



Plazma Sprey Tekniği ile Cr₂O₃ Kaplanmış Fren Diskinin Frenleme Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi

Ali Öz^{1*}, Abdullah Demir², Selami Sađırođlu³, Ali Kemal Yakut⁴

¹ Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, TBMYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Burdur, alioz@mehmetakif.edu.tr

² Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul, ademir@marmara.edu.tr

³ Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye; ssagiroglu@karabuk.edu.tr

⁴ Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Isparta, Türkiye; kemalyakut@isparta.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 7 Şubat 2019 ve Kabul Tarihi 13 Mart 2019)

(DOI: 10.31590/ejosat.522361)

ATIF/REFERENCE: Öz, A., Demir, A., Sağıroğlu, S. & Yakut, A. K. (2019). Plazma Sprey Tekniği ile Cr₂O₃ Kaplanmış Fren Diskinin Frenleme Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 394-403.

Öz

Bu çalışmada hafif ticari araca ait kanatçıklı soğutmalı ön fren diskleri kullanılmıştır. Testlerde kullanılan disk 257 mm dış, 150 mm iç çapa, 22 mm kalınlığa, 5328,73 g kütleyle sahiptir. Numune ise plazma sprej tekniği kullanılarak Cr₂O₃ ile kaplanmıştır. Kaplanmış diskin performans standartlarına uygun olarak atalet dinamometresinde alış(tır)ma ve ısıl titreşim (hot judder I-II) özellikleri incelenmiştir. Yapılan testler öncesi ve sonrasında disklerin kalınlık ve kütsel ölçümlerinin yanında yüzey pürüzlülük değerleri de ölçülerek aşınma oranları tespit edilmiştir. Ayrıca testler sonrası disklerden alınan numuneler TS EN ISO 9227 test standardına uygun olarak korozyon testine tabi tutulmuştur. Yapılan test ve ölçümlerde; tüm frenleme prosedürlerinde her iki diskin sıcaklıklarının birbirine yakın ve frenleme sayısına bağlı olarak çalkantılı gerçekteştiği, alıştırma test prosedüründe orijinal diskin belirgin şekilde sürtünme katsayısının yüksek olduğu; testler neticesinde kaplamalı diskin dış yüzeyinin tahrip olduğu ve dış balatasının ağır hasar gördüğu ve ayrıca gerçekteştirilen korozyon testinde ise orijinal diskin yoğun korozyona maruz kaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fren diski, Kaplama, Cr₂O₃, Atalet dinamometresi, Frenleme performansı

Experimental Investigation of Braking Performance on Cr₂O₃ Coated Brake Disk by Plasma Spray Technique

Abstract

In this study, front brake discs with air ventilated belonging to a light commercial vehicle were used. The disk used in the tests has an outer diameter of 257 mm, inner diameter of 150 mm, 22 mm thickness, 5328.73 g. The samples were plated with Cr₂O₃ by using a plasma spray technique. OEM and coated discs are tested in inertia dynamometer according to performance standards; bedding-in and hot judder I-II. In addition to the thickness and mass measurements of the disks before and after the tests performed in inertia dynamometer, the surface roughness values were also measured and the wear rates were determined. In addition, the samples taken from the discs after the tests were subjected to corrosion test in accordance with TS EN ISO 9227 test standard. After the tests and measurements carried out, it has been determined that; both disc temperatures were close and fluctuating depending on the number of braking in every braking procedure; OEM disc had significantly higher friction coefficient in the bending test procedure, the outer surface of the coated disc was worn out and the outer pad was heavily damaged and also in the corrosion test, the original disc was exposed to intensive corrosion.

Keywords: Brake disk, Coating, Cr₂O₃, Inertia dynamometer, Brake performance

* Sorumlu Yazar: Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, TBMYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, alioz@mehmetakif.edu.tr

1. Giriş

Frenler, güvenli sürüş için taşıtlarda bulunan en önemli aktif emniyet donanımıdır. Hareket halindeki taşıtı yavaşlatmak, durdurmak, taşıtın hızını kontrol altında tutmak ve duran taşıtı yerinde sabitlemek amacıyla kullanılırlar (Göktaş ve ark., 1995; Demir, 2009). Taşıtlarda tekerlek freni olarak yaygın bir biçimde sürtünmeli disk frenler kullanılmaktadır. Frenleme etkisiyle disk-balata ara yüzeyindeki sıcaklık ve hız değişimi sürtünme katsayısını etkilemektedir. Artan sıcaklık ve artan kayma hızı ile sürtünme katsayısı düşerek sıcaklık zayıflaması ve hız zayıflaması meydana gelmektedir (Göktaş ve ark., 1995). Fren zayıflaması, sürtünmeli fren sistemine sahip olan tüm taşıtlarda sıcaklığa bağlı olarak sürtünme katsayısının belirgin bir şekilde düşmesiyle meydana gelmektedir (Göktaş ve ark., 1995; Stanford ve Jain, 2001; Limpert, 2001; Orthwein, 2004; Thuresson, 2004; Bijwe ve ark., 2005; Demir, 2008-2009). Frenleme esnasında oluşan yüksek sıcaklık değerleri; fren zayıflamasına, erken aşınmalara, fren sıvısının buharlaşmasına, yatak arızalarına, termik çatlaklara ve titreşimlere sebep olabilmektedir (Lee, 1999).

Yapılan bir çalışmada binek otomobillerin frenlemesi için gerekli sürtünme katsayısının 0,30 ile 0,35 arasında (Bijwe ve ark., 2005), bir diğer çalışmada ise; sürtünme çiftleri arasındaki sürtünme katsayısının binek otomobiller için 0,45, spor otomobiller için 0,50'nin üzerinde ve raylı taşıtlar için ise 0,35 düzeylerinde olacağı bilgisi verilmiştir (Dmitriev ve ark., 2008). Yapılan bir başka çalışmada ise gri dökme demir esaslı kanatçıklı disk ve yarı metalik balata sürtünme çiftleri 98 – 632 °C arasındaki sıcaklıklarda 0,246 - 0,412 arasında sürtünme katsayısına sahip olmuştur² (Demir, 2009).

Lee ve Barber (1994) yaptıkları çalışmada, kayma hızının yeteri derecede büyük olması durumunda, balata-disk etkileşiminde kararsızlık olacağını belirtmişlerdir. Termoelastik kararsızlık (TEI) ile ilişkili yüksek lokal sıcaklıkların; malzemede bozulmaya, termik çatlak oluşumuna ve olumsuz frenleme performansına (fade) neden olduğu belirtilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada TEI, dönme hızına ve fren basıncına bağlı olarak araştırılmıştır. Çalışmada balata konfigürasyonu gibi diğer değişkenler sabit tutulmuştur. Ayrıca 250 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sıcaklığa bağlı fren zayıflamasının olduğu tespit edilmiştir. Özellikle uzun süreli frenlemelerde sürtünme yüzeyindeki sıcaklık değişimlerinin, sürtünme katsayısının azalmasına sebep olduğu saptanmıştır (Lee ve Barber, 1994).

Ellis (1998) tarafından yapılan bir çalışmada, dört farklı malzemeden imal edilmiş diskler -GG20'ye eşdeğer orta bir karbon derecesine sahip disk (A), GG25'e eşdeğer ve titanyum içerikli disk (B), bakır içeren yüksek karbonlu disk (C) ve GG35'e eşdeğer molibden ve krom içeren disk (D)- sürtünme testine tabii tutulmuştur. Testler, atalet dinamometre test cihazında ve ECE 90 Test Regülasyonuna uygun olarak yapılmış ve diskler; aşınma, sürtünme ve yapısal kararlılık açısından değerlendirilmiştir. Tip I fren zayıflaması testinde (fade testing); B diski genellikle daha yüksek sürtünme tepkisi sağlamıştır. Hız duyarlılık testinde ise daha düşük negatif ivmelenme göstermiştir. Aşınma testlerinde sıcaklık artışı B ve D disklerinin aşınma oranını artırmış ancak genel aşınma oranı açısından D diski en düşük aşınma değeri sağlamıştır. Aynı çalışmanın kararlılık testinde titanyum alaşımli disklerin en yüksek termik odaklı titreşim direnci sağladıklarına rağmen en düşük kararlılığa sahip olduğu da tespit edilmiştir. Yüksek karbonlu yarı otomobili diski iyi düzeyde kararlılık sağlarken zayıf bir aşınma direnci göstermiştir. Düşük ve orta karbonlu molibden alaşımli diskler, iyi düzeyde aşınma direnci göstermesine rağmen zayıf bir kararlılık sağladığı da tespit edilmiştir (Ellis, 1998).

Stanford ve Jain (2001) tarafından yapılan çalışmada sistemlerin termal verimliliğini arttırmak, çalışma sıcaklığını yükseltmek, korozyon, oksidasyon veya aşınma davranışını iyileştirmek amacıyla uygulanan termal sprey kaplamaların yüzey bileşen özellikleri için iyi bir mühendislik yaklaşımı sunduğu belirtilmiştir. Aynı çalışmada diskler ticari olarak uygulanabilecek sert kaplamalarla kaplanmıştır. Yapılan bu çalışmada, Fe-3.45C-2.15Si-0.5Mn-0.25Cr-0.2Cu kompozisyonuna sahip bir diskin sürtünme, aşınma ve korozyon direncini iyileştirmek için dört çeşit sert kaplama [Ni-17Cr-2.5Fe-2.5Si-2.5B-0.15C (Metco), Fe-30Mo-2C (Diamalloy), Co-30Cr-12W-2.4C (Stellite), and Zn-50SiC (Zn-SiC)] uygulanmıştır. Yapılan testlerde; en iyi korozyon direncini stellite kaplamalı disk göstermiştir. Tüm kayma hızlarında en düşük aşınma oranını stellite kaplamalı disk ile dökme demir disk sağlamıştır. Çalışmada genel olarak *sürtünme katsayısının kayma hızının artışıyla azaldığı* da tespit edilmiştir. Bununla birlikte en kararlı sürtünme davranışını yine stellite kaplamalı disk ile dökme demir disk göstermiştir. Ayrıca çalışmada Metco kaplamanın, sıcaklıkla fren zayıflamasına daha yatkın olabileceği üzerinde durulmuştur (Stanford ve Jain, 2001).

Thuresson (2004) tarafından yapılan çalışmada ise; kaymalı temasta, sıcaklık ve basınç gibi parametrelerin, sistemin geometrisinden, malzeme özelliklerinden ve sınır koşullarından etkilendiği belirtilmiştir. Frenlemelerde temas basıncı ve sıcaklık değişimleri, frenleme esnasında termik genleşme, aşınma ve sürtünmeden kaynaklanan ısıyla sürekli olarak değişir. Aşınma katsayısı sıcaklığa bağlı olarak değerlendirilmiş ve 600 °C'ye kadar lineer ve bu sıcaklığın üzerinde eksponansiyel artan bir fonksiyon olarak modellenmiştir. Sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısının azalması fren zayıflamasının ana nedeni olduğu ifade edilmiştir. Aynı çalışmada aşınma davranışı Archard'ın aşınma yasasıyla incelenmiştir (Thuresson, 2004). Bijwe ve arkadaşları (2005) tarafından yapılan bir çalışmada; sıcaklıkla fren zayıflamasının 300-400 °C arasındaki fren arayüz sıcaklıklarında kinetik sürtünme katsayısındaki düşmeden kaynaklandığı belirtilmiştir. Frenleme elemanlarının işletme esnasında maruz kaldığı tribolojik durumun sıcaklıkla fren zayıflaması üzerinde dominant bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Çalışmada bir otomobilin ön fren diski ile farklı reçine kompozisyonları kullanılan beş balatanın sıcaklıkla fren zayıflaması ve kararlılık (recovery) özellikleri incelenmiştir (Bijwe ve ark., 2005).

² Disk sıcaklığı 632 °C'de, iç balata sıcaklığı 451 °C ve dış balata sıcaklığı ise 441 °C'dir. Aynı sıcaklıkta sürtünme katsayısı 0,381 olarak tespit edilmiştir (Demir, 2009).

Natarajan ve ark. (2006), A356-%25SiC bileşeninin, otomobil fren balata malzemesine karşı aşınma miktarını konvansiyonel gri döküm malzeme ile karşılaştırmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, A356-%25SiC bileşeni eşit şartlar altında sürtünme malzemesi üzerinde kullanıldığında, sıradan gri döküm malzemedan daha fazla aşınma direnci göstermiştir. Ayrıca hem gri döküm malzeme hem de A356-%25SiC bileşene uygulanan yük miktarı arttıkça aşınma katsayısının azaldığını gözlemlemişlerdir.

Uyyuru ve ark. (2006), AlSi-SiC parçacıklı bileşenleri otomobil fren balatalarına sürtmeleri durumunda, frenleme yükündeki artışla aşınma oranının da arttığını, sürtünme hızının artması durumunda ise aşınma oranının düştüğünü göstermiştir. Ancak, frenleme yükü ve sürtünme hızının artması durumunda sürtünme katsayısının düştüğünü tespit etmişlerdir.

Düşük korozyon direncine ve optimum düzeyde termik iletkenlik ile aşınma mukavemetine sahip olan gri dökme demir, fren disklerinin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak disk için aracın bulunduğu ya da kullanıldığı yerlerde/bölgelerde suyun, nemin ve tuzun bulunması halinde ciddi sorunlarla karşılaşılabilir. Bu amaçla disklerin ısı verimliliğini arttırmak, korozyon, oksidasyon veya aşınma davranışını iyileştirmek amacıyla kaplama uygulamaları tercih edilebilir (Demir, 2009).

Yüzey kaplama, yeni bir yüzey tabakası elde etmek amacıyla kaplama yöntemleri kullanılarak ana malzemedan farklı özellikte ve kimyasal bileşimi bilinen bir metal veya alaşımın ana malzeme yüzeyine kaplanması işlemidir. Yüzey kaplama; aşınmayı, yıpranmayı, darbeyi, erozyonu ve oyulmayı azaltmak için orijinal parçalara uygulandığı gibi bozulan parçaların tamiri amacıyla da uygulanır. Yüzey kaplama işlemi ergitme kaynak yöntemleri ile yapılabildiği gibi, ısı püskürtme, lazer, kaynak yöntemi vs. kullanılarak da gerçekleştirilebilmektedir (Mingxi ve ark., 2005). Kaplamalar, genellikle mekanik bağlanma ve bölgesel olarak çeşitli sınıflarda kimyasal bağ kuvvetleri ile oluşmaktadır (Smith and Fast, 1994).

Metal püskürtme yönteminde toz veya tel halindeki kaplama maddeleri, bir püskürtme tabancasından yanıcı, yakıcı ve taşıyıcı gazların eşliğinde püskürtülerek iş parçasının yüzeyine kaplama oluşturulur. Bu grupta yer alan teknikler arasında toz alev püskürtme, tel püskürtme, plazma püskürtme gibi sıralanabilir (Halamoğlu, 2003).

Krom-oksit, tüm oksitler Sulzer Metco'da geçen tozlar arasında kimyasal olarak en hareketsizi ve en az aşınanıdır. 540 °C'nin altındaki çalışma sıcaklıklarında kullanılabilir. Seramik krom-oksit kullanılarak yapılacak kaplamalar plazma işlemi uygulanarak elde edilir. Titanyum oksit ve silisyum oksit eklendiğinde bağlama gücü, sertlik ve abrasiv aşınma direnci artar. Bu kaplamalar zirkonya tabanlı seramiklerle kıyaslandığında ısı iletkenlikleri daha fazladır ancak daha yüksek mikro, makro sertlik ve aşınma direnci gösterirler (Sulzer Metco, 2006).

Blau ve ark. (2007), iki adet ticari titanyum alaşım, dört adet titanyum sert toz kompozitleri ve bir adet termal sprey kaplamalı Titanyum alaşımı kullanarak yaptıkları çalışmalarında, sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimlerini araştırmışlardır. Çalışmalarında sürtünen parça olarak ticari amaçlı üretilmiş balata kullanılmıştır. Sonuç olarak; 0,6 mm kalınlığındaki termal sprey kaplamalı titanyum alaşım diskin (Ti-6Al-4V ThSp) en düşük aşınma değerine sahip olduğunu ve hafif olmasının yanında diğer disklerle oranla daha yüksek korozyon direncine sahip olması sebebiyle tercih edilebilir olduğunu belirtmişlerdir (Blau ve ark., 2007).

Öz (2012) tarafından yapılan doktora çalışmasında, hafif ticari bir aracın ön tekerlek frenleme sisteminde kullanılan tolerans limitleri dışında aşınmış 4 adet fren disklerine farklı kaplama yöntemleri, kaplama kalınlıkları ve tozları kullanılarak kaplama işlemi uygulanmış ve incelemeler yapılmıştır. Çalışmada orijinal disk olarak (83,2Fe4,9Si0,4Mn2,8P0,9S0,2Cr1,8Al2,4Cu2,5Zn0,1Sn0,2Zr) [R0] ve balata olarak ta (11,6Fe4Si2,7P2S11Cr31,3

Ni6Sn7,3Zr0,3Bi8,9W13,8Hf0,6Ti) kullanılmıştır. Kaplanmış disklerden birincisi [R1], seramik kromoksit (Cr₂O₃) tozu kullanılarak ve 95/5 oranına sahip NiAl ara bağlayıcı kullanılarak plazma sprey yöntemi ile kaplanmış ve 0,7 mm kalınlığında kaplama elde edilmiştir. İkincisi [R2], 88/12 oranına sahip tungsten karbür kobalt (W₂C-Co) tozu ve 80/20 NiCr ara bağlayıcı kullanılarak yüksek hızlı oksijen yakıtı ile püskürtme (HVOF) yöntemi ile kaplanmış ve 0,5 mm kalınlığında kaplama elde edilmiştir. Üçüncüsü [R3], Colmonoy 88RH (Ni3B4Si3,5Fe15Cr17,3W0,8C) tozu ve 80/20 NiCr ara bağlayıcı kullanılarak HVOF yöntemi ile kaplanmış ve 0,6 mm kalınlığında kaplama elde edilmiştir. Dördüncüsü [R4] ise, Colmonoy 88SA (Ni3B4Si3,5Fe15Cr17,3W0,8C) tozu uygulanarak herhangi bir ara bağlayıcı kullanılmadan ergitme ve püskürtme yöntemi ile kaplanmış ve 0,8 mm kalınlığında kaplama elde edilmiştir. Kaplanmış ve kaplanmamış orijinal diskler, FIAT 7-H4020 standardına uygun olarak atalet dinamometresinde; alıştırma, judder, fren tork değişimi, geçici-kalıcı deformasyon ve yapısal dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca atalet dinamometresinde elde edilen test sonuçlarından sıcaklıkla fren zayıflaması tespit edilmiştir. Yapılan tüm testler sonucunda; aşınmış fren disklerinin, tungsten-karbür kobalt ile kaplanması durumunda orijinal diske yakın frenleme performansı gösterebileceği ve ticari kullanım için ümit verici özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir (Öz, 2012).

Bu çalışmada ise hafif ticari araca ait biri kanatçıklı orijinal gri dökme demir (D0) ve diğeri ise seramik kromoksit (Cr₂O₃) tozu kullanılarak ve 95/5 oranına sahip NiAl ara bağlayıcıyla plazma sprey yöntemi kullanılarak kaplanmış ve 0,7 mm kalınlığında kaplamalı disklerdir. Akabinde her iki disk atalet dinamometresinde alış(tr)ma ve ısı titreşim (hot judder I-II) özellikleri açısından incelenmiştir. Bu incelemede her iki diskin son sıcaklığı, ortalama sürtünme katsayısı ve gürültü değerleri grafiklenmiştir. Yapılan testlerin öncesi ve sonrasında disklerin hem kalınlık hem de kütsel olarak durumları ölçülmüş ve aşınma oranları tespit edilmiştir. Ayrıca testler sonrası disklerden alınan numuneler TS EN ISO 9227 test standardına uygun olarak korozyon testine tabi tutulmuştur.



2. Materyal ve Metot

Kaplanmış ve kaplanmamış disk, FIAT 7-H4020 ve 7-H2000 standartlarına uygun olarak atalet dinamometresinde alış(tır)ma ve ısıl titreşim (hot judder I-II) testlerine tabi tutulmuştur. Testler öncesi ve sonrası kaplanmış ve kaplanmamış diskin üzerinde yapılan boyutsal ve kütesel ölçümler neticesinde disklerde meydana gelen aşınma oranları tespit edilmiştir. Kaplanmış ve kaplanmamış diskten alınan numunelerin standart metalografik incelemesi yapılmıştır³. Son olarak her iki diskten alınan numuneler TS EN ISO 9227 ve ASTM B117 test standartlarına uygun olarak korozyon testine tabi tutulmuştur.

2.1. Testlerde kullanılan disklerin genel özellikleri

Testlerde hafif ticari bir araca ait kanatçıklı ön fren diskleri kullanılmıştır. Testlerde kullanılan orijinal diskin ve balatanın özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Testlerde kullanılan orijinal disk ve balataya ait geometrik boyutlar


| Teknik özellikler | D0 Orijinal disk | Balata |
|---------------------------|---|---|
| Kalınlık (mm) | 21,805 | 17,663 |
| Disk çapı (mm) | 257 | - |
| Kütle (g) | 5328,73 | 335,43 |
| Disk çarpılma limiti (mm) | 0.05 | - |
| Kimyasal Kompozisyon | 83,2Fe - 4,9Si- 0,4Mn - 2,8P- 0,9S-0,2Cr-1,8Al- 2,4Cu-2,5Zn- 0,1Sn-0,2Zr | 11,6Fe-4Si-2,7P-2S- 11Cr- 31,3N-i 6Sn- 7,3Zr- 0,3Bi- 8,9W- 13,8HF-0,6Ti |
| |  |  |

2.2. Disk kaplama malzemesi, kaplama yöntemi ve diskin hazırlanması

Bu çalışmada, hafif ticari aracın ön tekerlek frenleme sisteminde kullanılan tolerans limitleri dışında aşınmış 1 adet fren diski plazma sprey tekniği kullanılarak Cr₂O₃ ile kaplanmıştır. Kaplama yapılmış diskin özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Plazma sprey yöntemi ile kaplanacak numunelerin hazırlanması: Dökme demir disk malzemesi üzerine NiAl ara bağlayıcının kuvvetli bağ oluşturabilmesi için disklerin yüzeyleri taşlanarak oksit tabakası uzaklaştırılmıştır. Seramik kaplama yüzeye mekanik bağlanma ile tutunacağından yüzey yeterince pürüzlü hale getirilmiştir. NiAl ara bağlayıcı kaplanmadan önce dökme demir disk yüzeyleri 35 grit alümina ile kumlanarak temizlenmiş ve Ra=13,4 µm ortalama pürüzlülük değeri elde edilerek yüzeyler bağ mukavemeti açısından aktif duruma getirilmiştir. Plazma püskürtme yöntemiyle NiAl ara bağlayıcı kaplama uygulanması esnasında diskte aşırı ısınmayı önlemek için diskin arkasından basınçlı hava ile soğutma yapılmıştır. Diskin yüzeyine uygulanan yaklaşık 50 µm kalınlığındaki kaplamanın ortalama pürüzlülük değeri Ra= 12,7 µm olarak perthometre (perthometer) ile ölçülmüştür.

Tablo 2. Kaplama yapılmış diskin özellikleri

| Kaplama Malzemesi | D1- Seramik Krom-oksit | Kaplanmış Diskin Resmi |
|--|--|---|
| Ağırlık (kg) | 5267,12 |  |
| Disk kalınlığı (mm) | 21,894 | |
| Balata ağırlığı (gr) | 334,54 | |
| Kaplama tozlarının bileşenleri ve % oranları | 3,5Fe- 2,3Si-0,3Mn-1,3P- 86,4Cr-1,6Al- 1,7Cu-2,6Zn- 0,2Ti-0,14Zr | |
| Ara bağlayıcı (astar) | Ni/Al-95/5 50µ | |
| Kaplamayı uygulayan firma | Sermet firması kaplama atölyesi İstanbul | |
| Kaplama türü | Plazma püskürtme yöntemi | |
| Kaplama kalınlığı (mm) | 0,7 | |
| Ergime sıcaklığı (°C) | 1160 | |
| Isı iletim katsayısı (W/mK) | 1,99 | |

2.3. Tam ölçekli atalet dinamometresi ve testler

Hidrolik ya da havalı frene sahip binek taşıtların testlerinde kullanılan atalet dinamometreleri; kaplanmış disklerin hızlı sürtünme katsayısı analizlerinden FMVSS 105 ya da 135 simülasyonlarına kadar çeşitli testlerin yapılması için kullanılan bir fren test ünitesidir. Dinamometrelerde; performans, dayanıklılık, kapasite ve gürültü testleri yapılan en yaygın testlerdir. OEM, balata tedarikçileri ve

³ Bu çalışmada metalografik incelemeye yer verilmemiştir.

komponent üreticileri tarafından kullanılan ataletli dinamometre prosedürlerinin çoğu (SAE, JASO, ISO, AK, FMVSS, JIS ya da hususi) dinamometrelerde gerçekleştirilebilmektedir (Demir, 2009). Atalet dinamometresinde yapılan ölçümlerde kullanılan sensörlerle; hız, tork, basınç, akışkanın yer değiştirmesi ve sıcaklık gibi parametreler ölçülebilmektedir (Anonymous, 2002). Bu çalışmada kullanılan tam ölçekli atalet dinamometresinin resmi Şekil 1’de gösterilmiş ve teknik özellikleri ise Tablo 3’de verilmiştir. Atalet dinamometresinde yapılan alıştırma ve hot judder I ve II testleri $23 \pm 5^\circ \text{C}$ sıcaklık, 0,86-1,060 bar atmosfer basıncı ve %45-%70 bağıl neme sahip ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Alıştırma (Bedding) testleri: Alıştırma testleri, 80 km/h başlangıç hızında 100°C başlangıç sıcaklığında, 20 bar frenleme basıncında 6 s’de bir aralıkta 100 frenleme sayısı için fren disk-balata çiftinin sürtünen yüzeylerinin birbirleriyle uyumlu bir şekilde çalışması için yapılan test işlemidir.

Hot judder testleri I ve II: Kaplanmış ve kaplanmamış fren diskleri üzerinde atalet dinamometresinde yapılan “hot judder” testleri 2 aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki, hot judder I testidir. Bu test, 152 km/h başlangıç hızında, 100°C başlangıç sıcaklığında, 1, 2 ve 3 m/s^2 olmak üzere 3 farklı frenleme ivmesinde 6 s’de bir aralıkta 15 frenleme sayısı için yapılmıştır. Hot judder II testi ise; 152 km/h başlangıç hızında, 300°C başlangıç sıcaklığında, 1, 2 ve 3 m/s^2 olmak üzere 3 farklı frenleme ivmesinde 6 s’de bir aralıkta 15 frenleme sayısı için yapılmıştır. Hot judder I ve II testleri dönen fren disk hızının 0 km/h hıza eşit olacağı duruma kadar frenleme işleminin yapılması şeklinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Testlerde kullanılan ESAM marka tam ölçekli atalet dinamometresi.

Disklerin iç ve dış çap ölçülerinin tespiti: Disklerin iç ve dış çapları mikron hassasiyetinde (0,001 mm) Hartford VMC-1020 CNC tezgâhında ölçülmüştür. OEM diskin üretim katalog değerleri mikron olarak tespit edilmiştir.

Yüzey salgılarının ölçülmesi: Bu çalışmada kullanılan disklerin yanal salgıları⁴ diskin hem iç hem de dış çalışma yüzeyinden ölçülmüştür. Disklerin salgı ölçümü; kadranlı komparatörle CNC tezgâhına tek tek bağlanarak yapılmıştır. Aynanın başlangıç noktası sıfırlandıktan sonra disk 360 derece döndürülerek, bir tam turda kadranın hareketi incelenerek geldiği en son noktalar (uç) tespit edilmiştir.

2.4. Korozyon testi

Kaplamaların korozyon testleri 168 saat boyunca %5 NaCl çözeltisinde, ASTM B117 standardına uygun olarak yapılmıştır. Malzemenin korozyon direnci, kızıl pasla kaplanmış yüzey miktarı ile belirlenir. Parçanın bu değerlendirmeyi geçebilmesi için %5’ten az kızıl pas olması gerekir. Korozyon testlerinde tuz solüsyonu 3 yöntemle uygulanabilmektedir. Bunlar; daldırma, püskürtme ve hava atomizasyonlu sis yöntemleridir. Bu çalışmada kaplanmış ve kaplanmamış disk korozyon direnci için hızlandırılmış TS EN ISO 9227 ve ASTM B117 test standartlarına uygun olarak 7 gün (168 saat) tuz püskürtme testine tabi tutulmuş ve Tablo 4’de gösterilen H₂O solüsyonu kullanılmıştır.

Tablo 3. Tam ölçekli atalet dinamometresinin teknik özellikleri

| Teknik Özellik Parametreleri | Birim | Değer |
|---|------------------|------------|
| Maksimum Motor Devri | rpm | 2400 |
| Maksimum Atalet Momenti | Kgm ² | 166 |
| Maksimum Fren Torku | Nm | 5000 |
| Her İki Yön için Maks. Hız (Donanım Limiti) | rpm | 2400 |
| Her İki Yön için Max. Hız (Yazılım Limiti) | rpm | 2160 |
| Havalandırma Maksimum Hızı | rpm | 2600 |
| Test Ekipman Ağırlığı | DA.N | 13.000 |
| Maksimum Dinamometre Yüku | kgmsq | 166 |
| Motoru Durduran Minimum Devir | rpm | ± 20 |
| Hidrolik Sistem Güç Ünitesi Basınç Limiti | bar | 160 |
| Hidrolik Sistem Uygulanabilir Basınç Ölçüsü | bar | 150 |
| Hidrolik Sistem Basınç Alarm Sınırı | bar | 152 |
| Maksimum Gövde Hareketi | mm | 1.900 |
| Maksimum ve Minimum Tork Aralığı | Nm | ± 4500 |

⁴ Disk üreticilerine bağlı olarak bir diskin maksimum yanal salgısı 0,05 ile 0,13 mm arasında olabilmektedir (Halderman, 2000). Aşırı salgı, diskin aşınmasına ve bu aşınmaya bağlı olarak disk kalınlık değişimine neden olabilmektedir (Demir, 2009).

| | | |
|---------------------------------------|-------------------|-----------|
| Torkmetre Mekanik Doğruluğu | Nm | ± 2,5 |
| Termokupl Sıcaklık Aralığı | °C | 0...1000 |
| Termokupl Telemetre Kanal Duyarlılığı | °C | ± 3 |
| Basınç Dönüştürme Skalası | bar | 200 |
| Basınç Dönüştürme Duyarlılığı | bar | ± 0,1 |
| Debimetre Akış Aralığı | l/min | 0,004 - 4 |
| Debimetre duyarlılığı | mm ³ | 10 |
| Havalandırma Boru Çapı | mm | 255 |
| Maksimum Hava Debisi | m ³ /h | 2.200 |
| Motor Gücü | kW | 140 |
| Yükseklik | mm | 2.250 |
| Volan | N° | 4 |
| Boy | mm | 6.950 |

Tablo 4. Disklere uygulanan korozyon testi solüsyonu (Malcolm ve ark., 2001)

| Solüsyonlar | Standart değerler [%] | Test değerleri [%] |
|--------------------|-----------------------|--------------------|
| NaCl | 0,5 | 0,7 |
| CaCl ₂ | 0,1 | 0,1 |
| NaHCO ₃ | 0,075 | 0,075 |

3. Bulgular

Bu çalışmada kaplanmış ve kaplanmamış orijinal disk, FIAT 7-H4020 ve 7-H2000 standartlarına uygun olarak atalet dinamometresinde alıştırma (bedding) ve hot judder I ve II testlerine tabi tutulmuştur.

3.1. Tam ölçekli atalet dinamometresinde yapılan testler

Tam ölçekli atalet dinamometresinde yapılan testin parametreleri Tablo 5’de verilmiştir. Bu standart, otomobillerde kullanılan gri dökme demir fren disklerinin teknik işleme süreçlerinin ardından, işlevsel özelliklerini bulmayı hedeflemektedir. Standart hem ön hem de arka olmak üzere her çeşit fren diskine uygulanmaktadır.

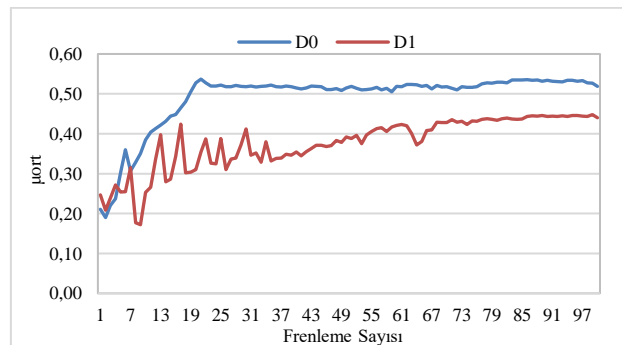
Tablo 5. Atalet dinamometresinde yapılan test

| Testin Adı | Fren Sayısı | İlk Hız (km/h) | Son Hız (km/h) | Fren Başlangıç Sıcaklığı (°C) | Frenleme İvmesi (m/s ²) |
|--------------|-------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Alıştırma | 100 | 80 | 0 | 100 | - |
| Hot Judder-1 | 15 | 152 | 0 | 100 | 1, 2 ve 3 |
| Hot Judder-2 | 15 | 152 | 0 | 300 | 1, 2 ve 3 |

3.1.1. Alıştırma (bedding) testleri

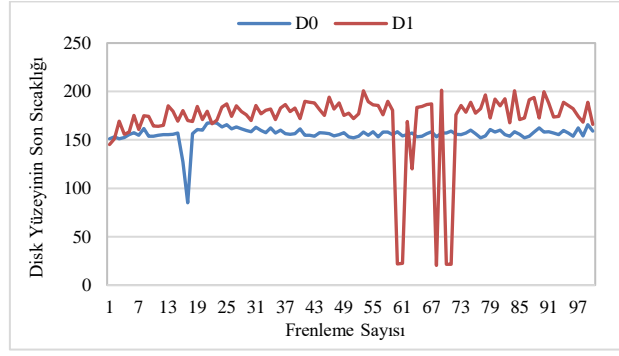
Alıştırma testlerinde elde edilen sonuçlardan; ortalama sürtünme katsayısının fren sayısı ile değişimi Şekil 2’de, disk yüzey sıcaklığının fren sayısı ile değişimi Şekil 3’de, ortalama fren torkunun fren sayısı ile değişimi Şekil 4’de gösterilmiştir.

Şekil 2’de görüldüğü gibi alıştırma testinde kaplanmış ve kaplanmamış diskte meydana gelen ortalama sürtünme katsayısı değeri; D0 diskinde D1 diskine oranla daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Her iki diskin ortalama sürtünme katsayısının (μ_{ort}) 0,3’ün üzerinde olması, literatürde bu alanda yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara uygun görülmektedir. Frenleme tekrar sayısı 60’dan sonra sürtünme katsayısındaki salının daha kararlı bir hale gelmiştir. Son frenleme de her iki diskinde sürtünme katsayısı 0,35’in üzerinde olmuştur.



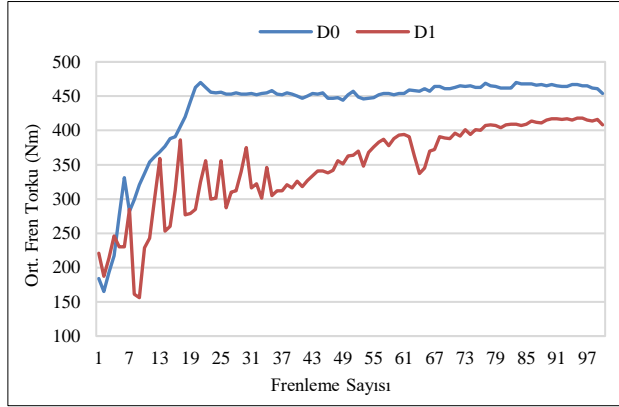
Şekil 2. Alıştırma testinde ortalama sürtünme katsayısının fren sayısı ile değişimi

Şekil 3’de görüldüğü gibi alıştırma testinde D0 diskinin yüzeyi sıcaklık değeri, D1 diski yüzeyi sıcaklık değerinden daha düşüktür. Her iki diskin sıcaklık farkı yaklaşık 20 °C düzeyinde olmuştur. Ayrıca maksimum sıcaklık 200 °C’nin altında gerçekleşmiştir.



Şekil 3. Alıştırma testinde disk yüzey sıcaklığının fren sayısı ile değişimi

Şekil 4’den görüldüğü gibi alıştırma testinde ilk 30 frenleme testinden sonra daha stabil bir frenleme tork değişimi görülmektedir. D0 diski, düşük frenleme tork değişimi ve yüksek ortalama frenleme tork değeri ile daha iyi bir frenleme performansına sahiptir.

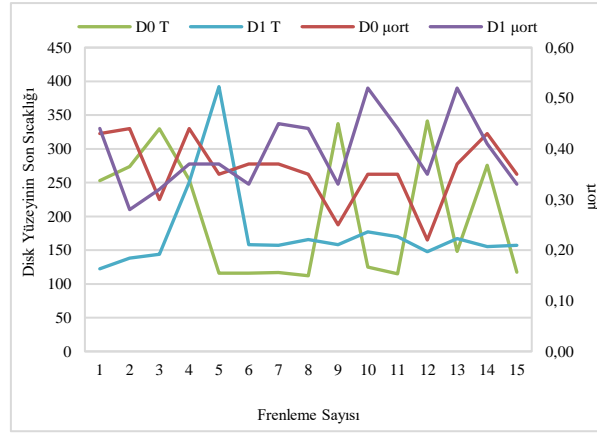


Şekil 4. Alıştırma testinde ortalama fren torkunun fren sayısı ile değişimi

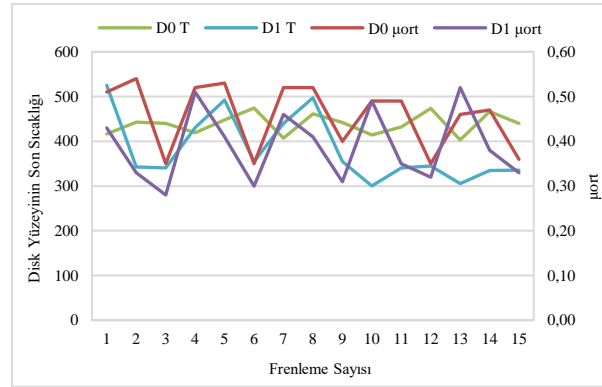
3.2. Hot judder testi

Frenlerdeki sürtünmeden kaynaklanan ısı, temas halindeki balata ile diskin termoelastik distorsiyonuna neden olur. Neticede termomekanik bağlantı termoelastik kararsızlığa (TEI) sebep olabilir. Kritik hız aşıldığında basınç dağılımı kararsız olur ve yükün lokalizasyonu ile ısı üretimine yol açar. Bundan dolayı sürtünen yüzeylerde kızgın noktalar oluşabilmektedir (Thuresson, 2004). Bu durum özellikle fren ve kavrama gibi enerji harcanan sistemlerde hüküm süren bir olaydır. Kızgın noktalar, malzemenin zarar görmesine ve aşınmaya neden olmasının yanı sıra sürtünmeden kaynaklanan ve arzu edilmeyen titreşimlerin de kaynağı olur. Bu durum “ısı pürüzlülük” ya da “ısı titreşim” olarak tanımlanır. TEI ile ilgili yüksek lokal sıcaklıklar malzemelerin bozulmasına, termik çatlaklara ve fren zayıflaması gibi olumsuzlukların başlıca nedenidir (Demir ve ark., 2006).

Atalet dinamometresinde yapılan “hot judder” testleri 2 aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki olan hot judder-I testi; 152 km/h başlangıç hızında, 100 °C başlangıç sıcaklığında, 1, 2 ve 3 m/s² olmak üzere 3 farklı frenleme ivmelerinde 6 s’lik aralıklarla 15 tekrar yapılmıştır. İkinci olarak yapılan hot judder-II testi; 152 km/h başlangıç hızında 300 °C başlangıç sıcaklığında, 1, 2 ve 3 m/s² olmak üzere 3 farklı frenleme ivmelerinde 6 s’lik aralıklarla 15 tekrar gerçekleştirilmiştir. Hot judder I ve II testleri dönen fren disk hızının 0 km/h hıza eşit olacağı duruma kadar frenleme işleminin yapılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu testlerde elde edilen sonuçlardan; hot judder I’de ortalama sürtünme katsayısı ve ortalama disk yüzey sıcaklığının değişimi Şekil 5’de, hot judder II’nin ise Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 5. Hot judder I'de ortalama sürtünme katsayısı ve diskin son sıcaklığının değişimi



Şekil 6. Hot judder II'de ortalama sürtünme katsayısı ve diskin son sıcaklığının değişimi

Şekil 5 ve 6 birlikte değerlendirildiğinde, yapılan tüm frenleme ivme değerleri için artan frenleme başlangıç sıcaklığı (100 °C'den 300 °C'ye) ile ortalama sürtünme katsayısının arttığı tespit edilmiştir. Ortalama disk sıcaklığının değişimi incelendiğinde ise her iki diskte de artan frenleme başlangıç sıcaklığı ile disk son sıcaklığının arttığı saptanmıştır. D0 diskindeki ortalama frenleme torku; diskin artan başlangıç sıcaklıklarında, D1 diskinde oranla daha fazla etkilenmektedir. Burada göze çarpan bir diğer hususta, hot judder I ve II testlerinden değişik frenleme ivmeleri için yüksek disk sıcaklığında (300 °C) disklerde frenleme kararlılığının daha iyi olduğunu söylemek mümkündür.

Tüm testlerden sonra D1 diskinin dış yüzeyinin tahrip olduğu ve dış balatasının ağır hasar⁵ gördüğü tespit edilmiştir (Şekil A1-A2).

3.4. Korozyon testinin değerlendirilmesi

TS EN ISO 9227 ve ASTM B117 standartlarına göre uygulanan 7 gün (168 saat) tuz püskürtme testi sonucunda; kaplanmış ve orijinal (kaplanmamış) disk, Şekil A3'deki resimlerde de görüldüğü gibi kaplanmış diske nazaran çok daha fazla korozyona maruz kalmıştır. Resimler orijinal ve kaplanmış numunelerin iç, dış ve alın yüzeylerinden korozyon testi sonrası alınmıştır. İç yüzey 1 numara, dış yüzey 2 numara ve alın yüzeyi (disk kalınlığı) 0 numara ile kodlanmıştır. Resimlerden açıkça görüldüğü gibi tüm disklerin alın yüzeyinde kaplama olmadığı için çok fazla korozyon oluşmuştur. Resimlerden D0 diskinde yoğun korozyon olduğu görülebilmektedir (Şekil A3). Tüm numunelerde; Vickers sertlik ölçme sonucu belirlenen noktalarda, atalet dinamometresi testleri sonucunda meydana gelen çizik ve aşınma yüzeylerinde bariz bir şekilde korozyon gözlemlenmiştir. Bu durum açıkça göstermektedir ki; darbe alan ve deformasyona uğrayan disk malzemelerinde korozyon oluşumu kaçınılmazdır. Bu yüzden korozyona ve darbelerle karşı dayanımı yüksek malzemelerle yüzey kaplama işlemi gerçekleştirilerek, korozyon miktarında azalma sağlanacaktır.

4. Sonuç

Bu çalışmada, hafif ticari aracın ön tekerlek frenleme sisteminde kullanılan tolerans limitleri dışında aşınmış bir fren diskine kaplama işlemi uygulanmıştır. Kaplanmış ve kaplanmamış disk, FIAT 7-H4020 ve 7-H2000 standartlarına uygun olarak atalet dinamometresinde alıştırma (bedding) ve hot judder test prosedürlerine tabi tutulmuştur. Testler öncesi ve sonrası kaplanmış ve kaplanmamış diskin hem boyutsal hem kütesel aşınması ve yüzey pürüzlülükleri tespit edilmiştir. Ayrıca her 2 diskten alınan numuneler TS EN ISO 9227 ve ASTM B117 test standartlarına uygun olarak korozyon testine tabi tutulmuştur. Bu testlerde;

⁵ Bundan dolayı hem boyutsal hem de geometrik aşınma yanıltıcı olabileceğinden dolayı makaleden çıkarılmıştır.

- Alıştırma testinde D0 diskindeki ortalama sürtünme katsayısı değeri D1 diskinde oranla daha yüksek değere ulaşmıştır. Her iki diskinde sürtünme katsayısının 0,3'n üzerinde olması, literatürde bu alanda yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara uygun görülmektedir. Frenleme tekrar sayısı 60'dan sonra sürtünme katsayısındaki salının daha kararlı bir hale gelmiştir. Yani diskler n alışma evresini tamamlamıştır. Son frenleme de her iki diskinde sürtünme katsayısı 0,35 değerinin üzerinde tespit edilmiştir.
- Alıştırma testinde D0 diskinin yüzey sıcaklık değeri, D1 diski yüzeyi sıcaklık değerinden daha düşüktür. Her iki diskin sıcaklık farkı yaklaşık 20 °C düzeyinde oluşmuştur. Ayrıca maksimum sıcaklık 200 °C'nin altında gerçekleşmiştir.
- Alıştırma testinde ilk 20 frenleme testinden sonra daha stabil bir fren tork değişimi olduğu tespit edilmiştir. D0 diski, düşük frenleme tork değişimi ve yüksek ortalama frenleme tork değeri ile daha iyi bir frenleme performansı sağlamıştır.
- Hot judder I ve II testlerinin sonuçları birlikte irdelendiğinde; yapılan tüm frenleme ivme değerleri için artan frenleme başlangıç sıcaklığı (100 °C'den 300 °C'ye) ile ortalama sürtünme katsayısının arttığı tespit edilmiştir. Ortalama disk sıcaklığının değişimi incelendiğinde ise her iki diskte de artan frenleme başlangıç sıcaklığı ile disk son sıcaklığının arttığı saptanmıştır. D0 diskindeki ortalama frenleme torku; diskin artan başlangıç sıcaklıklarında, D1 diskinde oranla daha fazla etkilenmektedir. Burada göze çarpan bir diğer hususta, hot judder I ve II testlerinden değişik frenleme ivmeleri için yüksek disk sıcaklığında (300 °C) disklerde frenleme kararlılığının daha iyi olduğunu söylemek mümkündür.
- Testler ncesi ve sonrası disk yüzeylerinde yapılan przlrlk ölçümlerinde; testler öncesinde D0 diskinin przlrlk değerinin kaplamalı diskten fazla ve testler sonrasında ise hem D0 hem de D1 diskinin yüzey przlrlk değerlerinde azalma olduğu; ayrıca tüm testlerden sonra D1 diskinin dış yüzeyinin tahrip olduğu ve dış balatasının ağır hasar gördüğü tespit edilmiştir (şekil A1-A2).
- TS EN ISO 9227 ve ASTM B117 standartlarına göre uygulanan korozyon testinde; orijinal disk, kaplanmış diske nazaran çok daha fazla korozyona maruz kalmıştır. Ayrıca iki diskinde alın yüzeyinde kaplama olmadığı için çok fazla korozyon oluşmuştur. D0 diskinde yoğun korozyon olduğu görülebilmektedir (şekil A3). İki numunede; Vickers sertlik lme sonucu belirlenen noktalarda, atalet dinamometresi testleri sonucunda meydana gelen çizik ve aşınma yüzeylerinde bariz bir şekilde korozyon gözlemlenmiştir. Bu durum açıkça göstermektedir ki; darbe alan ve deformatsiyona uğrayan disk malzemelerinde korozyon oluşumu kaçınılmazdır. Bu yüzden korozyona ve darbelere karşı dayanımı yüksek malzemelerle yüzey kaplama işlemi gerçekleştirilerek, korozyon miktarında azalma sağlanacaktır.

Kısaltmalar

TEI : Termoelastik kararsızlık

D : Disk

FMVSS : Federal Motor Vehicle Safety Standards

SAE : Society of Automotive Engineers

JASO : Japan Automobile Standards Organization

ISO : International Organization for Standardization

JIS : Japanese Industrial Standard

OEM : Orijinal Ekipman reticileri

Semboller

μ : Sürtünme Katsayısı

Alt İndisler

ort : Ortalama

Not: Bu alışma öz (2012) tarafından yapılan "Aşınmış Taşıt Fren Disklerinin Kaplama Tozları ile Kaplanarak Yeniden Kullanılabilirliğinin Deneysel Araştırılması" konulu doktora tezinden yararlanılarak gerekleştirilmiştir.

Kaynaka

Anonymous, How to read and understand the aftermarket standard SAE J2430/brake effectiveness evaluation procedure test report, Link Testing Laboratories B.E.E.P. task force, 2002.

Bijwe, J., Nidhi., Majumdar, N., Satapathy, B.K., Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials, Wear, 259, 1068–1078, 2005.

Blau P.J., Jolly, B.C., Qu, J., Peter, W.H., Blue, C.A., Tribological investigation of titanium-based materials for brakes, Wear, 203, 1202-1211, 2007.

Chichinadze, A. V., Temperature Distribution in Disk Brake", Friction and Wear in Machinery -15, 259-275, 1962.

Clare, J.H., Crawford, D.E., Thermal spray coatings, Metals Handbook, 5, 361-Halamoğlu, T., Metal Püskürtme Yöntemiyle Aşınmaya Dayanıklı Kaplamalar, Yüzey İşlemler Dergisi, Eylül-Ekim,2003 Syf.154-159375, 1982.

Demir, A., avdar, A., Kılıçaslan, İ., Diskli Frenlerde Termo-Elastik Kararsızlığın İncelenmesi", Uluslararası Mesleki ve Teknik Eğitim Teknolojileri Kongresi – MTET, 2006.

Demir, A., Fren Disklerine Uygulanan Kaplamaların Frenleme Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 2009.

Demir, A., Samur, R. and Kiliaslan, İ., Investigation of the coatings applied onto brake discs on disc-brake pad pair, 12-20, 2008.

Dmitriev, A.I., Yu Smolin, A., Psakhie, S.G., sterle, W., Kloss, H. ve Popov, V.L., "Computer modelling of local tribological contact by the example of the automotive brake friction pair", Physical Mesomechanics, 11, 1-2, 73-84, 2008

Ellis, K., The effect of cast iron disc brake metallurgy on friction and wear characteristic, The 2nd International Seminar on Automotive Braking Recent Developments and Future Trends, Britol, UK, (1998).

Gktan, A., Gney, A., Ereke, M., Taşıt Frenleri, Alliedsignal Automotive, Türkiye, Panel Matbaacılık, ISBN 975-95017-0-8, 1995.

- Halderman, J.D., *Automotive Brake Systems*, Second Edition, Prentice-Hall, 2000.
- Lee, K., Barber, J.R., An experimental investigation of frictionally excited thermoelastic instability in automotive disk brakes under a drag brake application, *Journal of Tribology*, 116, 3, 409–414, 1994.
- Lee, K., Numerical prediction of brake fluid temperature rise during braking and heat soaking, SAE Technical Paper Series, 1999-01-0483, 1999.
- Limpert, R., “*Brake Design and Safety*”, Third Edition, Society of Automotive Engineers, Warrendale, 2001.
- Malcolm K. Stanford, Vinod K. Jain., Friction and wear characteristics of hard coatings, *Wear* 251, 990-996, 2001.
- Mingxi, L., Yizhu, H, Xiaomin, Y., “Effect of nano-Y2O3 on microstructure of laser cladding cobalt-based alloy coatings”, *Applied Surface Science*, 252, 8, 2882-2887, (2005)
- Natarajan N, Vijayarangan S, Rajendran I., Wear behavior of A356/25SiCp aluminum matrix composites sliding against automobile friction material. *Wear* 261, 812–822, 2006.
- Öz, A., Aşınmış Taşıt Fren Disklerinin Kaplama Tozları İle Kaplanarak Yeniden Kullanılabilirliğinin Deneysel Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 2012.
- Smith, R.W., Fast, R.D., The future of thermal spray, *Welding Journal*, 7, 3 (8), 43-50, (1994)
- Stanford, M.K. ve Jain, V.K., Friction and wear characteristics of hard coatings, *Wear*, 250/51, 990–996, 2001.
- Sulzer Metco: *Thermal Spray Materials Guide*, Şubat 2006.
- Thuresson, D., Influence of material properties on sliding contact braking applications, *Wear*, 257, 451-460, 2004.
- Uyyuru RK, Surappa MK, Brusethaug S., Effect of reinforcement volume fraction and size distribution on the tribological behavior of Al-composite/ brake pad tribo-couple, *Wear*, 260, 1248–1255, 2006.
- William C. Orthwein, *Clutches and Brakes Design and Selection*, Second Edition, ISBN: 0-8247-4876-X, Marcel Dekker, 2004.