temas yüzeyi (birincil ve ikincil platoların oluşturduğu) içerisindeki birincil platoların anlık görünümü [98]

1.2.3.3. Çevresel Koşulların Sürtünme Performansı Üzerindeki Etkisi

Çevresel koşullara bağlı olarak ortaya çıkan su, toz, nem ve hava akışı gibi faktörler frenleme performansını etkileyen dış kaynaklı faktörler olarak değerlendirilmektedir [80]. Literatür çalışmaları incelendiğinde, öncelikli ve yoğun olarak frenleme koşulları ve sürtünme malzemesinin karakteristik özelliklerinin sürtünme performansı üzerine olan etkileri araştırılmış olsa da, çevresel koşullara bağlı bu faktörlerin etkilerinin araştırıldığı çalışmalar da mevcuttur. Hamid ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, farklı boyutlara sahip sert yapıli toz partikülleri sürtünme ortamına eklenmiş ve sürtünme performansına olan etkileri araştırılmıştır. Eklenen partiküllerin boyutuna göre etkin sürtünme temas alanının değiştiği ve düşük frenleme hızlarında sürtünme katsayısını azaltıcı bir etki yaptığı gözlenmiştir. Ayrıca, partikül boyutu arttıkça sürtünme katsayısının kararlılığında bir bozulma olduğu belirtilmiştir [77]. Başka bir çalışmada ise ıslak ve kuru frenleme koşullarının sürtünme performansı üzerine etkileri araştırılmış ve aynı şartlar altında ıslak ve kuru frenleme arasında ortalama sürtünme katsayısı açısından %15'e yakın bir fark oluştuğu ortaya koyulmuştur [99]. Diğer taraftan kompozit balata yapısına katılan bileşenlerin neme duyarlılıkları oldukça önemlidir. Nitekim sürtünme düzenleyici adı altında yağlayıcı olarak yapıya katılabilen grafitin nemli ve nemsiz koşullarda farklı sürtünme karakterine sahip olduğu ortaya koyulmuştur [100]. Bu çalışmada belirtildiği gibi grafitin

yağlayıcı özelliğinin ortaya çıkması için neme ihtiyaç duyulurken, ortamdaki nemin artması kullanılan metal katkılı bileşenlerde ve disk yüzeyinde pas oluşumuna neden olabileceği ve bu durumun balataların sürtünme davranışını etkileyebileceği belirtilmiştir [101].

1.2.4. Balatalardan Beklenen Performans Çıktıları

Değişken ve zorlu koşullar altında etkin ve sürdürülebilir bir frenleme performansı ortaya koyması fren balatalarından beklenen en önemli çıktıdır. Bu performansın değerlendirilmesinde ise genel olarak balata malzemesinin sahip olduğu sürtünme özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu kapsamda değerlendirilen en önemli özellik sürtünme katsayısı olarak ifade edilmiştir [15, 70]. Kabul edilebilir bir performans için balatanın çalışma koşulları dikkate alındığında, maruz kalınan çalışma sıcaklığı seviyelerinde istenilen düzeyde sabit ve kararlı bir sürtünme katsayısına sahip olması istenmektedir [89]. Ancak, bu durumun gerçekte pek mümkün olmadığı bilinen bir gerçektir. Nitekim yapılan çalışmalar sürtünme katsayısının uygulama basıncı, frenleme hızı ve sürtünme yüzeyinde ulaşılan sıcaklığın yanında çevresel dış etkilere bağlı olarak farklı değerler alabildiğini ortaya koyulmuştur [73-77, 83]. Bu yüzden performans değerlendirilmesi yapılırken uygulama basıncı, frenleme hızı ve sıcaklık gibi faktörlerin ayrı ayrı veya birlikte dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir [92]. Sürtünme katsayısının istenilen seviyelerde olması performans açısından tek başına yeterli olmamaktadır. Literatür çalışmalarına ve balatalarla ilgili diğer kaynaklara bakıldığında, kabul edilebilir bir frenleme performansı için balataların aşağıda sıralanan diğer özelliklere de büyük oranda sahip olması talep edilmektedir [5, 33]. Bu kriterlerde göz önüne alınarak sürtünme malzemesinin kabul edilebilir veya tutarlı bir frenleme performansı ortaya koyup koymadığı değerlendirilmektedir.

- İyi düzeyde feyd (sürtünme katsayısında sıcaklık etkili ani azalma) direnci ve toparlanma karakteristiğine sahip olmalı.
- Çalışma sıcaklık aralığı düşünüldüğünde kabul edilebilir bir aşınma davranışı göstermeli.
- Düşük seviyelerde karşı disk aşınmasına sebep olmalı.
- Ses ve titreşim oluşumuna neden olmamalı.
- İçerdiği bileşenlerin veya frenleme sırasında aşınarak çevreye bırakılan aşınma partiküllerinin insan sağlığına ve çevreye zarar verici bir etkisi olmamalı.

- Farklı çalışma koşullarına bağlı olarak minimum düzeyde feyd davranışı göstermeli.
- Çalışma koşullarında yeterli mekanik mukavemete sahip olmalı.
- Yüksek termal kararlılık ve termal iletkenliğe sahip olmalı.
- Karşı temas yüzeyi ile uyumu iyi olmalı.

1.2.5. Balataların Demir Yolu Taşıtı Uygulamalarında Kullanımı

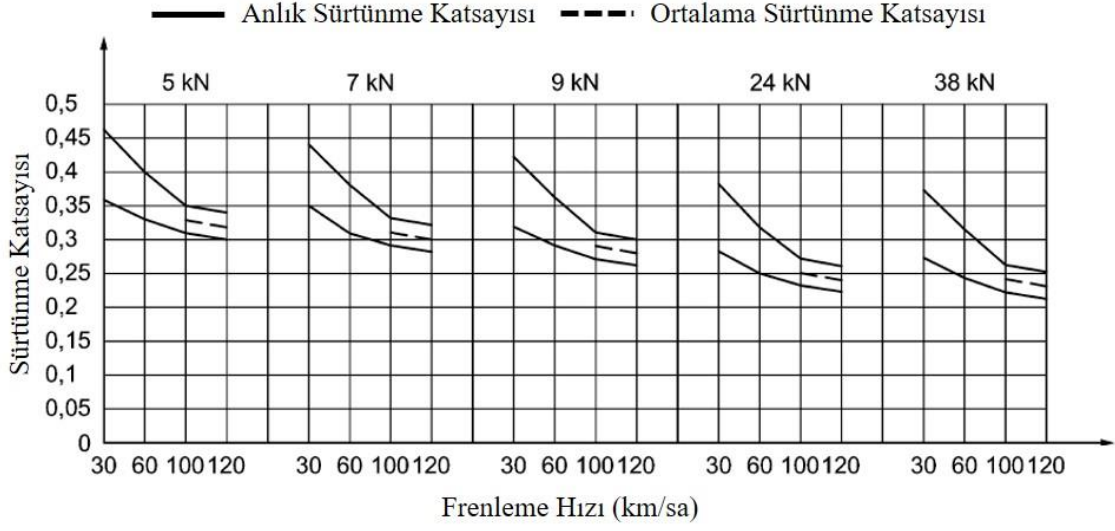
Demiryolu taşımacılığının geçmişi M.Ö. 600'lü yıllara kadar dayanmaktadır. Ancak günümüzde kullanılan demiryollarının ilk örneklerine 18. yüzyılın sonlarında rastlamak mümkündür. 1825-1830 yılları arasında lokomotifin geliştirilmesiyle ilgili yürütülen çalışmalar demiryolu taşımacılığının başlangıcı niteliğindedir. Söz konusu taşıtlar başlangıçta daha çok madenlerden yük taşıma amacıyla tercih ediliyor olsa da zamanla yolcu taşımacılığında da büyük talep görmüştür. Bu durum demir yolu ağlarının dünya genelinde hızlı bir şekilde yaygınlaşmasına katkı sağlamıştır. Demiryolu taşıtları 1850'li yıllarda 100 km/sa hızlara ulaşmış, 20. yüzyılın ortalarına gelindiğinde ise 200 km/sa'lik hızlarda hareket edebilir düzeye getirilmiştir [102]. Zaman içerisinde taleplerin değişmesine göre demir yolu araçları sürekli iyileştirilerek günümüzdeki şeklini almıştır. Taşıma maliyetlerinin düşürülmeye çalışılması ve/veya karayollarındaki trafik yoğunluğunun azaltılması amacıyla demiryolu taşımacılığına olan ilgi halen artarak devam etmektedir. Günümüzde, bu taşıtların hızları elektrikli lokomotiflerin kullanımıyla birlikte 250-300 km/sa seviyelerine kadar çıkmıştır. Hatta manyetik olarak havada tutulan Maglev trenlerin keşfiyle birlikte maksimum ulaşılabilir hız değerleri 600 km/sa seviyelerine kadar ulaşmıştır [102]. Karayolu taşıtlarıyla kıyaslandığında oldukça yüksek olan bu hız ve kapasite değerleri sayesinde bu taşıtların çok daha yüksek kinetik enerji seviyelerine ulaştıkları bilinmektedir. Bu durum söz konusu taşıtlarda kullanılan fren sistemlerinin daha fazla enerjiyi absorbe etmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle demir yolu taşıtlarında gerek frenleme süresi ve gerekse fren basınçları binek araçlarla kıyaslandığında çok daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır.

Demir yolu taşıtlarında sönmölenen yüksek seviyedeki kinetik enerji, fren pabuçları ve tekerleklerde çok ciddi bir sıcaklık artışı oluşturmaktadır. Dolayısıyla bu uygulamalarda kullanılan fren pabuçlarının yüksek sıcaklıklar altında dahi stabil ve yeterli bir sürtünme katsayısına sahip olması güvenlik açısından çok büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda en yaygın kullanılmış fren pabucu malzemesi dökme demirdir [103]. Ancak, bu malzemenin

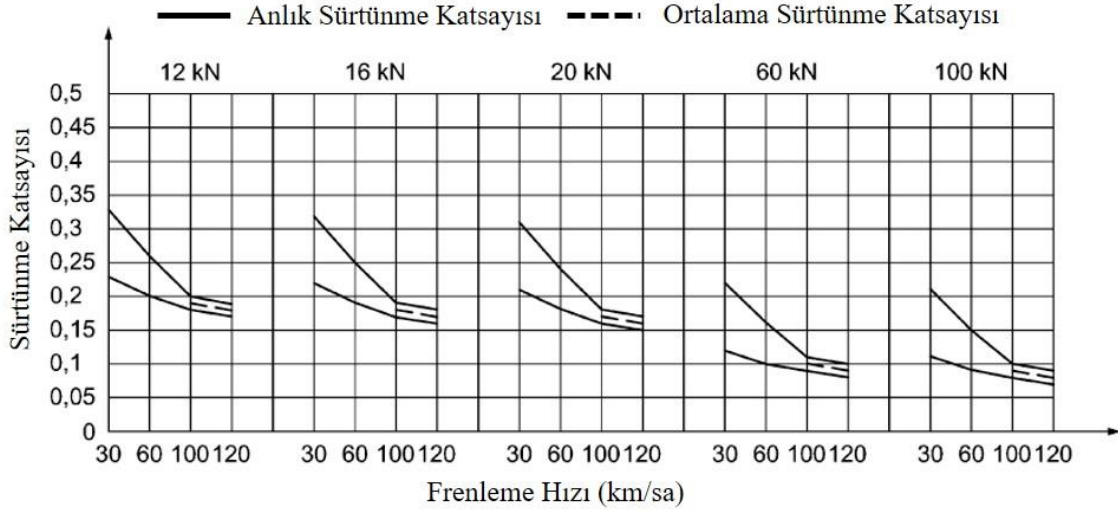
tekerlek yüzeyinde neden olduğu pürüzleşme ve aşınma seyahat halinde yüksek gürültü oluşumuna neden olmaktadır. Bu gürültü özellikle şehir içinde hizmet veren metro gibi demir yolu taşıtlarında önemli bir çevre problemine yol açmaktadır. Ayrıca, tekerlek aşınması ve bunun yol açtığı ray deformasyonlarının ortadan kaldırılması da önemli bir ekonomik külfeti beraberinde getirmektedir. Bu durumun engellenmesi için, dökme demirden üretilen balataların yerine kompozit esaslı fren pabuçları tercih edilmeye başlanmıştır [103]. Ülkemizde de bu balatalar, hem yük trenlerinde hem de şehir içi ve/veya şehirlerarası yolcu trenlerinde etkin olarak tercih edilmektedir. Ancak, kullanılan bu kompozit balataların sınıfı; taşıtın cinsine, lokomotif veya vagon (çeken-çekilen) olması durumuna göre değişiklik gösterebilmektedir. Kompozit formdaki bu fren pabuçları sahip oldukları ortalama sürtünme katsayılarına göre temelde K ve LL tipi olmak üzere 2 sınıfa ayrılmıştır. TS EN 16452 standardına göre ortalama sürtünme katsayısının K tipi fren balatalarında 0,25-0,30 arasında olması talep edilirken, LL tipi balatalarda ise 0,10-0,15 aralığında kalması yeterli görülmektedir [104]. Şekil 7 ve Şekil 8’de sırasıyla K ve LL tipi balataların frenleme basıncı ve hızına göre ortalama sürtünme katsayısının değişimleri verilmiştir. Yolcu trenlerinde, kullanılan fren sisteminin türüne göre K tipi blok (sabo) veya K tipi disk balatalar çoğunlukla tercih edilirken, yük trenlerinde ise LL tipi blok balataların kullanımı yaygındır. Günümüzde demir yolu araçları için geliştirilmiş bu kompozit fren balatalarında en yaygın görülen problem, yüksek çalışma sıcaklıklarında belirginleşen aşınma ve termal homojensizliklerin neden olduğu sürtünme katsayısı kararsızlığıdır [9, 66]. Bu durum frenleme performansını doğrudan etkilemekte olup balataların kullanımını sınırlamaktadır. Frenleme koşulları değişse dahi balataların sınıfına bakılmaksızın genel olarak balatalardan kararlı bir sürtünme katsayısına sahip olması talep edilir. TS EN 16452 standardına göre bu kararlı davranış Şekil 9’da sürekli çizgi (2) ile gösterilen eğrideki gibi karaktere sahip olmalıdır. Bu değişimin kararlılık açısından mükemmel olduğu ifade edilirken, kesikli çizgi (1) ile gösterilen değişimin zayıf olduğu belirtilmiştir [104]. Şekil 9’da 4 ile belirtilen nokta, balata üzerine uygulanan frenleme kuvvetinin (normal kuvvetin) %95’ine ulaştığı ana karşılık gelirken, 3 ile gösterilen nokta 30 km/sa hız değerine karşılık gelmektedir. Sürtünme kararlılığının değerlendirilmesinde 3 ve 4 noktaları arasındaki sürtünme katsayısının değişimi esas alınmaktadır. Bu noktalar arasındaki herhangi bir 5 saniyelik değişim süresince sürtünme katsayısının $\pm\%10$ ’dan fazla değişim göstermemesi arzu edilmektedir. Bu değerlerin aşıldığı durumlar kararsız bir sürtünme davranışı olarak değerlendirilmektedir. Bu kararsızlık büyük oranda tercih edilen katı yağlayıcıların yüksek

sıcaklıklarda sergilemiş olduğu yetersiz yağlama ile ortaya çıkabildiği gibi, kullanılan diğer katkı maddelerinin işlevselliğini yitirmesinden de kaynaklanabilmektedir. Bu durum temel olarak yüksek sıcaklıklarda kullanılacak yağlayıcıların iyi performans sergilemesini gerektirmektedir. Karayolu araçlarında, çalışma sıcaklığının 350°C'den daha düşük olması durumunda grafit, MoSi₂ gibi katı yağlayıcıların yüksek performans sergilemelerini sağlamaktadır. Ancak demir yolu araçlarında yüksek kinetik enerjinin sönümlenmesi sebebiyle sürtünme yüzeyinde daha yüksek sıcaklıklara çıkılabilmektedir ve bu durumda söz konusu bu katı yağlayıcılar yağlayıcılık özelliklerini büyük oranda kaybedebilmektedir [9, 66]. Bu durum mevcut fren pabuçlarında geleneksel olmayan yeni nesil katkıların da kullanılmasıyla söz konusu fren balata performansının iyileştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

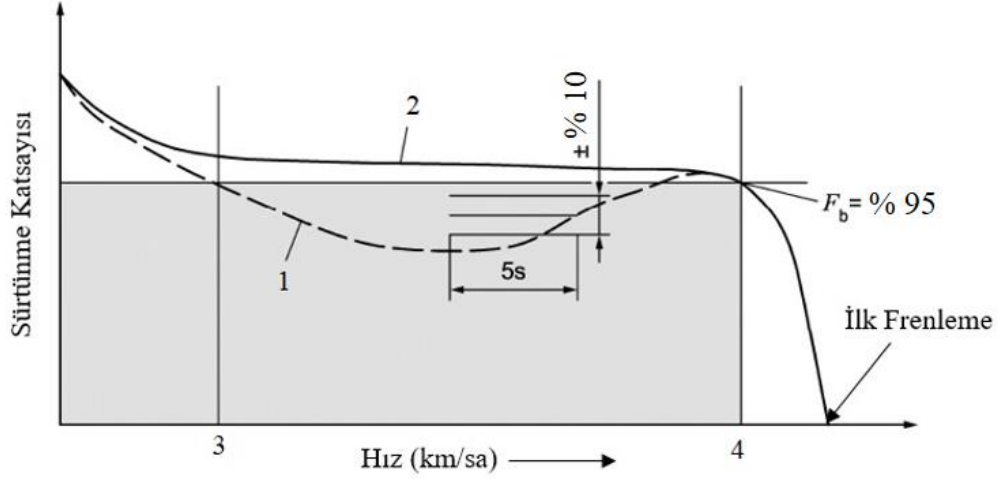
Bor nitrür (BN) türü bileşiklerin de bu açıdan değerlendirilmesi son yıllarda yapılan akademik çalışmalar neticesinde ön plana çıkmaya başlamıştır [9, 62, 66, 105-109]. Bilindiği gibi BN hegzagonal yapıda olup grafitte benzer katı yağlayıcı özelliği ile balatalarda sürtünme düzenleyici görevi yapma potansiyeli yüksektir [66, 105, 106]. Nitekim son yıllarda hegzagonal yapıda BN, yüksek performanslı sürtünme malzemelerinde önemli bir katkı malzemesi olarak kullanılmaya başlanmış ve bu malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarında önemli iyileşmeler sağladığı belirlenmiştir. Bu uygulamalarda BN grafitte benzer yapısıyla ara yüzeyde iyi bir yağlayıcı olarak görev yapmaktadır. Bu haliyle bir taraftan ara yüzeyde oluşturduğu yağlayıcı tabakası ile aşınmayı yavaşlatırken, diğer taraftan abrasif etki oluşturmadığı için karşı disk aşınmasını da önemli oranda azalttığı değerlendirilmektedir.



Şekil 7. K tipi fren balatalarının sürtünme katsayısının frenleme hızı ve kuvvetine göre değişimi [104].



Şekil 8. LL tipi fren balatalarının sürtünme katsayısının hız ve fren kuvvetine göre değişimi [104].



Şekil 9. Tren balatalarının sürtünme katsayısının hıza bağlı değişim karakteri [104].

1.3. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Günümüzde yolcu ve yük taşıma amacıyla geliştirilen taşıtların birim taşıma maliyetlerinin azaltılması amacıyla hem daha yüksek kapasitelerde taşıma yapabilecek hem de daha yüksek hızlarda hareket edebilecek şekilde geliştirildiği görülmektedir. Özellikle 20. yüzyılın ilk yarısında başlayan bu çalışmaların günümüzde de yoğun olarak sürdürüldüğü söylenebilir. Ancak, taşıtlarda görülen bu iyileştirmelerle birlikte güvenlik kaygılarının da sürekli arttığı bilinen bir gerçektir. Nitekim bu kapsamda karşımıza çıkan en önemli kaygının, artan hız ve taşıma kapasiteleriyle birlikte artan taşıt kinetik enerjisinin etkin bir şekilde sönmülmesi olduğu söylenebilir. Bu durum can ve mal güvenliği açısından büyük önem arz etmektedir. Bu görev ise taşıtlarda fren sistemleri tarafından üstlenilmektedir. Taşıtın sahip olduğu kinetik enerji bu sistem elemanları tarafından sürtünme yolu ile ısı enerjisine çevrilerek sönmülmekte ve taşıtın güvenli bir şekilde yavaşlaması ve/veya durdurulması sağlanmaktadır.

Taşıtlarda görülen bu gelişmeler, fren sistemleri ve sistem elemanları üzerine de yoğun çalışmaların yapılmasını zorunlu kılmıştır. Genel olarak bakıldığında 20. yüzyıl boyunca bu kapsamda önemli gelişmeler yaşanmıştır. Özellikle bu yüzyılın başlarında Fransız tasarımcı Louis Renault tarafından geliştirilen mekanik kampana fren sisteminin taşıtlarda etkin olarak kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Bu sistem 1920'li yıllarda hidrolik ekipmanlar eklenerek modernize edilmiştir. 1950'li yıllara gelindiğinde ise disk tipi fren sistemlerinin kampana fren sistemlerinin yerini almaya başladığı ve sonrasındaki

süreçte de hem otomobillerde hem de demir yolu taşıtlarında bu sistemlerin etkin olarak kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Günümüzde ise bu disk fren sistemleri daha da modernize edilerek ABS (anti-lock brake system) olarak da bilinen kilitleme karşıtı fren sistemlerinin geliştirildiği ve günümüz taşıtlarında yaygın olarak kullanıldığı görülebilmektedir [1].

Bu süreçte fren sistemlerinin yanı sıra, bu sistemlerde kullanılan ve kritik öneme sahip balata malzemeleri üzerine de yoğun çalışmalar yapıldığı görülmektedir. 20. yüzyıl öncesinde fren balatası olarak tek tip malzemedan (ahşap, deri (kayış), dökme demir gibi) üretilen sürtünme elemanlarının (balataların) kullanımına rastlanırken, 1908 yılına gelindiğinde dokuma asbesti pirinç tellerle güçlendirerek üretilen kompozit esaslı balataların otomobil ve kamyonlarda kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Ancak, 1930'lu yıllara gelindiğinde bu balataların yerine daha kompleks kompozit balataların üretilmeye başlandığı ve ilk olarak Londra metrosunda dökme demir balataların yerine bu balataların kullanıldığı bilinmektedir [110]. Bu kapsamda 1960'lı yıllara kadar asbest esaslı ve reçine bağlı bu kompozit balataların kullanıldığı görülürken daha sonra asbestin insan sağlığına olan zararlı etkileri ortaya koyulmuş ve bu durum kompozit esaslı balatalar için bir milat olmuştur. Bu gelişme sonrasında asbestin kullanımında kısıtlamaya gidilmesi asbeste alternatif malzeme arayışını hızlandırmıştır. Bu süreçte özellikle 1960-80 yılları arasında yoğun bir şekilde asbeste alternatif malzemelere yönelik araştırma çalışmaları yapılmıştır. Bu süreçte asbestin kademeli olarak balata yapısından çıkarılmaya başlanmış olması, balataların ortaya koyduğu sürtünme aşınma performanslarını da olumsuz etkilemiştir. Mevcut performans çıktılarının tekrardan sağlanması amacıyla matriks yapıya daha farklı katkı bileşenleri ilave edilmiş ve bu durum ise kompozit esaslı bu balataların yapısını daha da kompleks hale getirmiştir. Özellikle 1980'li yılların sonrasında bu sektörün tamamıyla asbestsiz kompozit balata üretimine odaklanılmış olması pek çok farklı türde bileşenin performans etkilerinin araştırılmasını da zorunlu kılmıştır. Balata matriks yapısına katılan bu bileşenler ise sağladıkları performans etkileri göz önünde bulundurularak temel olarak dört grupta toplanmış ve takviye elemanları (fiberler), dolgu bileşenleri, bağlayıcılar ve sürtünme düzenleyici bileşenler olarak adlandırılmıştır. Genel olarak bu kapsamda yapılan çalışmalara bakıldığında, bu çalışmaların daha çok kullanılan katkı türleri ve miktarlarının balata bileşimlerinin performansına etkileri üzerine olduğu görülmektedir. Bu araştırmalarda takip edilen deney şartlarının daha çok otomobil fren sistemlerine benzetildiği, demir yolu araçları ile kamyon, tır ve iş makinaları gibi ağır şartlarda hizmet veren fren sistemlerine ait

çalışma parametrelerinin kapsam dışında tutulduğu dikkati çekmektedir. Frenleme sırasında yüksek çalışma sıcaklıklarına ulaşılan bu tip uygulamalarda kullanılacak ve yüksek fren performansının elde edilmesini sağlayacak balata malzemelerinin geliştirilmesi üzerine sistematik olarak sınırlı çalışmanın olduğu da görülmektedir.

Günümüzde özellikle demir yolu taşımacılığı üzerine ülkemizde ve tüm dünyada önemli yatırımların yapıldığı ve bu sektördeki taşımacılık faaliyetlerinin her geçen gün daha da artırılmaya çalışıldığı görülmektedir. Ülkemizde 01.05.2013 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren “Demiryollarının Serbestleştirilmesi Hakkındaki Kanun” ile özel sektörü de bu işe dahil ederek demir yolu taşımacılık ağının ve kullanımının yaygınlaştırılmaya çalışıldığı görülmektedir. Ayrıca, 07.11.2017 tarihinde yayınlanan bir genelge ile kurulacak raylı sistemlerde yerli katkı zorunlu hale getirilmiş ve bu sayede geliştirilecek veya kurulacak raylı sistemlerde %51 oranında yerliliğin elde edilmeye çalışıldığı görülmektedir [111]. Bu yerlileştirme çalışmalarında bir yandan, Milli Tren Projesi gibi devlet destekli projelerle raylı sistem taşıtları geliştirilmeye çalışılırken, bir yandan da bu taşıtlarda kullanılan ve TCDD’nin yıllık ihtiyacı olan yaklaşık 300.000 adet kompozit esaslı fren balatalarının yerli olarak geliştirilerek üretilmesi hedeflenmektedir. Sürekli ihtiyaç olan bu balataların yerli olarak üretilebilmesi için geçtiğimiz süreç içerisinde TÜBİTAK, TCDD ve özel sektör destekli girişimler yapılmış, ancak gelinen noktada talep edilen şartname çıktılarını sağlayan ticarileşmiş bir ürün ortaya koyulamamıştır. 1990’lı yıllardan itibaren TCDD’de kullanılmaya başlanan kompozit esaslı bu balataların tamamının yurtdışından ithal olarak temin edildiği bilinmektedir. Demir yolu taşımacılığının daha da yaygınlaştırılmaya çalışıldığı düşünüldüğünde bu ihtiyacın her geçen gün daha da artacağı bilinen bir gerçektir.

Bu kapsamda genel bir literatür değerlendirmesi yapıldığında; özellikle demir yolu taşıtlarına yönelik balata malzemesi ve optimum özelliklerde yeni balata bileşimlerinin ortaya çıkartılmasına yönelik çalışmaların halen aktif bir araştırma alanı olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, bileşim belirleme sürecinden prototip balata üretimi ve ilgili testleri kapsayan sistematik araştırma çalışmaları hem bilimsel ve hem de teknolojik açıdan önemini korumaktadır. Tüm bu bilgiler ışığında yapılan bu tez çalışmasının amacı ve gerekçeleri aşağıda özetlenmiştir.

- Literatür çalışmaları incelendiğinde kompozit esaslı balatalarda kullanılan farklı bileşenlerin performans etkileri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Ancak, bu çalışmalarda kullanılan katkı bileşenlerinden bir veya bir kaçının değiştirilmesi durumunda bile

performans çıktılarının ciddi oranda değiştiği görülmüştür. Bu tez çalışmasında, öncelikle kullanılacak katkı bileşenlerinin büyük oranda yerli temin edilebilirliği de göz önünde bulundurularak bileşen seçimlerinin yapılması ve bileşenlerin türü ve oransal dağılımlarının frenleme performansına ve sahip olduğu mekanik özelliklere olan etkilerinin sistematik bir yaklaşımla belirlenmesi amaçlanmıştır. Dolayısıyla bu çalışma ile en iyi özellik ıktıları açısından tabandan tavana yaklaşımıyla balata malzemesi bileşim optimizasyonu yapılacaktır.

- Mevcut bilimsel ve teknolojik birikime bakıldığında, yapılan çalışmaların daha çok karayolu hafif taşıtlara yönelik balata bileşimi geliştirmeye yönelik olduğu dikkati çekmektedir. Bu kapsamda demir yolu taşıtları ile ağır karayolu taşıtlarına yönelik yeni nesil ve üstün performanslı balata bileşimi geliştirmeye yönelik sistematik çalışmalar sınırlıdır. Dolayısıyla dünyada bu kapsamdaki ürün çeşitliliği de karayolu hafif taşıtlarınkilere göre daha azdır, olanların da bileşim ve üretim süreçleri gizli tutulmakta ve know-how kapsamında değerlendirilmektedir. Bu nedenle önerilen tez çalışmasında özellikle demir yolu taşıtlarına yönelik yüksek performanslı balata bileşimlerinin geliştirilmesi ve bu bileşimlerin bazı temel testler üzerinden performanslarının ortaya konulması amaçlanmıştır. Dolayısıyla bu kapsamda sağlanacak ileriye yönelik her bir adım; zgn, yayımlanabilir ve uygulamaya da aktarılabilir çıktılar sunacaktır.

- Tez çalışmasında, balata bileşimi belirleme süreciyle başlayan ve gerçek boyutlu prototip balata üretimine kadar giden ve ilgili yapısal, mekanik ve tribolojik testlerin yapıldığı sistematik bir araştırmanın yapılması planlanmıştır. Yapıdaki katkı bileşenlerinin literatürdeki kullanım oranları göz önünde bulundurularak hazırlanan bileşimlerinden üretilen balataların, alışma Şartlarını simüle edecek NF F 11 291 Fransız standartına uygun pin-on-disk tipi bir sürtünme aşınma test cihazı ile sürtünme aşınma performansları incelenecektir. Ayrıca söz konusu balata örneklerinin sahip oldukları mekanik özellikler de uygun test yöntemleri kullanılarak belirlenecek ve mekanik ve tribolojik özellikler arasındaki ilişkiler değerlendirilecektir. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarında karşılaşılan olumsuz performans ıktıları detaylı bir Şekilde ortaya koyulacak ve ardından bu problemlerin giderilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilecektir. Bu çalışmalarda mevcut yapıya yeni katkı bileşenleri ilave edilecek veya yapıdaki diğer bileşenlerin oransal dağılımları değiştirilerek bu problemlerin çözümüne yönelik bir çalışma yapılacaktır. Bu tür optimizasyon çalışmalarıyla yapıdaki takviye malzemesi, dolgu malzemesi, sürtünme düzenleyici ve bağlayıcı bileşenlerin oransal dağılımları ortaya koyularak optimum

özelliklere sahip balata bileşimleri geliştirilmeye çalışılacaktır. Literatür incelendiğinde, kompozit balatalarla ilgili bu şekilde aşamalı optimizasyon çalışmasının yapılmadığı görülmektedir. Bu bağlamda yapılan çalışmaların literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracağı ve sonraki çalışmalar için de yol gösterici nitelikte olacağı düşünülmektedir.

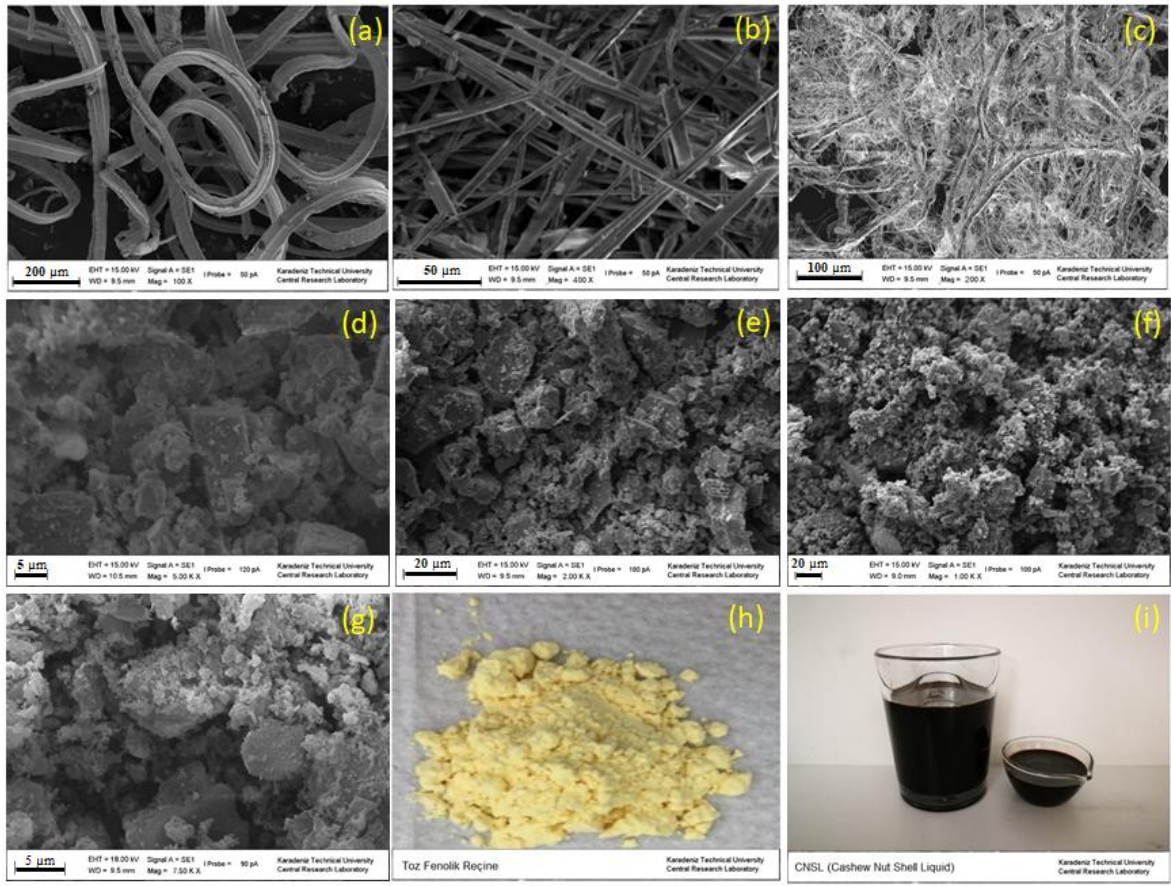
- Mevcut bilimsel ve teknolojik birikime bakıldığında, kompozit balata geliştirme sürecinde çok fazla sayıda bileşenin çalışıldığı ve bunlar üzerinden yeni bileşimler geliştirildiği görülmektedir. Bu anlamda sürtünme düzenleyici olarak da farklı bileşenler çalışılmıştır. Ancak bu açıdan yeni nesil balatalardan istenilen yüksek performansı sağlayabilecek yeni bileşenlerin de çalışılması ve performanslarının ortaya konulması son derece önemli gözükmemektedir. Bu tez çalışmasında, farklı bileşen ve bileşim oranlarıyla geliştirilecek balata bileşimlerine uygun bir bor bileşiğinin de katılması amaçlanmıştır. Bunun için bu tip uygulamalarda faydalı özellik çıktıları vereceği düşünülen hegzagonal yapıdaki bor nitrür (h-BN) bileşiği seçilmiştir. Bu tür borlu bileşiklerin uygulandığı ve ticarileşmiş bir balata bileşimi henüz mevcut değildir. Bu kapsamda literatüre bakıldığında çok az sayıda ve sistematik bir yaklaşım içermeyen giriş anlamında çok sınırlı ve yüzeysel çalışmalara rastlanılmıştır [9, 66, 106, 108, 109]. Dolayısıyla bu çalışmayla ilk kez, özellikle demir yolu araçlarına yönelik olarak h-BN katkılı kompozit balata malzemesi karışımının belirlenmesine yönelik sistematik bir çalışma yapılacaktır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında daha çok küçük numuneler üzerinden çalışmaların gerçekleştirildiği görülmektedir. Dinamometrik testler üzerinden bileşim geliştirmeye yönelik çalışmalar sınırlı olup, bunlar daha çok üretici firmalar tarafından yapılmaktadır. Öte yandan, çoğu zaman numune bazlı testlerden elde edilen sonuçlarla dinamometre tarzı benzetim testlerinden elde edilen sonuçlar uyumsuzluk gösterebilmektedir. Bu çalışmada ise öncelikle yine küçük numuneler üzerinden ilk bileşim optimizasyonu yapılacaktır. Ancak ileri aşamada, belirlenen optimum bileşimler üzerinden gerçek boyutlu balatalar üretilecek ve bunlardan çıkarılacak numuneler ile dinamometrik testler yapılacaktır. Bu sayede numune bazlı testlerden elde edilen tribolojik performans çıktıları, gerçek uygulamaya daha yakın dinamometre testlerinden elde edilen çıktılarla karşılaştırılacaktır.

- Bu tez çalışmasının nihai amacı, demir yolu taşıtlarına yönelik geliştirilecek optimum bileşimlerden gerçek boyutlarda balatalar üreterek bunların alan testleri sonrası ticari boyuta taşınmasıdır. Bu nedenle bu tez sonrası da çalışmaların devam ettirilmesi ve bir ticari firma üzerinden geliştirilen bileşenlerin ticarileştirilmesi hedeflenmektedir.

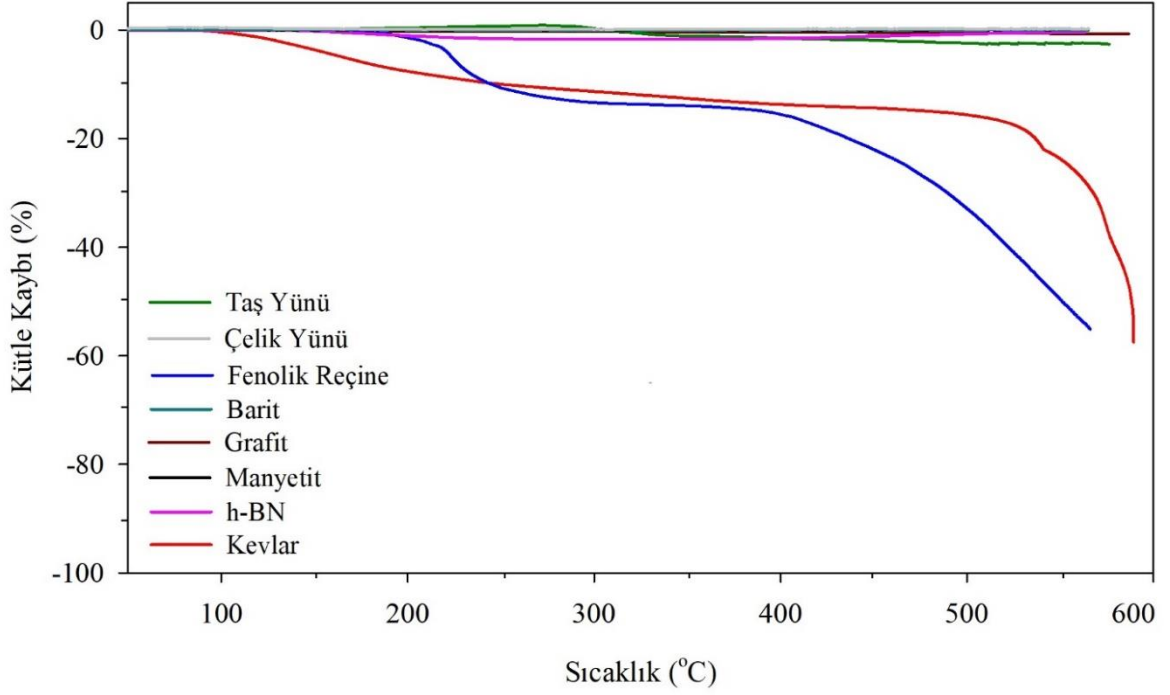
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Kullanılan Balata Bileşenleri

Çalışma kapsamında kullanılan bileşenler ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ve genel görünümü Şekil 10'da verilmiştir. Öte yandan, bu bileşenlerin termogravimetrik analizleri (TGA) de yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 11'de belirtilmiştir.



Şekil 10. Çalışma kapsamında kullanılan katkı bileşenlerinin SEM görüntüleri ve genel görünümü: (a) Çelik yünü, (b) taş yünü, (c) kevlar, (d) barit, (e) manyetit, (f) grafit, (g) h-BN, (h) toz fenolik reçine ve (i) cashew nut chell liquid



Şekil 11. Çalışma kapsamında kullanılan katkı bileşenlerinin kütlelerinin sıcaklığa bağlı değişimlerini gösteren TG eğrileri

2.2. Balata Numunesi Üretimi

Bu çalışmada demir yolu taşıtları için geliştirilecek balata bileşimlerinin organik kökenli ve asbetsiz olması planlandı. Bu kapsamda yapı içerisine katılacak katkı maddelerinin seçiminde özellikle son yıllarda balata üzerine yapılan çalışmalar, balatalardan sağlanması istenen beklentiler ve katkı maddelerinin yerli olarak temin edilebilirliği gibi temel kriterler göz önünde bulunduruldu. Balata bileşimi optimizasyonu kapsamında; literatürel bilgi birikimine, ön çalışmalara, metalurjik ve tribolojik öngörülere bağlı olarak balata malzemesi için temel (başlangıç) bir bileşim belirlendi. Bu bileşimde; ana takviye elemanı olarak taş yünü, düşük miktarda (ağırlıkça < %3) yardımcı takviye elemanı olarak aramid fiber (kevlar), bağlayıcı olarak toz fenolik reçine, sürtünme düzenleyici olarak grafit, abrazif etkili manyetit ve dolgu bileşeni olarak barit kullanıldı. Belirlenen bu temel bileşimde takviye elemanı oranı (taş yünü + aramid fiber) ağırlıkça %33, fenolik reçine oranı % 20, sürtünme düzenleyici olarak grafit %7, manyetit %5 ve dolgu bileşeni barit % 35 olacak şekilde ayarlandı. Bileşimlerde yapılacak ağırlıkça yüzde değişimler bu temel bileşim oranları üzerinden gerçekleştirildi.

Çalışma kapsamında ilk olarak takviye elemanı (taş yünü) oranı optimize edilmeye çalışıldı. Bunun için belirlenmiş temel bileşim üzerinde taş yünü ile dolgu bileşeni (barit) arasında kütleli değişimlerle balata malzemesi için optimum fiber oranı ortaya koyulmaya çalışıldı. Bu aşamada hazırlanan bileşimlerde barit ve taş yünü dışında yapıya katılmış diğer balata bileşenlerinin oranlarında değişiklik yapılmayarak sabit tutuldu. Yapıya ilave edilecek fiber oranı belirlenirken de literatürel bilgiler ve bilimsel öngörüler ışığında taş yünü oranı %30 ile %45 arasında değiştirilerek optimum taş yünü oranı belirlenmeye çalışıldı. Hazırlanan bileşimlerde taş yünü fiberi ve baritin kütlece yüzde oranı %65'te sabit tutulması kaydıyla dört farklı bileşim ortaya koyuldu. Bu bileşimler ve kullanılan katkı oranları Tablo 1'de verilmiştir. Taş yünü üzerine yapılan bu optimizasyon çalışması sırasında gerek tribolojik gerekse de mekanik özellikler açısından değerlendirilen bileşimler arasından optimum bir bileşim belirlendi. Çalışma kapsamında başlangıç bileşenleri dışında yapıya ilave edilen diğer katkı malzemelerinin türü her optimizasyon çalışması sonrası tribolojik ve mekanik açıdan gözlemlenen problemlerin giderilmesine katkı sağlayacak şekilde belirlendi ve bu bileşenin yapı içerisindeki kütlece katkı oranı yapılan sistematik çalışmalarla net olarak ortaya koyulmaya çalışıldı. Takviye elemanı, bağlayıcı, dolgu ve sürtünme düzenleyici bileşenler üzerine yapılan bu optimizasyon çalışmaları sonrasında standardın kabul ettiği gerek sürtünme ve aşınma ile ilgili kriterler gerekse de balatalardan karşılaması talep edilen diğer beklentiler göz önüne alınarak bir balata bileşimi ortaya koyuldu. Son olarak bu bileşim üzerinde özellikle yüksek sıcaklık performansı açısından önemli katkılar sağlayacağı düşünülen hekzagonal bor nitrür (h-BN) yapıya belirli oranlarda ilave edilerek h-BN katkısının balatanın tribolojik davranışı ve diğer özellikleri üzerindeki etkileri ortaya koyulmaya çalışıldı. Bu sayede çalışma kapsamında hem bor katkısız hem de bor katkısı ihtiva eden olmak üzere iki farklı balata bileşimi geliştirildi.

Tablo 1. Başlangıç (temel) balata bileşimi ve fiber katkı oranları.

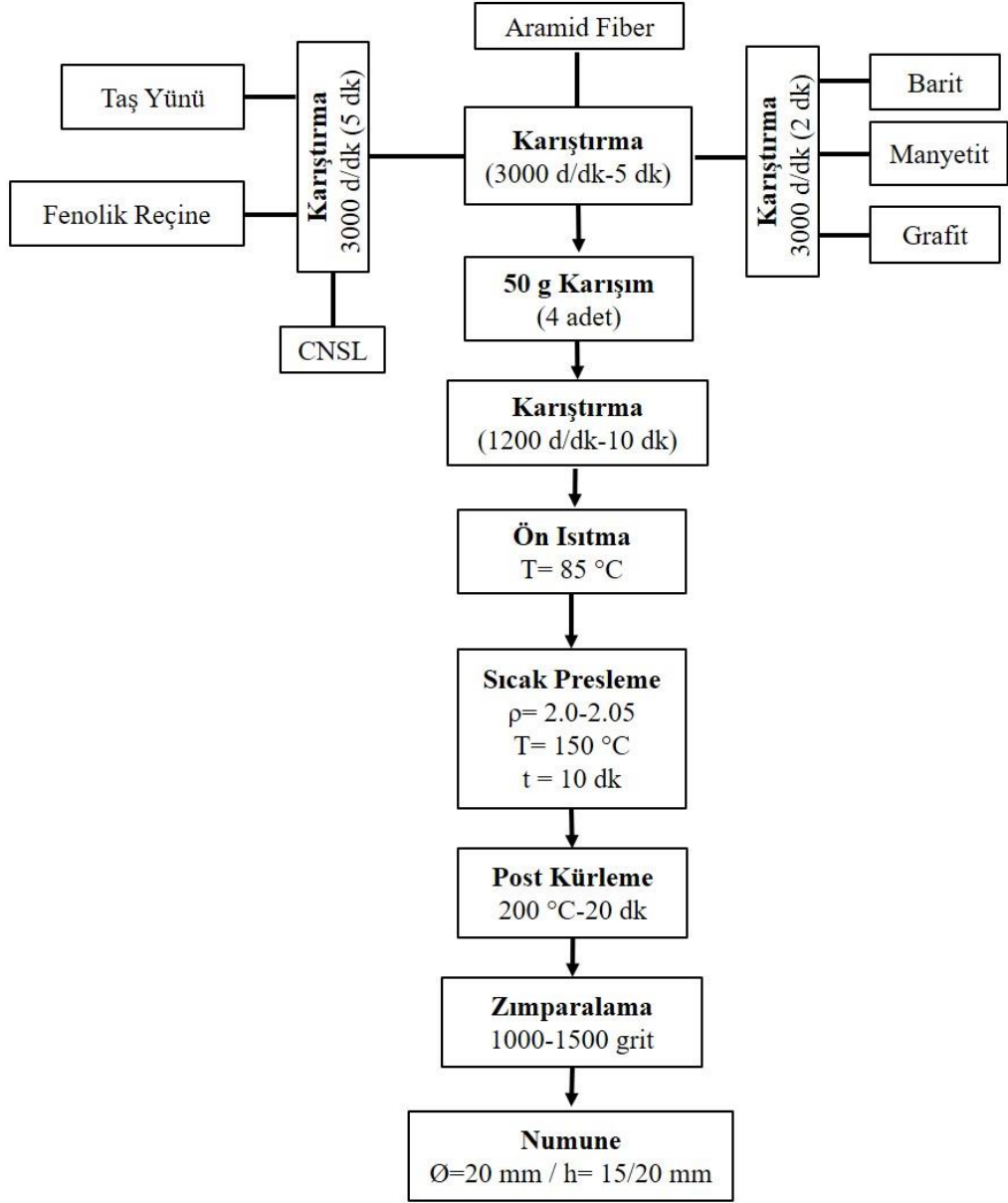
Katkı Bileşenleri	Bileşim kodları / katkı oranları (% ağı.)			
	TYO1 (Temel Bileşim)	TYO2	TYO-3	TYO-4
Taş Yünü	30	35	40	45
Barit	35	30	25	20
Toz-Reçine	20	20	20	20
Kevlar	3	3	3	3
Grafit	7	7	7	7
Manyetit	5	5	5	5

2.2.1. Küçük Boyutlu Numune Üretimi

Çalışma kapsamında uygulanan testlerde kullanılacak numuneler toz metalürjisi (T/M) yöntemi kullanılarak üretildi. Bu üretim süreci; hammadde tartma + karıştırma + ön ısıtma + basınç altında sıkıştırma ve kütleme + son kütleme + yüzey hazırlama şeklinde verilebilir. Bu süreci gösteren iş-akış şeması Şekil 12’de verilmiştir. Bileşim optimizasyonu kapsamında belirlenmiş olan her bir bileşimde kullanılacak olan bileşenler kütlece belirlenmiş yüzde oranlarda alınarak 0.1 mg hassasiyetli bir terazi ile tartıldı ve her bileşim için 50 g’lık toz karışımlar hazırlandı. Bileşimler hazırlanırken, yapıdaki segregasyonun önüne geçilerek homojen bir karışım elde edilebilmesi için ilk olarak taş yünü ve toz reçine 3000 dev/dk dönme hızına sahip bir karıştırıcı içerisine koyularak fiber yüzeyi toz reçine ile iyice kaplanıncaya kadar 2 dk boyunca karıştırıldı ve bu karışım kalıp dışına alındı. Ardından diğer bileşenler (dolgu malzemesi ve sürtünme düzenleyiciler) ilk aşamada olduğu gibi 2 dk boyunca karıştırıldı. Son olarak hazırlanmış bu iki ayrı karışım birbirine karıştırılmadan aramid fiber karıştırıcı içerisine koyularak açıldı ve hemen ardından hazırlanmış karışımlarda karıştırıcıya ilave edilerek toplam karışım 5 dk boyunca karıştırıldı ve ayrı bir kap içerisine alındı. Bu şekilde hazırlanan 50 g’lık dört karışım 1200 dev/dk dönme hızına sahip başka bir karıştırıcı içerisine koyularak 200 gr’lık karışım 10 dk boyunca karıştırıldı. Bu sayede yapısal olarak homojen bir karışım elde edilmeye çalışıldı.

İki farklı karıştırıcı ve iki ayrı aşamada hazırlanan bu homojen karışımdan farklı boyutlarda test numuneleri üretilmek için gerekli olan bileşim miktarı 0.1 mg hassasiyetinde bir terazi yardımıyla tartıldı. Bu karışım, genel ve detay görünümü sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14’te verilen ve önceden 85°C sıcaklığa ön ısıtma yapılmış kalıp içerisine yerleştirildi. Söz konusu kalıbın sıcaklığı 200 °C’ye kadar ayarlanabilmekte ve sıcaklık kullanılan PID kontrolcü sayesinde ± 4 °C hassasiyetinde kontrol edilebilmektedir. Kalıp içerisine koyulan karışım, sıcaklığının yaklaşık kalıp sıcaklığına kadar yükselmesi için 8-10 dk kalıp içerisinde bekletildi. Bu esnada herhangi bir sıkıştırma işlemi yapılmadı ve bu proses ön ısıtma olarak tanımlandı. Daha sonra bu karışım, kalıp içerisinde istenilen boyutta (yoğunluk 2.0 gr/cm³) olacak şekilde sıkıştırıldı. Sıkıştırma işlemini takiben kalıp sıcaklığı 150 °C’ye ayarlandı. Bu sıcaklık seviyesinde numune kalıp içerisinde 10 dk boyunca kürlendi. Bu kürlenme prosesi sırasında fenolik reçine ve diğer bileşenlerin sıcaklıkla birlikte reaksiyona girerek oluşturduğu gazların kalıp dışına atılabilmesi için 3 dk aralıklarla numune üzerindeki basınç kaldırılarak 15 sn boyunca gaz alma işlemi gerçekleştirildi ve ardından tekrar aynı basınca

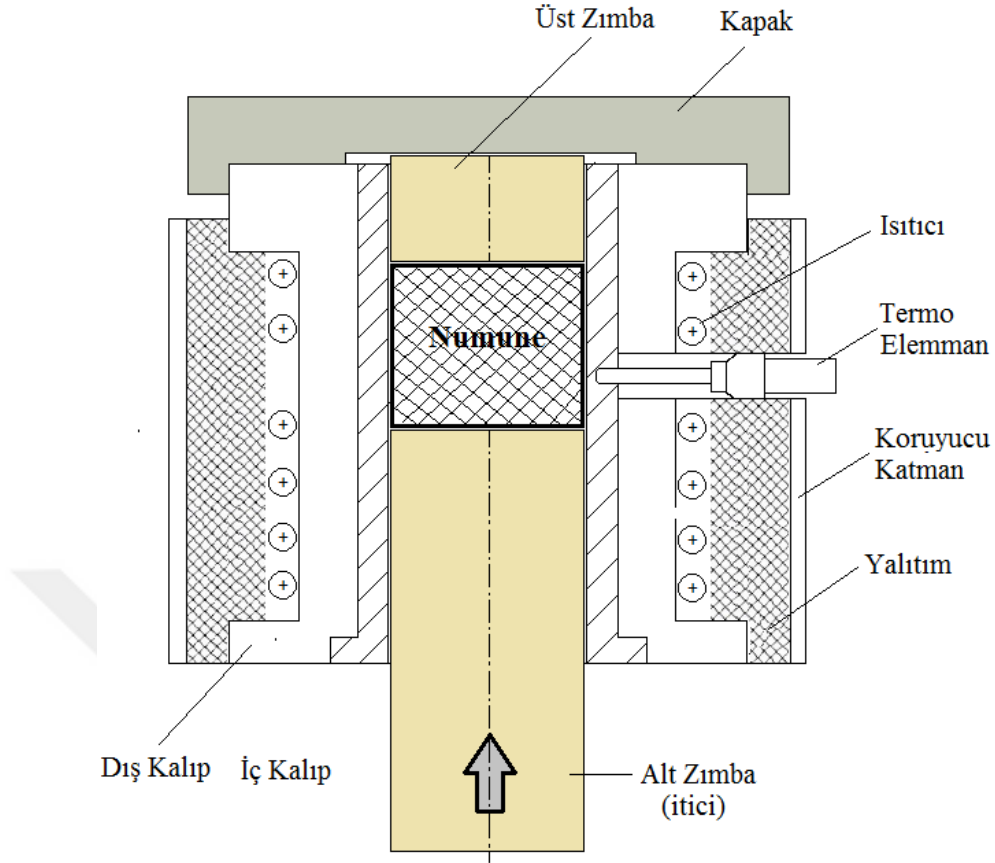
sıkıştırıldı. Bu gaz alma adımı sayesinde numune yapısında gazların etkisiyle oluşabilecek küçük boyutlu çatlakların ve diğer etkilerin önüne geçilmeye çalışıldı. 150 °C sıcaklıkta 10 dk boyunca yapılan kürlemenin ardından numune üzerindeki basınç kaldırıldı ve numune kalıp dışına çıkarılarak atmosfer ortamında soğumaya bırakıldı. Kalıp dışına alınıp soğuma işlemi tamamlanmış bütün numuneler ilk olarak gözle muayene edilerek yüzeysel herhangi bir çatlak olup olmadığına bakıldı. Sonrasında bir mikrometre yardımıyla çap ve uzunluk gibi boyut kontrolleri yapılarak numunelerin istenilen boyut ve geometrilerde olup olmadığı kontrol edildi. Bu aşamada numune yüzeylerinde gözlemlenen herhangi bir problem (çatlak vb.) veya boyutsal farklılık tespit edilmesi durumunda numuneler tekrardan hazırlandı. Gerekli kontrolleri yapılan numuneler önceden 200 °C'ye ön ısıtma yapılmış bir fırın içerisine yerleştirilerek bu sıcaklıkta yapı içerisindeki tüm reçinenin kürlenmesi için 20 dk boyunca bekletildi. Bu işlem sonrasında numuneler tekrardan fırın dışına alınarak atmosfer ortamında soğumaya bırakıldı. Soğuma işlemi sonrası numune yüzeyleri sürtünme aşınma ve diğer yapısal ve mekanik testler için 1000 ve 1500 gritlik zımparalarla temizlenerek uygulanacak testlere hazır hale getirildi.



Şekil 12. Küçük boyutlu numune hazırlama aşamaları



Şekil 13. Tribolojik ve mekanik testler için gerekli küçük boyutlu numunelerin üretilmesinde kullanılan presleme kalıbının genel görünümü



Şekil 14. Silindirik küçük boyutlu numunelerin üretilmesinde kullanılan presleme kalıbının detay görünümü

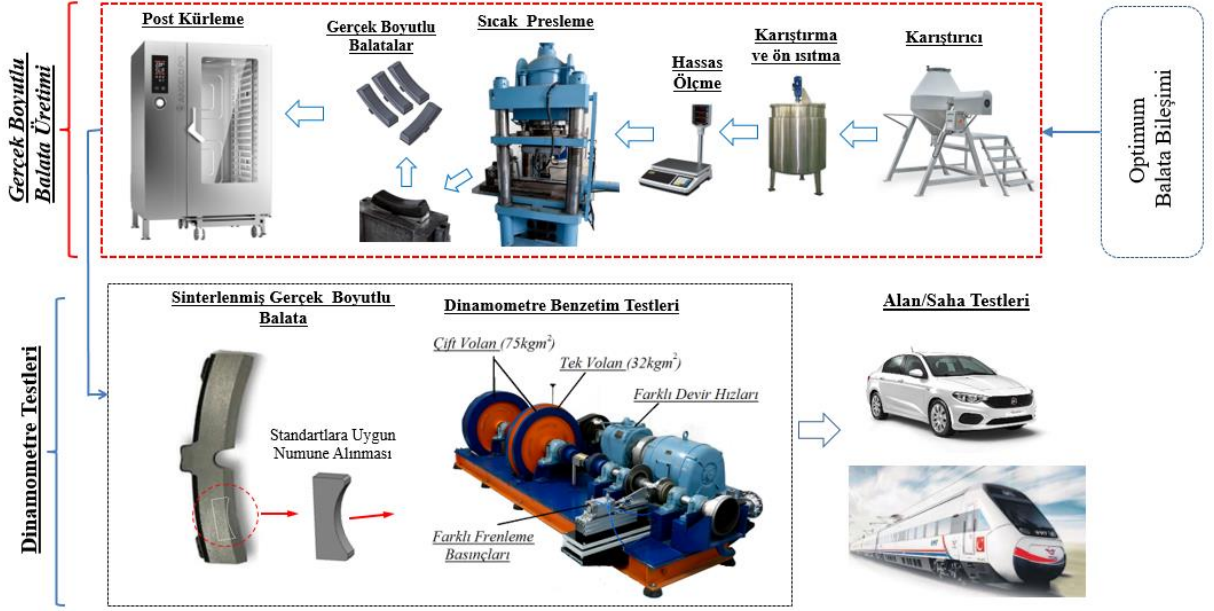
2.2.2. Gerçek Boyutlu Balata Üretimi

Balata katkı maddelerinin ağırlıkça oranları ve performans uygunluğu küçük numuneler üzerinde onaylanmış karışımlardan gerçek çalışma koşullarını simüle eden block-on-ring tipi sürtünme aşınma testlerinin gerçekleştirilebilmesi için gerçek boyutlu balatalar üretildi. Bu üretim sürecini şematize eden görsel Şekil 15'te verilmiştir. Bu üretim süreci için Metisafe firmasının (Metisafe Temiz Oda ve Biyogüvenlik Sist. İml. San. Tic. Ltd. Şti, Ankara) altyapısında bulunan balata üretim ve test laboratuvarından yararlanıldı. Gerçek boyutlu balata üretim sürecinde; bileşenlerin hazırlanması+ karıştırma ve ön ısıtma + presleme ve ön kurlama + vakum altında post kurlama işlem adımları takip edildi. Bu süreçte ilk olarak, uygunluğu küçük boyutlu numuneler üzerinde onaylanmış bileşim veya bileşimlere ait katkı bileşenleri daha fazla miktarlarda temin edilerek hazır hale getirildi. Bu

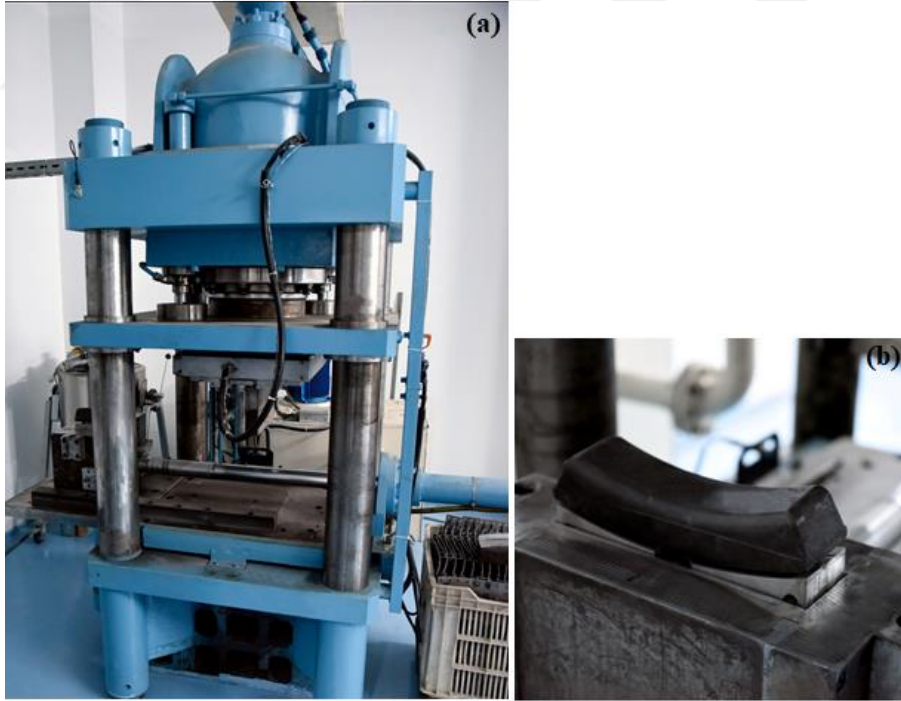
katkılarından küçük boyutlu numune üzerinde belirlenmiş optimum oranlarda alınarak 20 kg ağırlığında karışımlar özel bir karıştırıcı içerisinde karıştırılarak hazırlandı. Yapısal olarak homojen bir karışım elde edilmesi için katkı bileşenleri söz konusu karıştırıcıda 300 dev/dk dönme hızında yaklaşık 4 saat boyunca karıştırıldı. Sonrasında karıştırıcının dışına alınan karışım 100 dev/dk dönme hızına sahip başka bir karıştırıcı içerisine koyularak hem karıştırma işlemine devam edildi hem de karışımın 60-70 °C arasında bir sıcaklığa kadar ısıtılması sağlandı. Bu sayede kalıp içerisinde yapılan ön ısıtma işlemi tamamlanmış oldu. Sonrasında küçük boyutlu numunelerle aynı yoğunlukta olacak şekilde üretilecek gerçek boyutlu balata için gerekli olan karışım miktarı hassas bir terazi yardımıyla tartılarak hazırlandı. Ardından bu karışım genel görünümü Şekil 16'da verilen 400 ton kapasiteli pres altına yerleştirilen metro ve demiryollarının kullanmış olduğu balata geometrisine sahip kalıpta basıldı. Presleme işlemi için karışımlar kalıp içerisine koyulmadan önce alt ve üst kalıp 100 °C sıcaklığa kadar ısıtıldı. Ardından karışımlar ilgili kalıp içerisine koyuldu ve 150 bar basınç altında 30 dk boyunca preslendi. Bu presleme ve ön sinterleme aşamasında balata üzerindeki basınç 10 dk aralıklarla kaldırılarak 30 sn boyunca gaz alma işlemi yapıldı. Bu sayede söz konusu gazlar nedeniyle balata numunesinin yapısında oluşabilecek kılcal çatlakların da önüne geçilmiş oldu. Gerekli süre sonrasında kalıp dışına alınan balatalar atmosfer ortamında soğumaya bırakıldı.

Presleme ve ön kürlenme işlemleri yapılmış olan fren balataları daha sonrasında içerisine vakum entegrasyonu yapılmış ve 400 °C'ye kadar kademeli ısıtma yapılabilen endüstriyel bir fırın içerisine yerleştirildi. Balatalar 10^{-2} mbar vakum ortamında ve 180 °C sıcaklık altında 18 saat gibi uzun bir süre son kürlenme (post-kürlenme) işlemine tabi tutuldu. Bu sayede, yapının ihtiva etmiş olduğu reçinenin tamamen kürlenmesi sağlandı. Bu işlem sonrası fırın dışına (atmosfer ortamına) alınan balatalar soğumaya bırakıldı.

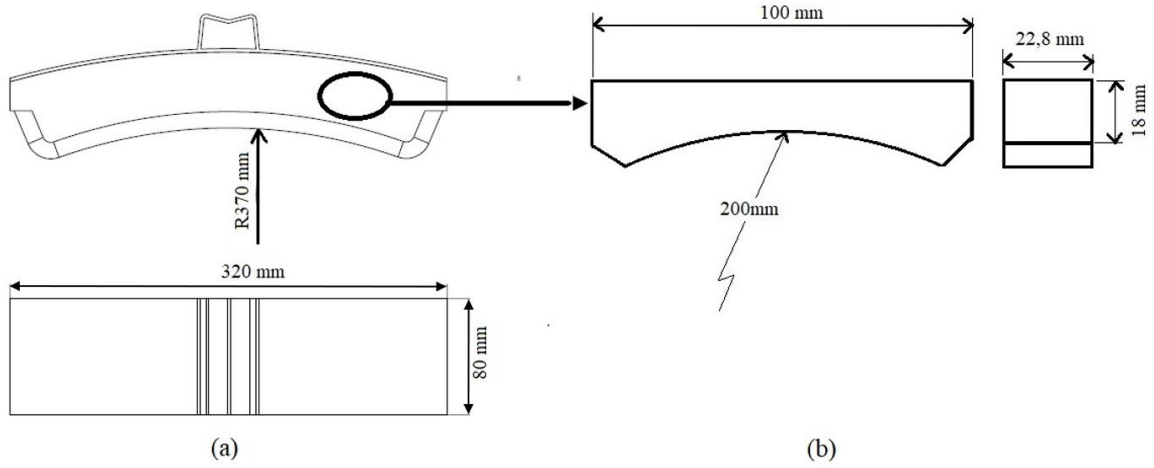
Post kürlenmenin tamamlanmasının ardından dinamometre testleri için gerekli olan blok tipi test numuneleri gerçek boyuttaki fren balatları üzerinden talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak çıkarıldı. Blok tipi test numunelerinin alınma yeri ve şekli IRAM FA L 134-86/80 No'lu Arjantin standardında belirtilen usul ve yöntemlere göre yapıldı [112]. Blok tipi numunelerin üretilen fren balatalarındaki konumları ve geometrileri Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 15. Büyük boyutlu numune hazırlama aşamaları ve deney prosedürünü gösteren şematik akış diyagramı



Şekil 16. (a) Gerçek boyutlu balata üretiminde kullanılan 400 ton kapasiteli pres ve (b) balataların kalıplanmasında kullanılan kalıp

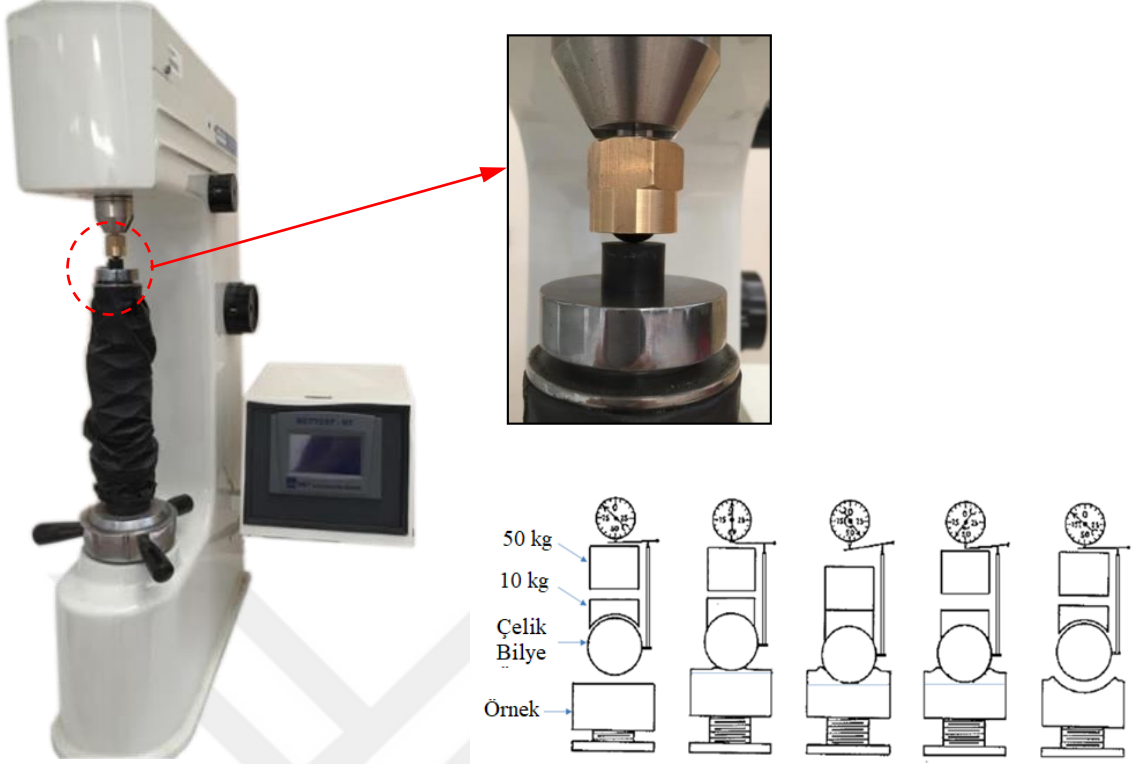


Şekil 17. (a) Dinamometre testlerinde kullanılacak olan blok tipi numunelerin çıkarıldığı gerçek boyutlu balata geometrisi ve boyutları (b) blok tipi numune geometrisi ve boyutları

2.3. Uygulanan Deneyler

2.3.1. Sertlik

Hazırlanan her bir balata bileşiminden elde edilen numunelere ait sertlik değerleri genel ve detay görünümleri Şekil 18’de verilen Rockwell sertlik ölçüm cihazı üzerinde ASTM D785-65 (UIC 541-4 (Appendix 5) standardına uygun olarak yapıldı. Söz konusu sertlik ölçümleri, standart bir Rockwell skalasının kullanılmamasından dolayı standart dışı olarak tanımlanmakta ve sertlik değerleri standartta HRX olarak ifade edilmektedir. Bu yöntem, Rockwell-F skalasında olduğu gibi standart 10 kgf’lik ön yük ve 60 kgf’lik (ön yük + ana yük) toplam yük olacak şekilde uygulandı. Ancak bu skalada kullanılan konik batıcı uç yerine standart dışı ve 19 mm çapa sahip bir çelik bilye kullanıldı. Bu sayede balata örneklerinin yapısındaki bileşenlerin homojen dağılmama ve boşluklu yapıdan kaynaklanabilecek problemlerin önüne geçildi. Sertlik ölçümleri 20 mm çapa ve 15 mm boya sahip numunelerin iki ayrı yüzeyi üzerinden en az beşer ölçüm alınarak gerçekleştirildi. Toplamda her iki yüzeyden alınan toplam on ölçümün aritmetik ortalaması alınarak numunelere ait ortalama HRX sertlik değerleri belirlendi.



Şekil 18. Sertlik deneyinin uygulandığı Rockwell sertlik ölçüm cihazının genel görünümü ve testin yapılışını gösteren şematik resimler

2.3.2. Elastisite Modülü

Hazırlanan bileşimlerden elde edilen numunelerin elastisite modülü (E) değerleri Instron 3382 elektromekanik çekme/basma cihazında UIC 541-4 (Appendix 5) standardına uygun bir şekilde oda sıcaklığında basma deneyleri uygulanarak belirlendi. Söz konusu test prosedürünü özetleyen bir şematik resim Şekil 19’da verilmiştir. Bu deneyler için 20 mm çapında ve 20 mm boyunda silindirik balata numuneleri kullanıldı. Test için basma cihazında hareketli üst çeneye 25 mm çapında silindirik bir mandrel bağlandı. Numuneler mandrel altına merkezlenerek yerleştirildi. Numune üzerine 30 kg’lık (300 N) ön yükleme yapıldı ve bu yük altında numunede meydana gelen boyca kısalma cihaz üzerinde sıfırlandı. Sonrasında 10 sn içerisinde 65 kg’lık (650 N) bir yükleme daha yapılarak toplam yük değeri 95 kg (950 N) olacak şekilde ayarlandı ve bu yük altında numune 45 sn bekletildi. Bu işlemten sonra ilave yük (65 kg) kaldırıldı ve numune üzerinde 30 kg’lık ön yükleme varken 10 sn daha beklendi. Cihaz üzerinde okunan boyca kısalma değeri tekrar sıfırlandı ve 95 kg’lık toplam yük değeri tekrardan uygulandı. Böylece hazırlanan her bir bileşime ait kuvvet-boyca

kısalma eğrileri belirlendi. Bu eğriler üzerinden numunede meydana gelen boyca kısalma değeri (Δh) mikro metre cinsinden okundu. Sonrasında söz konusu numunelere ait elastisite modülü değerleri N/mm^2 (MPa) cinsinden aşağıda verilen eşitlik (2) kullanılarak tayin edildi. Her bir deney en az 3 numune üzerinde gerçekleştirildi ve deneylerden elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak örneklere ait E değeri belirlendi.

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{\text{Toplam Yük (950 N)} - \text{Ön Yük (300N)} \cdot \frac{hx1000}{0,25x\pi d^2} \cdot \Delta h}{\Delta h} \quad (2)$$

Burada;

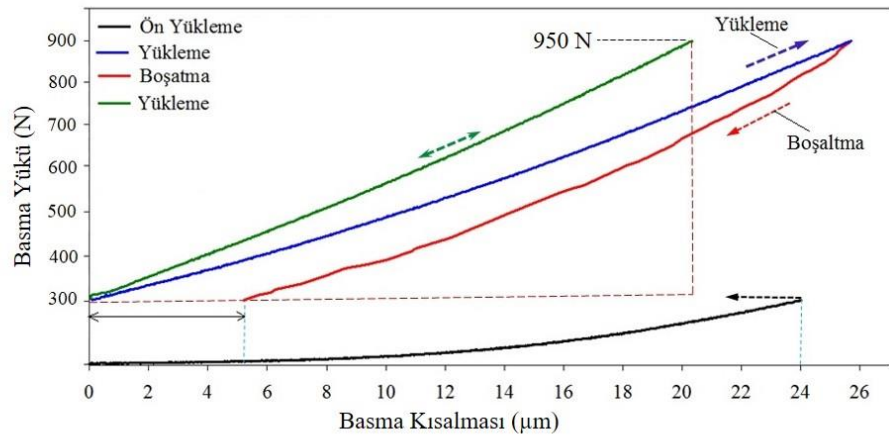
h: Numune yüksekliği (mm)

d: Numune çapı (mm)

Δh : Numune boyunda meydana gelen kısalma (μm)



(a)

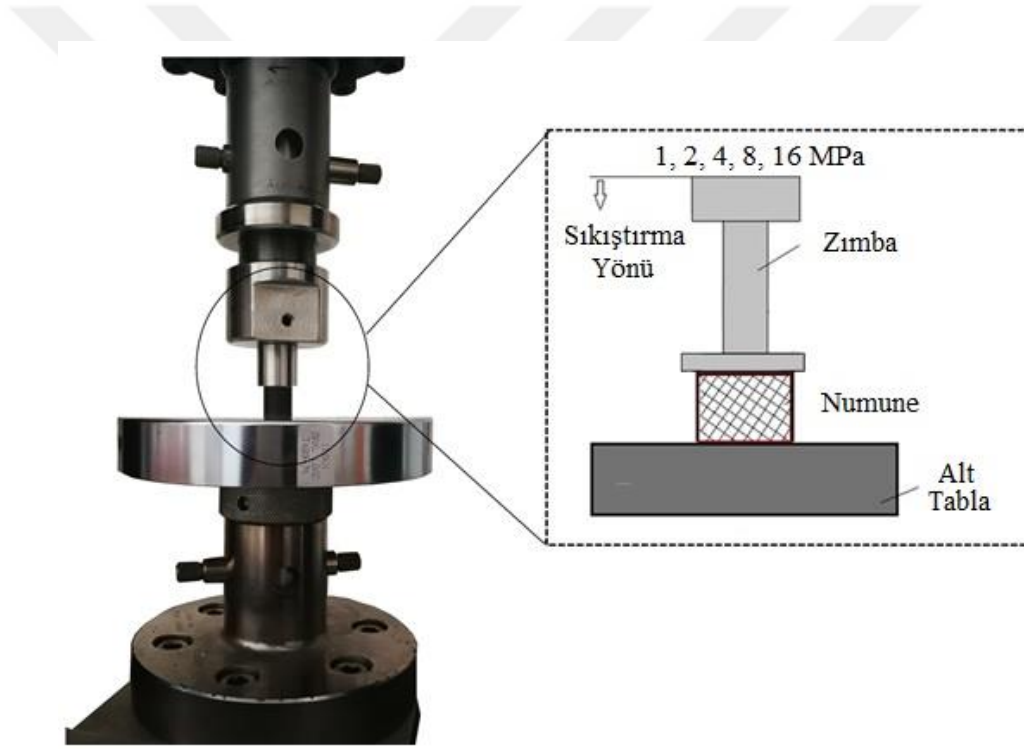


(b)

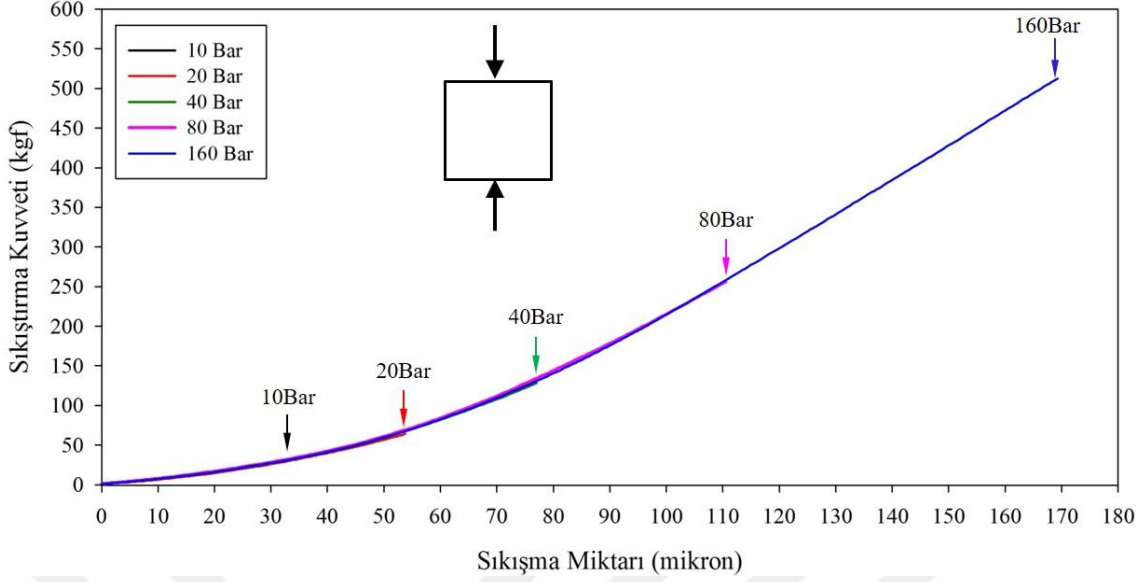
Şekil 19. (a) Elastisite modülünün belirlendiği çekme/basma cihazının deney kısmına ait görünümü ve (b) Basma elastisite modülünün tayininde kullanılan yüklemeye eğrileri

2.3.3. Sıkıştırılabilirlik

Balata bileşimi optimizasyonu kapsamında oluşturulan her bileşimden elde edilen numunelerin basınç altında boylarında meydana gelen değişimlerin belirlenebilmesi için ilgili numunelere sıkıştırılabilirlik testleri uygulandı. Bu testler Şekil 20’de verilen elektromekanik yükleme sistemine sahip Instron 3382 marka çekme/basma test cihazında ISO6310/2009 standartına uygun bir şekilde 10, 20, 40, 80 ve 160 bar (1 MPa, 2 MPa, 4 MPa, 8 MPa ve 16 MPa) basınç değerleri altında ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Bu testlerde numune boyunda basınca bağlı meydana gelen kısalma miktarları mikron cinsinden ölçüldü (Şekil 21).



Şekil 20. Sıkıştırılabilirlik testlerinin yapıldığı çekme/basma cihazının deney kısmına ait görünüm ile test ortamı ve numunenin konumunu gösteren şematik resim



Şekil 21. Farklı basınçlar altında sıkıştırılan numunedeki meydana gelen kuvvete bağlı boyca kısalma miktarlarını gösteren eğriler

2.3.4. Basma Dayanımı

Farklı bileşimlere sahip balata numunelerinin basma dayanımının belirlenmesi amacıyla elektromekanik prensiple çalışan 100 kN kapasiteli Instron marka bir çekme/basma deney makinası kullanıldı ve deneylerin gerçekleştirilmesinde TS 206 Standardı (metalik malzemelere uygulanan basma deneyi) esas alındı. Deneyler için 20 mm çapında ve 20 mm boyunda silindirik numuneler kullanıldı. Sinterleme işlemi sonrası fırından çıkan numunelerin yüzeyleri 1000 gritlik bir zımpara yardımıyla temizlenerek paralel hale getirildi ve sonrasında 0,02 mm/sn basma hızında basma deneyine tabi tutuldu. Deney sırasında uygulanan kuvvet ve şekil değişimi değerleri bir bilgisayar yardımıyla sürekli olarak kayıt edildi ve bu veriler üzerinde gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı çizildi. Numunelerin basma dayanımı basma sırasında numunelerde çatlama ve kırılmanın başladığı gerilme değeri (eğrideki maksimum nokta) esas alınarak belirlendi. Söz konusu basma deneyleri en az 3 numune üzerinde tekrarlandı ve basma dayanımı bu deneylerden elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak verildi.

2.3.5. Sürtünme ve Aşınma Deneyleri

2.3.5.1. Pin-on-Disk Tipi Cihazla Yapılan Deneyler

Belirlenen bileşimlerden elde edilen numuneler, Fransız standardına (NF F 11-292) göre geliştirilip imal edilmiş olan bir pin-on-disk esaslı sürtünme - aşınma deney düzeneği kullanılarak gerekli tribolojik testlere tabi tutuldu. İlgili test cihazına ait şematik bir görünüm Şekil 22’de ve bu cihazın genel bir resmi ise Şekil 23’te verilmiştir. Söz konusu cihaz üzerinde numuneye uygulanan basınç değeri 0,4-1,0 MPa aralığında ayarlanabilirken, frenleme hızı ise 13-27 m/sn (50-96 km/sa) aralığında istenilen değere set edilebilmektedir. Sürtünme ve aşınma testleri kapsamında; numunelere ait sürtünme katsayısı, hacim/kütle kaybı ve disk yüzeyinin sıcaklık değişimi gibi parametreler kaydedilerek farklı bileşimlere sahip balata numunelerinin sürtünme ve aşınma davranışları detaylı bir şekilde araştırıldı. Çalışmalar sırasında karşı aşındırıcı malzeme olarak TRW 5961814 kodlu ticari otomobil fren diski kullanıldı.

Pin-on-disk tipi test sisteminde yapılan sürtünme-aşınma deneyleri ilgili standardın da ön gördüğü gibi “aralıklı frenleme” ve “sürekli frenleme (sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi (fade test))” olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirildi. Numuneler, test öncesinde numune ve disk yüzeyi arasındaki temas uyumu için (en az %85 oranında uyum gereklidir) aynı cihaz üzerinde alıştırmaya tabi tutuldu. Bu alıştırmaya testleri normal testlerden farklı olarak 0,5 MPa basınç ve 22 m/sn kayma hızı şartlarında ve disk yüzeyi sıcaklığının 100 °C’nin üzerine çıkmamasına özen gösterilerek gerçekleştirildi.

Aralıklı frenleme testleri bir vagonun veya metro taşıtının işletme şartlarındaki bir frenleme periyodunu simüle edecek şekilde ayarlandı. Bunun için testler 27 m/sn hız (96 km/sa) ve 8 kg/cm² (0,8MPa) basınç altında gerçekleştirildi. Her bir frenleme periyodu 20 sn frenleme ve 150 sn (2,5 dk) boşta çalışma şeklinde ayarlandı (Şekil 24). Bu bileşik çalışma (yükleme ve bekleme) bir periyot olarak tanımlandı. Yapılan frenleme sırasında numunelere ait sürtünme katsayısı sürekli olarak kaydedildi ve 20 sn boyunca kaydedilen sürtünme katsayısı değerlerinin aritmetik ortalaması alındı. Her numune için benzer şekilde en az 15 frenleme periyodu uygulandı. Her bir test için numuneler test başlangıcı ve bitiminde 0,1 mg hassasiyetindeki elektronik bir terazide tartılarak kütleli aşınma miktarı belirlendi ve eşitlik (3)’de verilen formül kullanılarak cm³/MJ cinsinden özgül aşınma değerleri hesaplandı.

Sürekli frenleme testleri ise ilgili test cihazında ulaşılabilen maksimum kayma hızı (27 m/sn) ve maksimum basınç (8 kg/cm²) altında ve disk yüzey sıcaklığının 400 °C'ye ulaşmasına kadar frenleme yapılarak gerçekleştirildi (Şekil 25). Sürekli frenleme testleri sırasında numunelere ait sürtünme katsayısı değerleri ve disk yüzeyinden okunan sıcaklık değerleri sürekli olarak kayıt edildi. Sürekli frenleme testlerinde elde edilen ortalama sürtünme katsayısı benzer şekilde test süresince elde edilen verilerin aritmetik ortalamalarının alınmasıyla hesaplandı. Aşınma miktarları ise yine ağırlık kaybı şeklinde belirlendi. Test sırasında ölçülen sürtünme katsayısı ve disk yüzeyi sıcaklığının birbirine göre değişimleri de grafiksel olarak gösterildi.

Sürtünme ve aşınma testleri sonrasında numune yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve üç boyutlu profilometrik görüntüleme (3D profilometre) cihazı yardımıyla incelenerek, bileşenlerin balata malzemesinin sürtünme ve aşınma mekanizmalarına olan etkileri detaylı bir şekilde araştırıldı.

$$Q = \frac{\text{Kütle Kaybı (g)} \cdot 10^6}{F(N) \cdot V \left(\frac{m}{sn} \right) \cdot \mu \cdot t (sn) \cdot \rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) \cdot N} \quad (3)$$

Burada;

Q: Özgül aşınma miktarı (cm³/MJ)

F: Normal kuvvet (N)

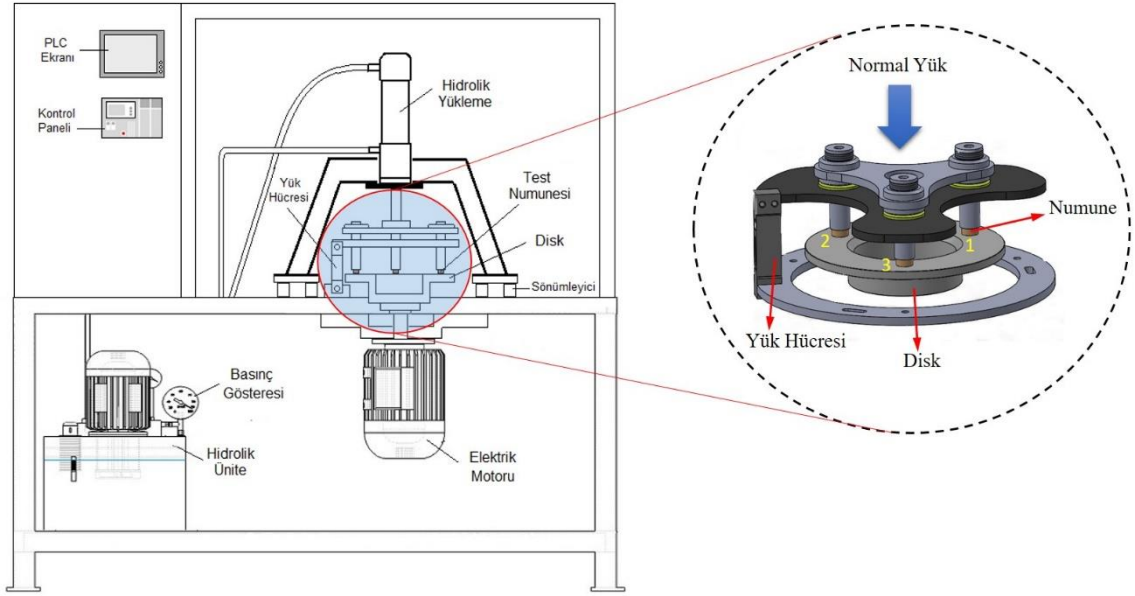
V: Sabit frenleme hızı (m/sn)

t: Frenleme süresi (sn)

μ: Ortalama sürtünme katsayısı

ρ: Yoğunluk (g/cm³)

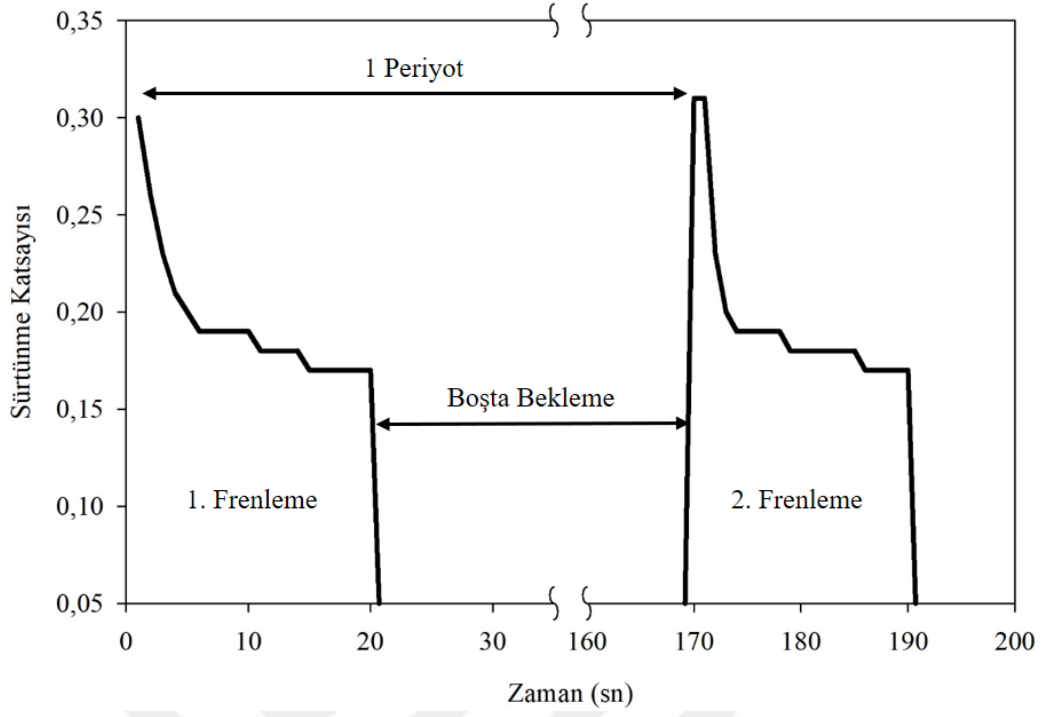
N: Toplam periyot sayısı



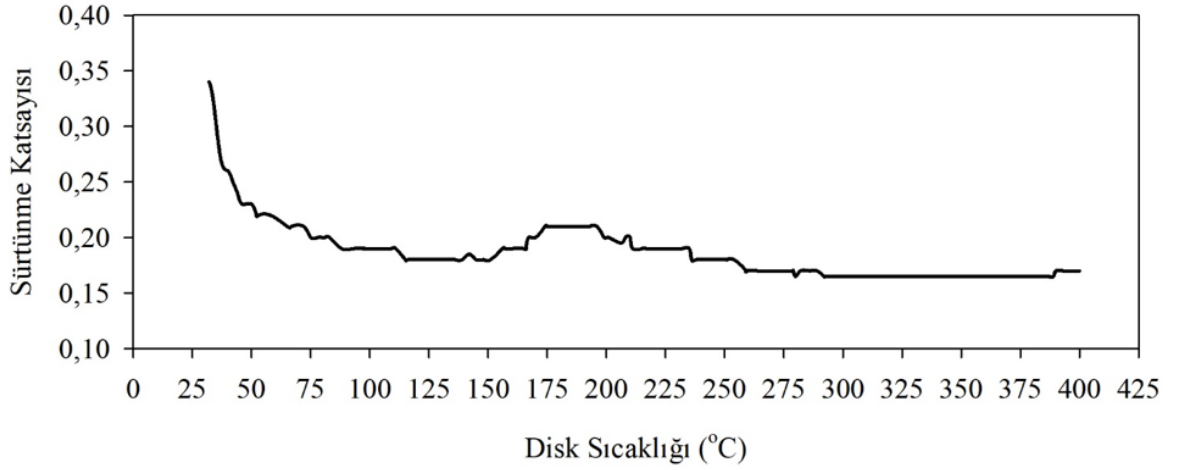
Şekil 22. Kullanılan pin-on-disk esaslı balata malzemesi sürtünme ve aşınma test sisteminin ve test bölgesini gösteren şematik resimler



Şekil 23. Kullanılan pin-on-disk esaslı balata malzemesi sürtünme ve aşınma test sisteminin genel ve detay resimleri



Şekil 24. Aralıklı frenleme testlerinde sürtünme katsayısının uygulanan frenleme ve boşta bekleme sürelerine göre değişimini gösteren bir periyotluk kesit



Şekil 25. Sürekli frenleme (drag) testlerinde elde edilen sürtünme katsayısının disk sıcaklığına göre değişimini göstermek için verilen örnek bir eğri

2.3.5.2. Dinamometre ile Blok-on-Ring Tipi Sürtünme ve Aşınma Deneyleri

Gerçek boyutlu balatalar üzerinden standartlara uygun boyutlarda çıkarılan blok tipi dinamometre test numuneleri UIC 541-4 standardına uygun ve gerçek çalışma geometrisini ve şartlarını simule edecek şekilde tasarlanmış “blok-on-ring” esaslı dinamometre (1/10 ölçekli) test makinasında testlere tabi tutuldu. Söz konusu makinaya ait genel bir görsel ile blok-on-ring yükleme kısmını gösteren şematik resim Şekil 26’ da verilmiştir. Sistem için gerekli olan güç 36 kW’lık bir elektrik motorundan sağlanmaktadır. Bu güç, elektrik motoru çıkışına yerleştirilen hidrolik bir kavrama yardımıyla dişli kutusuna iletilmektedir. Burada belirli oranlarda dönüşüm yapılarak bir triger kayış yardımıyla volanlara aktarılmaktadır. Sürtünme diski de volanlarla aynı yatay mil üzerine konumlandırılmış olup volanlar ve disk arasında 2000 Nm kapasiteli bir tork sensörü yerleştirilmiştir. Bu testlerde, fren balatası birim alanının absorbe etmesi gereken enerji miktarı bir volan üzerine yüklenmektedir. Volan belli bir hız değerine ulaştığında volan serbest bırakılmakta ve balata numunesinin volanı durdurması sağlanmaktadır. Bu esnada tork sensörü yardımıyla sürtünme momenti ve devir sayısı ölçülürken, pinomatik bir sistem aracılığıyla blok tipi numune üzerine uygulanan aksel kuvvet ölçülmektedir. Sistem PLC tabanlı bir yazılımla kontrol edilmektedir. Bu sayede ölçülen ve hesaplanan parametreler anlık olarak görüntülenebilmekte ve kayıt altına alınabilmektedir. Söz konusu dinamometre iki ayrı atalet momentine (35 kg.m^2 ve 75 kg.m^2) sahip olup iki ayrı yükleme kapasitesinde testler gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca önemli test parametrelerinden olan hız ve basınç değerleri de sırasıyla 0-100 km/sa ve 0-5 MPa gibi geniş bir aralıkta ayarlanabilmektedir.

Belirlenmiş bileşimlerden üretilen gerçek boyutlu balatalar üzerinde çıkarılan blok tipi numuneler teste alınmadan önce numune ve disk yüzeyi arasındaki uyumun %85 değerinin üzerinde olması için 50-70 km/sa hız aralığında ve düşük basınç değerlerinde alıştırma testlerine tabi tutuldu. Bu alıştırma devresinde numune sıcaklığının $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ’nin üzerine çıkmaması özen gösterildi. Daha sonra numuneler ilgili standardın ön gördüğü prosedür dahilinde farklı basınç ve hız değerlerinde sürtünme ve aşınma testlerine tabi tutuldu. Testler sırasında alınan yol (durma mesafesi), geçen zaman (durma süresi), sürtünme kuvveti ve disk sıcaklığı gibi veriler anlık olarak kayıt altına alındı. Aynı zamanda frenleme süresince disk ve numune üzerinden bir termal kamera yardımıyla görüntüler alınarak hem ulaşılan maksimum sıcaklık değerleri teyit edildi ve hem de numune yüzeyindeki sıcaklık dağılım

haritaları çıkarıldı. Her bir test sonrası disk yüzeyinin tekrardan oda sıcaklığına kadar soğuması için yeterli süre beklendi.

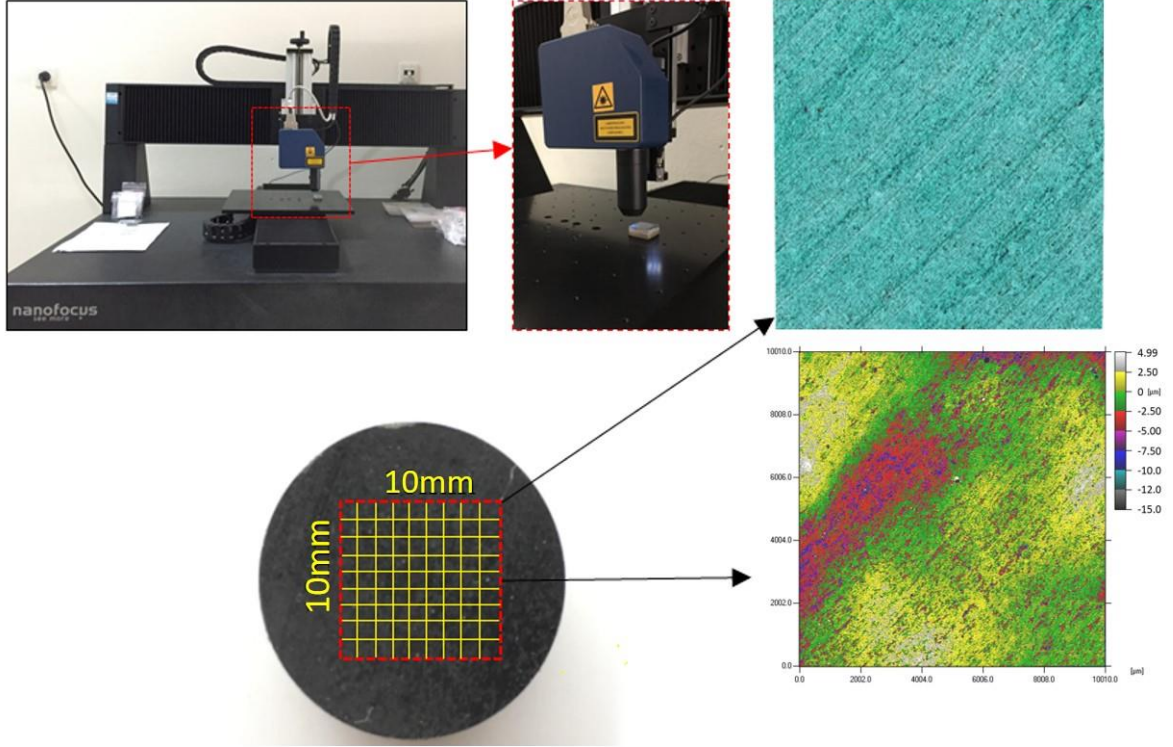


Şekil 26. Testlerde kullanılan 1/10 ölçekli dinamometre test sistemi; (a) genel görünümü (b) volanlar ve (c) bu sistem üzerine ilave edilen blok-on-ring tipi sürtünme ve aşınma test sisteminin detay görünümü

2.3.6. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

Farklı bileşimlerde hazırlanan küçük boyutlu numunelere uygulanan pin-on-disk tipi sürtünme ve aşınma testleri sonrasında numunelerin aşınma yüzeylerinin incelenmesi stereo mikroskobu, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve üç boyutlu optik yüzey profilometre ile gerçekleştirildi. SEM’de incelemeleri öncesi numune yüzeyleri Emitech SC 7620 marka kaplama cihazında 8×10^{-2} mbar mertebesine vakumlanarak 60 saniye boyunca altın kaplandı. SEM incelemeleri 20 kV’da çalıştırılan JEOL 6400 marka bir SEM kullanılarak gerçekleştirildi.

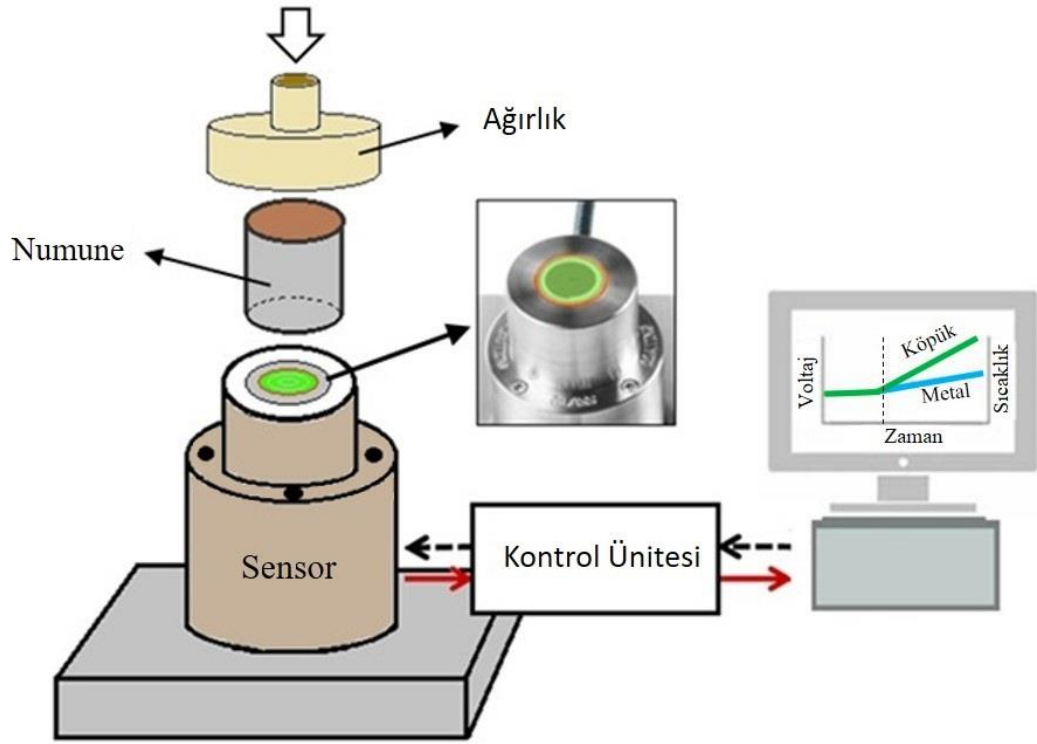
Sürtünme testleri sonrası numunelerin yüzey morfolojik durumları NANOFOCUS marka 3D optik bir profilometre kullanılarak incelendi (Şekil 27). Bu işlem sırasında tarama $10 \times 10 \text{ mm}^2$ ’lik bir alan üzerinde $10 \mu\text{m}$ ’lik çözünürlükte gerçekleştirildi. Tarama işlemi sonrasında yüzeye ait iki boyutlu topografik görüntüler elde edildi.



Şekil 27. Sürtünme yüzeylerinin üç boyutlu taranmasında kullanılan 3D optik profilometre cihazı ve bu cihazla yapılabilen bazı ölçümler

2.3.7. Isı İletim Katsayısının Belirlenmesi

Balata numunelerinin ısı iletkenlik değeri ölçümleri MPTS (Modified Transient Plane Source) yöntemine göre ölçüm yapan ve 0-10 W/mK arasında değerler veren C-Therm TCİ model termal iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı yardımıyla gerçekleştirildi. Bu ölçümler için 20 mm çapında ve 15 mm boyundaki pin tipi numuneler kullanıldı. Ölçüm yapılacak numune yüzeyinin düzgün, paralel ve pürüzsüz hale getirilmesi için sırasıyla 1000 ve 1500 gritlik zımpara ile zımparalandı. Bu yöntemde sensör ve numune yüzeyindeki sıcaklık etkileşiminden yola çıkılarak numunelerin sahip oldukları ısı iletim katsayıları W/mK cinsinden belirlendi. Söz konusu ölçüm yönteminin uygulanışını gösteren şematik resim Şekil 28’de verilmiştir.



Şekil 28. Isı iletim katsayısının belirlenmesini gösteren şematik resimler

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Optimum Fiber Oranının Belirlenmesi

3.1.1. Fiber Katkı Oranları

Optimum balata bileşiminin oluşturulması amacıyla literatürel bilgi birikimi, metalürjik ve tribolojik öngörüler göz önünde bulundurularak oluşturulmuş temel bileşim üzerinde ilk olarak fiber oranı optimize edilmiştir. Bileşim içerisindeki fiber oranı dolgu bileşeni olarak seçilen barit oranı değiştirilerek dengelenmiş ve diğer katkı malzemeleri bütün bileşimlerde ağırlıkça sabit tutulmuştur. Bu kapsamda, yapılan ön çalışmalar ve mevcut literatür bilgilerine dayanarak dört farklı fiber oranına sahip bileşim hazırlanmış ve bu bileşimlere tribolojik ve temel mekanik testler uygulanarak fiber oranı optimize edilmiştir. Çalışmalar için belirlenen başlangıç bileşimi ve fiber katkı oranları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Başlangıç (temel) balata bileşimi (TYO-1) ve bu bileşime ilave edilen fiber katkı oranları ile bunların kodları

Kullanılan Katkı Bileşenleri	Bileşim kodları / katkı oranları (% ağı.)			
	Başlangıç (temel) Bileşim (TYO-1)	TYO-2	TYO-3	TYO-4
Taş Yünü Fibri	30	35	40	45
Fenolik Toz Reçine	20	20	20	20
Barit	35	30	25	20
Manyetit	5	5	5	5
Grafit	7	7	7	7
Kevlar	3	3	3	3

3.1.2. Fiber Oranının Temel Balata Bileşiminin Mekanik Özelliklerine Etkisi

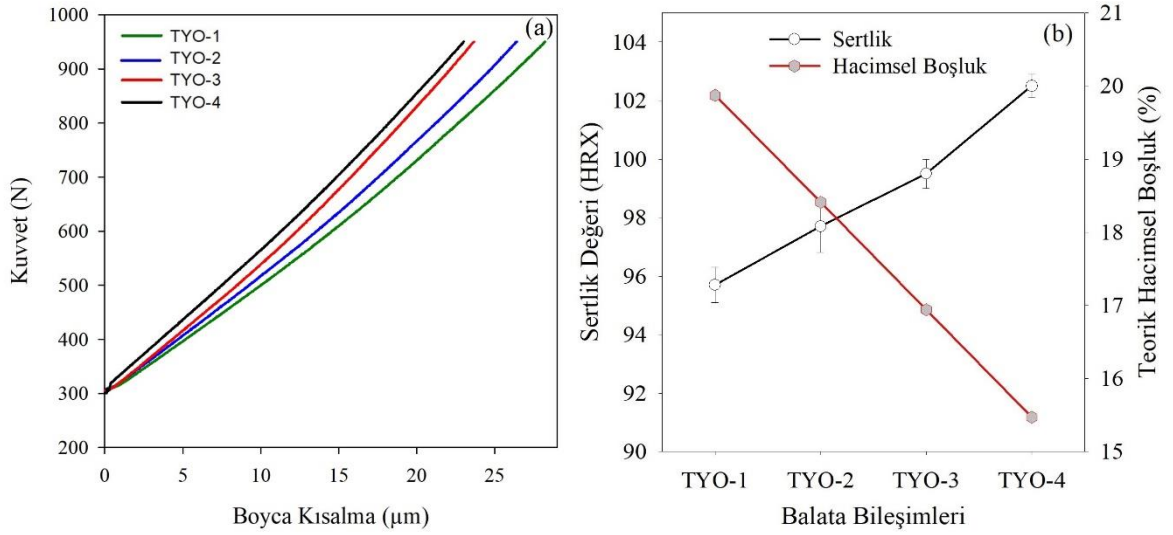
Farklı fiber oranlarında üretilen balata numunelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla sertlik, basma ve sıkıştırılabilirlik gibi temel bazı testler uygulanmış

ve elde edilen sonuçlar Şekil 29, Şekil 30'da ve Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 29(a)'da basma elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılan yükleme eğrileri gösterilmiştir. Genel olarak bakıldığında, temel bileşim üzerinde fiber oranının değiştirilmesi balata numunelerinin elastisite modülü üzerinde kayda değer bir değişim göstermemiştir. Nitekim 65 kg'lık yükleme (3 MPa) altında bütün bileşimlerde birbirine yakın boyca kısaltmalar gözlenmiş ve 1400-1590 MPa aralığında değişen elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Diğer taraftan fiber oranının sertlik üzerindeki etkisi de araştırılmış ve belirlenen ortalama sertlik değerleri Şekil 29 (b) ve Tablo 2'de verilmiştir. Elastisite modülünde olduğu gibi, yapıdaki fiber oranının değişmesi balataların sertlik değerleri üzerinde de sınırlı bir etki oluşturmuştur. TYO-1 ile gösterilen başlangıç bileşiminin ortalama sertlik değeri $95 \pm 0,6$ HRX olarak ölçülürken, bu değer fiber oranı arttıkça bir miktar artış göstermiş ve TYO-2, TYO-3 ve TYO-4 bileşimleri için sırasıyla $97 \pm 0,9$, $99 \pm 0,5$ ve $103 \pm 0,4$ HRX olarak belirlenmiştir. Fiber katkı oranına bağlı olarak sertlik değerinde gözlenen bu hafif artışın büyük oranda yapı içerisindeki hacimsel boşluk miktarının başlangıçta %19,8 seviyelerinden %15 seviyelerine kadar azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 29 (b)). Nitekim fiber oranındaki değişim barit oranı (dolgu bileşeni) değiştirilerek dengelenmiştir. Baritin taş yününe göre daha yoğun bir katkı maddesi olması hacimsel boşluğun değişmesinde etkili olmuştur. Piyasadaki mevcut ticari ürünlerle kıyaslandığında, elde edilen bu sertlik değerlerinin oldukça yüksek olduğu da söylenebilir. Nitekim ticari ürünlerde sertlik değerinin genellikle 60-80 HRX aralığında olduğu bilinmektedir. Etkin bir tribolojik performans için balataların sertliğinin yüksek olması pek arzu edilmemektedir. Çünkü balataların sertliğinin artmasıyla frenleme sırasında ses ve gürültü oluşumunun da arttığı bilinmektedir [113].

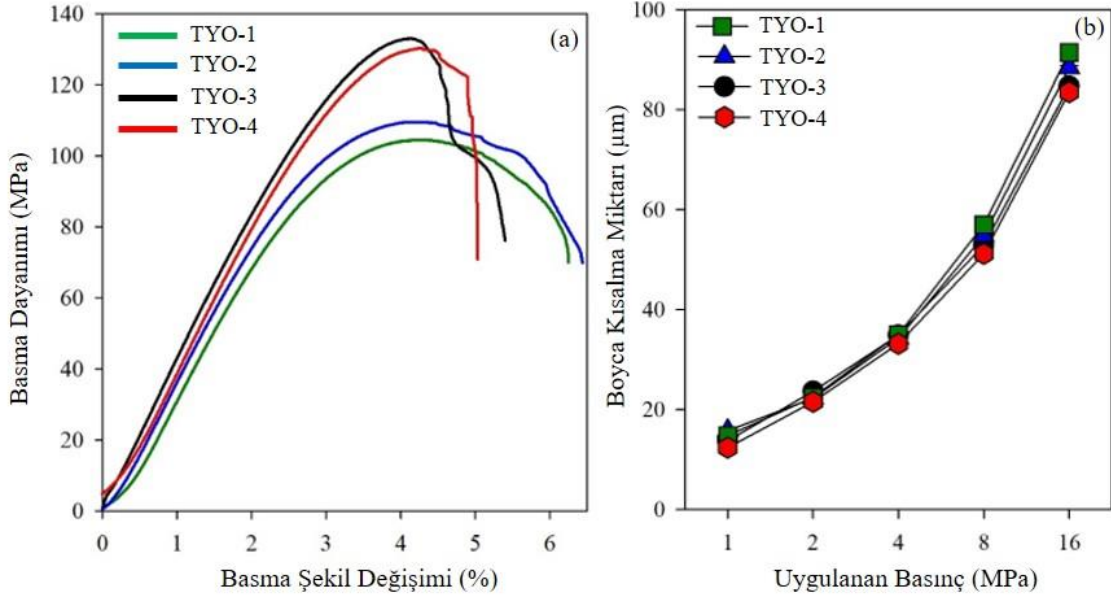
Balataların artan fiber oranı ile basma dayanımındaki değişimin yine sertlik değerindeki değişime paralel olduğu dikkati çekmektedir (Şekil 30 (a)). Düşük fiber katkısı içeren bileşimlerde (TYO-1 ve TYO-2) maksimum basma dayanımı 110 MPa civarında elde edilirken, yapıya daha yüksek oranda fiber katkısı yapıldığında basma dayanımının daha da arttığı ve TYO-3 ve TYO-4 bileşimleri için bu değer 130 MPa civarına kadar çıktığı görülmektedir (Şekil 30 ve Tablo 2). Ancak basma dayanımı ve sertlik değerlerinde görülen bu artış balatalarda istenmeyen bir durum olarak ifade edilen gevreklik problemini de beraberinde getirmektedir. Nitekim yüksek fiber katkılı TYO-3 ve TYO-4 bileşimlerinde maksimum basma yükü değerlerine ulaşılmasının ardından numunelerde oluşan çatlaklar ve buna bağlı etkilerle nedeniyle basma dayanımı değerlerinin çok hızlı bir şekilde düştüğü

görülmektedir (Şekil 30). Bu durum yüksek oranlarda fiber ilavesiyle gelişen gevrekliği göstermekte olup, bunun balatalarda arzu edilen bir durum olmadığı söylenebilir.

Diğer taraftan balata numunelerinin sıkıştırılabilirlik değerlerinin de elastisite modülü değerine benzer şekilde değiştiği söylenebilir. Nitekim beş farklı basınç (1 MPa, 2 MPa, 4 MPa, 8 MPa ve 16 MPa) altında gerçekleştirilen bütün testlerde yaklaşık aynı sıkıştırma miktarları belirlenmiştir (Şekil 30 (b), Tablo2).



Şekil 29. (a) Farklı fiber oranlarına bağlı olarak değişen basma elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılan yükleme eğrileri. (b) Fiber oranına bağlı olarak ortalama sertlik değerleri ve teorik hacimsel boşluk değerlerinde meydana gelen değişimler



Şekil 30. (a) Farklı fiber oranına sahip bileşimlerden elde edilen gerilme – kısalma eğrileri. (b) Farklı fiber oranlarında farklı basınçlar altında elde edilen ortalama sıkıştırılabilirlik değerleri

Tablo 2. Farklı oranlarda fiber katkısı içeren balata bileşimlerinden üretilen numunelerin sahip olduğu bazı mekanik özellikler

Özellikler		TYO-1	TYO-2	TYO-3	TYO-4
Sertlik (HRX)		95±0,6	97±0,9	99±0,5	102±0,4
Basma Dayanımı (MPa)		111±7,9	115±8,7	130±4,2	126±3,8
Elastisite Modülü (MPa)		1592±22	1490±14	1468±19	1455±17
Sıkıştırma Miktarı veya Boyca Kısılma (µm)	1 MPa	15±0,5	15±0,4	14±0,4	13±0,9
	2 MPa	23±1,0	22±0,40	22±0,40	21±0,18
	4 MPa	35±0,5	35±0,30	35±0,15	33±0,42
	8 MPa	52±0,3	54±0,15	54±0,35	51±0,24
	16 MPa	87±0,9	84±0,40	85±0,60	83±0,64
Hacimsel Boşluk (%)		19,8	18,4	16,9	15,4

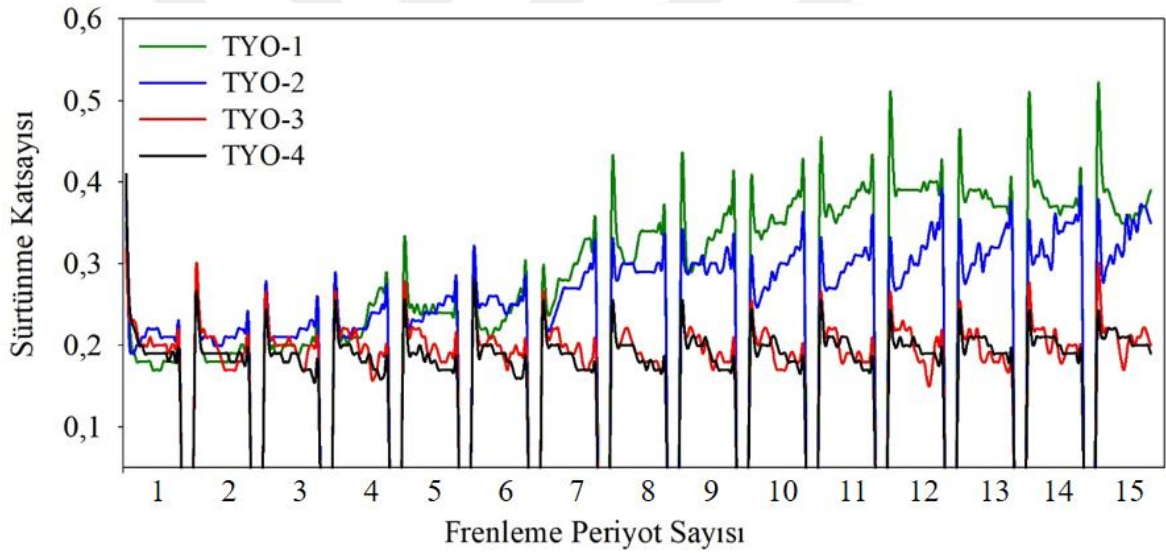
3.1.2. Fiber Oranının Temel Balata Bileşiminin Tribolojik Özelliklerine Etkisi

3.1.2.1. Aralıklı Frenleme

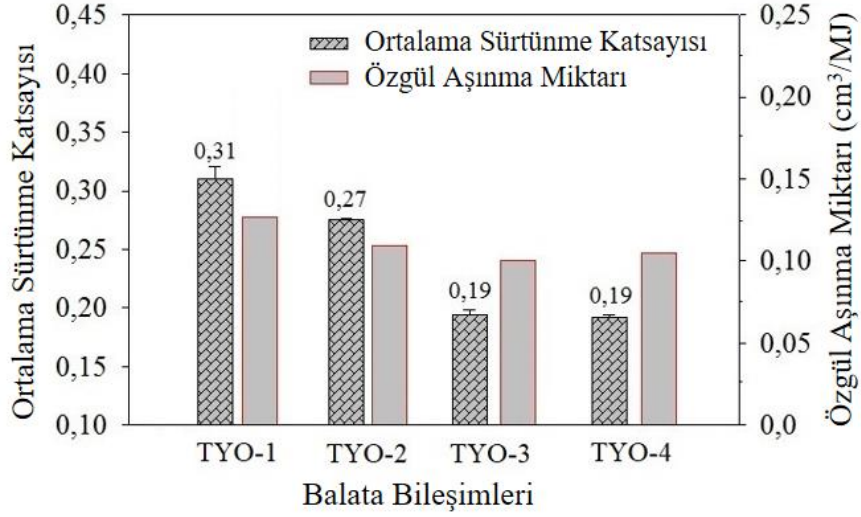
Yapı içerisine fiber olarak katılan taş yünü oranının optimizasyonu kapsamında hazırlanan balata bileşimlerinin sürtünme ve aşınma davranışının belirlenmesi amacıyla öncelikli olarak aralıklı frenleme (periyodik frenleme) testleri uygulandı. Şekil 31’de bu testlerden elde edilen sürtünme katsayısının frenleme periyot sayısına göre değişim eğrileri verilmiştir. Numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri ve numunelerde ortaya çıkan özgül aşınma miktarları ise Şekil 32’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Sürtünme katsayısının frenleme periyot sayısına göre değişim karakteristiği incelendiğinde, matris yapı içerisindeki fiber oranına bağlı olarak sürtünme katsayısının önemli oranda değişim gösterdiği dikkati çekmektedir. Nitekim fiber oranının artmasıyla birlikte ortalama sürtünme katsayısı azalmaktadır (Şekil 32). İlk dört frenleme periyodu boyunca sürtünme katsayısının bütün bileşimler için yaklaşık 0,21 seviyelerinde olduğu görülse de, bu değer dördüncü frenleme periyodu sonrasında değişmeye başlamaktadır (Şekil 31). Özellikle düşük fiber oranlarına sahip balatalarda (TYO-1 ve TYO-2) sürtünme katsayısı dördüncü frenleme periyodu sonrasında artmaya başlamakta ve TYO-1 bileşimi için dokuzuncu frenleme sonrasında anlık olarak 0,40 seviyelerine kadar ulaşmaktadır. Ortalama sürtünme katsayısı TYO-1 balata bileşimi için 15 periyotluk aralıklı frenleme testi sonrası 0,31 olarak elde edilmiştir. Ayrıca bu bileşim için sürtünme katsayısının frenleme periyodları süresince de (20 sn’lik frenlemeler) kararsız bir davranışa sahip olduğu görülmektedir (Şekil 31). Bu durum benzer şekilde TYO-2 bileşiminde de gözlemlenmiştir (Şekil 31). Ancak TYO-2 bileşimine sahip balatalarda bu etkinin nispeten daha geç oluştuğu dikkati çekmektedir. Bu durumun ise büyük oranda yapı içerisindeki fiber-barit dengesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü bileşim içerisindeki barit oranı azalmakta ve bu ise sürtünme katsayısını düşürerek onun stabil değişim aralığını da bir miktar ötelemektedir. Yapı içerisindeki fiber oranının %40 ve %45 gibi nispeten daha yüksek oranlara çıkarılmasıyla elde edilen bileşimlerin (TYO-3 ve TYO-4) sürtünme katsayılarının her periyot içerisinde veya 15 frenleme periyodu boyunca daha kararlı bir değişim gösterdiği dikkati çekmektedir. (Şekil 31, Tablo 2).

Öte yandan, test edilen balata numunelerinin özgül aşınma oranlarına bakıldığında ise fiber oranına bağlı olarak sınırlı bir azalmanın olduğu görülmektedir (Şekil 32). Bu durumun

büyük oranda yapı içerisinde fiber oranının artmasıyla birlikte yapısal bütünlüğün ısı ve mekanik etkiler altında daha iyi sağlanmasıyla ortaya çıktığı düşünülmektedir. Çünkü kompozit malzemelerin mekanik özellikleri büyük oranda yapıdaki matris-fiber etkileşimine bağlıdır [30, 114]. Nitekim fiber oranının artmasıyla birlikte balataların basma dayanımı değerlerinin de artması bunun bir göstergesidir. Ayrıca sürtünme yüzeylerinde oluşan ve yağlayıcı bir film etkisi yapan ikincil plato oluşumun fiber oranı arttıkça daha etkin bir şekilde ortaya çıkması balataların aşınma kayıplarını düşürmektedir. Aralıklı frenleme sonrasında TYO-1 ve TYO-2 bileşimleri için nispeten kabul edilebilir seviyelerde sürtünme katsayısı değerleri ($\mu=0,25 - 0,30$) elde edilmiş olsa da, özgül aşınma değerlerinin mevcut kabul edilebilir seviyelerin ($V \leq 0,05 \text{ cm}^3/\text{MJ}$) oldukça üzerinde olduğu söylenebilir (Şekil 32).



Şekil 31. Farklı fiber oranlarına sahip balata bileşimlerinin frenleme periyot sayısına göre sürtünme katsayılarının değişimi



Şekil 32. Farklı fiber oranlarına sahip balata bileşimlerinin frenleme periyot sayısına göre ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarlarının değişimi

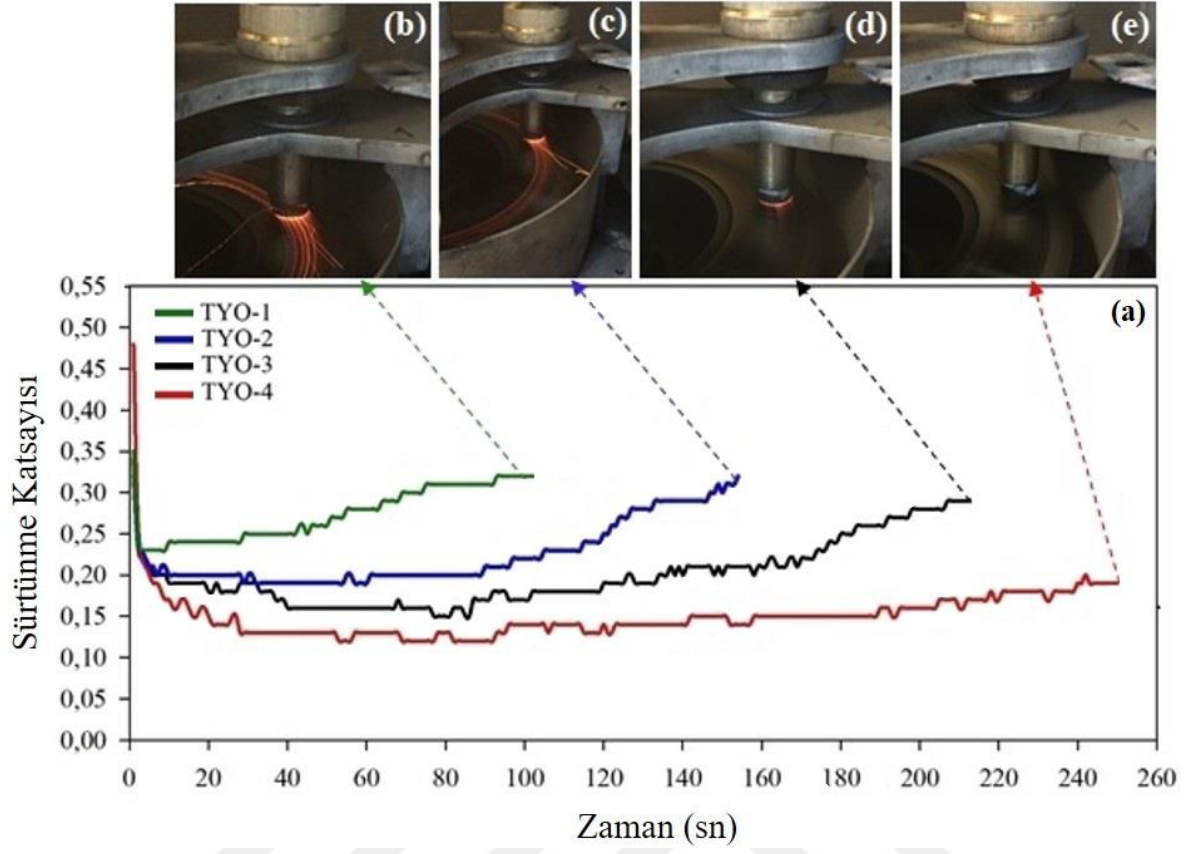
3.1.2.2. Sürekli Frenleme

Çalışma sırasında oluşan sıcaklığın sürtünme katsayısı değişimi üzerindeki etkisinin ortaya koyulması amacıyla bütün bileşimlere aralıklı frenleme testi sonrasında sürekli frenleme (drag) testi de uygulanmıştır. Söz konusu deneylerde disk yüzeyi sıcaklığı 400 °C'ye ulaşıncaya kadar frenlemeye devam edilmiş ve ardından test sonlandırılmıştır. Şekil 33(a)'da fiber oranına bağlı olarak sürekli frenleme testinde elde edilen sürtünme katsayılarının zamana bağlı değişim eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerden görüldüğü gibi, fiber oranının sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi sürekli frenlemede daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. TYO-1 başlangıç bileşimine ait değişim eğrisi incelendiğinde, sürtünme katsayısının aralıklı yükleme testinde elde edilen karaktere benzer bir davranış sergilediği görülmektedir. Nitekim bu bileşimde frenlemenin başlarında kararlı başlayan ortalama sürtünme katsayısı 0,24 seviyenin altına hiç düşmemiştir. Ancak, yaklaşık 50 sn süreyle yapılan frenleme sonrasında bu değer hızlı bir şekilde yükselerek 0,30 seviyesinin üzerine kadar tırmanmıştır. Yaklaşık 100 sn devam eden frenleme sonrasında ortalama sürtünme katsayısı söz konusu bileşim için 0,27 olarak elde edilmiştir. Aralıklı yüklemede elde edilen sürtünme katsayısıyla kıyaslandığında, sürekli frenleme testinde de yaklaşık aynı seviyelerde sürtünme katsayısı değeri elde edilmiştir.

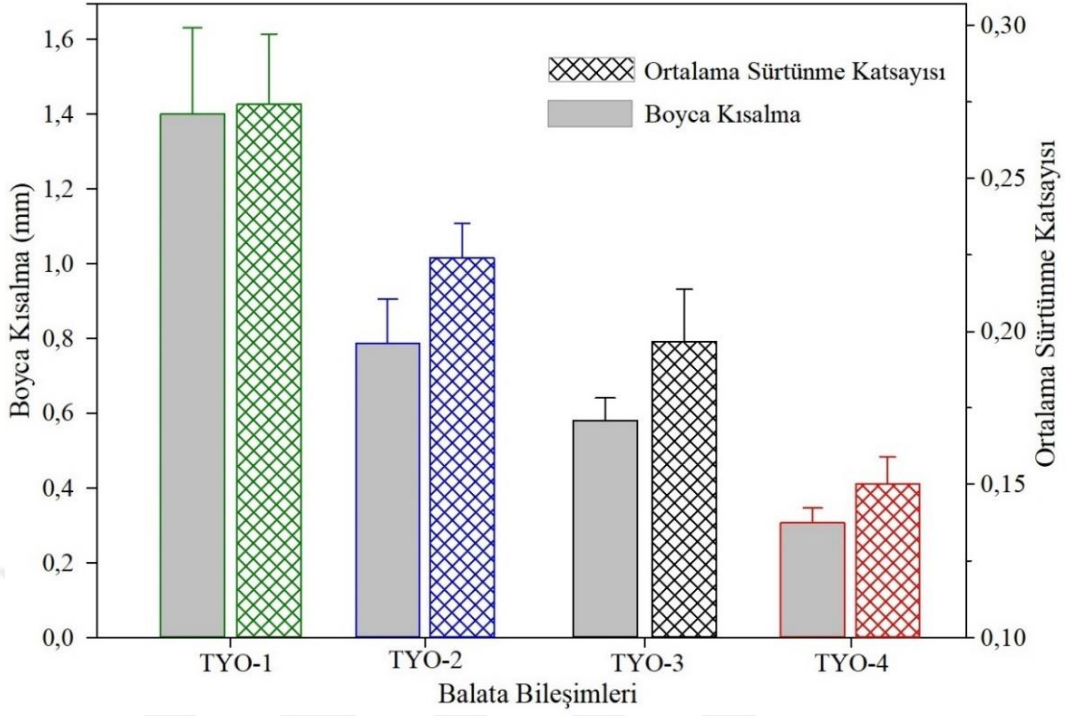
Diğer taraftan TYO-1 bileşiminden üretilen numunelerde sürtünme katsayısındaki ani yükselme ve numune-disk ara yüzey sıcaklığındaki artışlara bağlı olarak frenleme periyodunun sonlarına doğru kıvılcım oluşumu meydana gelmektedir (Şekil 33 (b-d)). Bu oluşumun büyük oranda oluşturulan balata bileşimlerinin rijitliğiyle (elastisite modülü ve sertlik değerlerinin yüksek oluşu) ve yapıdaki yüksek orandaki barit içeriğine bağlı olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bilindiği gibi eş çalışan yüzeylerde kütleli rijitlik arttıkça yüzeylerin birbirleriyle uyumlu teması da azalmakta ve dolayısıyla lokal yüksek basınç noktaları oluşmaktadır. Bu ise o bölgelerde ani sıcaklık yükselmelerine ve dolayısıyla gözle görülebilecek kıvılcım oluşumlarına neden olmaktadır.

Balata bileşimindeki fiber oranının %35'e çıkarılmasıyla (TYO-2) ortalama sürtünme katsayısı 0,27 seviyesinden 0,22'ye kadar azalmaktadır. Frenlemenin başlarında 0,20 seviyelerinde başlayan sürtünme katsayısı yaklaşık 90 sn frenleme boyunca bu seviyelerde kararlı bir davranış ortaya koymuş ve sonrasında TYO-1 bileşiminde olduğu gibi 0,30 seviyesinin üzerine kadar hızlı bir şekilde artmıştır. Sürtünme katsayısının 0,30 seviyelerinin üzerine çıkması TYO-1 bileşiminden üretilen numunelere benzer şekilde kıvılcım oluşumuna neden olmuştur (Şekil 33 (c)). Fiber oranının artırılması, balataların mekanik özelliklerinde kayda değer bir değişim oluşturmasa da sürtünme katsayısının nispeten daha geç yükselmesine ve dolayısıyla daha geç ve düşük seviyede bir kıvılcım oluşumuna neden olmaktadır. Fiberin %40 ve %45 gibi daha yüksek oranlarda yapıya katılması, ortalama sürtünme katsayısının daha da düşmesine neden olmakta ve dolayısıyla kıvılcım oluşumunu da azaltarak ortadan tamamen kaldırmaktadır. Nitekim ortalama sürtünme katsayısı 0,19 olan TYO-3 (%40 fiber katkılı) bileşimine sahip numunelerde çok az kıvılcım oluşumu gözlenirken (Şekil 33 (d)), %45 oranında fiber içeren numunelerde (TYO-4) bu durum tamamen ortadan kalkmıştır. Ayrıca artan fiber oranıyla birlikte sürtünme katsayısı hem daha düşük seviyelerde oluşmakta ve hem de daha kararlı bir değişim sergilemektedir (Şekil 33 (e)).

Diğer taraftan, sürekli frenleme süresince numune boylarında ortaya çıkan değişimler Şekil 34'te verilmiştir. Buna göre, yapıdaki fiber oranı arttıkça boyca kısalmanın azaldığı ve aşınma direncinin arttığı gözükmektedir. Nitekim sürekli frenleme süresince TYO-1 bileşiminden üretilen numunelerin boylarında yaklaşık 1,4 mm'lik bir kısalma meydana gelirken, en yüksek fiber oranına sahip TYO-4 bileşiminden üretilen numunede bu değer yaklaşık dört kat azalarak 0,32 mm seviyelerine kadar inmiştir. Yapıdaki fiber oranı arttıkça yapısal bütünlük artmakta dolayısıyla aşınma direnci yükselmektedir.



Şekil 33. (a) Farklı fiber oranlarına sahip balata bileşimlerinin sürekli frenleme (drag) testi sırasında sürtünme katsayılarının zamana bağlı olarak değişimini gösteren eğriler. Fiber oranına bağlı olarak yapılan sürekli frenleme testlerinin son aşamasında gözlenen kıvılcım oluşumu: (b) TYO-1, (c) TYO-2, (d) TYO-3 ve (e) TYO-4



Şekil 34. Farklı fiber oranlarına sahip balata bileşimlerinden sürekli frenleme sonrası elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değişimleri ile boyca kısalma değerleri

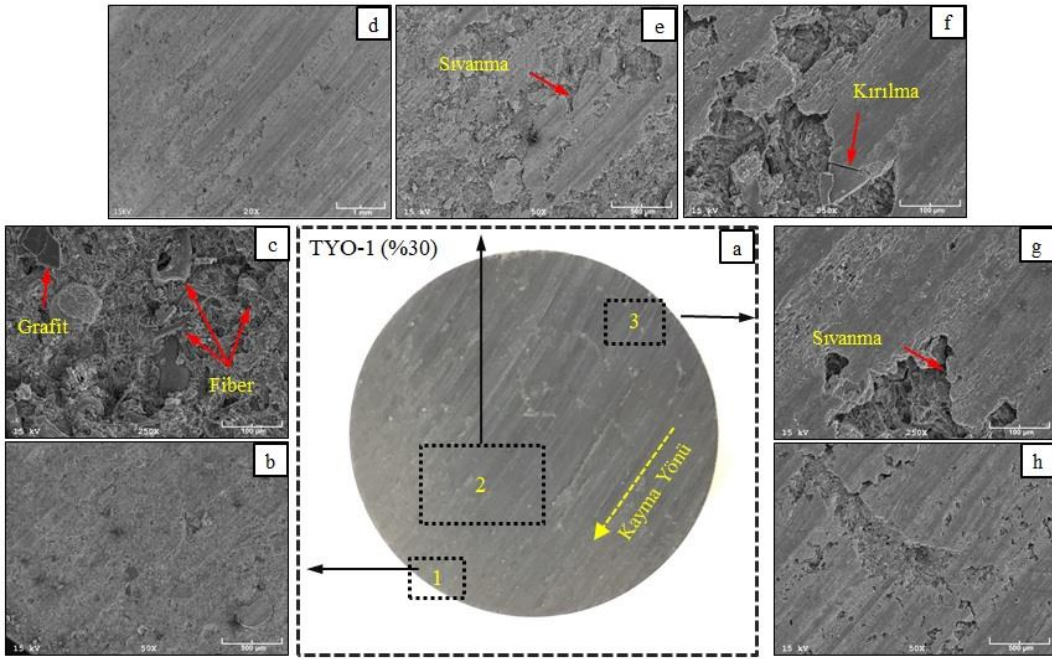
Sürekli frenleme sonrasında balata numunelerinin aşınma yüzeylerinden alınan optik ve SEM görüntüleri Şekil 35-38’de verilmiştir. Genel olarak bakıldığında, aşınma yüzeylerinin fiber oranlarına bağlı olarak farklı morfolojik özelliklere sahip oldukları söylenebilir. Şekil 35’te verilen TYO-1 bileşiminden (başlangıç (temel) bileşimi) üretilen numunelere ait yüzey görüntüleri incelendiğinde, aşınma yüzeyinde bağdaşıklığın büyük oranda kaybolduğu bölgeler (Şekil 35 (a-c)) ile geniş sıvanmaların olduğu bir bölgenin (Şekil 35 (g)-(h)) varlığı dikkati çekmektedir. Bu iki bölge arasında ise bir de geçiş bölgesinin olduğu görülmektedir (Şekil 35 (d)-(f)). Sürtünme yüzeyinde “1” ile işaretlenen bölge incelendiğinde, disk yüzeyinde ulaşılan yüksek sıcaklık (400 °C) etkileri nedeniyle katkı bileşenleri arasındaki bağdaşıklığın büyük oranda bozulduğu ve katkı bileşenlerinin koparak veya kırılarak yüzeyden uzaklaştığı dikkati çekmektedir (Şekil 35 (b)-(c)). Yüzeyden kopan bu aşınma parçacıkları ya sürtünme bölgesinden uzaklaşmakta ya da karşı disk yüzeyine transfer olarak sıvanmaktadır. Disk yüzeyine sıvanan bu aşınma parçacıkların frenleme sırasında tekrardan numune yüzeyine transfer olmasıyla (geri transfer) ince ikincil temas platolarının (sürtünme filmlerinin) veya kalın sıvama tabakalarının olduğu bilinmektedir [53]. Öte yandan, TYO-1 bileşimine sahip numunelerin aşınma yüzeyinin

neredeyse büyük çoğunluğunda görülen kalın sıvama tabakasının varlığı (3 nolu bölge), bu numunelerde meydana gelen yüksek orandaki aşınmanın en önemli göstergesidir. Test süresince devam eden bu transfer mekanizması aşınma direnci düşük olan TYO-1 bileşimine sahip numune yüzeylerinde daha kalın ve geniş bir alanda sıvanmanın ortaya çıkmasını sağlamıştır. Diğer taraftan ana yapıyla bağdaşıklığı zayıf olan bu sıvama tabaklarında çalışma sırasında kırılmalar da oluşmakta ve bunlar ara yüzeyden ayrılarak aşınma miktarını da artırmaktadır (Şekil 35 (f)).

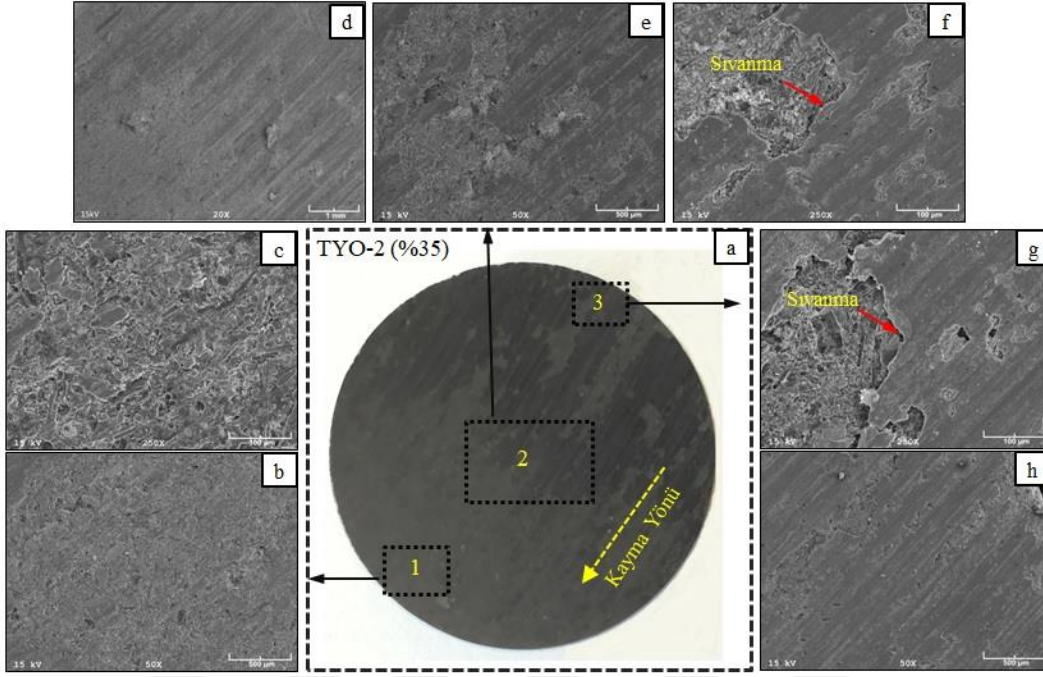
İlgili görsellerden (Şekil 36), TYO-2 bileşiminden üretilen numunelerin yüzey morfolojilerinin TYO-1 bileşiminden üretilen numunelerinkine bezer olduğu söylenebilir. Ancak bu numunelerde sıvama tabakasının nispeten daha ince ve daha dar bir alanda oluştuğu dikkati çekmektedir (Şekil 36 (a), (f), (g)). Bu durum ise TYO-2 bileşimine sahip numunelerin TYO-1 bileşimine sahip numunelerden daha az aşındığının bir göstergesi olarak ifade edilebilir. Öte yandan, TYO-2 balata örneklerinde sıvanma tabakasının olmadığı bölgede (1 ile gösterilen bölge), sürtünme yüzeyinde ulaşılan 400°C gibi yüksek sıcaklığa rağmen yapısal bütünlüğün daha iyi korunduğu ve nispeten daha homojen görünümlü bir yüzey morfolojisinin oluştuğu söylenebilir (Şekil 36 (b, c)). Bu durumun ise sürtünme katsayısının TYO-1 bileşimine göre daha kararlı kalmasında (Şekil 33 (a)) ve aşınma etkilerinin daha az ortaya çıkmasında etkili olduğu değerlendirilmiştir.

Sürtünme yüzeyinde gözlenen bu sıvama etkisinin yapı içerisindeki fiber oranının artırılmasıyla birlikte kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Sıvama tabakasının TYO-3 bileşimine sahip numune yüzeyinin yaklaşık %15'lik bir kısmında oluştuğu, %45 oranında fiber içeren TYO-4 bileşimine sahip numunelerde ise bu etkinin neredeyse hiç oluşmadığı ilgili resimlerde açıkça gözükmemektedir (Şekil 37 (a) ve Şekil 38 (a)). Söz konusu bileşimlerden (TYO-3 ve TYO-4) üretilen numunelerin sürtünme katsayılarında gözlenen değişimler de bu durumu desteklemektedir (Şekil 33). TYO-3 bileşimine sahip numune yüzeylerinin sıvanma etkisinin görüldüğü bölgenin dışında kalan kısımlarında ise daha çok kararlı ve yapısal bütünlüğün korunduğu bölgeler ile ikincil plato oluşumlarının gerçekleştiği küçük bölgeler dikkat çekmektedir (Şekil 37 (b), (c)). Sürtünme yüzeyinde daha çok birincil plato olarak adlandırılan yüzey yapısının hakim olması sürtünme katsayısının ortalama 0,19 seviyelerinde elde edilmesinde ve anlık olarak da 0,16 seviyesinin altına düşmemesinde etkili olmuştur. Sürtünme filmi etkisi oluşturan ikincil platolar TYO-4 bileşiminden üretilen numunenin aşınma yüzeyinin büyük bir kısmını kaplamakta olup (Şekil 38 (b)-(h)), bu durum sürtünme katsayısının frenleme süresince kararlı kalmasında,

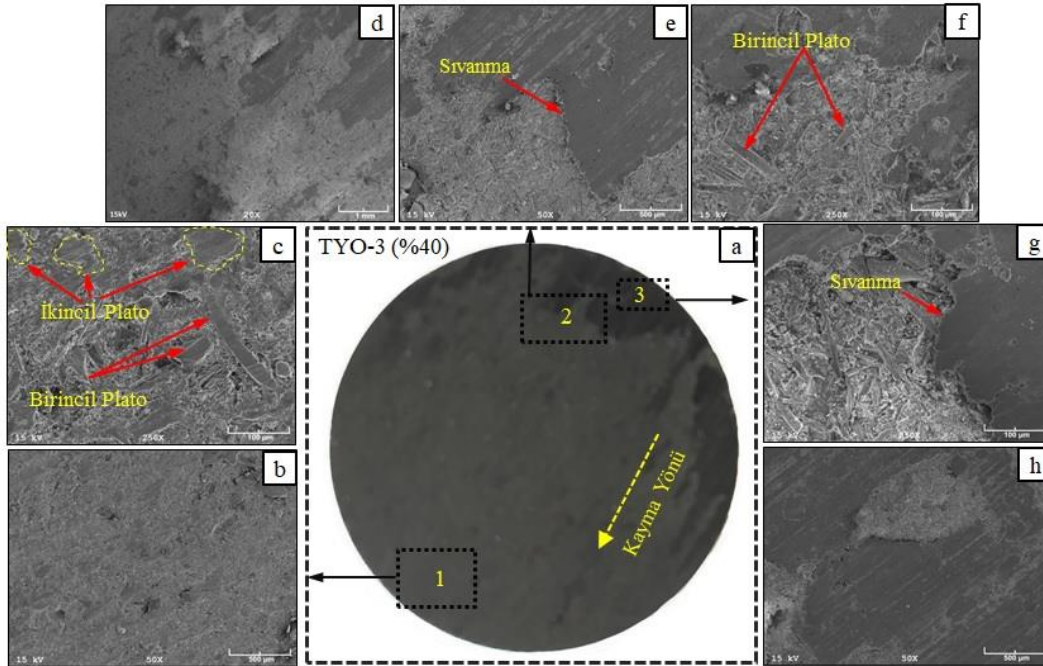
fakat diğer bileşimlerle kıyaslandığında daha düşük seviyelerde elde edilmesinde önemli bir etken olmuştur (Şekil 33 (a)). Özellikle fiber oranı daha yüksek bileşimlerden üretilen numunelerin sürtünme yüzeylerinde gözlemlenen bu ikincil temas platoları ana matris yapının disk yüzeyine doğrudan temasını azaltarak söz konusu numunelerde aşınma miktarının azalmasına da neden olmuştur. Çünkü yüzeyde oluşan bu tabalar kaygan bir yapıda olup, ana yapıyla bağdaşıklığı zayıf olduğundan bölgesel olarak kolay yer değiştirmektedirler. Bu durum ise sürtünme katsayısının düşmesine ve dolaylı olarak da numunenin aşınma direncinin artmasına neden olmaktadır.



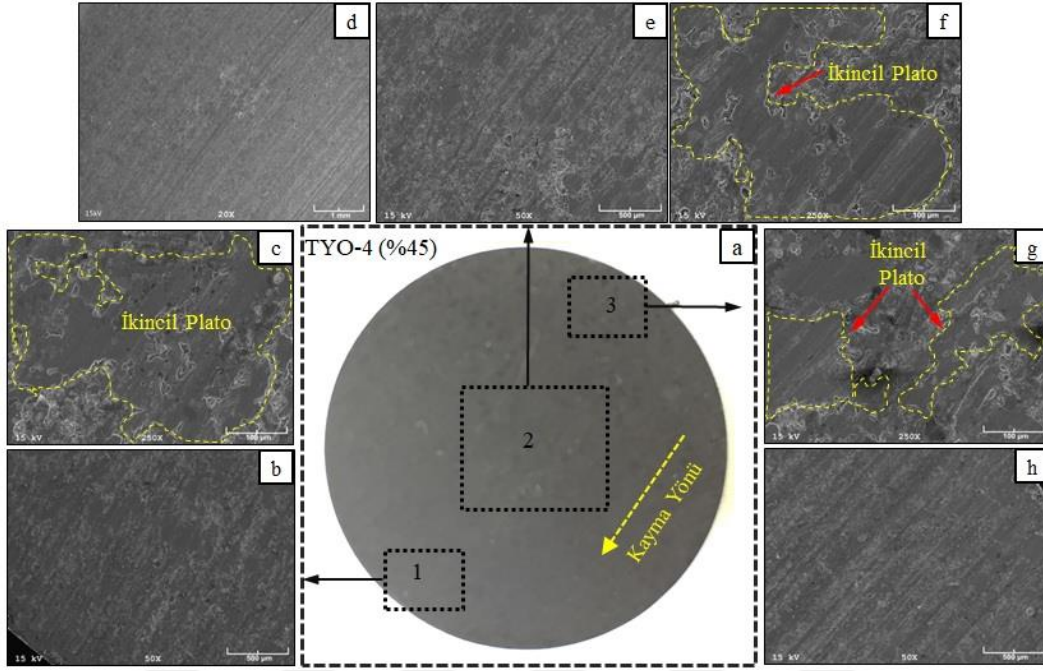
Şekil 35. Sürekli frenleme testi sonrası başlangıç bileşimi olan TYO-1'den üretilen numuneden elde edilen SEM ve optik mikroskop görüntüleri: (a) Sürtünme yüzeyinin genel görünümü, (b)-(c) yoğun aşınma etkilerinin olduğu bölge, (d)-(f) geçiş bölgesi ve (g)-(h) yoğun sıvanmaların olduğu bölge



Şekil 36. Sürekli frenleme testi sonrası TYO-2 bileşiminden üretilen numuneden elde edilen SEM ve optik mikroskop görüntüleri: (a) Sürtünme yüzeyinin genel görünümü, (b)-(c) yoğun aşınma etkilerinin olduğu bölge, (d)-(f) geçiş bölgesi ve (g)-(h) yoğun sıvanmaların olduğu bölge



Şekil 37. Sürekli frenleme testi sonrası TYO-3 bileşiminden üretilen numuneden elde edilen SEM ve optik mikroskop görüntüleri: (a) Sürtünme yüzeyinin genel görünümü, (b)-(c) aşınma etkilerinin olduğu bölge, (d)-(f) geçiş bölgesi ve (g)-(h) yoğun sıvanmaların olduğu bölge



Şekil 38. Sürekli frenleme testi sonrası TYO-4 bileşiminden üretilen numuneden elde edilen SEM ve optik mikroskop görüntüleri: (a) Sürtünme yüzeyinin genel görünümü, (b)-(c) aşınma etkilerinin olduğu bölge, (d)-(f) geçiş bölgesi ve (g)-(h) yoğun sıvanmaların olduğu bölge

3.1.3. Optimum Fiber Oranı Belirlemeye Yönelik Genel Değerlendirme

Literatür bilgileri ve daha önce yapılan çalışmalar ışığında belirlenen başlangıç bileşimi üzerinde optimum fiber oranının belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bu kapsamda dört farklı balata bileşimi oluşturulmuştur. Bu bileşimlerden üretilen balata numuneleri hem tribolojik hem de mekanik açıdan incelenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, başlangıç oranına göre fiber oranının değiştirilmesi balataların mekanik özellikleri üzerinde kayda değer bir etki oluşturmazken, sürtünme özelliklerini önemli oranda değiştirmiştir. Geliştirilecek balataların demir yolu taşımacılığı uygulamalarında kullanılacak olması göz önünde bulundurulursa, özellikle yüksek fiber katkılı balata numunelerinin (TYO-3 ve TYO-4) bu uygulamalar için talep edilen seviyelerde ($\mu \sim 0,25-0,30$) bir sürtünme katsayısına sahip olmadıkları belirlendi. Ayrıca düşük fiber katkılı balatalara göre daha gevrek bir yapıya sahip olmaları da bu balataların söz konusu taşımacılık uygulamalarında kullanımını önemli oranda sınırlayacaktır. Düşük fiber katkılı balata numunelerinin (TYO-1 ve TYO-2) ise nispeten kabul edilebilir seviyelerde bir sürtünme katsayısına sahip oldukları görülmüştür. Ancak,

sürtünme katsayısının frenleme sırasındaki kararsızlığı ve düşük aşınma direncine sahip olmaları bu balatalar için olumsuz bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Her iki bileşimden üretilen numuneler birbirine oldukça yakın mekanik ve tribolojik özelliklere sahiptirler. Ancak fiber oranının artması yapının ısı ve mekanik etkilere karşı olan direncini artırdığı düşünülerek, TYO-1 ve TYO-2 bileşimleri arasından daha yüksek oranda fiber katkısı içeren TYO-2 (%35 fiber) bileşimin bu açıdan daha kullanılabilir ve diğer bileşenlerin optimizasyonunda temel fiber oranı olarak alınabilir olduğu değerlendirilmiştir.

3.2. Optimum Sürtünme Düzenleyici Oranının Belirlenmesi

Taş yünü fiberinin optimizasyonun tamamlanmasının ardından TYO-2 bileşimi referans olarak kabul edilmiş ve gelinen aşamada bu bileşimin tribolojik ve mekaniksel açıdan yetersiz olan özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Hatırlanacağı üzere TYO-2 bileşiminin tribolojik açıdan sürtünme katsayıları yeterli olsa da aşınma direncinin zayıf olması, gevrek bir matris yapısına sahip olmaları, frenleme sırasında ortaya çıkan sürtünme davranışındaki kararsızlık ve buna bağlı olarak ara yüzeyde kıvılcım oluşumu gibi pek çok yetersiz yönleri bulunmaktadır. Bu yüzden çalışmanın bu aşamasında yetersiz kalan özelliklerin iyileştirilmesine ve karşılaşılan problemlerin giderilmesine yönelik sistematik bir çalışma yürütülmüştür. Bu kapsamda ilk olarak TYO-2 matris yapısına ilave edilecek bir sürtünme düzenleyici ile sürtünme katsayısında görülen kararsız davranışın önlenebileceği öngörülmüş olup literatür çalışmalarında ve mevcut ticari ürünlerde kullanılan sürtünme düzenleyici katkı bileşenleri araştırılmıştır. Yapılan incelemelerde ondan fazla katkı maddesinin sürtünme düzenleyici adı altında balata yapılarında kullanılabileceği görülmüştür. Ancak, özellikle ticari ürünlerde Kaju esaslı bileşenlerin sıklıkla tercih ediliyor olması göz önünde bulundurularak, Kaju meyvesinden sağlanan reçinenin işlenmesiyle elde edilen ve CNSL olarak adlandırılan bir ürünün kullanımının uygun olacağına karar verilmiştir [115]. CNSL yapısal olarak fenol esaslı bir ürün olup, aynı esaslı reçinelerle birlikte rahatlıkla kullanılabilir. Literatürde fenolik reçinenin elastik davranışının artırılması amacıyla CNSL ile modifiye edildiği çalışmalara rastlamak mümkündür [51]. Dolayısıyla bu aşamada CNSL'nin fenolik reçine ile %1-5 aralığında bir oranda kombine edilmesinin daha uygun olacağı düşünülmüştür. Yapıya ilave edilen CNSL katkısı temel bileşimdeki fenolik reçine miktarı azaltılarak dengelenmiştir. Bu esnada matris yapıdaki diğer katkı bileşenlerinin oranları sabit tutulmuştur. CNSL katkısının %1-5 aralığında

değiştirilmesiyle 5 farklı balata bileşimi oluşturulmuş (Tablo 3) ve bu bileşimlerden üretilen balata numuneleri benzer şekilde mekanik ve tribolojik açıdan kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Tablo 3. Fiber oranı optimize edilmiş balata bileşimi ve bu bileşime katılan CNSL oranları

Kullanılan Katkı Bileşenleri	Bileşim kodları / katkı oranı (% ağı.)					
	TYO-2 CN-0	CN-1	CN-2	CN-3	CN-4	CN-5
Taş Yünü Fibri	35	35	35	35	35	35
Fenolik Toz Reçine	20	19	18	17	16	15
CNSL	0	1	2	3	4	5
Barit	30	30	30	30	30	30
Manyetit	5	5	5	5	5	5
Grafit	7	7	7	7	7	7
Kevlar	3	3	3	3	3	3

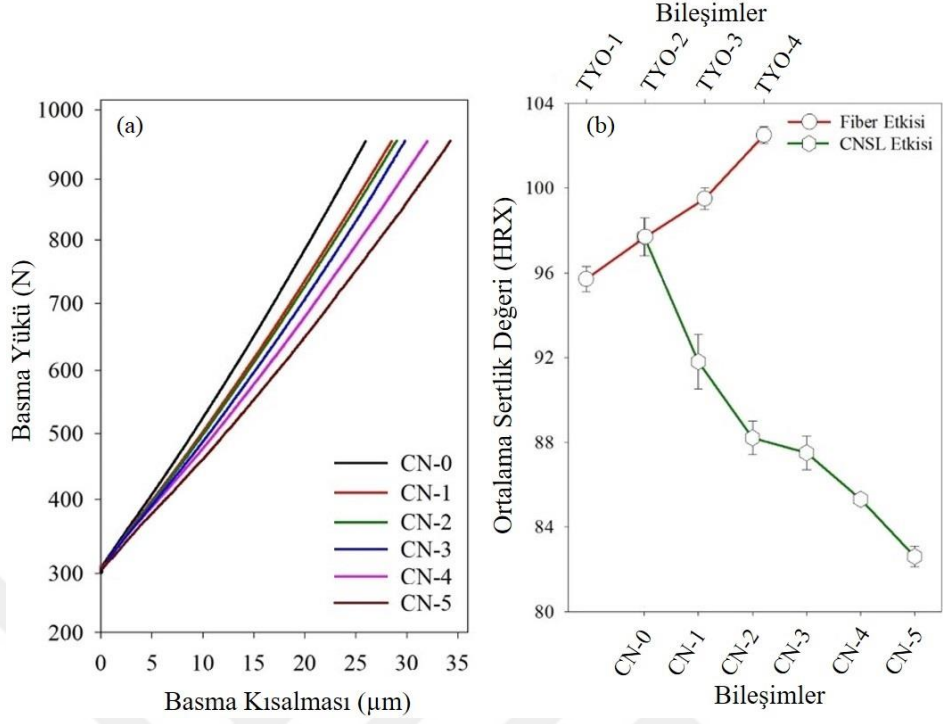
3.2.1. Sürtünme Düzenleyici Oranının Balata Numunelerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi

Bileşime katılan CNSL oranına bağlı olarak üretilen numunelerin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler Şekil 39-40 ve Tablo 4'te verilmiştir. Genel olarak bakıldığında, başlangıç bileşimine (TYO-2) katılan %1 oranındaki CNSL katkısının bile bu bileşimin mekanik özelliklerini büyük oranda değiştirdiği görülmektedir. Nitekim bu etki sertlik değerinde çok daha net bir şekilde ortaya çıkmıştır (Şekil 39 (b)). Balataların sertlik değerleri CNSL oranı arttıkça lineere yakın bir şekilde sürekli azalmıştır. Temel bileşimde 97 HRX olan ortalama sertlik değeri CNSL'nin yapıya %1 oranda katılmasıyla 91 HRX seviyesine kadar düşmüş, CNSL oranının %5'e çıkarılmasıyla daha da azalarak 82 HRX seviyesine kadar gerilemiştir. Bu durumun büyük oranda CNSL katkı maddesinin elastik özelliğine ve yapıdaki fenolik reçine miktarının azalmasına bağlı olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir. Nitekim CNSL katkısı sonrası yapının elastik davranışının değişimi azalan elastisite modülü değerinden de anlaşılmaktadır. CNSL içermeyen CN-0 (TYO-2) bileşimine sahip numune için ortalama elastisite modülü değeri 1490 MPa iken, yapıya %5 oranında katılan CNSL sonrası bu değer 1217 MPa'a düşmektedir (Tablo 4). Öte yandan,

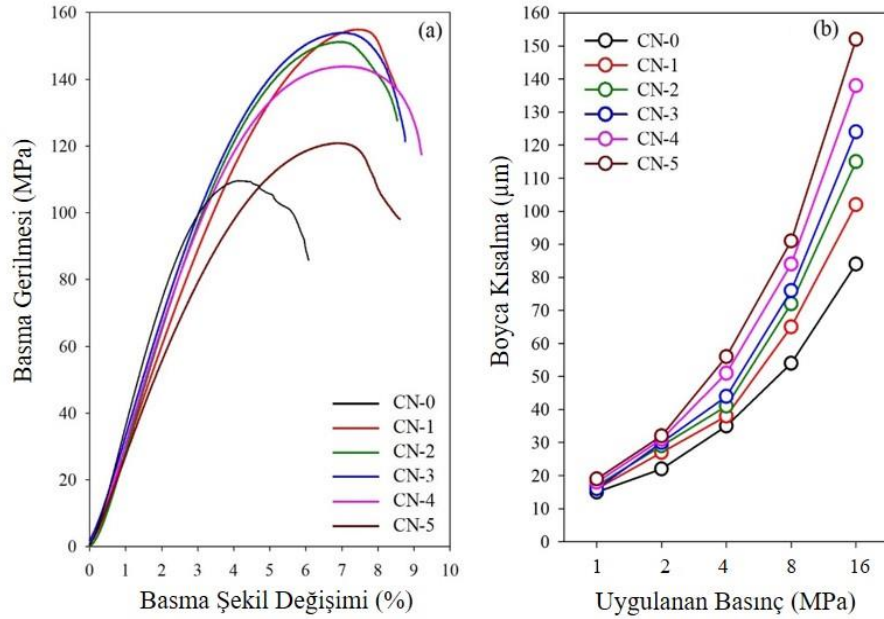
matris yapıda azalan fenolik reçine ile kuvvetli çapraz bağ oluşumu da zayıflamakta ve buna bağlı olarak sertlik ve elastisite modülü değerleri de düşmektedir.

CNSL katkısıyla bitlilikte yapının kazanmış olduğu bu esneklik artışı, söz konusu bileşimlerden üretilen numunelerin basınç altındaki deformasyon karakterini de önemli oranda etkilemektedir. CNSL katkısı içermeyen bileşimin (CN-0) gerilme-basma şekil değiştirme eğrisine bakıldığında, söz konusu karışımdan hazırlanan numunenin oldukça düşük basma dayanımı ve basma şekil değişimi değerine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 40 (a)). Öte yandan, CNSL katkısıyla birlikte numunelerin daha tok hale geldiği de ilgili eğrilerin altında kalan alanlardan görülmektedir. Sertlik değerinin değişiminde görülen etkinin aksine, %1 oranındaki CNSL katkısının temel bileşimin (CN-0) basma dayanımını artırdığı görülmektedir. Ancak, %1'in üzerindeki CNSL katkıları ilgili bileşimlerden üretilen numunelerin basma dayanımını düşürmektedir. Yapıya %1 oranında CNSL katkısıyla basma dayanımında ortaya çıkan bu artış büyük oranda matris yapının esneklik kazanması ve buna bağlı olarak çatlak oluşumu ve ilerlemesinin yavaşlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak artan CNSL oranı ile basma dayanımının tekrar düşmeye başlaması ise yapıdaki fenolik reçine oranının azalmasına dayandırılabilir. Yukarıda da kısaca vurgulandığı gibi, CNSL oranının artmasıyla birlikte matris yapıdaki fenolik reçine oranının azalması yapıdaki çapraz bağ oluşumunu azaltmaktadır. Bu durum ise yapısal bütünlüğe zayıflatmakta ve dolayısıyla bileşimin sertlik ve basma dayanımı değerlerini de düşürmektedir.

Diğer taraftan CNSL'nin balataların sıkıştırılabilirlik değerlerine etkisi de incelenmiş ve farklı basınçlar altında yapılan testlerden elde edilen bulgular Şekil 40 (b) ve Tablo 4'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Genel olarak bakıldığında, yapıya ilave edilen CNSL elastisite modülündeki değişime paralel olarak bileşimin sıkıştırılabilirlik kabiliyetini de artırmaktadır. Bu durum bütün basınç değerlerinde benzer şekilde ortaya çıkmaktadır. CNSL katkısı içermeyen temel bileşimin (CN-0) 1 MPa'lık basınç altında boyunda meydana gelen kısalma 15 μm civarında iken, bu değer %5 CNSL katkısıyla birlikte önemli oranında artarak 20 μm seviyesine çıkmaktadır. Sıkıştırma miktarında görülen bu artış maksimum basınç altında daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Nitekim, 16 MPa'lık maksimum basınç altında CNSL içermeyen başlangıç bileşimi için 84 μm olarak elde edilen sıkıştırılabilirlik değeri, %5 CNSL içeren numunede (CN-5) 154 μm olarak elde ölçülmüştür.



Şekil 39. (a) Farklı CNSL oranlarına bağlı olarak değişen basma elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılan yükleme eğrileri. (b) CNSL oranına bağlı olarak balata bileşimlerinin ortalama sertlik değerlerinde meydana gelen değişim



Şekil 40. (a) Farklı CNSL oranına sahip bileşimlerden elde edilen basma gerilmesi – basma şekil değişimi eğrileri. (b) Farklı CNSL oranlarında farklı basınçlar altında elde edilen ortalama boyca kısalma (sıkıştırılabilirlik) değerleri

Tablo 4. Farklı oranlarda CNSL katkısı içeren balata bileşimlerinden üretilen numunelerin sahip olduğu bazı mekanik özellikler

Özellikler	CN-0	CN-1	CN-2	CN-3	CN-4	CN-5	
Sertlik (HRX)	97±1,7	91±1,3	88±0,8	87±1,4	85±0,25	82±0,5	
Basma Dayanımı (MPa)	115±8,7	155±6,8	154±9,1	150±11,8	143±6,3	121±7,8	
Elastisite Modülü (MPa)	1490±14	1427±19	1380±24	1335±33	1273±11	1217±35	
Sıkıştırma Miktarı (µm)	1 MPa	15±0,40	15±0,42	17±0,28	16±0,30	18±0,22	20±0,64
	2 MPa	22±0,40	27±0,15	29±0,18	30±0,10	31±0,27	33±0,28
	4 MPa	35±0,30	38±0,32	41±0,22	44±0,31	51±0,28	54±0,38
	8 MPa	54±0,15	65±0,22	72±0,36	76±0,14	84±0,33	90±0,42
	16 MPa	84±0,40	102±0,33	115±0,38	124±0,41	138±0,19	154±0,36
Hacimsel Boşluk (%)	18,4	17,6	16,8	16,0	15,2	14,4	

3.2.2. Sürtünme Düzenleyici Oranın Balata Numunelerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi

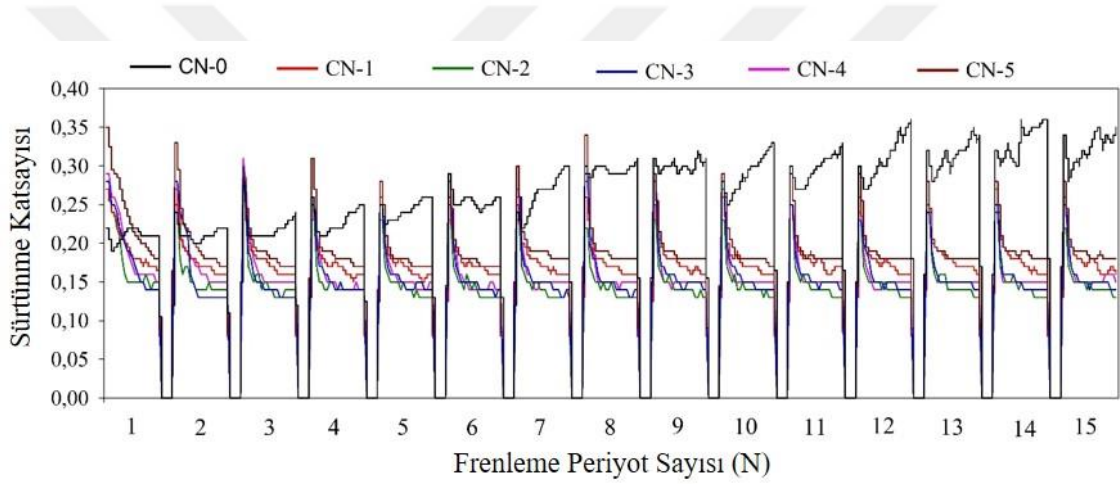
3.2.2.1. Aralıklı Frenleme

Ağırlıkça farklı oranlarda CNSL katkılı kompozit balata karışımlarından üretilen numunelerinin sürtünme katsayısının frenleme periyot sayısı ile değişimi Şekil 41'de verilmiştir. On beş periyot şeklinde uygulanan aralıklı frenleme testi sonrası elde edilen ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri ise Şekil 42'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Genel olarak bakıldığında, CNSL katkısının kompozit balata karışımından üretilen numunelerin sürtünme katsayısını önemli oranda etkilediği görülmektedir. Referans olarak değerlendirilen ve CNSL katkısı içermeyen numunenin (CN-0) sürtünme katsayısı değeri ilk dört periyotta yaklaşık 0,20 seviyelerinde seyrederken, bundan sonra kademeli bir şekilde artarak dokuzuncu periyottan sonra 0,35 seviyelerine kadar çıkmaktadır. Ayrıca sürtünme katsayısının her bir frenleme periyodu içerisinde de değişkenlik gösterdiği ve oldukça kararsız bir seyir izlediği dikkati çekmektedir (Şekil 41). Sürtünme katsayısında her bir periyot içerisinde ortaya çıkan bu kararsız davranış yapıya ilave edilen CNSL katkısıyla birlikte büyük oranda ortadan kalkmakta ve frenleme süresince (15 frenleme periyodu boyunca) daha kararlı bir değişim sergilemektedir.

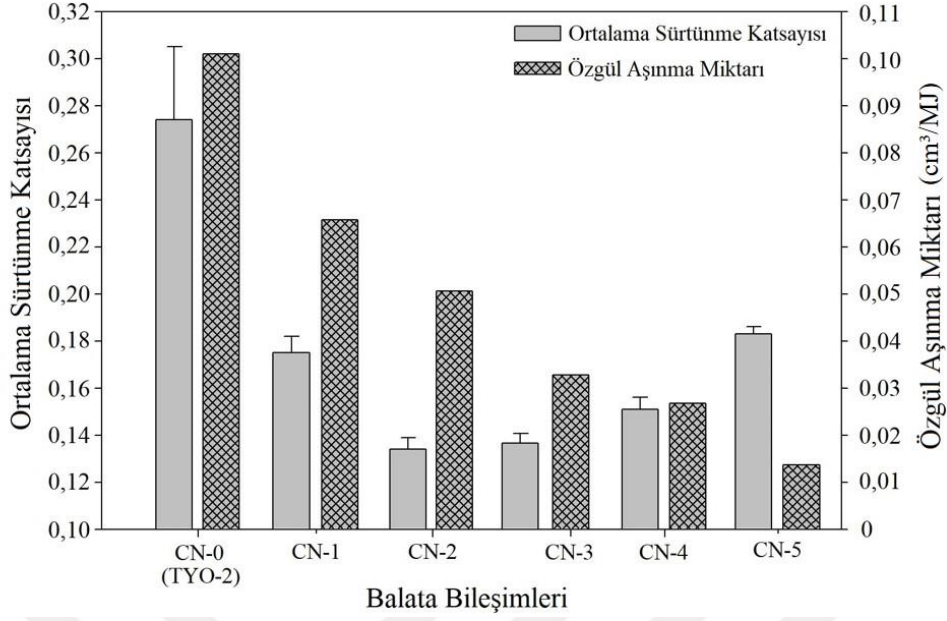
CNSL katkılı bileşimlerden üretilen numunelerin sürtünme katkısının CNSL katkısız numunelerde olduğu gibi yükseliş eğilimi göstermemesi bu bileşimin nispeten daha düşük ortalama sürtünme katsayısı sergilemesine neden olmaktadır. Ayrıca, CNSL bileşeninin daha düşük sıcaklıklarda bozulmaya başlaması sürtünme yüzeyinde ikincil plato oluşumunu hızlandırdığı bilinmektedir [116]. Söz konusu bu ikincil temas platoların sürtünme ara yüzeyinde film etkisi oluşturarak sürtünme katsayısını daha da azalttığı düşünülmektedir. Nitekim CNSL içermeyen (CN-0) bileşimden üretilen numunenin yaklaşık 0,27 olan ortalama sürtünme katsayısı değeri, bu bileşime % 1 oranında katılan CNSL ile birlikte 0,17 değerine düşmüştür. Bu değer %2 oranında CNSL katkısı sonrasında daha da azalarak ilgili numuneler için 0,13 olarak belirlenmiştir. Ancak CNSL katkısının %2'nin üzerine çıkarılması ortalama sürtünme katsayısında görülen bu azalma eğilimini durdurmuş ve devamında ise tekrar yükseltme trendine taşımıştır. Nitekim ortalama sürtünme katsayısı %3 (CN-3), %4 (CN-4) ve %5 (CN-5) oranlarında CNSL içeren bileşimlerden üretilen numuneler için sırasıyla yaklaşık 0,14, 0,15 ve 0,19 olarak belirlenmiştir (Şekil 42). Ortalama sürtünme katsayısının belirli bir CNSL oranından sonra artmaya başlaması, yapının CNSL oranı ile elastik davranışının da artmasından ve dolayısıyla sürtünme çiftleri arasındaki etkin temas alanının da genişlemesinden kaynaklandığı söylenebilir (Şekil 39 (a)). Bilindiği gibi sürtünme katsayısı ile etkin (gerçek) temas alanı arasında doğrusal bir ilişki mevcut olup, bu alanın artması sürtünme katsayısını da artırmaktadır [73].

Diğer taraftan CNSL katkısı numunelerin özgül aşınma miktarlarını da ciddi oranda düşürmektedir (Şekil 42). Nitekim CNSL içermeyen numunede (CN-0) $0,10 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ seviyelerinde elde edilen özgül aşınma miktarı matris yapıya farklı oranlarda katılan CNSL ile birlikte lineer bir şekilde azalarak, %5 CNSL (CN-5) içeren numunede $0,015 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 42). Bu sonuca göre, matris yapıya %5 CNSL katkısıyla birlikte özgül aşınma oranı yaklaşık 10 kat azaltılmıştır. CNSL içermeyen bileşimden üretilen numunede gözlenen bu yüksek orandaki aşınma söz konusu numunenin elastisite modülünün yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir (Şekil 39 (a), Tablo 4). Çünkü, düşük elastik özellik (yüksek elastisite modülü) balata numunesi ile disk arasında daha sınırlı lokal temas noktalarının oluşmasına ve neticesinde bu noktalarda yüksek ısıl etkilerin yoğunlaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle sınırlı alanlarda yoğunlaşan yüksek sıcaklık etkisiyle, bu noktalardaki organik bileşenler yumuşayarak veya bozularak kolay bir şekilde yapıdan uzaklaşabilmektedir. Bu durumun CNSL içermeyen numunelerde frenleme sırasında ortaya çıkan aşınma miktarını artırdığı düşünülmektedir. Yapıdaki CNSL oranının artmasıyla

birlikte balata numunelerinin esnekliği de önemli oranda artırılmıştır (Şekil 39 (a)). Artan esnekliğin sürtünme çiftleri arasındaki etkin temas alanının genişlemesine olumlu etki yaptığı bilinmektedir. Bu sayede yüzeyler arasında daha iyi bir uyumun elde edilmesi sürtünme ara yüzeyinde oluşan ısının bütün temas yüzeyi boyunca daha homojen yayılmasına katkı sağlamıştır. Ayrıca CNSL katkısının sürtünme yüzeyinde oluşan ısının daha homojen yayılmasında etkili olduğu ve ısının balata numunesine doğru geçişini kolaylaştırdığı düşünülmektedir. Sonuç olarak CNSL katkısıyla birlikte elde edilen bu olumlu kazanımlar, yüksek oranda CNSL katkısı içeren numunelerde sürtünme katsayısının daha homojen değişmesine ve dolayısıyla daha düşük miktarda aşınma kayıplarının ortaya çıkmasına katkı sağlamıştır.



Şekil 41. Farklı oranlarda CNSL içeren balata bileşimlerinin sahip oldukları sürtünme katsayılarının frenleme periyot sayısına göre değişimi



Şekil 42. Farklı oranlarda CNSL içeren balata bileşimlerinin aralıklı frenleme testinde elde edilen ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri

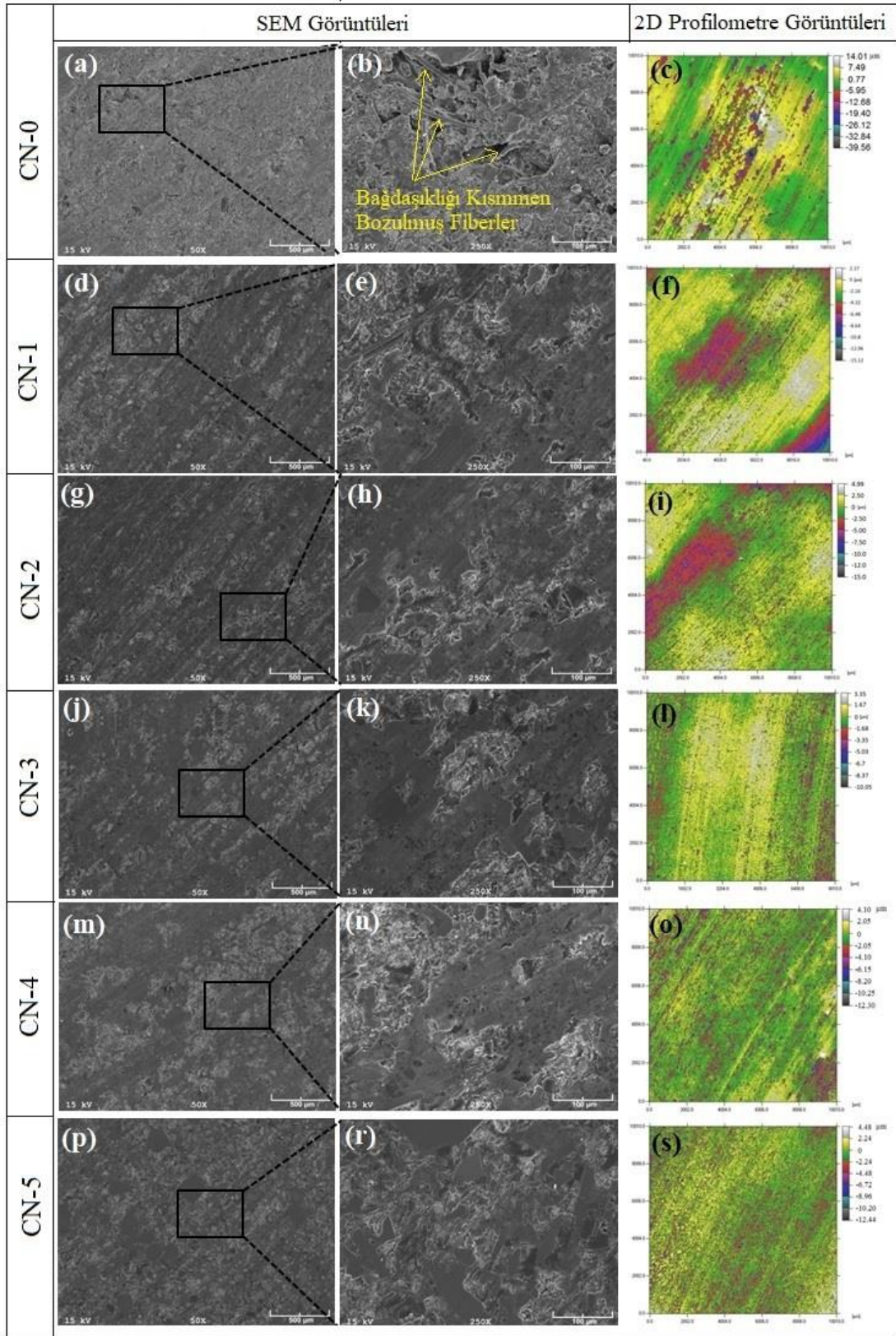
Aralıklı frenleme testi sonrası kompozit numunelerin sürtünme yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve 2D yüzey profilometresi kullanılarak incelenmiş ve elde edilen görüntüler Şekil 43'te verilmiştir. Genel olarak bakıldığında, sürtünme yüzeylerinin CNSL katkı içeriğine göre farklı morfolojik özelliklere sahip olduğu görülmektedir. CNSL içermeyen başlangıç (CN-0) bileşiminden üretilen numunenin yüzeyinden alınan SEM görüntüleri incelendiğinde, aşınma yüzeyin büyük oranda birincil temas platolarından oluştuğu görülmektedir (Şekil 43 (a), (b)). Birincil temas noktaları (platoları), matris yapıdaki fiber veya abrasif etkili katkı bileşenlerin karşı disk ile doğrudan temas ettiği noktalar olarak bilinmektedir [53]. Bu temas platolarının sürtünme yüzeyindeki etkinliği balata numunelerinin sürtünme katsayısını doğrudan etkileyebilmektedir. Nitekim Leonardi ve arkadaşları [117] tarafından yapılan bir çalışmada da bu etki doğrulanmıştır.

Diğer taraftan aynı aşınma yüzeyinde 10 x 10 mm²'lik bir alanda 3 boyutlu optik profilometre ile tarama yapılarak balata ve disk yüzeyi arasındaki temas durumu ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Şekil 43 (c)'de CNSL içermeyen (CN-0) numune yüzeyinden elde edilen bir topografik yüzey görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüden de anlaşılacağı üzere balatanın disk yüzeyine homojen bir şekilde temas etmediği ve lokal temas noktalarının oluştuğu görülmektedir. Bu durumun ısının belirli noktalarda yoğunlaşmasına ve bu

noktalardaki matris yapının bağdaşıklığının bozulmasına ve dolayısıyla aşınma miktarının artmasına neden olduğu düşünülmektedir (Şekil 43 (b)).

Yapıya %1 CNSL katkısının aşınma sonrası yüzey özelliklerini önemli oranda değiştirdiği görülmektedir (Şekil 43 (d-f)). Genel olarak bakıldığında, CNSL içermeyen (CN-0) numunenin aşınma yüzeyinde geniş yer kaplayan birincil temas noktaları, CNSL ilavesi ile birlikte kademeli bir şekilde ortadan kalkarak yerini büyük oranda ikincil temas platolarına bırakmıştır. Bu ikincil platolar yüzeyde bir yağlayıcı film etkisi yaparak numunenin sürtünme katsayısını önemli oranda düşürmektedir [118]. Ancak yapıya %1 oranında katılan CNSL katkısının yüzeyin temas durumunu pek fazla etkilemediği görülmektedir. Bu bileşimden üretilen numune yüzeylerinde de CN-0 bileşimine sahip numune yüzeylerinde olduğu gibi lokal temas (sınırlı temas) noktalarının varlığı dikkati çekmektedir (Şekil 43 (f)). Yapıdaki CNSL oranının %2 seviyesine çıkarılması sonrası sürtünme yüzeyinin neredeyse tamamının ikincil plato olarak adlandırılan sürtünme filmiyle kaplandığı görülmektedir (Şekil 43 (g), (h)). Bu durum CNSL katkı oranıyla birlikte sürtünme katsayısının dikkate değer oranda düşmesinin en önemli nedenini oluşturmaktadır. Yapıdaki CNSL oranının %3'e (CN-3) çıkarılması yüzey morfolojisinde önemli bir değişime neden olmamaktadır. Bu durum bu bileşimden üretilen numunelerin mekanik ve tribolojik özellikler açısından %2 CNSL içeren numunelerle yaklaşık aynı çıktılar vermesinden de anlaşılmaktadır. Ancak yapıdaki CNSL oranının %4'e çıkarılması yüzey özelliklerini değiştirmekte ve sürtünme yüzeylerinde birincil plato oluşumunu yeniden tetiklemektedir. Nitekim %4 (CN-4) ve %5 (CN-5) CNSL içeren bileşimlerden üretilen numunelerin yüzeylerinden alınan SEM görüntülerine bakıldığında (Şekil 43 (m), (n), (p) (r)), aşınma yüzeylerinde ikincil plato oluşumunun azaldığı ve birincil temas platolarının tekrar ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum ise söz konusu numunelerde sürtünme katsayısının yeniden artmaya başlamasının en önemli göstergesidir (Şekil 42). İlgili numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan 2D yüzey görüntülerinden de bu durum net olarak anlaşılmaktadır (Şekil 43 (o), (s)).

CNSL katkısı içermeyen veya nispeten düşük oranda CNSL katkısı içeren bileşimlerden üretilen numunelerin (CN-0, CN-1, CN-2 ve CN-3) yüzeylerinde lokal temas noktalarının varlığı dikkat çekerken, CNSL oranının artırılmasıyla birlikte etkin temas alanının da artarak daha homojen aşınmış yüzeylerin oluştuğu dikkati çekmektedir (Şekil 43 (o), (s)). Bu durumun ilgili numunelerde daha karalı bir sürtünme katsayısı ve daha düşük aşınma kaybının ortaya çıkmasına katkı sağladığı söylenebilir.

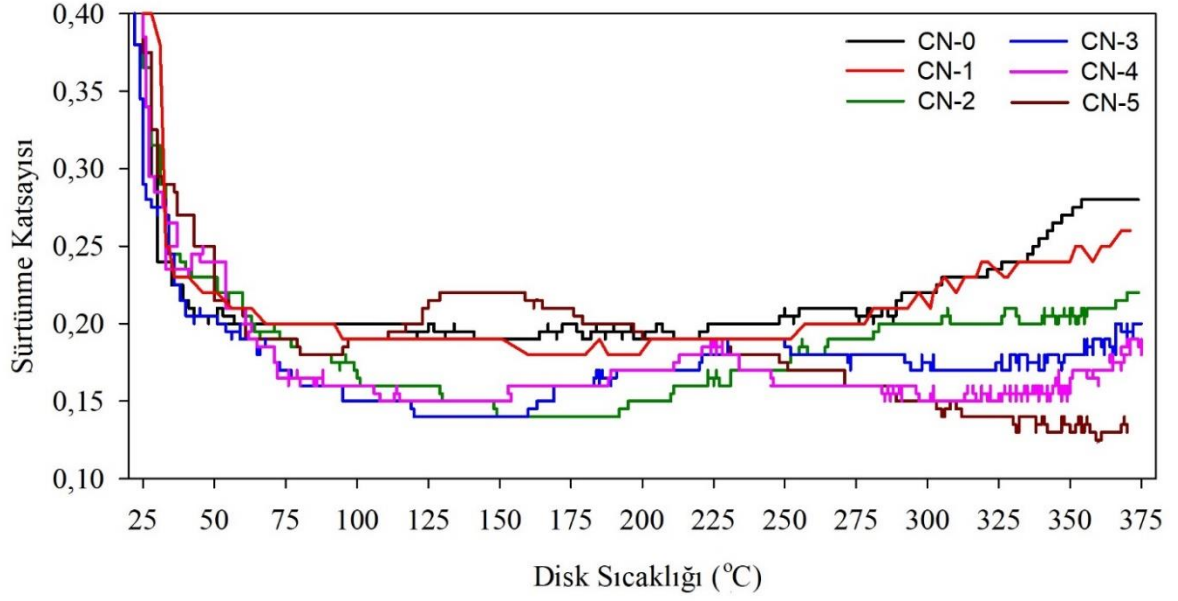


Şekil 43. Farklı oranlarda CNSL içeren balata bileşimlerinin aşınma yüzeylerinden alınan SEM ve 2D profilometre görüntüleri: (a)-(c) CN-0, (d)-(f) CN-1, (g)-(i) CN-2, (j)-(l) CN-3, (m)-(o) CN-4 ve (p)-(s) CN-5

3.2.2.2. Sürekli Frenleme

Aralıklı frenleme testleri sonrasında aynı balata numunelerine sürekli frenleme testleri uygulanmış ve numunelerin sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi belirlenmiştir. Şekil 44'te farklı oranlarda CNSL katkısı içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme sırasında ortaya koydukları sürtünme katsayısı değişimleri gösterilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, CNSL katkısı sonrası numunelerin anlık sürtünme katsayısı değerlerinin 0,20 seviyesinin altına kadar düştüğü ve frenlemenin büyük bölümünde bu seviyelerde kaldığı açık bir şekilde görülebilmektedir. Aralıklı frenleme testlerinde olduğu gibi, özellikle 150 °C disk sıcaklığı seviyesinin altında en düşük anlık sürtünme katsayısı değeri yine aynı şekilde CN-2 ve CN-3 bileşimine sahip numunelerde ortaya çıkmaktadır. Ancak bu durumun sürekli frenlemede sıcaklık arttıkça değiştiği ve özellikle düşük CNSL katkısı içeren numunelerin sürtünme katsayılarının disk sıcaklığının 150 °C seviyesini geçmesi sonrasında artmaya başladığı ve 0,20 seviyelerine kadar tekrardan yükseldiği görülmektedir (Şekil 44). Sürtünme katsayısında 150 °C disk sıcaklığı sonrasında görülen bu artışın yapıdaki CNSL oranı arttıkça azaldığı görülmektedir. Bu durumun büyük oranda yapıdaki CNSL bileşenin bozulmaya başlamasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Nitekim matris yapıya ilave edilen bu organik kökenli bileşenin özellikle 300 °C civarında bozulmaya başladığı ve 450 °C'ye ulaşıldığında büyük oranda bozulduğu rapor edilmiştir [119].

Frenleme sırasında disk sıcaklığının 200°C seviyesinin üzerine çıkması CNSL'nin bozulma sürecini hızlandırmaktadır. Bozularak yapıdan uzaklaşan CNSL'nin disk ve balata arayüzeyleri arasında transfer olarak balata yüzeyinde ikincil temas platolarının oluşumuna katkı sağladığı ve sürtünme katsayısını düşürücü etki oluşturduğu düşünülmektedir. Düşük miktarda CNSL katkısı içeren bileşimlerde bu durumun ortaya çıkmadığı söylenebilir. Ancak, yüksek miktarda CNSL katkısı içeren CN-4 ve CN-5 gibi bileşimlerde sürtünme katsayısının bir miktar yükseldikten sonra artan sıcaklıkla azalma trendine girmesi büyük oranda yapıdaki yüksek miktardaki CNSL katkısının bozularak ikincil plato oluşumlarını artırmasıyla ilişkilendirilmiştir. Sürtünme katsayısının artmasından ziyade kademeli olarak düşmesi daha kabul edilebilir bir durum olarak değerlendirilmektedir. Nitekim sürtünme katsayısının frenleme sırasında artış göstermesi hem balataların aşınmasına hem de karşı disk aşınmasına daha fazla sebebiyet vereceği düşünüldüğünde ekonomiklik açısından da pek arzu edilen bir durum olmadığı değerlendirilmektedir.



Şekil 44. Farklı oranlarda CNSL içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme testinde elde edilen sürtünme katsayılarının disk yüzey sıcaklığıyla değişimi

3.2.3. Optimum Sürtünme Düzenleyici Oranını Belirlemeye Yönelik Genel Değerlendirme

Fiber oranının optimize edilmesi sonrası belirlenen referans bileşim üzerinde reçine oranı azaltılarak yapıya beş farklı oranda CNSL eklenmesiyle elde edilen bileşimler tribolojik ve mekanik açıdan değerlendirilmiştir. Genel olarak bakıldığında CNSL katkısının referans bileşimin gerek mekanik gerekse de tribolojik özelliklerini ciddi oranda değiştirdiği görülmüştür. Mekanik açıdan bakıldığında, balataların sertlik ve elastisite modülü değerlerinin CNSL katkısıyla önemli oranda azaldığı ve bu sayede balataların sıkıştırılabilirliğinin arttığı görülmüştür. Ayrıca, nispeten gevrek bir yapıda olan başlangıç bileşiminden üretilen numunenin CNSL katkısı ile birlikte önemli oranda tokluk kazandığı da belirlenmiştir. Bu durum ise sürtünme sırasında ortaya çıkan titreşim ve dengesiz salınım gibi mekanik etkilerin absorbe edilmesi açısından önemli bir kazanım olarak değerlendirilmiştir.

Diğer taraftan CNSL katkısıyla birlikte numunelerin sürtünme katsayısının genel olarak hem aralıklı hem de sürekli frenleme testlerinde düştüğü görülmüştür. Aralıklı frenleme testlerinde yapıya katılan CNSL oranının %3'ten düşük seçilmesi durumunda sürtünme katsayısını azaltıcı yönde etki yaparken, bu değer üzerine çıkıldığında ise sürtünme katsayısını artırıcı bir etki göstermiştir. Ancak CNSL katkısının genel olarak

katkısız bileşime göre sürtünme katsayısını düşürdüğü söylenebilir. Ancak CNSL katkısıyla birlikte aralıklı frenlemelerde elde edilen daha kararlı sürtünme katsayısı değişimi ve düşük aşınma oranı önemli kazanımlar olarak değerlendirilmektedir. Öte yandan, aynı balata bileşimleri, sürekli frenlemelerde elde edilen sürtünme katsayısı değişimleri açısından ele alındığında ise bu durumun biraz daha farklı olduğu görülmektedir. Özellikle düşük oranda CNSL katkısı içeren bileşimlerde sürtünme katsayısının 150 °C disk sıcaklığına kadar düştüğü görülürken, bu değerden sonra ise artma eğilimi göstermiştir (Şekil 44). Bu durumun ise balata uygulamaları açısından arzu edilmediği bilinmektedir. Yüksek oranda CNSL katkısı içeren balata bileşimlerinde ise bu durumun biraz farklı olduğu ve sıcaklığın artmasıyla birlikte bir miktar yükselmiş olan sürtünme katsayısının sıcaklığın daha da artmasıyla birlikte azaldığı dikkati çekmektedir. Bu kapsamda hem mekanik ve hem de tribolojik özellik değişimleri açısından bakıldığında %5 CNSL (CN-5) oranına sahip bileşimin sonraki süreçlerde gelişime açık en iyi bileşim olarak değerlendirilmiştir. Çünkü bu bileşimden üretilen numuneler nispeten daha düşük elastisite modülü ve yüksek aşınma direnci ile CNSL içeren bileşimler içinde en yüksek sürtünme katsayısına sahiptir.

3.3. Optimum reçine oranının belirlenmesi

Bir önceki optimizasyon çalışmaları sırasında yapıya sürtünme düzenleyici olarak ilave edilen CNSL katkısı balata örneklerinin elastisite modülü, sertlik ve sıkıştırılabilirlik gibi mekanik özellikleri üzerinde olumlu bir etki oluşturmuş ve TYO-2 bileşimine sahip balatalarda karşılaşılan performans problemleri büyük oranda ortadan kaldırılmıştır. Ancak CNSL katkısıyla birlikte TYO-2 bileşimine sahip balata örneklerinin sürtünme karakterinin de değiştiği görülmüştür. Matris yapıdaki CNSL miktarı artırıldıkça balataların aşınma oranları ciddi oranda düşerken sürtünme katsayısı önce 0,13 seviyelerine kadar azalmış ve sonrasında artan CNSL oranıyla 0,18 seviyesine kadar tekrar yükselmiştir. TYO-2 bileşimine sahip balata örnekleriyle kıyaslandığında, aşınma kayıpları açısından oldukça önemli bir kazanım sağlanmış olsa da mekanik ve tribolojik açıdan değerlendirildiğinde optimum CNSL oranına sahip balata bileşiminin (CN-5) bile sürtünme katsayısının 0,20 seviyesinin altında elde edilmiş olması balataların demiryolu uygulamalarında kullanılabilirliği açısından önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Söz konusu uygulamalarda kullanılan K tipi balataların sürtünme katsayısının 0,25-0,30 aralığında olması gerekliliği

göz önünde bulundurulursa, optimum CNSL bileşimine sahip (CN-5) balata karışımının sürtünme katsayısının artırılması gerektiği görülmüştür. Bu yüzden çalışmanın bu aşamasında bir önceki süreçte optimize edilen bileşimdeki (CN-5) balataların sahip olduğu olumlu performans çıktılarını kötüleştirmeden ortalama sürtünme katsayısını artırmaya yönelik sistematik bir çalışma yürütülmüştür. Bu kapsamda ilk olarak yapıya farklı bir bileşen ilave etmek yerine, balata karışımının elastik davranışını iyileştirilmesinin sürtünme katsayısını da artırabileceği üzerinden gidilmiştir. Nitekim CNSL oranının optimize edildiği çalışmalarda balataların elastik davranışının iyileştirilmesinin (elastisite modülünün azalması), 0,13 seviyelerinde elde edilen ortalama sürtünme katsayısını tekrardan 0,18 seviyesine kadar artırdığı belirlenmiştir. Bu durum göz önünde bulundurulmuş ve bir önceki işlemlerle belirlenmiş optimum özelliklere sahip balata bileşiminin (CN-5) elastisite modülünün daha da düşürülmesi ve bu sayede sürtünme katsayısına artırılma ihtimali değerlendirilmiştir. Bunun için elastisite modülünü değiştirecek en önemli etkinin matris yapıdaki fenolik reçine miktarının değiştirilmesiyle sağlanacağı düşünülmüş ve reçine oranı üzerinde bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda CN-5 bileşiminde %15 oranında bulunan toz reçine oranı azaltılarak dört farklı bileşim (Tablo 5) elde edilmiş ve bunların sürtünme katsayısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu sırada yalnızca yapıdaki dolgu bileşeni olan barit miktarı ağırlıkça aynı oranlarda artırılarak bileşim dengelenmiştir.

Tablo 5. Farklı oranlarda reçine içeren balata bileşimleri

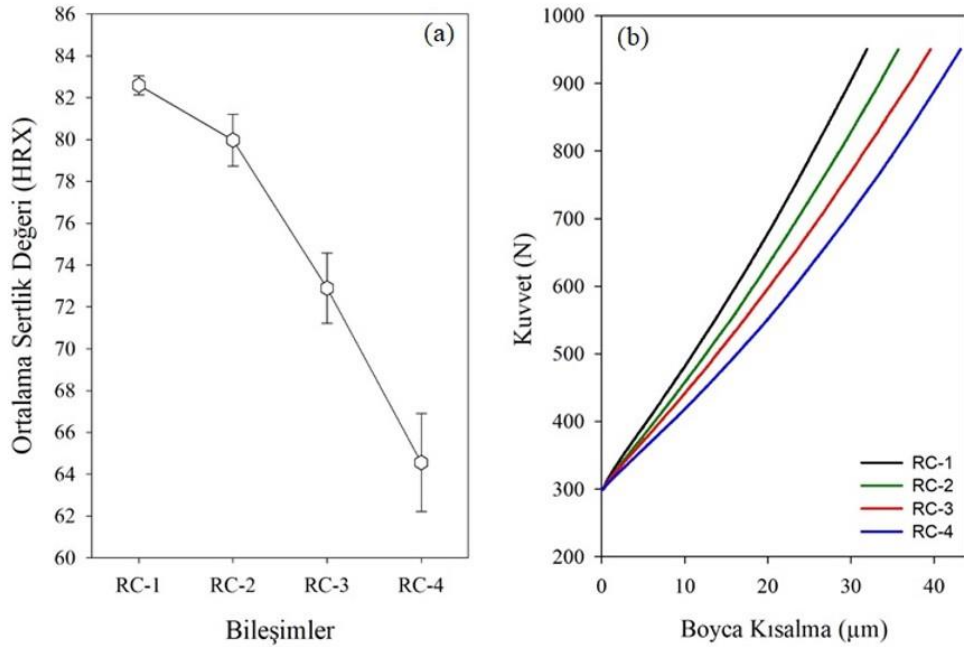
Kullanılan Katkı Bileşenleri	Bileşim kodları / katkı oranları (% ağı.)			
	(CN-5) RC-1	RC-2	RC-3	RC-4
Taş Yünü Fibri	35	35	35	35
Fenolik Toz Reçine	15	13	12	11
CNSL	5	5	5	5
Barit	30	32	33	34
Manyetit	5	5	5	5
Grafit	7	7	7	7
Kevlar	3	3	3	3

3.3.1. Reçine Oranının Balata Numunelerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi

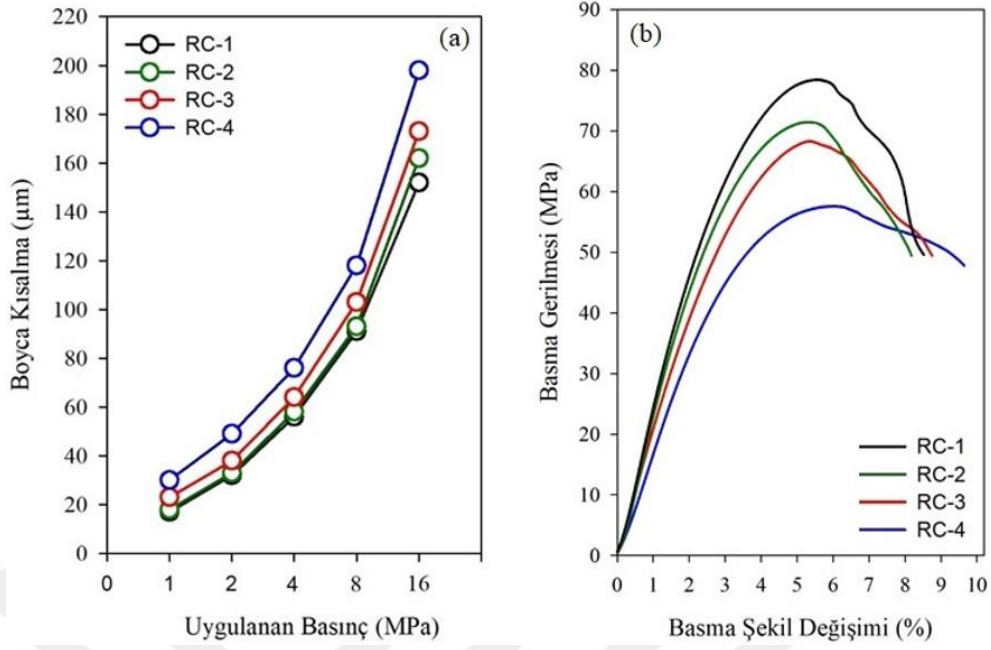
Farklı oranlarda toz reçine katkısı yapılarak hazırlanan kompozit balata örneklerinin bazı temel mekanik özellikleri Şekil 45, Şekil 46 ve Tablo 6'da verilmiştir. Reçine optimizasyonu için seçilen başlangıç bileşimine sahip balataların (CN-5) yapısında ağırlıkça %15 oranında bulunan toz reçine miktarı önce %13'e ardından ise sırasıyla %12 ve %11'e düşürülmüştür. Bu seçim ön çalışmalar, bilimsel/teknolojik ön görüşler ve mevcut literatür birikimi esas alınarak belirlenmiştir. Yapıdaki fenolik reçine oranının değiştirilmesi RC-1 (CN-5) kodlu bileşimin sahip olduğu mekanik özellikleri büyük oranda değiştirmiştir. Şekil 45(a)'da reçine miktarının numunelerin sertlik değerleri üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Matris yapıdaki reçine miktarının azalmasına bağlı olarak balataların sertlik değerlerinin de önemli oranda azaldığı görülmektedir. Ortalama sertlik değeri, %15 toz reçine içeren RC-1 bileşimi için 82,6 HRX olarak ölçülürken, bu değer RC-2 (%13), RC-3 (%12) ve RC-4 (%11) bileşimlerine sahip numuneler için sırasıyla 79,8 HRX, 72,9 HRX ve 64,5 HRX olarak elde edilmiştir. Ayrıca, reçine miktarı azaldıkça balataların sertlik değerlerinde görülen standart sapmanın (saçılım değerlerinin) da arttığı belirlenmiştir. Yüksek reçine oranına sahip bileşimlerde daha homojen bir sertlik dağılımı mevcutken, reçine miktarının azalmasıyla birlikte sertlik dağılımı homojenitesi de bozulmaktadır (Şekil 45 (a)). Ortalama sertlik ve standart sapma değerlerinde görülen bu değişim büyük oranda reçinenin bağlayıcılık etkisinin zayıflamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim matris yapıdaki reçine miktarı azaldıkça yapıdaki çapraz bağ oluşumunu sağlayan sertleştirici ajan miktarının da azalmış olması reçinenin bağlayıcılık etkilerinin azalmasında etkili olmuştur [47, 120, 121].

Balataların elastisite modülü değerleri incelendiğinde ise sertlik değerlerindeki değişime benzer bir durumun ortaya çıktığı görülmektedir (Tablo 6). Şekil 45 (b)'de verilen yükleme-boyca kısalma eğrileri incelendiğinde, matris yapıdaki reçine oranına bağlı olarak elastisite modülü değerlerinde beklendiği gibi bir trend ortaya çıkmış ve numunelerin önemli oranda esneklik kazandığı görülmüştür. Nitekim RC-1 bileşiminde 1293 MPa olarak elde edilen ortalama elastisite modülü değeri azalan reçine oranıyla birlikte azalarak RC-4 bileşimine sahip numunelerde 951 MPa olarak ölçülmüştür. Reçine miktarının azaltılmasıyla matris yapının kazanmış olduğu bu elastiklik sıkıştırılabilirlik testlerinde çok daha açık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Şekil 46(a)'da farklı basınçlar altında gerçekleştirilen testlerde numune boylarında meydana gelen kısaltmalar (sıkışma miktarları) verilmiştir. Genel olarak

bakıldığında, reçine miktarı azaldıkça yapının sıkıştırılabilirliğinin önemli oranda arttığı görülmektedir. Bu durum neredeyse bütün basınç değerlerinde aynı şekilde ortaya çıkmıştır. Maksimum basınç (5024 N (16 MPa)) altında RC-1 bileşiminde 152 μm 'lik bir boyca kısalma elde edilirken, reçine miktarının %11'e düşürülmesiyle elde edilen RC-4 bileşiminde bu değer daha da artarak 198 μm 'ye ulaştığı görülmektedir. Şekil 46 (b)'de ise balata numunelerinin basma gerilmesi-basma şekil değiştirme eğrileri karşılaştırılmıştır. Genel olarak bakıldığında, balataların deformasyon karakterinin de yapıdaki reçine oranına bağlı olarak değişiklik gösterdiği söylenebilir. Matris yapıdaki azalan reçine oranıyla birlikte balataların basma dayanımı değerleri de önemli oranda azalmıştır. Nitekim, RC-1 bileşimine sahip balatalar için 76 MPa olarak elde edilen ortalama basma dayanımı RC-2, RC-3 ve RC-4 bileşime sahip balatalarda sırasıyla 67 MPa, 63 MPa ve 58 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 45. (a) Farklı reçine oranına bağlı olarak değişen ortalama sertlik değerleri. (b) Reçine oranlarına bağlı olarak değişen basma elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılan yükleme eğrileri



Şekil 46. (a) Farklı reçine oranlarında ve farklı basınçlar altında elde edilen ortalama boyca kısalma (sıkıştırılabilirlik) değerleri ve (b) farklı reçine oranına sahip bileşimlerden elde edilen basma gerilmesi – basma şekil değişimi eğrileri

Tablo 6. Farklı oranlarda reçine katkısı içeren balata bileşimlerinden üretilen numunelerin sahip olduğu bazı mekanik özellikler

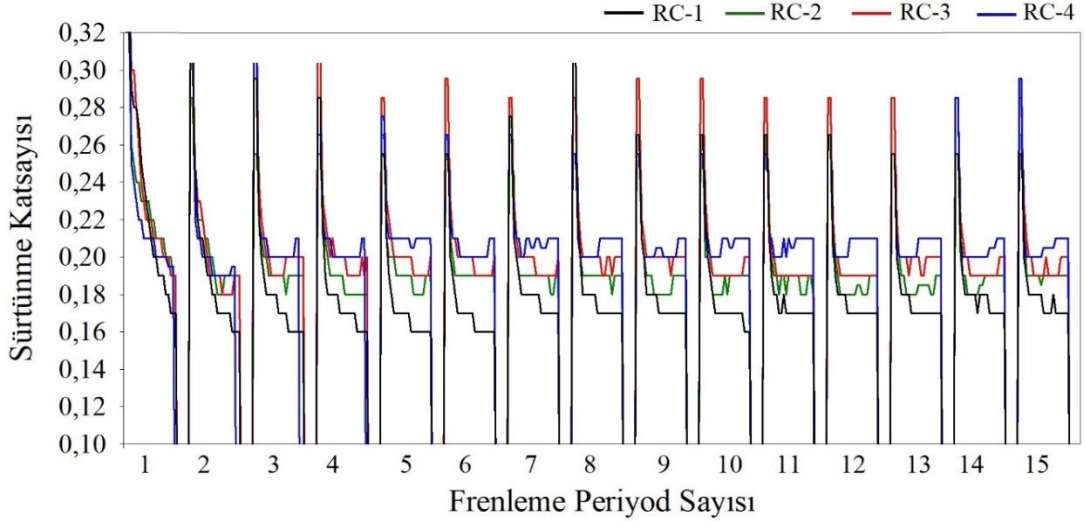
Özellikler	RC-1 (CN-5)	RC-2	RC-3	RC-4	
Sertlik (HRX)	82±0,4	79±1,2	73±2,2	64±2,9	
Basma Dayanımı (MPa)	76±3,5	67,66±1,9	63±2,7	58±3,3	
Elastisite Modülü (MPa)	1293±24	1118±32	1035±38	951±44	
Sıkıştırma Miktarı (μm)	1 MPa	17±0,64	18±0,36	23±0,71	30±0,68
	2 MPa	32±0,28	33±0,44	38±0,65	49±0,7
	4 MPa	56±0,38	56±0,5	64±0,84	76±0,25
	8 MPa	91±0,42	93±0,48	103±0,72	115±0,49
	16 MPa	152±0,36	162±0,32	173±0,65	198±0,95
Hacimsel Boşluk (%)	16,5	18,3	19,2	20,1	

3.3.2. Reçine Oranının Balata Numunelerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi

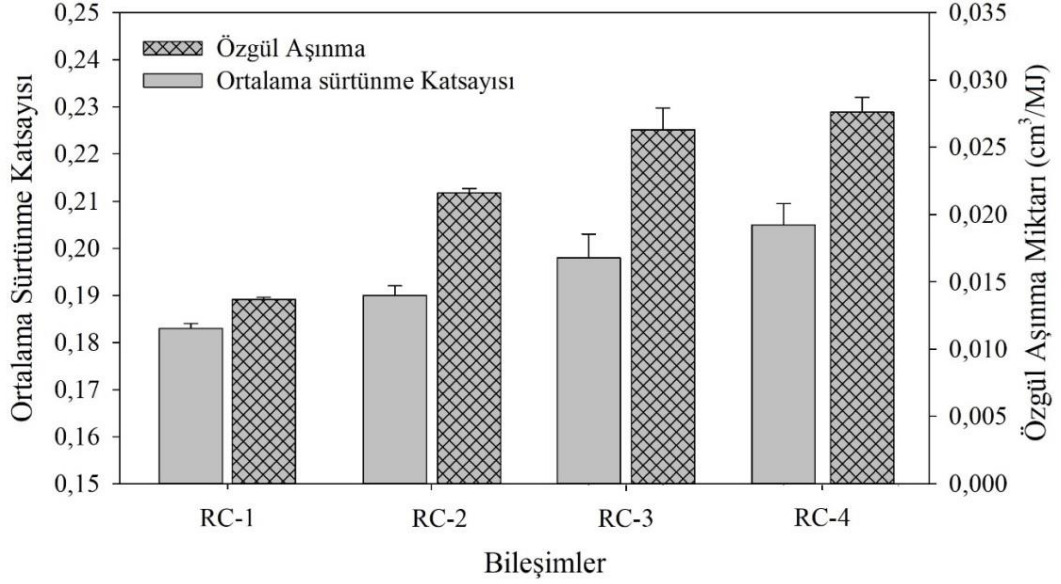
3.3.2.1. Aralıklı Frenleme

Hazırlanan balata bileşimlerinin frenleme periyot sayısına göre sürtünme katsayılarının değişimleri Şekil 47’de verilmiştir. Aralıklı frenleme testinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma oranları ise Şekil 48’de karşılaştırılmıştır. Genel olarak bakıldığında, sürtünme katsayısının matris içerisindeki reçine miktarına bağlı olarak değiştiği söylenebilir. Nitekim, RC-1 (%15 reçine içeriği) bileşimi için ortalama sürtünme katsayısı 15 periyot sonrasında 0,18 olarak belirlenirken, bu değer matristeki reçine miktarının azalmasıyla birlikte lineer bir şekilde artarak RC-4 (%11 reçine içeriği) bileşimine sahip numuneler için yaklaşık olarak 0,21 olarak belirlenmiştir. Ayrıca değişen reçine oranıyla birlikte sürtünme katsayısının kararlılığı da değişiklik göstermiştir. Özellikle frenlemenin ilk periyotlarında RC-1 bileşimine ait sürtünme katsayısının 20 s’lik frenleme boyunca sürekli olarak azaldığı gözlemlenirken, sürtünme katsayısının yedinci frenleme periyodu sonrasında daha stabil hale gelmeye başladığı dikkati çekmektedir. Matris yapı içerisindeki reçine oranı azaldıkça sürtünme katsayısının da daha hızlı kararlı hale geldiği, ancak her bir frenleme periyodu içerisinde daha fazla dalgalanma gösterdiği söylenebilir.

On beş (15) periyotluk aralıklı frenleme sonrasında balata numunelerinde görülen özgül aşınma oranlarına bakıldığında ise sürtünme katsayısına paralel olarak reçine miktarı azaldıkça özgül aşınma oranlarında da bir artış ortaya çıkmıştır. Nitekim RC-1 bileşiminde $0,0135 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ olarak belirlenen özgül aşınma oranı, RC-4 (%11 reçine) bileşimine sahip numunelerde bu değer iki kat artarak $0,026 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ seviyelerinde elde edilmiştir. Yapıdaki reçine miktarının değiştirilmesiyle birlikte sürtünme katsayısında sınırlı bir yükselme elde edilmesine karşın aşınma kayıplarının önemli oranda arttığı dikkati çekmektedir. Bu durum büyük oranda yapıdaki bağlayıcılık etkilerinin zayıflaması neticesinde yapı bütünlüğünün daha kolay bozulmasıyla ilişkilendirilmiştir.



Şekil 47. Farklı oranlarda reçine içeren balata bileşimlerinin sahip oldukları sürtünme katsayısının frenleme periyot sayısına göre değişimi

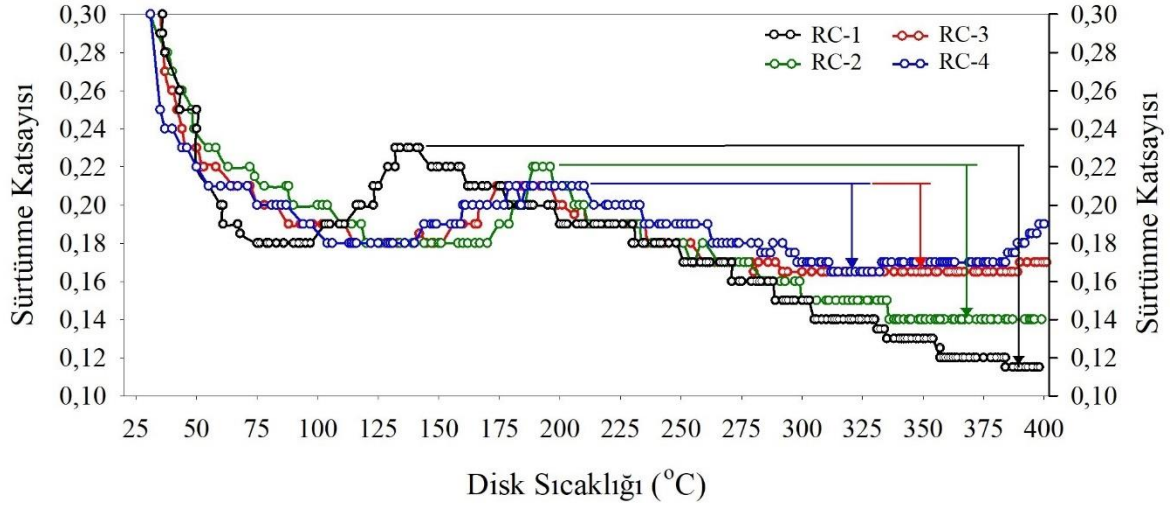


Şekil 48. Farklı oranlarda reçine içeren balata bileşimlerinin aralıklı frenleme testinde elde edilen ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri

3.3.2.2. Sürekli Frenleme

Diğer taraftan bu bileşimler aralıklı frenleme sonrası sürekli frenleme testine de tabi tutulmuş ve sıcaklığın sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda elde edilen sürtünme katsayısı-sıcaklık eğrilerinin balata bileşimiyle değişimi Şekil 49'da

karşılaştırılmıştır. Bu eğriler genel olarak incelendiğinde, sürekli frenleme sırasında sürtünme katsayısının değişiminin bütün bileşimlerde yaklaşık benzer karakter gösterdiği söylenebilir. Sürtünme katsayısı frenlemenin başlarında anlık olarak 0,18 değerine kadar azalmış, sonrasında ise bir artış sürecine girerek farklı maksimum değerlere ulaşmıştır. Ancak, sıcaklığın artmaya devam etmesiyle birlikte bütün bileşimler ulaştıkları bu maksimum sürtünme katsayısı değerlerini koruyamamış ve bu değer tekrardan azalma eğilimine girmiştir. Sıcaklıkla birlikte sürtünme katsayısında görülen bu değişim (düşüş) literatürde “feyd” olarak ifade edilmiştir [10]. Matris yapı içerisindeki reçine miktarı feyd oluşumu da etkilemektedir. Nitekim RC-1 bileşimine sahip balatalarda sürekli frenleme sırasındaki sürtünme katsayısı 125 °C - 150 °C arasında maksimum değerine ($\mu=0,23$) ulaşmışken, disk yüzeyi sıcaklığı 400 °C’ye ulaştığı anda ise önemli oranda azalarak 0,12 seviyelerine kadar gerilemiştir. Ancak, matris yapıdaki reçine miktarının düşürülmesi 400 °C’de elde edilen minimum sürtünme katsayısı değerlerini de artırmıştır. RC-2 bileşimine sahip örneklerde sürtünme katsayısı 400 °C’de 0,14 seviyelerinde ölçülürken, bu değer RC-3 bileşiminde 0,17 olarak elde edilmiştir. Matris yapıya %11 oranında reçine katılarak hazırlanan RC-4 bileşiminde ise diğer bileşimlerden farklı bir durum ortaya çıkmıştır. RC-3 bileşiminde olduğu gibi sürtünme katsayısı 0.17 seviyelerine kadar gerilemiş, ancak bu değer 380 °C sonrasında tekrardan ani bir şekilde artmaya başladığı görülmüştür. Bu durumun yüzeydeki kararlı sürtünme filminin bozulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Matristeki reçine miktarının azaltılmasıyla birlikte 400 °C’de nispeten daha yüksek sürtünme katsayısı değerlerinin elde edilmiş olması sürtünme katsayısında sıcaklıkla ortaya çıkan değişimi (feyd miktarını ($\Delta\mu$)) de azaltmıştır. Nitekim, RC-1 bileşimine sahip balatalar için $\Delta\mu$ değeri 0,11 olarak ölçülürken, bu değer RC-2, RC-3 ve RC-4 bileşimine sahip balata örneklerinde sırasıyla 0,080, 0,045 ve 0,045 olarak belirlenmiştir.

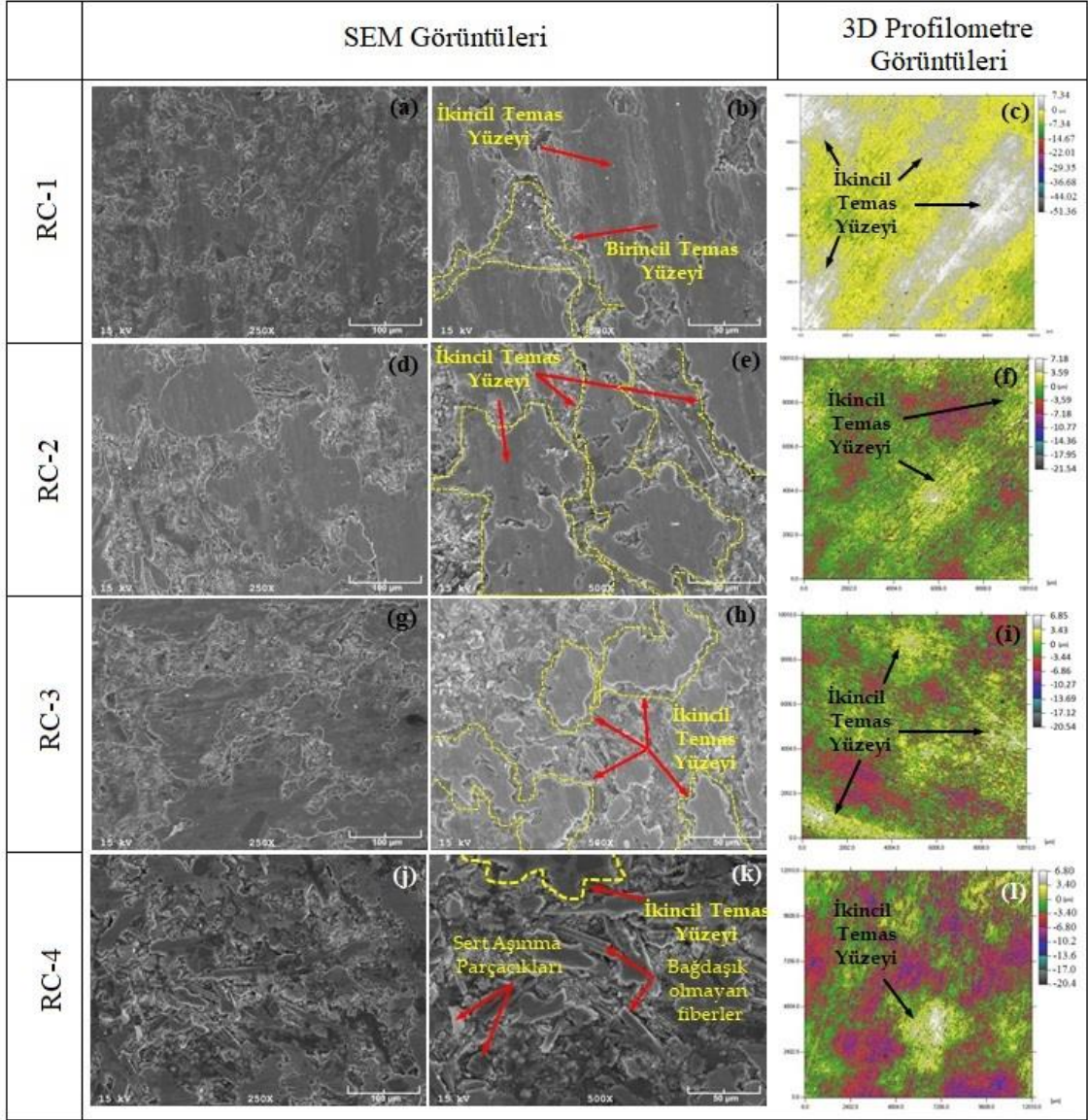


Şekil 49. Farklı oranlarda reçine içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme testinde elde edilen sürtünme katsayılarının disk yüzey sıcaklığıyla değişimi

Sürekli frenleme sonrasında numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve 3D yüzey profilometre görüntüleri Şekil 50'de verilmiştir. Bu görüntüler genel olarak değerlendirildiğinde, aşınma yüzeylerinin farklı morfolojik özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Yüksek oranda reçine içeren RC-1 bileşimine sahip balataların aşınma yüzeylerinin neredeyse tamamının ikincil temas platolarından oluştuğu görülmektedir (Şekil 50 (b), (c)). Bu platoların yüksek sıcaklık etkisi altında eriyen veya bozulan yapıdaki organik bileşenlerin önce karşı disk yüzeyine oradan da tekrardan balatanın aşınma yüzeyine geri transfer olmasıyla oluştuğu düşünülmektedir. Bu oluşumun en etkin gerçekleştiği bileşim RC-1 olarak belirlenmiştir. Bu durum büyük oranda matris yapıdaki yüksek miktardaki reçine varlığından kaynaklanmaktadır. Nitekim matris yapıda bulunan katkı bileşenleri arasında bozunma sıcaklığı düşük olan bileşenlerden birisi de reçine olarak karşımıza çıkmaktadır. RC-1 bileşiminden üretilen numunelerin aşınma yüzeyinin büyük bir kısmında hakim olan ikincil temas platoları aşındırıcı disk ile numunenin asıl yüzeyi (birincil temas yüzeyi) arasında kalarak bir yağlayıcı film etkisi oluşturmaktadır. Ara yüzeyde meydana gelen bu oluşum ise numunelerin sürtünme katsayısını düşürmektedir. Nitekim sürekli frenleme testlerinde disk yüzeyi sıcaklığı 400 °C'ye ulaştığında sürtünme katsayısının 0,12 seviyelerine kadar inmesi bu durumun en önemli göstergesidir. Ayrıca söz konusu ikincil platolar matris ana yüzeyinin disk yüzeyine doğrudan temasını önemli oranda engelleyerek daha düşük seviyelerde kütle kayıplarının ortaya çıkmasında da neden olmaktadır. Nitekim sürekli frenleme sonrası RC-2, RC-3 ve RC-4 bileşimine sahip

balatalarda sırasıyla 0,078, 0,100 ve 0,142 mm'lik boyca kısaltmalar gözlemlenirken, RC-1 numunelerinin boylarında 0,063 mm'lik ortalama değişim elde edilmiştir.

Yapı içerisindeki reçine oranının değiştirilmesi sürtünme yüzeylerinde gözlenen birincil ve ikincil temas platolarının dağılımını da önemli ölçüde etkilemiştir. Nitekim reçine oranı %13'e düşürülmesiyle elde edilen RC-2 bileşimine sahip numunelerin aşınma yüzeyleri RC-1 bileşimiyle kıyaslandığında ikincil temas platoların alansal olarak sürtünme yüzeyinde daha az yer kapladığı görülebilmektedir (Şekil 50 (d), (e)). Bu durumun yapıdaki reçine miktarının daha düşük oranda bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sürtünme yüzeyinde ikincil temas platolarının azalıp birincil temas platolarının artması 400 °C'de elde edilen sürtünme katsayısının daha yüksek elde edilmesinde önemli bir etken olmuştur. Reçine oranının daha da azaltılmasıyla elde edilen RC-3 (%12 reçine) ve RC-4 (%11 reçine) bileşimlerde ikincil plato oluşumunun giderek ortadan kalktığı (Şekil 50 (h), (k)) ve RC-4 bileşiminde neredeyse aşınma yüzeyinin tamamının birincil temas platolarından oluştuğu görülmektedir (Şekil 50 (k)). Sürtünme yüzeyleri arasında yağlayıcı film etkisi yapan ikincil temas platolarının etkinliğini kaybetmesi, sürtünme katsayısının yüksek sıcaklıklarda 0,17 gibi daha yüksek seviyelerde elde edilmesinde etken olmuştur (Şekil 49). Ancak reçine oranının %12 seviyesinin altına düşürülmesi yüksek sıcaklıklarda balatalardaki mekanik bütünlüğün sağlanmasını zorlaştırdığı görülmektedir. RC-4 bileşimine ait sürtünme yüzeyleri detaylı incelendiğinde yüksek sıcaklık etkisiyle bağdaşıklığı bozulmuş veya kırılmış fiberlerin veya diğer katkı bileşenlerinin varlığı dikkati çekmektedir (Şekil 50 (j), (k)). Yapısal bütünlüğün bozulmaya başlamış olması, söz konusu bileşimin sürtünme katsayısının özellikle yüksek sıcaklıklarda tekrardan yükselmesinde etkili olmaktadır. Diğer taraftan bunu doğrulamak için aynı aşınma yüzeylerinde üç boyutlu bir tarama yapılmış ve elde edilen 2D yüzey görüntüleri Şekil 50 (c), (f), (i), (l)'de verilmiştir. Bu görüntülerde de ikincil plato oluşumunun reçine oranı azaldıkça azaldığı ve RC-4 bileşimine ait numune yüzeylerinde neredeyse tümüyle ortadan kalktığı ve yerini birincil temas platolarına bıraktığı açık bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 50. Farklı oranlarda reçine içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme sonrasında aşınma yüzeylerinden alınan SEM ve 2D profilometre görüntüleri: (a)-(c) RC-1, (d)-(f) RC-2, (g)-(i) RC-3 ve (j)-(l) RC-4

3.3.3. Optimum Reçine Oranını Belirlemeye Yönelik Genel Değerlendirme

Yapıdaki reçine oranının değiştirilmesiyle hazırlanan dört farklı bileşimde üretilen balata numuneleri mekanik ve tribolojik özellikler açısından testlere tabi tutularak ortaya koydukları performansları değerlendirilmiştir. Genel olarak bakıldığında, yapıdaki reçine oranının değiştirilmesi balataların hem mekanik hem de tribolojik özelliklerini etkilediği görülmüştür. Bir önceki optimizasyon çalışmaları sırasında en iyi çıktılara sahip olan CN-5 bileşimi bu aşamada başlangıç bileşimi olarak ele alınmış ve RC-1 olarak adlandırılmıştır.

Söz konusu bileşimin yapısındaki yüksek orandaki reçinenin varlığı yapıdaki katkı bileşenlerinin daha sıkı bir şekilde bir arada tutulmasını sağlayarak üretilen balata örneklerinin mekanik açıdan daha yüksek sertlik ve basma dayanımı değerlerine sahip olmasına katkı sağlamıştır. Mekanik dayanım değerlerinin yüksek olması söz konusu balatalara daha düşük esneklik özelliği kazandırmıştır. Bu durum matris yapıdaki reçine oranının azaltılmasıyla birlikte büyük oranda ortadan kaldırılmıştır. Ancak matris yapıdaki reçine oranı azaldıkça bağlayıcılık özelliklerinin zayıflamasından dolayı balata örneklerinin sertlik ve basma dayanım değerleri kademeli olarak düşüş göstermiştir. Özellikle bu değişimin RC-4 bileşime sahip balatalarda daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı belirlenmiştir. Söz konusu bileşimler tribolojik açıdan ele alındığında ise reçine oranının düşürülmesi sahip oldukları sürtünme katsayısı değerlerini hem aralıklı hem de sürekli frenleme testlerinde artırmıştır. Reçine oranı azaldıkça hem elastisite modülü ve sertlik değerleri düşmüş hem de aşınma yüzeyinde ikincil plato oluşumu azalmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde ise yapıdaki reçine oranının azaltılması balatalara mekanik ve tribolojik açıdan bazı kazanımlar da sağladığı söylenebilir. Ancak, reçine oranının %12 seviyesinin altına düşürülmesi durumunda ise balatalarda gerek mekanik ve gerekse de tribolojik açıdan bazı problemlerin ortaya çıkabileceği düşünülmüş ve optimum reçine oranının %12 olarak yapıya katılmasının daha uygun olacağı kararlaştırılmıştır. Çünkü bu bileşim diğer bileşimlere göre nispeten daha düşük bir elastisite modülü (daha yüksek esneklik), daha kararlı ve yüksek bir sürtünme katsayısı ve kabul edilebilir bir aşınma direnci sergilemiştir.

3.4. Optimum Çelik Fiberi Oranının Belirlenmesi

Çalışmanın bu aşmasına kadar gerçekleştirilen üç farklı optimizasyon çalışması sonrasında tribolojik uygulamalar açısından kabul edilebilir mekanik özelliklere ve yaklaşık 0,20 seviyesinde ortalama sürtünme katsayısına sahip olan RC-3 kodlu bir balata bileşimi ortaya koyuldu. Bu bileşimde, %35 taş yünü, %12 fenolik toz reçine, %5 CNSL, %33 barit, %5 manyetit, %7 grafit ve %3 oranında kevlar bulunmaktadır. Ancak, sürtünme katsayısının 0,25 seviyesinin altında kalması bu bileşimin hala geliştirilmesi gereğini ortaya çıkarmaktadır. Bu yüzden çalışmanın bu aşamasında söz konusu bileşimin sürtünme katsayısının artırılmasına yönelik bir çalışma planlanmıştır. Bu kapsamda sürtünme katsayısında sağlanması düşünülen artış, matris yapıya ilave bir katkı maddesi eklenmeden grafit, Kevlar ve manyetit gibi bileşenlerin oransal dağılımları değiştirilerek sağlanabilir.

Ancak, sürtünme katsayısı artışıyla birlikte mevcut yapının termal iletkenliğinin de iyileştirilmesi balata performansı açısından daha olumlu sonuçları ortaya çıkarabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle kompozit esaslı balataların termal iletkenliğini artıran katkı bileşenleri araştırılmıştır. Mevcut literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ise bu etkinin genel olarak farklı formlardaki (granül veya fiber formunda) metal esaslı bileşenlerle sağlandığı görülmüştür [122, 123]. Bu katkı bileşenlerinin ise genelde alüminyum, bakır ve demir esaslı malzemelerden oluştuğu belirlenmiştir. Matris yapıda tercih edilen bu metalik katkıların türüne göre sürtünme-aşınma performansı açısından avantaj veya dezavantajlar oluşabilmektedir. Fakat literatürde, kompozit esaslı ve düşük metal katkılı organik balataların yapısında alüminyum esaslı katkı bileşenlerinin kullanıldığı sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bu durum, Al esaslı bileşenlerin sağlayacağı avantaj ve dezavantajların önceden öngörülebilmesini zorlaştırmaktadır. Balata yapısında tercih edilen bakır esaslı bileşenlerin ise önemli kazanımlar sağladığı belirlenmiştir [118]. Ancak, bakırın çevreye verdiği zararlı etkiler nedeniyle günümüzde balata uygulamalarında çok fazla tercih edilmediği görülmüştür.

Günümüz taşıtlarındaki fren sistemlerinde genel olarak demir esaslı fren disklerinin tercih ediliyor olması demir esaslı katkı bileşenlerinin de balata yapısında kullanımını artırmıştır. Demir esaslı bileşenlerin balataların termal iletkenliğini artırdığı ve bu sayede yüksek sıcaklıklarda dahi kararlı bir sürtünme katsayısının ortaya çıkmasında önemli bir etkiye sahip olduğu yapılan çalışmalarla ortaya koyulmuştur [34, 122, 123]. Ancak bu katkıların karşı disk (fren diski) ile aynı malzeme grubundan olması disk aşınmasını da artırıcı bir etki yapmaktadır [36, 124]. Bu olumsuz durum demir esaslı katkıların sağladığı olumlu etkilerin yanında göz ardı edilmekte ve günümüzde kompozit esaslı balataların yapısında bu tür katkılar kullanılmaktadır. Bu çalışmada da literatürdeki bu gelişmeler göz önünde bulundurulmuş ve mevcut balata bileşiminin yapısına düşük karbonlu ve lif formunda bir çelik fiberinin katılması kararlaştırılmıştır. Bu süreçte mevcut matris yapıya çelik fiberi ilavesi yapılarak yapının toplam fiber oranını artırmak yerine, yapıdaki taş yünü oranı azaltılıp yerine aynı oranda çelik fiber katkısı yapılarak hibrit bir yapının oluşturulması planlanmıştır. Günümüzde ticari olarak üretilen metal katkılı ve kompozit esaslı organik balataların yapısında %10 ile %30 arasında metal esaslı katkı bulunmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurulmuş ve çalışmanın bu aşamasında mevcut yapıya ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 olmak üzere dört farklı oranda çelik fiber katkısı yapılmıştır (Tablo 7). Bu sırada mevcut yapıdaki taş yünü de aynı oranda azaltılarak sırasıyla %30, %25, %20 ve %15'e

düşürülmüş ve bu sayede toplam fiber oranının bütün bileşimlerde optimum fiber oranında (%35) kalması sağlanmıştır. Bu iki bileşen dışındaki diğer bütün katkıların yapıdaki oranlarında değişiklik yapılmamış ve bütün bileşimlerde aynı kalması sağlanmıştır. Hazırlanan bu dört farklı bileşim bu aşamada diğer optimizasyon çalışmalarında olduğu gibi mekanik ve tribolojik açıdan kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Tablo 7. Geliştirilen balata malzemesi bileşimine katılan elik fiberi oranları

Kullanılan Katkı Bileşenleri	Bileşim kodları / katkı oranları (% aę.)				
	RC-3 (SF-0)	SF-1	SF-2	SF-3	SF-4
Taş Yünü Fiberi	35	30	25	20	15
elik Yünü Fiberi	0	5	10	15	20
Fenolik Toz Reçine	12	12	12	12	12
CNSL	5	5	5	5	5
Barit	33	33	33	33	33
Manyetit	5	5	5	5	5
Grafit	7	7	7	7	7
Kevlar	3	3	3	3	3

3.4.1. elik Fiberi Oranının Balata Numunelerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi

elik fiberi katkısı içeren ve içermeyen balata örneklerine uygulanan temel mekanik testlerden elde edilen bulgular şekil 51, şekil 52 ve Tablo 8’de verilmiştir. Genel olarak bakıldığında, yapıya eklenen farklı oranlardaki elik fiberi katkısıyla birlikte matris yapıdaki toplam fiber oranı değişmemesine rağmen numunelerin mekanik özelliklerinin büyük oranda değiştiği görülmüştür. şekil 51 (a)’da elik fiberi oranının balata örneklerinin ortalama sertlik değerleri üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Buna göre, başlangıç (RC-3 (SF-0)) bileşim yapısına farklı oranda katılan elik fiberi, numunelerin ortalama sertlik değeri üzerinde kayda değer bir etki oluşturmuştur. Başlangıç RC-3 bileşimi için 73 HRX olarak elde edilen ortalama sertlik değeri, matris yapıya eklenen %5’lik elik fiberi katkısı (SF-1) sonrasında 78 HRX olarak ölçülmüştür. Ancak elik fiberi oranın %5’in üzerine çıkarılmasıyla sertlik değerlerinde görülen bu artış trendi devam etmemiş ve balataların ortalama sertlik değerleri artan elik fiberi oranıyla birlikte azalmaya başlamıştır. Nitekim %10 (SF-2), %15 (SF-3)

ve %20 (SF-4) çelik fiberi katkısı içeren balata bileşimlerinde ortalama sertlik değerleri sırasıyla 74 HRX, 68 HRX ve 62 HRX olarak elde edilmiştir (Tablo 8). Sertlik değerlerinde ortaya çıkan bu azalma çelik fiberi katkısıyla birlikte artan hacimsel boşluk oranıyla ilişkilendirilmiştir. Nitekim hacimsel boşluk değeri başlangıç RC-3 bileşimi için %19,2 olarak ölçülmüş, ancak bu değer bileşime %20 oranında katılan çelik fiberi katkısı sonrası %28,8 olmuştur.

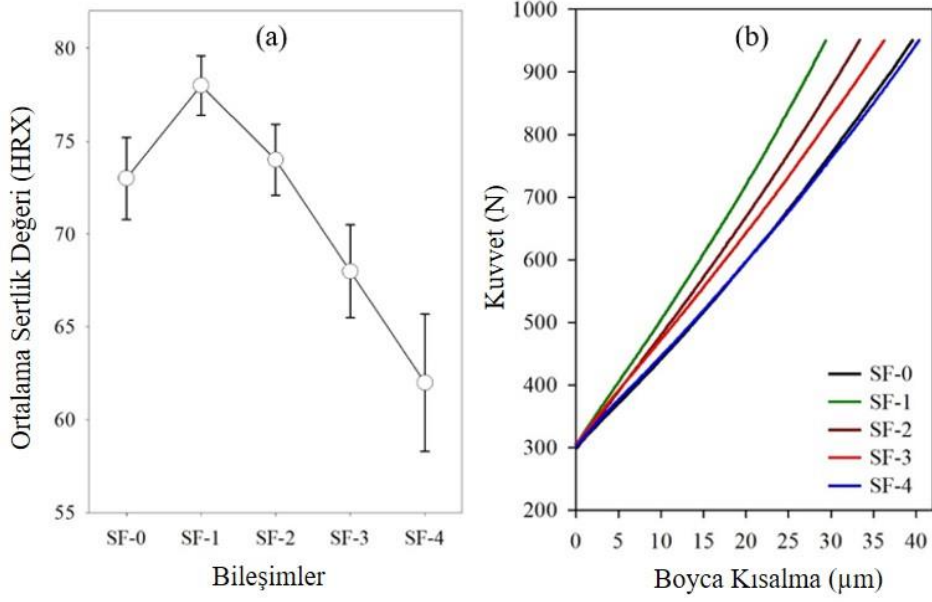
Öte yandan, yapı içerisindeki çelik fiberi oranının artırılmasıyla birlikte sertlik değerinde görülen saçılımın da (standart sapma) ciddi oranda arttığı dikkati çekmektedir (Şekil 51 (a)). Bu durumun ise büyük oranda matris yapıdaki çelik fiberinin dağılımından kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim sertlik ölçümlerinin yapıldığı noktalarda çelik fiberlerinin daha yoğun bulunması durumunda sertlik değerlerinin daha yüksek elde edildiği gözlemlenirken, aksi durumda daha düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. Bu durum ise artan çelik fiberi oranıyla birlikte daha belirgin şekilde ortaya çıkmıştır.

Çelik fiberi katkısının balataların elastisite modülü değerleri üzerindeki etkisi de araştırılmış ve elastik bölgede yük altında numune boylarında meydana gelen değişimler elde edilmiştir (Şekil 51 (b)). Genel olarak bakılırsa, numunelerin elastik davranışının da çelik fiberi katkısıyla birlikte ciddi oranda değiştiği görülmektedir. Nitekim, %5'lik çelik fiberi katkısı içeren SF-1 bileşimine sahip balata numunelerinin ortalama elastisite modülü değeri, çelik fiberi katkısı içermeyen (RC-3) balata numuneleriyle kıyaslandığında önemli oranda arttığı görülmektedir (Tablo 8). Ancak, çelik fiberi katkısının bu değer üzerine çıkarılması durumunda elastisite modülü değerlerinin artmaya devam etmediği ve aksine düşmeye başladığı dikkat çekmektedir (Tablo 8). Düşük oranlarda çelik fiberi katkısıyla elastisite modülü değerlerinin artması büyük oranda çelik fiberinin daha yüksek elastisite modülüne sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak bu katkının %5'in üzerinde çıkması durumunda bu değer azalmaya başlaması ise yapıdaki artan hacimsel boşluk oranıyla ilişkilendirilmiştir.

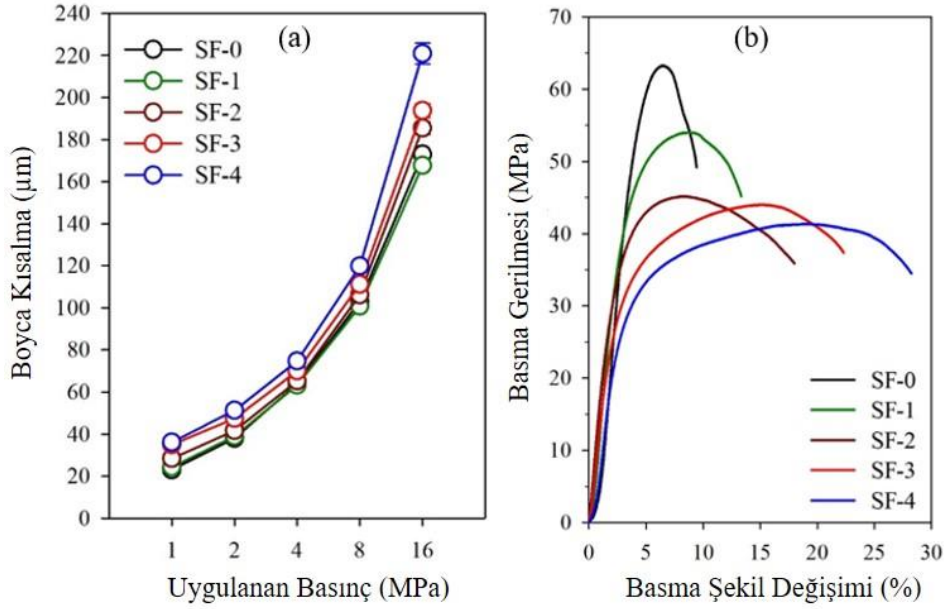
Çelik fiberi katkısının balataların sıkıştırılabilirlik özelliği üzerindeki etkisi de araştırılmış ve elde edilen bulgular Şekil 52 (a)'da verilmiştir. Çelik fiberi katkısıyla birlikte artan hacimsel boşluk değerleri sıkıştırılabilirlik değerlerinin de değişmesine neden olmuştur. Burada sertlik ve elastisite modülü değerlerinde görülen değişimin tersi bir durum ortaya çıkmaktadır. %5 çelik fiberi katkısıyla bileşimin sıkıştırılabilirlik değeri bir miktar düşerken, artan çelik fiberi oranıyla bu değer tekrar yükselmektedir. Nitekim SF-0 bileşimi için 16 MPa'lık maksimum basınç altında 173 μm olarak elde edilen sıkıştırılabilirlik değeri

%5 oranında çelik fiberi katkısı sonrasında 169 μm olarak elde edilirken, çelik fiber oranı %20'ye çıktığında bu değer 218 μm 'ye kadar yükselmektedir. Yüksek basınç değerleri altında daha belirgin olarak ortaya çıkan bu değişim bileşimin elastik davranışındaki değişime dayandırılarak açıklanabilir. %5 çelik fiberi katkısı bileşimin elastisite modülünü artırmakta ve bu durum doğal olarak sıkıştırılabilirliği düşürmektedir. Devamında ise artan çelik fiberi oranıyla numunelerin elastisite modülleri de azalmakta ve bu azalma bileşimlerin sıkıştırılabilirlik değerlerini artırmaktadır.

Farklı çelik fiberi oranlarının bileşimin basma davranışı üzerindeki etkisi de incelenmiş ve elde edilen basma gerilmesi-basma şekil değişimi eğrileri Şekil 52 (b)'de verilmiştir. Genel olarak bakıldığında, çelik fiberi katkısıyla birlikte balataların deformasyon karakterlerinde çok ciddi değişiklik olduğu görülmektedir. Artan çelik fiberi katkısıyla birlikte balata numunelerinin hasara uğradıkları maksimum dayanım değerlerinin düştüğü görülmektedir. Nitekim çelik fiberi katkısı içermeyen RC-3 bileşiminin ortalama basma dayanımı değeri 63 MPa civarında iken, yapıya eklenen %5, %10, %15 ve %20 çelik fiberi katkısı sonrası ortalama basma dayanımı değeri sırasıyla 53 MPa, 45 MPa ve 41 MPa olarak ölçülmüştür. Bu düşüş çelik fiberinin matris yapıya olan bağlanma davranışına dayandırılarak açıklanabilir. Çünkü bileşime eklenen çelik fiberi oranı yapıdaki taş yünü fiber oranı azaltılarak dengelenmektedir. Yapıdaki taş yününün matris yapıyla olan bağının daha iyi olduğu ve dolayısıyla çelik yünü ile birlikte bu bağın zayıfladığı düşünülmektedir [21]. Öte yandan taş yünü ile çelik fiberi arasındaki önemli bir yoğunluk farkı bulunmaktadır. Taş yününün yoğunluğu 2,4 gr/cm^3 iken çelik fiberinin yoğunluğu 7,8 gr/cm^3 civarındadır. Dolayısıyla oluşturulan bileşimlerin birim hacimlerinde kütleli olarak aynı olmasına rağmen hacimsel olarak çok daha az çelik fiberi bulunmaktadır. Bu ise bileşimin özellikle basma dayanımının azalmasına katkı sağlamaktadır. Ancak, artan oranlardaki çelik fiberi katkısıyla birlikte balataların maksimum dayanım değerleri düşse de matris yapı önemli ölçüde tokluk kazanmaktadır (Şekil 52 (b)). Nitekim çelik fiberi katkısız bileşimlerde (RC-3) %10 civarında elde edilen basma şekil değişimi değeri, çelik fiberi katkısıyla önemli oranda artarak SF-1, SF-2, SF-3 ve SF-4 bileşimine sahip numuneler için sırasıyla %13, %17, %22 ve %28 olarak elde edilmiştir. Bu durum büyük oranda yapıya katılan fiberlerin geometrik yapısıyla ilişkilendirilebilir. Nitekim yapıya katılan taş yünü fiberleri 0,5-1 mm aralığında bir boy değişime sahipken, çelik fiberi 2-3 mm aralığında bir boy değişimi göstermektedir (Şekil 10). Bu durum ise çelik fiberlerin basma sırasında yapının daha uzun bir süre bütünlüğünü korunmasına katkı sağladığını göstermektedir.



Şekil 51. (a) Farklı çelik fiberi oranına bağlı olarak değişen ortalama sertlik değerleri. (b) Çelik fiberi oranlarına bağlı olarak değişen basma elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılan yükleme eğrileri



Şekil 52. (a) Farklı çelik fiberi oranlarında farklı basınçlar altında elde edilen ortalama boyca kısılma (sıkıştırılabilirlik) değerleri ve (b) farklı çelik fiberi oranına sahip bileşimlerden elde edilen basma gerilmesi – basma şekil değişimi eğrileri

Tablo 8. Farklı oranlarda çelik fiberi katkısı içeren balata bileşimlerinden üretilen numunelerin sahip olduğu bazı mekanik özellikler

Özellik	SF-0 (RC-3)	SF-1	SF-2	SF-3	SF-4	
Sertlik (HRX)	73±2,2	78±1,6	74±1,9	68±2,5	62±3,7	
Basma Dayanımı (MPa)	63±2,7	53±1,1	45±1,3	43±1,4	41±1,2	
Elastisite Modülü (MPa)	1035±38	1452±24	1242±35	1120±29	1055±21	
Sıkıştırma Miktarı (µm)	1 MPa	23±0,71	21±1,0	27±0,7	34±1,2	36±1,3
	2 MPa	38±0,65	36±0,92	41±0,43	47±1,3	51±1,6
	4 MPa	64±0,84	62±0,76	64±0,40	70±1,9	74±1,5
	8 MPa	103±0,72	101±0,9	104±0,87	109±1,5	119±1,8
	16 MPa	173±0,65	169±0,78	183±1,0	194±2,4	218±2,1
Hacimsel Boşluk (%)	19,2	21,6	24,02	26,44	28,86	

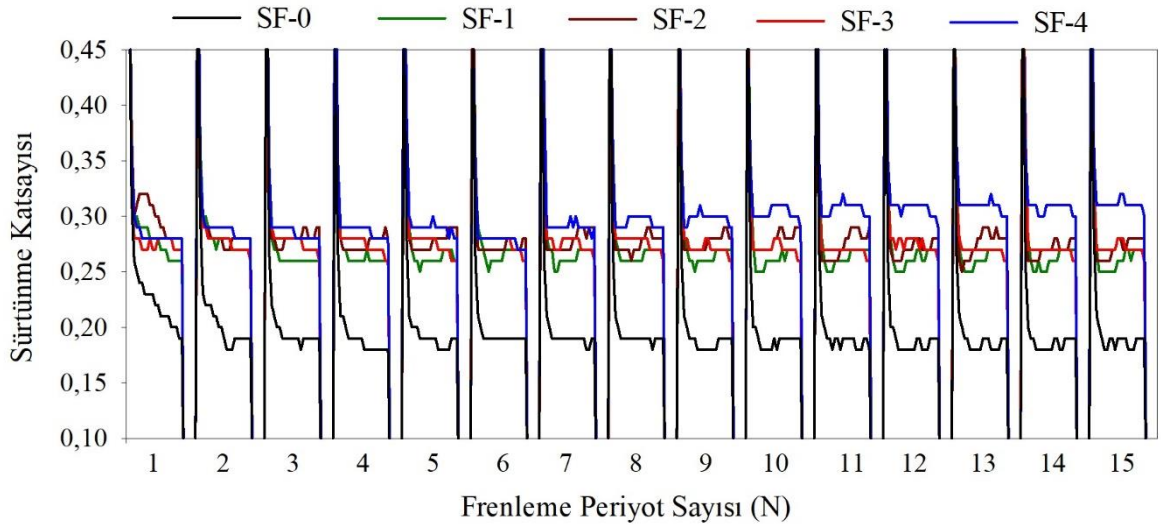
3.4.2. Çelik Fiberi Oranının Balata Numunelerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi

3.4.2.1. Aralıklı Frenleme

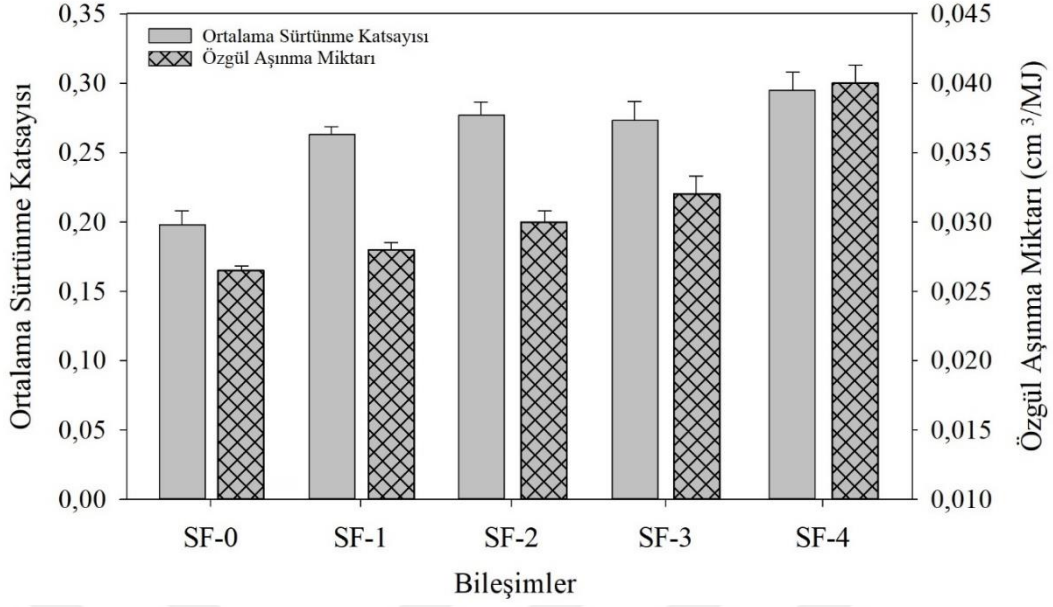
Çelik fiberi katkısı içeren veya içermeyen balata örneklerinin aralıklı frenleme testinde elde edilen sürtünme katsayılarının frenleme periyot sayısına göre değişimleri Şekil 53'te verilmiştir. Şekil 54'te ise bu testlerden elde edilen ortalama sürtünme katsayıları ve özgül aşınma miktarları karşılaştırılmıştır. Genel olarak bakıldığında, matris yapıya eklenen çelik fiberi katkısıyla birlikte numunelerin sürtünme katsayılarının önemli oranda değiştiği görülmektedir. Nitekim çelik fiber katkısı içermeyen RC-3 bileşimine sahip balatalar için ortalama sürtünme katsayısı 0,20 civarında elde edilirken, bu değer %5'lik çelik fiberi katkısı sonrası önemli oranda artış göstermiş ve SF-1 bileşimine sahip numuneler için yaklaşık 0,27 seviyelerinde ölçülmüştür. Ancak bu değer üzerindeki çelik fiberi katkıları bileşimin sürtünme katsayısında dikkate değer bir artışa neden olmamış ve yaklaşık aynı değerini korumuştur. SF-2 (%10), SF-3 (%15) ve SF-4 (%20) bileşimlerinden üretilen numuneler için ortama sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0,28, 0,27 ve 0,29 olarak ölçülmüştür. Çelik fiberi katkısıyla birlikte numunelerin sürtünme katsayısında %35-%40 aralığında bir artış sağlanırken, sürtünme katsayısının değişim stabilitesi de 15 periyot boyunca korunmuştur. Ayrıca her bir frenleme periyodu içerisinde de (20 s frenleme süresince) sürtünme katsayısının değişim kararlılığının artan çelik fiberi oranıyla birlikte

arttığı da belirlenmiştir. Sürtünme katsayısında görülen bu kararlı değişimin çelik fiberi oranıyla artan termal iletkenlikten kaynaklanmış olduğu söylenebilir. Nitekim termal iletkenlik değeri çelik fiber içermeyen RC-3 bileşimine sahip balatalar için 1,13 W/mK seviyelerinde ölçülürken, bu değer %20 oranında çelik fiberi katkısıyla birlikte önemli oranda artarak 2,54 W/mK seviyelerine kadar ulaşmıştır. Termal iletkenliğin artmasıyla birlikte sürtünme yüzeyinde oluşan ısının hızlı bir şekilde balata içerisine ve yüzeylerden de dışarı doğru transfer olması sağlanarak frenleme süresince daha iyi bir ısıl kararlılığın ve dolayısıyla daha kararlı bir sürtünme katsayısı değişiminin sağlandığı söylenebilir.

Diğer taraftan 15 periyot şeklinde uygulanan aralıklı frenleme sonrasında ortaya çıkan aşınma kayıplarına bakıldığında ise sürtünme katsayısının aksine kayda değer bir değişimin olmadığı söylenebilir. Ancak çelik fiberi oranının %20'ye çıkarılması durumunda aşınma kaybının çelik fiberi içermeyen bileşime göre az da olsa arttığı dikkati çekmektedir (Şekil 54). Bu artışın büyük oranda balataların zayıflayan mekanik dayanımlarıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Nitekim artan çelik fiber oranıyla birlikte matris yapının sertlik, elastisite modülü ve basma dayanımı değerleri azalmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, artan çelik fiberi oranıyla özgül aşınma değerlerinde çok az bir artış görülse de, bu değerlerin çelik fiberi içeren bütün bileşimlerde $0,050 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ seviyesinin altında kalması bu bileşimlerden üretilen balataların demir yolu uygulamalarında kullanılabilirliği açısından kabul edilebilir gözükmektedir.



Şekil 53. Farklı oranlarda çelik fiberi içeren balata bileşimlerinin sahip oldukları sürtünme katsayılarının frenleme periyot sayısına göre değişimi

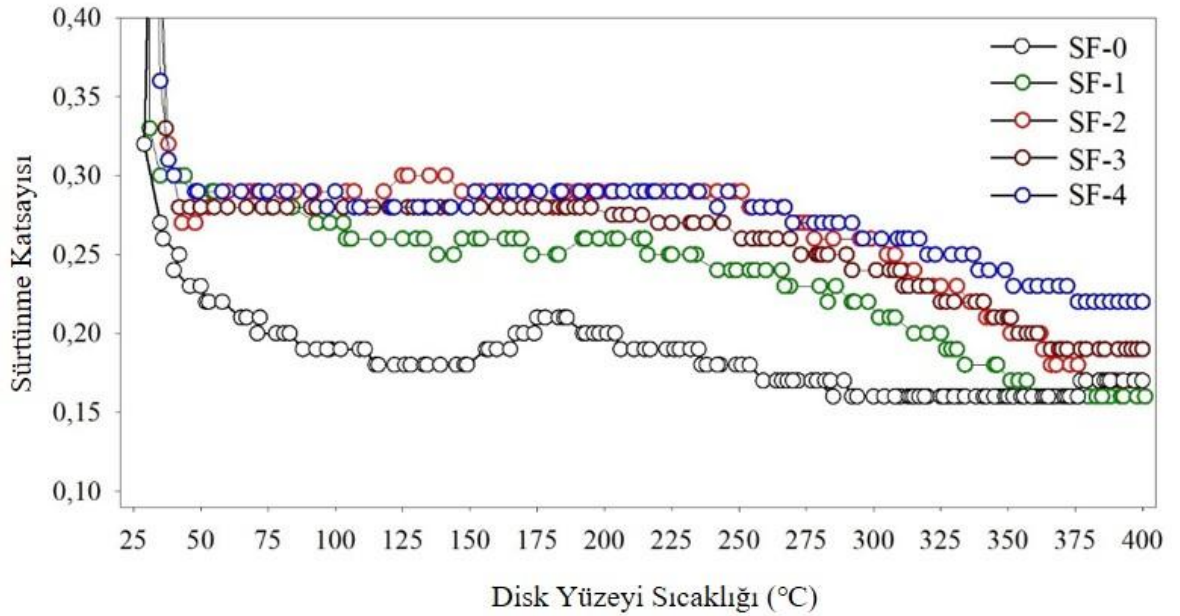


Şekil 54. Farklı oranlarda çelik fiberi içeren balata bileşimlerinin aralıklı frenleme testinde elde edilen ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri

3.4.2.2. Sürekli Frenleme

Çelik fiberi katkılı veya katkısız bütün bileşimlere aralıklı frenleme sonrasında sürekli frenleme testi (drag test) uygulanmış ve sürtünme katsayısı ile sıcaklık arasındaki ilişki ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Söz konusu bileşimler için sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimini gösteren eğriler Şekil 55'te verilmiştir. Genel olarak bakıldığında, sürtünme katsayısının çelik fiberi katkısıyla birlikte sürekli frenleme testlerinde de önemli oranda değiştiği görülmektedir. Nitekim çelik fiber içermeyen RC-3 bileşimine sahip numunelerin hem daha düşük sürtünme katsayısı değerine sahip olduğu hem de frenleme süresince daha kararsız bir sürtünme katsayısı değişimi sergilediği görülmektedir. Söz konusu numuneler için frenlemenin başlarında sürtünme katsayısı artan sıcaklıkla birlikte azalma eğilimi göstermiş ve yaklaşık 150 °C disk sıcaklığına ulaşıldığında 0,18 seviyelerine kadar gerilemiştir. Ancak artan disk sıcaklığıyla birlikte sürtünme katsayısı bu azalma trendini sürdürmemiş ve tekrar artma eğilimine girmiştir (Şekil 55). Disk yüzeyi sıcaklığının 180 °C'ye ulaştığı anda sürtünme katsayısının 0,21 seviyelerine kadar yükseldiği görülmektedir. Sonrasında ise sürtünme katsayısı tekrardan bir azalma trendine girerek artan sıcaklıkla birlikte kademeli olarak azalmış ve 400 °C'ye ulaşıldığında 0,16 seviyelerine kadar gerilemiştir. Sıcaklıkla birlikte sürtünme katsayısında ortaya çıkan bu kararsızlığın yapıya

ilave edilen çelik fiberi katkısıyla birlikte büyük oranda ortadan kalktığı görülmüştür. Aralıklı frenleme testlerinde olduğu gibi, çelik fiberi katkısı içeren balata bileşimlerinin sürekli frenlemede daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Söz konusu bileşimlerde (SF-1, SF-2, SF-3 ve SF-4) anlık sürtünme katsayısı disk sıcaklığının 250 °C'ye ulaşmasına kadar 0,25 seviyesinin altına düşmemiş ve oldukça kararlı bir davranış ortaya koymuştur. Öte yandan çelik fiberi katkısıyla birlikte artan termal iletkenlik sayesinde 400 °C'de elde edilen anlık sürtünme katsayısı değerlerinin de bir miktar yükseldiği görülmüştür. Nitekim RC-3 bileşimine sahip balatalarda sürtünme katsayısı 300 °C sonrasında anlık olarak 0,16 seviyelerine kadar gerilerken, %5 (SF-1) ve %10 (SF-2) çelik fiberi içeren bileşimlerde ise bu seviyelere sırasıyla 350 °C ve 380 °C disk sıcaklıklarına ulaşıldığında düşmüştür. Ancak çelik fiberi oranının %15 ve %20'ye çıkarılmasıyla elde edilen SF-3 ve SF-4 bileşimlerinde sürtünme katsayısı bu seviyelere kadar azalmamış ve 400 °C'de anlık olarak söz konusu bileşimler için sırasıyla 0,19 ve 0,22 seviyelerinde ölçülmüştür.



Şekil 55. Farklı oranlarda çelik fiberi içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme testinde elde edilen sürtünme katsayılarının disk yüzey sıcaklığıyla değişimi

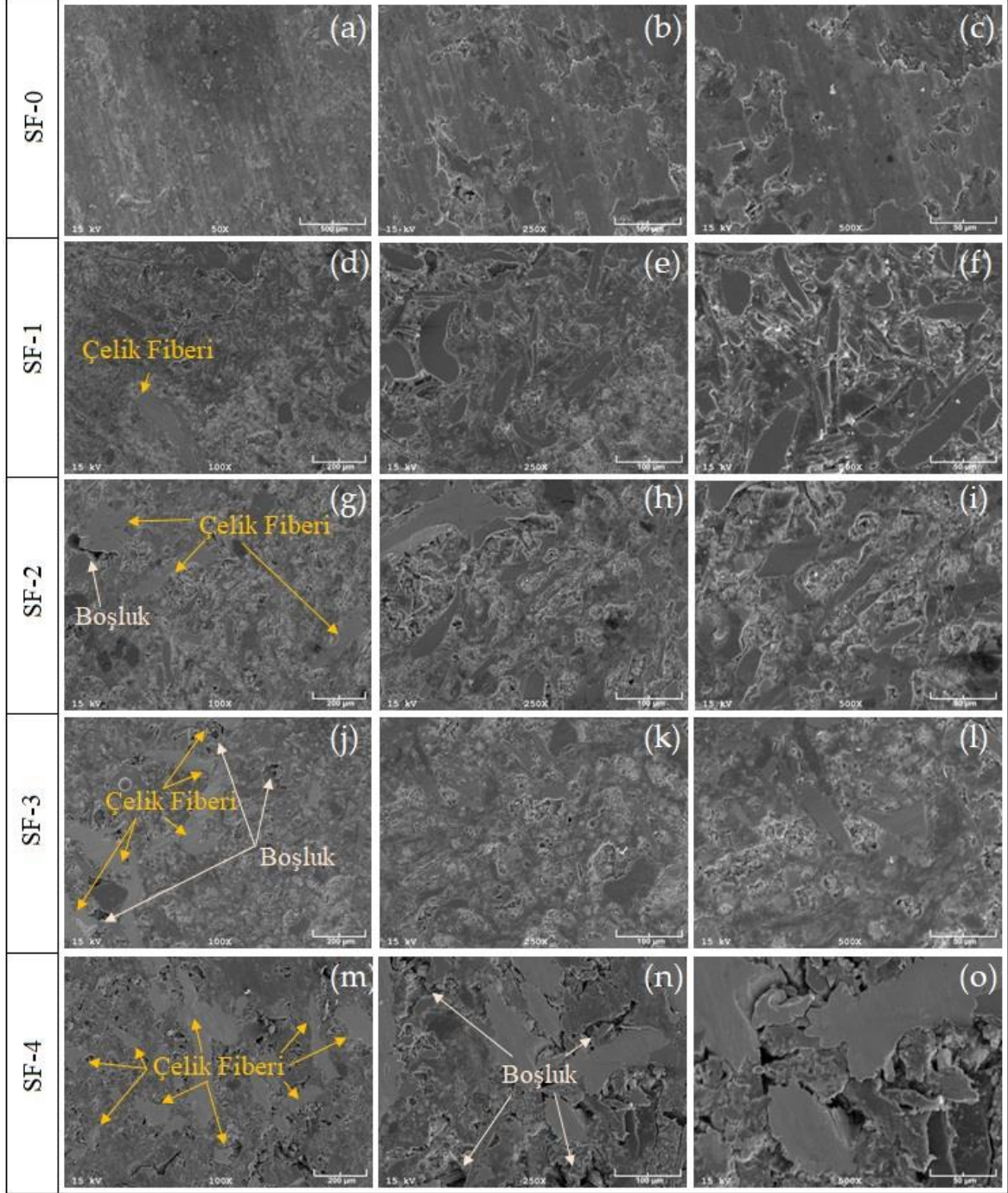
Sürekli frenleme sonrasında balata numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 56'da verilmiştir. Genel olarak incelendiğinde, çelik fiberi katkısının,

balata numunelerinin aşınma yüzeylerini morfolojik olarak etkilediği görülmektedir. Nitekim, çelik fiberi katkısı içermeyen balataların (SF-0) aşınma yüzeylerinin büyük bir kısmı ikincil temas platolarıyla kaplıyken, bu platolar çelik fiberi katkısıyla birlikte büyük oranda ortadan kalkmış ve yerini birincil temas platolarına bırakmıştır (Şekil 56). Bu duruma çelik fiberi katkısıyla birlikte artan termal iletkenliğin önemli katkı sağladığı düşünülmektedir. RC-3 bileşiminin yapısındaki %35 oranındaki taş yünü fiberinin, söz konusu numunelerin termal iletkenliğini düşürerek sürtünme ısısının balata numunesine doğru geçişini yavaşlattığı ve bu ısının büyük oranda sürtünme ara yüzeyinde kalmasında önemli bir etken olduğu düşünülmektedir. Bu durumun neticesinde çelik fiberi içermeyen RC-3 bileşiminin yapısındaki daha fazla organik bileşenin sıcaklık etkisiyle bozulduğu ve ikincil plato oluşumunu katkı sağladığı söylenebilir. Söz konusu balata bileşiminde sürekli frenleme sonrasında daha düşük sürtünme katsayısı ve daha iyi aşınma direnci elde edilmesinin en önemli sebebinin bu platoların olduğu değerlendirilmiştir. Çelik fiberi katkısı yapılarak artırılan termal iletkenlik, bu ısının numuneye doğru geçişini kolaylaştırmış ve sürtünme ara yüzeyinin daha yüksek ısı şoklarına maruz kalmasını engellemiştir. Nitekim çelik fiberi katkısı içeren numunelerin yüzeylerinde ikincil temas platolarının oldukça sınırlı bir şekilde görülmesi bu durumu desteklemektedir.

Diğer taraftan çelik fiberi katkısı içeren balata bileşimlerinde balata ve disk ara yüzeyindeki temasın çelik fiberleri üzerinden sağlandığı görülmektedir (Şekil 56). Yapıdaki artan çelik fiberi oranıyla birlikte bu durumun daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı söylenebilir. Bu temas yüzeyleri birincil platolar olarak adlandırılmakta olup söz konusu bileşimlerde daha kararlı bir sürtünme katsayısı elde edilmesinin de en önemli göstergesidir. Nitekim sürtünme sırasında kararlı bir temas alanının sürekli korunması sürtünme katsayısının daha az değişim sergilemesinde önemli bir etken olmuştur.

Artan çelik fiberi katkısıyla birlikte sürtünme performansı açısından önemli kazanımlar elde edilmesine karşın, çelik fiberi katkısı içeren balataların sürtünme yüzeylerinde boşluklu/gözenekli yapının varlığı da dikkati çekmektedir. Özellikle bu gözenekli yapının çelik fiberinin bulunduğu noktalarda daha etkin olduğu görülmektedir (Şekil 56 (g), (j) ve (n)) [125]. Nitekim bu durum artan çelik fiberi oranıyla birlikte artmakta ve daha büyük boşluklar şeklinde ortaya çıkmaktadır. Taş yünü fiberine göre daha yoğun bir fiberin yapıya eklenmiş olması hacimsel boşluk oranının artmasında etkin olmuştur. Ancak bu boşluklu yapıların özellikle çelik fiberlerinin çevresinde ortaya çıkması, çelik fiberiyle birlikte yapının çok iyi sıkıştırılmadığının bir göstergesi olarak ifade edilebilir. Bu durum

düşük metal fiber katkısı içeren bileşimlerde (%5 (SF-1), %10 (SF-2) ve %15 (SF-3)) sınırlı bir şekilde gözlenirken, %20 (SF-4) gibi daha yüksek oranlarda çelik fiberi katkısı içeren bileşimlerde çok daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır (Şekil 56 (d), (g), (j) ve (m)).



Şekil 56. Farklı oranlarda çelik fiberi içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme sonrasında aşınma yüzeylerinden alınan farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri: (a)-(c) RC-3 (SF-0), (d)-(f) SF-1, (g)-(i) SF-2, (j)-(l) SF-3 ve (m)-(o) SF-4

3.4.3. Optimum Çelik Fibri Oranını Belirlemeye Yönelik Genel Değerlendirme

Çelik fibri katkısı içeren balata bileşimleri hem tribolojik hem de mekanik açıdan detaylı bir şekilde incelenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, balata numunelerinin mekanik ve tribolojik özelliklerinin çelik fibri katkısından önemli oranda etkilendiği görülmüştür. Nitekim çelik fibri katkısıyla birlikte her iki açıdan da referans RC-3 (çelik fibri katkısı içermeyen) bileşimine kıyasla önemli kazanımlar elde edilmiştir. Özellikle RC-3 (SF-0) bileşimi için demir yolu uygulama esasları açısından kabul görmeyen ortalama sürtünme katsayısı değeri çelik fibri katkısı sonrası önemli oranda yükselerek aralıklı frenleme testlerinde kabul edilebilir (0,25-0,30) seviyelere ulaşmıştır. Benzer şekilde sürekli frenleme testlerinde de hem daha yüksek anlık ve ortalama sürtünme katsayısı değeri hem de termal açıdan daha kararlı bir değişim elde edilmiştir. Çelik fibri katkısıyla birlikte sürtünme katsayısının yükselmesine karşın aşınma kayıpları açısından balata bileşimleri arasında kayda değer bir fark gözlenmemiştir. Çelik fibri içermeyen RC-3 bileşiminde $0,026 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ seviyelerdeki elde edilen özgül aşınma miktarı, %15 veya daha düşük oranlarda çelik fibri katkısı içeren bileşimlerde (SF-1, SF-2 ve SF-3) $0,032 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ seviyesinin altında elde edilmiştir. Ancak, %20 çelik fibri içeren bileşimde (SF-4) aşınma kayıplarının bir miktar fazla olduğu ve özgül aşınma miktarının $0,040 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ seviyelerine kadar yükseldiği görülmüştür. SF-4 bileşimine sahip balatalarda RC-3 referans bileşimine kıyasla daha yüksek özgül aşınma miktarları elde edilmiş olsa da, bütün bileşimler için $0,050 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ seviyesinin altında kalan bu değerler ilgili standartlar açısından kabul edilebilir seviyelerdedir.

Söz konusu balata bileşimlerinin sahip oldukları mekanik özellikler kendi aralarında değerlendirildiğinde ise RC-3 matris yapısına ilave edilen %5'lik çelik fibri katkısı sonrası referans bileşimin (RC-3) sertlik ve elastisite modülü değerlerinde önemli oranda artış yaşandığı görülmüştür. Çalışmanın bu aşamasına kadar sürekli düşürülmeye çalışılan bu değerlerin tekrardan artmış olması olumsuz bir durum olarak değerlendirilebilir. Ancak matris yapıdaki çelik fibri oranının %5 değerinin üzerine çıkarılmasıyla sertlik ve elastisite modülü değerlerinde görülen bu artış etkisinin devam etmediği ve SF-1(%5) bileşimine kıyasla daha düşük sertlik ve elastisite modülü değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Her ne kadar %15 ve daha düşük çelik fibri katkı oranlarında referans bileşimle karşılaştırıldığında daha yüksek elastisite modülü değeri elde edilmiş olsa da, %20 oranında çelik fibri içeren bileşim (SF-4) yaklaşık çelik fibri içermeyen bileşimin seviyesine

inmektedir. Sertlik değerinin ise %10 çelik fiberi katkısı sonrası referans bileşime yakın elde edildiği görülürken, bu değer daha yüksek oranlarda çelik fiber katkısı ile azalmaya devam etmiş ve SF-4 bileşimine sahip balatalarda 62 HRX olarak elde edilmiştir. Ayrıca yapıdaki çelik fiberi oranı arttıkça sertlik değerlerinde ortaya çıkan saçılımın da arttığı görülmüştür. Bu durum sertliğin yüzey boyunca homojen olmadığına bir göstergesi olarak değerlendirilmekte olup çelik fiberlerinin matristeki dağılımıyla ilişkilendirilmiştir. Öte yandan balatalarda ortaya çıkan basma deformasyonu karakterleri incelendiğinde ise çok ciddi bir değişimin ortaya çıktığı görülmüştür. Çelik fiberi katkısı içermeyen bileşime sahip numuneler çok daha yüksek basma dayanımına sahipken, bu değer çelik fiberi katkısıyla birlikte kademeli olarak azaldığı dikkati çekmektedir. Maksimum basma dayanımı değerleri düşmüş olsa da matris yapısındaki çelik fiber oranı arttıkça balataların absorbe ettikleri enerji miktarının (tokluk) da arttığı belirlenmiştir. Çelik fiberi içermeyen RC-3 bileşiminde %10 seviyelerinde olan basma şekil değişimi %20 çelik yünü içeren SF-4 bileşiminde bu değer %200 artarak %30 seviyelerine kadar ulaşmıştır.

Özetlenecek olursa, yapıdaki çelik fiberi katkısının balatalara mekanik ve tribolojik açıdan önemli kazanım sağladığı açıktır. Ancak, çelik fiberi oranının çok düşük veya çok yüksek seçilmesi durumunda ise balatalarda gerek mekanik gerekse de tribolojik açıdan bazı problemlerin ortaya çıkabileceği görülmektedir. Nitekim düşük çelik fiberi katkılı balata bileşimlerinde (SF-1 ve SF-2) yeterli sürtünme katsayısı ve aşınma oranları elde edilmiş olsa da sertlik ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinin yükselmesi olumsuz bir durum olarak değerlendirilmiştir. Elastisite modülünün artmasına bağlı olarak zayıflayan elastikiyet özelliği fren uygulamaları açısından istenmeyen bazı durumların (hot spot ve ses) oluşumunu artırabileceği düşünülmüştür. Diğer taraftan daha yüksek orandaki (%20) çelik fiberi katkısı içeren balata bileşimi diğer bileşimlere kıyasla daha fazla aşınma kayıpları göstermiştir. Ayrıca bu durumun matris yapısındaki yüksek metal içeriğinden dolayı karşı disk aşınmalarını da artırabileceği ön görülmektedir. Bütün bu değerlendirmeler ışığında optimum çelik fiberi oranının %15 olarak seçilmesinin uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Çünkü bu bileşim diğer bileşimlere göre daha yüksek ortalama sürtünme katsayısı ve termal kararlılık değerine sahip ve kabul edilebilir mekanik özellikler sergilemektedir. Sonrasında yapılacak çalışmalarda %15 çelik fiberi içeren SF-3 bileşimine sahip balataların referans olarak ele alınması ve bu bileşimin bor bileşiği katkısız balata bileşimi olarak kabul edilmesi ön görülmüştür. Söz konusu bileşim bor bileşiği oranının optimize edilmesi sonrasında

optimum bor oranına sahip bileşimle birlikte dinamometre çalışmalarında kapsamlı bir şekilde tribolojik açıdan incelenmiştir.

3.5. Hegzagonal Bor Nitrür (h-BN) Oranının Belirlenmesi

Bu aşamaya kadar gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarıyla balataların matris yapısında bulunan takviye elemanı, sürtünme düzenleyici ve bağlayıcı gibi bileşenler optimize edilerek demir yolu uygulamaları açısından kabul edilebilir bir balata bileşimi ortaya koyuldu. Ancak, bu bileşim optimizasyonu sürecinde matris yapıda bulunan katı yağlayıcı bileşenler üzerinde bir çalışma gerçekleştirilmedi. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; balataların yapısında tabakalı yapıya sahip Grafit, MoSi₂, SnS₂, WS₂ ve TiS₂ gibi farklı türlerde katı yağlayıcıların tercih edildiği ve bu bileşenlerin türü ve miktarlarının sürtünme performansını doğrudan etkilediği görülmektedir [15, 62, 65, 106]. Bu yüzden söz konusu katkı bileşenlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve uygun oranlarda yapıya katılması etkin bir frenleme performansı açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada da bu aşamaya kadar test edilmiş bütün balata bileşimlerinde ağırlıkça %7 sabit oranda toz grafit katı yağlayıcı olarak kullanılmıştır. Grafit, günümüzde balataların yapısında olduğu gibi pek çok farklı uygulamada da etkin bir katı yağlayıcı olarak tercih edilmektedir. Ancak yapılan çalışmalar, grafitin yağlayıcılık özelliğinin uygulama şartlarına bağlı olarak değişebildiğini göstermektedir. Grafitin, özellikle düşük uygulama sıcaklıklarında etkin bir yağlayıcılık özelliğine sahip olduğu görülürken, sıcaklığının yükselmesine birlikte oksitlenmeye başladığı ve yağlayıcılık özelliğinin azaldığı belirlenmiştir [100, 126-129]. Günümüzde de demir yolu araçları için geliştirilmiş kompozit fren balatalarında görülen en yaygın problem, yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkan yetersiz yağlama sonucu belirginleşen aşınma ve homojen olmayan ısı dağılımının (termal homojensizliklerin) neden olduğu sürtünme katsayısı kararsızlığıdır [9, 66]. Kara yolu taşıtları için geliştirilmiş balatalarda etkin bir performans ortaya koyan katı yağlayıcılar demir yolu taşıt balatalarında kullanıldığında, daha uzun frenleme süreleri ve yüksek ataletler neticesinde daha yüksek sıcaklıklara maruz kalmakta ve yağlayıcılık özelliklerini kara yolu taşıtlarındaki kadar koruyamamaktadırlar [9, 66]. Bu yüzden optimize edilmiş balata bileşiminin yapısında yalnızca grafit esaslı bir katı yağlayıcının bulunması özellikle demir yolu taşıtlarında sürtünme performansının sürdürülebilirliği açısından sorun teşkil edebileceği düşünülmüştür.

Yapılan araştırmalar, h-BN bileşiğinin yüksek sıcaklıklardaki yağlama özelliklerinin diğer katı yağlayıcılardan daha iyi olduğunu ve yağlayıcılık özelliğini 700°C sıcaklığa kadar koruduğunu göstermiştir [130]. Bu durumun söz konusu katkının özellikle yüksek sıcaklıklarda kimyasal yapısının stabil olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Bunun yanında grafit ve MoSi₂ bileşiklerinin tersine h-BN bileşiğinin yüksek sıcaklıklarda oksitlenmeye karşı direncinin daha yüksek olması da daha iyi yağlama özelliği sergilemesine katkıda bulunmaktadır [131]. şimdiye kadar h-BN bileşiğinin fren bileşimlerinde ve pabuçlarında kullanımı ile ilgili sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Yi ve arkadaşları [9] tarafından yapılan bir çalışmada, balata bileşimlerinin yüksek sıcaklıklardaki aşınma direncinin h-BN katkısı ile arttığı rapor edilmiştir. Öztürk ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, h-BN katkısının sürtünme katsayısındaki ani düşüş (feyd oluşumu) etkisini azalttığı grlmştir [66]. Yapılan bu çalışmalar özellikle yüksek sıcaklıklarda h-BN katkısının balata bileşiminin yüksek sıcaklık performansı açısından olumlu sonuçlar getireceğini göstermektedir. Ancak, frenleme hızlarının ve dolayısıyla sıcaklığın düşük olduğu uygulamalarda h-BN katkısının sürtünme katsayısını arttırdığı rapor edilmiştir [9]. Bu durum ise yalnızca katı yağlayıcı olarak h-BN bileşiği içeren balataların düşük uygulama sıcaklıklarında standartların n gördüğü değerlerin üzerinde sürtünme katsayısı değerleri sergileyebileceğini göstermektedir. Bu nc araştırmalardan hareketle bu çalışmada da geliştirilmekte olan balata bileşimine mevcut %7'lik grafit katkısı değiştirilmeden belirli oranlarda h-BN bileşiği katkısı da yapılarak katı yağlayıcı açısından hibrit bir balata bileşimi ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Toplam yağlayıcı oranının %10 seviyesinin altında kalması sağlanarak mevcut bileşimin yapısına %1, %1,5 ve %2 oranlarında h-BN katkısı yapılmış ve üç farklı bor katkılı bileşim hazırlanmıştır (Tablo 9). Bu aralık hem nc çalışmalar ve hem de yapılan ön denemelerden elde edilen veriler ışığında belirlenmiştir. H-BN katkısı barit oranı azaltılarak dengelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle seçilen bu bileşimlerinin sürtünme ve aşınma performansları pin on disk esaslı sürtünme aşınma testleriyle belirlenmiş ve bu sonuca göre dinamometre testleri için gerçek boyutlu balata üretimine geçilmiştir.

Tablo 9. Geliştirilen balata bileşimine katılan h-BN ve grafit katkı oranları

Kullanılan Katkı Bileşenleri	Bileşim kodları / katkı oranları (% ağı.)			
	Optimum Bor Katksız Bileşim (BN-0)	BN-1	BN-2	BN-3
Taş Yünü Fibri	20	20	20	20
Çelik Yünü Fibri	15	15	15	15
Fenolik Toz Reçine	12	12	12	12
CNSL	5	5	5	5
Barit	33	32	31,5	31
Manyetit	5	5	5	5
Grafit	7	7	7	7
h-BN	0	1	1,5	2
Kevlar	3	3	3	3

3.5.1. Hegzagonal Bor Nitrür Oranının Balata Numunelerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi

Hegzagonal bor nitrür katkısının geliştirilen bileşimin mekanik özelliklerine etkisi Tablo 10'da verilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde; matris yapıya ilave edilen h-BN katkısıyla birlikte bileşimin mekanik özelliklerinde belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Bu durum Yi ve arkadaşları [132] tarafından yapılan bir çalışmada da rapor edilmiştir. Söz konusu çalışmada, h-BN katkı oranının üretilen balata numunelerinin mekanik özelliklerine etkileri kabaca araştırılmış ve hacimsel olarak %10 oranına kadar katılan h-BN bileşeninin balataların sertlik ve eğilme mukavemeti değerlerinde önemli bir değişime neden olmadığı belirlenmiştir. Bundan daha yüksek oranda yapılan katkıların ise balata malzemesinin hem sertlik hem de mukavemet değerlerini sürekli olarak azalttığı belirlenmiştir. Bu azalama h-BN katkısının belirtilen oranın üzerinde olması durumunda yapı içerisinde belirli bölgelerde toparlanarak segregasyon oluşturmasına ve bunun sonucunda da içyapısal homojenliğin bozulmasına dayandırılarak açıklanmıştır. Bilindiği gibi kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini büyük oranda yapıdaki matris-fiber etkileşimi ve bağlayıcı miktarı belirlemektedir. Bor bileşiği katksız ve katkılı balataların yapısında bu bileşenler matris yapısının ağırlıkça %50'ni oluşturmaktadır. Bu yüzden matris yapıya katılan oldukça düşük oranlardaki h-BN katkısı mekanik özellikler açısından dikkate değer bir değişim oluşturmamıştır.

Tablo 10. Farklı oranlarda h-BN içeren balata bileşimlerinden üretilen numunelerin sahip olduğu bazı mekanik özellikler

Özellik	BN-0 (Referans)	BN-1	BN-2	BN-3	
Sertlik (HRX)	68±2,5	68±2,5	67±1,9	68±2,3	
Basma Dayanımı (MPa)	43±1,4	45±1,8	47±1,1	48±2,2	
Elastisite Modülü (MPa)	1120±29	1080±14	1180±21	1130±27	
Sıkıştırma Miktarı (μm)	1 MPa	34±1,2	32±1,7	31±1,4	32±1,0
	2 MPa	47±1,3	44±2,4	42±2,1	44±2,6
	4 MPa	70±1,9	70±2,3	68±1,8	69±1,8
	8 MPa	109±1,5	107±1,9	106±1,2	108±2,2
	16 MPa	194±2,4	191±2,8	189±2,4	190±3,1
Hacimsel Boşluk (%)	26,4	26	25,8	25,6	

3.5.2 Hegzagonal Bor Nitrür Oranının Balata Numunelerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi

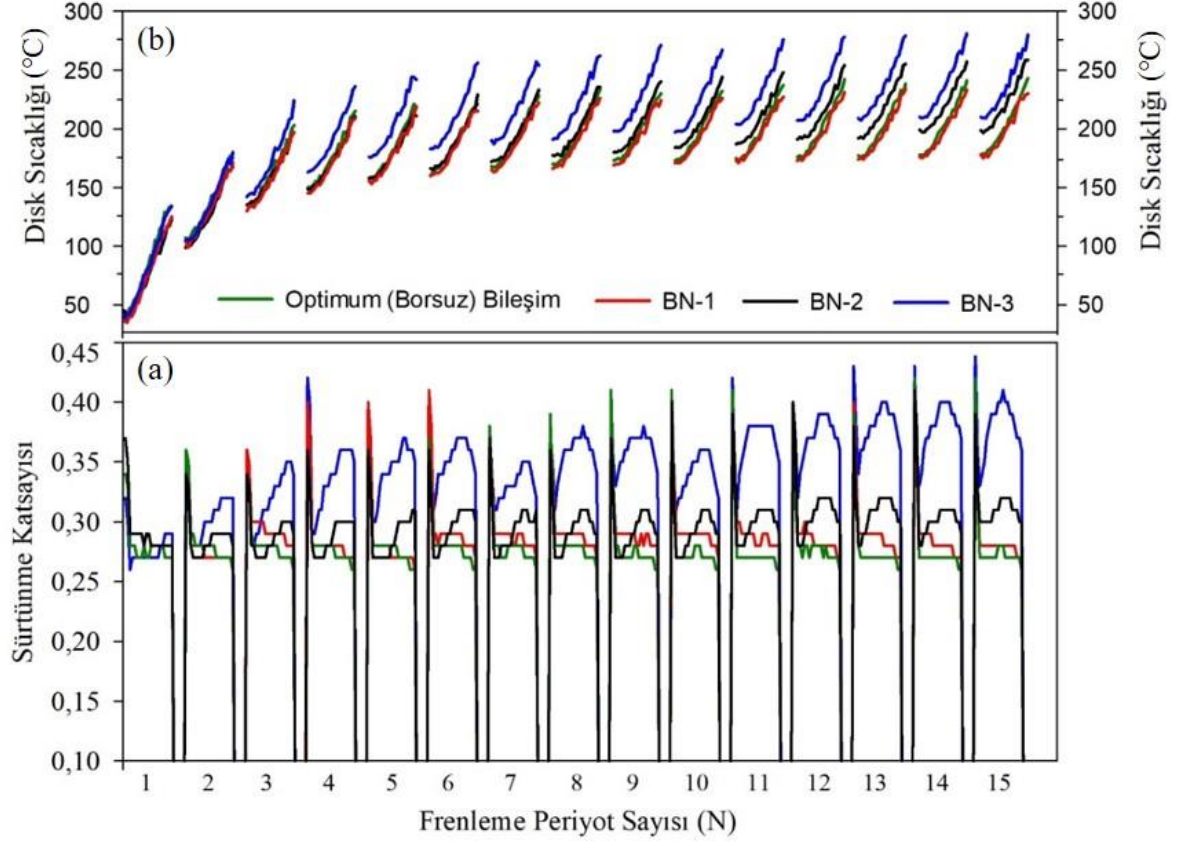
3.5.2.1 Aralıklı Frenleme

Şekil 57’de h-BN katkılı ve katkısız numunelerin aralıklı frenleme testinde elde edilen sürtünme katsayılarının frenleme periyot sayısına göre değişimleri gösterilmiştir. Uygulanan bu sürtünme testlerinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerleri ve özgül aşınma miktarları ise Şekil 58’de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Şekil 57’de verilen sürtünme katsayısı-frenleme periyot sayısı değişimi incelendiğinde; h-BN katkısı sonrası balataların sürtünme davranışlarının değiştiği görülmektedir. Buna göre, h-BN katkısı öncesi daha kararlı ve daha düşük bir ortalama sürtünme katsayısı değerine sahip olan balata bileşiminin farklı oranlarda BN katkısı sonrasında sürtünme katsayısı değerinin arttığı ve kararlılığının bozulduğu görülmektedir. Bu durumun ise matris yapı içerisindeki BN oranı arttıkça daha belirgin hale geldiği söylenebilir. Nitekim, %1 oranında h-BN katkısı sonrası BN ilavesiz bileşimin ortalama sürtünme katsayısı değeri ($\mu=0,27$) pek etkilenmemiş ve 0,28 seviyelerinde elde edilmiştir. %1 h-BN katkısı içeren numune 15 periyotluk frenleme boyunca BN katkı içermeyen bileşimden (BN-0) üretilen numunelere benzer bir değişim sergilemiştir. Ancak matris yapıdaki h-BN oranının %1,5 değerine çıkarılması durumunda ortalama sürtünme katsayısı da 0,30 seviyelerinde kadar çıkmaktadır.

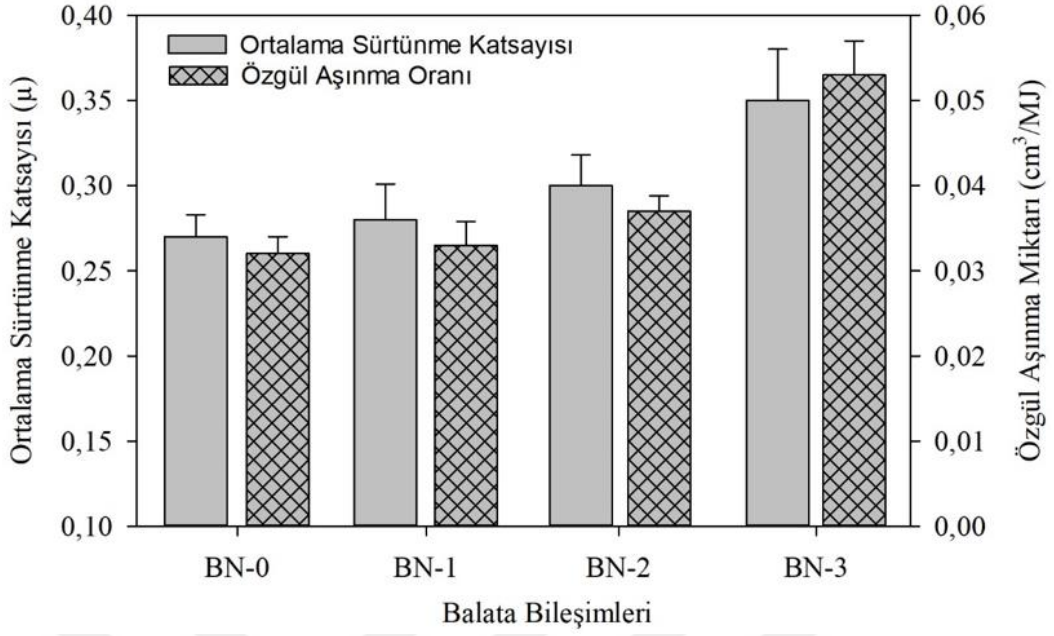
Öte yandan, BN katkısıyla birlikte numunelerin sürtünme karakteristiğinin de önemli oranda değişmeye başladığı söylenebilir. Nitekim h-BN katkısız ve %1 oranında h-BN katkısı içeren bileşimlerin sürtünme katsayısının her bir frenleme periyodu içerisinde kararlı veya sıcaklık arttıkça azalan bir karaktere sahip olduğu görülürken, %1,5 h-BN katkılı bileşimden üretilen numunede ise bu durumun değiştiği ve belirli bir sıcaklık değerine kadar sürtünme katsayısının anlık olarak arttığı görülmektedir. Ancak, frenlemenin başlarında artan sıcaklıkla birlikte yükselen anlık sürtünme katsayısı değeri disk sıcaklığının yaklaşık 220-240 °C aralığına ulaşması sonrasında tersine dönerek artan disk sıcaklığıyla birlikte azalma eğilimi göstermiştir. Bu etki ilk olarak yedinci frenleme periyodunda ortaya çıkmış ve sonrasında da benzer şekilde devam etmiştir (Şekil 57). Her ne kadar periyot içerisinde sürtünme katsayısı değişken bir karaktere sahip olsa da söz konusu bileşimin (BN-2) 15 periyot frenleme süresince kararlı bir sürtünme katsayısı değişimine sahip olduğu söylenebilir. Öte yandan, matris yapıdaki h-BN oranının %2'ye çıkarılması sürtünme katsayısının değişim karakteristiğini çok fazla etkilemediği görülmektedir. Ancak, bu değişim etkisinin (periyot içerisinde değişim) %2 BN içeren bileşimde (BN-3) daha erken oluşmaya başladığı söylenebilir. Bu durum, anlık sürtünme katsayısının yüksek olmasına bağlı olarak disk sıcaklığının daha hızlı eşik değere ulaşmasıyla ilişkilendirilmektedir. Nitekim anlık sürtünme katsayısı değeri diğer bileşimlere kıyasla %2 oranında h-BN içeren bileşimde (BN-3) daha yüksek elde edilmiş ve frenlemenin sonlarında bu değer 0,40 seviyelerine kadar ulaşmıştır. Frenlemenin başlarında 0,27 seviyelerinde başlayan periyodik ortalama sürtünme katsayısı 15. periyot sonrasında 0,38 seviyelerine kadar yükselmiş ve söz konusu bileşim için frenleme süresince ortalama sürtünme katsayısı 0,34 seviyelerinde kalmıştır. %1,5 (BN-2) ve %2 (BN-3) oranlarında h-BN içeren numunelerin sürtünme katsayılarında görülen bu değişim genel olarak literatürel bilgilerle örtüşmektedir. Özellikle düşük disk sıcaklıklarında h-BN katkısı sürtünme katsayısını artırıcı etki yaparken, sıcaklığın belirli bir eşik değerinin üzerine çıkması durumunda sürtünme katsayısını düşürücü bir etki oluşturmaktadır [66]. Bu durum ise h-BN katkısının yağlayıcılık etkisinin yüksek sıcaklıklarda ortaya çıktığını doğrular niteliktedir.

Öte yandan, frenleme sonrası ortaya çıkan özgül aşınma miktarlarına bakıldığında ise ortalama sürtünme katsayısının paralelinde bir değişimin olduğu görülmektedir. Özellikle h-BN katkısız ve %1 ve %1,5 h-BN katkılı bileşimler arasında aşınma kayıpları açısından kayda değer bir fark ortaya çıkmazken, %2 h-BN katkısı sonrasında bu değer çok ciddi oranda arttığı ve 0,05 cm³/MJ seviyelerinin üzerine çıktığı görülmektedir. Bu durumun artan

BN oranıyla birlikte sürtünme katsayısının daha kararsız bir değişim karakteri sergilemesinden kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 57. (a) Farklı oranlarda h-BN içeren balata bileşimlerinin sahip oldukları sürtünme katsayısı ve (b) disk sıcaklıklarının frenleme periyot sayısına göre değişimi



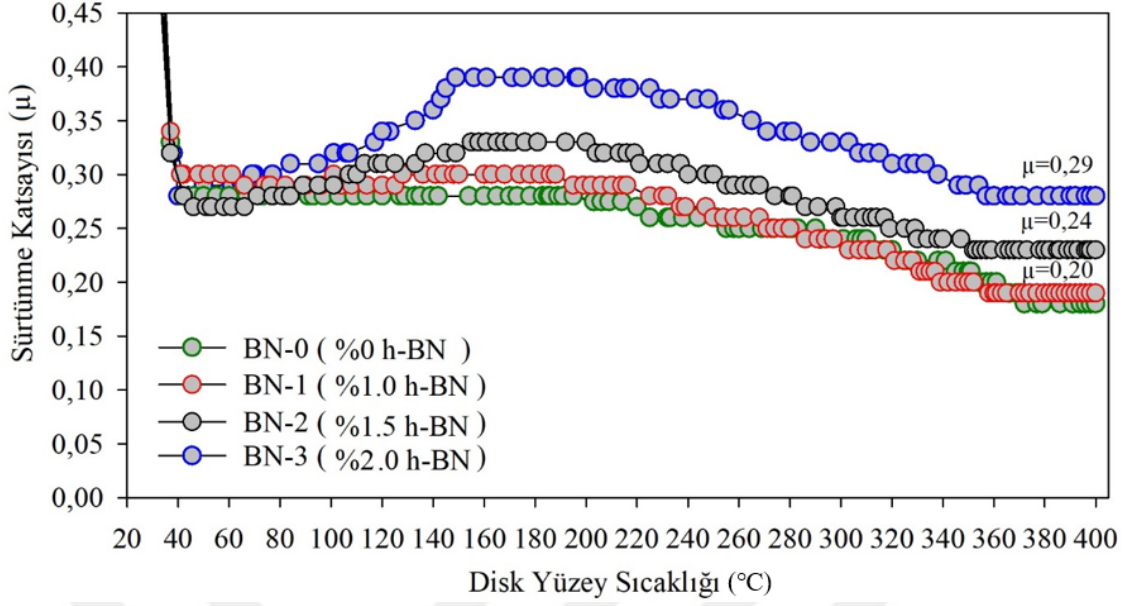
Şekil 58. Farklı oranlarda h-BN içeren balata bileşimlerinin aralıklı frenleme testinde elde edilen ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri

3.5.2.2. Sürekli Frenleme

Aralıklı frenleme testi sonrasında h-BN içeren ve içermeyen dört farklı bileşim sürekli frenleme (drag) testine tabi tutulmuş ve bu testlerden sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimleri elde edilerek Şekil 59'da gösterilmiştir. Bu değişimler genel olarak incelendiğinde; h-BN katkısı sonrasında bileşimlerin sürtünme katsayılarında görülen değişimin farklılaştığı görülmektedir. Nitekim, BN katkısı içermeyen optimum balata bileşimi frenlemenin başlarında sahip olduğu 0,28 seviyelerindeki sürtünme katsayısı değerini 200-220°C civarına kadar kararlı bir şekilde korumuş ve sonrasında artan disk sıcaklığıyla birlikte sürtünme katsayısında bir azalma ortaya çıkmıştır. Sürtünme katsayısı söz konusu bileşim için disk yüzeyi sıcaklığı 400°C'ye ulaşıldığı anda anlık olarak 0,19 seviyelerinde elde edilmiştir. Matris yapıya eklenen %1 oranındaki h-BN katkısıyla birlikte sürtünme katsayısının karakterinde ciddi bir değişim görülmemiş ve BN içermeyen bileşimden elde edilen değere oldukça benzer bir değişim ortaya çıkmıştır.

Yapıya %1 oranının üzerinde yapılan h-BN katkısı sonrasında bu durumun farklılaştığı Şekil 59'da açık bir şekilde görülebilmektedir. %1,5 h-BN içeren bileşime (BN-2) ait sürtünme katsayısı değişimine bakıldığında, özellikle düşük disk sıcaklıklarında aralıklı frenleme testlerinde olduğu gibi bu değer başlangıçta artma eğiliminde olduğu

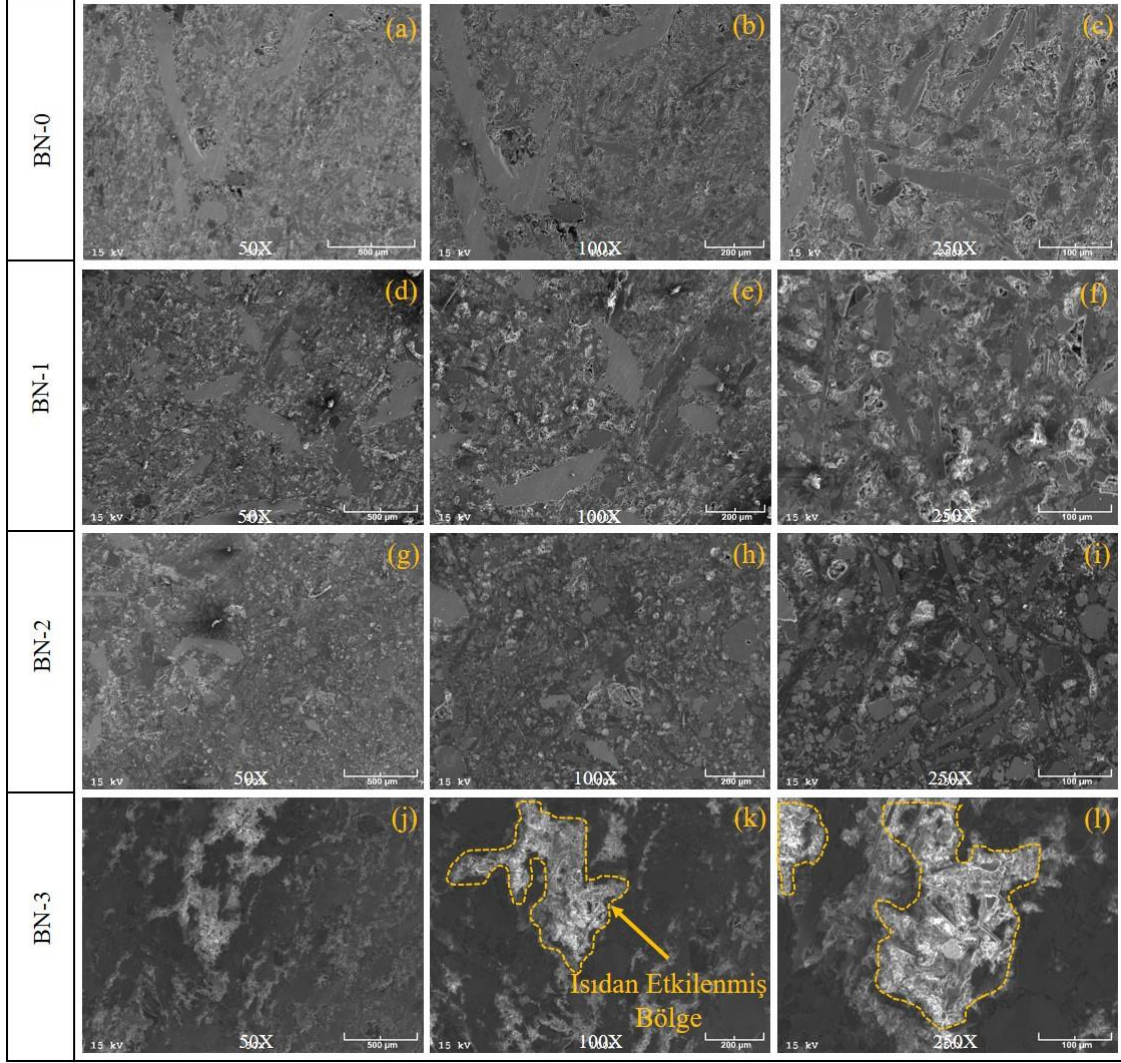
görülmektedir. Ancak sıcaklığın belirli bir eşik değere ulaşması sonrası sürtünme katsayısı düşerek 0,24 seviyesine kadar inmektedir. Bu azalma eğilimi disk sıcaklığının yaklaşık 350 °C'ye ulaştığı ana kadar devam etmiş ve sonrasında bu seviyedeki değerini 400°C'ye kadar kararlı bir şekilde korumuştur. Frenlemenin sonrasında ise %1,5 oranında BN içeren bileşim %0 ve %1 BN içeren bileşimlerle kıyaslandığında, hem anlık hem de ortalama olarak daha yüksek bir sürtünme katsayısına sahip oldukları görülmektedir. Sürtünme katsayısında görülen bu farklılık %2 BN içeren bileşimde (BN-3) daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. %2 BN içeren bileşimin (BN-3) sürtünme katsayısı ve değişimi de disk sıcaklığına bağlıdır. Bu değer özellikle düşük disk sıcaklıklarında hızlı bir şekilde yükselmiş ve anlık olarak 0,40 seviyelerine kadar ulaşmış, sonrasında ise artan sıcaklıkla birlikte kademeli olarak azalarak 0,29 seviyesine kadar gerilemiştir. %1,5 BN içeren bileşimde (BN-2) olduğu gibi yaklaşık 350 °C disk sıcaklığına ulaşıldığı anda bu seviyelere kadar gerileyen sürtünme katsayısı, sıcaklığının 400 °C'ye ulaştığı ana kadar da bu seviyelerdeki değerini korumuştur. Özetlenecek olursa; matris yapıdaki artan h-BN oranıyla birlikte hem daha yüksek anlık ve ortalama sürtünme katsayısı değeri elde edilmekte hem de 400°C gibi yüksek bir disk sıcaklık değerinde sürtünme katsayısı daha kararlı ve yüksek kalabilmektedir. Bu durumun büyük oranda yapıya katılan h-BN bileşiğinin yüksek sıcaklıklarda daha kararlı bir davranış ortaya koymasıyla ilişkilendirilmektedir. Nitekim BN bileşiği bu kararlılığını, yüksek sıcaklıklarda oksitlenmeye karşı olan direnci sayesinde kazanmıştır. Diğer katı yağlayıcılarla kıyaslandığında BN bileşiğinin oksitlenme sıcaklığının daha yüksek olması tribolojik uygulamalar açısından tercih edilebilirliğini artırmıştır.



Şekil 59. Farklı oranlarda h-BN bileşiği içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme testinde elde edilen sürtünme katsayılarının disk yüzey sıcaklığıyla değişimi

Sürekli frenleme (drag) testi sonrasında BN katkısız ve katkılı balata numunelerinin sürtünme yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 60'da karşılaştırılmıştır. Genel olarak bakıldığında; özellikle matris yapıya ilave edilen %1 ve %1,5 oranındaki h-BN katkısı sonrası numunelerin sürtünme yüzeyleri morfolojik özellikler açısından kayda değer değişim göstermemiştir. Söz konusu sürtünme yüzeylerinde nispeten homojen dağılmış çelik fiberleri dikkati çekmekte ve disk yüzeyi ile olan temasın büyük oranda bu fiberler üzerinden sağlandığı görülmektedir. Ayrıca sürtünme yüzeyinde ikincil platolardan çok birincil temas platolarının yaygın olması, sürtünme katsayısının kararlı kalmasında önemli bir etken olmuştur. Ancak yapıya %2 oranında eklenen h-BN bileşiği sonrasında ilgili numunelerin sürtünme yüzeylerinde birincil temas platolarının azaldığı ve ikincil temas platosu oluşumunun arttığı dikkati çekmektedir. Bu durum, söz konusu matris yapıda daha fazla organik bileşenin bozulmaya uğradığının bir göstergesi olarak ifade edilebilir. Ayrıca, söz konusu sürtünme yüzeylerinde, lokal olarak bileşenler arasındaki yapısal bağdaşıklığın da bozulmaya başladığına dair emareler ortaya çıkmıştır (Şekil 60 (k), (l)). Oluşan bu bölgelerin büyük oranda yüksek ısıl etkiler altında yapıdaki organik bileşenlerin bozulması sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. Sürtünme ara yüzeyindeki ciddi sıcaklık değişimlerine ise frenleme sırasında özellikle %2 BN içeren bileşiminin (BN-3) sürtünme katsayısında görülen kararsız ve ani yükselmelerin sebep olabileceği değerlendirilmiştir. Isıdan etkilenen

bölgelerde yapısal bütünlüğü bozulan katkı bileşenlerinin bu noktalardan koparak uzaklaştığı ve ilgili numunenin sürtünme yüzeyinde yaygın olarak görülen ikincil temas platosu oluşumuna katkı sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca, bu etkilerin söz konusu numunelerde elde edilen aşınma miktarlarını da artırdığı değerlendirilmektedir.



Şekil 60. Farklı oranlarda h-BN bileşiği içeren balata bileşimlerinin sürekli frenleme sonrasında aşınma yüzeylerinden alınan farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri: (a)-(c) BN-0 (Bor katkısız), (d)-(f) BN-1, (g)-(i) BN-2 ve (j)-(l) BN-3

3.5.3. Optimum h-BN Oranını Belirlemeye Yönelik Genel Değerlendirme

Hegzagonal bor nitrür katkılı ve katkısız balata örnekleri tribolojik ve mekanik açıdan ele alınarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Genel olarak bakıldığında, h-BN katkısı

sonrası BN içermeyen bileşimin mekanik özelliklerinde kayda değer bir etki gözlemlenmezken, tribolojik açıdan bazı farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bütün oranlardaki h-BN katkısı sonrası optimum balata bileşiminin ortalama sürtünme katsayısının hem aralıklı (periyodik) hem de sürekli (drag) frenleme testlerinde bir miktar yükseldiği görülmektedir. Ancak, matris yapıdaki h-BN katkı oranı arttıkça sürtünme katsayısında sıcaklığa bağlı bir kararsızlığın da ortaya çıktığı ve bu durumun h-BN oranı arttıkça daha da belirginleştiği dikkati çekmektedir. Öte yandan sürtünme katsayısında görülen değişimin paralelinde h-BN ilavesiyle aşınma kayıplarında da bir miktar artış yaşanmıştır. Ancak %0 (BN-0), %1 (BN-1) ve %1,5 (BN-2) bileşimleri arasında kütle kaybı açısından kayda değer bir farklılığın olmadığı ve bir birine oldukça yakın değerlerin elde edildiği görülürken, %2 h-BN bileşiği katkısı sonrası bu değerlerin ciddi miktarda arttığı ve 0,055 cm³/MJ seviyelerine kadar yükseldiği belirlenmiştir. Bu aşamaya kadar 0,050 cm³/MJ özgül aşınma seviyesinin referans alınarak değerlendirilmeler yapıldığı düşünülürse BN-3 bileşiminin standartlar açısından kabul görmeyeceği düşünülmektedir. Düşük h-BN katkı oranlarında ise hem tribolojik hem de mekanik açıdan BN katkısız balata bileşime kıyasla belirgin bir farklılığın ortaya çıkmadığı değerlendirilerek, BN-2 (%1,5 h-BN) bileşiminin optimum bor katkılı bileşim olarak ele alınmasının daha uygun olacağı düşünülmüş ve sonraki aşamada gerçekleştirilecek dinamometre testlerine BN içermeyen (BN-0) ve %1,5 BN içeren (BN-2) bileşimlerle devam edilmesi uygun bulunmuştur.

3.6. Dinamometre Benzetim Testleri

3.6.1. H-BN Katkısı İçermeyen Bileşim Üzerinden Yapılan Dinamometre Testleri

Gerçekleştirilen tribolojik ve mekanik deneyler sonrasında belirlenmiş olan optimum BN katkılı ve BN katkısız bileşimlerden gerçek boyutlu balata üretimi yapılmıştır. Üretilen bu balatalardan talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak dinamometre testleri için Şekil 17 (b)'de verilen boyutlarda blok tipi numuneler çıkarılmıştır. İlgili numuneler TS-EN 16452 standardının C.3.4 bendi kapsamında dinamometre testlerine tabi tutularak basınç ve hız gibi frenleme parametrelerinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak h-BN içermeyen optimum balata bileşimi test edilmiştir. H-BN içermeyen söz konusu balata bileşiminde ağırlıkça %20 taş yünü fiberi, %15 çelik fiberi, %3 Kevlar, %12 fenolik reçine, %5 CNSL, %33 barit, %5 manyetit ve %7 oranında da grafit bulunmaktadır.

Dinamometre testlerinde standarda da uygun bir şekilde 3 farklı basınç değeri (0,22 MPa, 0,6 MPa ve 0,95 MPa) seçilerek, bu basınç değerlerinde dört farklı ilk frenleme hızında (30 km/sa, 50 km/sa, 70 km/sa ve 80 km/sa) testler gerçekleştirilmiştir. Dinamometre testleri gerçekleştirilirken, uygulama basıncı için, 0,22 MPa, 0,95 MPa ve 0,60 MPa sıralaması takip edilirken, her bir basınç değerinde sırasıyla 70 km/sa, 30 km/sa, 80 km/sa ve 50 km/sa ilk frenleme hızlarında testler gerçekleştirilmiştir.

Dinamometre testlerinde elde edilen sürtünme katsayısının tekerlek hızına göre değişimini gösteren eğriler Şekil 61-64'te verilmiştir. İlgili testlerden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı, ulaşılan maksimum disk sıcaklığı, frenleme süresi ve durma mesafe gibi değerler ise Tablo 11'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Üretilen gerçek boyutlu balatalardan çıkarılan numuneleri ilk olarak 70 km/sa ilk frenleme hızı ve 0,95 MPa sabit frenleme basıncında iki kez arka arkaya frenlemeye tabi tutulmuştur. Genel olarak bakıldığında, BN katkısı içermeyen balata numunesinin frenlemenin başlarında nispeten dalgalı bir sürtünme katsayısı değişimi sergilemiş olsa da sonrasında daha kararlı bir değişim gösterdiği ve bu süreçte 0,22 seviyesinde bir ortalama sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmektedir (Şekil 61 ve Tablo 11). Öte yandan ilgili numunelerle yapılan frenleme sonrasında disk sıcaklığı bir termal kamera yardımıyla ölçülmüş ve sıcaklığın yaklaşık 350 °C gibi bir değere kadar ulaştığı görülmüştür (Tablo 11). Bu testlerde dinamometrenin kinetik enerjisi tamamıyla sönmülene kadar (araç durana kadar) yaklaşık 2400 m'lik bir mesafe kat edilmiştir.

Sonrasında frenleme basıncı değeri 0,22 MPa değerine düşürülmüş ve numune sırasıyla 70 km/sa, 30 km/sa, 80 km/sa ve 50 km/sa ilk hız değerlerinde teste tabi tutulmuştur. Bu testlerden elde edilen sürtünme katsayılarının tekerlek (disk) hızına göre değişimleri Şekil 62'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Genel olarak bakıldığında, aynı hız değerine karşılık gelen anlık sürtünme katsayısı değerlerinin, bütün testlerde özellikle 50 km/sa'ten daha düşük hız değerlerinde birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca, disk hızının 30 km/sa değerinin altına düştüğünde (frenlemenin sonlarına doğru) ise bütün testlerde durmaya yakın sürtünme katsayısının hızlı bir şekilde artmaya başladığı ve anlık olarak 0,45 seviyelerine kadar ulaştığı görülmektedir. Bu durum, ara yüzey etkileşimlerinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisiyle ilişkilendirilmiştir [133, 134]. Ayrıca bu aşamada statik sürtünme katsayısının dinamik sürtünme katsayısına kıyasla daha fazla etkili olduğunu ve bu sebeple de anlık sürtünme katsayısının yükseldiğini rapor eden çalışmalara rastlanmaktadır [133, 134]. Öte yandan frenlemenin son aşamasında görülen bu sürtünme

katsayısı yükselmesinin belli ölçüde hızlı yavaşlama ve durana kadar daha kısa fren mesafesi oluşması açısından istenilen bir durum olduğu da belirtilmektedir [133].

Öte yandan, ortalama sürtünme katsayısının hıza duyarlı bir değişim sergilediği belirlenmiştir. Nitekim, frenlemenin yapıldığı ilk hız değeri arttıkça ortalama sürtünme katsayısı değerinin azaldığı dikkati çekerken, bu değerler 70 km/sa, 30 km/sa, 80km/sa ve 50 km/sa frenleme hızları için sırasıyla 0,22, 0,28, 0,21 ve 0,26 olarak elde edilmiştir (Tablo 11). Ayrıca, disk yüzeyinde ulaşılan maksimum sıcaklık değerinin ve fren mesafesinin de ilk frenleme hızına bağlı olarak değiştiği dikkati çekmektedir. Disk sıcaklığı, 70 km/sa, 30 km/sa, 80km/sa ve 50 km/sa hız değerleri için sırasıyla 152°C, 76°C, 185°C ve 115°C olarak ölçülürken, durma mesafeleri ise sırasıyla 4364 m, 968 m, 5017 m ve 2410 m olarak ölçülmüştür (Tablo 11). Sıcaklık ve durma mesafelerinde görülen bu farklılığın ise büyük oranda sistemin başlangıçta sahip olduğu kinetik enerji değerine bağlı olarak ortaya çıktığı bilinmektedir. Frenleme öncesi kinetik enerjinin yüksek olması, nispeten daha yüksek disk sıcaklıklarına ulaşılmasına ve daha uzun sürelerde bu enerjinin sönmelenmesine sebep olmaktadır.

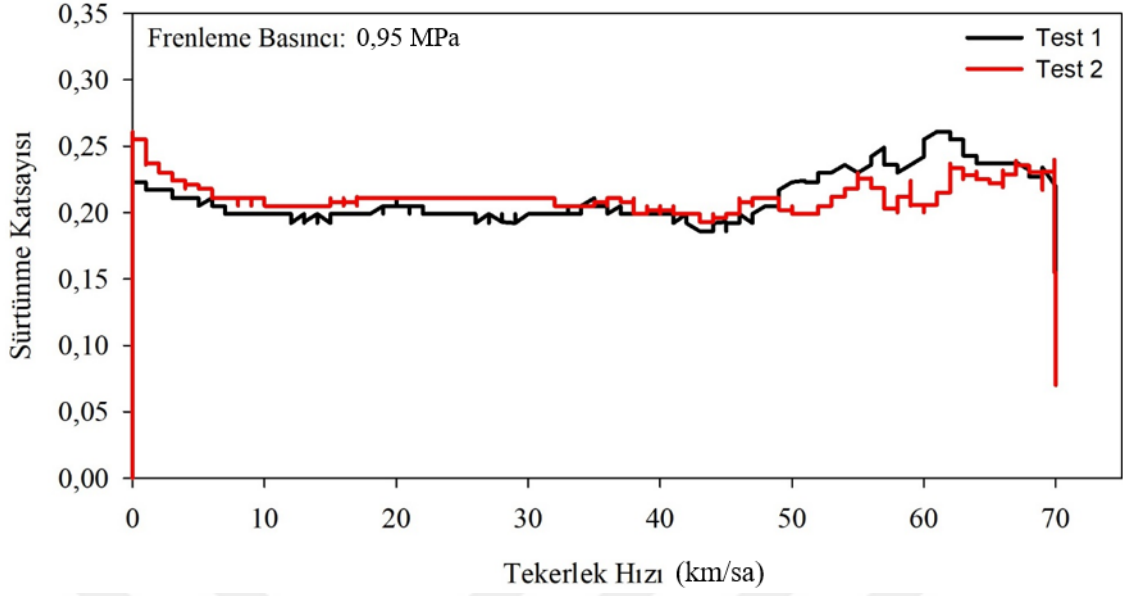
Frenleme basıncı yaklaşık dört kat artırılarak 0,95 MPa seviyesine çıkarılmış ve aynı hız değerlerinde tekrardan testler yapılmıştır. Bu testlerden elde edilen sürtünme katsayısının değişimleri Şekil 63'te verilmiştir. Buna göre uygulanan frenleme basıncındaki artışın sürtünme katsayısı üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Nitekim 0,95 MPa basınç altında ortalama sürtünme katsayısı değeri 70 km/sa, 30 km/sa, 80km/sa ve 50 km/sa hız değerleri için sırasıyla 0,21, 0,24, 0,19 ve 0,23 olarak ölçülmüştür (Tablo 11). İlgili değerler incelendiğinde (Tablo 11, Şekil 63), bütün hız değerlerinde basıncın artması sonrası ortalama sürtünme katsayısı değerinin azaldığı görülmektedir. Ancak, bu etkinin düşük hız değerlerinde daha belirgin olduğu dikkati çekmektedir (Tablo 11). Ayrıca, frenleme basıncının artması sonrası sürtünme katsayısının zamana bağlı kararlılığının da büyük oranda bozulduğu görülmektedir (Şekil 63). Nitekim, frenlemenin başlatıldığı yüksek hız değerlerinden (70 km/sa ve 80km/sa) disk hızının yaklaşık 40 km/sa hız değerine düşünceye kadar sürtünme katsayısında oldukça kararsız bir değişimin ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 63). Bu hız değerinin (< 40 km/sa) altında ise sürtünme katsayısı açısından nispeten daha kararlı bir değişimin elde edildiği söylenebilir. Düşük ilk hız değerlerinde (30 km/sa ve 50 km/sa) ortalama sürtünme katsayısı değeri düşse de, sürtünme katsayılarının sergilemiş olduğu değişim karakterleri düşük basınç değerinde (0,22 MPa) elde edilen karakterle benzerlik göstermektedir. Öte yandan, özellikle frenlemenin başında ve sonunda

elde edilen anlık sürtünme katsayısı değerleri, düşük basınç (0,22 MPa) altında yapılan frenlemelerde yaklaşık aynı değerleri aldığı görülürken (Şekil 62), bu durumun yüksek basınç altında (0,95 MPa) görülmediği ve farklı hızlarda yapılan frenlemelerde farklı değerler aldığı dikkati çekmektedir (Şekil 63).

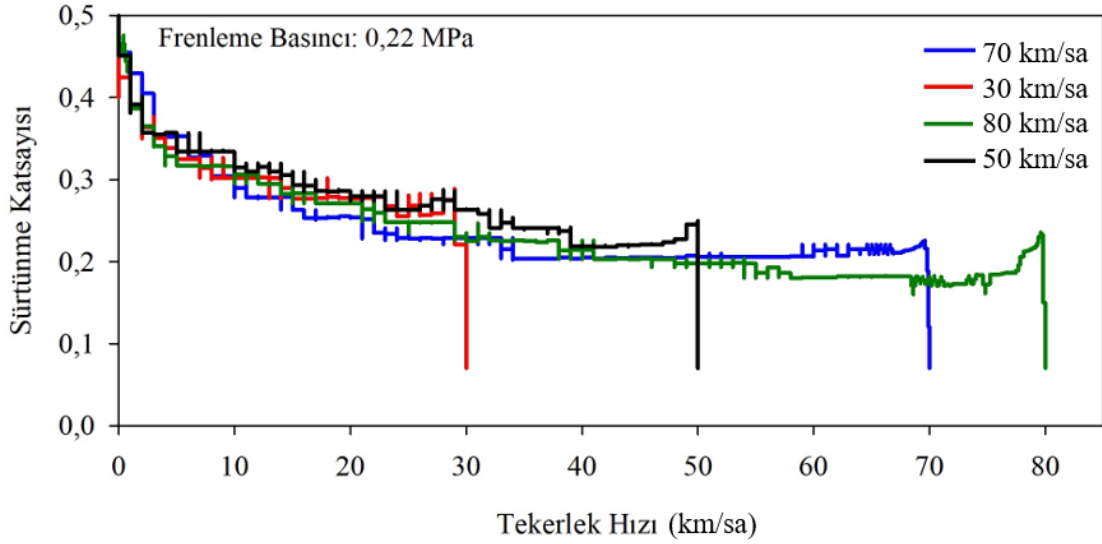
Uygulama basıncının artması, disk yüzeyinde okunan maksimum sıcaklık değerlerini yaklaşık 2 kat artırırken, durma mesafesi değerlerini ise aynı hız değerleriyle kıyaslandığında önemli oranda düşürmüştür (Tablo 11). Basıncın artması sonrası daha yüksek değerlerde elde edilen frenleme momenti (yüksek sürtünme kuvveti) ara yüzeydeki sıcaklığın daha fazla yükselmesine ve daha kısa mesafelerde toplam kinetik enerjinin sönmelenmesine katkı sağlamıştır.

En düşük ve en yüksek frenleme basınçlarında (0,22 MPa ve 0,95 MPa) uygulanan testler sonrasında basınç değeri tekrardan 0,60 MPa yapılarak aynı ilk hızlarda testler tekrarlanmıştır. Bu testlerden elde edilen sürtünme katsayısı değişimleri ise Şekil 64'te karşılaştırılmalı olarak verilmektedir. Buna göre, basıncın artmasıyla bozulan sürtünme katsayısı değişim karakteri basınç değerinin 0,60 MPa'ya düşürülmesi sonrasında nispeten daha kararlı hale gelmiştir. Frenlemenin başında ve sonunda elde edilen anlık sürtünme katsayısı değerlerinin ilk frenleme hızı değişse dahi yaklaşık olarak aynı değerde elde edildiği görülmektedir (Şekil 64). Ancak, ortalama sürtünme katsayısı değerine bakıldığında 70 km/sa, 30 km/sa, 80 km/sa ve 50 km/sa ilk frenleme hız değerleri için sırasıyla 0,27, 0,28, 0,27 ve 0,27 değerlerini aldığı görülmektedir (Tablo 11). Bu sonuçlar bu şartlar altında sürtünme katsayısında hıza bağlı kayda değer bir farklılığın ortaya çıkmadığını göstermektedir.

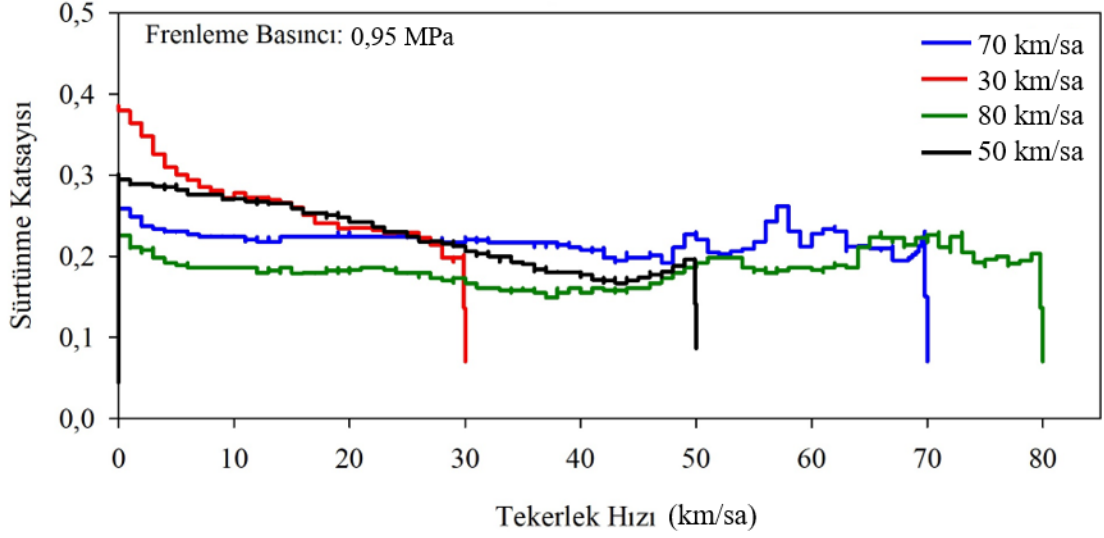
Daha düşük ve daha yüksek basınç değerlerinde ilk frenleme hızı değeri arttıkça ortalama sürtünme katsayısı değerinin azaldığı söylenebilir. Bu aşamada sürtünme katsayısında hızdan bağımsız bir değişimin ortaya çıkması büyük oranda bir önceki yüksek basınç altında bozulan (etkilenen) sürtünme yüzeylerinin toparlanma sürecine girmesiyle ilişkilendirilmiştir. Nitekim yüksek basınç ve yüksek hızlarda gerçekleştirilen testlerde disk yüzeyinde oluşan sıcaklığın 350 °C seviyesinin üzerine çıkması sürtünme yüzeylerini etkilemiş olabilir. Bu aşamada basıncın düşmesine bağlı disk sıcaklığının da düşmesi (Tablo 11) toparlanma sürecine önemli katkı sağlamıştır.



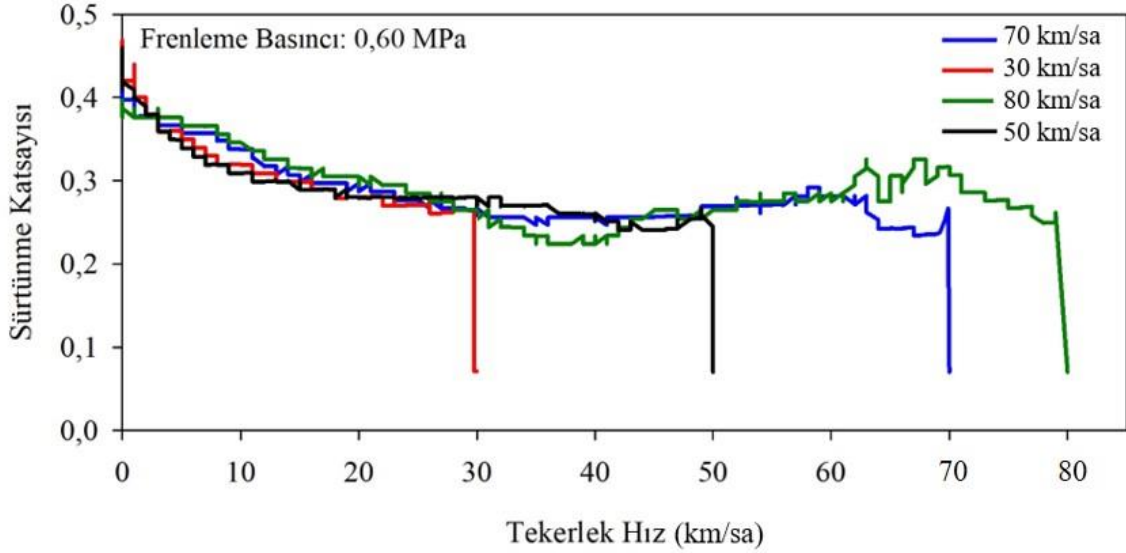
Şekil 61. 70 km/sa ilk frenleme hızı, 0,95 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m² başlangıç atalet yükü altında gerçekleştirilen dinamometre testlerinde h-BN içermeyen optimum balata bileşimine (SF-3) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızına göre değişimi



Şekil 62. 0,22 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m² başlangıç atalet yükü altında farklı ilk frenleme hızlarında gerçekleştirilen dinamometre testlerinde h-BN içermeyen optimum balata bileşimine (SF-3) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızı ile değişimi



Şekil 63. 0,95 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m^2 başlangıç atalet yükü altında farklı ilk frenleme hızlarında gerçekleştirilen dinamometre testlerinde h-BN içermeyen optimum balata bileşimine (SF-3) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızı ile değişimi



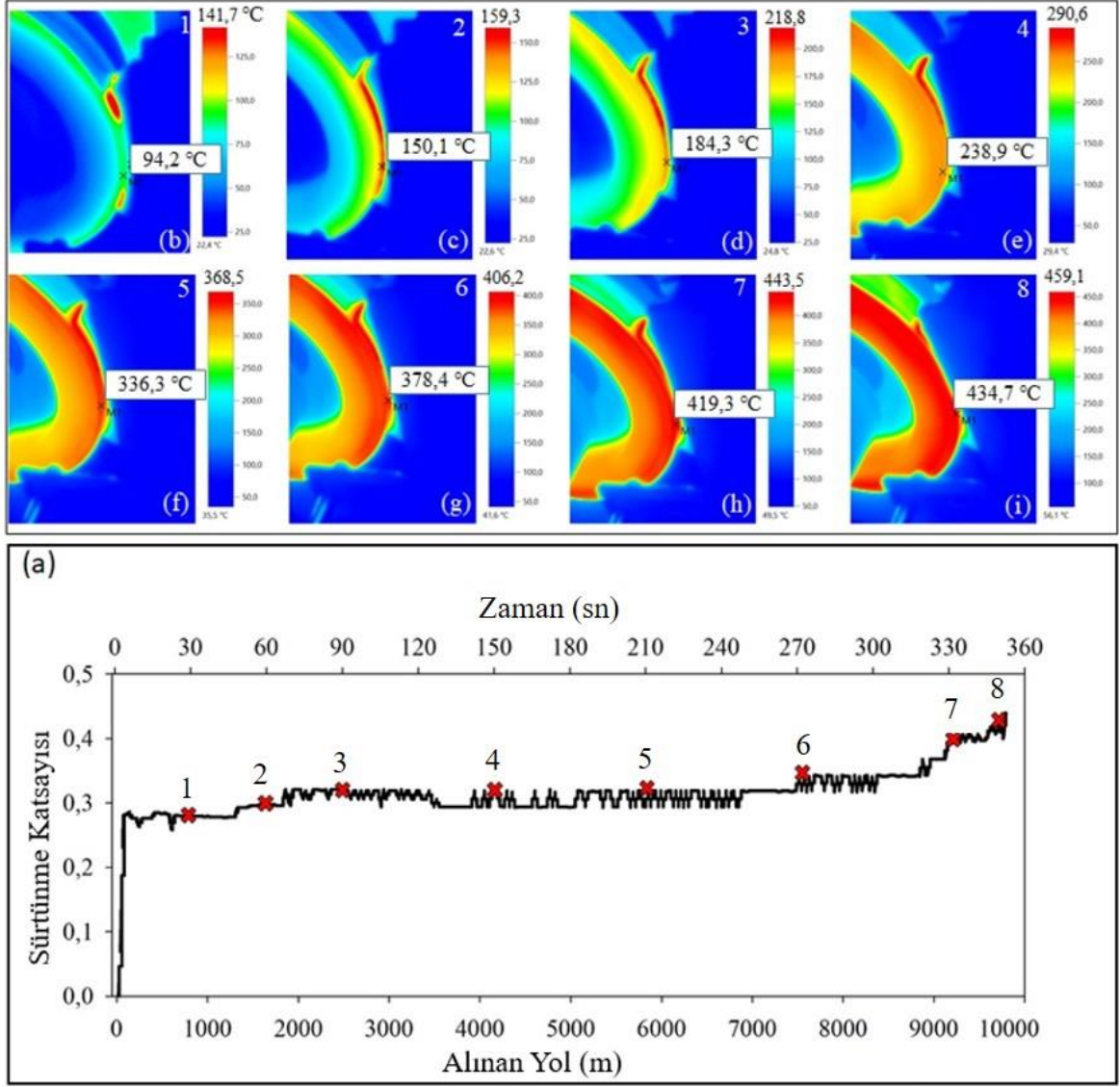
Şekil 64. 0,60 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m^2 başlangıç atalet yükü altında farklı ilk frenleme hızlarında gerçekleştirilen dinamometre testlerinde h-BN içermeyen optimum balata bileşimine (SF-3) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızı ile değişimi

Tablo 11. H-BN içermeyen balata numunesine, farklı hızlarda ve farklı frenleme basınçlarında uygulanan dinamometre testlerinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı, durma mesafesi, durma süresi ve maksimum disk sıcaklığı değerleri

Frenleme Basıncı (MPa)	Frenleme İlk Hızı (km/sa)	Ölçüm Parametreleri			
		Ortalama Sürtünme Katsayısı	Durma Mesafesi (m)	Maksimum Disk Sıcaklığı (°C)	Durma Süresi (sn)
0,95	70	0,217	2406	350	257
	70	0,214	2423	353	266
0,22	70	0,224	4364	152	486
	30	0,279	968	76	236
	80	0,208	5017	185	508
	50	0,262	2410	115	356
0,95	70	0,211	2443	345	264
	30	0,240	499	134	115
	80	0,185	3414	365	334
	50	0,232	1434	221	201
0,60	70	0,268	2817	286	299
	30	0,282	609	119	143
	80	0,274	3653	325	346
	50	0,267	1561	200	225

Basınç ve hız parametrelerinin balata numunesinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisinin incelenmesinin ardından, aynı numuneye atalet yük değeri 32 kg.m^2 'ye düşürülerek 0,22 MPa sabit basınç ve 100 km/sa sabit hız altında sürekli frenleme testi (drag test veya kilitli fren testi) uygulandı. Şekil 65 (a)-(i)'de bu testten elde edilen sürtünme katsayısının alınan yol ve sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir. Bu eğriden, sürtünme katsayısının belirli bir sıcaklık seviyesinin altında oldukça kararlı bir davranışa sahip olduğu görülmektedir. Nitekim frenlemenin başlarında 0,29 seviyelerinde elde edilen sürtünme katsayısının 330 saniye boyunca çok az miktarda yükselerek yaklaşık bu değerini koruduğu görülmektedir.

Frenleme sırasında belirli aralıklarla alınan termal kamara görüntülerine bakıldığında ise bu süre zarfında disk sıcaklığının $400 \text{ }^\circ\text{C}$ seviyelerine kadar ulaştığı dikkati çekmektedir (Şekil 65.(h)). Bu sıcaklık değerinden sonra sürtünme katsayısı bu seviyeyi koruyamamakta ve hızlı bir şekilde yükselerek 0,40 seviyesine çıkmaktadır (Şekil 65(a)). Sürtünme katsayısında görülen bu ani yükselmenin ardından disk sıcaklığı da $440 \text{ }^\circ\text{C}$ seviyesine kadar çıkmıştır (Şekil 65 (i)). Disk sıcaklığının $400 \text{ }^\circ\text{C}$ seviyesinin üzerine çıkmasıyla birlikte sürtünme katsayısının kararlılığının bozulması, matris yapıdaki fenolik reçine, CNSL, Kevlar gibi organik esaslı bileşenlerin bozulmaya başlaması ve katı yağlayıcı olarak bulunan grafitin oksitlenmesiyle ilişkilendirilmiştir. Nitekim balata bileşiminin matris yapısında bulunan katkı bileşenlerinin TGA analizlerine bakıldığında organik kökenli katkıların $400 \text{ }^\circ\text{C}$ seviyesinin altında bozulmaya başladığı dikkati çekmektedir (Şekil 11). Benzer şekilde, grafitin de $300 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık seviyelerinden sonra oksitlenerek yağlayıcılığını kaybetmeye başladığı bilinmektedir [128, 129].



Şekil 65. H-BN içermeyen optimum balata bileşiminin (SF-3) 0,22 MPa sabit frenleme basıncı, 32 kg.m² atalet yükü ve 100 km/sa sabit frenleme hızı altında gerçekleştirilen frenleme testi (Drag Test): (a) Sürtünme katsayısının sıcaklık ve alınan yola bağlı değişimi, (b)-(i) disk ve balata temas yüzeyinin belirli bir noktasından belirli periyotlarla alınan termal kamera görüntüleri; (b) 30 sn, (c) 60 sn, (d) 90 sn, (e) 150 sn, (f) 210 sn, (g) 270 sn, (h) 330 sn ve (i) 349 sn

3.6.2. H-BN Katkısı İçeren Bileşim Üzerinden Yapılan Dinamometre Testleri

BN katkısız numunelere uygulandığı gibi %1,5 oranında h-BN katkısı yapılarak hazırlanan numunelere de TS-EN 16452 Standardının C.3.4 bendi kapsamında üç farklı basınç (0,22 MPa, 0,95 MPa ve 0,60 MPa) ve dört farklı ilk frenleme hızında (30 km/sa, 50 km/sa, 70 km/sa ve 80 km/sa) dinamometre testleri uygulanmıştır. Bu testlerden elde

edilen sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 66-69'da gösterilmiştir. Ayrıca, test sonrasında belirlenen ortalama sürtünme katsayısı, durma mesafesi, durma süresi ve maksimum disk sıcaklığı gibi veriler Tablo 12'de verilmiştir.

Bu kapsamda, h-BN içeren balata numunesi ilk olarak 0,95 MPa frenleme basıncı ve 70 km/sa ilk frenleme hızında iki adet teste tabi tutulmuştur. Bu testler arasında disk yüzeyinin oda sıcaklığına kadar tekrardan soğuması için yeterli süre beklenmiştir. Aynı şartlar altında iki kez tekrarlanan bu testlerden elde edilen sürtünme katsayısının tekerlek hızına göre değişimi Şekil 66'da verilmiştir. Bu eğrilerden her iki testte de birbirine oldukça yakın sürtünme katsayısı değişimleri elde edilmiş ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri 0,26 civarında ölçülmüştür. Her iki testte de tekerlek hızının sıfırlanmasına kadar yaklaşık 2250-2300 m'lik yol kat edilmiş olup, bu yol sonrası disk yüzeyinde okunan maksimum sıcaklık 330-350 °C aralığına kadar çıkmıştır (Tablo 12).

Yüksek basınç (0,95 MPa) ve yüksek hızda (70 km/sa) yapılan iki adet frenleme testinin ardından basınç değeri 0,22 MPa değerine düşürülmüş ve aynı numune sırasıyla 70 km/sa, 30 km/sa, 80 km/sa ve 50 km/sa ilk frenleme hız değerlerinde teste tabi tutulmuştur. Bu testlerden elde edilen sürtünme katsayısı değişim eğrileri Şekil 67'de verilmiştir. Bu eğrilerden frenlemenin başlarında hıza bağlı olmaksızın sürtünme katsayısının aynı seviyelerde başladığı sonrasında ise özellikle yüksek hızlarda yapılan frenlemelerde bir miktar düştüğü görülmektedir. Tekerlek hızının 30 km/sa değerinin altına düşmesi sonrasında ise sürtünme katsayısının bütün hız değerleri için benzer bir değişim sergileyerek, hız değeri azaldıkça artmaya devam ettiği ve durmadan önce ise anlık olarak yaklaşık 0,60 değerlerine kadar arttığı görülmektedir. Frenleme süresince elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerleri ise 70 km/sa, 30 km/sa, 80 km/sa ve 50 km/sa hızları için sırasıyla 0,26, 0,35, 0,27 ve 0,32 olarak ölçülmüştür (Tablo 12). Elde edilen bu anlık ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri aynı şartlar altında test edilen h-BN içermeyen (SF-3) balata bileşiminden elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu söylenebilir (Şekil 62 ve Tablo 11). Bu durum h-BN bileşiğinin düşük sıcaklıklarda sürtünme katsayısını artırıcı etkisiyle ilişkilendirilmiştir. Nitekim söz konusu testlerde frenleme süresince ölçülen maksimum disk yüzeyi sıcaklığı 70 km/sa, 30 km/sa, 80km/sa ve 50 km/sa hız değerleri için sırasıyla 168 °C, 87 °C, 192 °C ve 132 °C olarak belirlenmiştir. H-BN oranının optimize edildiği çalışmalarda da belirli bir disk yüzeyi sıcaklığı seviyesine kadar (220-250 °C) sürtünme katsayısının anlık olarak yükseldiği ve sonrasında ise artan sıcaklıkla birlikte düşmeye başladığı görülmüştü. Bu bulgunun literatürdeki çalışmalarla da uyumlu olduğu söylenebilir.

Öztürk ve arkadaşları [66] tarafından yapılan bir çalışmada h-BN katkısının yağlayıcılık etkisi araştırılmış ve bu etkinin yaklaşık 300 °C civarında ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Buradan hareketle sürtünme katsayısının h-BN katkısı içeren balatalarda düşük frenleme basıncı altında (düşük sıcaklıklar altında) yükselmesi beklenen bir durum olarak değerlendirilebilir.

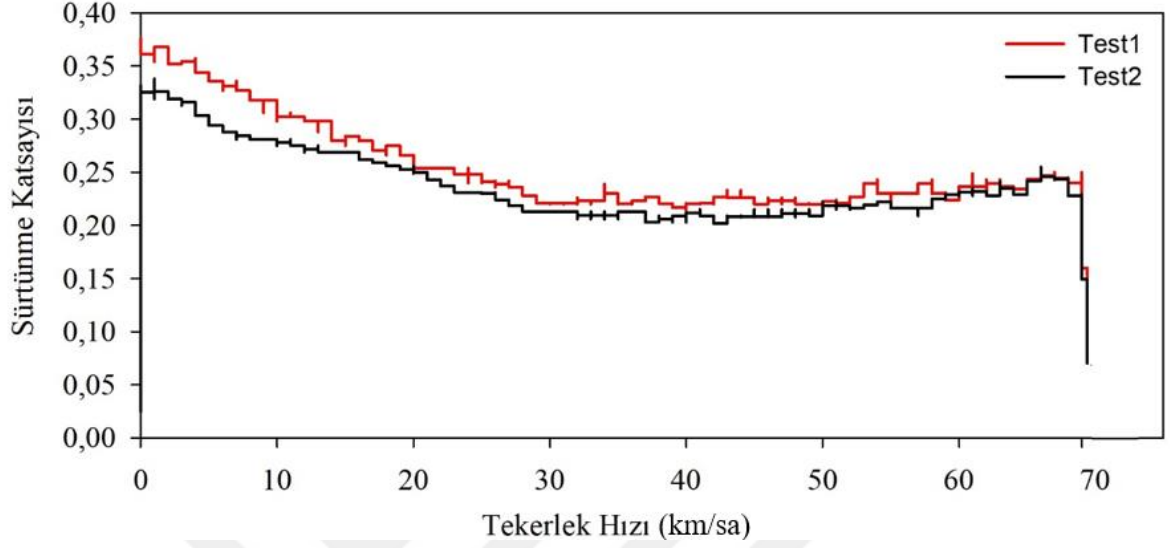
Düşük basınçta (0,22 MPa) gerçekleştirilen testlerden sonra frenleme basıncı yaklaşık 4 kat artırılarak 0,95 MPa değerine yükseltilmiş ve aynı ilk frenleme hızlarında tekrardan testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden elde edilen sürtünme katsayısı değişimleri ise Şekil 68'de verilmiştir. Düşük basınçta yapılan deneylerde elde edilen verilerle kıyaslandığında, yüksek basınç altında sürtünme katsayısının frenleme süresince nispeten daha kararlı olduğu ve daha az saçılım gösterdiği dikkati çekmektedir (Şekil 67, Şekil 68). Bu durumun büyük oranda yüzeyler arasındaki uyumun yüksek basınç altında daha iyi sağlanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek basınç etkisiyle disk ve balata yüzeyleri arasında oluşan iyi etkileşimin ve uyum, disk yüzeyinde ulaşılan maksimum sıcaklık değerlerini de önemli oranda artırmıştır. Nitekim maksimum sıcaklık değerleri 70 km/sa, 30 km/sa, 80 km/sa ve 50 km/sa ilk frenleme hızları için sırasıyla 332 °C, 127°C, 381°C ve 223°C olarak ölçülmüştür. Maksimum sıcaklık değerlerinin bir önceki test aşamasına göre önemli oranda yükselmiş olması yüksek basınç altında elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerlerini de ciddi miktarda düşürmüştür. Düşük basınç altında 70 km/sa, 30 km/sa, 80 km/sa ve 50 km/sa hızları için sırasıyla 0,26, 0,35, 0,27 ve 0,32 olarak elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerleri, bu aşamada ise aynı hız değerleri için sırasıyla 0,21, 0,23, 0,18 ve 0,20 olarak ölçülmüştür (Tablo 12).

Bu aşamada elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerlerinin aynı şartlar altında test edilen h-BN içermeyen (SF-3) balata bileşimine ait verilerle kıyaslandığında ise birbirine oldukça yakın değerlere sahip oldukları görülmektedir (Tablo 11 ve Tablo 12). Ancak, frenleme süresince sürtünme katsayısının değişimleri değerlendirildiğinde ise önemli oranda farklılık göze çarpmaktadır. BN katkısı içermeyen balata bileşimine ait sürtünme katsayısının neredeyse bütün hız değerlerinde oldukça dalgalı bir değişim sergilediği dikkati çekerken, bu durumun aynı matris yapıya %1,5 oranında h-BN bileşiği katkısı yapılması sonrasında büyük oranda ortadan kalktığı ve oldukça kararlı bir değişimin ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 63 ve Şekil 68). Bu durum, h-BN bileşiğinin yüksek sıcaklık altında yağlayıcı olarak daha iyi stabilizasyon sağladığının önemli bir göstergesidir.

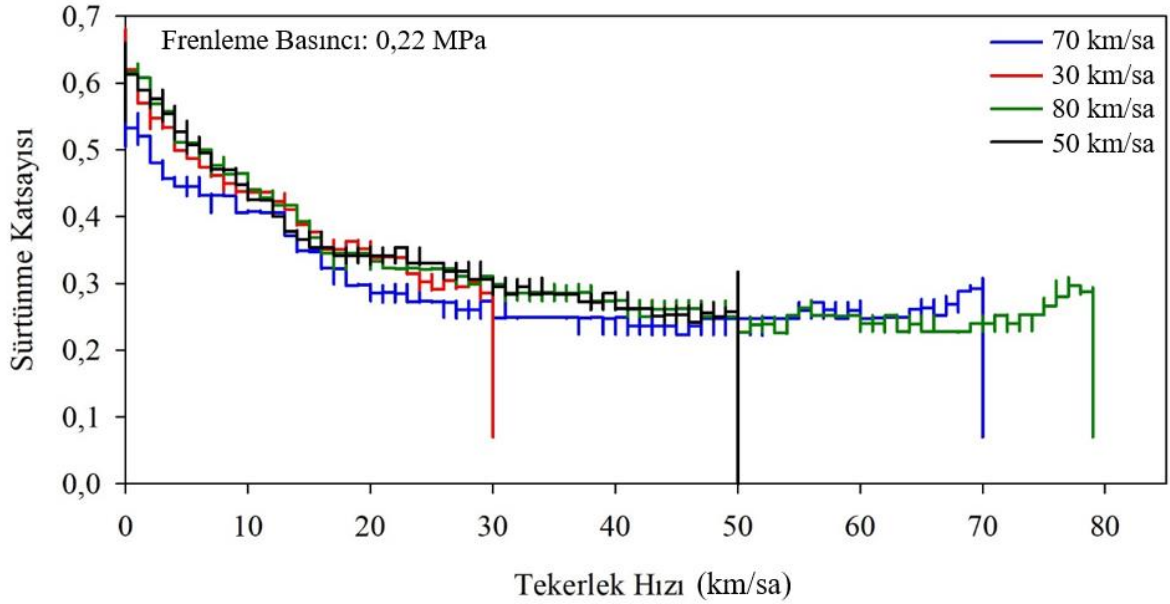
Maksimum basınçta gerçekleştirilen frenleme testleri sonrasında basınç tekrardan düşürülerek maksimum ve minimum basınç değerlerinin arasındaki 0,60 MPa değerine ayarlanmıştır. Şekil 69’da bu basınç değerinde gerçekleştirilen frenleme testlerinden elde edilen sürtünme katsayılarının değişimleri verilmiştir. Genel olarak incelendiğinde, basıncın 0,95 MPa değerinden 0,60 MPa değerine düşürülmüş olması anlık ve ortalama sürtünme katsayısı değerlerini artırdığı dikkati çekmektedir (Şekil 69 ve Tablo 12). Ortalama sürtünme katsayısı söz konusu şartlar altında 70 km/sa, 30 km/sa, 80 km/sa ve 50 km/sa ilk frenleme hızları için sırasıyla 0,24, 0,28, 0,21 ve 0,22 olarak elde edilmiştir. Bu durum benzer şekilde ulaşılan maksimum sıcaklık değerlerinde de ortaya çıkmış olup, disk yüzeyinde aynı şartlar altında sıcaklık değerleri sırasıyla 269 °C, 98 °C, 291 °C ve 175 °C olarak ölçülmüştür (Tablo 12). Disk yüzeyinde ulaşılan maksimum sıcaklık değerlerinin düşmesi sürtünme katsayısının anlık ve ortalama olarak artmasındaki en önemli etken olarak değerlendirilmiştir.

Öte yandan aynı şartlar altındaki BN katkılı ve katkısız balata bileşimleri karşılaştırılacak olursa belirgin bir farklılık göze çarpmaktadır (Tablo 11 ve Tablo 12). Burada BN katkısız balata numunesinin daha yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmektedir. BN katkısız bileşimde frenleme basıncının 0,95 MPa değerinden 0,60 MPa değerine düşürülmesi sonrası ortalama sürtünme katsayılarının yükselmesi beklenen bir durumdur. Ancak, bu değerlerin düşük frenleme basıncında (0,22 MPa) yapılan testlerde elde edilen değerlerden daha yüksek olması sürtünme karakterinin yüksek basınç etkisi altında maruz kaldığı yüksek sıcaklık etkisi sonrasında bozulduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir (Tablo 12). Bu durumun h-BN katkılı bileşimlerde beklendiği gibi ortaya çıktığı görülmektedir. Nitekim BN katkılı numunede frenleme basıncının 0,95 MPa değerinden sonra 0,60 MPa seviyesine düşürülmesi sonrası ortalama sürtünme katsayısı bir miktar yükselmiştir. Ancak bu değerler düşük basınçta (0,22 MPa) elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerleriyle kıyaslandığında daha düşük olması basınca bağlı değişimin beklendiği gibi gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, BN katkısız bileşimde 0,60 MPa frenleme basıncı dışındaki diğer basınç değerlerinde (0,22 MPa ve 0,95 MPa) gerçekleştirilen testlerde ortalama sürtünme katsayısında ilk frenleme hızına bağlı bir değişim ortaya çıkarken, bu durumun 0,60 MPa frenleme basıncı altında çıkmaması kararlılığın bozulduğunun diğer bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir (Tablo 11). Bu durumun h-BN katkılı balata bileşimde diğer frenleme basıncı değerlerinde olduğu gibi ortaya çıkmasında ise h-BN bileşiğinin önemli bir etken olduğu düşünülmektedir (Tablo 12).

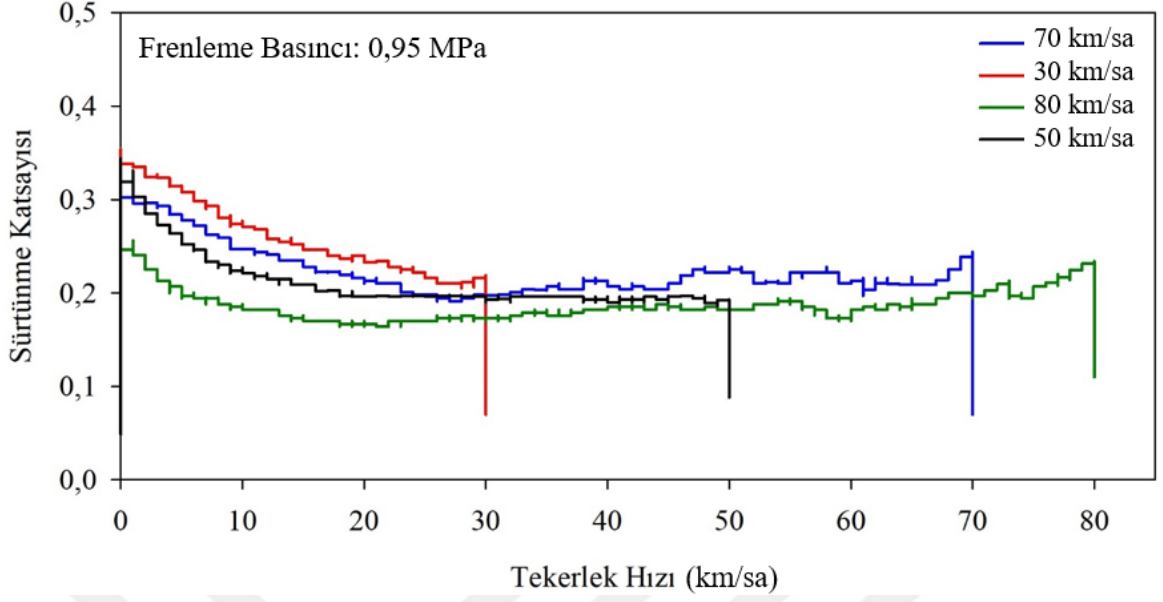
Nitekim, h-BN bileşiğinin grafitle kıyaslandığında daha yüksek sıcaklıklarda yapısı bozulmadan kararlı bir şekilde kalabildiği yapılan çalışmalarda da ortaya koyulmuştur [109].



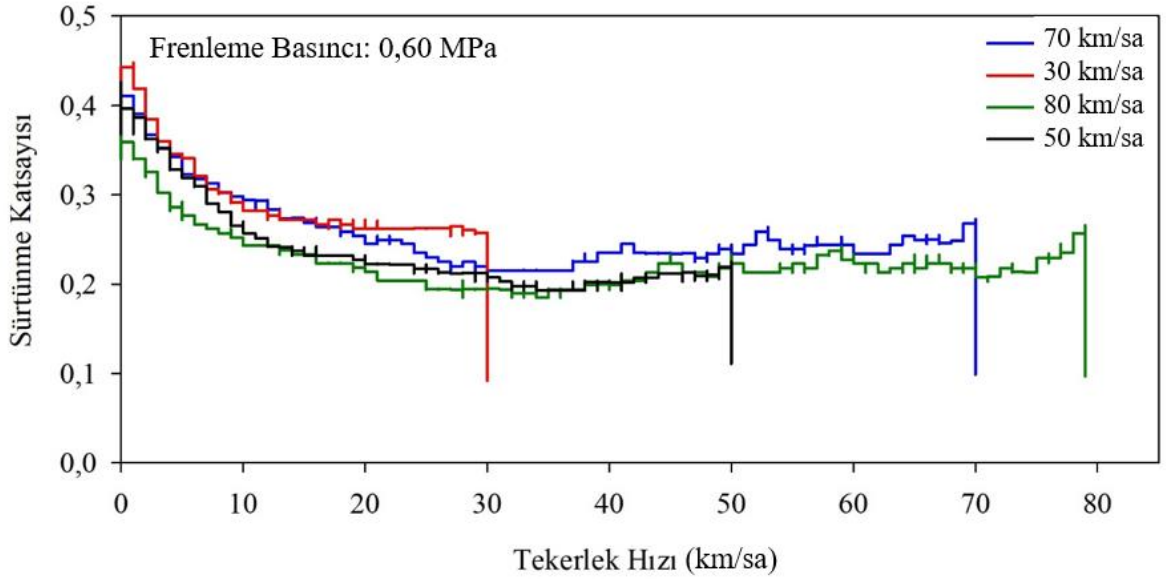
Şekil 66. 70 km/sa ilk disk frenleme hızı, 0,95 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m² başlangıç atalet yükü altında iki kez tekrarlanan dinamometre testlerinde h-BN katkılı optimum balata bileşimine (BN-2) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızına göre değişimi



Şekil 67. 0,22 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m² başlangıç atalet yükü altında farklı ilk frenleme hızlarında gerçekleştirilen dinamometre testlerinde h-BN katkılı optimum balata bileşimine (BN-2) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızı ile değişimi



Şekil 68. 0,95 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m^2 başlangıç atalet yükü altında farklı ilk frenleme hızlarında gerçekleştirilen dinamometre testlerinde h-BN katkılı optimum balata bileşimine (BN-2) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızı ile değişimi



Şekil 68. 0,60 MPa sabit frenleme basıncı ve 75 kg.m^2 başlangıç atalet yükü altında farklı ilk frenleme hızlarında gerçekleştirilen dinamometre testlerinde h-BN katkılı optimum balata bileşimine (BN-2) ait sürtünme katsayısının tekerlek hızı ile değişimi

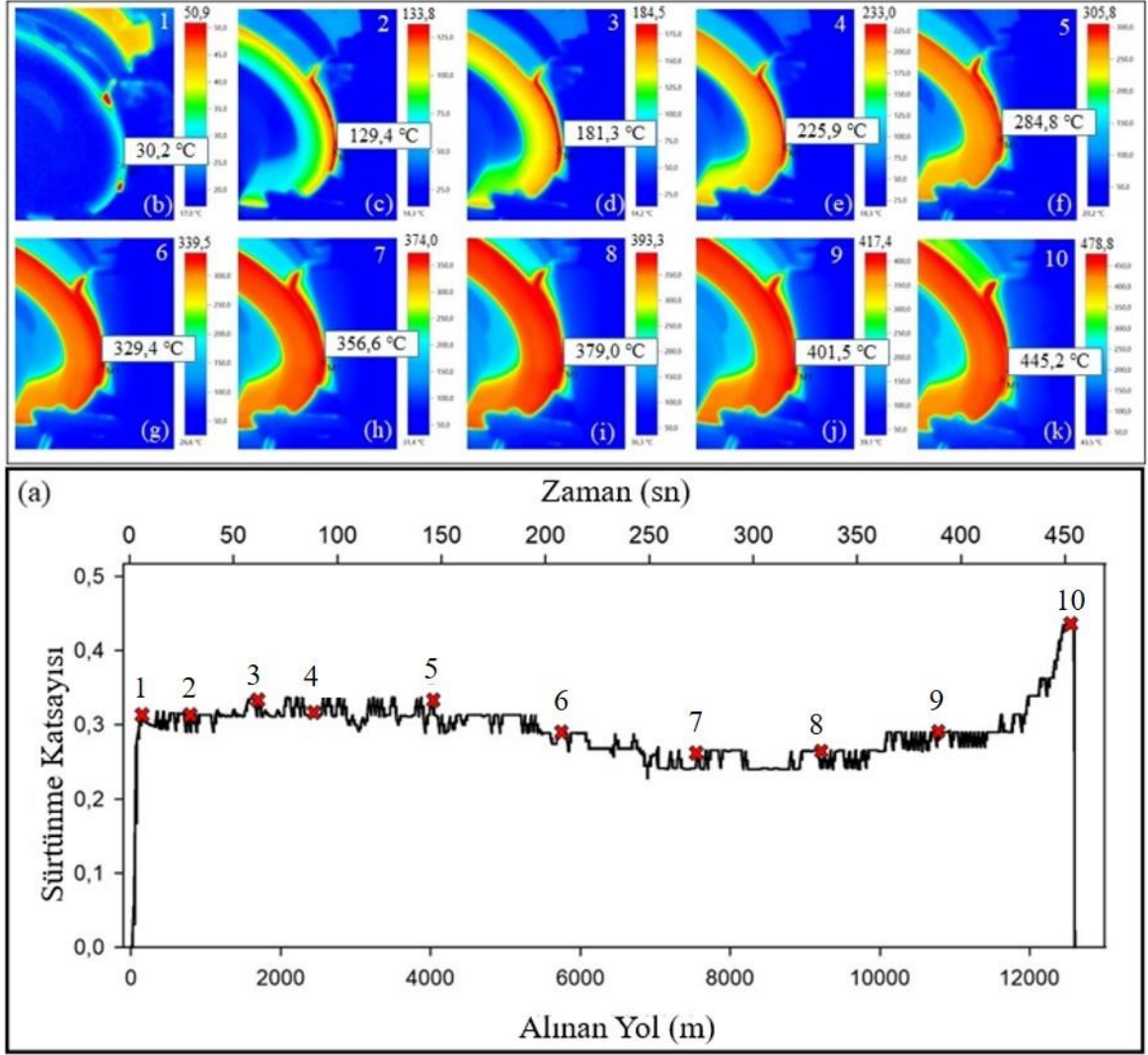
Tablo 12. H-BN katkılı bileşime sahip balata numunesine, farklı hızlarda ve farklı frenleme basınçlarında uygulanan dinamometre deneylerinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı, durma mesafesi, durma süresi ve maksimum disk sıcaklığı değerleri

Frenleme Basınç (MPa)	Frenleme İlk Hızı (km/sa)	Ölçüm Parametreleri			
		Ortalama Sürtünme Katsayısı	Durma Mesafesi (m)	Maksimum Disk Sıcaklığı (°C)	Durma Süresi (sn)
0,95	70	0,26	2237	350	243
	70	0,254	2294	353	251
0,22	70	0,265	3868	168	432
	30	0,350	775	87	194
	80	0,270	4063	192	451
	50	0,325	2410	132	317
0,95	70	0,207	2645	332	282
	30	0,231	525	127	126
	80	0,178	3666	381	360
	50	0,201	1587	223	221
0,60	70	0,24	3240	269	346
	30	0,279	599	98	142
	80	0,212	3979	291	390
	50	0,224	1808	175	255

H-BN katkılı bileşimden üretilen gerçek boyutlu balatalardan çıkarılan numune farklı frenleme basıncı ve hızlarında test edildikten sonra kilitli fren simülasyonu için drag testine tabi tutuldu. Şekil 70 (a)-(k)'de bu testten elde edilen sürtünme katsayısının alınan yol ve frenleme süresine bağlı değişiminin yanında disk ve balata temas yüzeyinin belirlenen bir noktadan belirli periyotlarda alınmış termal kamera görüntüleri verilmiştir. Bu değişimler incelendiğinde, sürtünme katsayısının frenleme süresinin önemli bir bölümünde oldukça kararlı kaldığı ve frenlemenin sonlarına doğru sürtünme katsayısının ani bir şekilde

yükseldiği dikkati çekmektedir. Frenlemenin başlangıcında 0,30 seviyelerinde başlayan sürtünme katsayısı yaklaşık 200 sn boyunca bu değerini korumuş ve bu noktadan sonra kademeli olarak azalarak 0,24 seviyesine kadar gerilemiştir (Şekil 70 (a)). Sürtünme katsayısının kademeli olarak düşmeye başladığı sıcaklık değerinin yaklaşık olarak 300 °C civarına karşılık geldiği görülmektedir (Şekil 70 (f) ve (g)). Öztürk ve arkadaşları [66] tarafından yapılan benzer bir çalışmada da 300 °C sonrasında h-BN bileşiğinin yağlayıcı özelliğinin ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Bu süreçte 0,24 seviyelerine kadar gerileyen sürtünme katsayısı bu değerini disk yüzeyi sıcaklığının yaklaşık 400-420 °C aralığına yükselmesine kadar korumuş ve sonrasında ani bir şekilde yükselerek 0,42 seviyesine kadar çıkmıştır. Sürtünme katsayısının 0,40 seviyesinin üzerine çıkması sonrasında test sonlandırılmıştır. Frenlemenin tamamlanmasından hemen önce alınan termal kamera görüntüsü incelendiğinde ise disk sıcaklığının 450 °C seviyesine kadar ulaştığı görülebilmektedir (Şekil 70 (k)).

Aynı koşullar altında gerçekleştirilen drag testlerde sürtünme katsayısının değişimi açısından BN katkılı ve katkısız balata bileşimleri arasında dikkate değer bir farkın ortaya çıktığı görülmektedir. BN katkılı balata numunesine ait sürtünme katsayısının değişimi detaylı incelenecek olursa (Şekil 70), 300 °C civarında sürtünme katsayısının bir miktar düştüğü ve uzunca bir süre bu seviyelerdeki değerini koruduğu dikkati çekmektedir. Bu durumun BN katkısız balata bileşiminde ortaya çıkmadığı ve sürtünme katsayısının sıcaklık arttıkça sürekli arttığı belirlenmiştir (Şekil 65). Bu farklılığın büyük oranda yapıdaki h-BN katkısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim BN katkısız balata bileşiminin yapısında yalnızca grafit esaslı bir katı yağlayıcının bulunması ve grafitin özellikle yüksek sıcaklıklarda oksitlenerek yağlayıcılık özellikleri yitirmeye başlaması sürtünme katsayısının test sırasında sürekli yükselmesindeki en önemli etken olarak değerlendirilmektedir. Aynı matris yapıya, grafit miktarı değiştirilmeden ağırlıkça %1,5 oranında eklenen h-BN bu yükseliş trendini yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı etki yaparak büyük oranda geciktirmiştir. Ancak, sıcaklığın 400-420 °C seviyelerine ulaşması sonrasında benzer şekilde sürtünme katsayısında ani bir yükselmenin olması, yukarıdaki bölümlerde de açıklandığı gibi organik kökenli bileşenlerin yapısal olarak bozulmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 69. H-BN katkılı bileşimden (BN-2) üretilen balatlardan çıkarılan numnelere 0,22 MPa sabit frenleme basıncı, 32 kg.m² atalet yükü ve 100 km/sa sabit frenleme hızı altında gerçekleştirilen frenleme testi (Drag Test): (a) Sürtünme katsayısının sıcaklık ve alınan yola bağlı değişimi, (b)-(k) disk ve balata temas yüzeyinin belirli bir noktasından belirli periyotlarla alınan termal kamera görüntüleri: (b) 5 sn (c) 30 sn, (d) 60 sn, (e) 90 sn, (f) 150 sn, (g) 210 sn, (h) 270 sn, (i) 330 sn, (j) 390 sn ve (k) 450 sn

4. GENEL SONUÇLAR

Bu tez kapsamında demir yolu taşıtlarına yönelik optimum özellik çıktıları veren hegzagonal bor nitrid (h-BN) katkılı ve katkısız asbest içermeyen kompozit balata bileşimleri geliştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak, bilimsel birikim, ön çalışmalar ve literatür bilgileri ışığında temel bir balata bileşimi belirlenmiştir. Sonrasında ise bu matris yapıdaki katkı bileşenlerinin türü ve miktarları değiştirilerek hazırlanan örneklerin yapısal, fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikleri kapsamlı bir şekilde ele alınarak bir en iyileme çalışması yürütülmüştür. Bu çalışmalar sonunda en iyi özellik çıktıları sergileyen h-BN katkılı ve katkısız bileşimler ortaya konulmuş ve bu bileşimlerden gerçek boyutlu balatalar üretilmiştir. Bu balatalar üzerinden çıkarılan numuneler farklı hız ve frenleme basınçlarında düşük ölçekli dinamometre benzetim testlerine tabi tutularak en uygun bileşimlerin doğruluğu sınanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Oluşturulan başlangıç (temel) balata bileşimine (TYO-1) ilave edilen taş yünü, çalışılan aralıkta (%30 - %45) bileşimin mekanik özellikleri (sertlik, basma dayanımı, elastisite modülü ve sıkıştırılabilirlik) üzerinde kayda değer bir etki oluşturmazken, tribolojik özellikler (sürtünme, aşınma ve ilintili konular) üzerinde etkili olmaktadır.
2. Karışımdaki taş yünü oranının %30'dan %45'e çıkarılması aralıklı frenlemede elde edilen ortalama sürtünme katsayısını düşürürken, aşınma direnci üzerinde ise belirgin bir etki oluşturmamaktadır. Nitekim başlangıç temel bileşim için 0,31 olarak elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değeri, %45 taş yünü katkısı sonrasında 0,19 seviyesine kadar düşmüştür. Sürtünme katsayısında görülen bu düşüşün, taş yünü ilavesi karşılığında matris yapıdaki barit oranının azaltılmasından ve sürtünme katsayısı değişiminin daha kararlı hale gelmesinden kaynaklanmaktadır.
3. Matris yapıdaki taş yünü oranının artırılması sürekli frenleme testlerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerini ve aşınma direncini de doğrudan etkilemektedir. Nitekim sürekli frenleme testinde başlangıç temel bileşimine sahip (TYO-1) balata numunelerin ortalama sürtünme katsayısı 0,27 olarak elde edilirken, bu bileşime katılan %45 oranındaki taş yünü bu değeri 0,15'e kadar düşürmektedir. Sürekli frenlemede ortaya çıkan boyut değişimi (aşınma derinliği) ise taş yünü oranının %30'dan %45'e çıkarılmasıyla 1,4 mm'den 0,3 mm'ye düşmüştür. Bu ise taş yünü katkısının sürekli

frenleme testlerinde bileşimin aşınma direncini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ancak matris yapıdaki taş yünü oranının düşük seçilmesi durumunda, sürekli frenleme testlerinde disk ve balata ara yüzeyinde kıvılcım oluşmaktadır. Bu durumun ise sürtünme katsayısı değişimindeki ani yükselmelerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. Matris yapıdaki taş yünü oranının değiştirilmesi balata numunesi aşınma yüzeyinin morfolojik yapısı üzerinde de etkili olmaktadır. Nitekim %30 taş yünü içeren bileşimin aşınma yüzeyinde yoğun sıvanma bölgeleri oluşurken, %45 taş yünü içeren bileşimde bu durum tamamıyla ortadan kalkmakta ve oldukça homojen bir sürtünme yüzey morfolojisi oluşmaktadır.
5. Başlangıç temel bileşim (TYO-1) üzerinden optimum taş yünü oranının belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar neticesinde, %35'lik taş yünü oranının (TYO-2) optimum özellik çıktıları açısından en uygun oran olduğu belirlenmiştir.
6. Optimum taş yünü katkısıyla belirlenen balata bileşimine (TYO-2) %1-5 aralığında eklenen Kaju esaslı sıvı reçine (CNSL), bu bileşimin sertlik ve elastisite modülü değerlerini düşürmektedir. Nitekim TYO-2 balata bileşiminin 97 HRX olan ortalama sertlik değeri, %5 CNSL katkısı sonrasında 82 HRX seviyesine kadar düşerken, 1490 MPa olan elastisite modülü değeri ise 1050 MPa seviyesine kadar inmiştir. Ancak bileşimin sıkıştırılabilirlik değeri artan CNSL oranı ile bütün basınç değerlerinde önemli oranda artmaktadır. Bileşimin basma dayanımı değeri ise %1 CNSL oranı ile 115 MPa'dan 155 MPa'a kadar çıkarken, devamında artan CNSL oranı ile azalma eğilimine girerek %5 CNSL oranında bu değer 121 MPa değerini almıştır. CNSL katkısının bileşimin mekanik özelliklerinde meydana getirdiği bu değişim, büyük oranda CNSL'nin elastik yapısından ve artan CNSL oranının dengelenmesi için kütleli olarak azaltılan fenolik reçineden (çapraz bağ oluşumundan zayıflamasından) kaynaklandığı düşünülmektedir.
7. Optimum taş yünü katkısıyla belirlenen balata bileşimine (TYO-2) katılan CNSL, aralıklı frenleme şartlarında bileşimin aşınma direncini artırırken, sürtünme katsayısını ise düşürmektedir. Nitekim CNSL katkısı öncesi bileşimin (TYO-2) $0,112 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ olarak elde edilen özgül aşınma oranı, %5 CNSL katkısı sonrasında $0,013 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ seviyesine kadar gerileyerek bileşimin aşınma direncini yaklaşık 10 kat artırmıştır. Sürtünme katsayısı ise 0,27 değerinden %5 CNSL katkısı sonucu 0,18'e kadar düşmüştür. Balata bileşimine katılan CNSL ile meydana gelen bu değişimin büyük

orandan aşınma sırasında ikincil plato oluşumunun artması ve CNSL'nin sürtünme düzenleyici özelliğinden kaynaklandığı söylenebilir.

8. Optimum taş yünü katkısıyla belirlenen balata bileşimine (TYO-2) katılan CNSL, sürekli frenleme sırasında bileşimin sürtünme katsayısını oluşturan sıcaklık değerine göre etkilemektedir. Özellikle 300 °C'nin üzerinde oluşan disk sıcaklıklarında artan CNSL oranıyla birlikte balataların sahip olduğu anlık sürtünme katsayısı değerleri düşmektedir. Bu durumun yüksek sıcaklıklara çıkıldığında CNSL yapısının bozularak bileşimden uzaklaşması ve ara yüzeyde daha etkin sürtünme filmi (ikincil temas platoları) oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
9. Optimum taş yünü katkısıyla belirlenen balata bileşimine (TYO-2) katılan CNSL, aşınma yüzeylerinin morfolojik görünümünü de etkilemektedir. Düşük oranlarda (%1-3) CNSL içeren bileşimlerin sürtünme yüzeylerinin büyük bölümü ikincil temas platolarıyla kaplanırken, matristeki CNSL oranının artırılmasıyla (%4 ve %5) ikincil temas platosu oluşumu kademeli olarak azalmaktadır.
10. Optimum taş yünü katkısıyla belirlenen balata bileşimi (TYO-2) üzerinden optimum CNSL oranının belirlenmesine yönelik yapılan bu çalışmalar neticesinde, %5'lik CNSL oranı (CN-5) optimum özellik çıktılarını açısından en iyi oran olarak belirlenmiştir.
11. Optimum CNSL katkısıyla belirlenen balata bileşimi (CN-5) içerisindeki fenolik reçine oranının %11-15 aralığında değiştirilmesi, başlangıç bileşiminin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Matris yapıdaki azalan fenolik reçine oranıyla, bileşimin sertlik, basma dayanımı ve elastisite modülü değerleri azalırken, sıkıştırılabilirlik oranı ise artmaktadır. Nitekim başlangıç bileşimi (CN-5) için sırasıyla 82 HRX, 72 MPa ve 1293 MPa olarak belirlenen sertlik, basma dayanımı ve elastisite modülü değerleri, matris yapıdaki azalan fenolik reçine oranıyla birlikte kademeli olarak azalarak %11 fenolik reçine katkısı sonrasında sırasıyla 64 HRX, 58 MPa ve 951 MPa değerlerini almaktadır. Bileşimin 17 µm (10 Bar basınç altında), 32 µm (20 Bar basınç altında), 56 µm (40 Bar basınç altında) , 91 µm (80 Bar basınç altında) ve 152 (160 Bar basınç altında) olan başlangıçtaki sıkıştırılabilirlik değerleri ise uygulanan bütün basınçlarda azalan fenolik reçine oranıyla artmış ve % 11 oranında katılan reçine sonrası sırasıyla 30 µm (10 Bar basınç altında) , 49 µm (20 Bar basınç altında), 76 µm (40 Bar basınç altında) , 115 µm (80 Bar basınç altında) ve 198 (160 Bar basınç altında) değerlerine çıkmıştır. Bileşimdeki fenolik reçine miktarının azalmasıyla mekanik özelliklerde

meydana gelen bu değişim yapıda çapraz bağ oluşumunu sağlayan sertleştirici ajan miktarının azalmış olmasından kaynaklanmaktadır.

12. Optimum CNSL katkısıyla belirlenen balata bileşimindeki (CN-5) fenolik reçine oranının değiştirilmesi bileşimin sürütme katsayısı ve aşınma direnci üzerinde de etkili olmaktadır. Matris yapıdaki reçine miktarının %15 seviyesinden %11'e düşürülmesi, bileşimin ortalama sürütme katsayısı değerini sınırlı oranda artırırken, aşınma direncini ise olumsuz yönde etkilemektedir. Nitekim %15 oranında fenolik reçine içeren bileşimin 0,18 olan ortalama sürütme katsayısı değeri, bu oranın %11'e düşürülmesiyle 0,21 seviyesine kadar yükselmiştir. Ancak, aralıklı frenleme sürecinde %15 fenolik reçine içeren CN-5 bileşiminde 0,013 cm³/MJ'lük bir aşınma kaybı ortaya çıkarken, %11 fenolik reçine içeren bileşimde bu değer önemli oranda artarak 0,028 cm³/MJ seviyesine kadar yükselmiştir. Bileşimdeki fenolik reçine oranındaki azalmayla birlikte ortaya çıkan bu değişimin büyük oranda yapıdaki reçineden kaynaklı bağlayıcılık etkilerinin zayıflaması ve bileşimin yapısal bütünlüğünün daha kolay bozulmasından kaynaklandığı düşünölmektedir.
13. Optimum CNSL katkısıyla belirlenen balata bileşimindeki (CN-5) reçine oranının azaltılması sürekli frenleme testlerinde ortaya çıkan sürütme katsayısı değişimini de etkilemektedir. Nitekim matris yapıdaki reçine miktarı azaldıkça özellikle 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda daha yüksek anlık sürütme katsayısı değerleri elde edilmektedir. Bu durumun sürütme yüzeyinde oluşan ikincil temas platolarının azalmasından kaynaklandığı belirlenmiştir.
14. Optimum CNSL katkısıyla belirlenen balata bileşimi (CN-5) üzerinde en uygun fenolik reçine oranının belirlenmesine yönelik yapılan bu çalışmalar neticesinde, %12'lik reçine oranını optimum özellik çıktıkları açısından en uygun oran (RC-3) olduğu belirlenmiştir.
15. Optimum fenolik reçine katkısıyla oluşturulan balata bileşimine (RC-3) %5-20 aralığında katılan çelik fiberi bileşimin mekanik özellikleri üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Artan çelik fiberi oranıyla, bileşimin sertlik, elastisite modülü ve basma dayanımı değerleri azalırken, sıkıştırılabilirlik değerleri ise önemli oranda artmaktadır. Nitekim sırasıyla 73 HRX, 63 MPa ve 1035 MPa olan başlangıç bileşiminin (RC-3) sertlik, elastisite modülü ve basma dayanımı değerleri, %20 çelik fiberi katkısı sonrasında sırasıyla 62 HRX, 41MPa ve 1055 MPa değerlerini almaktadır. Mekanik özelliklerde görölen bu bozulma büyük oranda artan çelik fiberi miktarıyla matris yapıdaki boşluk oranının da artmasından ve buna bağlı yapının mekanik bütünlüğünün

bozulmasından kaynaklanmıştır. Nitekim başlangıç RC-3 bileşimi için %19,2 olarak belirlenen hacimsel boşluk oranı, yapıya katılan % 20 çelik fiberi katkısı sonrasında % 29 seviyesine kadar yükselmiştir.

16. Optimum fenolik reçine katkısıyla oluşturulan balata bileşimine (RC-3) katılan çelik fiberi, genel olarak balata bileşiminin ortalama sürtünme katsayısı değerini artırırken, aşınma direncini ise düşürmektedir. Nitekim %5 çelik fiberi katkısı, başlangıç bileşiminin 0,20 olan ortalama sürtünme katsayısı değerini 0,27 seviyesine kadar yükseltmektedir. Bu değer %20 çelik fiberi içeren bileşimde ise 0,29 olarak belirlenmiştir. Artan çelik fiberi oranıyla bileşimin aşınma oranı da artmakta ve başlangıçta 0,027 cm³/MJ olan aşınma oranı, %20 oranında çelik fiberi içeren bileşimde 0,040 cm³/MJ seviyesine kadar yükselmektedir. İlave edilen çelik fiberi oranıyla bileşimin sürtünme katsayısında görülen yükselmenin büyük oranda çelik fiberi ile artan termal kararlılık neticesinde ortaya çıktığı, aşınma direncindeki düşüşün ise çelik fiberinden kaynaklı mekanik özelliklerin olumsuz etkilenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
17. Optimum fenolik reçine katkısıyla oluşturulan balata bileşimine (RC-3) katılan çelik fiberi aralıklı frenleme testlerinde olduğu gibi, sürekli frenleme sırasında da bileşimin sürtünme katsayısı değişimini etkilemektedir. Nitekim çelik fiberi içermeyen başlangıç bileşimi (RC-3) sürekli frenleme sırasında daha kararsız bir sürtünme katsayısı değişimi sergilerken, bu değişim genel olarak yapıya katılan çelik fiberi ile birlikte daha kararlı bir hale gelmektedir. Bu kararlılıkta belirli bir sıcaklık seviyesinin (yaklaşık 250 °C) altında çelik fiberi oranının çok fazla bir etkisi olmazken, artan çelik fiberi oranıyla birlikte yüksek disk sıcaklıklarında daha yüksek anlık sürtünme katsayısı değerleri elde edilmektedir. Bu etki ise büyük oranda artan çelik fiberi oranıyla birlikte yükselen termal iletkenlikle ilişkilendirilmiştir.
18. Optimum fenolik reçine katkısıyla oluşturulan balata bileşimine (RC-3) eklenen çelik fiberi, aşınma yüzeyinin morfolojik özellikleri üzerinde de etkili olmaktadır. Yapıya katılan artan çelik fiberi oranıyla, bu bileşimlerden üretilen numunelerin aşınma yüzeyleri sürtünme tabakaları açısından çok daha homojen bir karakter almaktadır. Ancak artan çelik fiberi oranıyla numunelerin aşınma yüzeylerinde nispeten daha boşluklu bir yapı oluşmaktadır. Bunun ise yapıya katılan çelik fiberinin çevresinde düşük bağdaşıklık nedeniyle kolay boşlukların oluşmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

19. Optimum fenolik reçine katkısıyla belirlenen balata bileşimi (RC-3) üzerinden en uygun çelik fiberi oranının belirlenmesine yönelik yapılan bu çalışmalar neticesinde, %15'lik çelik fiber oranının optimum özellik çıktıları açısından en uygun oran (SF-3) olduğu belirlenmiştir.
20. Optimum çelik fiberi katkısıyla belirlenen balata bileşimine (SF-3) farklı oranlarda katılan hegzagonal bor nitrür (h-BN), bileşiminin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir değişime neden olmazken, sürtünme ve aşınma özellikleri üzerinde etkili olmakta ve bu etki artan h-BN'nin katkısı ile belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Nitekim h-BN katkısız bileşime sahip numune aralıklı frenleme testlerinde 0,27 ortalama sürtünme katsayısına sahipken, %1 ve %1,5 h-BN katkısı sonrası bu değer bir miktar artarak sırasıyla 0,28 ve 0,30 seviyelerine çıkmaktadır. Ancak h-BN oranının %2,0'a çıkarılması sonrasında bu değer daha fazla artarak 0,38 seviyelerine kadar yükselmektedir. Bu artış ise bileşimin aşınma oranını ve dolayısıyla aşınma direncini düşürmektedir. Ayrıca, artan h-BN oranı bileşimin sürtünme katsayısının kararlılığını da olumsuz yönde etkilenmektedir.
21. Optimum çelik fiberi katkısıyla belirlenen balata bileşimine (SF-3) farklı oranlarda katılan h-BN bileşiği, sürekli frenleme şartlarında da sürtünme katsayısının değişimini önemli oranda etkilemektedir. Matris yapıdaki h-BN oranı arttıkça sürtünme katsayısı anlık olarak daha yüksek değerlerde elde edilmektedir. Nitekim %1,0 oranında h-BN içeren balatalarda sürtünme katsayısı anlık maksimum 0,30 seviyelerine kadar ulaşırken, %1,5 ve %2,0 h-BN içeren balata bileşimlerinde bu değer sırasıyla 0,33 ve 0,40 seviyelerine kadar çıkmaktadır.
22. Optimum çelik fiberi katkısıyla belirlenen balata bileşimine (SF-3) farklı oranlarda katılan h-BN, bileşimin düşük sıcaklıklarda sürtünme katsayısını artırırken, yüksek sıcaklıklarda belirli bir sıcaklık seviyesinin üzerinde azaltıcı etki yapmaktadır. Nitekim bu durumun hem aralıklı frenleme testlerinde hem de sürekli frenleme testlerinde oldukça belirgin bir şekilde ortaya çıktığı gözlenmektedir.
23. Optimum fenolik reçine katkısıyla belirlenen balata bileşimi (RC-3) üzerinden en uygun h-BN oranının belirlenmesine yönelik yapılan bu çalışmalar neticesinde, %1,5'lik h-BN oranının optimum özellik çıktıları açısından en uygun oran (BN-2) olduğu belirlenmiş ve bu bileşim üzerinden dinamometre testleri yapılmıştır.

24. Bu tez çalışmasında tabandan tavana yaklaşımıyla geliştirilen h-BN katkısız (SF-3) ve katkılı (BN-2) balata bileşimlerinden demir yolu taşıtlarına yönelik sabo tipinde gerçek boyutlardaki balatalar başarıyla üretilmiştir.
25. Üretilen balatalardan çıkarılan blok tipi numuneler farklı ilk frenleme hızlarında düşük ölçekli (1/10) dinamometre testlerine tabi tutulmuştur. Uygulanan farklı frenleme hızlarının her iki bileşimden üretilen balata örneklerinin sürtünme katsayısı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Her iki balata numunesi için de bütün frenleme basınçlarında ilk frenleme hızı arttıkça numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değeri düşmektedir.
26. Dinamometre testlerinde ilk frenleme hızının değişmesi her iki bileşimden üretilen balata numunelerinin sürtünme katsayısının değişim karakterini etkilemektedir. Nitekim ilk frenleme hızı arttıkça sürtünme katsayısı daha kararsız (dalgalı) bir değişim sergilemektedir. Sürtünme katsayısında görülen bu kararsız davranış h-BN katkısız bileşimden (SF-3) üretilen balata numunelerinde çok daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır.
27. Dinamometre testlerinde frenleme basıncının artması, her iki bileşiminden üretilen balata numunelerinin sürtünme katsayısı değerlerini doğrudan etkilemektedir. Frenleme basıncı ile h-BN katkılı (BN-2) balata bileşiminden üretilen balata örneğinin sürtünme katsayısı arasında lineer bir ilişki ortaya çıkarken, bu durum h-BN katkısız bileşimden üretilen balata örneğinde görülmemektedir.
28. Düşük frenleme basıncında (0,22 MPa) h-BN katkılı bileşimden (BN-2) üretilen balata numuneleri, h-BN içermeyen bileşimden (SF-3) üretilen balata numunelerinden daha yüksek sürtünme katsayısı değerleri sergilemektedirler. Ancak frenleme basıncı artırıldığında (0,60 MPa ve 0,90 MPa) ise bu durum tersine dönmekte ve h-BN içermeyen bileşimden üretilen balata numuneleri daha yüksek sürtünme katsayısı değerleri sergilemektedir. Bu durumun büyük oranda h-BN bileşiğinin yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkan yağlayıcı özelliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim frenleme basıncı arttıkça ara yüzeyde oluşan sürtünme ısısı ve dolayısıyla h-BN kaynaklı yağlayıcı film oluşumu da artmaktadır.
29. H-BN katkılı (BN-2) ve katkısız (SF-3) bileşimlerinden üretilen balata numuneleri ile 100 km/sa sabit frenleme hızında ve 0,22 MPa sabit frenleme basıncında yapılan kilitli fren simülasyon testinde (drag test), numunelerin sürtünme katsayısı değişimleri ara yüzeyde oluşan sıcaklıktan büyük oranda etkilenmektedir. H-BN katkısız bileşimden

(SF-3) üretilen balata numunesinin anlık sürtünme katsayısı değeri artan disk sıcaklığıyla artarken, h-BN katkılı bileşimden (BN-2) üretilen numunesinin sürtünme katsayısı 300 °C'ye kadar kararlı bir şekilde değerini korurken, bu değerden sonra azalma eğilimine girmektedir. Bu azalmanın, h-BN katkılı bileşiğin özellikle yüksek sıcaklıklarda etkin olmaya başlayan yağlayıcılık etkisinden kaynaklanmış olduğu değerlendirilmiştir.

- 30.** Dinamometre testlerinde, balata numunesi ve disk ara yüzeyinde oluşan yüksek ısı h-BN katkılı ve katkısız bileşimlerden üretilen balata örneklerinin sürtünme karakterini etkilemektedir. Nitekim disk yüzeyinde okunan sıcaklığın 400-420 °C ulaşması sonrasında her iki bileşime ait numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinde ani yükselmeler oluşmaktadır. Bu ani yükselme etkisinin büyük oranda matris yapıdaki diğer bileşenlerin ısıdan etkilenmesi neticesinde bozulmaya başlaması sonucunda ortaya çıktığı düşünülmektedir.

5. ÖNERİLER

1. Elektrikli araçlar ve uçak balatalarına yönelik de bu tür bir bileşim optimizasyonu çalışmaları yürütülebilir.
2. Geliştirilen bileşimlerden üretilecek gerçek boyutlu balatalarla tam ölçekli dinamometre testleri ve alan testleri yapılabilir.
3. Balata bileşimlerine h-BN benzeri başka sürtünme düzenleyici bileşenler de ilave edilerek, bunların balata performansına etkileri incelenebilir.
4. Balata bileşimlerine nano ölçekte tane boyutuna sahip h-BN ilave edilerek, bunların balata performanslarına etkileri incelenebilir. Ayrıca bu sayede makro, mikro ve nano ölçekteki tane boyutlarına sahip h-BN'ün balata bileşimleri üzerindeki boyut etkileri de araştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

1. Konrad, R., Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems, First Edition, Springer Vieweg, 2015.
2. Bijwe, J., Composites as Friction Materials: Recent Developments in Non-Asbestos Fiber Reinforced Friction Materials-A Review, Polymer Composites, 18, 3 (1997) 378-396.
3. Ibhadode, A. O. A. ve Dagwa, I. M., Development of Asbestos-Free Friction Lining Material from Palm Kernel Shell, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 30, 2 (2008) 166-173.
4. Kusiorowski, R., Zaremba, T., Piotrowski, J. ve Adamek, J., Thermal Decomposition of Different Types of Asbestos, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 109 (2012) 693–704.
5. Friedrich, K. ve Breuer, U., Multifunctionality of Polymer Composites-Chapter 17, Elsevier Science, Oxford, 2015.
6. Ho S.C., Effect of Fiber Addition on Mechanical and Tribological Properties of a Copper/Phenolic-Based Friction Material, Wear, 258 (2005) 861–869.
7. Öztürk, B., Effects of Resin Type and Fiber Length on the Mechanical and Tribological Properties of Brake Friction Materials, Tribology Letters, 42 (2011) 339–350.
8. Dureja, N., Bijwe, J. ve Gurunath, P. V., Role of Type and Amount of Resin on Performance Behavior of Non-Asbestos Organic (NAO) Friction Materials, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 28, 4 (2009) 489-497.
9. Yi, G. ve Yan, F., Effect of Hexagonal Boron Nitride and Calcined Petroleum Coke on Friction and Wear Behavior of Phenolic Resin-based Friction Composites, Materials Science and Engineering A, 425 (2006) 330–338.
10. Cho, M. H., Kim, S. J., Kim, D. ve Jang, H., Effects of Ingredients on Tribological Characteristics of a Brake Lining: An Experimental Case Study, Wear, 258 (2005) 1682–1687.
11. Blau, P. J., Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives, <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub57043.pdf> 21 Nisan 2020.
12. Dante, R. C., Handbook of Friction Materials and Their Applications, First Edition, Woodhead Publishing, 2015.
13. Abdul Rahman B. A. R., Friction Material (Metal Reinforcement) Analysis of Brake Pad for Light Rail Train System, Master of Science, Faculty of Engineering Technology University Tun Hussein Onn, Malaysia, 2016.

14. Toros, M., Fren Balatalarında Nano Malzemelerin Kullanımının Frenleme Performansına Etkilerinin Deneysel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2011.
15. Bowden, F. P. ve Tabor, D., *The Friction and Lubrication of Solids*, Oxford University Press, London, 2001.
16. Childs, P., *Mechanical Design Engineering Handbook-Chapter 13*, Butterworth Heinemann, Oxford, 2014.
17. Temiz, V., Kavramalar, https://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Kavramalar_2.pdf 21.04.2020.
18. Jang, H. ve Kim, S. J., Brake Friction Materials, *Polymer Tribology*, (2009) 506-532.
19. Baker, R., Changes Caused by Legislation Against Asbestos, *Powder Metallurgy*, 35, 4 (1992) 255-256.
20. Berry, G., Mortality and Cancer Incidence of Workers Exposed to Chrysotile Asbestos in The Friction Product Industry, *The Annals of Occupational Hygiene*, 38, 4 (1994) 539-546.
21. Öztürk, B., Arslan, F. ve Öztürk, S., Effects of Different Kinds of Fibers on Mechanical and Tribological Properties of Brake Friction Materials, *Tribology Transactions*, 56, 4 (2013) 536-545.
22. Park, S. H., Types and Health Hazards of Fibrous Materials Used as Asbestos Substitutes, *Safety and Health at Work*, 9 (2018) 360–364.
23. Knox, C. E., Fiberglass Reinforcement, *Handbook of Composites*, Van Nostrand, Reinhold Company, 136-159. 1982.
24. Gopal, P., Dharani, L. R. ve Blum, F. D., Fade and Wear Characteristics of a Glass-Fiber-Reinforced Phenolic Friction Material, *Wear*, 174, 1-2 (1994) 119-127.
25. Wallenberger, F. T., Watson, j. C. ve Li, H., Glass Fibers, *ASM Handbook*, 21 (2001) 27-34.
26. Holman, J. P., *Heat Transfer*, 8th edition, McGraw-Hill, New York, 1997.
27. Singha, K., A Short Review on Basalt Fiber, *International Journal of Textile Science*, 1-4 (2012) 19-28.
28. Kumzerov, Y. A., Parfen'eva, L. S., Smirnov, I. A., Misiorek, H., Mucha, J. ve Jezowski, A., Thermal Conductivity of Crystalline Chrysotile Asbestos, *Physics of the Solid State*, 45, 1 (2003) 57-60.

29. Gemalmayan, N., Asbestsiz Sürtünme Malzemelerinin Yapımı ve Uygulaması, 2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, Eylül 1986, Ankara, Bildiriler Kitabı, 481-491.
30. Ayar, H. H., Disk Fren Balatalarında Bileşimin Performansa Etkilerinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1991.
31. Brinzey, A. E., Friction Materials with Universal Core of Non-Asbestos Fibres, United States Patent and Trademark Office, US Patent 5041471, 1991.
32. Stocks, A.I., Giezendanner, H. ve Van Den Hurk, H., Asbestos-Free Clutches and Brakes Reinforced with Kevlar Aramid Fibres, International Journal of Vehicle Design, 6 (1985) 483 - 487.
33. Chan, D., Review of Automotive Brake Friction Materials, Journal of Automobile Engineering, 218, D (2004) 953-966.
34. Bijwe, J. ve Kumar, M., Optimization of Steel Wool Contents in Non-Asbestos Organic (NAO) Friction Composites for Best Combination of Thermal Conductivity and Tribo-Performance, Wear, 263 (2007) 1243–1248.
35. Thiyagarajan, V., Kalaichelvan, K., Vijay, R. ve Singaravelu, D. L., Influence of Thermal Conductivity and Thermal Stability on the Fade and Recovery Characteristics of Non-Asbestos Semi-Metallic Disc Brake Pad, Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 38 (2016) 1207–1219.
36. Park, S. B., Cho, K. H., Jung, S. ve Jang, H., Tribological Properties of Brake Friction Materials with Steel Fibers, Metals and Materials International, 15, 1 (2009) 27-32.
37. Han, Y., Tian, X. ve Yin, Y., Effects of Ceramic Fiber on the Friction Performance of Automotive Brake Lining Materials, Tribology Transactions, 51 (2008) 779-783.
38. Kim, S.J., Cho, M. H., Lim, D. S. ve Jang, H., Synergistic Effects of Aramid Pulp and Potassium Titanate Whiskers in the Automotive Friction Material, Wear, 251 (2001) 1484–1491.
39. Jacko, M.G. ve Rhee, S.K., Brake Linings and Clutch Facing, in: M. Grayson (Ed.), Encyclopedia of Composite Materials and Components, Wiley, 1983.
40. Abadi, S. B. K., Khavandi, A. ve Kharazi, Y., Effects of Mixing the Steel and Carbon Fibers on the Friction and Wear Properties of a PMC Friction Material, Applied Composite Materials, 17 (2010) 151–158.
41. Critchley, J. P., Knight, G. J. ve Wright, W. W., Heat-Resistant Polymers, Plenum Press, New York, 1983.
42. Gardziella, A., Pilato, L. A. ve Knop, A., Phenolic Resins, Second Completely Revised Edition, Siproinger, 2000.

43. Jiang, H., Wang, J., Wu, S., Wang, B. ve Wang, Z., Pyrolysis Kinetics of Phenol Formaldehyde Resin by Non-Isothermal Thermogravimetry, Carbon, 48 (2010) 352-358.
44. Jiang, H., Wang, J., Wu, S., Yuan, Z., Hu, Z., Wu, R. ve Liu, Q., The Pyrolysis Mechanism of Phenol Formaldehyde Resin, Polymer Degradation and Stability, 97 (2012) 1527-1533.
45. Yesnik, M. A., Friction Material Comprising Powdered Phenolic Resin and Method of Making Same, United States Patent and Trademark Office, US Patent 5529666, 1996.
46. Abbasi, F., Shojael, A. ve Katbab, A.A., Thermal Interaction Between Polymer Based Composite Friction Materials and Counter Faces, Journal of Applied Polymer Science, 81, 2 (2000) 364-369.
47. Bijwe, J., Influence of Amount of Resin on Fade and Recovery Behavior of Non-Asbestos Organic(Nao) Friction Materials, Transactions of the Indian Institute of Metals, 57, 4 (2004) 335-344.
48. Tsang, P. H., Coyle, J. P., Liu, T. ve Vander-Poorte, J. G., Method of Manufacturing a Friction Article, United States Patent and Trademark Office, US Patent 4537823, 1985.
49. Kane, J. F. ve Mowrer, N. R., Phenolic Resin Compositions with Improved Impact Resistance, United States Patent and Trademark Office, US Patent 5736619, 1998.
50. Abdalla, M. O., Ludwick, A. ve Mitchell, T., Boron Modified Phenolic Resins for High Performance Applications, Polymer, 44 (2003) 7353-7359.
51. Bijwe, J., Nidhi, Majumdar, N. ve Satapathy, B. K., Influence of Modified Phenolic Resins on the Fade and Recovery Behavior of Friction Materials, Wear, 259 (2005) 1068-1078.
52. Konada, K. N. ve Suman, K. N. S., Review of Brake Friction Materials for Future Development, Journal of Mechanical and Mechanics Engineering, 3, 2 (2017) 1-29.
53. Eriksson, M., Bergman, F. ve Jacobson, S., On the nature of Tribological Contact in Automotive Brakes, Wear, 252 (2002) 26-36.
54. Dönmez, A.G., Asbest Dışı Elyaflarla Üretilen Balata Malzemelerinin Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2000.
55. Komori, T., Miyake, S. ve Senoo, Y., Brake friction material, United States Patent and Trademark Office, US Patent 4954536, 1990.
56. Ohya, K. ve Kimbara, H., Disc Brake Pad, United States Patent and Trademark Office, US Patent 4944373, 1990.

57. Yamashita, Y., Nakagawa, M., Ibuki, M. ve Kishimoto, H., Friction Material for Making Brake Pads, United States Patent and Trademark Office, US Patent 5266395, 1993.
58. Kimura, K., Goto, Y., Torii, N., Katagiri, H., Miyazawa, H. ve Motoyoshi, Y., Friction Material for Dampers and Process for Producing the Same, United States Patent and Trademark Office, US Patent 5830566, 1998.
59. Seki, K., Non-Asbestos Friction Material, United States Patent and Trademark Office, US Patent 5217528, 1993.
60. Nakagawa, M., Yamashita, Y., Ibuki, M. ve Kishimoto, H., Friction Material and Method of Manufacturing Such Material, United States Patent and Trademark Office, US Patent 5268398, 1993.
61. Ekmekyapar, T. ve Örüng, İ., İnşaat Malzeme Bilgisi, 3. Baskı, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ofset Tesisi, Erzurum, 1997.
62. Österle, W. ve Dmitriev, A. I., The Role of Solid Lubricants for Brake Friction Materials, Lubricants, 4, 5 (2016), doi:10.3390/lubricants4010005.
63. Clauss, F. J., Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids, Elsevier Academic Press, 1972.
64. Lancaster, J.K., Anisotropy in the Mechanical Properties of Lamellar Solids and Its Effect on Wear and Transfer, Wear, 9, 3 (1966) 169-188.
65. Choa, M. H., Jua, J., Kim, S. J. ve Jang, H., Tribological Properties of Solid Lubricants (Graphite, Sb_2S_3 , MoS_2) for Automotive Brake Friction Materials, Wear, 260, 7-8 (2006) 855-860.
66. Öztürk, B., Öztürk, S. ve Adıgüzel, A. A., Effect of Type and Relative Amount of Solid Lubricants and Abrasives on the Tribological Properties of Brake Friction Materials, Tribology Transactions, 56-3 (2013) 428-441.
67. Ludema, K.C., Friction Wear Lubrication a Textbook in Tribology, Crc Press, Florida, 1996.
68. Kobayashi, M., Non-Asbestos Friction Materials, United States Patent and Trademark Office, US Patent 6413622, 2002.
69. Sundarkrishnaa, K. L., Friction Material Composites, Springer-Verlag Berlin, 2013.
70. Bhushan B., Introduction to Tribology, Second Edition, John Wiley, New York, 2013.
71. Shen, R. H. ve He, L., Friction Material and Technology of Its Products, Peking University Press, China, 2010.
72. Eriksson, M., Lord, J. ve Jacobson, S., Wear and Contact Conditions of Brake Pads: Dynamical in Situ Studies of Pad on Glass, Wear, 249 (2001) 272-278.

73. Luo, Y. ve Yang, Z., Effect of Different-Condition Parameters on Frictional Properties of Non-Asbestos Phenolic Resin-Based Friction Material, Advances in Mechanical Engineering, 9, 5 (2017) 1–14.
74. Deng, H., Li, K., Li, H., Wang, P., Xie, J. ve Zhang, L., Effect of Brake Pressure and Brake Speed on the Tribological Properties of Carbon/Carbon Composites with Different Pyrocarbon Textures, Wear, 270 (2010) 95–103.
75. Bao, J., Zhu, Z., Yin, Y ve Chen, G., Influence of Initial Braking Velocity and Braking Frequency on Tribological Performance of Non-Asbestos Brake Shoe, Industrial Lubrication Tribology, 61 (2009) 332–338.
76. Bao, J., Chen, G., Zhu, Z., Tong, M., Yin, Y. ve Peng, Y., Friction and Wear Properties of the Composite Brake Material for Mine Hoister Under Different Initial Velocities, Journal of Engineering Tribology, 226, 10 (2012) 873–879.
77. Abdul Hamid, M. K., Abu Bakar, A. R. ve Stachowiak, G. W., External Hard Particle Size Effect on Changes in Frictional Performance and Grit Embedment during Drag and Stop Mode Braking, Journal Teknologi, 66-3 (2014) 65–73.
78. Satapathy, B. K. ve Bijwe, J., Performance of Friction Materials Based on Variation in Nature of Organic Fibres: Part I. Fade and Recovery Behavior, Wear, 257 (2004) 573–584.
79. Zhu, Z., Bao, J., Yin, Y. ve Chen, G., Frictional Catastrophe Behaviors and Mechanisms of Brake Shoe for Mine Hoisters During Repetitious Emergency Braking, Industrial Lubrication and Tribology, 65 (2012) 245–250.
80. Xiao, X., Yin, Y., Bao, J., Lu, L. ve Feng, X., Review on the Friction and Wear of Brake Materials, Advances in Mechanical Engineering, 8, 5 (2016) 1–10.
81. Jie, C. ve Li, Y., Effect of Braking Speeds on the Tribological Properties of Carbon/Carbon Composites, Materials Transactions, 51, 5 (2010) 1038-1043.
82. Fan, S., Zhang, J., Zhang, L., Cheng, L., Tian, G. ve Liu, H., Tribological Properties of Short Fiber C/SiC Brake Materials and 30CrSiMoVA Mate, Tribology Letters, 43 (2011) 287–293.
83. Zhang, J.Z., Xu, Y.D., Zhang, L.T. ve Cheng, L. F., Effect of Braking Speed on Friction and Wear Behaviors of C/C-Sic Composites, International Journal of Applied Ceramic Technology, 4-5 (2007) 463-469.
84. Blau, P. J., Friction Science and Technology, Second Edition, CRC Press, London, 2008.
85. Bao, J., Yin, Y., Zhu, Z., Tong, M., Lu, Y. ve Peng, Y., Wear Modalities and Mechanisms of the Mining Non-Asbestos Composite Brake Material, Applied Composite Materials, 20 (2013) 331–339.

86. Severin, D. ve Dörsch, S., Friction Mechanism in Industrial Brakes, Wear, 249 (2001) 771–779.
87. Bay, N. ve Wanheim, T., Real Area of Contact and Friction Stress at High Pressure Sliding Contact, Wear, 38 (1976) 201–209.
88. Wen, S. Z. ve Huang, P., The Principle of Tribology, Tsinghua University Press, Beijing-China, 2008.
89. Eriksson, M., Bergman, F. ve Jacobson, S., Surface Characterization of Brake Pads After Running under Silent and Squealing Conditions, Wear, 232 (1999) 163–167.
90. Vishwanath, B., Verma, A. P. ve Rao, C. V. S. K., Friction and Wear of a Glass Woven Roving/Modified Phenolic Composite, Composites, 21, 6 (1990) 531-536.
91. Jang, G. H., Cho, K. H., Park, S. B., Lee, W. G., Hong, U. S. ve Jang, H., Tribological Properties of C/C-SiC Composites for Brake Discs, Metals and Materials International, 16, 1 (2010) 61-66.
92. Bao, J., Li, Z., Hu, D., Yin, Y. ve Liu, T., Frictional Performance and Temperature Rise of a Mining Non-Asbestos Brake Material during Emergency Braking, Advances in Materials Science and Engineering, ID: 867549 (2015) 7 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/867549>.
93. Bao, J., Zhu, Z., Tong, M. ve Yin, Y., Dynamic Friction Heat Model for Disc Brake During Emergency Braking, Advanced Science Letters, 4 (2011) 11–12.
94. Bao, J., Zhu, Z. ve Yin, Y. A Simple Method for Calculating Maximal Surface Temperature of Mine Hoister's Brake Shoe During Emergency Braking, Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 6 (2009) 1566–1570.
95. Krenkel, W. ve Berndt, F., C/C–SiC Composites for Space Applications and Advanced Friction Systems, Materials Science and Engineering A, 412 (2005) 177–181.
96. Kim, S. J. ve Jang, H., Friction and Wear of Friction Materials Containing Two Different Phenolic Resins Reinforced with Aramid Pulp, Tribology International, 33 (2000) 477–484.
97. Rhee, S. K. ve Thesier, P., Effects of Surface Roughness of Brake Drums on Coefficient of Friction and Lining Wear, SAE Technical Paper, 720449, 1972, <https://doi.org/10.4271/720449>.
98. Eriksson, M. ve Jacobson, S., Tribological Surfaces of Organic Brake Pads, Tribology International, 33 (2000) 817–827.
99. Kim, M., Dynamometer Tests of Brake Shoes Under Wet Conditions for the High Speed Trains, International Journal of Systems Applications, Engineering and Development, 5, 2 (2011) 143-150.

100. Savage, R.H., Graphite Lubrication, Journal of Applied Physics, 19, 1 (1948) 1-10.
101. Arslan, F., Dönmez, A.G., Ayar, H.H., Yaşar, İ. ve Çuvalcı, H., Asbestsiz Fren Balatalarının Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, TÜBİTAK Misag-47 No'lu Proje Raporu, KTÜ, Trabzon 1997.
102. Bilgiç, S., Demir Yolu Ders Notları-I, <http://web.ogu.edu.tr/Storage/akalin/Uploads/demiryolu-dersnotu-1-2017.pdf> 24.04.2020.
103. Ferrer, C., Pascual, M., Basquets, E. ve Rayon, E., Tribological Study of Fe–Cu–Cr–Graphite Alloy and Cast Iron Railway Brake Shoes by Pin-On-Disc Technique, Wear, 268 (2010) 784–789.
104. TS EN 16452, Demiryolu uygulamaları, Frenleme, Sabolar, T.S.E., Ankara, 2015.
105. Mosuang, T. E. ve Lowther, J. E., Relative Stability of Cubic and Different Hexagonal Form of Boron Nitride, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 63 (2002) 363-368.
106. Chen, B., Bi, Q., Yang, J., Xia, Y. ve Hao, J., Tribological Properties of Solid Lubricants (Graphite, H-BN) For Cu Based P/M Friction Composites, Tribology International, 41, 12 (2008) 1145-1152.
107. Sugözü, İ., Bor Katkılı Asbestsiz Otomotiv Fren Balatası Üretimi ve Frenleme Karakteristiğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2009.
108. Lee, P. W., Leist, J. and Filip, P., Use of Hexagonal Boron Nitride in Automotive Friction Materials, SAE Technical Paper, 2010-01-1676, 2010, <https://doi.org/10.4271/2010-01-1676>.
109. Aranganathan, N., Bijwe, J. ve Khatri, D. S., Role of Combination of Hexagonal Boron Nitride and Graphite in NAO Friction Material, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 230, 9 (2016) 1107-1112.
110. Biczó, R., Kalacska, G., Szakal, Z. ve Fledrich, G., Composite Friction Materials. for Brakes and Clutches, Scientific Bulletin Series C: Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology, 30 (2016) 21-26.
111. Kahraman, F. ve Küçük, M., Raylı taşıtlarda kullanılan fren balataları üzerine bir inceleme, 2. International Mersin Symposium, Mayıs 2019, Mersin, Bildiriler Kitabı, 128-140.
112. IRAM FA L 134-86/80, Zapatas de Composición Para Uso Ferroviario – Diagrama de Extracción, Forma de Cortey Dimensiones de Probetas (Composition Footings for

Railway Use - Diagram of Extraction, Shape of Cut and Dimensions of Test Pieces), Argentina, 1984.

113. Gediktaş, M., Sürtünme Malzemelerinin Deneysel Tayini, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 1968.
114. Gülmez, S., Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler, Tezsiz Yüksek Lisans Projesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2018.
115. Gandhi, T. S., Dholakiya, B. Z. ve Patel, M. R., Extraction Protocol for Isolation of CNSL by Using Protic and Aprotic Solvents from Cashew Nut and Study of Their Physico-Chemical Parameter, Polish Journal of Chemical Technology, 15, 4 (2013) 24-27.
116. Singaravelua, D. L., Vijaya, R. ve Filip, P., Influence of Various Cashew Friction Dusts on the Fade and Recovery Characteristics of Non-Asbestos Copper Free Brake Friction Composites, Wear, 426-427 (2019) 1129–1141.
117. Leonardi, M., Menapace, C., Matejka, V., Gialanella, S. ve Straffelini, G., Pin-On-Disc Investigation on Copper-Free Friction Materials Dry Sliding Against Cast Iron, Tribology International, 119 (2018) 73-81.
118. Kumar, M. ve Bijwe, J., Non-asbestos organic (NAO) friction composites: role of copper; its shape and amount, Wear, 270, 3-4 (2011): 269-280.
119. Sawant A.V., Takalkar A.R., ve Padmanabhan K., Synthesis and Characterization of Cashew Nut Shell Liquid Matrix Compositions for Composites Applications, Bio Polymers and Bio Materials, Edited by Sabu Thomas, 2018.
120. Sharafat, A., ve Joshi, E., Effect of Amount of Straight Phenolic Resin on NVH Properties of a Friction Material Composite, International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology, 2, 2 (2015) 489–492.
121. Nidhi, Bijwe, J. ve Mazumdar, N., Influence of Amount and Modification of Resin on Fade and Recovery Behavior of Non-Asbestos Organic (NAO) Friction Materials, Tribology Letters, 23, 3 (2006) 215–222.
122. Kumar, M. Boidin, X., Desplanques, Y. ve Bijwe, J., Influence of Various Metallic Fillers in Friction Materials on Hot-Spot Appearance During Stop Braking, Wear, 270, 5-6 (2011) 371-381.
123. Kumar, M. ve Bijwe, J., Optimized Selection of Metallic Fillers for Best Combination of Performance Properties of Friction Materials: A Comprehensive Study, Wear, 303, 1-2 (2013)569-583.
124. Jaafar, T. R., Ismail, N. I., Ismail, M. F. ve Othman, E. A., Influence of Steel Fibres on Friction Behaviors with Respect to Speed, Pressure and Temperature, Industrial Lubrication and Tribology, 69, 3 (2017) 420-424.

125. EL-Tayeb, N. S. ve Liew, K. W., On the Dry and Wet Sliding Performance of Potentially New Frictional Brake Pad Materials for Automotive Industry, Wear, 266, 1-2 (2009) 275–287.
126. Peterson, M. B., ve Johnson, R. L., Friction Studies of Graphite and Mixtures of Graphite with Several Metallic Oxides and Salts at Temperatures to 1000 °F, TN-3657, NACA, Cleveland, Ohio, 1956.
127. Peterson, M. B., ve Johnson, R. L., Solid Lubricants for Temperatures to 1000 °F, Lubrication Engineering, 13, 4 (1957) 203-207.
128. Gouider, M., Berthier, Y., Jacquemard, P., Rousseau, B., Bonnamy, S. ve Szwarczkopf, H. E., Mass Spectrometry During C/C Composite Friction: Carbon Oxidation Associated with High Friction Coefficient and High Wear Rate, Wear, 256, 11-12 (2004) 1082-1087.
129. Kasem, H., Bonnamy, S., Berthier, Y., Dufrenoy, P., ve Jacquemard, P., Tribological, Physicochemical and Thermal Study of the Abrupt Friction Transition During Carbon/Carbon Composite Friction, Wear, 267, 5-8 (2009) 846-852.
130. Sliney, H. E., Solid lubricants, Metals Handbook, Vol. 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM-International, Metals Park, Youngstown, OH, 1993, 115-122.
131. Eichler, J. ve Lesniak, C., Boron Nitride (BN) and BN Composites for High-Temperature Applications, Journal of the European Ceramic Society, 28, 5 (2008) 1105-1109.
132. Yi, G. ve Yan, F., Mechanical and Tribological Properties of Phenolic Resin-Based Friction Composites Filled with Several Inorganic Fillers, Wear, 262, 1–2 (2007) 121-129.
133. Li, Z., Xiao, P., Zhang, B., Li, Y., Lu, Y. ve Zhu, S., Preparation and Dynamometer Tests of 3D Needle-Punched C/C-SiC Composites for High-Speed and Heavy-Duty Brake Systems, International Journal of Applied Ceramic Technology, 13, 3 (2016) 423-433.
134. Yannick, D., Olivier, R., Gerard, D., Reynald, C. ve Yves, B., Analysis of Tribological Behavior of Pad–Disc Contact in Railway Braking: Part 1. Laboratory Test Development, Compromises Between Actual and Simulated Tribological Triplets, Wear, 262, 5-6 (2007) 582-591.

ÖZGEÇMİŞ

Harun YANAR, 1990 yılında Osmancık/Çorum'da doğdu. 2007 yılında Osmancık Süper Lisesi'nden mezun oldu. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nden Lisans derecesini, 2014 yılında da Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan Yüksek Lisans derecesini aldı. Yüksek lisans tezini Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi-Tezleri (SAN-TEZ) programı kapsamında desteklenen araştırma projesinde tez öğrencisi olarak tamamladı. Harun YANAR çeşitli kurum veya kuruluşlar tarafından desteklenen 8 adet projede yürütücü, araştırmacı veya tez öğrencisi olarak görev almıştır. Ayrıca Harun YANAR'ın uluslararası hakemli bilimsel dergilerde yayınlanmış 15'i SCI/SCI-Exp. olmak üzere 24 adet makalesi ve 28 adet uluslararası bildirisi bulunmaktadır. Yayınlanmış makaleleri 360'ın üzerinde atıf almıştır. Bu çalışmalardan, doktora tezi kapsamında yapılan çalışmaları kapsayanları aşağıda sıralanmıştır. İyi derecede İngilizce bilen Harun YANAR, 2014 yılından beri Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Doktora tezi kapsamındaki yayınları:

1. **Yanar H.**, Ayar H.H., Demirtaş M., Pürçek G., "Effect of resin content on tribological behavior of brake pad composite material, Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 72, no. 2, pp. 195-202 (2018).
2. **H Yanar**, G Purcek and H H Ayar, "Effect of steel fiber addition on the mechanical and tribological behavior of the composite brake pad materials" IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 724 (2020) 012018.