

Derleme Makale

Fren Balatalarının Tasarımında Kullanılan Malzemeler ve Balata Performansı Üzerindeki Etkileri

Zülal Arca Batı^{1,*} , Noman Gündüz²  ve Yahya Hışman Çelik³ 

Gönderim: 04.03.2025

Kabul: 04.04.2025

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye; zulal.arca@gmail.com.

²Makine Mühendisliği Bölümü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye; gunduznuman@hotmail.com

³Makine Mühendisliği Bölümü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye; yahyahisman.celik@batman.edu.tr

*Sorumlu yazar

Özet: Fren sistemi araçlar için oldukça büyük bir öneme sahiptir. Araçların kontrolü ve güvenliği bu sistemler sayesinde sağlanmaktadır. Fren sistemlerinin en önemli bileşenleri fren balatalarıdır. Bir fren balatasının optimum şartlarda sürtünme performansı ve aşınma direncini karşılaması ve ekonomik olması beklenirken, insan sağlığı üzerinde toksik etkisinin de olmaması gerekmektedir. Fren balataları içeriğinde farklı birçok malzeme bulunmaktadır. Bu malzemelerden özellikle asbestin yasaklanması ve bakırın çevre üzerindeki olumsuz etkileri dikkate alındığında, fren balatalarının performansı üzerine alternatif malzemeler büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada hem araç güvenliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik olan fren balatalarının daha iyi performans sergileyen ve çevreye daha az zarar veren malzemelerle üretilmesine katkıda bulunmak amacıyla araştırma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: fren balatası; sürtünme malzemeleri; çevresel etkiler.

Review Article

Materials Used in the Design of Brake Pads and Their Effects on Pad Performance

Abstract: The braking system is crucial for automobiles. The control and safety of vehicles are ensured through these systems. One of the most critical components of braking systems is the brake pads. A brake pad is expected to meet the requirements of optimal friction performance, wear resistance, and cost-effectiveness while also being non-toxic to human health. Brake pads contain a variety of materials and given the ban on asbestos and the negative environmental impact of copper, alternative materials for brake pads are of great importance for their performance. This study aims to contribute to the production of brake pads with better performance and less environmental damage, which are critical for both vehicle safety and environmental sustainability.

Keywords: brake pads; friction materials; environmental effects.

1. Giriş

Fren sistemleri, aracın en önemli bileşenlerinden biridir ve kullanım süreci boyunca sabit performans sunarak yüksek güvenilirlik sağlamalıdır. Uygun şekilde eşleştirilmiş sürtünme çifti, bir disk ve fren balatası, aracın belirli bir süre içinde durdurulması veya yavaşlatılmasını sağlamak amacıyla işlev gördüğü için insan sağlığı ve hayatı için temel bir rol oynamaktadır [1]. Bu işlev, iki temas yüzeyi arasındaki sürtünme ile sağlanmaktadır. Fren balataları önemli miktarda ısıya maruz kaldığı için, günümüzde, ıslığı daha hızlı dağıtarak fren solmasına katkı sağlayan disk frenler kullanılmaktadır [2-3]. Çoğu durumda, disk gri dökme demirden üretilir. Çünkü gri dökme demir, yeterli mekanik mukavemet, tatmin edici aşınma direnci, iyi termal iletkenlik ve titreşim önleme kapasitesi, düşük maliyet ve kolay işlenebilirlik özellikleriyle karakterize edilir. Ancak fren balataları çok daha karmaşık bileşenlerden üretilmektedir [4].

Fren balataları, disk fren rotorunun yüzeyine temas eden sürtünme malzemelerini içeren en kritik araç elemanlarıdır. Temel işlevi, hareket halindeki aracın hızını düşürmek veya aracı tamamen durdurmaaktır. Bu nedenle, fren balataları güvenilir olmalı ve ömrü boyunca değişen atmosferik koşullarda dahi sabit bir verimlilik sağlamalıdır. Fren balatalarının güvenilirliği yalnızca araç yolcularının güvenliği açısından değil, aynı zamanda yoldaki diğer araçlar ve yayalar için de kritik önem taşımaktadır [1]. Fren balatası diske temas ettiğinde, sürtünme yoluyla, fren balataları aracın kinetik enerjisini ısı enerjisiye dönüştürmektedir. Frenleme sırasında, yüzey pürüzlerindeki flaş sıcaklığı 1 ms içinde 1100°C'ye kadar yüksek değerlere ulaşabilir ve bu durum lokalize organik faz ayrışmasına neden olabilir [5]. Sürtünme etkileşimi, sadece enerji salınımına neden olmakla kalmayıp, aynı zamanda malzeme aşınmasına da yol açarak fren bileşenlerinin ısınmasına ve aşınma parçacıklarının salınmasına neden olur. Bu nedenle, fren balatalarının aşınması, fren performansını azaltarak balataların değiştirilmesi gerekliliğini doğurmaktadır [2]. Ancak fren balatalarında aşınma, değişken çalışma basınçları, hızlar, çevresel koşullar, sürüş koşulları, fren balatası formülasyonu, üretim parametreleri ve rotor ile sürtünme malzemesi arasındaki arayüzde biriken sürtünme filmi gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak sürekli bir değişim göstermektedir [3,6]. Bu yüzden fren balatalarının yüksek sıcaklıklarda etkili performans sağlamak üzere olağanüstü tribolojik özelliklere (kontrollü bir sürtünme katsayısına, minimum aşınma oranına ve iyi bir termal iletkenliğe) sahip olması beklenir [7].

Fren balatası geliştirilirken, başlangıçta asbest, dayanıklılığı, ısıya ve alevlere karşı direnci gibi özelliklerinden dolayı baskın malzeme olarak kullanılmış ve kullanımı bir yüzyıl kadar sürmüştür. Sağlık üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle (kanserojen olarak tanımlanması) 1980'lerden bu yana fren balatası üretiminde kullanılması yasaklanmıştır. Bu durum asbest malzemesi yerine kullanılabilecek alternatiflerin aranmasına yol açmıştır. Asbestin yasaklanmasının ardından çeşitli metalik ve yarı metalik malzemeler devreye girmiştir [2-3].

Fren balata formülasyonlarında bakır veya pirinç makro-parçacıkları veya her ikisinin bir kombinasyonu bulunur [8]. Çünkü bakır ve pirinç, sürtünme malzemelerinin performans özelliklerini artıran kendine özgü özelliklere sahiptir. Özellikle bakır, balatada termal solmayı önlemesi ve ısı iletkenliği artırması nedeniyle bir sürtünme düzenleyici olarak işlev görmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı bir özellik gösteren bakır, temas alanlarında homojen bir sürtünme tabakası oluşturarak gürültü ve titreşimi azaltır ve sürtünme katsayısının stabilizasyonuna katkı sağlar [9-10]. Bakır, fren performansına çok yönlü katkılar sağlasa da en ciddi dezavantajlarından biri, su ekosistemine verdiği zarardır. Yüksek toksisite oranı, birçok sucul türün yok olmasına ve ekosistem üzerinde ciddi tahribata yol açmaktadır. Bu olumsuz etkiler nedeniyle, gelişmiş ülkelerde fren malzemesi formülasyonlarında bakır kullanımı önemli ölçüde azaltılmıştır [11]. Bu bağlamda, ABD Çevre Koruma Ajansı ve otomotiv endüstrisi, motorlu taşıt fren balatalarındaki bakır oranını azaltmak için bir anlaşma imzalamıştır. Kaliforniya ve Washington eyaletleri bu konuda öncülük ederek, fren balatalarındaki bakır içeriğini azaltmaya yönelik yasalar çıkarmıştır. Bu yasal düzenlemelerin amacı, fren balatalarındaki bakır oranını 2025 yılı itibarıyla %0,5'e (bakır içermeyen fren balatası) düşürmektir [12].

Fren balatalarında hem asbestin yasaklanması hem de bakır kullanımının azaltılmasına yönelik çabalara ilaveten yeni teknolojik gelişmeler, son yıllarda, fren balatası matrisine genellikle mekanik mukavemetini ve termal stabilitesini artırmak için farklı lif türü eklenmesine ve bunların tribolojik ve

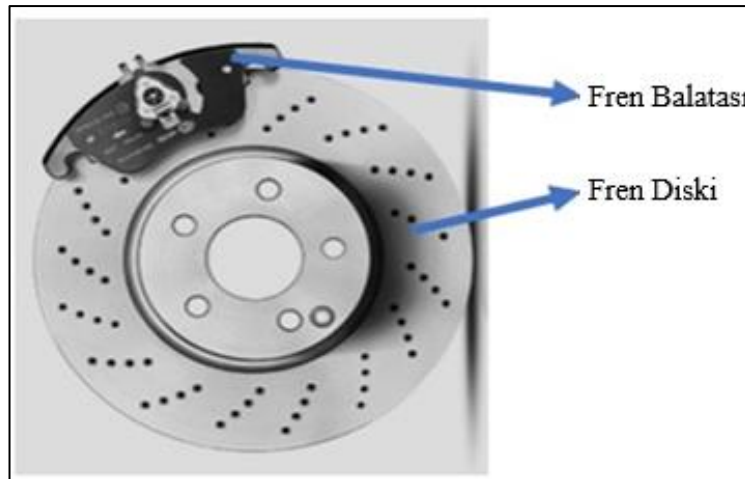
mekanik etkilerinin kapsamlı bir şekilde araştırılmasına yol açmıştır [13]. Günümüzdeki fren balataları (asbestsiz organik—NAO), frenlerin gerektirdiği özellikleri sağlamak amacıyla, tek bir element veya bileşikten oluşmak yerine, birçok malzemenin bileşenlerinden oluşmaktadır. Fren bileşenlerinde 2000’den fazla farklı malzeme ve bunların varyantları kullanılmaktadır [14]. Bu bileşenlerin performans özellikleri üzerindeki etkileri çoğunlukla sinerjik bir biçimde gerçekleştiğinden, sürtünme malzemelerinin formülasyonu genellikle deneysel gözlemlere, deneme-yanılmaya veya tecrübeye bağlı olarak değerlendirilmektedir [6,15,3].

Balatada kullanılan bir bileşen, balatanın herhangi bir diğer bileşeniyle reaksiyona girmemelidir. Çünkü bu, genel malzeme karakteristiğinde değişikliklere yol açabilir veya kompozitin delaminasyonuna neden olabilir. Bu da fren sisteminin verimliliğini büyük ölçüde sınırlayabilir. Bağlayıcı genellikle epoksi veya silikon reçineden yapılır. Takviye malzemesi, bağlayıcının mekanik özelliklerini güçlendiren lifli bir yapıya sahiptir. Farklı takviye türleri, fren balatalarının dayanıklılığı ve mukavemeti üzerinde önemli bir etki gösterdiğinden, uygun takviye seçimi dikkatle yapılmalıdır. Geçmişte asbest, üstün takviye özellikleriyle yaygın olarak kullanılmışsa da sağlık üzerindeki zararlı etkileri nedeniyle güvenli alternatifler geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Günümüzde, bu amaçla başarıyla kullanılacak çok çeşitli takviye malzemeleri bulunmaktadır. Bu malzemeler, fren balatalarının performansını artırmaya yönelik olarak güvenli ve etkili seçenekler sunmaktadır [1].

Farklı kökenli birçok malzeme, fren balatası uygulaması için dolgu maddesi veya sürtünme düzenleyici olarak test edilmiştir, bu da fren sürtünme malzemelerinin seçiminin hala açık bir araştırma konusu olduğunu ortaya koymaktadır [5].

2. Fren Sistemi ve Nominal Temas Koşulları

Fren sistemi, otomobil ve endüstriyel makinelerin güvenliği ve performansı açısından kritik bir bileşen olup, hareket eden mekanizmanın belirli bir süre içinde durdurulması veya yavaşlatılmasını sağlamak amacıyla işlev görmektedir. Bu işlev, iki temas yüzeyi arasındaki sürtünme ile sağlanmaktadır [2]. Sürtünme frenlerinin iki farklı türü bulunmaktadır. Bunlar tambur frenler ve disk frenlerdir. Tambur frenlerine kıyasla, günümüzde çoğu araçlarda disk fren sistemleri tercih edilmektedir. Bunun nedeni, disk frenlerin ısıyı daha etkili bir şekilde dağıtarak fren solmasını azaltma yeteneğidir [3]. Şekil 1’de disk freninin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1. Disk freninin şeması [16]

Şekil 1’de şematik görüntüsü verilen disk frenler, kullanım süreci boyunca sabit performans sunarak yüksek güvenilirlik sağlamalıdır. Değişen atmosferik koşullarda dahi sabit bir verimlilik sunmalıdır. Bu

yüzden korozyona dayanıklı, hafiflik, uzun ömürlü, düşük gürültülü, kararlı sürtünme, düşük aşınma oranı ve performansa göre kabul edilebilir maliyet gibi ek gereksinimleri bulunmalıdır.

Çoğu durumda fren sistemlerinde kullanılan disk, gri dökme demirden üretilir. Çünkü gri dökme demir, iyi termal iletkenlik ve titreşim önleme kapasitesiyle karakterize edilir. Ancak fren balataları çok daha karmaşık bileşenlerden üretilebilmektedir. Bunun ana nedeni yeni teknolojik gelişmelerin çeşitli bileşimlere ve farklı oranlara sahip malzemelerin geliştirilmesini ve bunların tamamen kontrol edilebilir işlemlerde kalıcı olarak birbirine bağlanmasını mümkün kılmasıdır.

Fren balatası diske temas ettiğinde, kinetik enerjiyi ısıya dönüştür. Bu süreçte açığa çıkan ısı enerjisi atmosfere yayılır. Bu ısı transferi kritik bir öneme sahiptir; zira aşırı ısınma, süspansiyon elemanları gibi plastik veya kauçuk bazlı bileşenlere zarar verebilir [1].

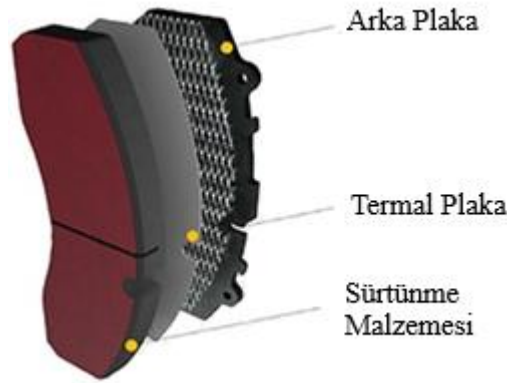
Nominal temas koşullarını anlatırken, tipik bir araç disk fren sistemi olarak Volvo 850 veya S70'in ön fren sistemi örnek alınabilir. Bu model, 280 mm çapında gri dökme demir bir disk ve tek pistonlu bir kaliperle donatılmıştır. Fren sisteminde, yaklaşık 4000 mm² büyüklüğünde organik fren balataları kullanılmakta ve diske uygulanan kuvvet 25 kN'a kadar çıkabilmektedir. Bu kuvvet, 100 barlık bir fren hattı basıncına denk gelmektedir. Ancak, günlük sürüş koşullarında, bu sıkıştırma kuvveti nadiren 10 kN'u aşar [4].

Otomotiv fren sistemlerinde sürtünmeden kaynaklanan ısı enerjisi de büyük önem taşır. Normal bir aile arabasında sert fren yapıldığında, her bir ön fren balatasında 80 kW'ı aşkın güç açığa çıkabilir. Yapılan incelemelerde, balatalar ile disk arasında oluşan gerçek temas alanının, nominal temas alanının yalnızca %20'sine karşılık geldiği ve deforme olmuş yüzey tabakasının kalınlığının 0.1 mm olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, toplam deforme olmuş hacim 1 mm³'ten azdır ve bu bölgedeki güç yoğunluğu yaklaşık 80 TW m⁻³'tür. Bu oran, 1 dm³ hacminde yaklaşık 80 nükleer reaktörün ürettiği güç eşdeğeridir [4].

Amerika ve Avrupa'da fren tercihleri farklılık gösterir. Avrupalı sürücüler yüksek konfor arayan Amerikalıların aksine, genellikle yüksek performanslı frenleri tercih ederler. Bu durum, iki kıta arasındaki balata malzemesi seçimlerinde de kendini göstermektedir. ABD'de kullanılan araç fren sistemlerinde ortalama sürtünme katsayısı genelde 0,4 civarında iken, Avrupa araçlarında bu katsayı 0,5'in üzerinde olur [4].

3. Fren Balataları

Fren balataları, belirli katmanlardan oluşur. En önemli bileşeni, Şekil 2'de görülen frenleme sırasındaki aktif olan sürtünme katmanıdır. Bu katman, 6 ila 9 mm kalınlığında olup bileşimi farklı uygulamalara göre optimize edilmektedir. Sürtünme katmanının hemen altında, sürtünme malzemesini yapısal olarak destekleyen ve onu arka plakaya bağlayan 1–4 mm kalınlığında bir alt katman bulunur. Alt katman (termal plaka), ayrıca fren balatasının arka plakaya daha iyi yapışmasını sağlayan ince bir yapışma tabakasıyla desteklenir. Bu tabaka, aynı zamanda belirli bir termal yalıtım sağlamakta olup, aşırı ısının fren sıvısına ulaşmasını önler. Fren balatasının en alt kısmında bulunan arka plaka, fren balatasının yeterli sertlikte olmasını sağlar ve kenar profili ile kaliperin kılavuzu boyunca düzgün hareket etmesine katkıda bulunur. Bu yapı, fren balatalarının verimlilik, ısı dayanımı ve ses kontrolü gibi çok boyutlu işlevlerini yerine getirmesine olanak tanır [1].



Şekil 2. Önemli fren balatası bileşenleri [17]

Fren balataları önemli miktarda ısıya maruz kaldığı için, yüksek sıcaklıklarda etkili performans sağlamak üzere olağanüstü tribolojik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Sistemin sürtünme katsayısı ve aşınma özellikleri, balata-diskin temas alanındaki sürtünme tabakasının özelliklerine bağlıdır; bu durum, kullanılan malzemelerin yapısı ve işlevselliğinden etkilenir [2].

3.1. Fren balatalarının tarihsel gelişimi

Tarihsel süreç boyunca frenlerin birçok malzemeden üretildiği görülmüştür. Başlangıçta at arabalarının frenleri ahşap ve deriden yapılmıştır. Aslında, günümüzde birçok fren malzemesi hala polimerler ve bitki lifleri gibi organik bazlı malzemeler içermektedir. 1800'lerdeki yeni demiryolu teknolojisi, fren malzemelerinin yüksek yükler ve hızlar altında performans göstermesini gerektirmiş ve 1870'lerde demir fren ayakkabılarıyla sürtünme deneyleri gerçekleştirilmiştir [14].

Nicholson'a göre, ilk fren balatası malzemelerinin icadı Herbert Frood'a atfedilmektedir ve bu malzeme 1897 yılında geliştirilmiştir. Frood'un icat ettiği bu malzeme, pamuk bazlı olup bitüm çözeltisi ile emdirilmiştir. Hem vagon tekerleklerinde hem de erken otomobillerde kullanılmıştır. Bu icat, günümüzde de fren malzemeleri tedarik eden Ferodo Şirketi'nin kuruluşuna yol açmıştır. İlk fren balatası malzemeleri dokuma şeklindeydi, ancak 1920'lerde bunlar, bol miktarda bulunan krizotil asbest lifleri içeren kalıplı malzemelerle değiştirilmiştir. 1950'lerde reçine ile bağlanmış metalik balatalar tanıtılmış ve 1960'larda ise "yarı metal" olarak adlandırılan malzemeler geliştirilmiştir. Bu malzemeler, daha yüksek miktarda metal katkı maddesi içermektedir. Nicholson'ın (1995) çalışmasında yer alan Tablo 1'de bazı yaygın fren malzemelerini listelemektedir [14].

Tablo 1. Otomotiv sürtünmeli fren malzemelerinin tarihsel bileşimleri [14]

Malzeme Tanımı	Uygulama(lar)	Yaklaşık Yıl
Çelik üzerine dökme demir	Demiryolu vagonu fren blokları ve lastikler	1870'lerden önce
Saç veya pamuk kayışı (yaklaşık 300 °F'de yanma ile sınırlı)	Arazi tekerlekleri ve erken otomobiller	1897 civarı
Güç ve performansı artırmak için pirinç ve diğer tellerle dokuma asbest	Otomobiller ve kamyonlar	1908 civarı

Kısa krizotil lifleri, pirinç parçacıkları ve düşük kül içeren bitümlü kömür ile yapılan kalıplı astarlar	Endüstriyel uygulamalar	1926 civarı
Metal toz üreterek elektrikli tren raylarını kısa devre yapan dökme demir fren bloklarını değiştirmek için kuru karışım kalıplı malzeme	Londra yer altı demiryolu	1930 civarı
Daha karmaşık fren tamburu astar formülasyonları ile geliştirilen esnek reçine bağlayıcıları	Otomotiv uygulamaları	1930'lar
Reçine bağlı metalik fren astarları	Endüstriyel ve hava aracı uygulamaları	1950'ler
Cam, mineral, metal, karbon ve sentetik lifler	Otomobiller ve kamyonlar	1960'lar
Asbest içermeyen malzemeler	Orijinal ekipmandaki fren tamburları	1980'ler
Karbon liflerinin kullanımı	Otomotiv frenleri	1991

Tablo 1’de görüldüğü gibi 1900’lü yılların başlarında asbest fren balatalarında kullanılan temel malzeme olmuşken, akciğer kanserine ve diğer sağlık sorunlarına neden olduğu için 1980’lerde yasaklanmıştır. Bu nedenle, asbest yerine fiber cam ve karbon lifleri içeren asbest dışı içerikli balataların üretimine başlanmıştır [15]. Son yıllarda, teknolojik gelişmelerle birlikte fren balatası matrisine genellikle mekanik mukavemetini ve termal stabilitesini artırmak için farklı lif türü eklenmesine ve bunların tribolojik ve mekanik etkilerinin kapsamlı bir şekilde araştırılmasına yol açmıştır [13].

3.2. Fren balatalarından beklenen özellikler

Balata malzemelerinin gerekli özelliklerinin belirlenebilmesi için çalışma koşullarının iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Özellikle balata yüzeyine etki eden basınç, aracın hızı ve sürtünme kaynaklı sıcaklık artışlarında oldukça önemlidir. Bu yüzden balata testlerinde basınç, hız ve sıcaklık gibi değişkenlerin birbiriyle etkileşimi dikkate alınmalıdır. Çünkü bu değişkenler balata ömrünü belirleyen temel faktörlerdir. Ancak balatalar sürekli değişen basınç ve sıcaklık koşullarında çalıştıkları için, aşınma ve sürtünme davranışları oldukça karmaşıktır. Temas eden yüzeyler 1 m s^{-1} hızında 1000°C ila 1100°C ’ye kadar ısınabilir ve diğer yüzeyler gibi ısıyı emerek soğutulurlar. Bu karmaşık termoelastik davranıştan kaçınmak için yüksek performanslı, anizotropik balata malzemeleri geliştirilmektedir [18].

Balataların tüm frenleme koşullarında sabit bir sürtünme katsayısına sahip olması beklenir. Ancak uygulamada, hız ve basıncın artması ile sıcaklık yükselmesi sürtünme katsayısında azalmaya neden olabilir. Araçların farklı hızlarda fren yaparken kullanıldığı koşullar ve iklim şartları, fren kuvvetini olumsuz etkilememelidir. Balata malzemeleri, zorlu koşullardan etkilenmeyecek özelliklere sahip olmalıdır [18].

Bu doğrultuda, balatalardan beklenen özellikler;

1. Tüm çalışma koşullarında sabit sürtünme performansı,
2. Sürtünme katsayısının sıcaklık, basınç ve hızdan bağımsız ya da çok az değişken olması,
3. Yüksek sıcaklık direnci,

4. Yüksek ısı iletkenliği,
5. İyi korozyon direnci,
6. Yüksek mekanik mukavemet,
7. Düşük gürültü seviyesi,
8. Hava koşullarından etkilenmeme,
9. Sağlığa zararsız malzeme,
10. Yüksek aşınma direnci ve karşı malzemede düşük aşınmadır [18].

3.3. Fren balatalarının sınıflandırılması

Fren balatalarının sınıflandırılması, TS 555'te tanımlanan sürtünme katsayısı değerleri temel alınarak yapılmaktadır. Bu standart, farklı sürtünme malzemelerinin performanslarını belirlemek ve karşılaştırmak amacıyla sürtünme katsayısı kriterlerini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Fren balataları, bu katsayı değerlerine göre farklı kategorilere ayrılır ve her kategori belirli performans ve kullanım alanlarına yönelik tanımlamalar içerir. Tablo 2'de, TS 555 standardında belirtilen sürtünme katsayısı aralıklarına göre fren balatalarının kategorileri detaylı bir şekilde sunulmuştur [19].

Tablo 2. TS 555'e göre sürtünme katsayısına bağlı balataların sınıflandırılması

Sınıf	Sürtünme Katsayısı
C	0.15'e kadar
D	0.15-0.25
E	0.25-0.35
F	0.35-0.45
G	0.45-0.55
H	0.55'ten yukarı

Bu sınıflandırma, balataların kullanım ömrü, aşınma direnci ve frenleme performansı gibi önemli parametrelerin değerlendirilmesine olanak sağlar ve endüstride balata seçimi ve uygulama sürecine rehberlik eder.

Endüstride kullanılan balatalar, içerdiği malzemelerin benzerliklerine göre de sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırmaya göre balatalar üç ana kategoriye ayrılabilir. Bunlar; organik balatalar, metalik balatalar ve karbon esaslı balatalardır [19].

Organik polimer esaslı fren balataları, fren ve kavrama sistemlerinde en yaygın kullanılan sürtünme malzemeleridir. Çeşitli bileşimlerde üretilen bu balataların formülasyonları genellikle patent koruması altındadır. Organik polimer esaslı balatalar, bağlayıcılar, dolgu maddeleri, sürtünme düzenleyiciler ve takviye edici malzemelerden oluşmaktadır. Bu balatalar, asbest esaslı ve asbestsiz olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır [20].

Metalik esaslı fren balataları genellikle bakır veya demir esaslı malzemelerden üretilmekte olup, yüksek ısıl kararlılık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Performansı artırmak amacıyla bu

balatalara, genellikle inorganik katkı maddeleri veya seramikler ilave edilerek katı faz sinterleme yöntemi uygulanır. Üretim süreçleri nispeten kolay ve ekonomiktir [20].

Karbon esaslı malzemeler ise ağırlığın önemli olduğu ve yüksek performans gereksinimi duyulan, maliyetin ise ikincil öneme sahip olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Hacimce yaklaşık %63 oranında karbon-karbon bileşiminde olan bu kompozitler, genellikle uçak fren sistemlerinde kullanılmaktadır. Karbon bazlı sürtünme malzemeleri, karbon elyafların amorf karbonla bağlanmasıyla elde edilir. Bu bağlama sürecinde organik reçineler yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak işleminden geçirilerek amorf karbon bağlayıcı oluşturulur ya da kimyasal buhar çöktürme yöntemi kullanılır. Hafif yapıları, yüksek ısı kararlılıkları ve uygun özgül ısı özellikleri sayesinde bu malzemeler fren uygulamalarında üstün performans sergiler [20].

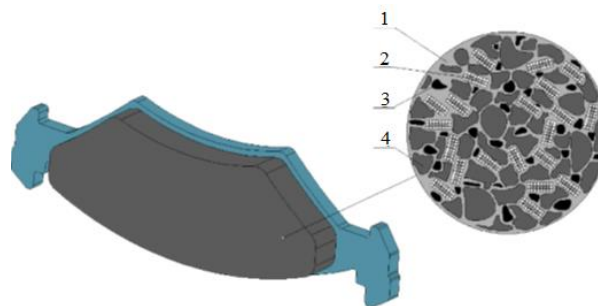
3.4. Balata yapımında kullanılan malzemeler ve işlevleri

Fren balatası üreticileri, nihai ürün üzerinde farklı etkilere sahip yaklaşık 2000 farklı malzeme kullanır. Ortalama bir fren balatası 10 ila 20 farklı makro veya mikro bileşenden oluşur. Fren balatası için doğru bileşimi seçmek ve nihai ürünler üzerindeki etkisini tahmin etmek zordur. Çok sayıda deneysel çalışma ve oldukça fazla deneyim gerektirir. Fren balatasının nihai özellikleri, genellikle her üreticinin en iyi saklanan ticari sırrı olan üretim teknolojisi tarafından da şekillendirilir. Etkili üretim teknolojisi, fren balatasının tribolojik özelliklerini %100 oranında iyileştirebilir [1,8].

Balata kompozisyonlarında kullanılan malzemeler, genellikle birçok farklı bileşen içeren kaba tozların sıcak sıkıştırılmasıyla oluşturulan kompozitlerdir. Bileşenlerin mekanik özellikleri, çok yumuşak ve kolay aşınan fenolik reçinelerden sert ve aşınmaya dayanıklı liflere ve aşındırıcı parçacıklara kadar geniş bir yelpazeye yayılır. Ancak görevleri bakımından dört ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

1. Bağlayıcı malzemeler,
2. Takviye malzemeleri,
3. Dolgu malzemeleri,
4. Sürtünme ayarlayıcı malzemelerdir [4,21].

Ancak bu sınıflandırmada bazı belirsizlikler vardır. Bazı katkı maddeleri birden fazla işlevi yerine getirdikleri için birden fazla gruba dahil edilebilirler [14]. Şekil 3'te fren balata malzemesinin yapısı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3. Fren balatası yapısında kullanılan malzemeler: 1. bağlayıcı, 2. takviye, 3. dolgu, 4.sürtünme ayarlayıcı [1]

Balatada kullanılan herhangi bir malzeme, balatanın herhangi bir diğer bileşeniyle reaksiyona girmemelidir, çünkü bu, genel malzeme karakteristiğinde değişikliklere yol açabilir veya kompozitin delaminasyonuna neden olabilir ve fren sisteminin verimliliğini büyük ölçüde sınırlayabilir [1].

3.4.1. Bağlayıcı malzemeler

Bağlayıcılar, bileşenlerini bir arada tutmak ve kararlı bir matris yapısı oluşturmak amacıyla kullanılır. Bu maddeler genellikle polimer bazlıdır ve yüksek sıcaklıklara karşı dirençleri sınırlıdır. Fren malzemesinin içinde kullanım oranı en zor tahmin edilebilen bileşenler olarak kabul edilirler. Yetersiz reçine kullanımı, fren balatasının dayanıklılığını azaltırken, aşırı reçine kullanımı ise yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısını düşürebilir ve sertliği önemli ölçüde artırabilir. Yaygın olarak kullanılan bağlayıcı reçineler arasında novolak fenolik reçineler, epoksi reçineler ve polyester reçineler yer almaktadır [21,22]. Bazı bağlayıcılara ait bilgiler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. *Bağlayıcı malzemeler [22]*

Bağlayıcı	Avantajları	Dezavantajları
Fenolik reçine	Ucuz ve üretimi kolay	Kırılgan, düşük darbe direnci, son derece toksik, nispeten düşük sıcaklıklarda (450°C) ayrışır.
COPNA reçinesi	Grafitle (yaygın bir yağlayıcı) yüksek bağlanma mukavemeti; bu nedenle saf fenolik reçineden daha iyi aşınma direncine sahiptir.	Nispeten düşük sıcaklıklarda (450 ve 500°C) ayrışır.
Silikon modifiyeli fenolik reçine	Saf fenolik reçineden daha iyi darbe direnci; saf fenolik reçineden daha iyi ısı ve kimyasal direnci; geliştirilmiş su iticilik.	Fenolik reçine tabanlı olması, oldukça toksik olmasına sebep olur.
Epoksi modifiyeli fenolik reçine	Saf fenolik reçineden daha iyi ısı direnci.	Fenolik ve oldukça toksiktir.
Termoplastik poliimid reçinesi	Aşınmaya dayanıklı; termal solma göstermez.	Isı iletkenliği fenolik reçineden üç kat daha düşüktür.

Frenleme sırasında aşırı ısı oluştuğundan dolayı, fren balatasının malzeme kalitesi bozulabilir. Bu durum, reçinenin bozulmasıyla ilişkilidir ve sonuç olarak malzemenin bağlayıcı özelliklerini kaybetmesine neden olur. Bu nedenle, fren balatasının termal stabilitesi, mekanik özelliklerini koruma kapasitesi ve olumsuz frenleme koşullarında bileşenleri bağlama yeteneği büyük ölçüde reçineye bağlıdır [1].

Fenol reçineler, genellikle sürtünme malzemeleri üretimi için neredeyse yalnızca kullanılan düşük maliyetli, yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve iyi mekanik özelliklere sahip bağlayıcı malzemelerdir. Diğer reçinelerle karşılaştırıldığında, çözücülere, asitlere ve suya daha dayanıklıdır ve yanma sırasında daha az duman üretir. Önemli bir özellik olarak, ilk bozulma sıcaklığı, fren balatası solması ile ilgili bir fenomen ile korelasyon nedeniyle kritik bir öneme sahiptir. Bu sıcaklık saf reçinelerde 354 °C'den, kürlenmiş sürtünme malzemesinde 303 °C'ye düşmektedir. Fenol reçinesi, yüksek sıcaklık sürtünmesi için en uygun malzeme değildir. Ani frenleme durumlarında, fren balatasının sıcaklığı kolaylıkla 700 °C'ye ulaşabilir ve bu, fenol reçinesinin bozulma sıcaklığını önemli ölçüde aşmaktadır [1].

Bir fren balatasındaki fenol reçinesi oranı hacim açısından %5 ile %35 arasında değişmektedir. Bu içeriğin miktarı, sürtünme katsayısı değeri ve aşınma oranı üzerinde ters etkiye sahiptir. Reçine içeriğindeki %10'luk bir düşüş, sürtünme katsayısında yalnızca birkaç yüzdelik değişime neden olur. Bashir vd. (2021), özel olarak tasarlanmış bir disk fren test düzeneğinde muz lifi ve fenolik reçineyi modifiye bağlayıcı olarak kullanarak fren balatası üretmişler ve ürettikleri fren balatasının termal kararlılığını ve sürtünme performansını analiz etmişlerdir. Balata malzemesine muz lifi eklenmesinin fren sürtünme malzemesindeki bağlayıcıların termal kararlılığını artırma potansiyeline sahip olduğunu ve bu durumun, alternatif bağlayıcılar açısından umut verici bir yaklaşım sunduğunun ifade etmişlerdir [23].

Epoksi reçineler, mükemmel yapışma ve kimyasal dayanıklılık özelliklerine sahip bağlayıcılardır. Genellikle yüksek performanslı kompozitlerde tercih edilir.

Polyester reçineler, uygun maliyetli olup, birçok uygulamada kullanılabilir, ancak genellikle epoksi kadar dayanıklı değildir.

Fenol ve formaldehit, genellikle kalıp pudrası formunda kullanılır ve yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur. Moleküler yapıları, sürekli bir kafes yapısına sahip olmalarını sağlar, bu da moleküller arasında kayma olasılığını ortadan kaldırır ve şekil değiştirmeyi sıcaklık artışına karşı dirençli hale getirir. Ayrıca, doğal veya sentetik kauçuk da bağlayıcı olarak kullanılabilir, bu da malzemenin elastikiyetini ve genel performansını artırır [21]. Pujari ve Srikan (2019), alüminyum oksit (%5-%20) ve grafit tozu (%10-%35) gibi katkı maddeleri ile palmye çekirdeği (%0-%50), Nil gülü (%0-%15) ve buğday (%0-%10) gibi doğal liflerin çeşitli kombinasyonlarını %35 fenolik reçine bağlayıcı ile birleştirerek beş farklı fren balatası üretmişlerdir. Bu fren balatalarının tribolojik özelliklerini incelemişler ve asbestli fren balatalarıyla karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, sürtünme katsayısını artırmak için parçacıklı Nil gülü, aşınma oranını azaltmak için ise buğday tozu kullanıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, alüminyum oksit ve grafitin aşındırıcı özellikte olması sayesinde düşük gürültü seviyesine, yüksek sürtünme katsayısına ve düşük aşınma oranına sahip fren balataları üretimine katkı sağladığını ifade etmişlerdir. %30 lif oranına %5 buğday eklenmesiyle fren balatalarında daha iyi aşınma özellikleri elde edildiğini, kompozitlerde maksimum sertlik değerine ise %10 buğday, %15 Nil gülü ve %25 palmye çekirdeği oranlarında ulaşıldığını gözlemlemişlerdir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, test edilen doğal liflerin sürtünme kompozitlerini güçlendirmede asbestin yerine geçebileceği sonucuna varmışlardır [24].

3.4.2. Takviye malzemeleri

Takviye malzemeleri, mekanik mukavemet sağlayan bileşenlerdir. Fren balatalarının dayanımını artırmak ve rijitliğini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Matris içinde homojen bir şekilde dağılan bu malzemeler, balataların performansını iyileştirmektedir. Alternatif takviye malzemeleri arasında metal, karbon, cam ve Kevlar lifleri öne çıkmaktadır. Kevlar, yüksek dayanıklılık özellikleri ile fren balatalarının performansını iyileştirmekte etkili bir malzemedir. Cam elyafı, özel işlemlerle üretilmekte ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılığı ile bilinmektedir. Çelik fiber ise, iyi ısı ve sürtünme kararlılığına sahip olup, kolay temin edilebilirliği ile avantaj sağlamaktadır [4,21,13]. Takviye malzemeleri ve tanımlarına ait bazı bilgiler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. *Takviye malzemeleri ve tanımları [14,22]*

Malzeme	Tanım/Yorum
Asbest	İlk fren malzemelerinde en yaygın dolgu malzemesidir.
Pamuk Takviye Lifleri	Matris için kullanılır.
Karışık Oksit Takviye Lifleri	Temel cüruflardan üretilir.
Aramid Lifleri	Yumuşaktır, diğer lifler olmadan kullanılamazlar. İyi sertlik-ağırlık oranı, mükemmel termal esneklik ve iyi aşınma direnci sergilerler
Cam Lifleri	Kırılındırlar. Yeterli termal dayanıklılık sergilerler.
Metalik Lifler	Isıya dayanıklıdır. Ancak aşırı rotor aşınmasına neden olabilirler.
Mineral Yün	Silika (%40-50 ağırlık), alümina (%5-15 ağırlık), kalsiyum (%34-42 ağırlık), magnezyum (%3-10 ağırlık) ve diğer inorganik bileşenleri içerebilir (%0-7 ağırlık); amacı kaymayı kontrol etmek ve fren etkinliğini artırmaktır.
Kauçuk (Diene, Nitril)	Asbest lifleri içeren polimer kompozit fren malzemelerinde çapraz bağlanmayı teşvik etmek ve aşınma direncini artırmak için stabilizatörler olarak kullanılır; ayrıca, sıkıştırılabilirliği (modül/sertlik) de değiştirir.

Yanar vd. (2020), asbestsiz fren balatasına %0–%20 ağırlık oranlarında çelik elyaf ilaveli balata malzemelerinin sürtünme ve aşınma karakteristikleri ile mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Hazırlanan numunelerin sürtünme davranışını pim–disk tipi test konfigürasyonunu kullanarak test etmişlerdir. Kompozit balata numunelerinin sürtünme katsayısının çelik elyaf içeriğinin artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir. Ağırlıkça %5 çelik elyaf ilavesinden sonra kompozitin sürtünme katsayısının önemli ölçüde değişmediğini belirtmişlerdir. Çelik elyaf ilavesinin kompozitin sürtünme katsayısında önemli bir artışa neden olsa da ağırlıkça %15'e kadar çelik elyaf ilavesiyle özgül aşınma oranında önemli bir değişiklik gözlemlenmediğini belirtmişlerdir. Öte yandan kompozit matrise çelik elyaf ilavesi numunenin solmaya karşı balata direncinin artmasına katkı sağlasa da mekanik özelliklerinin kötüleşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir [13].

3.4.3. Dolgu malzemeleri

Dolgu malzemeleri, fren balatalarının üretim maliyetini azaltmak ve işlenebilirliği arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında temizleyiciler, renklendiriciler ve organik/inorganik dolgu maddeleri yer almaktadır. Genellikle sürtünme performansına etkisiz oldukları kabul edilmekle birlikte, bazı durumlarda sürtünme ayarlayıcı işlev de görebilirler. Fren balatalarında yaygın olarak kullanılan dolgu maddeleri barit, kil, alçı ve talk'tır. Barit, genellikle sürtünme katsayısını etkilemeyen bir dolgu malzemesi olarak kabul edilmekle birlikte sadece dolgu işlevi görmektedir. Kil, doğal olarak toprak ve taş formunda bulunan ve dolgu malzemesi olarak kullanılan bir bileşendir. Alçı, düşük ısı iletkenliğe sahip olup dolgu malzemesi olarak %50'ye kadar kullanılabilir. Talk ise, yüksek yağ ve gres emme kapasitesi ve yaprağımsı yapısıyla balatalarda tercih edilen dolgu malzemelerinden biridir [21]. Dolgu malzemeleri ve tanımlarına ait bazı bilgiler Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Dolgu malzemeleri ve tanımları [14,22]

Malzeme	Tanım/Yorum
Baryum Sülfat (BaSO_4)	Temelde inert bir malzeme olup, yoğunluğu artırır ve aşınma direncine yardımcı olabilir; yüksek sıcaklıklarda kararlıdır.
Kalsiyum Karbonat (CaCO_3)	Baryum sülfata daha düşük maliyetli bir alternatif, ancak yüksek sıcaklıklarda tam olarak stabil değildir.
Kaju Fıstığı Kabuk Yağı	Bağlayıcı sistemde dayanıklılığı artırır ve fren gürültüsünü azaltır.
Kaju fıstığı tozu	Fren gürültüsünü bastırır, ancak sürtünme malzemelerine iyi gelmez
Kireç (Ca(OH)_2)	Demir katkı maddelerinde korozyonu önlemek için kullanılır; işleme yardımcı olur ve kayma sıcaklıklarını artırır.
Potasyum Titanat	İnert dolgu malzemesi; ayrıca bir yalıtkan ve asbestin rolünü değiştiren yapısal bir katılımcıdır.
Kauçuk Atığı	Öğütülmüş lastik ("lastik kabukları"), maliyeti düşürür, yol kirini içermemelidir.
Vermikülit	Düşük frekanslı fren sesini bastırır, ancak düşük ısı direncine sahiptir
Deniz Kömürü	Genel düşük maliyetli parçacıklı dolgu; zararlı kül içerebilir, yüksek sıcaklıklar için iyi değildir.
Çinko Oksit (ZnO)	Bazı aşınma direnci sağlar, ancak tamburları parlatabilir.

Uçucu kül, sanayi fabrikaları ve ısıtma ile elektrik santrallerinde kömür yanmasından kaynaklanan bir yan üründür. İnce mineral tozu formunda, açık gri ile koyu gri ya da açık kahverengi renklerde olup, esas olarak silisyum, alüminyum ve demir bileşenlerinden oluşmaktadır. Uçucu kül, ayrıca doğal taşlarla benzer şekilde çeşitli iz elementleri içerir ve yanmamış karbon içeriği düşüktür. Kömür yanması çevre üzerinde olumsuz etkilere yol açtığı için, atık yönetimi, özellikle sanayi atıkları açısından birçok devlette çevresel politika önceliği haline gelmiştir. Farklı kömür türleri ve çeşitleri, uçucu külün değişen özelliklerle sonuçlanmasına yol açmakta ve bu da atık yönetim sürecini etkilemektedir. Uçucu kül, maliyetinin düşük olması nedeniyle fren balatalarında dolgu maddesi olarak kullanılması amacıyla

denenmiştir. Toplam ağırlığın %5'inden %55-60'ına kadar kütle içeriği bulunmaktadır. Araştırmalar, yüksek kül içeriğine sahip fren balatalarının, araçların düşük başlangıç hızlarında sürtünme katsayılarının stabil olduğunu göstermiştir [1].

3.4.4. Sürtünme ayarlayıcı malzemeler

Sürtünme ayarlayıcı malzemeler, sürtünme koşullarını kararlı bir şekilde sağlamak amacıyla eklenen bileşenlerdir. Bu malzemeler, sürtünme katsayısını modifiye ederek, fren performansının iyileşmesinde kritik bir rol oynar. Abrasif (aşındırıcı) ve non-abrasif (aşındırıcı olmayan) olmak üzere iki gruba ayrılabilir [21]. Boz ve Kurt (2006), yaptıkları bir çalışmada, bronz esaslı fren balatalarına toz metalurjisi yöntemiyle farklı oranlarda (%0,5-%4) antimon trisülfid tozu ilave etmişler ve ürettikleri fren balatalarının sürtünme ve aşınma davranışlarını bronz esaslı balata numuneleri ile karşılaştırmışlardır. Aşınma direnci açısından en iyi sonucunun %0,5 antimon trisülfid içeren sürtünme malzemesinden elde edildiğini, sürtünme katsayısı açısından ise en iyi sonucun %4 antimon trisülfid katkılı sürtünme malzemesinden elde edildiğini gözlemlemişlerdir [25].

Aşındırıcılar, birleşim yüzeylerinin temizliğini korumaya ve sürtünme filmlerinin birikimini kontrol etmeye yardımcı olur. Ayrıca, özellikle duruşu başlatırken sürtünmeyi artırır. Tablo 6'da aşındırıcı olarak kullanılan malzemeler ve tanımları verilmiştir.

Tablo 6. *Aşındırıcı sürtünme ayarlayıcı maddeler ve tanımları [14]*

Malzeme	Tanım/Yorum
Alüminyum oksit	(1) Parlatma ajanı olarak eklenir ve aşınma direnci sağlar. Ancak solma üretebilir. (2) Anhidrat formu daha az aşındırıcıdır. (3) Eritilmiş formu çok serttir ve en aşındırıcı formdur.
Demir oksitler	Hematit hafif bir aşındırıcı olarak işlev görebilir; manyetit de hafifçe aşındırıcıdır.
Kuvartz	Kırılmış mineral parçacıkları
Silika	Doğal veya sentetik olarak üretilmiş silika
Zirkonyum silikat	(ZrSiO ₄)

B. Sugözü ve Dağhan (2017), çalışmalarında farklı oranlarda alümina, silika ve zirkon (ağırlıkça %5 ve %10) içeren altı farklı fren balatası numunesi üreterek bu numunelerin sürtünme özelliklerini incelemişlerdir. Fren balatalarını geleneksel yöntemleri izleyerek sırasıyla toz karıştırma, ön şekillendirme ve sıcak presleme işlemleri ile üretmişlerdir. Numunelerin aşınma karakteristiklerini, pad-on-disk tipi aşınma test cihazı kullanarak belirlemişlerdir. Ayrıca, sertlik, yoğunluk, porozite, çekme dayanımı ve basma dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirmişler; morfolojik özellikleri ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz etmişlerdir. Elde ettikleri bulgular doğrultusunda, aşındırıcı miktarının artması ile sürtünme katsayısının yükseldiğini ve özgül aşınma oranının azaldığını belirtmişlerdir. Yapılan sürtünme testleri sonucunda en yüksek sürtünme katsayısının 0.407 ile ağırlıkça %10 alümina içeren numuneden, en düşük sürtünme katsayısının ise 0.296 ile %5 zirkon içeren numuneden

elde edildiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca ağırlıkça %10 alümina içeren balata numunesinin yüksek sürtünme performansı sergilediğini vurgulamışlardır [26].

Aşındırıcı olamayan maddeler ise sürtünme katsayısını etkileyen, ancak aşındırıcı özellik göstermeyen malzemelerdir. Bu malzemeler, yağlama yapar, sürtünmeyi artırır veya oksijenle reaksiyona girerek arayüz filmlerinin kontrolüne yardımcı olur. Tablo 7’de aşındırıcı olmayan malzemeler ve tanımları verilmiştir.

Tablo 7. *Aşındırıcı olmayan sürtünme ayarlayıcı maddeler ve tanımları [14]*

Malzeme	Tanım/Yorum
Antimon trisülfür	Sürtünme kararlılığını artırmak için eklenen katı yağlayıcıdır. Potansiyel olarak toksik içerir.
Pirinç	Tipik olarak %62 Cu - %38 Zn içerir. Bazen talaş veya makine atığı olarak kullanılır, ıslak sürtünmeyi ve geri kazanımı artırdığı söylenir.
Grafit	Ucuz ve yaygın olarak kullanılır. Birçok form ve kaynağı vardır, bazıları aşındırıcı kirleticiler içerebilir; hava ile >700°C’de yanar, sürtünme seviyesi nem ve yapıyla etkilenir.
Seramik	Alümina-silika ile düşük yoğunluklu dolgu, rotor aşınmasını azaltmaya ve sürtünmeyi kontrol etmeye yardımcı olduğu iddia edilir.
Bakır	Isı taşıma kontrolü için toz olarak kullanılır ancak aşırı dökme demir aşınmasına neden olabilir.
Sürtünme tozu	İşlenmiş kaju reçinelerinden oluşur, bazen kauçuk bazlı olabilir; spontan yanmayı azaltmak veya parçacık dağılımını desteklemek için bazı katkı maddeleri kullanılır.
Kurşun oksit	Sürtünme düzenleyici olarak kullanılmıştır, ancak toksisite endişeleri vardır.
Metaller-akışkan bileşenler	Pb, Sb, Bi, Mo, akışkan bileşenleri olarak, sürtünme kaynaklı filmleri stabilize etmek ve bunların aşırı kalınlaşmasını önlemek için oksijen alıcıları olarak işlev görür.
Metal oksitler-çeşitli	Magnetit soğuk sürtünmeyi artırır; ZnO yağlama yapar ancak tambur parlatmasına neden olabilir; Cr ₂ O ₃ sürtünmeyi artırır.
Metal sülfürler-çeşitli	Cu ₂ S, Sb ₂ S ₃ , PbS; metal fiber içeren ve içermeyen disk fren balataları üzerindeki katkı maddelerinin etkisini göstermektedir; sürtünme katsayısını değiştirmekte ve stabilize etmektedir, en yüksek değer Sb için yaklaşık 1 (0.47-0.49), ardından PbS (0.40-0.47) gelmektedir; Cu için en değişken değerler (0.36-0.52) olup, Cu-S için aşınma en kötüsüdür.
Mineral dolgu maddeleri	Mullit, kyanit, sillimanit, alümina, kristalin silika; aşınmayı kontrol etmeye yardımcı olur.
Molibden disülfür	(MoS ₂), tipik bir katman ızgara türü yağlayıcıdır; düşük maliyetli, sürtünmeyi azaltabilir.
Petrol koku	Düşük maliyetli, sürtünmeyi azaltabilir, düşük kül içerir.

Grafit, iki boyutlu halkalar şeklinde dizilmiş karbon atomlarından oluşan, parlak ve yumuşak bir malzemedir. Yüksek ısıya dayanıklılığı ve birçok korozyon maddeye karşı gösterdiği direnç ile öne çıkar. Grafitin sıcaklıkla birlikte artan dayanımı, düşük sürtünme uygulamalarında avantaj sağlar. Fren balatalarında, grafitin uygun oranlarda kullanılması, sürtünme katsayısının istenilen seviyede dağılmasına yardımcı olur ve bu da balata performansını iyileştirir.

Bakır, kalay ve çinkodan oluşan bronz tozu, katıldığı malzemenin elastik modülünü, sıcaklık iletkenliğini ve elektromanyetik koruma kapasitesini artırır. Ayrıca, malzemenin katılma süresini kısaltır ve termal genleşme katsayısını düşürür, böylece fren balatasının genel performansını iyileştirir [21].

Bakır, sürtünme malzemelerinin performans özelliklerini artıran kendine özgü özellikleri sayesinde uzun süredir fren balata bileşimlerinde önemli bir bileşen olarak kullanılmaktadır. Bakır, balatada termal solmayı önlemesi ve ısı iletkenliği artırması nedeniyle bir sürtünme düzenleyici olarak işlev görmektedir. Yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı bir özellik gösteren bakır, temas alanlarında homojen bir sürtünme tabakası oluşturarak gürültü ve titreşimi azaltır ve sürtünme katsayısının stabilizasyonuna katkı sağlar. Ayrıca, bakırın balatada fiber formunda takviye olarak kullanılması, aşınmayı azaltıcı bir rol oynar [9,10].

3.5. Balatanın mikroyapı ve tribolojik özelliklerini etkileyen faktörler

Fren balatalarının mikroyapı ve tribolojik özellikleri, malzemenin performansını belirleyen önemli parametrelerdir. Bu özellikler, fren balatalarının sürtünme, aşınma, dayanıklılık ve uzun ömür gibi kritik performans kriterlerini doğrudan etkiler. Balatanın mikroyapısı, kullanılan malzemeler ve üretim süreciyle şekillenirken; tribolojik performansı, malzemenin sürtünme ve aşınma davranışlarıyla ilişkilidir. Bu faktörler, fren balatasının genel verimliliğini ve güvenliğini belirlemede önemli rol oynar.

Balatanın mikroyapısını etkileyen faktörler, malzemenin bileşen yapısına ve üretim süreçlerine dayanır. Bu faktörler, balatanın dayanıklılığını ve performansını belirleyen unsurlardır.

1. **Balatada Kullanılan Malzemeler:** Fren balatasının bileşenlerinde kullanılan malzemeler, mikroyapıyı doğrudan etkiler. Örneğin, organik, metalik veya karbon esaslı malzemeler arasındaki farklar, mikroyapı özelliklerinin değişmesine yol açabilir. Her malzeme türü, farklı sertlik, yoğunluk ve aşınma direnci sunar.
2. **Malzemelerin Yapısı:** Malzemelerin kristal yapısı, içsel boşluklar ve bağ yapıları gibi faktörler, mikroyapıyı belirleyen önemli unsurlardır. Bu yapılar, malzemenin sürtünme ve aşınma özelliklerini etkileyebilir.
3. **Malzemelerin Oransal Kullanımı:** Malzemelerin farklı oranlarda karıştırılması, kompozit malzeme oluşumunda önemli bir rol oynar. Balatanın mikroyapısındaki değişiklikler, bu karışım oranlarının etkisiyle şekillenir.
4. **Sıkıştırma Basıncı:** Üretim sırasında uygulanan sıkıştırma basıncı, balatanın yoğunluğunu ve yapısal bütünlüğünü belirler. Yüksek basınç, daha dayanıklı ve homojen bir mikroyapı oluşumunu teşvik eder.
5. **Sinterleme Sıcaklığı ve Süresi:** Sinterleme süreci, balatanın mikroyapısını etkileyen kritik bir adımdır. Sıcaklık ve süre, malzemenin bağ yapısını ve aşınma direncini artırmak için optimize edilmelidir.

6. **Üretim Yöntemi:** Üretim yöntemleri, mikroyapıyı belirleyen bir diğer faktördür. Örneğin, döküm, sinterleme veya presleme yöntemlerinin her biri, balatanın mikroyapısal özelliklerini farklı şekilde etkiler.

Fren balatasının tribolojik performansı, sürtünme ve aşınma davranışlarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu performans hem balatanın iç yapısına hem de çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.

1. **Balataların İçerdikleri Malzeme Bileşenleri:** Balatalarda kullanılan malzeme bileşenleri, sürtünme özelliklerini belirleyen temel unsurlardan biridir. Takviye edici malzemeler ve dolgu maddeleri, balatanın tribolojik performansını iyileştirebilir.
2. **Balatanın Yüzey Yapısı:** Fren balatasının yüzey yapısı, sürtünme davranışını önemli ölçüde etkiler. Pürüzlü yüzeyler, sürtünmeyi artırırken, düzgün yüzeyler daha düşük sürtünme sağlar.
3. **Yüzey Enerjisi:** Yüzey enerjisi, malzemenin çevresiyle etkileşim kapasitesini gösterir. Bu, özellikle sürtünme katsayısını ve aşınma oranını etkileyen bir faktördür.
4. **Fren Balatalarındaki Kimyasal Reaksiyonlar:** Frenleme sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar, sürtünme özelliklerini değiştirebilir. Bu reaksiyonlar, yüzeydeki oksitlenme, aşınma ve diğer kimyasal bozulmalarla bağlantılıdır.
5. **Balatanın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri:** Sertlik, yoğunluk, ısıl iletkenlik gibi fiziksel özellikler ile çekme dayanımı ve elastikiyet modülü gibi mekanik özellikler, balatanın tribolojik performansını doğrudan etkiler.
6. **Çalışma Koşulları:** Fren balatasının çalışma koşulları, özellikle hız, basınç ve sıcaklık gibi faktörler, sürtünme davranışını önemli ölçüde değiştirebilir. Bu koşullar, balatanın aşınma hızını ve etkinliğini etkiler.
7. **Çevresel Koşullar:** Çevresel faktörler, sıcaklık, nem ve dış ortam koşulları, balatanın performansını ve ömrünü etkileyebilir. Örneğin, aşırı sıcaklık, malzemenin aşınma hızını artırabilir.
8. **Yağlı, Nemli ve Kirli Yüzeyler:** Fren balatalarının çalıştığı yüzeyin yağlı, nemli veya kirli olması, sürtünme katsayısını ve aşınma direncini değiştirir. Bu tür yüzeyler, frenleme verimliliğini olumsuz etkileyebilir [20,27]

4. Balata Üretim Yöntemleri

Fren balataları, çeşitli malzemelerin toz halinde bir araya getirilip preslenmesiyle oluşan kompozit malzemelerdir. Bu balataların kimyasal ve mekanik özellikleri, içerdiği bileşenlerin oranlarına göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, balata malzemesinin tasarımında kullanılan malzemelerin türü ve oranlarının belirlenmesi oldukça karmaşık ve önemli bir süreçtir [28].

Fren balatalarının üretiminde toz metalürjisi yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, metal veya metal dışı malzemelerin çok ince tozlar halinde karıştırılıp, istenen formda preslenerek kontrollü bir atmosferde ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta belirli bir süre boyunca sinterlenmesini içerir. Bu yöntemle, tek aşamalı üretim mümkündür. Bu yöntemin fren balata üretiminde tercih edilmesinin temel nedeni, farklı özelliklere sahip malzeme karışımlarının, özelliklerini kaybetmeden üretilebilmesidir. Örneğin, yüksek sıcaklıklara dayanımı düşük olan kauçuk veya reçine gibi malzemeler, yüksek sıcaklıkta yapılan üretim sırasında yanarak özelliklerini kaybedebilir. Bu nedenle, fren balata malzemelerinin, döküm gibi yüksek sıcaklık gerektiren yöntemlerle üretilmesi tercih edilmemektedir. Ancak toz

metalürjisi yöntemi ile üretilen fren balataları, bileşimdeki tüm malzemelerin üretim süresince özelliklerini korumasını sağlar. Ayrıca bu yöntemle, istenen boyutlarda gözenekli bir yapı elde edilebilir ve farklı boyut ve şekillere sahip malzeme tozları dayanıklı, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürülebilir [28].

Her ne kadar fren balata üretiminde döküm yöntemi tercih edilmese de özellikle metal fren balatalarının üretiminde döküm yöntemi tercih edilebilir. Bu yöntemde, malzeme sıvı hale getirilir ve özel kalıplara dökülerek fren balatası şeklini alır. Döküm yöntemi, özellikle ağır yük taşıyan araçlar ve yüksek performans gerektiren uygulamalar için uygundur. Döküm yöntemiyle üretilen fren balataları, metal yapıları sayesinde yüksek dayanıklılık gösterir, metal alaşımları, yüksek sıcaklıklarda bile stabil kalabilir, bu da frenleme sırasında aşırı ısınmayı engeller. Bu yöntem özellikle ağır araçlar ve yüksek performans gerektiren sistemler için uygundur. Ancak döküm yöntemi, özellikle özel metal alaşımlarının kullanıldığı durumlarda daha pahalı olabilir. Ayrıca metal fren balataları, kompozit malzemelere göre daha ağır olabilir, bu da aracın genel ağırlığını etkileyebilir.

5. Sonuç

Türkiye’de ve dünyada artan nüfusa bağlı olarak araç sayısının artması, otomotiv endüstrisinin hızlı bir şekilde gelişmesi ve yüksek hızlı araçların yaygınlaşmasıyla birlikte taşıtlarda kullanılan frenleme güvenliği kritik bir konu haline gelmiştir. Yüksek hız ve kütleye sahip olan taşıtların güvenli bir şekilde frenlenmesi, bu taşıtların emniyetli çalışabilmesi için önemli bir faktördür. Fren balatası, fren sisteminin en önemli bileşenlerinden biridir. Bu nedenle, taşıtlarda kullanılan fren balata malzemeleri çok önemlidir. Fren balata malzemelerinin yapısı, boyutları ve performansı üzerine yapılan çalışmalar sonucunda çeşitli optimum çözümler geliştirilmiştir. Ayrıca çevresel sürdürülebilirlik kaygıları nedeniyle bakır ve asbest içermeyen veya düşük çevresel etkiye sahip fren balatası malzemeleri üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Frenleme sırasında açığa çıkan yüksek enerji, balatanın aşırı ısınmasına neden olabilir. Isının hızla emilmesi, ısıya dönüşmesi ve dağıtılması, fren balatası için oldukça önemlidir. Frenleme anında, balata yüzeyinde yüksek sıcaklıklara ulaşan noktalar oluşabilir ve bu, fren performansında azalmaya, termal deformasyonlara, sürtünme katsayısındaki dalgalanmalara ve fren kayıplarına yol açabilir. Yüksek ısı, termal çatlaklar ve yüzey pürüzlülüğünde artış gibi hasarlara sebep olabilir. Bu tür ısı hasarları, balatanın sürtünme özelliklerini bozar ve taşıtların güvenliğini tehdit edebilir. Sonuç olarak, aşınma, çatlaklar ve diğer hasarlar nedeniyle fren balatalarının beklenen ömrü dolmadan değiştirilmesi gerekebilir.

Fren balatasının aşınma davranışı, malzeme özelliklerine ve tasarım parametrelerine bağlıdır. Geleneksel olarak, demir alaşımları yaygın olarak kullanılsa da son yıllarda kompozit malzemelerin (özellikle seramik ve alüminyum matrisli) fren balatası olarak kullanımı önerilmiştir. Bununla birlikte, dövme çelikler, yüksek hızlarda çalışan taşıtlarda kullanılmak için uygun olup, istenilen aşınma direncini ve stabil mikroyapıyı sağlama açısından yeterlidir.

Fren balatalarında kullanılan malzemeler, güvenlik, performans ve dayanıklılık açısından önemli bir rol oynamaktadır. Her malzemenin kendine has avantajları ve dezavantajları vardır. Organik malzemeler, çevre dostu olmaları ve düşük gürültü seviyeleri ile öne çıkar. Ancak, aşırı sıcaklık ve yüksek performans gereksinimlerinde sınırlı kalabilirler. Metalik ve sinterlenmiş metal malzemeler, yüksek

sıcaklık dayanımı ve uzun ömürleri ile ideal olup, ancak gürültü ve aşınma gibi olumsuz etkilerle karşılaşılabilir. Seramik malzemeler ise, özellikle performans araçları için yüksek ısıl dayanıklılık ve düşük gürültü sağlar, ancak maliyet açısından daha pahalıdır.

Genel olarak, fren balatası seçimi, araç tipine, sürüş koşullarına ve maliyet beklentilerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Fren balataları seçilirken bu faktörlerin dikkate alınması, güvenli ve verimli bir sürüş deneyimi sağlamada önemli rol oynar.

Gelecekte, fren balatası üretiminde karbon ayak izinin azaltılması, geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı ve toksik özellikleri daha az olan katkıların tercih edilmesi yönündeki çalışmaların artması öngörülmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin hakemlerine ve dergi kurullarına teşekkür eder.

Çıkar Çatışması

Yazarlar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

References

- [1] Borawski, A. (2020). Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads-review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 27(1), 374-396.
- [2] Gawande, S. H., Banait, A. S., & Balashowry, K. (2023). Study on wear analysis of substitute automotive brake pad materials. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 21(1), 144-153.
- [3] Saindane, U. V., Soni, S., & Menghani, J. V. (2021). Dry sliding behavior of carbon-based brake pad materials. *International Journal of Engineering*, 34(11), 2517-2524.
- [4] Eriksson, M., & Jacobson, S. (2000). Tribological surfaces of organic brake pads. *Tribology international*, 33(12), 817-827.
- [5] Marin, E., Daimon, E., Boschetto, F., Rondinella, A., Inada, K., Zhu, W., & Pezzotti, G. (2019). Diagnostic spectroscopic tools for worn brake pad materials: A case study. *Wear*, 432, Article 202969.
- [6] Sugoza, I., Mutlu, I., & Sugoza, K. B. (2018). The effect of ulexite to the tribological properties of brake lining materials. *Polymer Composites*, 39(1), 55-62.
- [7] Hendre, K. N., & Bachchhav, B. D. (2019). Friction and wear characteristics of rubber resin-bonded metallic brake pad materials. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(6), 1312-1316.
- [8] Österle, W., Prietzel, C., Kloth, H., & Dmitriev, A. I. (2010). On the role of copper in brake friction materials. *Tribology International*, 43(12), 2317-2326.
- [9] Tavangar, R., Moghadam, H. A., Khavandi, A., & Banaeifar, S. (2020). Comparison of dry sliding behavior and wear mechanism of low metallic and copper-free brake pads. *Tribology International*, 151, Article 106416.
- [10] Zhang, P., Zhang, L., Ren, S., Fu, K., Wu, P., Cao, J., Shijia, C., & Qu, X. (2019). Effect of matrix alloying of Fe on friction and wear properties of Cu-based brake pad materials. *Tribology Transactions*, 62(4), 701-711.

- [11] Krishnan, G. S., Kumar, S., Suresh, G., Akash, N., Kumar, V. S., & David, J. P. (2021). Role of metal composite alloys in non-asbestos brake friction materials-A solution for copper replacement. *Materials Today: Proceedings*, 45, 926-929.
- [12] Lyu, Y., Leonardi, M., Wahlström, J., Gialanella, S., & Olofsson, U. (2020). Friction, wear and airborne particle emission from Cu-free brake materials. *Tribology International*, 141, Article 105959.
- [13] Yanar, H., Purcek, G., & Ayar, H. H. (2020). Effect of steel fiber addition on the mechanical and tribological behavior of the composite brake pad materials. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (pp. Article 012018). IOP Publishing.
- [14] Blau, P. J. (2001). Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives (No. ORNL/TM-2001/64). Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- [15] Liew, K. W., & Nirmal, U. (2013). Frictional performance evaluation of newly designed brake pad materials. *Materials & Design*, 48, 25-33.
- [16] Mulani, S. M., Kumar, A., Shaikh, H. N. E. A., Saurabh, A., Singh, P. K., & Verma, P. C. (2022). A review on recent development and challenges in automotive brake pad-disc system. *Materials Today: Proceedings*, 56, 447-454.
- [17] Zagurskiy, A. (2024). Technical overview of the main types, designs, and materials of brake pads for mobile agricultural machinery. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 4(20), 119-130.
- [18] Akpınar, G. (2008). Modifiye edilmiş karaçam kozalaklarının otomotiv fren balatalarında kullanımının araştırılması. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- [19] Toros, M. (2011). Fren balatalarında nano malzemelerin kullanımının frenleme performansına etkilerinin deneysel araştırılması. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Selçuk Üniversitesi.
- [20] Kara, F. (2011). Karbon elyaf takviyeli otomotiv fren balata özelliklerinin araştırılması. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- [21] Sugözü, I., & Mutlu, I. (2008). Fren balata malzemelerinin sürtünme ve aşınmaya etkisinin incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(4), 33-40.
- [22] Raghunathan, V., Sathyamoorthy, G., Ayyappan, V., Srisuk, R., Singaravelu, D. L., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2024). Advances in brake friction materials: A comprehensive review of ingredients, processing methods, and performance characteristics. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 30(6), 1396-1431.
- [23] Bashir, M., Qayoum, A., & Saleem, S. S. (2021). Experimental investigation of thermal and tribological characteristics of brake pad developed from eco-friendly materials. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 7, 1-13.
- [24] Pujari, S., & Srikanth, S. (2019). Experimental investigations on wear properties of Palm kernel reinforced composites for brake pad applications. *Defence Technology*, 15(3), 295-299.
- [25] Boz, M., & Kurt, A. (2006). Antimon trisülfürün bronz esaslı fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma özelliklerine etkisi. *Teknoloji*, 9(2), 79-90.
- [26] Sugözü, B., & Dağhan, B. (2017). Fren sürtünme malzemelerinde aşındırıcıların (alümina, silika, zirkon) tribolojik özellikleri. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 14-23.
- [27] Üstün, N. S. (2011). Otomotiv endüstrisi için bir disk fren balatası üretimi ve performansının incelenmesi. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [28] Ertan, R. (2008). Fren balata malzemelerinin optimizasyonu ve üretim parametrelerinin analizi. [Yayınlanmış doktora tezi]. Bursa Uludağ Üniversitesi.