



# Demiryolu Taşıtlarında Kullanılan Fren Disklerinin Isı ve Malzeme Yönünden Değerlendirilmesi

Beytullah Başgeçmez<sup>1</sup>

## ÖZ

Demiryolu taşıtı frenleme sistemleri, emniyetli şekilde durdurma, yavaşlatma ve uygun hızla hareketi sağlar. Yaygın olarak sürtünme etkisiyle mekanik frenleme gerçekleştirilir ve demiryolu taşıtları yüksek hızda uygun tasarlandığında fren disklerinin kullanımı, tek güvenli seçenektir. Fren diski boyutları ve ağırlığı, şasi altındaki alan, servis hızı gibi parametrelere göre çeşitlilik gösterir. Farklı malzemeler kullanıldığında ağırlık yarı yarıya varacak kadar azaltılabilmektedir. Frenleme esnasında mekanik enerji ısıya dönüşür. Çeşitli şekillerde ve boyutlarda tasarlanabilen soğutma kanatçıkları arasında akan hava, diskte konveksiyonla etkili soğutma sağlar. Diskte yerel olarak aşırı ısınan alanlar, fren diski malzemesinde yapısal değişikliğe, termal çatlak oluşumuna ve diğer hasarlara yol açar. Bu hasarlar, kontrol edilmediği ve ilerlediği, derin çatlaklar haline dönüştüğü takdirde zamanla disk kullanılamaz hale gelir. Demiryolu taşıtı fren diski imalinde yaygın ve geleneksel olarak dökme demir (lamelli, vermiküler, küresel grafitli) kullanılır; ayrıca yüksek alaşımli dökme demirler, dökme ve dövme çelik. Fren diski çeliklerinin kırılma tokluğunu artırmak ve aşınma dirençlerini yükseltmek için bileşene çeşitli alaşım elementleri eklenebilir. Ayrıca özellikle alüminyum ve seramik matrisli kompozit malzemelerin kullanımı da söz konusudur, böylelikle istenilen özelliklerde ve oldukça hafif tren fren diski üretilebilir. Bu çalışmada fren disk yapısı ve soğutma kanatçıkları, frenlemede ısı oluşumu, transferi, sıcaklık gradyanları ve sıcak bölgelerde oluşan sorunlar, termik çatlaklar, fren disklerinde kullanılan ve kullanılabilecek malzemeler hakkında bilgi verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Demiryolu, fren diskleri, malzeme, ısı, ısıl hasarlar

## Assessment of Brake Discs Used Railway Vehicles in terms of Heat and Material

### ABSTRACT

Railway vehicle brake systems provides safely stopping, slowing and its movement at the appropriate speed. Mechanical braking is commonly performed by the effect of friction, and the use of brake discs is the only reliable option when railway vehicle is designed for high speed. The dimensions and weight of the brake discs, the area under the chassis, the service speed of the train, etc. varies as it is designed according to the parameters. The weight can be reduced by up to half, when different materials are used. During braking, mechanical energy is converted into heat. The air flowing between the ventilation vanes, which can be designed in various shapes and sizes, provides effective convective cooling in the disc. Locally overheated areas cause structural changes in the brake disc material, thermal crack formation and other damage. If these damages are not controlled and progress and turn into deep cracks, the disc becomes unusable over time. Lamellar, vermicular or spheroidal graphite cast iron is commonly and traditionally used in the manufacture of railway vehicle brake discs. Also cast irons with special compositions, as well as casting and forging steel. Various alloying elements can be added to the composition to increase the fracture toughness and wear resistance of steels to be used as brake disc material. There is also the use of composite materials especially aluminium or ceramic matrix composites thus, a train brake disc desired property and very light can be produced. In this study, information is given about brake disc structure and cooling vanes, heat generation and transfer in braking, heat gradients and problems in hot regions, thermal cracks, materials used and can be used in brake discs.

**Keywords:** Railway, brake discs, material, heat, thermal damages

Geliş/Received : 15.07.2021

Kabul/Accepted : 13.08.2021

<sup>1</sup> Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine Programı, Uşak, beytullah.basgecz@usak.edu.tr

ORCID: 0000-0001-5981-5317



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Stopping, slowing it down or ensuring its movement at the appropriate speed on downhill descents of the railway vehicle are actualized by brake systems. In contemporary, railway vehicle started to be produced suitable for movement at high speeds, with globalization, to overcome distances in a short time and this situation brings with it many dangers. So, infrastructure and railway vehicle design should be compatible with the service speed. Braking is commonly performed by the effect of friction, and almost all railway vehicles use friction braking by mechanical or electrical manners. Brake discs are used, as a mechanical braking system, instead of the old system with shoe so no braking on the wheel tread. It gives pretty good results for the wheels; the stresses on the wheels are reduced and their life is extended. Brake discs provide a quieter and smoother braking process. In both axle and wheel mounted types, friction is applied to the brake disc by an equipment (pad/caliper) that creates friction force on the brake disc surface. The brake disc that have suitable structure and metallurgy can complete its service life without any problems by minimizing the problems that may occur due to thermal damage and wear.

### Brake Disc Construction and Cooling Vanes

The dimensions of the brake discs, the area under the chassis, the operating speed range of the train, etc. varies as it is designed according to the parameters. Weight of commonly used cast brake discs are heavy - placed on the wheel are lighter - but when different materials are used, the weight can be reduced by up to half. The air flowing between the ventilation vanes, which can be designed in various shapes and sizes, provides effective convective cooling in the disc. Improved heat dissipation in addition to direct energy savings as a result of reduced pumping losses with adequate and properly designed cooling; It has great potential to reduce energy consumption, negative environmental impact and costs.

### Thermic Review of Brake Disc

When braking starts; the brake cylinder which receives the command closes the brake callipers by driving them with hydraulic or compressed air. The brake pad contacts the brake disc and the braking process begins. During braking, mechanical energy is converted into heat. Hot zones which high temperature gradients on the friction surface are considered among the most dangerous phenomena that cause damage to the friction elements and premature failure. These high local temperatures can also lead to unacceptable braking performances, such as brake weakening or called hot flickers. Locally overheated areas, as well as thermal and mechanical stress caused by frictional heating, cause structural changes in the brake disc material, thermal crack formation and other damage. If these damages are not controlled and progress and turn into deep cracks, the disc becomes unusable over time. To prevent the formation of cracks in the brake discs; material with high yield and fatigue strength should be selected, necessary actions should be taken to reduce the temperature occurring during braking and/or changes should be made in the brake disc design to reduce stresses.

### Materials Used and Can Be Used in The Brake Disc and Their Metallurgy

The friction and wear behaviour of the materials used in the brake friction elements are basically; physical, chemical, mechanical properties of the material, namely the material characteristic; braking pressure, initial braking speed, braking time, temperature rise at braking etc. braking conditions in which we can list the features; ambient temperature, humidity, air flow etc. environmental conditions; surface conditions including surface roughness and contact properties; It is affected by structural parameters such as shape, size and contact shape of the brake pair. By changing the material used, the friction-wear behavior of the disc can be improved and the brake system can be made suitable for high speed. Cast iron is commonly and traditionally used in the manufacture of brake discs, given its low cost, ease of manufacture, resistance to thermal loads, and strength. We can list the types used in the production of railway vehicle brake discs as follows; lamellar, vermicular, spheroidal graphite cast irons, cast irons with special compositions, as well as cast and wrought steel. Cast steel has high strength and good toughness. Vanadium, molybdenum, nickel and solution aluminium can be added to the component to increase the fracture toughness of steels to be used as brake disc material. Wear resistance can be brought to the desired level by changing the carbon and chromium ratios. In the literature review, it was seen that AISI 4330 steel, 28CrMoV5-0.8 steel and 30CrNiMn steel were used as high-speed brake disc material. There is also the use of composite materials especially aluminium matrix composites and ceramic matrix composites, thus, a train brake disc desired properties and very light can be produced.

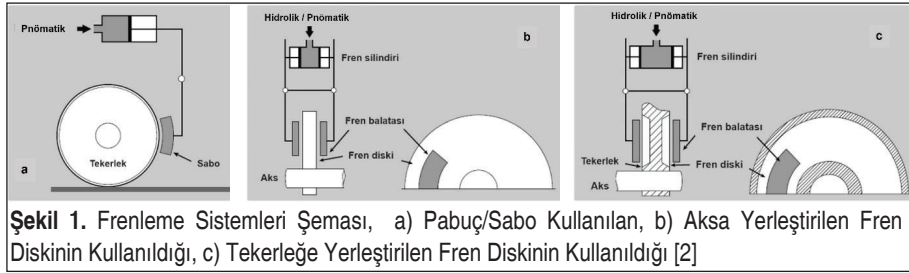
### Discussion and Conclusion

It is foreseen that the steel brake discs with the composition containing the mentioned elements and which will be manufactured by forging method will be the optimum solution option.

## 1. GİRİŞ

Demiryolu taşıtının yavaşlatılması, durdurulması veya rampa aşağı inişlerde uygun hızla hareketinin sağlanması amacıyla uygulanan işlemin sağlandığı frenleme sistemi, demiryolu taşıtı için yüksek öneme sahiptir. Yaygın olarak sürtünme etkisiyle frenleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Demiryolu taşıtlarının hemen hepsinde mekanik ya da elektriksel yollarla sürtünmeli frenleme uygulamaları kullanılmaktadır.

Mekanik frenleme sisteminin kullanıldığı mekanizmaların tümünde tekerleğe/diske sürtünme uygulayan kısım vardır. Bu kısım, hidrolik veya pnömatik olarak tahrik edilir. Fren kuvvetinin kontrolü, sürtünme yüzeyleri arasında üretilen basınç ile sağlanır. Mekanik frenler pabuçlu ve diskli frenler olarak ikiye ayrılabilir [1]. Şekil 1’de pabuçlu ve fren diskli sistemler, tahriğin sağlandığı fren silindiriyle birlikte gösterilmiştir. Ayrıntılı olarak ele aldığımız disk frenli mekanik frenleme sistemleri kendi içinde çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir.



Pabuçlu frenlerde pabuç (sabo), tekerlek aderans yüzeyine sürtünmeyle frenleme etkisi oluşturur. Yüksek hızlarda kayma etkisi istenmeyen düzeylerde olacağından ve tekerlek yüzeyine hasar vereceğinden yüksek hızlı trenlerde pabuçlu fren kullanmak olası değildir; onun yerine disk frenler kullanılır [1].

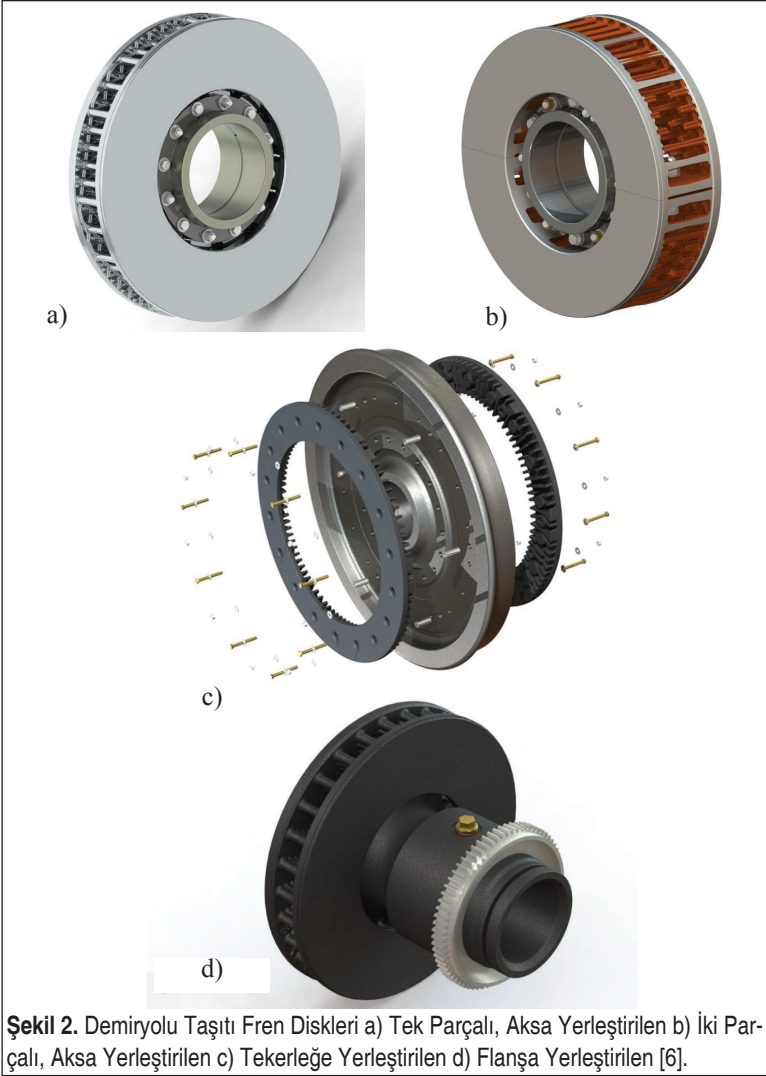
Fren disklerinin kullanımıyla tekerlek yuvarlanma yüzeyinden frenleme olmaz, tekerlekler açısından oldukça iyi sonuçlar doğurur; tekerleklerdeki gerilmeler düşer ve ömürleri uzar [3]. Fren diskleri daha sessiz ve yumuşak bir frenleme süreci sağlar.

Sürtünme aksamının disk - balata çifti olduğu frenleme sistemi; fren silindiri, boşluk ayarlayıcı, fren kaliperi, fren balatası tutucusu, fren balatası ve diskten oluşur. Söz konusu sistemde kullanılan fren diskleri;

- Vagonların/trenin frenlenmesi esnasında oluşan kinetik ve potansiyel enerjinin tümünü ya da istenilen kısmını emebilmelidir.
- Frenleme torkunu üretebilmeli, karşılamalı ve aksa aktarabilmelidir.
- Balata ile sürtünmeli birleşme sağlayabilmeli ve bu şekilde disk frene sahip araçların kinetik ve potansiyel enerjisi ısıya dönüşebilmelidir.



- Kondüksiyon/konveksiyon/radyasyon yollarıyla enerjiyi/ısıyı dağıtabilmelidir [4].
- Yüksek frekanslı sıcaklık değişimlerine dayanabilmelidir. Fren diskinin iyi derecede ısı direnci, yüksek termal iletkenlik, yeterli ısı kapasitesi ve düşük doğrusal genleşme katsayısına sahip olması gerekir.
- Güvenlik parçası olarak kabul edildiklerinden özellikle acil durum/emniyet frenlemelerinde fonksiyonlarını tam olarak yerine getirmeleri gerekmektedir. Acil frenleme süresince fren diskinin yüzeyinde belirgin bir hasar olmamalıdır, aşınma oranı düşük ve termal deformasyonlar minimum seviyede olmalıdır.



- İyi derecede termal yorulma direncine, her türlü koşulda kararlı sürtünme katsayısı ve düşük aşınma oranına sahip olmalıdır.
- Yüksek sıcaklık ve nem içeren ortamda çalıştığı göz önünde bulundurmalı, yeterli korozyon direncine sahip olmalıdır [5].

Demiryolu taşıtı fren diskleri aksa, tekerleğe ve flanşa yerleştirilen olmak üzere üç farklı tipte olabilmektedir, Şekil 2’de sırasıyla gösterilmiştir.

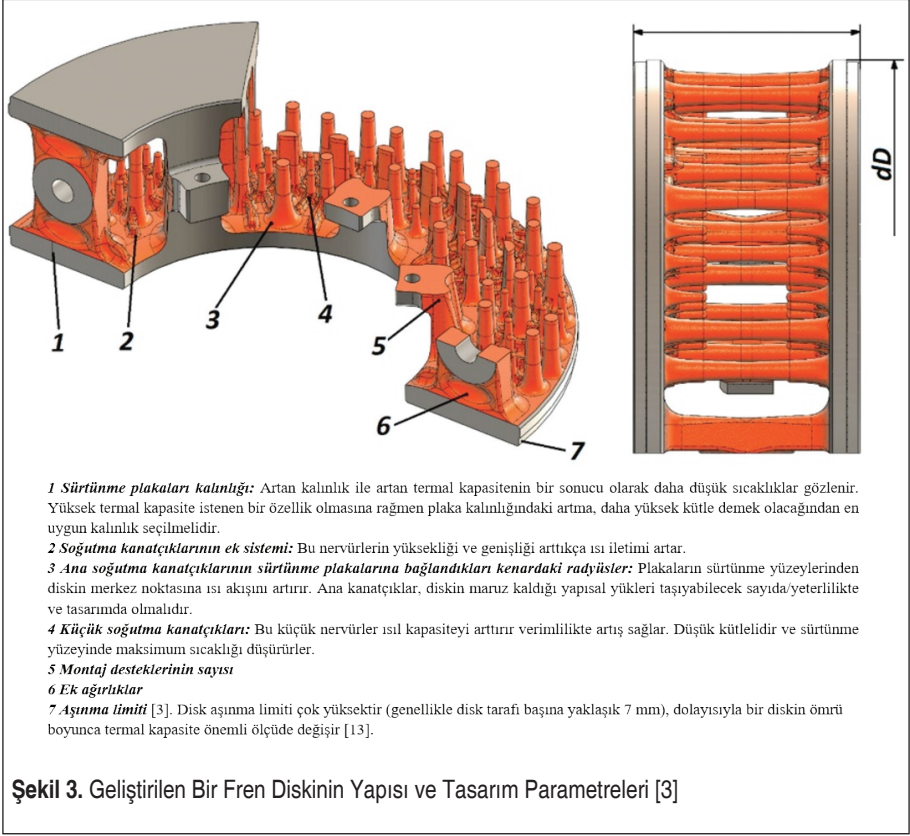
Tekerleğe yerleştirilen fren diskinin avantajları; aks çevresindeki alanın boş olarak kalması, çeşitli boyuttaki tekerleklerle uygulanabilmesi, pabuçlu sistemden dönüşümünün kolay olması, hem çeken hem de çekilen yük ve yolcu taşıtlarında uygulanabilmesi, geniş hız aralığında kullanılabilmesidir [7].

Tüm tiplerde fren diski yüzeyinde sürtünme kuvveti yaratan ekipman; kaliper ve onun içerisinde yer alan balata ile fren diskine sürtünme uygulanır. Aksa yerleştirilen fren diskleri, sistemin konumlandırılması için yeterli açıklığa sahip olan çekilen araç bojilerinde kullanılır. Tekerleğe yerleştirilen fren diskleri, cer (çekiş) motorunun da bulunduğu çeken araç bojilerinde kullanılır; bu bojilerde aksa yerleştirilen disklerin kullanımını için yeterli açıklık yoktur [2]. Tüm tekerleğe yerleştirilen disk tasarımlarının temel özelliği, yalnızca bir sürtünme yüzeyinin varlığıdır. Tek taraflı ısı girişi, yüksek frenleme görevlerinde malzemede akmaya ve kalıcı disk (halka) konikleşmesine neden olabilir. Bu nedenle, benzer boyut ve kütledeki aksa yerleştirilen disklerle kıyasla, tekerleğe yerleştirilen diskler genellikle daha düşük görevlerle sınırlıdır [8].

## 2. FREN DİSKİ YAPISI VE SOĞUTMA KANATÇIKLARI

Fren diskleri, tek parça veya ayrılabilir iki parça halinde döküm, dövme vd. yöntemlerle imal edilebilirler. Fren disklerini birleştirme elemanı olarak civatalar kullanılır. Bunların sayısı da tasarıma göre farklılık göstermektedir.

Fren disklerinin boyutları, şasi altındaki alan, kullanılacağı trenin çalışma hız aralığı gibi parametrelere göre tasarlandığından çeşitlilik gösterir. Hindistan demiryollarında işletilmekte olan yolcu vagonlarında kullanılan fren diskleri için dış çap, iç çap ve kalınlık değerleri sırasıyla şu şekildedir; 640 mm, 350 mm ve 110 mm [4]. Çin demiryollarında işletilmekte olan hızlı trenlerde kullanılan fren diskleri için değerler ise şu şekildedir; dış çap 725 mm, iç çap 286 mm ve kalınlık 52 mm [9]. Fransa demiryollarında işletilmekte olan yüksek hızlı trenlerde bir aksta 4 fren diski konumlandırılmıştır ve fren diski boyutları şu şekildedir; dış çap 640 mm, kalınlık 45 mm, diskin iç çapı 380 mm ve fren diskinin ana sürtünme yarıçapı 255 mm’dir [10]. Tekerleğe yerleştirilen tip fren diskinin boyutları şu şekildedir; dış çap 560 mm, iç çap 360 mm, sürtünme diskinin kalınlığı 23 mm [11]. Bahsedilen kalınlıktaki diskler tekerleğin her iki yanına montajlanıyor olduğundan fren diski toplam kalınlığı belirtilen kalınlığın iki katıdır denilebilir.



Fren diskinin kütlesi kritik konudur. Fren diski daha hafif imal edilirse, hem üretim için gerekli malzeme ve enerji azalacağından üretim maliyeti düşer hem de dönme ve öteleme ataleti de düşer. Yaygın olarak kullanılan döküm fren diskleri, 100-125 kg dolaylarında ağırlığa sahiptir -tekerleğe yerleştirilenler daha hafif- fakat farklı malzemeler kullanıldığında ağırlık yarı yarıya varacak kadar azaltılabilmektedir.

Sürtünme yüzeylerini göbeğe bağlayan parmakların sayısı ve biçimi fren diskinin mekanik ve termal yükler açısından yapısal optimizasyonunun bir sonucudur; ayrıca kullanılacak cıvata sayısı da bununla doğrudan ilintilidir. Parmaklarda minimum stres seviyeleri yaratırken diskin termal genişmesine izin vermek ve yine de sürtünme halkası hareketlerini kontrol etmek için 12 adet parmak/cıvata en iyi çözümdür [12]. Şekil 3'te yaygın yapıdan farklı olarak tasarlanmış bir fren diskinin yapısı ve tasarım parametrelerinin hangi etkileri ortaya çıkardığı anlatılmıştır.

Disk soğutması, işletim maliyetleri ve filo kullanılabilirliği üzerinde önemli etkileri olan disk ve balata aşınması ve ömrü üzerinde baskın etkiye sahiptir [13]. Fren diski

için en doğru termal akış sistemini bulmak üzerine çalışmalar devam etmektedir. Katı dolu ve soğutma kanallarına sahip fren disklerinin termal performansı karşılaştırıldığına, toplam konveksiyonel ısı transfer katsayısının yaklaşık üçte birinin kanatçıklardan ve geri kalan üçte ikisinin ortam havasına maruz kalan sürtünme yüzeylerinden olduğu sonucuna varılmıştır [14]. Katı diskte hava direnci oldukça düşüktür. Hava hızı soğutmada önemli rol oynar.

Fren diskleri kanatçıkları radyal ve teğetsel şekilde konumlandırılmış tasarımlara sahip olabilir. Radyal kanatçıklı diskler en büyük pompalama/aerodinamik kayba sahiptir ama en efektif soğutmayı gerçekleştirir [13]. Sürtünen yüzeyler arasında radyal olarak düzenlenen soğutma kanatçıkları, sürtünme plakaları arasında verimli soğutma sağlar. Çapraz soğutma kanalları ısıyı uzaklaştırır; sürtünme plakalarının termal balansının sürdürülmesine yardımcı olur. Kanatçıklar ile soğutma havası göbekten sürtünme plakalarının dışına iç yüzeyden akarak dağılır. Hava, hıza bağlı olan merkezkaç kuvvetinin etkisiyle hareket eder [4]. Kanatçıklar çok sayıda olmalıdır ve kalınlıkları 8 - 10 mm dolaylarında olabilir. Soğutma verimliliği kanatlardan geçen hava hızına bağlı ve kanatçık sayısı hava hızını doğrudan etkilediğinden uygun sayıda ve kalınlıkta kanatçık olması önemlidir [15].

Yeterli ve uygun tasarımdaki soğutma ile azalan pompalama kayıplarının bir sonucu olan doğrudan enerji tasarrufuna ek olarak ısı dağılımının iyileştirilmesi; enerji tüketimini, olumsuz çevresel etkiyi ve maliyetleri azaltmak için büyük potansiyele sahiptir [13].

### 3. FREN DİSKİNİN ISIL (TERMİK) İNCELEMESİ

#### 3.1 Fren Diskinde Isı Oluşumu ve Dağıtımı

Frenleme komutunu alan fren silindiri, hidrolik veya pnömatik olarak fren kaliperlerini tahrik edip kapanmalarını sağlar. Fren balatası fren diskine temas eder; frenleme işlemi başlar. Frenleme esnasında mekanik enerji ısıya dönüşür.

Kaymalı sürtünmeye maruz balata-disk çiftinin temas yüzeylerinde, yüksek hız ve sürtünme kuvvetleri yüzünden ortaya çıkan kayda değer termal yük, sıcaklığı yükseltir. Temas bölgesinde tipik ısı akışı koşulu geçerlidir ve sıcaklık dağılımı üç boyutludur [16].

Fren diskinde ısıya dönüşen enerji belli bir oranda kondüksiyon, önemli bir oranda radyasyon ve büyük oranda ise konveksiyon yoluyla çevreye iletilir. Isı iletimi (kondüksiyon), frenlemenin ilk saniyelerinde en önemli rolü oynar. Fren diski sıcaklığı, frenleme ısı akışı ve termal kapasitenin bir sonucu olarak homojen yarı kararlı bir



sıcaklık seviyesine ulaştıktan sonra konveksiyon ve radyasyon önemlidir. Disk, frenleme enerjisini ne kadar hızlı emer ve yayarsa, daha küçük sıcaklık gradyanları vardır, bu nedenle termal şok riski o kadar azdır. Fren disklerinden üç ısı dağıtma modundan, taşıt hareket ederken veya dururken de frenin çevre ortamdaki havaya maruz kalması nedeniyle konveksiyonel ısı dağıtımı büyük önem kazanmaktadır. Standart fren disklerinde konveksiyonel soğutma performansı, fren diskinin geometrisi değiştirilerek optimize edilebilir [11].

Katı dolu bir fren diski geometrisi ısıyı yalnızca çevre ortama yayabilir ve aktarabilir ancak soğutma kanallarına sahip havalandırmalı fren disklerinde kanal yüzeyinden konveksiyonla ısı kaybedilir. Doğrusal olmayan davranışı nedeniyle disk yüzey sıcaklığı yüksek seviyelere ulaştığında radyasyonla ısı dağılımı önemli hale gelir [11]. Radyasyon, hızdan bağımsız olan ısı yayma modudur. Tekerleğe yerleştirilen fren disklerinde diskin arka yüzü, nispeten yakın olan tekerleğe ısı yayar; [8]. aksa yerleştirilenlerde ise soğutma kanallarının bulunduğu iç boşlukta yayılır. Bu alanlardaki ışınım ile ısı transferi, yansıma nedeniyle sınırlıdır. Bununla birlikte, ön (sürtünme) disk yüzü için radyasyonla ısı dağılımı son derece önemlidir [8].

Soğutma hızı parametresi, disk tasarım parametrelerinden elde edilir; ısı transfer katsayısı ve konveksiyon alanı ile doğru; özgül ısı, ve disk kütlesi ile ters orantılıdır. Isı transfer katsayısı disk boyutları ve kanatçıklar arasında akan hava hızından kestirilebilir. Yukarıda bahsedilen soğutma hızı parametresi, konveksiyonun yanı sıra konveksiyon yoluyla ısı dağılımını da içerdiğinden konveksiyonla ısı transferinin net parametresi için iletimle ısı transferinin çıkarılması gerekir [15]. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinden elde edilen verilere göre konveksiyonel ısı transfer katsayısı değerleri disk yüzeyi boyunca büyük değişiklikler göstermektedir. Konveksiyonel ısı dağıtım katsayısı diskin birçok bölgesinde 30 ila  $60 \frac{W}{m^2K}$  aralığında yer alır ve ortalama değer  $44,9 \frac{W}{m^2K}$  olarak hesaplanmıştır. Kanatçık yüzeylerinde değişkenlik artar ve katsayı yükselir [8].

### 3.2 Fren Diskinde Sıcaklık Gradyanları ve Sıcak Bölgelerde Oluşan Sorunlar

Fren diskindeki sıcaklık genellikle servis hızına göre saptanır. Servis hızının artırılmasıyla maksimum sıcaklık artar. Frenleme süresince maksimum sıcaklık, güvenlik ve servis performansı açısından çok önemlidir. Frenleme sırasında maksimum sıcaklıktaki değişim üç fazda açıklanabilir; ani artış, denge fazı ve yavaşça düşüş. Termal şoklar ve termo-mekanik gerilmeler disk için iki temel servis yüküdür ve her ikisi de sıcaklıkla ve özellikle de maksimum sıcaklıkla ilişkilidir. Sıcaklık değişimleri ısı döngü gerilmelerine sebebiyet verir [9].



Demiryolu taşıtı fren diskinde başlıca beş tip sıcaklık gradyanı tanımlanabilir, Tablo 1’de sıcaklık gradyanlarına ait bilgi verilmiştir.

**Tablo 1.** Deneysel Termograflara Göre Demiryolu Taşıtları Fren Diski Sıcaklık Gradyanları Sınıflandırması [17].

Sıcaklık gradyanı türü	Boyut (mm)	Isı seviyesi (°C)	Zaman
Şiddetli	<1	1200	<1 ms
Sıcak noktalarda gradyan	Uzunluk: 5 - 20	650 - 1000	0,5 - 10s
Sıcak noktalar	Genişlik: 5 - 50	800’e kadar	>10s, radyal değişimler var
Makroskobik sıcak noktalar	40 - 110	1100’e kadar	>10s, sabitleştirilmiş
Bölgesel	80 - 200	20 - 300	>10s

Fren diski sürtünme yüzeyinde temas basıncı düzensiz şekilde dağılır ve sıcak nokta olarak adlandırılan çok yüksek sıcaklıkta dar alanlar oluşur [17]. Bu yerel bölgelerde aşırı yüksek uç sıcaklıklar gözlenir; sıcaklıklar östenit çelik sıcaklığını da aşan şekilde 900 °C’ye varır. Frenleme sırasında aşırı ısınmış bölgelerde yüksek sıcaklık dalgalanmaları (ısınma-soğutma), çeliğin mikro yapısında dönüşüm(ler)e neden olur [18].

Frenleme süresince sıcak alanlar radyal doğrultuda hareket eder [17]. Yerinde ölçümle diskin sıcaklık değişiminde sıcak bir halkanın oluştuğu ve tüm sürtünme yüzeyine yayıldığı gösterilmiştir. Disk yüzeyinde sıcak noktalardan oluşan halka, sıcak noktalar ve soğuk bölge sıcak noktaları ve soğuk bölgelerden oluşur [9].

Sürtünme yüzeyindeki yüksek sıcaklık gradyanları olan sıcak bölgeler, sürtünme elemanlarında hasara ve erken arızaya yol açan en tehlikeli fenomenler arasında sayılırlar. Bu sıcak noktalardan kaynaklanan termo-mekanik talebin plastik gerinim varyasyonları, çekme ve sıkıştırma gerilmeleri döngüsüne neden olabilir. Dolayısıyla termal düşük çevrim yorulması meydana gelebilir ve bunun disk yüzeyindeki çatlakların gelişmesi ile ilişki içerisinde olduğu gösterilmiştir. Bu yüksek lokal sıcaklıklar, frenin zayıflaması veya ısıl titreme adı verilen istenilmeyen düşük frekanslı titreşimler gibi kabul edilemez fren performanslarına da yol açabilir [19] ve servis ömrünü olumsuz etkiler. Müsaade edilen maksimum sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda çalışan sürtünme çifti, termal deformasyonlara, sürtünme katsayısında dalgalanmalara, fren kayıpları oluşmasına neden olabilmektedir [20]. Isıl hasarlar yüzey pürüzlülüğünü artırır ve diskin sürtünme özelliğini bozar [9]. Demiryolu taşıtlarının dayanıklılığı, güvenilirliği ve her şeyden önce emniyeti ile ilgili gereklilikleri hesaba katmak, çalışırken fren diskinin maruz kalacağı termal yükü azaltmak çok önemli bir husustur [21].



### 3.3 Fren Diskinde Termal Çatlaklar

Demiryolu fren disklerinin sürtünme yüzeyindeki termik (ısıl) çatlaklar disklerin ömürleri süresince gelişebilir. Tekrarlı frenleme çevrimleri boyunca, sürtünme yüzeyinde çevrim sıcaklığı ve mekanik yükler söz konusudur. Sert frenleme koşullarında, diskin sürtünme yüzeylerinde yüksek sıcaklıklarda plastik şekil değişimi meydana gelir ve bahsedilen bu gerinim malzemede geri dönülemez hasara yol açabilir. Çevrimsel ısıl plastik gerinim ve artık gerilmeler, termal çatlakların başlama ve büyüme sebebi olan etken faktörler olarak göz önünde bulundurulur [18]. Termik çatlaklar ciddi hasarlara neden olabilir; fren performansının bozulması, fren balata ve disklerinin sık sık değiştirilmesi gerekliliği nedeniyle bakım maliyetlerinin artması gibi. Fren diski malzemesinin çatlak başlatma ve yayılma karakteristikleri fren disklerinin ömrünü önemli ölçüde etkiler [22]. Fren diski 6 ay kullanıldıktan sonra sürtünme yüzeyinde termik yorulma çatlakları meydana gelebilmektedir. Fren diskinin tipik kullanım ömrü 5-6 yıl iken; genellikle 2-3 yıllık aralıklarla değiştirilmektedir [23].

Sürtünme yüzeyindeki hasar gelişimi frenleme çevrim sayısının bir fonksiyonudur. İlk bin frenleme çevriminde, fren diskinin sürtünme yüzeyinde sadece yüzeysel izler gözlenir. 103–104 frenleme döngüsünden sonra fren diski sürtünme yüzeylerinde termik çatlaklar ortaya çıkar. Termal çatlaklar, termal yorulma sonucu ortaya çıkan tipik çatlaklardır. Yerel stres konsantrasyonu nedeniyle sürtünme yüzeyinin pürüzlülüğündeki artış, termal stres ve yerel sürtünme gerilimi radyal derin çatlakların yayılması ve birleşmesi için termal çatlakları tahrik eder. 104 frenleme döngüsünden sonra radyal derin çatlaklar görülmeye başlar, artan döngü sayısı ile derin çatlaklar büyür ve gelişir. Termal(ısıl) çatlakların derinlik aralığı, 0,1 – 0,45 mm dolaylarındadır buna karşın radyal derin çatlakların derinliği ise 0,5 – 2 mm arasında değişebilmektedir [24]. Şekil 4’de sıcak noktalar, termik (ısıl) çatlaklar ve derin radyal çatlaklar gibi fren diski sürtünme yüzeyinde meydana gelen ısıl hasarların gözle net şekilde görülebildiği bir fotoğraf verilmiştir.



Şekil 4. Fren Diski Sürtünme Yüzeyindeki Isıl Hasarlar [24]

Disk yüzeyinden iç kısmına doğru giden yolda sıcaklıkların ve yüzey gerilmelerinin düşürülmesi diskte oluşacak aşınma ve çatlakların önlenmesi ve mevcut çatlakların ilerlemesinin yavaşlamasına olanak tanıdığından, frenleme basıncı ve disk malzemesi seçimi fren disk tasarımında oldukça önemlidir [20]. Fren disklerinde çatlak oluşumuna engel olmak için; yüksek akma ve yorulma dayanımına sahip malzeme seçilmeli, frenlemede oluşan sıcaklığın düşürülmesi için gerekenler yapılmalı ve/veya fren diski tasarımında gerilmeleri azaltacak değişikliklere gidilmelidir.

#### 4. FREN DİSKİNDE KULLANILAN/BİLECEK MALZEMELER VE METALURJİSİ

Demiryolu fren sisteminin tasarım sürecinde, sürtünme çiftinin maruz kalacağı termal yük kilit konudur. Çalışma sıcaklığına bağlı olarak, sürtünme elemanlarının imalatında farklı malzemeler kullanılabilir [21]. Öte yandan malzemenin aşınma davranışı, disk malzemesinin seçiminde ve tasarımında çok önemlidir [25].

Fren sürtünme elemanlarında kullanılan malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları temel olarak aşağıda belirtilen faktörlerden etkilenmektedir.

- **Malzeme karakteristiği:** Malzemenin fiziksel, kimyasal, mekanik özellikler vd.
- **Frenleme koşulları:** Frenleme basıncı, ilk frenleme hızı, frenleme zamanı, frenlemede sıcaklık artışı vd.
- **Çevre şartları:** Çevre sıcaklığı, nem oranı, hava akışı vd.
- **Yüzey koşulları:** Yüzey pürüzlülüğü, temas özellikleri vd.
- **Yapısal parametreler:** Biçim, boyut, fren çiftinin temas şekli vd. [26].

Fren disklerinin üretiminde düşük maliyeti, imalat kolaylığı, termal yüklere karşı direnci ve dayanımı göz önünde bulundurularak yaygın ve geleneksel olarak dökme demir kullanılır. Yüksek hızlı demiryolu taşıtları fren disklerinde kullanılan dökme demirler ise Ni, Cr ve Mo'li özel kimyasal kompozisyonlara sahiptir [27].

Dökme demirin mikroyapısı, ferrit/perlit matris içerisinde dağılmış grafit parçacıklarından oluşur. Dökme demirler grafitlerin şekli, dağılımı, büyüklüğü ve yoğunluğu gibi özellikleri ile karakterize edilir, adlandırılırlar. Grafit parçacıklar mekanik özelliklere büyük oranda etki eder [28].

Demiryolu taşıtı fren diski imalinde kullanılan türleri şu şekilde sıralayabiliriz; lamelli, vermiküler, küresel grafitli dökme demirler, yüksek alaşımlı dökme demirler ve ayrıca dökme çelik kullanılmaktadır. Dökme çelik yüksek dayanıma ve iyi derecede tokluğa sahiptir [5].

Raylı araçlarda kullanılan fren diskleri yaygın ve geleneksel olarak lamel grafitli dök-



me demirden üretilmektedir. Bunun nedenleri; a) yüksek ısı iletkenlik, b) yüksek ısı ı dağılma gücü, c) ısı ı yüklerle direnç, d) düşük maliyet ve e) üretiminin basitliğine dayanmaktadır [29]. Buna karşın lamel grafitli (gri) dökme demirin istenmeyen önemli bir özelliği, oluşmuş bir çatlaktan çok sayıda yeni çatlak oluşumuna neden olarak nihayetinde kırılmaya sebep olan grafit pullara sahip olmasıdır. Gri dökme demir kayda değer miktarda silisyum içerir, karbon oranları %4'ün altındadır. Çoğu dökme demirin bileşimi, demir-karbon sisteminin ötektik noktası civarında olduğundan, ergime sıcaklıkları da buna paralel şekilde, genellikle 1.150 ila 1.200 °C arasında değişmektedir [30].

Vermiküler grafitli dökme demir; termal ve elektriksel iletkenlik, basma dayanımı küresel grafitliden yüksek, buna karşın süneklik, çekme ve akma dayanımı küresel grafitliden düşüktür. Yapısında düşük oranda mevcut olan küresel grafitlerin miktarına bağlı olarak mekanik özellikleri farklılaştırılabilir. Lamelli dökme demir ile kıyaslandığında ise; termal ve elektriksel iletkenlik, basma dayanımı düşük, buna karşın süneklik, çekme ve akma dayanımı yüksektir. Dolayısıyla özellikle orta derecede mekanik ve fiziksel özellikler talep edildiğinde başvurulabilir [31].

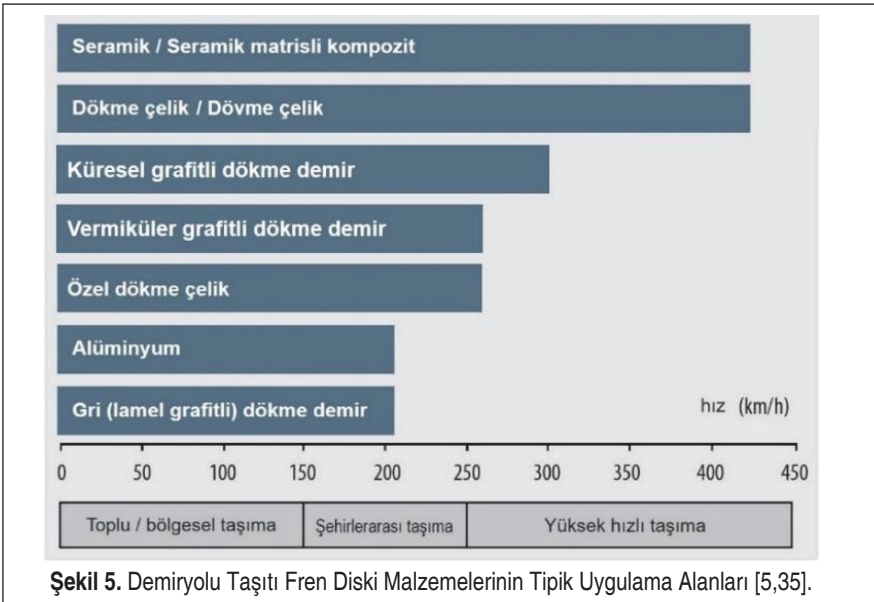
Akma dayanımı dolaylarında yaşanan termo-elastik/plastik gerilimleri karşılamak için gereken tokluk davranışının üstün olması nedeniyle daha iyi termal iletkenliğe sahip lamelli veya vermiküler grafitli diğer dökme demir malzemeler yerine küresel grafitli dökme demir tercih edilebilir [32].

Fren diski malzemesi olarak kullanılacak çeliklerin kırılma tokluğunu artırmak için bileşene vanadyum, molibden, nikel ve çözelti alüminyum eklenebilir; karbon ve krom oranları değiştirilerek aşınma dirençleri istenen düzeye getirilebilir [27]. Krom ve molibden çökelti ve katı çözelti güçlendirme etkisine sahiptir. Krom, çeliğin oksidasyon direncini artırır ve ayrıca krom oranındaki artışla oksidasyon sonucu disk yüzeylerinde gözlenen Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeO, FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> katmanlarının kalınlığı azalır. Vanadyum ince tane ve çökelti güçlendirme etkisine sahiptir, böylece dayanım ve tokluk artar. Ayrıca vanadyum, fren diski çeliğinin termal şok direncini ve aşınma direncini artırabilir [33]. Yapılan çalışmalar neticesinde; sürtünme yüzeyine yakın bölgelerdeki sertliğin yüksek sertleşirli çeliğinki kadar yüksek olduğ u ve her ilave %0,1 vanadyum ile ısı şoku direncinin iyileştirildiği açıklanmıştır. Ayrıca V ilavesinin yüksek tokluk ve sertliğ e sahip olan alt beynite dönüşüme yol açtığı tespit edilmiştir [34].

Çeşitli kompozisyonlara sahip pek çok çelik türü numunesi ile ASTM E399'a uygun olarak gerçekteştirilen kırılma tokluğu deneyleri sonucunda AISI 4330 malzemesinin kırılma tokluğu açısından uygun olduğ u tespit edilmiştir. Aynı zamanda termal çatlak direnci de daha iyidir [27].

Yüksek hızlı trenlerde kullanılmak üzere geliştirilen bir fren diski, dövme yöntemiyle imal edilmiştir ve çeliğinin kompozisyonu şu şekildedir; karbon %0,15 - 0,18, silis-

yum maks %0,20, mangan %0,80 - 1,10, fosfor maks. %0,015, kükürt maks. %0,015, krom %1,25 - 1,50, molibden %0,80 - 1,10, vanadyum %0,20 - 0,30 [7]. Fransa demiryollarında işletilmekte olan yüksek hızlı trenlerde aksa yerleştirilmiş fren diskleri 28CrMoV5-0.8 çeliğinden dövme yöntemiyle imal edilir ve temperli martenzitik mikroyapıyı elde edebilmek için ısıtılma tabii tutulur [17]. Çin demiryolları hızlı trenlerinde kullanılan fren diskleri 30CrNiMn çeliğinden ve kapalı kalıpta dövme yöntemiyle imal edilir [9]. Bir diğer çalışmada, su verilmiş ve temperlenmiş 15CDV6 çeliğinden dökme yöntemiyle imal edilen fren diskleri çalışılmıştır [13]. Şekil 5’de demiryolu taşıtı fren diski malzemesi olarak kullanıla/n/bilecek malzemelerin hangi maksimum hıza ulaşan trenlerde kullanılabileceği ve hangi misyona sahip trenlerde kullanımlarının daha uygun olabileceği ile ilgili grafik verilmiştir.



Şekil 5. Demiryolu Taşıtı Fren Diski Malzemelerinin Tipik Uygulama Alanları [5,35].

Fren sistemin ağırlığının azaltılması, son yıllarda hafif alaşımlardan ve metal matrisli kompozitlerden (MMK) yapılan fren disklerinin geliştirilmesine yol açan ana konudur [36]. Parçacık takviyeli alüminyumdan (alüminyum matrisli kompozit) mamül sürtünme plakalı fren diskleri, geleneksel dökme demir disklerle kıyasla %50’ye varan ağırlık azaltma sağlar - yaklaşık 60 kg ağırlıkta diskler üretilmiştir [36].- ve daha az disk ve balata aşınması sunar [35].

Ortak sürekli metal seramik kompozitler olarak da adlandırılan, SiC seramik ağıyla güçlendirilmiş alüminyum matris kompozitleri olan SiC3D/Al kompozitler, yüksek spesifik sertlik, yüksek plastik akış mukavemeti, sünme direnci, iyi oksidasyon ve korozyon direnci dahil olmak üzere arzu edilen mekanik özellikleri sağlayabilir. Dök-



me demir ve çeliklerin yoğunluğunun yarısı yoğunluğa ve daha iyi termal iletkenliğe sahiptirler fakat yüksek sıcaklıklarda mukavemetleri daha düşüktür. SiC3D/Al kompozitler kuru sürtünme ve aşınma uygulamalarında kullanılmıştır, özellikle iyi sürtünme ve aşınma performanslarıyla yüksek hızlı trenlerin fren sisteminde potansiyel uygulamalara sahiptirler [37].

Düşük ağırlıklarına ve üstün termal özelliklerine rağmen, düşük süneklik, çatlak büyüme davranışındaki artış ve nispeten yüksek fiyat, araştırmacıların dikkatini seramik matrisli kompozitlere (SMK) kaydırmıştır [36]. Organik kompozit sürtünme malzemelerinin genel olarak düşük ısıl iletkenlikle karakterize edildiği dikkate alındığında, kullanım oranındaki artışın fren diskinin ömrünü olumlu yönde etkilemesi gerekmektedir [21]. Toz metalürjisi ile geliştirilen yüksek performanslı kompozit malzeme olan C/SiC, düşük yoğunluk, iyi yüksek sıcaklık direnci, yüksek mukavemet, oldukça iyi sürtünme özellikleri, düşük aşınma oranı ve uzun ömür gibi bir dizi önemli avantaja sahiptir. Yüksek frenleme performanslarıyla C/SiC malzemeden yapılmış olan fren diskleri, yüksek hızlı trenler ve diğer birtakım uygulamalarda kullanıma potansiyeline sahiptir [25].

Bu yeni malzeme sınıfının üretimi için şerit döküm, kimyasal buharla infiltrasyon, katı ve sıvı infiltrasyon ve ardından sıcak presleme veya sıcak izostatik presleme dahil olmak üzere çeşitli işlemler kullanılabilir. Kompleks biçimli C/SiC kompozitleri halihazırda erimiş silikon kullanılarak C preformlarının infiltrasyonu ile üretilmektedir; ardından reaktif sinterleme prosesiyle yoğun C/SiC malzemeye dönüştürmektedir. Bir diğer yöntem, silazanlar veya karbosilazanlar gibi organometalik polimerik SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> öncüllerine dayanmaktadır [36].

## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Demiryolu taşıtları çeşitli frenleme sistemlerine sahip olabilmekle birlikte yaygın olarak mekanik frenleme kullanılmaktadır. Türkiye’de ve dünyada yüksek hızlı tren hatları yaygınlaşmaktadır, yapım aşamasında olan hatlar mevcuttur. Yüksek hız ve kütleyle sahip olan demiryolu taşıtının emniyetli frenlenmesi kritik konulardan biridir. Demiryolu taşıtı fren diski, bu sistemin en önemli parçalarındandır. Bundan dolayı, yüksek hızlı demiryolu taşıtlarında eski tip pabuçlu frenlerin kullanılması olası değildir. Fren diski boyutları, yapısı ve kütlesi konuları çalışılmış ve çeşitli optimum çözümler geliştirilmiştir. Frenleme sırasında açığa çıkan çok yüksek enerjiyi emmesi, ısıya dönüştürmesi ve ısıyı dağıtması görevleri kendisinden beklenen fren diskleri için soğutma oldukça önemlidir. Her durumda frenleme sırasında disk sürtünme yüzeyinde çok yüksek sıcaklıklara ulaşan dar alanlar oluşur ve yüksek ısı, kabul edilemez fren performanslarına yol açar, termal deformasyonlar, sürtünme katsayısında dalgalanmalar ve fren kayıpları oluşur. Isıl hasarlar yüzey pürüzlülüğünü artırır ve diskin sürtünme özelliğini bozar ve demiryolu taşıtlarının güvenilirliği/emniyeti açısından

tehdit oluşturur. Bunun sonucunda, termal çatlaklar ve radyal derin çatlaklar gibi çeşitli hasarlar ile aşınma meydana gelir ve beklenen zamandan çok daha önce fren disklerinin değiştirilmesi gerekebilir. Çeşitli şekillerde ve boyutlarda tasarlanabilen soğutma kanatçıkları arasından akan hava, diskte konveksiyonla etkili soğutma sağlar. Diskin yapısal özelliklerinde yapılacak değişiklikler ile sürtünme yüzeyinde aşırı yüksek sıcaklıklardan dolayı oluşacak çatlakların, hasarın ve aşınmanın önüne geçilebilir.

Fren diskinin aşınma davranışı saydığımız parametrelerin yanında sıkı şekilde malzemeyle ilgilidir. Yaygın ve geleneksel olarak dökme demir kullanılır. Gri dökme demir yerine küresel grafitli dökme demirlerin tercih edilmesiyle tokluk artar, fren diskinin daha yüksek hızlarda çalışma olanağı sağlanmış olur; vermiküler ise bu ikisinin arasındadır. Yüksek hızlı demiryolu taşıtları fren disklerinde kullanılan dökme demirler ise Ni, Cr ve Mo'li özel kimyasal kompozisyonlara sahiptir. Son yıllardaki çalışmalarda ağırlığı azaltmak ve diğer istenilen özellikleri elde etmek için çeşitli kompozit malzemelerin (özellikle alüminyum ve seramik matrisli) demiryolu taşıtı fren diski olarak kullanımı önerilmiştir. Buna karşın dövme çelikler, saatte 400 km/h'i aşan yüksek hızlarda kullanıma uygundur, istenilen aşınma direncini ve kararlı mikro yapıyı sağlamaları bakımından yeterli seviyededir. Fren diski malzemesi olarak kullanılacak çeliklerin kırılma tokluğunu artırmak için bileşene vanadyum, molibden, nikel ve çözültü alüminyum eklenebilir; karbon ve krom oranları değiştirilerek aşınma dirençleri istenen düzeye getirilebilir. Vanadyum dayanımı ve tokluğu, termal şok direncini ve aşınma direncini artırır. Özellikle soğutma kanatçıklarının tasarımında olmak üzere, gerçekleştirilecek yapısal değişikliklerle soğutma performansı artırılmış ve bahsedilen alaşım elementlerini uygun oranda içeren dövme yöntemiyle üretilen çelik fren diski, fren diskinden beklenen özellikleri sağlayabilecek, ısıl hasarlar ve aşınma nedeniyle oluşabilecek sorunlar minimuma indirilerek servis ömrünü sorunsuz tamamlayabilecektir.

## KAYNAKÇA

1. **Sharma, R.,C., Dhingra, M. ve Pathak, R., K.** (2015). Braking Systems in Railway Vehicles. (IJERT) International Journal of Engineering Research & Technology, Vol.4, Issue.01, 206-211.
2. **Hasegawa, I. ve Uchida, S.** (1999). Braking systems. Japan Railway & Transport Review 20, 52-59.
3. **Grive, U. ve Muhić, S.** (2018). Numerical optimization of brake discs for railway vehicles. Journal of Energy Technology, JET., Vol.11, Issue.3, Type.1.01, 11-25.
4. Research Designs and Standarts Organization. (2017). Specification for Standardized Brake Disc for LHB Coaches (RDSO/2017/CG-02). Manak Nagar Luckdown, RDSO.
5. **Li, J., Li, H., Jiao, B., Lv, B., Chen, D. ve Gu, L.** (2013). Development of cast steel for brake discs of high-speed train. Applied Mechanics and Materials, Vol.419, 370-375.



6. Brake Discs, Kovis Group, (2021, 12 Mayıs). Erişim adresi <https://www.kovis-group.com/kovis/en/products/brake-discs/>.
7. **Tirovic, M.** (1998). Development of a wheel mounted disc brake for a high-speed train. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.212, 113-121.
8. **Tirovic, M. ve Galindo-Lopez, C.H.** (2008). Convective heat dissipation from a wheel-hub mounted railway brake disc. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.222, 355-365.
9. **Wang, Z., Han, J., Liu, X., Li, Z., Yang, Z. ve Chen, E.** (2019). Temperature evolution of the train brake disc during high-speed braking. Advances in Mechanical Engineering, Vol.11(1), 1-10.
10. **Desplanques, Y., Roussette, O., Degallaix, G., Copin, R. ve Berthier, Y.** (2007). Analysis of tribological behaviour of pad-disc contact in railway braking Part 1. Laboratory test development, compromises between actual and simulated tribological triplets. Wear, Vol.262, 582-591.
11. **Galindo-Lopez, C. H.** (2009). Optimisation of convective heat dissipation from ventilated brake discs. Doktora Tezi, Cranfield Üniversitesi, Birleşik Krallık.
12. **Tirovic, M. ve Galindo-Lopez, C.H.** (2012). Maximising heat dissipation from ventilated wheel-hub-mounted railway brake discs. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.227(3), 269-285.
13. **Tirovic, M.** (2009). Energy thrift and improved performance achieved through novel railway brake discs. Applied Energy, Vol.86, 317-324.
14. **Nejat, A., Aslani, M., Mirzakhali, E. ve Najian Asl, R.** (2011). Heat transfer enhancement in ventilated brake disk using double airfoil vanes. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, Vol.3(4), 045001.
15. **Sakamoto, H.** (2015). Heat convection and design of brake discs. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.218, 203-212.
16. **Adamowicz, A. ve Grzes, P.** (2011). Analysis of disc brake temperature distribution during single braking under non-axisymmetric load. Applied Thermal Engineering, Vol.31 (6-7), 1003-1012.
17. **Dufrénoy, P. ve Weichert, D.** (2003). A thermomechanical model for the analysis of disc brake fracture mechanisms. Journal of Thermal Stresses, Vol.26(8), 815-828.
18. **Li, Z., Han, J., Yang, Z. ve Li, W.** (2015). Analyzing the mechanisms of thermal fatigue and phase change of steel used in brake discs. Engineering Failure Analysis, Vol.57, 202-218.
19. **Panier, S., Dufrénoy, P. ve Weichert, D.** (2004). An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes. Wear, Vol.256, 764-773.
20. **Balci, M. N.** (2020). Fren disk-balata mekanizmasının üç boyutlu gerilme analizi. Konya Journal of Engineering Sciences, Vol.9, No.1, 62-84.



21. **Yevtushenko, A., Kuciej, M. ve Wasilewski, P.** (2019). Experimental study on the temperature evolution in the railway brake disc. *Theoretical & Applied Mechanics Letters*, Vol.9, 308-311.
22. **Goo, B. ve Lim, C.** (2012). Thermal fatigue of cast iron brake disc materials. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.26(6), 1719-1725.
23. **Kim, D.J., Seok, C.S., Koo, J.M., We, W.T., Goo, B.C., ve Won, J.I.** (2010). Fatigue life assessment for brake disc of railway vehicle. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol.33, 37-42.
24. **Wang, Z., Han, J., Domblesky, J. P., Li, Z., Fan, X. ve Liu, X.** (2019). Crack propagation and microstructural transformation on the friction surface of a high-speed railway brake disc. *Wear*, Vol.428-429, 45-54.
25. **Fan, S., Zhang, L., Cheng, L., Zhang, J., Yang, S. ve Lui, H.** (2011). Wear mechanisms of the C/SiC brake materials. *Tribology International*, Vol.44, 25-28.
26. **Xiao, X., Yin, Y., Bao, J., Lijian, L. ve Feng, X.** (2016). Review on the friction and wear of brake materials. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol.8(5), 1-10.
27. **Sakamoto, H. ve Hirakawa K.** (2005). Fracture analysis and material improvment of brake discs. *JSME(The Japan Society of Mechanical Engineering) International Journal, Series:A Vol.48 No.4*, 458-464.
28. **Gigan, G., Norman, V., Ahlström, J. ve Vernersson, T.** (2019). Thermomechanical fatigue of grey cast iron brake discs for heavy vehicles. *Proceedings of the Institution of mechanical engineers. Part D, Journal of Automobile Engineering*, Vol.233(2), 453-467.
29. **Er, O. ve Ünel, E.** (2013). Raylı araçların boji donanımında kullanılan dökme demir ürünler. 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'13), Karabük, Türkiye, 9-11 Ekim.
30. **Abebe, L., Nallamothe, R.B., Subrahmanyam, K.H.S., Nallamothe, S.K., Nallamothe A.K.** (2016). Thermal analysis of disc brake made of different materials. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, Vol.3(6), 5-9.
31. **Karatay, B. ve Hasırcı, H.** (2018). Üretim koşullarının vermiküler grafitli dökme demirin mikro ve makro yapısal özelliklerine etkileri. *Fen Bilimleri Dergisi GU J Sci, Part C:Tasarım ve Teknoloji*, Vol.6(4), 887-897.
32. **Šamec, B., Potrc, I. ve Šraml, M.** (2011). Low cycle fatigue of nodular cast iron used for railway brake discs. *Engineering Failure Analysis*, Vol.18, 1424-1434.
33. **Wu, D., Wang, F., Li, C., Zheng, Y. ve Shen, W.** (2018). Effect of temperature on oxidation behavior of Cr-Mo-V steel with different Cr contents for high-speed train brake discs. *9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*, Arizona, ABD, 11-15 Mart.
34. **Harada, N., Takuma, M., Tsujikawa, M. ve Higashi, K.** (2013). Effects of V addition



on improvement of heat shock resistance and wear resistance of Ni–Cr–Mo cast steel brake disc. *Wear*, Vol.302, Issues.1-2, 144-1452.

35. Brake discs and pads. (2014). Munich: Knorr-Bremse s. 2.
36. **Rak, Z. S.** (2013). CMC material for train brake systems. *Journal of Advances in Applied Ceramics*, 99(6), 270-273, <http://dx.doi.org/10.1179/096797800681072>.
37. **Nong, X.D., Jiang, Y.L., Fang, M., Yu, L. ve Liu, C.Y.** (2017). Numerical analysis of novel SiC3D/Al alloy co-continuous composites ventilated brake disc. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.108, 1374-1382.