



Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi (Research Article)

Makale Doi: 10.17100/nevbiltek.726474

Geliş Tarihi: 24-04-2020

Kabul Tarihi 30-06-2020



55TiO₂-Cr₂O₃ Kaplamanın Frenleme Performansına Etkisinin Araştırılması¹

İbrahim MUTLU¹, Bekir GÜNEY², Onur Can ÜNAL³, Ömer KARTAL⁴

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye, E-posta: ibrahimmutlu@aku.edu.tr

ORCID ID:0000-0001-5563-1000

² Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Türkiye, E-posta: guneyb@kmu.edu.tr

ORCID ID:0000-0001-9764-9313

³ YUKI Endüstriyel Makineler ve Motor San. A.Ş., Türkiye, E-posta: onurcanunal@hotmail.com

ORCID ID:0000-0003-4116-0134

⁴ OSP Demir Çelik A.Ş., Türkiye, E-posta: omerkartal@ospsteel.com

ORCID ID:0000-0002-1544-7695

Öz

Bu çalışmada, 55TiO₂-Cr₂O₃ (Metco111) seramik toz, atmosferik plazma püskürme (APS) kaplama tekniği ile dökme demir disk üzerine kaplanmıştır. Kaplamanın SAE J2430 frenleme test standardına göre sürtünme katsayısı davranışına etkisi incelenmiştir. 55TiO₂-Cr₂O₃ kaplanmış ve kaplanmamış diskin mekanik ve mikro yapısal karakterizasyonu araştırılmıştır. Sıcaklık ve hızın artmasıyla birlikte, sürtünme katsayısı (COF) ve aşınma oranı azalmıştır. Kaplanmış ve kaplanmamış yüzeyler taramalı elektron mikroskopuyla (SEM), ışık mikroskobu (LM) ile incelenip enerji dispersif spektrometresi (EDS) yardımıyla analiz edilmiştir. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve mikro sertlik testleri yapılmıştır. Krom ve Titanyum'ca zengin kaplamalarda yük ve sıcaklığın artmasıyla Cr, Ti yağlayıcı film olarak görev yaptığından kaplamanın sürtünme katsayısı ve aşınma oranı kaplamasız diskten düşük çıkmıştır. Kaplamalı diskin daha düşük aşınması, titanyum ve krom oksitlerin oluşturduğu yüzey filminin sert yapısına ve yağlayıcılık özelliğine bağlanmıştır. Mikro yapı analizlerinden kaplamanın metalürjik olarak problemsiz olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Crom Oksit, Titanyum Oksit, Plazma Püskürtme, Aşınma, Frenleme Performansı

Investigation of The Effect of 55TiO₂-Cr₂O₃ Coating on Braking Performance

Abstract

In this study, 55TiO₂-Cr₂O₃ (Metco111) ceramic powder was coated on cast iron disc by atmospheric plasma spraying (APS) coating method. The effect of coating on friction coefficient behavior according to SAE J2430 braking test standard was investigated. Mechanical and microstructural description of 55TiO₂-Cr₂O₃ coating and uncoated disc was performed. Friction coefficient (COF) and wear rate decreased with growing temperature and speed. The coated and uncoated surfaces were analyzed by scanning electron microscopy (SEM), light microscope (LM)), with energy dispersive spectrometry (EDS). Surface roughness and micro hardness tests of samples were performed. Since Cr and Ti act as lubricant film with increased load and temperature in chromium and titanium-rich coatings, the friction coefficient and wear rate of the coating were lower than the uncoated disc. The lesser wear of the coated disc is ascribed to the rigid structure and lubricity of the surface film formed by the titanium and chromium oxides. Microstructure analysis revealed that the coating was metallurgically problem-free.

Keywords: Chromium Oxide, Titanium Oxide, Plasma Spraying, Wear, Braking Performance

1. Giriş

Plazma püskürtme, metalik bileşenlerde koruyucu kaplamalar üretmek için çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın kullanılan teknolojidir. Bu kaplamalar ısı koruma, oksidasyon, korozyon ve aşınmaya karşı yüksek direnç sağlar. Bu

¹ Bu makale, 4. International Conference on Material Science and Technology in Kızılcahamam/ANKARA(IMSTEC 2019) sempozyumunda sözlü olarak sunulan bildirinin düzenlenmiş halidir.

Sorumlu yazar e-mail: guneyb@kmu.edu.tr

teknoloji aynı zamanda, refrakter alaşımlar, sermetler ve seramikler gibi yüksek ergime noktalarına sahip çok çeşitli yüksek performanslı malzemelerin püskürtülmesine de imkan sağlar [1-5]. Plazma püskürtme Cr_2O_3 kaplamaların sürtünme ve aşınma özellikleri diğer kaplamalardan daha üstündür [5 ve 6].

Krom oksit gibi seramik kaplamalar genellikle mükemmel mekanik ve kimyasal özellik sergilerler [7]. Bu nedenle, plazma püskürtme Cr_2O_3 kaplamalar, ağır hizmet şartlarında çalışan metalik bileşenlerin aşınma ve korozyon direncini geliştirmek için yaygın olarak kullanılır [8-10]. Krom oksit mükemmel sertliğe sahiptir ve diğer oksit seramiklerden daha iyi sürtünme, aşınma, oksidasyon ve korozyon direnci gösterir. Bu kaplamalar, makine, tekstil, otomotiv bileşenlerinde, mühendislik elemanlarının aşınma ömrünü artırmak için kullanılır [11-14]. Ayrıca, krom tozlarına eklenen titanya genellikle Cr_2O_3 kaplamaların biriktirme oranını ve bağlanma gücünü artırmak için kullanılır [15]. Titanya bu kaplamalar için önemli bir katkı maddesidir. Monolitik toz kaplamalara kıyasla daha az gözenekli kaplama üretmek için kullanılır [16]. TiO_2 ilavesi, plazma ile püskürtülmüş oksit bazlı seramik kaplamalarda, kırılma tokluğu [17 ve 18]. düşük gözeneklilik, daha iyi mikro sertlik, tokluk, sürtünme ve aşınma direnci sağlar [19-26].

Önceki çalışmalar, TiO_2 'nin Cr_2O_3 kaplamaya eklenmesinin, kaplamanın daha iyi bağ yapmasına, kırılma tokluğunun iyileştirilmesine ve aşınma direncinin artmasına yol açtığını göstermiştir [27]. Ahn ve Kwon [28], plazma püskürtme Cr_2O_3 - $3TiO_2$ - $5SiO_2$ kaplamanın, oda sıcaklığında ve $450\text{ }^{\circ}C$ 'de kuru kayma şartlarında sürtünme davranışını araştırmışlardır. Oksit filmlerinin yüzeye yapışması sebebiyle sürtünme ve aşınma davranışını etkilediğini yüksek sıcaklıkta sürtünme katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. Li ve arkadaşları [26], Cr_2O_3 - TiO_2 kaplamanın farklı TiO_2 içeriği ile sürtünme davranışını incelediler. Plazma püskürtme ile kaplamada saf Cr_2O_3 'e göre TiO_2 içeriğinin artmasıyla, kaplamanın tokluk ve aşınma direncinde iyileşme olduğunu bildirmişlerdir. Bagde ve arkadaşları [29], Cr, Ti oksit tabakalarının yağlayıcılık etkisiyle, Cr_2O_3 - $25TiO_2$ kaplamanın aşınma ve sürtünme davranışını etkiledi. Kırılma kaynaklı abrasiv parçaların etkisiyle mekanik aşınmanın oksidatif aşınmadan daha yüksek olması, yüksek yüklerde COF'da artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir. Bizim önceki çalışmalarımızda Cr_2O_3 - $40TiO_2$, Cr_2O_3 - $2TiO_2$, kaplamaların frenleme performansı araştırılmıştır. Kaplamanın aşınma oranını düşürerek frenleme performansını attırdığı tespit edilmiştir [30-34].

Sürüş esnasında, fren diski aracın en önemli güvenlik elemanlarından birisidir. Fren diskleri genellikle yüksek sönümleme kapasitesi, iyi ısı iletkenliği ve yüksek mukavemeti nedeniyle gri dökme demirden yapılır [35]. Bir araçtaki fren sisteminin performansını, gri demir disk ve balatadan oluşan sürtünme çiftinin tribolojik özellikleri belirler [36]. Sıcaklık, nem, hız, yük ve yol durumu gibi tüm çalışma şartlarında sürtünme katsayısı nispeten yüksek ve kararlı olmalıdır. Ayrıca, titreşimi soğurma, uzun ömür, yüksek konfor tercih edilen diğer özelliklerdir.

Fren diski yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı için yüzey kaliteleri artırılması gerekmektedir. Tribolojik sistemler nedeniyle ortaya çıkan problemlerin çözümünde en çok başvurulan yöntem yüzeylerin kaplanmasıdır [37 ve 38]. Bu çalışmanın amacı, $55TiO_2$ - Cr_2O_3 seramik tozunu, plazma püskürtme yöntemiyle dökme demir fren disk yüzeyine kaplamanın, yüzeylerin mikro yapı, aşınma, sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve frenleme performansına etkisini araştırmaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Disk ve Balatanın Özellikleri

Deneysel çalışmada **Tablo 1**'de fiziksel özellikleri verilen hava kanallı diskin spektral analiz sonuçları **Tablo 2**'de verilmiştir. Disk orjinal ve kaplama yapılarak frenleme testlerine tabi tutulmuştur (**Şekil 1**).

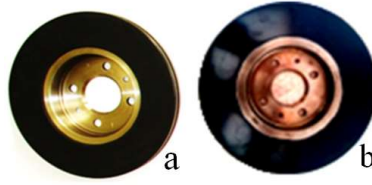
Tablo 1. Diskin özellikleri

Disk özellikleri	Özellik/değeri
Disk Yüzeyi	Standart
Disk Tipi	Hava Soğutmalı Fren Diski
Fren Diski Kalınlığı (mm)	24,0 mm
Minimum Kalınlık (mm)	21,8 mm
Merkez Çapı (mm)	61,0 mm

Delik Sayısı	4 Delik
Porya Çapı (mm)	100 mm
Yükseklik (mm)	44,0 mm
Bijon Ölçüsü (mm)	13,6 mm
İç Çap (mm)	140,0 mm
Disk Çapı (mm)	280,00 mm

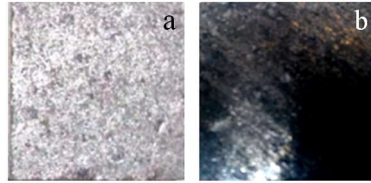
Tablo 2. Diskin kimyasal kompozisyonu

Element	% Miktarı	Element	% Miktarı
Mg	0,003	Mo	0,021
V	0,000	Cr	0,116
Ti	0,015	S	0,023
Nb	0,000	P	0,025
Cu	0,005	Mn	0,586
Al	0,000	Si	1,81
Ni	0,033	C	3,61
Fe	93,56		



Şekil 1. Fren diskleri (a: Orijinal disk, b: Kaplanmış disk)

Sürtünme malzemesi olarak, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan ticari balatalar piyasadan temin edilerek SAE J661'e göre 25,4 mm x 25,4 mm ölçülerinde kesilerek kullanılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Fren balatalarının görünüşü (a: Orijinal disk balatası, b: Kaplanmış disk balatası)

2.2. Kaplama Malzemesi Özellikleri

55TiO₂-Cr₂O₃ (Metco 111) harmanlanarak 245 ile 1840 µm tane boyutlarında imal edilmiş oksit seramiktir. Mükemmel aşınma, sıcaklık ve korozyon direnci sağlar. Yüksek kırılma tokluğu ve yüksek sıcaklık direnci özelliklerini 540 °C'ye kadar muhafaza eder [39]. Cr₂O₃ yüksek ergime sıcaklığı (~2300 °C) ve yüksek sıcaklık oksidasyon direncinden dolayı önemli bir refrakter malzemedir [40]. Az miktarda silika ve titanya ihtiva eden geleneksel Cr₂O₃ kaplamalar düşük sürtünme ve iyi aşınma direnci için aday malzemelerdir [41]. Bu kaplamalar korozyon direnci ve abrasif aşınma direnci istenilen yerlerde tercih edilir. Yüzey bağlanma mukavemeti yüksektir, yüzeye iyi yapışır ve 2300 HV₅₀₀ gibi yüksek sertlik değerine sahiptir [42]. Plazma püskürtme ile yapılan seramik kaplamalarda gözeneklilik, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğünün azalması ile korozyon direnci artmaktadır [43].

2.3. Plazma Püskürtme Kaplama Yönteminin Uygulanması

Disk yüzeyleri 35 grit'lik SiC aşındırıcı toz püskürtülerek hazır hale getirilmiştir. Yüzeyi pürüzlendirmek amacıyla kullanılan havanın ve kumlama malzemesinin kuru ve temiz olmasına dikkat edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün en iyi şekilde elde edilmesi amacıyla, yüzey pürüzlendirme işlemi 90°'lik bir açı altında, 9 bar basınçta ortalama Ra=8-9 µm

	Fren zayıflaması (15 tekrar)
	Sıcaklık performansı (2 tekrar)
	Soğutma (4 tekrar)
	Kararlılık Etkinliği (2 tekrar)
	Yeniden Alıştırma (35 tekrar)
	Final etkinliği (15 tekrar)
	Yüzey pürüzlülüğü
3-Deney sonrası ölçümler	Sertlik
	Ağırlık

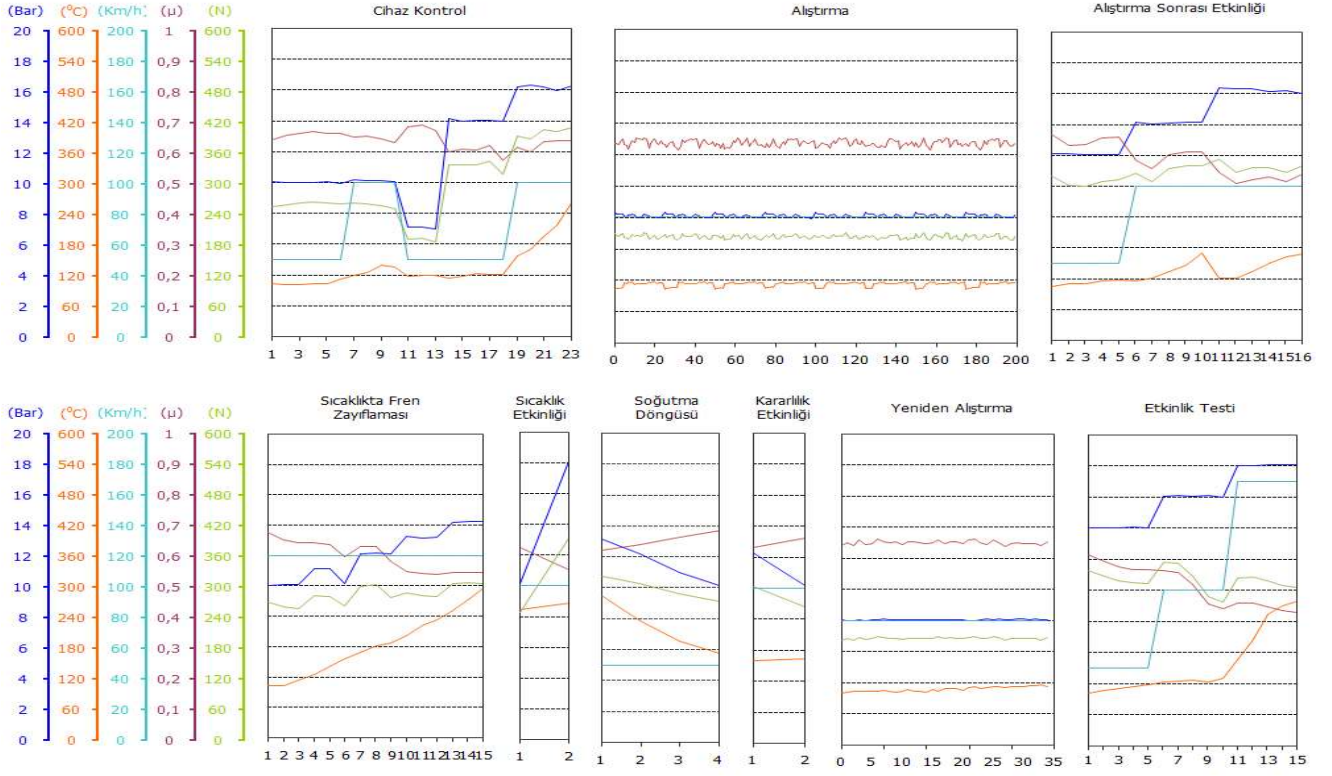
2.5 Deney Prosedürü

Fren test cihazı ile disk-balata ikilisinin frenleme performansını; alışma, hız, sıcaklık, sürtünme gibi faktörler belirlemektedir. Bu faktörlere bağlı olarak performans davranışını kapsamlı bir şekilde incelemek için SAE J2430 test standardı seçilmiştir [45-47]. SAE J2430 frenleme test standardı, 1999'da, USA'da alanında uzman 400 personel çalışarak hazırlanmıştır. Frenleme performansı, tek diskli, tam donanımlı dinamometre ile tayin edilmiştir. Cihazın dış ortamlardan yalıtılarak kontrol altına alınmıştır. Bu elektrik motoru ile çalışmaktadır. Deneysel çalışmaların sonuçları bilgisayar programı yardımı ile kayıt edilmektedir. Yapılan bilgisayar programı ile test prosedürü basamakları kontrollü olarak uygulanabilmektedir. Farklı özellikteki disk ve balatalar cihazla test edilebilmektedir [48].

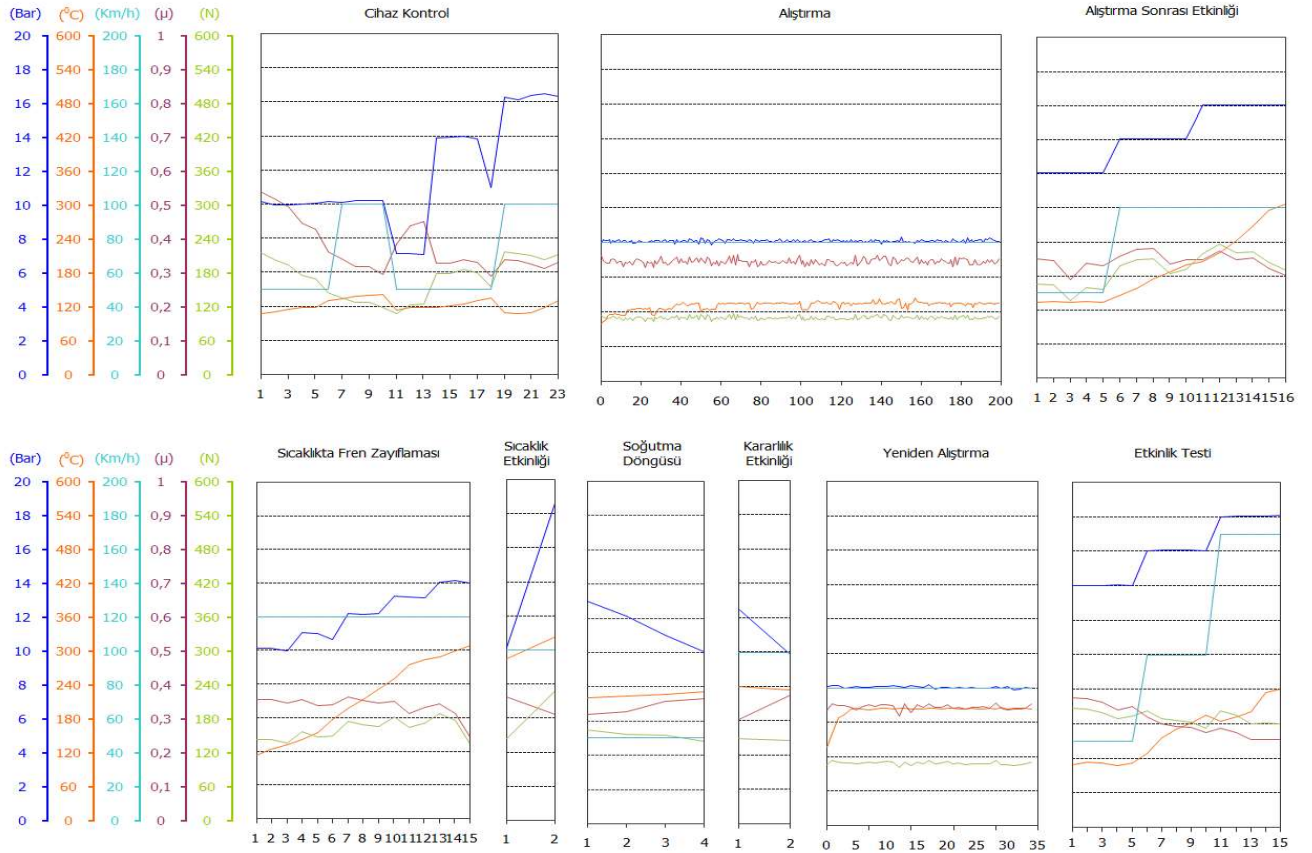
3. Deneysel Çalışmalar

3.1. Orijinal ve Kaplanmış Disklerin Frenleme Performansı Çalışması

Uygulanan kuvvet, basınç ve hızlara göre oluşan sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerine göre kaplanmış diskin genel karakteristiği sıcaklığın yükselmesi ve sürtünme katsayısının orijinal diske yakın seyretmesi olarak tespit edilmiştir. Tam detaylı test adımlarından elde edilen performans verilerine dayalı çizilen grafik **Şekil 4**'te gösterilmiştir. Fren disklerinin ömrü, frenleme sayısı, frenleme kuvveti, frenleme şartları gibi çok farklı değişkenlere bağlıdır. Ancak üreticiler tarafından sürekli kontrol edilmek şartıyla teorik olarak ortalama 80.000-100.000 km arasına veya kalınlık olarak %10 aşınma miktarına garanti edilmektedir. Frenleme siteminde disk ve balataların az aşınması hem uzun ömürlü olmalarını sağlar hem de aşınma kaynaklı emisyon değerlerinin düşürülmesine katkı sağlar. Bu sayede ekonomik kayıplar önlenmiş olur.



(a)



(b)

Şekil 4. a) Kaplanmamış fren diskinin karakteristik verileri , b) 55TiO₂-Cr₂O₃ kaplanmış fren diskinin karakteristik verileri

Test müddetince sıcaklık etkinliğinde temassız termometre ile ölçülen orijinal diske ait en yüksek sıcaklık 286 °C gerçekleşirken kaplanmış diskte 338 °C olarak gerçekleşmiştir. Kaplamalarda yükün artmasıyla sürtünme katsayısı düşmektedir [49-51]. Kayma hızı arttığı zaman aşınma miktarı da artmaktadır [52]. Performans kriterlerine göre 50-160 km/h arasında uygulanan hızın ve basıncın artmasıyla sürtünme katsayısı düşmüş, azalması ile artmıştır. Sıcaklıkta fren zayıflaması, sıcaklık etkinliği, soğutma etkinliği ve final etkinliği bölümlerinde sıcaklığın yükselmesi ile orijinal ve kaplanmış diskin her ikisinde de sürtünme katsayısında bir düşüş olduğu Şekil 4'te görülmektedir. Bu durum sürtünme yüzeylerinde oluşan tabakanın fiziksel ve kimyasal değişiminden kaynaklanmaktadır [53]. Balata malzemesinin bir fren diski ile beraber çalışması esnasında sürtünmenin etkisi ile ara yüzey sıcaklığı sürekli artış gösterir. Yükselen sıcaklığın etkisiyle disk-balata malzemesinin yapısı ve sergilediği tribolojik özellikler de değişmektedir. Sıcaklığın artmasıyla disk-balata ara yüzeyinde ince bir film tabakası meydana gelmektedir. Bu film yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısının düşmesinin başta gelen sebebidir. Soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı arasındaki fark ne kadar fazla ise balatanın sürtünme kararlılığı o kadar düşüktür. Güvenli bir sürüş için sürtünme katsayısının yüksek olmasının yanı sıra bu katsayının kararlı olması istenir [54].

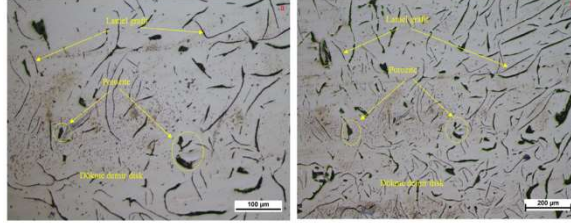
Orjinal diskin sıcaklık etkinliğinde ortalama sürtünme katsayısı 0,58 gerçekleşirken, kaplanmış diskte 0,33 olarak gerçekleşmiştir. Soğutma etkinliğinde orijinal disk 0,62 sürtünme katsayısı üretirken, kaplamalı disk 0,34 sürtünme katsayısı üretmiştir. Alıştırma sonrası etkinliğinde orijinal disk 0,53 sürtünme katsayısı üretirken, kaplamalı disk 0,36 sürtünme katsayısı üretmiştir. Final etkinliğinde orijinal disk 0,53 sürtünme katsayısı üretirken, kaplamalı disk 0,29 sürtünme katsayısı üretmiştir. Kullanılan balataların GG sınıfı balatalar olduğu düşünüldüğünde Krom oksit kaplamalar 0,8 gibi yüksek bir sürtünme katsayısı üretebilir [41]. Final etkinliği bölümünde bu faktörlere bağlı olarak sürtünme katsayısı 0,56 değerinden 0,35 seviyelerine kadar gerilemiştir.

Kayma hızının yükselmesi, aşınmış partikül miktarını artırmaktadır. Bu da sürtünme tabakasını oluşturan bileşikleri arttırmaktadır. Bu bileşikler disk-balata temasını azalttığı için [53] sürtünme katsayısı da hissedilir derecede düşmüştür. Sıcaklığın artmasıyla sürtünme katsayısındaki düşüşün nedeni aşınma miktarının artmasıdır. Şekil 4'teki grafikte görüldüğü gibi her iki diskte de sıcak sürtünme katsayısı, soğuk sürtünme katsayısından daha düşük gerçekleşmiştir. Frenleme sırasında sıcaklık yükselmesinden dolayı sürtünme katsayısındaki düşme, frenleme zayıflaması olarak tanımlanır [35]. Sıcaklık ve basınç değerleri farklı olsa bile yüzey pürüzlülük değerleri sürtünme katsayısına, dolayısıyla aşınma miktarına doğrudan etki etmiştir. Kaplanmış diskin yüzey pürüzlülüğünün orijinal diskten düşük olması gerçek temas alanı büyümesini beraberinde getirmesine rağmen kaplamalı diskin sürtünme katsayısı değeri orijinal diskten daha düşük çıkmıştır.

SAE J2430'e göre frenleme performansını değerlendirirken, ön alıştırma etkinliği, alıştırma etkinliği, birinci etkinlik, sıcaklıkta fren zayıflaması, sıcaklık, soğutma, kararlılık, yeniden alıştırma ve final etkinliği kriterleri göz önüne alınmaktadır. Bu çalışmada kaplanmış ve kaplanmamış disk numuneleri hız ve basıncın değiştirildiği farklı şartlarda standartlarda belirlenen sınırlar arasında kararlı sürtünme katsayısı sergilemiştir. Diskler soğuk etkinliğinde uygulanan maksimum pedal kuvveti ve sıcaklıkta fren zayıflamasına karşın belirlenen limitlerde durma yeteneği göstermiştir. Alıştırma sonrası ve final etkinlik testlerinde 50, 100 ve 160 km/h hızlarda 0,8 g yavaşlama ivmesinde BMC kriterlerine uygun hız ve basınç hassasiyeti ile doğrusal olarak azalan sürtünme katsayısı sergilemiştir.

3.2. Mikro Yapı Çalışması

Kaplanmış ve kaplanmamış disklerin mikro yapıları LM ve SEM incelenip EDS ile analizleri yapılmıştır. Kaplama işlemi ile aşınma dayanımı yüksek, dış tesirlere dayanıklı yüzey yapısı elde edilmiştir. Dökme demir fren diskin'e (dağlanmış ve parlatılmış) ait grafit lamellerini ve poroziteleri işaret eden x100 ve x200 büyütmeli LM ile elde edilen görüntüler **Şekil 5** (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Metalik lamelli grafit dökme demir numunesi ile oksit yapıları içeren gevrek, sert ve kırılğan kaplama malzemesi arasındaki uyumsuzluğu ortadan kaldırmak için Ni20Cr intermetalik ara bağlayıcı kullanılmıştır. Astar malzemesindeki Ni elementinin, sert ve sünek bir yapının oluşmasını sağladığı **Şekil 6**'da kaplama kesitinden elde edilen SEM mikrografından gözlemlenmektedir.

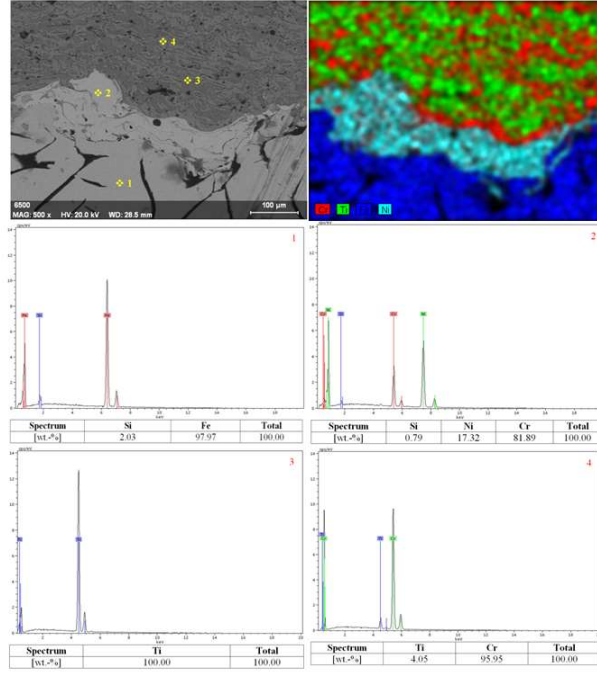


Şekil 5. Dökme demir altlık malzemesinin yüzeyinden alınan LM mikrografları, a) x100, b) x200.

55TiO₂-Cr₂O₃ seramik toz kullanılarak plazma püskürtme yöntemi ile kaplanan dökme demir disk altlık malzemesinin SEM görüntüleri aşağıdaki **Şekil 6**'da gösterilmiştir. Ni elementinin altlık dökme demir malzemesine kuvvetli difüzyon sağladığı EDS analizinden anlaşılmaktadır. Bu sayede dökme demir disk ve Ni20Cr intermetalik ara bağlayıcı arasında uyum sağlandığından mükemmel bir fiziksel bağ kurulduğu mikrografda görülmektedir. Böylece mekanik etkileşiminin istenilen seviyede olduğu kaplama tabakası ve dökme demir disk arasında iyi bir bağ mukavemeti oluştuğu anlaşılmaktadır.

Kaplama tabakası içerisinde oksitli bileşikler ve %1-2 miktarlarında porozitenin varlığı ImageJ görüntü analiz programı ile belirlenmiştir. Kaplama tozu içerisinde TiO₂ miktarının artırılması kaplama tabakasının tokluk ve sünekliğini artırmaktadır [29]. Plazma püskürtme sistemlerinde kaplama tozu üç süreçten geçer. Birincisi toz plazma jetine enjekte edilir, ikinci aşamada toz ile plazma alevi ara reaksiyona girerek ısıtılır ve ergitilir ve son aşamada ise alt tabakaya yüksek ısı ve yüksek hızda çarptırılarak hızla katılaşır. Katılaşma sırasında tozların ergiyik durumları da üçe ayrılabilir; tamamen ergiyen partiküller, kısmen ergiyen partiküller ve hiç ergimeyen partiküllerdir. Normal şartlar altında plazma alevinin oluşturduğu yüksek ısıdan dolayı ergimeyen toz miktarı azdır. Bunun sonucunda çoğu tozlar plazma püskürtme sırasında tamamen veya kısmen ergir. Bu kaplama malzemelerinin kısmen ergiyik ve tamamen ergiyik durumları kaplama tabakasında %1-2 civarında gözenek oluşturduğundan, kaplamanın kohezyon mukavemeti mükemmeldir [55 ve 56].

Şekil 6'daki mikrografta kaplamada, ergiyik haldeki metal damlacıkların alt malzemeye devamlı bir şekilde çarparak ıslatmasıyla oluşan lamelli mikro yapı görülmektedir [57 ve 58]. Bu yapı, ergiyik partiküllerin alt malzemeye çarpma sonucu, deformasyona uğradıktan sonra katılaşarak oluşmaktadır [59]. Alt malzemeye paralel olarak oluşan bu lamellerin, orta kısmı kalın, uç kısımları ise incelmektedir [60]. SEM fotoğrafından, ergimiş, ergimemiş ve kısmen ergimiş bölgeler görülmektedir. Substrat'tan kaplama üst yüzeyine doğru gözeneklilik azalmıştır. Plazma kaplamalar genellikle inklüzyon, oksit, ergimemiş, yarı ergimiş partiküller ve porozite içerirler [61] Gözenekler genel olarak tüm ısı püskürtme kaplamalarda meydana [62].



Şekil 6. Kaplanmış diskin kesitinin 1, 2, 3 ve 4 numaralı bölgelerinin EDS analizleri.

Yetersiz dolgu ve ıslatma kabiliyeti yetersiz, ergiyik partiküllerin, pürüzlü kaplama yüzeyine çarpası sırasında gözenekli yapı oluşturmaktadır [63]. Ayrıca altlık malzemenin püskürtme mesafesi, yüzey pürüzlülüğü, substratın sıcaklığı ve kaplama kalınlığına bağlı olarak da gözenek miktarı değişmektedir [64]. Kaplamalarda gözenek miktarı, kullanılan tel, kaplama yöntemi ve toz malzeme cinsine bağlı %20'lere kadar çıkmaktadır [65]. Bundan başka, kaplama ile alt tabaka arasında ısıl ve mekanik özellikler arasında uyumsuzluk varsa, bu durumun da çatlaklara yol açtığı belirtilmiştir [66]. Şekil 6'da 1 no'lu noktanın 55TiO₂-Cr₂O₃ seramik kaplama olarak adlandırılan kaplamanın kesitini karakterize eden, x100 büyütme oranına sahip mikrografın açık gri renkli bölgesinden alınmış Şekil 6'daki 1 no'lu EDS analizi Krom'ca zengin bir mikro yapıyı sergilemektedir. Yine aynı mikrograftan alınmış, 2 no'lu nokta, koyu gri renkli bölgenin Şekil 6'daki 2 no'lu EDS analiz sonucu Cr ve Ni bakımından zengin bir mikro yapıyı sergilemektedir. Aynı bölgenin ara bağlayıcı NiCr'un elementel analizleri ile büyük oranda örtüşmektedir. Burada %5 gibi yüksek oranda analiz edilen karbonun yüksek sıcaklığın etkisiyle altlık disk malzemesinden ara bağlayıcıya difüze olduğunu söylemek mümkündür. Mikrograftaki 3 no'lu noktanın Şekil 6'deki 3 no'lu EDS analizine dayanarak temsil ettiği noktanın dökme demir altlık malzemesi olduğunu söylemek mümkündür. Genel olarak kaplama tabakası, ara bağlayıcı ve altlık malzemesi arasında sorunsuz bir geçiş olduğu bağlanma mukavemetinin mükemmel olduğu ışık mikroskobu ve SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır.

3.3 Orjinal ve Kaplanmış Disklerin Triboloji Çalışması

Orijinal ve kaplanmış disk ve balataların frenleme testleri öncesi ve sonrasında ölçülen sertlik, aşınma yüzey pürüzlülüğü ve sürtünme katsayısı ortalama değerleri **Tablo 6**'da verilmiştir. Sürtünmede kinetik enerjinin ısıya dönüşme nedeniyle sıcaklık artar. Buna ilave olarak, frenlemede artan yük ve frenleme süresi, sürtünme yüzeyinde sıcaklığın yükselmesine sebep olur. Sıcaklık sebebiyle aşınma mekanizmaları ve temas konfigürasyonları değiştiği için malzemenin mekanik özellikleri olumsuz etkilenir. Örneğin; sıcaklık yükselmesi aşınma miktarını ani olarak arttırdığı gibi sürtünme katsayısı

da azalmaktadır. Bu azalma frenleme zayıflaması olarak adlandırılır. Bu zayıflama sürtünme malzemeleri için kritik bir özelliktir.

Disk ve balata temas yüzeyindeki mikro boyuttaki temas durumu ve sürtünme mekanizmaları hakkındaki temel bilgiler günümüzde oldukça sınırlıdır. İki farklı malzeme ara yüzeyinde oldukça karmaşık bir yapıya sahip moleküler boyutta kimyasal ve mekaniksel değişimler meydana gelir [67].

Tablo 6. Orijinal ve kaplanmış disklerin tribolojik değerleri

Kullanılan disklerin tribolojik özellikleri	Orijinal disk	Plazma püskürtme $55\text{TiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$
Disk başlangıç yüzey pürüzlülüğü (μm)	1,496	0,236
Disk bitiş yüzey pürüzlülüğü (μm)	0,334	0,193
Balata başlangıç yüzey pürüzlülüğü (μm)	2,261	2,267
Balata bitiş yüzey pürüzlülüğü (μm)	1,564	1,346
Disk sertliği (HV_{500})	258	334
Disklerin ağırlık kaybı (gr)	1,485	0,359
Balataların ağırlık kaybı (gr)	9,586	7,485
Disklerin kalınlık kaybı (mm)	0,031	0,004
Balataların kalınlık kaybı (mm)	5,497	5,165
Diskte oluşan en yüksek sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	286	338
Cihaz kontrol sürtünme katsayısı (μ)	0,61	0,37
Alıştırma sürtünme katsayısı (μ)	0,62	0,35
Alıştırma sonrası etkinliği sürtünme katsayısı (μ)	0,53	0,36
Sıcaklıkta fren zayıflaması sürtünme katsayısı (μ)	0,59	0,38
Sıcaklık etkinliği sürtünme katsayısı (μ)	0,58	0,33
Soğuk etkinlik sürtünme katsayısı (μ)	0,62	0,34
Kararlılık etkinliği sürtünme katsayısı (μ)	0,61	0,38
Yeniden alıştırma sürtünme katsayısı (μ)	0,62	0,36
Final etkinliği sürtünme katsayısı (μ)	0,53	0,29

Sürtünme katsayısına etki eden en önemli faktörlerden birisi yüzey temas alanının oranına etki eden pürüzlülük değerleridir. Pürüz tepeliklerinde durgun haldeki mikro deformasyon alanları, kayma hareketine bağlı olarak kayma gerilmesi etkisi ile büyüyerek temas alanını büyütür. Bu alan büyümesi sistem için harcanan kuvvetin bir kısmının sürtünme kuvvetine dönüşmesine sebep olur. Frenlemede tribolojik temasın yapısı, gerçek temas alanlarını tanımladığı için sürtünme katsayısı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Sürtünme katsayısı, düzgün ve kuru temas yüzeylerinde pürüzlü yüzeylere göre daha fazladır. Pürüzsüz yüzeyler sürtünme sırasında daha fazla ısınır ve pürüzlü yüzeylere göre daha fazla yapışır. Sonuç olarak gerçek temas alanlarının artması ile sürtünme katsayısı da artmaktadır [68].

Orijinal ve kaplanmış disk ile kullanılan balataların yüzey pürüzlülükleri test öncesi ve sonrasında pürüzlülük ölçme cihazıyla ölçülmüştür (Tablo 6). Sürtünme nedeniyle temas eden yüzey tabakaları düzleşerek mikro ve makro boyutta birbirine eş hale gelmiştir. Başlangıçta çok yüksek yüzey pürüzlülük değerine sahip olan orijinal disk sürtünme sırasında yüzey pürüzlülük değeri $1.496 \mu\text{m}$ 'den $0,334 \mu\text{m}$ 'ye düşmesine rağmen kaplanmış diskin yüzey pürüzlülük değeri sürtünme sırasında $0,236 \mu\text{m}$ değerinden $0,193 \mu\text{m}$ seviyesine gerilemiştir. Bu durumu Bağde ve arkadaşları şöyle açıklamaktadır. Çalışmasına göre; Titanyum'ca zengin kaplamalarda yük ve sıcaklığın artmasıyla Cr, Ti yağlayıcı film olarak görev yapan tribo oksitleri oluşmaktadır. Cr, Ti oksit tabakası $55\text{TiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$ kaplamanın aşınma ve sürtünme davranışını etkilemektedir [30 ve 31]. Daha az pürüzlülük derecesindeki kaplanmış disk orijinal diskten daha düşük sürtünme katsayısı sergilemiş ve aşınma miktarı orijinal diskin çok altında gerçekleşmiştir. Kaplanmış diskin sürtünme ara yüzey sıcaklık değerleri orijinal diske hemen hemen yakın çıkmıştır. Orijinal ve kaplanmış diskin sertlikleri mikro

sertlik ölçme cihazı ile ölçülmüştür. Sertlikler 500 gr yük uygulanarak whickers sertlik yöntemiyle ölçülmüştür (Tablo 6). Kaplanmış diskin sertlik değerinin orijinal diskten yüksek çıkması kaplama yapısı içerisinde oksitli sert fazların bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüksek sertlik değeri de kaplamanın aşınma dayanımının daha iyi olması anlamına gelmektedir.

Deneylerde ağırlık aşınması oranları ölçümünde hassas terazi kullanılmış olup elde edilen değerler Tablo 6'da verilmiştir. Kalınlık aşınması oranları 0,001 hassasiyetli mikro metre ile ölçülmüştür (Tablo 6). Bir fren sisteminde yer alan disk-balata malzemelerinin sergilediği sürtünme katsayısı değişimi, frenleme performansını değerlendirmek için yeterli bir sonuç değildir. Sürtünme katsayısı çok yüksek olsa bile ömrü az olan bir disk-balata ikilisinin, maliyeti ve değiştirme süreleri önemli bir dezavantaj oluşturur. Aşınma miktarı, disk ve balata ömrünü belirleyen ve en az sürtünme katsayısı kadar önemli olan bir parametredir. Normalde sürtünme katsayısı arttığı zaman aşınmada artar [69]. Ancak kaplanmış diskin frenleme performansını etkileyen aşınma, sürtünme katsayısı, termal dayanım, ses, korozyon gibi özellikler birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Fren aşınması artıkları açıkça çevre ve insan sağlığı için olası bir tehlikeyi temsil eder. Bu nedenle fren üreticilerinin daha güvenli ürünler geliştirmesine, test ve analizlerde daha fazla iyileştirmeye ihtiyaç vardır. Ayrıca son kullanıcıların daha az aşını çıkaracak elemanları tercih ederek daha çevreci davranmaları gerekir. Gerçek araç uygulamalarını simüle etmek için fren dinamometreleri geliştirilmiştir. Farklı işlemlerde sıcaklık ve yük dağılımındaki önemli farklılıklar nedeniyle, frenleme ile üretilen aşınma döküntülerinin kimyası ve büyüklüğü, aynı fren balatalarından elde edilen bilyalı öğütülmüş parçacıkların kimyasından oldukça farklıdır. Çalışmamızda kaplanmış disk kaplanmamış diske göre daha düşük sürtünme katsayısını, daha az aşınarak sağlamıştır. Bu sayede frenleme kaynaklı çevreye daha az emisyon maddesi bırakılmıştır. Sonuç olarak aşınma kaynaklı ekonomik kayıpların azalacağı düşünülmektedir

4. Sonuçlar

Plazma yöntemiyle dökme demir disk yüzeyinde başarılı bir kromoksit kaplama oluşturulmuştur. Bu mekanik ergonomik seramik metal bir kaplamadır. Kaplamadaki fiziksel bağlanma, kaplama tekniği sayesinde, ergitilmiş tozun yüzeye hızlı bir şekilde enjekte edilmesiyle oluşturulmuştur. Benzer frenleme şartlarında kaplamalı disk orijinal diskten daha düşük sürtünme katsayısı sergilemiştir. Kaplanmış diskin sertliği orijinal diskten daha yüksek, yüzey pürüzlülük değeri altı kat daha düşük ölçülmüştür. Bu durum kaplama tozunun ergitilmesi esnasında yapı içerisindeki krom ve titanyum oksit tabakalarına bağlanmıştır. Dolayısıyla kaplamalı diskin ağırlıkça aşınması orijinal diskten daha düşük çıkmıştır. Kaplamalı diske ait balatanın aşınma değeri de daha düşük elde edilmiştir. Bu değerler kaplamalı disk ve ona ait balatanın daha uzun ömürlü olacağı anlamına gelmektedir. Ancak, kaplamalı diskin sürtünme katsayısı değerinin artırıcı çalışma yapılması gerekmektedir. Bu sayede, frenleme nedeniyle çevreye daha az emisyon yayılmaktadır. Sonuç olarak, aşınmadan kaynaklanan ekonomik kayıpların da azalacağı düşünülmektedir.

6. Kaynaklar

- [1] Kennedy, Z.E., Natarajan, S., "Slurry erosion properties of detonation sprayed and plasma sprayed coatings for materials used in mining environments", *Surface Engineering*, 125, 476-481, 2009.
- [2] Saral, U., Toplan, N., "Thermal cycle properties of plasma sprayed YSZ/Al₂O₃ thermal barrier coatings", *Surface Engineering*, 25, 541-547, 2009.
- [3] Enayati, M.H., Fathi, M.H., Zomorodian, A., "Characterisation and corrosion properties of novel hydroxyapatite niobium plasma sprayed coating", *Surface Engineering*, 25, 338-342, 2009.
- [4] Wang, Y., Guo, H.B., Li, Z.Y., Gong, S.K., "Segmented lanthanum cerium oxide thermal barrier coatings by atmospheric plasma spray", *Surface Engineering*, 25, 555-558, 2009.

- [5] Verdian, M.M., Salehi, M., Raeissi, K., "Influence of feedstock particle size on corrosion resistance of air plasma sprayed NiTi coatings applied to AISI 1045 steel", *Surface Engineering*, 26, 478-483, 2010.
- [6] Jin, Y., Yang, Y., "Tribological behavior of various plasma sprayed ceramic coatings", *Surface and Coatings Technology*, 88, 248-54, 1996.
- [7] Wang, Y., "Friction and wear performances of detonation gun and plasma sprayed ceramic and cermet hard coatings under dry friction", *Wear*, 161, 69-78, 1993.
- [8] Liu, H., Tao, J., Xu, J., Chen Z., Qiang Gao, Q., "Corrosion and tribological behaviors of chromium oxide coatings prepared by the glow-discharge plasma technique", *Surface and Coatings Technology*, 204, 28-36, 2009.
- [9] Zhang, J., Wang, Z., Lin, P., Lu, W., Zhou, Z., Jiang, S., "Effect of Sealing Treatment on Corrosion Resistance of Plasma-Sprayed NiCrAl/Cr₂O₃-8wt.%TiO₂ Coating", *Journal of Thermal Spray Technology*, 5(20), 508-513, 2011.
- [10] Güney, B.i, Mutlu, İ., "Wear and corrosion resistance of Cr₂O₃%-40% TiO₂ coating on gray cast-iron by plasma spray technique", *Materials Research Express*, 6 (9), 069577, 2019.
- [11] Harju, M., Halme, J., Järn, M., Rosenholm, J.B., Mäntylä, T., "Influence of aqueous aging on surface properties of plasma sprayed oxide coatings", *Journal of Colloid and Interface Science*, 313, 194-201, 2007.
- [12] Merlin, M., Soffritti, C., Vazquez, R., "Effect of relative humidity and applied loads on the tribological behaviour of a steel/Cr₂O₃-ceramic coupling", *Wear*, 303, 371-80, 2013.
- [13] Pawlowski, L., "Technology of thermally sprayed anilox rolls: State of art, problems, and perspectives", *Journal of Thermal Spray Technology*, 5, 317-334, 1996.
- [14] Singh, V.P., Sil, A., Jayaganthan, R., "Wear of plasma sprayed conventional and nanostructured Al₂O₃ and Cr₂O₃ based coatings", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 65, 1-12, 2012.
- [15] Zhang, J., Wang, Z., Lin, P., "Effects of sealing on corrosion behaviour of plasma-sprayed Cr₂O₃-8TiO₂ coating", *Surface Engineering*, 29(8), 594-99, 2013.
- [16] Ramachandran, K., Selvarajan, V., Ananthapadmanabhan, P.V., Sreekumar, K.P., "Microstructure adhesion, microhardness, abrasive wear resistance and electrical resistivity of the plasma sprayed alumina and alumina-titania coatings", *Thin Solid Films*, 315, 144-152, 1998.
- [17] Yılmaz, R., Kurt, A.O., Demir, A., Tatli, Z., "Effects of TiO₂ on the mechanical properties of the Al₂O₃-TiO₂ plasma sprayed coating", *Journal of the European Ceramic Society*, 27, 1319-1323, 2007.
- [18] Fervel, V., Normand, B., Coddet, C., "Tribological behavior of plasma sprayed Al₂O₃ based cermet coatings", *Wear*, 230, 70-77, 1999.
- [19] Çetinel, H., Çelik, E., Kusoğlu, M.I., "Tribological behavior of Cr₂O₃ coatings as bearing materials", *Journal of Materials Processing Technology*, 196, 259-265, 2008.
- [20] Sammelseg, A., Tarre, J., Lu, J., Aarik, A., Niilisk, T., Uustare, T., Netšipailo, I., Rammula, R., Pärna, R., Rosental, A., "Structural characterization of TiO₂-Cr₂O₃ nanolaminates grown by atomic coating deposition", *Surface and Coatings Technology*, 204 (12), 2015-2018, 2010.
- [21] Ctibor, P., Piš, I., Kotlan, J., Pala, Z., Khalakhan, I., Stengl, V., Homola, P., "Microstructure and properties of plasma-sprayed mixture of Cr₂O₃ and TiO₂", *Journal of Thermal Spray Technology*, 22, 1163-1169, 2013.
- [22] Negishi, N., Takeuchi, K., "Preparation of TiO₂ thin film photocatalysts by dip coating using a highly viscous solvent", *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 22(1-2), 23-31, 2001.
- [23] Wang, J., Wang, J.J., Sun, Y.L., Wang, C.H., "The preparation of superhydrophilic surface of TiO₂ coating without ultraviolet irradiation through annealing treatment", *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 68(1),75-80, 2013.

- [24] Bergamonti, L., Alfieri, I., Franzò, M., Lorenzi, A., Montenero, A., Predieri, G., Raganato, M., Calia, A., Lazzarini, L., Bersani, D., Lottici, P.P., "Synthesis and characterization of nanocrystalline TiO₂ with application as photoactive coating on stones", *Environmental Science and Pollution Research*, 21(23), 13264-13277, 2014.
- [25] Magami, S.M., Oldring, P.K.T., Castle, L., Guthrie, J.T., "The effect of TiO₂ pigmentation on the hydrolysis of amino resin crosslinked epoxy can coatings", *Journal of Coatings Technology and Research*, 11(6), 1013-1022, 2014.
- [26] Li, N., Li, G., Wang, H., Kang, J., Dong, T., Wang, H., "Influence of TiO₂ content on the mechanical and tribological properties of Cr₂O₃-based coating", *Materials and Design*, 88,906-914, 2015.
- [27] Bolelli, G., Cannillo, V., Lusvardi, L., Manfredini, T., "Wear behaviour of thermally sprayed ceramic oxide coatings", *Wear*, 261, 1298-1315, 2006.
- [28] Ahn, H., Kwon, O.K., "Tribological behaviour of plasma-sprayed chromium oxide coating", *Wear*, 225-229, 814-824, 1999.
- [29] Bagde, P., Sapate, S.G., Khatirkar, R.K., Vashishtha, N., Tailor, S., "Friction and wear behaviour of plasma sprayed Cr₂O₃-TiO₂ coating", *Materials Research. Express*, 5, 1-14, 2018.
- [30] Güney, B., Mutlu, İ., "Tribological properties of brake discs coated Cr₂O₃-40%TiO₂ by plasma spraying", *Surface Review And Lettres*, 26 (10) , 1950075, 2019.
- [31] Mutlu, İ., Güney, B., Erkurt, İ., "Investigation of the effect of Cr₂O₃-2TiO₂ coating on braking performance", *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 9 (1), 29-41, 2020.
- [32] Güney, B., Mutlu, İ., Gayretli, A., "Investigation of braking performance of NiCrBSi coated brake discs by thermal spraying and melting", *Journal of The Balkan Tribological Association*, 22 (1), 331-346, 2016.
- [33] Güney, B., Mutlu, İ., Küçüksarıyıldız, H., "The effect of flame spray coating on the tribological properties of brake disc", *Politeknik Dergisi*, 2020. <https://doi.org/10.2339/politeknik.563277>.
- [34] Güney, B., Mutlu, İ., "Dry friction behavior of NiCrBSi-%35W₂C coated brake disks", *Materials Testing*, 59 (5), 497-505, 2017.
- [35] Blau, P.J., Mc-Laughlin, J.C., "Effects of water films and sliding speed on the frictional behavior of truck disc brake material", *Tribology in Industries*, 36 (10), 709-715, 2003.
- [36] Anderson, A.E., "Friction and wear automotive brakes", ASM Handbook, Friction, Lubrication, and Wear Technology, *ASM International, Materials Park*, Ohio, 18 2017.
- [37] Wu, Y., Ma, Y., Gao, W., Yang, G., Fu, H., Xi, N., Chen, H., "High temperature wear performance of laser cladding Co6 coating on high-speed train brake disc", *Applied Surface Science*, 481, 761-766, 2019.
- [38] Kılıç, H., Mısırlı, C., "Investigation of tribological behavior of 20NiCrBSi-WC12Co coated brake disc by HVOF method", *Materials Research Express*, 7 (1), 016560, 2020.
- [39] <https://www.oerlikon.com/metco/en/meta-navigation/search-result/?q=MaterialGuide>, (Erişim: 22 Mayıs 2019).
- [40] Hirota, K., Takano, Y., Yoshinaka, M., Yamaguchi, O., "Fabrication and mechanical properties of almost fully-densified Cr₂O₃ ceramics", *Journal of Materials Science Letters*, 21(11), 853-854, 2002.
- [41] Du, H.L., Datta, P.K., Burnell-Gray, J.S., Guo, X., "Influence of plasma-sprayed Mo coating on sulphidation behaviour of inconel 600 and nimonic PE11 alloys", *Surface and Coatings Technology*, (76-77), 1-6, 1995.
- [42] Hieman, R.B., Plasma spray coating-principles and applications, VCH publishers Inc., NY, USA. 1996.
- [43] Çelik, E., Şengil, İ.A., Avcı, E., "Effect of some parameters on corrosion behaviour of plasma-sprayed coatings", *Surface and Coatings Technology*, 97, 355-360, 1997.
- [44] Anonim, SAE J2430, "Dynamometer effectiveness characterization test forpassenger car andlight truck brake friction products. surface vehicle standard", *Society of Automotive Engineers*, Pensilvanya, USA, 1999.

- [45] Anonim, "How to read and understand the aftermarket standard sae J2430/brake effectiveness evaluation procedure- Test report", Detroit, Michigan, *Link Testing*, 1999.
- [46] Carlos, E.A., Ferro, E., "Technical overview of brake performance testing for original equipment and aftermarket industries in the US and europe an markets", *Link Technical Report FEV 2005-01*. 2005.
- [47] Miguel, J.M., Guilemany, J.M., Vizcaino, S., "Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes", *Tribology International*, 36 (3), 181-1 87, 2003.
- [48] Vaclav, R., Helena, R., Dagmer, J., Peter, F., "Wear and environmental aspects of composite materials for automotive braking industry", *Wear*, 265, 167-175, 2005.
- [49] Guo, C., Zhou, J., Zhao, J., Chen, J., "Effect of ZrB₂ on the microstructure and wear resistance of Ni-based composite coating produced on pure Ti by laser cladding", *Tribology Transactions*, 54, 80-86, 2001.
- [50] Skrúcaný, T., Synák, F., Semanová, S., "Influence of the braking system that is contrary to legislation on breaking characteristics of passenger car", *Transport Technic and Technology*, 14 (1), 1-5, 2018.
- [51] Öz, A., Gürbüz, H., Yakut, A.K., Sağıroğlu, S., "Braking performance and noise in excessive worn brake discs coated with HVOF thermal spray process", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31 (2), 535-543, 2017.
- [52] Peng, L., "Preparation and tribological properties of NiCrBSiC reinforced laser alloying layer", *Tribology Transactions*, 56, 697-702, 20013.
- [53] Filip, P., Weiss, Z., Rafaja, D., "On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications", *Wear*, 252, 189-198, 2002.
- [54] Ertan, R., Yavuz, N., "Balata malzemelerinde kullanılan yapısalaraın balataların tribolojik ve fiziksel özelliklerine etkisi", *Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Dergisi*, 15, 169-177, 2010.
- [55] Shorowordi, K.M., Haseeb, A.S.M.A., Celis, J.P., "Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminium MMC sliding against phenolic brake pad", *Wear*, 256, 1176-1181, 2004.
- [56] Özel , S., Kurt, B., Somunkıran, İ., Orhan, N., "Microstructural characteristic of NiTi coating on stainless steel by plasma transferred arc process", *Surface and Coating Technology*, Volume, 202, 633-637, 2008.
- [57] Somunkıran, İ., Kurt, B., Buytoz, S., Orhan, N., "Microstructural characteristic of Co-Cr-Mo powder alloy coating on stainless steel by plasma transferred arc weld surfacing", *Praktical Metallography*. 47(10), 418-431, 2010.
- [58] Lee, C.H., Kim, H.K., Choi, H.S., Ahn, H.S., "Phase transformation and bond coat oxidation behavior of plasma-sprayed zirconia thermal barrier coating", *Surface and Coatings Technology*, 124, 1-12 2000.
- [59] Li, C.J., Yang, G.J., Ohmori, A., "Relationship between particle erosion and lamellar microstructure for plasma-sprayed alumina coatings", *Wear*, 260, 1166-1172, 2006.
- [60] Pawlowski, L., "The science and engineering of thermal spray coatings", John Wiley-Sons, Ltd., England, 2008.
- [61] Kuroda, T., Kobayashi, A., "Adhesion characteristics of zirconia-alumina composite coatings by gastunnel type plasma spraying", *Vacuum*, 73, 635-641, 2004.
- [62] Çelik, E., Tekmen, C., Özdemir I., Çetinel, H., Karakaş, Y., Okumuş, S.C., "Effects on performance of Cr₂O₃ layers produced on Mo/cast-iron materials", *Surface and Coatings Technology*, (174-175), 1074-1081, 2003.
- [63] Luo, H., Goberman, D., Shaw, L., Gell, M., "Indentation fracture behavior of plasma sprayed nano structured Al₂O₃-%13TiO₂ coatings", *Materials Science and Engineering A*, 346 (1-2), 237-245, 2003.
- [64] Fervel, B., Normand, C., Coddet, C., "Tribological behavior of plasma sprayed Al₂O₃-based cermet coatings", *Wear*, 230(1), 70-77, 1999.
- [65] Yin, Z., Tao, S., Zhou, X., Ding, C., "Particle in-flight behavior and its influence on the microstructure and mechanical properties of plasma sprayed Al₂O₃ coatings", *Journal of the European Ceramic Society*, 28, 1143-1148, 2008.

- [66] Çelik, E., Sarıkaya, Ö., "The effect on residual stresses of porosity in plasma sprayed MgO-ZrO₂ coatings for an internal combustion diesel engine", *Materials Science and Engineering A*, 379, 11-16. 2004.
- [67] Song, E.P., Ahn, J., Lee, S., Kim, N.J., "Effects of critica lplasma spray parameter and spray distance on wear resistance of Al₂O₃-%8TiO₂ coatings plasma sprayed with nano powders", *Surface and Coating Technology*, 20, 3625-3632, 2008.
- [68] Eriksson, M., Bergman, F., Jacobson, S., "On the nature of tribological contact in automotive brakes", *Wear*, 252, 26-36, 2002.
- [69] Mutlu, İ., Öner, C., Fındık, F., "Boric acid effect in phenolic composites on tribological properties in brake linings", *Materials and Design*, 28, 480-487, 2007.