

**KAPLANMIŞ OTOMOTİV FREN DİSKİNİN
FRENLEME PERFORMANSINA ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Bekir GÜNEY

DANIŞMAN

Doç. Dr. İbrahim MUTLU

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

EYLÜL 2013

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**KAPLANMIŞ OTOMOTİV FREN DİSKİNİN
FRENLEME PERFORMANSINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Bekir GÜNEY

**DANIŞMAN
Doç. Dr. İbrahim MUTLU**

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

EYLÜL 2013

TEZ ONAY SAYFASI

Doç. Dr. İbrahim MUTLU danışmanlığında Bekir GÜNEY tarafından hazırlanan “KAPLANMIŞ OTOMOTİV FREN DİSKİNİN FRENLEME PERFORMANSINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 25/09/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metal Eğitimi Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Görevi	Unvan, Adı ve Soyadı	İmza
Başkan	Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	
Üye	Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	
Üye	Prof. Dr. Şükrü TAKTAK Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	
Üye (Danışman)	Doç. Dr. İbrahim MUTLU Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	
Üye	Doç. Dr. Mustafa AYDIN Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun

...../09/2013 tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİMİ

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

25.09.2013

Bekir GÜNEY

ÖZET
Doktora Tezi

**KAPLANMIŞ OTOMOTİV FREN DİSKİNİN
FRENLEME PERFORMANSINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Bekir GÜNEY

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İbrahim MUTLU

Bu çalışmada, otomobil fren disklerinin sürtünme ve termo-mekanik davranışlarını iyileştirerek frenleme performansını arttırmak için hava kanallı otomobil ön fren diskleri, Cr_2O_3 -%40 TiO_2 seramik tozu plazma püskürtme, NiCrBSi-%35 W_2C ve NiCrBSi kompozit tozları alevle püskürtme ve ergitme, W_2C -%12Ni tozu yüksek hızlı oksijen yakıtlı püskürtme (HVOF-High Velocity Oxy-Fuel) kaplama yöntemleri kullanılarak kaplanmıştır. Frenleme performansı SAE J2430-BEEP “Binek otomobilleri ve kamyonet frenleri için dinamometre etkinlik karakterizasyon testi-Fren değerlendirme prosedürü” test standardına göre fren test cihazında yapılmıştır. Bu testlerde disklerin farklı hız, sıcaklık, basınç vb. gibi değişik çalışma şartları altındaki frenleme performansları belirlenmiştir.

Elde edilen kaplama tabakalarının mikrografları optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu yardımıyla çekilerek enerji dağılımlı spektrometre ile analizleri yapılmıştır. Frenleme testleri öncesi ve sonrasında orijinal ve kaplanmış diskler ile bunlara ait balataların yüzey pürüzlülüğü, ağırlık aşınması, kalınlık kaybı, yanal salgılar, mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. W_2C -%12Ni ve NiCrBSi kaplamalı diskler en yüksek sürtünme katsayısı sergilerken, en yüksek aşınma direnci NiCrBSi-%35 W_2C ve Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplamalı disklerde gerçekleşmiştir.

2013, xiii + 157 sayfa

Anahtar Kelimeler: Fren Diski, Dökme Demir, Aşınma, Sürtünme, Kaplama

ABSTRACT
Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF EFFECT TO COATED
AUTOMOTIVE BRAKE DISC ON BRAKING PERFORMANCE

Bekir GÜNEY

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metal Education

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim MUTLU

In this study, in order to improve braking performance by developing friction and thermo-mechanical behavior of automotive brake discs, front brake discs with ventilation channel were coated by using Cr_2O_3 -40% TiO_2 plasma sprayed ceramic powder, NiCrBSi-35% W_2C NiCrBSi composite powders flame spray and melting, W_2C -12%Ni powder, high-speed oxygen fuel spraying (HVOF-High Velocity Oxy-Fuel). Braking performance SAE J2430-BEEP was made in brake tester in accordance with test standards "Dynamometer Effectiveness Characterization Test for Passenger Car and Light Truck Brake Friction Products-Brake Effectiveness Evaluation Procedure". In these tests, braking performances of these discs under different operating conditions such as different speed, temperature, pressure and so on.

Micrographs of obtained coating layers were analyzed with an energy dispersive spectrometer by capturing with optical microscopy and scanning electron microscopy. Before and after braking tests, surface roughness, weight, wear, thickness loss, lateral secretions, micro hardness values of original and coated disks and their linings were measured. While W_2C -12%Ni and NiCrBSi coated discs exhibiting the highest friction coefficient, the highest wear resistance occurred on NiCrBSi-35% W_2C and Cr_2O_3 -40% TiO_2 coated disks.

2013, xiii + 157 pages

Keywords: Disc Brake, Cast Iron, Wear, Friction, Coating

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması esnasında fikir, bilgi ve tecrübelerinden fazlasıyla faydalandığım, bana öncülük ve rehberlik eden, danışmanım ve değerli hocam Doç. Dr. İbrahim MUTLU'ya en derin teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmaları sırasında düşüncelerini benimle paylaşan, çalışmalarımı ilgiyle takip eden, tez izleme komitesi üyesi değerli hocalarım Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ, Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN'a, teşvik ve desteklerinden dolayı değerli hocalarım Prof. Dr. Süleyman TAŐGETİREN ve Prof. Dr. Şükrü TAKTAK'a, çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç Dr. Mehmet ÇAKMAKKAYA, Yrd. Doç. Dr. İbrahim YAVUZ ve Mustafa NARTKAYA hocalarıma, kaplamaların ve deneylerin yapılmasında büyük desteğini gördüğüm kıymetli hocam Yrd. Doç. Dr. Ramazan SAMUR'a, sabır ve desteklerinden dolayı sevgili eşime, canım oğlum ve kızıma, moral ve manevi desteklerinden dolayı canım aileme, tezin yazımında ve kontrol edilmesinde emeği geçen tüm hocalarıma, arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bekir GÜNEY

AFYONKARAHİSAR, Eylül 2013

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
RESİMLER DİZİNİ	xi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	5
2.1 Literatür Araştırması	5
2.2 Isıl Püskürtme Kaplama Yöntemi ve Çeşitleri	10
2.2.1 Plazma Püskürtme Kaplama Yöntemi	16
2.2.2 Alev Püskürtme ve Ergitme Kaplama Yöntemi.....	18
2.2.3 Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtlı Püskürtme (HVOF) Kaplama Yöntemi.....	19
2.3 Fren Sistemi ve Fren Sistemlerinde Tribolojik Mekanizmalar.....	21
2.3.1 Fren Sisteminin Yapısı.....	21
2.3.2 Fren Sistemi Elemanları.....	23
2.3.2.1 Diskler	23
2.3.2.2 Kaliperler.....	24
2.3.2.3 Fren Balataları	25
2.4 Sürtünme ve Aşınma.....	26
2.4.1 Sürtünme	28
2.4.1.1 Sürtünme Kanunları	29
2.4.1.2 Sürtünme Katsayısı.....	30
2.4.2 Aşınma	31
2.4.3 Fren Sistemlerinde Sürtünme ve Sürtünmeyi Etkileyen Faktörler	32
2.4.3.1 Kayma Hızının Sürtünmeye Etkisi.....	32
2.4.3.2 Basıncın Sürtünmeye Etkisi	32
2.4.3.3 Sıcaklığın Sürtünmeye Etkisi	33
2.4.3.4 Balata Yapısının Sürtünmeye Etkisi.....	33
2.4.3.5 Disk Yapısının Sürtünmeye Etkisi	34

	Sayfa
2.4.3.6 Frenleme Süre ve Sayısının Sürtünmeye Etkisi	35
2.4.3.7 Temas Alanının Sürtünmeye Etkisi.....	35
3. MATERYAL ve METOD	37
3.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	37
3.1.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Disk ve Balataların Özellikleri	37
3.1.2 Kaplama Tozlarının Seçimi	41
3.1.3 Kaplama Yöntemlerinin Seçimi.....	41
3.1.4 Fren Test Standartları ve Frenleme Performansı Değerlendirme Prosedürü	42
3.2 Mikroyapı Çalışmaları	45
3.3 Sertlik ve Dayanım Testleri	46
3.4 Deneysel Çalışmada Kullanılan Makina ve Cihazlar.....	47
3.4.1 Fren Test Cihazı ve Özellikleri	47
3.4.2 Yük Hücresi	49
3.4.3 İnvörtör.....	50
3.4.4 Temassız İnfared Termometre	51
3.4.5 Devir Sensörü.....	51
3.4.6 Basınç Sensörü	52
3.4.7 Hidrolik Ünite	52
3.4.8 Kaliper ve Balata Tutucu Pabuç.....	52
3.5 Test Prosedürü Bilgisayar Otomasyon Programı.....	53
3.6 Hassas Teraziler	58
3.7 Mikrometre	58
3.8 Perthometre.....	59
3.9 Komparatör	59
3.10 Sertlik Ölçüm Cihazı	60
3.11 Numune Kesme Cihazı	60
3.12 Numune Parlatma Cihazı	61
3.13 Kesilen Numuneler ve Soğuk Bakalite Alınması	61
3.14 Taramalı Elektron Mikroskobu ve Enerji Dağılımlı Spektrometre	62
3.15 Spektral Analiz Cihazı	63
3.16 Işık Mikroskobu.....	64

	Sayfa
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	65
4.1 Kaplama Tozlarının Özellikleri ve Disklerin Kaplanması	65
4.1.1 Cr ₂ O ₃ -%40TiO ₂ Tozunun Özellikleri.....	67
4.1.2 NiCrBSi-%35W ₂ C ve NiCrBSi Tozlarının Özellikleri.....	69
4.1.3 W ₂ C-%12Ni Tozunun Özellikleri.....	71
4.1.4 Disk Yüzeylerinin Kaplamaya Hazırlanması.....	72
4.1.5 Kaplama Yöntemlerinin Uygulanması.....	73
4.1.5.1 Plazma Püskürtme Kaplama Yönteminin Uygulanması	74
4.1.5.2 Alev Püskürtme ve Ergitme Kaplama Yönteminin Uygulanması.....	75
4.1.5.3 HVOF Püskürtme Kaplama Yönteminin Uygulanması	76
4.2 Disklerin Mikroyapılarının İncelenmesi ve Analizi	77
4.2.1 Plazma Püskürtme Yöntemiyle Cr ₂ O ₃ -%40TiO ₂ Kaplanan Diskin Mikroyapı Özellikleri	77
4.2.2 Alev Püskürtme ve Ergitme Yöntemiyle NiCrBSi-%35W ₂ C Kaplanan Diskin Mikroyapı Özellikleri.....	81
4.2.3 HVOF Yöntemiyle W ₂ C-%12Ni Kaplanan Diskin Mikroyapı Özellikleri...84	84
4.2.4 Alev Püskürtme ve Ergitme Yöntemiyle NiCrBSi Kaplanan Diskin Mikroyapı Özellikleri	88
4.2.5 OEM Diskin Mikroyapı Özellikleri	91
4.3 OEM ve Kaplanmış Disklerin Yüzey Pürüzlülüğü.....	93
4.4 OEM ve Kaplanmış Disklerin Yanal Salgılar.....	97
4.5 OEM ve Kaplanmış Disklerin Mikro Sertlik Değerleri.....	99
4.6 OEM ve Kaplanmış Disklerin ve Balataların Aşınma Değerleri.....	101
4.7 OEM ve Kaplanmış Disklerin Frenleme Performans Testleri.....	110
4.7.1 Plazma Püskürtme Yöntemiyle Cr ₂ O ₃ -%40TiO ₂ Kaplanan Diskin Frenleme Performansı.....	111
4.7.2 Alev Püskürtme ve Ergitme Yöntemiyle NiCrBSi-%35W ₂ C Kaplanan Diskin Frenleme Performansı	116
4.7.3 HVOF Yöntemiyle W ₂ C-%12Ni Kaplanan Diskin Frenleme Performansı	121
4.7.4 Alev Püskürtme ve Ergitme Yöntemiyle NiCrBSi Tozu Kullanılarak Kaplanan Diskin Frenleme Performansı.....	126

	Sayfa
4.7.5 Orijinal Diskin Frenleme Performansı	131
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	137
5.1 Sonuçlar	138
5.2 Öneriler	143
6. KAYNAKLAR	144
6.1 İnternet Kaynakları	156
ÖZGEÇMİŞ.....	157

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1	Isıl püskürtme yönteminin şematik gösterimi	11
Şekil 2.2	Isıl püskürtme tabakasının oluşumunun gösterimi	12
Şekil 2.3	Plazma püskürtme yönteminin düzeneği	17
Şekil 2.4	Alev püskürtme yönteminin düzeneği	19
Şekil 2.5	HVOF püskürtme yönteminin düzeneği	20
Şekil 2.6	Disk fren ve kampanalı fren sistemi elemanları	23
Şekil 2.7	Tribolojik sistemin şematik gösterimi	27
Şekil 3.1	Fren test cihazının şematik gösterimi.	49
Şekil 4.1	Plazma püskürtme yöntemiyle Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplanan diskin ışık mikroskobu mikrografı, a) yüzeyinden x50, b) kesitinden x100.	77
Şekil 4.2	Plazma püskürtme yöntemiyle Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplanan diskin taramalı elektron mikroskop (SEM) mikrorafı, a) yüzeyden x500, b) yüzeyden x200, c) kesitinden x85, d) kesitinden x500.	79
Şekil 4.3	Plazma püskürtme yöntemiyle Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplanan diskin kesitinden alınan taramalı elektron mikroskop (SEM) mikrorafı ve 1, 2, 3 ve 4 numaralı bölgelerinin EDS analizleri.	80
Şekil 4.4	Alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle $NiCrBSi$ -%35 W_2C kaplanan diskin ışık mikroskobu mikrografı, a) yüzeyinden, b) kesitinden.	81
Şekil 4.5	Alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle $NiCrBSi$ -%35 W_2C kaplanan diskin kesitinden ve yüzeyinden alınan SEM mikrografı, a) kesitinden x35, b) kesitinden x500, c) yüzeyinden x500, yüzeyinden x2000.	82
Şekil 4.6	Alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle $NiCrBSi$ -%35 W_2C kaplanan diskin kesitinden alınan SEM mikrografı ve 1, 2, 3 ve 4 numaralı bölgelerinin EDS analizleri.	83
Şekil 4.7	HVOF püskürtme yöntemiyle W_2C -%12 Ni kaplanan diskin ışık mikroskobu mikrografı, a) yüzeyinden x100, b) kesitinden x50.	85
Şekil 4.8	HVOF püskürtme yöntemiyle W_2C -%12 Ni kaplanan diskin yüzeyinden ve kesitinden alınan SEM mikrografı, a) yüzeyinden x1000, b) yüzeyinden x5000, c) kesitinden x500, d) kesitinden x2000.	86

Şekil 4.9 HVOF püskürtme yöntemiyle W_2C -% 12Ni kaplanan diskin kesitinden alınan SEM migrografi ve 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerinin EDS analizleri.	87
Şekil 4.10 Alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi kaplanan diskin ışık mikroskobu mikrografi, a) yüzeyinden x100, b) kesitinden x50.	88
Şekil 4.11 Alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi kaplanan diskin yüzeyinden ve kesitinden alınan SEM migrografı, a) kesitinden x50, b) yüzeyinden x500, c) kesitinden x1000, d) yüzeyinden x1000.	89
Şekil 4.12 Alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi kaplanan diskin yüzeyinden alınan SEM migrografi ve 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerinin EDS analizleri.	90
Şekil 4.13 Dökme demir altlık malzemesinin yüzeyinden alınan ışık mikroskobu mikrografı, a) x70, b) x300.	92
Şekil 4.14 Dökme demir altlık malzemesinin yüzeyinden alınan SEM migrografi ve 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerinin EDS analizleri.	92
Şekil 4.15 OEM ve kaplanmış fren disklerin yüzey pürüzlülük değerleri.	95
Şekil 4.16 Balataların yüzey pürüzlülük değerleri.	97
Şekil 4.17 Disklerin sürtünme yüzeyinden ölçülen salgı miktarları.	99
Şekil 4.18 OEM ve kaplanmış fren disklerin sertlik değerleri.	100
Şekil 4.19 Frenleme performans testlerinde kullanılan disk-balata ikilisi.	102
Şekil 4.20 Disk ve balataların ağırlık kaybı değerleri.	106
Şekil 4.21 Disk ve balataların kalınlık kaybı değerleri.	109
Şekil 4.22 Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplanmış fren diskinin (D1 diski) SAE J2430 test standardına göre frenleme performansı grafiği.	113
Şekil 4.23 NiCrBSi-%35 W_2C kaplanmış fren diskinin (D2 diski) SAE J2430 test standardına göre frenleme performansı grafiği.	118
Şekil 4.24 W_2C -% 12Ni kaplanmış fren diskinin (D3 diski) SAE J2430 test standardına göre frenleme performansı grafiği.	124
Şekil 4.25 NiCrBSi kaplanmış fren diskinin (D4 diski) SAE J2430 test standardına göre frenleme performansı grafiği.	129
Şekil 4.26 Orijinal fren diskinin (D5 diski) SAE J2430 test standardına göre frenleme performansı grafiği.	134

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Isıl püskürtme proseslerinin karşılaştırılması.....	14
Tablo 2.2 Isıl püskürtme yöntemleri	15
Tablo 3.1 Deneysel çalışmada kullanılan diskin özellikleri.....	38
Tablo 3.2 Gri dökme demir disk malzemesinin içeriği.....	38
Tablo 3.3 Balataların sürtünme katsayısına göre sınıflandırılması.....	40
Tablo 3.4 Kullanılan balataların sürtünme katsayısı değerleri.....	40
Tablo 3.5 Deneysel çalışmada kullanılan balataların yoğunluk değerleri.....	41
Tablo 3.6 SAE J2430 frenleme etkinlik test prosedürü	44
Tablo 4.1 Kaplama yapılan dökme demir disk ve kaplama tozlarının özellikleri.....	66
Tablo 4.2 Plazma püskürtme kaplama parametreleri.....	74
Tablo 4.3 NiCrBSi-%35W ₂ C ve NiCrBSi tozlarının alev püskürtme ve ergitme yöntemi ile kaplama parametreleri.....	75
Tablo 4.4 Oksijen ve asetilen gaz karışımının özellikleri	76
Tablo 4.5 W ₂ C-%12Ni kaplama tozunun HVOF yöntemi ile kaplama parametreleri..	76
Tablo 4.6 OEM ve kaplanmış fren disklerinin yüzey pürüzlülük değerleri.....	94
Tablo 4.7 Balataların yüzey pürüzlülük değerleri.....	96
Tablo 4.8 Disklerin sürtünme yüzeyinden ölçülen salgı miktarları.....	98
Tablo 4.9 OEM ve kaplanmış disklerin mikro sertlik değerleri.....	100
Tablo 4.10 OEM ve kaplanmış disklerin ağırlık kaybı değerleri.....	103
Tablo 4.11 Balataların ağırlık kaybı değerleri.....	105
Tablo 4.12 OEM ve kaplanmış disklerin kalınlık kaybı değerleri.....	107
Tablo 4.13 Balataların kalınlık kaybı değerleri.....	108
Tablo 5.1 Deneysel çalışmalarda elde edilen performans değerleri.....	137

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 3.1 Çalışmada kullanılan fren disklerinin görünüşü. (1) Plazma püskürtme ile Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplanmış disk, (2) Alev püskürtme ve ergitme ile NiCrBSi-%35 W_2C kaplanmış disk, (3) HVOF püskürtme yöntemi ile W_2C -%12Ni kaplanmış disk, (4) Alev püskürtme ve ergitme ile NiCrBSi kaplanmış disk, (5) Orijinal disk.	39
Resim 3.2 Deneysel çalışmada kullanılan aynı içeriğe sahip ticari fren balatalarının görünüşü. (1) 1 no'lu diske ait balata, (2) 2 no'lu diske ait balata, (3) 3 no'lu diske ait balata, (4) 4 no'lu diske ait balata, (5) 5 no'lu diske ait balata.	39
Resim 3.3 Fren test cihazı	48
Resim 3.4 Yük hücresi.	50
Resim 3.5 Devir ayarlayıcı invertör.	50
Resim 3.6 Temassız infrared termometre.	51
Resim 3.7 Devir ölçme sensörü.	51
Resim 3.8 Basınç ölçme sensörü.....	52
Resim 3.9 Kaliper ve balata tutucu pabuç.....	53
Resim 3.10 Fren test cihazı otomatik kontrol paneli.....	56
Resim 3.11 Bilgisayar kontrol paneli grafik göstergesi.	57
Resim 3.12 Fren test cihazı manuel kontrol paneli.	57
Resim 3.13 Disk ve balata ağırlıklarını ölçmede kullanılan teraziler.	58
Resim 3.14 Disk kalınlıklarını ölçmede kullanılan dijital mikrometre.....	58
Resim 3.15 Mahr perthometer yüzey yürüzlülük cihazı.	59
Resim 3.16 Disk salgılarının ölçümünde kullanılan komparatör.....	59
Resim 3.17 Mikro sertlik ölçme cihazı.	60
Resim 3.18 Numune kesme cihazı.	60
Resim 3.19 Numune parlatma cihazı.	61
Resim 3.20 Bakalit kaplama cihazı.	62
Resim 3.21 Bakalitle kaplanmış ve parlatılmış numuneler.....	62
Resim 3.22 Enerji dağılımlı spektrometre ekipmanı ile taramalı elektron mikroskobu.	63
Resim 3.23 Elementel analiz cihazı.	64
Resim 3.24 Işık mikroskobu.	64

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Cr_2O_3	Krom Oksit
TiO_2	Titanyum Oksit
W_2C	Tungsten Karbür
Ni	Nikel
NiCrBSi	Nikel Krom Bor Silisyum
Mo	Molibten
Al	Alüminyum
CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
SO_2	Kükürtdioksit
Ar	Argon
He	Helyum
N_2	Azot
H_2	Hidrojen
Ti	Titanyum
Ti-6Al-4V (Ti64)	Titanyum Alaşımı
FeO	Demir Oksit
μm	Mikrometre
μ	Sürtünme Katsayısı

Kısaltmalar

MMK	Metal Matrisli Kompozit
Al-MMK	Alüminyum-Metal Matrisli Kompozit
HVOF	Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtıyla Püskürtme
NAO	Asbest İçermeyen Organikler
APS	Atmosferik Plazma Püskürtme
IPS	Inert Gaz Altında Plazma Püskürtme
VPS	Vakum Altında Plazma Püskürtme
SPS	Su Altında Plazma Püskürtme
GI25O	Gri Dökme Demir
GIHC	Yüksek Karbonlu Gri Dökme Demir
GI25OTi	Titanyum Alaşımli Dökme Demir
CGI	Kompakt Grafitli Dökme Demir
SAE	Otomotiv Mühendisleri Derneği (Amerika)
TS	Türk Standartları
BEEP	Fren Değerlendirme Prosedürü
UMTRI	Michigan Üniversitesi Ulaşım Araştırmaları Enstitüsü
FMVSS	Federal Motorlu Taşıtlar Emniyet Standartları
FMSI	Sürtünme Malzemeleri Standartları Enstitüsü
OEM	Orijinal Ekipman Üreticisi
Ra	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	Enerji Dağılımlı Spektrometre
XRF	X Işını Floresansı
LM	Işık Mikroskobu
BMC	Fren Üreticileri Komitesi
VSD	Vickers Sertlik Değeri

1. GİRİŞ

Teknolojinin artan bir ivmeyle ilerlemesi sonucu, günümüzde, kullanılan çoğu mühendislik malzemesinin performansı, ağırlaşan çalışma şartları karşısında yetersiz kalabilmektedir. Malzeme bilimi ve mühendisliği bu gelişmelere paralel olarak hızla ilerleme göstererek, hem geleneksel malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesine hem de gelişen teknolojinin ihtiyacı olan yeni malzemelerin üretimi ve uygulanmasına öncülük etmektedir.

Malzemede bulunmayan fakat istenilen yüzey özellikleri, Ulutan (2007)'in çalışmasında da belirtildiği gibi malzeme üzerine gerekli yüzey işlemleri uygulanarak elde edilmektedir. Bu işlemlerin yaygın olanlarından birisi de yüzeyin farklı malzemelerle "kaplanması" işlemidir. Metal yüzeylerinin dış ortamların etkilerinden korunması, kullanım yerlerinde maruz kaldıkları yorulma, korozyon, sürtünme ve aşınma etkilerine direnç göstermesi amacıyla kullanılan kaplama ve yüzey geliştirme tekniklerine olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Malzeme yüzeyinin sert ve aşınmaya dayanıklı, ana malzemenin de yeterli mukavemette ve sünek olması gerektiğinden, pratik uygulamalarda yüzey sertleştirme veya yüzey kaplama yöntemleri tercih edilir. Otomobil fren sistemi elemanlarının da termal iletkenlik, termal genişleme, aşınma direnci, sürtünme katsayısı ve frenleme karakteristiği özelliklerini istenen düzeyde karşılaması gerekmektedir.

Günümüzde, otomotiv sanayiindeki teknolojik gelişmeler yeni ve daha üstün performanslı otomotiv parçalarının üretilmesine sebep olmaktadır. Bu sayede hızı ve gücü yüksek motorların emniyetli ve güvenli şekilde frenleme karakteristiği kazanması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, fren diskleri geleneksel dökme demir malzemeden başka çok pahalı kompozit ve seramik malzemelerden de üretilmektedir. Bu yeni malzemeler ileri teknoloji ürünü olduklarından temin etmek oldukça güç ve pahalıdır. Bu teknolojik malzemelere alternatif olabilecek ve bunların teknik özelliklerini taşıyabilecek malzemeleri üretmek gerekmektedir. Bunu daha kolay ve ekonomik yoldan elde etmek için geleneksel fren disklerinin yüzeylerini kaplayarak daha üstün sürtünme yüzey özelliklerine sahip malzeme üretme çalışması yapmak, bu çalışmanın önemini ortaya çıkarmaktadır.

Reinsch (1970)'e göre frenlerin fonksiyonu; hareket enerjisini absorbe ederek, ısıya çevirmek ve bu ısıyı da atmosfere yaymaktır. Eğer fren sistemlerine çıkabileceğinden daha fazla ısı verilirse fren sistemlerindeki sürtünme katsayısının düştüğü görülecektir ve frenlerin durdurma kabiliyetlerinin azalmasına neden olacaktır.

Hareket halindeki taşıtlar, bir tehlike anında sürtünmeli veya kaymalı zorlamaya maruz bırakılıp kinetik enerjileri alınır ve yavaşlatılıp durdurulurlar. Bunun yapılabilmesi için sürtünen yüzeylerin oluşturduğu malzeme çiftinin sürtünme katsayısı frenlemede önemli rol almaktadır. Sürtünen yüzeylerdeki durdurma tesiri, iyi sürtünme kuvveti temin eden malzeme çiftini seçmek veya yapmakla mümkün olur. Bu malzeme çiftini seçmek veya mevcutlarından daha iyisini yapmak piyasada kullanılan mevcut malzeme çiftlerinin frenlemeye etkisinin bilinmesi ile mümkündür. Mevcut malzeme çiftlerinin frenlemeye etkisinin bulunabilmesi, her malzemenin tesirinin ayrı ayrı değerlendirilmesi ile sağlanabilir (Mutlu 2002).

Frenleme sırasında aracın kinetik enerjisi sürtünmeden dolayı ısı enerjisine çevrilmektedir. Frenleme esnasında, fren sistemi ve balata malzemesi için belirlenmiş ısı kararlılığın üzerine çıkıldığında balataadaki sürtünme katsayısı düşer. Frenlerin performansındaki azalma; hatalı çalışma, hızlı balata aşınması ve ses olarak kendini gösterir. Sıcaklık artışı balataların aşınma direncini azaltır. Belirli bir sıcaklıktan sonra aşınma hızla artar. Aşınmanın hızla yükseldiği bu sıcaklığa “balata aşınma sıcaklığı” denir. Bu sıcaklığın yüksek olması balatanın bir iyilik göstergesidir. Frenleme esnasında oluşan sıcaklığın, balata malzemesinin aşınma noktası sıcaklığının altında bulunması durumlarında balatalar normal görevlerini yaparlar (Boz 1999). Fren sistemlerinin sürekli veya uzun süreli olarak aşırı sıcaklıklara maruz kalmaları sistem elemanlarının zarar görmesine neden olmaktadır.

Sürtünme ve aşınma problemlerinin çözümünde en çok başvurulan yöntemlerden birisi kaplamalardır. Taban malzeme özelliklerinden çok farklı özelliklere sahip kaplama materyallerini yüzeye biriktirerek yüzey özelliklerini değiştirme temeline dayanan kaplama proseslerinin kullanımı ile üstün tribolojik özelliklerin elde edilmesi hem hedeflenmiş hem de mümkün olmuştur.

Çelik vd. (1997)'e göre ısı püskürtme ile seramik, metalik ve sermet kaplamalar uçak, otomobil ve diğer endüstrilerde yüzeyden istenen performansını artırmaktadır.

Literatürde fren disklerinin özelliklerini geliştirmek için yapılan kaplama çalışmalarında, ağırlıklı olarak disk-balata ikilisinin tribolojik davranışı incelemelerinde sürtünme elemanlarının kimyasal kompozisyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır. Disklere uygulanan kaplamalara yönelik çalışmalarda ise özellikle farklı kaplama metodu ve değişik kaplama malzemeleri üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır.

Yapılan bu çalışmada disk-balata çiftinin hem sürtünme hem de termik davranışını iyileştirerek frenleme performansını artırmak için 5 adet hava kanallı otomobil ön fren diskinden birisi orijinal haliyle dört tanesi yüzey kaplaması yapılarak kullanılmıştır. Bu diskler, Cr_2O_3 -%40 TiO_2 seramik tozu plazma püskürtme kaplama yöntemi, NiCrBSi-35 W_2C ve NiCrBSi kompozit tozlar alevle püskürtme ve ergitme kaplama yöntemi, W_2C -%12 W_2C Ni tozu yüksek hızlı oksijen yakıtlı püskürtme (HVOF) kaplama yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Orijinal disk ve dört adet kaplanmış disk SAE J2430-BEEP “Binek Otomobilleri ve Kamyonet Frenleri İçin Dinamometre Etkinlik Karakterizasyon Testi-Fren Değerlendirme Prosedürü” test standardına göre fren test cihazında frenleme performansı etkinliği testine tabi tutulmuştur. Bu testlerde disk-balata ikilisinin; farklı hız, sıcaklık, basınç vb. değişik çalışma şartları etkisinde oluşan sürtünme katsayısı, sıcaklık, basınç, hız, kuvvet grafikleri oluşturularak kaplanmış fren disklerinin frenleme performansı belirlenmiştir. Elde edilen kaplama tabakalarının mikroyapısının ve tribolojik özelliklerinin nasıl değiştiği incelenmiştir.

Bu çalışmanın gayesi yukarıda özellikleri bahsedilen kaplama metotları ve malzemelerinin fren disklerine uygulanması ile frenleme performansına etkisini incelemektir. Fren diski üzerine yapılmış olan kaplamalar yüksek sertlik, düşük yoğunluk, ısı kararlılık ve korozyon direnci özelliği iyi olan uygulamalardır. Buna bağlı olarak gri dökme demir diskin termal iletkenlik, termal genleşme, aşınma direnci özelliklerini geliştirerek yüksek sürtünme katsayısı özelliği kazanarak mükemmel frenleme performansı sağlayan disk üretilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde çalışmanın konusu ve amaçlar anlatılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünü literatür araştırması oluşturmaktadır. Bu bölümde hem disk-balata ikilisinin, fren sürtünme özellikleri, disk kalınlık kaybı, sertlik ve aşınma direnci gibi özellikleri hem de disklere uygulanan kaplamalar üzerine yapılan araştırmalar incelenmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde; kullanılan metotlar ve materyaller tanıtılmıştır. Disklerin seçimi, kaplama malzemelerinin seçimi, kaplama yöntemleri ve parametrelerinin tespiti yapılmıştır. Frenleme performansının tespit edildiği test standartları SAE J2430, TS 555 ve TS 9076'nın seçilmesi ve fren sistemi test cihazı tanıtılmıştır. Mikroyapı incelemesi için numune hazırlama makinaları, kaplamaların metalografik incelenmesinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu, enerji dağılımlı spektrometre ve ışık mikroskobu tanıtılmıştır. Numunelerin sertlik ölçümünde kullanılan cihaz, aşınmaların ölçümünde kullanılan aletler, yanal salgıların ölçülmesinde kullanılan aletler, yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinde kullanılan cihazlar ile bunlara ait metotlar tanıtılmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde; deneysel çalışmalar anlatılmıştır. Kaplama yöntemlerinin uygulanışı açıklanmıştır. Orijinal (Original Equipment Manufacturer-OEM) ve kaplanmış disklerin yüzey ve kesitlerinden ışık mikroskobu (Light Microscopy-LM) ve taramalı elektron mikroskobuyla (Scanning Electron Microscope-SEM) mikrograflar alınarak enerji dağılımlı spektrometre (Energy Dispersive Spektrometre-EDS) ile analizleri yapılmıştır. Orijinal ve kaplanmış disklerin sertlikleri, yüzey pürüzlülük değerleri, yanal salgı miktarları, sürtünme ve aşınma özellikleri incelenerek SAE (Society of Automotive Engineers) J2430, TS (Türk Standartları) 555 ve TS 9076 test standardına göre yapılan frenleme testlerindeki verilerin grafiklenmesi ve yorumlanması yapılmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümünde, çalışmadan elde edilen sonuçlar açıklanarak, çalışmanın devamı olabilecek araştırmalara yönelik önerilere yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Literatür Araştırması

Fren sistemi, kara ulaşım sistemlerinin en hayati güvenlik elemanıdır. Fren performansındaki gelişmeler otomotiv endüstrisindeki gelişmelerin önemli bir kısmıdır. Yıllar boyu otomobillerin boyutlarındaki değişimler, araç ağırlığını etkilemiş, dolayısıyla daha işlevsel frenlerin ve sürtünme malzemelerinin geliştirilmesini de beraberinde getirmiş, otomotiv taşımacılığı ve güvenlik açısından önemli olduğu için çok çalışılır bir konu haline almıştır.

Gemalmayan (1984)'a göre disk ve kampana üretiminde perlitik dökme demir kullanılır. Sertliği 170-255 HB (kg/mm^2) arasında değişen bu dökme demir için %3,40 dolaylarında karbon kullanılır. Mutlu (2002)'ya göre perlitik dökme demir grafit yaprakçıkları bulundurduğundan iyi bir kayma özelliği gösterir. Yüksek işlenebilirlik, titreşimi soğurma, yüksek ısı iletkenlik ve aşınma direnci en önemli özelliklerindedir. Bunun yanında kırılğan oluşu ve dinamik yüklere karşı hassas oluşu dikkati çeker.

Birbirleri ile temas halinde olan yüzeylerden, mekanik etkilerle oluşan malzeme kaybı, yüzyıllardır insanoğlunun karşılaştığı mekanik problemlerinin başında gelmiştir. Dünyadaki mekanik enerjinin 1/3'ünün mekanik kayıplara harcandığı kabul edilirse, sürtünme ve aşınmanın önemi daha da iyi anlaşılabilir. Teknolojik ilerlemelerle birlikte sürtünme ve bunun neden olduğu aşınma problemlerinin aşılması için birçok yöntem uygulanmıştır (Stachowiak and Batchelor 2000).

Bir fren diskinin bileşiminde bulunması gereken bütün katkı elemanları ve yüzey işlemleri ile ilgili yapılan çalışmaların sonuçları ticari önem taşıdığından genellikle yayınlanmayıp patent alma yolu seçilmektedir. Disk ve balataların özelliklerini geliştirerek frenleme performansını arttırmak için yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Anderson (1992)'a göre gri dökme demirler otomobil fren sistemi ve silindir gömlekleri için kullanılan ortak bir malzemedir. Bunun nedeni Stanford and Jain (2001)'in yaptığı

çalışmada dökme demirlerin yüksek ısı iletkenliği, yüksek aşınma dayanımı ve mikroyapıda grafitin bulunmasına bağlanmıştır. Aynı çalışmada dökme demirin sulu ortamlarda düşük olan korozyon dayanımını yükseltmek için fren diskleri yumuşak kaplamalar ile kaplandığı, ancak bu kaplamalarında frenleme mesafesini uzattığı bildirilmiştir. Bazı sert frenleme şartlarında oluşan yüksek ara yüz sıcaklıklarında organik bileşiklerin özelliği bozulur, sürtünme katsayısı düşer ve aşınma oranı ekponansiyel olarak artar. Bu olay sıcaklıkla fren zayıflaması (fade) olarak isimlendirilir. İdeal fren balataları ve dolayısıyla fren diskleri herhangi bir sıcaklıkla fren zayıflaması (fading) oluşmaksızın bütün çalışma şartlarında üniform ve kararlı sürtünmeyi sağlamalıdır. Söz konusu çalışmada, Fe-3, 45C-2, 15Si-0,5Mn-0,25Cr-0,2Cu kompozisyonuna sahip bir diskin sürtünme, aşınma ve korozyon direncini iyileştirmek için HVOF yöntemiyle Co-30Cr-12W-2,4C (Stellite) tozu, alevle püskürtme yöntemiyle [Ni-17Cr-2,5Fe-2,5Si-2,5B-0,15C (Metco), Fe-30Mo-2C (Diamalloy), ve Zn-50SiC (Zn-SiC)] tozlarıyla kaplanmıştır. Yapılan çalışmada; en iyi korozyon direncini stellite kaplamalı disk göstermiştir. Tüm kayma hızlarında en düşük aşınma oranını ve en yüksek sürtünme katsayısını stellite kaplamalı disk ile dökme demir diskin sağladığı bildirilmiştir.

Dökme demirin sürtünme ve aşınma özelliklerini iyileştirmek amacıyla Ocelik vd. (2007)'in yapmış oldukları çalışmada; yüksek güçlü lazer kaplama yöntemi ile sıkıştırılmış grafit ve gri dökme demir yüzeylere yaptıkları Co-bazlı kaplamanın endüstriyel parçaların, geleneksel dökme demirlerin mikro sertliğinde artış, lokal aşınma ve korozyon direncinde önemli bir iyileşme sağladığını, sürtünme katsayısının standart sınırlar içinde olduğunu tespit etmişlerdir.

Fren diski üzerine ısı püskürtme yöntemleri ile kaplanan değişik tozlarının frenleme performansını tespit etmek için Demir (2009) yaptığı çalışmada; 5 adet fren diskini incelemiştir. Kimyasal kompozisyonu 3,58C-2,28Si-0,572Mn-0,02P- 0,03S-0,057Cr-0,047Cu-0,01Ti olan orijinal disk metalik Metco 19E (Ni-16Cr-4Si-4B-4Fe-2,4Cu-2,4Mo-2,4W-0,5C) ve Metco 18E (Co-27Ni-18Cr-6Mo-3,5Si-3B-2,5Fe-0,2C) tozlarıyla alevle püskürtme yöntemi ile Sermet Cr₃C₂-NiCr (%75 (Cr₃C₂) + %25 NiCr) tozuyla HVOF yöntemi ile ve seramik Al₂O₃-TiO₂ (%87(Al₂O₃) + %13(TiO₂)) tozuyla plazma

püskürtme yöntemiyle kaplamıştır. Orijinal ve kaplanmış diskleri SEA J2522 test standardına göre frenleme performansı testlerine tabi tutmuştur. Daha sonra tüm diskler SAE J2334 test standardına göre hızlandırılmış korozyon testine tabii tutulmuştur. Çalışmada kaplamalı disklerin hem korozyon direnci hem de sürtünme katsayısı açısından orijinal diskten daha iyi performans gösterdiğini bildirmiştir.

Fren disk malzemesi ve yüzey özellikleri üzerine Qu vd. (2009)'nin yaptıkları diğer bir çalışmada; Ti-6Al-4V (Ti64), metal matrisli kompozitler (MMK), ısıp püskürtme kaplı Ti alaşımından oluşan malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma direncini test etmişler. Ti-6Al-4V (OD-Ti64) alaşımına oksijen difüze etmişler, fren test cihazında karşı malzeme olarak bu çalışma için optimize edilmiş ticari fren balatası kullanmışlardır. OD-Ti64 sürtünmesi ile ilgili olarak, diğer malzemelerle birlikte disk yüzey sıcaklığı yaklaşık 600 °C'ye ulaştığında bile, sürtünme katsayısının arzu edilen 0,35-0,50 aralığında gerçekleştiğini tespit etmişler.

Blau vd. (2007) tarafından yapılan benzer çalışmada ise; iki adet ticari Ti alaşım, dört adet Ti sert toz metal matris kompozitleri ve bir adet ısıp püskürtme kaplamalı Ti alaşımının sürtünme katsayıları ve sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Karşı parça olarak ticari amaçlı üretilmiş balata kullanılmıştır. Bu deney diskleri içerisinde, 0,6 mm kalınlığındaki ısıp püskürtme kaplamalı Ti diski (Ti-6Al-4V ThSp) en az aşınma değeri göstermiştir. Ayrıca aynı çalışmada hem hafif olması hem de sağladığı korozyon direncinden dolayı Ti kaplamalı diskin tercih edilebilir olduğu belirtilmiştir.

Frenleme performansı üzerine Lee (1999) tarafından yapılan bir başka çalışmada; frenleme esnasında disk ve balata ara yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklıkların; frenlerin zayıflamasına, erken aşınmalara, fren sıvısının buharlaşmasına, yatak arızalarına, termik çatlaklara, termik olarak uyarılmış titreşimlere ve gürültüye sebep olduğu bildirilmiştir.

Bu gibi zararları önlemenin en uygun yolu frenleme esnasında oluşan ısının mümkün mertebe en kısa zamanda sistemden uzaklaştırılması ya da disk-balata ikilisinin daha yüksek sıcaklıklara dayanımının sağlanmasıdır. Frenleme esnasında oluşan yüksek sıcaklıkların ortaya çıkaracağı mahsurları azaltmak ve frenleme performansını artırmak

amacıyla fren sistemine hem konstrüktif hem de metalurjik bazı uygulamalar yapılmaktadır. Bu amaçla disklere; delik, kanal, delik-kanal kombinasyonu ve dört soğutma yüzeyli disk gibi konstrüktif uygulamalar yapılabilmektedir. Ayrıca bazı farklı metalurjik ve kimyasal uygulamalar da yapılmaktadır. İnce grafit tabakalı dökme demir, yüksek karbonlu grafit tabakalı dökme demir (Yamabe et al. 2003), alüminyum metal matrisli kompozit (Al-MMK) (Bettge and Starcevic 2003, Zhang et al. 2004), dökme çelik (Yamabe et al. 2003), SiC içeren alüminyum metal matrisli kompozit (Oda et al. 1997), karbon-karbon kompozit, seramikler (Blau 2001) ve metalik kaplamalar (Stanford and Jain 2001) bu uygulamalardandır.

Fren disklerinin özelliklerini geliştirmek amacıyla Pandya vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada, gri dökme disk yüzeylerinin üzerine monte ettikleri pimleri Tungsten İnert Gaz (TIG) yöntemi ile ergiterek modifiye etmişler. Numuneleri; mikroyapı, mikro sertlik ve kuru kayma aşınma testlerine tabi tutmuşlar. Maksimum sürtünme katsayısı (μ) değeri 9,81 N yüklemde kaynaklı GC1 numunede (0,58) ve minimum (μ) sürtünme katsayısı 19,62 N yüklemde 45 A akımla kaynatılan GC4 numunede (0,43) tespit etmişler. Bunun sebebi yüzeyde oluşan oksit nedeniyle metal-metal temasının azalması ve sıkıştırılmış grafit tabakanın oluşmasıdır. Ayrıca grafitin yağlayıcı özelliği de sürtünme katsayısının azalmasına neden olmuştur. TIG uygulanmamış numuneye göre diğer üç numunenin daha iyi sertlik ve aşınma direnci gösterdiğini en yüksek sertlik (258 VHN) ve aşınma direncini ise 45 A'de ergitilen numunenin, en düşük sertliği (187 VHN) ve aşınma direncini TIG uygulanmamış numunenin gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Bu konuda Yamabe vd. (2003) tarafından yapılan başka bir çalışmada; termal yorulma mukavemetinin diskin mikroyapısındaki grafit sayısının arttırılmasıyla iyileştiği bildirilmiştir. Diske nikel ilavesi ve seryum aşılması ile orantılı olarak termik yorulma mukavemetinin arttığını gözlemlemişler. Testlerde pin-on disk tipi aşınma cihazı kullanılmışlardır. Çalışmada grafit miktarı arttıkça çatlak oluşma oranının azaldığını, mikroyapıdaki grafit sayısının nikel ilavesi ve seryum aşılmasıyla arttığını tespit edilmişler.

Cueva vd. (2003) tarafından yapılan bir çalışmada üç farklı gri dökme demirin (gri dökme demir GI250, yüksek karbonlu gri dökme demir-GIHC ve titanyum alaşımlı gri dökme demir-GI250Ti) aşınma dirençleri ölçülmüştür. Bu gri dökme demirler, kompakt grafitli dökme demir (CGI) ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada genel olarak diske uygulanan basıncın düşmesi ile aşınma oranının azaldığı bildirilmiştir.

Gri dökme demir disk ve otomotiv fren balatalarının sürtünme karakteristikleri deneysel olarak Cho vd. (2003) tarafından incelenmiştir. Soğutma hızı ve karbon değerinin değişmesiyle, farklı mikroyapılar elde etmek için üretilen gri dökme demir numunelerini ve ticari olmayan fren balatalarının iki farklı tipini (çelik içermeyen ve çelik içeren) bir karşıt yüzey malzemesi olarak denemişlerdir. Sürtünme testlerini, tribotester tipi bir sürtünme test cihazı üzerinde denemişlerdir. Gri dökme demir disklerde sürtünme katsayısının sınırının belirlenmesinde, ferrit ve grafit parçacıklarının etkisi üzerinde durmuşlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucuna göre; gri dökme demirdeki grafit parçacıkların artan miktarıyla sürtünme katsayısı ve etkisinin, demir içerikli balata kullanımında olduğu gibi daha belirgin olduğu sonucuna varmışlardır. Disk yüzeyindeki ferrit fazı miktarının, sürtünme katsayısında az etki gösterdiğini ortaya çıkarmışlardır.

Farklı metal fiberler (bakır, çelik, ya da Al) ile iki farklı disk (gri dökme demir ve Al-MMK) içeren malzemelerin sürtünme özellikleri üzerine Jang vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada; düşük sıcaklıkta hız ve basınç hassasiyetleri sabit aralıkta yüksek sıcaklık, aşınma ve frenleme testleri yapılmıştır. Düşük sıcaklıklarda gri dökme demir diske karşı bakır veya çelik elyaf içeren balatalar kullanıldığında yüksek hız hassasiyeti göstermiştir. Aşınma büyük miktarda çelik fiber, bakır fiber ve son olarak da Al fiber balatada gerçekleşmiştir. Her iki tip disk için aşınma miktarı aynı gerçekleşmiştir. Ayrıca, yüksek ara yüz sıcaklıklarında sürtünme kuvvetinin değişiminin sebebi olarak da dökme demirden yapılan diskin mikroyapısının homojen olmaması gösterilmiştir.

Farklı disk malzemeleri üzerine Natarajan vd. (2006)'nin yaptıkları çalışmada; alüminyum metal matris kompozit ile gri dökme demirin aşınma davranışını karşılaştırmışlardır. Fren disk malzemesi olarak A356/25SiC_p Al-MMK ve gri dökme demir kullanarak aşınma testleri yapmışlardır. Yapılan araştırma sonucunda, aynı şartlar

altında otomobil fren balatasına karşı MMK'lerin gri dökme demirlere göre önemli derecede yüksek aşınma direncine sahip olduğunu, bütün testlerde aynı şartlardaki kaymada Al-MMK'nin sürtünme katsayısının gri dökme demirinkinden %25 daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir.

Fren disklerinin termal özellikleri üzerine Mackin vd. (2002)'nin yaptıkları çalışmada; diskli frenlerde rutin frenlemenin, diski fazla miktarda termal gerilmeye maruz bıraktığı, bu gerginlik sırasında frenlemenin sertleştiğini tespit etmişlerdir. Yolcu araçlarının yavaşlatılmasında bir dakikalık zaman dilimi içerisinde 900 °C gibi yüksek sıcaklık oluşmaktadır. Yüksek frenlemenin yardımıyla fazla termal gerilmenin plastik deformasyon oluşturduğu analiz sonuçlarında belirtilmiştir.

Yüksek hızlarda tekrarlı frenlemelerin disk yüzündeki etkisini incelemek amacıyla Jimbo vd. (1990) tarafından yapılan bir çalışmada; diskin yüzeyinde kılcal çatlakların oluşabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada yüksek karbonlu ve düşük silisyumlu disk malzemesi seçilerek, diskteki termik iletkenlik ve çatlak oluşum direnci incelenmiştir. Diskteki silisyum içeriğinin azaltılması ile hem termik iletkenliğin hem de disk mukavemetinin artması sağlanmıştır. Aynı çalışmada dökme demir diske, dayanımını arttırmak için vanadyum, krom ve çatlak oluşumuna karşı çok iyi direnç gösteren molibden katılmıştır. Kullanılan diskin temel kompozisyonu; yüksek karbon, düşük silisyum ve molibden ilavesidir. Diskin karbon ve molibden içeriğine bağlı olarak çatlak uzunluğunda düşme olduğu görülmüştür.

Fren disk malzemeleri üzerine yapılan bu çalışmalar onlardan istenilen performans özelliklerini karşılamak için yeterli gelmemektedir. Fren disklerinin balatalarla daha uyumlu bir çift oluşturarak daha yüksek frenleme performansı gösterebilmeleri için yüzeylerine ısı püskürtme kaplamalar yapılarak incelenmiştir.

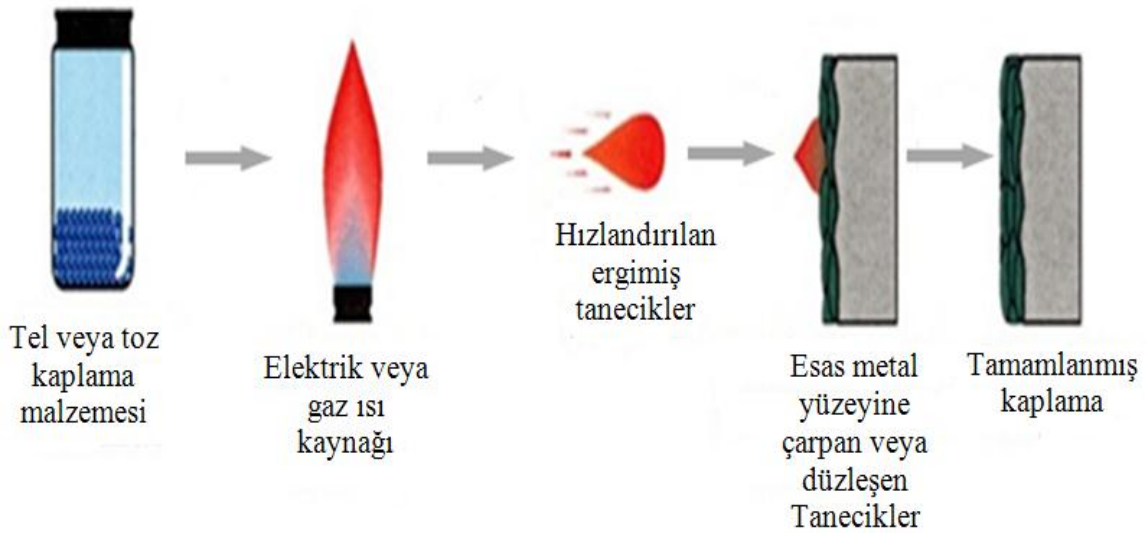
2.2 Isıl Püskürtme Kaplama Yöntemi ve Çeşitleri

Sert kaplama tekniklerinden biri olan ısı püskürtme yöntemi gerek yöntem çeşitliliği, gerek kullanılabilen malzeme çeşitliliği ve gerekse üreticiye ekonomik katkı sağlayan bir yüzey işleme yöntemi olduğundan endüstride geniş bir alanda kullanılmaktadır.

Bunların yanında birkaç mm'den 25 mm'ye kadar değişik boyut ve geometriye sahip parçalar bu yöntemle kaplanabilmektedir. Isıl püskürtme kaplamaların kalınlığı uygulanan yöntem ve kullanılan malzeme çeşidine göre değişmektedir. Isıl püskürtme tekniğinin ikinci bir önemli avantajı ise kaplanacak malzemeye az ısı vererek onu 100-300 °C gibi düşük sıcaklıkta tutabilmesidir. Bu özellik kaplanacak malzemenin ısı çarpılmasını, oksidasyonunu ve diğer metalurjik özelliklerinin değişmesini önlemektedir.

Isıl püskürtme yöntemlerinde kaplanacak yüzey, boyanın püskürtülmesindeki mantığa benzer şekilde, ergimiş damlacıklar ile bombardıman edilerek kaplandığı Kwin (1989) tarafından yapılan çalışmada bildirilmiştir. Boyama işleminden farklı olarak kaplama malzemesi oda sıcaklığında sıvı değildir ve bir yüksek enerjili ısı kaynağı tarafından ergitilmek üzere ısıtılmakta ve kaplanacak malzemenin yüzeyine püskürtülmektedir.

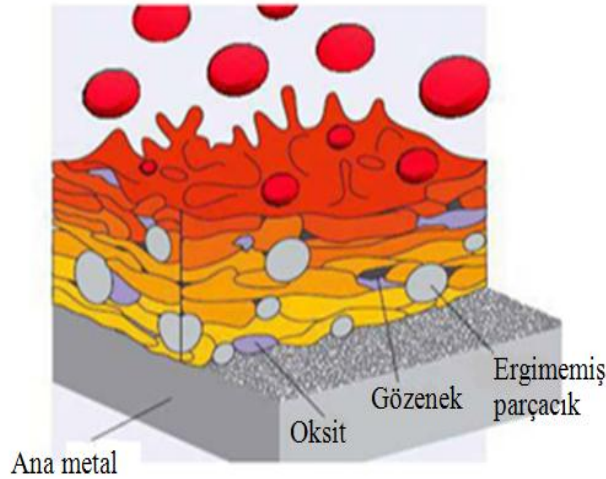
Isıl püskürtme; kaplama oluşturmak amacı ile önceden hazırlanmış olan altlık metale çok ince tel, toz veya çubuk haldeki metalik, seramik, sermet veya bazı polimerik malzemeleri çökeltten bir grup yöntemi tanımlamak için kullanılan jenerik bir terimdir. Ergiyen kaplama malzemesinin kaplanacak olan altlık yüzeyinde kaplama oluşturma adımları Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Isıl püskürtme yönteminin şematik gösterimi (Hermanek 2001).

Isıl püskürtme alevi, kaplama malzemesini ergetmek için gerekli olan sıcaklığı; yanıcı gazlar, elektrik arkı veya plazma arkı ile elde eder. Ergiyen kaplama malzemesi kaplanacak olan metal yüzeyine püskürtülür. Yüzeye darbe etkisiyle çarpan tanecikler, düzleşmekte ve hedef metale olan ısı transferi ile soğuyarak katılaşmakta ve birbirleri ile temas haline gelerek tabaka meydana getirmektedir (Tucker1994). Kaplamalar genellikle mekanik bağlanma ve bölgesel olarak oluşan çeşitli sınıflardaki metalurjik bağlanma veya difüzyonla yüzeye tutunmaktadır (Villat 1986).

Isıl püskürtme ile çökelen kaplama tabakasının boşluk, tamamen ergimiş tabakalar, ergimemiş veya yarı ergimiş tanecikler ve kalıntılardan oluştuğu Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Oksit kalıntıları, püskürtme jetindeki sıcak taneciklerin bir kısmının çevre ile reaksiyonundan dolayı oksitlenmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Milyonlarca tanecik aynı anda ısıtıldığından her biri aynı ısı etkisinde taneciklerin bir kısmı tamamen ergimemekte ve kaplamada boşluk ve ergimemiş tanecikler meydana gelmektedir. Bu durum ısıl püskürtme yöntemine, seçilen işlem parametrelerine ve püskürtülen malzemeye bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 2.2 Isıl püskürtme tabakasının oluşumunun gösterimi (Weidmann et al. 2005).

Isıl püskürtme yöntemleri iki ana grup altında incelenmektedir. Birinci grup yanma yöntemi olarak adlandırılır ve bir hidrokarbon yakıt (asetilen, propan, hidrojen, vb.) ile oksijenin (veya havanın) kaplama malzemesinin ertilip altlık malzeme üzerine püskürtülmesi için gerekli entalpi ve kinetik enerji sağlaması için yanması esasına

dayanmaktadır. İkinci grupta ise elektrik gücü toz partiküllerini püskürtmek için kullanılan enerjinin kaynağı olmaktadır. Alev püskürtme, elektrik ark püskürtme, yüksek hızlı oksijen yakıt teknikleri ve detonasyon tekniği gibi çeşitli yöntemler örnek olarak verilebilir (Sahoo 1993). Isıl püskürtme yöntemleriyle yapılan kaplamaların karakteristik özellikleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Ana malzeme ile kaplama arasında iyi bir bağlanma sağlanması için ana malzeme yüzeyinin kaplama öncesi kumlama ile pürüzlendirilmesi, yağının alınması ve tamamen temizlenmesi son derece önemlidir (Tucker 1994, Weidmann et al. 2005).

Isıl püskürtme yöntemiyle oluşturulan kaplamaların yoğunluğu yöntem tarafından oluşturulan partiküllerin sıcaklığına ve çarpan partiküllerin hızlarına bağlıdır. Isıl püskürtme tekniklerinde sıcaklıklar 2500-20000 °C arasında, partikül hızları ise 30-40 m/sn'den 800 m/sn'ye kadar değişen aralıklarda olmaktadır. Partiküllerin sahip olduğu sıcaklık ve hızlar ne kadar yüksek olursa oluşturulan kaplamaların yoğunluğu da o kadar yüksek olmaktadır. Çünkü plazma tabancasının ürettiği partikül hız ve sıcaklık değerleri alev püskürtmede oluşturulan hız ve sıcaklık değerlerinden çok daha yüksektir (Unger 1988).

Isıl püskürtme kaplama, ana malzemeye kendinde olmayan özel bir yüzey kalitesi kazandırmak için uygulanır. Dolayısıyla parçanın mukavemeti ana malzeme tarafından sağlanırken, korozyon, aşınma direnci veya ısı direnci gibi nitelikleri kaplama sağlar. Bu özelliğinden dolayı ısı püskürtme kaplamalar, havacılık ve enerji üretim endüstrilerinde gaz türbinlerinin yeni ve yenilenmiş parçalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Weidmann et al. 2005).

Isıl püskürtme kaplamalar piston ringleri, yataklar, taşıyıcılar, ekstrüzyon kalıpları, transformatör kutusu, gemi tekneleri, asma köprüler olmak üzere çok geniş kullanım alanına sahiptir. Isıl püskürtme teknikleri; malzemede aşınma dayanımı, oksidasyon direnci, korozyon dayanımı, ısı yalıtım, yağlama, elektrik iletkenlik veya elektriksel direnç, biyomedikal amaçlı özellikleri geliştirme amacına uygun olarak fonksiyonel yüzey kaplamaları olarak uygulanmaktadır (Kwin 1989, Smith 1991).

Tablo 2.1 Isıl püskürtme proseslerinin karşılaştırılması (İnt. Kay. 1).

Özellik	Kaplama tipi	Toz alev püskürtme	HVOF	Elektrik ark püskürtme	Plazma püskürtme
Gaz sıcaklığı (°C)		3000	2500-3000	4000	2500-20000
Püskürtme hızı (kg/h)		2-6	1-9	10-25	2-10
Parçacık hızı (m/s)		50'ye kadar	700'e kadar	Yaklaşık 150	450'ye kadar
Bağ mukavemeti (MPa)	Demir esaslı alaşımlar	14-21	48-62	28-41	21-34
	Demir dışı alaşımlar	7-34	48-62	14-48	14-48
	Seramikler	14-34	---	---	21-41
	Karbürler	34-48	83+	---	55-69
Kaplama kalınlığı (mm)	Demir esaslı alaşımlar	0,05-2,0	0,05-2,5	0,1-2,5	0,4-2,5
	Demir dışı alaşımlar	0,05-5,0	0,05-2,5	0,1-2,5	0,05-5,0
	Seramikler	0,25-2,0	---	---	0,1-2,0
	Karbürler	0,15-0,8	0,05-5,0	---	0,15-0,8
Sertlik (HRC)	Demir esaslı alaşımlar	35	45	40	40
	Demir dışı alaşımlar	20	55	35	50
	Seramikler	40-65	---	---	45-65
	Karbürler	45-55	55-2	---	50-65
Porozite (%)	Demir esaslı alaşımlar	3-10	<2	3-10	2-5
	Demir dışı alaşımlar	3-10	<2	3-10	2-5
	Seramikler	5-15	---	---	1-2
	Karbürler	5-15	<1	---	2-3

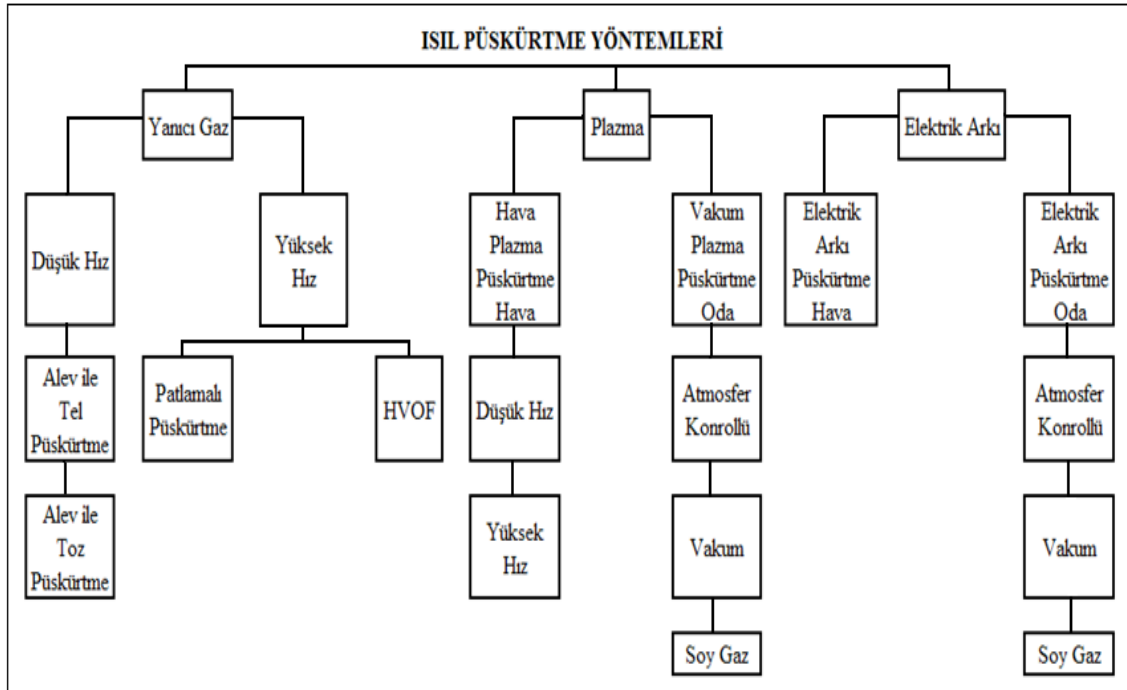
Isıl püskürtme kaplamalar piston ringleri, yataklar, taşıyıcılar, ekstrüzyon kalıpları, transformatör kutusu, gemi tekneleri, asma köprüler olmak üzere çok geniş kullanım alanına sahiptir. Isıl püskürtme teknikleri; malzemede aşınma dayanımı, oksidasyon direnci, korozyon dayanımı, ısı yalıtım, yağlama, elektrik iletkenlik veya elektriksel

direnç, biyomedikal amaçlı özellikleri geliştirme amacına uygun olarak fonksiyonel yüzey kaplamaları olarak uygulanmaktadır (Kwin 1989, Smith 1991).

Isıl püskürtme tekniği ile tokluğu, sertliği, sürtünme katsayısı ve daha birçok özelliği farklı çok çeşitli malzemeler kaplanabilir. Bu malzemeler saf metaller, metal alaşımları, sermetler, seramikler, karbürler, polimerler, özel kompozit malzemeler olarak sınıflandırılabilir (Kwin 1989).

Tablo 2.2'de görüldüğü gibi ısı püskürtme yöntemleri; yanıcı gaz ile püskürtme, elektrik arki ile püskürtme ve plazma püskürtme yöntemleri olmak üzere genelde 3 ayrı gruba ayrılmaktadır.

Tablo 2.2 Isıl püskürtme yöntemleri (Bernecki 2005).



Düşük ergime noktalı metaller, seramikler, refrakter karakterli metaller, camsı metaller, polimerler ve bu malzemelerin kombinasyonları gibi geniş bir aralıktaki sıvı hallerinde kararlı olan tüm malzemeler ısı püskürtme proseslerinden en az birini kullanarak altlık malzemeleri kaplamada kullanılabilir (Kempton 1991).

Püskürtme yöntemlerinde püskürtme hızı ve sıcaklık operasyon aralığı, kaplama karakterini etkileyen iki önemli faktördür. Püskürtme sisteminin taşınabilirliği iç veya dış alanda olabilecek kaplama uygulamaları açısından önemlidir. Isıl püskürtme yönteminin seçimi genellikle şu faktörlere bağlıdır (Güleç 2006);

- a) Bir pasodaki kaplama alanı,
- b) Maliyet etkili kaplamalar,
- c) Taşınabilir kaplama sistemleri,
- d) Püskürtme kaplamaların mekanik özellikleri,
- e) Çevresel zorluklar,
- f) İş güvenliği.

2.2.1 Plazma Püskürtme Kaplama Yöntemi

Isıl püskürtme kaplama tekniğinin bir alt grubu olan plazma püskürtme kaplama yöntemi, yüksek proses sıcaklığıyla geniş bir sahada malzeme işlenmesine ve bunların endüstriyel alanda kullanılmasına imkan sağlar. Katı haldeki bir maddede atomlar arasındaki bağ enerjisi atomların sahip olduğu enerjiden çok yüksektir ve dolayısıyla atomların hareketleri çok azdır. Atomlara çeşitli yöntemlerle enerji aktarıldığında atomların enerjisi bağ enerjisinin üstüne çıkar ve hareket artar. Bunun sonucunda madde faz değiştirerek önce sıvı daha sonra da gaz haline geçiş yapar. Gaz halindeki atomların enerjisi artmaya devam ettiğinde elektronlar çekirdekten kurtularak serbest kalabilir. Böylece madde pozitif yüklü iyonlar ve negatif yüklü elektronlar içeren bir hale gelir. Ortaya çıkan bu yeni faz plazma olarak adlandırılır. Sonuçta plazma, en genel tanımıyla iyonize yoğunlaştırılmış gazlara verilmiş isimdir ve genellikle maddenin dördüncü hali olarak adlandırılır (Fitzpatrick 2008).

Plazma püskürtme yöntemiyle otomotiv endüstrisinde dizel motorlarının piston başlıkları, subap yüzeyleri ve silindir kapakları seramik kaplamalarla kaplanmaktadır. (Hermanek 2001). Plazma püskürtme yönteminin elemanları Şekil 2.3'de görülmektedir.



Şekil 2.3 Plazma püskürtme yönteminin düzeneği (İnt. Kay. 1).

Normal gazlar (CO , CO_2 , SO_2) ısıtıldıklarında klasik fizik ve termodinamik kanunlara uygun davranış gösterirler. Plazma ise bu kanunların dışında bir davranış göstermektedir. Bu nedenle, bilinen gaz halinden daha yüksek enerji seviyesine ulaşmış gaz halini tanımlamak için plazma terimi kullanılmaktadır. Plazma püskürtme kaplama prosesinde kullanılan gazlar Ar, He, N_2 ve H_2 gazlarıdır. (Sarıkaya 2007).

Plazma ark püskürtme yönteminde 40-80 kW seviyesinde çalışan bir elektrik arkının ısı enerjisi plazmayı oluşturacak gaz olan Argon veya Nitrojen ile birlikte biriktirilecek malzemenin eritilmesinde ve oldukça yüksek hızlarda (~ 300 m/s) püskürtülmesinde kullanılır. Plazma jeti, kullanılmasındaki esas amaç, genellikle Argon, Azot veya Helyum olan soy gazın, nozul içinde oluşturulan bir elektrik akımı kullanarak 2500-20000 °C gibi çok yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılması ile ergime noktası yüksek malzemelerin püskürtülebilmesidir. Tungsten katot ve bakır anot arasındaki soy gaz, oluşturulan elektrik arkı ile iyonize olarak genişir ve plazma durumuna geçer. Kaplama malzemesi olan tozlar yine bir soy gaz ile plazma jetine enjekte edilir ve malzeme yüzeyine doğru hızla taşınır. Oldukça yüksek sıcaklık ve tane hızı, bu yöntemle çok daha iyi mikroyapı ve mekanik özellikler elde edilmesine imkân sağlar. Plazma tabancasından püskürtülen kaplama partikülleri çevre atmosferi ve havanın oksijeni ile reaksiyona girerek kaplanacak malzemenin yüzeyine ergimiş olarak ulaşır (Stokes, 2008). Çalışmamızda bu yöntem ile kaplama yapılarak inceleme yapılmıştır.

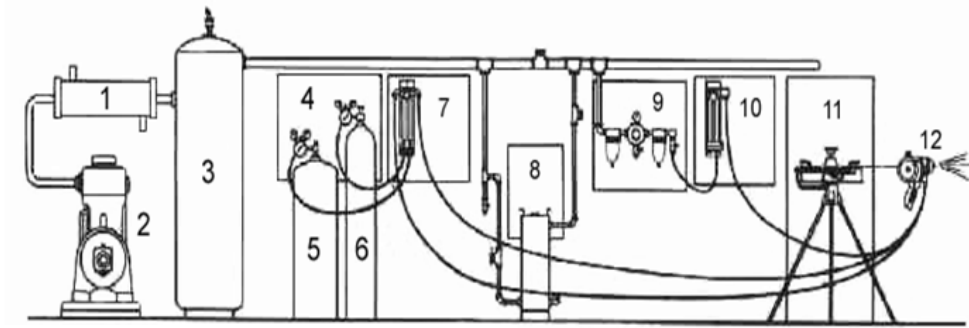
2.2.2 Alev Püskürtme ve Ergitme Kaplama Yöntemi

Tüm ısı püskürtme kaplamalar içerisinde en eski metottur, keşfi 1911 yılında İsviçre’de gerçekleşmiştir (Tucker 1994). Günümüzde de hala popülerliği devam eden bir püskürtme sistemidir. Tel veya toz haline getirilen ve ergime sıcaklığı oksii-asetilen alevi sıcaklığının altında olan herhangi bir metalin, kaplanacak yüzeye püskürtülmesi şeklinde tanımlanabilir. Püskürtülecek metal ve tel, sürücü ile püskürtme nozuluna sürülür. Tel nozul içerisinde geçerken bir oksijen ve yanıcı gaz aleviyle eritilir. Bu erimiş metal yüksek basınçlı hava ile atomize edilerek kaplanacak yüzeye püskürtülür (Evkaya 2003).

Alev püskürtme yöntemi ile toz esaslı malzemelerin bir malzeme yüzeyine kaplanması mümkündür. Ekonomik olmasının yanı sıra geniş bir malzeme grubuna uygulanabilmesi nedeniyle, sıklıkla tercih edilen bir tekniktir. Püskürtme yöntemlerinde nikel esaslı alaşımların iyi aşınma direnci sağlamaları, oksidasyona ve yüksek sıcaklık korozyonuna dayanıklı olmaları ve uygulamalara daha iyi yatkınlıkları nedeniyle büyük miktarlarda kullanılmaktadır. Alevle püskürtmede kaplama katmanının gözenekliliği yüksek (%10-20) ve ana malzemeye bağlanma yeteneği sınırlıdır. Tabakaların yeniden ergitilmesi; gözenekliliği azaltmakta, daha iyi bir metalurjik bağ oluşumunu sağlamakta ve kaplama tanecikleri arasında daha iyi bir bağın meydana gelmesini sağlamaktadır. Alevle püskürtmede ergitme işlemi; indüksiyonla, fırında ve oksii-asetilenle yapılabilir. Özellikle oksii-asetilen ucuz oluşu nedeniyle sıklıkla kullanılsa da, endüstriyel uygulamalarda hassas bir kontrol mümkün değildir. Yöntemin yeterliliği hakkında herhangi bir garanti verilememektedir (Gonzalez et al. 2007).

Alev püskürtme yönteminde, toz ya da tel malzeme yanma ile elde edilen bir kimyasal enerjiyle ergitilmektedir. Yakıt gazı (ya da sıvısı) oksijen veya sıkıştırılmış hava ile yakılmaktadır. Düşük maliyeti ve yüksek yanma sıcaklığı nedeniyle asetilen gazı tercih edilir. Ayrıca Propan, Hidrojen ve doğal gaz da yaygın olarak kullanılmaktadır. Alevle ergitilen malzeme hızlandırılır ve ergimiş partiküller haline getirilir. Hızlandırma için sıkıştırılmış hava kullanılsa da oksidasyondan kaçınmak için argon ya da azot tercih edilir. Şekil 2.4’de alev püskürtme yönteminin düzeneği gösterilmiştir. Bu tekniğin

dezavantajı kaplanan malzemeye uygulanan yüksek sıcaklığın deformasyona neden olma tehlikesinin bulunmasıdır (Schwartz 2002).



- | | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| 7- Basınçlı Hava Kurutma Ünitesi | 1- Gaz Debi Ölçer |
| 8- Hava Kompresörü | 2- Hava Temizleyici |
| 9- Hava Tankı | 3- Hava Kontrol Ünitesi |
| 10- Gaz Kontrol Ünitesi | 4- Hava Debi Ölçer |
| 11- Asetilen veya Propan | 5- Tel veya Toz Bağlama Ünitesi |
| 12- Oksijen | 6- Püskürtme Tabancası |

Şekil 2.4 Alev püskürtme yönteminin düzeneği (İnt. Kay. 2).

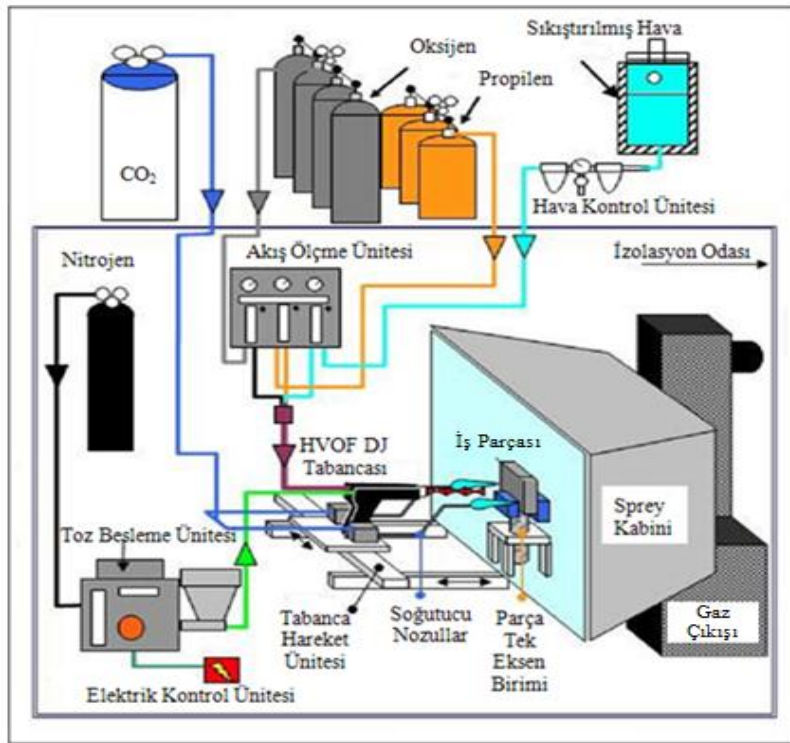
Otomotiv sektöründe, rulman yatakları, hidrolik piston milleri, her türlü yatak, shaft ve millerin aşınan yüzeyleri, piston segmanları, krank milleri, debriyaj baskı plakalarının kaplanmasında kullanılmaktadır. Alev püskürtme kaplamalar, yapıların ve parçaların korozyon dayanımı, aşınmış shaftların yeniden boyutlandırılması gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır (Evkaya 2003). Çalışmamızda bu yöntem ile de kaplama yapılarak inceleme yapılmıştır.

2.2.3 Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtlı Püskürtme (HVOF) Kaplama Yöntemi

HVOF sistemi alev püskürtme yönteminin bir uygulamasıdır ve biriktirilecek malzemelerin yalnızca toz olarak kullanılabilmesine elverişlidir. HVOF ısı püskürtme yönteminde toz halindeki malzeme, yakıt görevi gören bir gazın oksijenle yakılması sonucu ortaya çıkan ısıyla ergitilir ve basınçlı hava yardımıyla çok yüksek hızlarda kaplanacak yüzeye püskürtülür. Tozlar yanma odasında aleve maruz kalarak, ergime noktalarına ve toz besleme hızına bağlı olarak ergimiş veya yarı ergimiş hale gelirler. HVOF sisteminde işlem sıcaklığı 2300 °C ile 3000 °C arasındadır. Ergimiş veya yarı

ergimiş partiküller daha sonra 1350 m/s'ye varan süpersonik hızlarda tabanca nozulünden kaplanacak malzemeye doğru püskürtülürler (Stokes 2008).

Yüksek hızlı oksijen-yakıt püskürtme yönteminde, oksijen ve sıvı yakıt bir odacıkta yakıldıktan sonra tozların enjekte edildiği nozula doğru yönlendirilir. Nozulda bulunan tozlar ve yanıcı gazlar, gaz jetinin genişmesi ile ses üstü bir hızda atmosfere çıkmaktadır (Ronald and Ronald 1994). Şekil 2.5'de yüksek hızlı oksijen yakıtlı püskürtme sistemi düzeneğinin şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.5 HVOF püskürtme yönteminin düzeneği (Stokes 2008).

HVOF yönteminde, 0,75 MPa gibi yüksek basınçlarda iş parçasına çarpan taneciklerin ortaya çıkardıkları kinetik enerji etkisiyle diğer püskürtme yöntemlerine göre çok yüksek bir bağlanma mukavemeti elde edilir. Böylece bu yöntemdeki taneciklerin kinetik enerjilerinin etkisi, plazmadaki ısıl enerjinin etkisinden göre daha yüksek bağlanma mukavemeti sağladığından yoğunluğu iyi olan kaplamalar üretilebilmektedir (Holf 1995).

HVOF yöntemi ile aşınmaya ve korozyona karşı koruma ile ısı ve elektriksel izolasyon için kaplamalar üretilmektedir. Püskürtme parametreleri özel uygulamalar için ayarlanabilmektedir. Yüksek dolgu oranları, geniş yüzeyli parçalarda işlem zamanını kısaltmaktadır (Charles 1994).

Parker and Kurtner (1991)' e göre, HVOF yönteminin, en büyük özelliği püskürtme anında esas metalin yüzeyi yaklaşık 100 °C'yi aşmamasıdır. Bundan dolayı malzemede distorsiyon ve metalurjik olarak bir değişme meydana gelmez. Püskürtme tabancası ve esas yüzey arasındaki mesafenin ayarlanmasıyla esas yüzeyde anormal bir sıcaklık artışı görülmemiştir.

Stokes (2008), partikül hızının ısı püskürtme işlemlerinde oldukça önemli olduğunu bildirmiştir. Aynı çalışmada, yüksek hızların daha iyi bağlanma mukavemeti, düşük gözeneklilik sağlayacağı gibi partikülün soğuma süresi azalacağından kaplama yüzeyini yarı ergimiş bir halde etkilemesine neden olacağı bildirilmiştir. HVOF yöntemi bu yüksek hızların üretilmesi için tasarlanmış ve bu da HVOF'un partikül şartları göz önüne alındığında diğer ısı püskürtme yöntemlerine göre avantajlı olmasını sağlamaktadır. Çalışmamızda bu yöntem ile de kaplama yapılarak inceleme yapılmıştır.

2.3 Fren Sistemi ve Fren Sistemlerinde Tribolojik Mekanizmalar

Bir fren sisteminde frenleme görevini yerine getiren temel eleman çifti disk ve balatadır. Frenleme ile ilgili elemanların görevi aracı en kısa sürede ve emniyetli bir şekilde farklı çalışma şartlarında (buzlu, ıslak, kuru, düz, yokuş yukarı veya yokuş aşağı gibi yollarda, boş veya tamamen dolu bir taşıtta, yeni veya eski sürtünme elemanlarının kullanımında, ıslak veya kuru frenlerde) güvenlik sınırlarını aşmadan durdurmaktır. Ayrıca taşıtın uygun hareket etmesini sağlayabilmek için istenmeyen hızların önlenmesi, taşıtı yavaşlatmak ve taşıtın kendiliğinden harekete geçmesini önlemek asıl önemli görevidir.

2.3.1 Fren Sisteminin Yapısı

Frenler, otomobillerin en önemli güvenlik ve performans elemanlarından birisidir.

Otomobillerin icat edilmesinden bu yana güçlü ve güvenli fren sistemleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Fren sisteminden, aracı değişik şartlar altında emniyetli bir şekilde durdurması istenir. Fren performansının en önemli göstergesi, frenlemeden sonra sağlanan kısa durma mesafesidir. Bu maksimum yavaşlama ivmesi ile mümkündür (Kinkaid et al. 2003).

Hareket halindeki bir taşıt kinetik enerjiye sahiptir. Fren sistemlerinde, taşıtın kinetik enerjisi sürtünme yoluyla ısı enerjisine çevrilir. Hareket enerjisini sürtünme yoluyla ısıya dönüştürerek hareketin durdurulması ya da kontrol altına alınmasını sağlayan sistemlere fren sistemi denir (Bijwe 1997).

Fren sistemi; sürtünme malzemesi olarak balata, otomobillerde genellikle dökme demirden yapılan disk/kampana ve balatayı hidrolik/pnömatik olarak hareket ettirerek rotor yüzeyine bastıran sistemden oluşur. Otomobil ve hafif yük araçlarında kampanalı veya diskli frenler, ağır tonajlı ve otobüslerde kampanalı frenler kullanılır (Bijwe 1997).

Frenlere çevreye verebileceğinden daha fazla bir ısı verilirse fren balatalarındaki sürtünme katsayısı düşmekte ve frenlerin durdurma kabiliyetleri azalmaktadır. Fren balatalarının etkinliğindeki bu azalma için balata yumuşaması terimi kullanılır. Bu noktadan sonra aşınma hızlanır. Fren balatalarının sürekli olarak aşırı sıcaklıklara maruz kalmaları balataların frenleme etkinliklerinin sona ermesine sebep olur. Bu durum, frenlerin performansındaki azalma, hatalı çalışma, hızlı balata aşınması ve ses olarak kendini gösterir (Mutlu 2002).

Taşıtlarda tekerlek freni olarak sürtünmeli frenler kullanılmaktadır. Genel olarak doğrudan doğruya tekerleğe bağlı olan bu frenler iki ana fonksiyonu yerine getirirler (Göktan vd.1995);

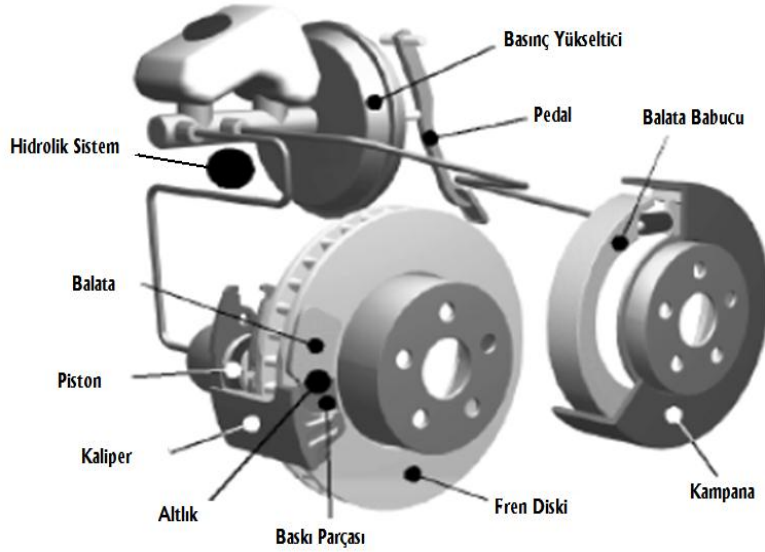
1. Fren momentinin oluşturulması,
2. Enerji değişiminin gerçekleşmesi (kinetik veya potansiyel enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi ve bu ısının atılması).

Otomotiv fren sistemi üç ana bölüme ayrılabilir (Eriksson 2000);

1. Rotor: Tekerlek ile birlikte dönen kısımdır. Sürtünme çiftinin ilk parçasıdır. Çoğunlukla ve yaygın olarak kullanılan parçalar dökme demirden yapılırken, çeliğin ve son yıllarda metal matrisli kompozit malzemelerin de fren disk malzemesi olarak kullanımı mevcuttur.
2. Balata: Sürtünme çiftinin ikinci parçasıdır. Hidrolik piston yardımıyla diski sıkıştırarak, sürtünme ile kinetik enerjiyi ısıya çevirir.
3. Hidrolik sistem: Fren pedalındaki frenleme kuvvetini balataya basınç uygulayan hidrolik pistonu transfer etmek ve basıncı ayarlamak amacıyla kullanılan sistemdir.

2.3.2 Fren Sistemi Elemanları

Fren sistemi elemanları temel olarak; disk, kaliper, balata ve fren ana merkezinden oluşmaktadır. Şekil 2.6’da fren sistemi elemanları gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Disk fren ve kampanalı fren sistemi elemanları (Eriksson 2000).

2.3.2.1 Diskler

Mutlu (2002)’nin bildirdiğine göre, diskli frenler açık havaya açıktır ve daha küçük sürtünme yüzeylerine sahiptir. Bu yüzden büyük frenleme kuvvetlerine ve basınçlarına ihtiyaç duyulabilir. Diskli frenlerin nem ve dış kirliliklere açık oluşu şikâyet konusu

olmakla birlikte diskli frenlerin kuru ve ıslak havada rahatlıkla çalıştıkları belirlenmiştir. Diskler yüzeydeki yabancı maddelerden kolay kurtulur. Diskli fren balatasının disk üzerindeki kuvvet dağılımı kampanalı fren tipine oranla daha kararlı ve daha homojendir. Yüksek hızlardaki frenlemede, ani kavrama eğilimi daha düşüktür.

Hava kanallı disklerde oluşan sürtünme kuvveti normal disklerde oluşan sürtünme kuvvetinden daha büyüktür (Düzgün 2009). Fren gücü yüksek olan araçlarda ayrıca seramik fren diskleri de kullanılmaktadır. Bu diskler normal fren disklerine göre çok daha iyi frenleme performansı sağlamaktadır. Aşınmada normal disklere göre son derece düşük ve her bir seramik diskin hizmet süresi yaklaşık 300 bin km olabilmektedir.

Disk frenleme yüzeyindeki kalınlık farkı 35 µm'yi geçmemelidir. Uzun süreli nemli ortam şartlarında çalışma disk yüzeyinde paslanma diye ifade edilen korozyon oluşturur. Disk yüzeyinde derin dairesel yarıklar veya çok sayıda radyal çatlaklar görülüyorsa disk değiştirilmelidir (Harper 1998).

Sürtünme elemanları düşük sıcaklıklardan çok yüksek sıcaklıklara kadar sürekli değişebilen çalışma sıcaklıklarında ve yüksek hızlarda çalışmaktadır. Disk ve kampananın mekanik ve ısıl zorlamalara karşı dayanıklı olması istenir. Fren sistemlerinde sürtünmeden dolayı kısa zamanda oluşan sıcaklık artışının, en kısa zamanda sistemden uzaklaştırılabilmesi için karşı malzemenin yüksek ısı iletim katsayısı ile özgül ısıya sahip olması gerekmektedir. Oluşan bu sıcaklık artışı nedeniyle disk veya kampananın bozulmadan, minimum deformasyon göstermesi için ısıl genleşme katsayısının küçük olması istenir. Frenlemede kısa zamanda oluşan yüksek ısı miktarı, disk veya kampana tarafından alınıp, iletilerek dışarıya verileceğinden, disk malzemesinin yüksek ısı iletme kabiliyetine sahip olması gerekir (Fenton 1996).

2.3.2.2 Kaliperler

Fren sisteminin durdurma yeteneğini sağlayan önemli elemanlarından birisi de kaliperlerdir. Bu gün araçların genelde ön tekerleklerinde bazen de arka tekerleklerinde

disklere balataların tutturulmasını sağlayarak sistemi tamamlama görevini yerine getirirler. Genellikle dökme demirden yapılan kaliperler ana merkezin sevk ettiği hidrolik basınç ile kendi pistonlarını kullanarak balataları disk yüzeyine bastırırlar. Çift (sabit kaliper) ve tek (yüzer veya sürgülü kaliper) pistonlu olarak ikiye ayrılırlar. Çift pistonlu kaliper çok yer kapladığından, genellikle tek pistonlu kaliper kullanılmaktadır. Kaliperler pistonun uyguladığı baskı kuvveti ile disk yüzeyine balatayı bastırarak frenleme işlevini yerine getirirler (İnt. Kay. 3).

2.3.2.3 Fren Balataları

Balatalar, Türk Standartları (TS) 555'e göre sürtünmeli frenler için uygulanan fren kuvvetinin araçların tekerlekleri ile bağlantılı disk veya kampanalara sürtünme yolu ile aktarılmasını sağlayan elemanlar olarak tanımlanır. Balata, pabuç ile kampana/disk arasındaki sürtünme görevini üzerine alır. Balata, pabuca yapıştırma veya perçinleme usullerinden biriyle tutturularak, pabuca bağlı olarak çalışır (Mutlu 2002).

Balatalar, gösterdiği performansı tüm şartlarda ve tekrar kullanıma bağlı olmaksızın yineleyebilmelidir. Kullanım sırasında uygulanan basınç ve oluşan kesme gerilmesine karşı yeterli mukavemete sahip olmalı, üretimi kolay ve sürekli aynı kalitede üretime uygun olmalıdır. Malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını sürtünme yüzeyleri arasındaki doğal etkileşim belirler. Bu etkileşimin derecesi; balata sürtünme ve aşınma özellikleri, bileşim, yüzey geometrisi, yüzey enerjisi, kimyasal reaksiyonlar, yüzeyin fiziki ve mekanik özellikleri, yağlı, yağ, kumlu ve aşınmadan dolayı kirlenen yüzey ile çalışma şartlarındaki basınç, kayma hızı, sıcaklık gibi birçok parametreye bağlıdır. Balataların sürtünme sırasında oluşan sıcaklık artışından dolayı oksitlenmeye karşı dayanıklı, çatlama ve ısıl yorulmaya karşı dayanımı yüksek olmalıdır (Bijwe 1997).

Otomotiv sürtünme malzemesi olarak kullanılan balatalar dört sınıfa ayrılmıştır: Organik balatalar, anorganik (madeni esaslı) balatalar, bileşik balatalar ve karbon esaslı balatalar. Balatayı oluşturan bileşenler bağlayıcı, elyaf, sürtünme ayarlayıcı, dolgu maddesi, yağlayıcı, temizleyici ve renklendiricilerdir. Balata üretiminde %20-80 oranında mineral esaslı, %10-60 oranında organik esaslı, %20-40 oranında bağlayıcı

elemanlar, %10-20 oranında madeni esaslı malzemeler ve renk verici oksitler kullanılmaktadır. Bağlayıcı malzeme olarak genellikle fenol formaldehit reçine kullanılmaktadır. Fenolik reçine, iyi düzeyde yüksek sıcaklık stabilitesine sahiptir ve alevlenmeye karşı mukavimdir (Mutlu vd. 2006).

2.4 Sürtünme ve Aşınma

Triboloji, birbirine göre izafi hareket eden ve temasta olan yüzeylerde sürtünme, aşınma ve yağlama konuları ile bunlara bağlı konuları inceleyen bilim dalıdır. Esas olarak Yunanca bir terim olan “TRIBOS” kelimesinden türetilmiş olup (ovalama, kaydırma), disiplinler arası bir bilim dalıdır (Szeri 1980).

Triboloji, fizik, kimya, malzeme bilimi, matematik, mekanik ve reoloji dallarının disiplinler arası çalışmalarını gerektirir. Triboloji ilk kez 1966 yılında İngiltere Hükümeti tarafından “Etkileşim halinde olan yüzeylerin relatif hareketi ile ilişkili bilim ve teknoloji dalı” olarak tanımlanmıştır (Dowson 1979).

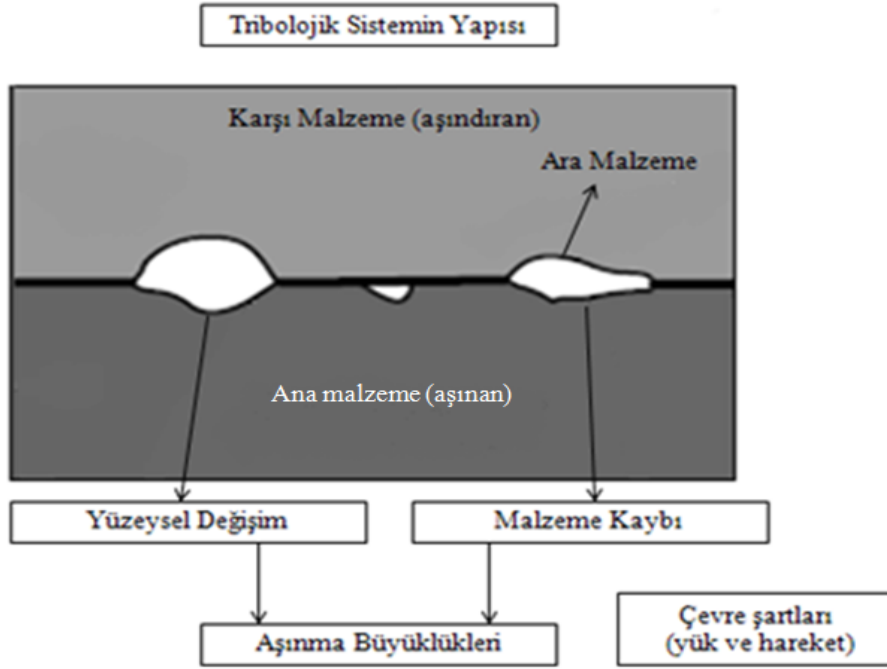
Triboloji, kayma ve yuvarlanma hareketi yapan makinelerin yüzeylerinde hayati öneme sahiptir. Rulmanlar, mekanik contalar, tıbbi protezler, kesici uçlar, motor parçaları ve nano teknoloji uygulama alanlarında oldukça önemli rol oynamaktadır (Hutchingsv 1992).

Sürtünme, ilgili yüzeyler arasında belirli değerler içinde olmalıdır. Taşıt frenlerinde sürtünmenin azlığı nedeniyle taşıtın istenilen mesafe ve zamanda durmaması veya fazla sürtünme nedeniyle taşıtın frenlerinin bloke olması bu duruma tipik örnektir (Halliday and Resnick 1986).

Tribolojik sistem, karşılıklı etkileşen elemanlarda hız, ısı şartlar ve yükün etkisi ile sonuçlanan aşınma olayını inceler. Tribolojik sistemin yapısı Şekil 2.7’de gösterilmiştir (Trilk and Eyre 1993, Kjeldsteen and Trilk 1995, Kayalı 1996).

Frenlerde sürtünme prensipleri geçerlidir. Sistemin performansı dönen diske karşı baskı uygulayan balata ile arasındaki sürtünmeye bağlıdır. Fren sistemlerinde sürtünme

malzemesi olarak kullanılan malzemelerin seçimi ve üretimi, disk malzemesinin seçimi ve üretimi, aşınma, titreşim ve gürültü gibi frenleme performansı açısından büyük önem taşıyan konularda yoğun olarak bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Bunun dışında kayma hızı, basınç ve rotor yapısının tribolojik temasa etkisi incelenmiştir.



Şekil 2.7 Tribolojik sistemin şematik gösterimi (Kayalı 1996, Yılmaz 1997).

Bir fren sisteminden, yüksek ve kararlı sürtünme, düşük aşınma, güvenlik, konfor, dayanıklılık, gürültüsüz ve titreşimsiz performans sağlaması beklenir. Bu performans özellikleri; fren diski, balataları ve kayan yüzeyler üzerinde oluşan sürtünme filminden (sır) etkilenmiş olabilir. Bu çalışma; fren sisteminin bu performans özelliklerini geliştirmek amacıyla otomobil fren disklerini kaplayarak frenleme performansını incelemek amacıyla yapılmıştır.

Dökme demir bir fren diski ve bu diskin değişik kaplama toz ve yöntemleri ile kaplanmış hali ile organik veya yarı-metalik bir fren balatası arasındaki temasın durumu kendine has özellik taşır ve diğer birçok tribolojik temastan farklıdır. Bu sistemdeki kuru temas çoğunlukla yüksek hız, yüksek temas basıncı ve balata malzemesinin etkisiyle çok çeşitli ve karmaşıktır.

Balata malzemesi çok farklı özellik ve türdeki bileşenlerden oluşmuş kompozit bir malzemedir. İçerisinde düşük bir sertliğe sahip reçine ve katı yağlayıcıların yanı sıra, çok yüksek sertliklere sahip abrasif partiküller ve lifler de yer almaktadır. Özellikle kayma esnasında iki sürtünme yüzeyi arasında meydana gelen sürtünme tabakasının tribolojik temasın yapısı üzerinde büyük bir etkisi bulunmaktadır. Balata ve disk arasında meydana gelen tribolojik temasın yapısı sürtünme, aşınma, gürültü ve vibrasyon gibi hem çalışma hem de konfor açısından büyük öneme sahip faktörlerin belirlenmesinde temel etkidir. Bu yüzden disk-balata temasını sağlayan gerçek temas alanları, temas bölgeleri, mikro ve makro boyutta şekil adaptasyonu, termal deformasyon ve yüzey özelliklerinin değişimi gibi sürtünme kuvvetinin oluşumunda ve değişiminde etkin kavramların açıklanması ve iyi bir şekilde anlaşılması gerekir (Eriksson and Jacobson 2000, Ostermeyer 2003).

2.4.1 Sürtünme

Genel anlamda sürtünme, temas halindeki yüzeylerin ve birbiri üzerinde hareket eden ya da hareket ihtimaline karşı gösterilen direnç olarak tanımlanır. Genelde tanımlanan sürtünme her türlü yabancı maddeden arındırılmış yüzeylerin mutlak vakumdaki hareketlerini ifade eder. Fakat mevcut sistemlerin çoğunluğu normal atmosfer şartlarında çalışmaktadır. Yabancı maddelerden arındırılmış yüzeylerin atmosfer şartlarındaki sürtünme hali kuru sürtünme olarak kabul edilmektedir (Ashby and Jones 1996, Yılmaz 1997).

Sürtünme; hareketin cinsine göre, kayma, yuvarlanma veya kayma yuvarlanma şeklinde olabilir. Birbiri üzerinde hareket eden yüzeyler arasına yağlayıcı madde konulup konulmaması bakımından temas yüzeylerinin durumuna göre, kuru, yarı sıvı ve sıvı sürtünme olarak üç halde de incelenebilir (Gemalmayan 1984).

Leonardo da Vinci gibi birçok bilim adamı, kuru sürtünme ile ilgilenmişlerdir. Çoğu araştırmacılar pürüzlülük, adhezyon, elastisite veya kuru sürtünme boyunca yüzey geçişleri gibi kuru sürtünmenin bir tek parametresi ile ilgilenmişlerdir (Holinski 2001).

Son zamanlarda sürtünmenin meydana gelme nedenleri ile ilgili çalışmalarda; sürtünmenin sebebi olarak bir yüzeydeki atomların diğer yüzeydeki atomlar üzerinde hareket ettiği zaman katı yüzeyin kayması esnasında meydana gelen kafes hareketinin neden olduğu üzerinde durulmaktadır. Çünkü bir yüzeyin diğer bir yüzey üzerinde hareketi sonucunda mekanik enerjinin bir bölümü ses dalgaları ve ısıya dönüşür. Birbirleri ile temastaki her katı malzemenin kristal kafesi atomik düzeyde denge durumundadır. Sürtünen çiftlerden birine kayma gerilmesi uygulandığında her kafes elastik olarak deforme olur (Persson 1994). Eğer kayma daha da artar ve kararsız duruma gelirse atomlar yeni bir denge durumuna geri döner. Deformasyon enerjisi bütünüyle yok olana kadar kristal kafes hareket eder (Tabor 1996).

2.4.1.1 Sürtünme Kanunları

Persson (1999)'a göre sürtünme kuvveti, iki cisim arasında oluşan soğuk kaynaklanmış bağlantıyı kesmek için gerekli olan kuvvettir. Malzemeler arasındaki sürtünme olaylarını izah ve formüle etmek için tarihsel gelişim içerisinde birçok teori ileri sürülmüştür. İlk zamanlar, sürtünme katsayısının pürüzlerin eğim açısının tanjantı ile ilişkili olduğu düşünülmüş, daha sonraları sürtünmede, iki katı arasındaki moleküler çekim kuvvetinin de etkili olduğu açıklanmıştır (Kragelskii 1965). Bunlar arasında Amontons ve Coulomb'un teorileri önemlidir. Coulomb 1785 yılında açıklamış olduğu kuralda; sürtünme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu gözlemlemiş ve statik sürtünme katsayısını (μ_s) kaymaya başlama kuvveti ile kinetik sürtünme katsayısını da (μ_k) hareketi devam ettirme kuvveti ile tarif etmiştir. Bu teorilere göre sürtünme kuvveti genelde şu kurallara bağlıdır (Hutchings 1992):

1. Sürtünme kuvveti, normal yükü orantılıdır. Bu oran F_s/W 'nin sürtünme katsayısı μ 'yü ifade ettiğini ortaya çıkarır. $\mu = F_s/W$ olur.
2. Sürtünme kuvveti, geometrik temas alanına (A_a) bağlı değildir. Bu yüzden büyük ve küçük cisimlerin sürtünme katsayıları aynıdır.
3. Sürtünme kuvveti, kayma hızına (v) bağlı değildir.
4. Kaymayı başlatmak için gereken sürtünme kuvvetinin genellikle kaymayı sürdürmek için gereken kuvvetten büyük olduğu bilinir ve bundan da iki sürtünme katsayısı olduğu

teorisine varılır, bunlar statik sürtünme katsayısı (μ_s) ve kinetik sürtünme katsayısıdır (μ_k). Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından daha büyüktür ($\mu_s > \mu_k$).

2.4.1.2 Sürtünme Katsayısı

Mart 1992 tarihli TS 555’de sürtünme katsayısı, “Disk veya kampana ile disk fren veya kampana fren arasındaki sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranıdır” şeklinde ifade edilmiştir (Mutlu ve ark. 2002).

Sürtünme kuvvetleri uygulanan kuvvetlerin bileşkesine eşit ve ters yönde olur, böylece herhangi bir yatay hareket meydana gelmez. Buna göre bağlı hareket eden ve normal bir kuvvetin (W) etkisi altında bulunan iki cismin temas eden yüzeyleri arasında harekete karşı aşağıdaki denklemdeki gibi bir (F_s) sürtünme kuvveti bağıntısı oluşur (Bowden and Tabor 1964).

$$F_s = \mu \times W \quad (1)$$

Burada; μ : Sürtünme katsayısı

F_s : Teğetsel kuvvet (sürtünme kuvveti)

W : Normal kuvvet (yük)

Bu ifadedeki (μ) değeri iki malzeme yüzeyine bağlı olarak değişen sürtünme katsayısı değeridir. Fren ve kavrama gibi sürtünme esasına göre çalışan makine elemanları hesabı “ $F_s = \mu \times W$ ” denklemine dayanır. Sürtünme kuvveti (F_s) normal kuvvetten (F_n) küçük ve harekete ters yönde olduğundan ısınma, enerji kaybı ve sıcaklık artışı bu olayın sonucunda ortaya çıkar. Kaymayı başlatan kuvvet (F_s) ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (F_n) arasında; $F_s = \mu_s \times F_n$ bağıntısı mevcuttur. Burada, μ_s statik sürtünme katsayısıdır. Kayma başladıktan sonra, (F_k) sürtünme kuvvetinde bir azalma olur. Bu durumda; $F_k = \mu_k \times F_n$ ilişkisi geçerlidir. Burada, μ_k kinetik sürtünme katsayısıdır. Statik sürtünme katsayısı ile kinetik sürtünme katsayısı arasında $\mu_k < \mu_s$ ilişkisi mevcuttur (Kayalı 1996, Ashby and Jones 1996, Yılmaz 1997).

2.4.2 Aşınma

Aşınma çok geniş tanımlara sahiptir. ASLE (American Society of Lubrication Engineers)'ye göre aşınma, mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) araştırma grubuna göre, yüzeyde relatif hareketin sonucu olarak cisimden sürekli malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Alman DIN 50320 normuna göre ise aşınma, kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulması şeklinde tanımlanmaktadır (Peterson 1976).

Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı üç şekilde meydana gelebilir. Bunlar bölgesel erimeler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel ayrılmalardır. Uygulamada aşınma kapsamına daha çok yüzeyden fiziksel anlamda ayrılan malzemenin sebep olduğu hasarlar dâhil edilmektedir.

Bir aşınma sisteminde önemli etkenlerden biri de çevre şartlarıdır. Sistem elemanlarının nem veya korozif etkilerle karşı karşıya kalması aşınmayı hızlandırır. Birbirleri ile temasta bulunan malzeme yüzeyleri, oksit filmleri, sert kaplamalar ve yağlayıcılar ile korunsalar bile mekanik yüklemeler altında tabakaların veya yağlamanın bozulması iki yüzeyin birbiri ile temasına sebep olabilir. Bunun sonucunda oluşacak sürtünme, malzemenin çalışma şartlarındaki ömrünü ve performansını sınırlayan aşınmaya sebep olur. Aşınmayı etkileyen faktörleri şöyle sınıflandırabiliriz (Kayalı 1993);

1. Ana malzemeye bağlı faktörler: Malzemenin kristal yapısı, sertliği, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü ve malzemenin boyutu.
2. Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi.
3. Ortamın etkisi: sıcaklık, nem, atmosfer.
4. Servis şartları: basınç, hız ve kayma yolu.

Aşınma prosesleri için birçok sınıflandırma yapılmıştır. Kislik, pürüzlerin (asperity) mekanik bozulması, pürüz yorulması, servis esnasında kırılma, oksit filmlerinin dökülmesi, moleküler etkileşim ve yüksek sıcaklıktan dolayı mekanik bozulma olarak

sınıflandırma yapmıştır. Kragelskii, elastik ve plastik yer değiştirme, kesme, yüzey filmlerinin bozulması ve aşınan malzemenin bozulması olarak sınıflandırmıştır. Archard ise, malzeme ve yüzeydeki temas alanının elastik ve plastik deformasyonu arasındaki farkları göz önüne alarak sınıflandırma yapılmıştır (Peterson 1976).

Aşınma mekanizmaları genel olarak dört başlıkta incelenmektedir (Bhushan 2001):

1. Adhesif aşınma
2. Abrasif aşınma
3. Yorulma ve Deleminasyon aşınması
4. Korozyon aşınması

2.4.3 Fren Sistemlerinde Sürtünme ve Sürtünmeyi Etkileyen Faktörler

Fren sistemlerinde temel eleman, sistemin fonksiyonu açısından en fazla aşınma tehlikesi gösteren balatadır. Karşı sürtünme elemanı diskli sistemlerde disklerdir. Her iki eleman arasında frenleme esnasında, sürtünme ve aşınma sonucunda bir tribofilm (sürtünme tabakası) meydana gelir. Bu film genellikle disk yüzeyinde yağlayıcı gibi bir koruma görevine sahiptir. Balatanın abrasif etkilerine karşı diskleri korur ve sürtünme olayında çok önemli bir mekanizmadır. Frenleme esnasında çevre şartları da önemli etkenlerdendir. Toz, kir, su, hava şartları gibi faktörler tribolojik teması ve dolayısıyla frenleme performansını önemli ölçüde etkiler.

2.4.3.1 Kayma Hızının Sürtünmeye Etkisi

Shorowordi vd. (2004), farklı malzeme çiftleri ile yaptıkları bir çalışmada artan kayma hızıyla birlikte aşınmış partikül miktarında artış olduğunu ve dolayısıyla sürtünme tabakasını oluşturan bileşenlerin de arttığını tespit etmişler. Böylece ara yüzeyde koruyucu kaplama görevi gören bu tabakanın kalınlığının arttığını ve disk-balata temasının azalmasından dolayı sürtünme katsayısının düştüğünü tespit etmişlerdir.

2.4.3.2 Basıncın Sürtünmeye Etkisi

Eriksson vd. (2002) yaptıkları çalışmada, balatalarda ortalama sürtünme katsayısının

artan basınçta, azalan basınca göre daha düştüğünü tespit etmişler. Aynı çalışmada, sürekli frenlemelerde belirli bir alışma devresinden sonra artan basınç ile temas bölgelerinin büyüdüğünü, buna dayalı olarak aşınmış ürünlerin ve sıcaklığın artmasının da ara yüzeydeki sürtünme tabakası kalınlığını arttırdığını belirtmişler. Böylece disk-balata temasının azaldığını ve ara yüzeydeki sürtünme katsayısının düştüğünü, basıncın düşük değerlerde tutulması durumunda ise iki yüzey arasında yeterli temas sağlanmadığından sürtünme katsayısının yine küçük kaldığını tespit etmişlerdir. Ancak belirli basınç değerleri aralığında en yüksek sürtünme katsayısını elde etmenin mümkün olduğunu bildirmişlerdir.

2.4.3.3 Sıcaklığın Sürtünmeye Etkisi

Fren uygulaması esnasında sıcaklık artışı ile sürtünme katsayısındaki azalma sürtünme zayıflaması olarak adlandırılır ve yüksek sıcaklıklardaki sürtünme zayıflaması sürtünme malzemeleri için kritik bir özelliktir. Ara yüzeyde oluşan sıcaklığı azaltmanın yolu ise çevreye transfer edilen ısı miktarını arttırmaktır (Anderson 1992).

Frenlemelerde artan yük ve frenleme süresi ile birlikte sürtünme yüzeylerinde çok yüksek bir sıcaklık artışı meydana gelir. Sıcaklığın etkisiyle sürtünme malzemesinin mekanik özellikleri olumsuz etkilendiği gibi gelişen aşınma mekanizmaları ve temas konfigürasyonlarında değişim gösterir. Yüksek sıcaklıklarda aşınma oranında ani bir artış meydana gelir. Fren balata malzemesine karşı gri dökme demir disk kullanarak yapılan deneylerde sıcaklık yükselmesiyle sürtünme katsayısı düşmekte buna bağlı olarak aşınma artmakta ve yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır (Bergmann et al. 1999, Filip et al. 2002).

2.4.3.4 Balata Yapısının Sürtünmeye Etkisi

Balata yapısına bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi oldukça karmaşık bir kavramdır. Tüm koşullar sabit olsa dahi, testlerden elde edilen sonuçlar farklılık gösterebilmektedir. Sabit frenleme basıncına karşın sürtünme katsayısı her bir frenlemede artabilir ve frenleme sayısına bağlı olarak da belirli bir süre sonra düşebilir.

Geometrik açıdan balatanın sürtünme yerindeki küçük sapmalar da belirli bir alışma devresi içinde sürtünme katsayısı değişiminde önemlidir (Bergmann et al. 1999).

2.4.3.5 Disk Yapısının Sürtünmeye Etkisi

Son yıllarda fren rotorunun sürtünme performansını arttırmak için büyük bir çaba sarf edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda çok farklı disk malzemeleri geliştirilmiştir. Bunların içerisinde demir içermeyen bakır alaşımları, alüminyum metal matrisli kompozitler (Wycliffe 1993, Shorowordi et al. 2004, Gültekin 2007) ve karbon seramik kompozitler (Gomes et al. 2001) bulunmaktadır. Bununla birlikte yüksek sönümlenme kapasitesi, yüksek termal iletkenlik, kolay üretim ve düşük maliyet gibi etkenlerden dolayı en çok tercih edilen disk malzemesi gri dökme demirdir. Kullanılan gri dökme demir malzemesi ihtiyaçlara göre farklı karbon oranlarında ve ısıl işlem koşullarında üretilmektedir. Gri dökme demir içerisinde bulunan grafit lamelleri kullanılan balata malzemesine göre sürtünme performansı üzerinde farklı etkilere sahiptir. Buna göre çelik lif içerikli balata ile karşılıklı temasta bulunan bir diskteki grafit oranı arttıkça sürtünme katsayısının arttığı, çelik içermeyen bir balata kullanıldığı takdirde grafit alanının sürtünme katsayısı üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı gözlenmiştir. Gri dökme demir içinde bulunan ferritin sürtünme katsayısı üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı yapılan deneyler ile tespit edilmiştir (Cho et al. 2003).

Eriksson vd. (2002) tarafından yapılan çalışmada, disk yapısının sadece mikroyapısal olarak değil, aynı zamanda yüzey geometrisi açısından da sürtünme katsayısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir. Yeni bir diskin ilk çalışması esnasında sürtünme katsayısı düşüktür. Diskin yüzeyi talaşlı işleme operasyonlarından dolayı spiral izlere sahiptir. İlk frenlemelerde bu çizgiler kademeli olarak aşınır ve daha düzgün bir yüzey meydana gerek temas alanı artarak sürtünme katsayısının artmasına sebep olur. Pürüzlü ve pürüzsüz yüzeyler ile yapılan incelemelerde, pürüzlü yüzeyde oluşan temas alanı oranının %90 azaldığı, sürtünme katsayısının da pürüzsüz duruma göre %25 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Disk in sadece belirli bir bölgesini partikül püskürtmek suretiyle belirli bir pürüzlülük değerine sahip hale getiren Eriksson et al. (1999) disk-balata sistemi üzerinde yaptıkları testler sonucunda kayma esnasında bu bölgeden her geçişte sürtünme katsayısının düştüğünü ve bu bölgeyi geçtikten sonra tekrar eski değerini aldığı gözlemlenmiştir. Buradan da anlaşıldığı üzere sürtünme katsayısı, gerçek temas alanından etkilenmektedir.

2.4.3.6 Frenleme Süre ve Sayısının Sürtünmeye Etkisi

Sürtünme katsayısı yapılan her frenleme esnasında farklı değerler alabilmektedir. Frenlemenin başlangıç aşamasında, eş çalışan yüzeylerin zamanla birbirine uyum sağlaması ve pürüzlerin ortadan kaldırılmasıyla daha fazla temas alanına sahip olması gibi nedenlerden dolayı sürtünme katsayısı artar. Ancak basıncın sabit olmasına karşın belirli bir frenleme sayısından sonra sıcaklığın artması, temas bölgelerinin parçalanması gibi etkenlerden dolayı sürtünme katsayısı belirli bir değerden sonra çok yavaş düşer (Eriksson et al. 2002).

2.4.3.7 Temas Alanının Sürtünmeye Etkisi

Deamaley (1985)'e göre, temas alanı büyümesi, pürüz tepeciklerinde durgun haldeki mikro deformasyon alanlarının kayma hareketine bağlı olarak kayma gerilmesi etkisi ile büyümesi şeklinde ifade edilmektedir. Ayrıca, metalik malzemeler üzerinde sürtünme katsayısının incelenmesinde diğer önemli olay plastik sertleşme (pekleşme) halinin meydana gelmesidir

Eriksson vd. (2002) yaptıkları çalışmada, genelde 50-500 µm genişliğinde ve birkaç mikron yüksekliğindeki temas bölgelerinin sisteme giren gücün büyük bir kısmının sürtünme gücüne dönüşmesine sebep olduğunu, yapılan ölçümlerde temas bölgelerinin çoğunlukla sertlik değerlerinin balata kompozisyonunun sertliğine göre daha sert olduğunu gösterdiğini tespit etmişlerdir. (Örneğin; 3000 MPa'a karşılık 200 MPa) Disk yüzeyindeki temas bölgelerinin balatadakilere göre hem yüksekliğinin hem de alanının çok küçük olduğunu, buna karşın, frenlerde tribolojik temasın yapısını tanımlayan

gerçek temas alanları balata yüzeyinde oldukça geniş yer tuttuğunu bildirmişlerdir. (Toplam balata alanının %20'sine denk gelmektedir .

Temas bölgelerinin birleşmesi ile temas bölgelerinin boyutu büyür ve sayısı düşer. Küçük ve çok sayıda temas bölgesine sahip bir fren balatasında, büyük ve az sayıda temas bölgesine sahip olana göre gürültü oluşturma eğilimi daha fazladır (Eriksson et al. 1999).

3. MATERYAL ve METOD

Bu bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan disk, balata, kaplama malzemeleri, deney cihazları ve metotlar hakkında bilgiler verilmiştir.

3.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Literatür kısmında açıklandığı gibi fren sisteminin ana elemanları disk/kampana ve balatalardır. Bu bölüm deneylerde kullanılan disk ve balataların özelliklerini, kaplama tozu ve kaplama yöntemlerinin seçilmesini, frenleme performansının tayin edilmesi için gerekli olan test standardının seçilmesi ve bu test standardına göre testlerin yapılacağı cihazın hazırlanması, deneysel çalışmalarda kullanılan cihaz ve aletlerin tanıtılması konularını içermektedir.

3.1.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Disk ve Balataların Özellikleri

Disk, sürtünme özellikleri ile verimli bir şekilde çalışabilmesi için, sistemin mekanik ve ısıl zorlamalarına karşı dayanıklı olması gerekir. Sürtünmeye bağlı sıcaklık artışı nedeni ile disk veya kampananın bozulmadan, minimum deformasyon göstermesi için ısıl genleşme katsayısının küçük olması gerekir. Diskte sürtünmeden dolayı kısa zamanda meydana gelen sıcaklık artışının, biran önce sistemden uzaklaştırılması istenir. Bu yüzden frenleme esnasında kısa zamanda meydana gelen yüksek ısı miktarları, disk tarafından alınıp dışarıya verileceğinden, disk malzemesinin yüksek ısı iletme kabiliyetine de sahip olması gerekir (Gediktaş 1968).

Bu çalışmada bu özellikler göz önünde bulundurularak taşıtların frenleme performanslarını iyileştirmek amacıyla fren diskleri üzerinde bir dizi çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalarda fren diski olarak özellikleri Tablo 3.1’de verilen hava kanallı orijinal gri dökme demir diskler kullanılmıştır. Fren balatası olarak orijinal ticari fren balataları kullanılmıştır. Çalışma çerçevesinde fren disklerinden dört tanesi kaplama yapılarak bir tanesi kaplama yapılmadan orijinal halde fren performans testlerine ve deneylerine tabi tutulmuştur.

Tablo 3.1 Deneysel çalışmada kullanılan diskin özellikleri.

Disk özellikleri	Özellik/Değeri
Disk çapı (mm)	280,00 mm
Fren diski kalınlığı (mm)	24,0 mm
Minimum kalınlık (mm)	21,8 mm
Disk tipi	Hava kanallı fren diski
Disk yüzeyi	Standart
Bijon bağlantı delik sayısı	4 Delik
Porya çapı (mm)	100 mm
Yükseklik (mm)	44,0 mm
Merkez çapı (mm)	61,0 mm
İç çap (mm)	140,0 mm
Bijon ölçüsü (mm)	13,6 mm

Çalışmada kullanılan dökme demir diskin Afyonkarahisar Ana Bakım Merkezi Komutanlığı kalite kontrol laboratuvarında yapılan spektral analiz testi sonuçları Tablo 3.2’de verilmiştir. Orijinal ve 4 adet kaplanmış disklerin fotoğrafları Resim 3.1’de gösterilmiştir.

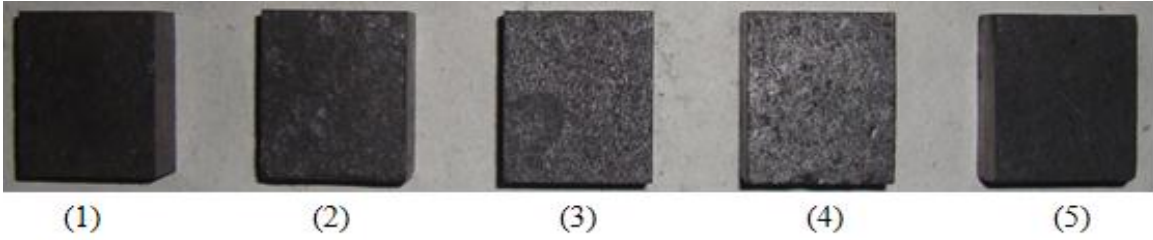
Tablo 3.2 Gri dökme demir disk malzemesinin içeriği.

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



Resim 3.1 Çalışmada kullanılan fren disklerinin görünüşü. (1) Plazma püskürtme ile Cr_2O_3 - $\%40\text{TiO}_2$ kaplanmış disk, (2) Alev püskürtme ve ergitme ile NiCrBSi - $\%35\text{W}_2\text{C}$ kaplanmış disk, (3) HVOF püskürtme yöntemi ile W_2C - $\%12\text{Ni}$ kaplanmış disk, (4) Alev püskürtme ve ergitme ile NiCrBSi kaplanmış disk, (5) Orijinal disk.

Yapılan deneysel çalışmaya uygun disk-balata ikilisini temin etmek amacıyla otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan ticari balatalar piyasadan temin edilerek SAE J661'e "Fren Balatası Kalite Test Prosedürü" göre 25,4x25,4 mm ebatlarında kesilerek kullanılmıştır. Resim 3.2'de kullanıma hazır balatalar gösterilmiştir.



Resim 3.2 Deneysel çalışmada kullanılan aynı içeriğe sahip ticari fren balatalarının görünüşü. (1) 1 no'lu diske ait balata, (2) 2 no'lu diske ait balata, (3) 3 no'lu diske ait balata, (4) 4 no'lu diske ait balata, (5) 5 no'lu diske ait balata.

Balatalar TSE 555 ve SAE J866 standartlarına göre sürtünme katsayısı değerlerine göre sınıflandırılır. Tablo 3.3'de balataların sürtünme katsayılarına göre sınıflandırılması gösterilmiştir.

Kullanılan ticari balataların sürtünme katsayısı değerlerini tayin edebilmek için sektörde ticari olarak faaliyet gösteren iki ayrı A ve B firmalarının laboratuvarlarında TSE 555 ve SAE J866'ya göre frenleme testi yapılmıştır. Bu testler sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerleri aşağıda Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.3 Balataların sürtünme katsayısına göre sınıflandırılması.

Sınıfı	Sürtünme katsayısı
C	0-0,15
D	0,15-0,24
E	0,25-0,34
F	0,35-0,44
G	0,45-0,54
H	0,55 ve Üzeri
Z	Sınıfsız

Tablo 3.4 Kullanılan balataların sürtünme katsayısı değerleri.

Değerler	A firması	B firması
Soğuk sürtünme katsayısı	0,58	0,54
Sıcak sürtünme katsayısı	0,48	0,45
Aşınma miktarı (g)	0,38	0,40
Aşınma miktarı (mm)	0,48	0,47
Balata tanımlama sınıfı	GG	GG

Tablo 3.4’de görüldüğü gibi kullanılan ticari fren balatasının sürtünme katsayısı değerleri iki ayrı firma laboratuvarlarında da birbirine yakın çıkmış ve sonuç olarak GG grubunda balata olduğu tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan balataların görünen katı yoğunlukları, Arşimet prensibine göre 0,001 hassasiyetli terazi ile belirlenmiştir. Normal terazilerden farklı olarak terazinin alt kefesini saf su içine daldırılarak alt kefesinden de ölçüm alınmaktadır. Balataların ölçülen yoğunluk değerleri Tablo 3.5’de gösterilmiştir.

Elde edilen yoğunluk değerlerine göre kullanılan balataların yüksek yoğunluklu olduğu tespit edilmiştir. Balatalardaki yüksek yoğunluk değeri, arzu edilen az aşınma ve frenleme kilitlemesi yapmadan kararlı sürtünme katsayısı üretmede istenilen fiziksel özelliğdir.

Tablo 3.5 Deneysel çalışmada kullanılan balataların yoğunluk değerleri.

Balatalar	1 no'lu diskin balatası (Cr ₂ O ₃ -%40TiO ₂ /Plazma püskürtme)	2 no'lu diskin balatası (NiCrBSi-%35W ₂ C/Alev püskürtme)	3 no'lu diskin balatası (W ₂ C-%12Ni/HVOF püskürtme)	4 no'lu diskin balatası (NiCrBSi/Alev püskürtme)	5 no'lu diskin balatası (Orişinal disk)
Yoğunluk (gr/cm ³)	2,453	2,397	2,496	2,446	2,518

3.1.2 Kaplama Tozlarının Seçimi

Dünyada ve ülkemizde genellikle metalik, sermet ve seramik esaslı tozlar bilimsel araştırmalarda ve ticari alanda daha çok kullanılmaktadır. Fakat bu tozları üretmek hem ekonomik hem de teknolojik açıdan kolay değildir. Ayrıca kaplama yöntemlerinin ısı ve hız farklarından dolayı kaplama özellikleri de farklılık göstermektedir. Bunun için toz üreten firmalar ürettikleri tozların fiziksel ve kimyasal özelliklerini kaplama yöntemlerine ve kaplanacak malzemeye göre istenen nitelikte üretmektedirler. Bu çalışmada disklerin termal ve aşınma özelliklerini geliştirerek fren sisteminde uyumlu bir disk-balata ikilisi oluşturmak amacıyla, 1 no'lu diski kaplamak için Cr₂O₃-%40TiO₂ (Metco 6483) seramik esaslı toz, 2 no'lu diski kaplamak için NiCrBSi-%35W₂C (Metco 36C) metalik esaslı kompozit toz, 3 no'lu diski kaplamak için W₂C-%12Ni (GTV 80.77.1) seramik esaslı kompozit toz ve 4 no'lu diski kaplamak için NiCrBSi (Metco 15E) metalik esaslı toz kaplama malzemesi olarak seçilmiştir.

3.1.3 Kaplama Yöntemlerinin Seçimi

Fren diskleri lamel grafitli perlitik dökme demirden üretilmektedir. Bu malzemelerin vakumlu yöntemlerle ve ince film tabakası ile kaplanması durumunda yüzeylerindeki poroziteler ve kılcal çatlaklar meydana çıkmaktadır. Bu durum yüzeyde iyi bir kaplama tabakasının oluşmasına mani olmaktadır. Bu tür yapılarda ısı püskürtme yöntemleri ile kaplama yapmak daha uygun düşmektedir.

Bu çalışmada disklerin termal ve aşınma özelliklerini geliştirerek fren sisteminde

uyumlu bir disk-balata ikilisi oluşturmak amacıyla kaplanacak dökme demir disklerin birincisi Cr_2O_3 -%40 TiO_2 (Metco 6483) oksit seramik tozu kullanarak plazma püskürtme kaplama yöntemi ile kaplanmıştır, ikincisi NiCrBSi-%35 W_2C (Metco 36C) seramik metal kompozit tozu kullanarak alevle püskürtme ve ergitme kaplama yöntemi ile kaplanmıştır, üçüncüsü W_2C -%12Ni (GTV 80.77.1) seramik metal tozu kullanarak yüksek hızlı oksijen yakıtlı püskürtme (HVOF) kaplama yöntemi kullanılarak kaplanmıştır, dördüncüsü NiCrBSi (Metco 15E) metal matrisli kompozit tozu kullanarak alevle püskürtme ve ergitme kaplama yöntemi ile kaplanmıştır. Beşincisi kaplanmayarak orijinal haliyle deneysel çalışmalara tabi tutulmuştur. Altıncı disk 50x50 mm ölçülerde kesilerek her bir parçası bir kaplama yöntemi ile kaplanarak deneysel çalışmanın mikroyapı ve sertlik incelemeleri için kullanılmıştır. Üç farklı yöntem ve 4 farklı toz üzerinde inceleme yapılmıştır.

3.1.4 Fren Test Standartları ve Frenleme Performansı Değerlendirme Prosedürü

Frenleme performansı, temel olarak durma mesafesine, fren çıkış torkuna ya da fren verimliliğine göre ölçülür. Frenleme performansını değerlendirmek için yapılan testler; farklı yük, hız, sıcaklık ve pedal kuvveti/fren basıncı uygulanarak ya ataletli dinamometrede ya da taşıt üzerinde gerçekleştirilir. Yaygın test prosedürleri; FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards), SAE, ISO (International Organization for Standardization) ve ECE (United Nations Economic Commission for Europe) tarafından oluşturulmuştur (Demir 2009).

OEM balata tedarikçileri ve komponent üreticileri tarafından kullanılan test prosedürlerinin çoğu (SAE, JASO, ISO, AK, FMVSS, JIS ya da özel) tek diskli ataletli dinamometrelerinde 1 inç karelik balata kullanılarak test edilebilmektedir (Link Report 1999).

Fren test cihazında disk-balata ikilisinin sürtünme davranışının performansını; ön alışma etkinliği, hız hassasiyeti, sıcaklığa bağlı fren zayıflaması direnci, etkin sürtünme davranışının yeniden oluşturulması ve sürtünme kararlılığı gibi faktörler belirlemektedir. Bu faktörlere bağlı olarak sürtünme davranışını kapsamlı bir şekilde

incelemek için FMVSS 105 ve 135 ana bölümleri temel alınarak hazırlanan SAE J2430 test standardı seçilmiştir. SAE J2430 test prosedürüne göre çıkarılan detaylı deney çalışma prosedürü aşağıda Tablo 3.6'da gösterilmiştir (SAE J2430 1999, Link Report 1999, Agudelo and Ferro 2005).

Test prosedürü için; dingil mesafesi, lastik yuvarlanma yarıçapı, fren etkin yarıçapı, fren disk veya kampana boyutları, ağırlık yüksekliğinin merkezi, brüt ve net yüklü araç ağırlığı, frenleme hızı, çıkış hızı fren pedal kuvveti, ilk fren sıcaklığı, döngü zamanı, döngü sayısı ve yavaşlama ivme değeri bilgilerine ihtiyaç vardır (Equipment M. A. 2002).

BMC (Brake Manufacturers Council) sürtünme malzemeleri komitesi tarafından fren etkinliğinde kullanılan sürtünme malzemelerinin gerçek performansını değerlendirmek için emniyetli kriterler oluşturulmuştur. Kabul edilen bu kriterler UMTRI (University of Michigan Transportation Research Institute) tarafından gerçekleştirilen FMVSS şartlarını taşıyacak şekilde düzenlenmiştir.

Ağustos 1999'da Warrendale, Pensilvanya, USA'da yayınlanan SAEJ 2430 frenleme test prosedürünün hazırlanmasında 400 kadar alanında uzman personel çalışmış, frenleme performansını simüle etmek için tek diskli, tam donanımlı otomobil atalet dinamometresi kullanılmıştır. Elektrik motoru ile çalıştırılan cihazın dış hava akımından etkilenmemesi ve gürültü kontrolü için etrafı kabinle kapatılmıştır. Link Engineering laboratuvarında yapılan bu çalışmanın sonuçlarını almak için yapılan bilgisayar programı ile test prosedürü basamakları kontrollü olarak uygulanabilmektedir. Her çeşit balata ve dökme demir disk cihaza uyarlanarak test edilebilmektedir (Vaclav et al. 2008).

FMVSS kriterlerine göre FMVSS 135 sertifikalı araçlar binek otomobillerini ifade etmektedir. FMVSS 135 sertifikalı araçlar için hidrolik sistem basıncı 500 N pedal kuvvetindeki basınç sınırları ve bu basınç etkinlik bölümü için ise pedal kuvveti sınırı maksimum 1000 N pedal kuvvetini geçmemelidir (Link Report 1999, Agudelo and Ferro 2005).

Tablo 3.6 SAE J2430 frenleme etkinlik test prosedürü (Link Report 1999).

Bölüm		Durma veya Yavaşlama Sayısı	Frenleme / Bırakma Hızı (km/h)	Fren Uygulaması Kontrolü	IBT (Fren Başlangıç Sıcaklığı) (°C)	Dönme Zamanı (s)
0002	Cihaz kontrol etkinliği (50 km/h tork kontrol)	5	50-3	Tork@0.31g	<100	
0003	Cihaz kontrol etkinliği (100 km/h tork kontrol)	5	100-3	Tork@0.31g	100	
0004	Cihaz kontrol etkinliği (Basınç kontrol)	3	50-3	Basınç@75 N Pedal gücü	100	
0005	Cihaz kontrol (50 km/h kademeli)	5	50-0.8 g 1,000 N veya 3 km/h	135 N/s Pedal uygulama oranı	100	
0006	Cihaz kontrol (100 km/h kademeli)	5	50-0.8 g 1,000 N veya 3 km/h	135 N/s Pedal uygulama oranı	100	
None	Cihaz kontrol (80 km/h soğutma döngüsü)	18	80-80	Soğutma bandı içinde	Ön için 200 Arka İçin 150	15
0007	Alıştırma etkinliği	200	80-3	Tork@0.31g	100 °C veya 97 s	
0008	1. Alıştırma sonrası etkinliği (50 km/h kademeli)	5	50-0.8 g 1,000 N veya 3 km/h	135 N/s Pedal uygulama oranı	100	
0009	1. Alıştırma sonrası etkinliği (100 km/h kademeli)	5	50-0.8 g 1,000 N veya 3 km/h	135 N/s Pedal uygulama oranı	100	
0010	Alıştırma sonrası soğuk etkinliği	6	100-3	Tork@0.65g	100	
0011	Sıcaklıkta fren zayıflaması etkinliği	15	120-56	Tork@0.31g	55 Birinci yavaşlama	45
0012	Sıcak performans etkinliği	2	100-3	1. basınç 0010. bölüme göre 2. basınç @ Pedal gücü; 135 testi için 500 N 105 testi için 667 N	---	1.de 35 2.de 30
0014	Soğutma döngüsü etkinliği	4	50-3	Tork@0.31g	---	120
0015	Kararlılık etkinliği (100 km/h kademeli)	2	100-0.8 g 1,000 N veya 3 km/h	135 N/s Pedal uygulama oranı	---	60
0016	Yeniden alıştırma etkinliği	35	80-3	Tork@0.31g	100 °C 1 duruşda, 100 °C veya 97 s	
0017	Final etkinliği (50 km/h kademeli)	5	100-0.8 g 1,000 N veya 3 km/h	135 N/s Pedal uygulama oranı	100	
0018	Final etkinliği (100 km/h kademeli)	5	100-0.8 g 1,000 N veya 3 km/h	135 N/s Pedal Apply Rate	100	
0019	Final etkinliği (160 km/h kademeli)	5	100-0.8 g 1,000 N veya 3 km/h	135 N/s Pedal uygulama oranı	100	
None	Test sonrası soğuma döngüsü	18	Sürekli 80 km/h	Soğutma bandı içinde	Ön için 200 Arka İçin 150	15
None	Test sonrası soğuma döngüsü	18	Sürekli 112 km/h	Soğutma bandı içinde	Ön için 200 Arka İçin 150	15

SAE J2430 testi asıl test yapılmadan önce özel test şartları ve donanım bilgileri gerektirir. Test edilecek araçlar belli başlı bazı kriterleri sağlamalıdır. Bunlar;

1. Motorlu karayolu taşıtı olmalı.
2. Brüt taşıt ağırlığı 3500 kg'a kadar olmalı.
3. İlgili temel kontrolleri ve önlemleri mevcut olmalı.

UMTRI kriterlerine göre hafif yüklü araçlar için maksimum pedal kuvveti 178 N ve yavaşlama ivmesi 1,0 g sınırına ulaşabilir. Bu sınırın amacı bir sürtünme malzemesinin çok etkili olacağı, güvenli veya normal sürüş şartlarında düşük seviyelerde bile karşılaşılan yavaşlama kilitlenmesinden kurtulmaktır. FMVSS 135 sertifikalı araçlar 100 km/h hızda başlangıç sıcaklığı 100 °C'nin altında 70-168 m'den daha az mesafede durma yeteneğine sahip olmalıdır (Link Report 1999, Agudelo and Ferro 2005).

Bu standardı seçmedeki amacımız; yeni nesil otomobil dünyasının ihtiyacı olan güçlü ve güvenli fren performans ihtiyacını karşılayacak kriterlere uygun malzemeyi tespit etmek, müşterilerin endişelerini azaltmak, teknolojik gelişme sağlamak ve buna paralel emniyet şartları tayin etmek olarak sıralanabilir. Buna ilave olarak deneylerimizi düzenlemiş olduğumuz test cihazında yaparak test maliyetlerini ekonomik hale getirmek ve alandaki geliştirme, yaygınlaştırma çalışmalarına katkı sağlamaktır.

3.2 Mikroyapı Çalışmaları

Metalografik incelemeler için hazırlanan parçalar kesildikten sonra, 1200 numaralı zımparaya kadar zımparalanarak, 3 µm'lik elmas pasta ile parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Nihai parlatmadan geçirilen numunelerin yüzeyi ışığı eşit bir şekilde dağıttığından, mikroskopik incelemelerde yapıdaki ayrıntılar ayırt edilemez. Bu sebeple yapıda kontrast oluşturmak amacıyla parlatılan numuneler dağlama işleminden geçirilmiştir. Bu işlem için dağlama reaktifi olarak %5 Nitrik asit (HNO₃) ile %95 Alkol (CH₃OH) karışımı kullanılmıştır. Mikroyapılar, Olympus BX-60 marka optik mikroskop ve JEOL-JSM 5910-LV marka SEM mikroskobu ile incelenmiş ve çeşitli büyüklüklerde mikrografları çekilerek bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

OEM ve kaplanmış disklerin mikroyapıları ışık mikroskobu (LM) ve taramalı elektron mikroskobuyla (SEM) incelenmiş, OXFORD INDUSTRIES INCA X-SIGHT 7274 marka enerji dağılımlı spektrometre (EDS) ile analizleri yapılmıştır. Kaplamalar genel olarak, altlık malzemesi, kaplama tabakası ve ara bağlayıcı tabakası olmak üzere olarak üç bölgeden oluşmuştur. Kaplama işlemi ile aşınma dayanımı yüksek, dış tesirlere dayanıklı yüzey yapıları elde edilmiştir.

3.3 Sertlik ve Dayanım Testleri

OEM ve kaplanmış disklerin mikro sertlik deneyleri TS 6503 EN ISO 4516'da "Metalik ve diğer inorganik kaplamalar-vickers ve knoop mikro sertlik deneyleri" belirtilen şartlarda yapılmıştır. Çok ince saçların hassas parçaların ve kaplamaların mikro sertliklerinin ölçümünün yapıldığı bu yöntemde baskı elemanı olarak tepe açısı 136° olan elmas uç kare pramit kullanılır. Düşük miktardaki F yükü ile malzemeye bastırılan piramit ucun bıraktığı dörtgen izin köşegenleri ölçülerek elde edilen ortalama köşegen uzunluğu aşağıdaki formül 2'de yerine konarak hesaplanır.

$$VSD = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

Burada;

VSD: Vickers Sertlik Değeri

F: Deney Yüğü (Kgf)

d: Batıcı uç ortalama köşegen uzunluğu (mm)

Vickers sertliği yüke bağılı değildir. Ölçme hatalarını azaltmak ve heterojen yapılarda ortalama değer elde edebilmek için yüğü ve dolayısı ile izi büyötmek faydalıdır. Ancak köşegen uzunluğu sertliği ölçölen numune kalınlığının en çok üçte ikisi kadar olmalıdır. Yüğü 0,0025 gr ile 12000 gr arasında değışebilir. Yüğüün uygulanma zamanı yaklaşık 20 sn'dir. Mikro sertlik ölçmede batıcı ucun derinliği hiçbir zaman 1 mikronu geçemez.

3.4 Deneyleerde Kullanılan Makina ve Cihazlar

Frenleme performansı, sürtünme malzemelerinin sıcaklığına, sertliğine, temas alanına, mikroyapısına, fiziksel özelliklerine, yanal salgısına, aşınma direncine bağlıdır. Çalışmamızda kullandığımız OEM ve kaplamalı diskler ile kullanılan balataların bu özelliklerini tayin edebilmek için kullandığımız makine ve cihazlar bu bölümde tanıtılmıştır.

3.4.1 Fren Test Cihazı ve Özellikleri

Hidrolik ya da havalı frene sahip binek veya hafif ticari taşıtların testlerinde kullanılan ataletli dinamometreler; kaplanmış disklerin hızlı sürtünme katsayısı analizlerinden FMVSS 105 ya da 135 simülasyonlarına kadar çeşitli testlerin yapılması için kullanılan bir fren test ekipmanıdır. Dinamometrelerde; performans, dayanıklılık, kapasite ve gürültü testleri yapılan en yaygın testlerdir (Link Report 1999).

Atalet dinamometreleri; ana tahrik ünitesi, atalet uygulama ünitesi, frenleme ünitesi, soğutucu hava sistemi, bilgisayar kontrol elemanları, test için gerekli fren komponentlerinden ve sabitleme parçalarından oluşur. Ana tahrik ünitesi, taşıtın kinetik enerjisini simüle eden kütle ataletlerini hızlandırmak ve akabinde kütle hızını azaltmak ya da durdurmak için uygulanan frenlemeyi sağlar. Motor, sabit hızlı yokuş aşağı inişleri simüle etmek için frenlemelerde de kullanılabilir (Link Report 1999).

Çalışmamızda OEM ve dört adet kaplanmış disk SAE J2430, TS 555 ve TS 9076 test standardına göre frenleme performansı etkinliği testine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmaların yapıldığı Resim 3.3'de gösterilen fren test cihazı, SAE J2430 test prosedürüne göre frenleme performansını belirlemek için kullanılan tek diskli atalet dinamometre test cihazından istenilen teknik özellikleri simüle etmektedir. Performans testlerini gerçekleştirebilmek için cihazın mekanik donanımları tamamlanmış ve bu donanımları bilgisayar kontrollü olarak kullanabilecek Windows tabanlı işletim programı Delphi dilinde hazırlanmıştır.



Resim 3.3 Fren test cihazı

Daha önce bu konuda yapılmış olan çalışmalar dikkate alınarak deney düzeneğine bir takım aparatlar ve ölçü aletleri konulmuştur. Deney düzeneği ile disklerin farklı devir, sıcaklık, basınç vb. gibi değişik çalışma şartları etkisinde oluşan sürtünme katsayısı, sıcaklık, basınç, hız, kuvvet-frenleme sayısı grafiklerini oluşturarak kaplanmış fren disklerinin frenleme performansı belirlenmiştir.

Üretilmiş olan fren sistemi test cihazında diski döndürmek için 5.5 kW gücünde trifaze elektrik motoru seçilmiştir. Elektrik motorundan çıkan dairesel hareketin mil üzerinden diske istenilen devirlerde aktarılması invertör sayesinde gerçekleşmektedir. Bu devirler 0-1500 dev/dak arasındadır. Fren sistemi test cihazının şematik görünüşü Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Elektrik motorunun devir sayısı bilgisayar programından kolaylıkla kontrol edilebilmektedir. Sistemde bulunan hidrolik ünite sayesinde fren diskine istenilen değerlerde basınç uygulanabilmektedir. Deneyler esnasında basınç düzensizliğini önlemek ve basıncı istenilen değerde sabit tutmak için piston ile hidrolik motor arasında basınç kontrol valfi yerleştirilmiştir. Söz konusu kontrol valfi sistemde kapalı devre olarak çalışmaktadır. Kontrol paneli göstergesindeki kuvvet kısmına girilen değerler ile hidrolik ünite devreye girerek üzerine balata takılı fren pabucunu diske doğru itmektedir.

ölçmek için kullanılanlarına yük hücresi adı verilir (Parr 1997). Bu cihazlar gelen yükü, milivolt cinsinden algılayarak ekrana yansıtmaktadırlar. Deney düzeneğinde Resim 3.4’de gösterilen 100 kg kapasiteli Esit marka BB100 modeli yük hücresi kullanılmıştır.



Resim 3.4 Yük hücresi.

3.4.3 İvertör

Deney düzeneğine ait Resim 3.5’de gösterilen Telemecanique marka invertör 5,5 kW, 0-1500 dev/dak aralıklarında çalışmaktadır. Çalışma sistemi; elektrik panosundaki pako şartel 1 numaralı konuma getirilerek motora elektrik verilir. Bilgisayar programında invertör ayarları otomatik veya manuel olarak yapılarak istenilen devire kolaylıkla ulaşılması sağlanır.



Resim 3.5 Devir ayarlayıcı invertör.

3.4.4 Temassız İfrared Termometre

Deneyleer sırasında balatanın fren diskine sürtünmesi sonucunda sürtünme ara yüzeyi sıcaklığı artmaktadır. Sıcaklık artışının sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla balatanın diske sürtünme yüzeyinden 2 cm ilerisinden sıcaklık ölümü yapılmıştır. Sıcaklık ölümünde her saniye veri alabilen, infrared olarak ölümü yapabilen -40 +700 °C aralıklarında, 2 °C hassasiyetle çalışabilen, , USB ile PC'den veri toplama özelliği olan Resim 3.6'da gösterilen Optris marka infrared temassız termometre kullanılmıştır.



Resim 3.6 Temassız infrared termometre.

3.4.5 Devir Sensörü

SAE J 2430 test prosedürüne göre frenleme performansı değerlendirmesi belirli hız limitleri arasında yapılmaktadır. Test cihazı maksimum 1500 dev/dak hızla dönebilmektedir. Performans testleri esnasında hız limitleri test cihazımıza ilave edilen (0-1500 dev/dak arasında) Resim 3.7'de gösterilen devir lme sensörü ile kontrol edilerek uygulanmıştır.



Resim 3.7 Devir lme sensörü.

3.4.6 Basınç Sensörü

Test cihazı hidrolik ünitesinden oransal valf kanalı ile kaliper pistonuna gönderilen hidrolik yağın basınç seviyesi Resim 3.8’de gösterilen basınç sensörü (0-25 bar) ile kontrol edilmektedir.



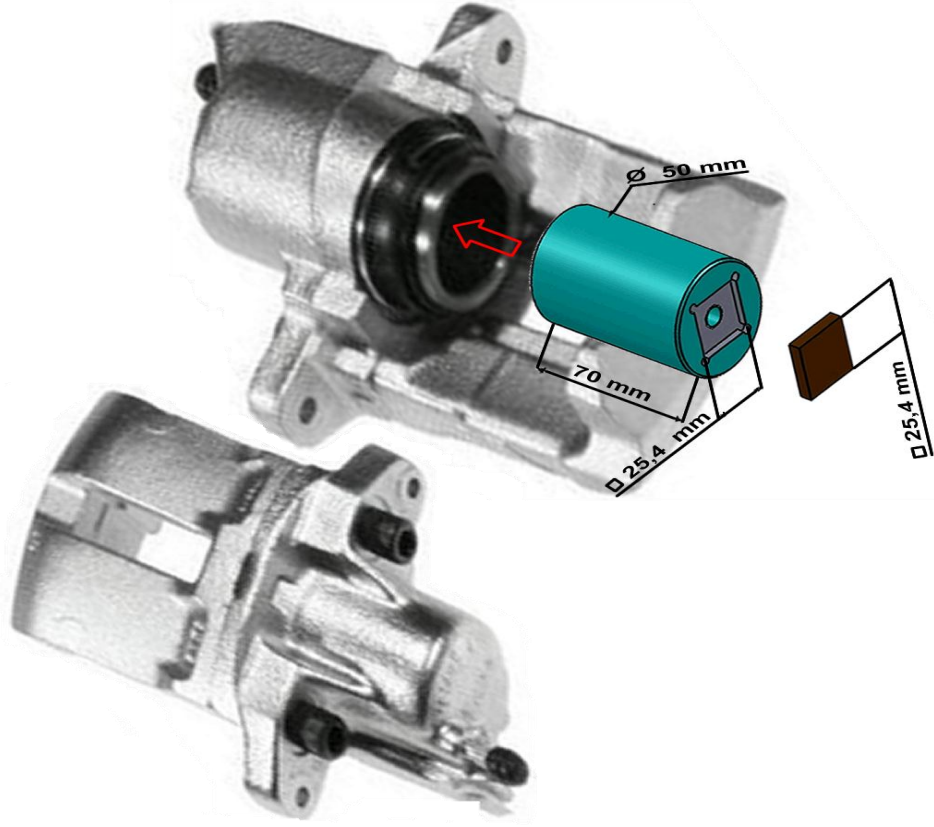
Resim 3.8 Basınç ölçme sensörü.

3.4.7 Hidrolik Ünite

Elektrik motoruna bağlı olan hidrolik pompa, elektrik motorundan aldığı hareketle döndürüldüğünde depo içerisindeki yağı emerek hidrolik on/off valfe gönderir. On/off valften sistemin basınç kontrolü için elektro hidrolik oransal valfe (basınç kontrol valfi) göndeririyor. On/off valf ve oransal valf kontrol panosundaki elektronik kartlarla kumanda edilmektedir. Elektronik kartlara verilen sinyal, test cihazı için geliştirilen program aracılığıyla bilgisayardan gönderilmektedir.

3.4.8 Kaliper ve Balata Tutucu Pabuç

Aşınma ve sürtünme testlerinde kullanılacak disk-balata ikilisine uygun kaliper ve balata tutucu pabuç resimleri Resim 3.9’da gösterilmiştir. Balata tutucu pabuç kaliper pistonu içindeki yuvaya monte edilerek cihaza bağlanmıştır. Önceden 1 inç kare ölçülerinde hazırlanan balatalar pabucun yuvasına takılarak kullanılmaktadır.



Resim 3.9 Kaliper ve balata tutucu pabuç.

3.5 Test Prosedürü Bilgisayar Otomasyon Programı

Deneysel çalışmada kullanılan fren test cihazının SAE J2430 test prosedürü kriterlerini yerine getirebilmesi için bir otomasyon programı geliştirilmiştir. Test cihazında elektrik motoru ile tahrik edilen disk üzerine hidrolik pompa ile oluşturulan basınçlar, oransal elektronik valflerle kontrol edilmektedir. Sürtünmeden dolayı ara yüzeyde oluşan sıcaklık değerleri temassız ısı çift (termokupl) yardımıyla, sürtünme katsayısı değerleri sensörler yardımıyla ve tatbik edilen yük değerleri load cell yardımıyla okunarak hazırlanan bilgisayar programı tarafından kayıt edilmektedir.

Farklı devir, yavaşlama ivmesi ve yüzey basıncı kullanılarak, yük hücresi ekranından okunan değer ve moment kolu dikkate alınarak program tarafından otomatik olarak belirlenen sürtünme katsayısı ve tam yavaşlamayı sağlayan frenleme aşağıdaki formüller ile hesaplanmaktadır (Link Report 1999).

$$\mu=(F_s \times 1,64)/F \quad (3)$$

$$F_s = W_s \times a \quad (4)$$

$$F = P \times A \quad (5)$$

$$\mu=(F_s \times 1,64)/(P \times A) \quad (6)$$

Burada; μ : Sürtünme katsayısı,

F: Uygulanan kuvveti (N),

F_s : Sürtünme kuvveti (Yük hücresinden okunan kuvvet (kg)

F_s : Aracın gidiş yönünde kütle yer değişimini sağlayan kuvvettir. SAE J2430'a göre; frenleme veya yavaşlama kuvveti ile eşittir (N).

W_s : Ağırlığın etkisi hızla birlikte değişmektedir. SAE J2430'a göre; her bir disk üzerine düşen kütle bürüt araç ağırlığı (sürücü, aletler ve disk üzerine düşen aracın boş yükü) veya hafif yüklü araç ağırlığı (kg), (sürücü, aletler, dolu yakıt tankı ve disk üzerine düşen aracın boş ağırlığı) FMVSS 135 taşıtlar için 180 kg'dır.

a: İvme (m/sn^2).

P: Basınç (N/m^2),

1,64: Cihaz sabiti,

A: Balata alanı (m^2),

Tam yavaşlamayı sağlayan frenleme FMVSS 135 sertifikalı araçlar üzerinde 500 N pedal kuvvetini aşmadan 100 km/h hızdaki bir aracı 168 m'lik mesafede durdurmak için araç ağırlığını tamamen sıfırlayacak yardımcı bir güce ihtiyaç vardır. Durma mesafesi, ilk hız, yavaşlama ve reaksiyon süresi arasında ilişki FMVSS kodunda tanımlanan araç dinamiği denklemleri kullanarak aşağıdaki gibi kurulmaktadır.

$$a = V^2/[2x(X-0,72 \times V/2)] \quad (7)$$

Burada; a: Reaksiyon veya hızlanmadan sonra ortalama yavaşlamadır. Burada uygulanan kuvvet neticesinde alınan yol mesafesi $0,72xV/2$ göre hesaplanır. SAE J2430'a göre; bu mesafe hedeflenen yavaşlamayı elde etmek için gereken hız süresi ile karşılanmaktadır (m/sn^2).

V: Frenlemenin başladığı andaki aracın hızı, FMVSS 135 sertifikalı araç için Tablo 3.6'daki başlangıç hızları alınmaktadır (m/s).

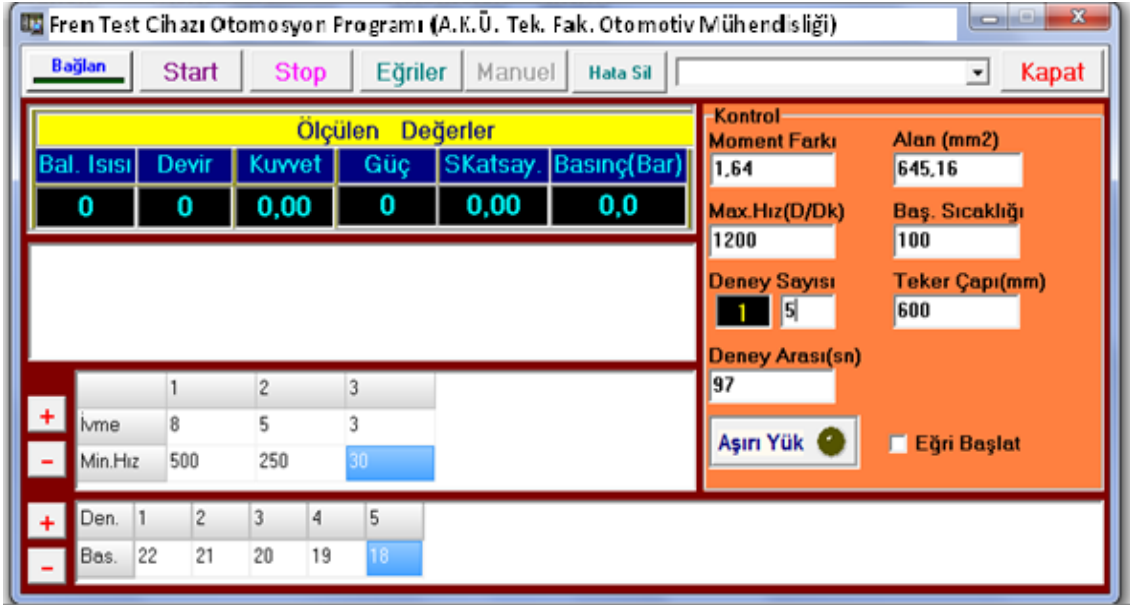
X: İzin verilen maksimum durma mesafesi, FMVSS 135 sertifikalı araçlar için Tablo 3.6'daki değerler göz önüne alınmaktadır (m).

Deneysel çalışmada kullanılan test düzeneğinin çalışması şöyledir: Bilgisayar otomasyon programı kontrol paneli üzerinde bulunan süre, kuvvet, devir, lastik yuvarlanma çapı, başlangıç sıcaklığı, moment farkı, basınç uygulanan alan, frenleme sayısı, uygulanacak basınç ve yavaşlama ivmesi değerleri girildikten sonra başlat düğmesiyle komut verilerek sistem çalışmaktadır. Süre değeri saniye olarak işlemektedir.

Bilgisayar programı sayesinde sensörlerden okunan basınç, sıcaklık, kuvvet ve devir değerleri, sisteme girilen değerleri sağlayana kadar disk serbest dönüyor. Girilen değerler sağlandığında disk yavaşlama ivmesi değerlerinde frenleme yapıyor. Frenleme başladığı anda bilgisayar programı sensörlerden okuduğu değerleri kayıt etmeye başlıyor. Belirlenen test prosedürü kriterleri tamamlandığında frenleme yaparak döngüyü tamamlamış oluyor. Resim 3.10'da fren sistemi test cihazının bilgisayar kontrol paneli görülmektedir.

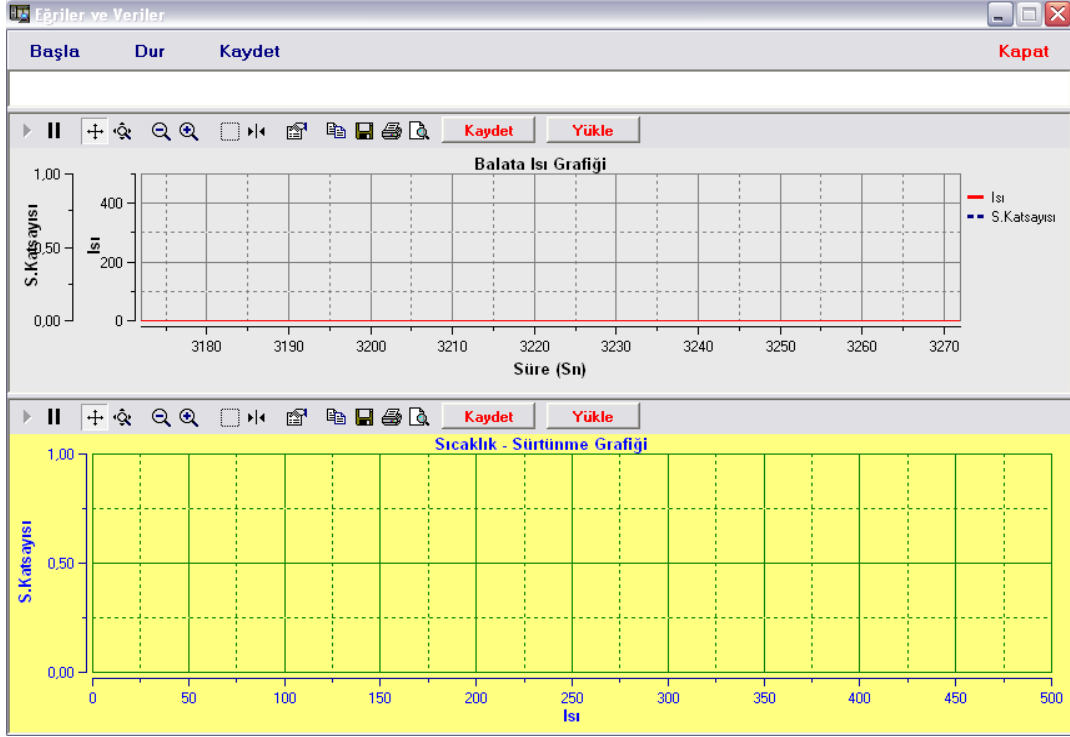
Programın, grafikleri otomatik olarak çizmesi istenmiyorsa deneyler esnasında elde edilen veriler metin dosyası olarak kaydedilmekte ve Excel programına aktarılmaktadır. İstenildiği zaman deneylerden elde edilen grafiklere, kontrol paneli eğriler kısmından yükle ikonu tıklanarak bir önceki grafikler tekrar çizdirilmekte ve grafik üzerinde değişiklikler yapılabilmektedir. Excel programı ile çizilen grafikler yardımıyla frenleme etkinliklerinde frenleme sayısına bağlı olarak hız, basınç ve uygulanan kuvvet miktarlarına göre sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimleri incelenebilmektedir.

Fren sistemi test cihazının bilgisayar kontrol paneli üzerinde bulunan eğri başlat ikonu işaretlenmişse deney sırasında bilgisayar ortamına aktarılan verilerin grafikleri otomatik olarak çizilmektedir. Otomatik olarak çizilen grafiklere kontrol paneli üzerindeki eğriler kısmından ulaşılmaktadır (Resim 3.11).

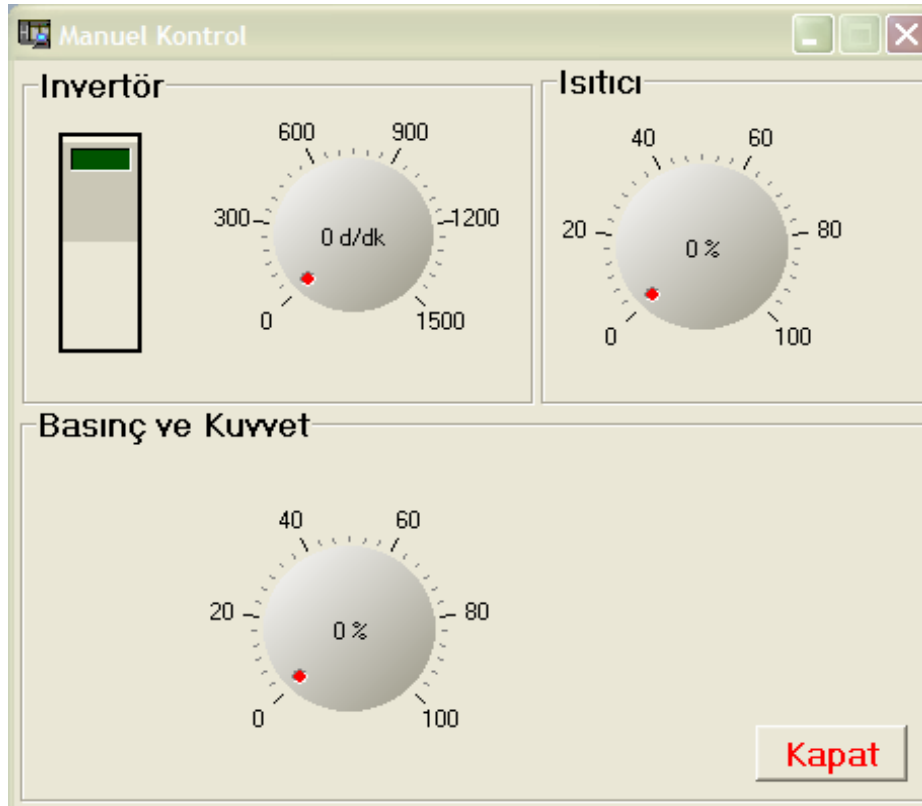


Resim 3.10 Fren test cihazı otomatik kontrol paneli.

Basınç bilgisayar programı tarafından 0-25 MPa arasında ayarlanabilmektedir. Hız devir sayısı ile kontrol edilebilmekte ve devir sayısı 0-1500 dev/dak arasında değiştirilebilmektedir. Deney düzeneği tüm deney işlemlerini otomatik olarak yapmaktadır. Ayrıca fren sistemi test cihazının bilgisayar kontrol paneli üzerinde bulunan, Resim 3.12’de gösterilen manuel kısmına girilip devir ve basınç el ile ayarlanarak deneyler manuel olarak ta yapılabilmektedir. Program sayesinde; bu değişken etkenlerin sürtünme performansına etkileri, farklı deney şartlarının oluşturulması, verilerin kaydedilmesi, kullanılması ve istenildiğinde yeniden ulaşılarak hassas sonuçlar alınabilmesi mümkündür. Frenleme performans kriterlerini yerine getiren bu test cihazı için Delphi yazım dilinde geliştirilen programa istenilen deney şartları girilerek güvenilir olarak deneyler yapılabilmektedir.



Resim 3.11 Bilgisayar kontrol paneli grafik göstergesi.



Resim 3.12 Fren test cihazı manuel kontrol paneli.

3.6 Hassas Teraziler

Disklerdeki kütle kaybını ölçmek için 0,1 g hassasiyetli max 30 kilograma kadar kapasiteli TEKSTAR JZC-TSC marka terazi, balatalardaki ağırlık kaybını ölçmek için 0,001 gr hassasiyetli max 200 gram'a kadar kapasiteli KERN PLS 360-3 marka terazi kullanılmıştır. Kullanılan teraziler Resim 3.13'de gösterilmiştir.



Resim 3.13 Disk ve balata ağırlıklarını ölçmede kullanılan teraziler.

3.7 Mikrometre

OEM ve kaplanmış disk ve balataların kalınlık değişimleri, aşınma testinden önce ve sonra 0,001 mm hassasiyetindeki BMI marka Resim 3.14'de gösterilen dijital mikrometre (0-25 mm) ile ölçülmüştür.



Resim 3.14 Disk kalınlıklarını ölçmede kullanılan dijital mikrometre.

3.8 Perthometre

Disk yüzeyinde meydana gelen pürüzlülük değerlerini belirlemek için Mahr marka yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır (Resim 3.15). Elde edilen değerlerle, deneyde kullanılan diskin pürüzlülük değerleri belirlenmiştir.



Resim 3.15 Mahr perthometer yüzey yürüzlülük cihazı.

3.9 Komparatör

Disklerin yanal salgıları hem dış hem de iç sürtünme yüzeylerinden Resim 3.16'da gösterilen 0,01 mm hassasiyetli komparatörle ölçülmüştür.



Resim 3.16 Disk salgılarının ölçümünde kullanılan komparatör.

3.10 Sertlik Ölçüm Cihazı

Deneyleerde kullanılan fren disklerinin sertliklerini ölçmek için Resim 3.17’de gösterilen Matsuzawa MHT-2 mikro sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Disklerin karşılıklı bölgelerinden ölçülen değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak disk ve kaplamaların sertlik değerleri tespit edilmiştir.



Resim 3.17 Mikro sertlik ölçme cihazı.

3.11 Numune Kesme Cihazı

OEM ve kaplanmış diskleri istenilen ebatlarda kesmek amacıyla Resim 3.18’de gösterilen SERVOCUT-A 300 marka numune kesme cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.18 Numune kesme cihazı.

3.12 Numune Parlatma Cihazı

Kaplama yapılan disklerin mikroyapı incelemelerinde görüntünün daha iyi alınabilmesi için numuneler karbon kaplama yapılmadan önce Resim 3.19’da gösterilen FORCIPOL 2V marka metalografik numune hazırlama cihazında 80, 150, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 numara zımpara ile zımparalama işlemi yapıldıktan sonra keçe üzerinde temizlenerek parlatılmıştır.



Resim 3.19 Numune parlatma cihazı.

3.13 Kesilen Numuneler ve Soğuk Bakalite Alınması

Işık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobundan mikroyapı resimlerinin alınabilmesi için kesilen numuneler metalografik inceleme yapılmak üzere Resim 3.20’de gösterilen METAPRESS-P marka cihaz ile bakalite alınmıştır. Bunun için reçine ve sertleştirici bulunan epoksi kaplama malzemesi ile numuneler soğuk plastik kalıba alınarak katılaşmaya bırakılmıştır. Resim 3.21’de gösterilen yaklaşık 6-8 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler, metalografik inceleme için yüzeyin temizlenmesi ve parlatılması işlemine tabi tutulmuştur.



Resim 3.20 Bakalit kaplama cihazı.



Resim 3.21 Bakalitle kaplanmış ve parlatılmış numuneler.

3.14 Taramalı Elektron Mikroskobu ve Enerji Dağılımlı Spektrometre

OEM ve kaplanmış disklerin mikroyapısını incelemek amacıyla Resim 3.22’de gösterilen JEOL-JSM 5910-LV model taramalı elektron mikroskobunda (SEM) çalışma yapılmıştır. SEM cihazı W (Tungsten) filament ile çalışmaktadır. Cihaz üzerinde ikincil elektron (secondary electron), geri yansıyan elektron (backscattered electron) ve X ışınları (EDX-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) OXFORD INDUSTRIES INCA X-SIGHT 7274 marka detektörü bulunmaktadır. Cihaz görüntü üzerinde nokta, çizgi, alan ve haritalama yöntemleri ile kalitatif ve semi-kantitatif olarak elementel analizleri

yapabilmektedir. Cihaz işletim yazılımında görüntü işleme imkânı sağlamaktadır. Cihaz “değişken basınç” prensibi ile çalışma yeteneğine sahiptir.



Resim 3.22 Enerji dağılımlı spektrometre ekipmanı ile taramalı elektron mikroskobu.

Mikroyapı incelemeleri soğuk bakalite alınmış numunelerin daha iyi görüntü alabilmek için metalik esaslı numunelere gümüş çözelti sürülmüştür. Seramik ve seramik metal numunelerin üzerine Palaron Range SC7620 marka fiziksel buhar çökeltme yöntemi ile 10 mA’de, 1 Pa basınçta, 2 dakika süreyle altın plaka katot kullanılarak altın kaplanmıştır.

3.15 Spektral Analiz Cihazı

Çalışmamızda kullandığımız dökme demir disk ve kaplanmış disklerin elementel analizleri XRF tekniği Resim 3.23’de gösterilen THERMO NITON XL3t 980 marka spektrometre cihazıyla yapılmıştır.



Resim 3.23 Elementel analiz cihazı.

3.16 Işık Mikroskobu

OEM ve kaplanmış disklerin optik mikroskop görüntüleri Resim 3.24’de gösterilen OLYMPUS PME 3 marka mikroskop ile elde edilmiştir.



Resim 3.24 Işık mikroskobu.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölüm; materyal ve metod kısmında anlatılan yöntem ve teknikler kullanılarak disklerin kaplanması, SAE J2430 “Binek Otomobilleri ve Kamyonet Frenleri İçin Dinamometre Etkinlik Karakterizasyon Testi-Fren Değerlendirme Posedürü” standardı kriterlerine göre frenleme testlerine tabi tutulan OEM ve kaplanmış disklerin mikroyapılarının incelenmesi, sertlik değerleri, yüzey pürüzlülük değerleri, disklerdeki yanal salgı miktarları ve aşınma miktarlarının ölçülmesi ile elde edilen verilere dayanılarak frenleme performanslarının değerlendirilmesini içermektedir.






4.1 Kaplama Tozlarının Özellikleri ve Disklerin Kaplanması

Otomobillerde kullanılan fren disklerinin %95'i metal alaşımlarından imal edilmektedir. Son yıllarda kapsam iyice genişlemiş ve bu fren diskleri "havalandırılmalı" olarak çoğu otomobilde standart olarak yer almaya başlamıştır. Bu diskler, hava akımını verimli kullanmak ve bu hava akımı ile disk yüzeyini soğutmak amacı ile kanallı ve delik yüzeyli olarak üretilmektedir. Ancak bu metal alaşımlı disklerin zayıf noktası art arda frenlemelerle çabuk ısınması, yıpranması ve bu ısınma yüzünden frenleme mesafesini uzatmasıdır.

Günümüzde konforlu ve bazı üst sınıf spor otomobillerde kullanılan diskler metalik, seramik ve kompozit malzemelerden imal edilmektedirler. Bu fren disklerinin, yüksek hızlarda iken kısa mesafede duruş imkânı, hafif olmaları, korozyona ve ısıya dayanıklı olmaları, uzun ömürlü olmaları ve yüksek performans göstermeleri önemli özelliklerindedir. Ancak yeni nesil bu disklerin maliyetleri yüksek ve az bulunmaktadır.

Bu disklerin sağladıkları performans özelliklerini ekonomik olarak temin etmek, yaygınlaştırmak ve bilimsel araştırmalara katkı sağlamak amacıyla Tablo 4.1'de özellikleri verilen dökme demir diskler seramik ve kompozit esaslı tozlarla kaplanmıştır.

Tablo 4.1 Kaplama yapılan dökme demir disk ve kaplama tozlarının özellikleri.

Özellikler	1 No' lu Disk	2 No' lu Disk	3 No' lu Disk	4 No' lu Disk	5 No' lu Disk
Kaplama malzemesi	Cr ₂ O ₃ -%40TiO ₂	NiCrBSi-%35W ₂ C	W ₂ C-%12Ni	NiCrBSi	-----
Teknik adı	Metco 6483	Metco 36C	GTV 80.77.1	Metco 15E	Orijinal disk
Kaplama yöntemi	Plazma püskürtme	Alevle püskürtme ve ergitme	HVOF/(High velocity oxy-fuel)	Alevle püskürtme ve ergitme	-----
Kaplama önceki ağırlığı (gr)	7135,4	7136,2	7134,3	7135,6	7164,2
Kaplama sonrası ağırlığı (gr)	7242,1	7284,6	7269,2	7367,3	-----
Kaplama tozları ve orijinal diskin kimyasal kompozisyonları	54,69Cr 40,88Ti 3,59Fe 0,328V 0,148Cu 0,047Ni 0,047Nb 0,015Zr 0,018Ag	62,84Ni 13,19Cr 10,25W 5,95Co 3,46Fe 2,59B 0,148Mn 0,086Mo 0,004Nb	75,47W 22,62Ni 0,494Co 0,418Fe 0,326Cr 0,258Ta 0,12Ti 0,069V	66,49Ni 14,79Cr 5,07Al 4,71Si 3,74Fe 3,32B 0,207P 0,185W 0,110Co 0,102Mo 0,007Nb	93,56Fe 3,61C 1,81Si 0,586 Mn 0,025P 0,023S 0,116Cr 0,021Mo 0,033Ni 0,005Cu 0,015Ti 0,003Mg
Kaplama yapan firma	Senkron Metal&Seramik Kaplama/Gebze	Sermed Mühendislik Pendik/İstanbul	Sermed Mühendislik Pendik/İstanbul	Sermed Mühendislik Pendik/İstanbul	-----
Kaplama öncesi disk kalınlığı (mm)	24,070	24,032	24,093	24,098	24,056
Kaplama sonrası disk kalınlığı (mm)	24,593	24,768	24,340	24,901	-----
Kaplama kalınlığı (mm)	0,524	0,772	0,247	0,803	-----
Sertliği (HV _{0,2})	822	991	660	748	245
Disk resimleri					

4.1.1 Cr₂O₃-%40TiO₂ Tozunun Özellikleri

Krom Oksit ve %40 Titanyum Oksit (Metco 6483) harmanlanarak -90 +16 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. Tıp ve makine sanayiinde kullanılmaktadır (Thermal Spray Materials Guide, Sulzer Metco 2013).

Cr₂O₃ yüksek ergime sıcaklığı (~2300 °C) ve yüksek sıcaklık oksidasyon direncinden dolayı önemli bir refrakter malzemedir (Hirota and al. 2002). Az miktarda silika ve titanya ihtiva eden geleneksel Cr₂O₃ kaplamalar düşük sürtünme ve iyi aşınma direnci için aday malzemelerdir (Du et al. 1995). Metalik malzemeler üzerine plazma püskürtme ile yapılan seramik kaplamaların bağ mukavemeti alev püskürtme ile yapılan kaplamalardan daha yüksektir (Berndt 1985). Metalik kaplamaların bağ mukavemeti ise seramik kaplamalardan daha yüksektir (Salman ve ark. 2006). Plazma püskürtme ile yapılan seramik kaplamalarda gözeneklilik, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğünün azalması ile korozyon direnci artmaktadır (Çelik et al. 1997).

Bazen metalik kaplamalar ve metal alaşımlı karbür kaplamalar yüksek sıcaklık ortamlarında oksidasyon ve dekarbürizasyondan dolayı aşınma ve korozyon uygulamalarında uygun değildir. Bu durumda örneğin, Al₂O₃, Cr₂O₃, TiO₂, ZrO₂ gibi malzemeler ya da bunların kombinasyonları oksit seramik bir kaplama tercih edilebilir. Ancak bu malzemelerin, yüksek aşınma dayanımı, kimyasal ve ısıl kararlılık gibi üstün özellikleri düşük ısıl genleşme katsayısı, düşük ısıl iletkenlik, düşük mekanik mukavemet, düşük kırılma tokluğu gibi dezavantajlarını dengelenmektedir. Bu kaplamaların kalınlığı istenilen kalınlıkta ayarlanabilir. Bu nedenle, iyi bir bağ tabakası oluşturabilmek için, püskürtme parametreleri ve ara bağlayıcı özelliklerini doğru tayin etmek gerekir (Hieman 1996).

Plazma püskürtme ile kaplanan Cr₂O₃ kaplamanın değişik hız ve yüklerde çelik yüzey karşısında hız ve yükün artmasıyla aşınma miktarı artmakta ve kuru sürtünme yapılabilmektedir (Fernandez et al. 1996). Plazma püskürtme yöntemiyle metalik

parçalara yapılan alüminyum oksit ve krom oksit kaplamalar, genellikle aşınma ve korozyon direncini geliştirmek için yapılır. Ancak bu kaplamaların korozyon direnci daha çok meydana gelen gözenek yapısına bağlıdır (Leivo et al. 1997). Kaplama esnasında oluşan lokal hatalar, iğne deliği, mikro çatlaklar ve özellikle gözenekler, bölgesel olarak yığıldıklarında oluk etkisi yaparak ana malzemede çukurcuk korozyonuna sebep olur (Çelik et al. 2005). Bu da malzemenin elastiklik modülünü azaltırken, termal direncini artırır (Çelik ve Sarıkaya 2004). Seramik kaplamalardaki homojen olmayan bu düzensizlikler, kaplamanın mekanik, aşınma ve termal özelliklerini etkilemektedir (Çelik et al. 2003).

Cr_2O_3 kaplamaların en önemli dezavantajı yıpranmış yüzeylerde tane sınırları boyunca oluşan mikro çatlaklardır (Merlin 2012). Bu kaplamalar korozyon direnci ve abrasif aşınma direnci istenilen yerlerde tercih edilir. Yüzey bağlanma mukavemeti yüksektir, yüzeye iyi yapışır ve 2300 HV 0,5 kg gibi yüksek sertlik değerine sahiptir. Krom oksit kaplamalar gemi ve diğer dizel motorları, su pompaları, baskı rulolarında ve makine parçalarında uygulanır. Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplama 0,8 gibi yüksek bir sürtünme katsayısı ürettiğinden dolgu kaplaması olarak kullanılabilir. Krom oksit kaplamaların aşınma davranışı çeşitli şartlar altında incelenmiştir. Deney şartlarına bağlı olarak, abrasif aşınma plastik deformasyon, mikro çatlak ya da bunların hepsi bir arada olabilir (Hieman 1996).

TiO_2 'in sıçrayan partiküller arasında iyi bir yapışma sağladığından Titanya kaplama yüksek sertlik, yoğunluk ve yapışma gücü sağlar. Bu, diğer bileşikler ile esasen saf olarak, abrasif, erozif ve yorulma aşınma mekanizmalarının önlenmesinde kullanılır (Bollelli et al. 2006). Plazma püskürtme ile kaplanan saf TiO_2 'nin hem kuru hem de yağlı temas şartlarındaki performansı çok iyidir. TiO_2 oldukça yüksek poroziteli olması sebebiyle çok iyi yağ depolayabilir ve yağ filminin iyi bağlanmasını sağlayabilir (Halling 2000). Titanyum bazlı alaşımlar düşük kayma hızında yüksek sertliğe rağmen yüksek aşınma gösterirler. Bu da yüksek sürtünme katsayısı oluşturur. Kırılma tokluğu ve beklenmedik tribomekanik tepkilere karşı yüksek direnç sağlar. Katı yağlayıcılık özelliği vardır (Qu et al. 2005).

4.1.2 NiCrBSi-%35W₂C ve NiCrBSi Tozlarının Özellikleri

NiCrBSi-%35W₂C (Metco 36C) harmanlanarak -150 +45 µm tane boyutlarında imal edilmiş seramik metal kompozittir. Kaplamada Nikel alaşımı içerisinde sert karbür tanelerinin çökmesinden dolayı homejen yapı elde edildiğinden mükemmel metalurjik bağlanma temin edilmektedir. 540 °C'ye kadar sıcaklıklarda, aşınma, korozyon ve sertlik özelliklerini muhafaza eder. Sertliği 1000-1050 HV mikro sertliğe kadar yükselir (Thermal Spray Materials Guide, Sulzer Metco 2013).

Seçilen püskürtme yöntemi NiCrBSi kaplamalarda çok önemlidir. En uygun yöntemlerden biriside alevle püskürtme yöntemidir. Bu kaplamalar 500 °C sıcaklığa kadar iyi aşınma davranışı sergilediklerinden hacimlerini muhafaza etmektedirler (Rodriguez et al. 2003). Nikel bazlı kaplamalar bilhassa NiCrBSi kaplama yüksek sıcaklıklarda korozyon ve aşınma direnci uygulamalarında çok iyi performans sergiler. Ni esaslı alaşımlar, ısı püskürtme teknolojisinde püskürtme-ergitme tozları olarak bilinir. Kaplama sonrası ergitme işlemi, alaşımın katı-sıvı sıcaklıkları arasında (927-1127 °C) oksit-asetilen başlığı veya fırın yardımı ile yapılır. Böylece kaplama tabakası ile ana malzeme arasında kaplamanın difüzyonu ve bağ mukavemeti artırılmış olur (Miguel et al. 2003). Ni-esaslı alaşımların aşınma direncini arttırmak için bir diğer yol ise kaplama tabakası içine WC, VC ve CrC gibi sert fazların ilavesidir (Hidalgo 2001).

Kendi başlarına ya da kombine kullanılan Nikel bazlı alaşımlar, diğer takviye partiküllerle beraber yüksek aşınma, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık direnci gibi üstün özellikler sergilemektedirler (Ming et al. 1998, Wu et al. 2003, Serres et al. 2011). Piston, silindir, kutu ambalaj, prizler, pompa milleri, gıda, tıp, otomotiv ve uzay sanayinde kullanılır. NiCrBSi tozunu termal püskürtme kaplamalarında aşınma miktarının artmasında yükün etkisi sıcaklıktan daha fazladır (Rodriguez et al. 2003).

Altlık malzeme yüzeyinde sıcaklığının düşük olması bu yöntemin önemli avantajlarından birisidir. Nikel esaslı kaplamaların aşınma dirençlerinin yanında oksitlenmeye karşı direnç istendiğinde kullanılmaktadır. NiCrBSi nikel esaslı alaşımlarından birisidir. NiCrBSi esaslı alaşımlar cam seramik, çimento ve çelik

üretiminde aşınma dirençli yüzey sertleştirme malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu tip alaşımlar aşınma ve korozyona gerektiren uygulamalarda kimya, petrol, cam kalıp endüstrisi ile valf, sıcak iş zimbalarında ve vantilatör kanatçıklarında kullanılmaktadır. Aynı zamanda, piston çubuklarının, toprak işleme araçlarının ve boyler, tüpler ve yanma silindirlerinin yüzeylerinin kaplanmasında kullanılmaktadır (Miguel et al. 2003, Carrasquero et al. 2008).

Nikel esaslı alaşımlar kendinden akışkanlı olup, birçok özelliğe beraber sahip olmasından ve mükemmel ıslatmaya sahip olduğundan tercih edilmekte olup, kaplama esnasında iyi yapışma sağlanmaktadır. Krom yüksek korozyon direnci ve sertliğin arttırarak yüksek sıcaklıklarda, adhesif ve abrasif aşınmaya karşı direnç sağlanmaktadır. Bor kaplama tozunun ergime sıcaklığını düşürmekte ve aynı zamanda sert fazların oluşumuna katkı sağlamaktadır. Silisyum ergime sıcaklığını düşürmekte ve akışkanlığı arttırmaktadır. Demir ise difüzyon oranlarını arttırmaktadır. Karbon sert karbürlerin oluşmasını sağlayarak sertlik ve aşınma dirençlerinin artmasını sağlamaktadır (Miguel et al. 2003, Rodriguez et al. 2003, Stoica et al. 2005, Gonzalez et al. 2007).

Nikel bor 1092 °C'de Ni-Ni₂B ötektiği oluşturmakta, silisyum ilavesi ergime derecesini daha da düşürmektedir. Nikelde borun çözünürlüğü çok az olup, silisyum nikel ile yer alan katı çözeltilisi oluşturmaktadır (Sarı ve ark. 2004).

NiCrBSi kaplama tozlarının içerisine daha sert seramik tozları katılarak sertlik ve aşınma özelliklerinin geliştirilmesi sağlanmaktadır. Bu sert parçalardan olan tungsten karbür (WC) NiCrBSi içerisine belirli oranlarda katılarak aşınma dirençlerinin artırılmasını sağladığından birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Stoica et al.2005, Stewart et al. 2005, Sarı ve Yılmaz 2008). WC malzeme NiCrBSi ile ikili oluşturduğunda endüstriyel uygulamalarda tokluk ve aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Ayrıca, WC ilave edilmiş NiCrBSi tozların kaplanmasında HVOF yöntemi ile kullanılması daha uygundur (Yılmaz ve Akbaş 2008).

NiCrBSi (Metco 15E) harmanlanarak -106 +45 µm tane boyutlarında gaz atomizasyon yöntemiyle imal edilmiş metal kompozittir. İyi ıslatma özelliği olduğundan mükemmel

metalurjik bağlanma temin eder. Gözeneksiz ve yoğun yüzeyler elde edilebildiğinden yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci sağlar. Sertlik değeri 850-900 HV mikro sertliğe kadar yükselir (Thermal Spray Materials Guide, Sulzer Metco 2013).

4.1.3 W₂C-%12Ni Tozunun Özellikleri

W₂C-%12Ni (GTV 80.77.1) harmanlanarak -45 +20 µm tane boyutlarında imal edilmiş karbürlü seramik metal kompozittir. Mükemmel aşınma, sıcaklık, korozyon direnci ve yüzey tabakasında 1000-1200 HV_{0,3} mikro sertlik özelliklerini 540 °C'ye kadar muhafaza eder (İnt. Kay. 4).

Tungsten karbürlü seramik metaller yüksek sertlik ve aşınmaya karşı üstün özellikleri ile geniş bir kullanım alanına sahiptir (Upadhyaya and Bhaumik 1988, Taheri-Nassaj and Mirhosseini 2003, Xiong et al. 2008). Tungsten karbür esaslı sermet sert metal üretim uygulamalarında yüksek sertlik, mükemmel aşınma ve korozyon direnci özelliklerinden dolayı geniş bir alanda kullanılır (Koç et al. 2000, Xiong et al. 2008). Sert alaşımlar ve refrakter karpitler, Tungsten karbür sementidi yüksek sertlik ve çok iyi aşınma direncinin dışında yüksek basınç ve sıcaklıklardaki korozyon direnci ile madencilik endüstrisinde, metallerin işlenmesi ve delinmesi gibi geniş uygulama alanlarında kullanılır. Tungsten karbür taneleri mikro ve nano boyutta üretildiği zaman sementit karpitlerin fiziksel ve mekaniksel özellikleri iyileştirilmiştir (Zhang 1999).

Düşük konsantrasyonlarda bile WC-Ni seramik metal kompozitlerin sertliği W₂C fazının miktarından etkilenir. Sinterleme sonrası soğuma süresine bağlı olarak W₂C kararlıdır. Bu durum kompozitlerin mekaniksel özelliklerinin iyileşmesini sağlar (Li et al. 2006). Kaplama için kullanılan toz boyutunun küçük olması durumunda toz sıvı metal içinde kolayca ergir ve W oranına bağlı olarak karbür oranı da artar (Yang and Man 2000). Kolayca ergiyen bir alaşım elementi sayesinde, kaplama/alt tabaka ara yüzeyinde güçlü bir bağ oluşur ve kaplamanın mekanik özellikleri iyileşir (Mateos et al. 2000, Wu et al. 2003). W₂C fazı oldukça kırılğan bir faz olup, kaplama esnasında ıslatma kabiliyetini arttırmaktadır (Miguel et al. 2003, Kim et al. 2003, Navas et al. 2006, Gonzalez et al. 2007, Carrasquero et al. 2008). Sertlik değerlerinde kaplama

parametreleri etkili olup, farklı kaplama parametrelerden dolayı önceki çalışmalarda daha yüksek değerler elde edilmiştir (Miguel et al 2003, Planche et al 2005, Gonzalez et al. 2007). Kaplama içindeki gözenek miktarına bağlı olarak sertlik değerlerinde düşüş görülmektedir (Kim et al. 2003, Planche et al. 2005). NiCrBSi kaplama tozunun içerisine belirli oranlarda daha sert ve yüksek sıcaklıklarda aşınma dirençleri iyi olan WC parçacıkları ilave edilerek daha sert ve aşınmaya dayanıklı kaplamalar elde edilmektedir. WC sahip olduğu 2100 HV ile hem sertliğin hem de aşınma direncinin artmasını sağlayabilmektedir (Kim et al. 2003).

Kaplama ile altlık arasındaki bağın iyi olduğunun gözlenmesi, bu tip kaplamalarda HVOF yönteminin uygun olduğunu göstermektedir. Kaplamaların sertlik değerleri altlık malzemenin sertlik değerlerinden 1,8 kat daha yüksektir. WC ilave edilen kaplamalarda sertlik değeri 4 kat daha artmaktadır (Yılmaz ve Akbaş 2008).

Tungsten karbür; yüksek sertlik, yüksek ergime noktası, aşınma direnci, termal şok direnci ve oksidasyon direnci gibi özellikleri bir araya getiren gelişmiş bir seramik malzemedir. Sinterlenmiş tungsten karbür sermetler abrasif ve erozif aşınmaya direnç istenen uygulamalarda sıkça kullanılır. Bu malzemeler plazma püskürtme, yüksek hızlı oksidasyon, patlamalı tabanca gibi yöntemlerle uygulanabilir (Koutsomichalis et al. 2008).

4.1.4 Disk Yüzeylerinin Kaplamaya Hazırlanması

Alt tabaka ve ısıl püskürtme birikintisi arasındaki bağ tipi mekanik, metalurjik, kimyasal ya da bunların kombinasyonu olabilir. Kaplamanın özellikleri kullanılan kaplama malzemesine, püskürtme yöntemine ve parametrelerine göre değişir. Uygun yüzey hazırlama, güçlü bir bağ elde etmede en önemli parametredir (Kearns 1984).

Üstel (1995)'e göre, metaller üzerine uygulanan kaplamalar iki temel prensibe göre yapılmaktadır. Bunlardan birincisi kaplama ile metal arasına bir difüzyon bağı oluşturarak, ikincisi ise herhangi bir difüzyon bağı olmaksızın metal-kaplama arasındaki mekanik yapışma ile bağlanmasıdır. Difüzyonlu kaplamalarda, metal ile kaplama

arasındaki bağı özelliği, malzeme bileşimleri ile doğrudan ilişkilidir. Plazma püskürtme yöntemi gibi difüzyonsuz kaplamalarda ise, kaplama ile metal arasındaki mekanik yapışma tamamen kaplama prosesi şartlarına bağlıdır. Evcin (2006)'e göre ise, bu mekanik bağlanmanın yanında, partiküllerin ana malzeme ile mikro kaynaması ve kimyasal bağ oluşumu gibi diğer bağlanma mekanizmaları da mevcuttur.

Püskürtülen tabakanın altlık malzemesi ile iyi bir tutunma temin edebilmesi için, altlık malzeme yüzeyinin iyi bir şekilde hazırlanması gerekir. Bilhassa püskürtülen tabakanın kalınlığı arttıkça, ısının tesiriyle meydana gelen kendini çekme gerilimleri, tabakanın tutunma mukavemetini azaltır ve çatlama ile tabakanın kalkma tehlikesi ortaya çıkar (Anık 1983, Oğuz 1993).

Anık vd. (1993)' ne göre, kaplanacak yüzey yağlardan arındırılmış ve metalik temizlikte olmalıdır. Bu kural, DIN 8567'de şu şekilde ifade edilir: "Yüzeyin itinalı ve tekniğe uygun hazırlanması, püskürtmenin bu hazırlıktan mümkünse hemen sonra yapılması ile püskürtülen tabakanın yeterli bir tutunmaya sahip olduğuna garanti edilebilir." Bu ifade, yüzey ön hazırlığının ve püskürtmenin başlamasına kadar geçen sürenin, püskürtme tabakasının tutunması bakımından önemini olduğunu belirtmektedir.

Kaplama ve altlık malzeme arasındaki yapışma mukavemetini arttırmak için altlık malzeme yüzeyindeki oksit filmleri, yağ, gres, nem, organik veya inorganik maddeler temizlenerek kaplanacak yüzey pürüzlendirildi. Bunun için yağ giderme ve kumlama işlemleri gerçekleştirildi. Kumlama işleminden sonra kaplama işlemine geçildi. Bu esnada yüzeylerin tekrar kirlenmemesi ve oksitlenmemesi için fazla zaman kaybetmemeye dikkat edildi.

4.1.5 Kaplama Yöntemlerinin Uygulanması

Deneysel çalışmalarda kullanılan disklerin kaplama parametreleri seçilen toz ve dökme demir disk malzemesine göre belirlenmiştir. Yöntemlerin uygulanması aşağıda anlatılmıştır.

4.1.5.1 Plazma Püskürtme Kaplama Yönteminin Uygulanması

Yağların yüzeyden uzaklaştırılması amacı ile yağ çözücü kimyasal maddeler kullanılmıştır. Yüzeyi pürüzlendirmek amacıyla kullanılan havanın ve kumlama malzemesinin kuru ve temiz olmasına dikkat edilmiştir. Yüzey pürüzlendirme işleminde 35 grit'lik SiC toz kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün en iyi şekilde elde edilmesi amacıyla, yüzey pürüzlendirme işlemi 90°'lik bir açı altında, 9 bar basınçta ortalama Ra=8-9 µm pürüzlülük değerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan 1 no'lu dökme demir disk yüzeyi üzerine Ni20Cr (Metco 43F-NS) ara bağlayıcı ve Cr₂O₃-%40TiO₂ (Metco 6483) seramik toz aşağıda Tablo 4.2'de verilen atmosferik plazma püskürtme parametreleri ile kaplanmıştır.

Tablo 4.2 Plazma püskürtme kaplama parametreleri.

Kaplama parametreleri	Özellik/değeri
Kaplama yapılacak disk	1 no'lu disk
Kaplama malzemesi	Cr ₂ O ₃ -%40TiO ₂
Kaplanacak ana malzeme	Dökme demir
Plazma tipi	Ar+H ₂
Argon akış hızı (lt/dk)	44
Hidrojen akış hızı (lt/dk)	15
Plazma akımı (A)	500
Ark voltajı (V)	60-70
Plazma tabancası tipi	METCO 3MB
Nozul ve elektrod	W katod-Cu anod
Nozul çapı (mm)	8
Enjektör mesafesi (mm)	100
Enjektör açısı	90°
Toz besleme oranı (gr/dk)	42
Toz taşıyıcı gaz (lt/dk)	6

Yüzeyleri temizlenerek pürüzlendirilen dökme demir disk malzemesi üzerine -53 +11 µm tane boyutlarında, atomize edilmiş, metalik alaşım astar (ara bağlayıcı) Ni20Cr (Metco 43F-NS) tozu 30 µm kalınlığında uygulanmıştır. Plazma oluşturmak amacıyla

Ar+H₂ gazları kullanılmıştır. Plazma püskürtme yöntemiyle Ni20Cr ara bağlayıcı kaplama uygulanması esnasında diskte aşırı ısınmayı önlemek için diskin arkasından 3-5 atm basınçlı hava ile soğutma yapılmıştır.

4.1.5.2 Alev Püskürtme ve Ergitme Kaplama Yönteminin Uygulanması

Çalışmamızda kullanılan 2 no'lu disk NiCrBSi-%35W₂C (Metco 36C) kaplama tozu ile 4 no'lu disk NiCrBSi (Metco 15E) kaplama tozu ile aşağıdaki Tablo 4.3'de verilen alevle püskürtme ve ergitme parametreleri ile kaplanmıştır. Tablo 4.4'de ise alev oluşturmada kullanılan yanıcı ve yakıcı gazın özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.3 NiCrBSi-%35W₂C ve NiCrBSi tozlarının alev püskürtme ve ergitme yöntemi ile kaplama parametreleri.

Kaplama parametreleri	Özellik/değeri	
	2 no'lu disk	4 no'lu disk
Kaplanacak disk	NiCrBSi-%35W ₂ C	NiCrBSi
Kaplanacak toz	NiCrBSi-%35W ₂ C	NiCrBSi
Püskürtme tabancası tipi	6 P	
Püskürtme nozul tipi	MG-C 26	
Püskürtme mesafesi (mm)	50-75	
Püskürtme açısı	90°	
Oksijen basıncı (Bar)	4	
Asetilen basıncı (Bar)	0,7	
Hava basıncı (Bar)	4,8-4,9	
Oksijen akış hızı (m ³ /s)	1,7	
Asetilen akış hızı (m ³ /s)	0,93-1,4	
Püskürtme hızı (kg/s)	0,7-0,9	

Yağ, pas ve kirler yüzeyden uzaklaştırıldı. Disk yüzeyleri 7 bar basınçtaki SiC toz püskürtülerek ortalama Ra=9-11 µm değerinde pürüzlendirilerek hazır hale getirilmiştir. Alevle püskürtme ve ergitme yöntemi ile yapılan kaplamalarda ana malzemeler ile kaplama tabakası arasındaki bağlanma genellikle intermetalik ve kimyasal karakterli olduğundan yüzeyin dış etkilerden etkilenmemesi için derhal kaplama işlemine geçilmiştir.

Tablo 4.4 Oksijen ve asetilen gaz karışımının özellikleri (Salman 1995).

Gaz karışımı	Alev sıcaklığı (°C)	Isı değeri (kJ/m ³)	Tutuşma hızı (cm/s)	Alev verimi (kJ/cm)
Oksijen-Asetilen	3300	56430	1350	45

4.1.5.3 HVOF Püskürtme Kaplama Yönteminin Uygulanması

Oluşturulan pürüzlü yüzey üzerine Tablo 4.5’de verilen HVOF termal püskürtme yöntemi parametreleri ile W₂C-%12Ni karbür esaslı kaplama ortalama 250 µm kalınlığında kaplanmıştır.

Tablo 4.5 W₂C-%12Ni kaplama tozunun HVOF yöntemi ile kaplama parametreleri.

Kaplama parametreleri	Özellik/değeri
Kaplama yapılacak disk	3 no’lu disk
Kaplanacak toz	W ₂ C-%12Ni
Püskürtme tabancası tipi	WokaJet-410-Si Gun
Püskürtme mesafesi (mm)	350
Püskürtme açısı	90
Oksijen basıncı (Bar)	10
LNG basıncı (Bar)	8,5
Azot basıncı (Bar)	4
Oksijen akış hızı (lt/dk)	150
Yanıcı gaz	LNG
Püskürtme hızı (kg/s)	5,9

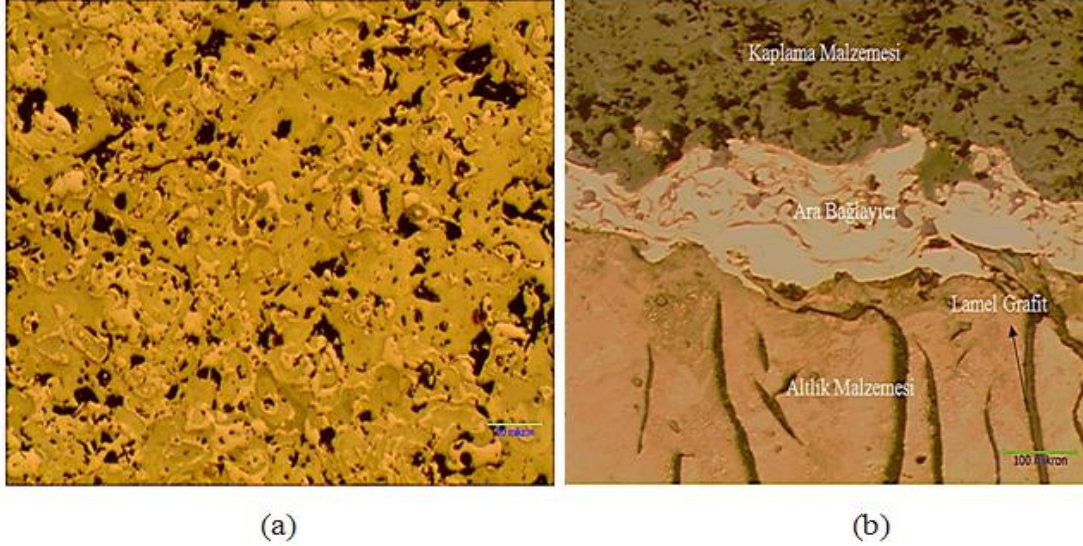
Yüzeyi yağ, pas vs. kirlere temizlenen disk yüzeyi SiC toz püskürtülerek temizlendi ve ortalama Ra=7-8 µm değerinde pürüzlendirilmiş 3 no’lu dökme demir disk yüzeyine -90 +45 µm tane boyutlarında Ni5Al (Metco 450NS) ara bağlayıcı yaklaşık 50 µm kalınlığında HVOF termal püskürtme yöntemi ile kaplanmıştır. Servis koşullarında çalışacak -45 +15 µm tane boyutundaki W₂C-%12Ni (GTV 80.77.1) en üst kaplamanın Ni5Al ara bağlayıcı ile kuvvetli bir bağ oluşturabilmesi için Ni5Al ara bağlayıcı yüzeyinde yeterli ortalama pürüzlülük değeri (Ra=9-10 µm) belirlenmiştir. Isıl püskürtme esnasında diskin aşırı ısınmasını önlemek için kaplama uygulanan yüzeyin tersinden basınçlı hava ile soğutma uygulanmıştır.

4.2 Disklerin Mikroyapılarının İncelenmesi ve Analizi

Kaplanmış ve orijinal disklerin mikroyapıları LM ve SEM yardımıyla incelenip EDS ile analizleri yapılmıştır. Kaplamalar genel olarak, altlık malzemesi, kaplama tabakası ve ara bağlayıcı tabakası olmak üzere olarak üç bölgeden oluşmaktadır. Kaplama işlemi ile aşınma dayanımı yüksek, dış tesirlere dayanıklı yüzey yapıları elde edilmiştir.

4.2.1 Plazma Püskürtme Yöntemiyle Cr_2O_3 -%40 TiO_2 Kaplanan Diskin Mikroyapı Özellikleri

Metalik altlık dökme demir disk malzemesi ile seramik kaplama malzemesi içerisindeki oksitlerin gevrek, sert ve kırılğan olmasından kaynaklanan uyumsuzluğunu tolere etmek için kullanılan Ni20Cr intermetalik ara bağlayıcı içerisinde bulunan Ni elementinin tok ve sünek bir yapının oluşmasını sağladığı Şekil 4.1'de kaplama tabakası yüzeyi ve kesitinden elde edilen ışık mikroskobu mikrograflarından gözlemlenmektedir.



Şekil 4.1 Plazma püskürtme yöntemiyle Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplanan diskın ışık mikroskobu mikrografı, a) yüzeyinden x50, b) kesitinden x100.

Cr_2O_3 -%40 TiO_2 seramik toz kullanılarak plazma püskürtme yöntemi ile kaplanan dökme demir disk altlık malzemesinin SEM görüntüleri aşağıdaki Şekil 4.2 ve 4.3'de gösterilmiştir. Dökme demir disk ve kaplama tabakası arasında iyi bir bağ mukavemeti

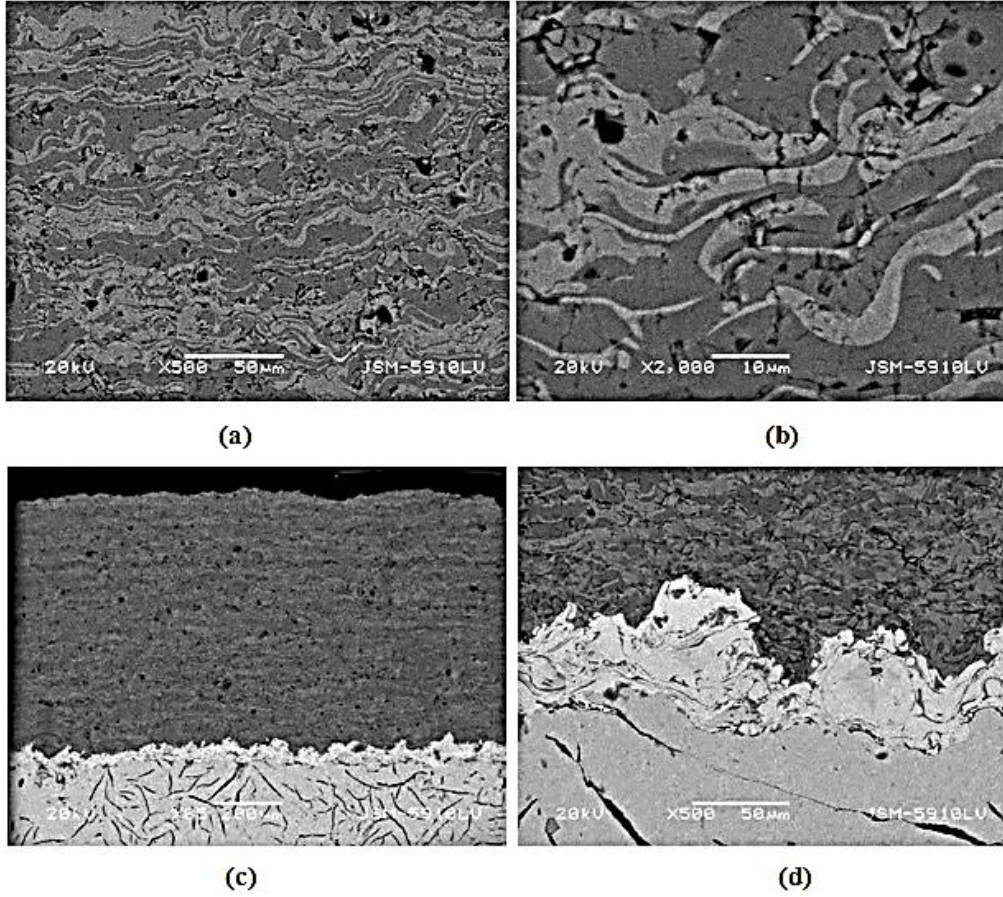
oluşturabilmek için kullanılan Ni20Cr intermetalik ara bağlayıcı tabakası arasında Ni elementinin altlık dökme demir malzemesine kuvvetli difüzyonu sebebiyle uyum sağlandığı için mükemmel bir fiziksel bağ kurulduğu, mekanik etkileşiminin istenilen seviyede olduğu görülmektedir. Buytoz ve ark. (2012)'nin bildirdiğine göre, plazma püskürtme sistemlerinde katılma sırasında tozlar, ya tamamıyla ergir veya kısmen ergir yada hiç ergimezler. Normal şartlar altında plazma alevinin oluşturduğu yüksek ısıdan dolayı ergimeyen toz miktarı azdır. Görüntü analizlerinden anlaşıldığına göre, kaplama malzemelerinin kısmen ergiyik ve tamamıyla ergiyik durumları kaplama tabakasında %1-2 civarında gözenek oluşturmuştur. Kaplama tozu içerisinde TiO₂ miktarının artırılması kaplama tabakasının tokluk ve sünekliğini artırmaktadır (Bollelli et al. 2006).

Şekil 4.2 (a) ve (b)'de ki mikrografta kaplamada, ısı püskürtme kaplamalarda klasik bir olgu olan ve ergiyik haldeki metal damlacıkların alt malzemeye çarpıp, sürekli bir şekilde ıslatmasıyla oluşan lamelli mikroyapı görülmektedir (Lee et al. 2000, Li et al. 2006). Lamelli yapı, ergiyik haldeki partiküllerin alt malzemeye çarpması, deformasyona uğraması ve katılması şeklinde meydana gelir (Pawłowski 2008). Bu lameller alt malzemeye paralel olarak oluşur ve lamellerin orta kısmı kalın, uç kısımlara doğru ise kalınlık azalmaktadır (Kuroda and Kobayashi 2004).

Şekil 4.2 (c) ve (d)'de kaplamada ergimemiş, kısmi ve tamamen ergimiş bölgeler SEM fotoğrafından görülmektedir. Bağlanma tabakasından kaplamanın üst kısmına doğru gözeneklilik azalmıştır. Plazma püskürtme kaplamalar genellikle porozite, oksit, ergimemiş, yarı ergimiş partiküller ve inklüzyon içerirler (Tekmen vd. 2003, Çelik et al. 2003). Gözenekler genel olarak tüm ısı püskürtme kaplamalarda meydana gelmektedir (Luo et al. 2003). Şekil 4.3'de 1 no'lu noktanın Cr₂O₃-%40TiO₂ seramik kaplama olarak adlandırılan kaplamanın kesitini karakterize eden, x1000 büyütme oranına sahip mikrograf gösterilmiştir.

Mikrografın açık gri renkli bölgesinden alınmış Şekil 4.3'deki 1 no'lu EDS analizi Krom'ca zengin bir mikroyapıyı sergilemektedir. Yine aynı mikrograftan alınmış, 2 no'lu nokta, koyu gri renkli bölgenin Şekil 4.3'deki 2 no'lu EDS analiz sonucu Ti ve O

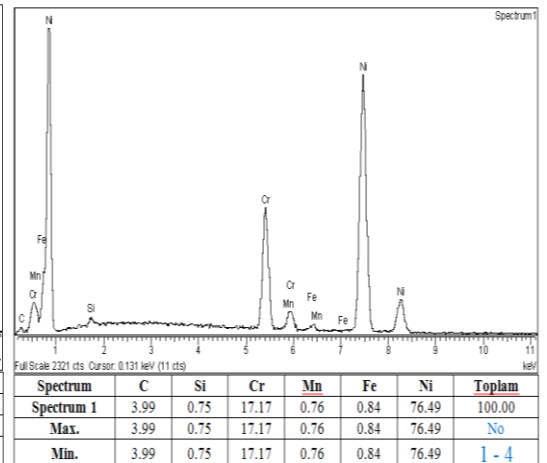
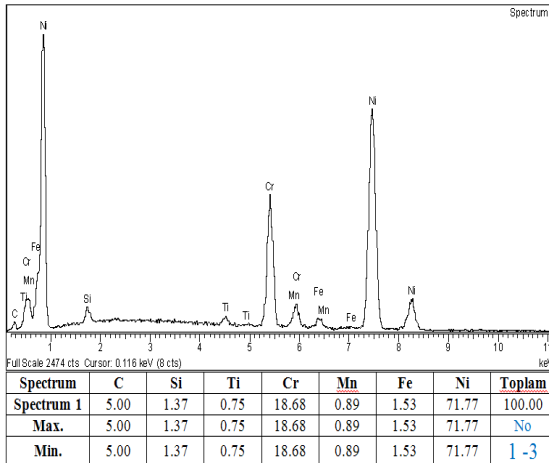
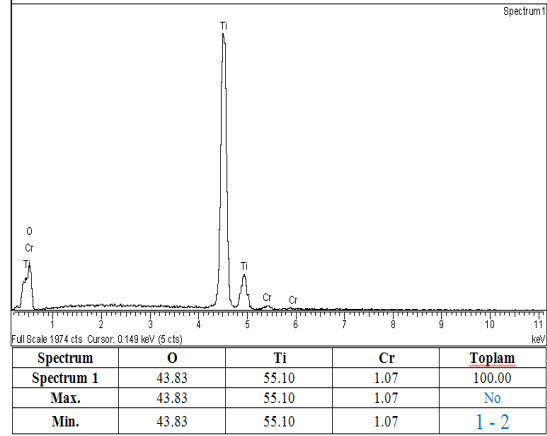
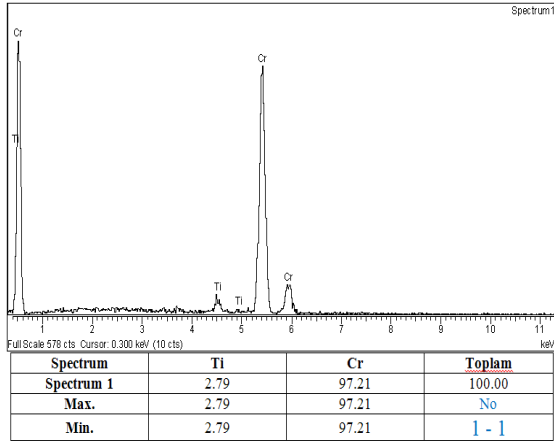
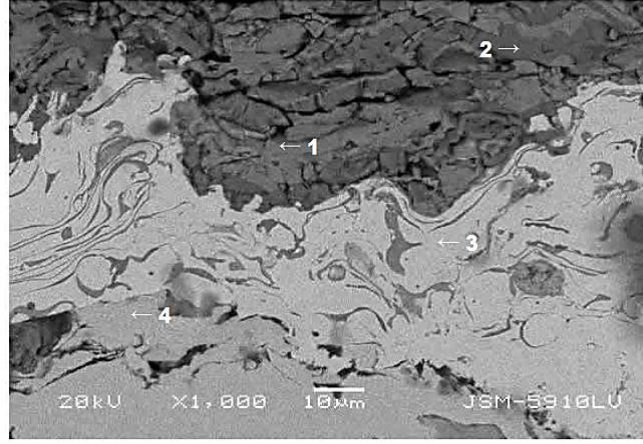
bakımından zengin bir mikroyapıyı sergilemektedir. 3 no'lu nokta, beyaz renkli bölgenin Şekil 4.3'deki 3 no'lu EDS analizi tipik ara bağlayıcı NiCr'un elementel analizleri ile büyük oranda örtüşmektedir. Burada %5 gibi yüksek oranda analiz edilen karbonun yüksek sıcaklığın etkisiyle altlık disk malzemesinden ara bağlayıcıya difüze olduğunu söylemek olasıdır.



Şekil 4.2 Plazma püskürtme yöntemiyle Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplanan diskin taramalı elektron mikroskop (SEM) mikrorafı, a) yüzeyden x500, b) yüzeyden x200, c) kesitinden x85, d) kesitinden x500.

Gözeneklilik, yetersiz dolgu ve pürüzlü kaplama yüzeyine çarpan ergiyik partiküllerin ıslatma kabiliyetinin yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır (Fervel et al. 1999). Ayrıca altlık malzemenin yüzey pürüzlülüğü, püskürtme mesafesi, altlık malzeme sıcaklığı ve kaplama kalınlığına bağlı olarak da gözenek miktarı değişmektedir (Yin et al. 2008). Kullanılan tel ve toz malzeme cinsine bağlı olarak kaplamalarda %20'lere kadar gözenek bulunabilir (Çelik ve Sarıkaya 2004). Bundan başka, kaplama ile alt

tabaka arasında ısıl ve mekanik özellikler arasında uyumsuzluk varsa, bu durumun da çatlaklara yol açtığı belirtilmiştir (Song et al. 2008).

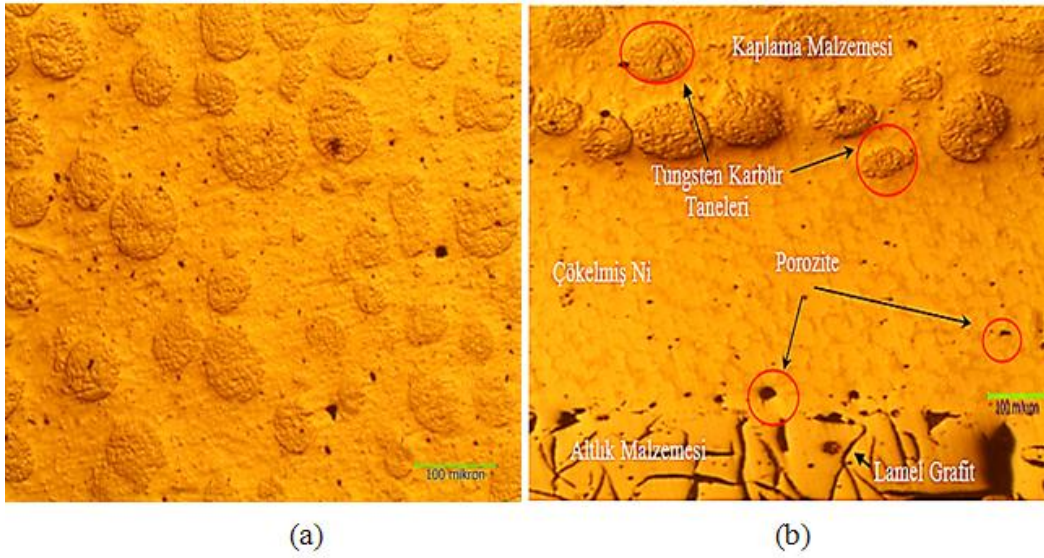


Şekil 4.3 Plazma püskürtme yöntemiyle Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplanan diskin kesitinden alınan taramalı elektron mikroskop (SEM) mikrorafı ve 1, 2, 3 ve 4 numaralı bölgelerinin EDS analizleri.

Altlık gibi görünen 4 no'lu noktanın Şekil 4.3'deki 4 no'lu EDS analizi için ise tipik NiCr ara bağlayıcıya yüksek oranda karbon ve az miktarda altlık malzemedan Fe difüzyonu 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 görüntülerinlen anlaşılmaktadır.

4.2.2 Alev Püskürtme ve Ergitme Yöntemiyle NiCrBSi-%35W₂C Kaplanan Diskin Mikroyapı Özellikleri

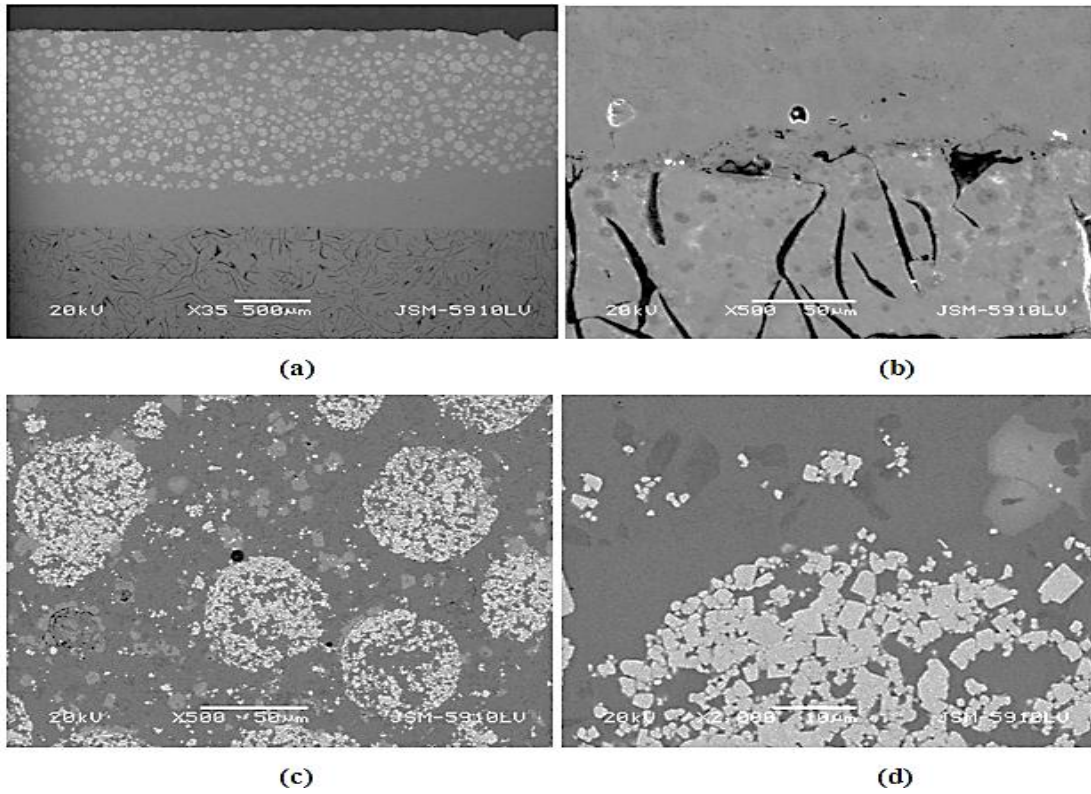
NiCrBSi-%35W₂C tozu kullanılarak alevle püskürtme ve ergitme yöntemi ile kaplanan dökme demir disk altlık malzemesinin ışık mikroskop görüntüleri aşağıdaki Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Kaplama-dökme demir disk ara yüzeyindeki geçiş bölgesinin düzenli olduğu kaplama tabakasında koyu siyah bölgelerde gözeneklerin bulunduğu gözlenmiştir. Küresel yapıda tam ergimemiş toz taneleri göze çarpmaktadır. Sınır hatlarında birleşmenin sağlıklı bir şekilde olduğu görünmektedir.



Şekil 4.4 Alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi-%35W₂C kaplanan diskın ışık mikroskobu mikrografı, a) yüzeyinden, b) kesitinden.

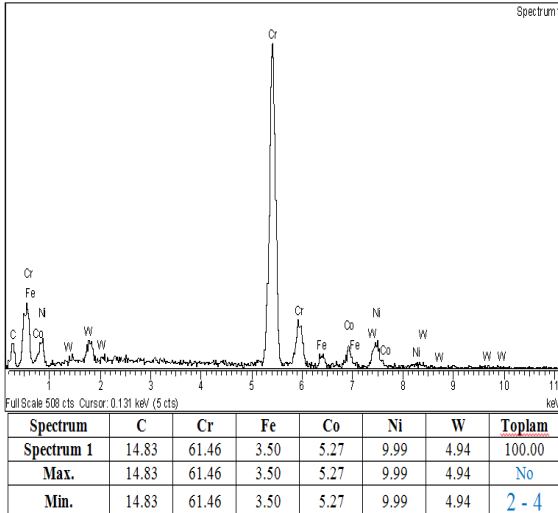
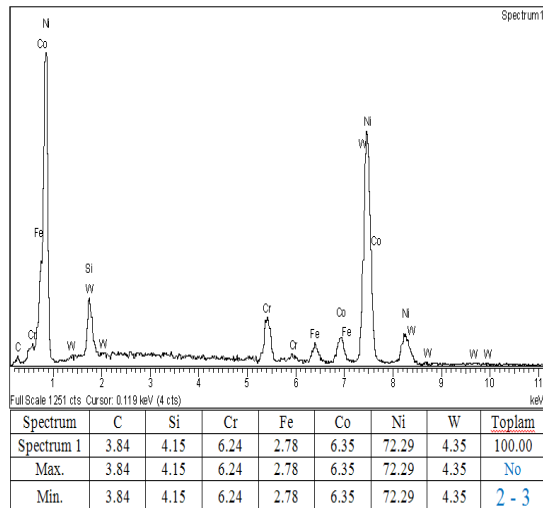
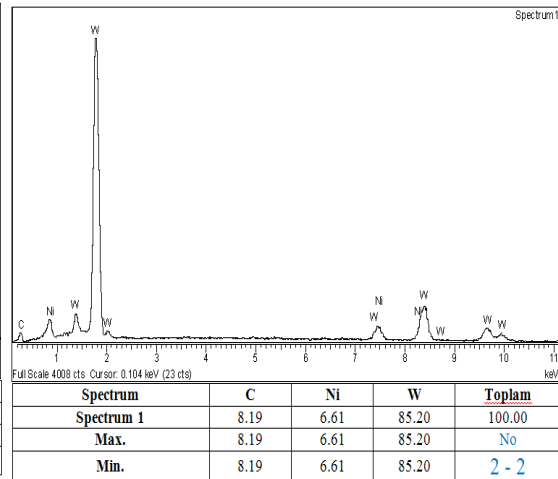
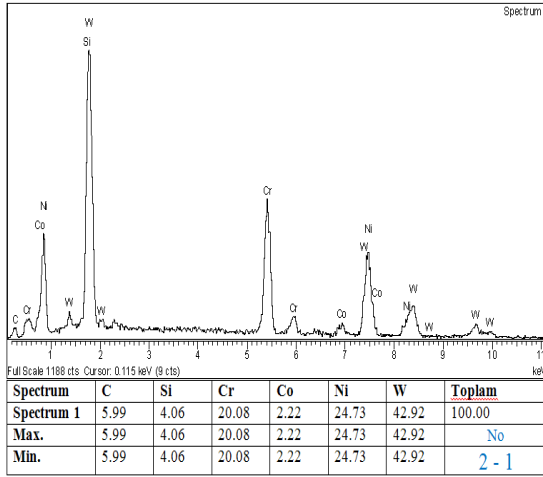
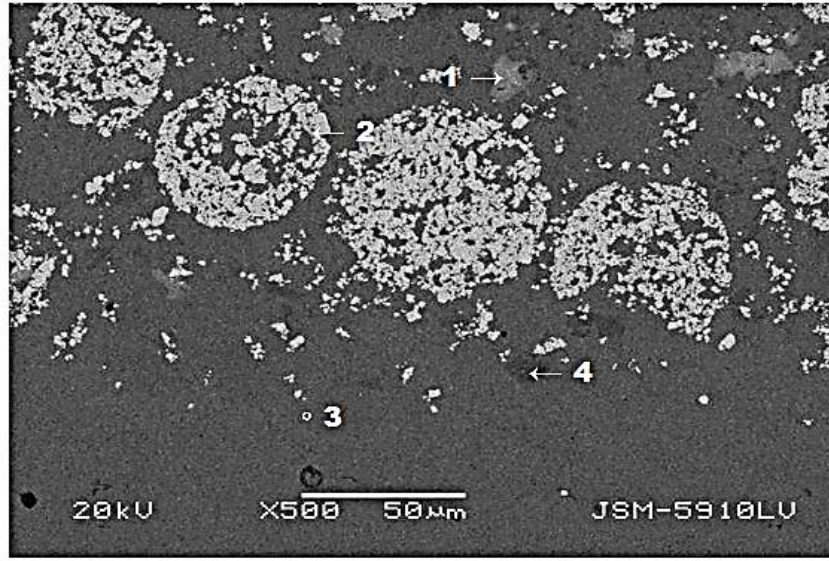
Kaplama tabakasında x35 büyütme Şekil 4.5 (a) ve x500 büyütme (c)'deki SEM mikrograflarında Ni matris içerisinde daha büyük tane boyutuna sahip yarı ergimiş

tungsten karbür kümelerini görmek mümkündür. Şekil 4.5 (b)'de x500 büyütme kesitten alınan mikrografa dayanarak bağlanmanın mükemmel olduğunu Ni elementinin tekrar ergitme esnasında daha fazla yoğunluğa sahip olması ve kendiliğinden ıslatma kabiliyeti sebebiyle çökerek ara bağlayıcı gibi davranarak altlık malzemeye Ni ve Cr difüzyonu ile bağlanma mekanizmasını güçlendirdiğini söyleyebiliriz. Şekil 4.5 (d)'deki x200 büyütme SEM mikrografı tungsten karbür tanelerinin Ni elementi ile hatasız bir mekanik bağ kurduğunu göstermektedir.



Şekil 4.5 Alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi-%35W₂C kaplanan diskin kesitinden ve yüzeyinden alınan SEM mikrografları, a) kesitinden x35, b) kesitinden x500, c) yüzeyinden x500, yüzeyinden x2000.

Şekil 4.6'daki 1 no'lu nokta NiCrBSi-%35W₂C kompozit kaplama olarak adlandırılan kaplamanın EDS analizine göre tungsten karbür tanelerinin yoğun olduğu noktayı ifade etmektedir. Analiz sonucuna göre x500 büyütme SEM mikrografının gri renkli bölgesi W₂C yönünden zengin bir mikroyapıyı sergilemektedir. Yine aynı mikrograftan alınmış 2 no'lu nokta açık gri renkli bölgenin EDS analiz sonucu W yönünden zengin kısmen Ni ve C içeren mikroyapıyı açıklamaktadır.



Şekil 4.6 Alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi-%35W₂C kaplanan diskin kesitinden alınan SEM mikrografi ve 1, 2, 3 ve 4 numaralı bölgelerinin EDS analizleri.

Şekil 4.6'daki 3 no'lu nokta koyu renkli bölgenin EDS analizi Ni'in ergiyerek çökmesi sonucunda altlık malzemesi ve kaplama içerisindeki Fe, Cr, Co, Si, C ve W gibi elementlerin sert partiküllerinin bu ergiyik içerisine batması sonucu çok iyi bir kompozit oluşturarak yoğun, sıkı dokulu ve mükemmel olarak bağlanmış, yüzeye çok iyi yapışan bir kaplama elde edildiğini göstermektedir. Siyah renkli 4 no'lu noktayı Şekil 4.6'daki 4 no'lu EDS analizine göre tipik CrC olarak teleffuz etmek mümkündür.

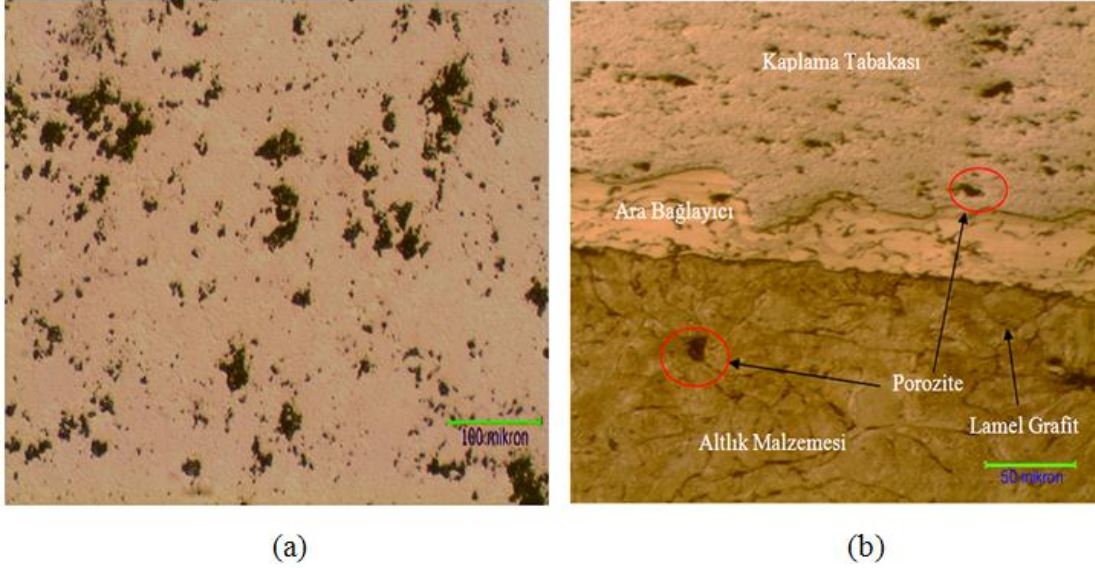
Alevle püskürtme ve ergitme işlemi atmosferik şartlarda olduğu için kaplama tabakası içerisinde oksitli bileşiklerin oluşması muhtemeldir. SEM mikrografları ve EDS analizleri Nikel ağırlıklı matris içerisinde Fe, Cr, Si ve W karburlü farklı morfolojik yapıları bileşiklerin matris içerisine dağıldığını göstermektedir. Yapı içerisinde oksit, karbür, porozite ve tam ergimemiş partiküller süreksizliği ifade eder. Bu da homojen olmayan bir yapı demektir. SEM mikrografları ve ışık mikroskobu görüntülerinde görülen güçlü bağlanma yapısının bu homojen olmayan yapı düzensizliğinden kaynaklanan dezavantajları bertaraf ettiği görülmektedir.

4.2.3 HVOF Yöntemiyle W_2C -%12Ni Kaplanan Diskin Mikroyapı Özellikleri

Ni5Al ara bağlayıcı ve W_2C -%12Ni tozu kullanılarak HVOF yöntemi ile kaplanan dökme demir disk altlık malzemesinin metalografik yöntemlerle hazırlanan numunelerin aşağıdaki Şekil 4.7'de x100 büyütmede yüzeyinden ve x50 büyütmede enine kesitinden alınan ışık mikroskobu görüntüleri gösterilmiştir. Ana malzemede perlitik yapı, lamel grafitleri ve gözenekler dikkati çekmektedir. Ara bağlayıcı lamelli ve gözenekli yapıda, sınır bölgelerinde yer yer oksit kalıntıları gözlenmektedir. Kaplama tabakası mekanik etkileşimi iyi derecede ve minimal düzeyde gözenekli yapı gözlenmektedir. Az miktarda tam ergimemiş toz tanelerine rastlanmaktadır.

Şekil 4.8 (a) ve (b)'de gösterilen kaplama yüzeyinden x1000 ve x5000 büyütmede alınan mikrograflardan morfoloji ve mikroyapıları incelendiğinde kaplama da hafif gri renkli Nikel matris içerisine beyaz renkli ergimemiş ve yarı ergimiş tungsten karbürlerin düzenli ve yoğun olarak yerleşerek iyi bir bağ oluşturduğunu gözlemlemek mümkündür. Kaplama yüzeyinde çok az porozite varlığı tespit edilmektedir. Şekil 4.8 (c) ve (d)'de

kaplamanın enine kesitinden x500 ve x2000 büyütme SEM mikrografları verilmiştir. Tungsten karbür taneleri çok küçük boyutlarda olduğu için HVOF püskürtme metodunda NiAl ara bağlayıcı içerisine gömülerek dökme demir altlık içerisine difüze olarak mükemmel bir bağ oluşturduğu gözlemlenmiştir.

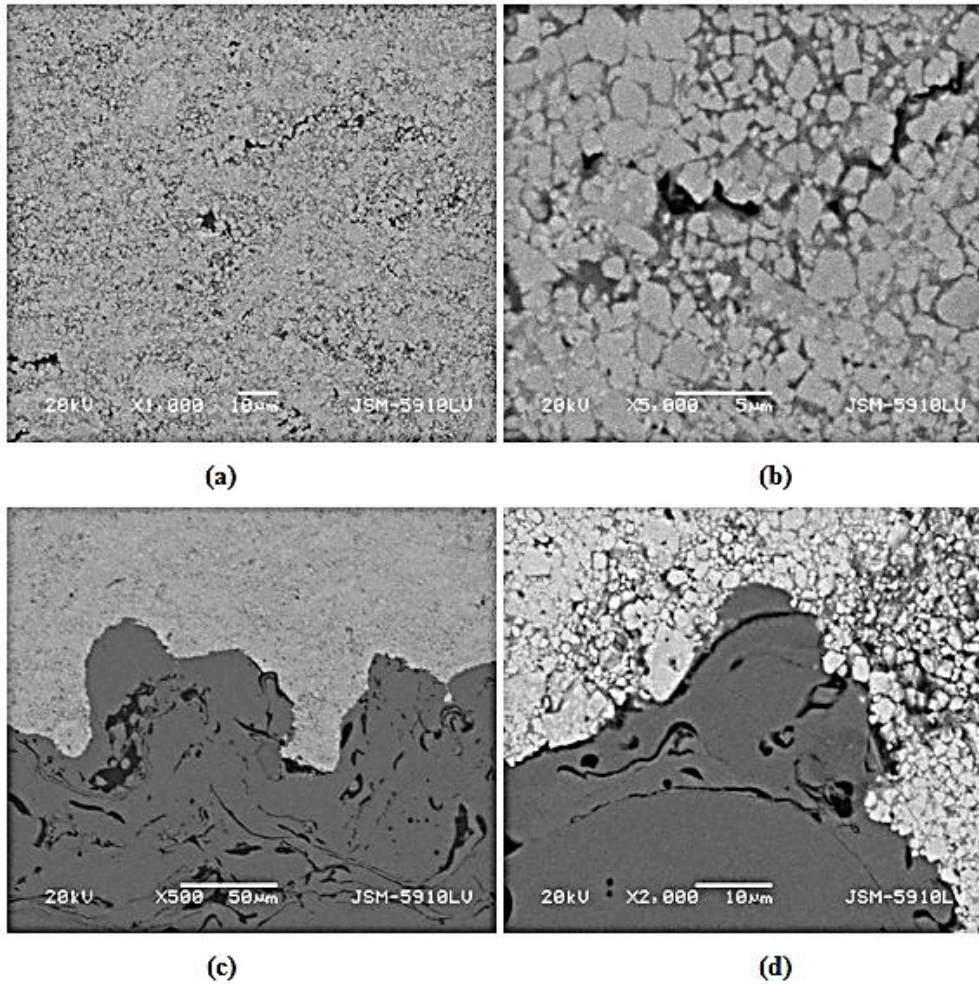


Şekil 4.7 HVOF püskürtme yöntemiyle W_2C -%12Ni kaplanan diskin ışık mikroskobu mikrografı, a) yüzeyinden x100, b) kesitinden x50.

Bilgin ve Samur (2009)'un bildirdiğine göre kaplamada NiAl intermetalik ara bağlayıcı kullanıldığından gerek altlık ara bağlayıcı ara yüzeyi olsun gerek kaplama ara bağlayıcı ara yüzeyi olsun birbirlerini iyi ıslattıkları gözlemlenmektedir. Bunun olası nedenini NiAl intermetalik ara bağlayıcının altlık ve kaplama malzemesine mekanik tutunmanın yanı sıra, kaplama işlemi sırasında NiAl ara bağlayıcı malzemenin ekzotermik reaksiyon üreterek alev ısısına ilave bir enerji verdiği için mikrodifüzyonla kimyasal bir bağ oluşturma olasılığı olarak söylemek mümkündür.

Dökme demir altlık malzeme üzerine HVOF yöntemi ile Ni5Al ara bağlayıcı ve kaplama tabakasının enine kesitinden x200 büyütme SEM mikrografı Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Dökme demir disk malzemesi, kaplama ve ara bağlayıcı bölgelerinden alınan EDS analizleri Şekil 4.9 (1), (2) ve (3)'de verilmiştir. 1 no'lu EDS analizinden kaplama tabakasının W yönünden zengin %12 kadar Ni ve %8 miktarında C içerdiği görülmektedir. 2 no'lu EDS analizinden ara bağlayıcı tabakasında Ni matris içerisinde

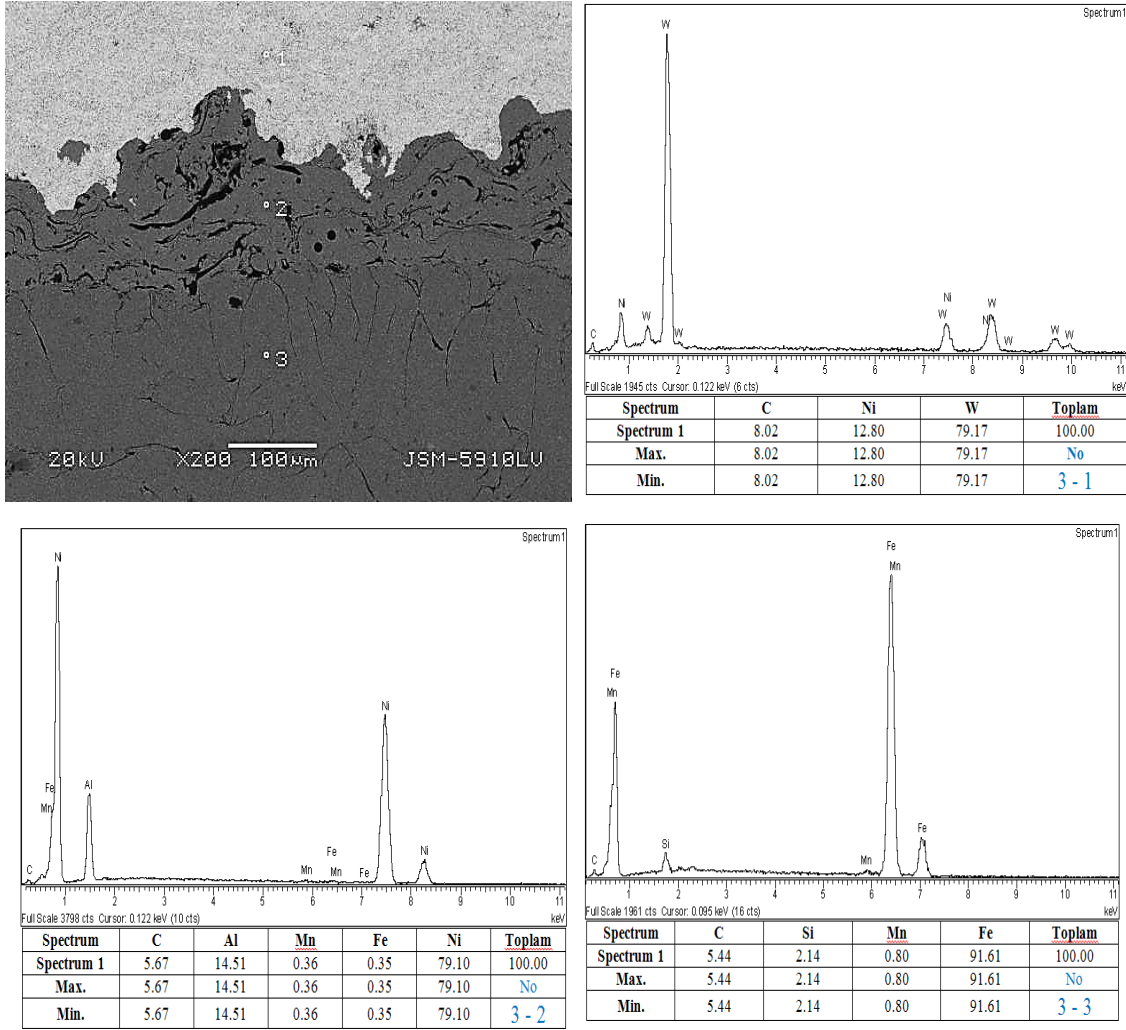
Al %14 seviyesinde tespit edilmiştir. Fe, Mn ve C elementlerinin bilhassa altlık malzemesi ve kaplama malzemesinden yüksek ısıdan dolayı difüzyon yoluyla yapıya dâhil olduğu kabul edilmiştir. Ara bağlayıcı yapısı içerisinde püskürtme yönteminden kaynaklandığını düşündüğümüz kısmi poroziteler göze çarpmaktadır. 3 no'lu EDS analizinde ise altlık malzeme dökme demirin tipik yapısını yansıtmaktadır. Yapı içerisindeki Fe, Mn, Si ve C nin kabul değerleri arasında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8 HVOF püskürtme yöntemiyle W_2C -%12Ni kaplanan diskin yüzeyinden ve kesitinden alınan SEM mikrografları, a) yüzeyinden x1000, b) yüzeyinden x5000, c) kesitinden x500, d) kesitinden x2000.

NiAl bağ tabaka, iyi yapışma özelliği yanında kaplama ile altlık malzeme arasındaki termal uzama ve elastik modül uyumsuzluğunu azaltması nedeniyle kullanılmıştır. Nikel ve Alüminyum oksitleyen; nikel-oksit ve alüminadan nikelalüminiti oluşturan

ekzotermik reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısının olduğu bölgelerde metalurjik bağ sağlanır. Ayrıca Ni-Al'un sünek bir malzeme olması kaplama ile dökme demir altlık malzeme arasındaki termal uzama ve elastite modülü farklarının etkisini azaltmıştır (Samur vd. 2003).



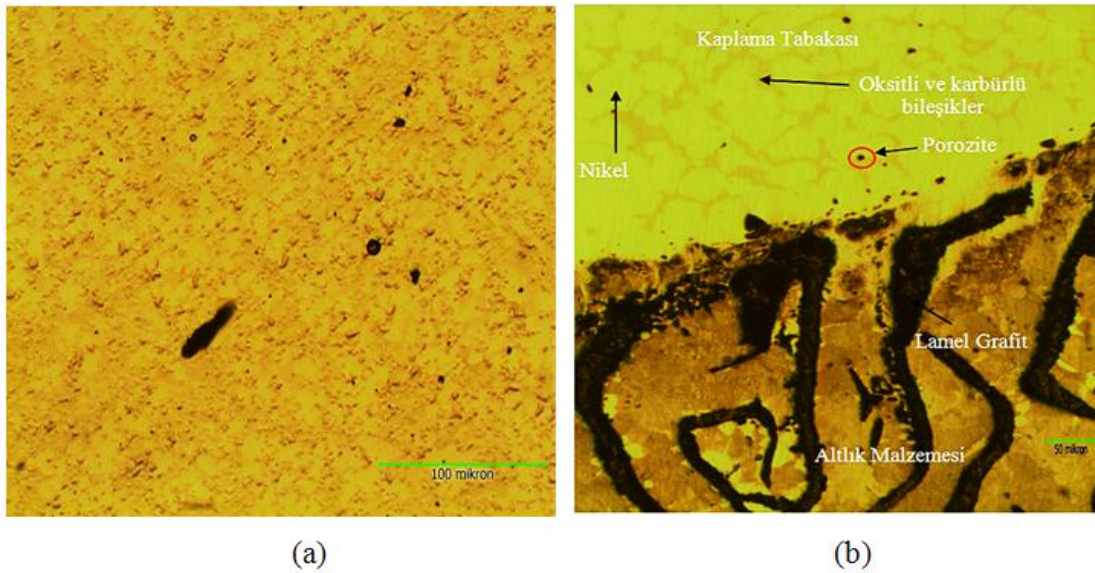
Şekil 4.9 HVOF püskürtme yöntemiyle W_2C -% 12Ni kaplanan diskin kesitinden alınan SEM mikrografi ve 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerinin EDS analizleri.

HVOF karbürizasyon atmosferine ve alevlerin yüksek hızına bağlı olarak karburlu kaplamalar için uygundur. HVOF atmosferi karbür ayrışması ve oksidasyonu azaltarak yüksek hızında etkisi ile parçacıklar arasında etkileşimi azaltır ve alev erimiş metal veya alaşım matrisi içerisinde karbürlerin katı olarak korunmasına neden olabilir. HVOF yönteminde alev sıcaklığı düşük olduğu için W_2C -% 12Ni kaplama tozunun küçük

boyutlu olması nedeniyle Ni matris parçaları eriyerek çökeldiği ve tungsten karbürler katı kaldığı için ara bağlayıcı ile sorunsuz geçiş yaparak iyi bir bağ oluşturduğu mikrograflardan görülmektedir.

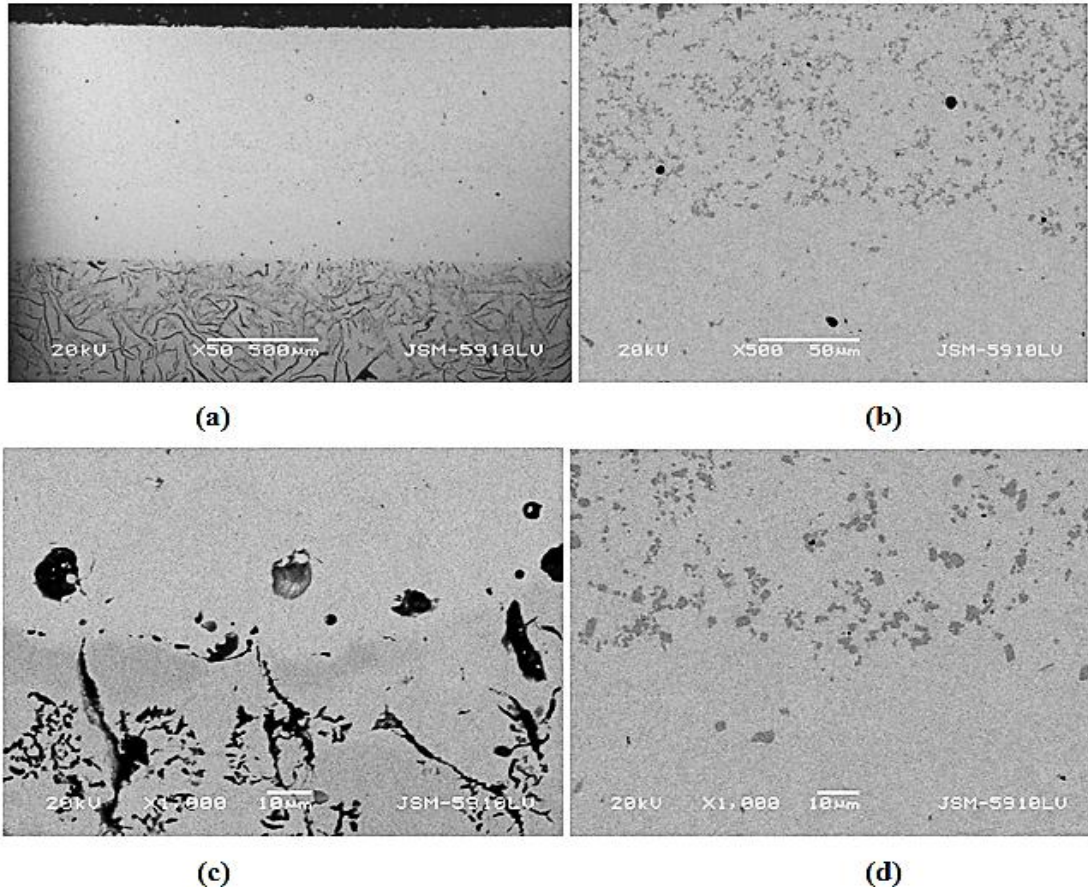
4.2.4 Alev Püskürtme ve Ergitme Yöntemiyle NiCrBSi Kaplanan Diskin Mikroyapı Özellikleri

Standart metalografik yöntemlerle hazırlanan NiCrBSi kaplamanın LM ve SEM mikrografları yardımıyla analizleri yapılmıştır. Sıcaklık ve sürenin bir fonksiyonu olarak büyük çoğunlukla Ni elementinin ve tane boyut dağılımı çok küçük partiküllerin yeniden ergitilmesinden dolayı oksitli ve karbürü bileşiklerin varlığı gözlemlenmiştir. NiCrBSi tozu kullanılarak alevle püskürtme işlemi yapılmış devamında daha mukavim ve mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla ergitme işlemi uygulanmıştır. Kaplanan dökme demir disk altlık malzemesinin Şekil 4.10'da ışık mikroskobu ile yüzeyinden x100 büyütmede ve enine kesitinden x50 büyütmede elde edilen mikrografları gösterilmiştir. Ni elementinin sınır bölgesine yakın yerlerde daha yoğun çökeler altlık ile kaplama tabakası arasında sorunsuz bir geçiş yaparak mükemmel mekanik bağlanmayı temin ettiği mikrograflar yardımıyla gözlemlenmiştir.



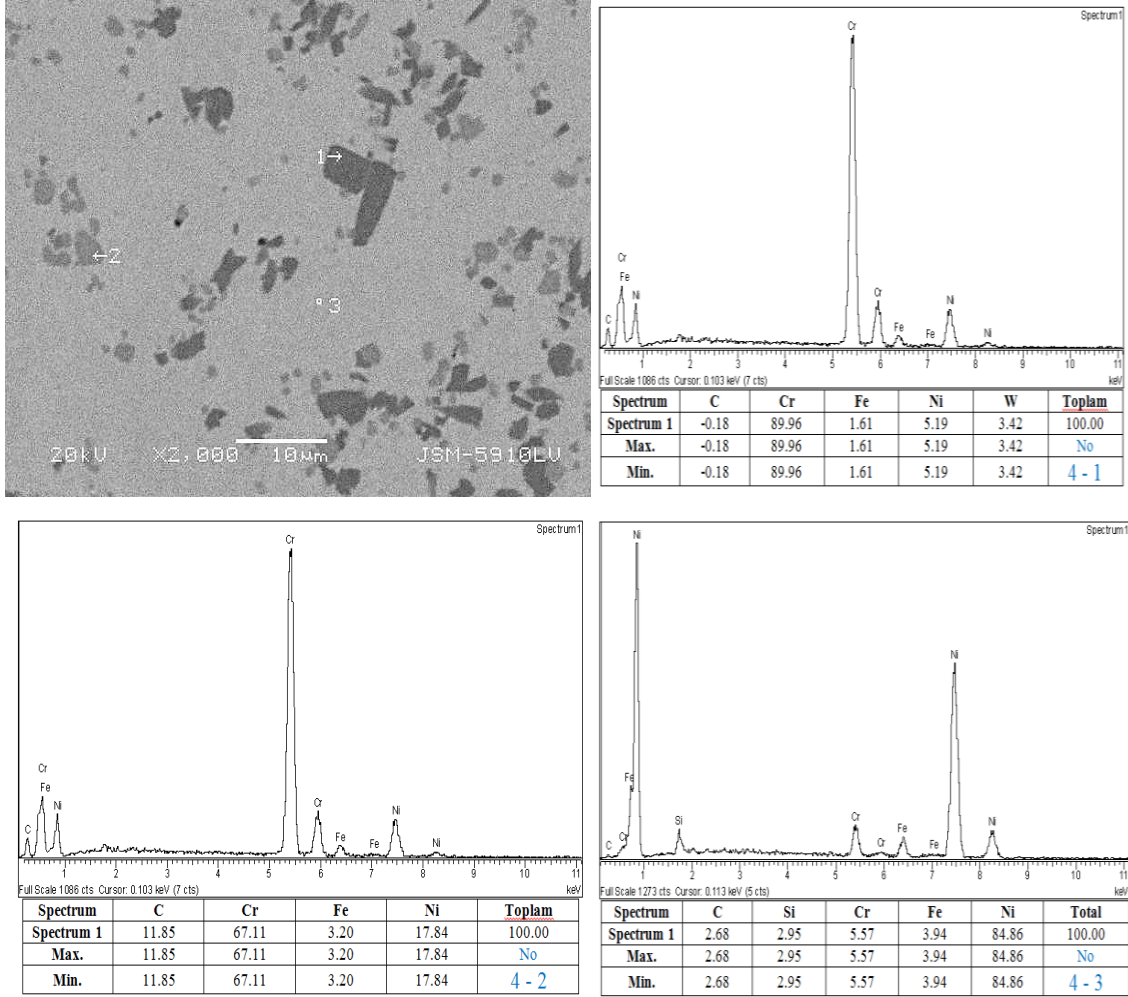
Şekil 4.10 Alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi kaplanan diskten ışık mikroskobu mikrografı, a) yüzeyinden x100, b) kesitinden x50.

Kaplamanın büyütülmüş SEM mikrografları Şekil 4.11 (a), (b), (c) ve (d)'de gösterilmiştir. Şekil 4.11 (a)'da verilen x50 büyütmede enine kesitinden alınan mikrografta kaplama tozu içerisinde var olan elementlerin ergimiş Ni içerisinde çökerek dökme demir altlık malzemesi ile iyi bir bağ kurduğu görülmektedir. Şekil 4.11 (b)'de verilen x500 büyütmede enine kesitinden alınan mikrografta kaplamanın altlık malzemesine yakın bölgelerinde daha yoğun Ni elementinin çökeldiği, içerisinde oksitli ve karburlu bileşiklerin varlığı tespit edilmiştir. Şekil 4.11 (c)'de x1000 büyütmede enine kesitinden alınan mikrografta altlık malzeme ile kaplama arasında mükemmel bir mekanik bağlanmanın olduğu görülmektedir. Şekil 4.11 (d)'de verilen x1000 büyütmede enine kesitten alınan mikrografta da karbür ve oksitler dikkati çekmektedir. Dökme demir altlık ile kaplama tabakası arasında kusursuz bir bağlanmanın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11 Alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi kaplanan diskin yüzeyinden ve kesitinden alınan SEM mikrografları, a) kesitinden x50, b) yüzeyinden x500, c) kesitinden x1000, d) yüzeyinden x1000.

Kaplamaların içerisinde %1-2 civarında gözenek bulunmaktadır. Isıl püskürtme kaplamalarda belirli bir miktar gözenek bulunduğu daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir (Miguel et al. 2003, Carrasquero et al. 2008). Şekil 4.12'deki kaplamanın yüzeyinden x2000 büyütme alınmış SEM mikrografının farklı noktalarından alınan EDS analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.12 Alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi kaplanan diskin yüzeyinden alınan SEM mikrografı ve 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerinin EDS analizleri.

Şekil 4.12 (1)'de Ni ve Cr ağırlıklı koyu gri renkli 1 no'lu noktanın analizinde Ni matris içerisinde C, Cr, Fe, ve W elementlerinin varlığından söz etmek mümkündür. Şekil 4.12 (2)'de açık gri renkli 2 no'lu noktanın analizi verilmiştir. Analizde matrisin Cr ağırlıklı olduğu Ni, Fe ve C elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Şekil 4.12 (3)'de açık gri renkli 3 no'lu noktanın analizinde matrisin Ni elementi olduğu kaplama tozu içerisinde

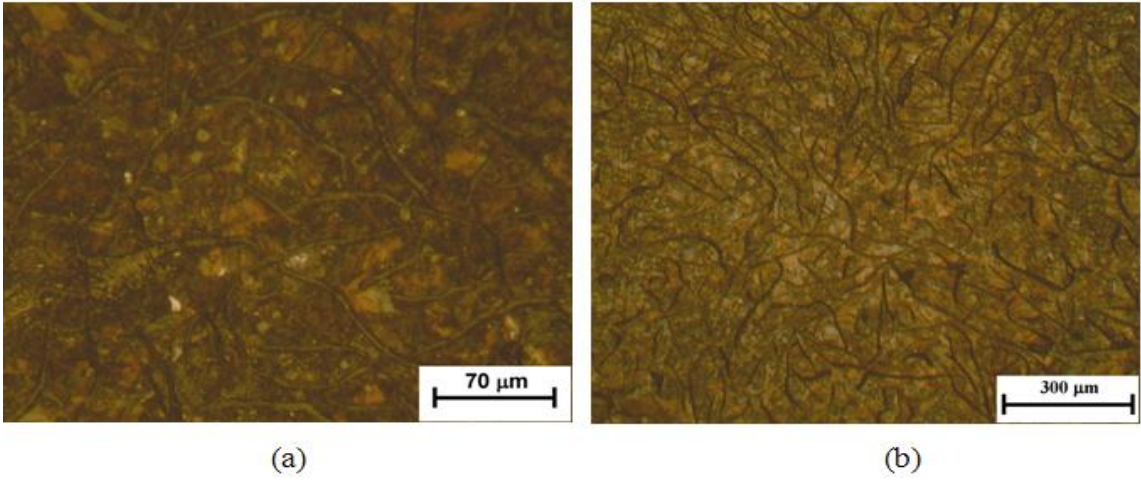
bulunan Cr, Si ve altlık malzeme içerisinde bulunan Fe ve C elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Analizlerde B elementinin çıkmaması, analizi yapılan noktalarda bu elementin yoğun şekilde bulunmayışı şeklinde izah edilebilir. Analizlerde her üç yapıda da Fe ve C elementinin altlık malzemedan yapıya difüzyon yoluyla katıldığı düşünülmektedir. Kaplama tozu içerisinde Bor ve silisyum elementlerinin varlığı NiCr alaşımının kendiliğinden ıslatma kabiliyetini arttırarak daha iyi kaplama üretme imkânı sağlamıştır (Gonzalez et al. 2007). Bor ve Silisyum elementlerinin kaplama tozunun ergime sıcaklığını düşürerek akışkanlığı arttırdığı için oksitli ve karburlu sert fazların oluşumuna katkı sağladığı, Karbon'un sert karbürlerin oluşmasını sağlayarak sertlik ve aşınma dirençlerini arttırdığı varsayılmaktadır (Miguel et al. 2003, Rodriguez et al. 2003, Stoica et al. 2005, Serres et al. 2009).

Nikel'in yeniden ergitme yöntemiyle yaklaşık 1100 °C civarında yeniden ergitilerek çökmesiyle problemlili altlık malzemesi ile ara bağlayıcı özelliği de göstererek mükemmel bağ oluşturduğu mikrogfarlarda görülmektedir. Bu durumu EDS analizlerinde difüzyon yoluyla yapıya katılan Fe ve C gibi elementlerin varlığı da desteklemektedir.

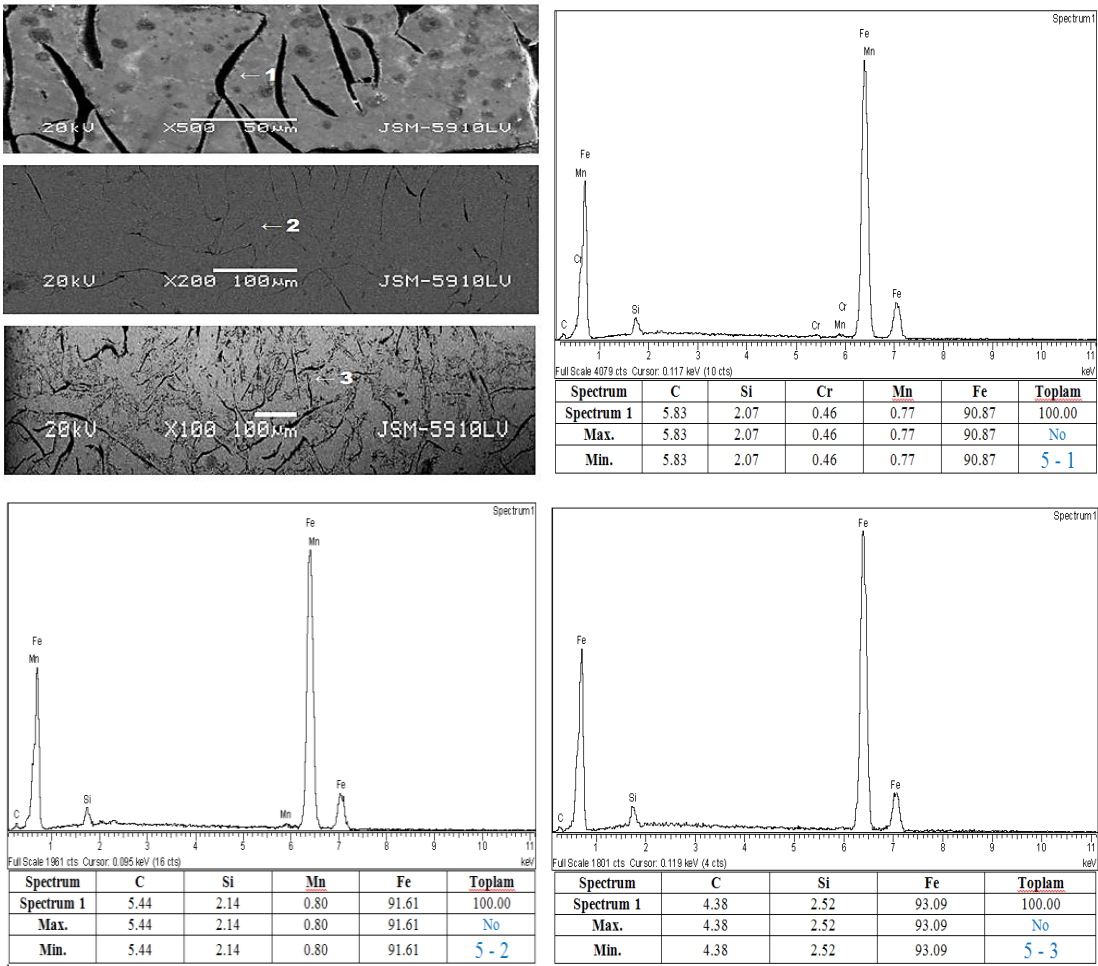
4.2.5 OEM Diskin Mikroyapı Özellikleri

Literatürde de belirtildiği gibi otomobil fren diskleri genellikle perlitik yapılı lamel grafitli dökme demirlerden üretilirler. Standart yöntemlerle parlatılmış ve %5HNO₃+%95CH₃OH kullanılarak dağlanmış dökme demir fren diskine ait grafit lamellerini gösteren x70 ve x300 büyütme ışık mikroskobu görüntüleri Şekil 4.13'de gösterilmiştir.

Şekil 4.14'deki SEM mikrografında perlit matris içerisinde az miktarda ferrit bilinen bir yapıdır. Elementel serbest karbon atomlarının farklı geometrik şekillerde dökme demir matris içerisinde oluşturduğu grafit yapılar görülmektedir. Bu migrografta belirtilen farklı üç noktadan alınan numunelerin EDS analizleri Şekil 4.14 (1), (2) ve (3)'de gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre ana matris her üç noktada da (ağırlıkça % > 90) Fe tespit edilmiştir.



Şekil 4.13 Dökme demir altlık malzemesinin yüzeyinden alınan ışık mikroskobu mikrografları, a) x70, b) x300.



Şekil 4.14 Dökme demir altlık malzemesinin yüzeyinden alınan SEM mikrografları ve 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerinin EDS analizleri.

4.3 OEM ve Kaplanmış Disklerin Yüzey Pürüzlülüğü

Dönen bir disk ve sabit balata arasındaki yüzey temasında, mikroskobik ölçeklerde yükseklikler arasındaki farklılıklardan dolayı yüzeyler yeni bir geometriye sahip olacaktır. Bu yeni yüzey geometrisi dönme şartlarına bağlı olmakla birlikte diskin ve balatanın mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre şekillenir.

Sürtünme esnasında yüzeylerin pürüzlülüğü ve yutulan enerjiler sonucu meydana gelen sıcaklık, sürtünme katsayısını önemli ölçüde etkiler, sıcaklığın artması malzemede sürtünme katsayısının düşmesine neden olur ve sistem görev yapmaz hale gelir (Uygur 1996).

Bettge ve Starceviz (2003)'e göre disk frenlerde aşınma yüzeylerindeki temas bölgelerinin sürtünme ve kaymaya etkisinde temas basıncının değişimi, aşınma miktarı, yüzey geometrisi ve disk-balata malzeme özelliklerine bağlı olarak yüksek frenleme kuvvetlerinde, geniş temas pürüzlülüğü ortaya çıkarmaktadır.

Genellikle yeni disklerin ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) 1,125-1,5 µm arasında olabilmektedir (Halderman 2000). OEM ve kaplanmış fren disklerinin yüzey pürüzlülük değerleri disk yüzeyi 36'şar derece 10 eşit parça olacak şekilde işaretlenerek frenleme testi öncesinde ve frenleme testi sonrasında 10'ar defa ölçülmüştür. Ölçümler diskin dönme esnasında oluşan kayma çizgilerine dik olacak şekilde materyal metod bölümünde tanıtılan pürüzlülük ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Tablo 4.6'da OEM ve kaplanmış fren disklerinin yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Ayrıca sürtünme ikilisi olarak kullanılan balatalarında pürüzlülük değerleri karşılaştırma amaçlı olarak yine sürtünme çizgilerine dik olarak 4'er defa ölçülmüş, elde edilen değerler Tablo 4.7'de verilmiştir. OEM diskin başlangıç yüzey pürüzlülüğü literatürde belirtilen oranlar arasında gerçekleşmiştir. Orijinal diske en yakın pürüzlülük değerleri plazma püskürtme yöntemi ile oksit seramik toz (Cr_2O_3 -%40 TiO_2) kaplanan 1 no'lu diskte gerçekleşmiştir. TiO_2 miktarını artırıp, Cr_2O_3 miktarının azaldığı durumlarda yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı gözlenmiştir (Sert 2007). Plazma püskürtme ile kaplanmış diskin pürüzlülük değerinin diğer kaplamalardan yüksek çıkması mikroyapı incelemelerinde

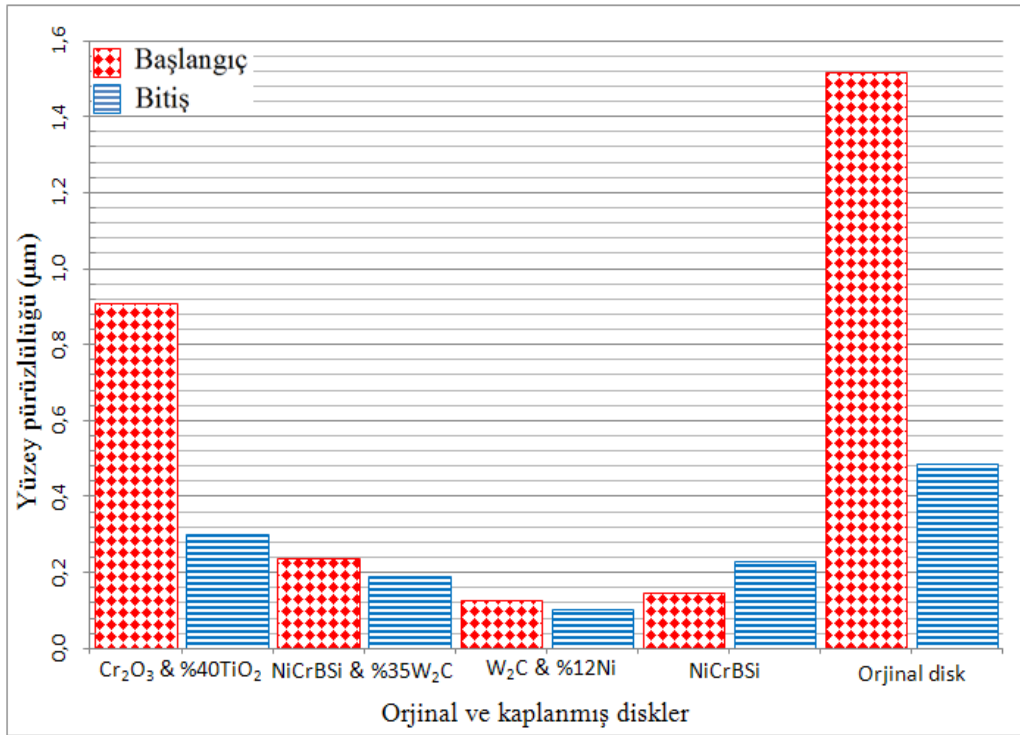
Cr₂O₃-%40TiO₂ kaplamanın %1-2 civarında pororozite ve oksitli sert yapının mikro çatlaklar içermesine bağlanabilir.

Tablo 4.6 OEM ve kaplanmış fren disklerinin yüzey pürüzlülük değerleri.

Disklerin yüzey pürüzlülük değerleri (µm)												
Disk ve kaplama yöntemi		1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	4. Ölçüm	5. Ölçüm	6. Ölçüm	7. Ölçüm	8. Ölçüm	9. Ölçüm	10. Ölçüm	Ortalama
Disk 1 (Cr ₂ O ₃ - %40TiO ₂) Plazma püskürtme	Başlangıç	0,922	0,842	0,909	0,922	0,841	0,949	0,958	0,942	0,906	0,901	0,909
	1. Deneme	0,291	0,226	0,482	0,361	0,206	0,254	0,413	0,515	0,639	0,361	0,375
	2. Deneme	0,248	0,237	0,148	0,301	0,202	0,159	0,166	0,311	0,259	0,276	0,231
	3. Deneme	0,303	0,341	0,377	0,279	0,156	0,157	0,168	0,431	0,391	0,359	0,296
Disk 2 (NiCrBSi- %35W ₂ C) Alev püskürtme	Başlangıç	0,221	0,216	0,293	0,259	0,203	0,241	0,209	0,177	0,271	0,281	0,237
	1. Deneme	0,183	0,176	0,19	0,172	0,153	0,239	0,153	0,211	0,172	0,209	0,186
	2. Deneme	0,204	0,235	0,171	0,141	0,236	0,173	0,251	0,158	0,203	0,146	0,192
	3. Deneme	0,241	0,171	0,179	0,141	0,236	0,173	0,251	0,158	0,203	0,146	0,190
Disk 3 (W ₂ C- %12Ni) HVOF püskürtme	Başlangıç	0,133	0,109	0,125	0,135	0,125	0,125	0,139	0,129	0,118	0,124	0,126
	1. Deneme	0,102	0,171	0,093	0,127	0,152	0,079	0,075	0,073	0,128	0,077	0,108
	2. Deneme	0,081	0,119	0,078	0,141	0,077	0,065	0,056	0,086	0,147	0,128	0,098
	3. Deneme	0,113	0,131	0,124	0,135	0,072	0,138	0,069	0,116	0,056	0,064	0,102
Disk 4 (NiCrBSi) Alev püskürtme	Başlangıç	0,152	0,148	0,158	0,139	0,138	0,141	0,134	0,134	0,147	0,164	0,146
	1. Deneme	0,192	0,233	0,247	0,298	0,207	0,246	0,267	0,203	0,221	0,158	0,227
	2. Deneme	0,268	0,215	0,255	0,266	0,223	0,279	0,188	0,205	0,195	0,208	0,230
	3. Deneme	0,261	0,245	0,243	0,248	0,264	0,227	0,227	0,207	0,179	0,207	0,231
Disk 5 (Orijinal disk)	Başlangıç	1,479	1,481	1,471	1,473	1,531	1,585	1,593	1,429	1,475	1,633	1,515
	1. Deneme	0,355	0,325	0,391	0,585	0,554	0,479	0,451	0,542	0,387	0,595	0,466
	2. Deneme	0,537	0,479	0,482	0,534	0,409	0,434	0,273	0,319	0,301	0,322	0,409
	3. Deneme	0,459	0,751	0,611	0,746	0,472	0,697	0,797	0,498	0,374	0,409	0,581

OEM ve kaplanmış fren disklerinin yüzey pürüzlülük değerleri grafiği Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Şekilde de gösterildiği gibi alevle püskürtme yöntemi ile NiCrBSi-%35W₂C kullanılarak kaplanan 2 No’lu diskin pürüzlülük değerleri ile NiCrBSi tozu kullanılarak kaplanan 4. No’lu diskin yüzey pürüzlülük değerleri birbirine yakın

gerçekleşmiştir. Bunun sebebi aynı kaplama yöntemi ile kaplanmalarındandır. Aradaki küçük fark ise tozların kimyasal kompozisyonlarına bağlanabilir. NiCrBSi tozu ile kaplanan diskin frenlemeden sonra pürüzlülük değerindeki artış kaplama içerisinde sert fazların olmamasından kaynaklanmış olabilir. Bunun sonucu olarak bu diskte diğer kaplamalara göre daha fazla aşınma meydana gelmiştir. Bu iki diskin yüzey pürüzlülük değerleri 1 no'lu diskten düşük gerçekleşmiştir. Bunun birinci nedeni kaplama yöntemleridir. İkinci olarak 2 ve 4 no'lu disklerin kaplama tozları içerisinde bulunan Nikel sayesinde yüzeyde gözeneksiz yoğun bir kaplama tabakası oluşturması olarak ifade edilebilir. HVOF püskürtme yöntemiyle karbür esaslı toz (W_2C -%12Ni) kullanılarak kaplanan 3 no'lu diskin yüzey pürüzlülüğü en düşük olduğu Tablo 4.6'daki değerlerden anlaşılmaktadır.



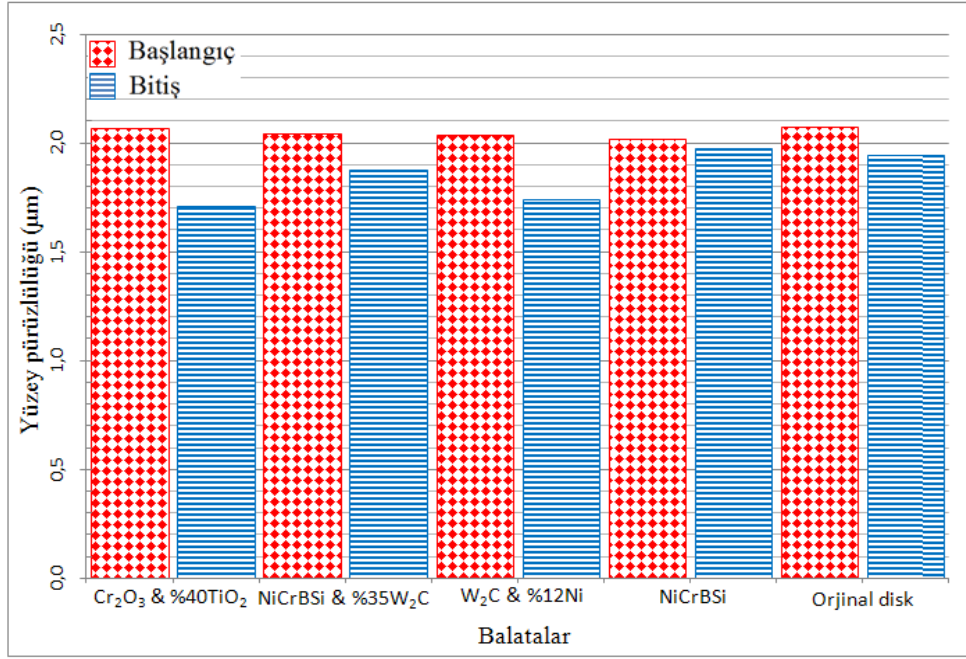
Şekil 4.15 OEM ve kaplanmış fren disklerin yüzey pürüzlülük değerleri.

Disk-balata sisteminde disklerin yüksek aşınma mukavemeti göstererek uzun süreli yıpranmadan kalabilmesi için balataların da düşük değerlerde aşınması tercih edilir (Mutlu 2002). İkili sistemde çalışma şartlarına, mikroyapıya, sertlik değerlerine ve kimyasal yapıya bağlı olarak sürtünme ara yüzeylerinde oluşan yüzey pürüzlülük değerleri

farklılık göstermektedir. Balataların yüzey pürüzlülük değerlerinin birbirine yakın olduğu Şekil 4.16'deki garafikte gösterilmiştir.

Tablo 4.7 Balataların yüzey pürüzlülük değerleri.

Balataların yüzey pürüzlülük değerleri (μm)						
Disk ve balatası		1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	4. Ölçüm	Ortalama
Disk 1 balatası	1. Deneme takılan	2,444	2,213	1,893	1,617	2,042
	1. Deneme sökülen	1,271	1,244	1,832	1,632	1,495
	2. Deneme takılan	1,721	2,199	2,442	2,175	2,134
	2. Deneme sökülen	1,996	1,649	1,625	1,433	1,676
	3. Deneme takılan	1,976	2,038	2,128	1,974	2,029
	3 Deneme sökülen	1,526	1,685	1,664	1,523	1,600
Disk 2 balatası	1. Deneme takılan	1,941	1,981	2,192	1,989	2,026
	1. Deneme sökülen	2,242	1,798	1,648	2,198	1,972
	2. Deneme takılan	2,317	1,911	2,145	1,885	2,065
	2. Deneme sökülen	1,967	1,971	1,716	1,628	1,821
	3. Deneme takılan	2,172	2,284	1,716	1,996	2,042
	3 Deneme sökülen	2,243	1,904	1,536	1,645	1,832
Disk 3 balatası	1. Deneme takılan	1,929	2,128	2,158	1,836	2,013
	1. Deneme sökülen	1,735	1,826	1,756	1,657	1,744
	2. Deneme takılan	2,215	1,934	1,988	1,986	2,031
	2. Deneme sökülen	1,877	1,652	1,783	1,726	1,760
	3. Deneme takılan	2,041	2,102	2,132	1,987	2,066
	3 Deneme sökülen	1,727	1,696	1,768	1,678	1,717
Disk 4 balatası	1. Deneme takılan	1,747	2,262	1,937	2,127	2,018
	1. Deneme sökülen	1,446	2,171	2,014	2,236	1,967
	2. Deneme takılan	1,781	2,073	1,986	2,259	2,025
	2. Deneme sökülen	2,036	1,856	1,918	2,055	1,966
	3. Deneme takılan	1,981	1,865	2,032	2,183	2,015
	3 Deneme sökülen	1,713	1,936	2,276	2,056	1,995
Disk 5 balatası	1. Deneme takılan	2,646	1,771	2,772	1,614	2,201
	1. Deneme sökülen	2,343	1,496	2,325	1,254	1,855
	2. Deneme takılan	2,382	1,639	1,876	1,975	1,968
	2. Deneme sökülen	2,125	1,476	1,475	1,762	1,710
	3. Deneme takılan	2,532	2,125	1,635	2,468	2,190
	3 Deneme sökülen	2,233	2,225	1,716	2,359	2,133



Şekil 4.16 Balataların yüzey pürüzlülük değerleri.

4.4 OEM ve Kaplanmış Disklerin Yanal Salgılar

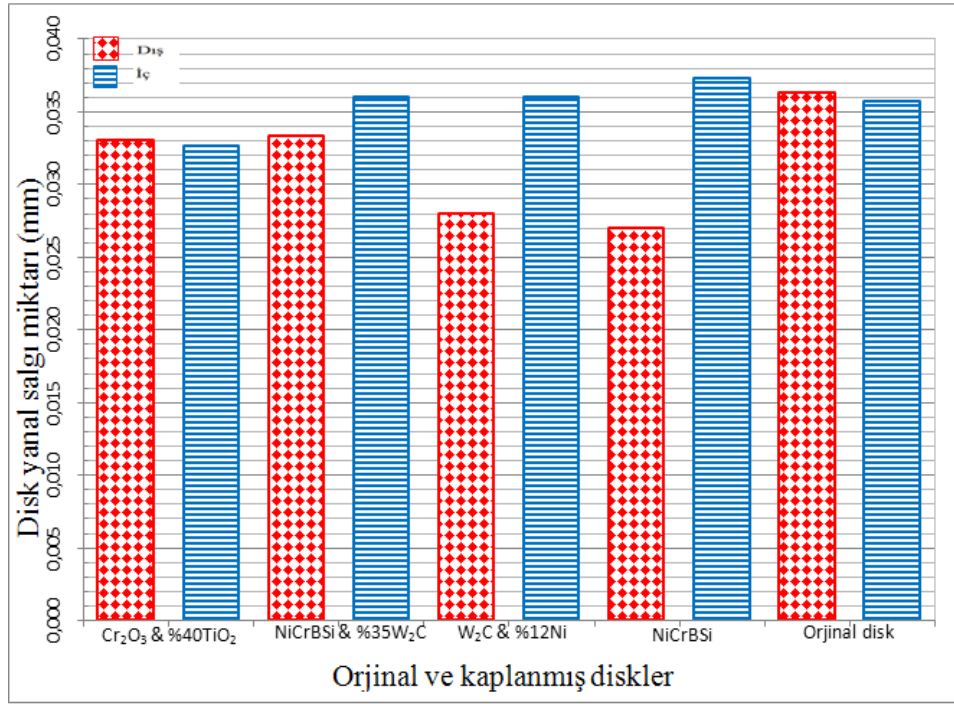
Çalışmamızın yapıldığı fren test cihazında balatalar diskin bir yüzünden sürtünmektedir. Frenleme esnasında yüksek basınç, hız ve sıcaklıkta bu tek taraflı sürtünmenin diskte çarpılma meydana getirip getirmediğini kontrol etmek amacıyla yanal salgılar ölçülmüştür. Diskteki fazla salgı titreme ve mekanik arızalara sebep olur (Brakeworld 2011). Aşırı salgı, diskin aşınmasına ve bu aşınmaya bağlı olarak disk kalınlık değişimine neden olabilir (Demir 2009). Deneysel çalışmada kullanılan disklerin yanal salgıları diskin hem iç hem de dış, dört farklı çalışma yüzeyinden ölçülmüş elde edilen değerler Tablo 4.8’de verilmiştir. Kaplanmış disklerin ısıl püskürtme kaplama uygulamalarında maruz kaldığı yüksek sıcaklıklarda bile fiziksel özelliklerini kaybetmedikleri ayrıca frenleme performans testleri sonrasında da bu özelliklerini korudukları elde edilen bu değerlerden anlaşılmaktadır. Bu değerlere göre elde edilen grafik Şekil 4.17’de gösterilmiştir.

Disk yüzeyinin montaj yapıldığı dönme merkezine göre yanal salgı miktarı 0,05 ile 0,1 mm değer aralığında olabilir (Brakeworld 2011). Deneysel çalışmada kullanılan OEM

ve kaplanmış disklerin yanal salgı miktarları oldukça düşük değerlerde çıktığından literatürde belirtilen sınırlar içinde kalmaktadır.

Tablo 4.8 Disklerin sürtünme yüzeyinden ölçülen salgı miktarları.

Disklerin yanal salgı değerleri					
Disk ve kaplama yöntemi	Aşama	Dış	Denemelerin ortalaması	İç	Denemelerin ortalaması
Disk 1 (Cr ₂ O ₃ - %40TiO ₂) Plazma püskürtme	Kaplanmadan önce	0,03	0,03	0,03	0,03
	Başlangıç	0,03		0,03	
	1. Deneme	0,03		0,03	
	2. Deneme	0,03		0,03	
	3. Deneme	0,03		0,03	
Disk 2 (NiCrBSi- %35W ₂ C) Alev püskürtme	Kaplanmadan önce	0,03	0,03	0,03	0,03
	Başlangıç	0,03		0,04	
	1. Deneme	0,03		0,04	
	2. Deneme	0,03		0,03	
	3. Deneme	0,03		0,03	
Disk 3 (W ₂ C- %12Ni) HVOF püskürtme	Kaplanmadan önce	0,03	0,02	0,03	0,03
	Başlangıç	0,03		0,03	
	1. Deneme	0,02		0,03	
	2. Deneme	0,02		0,03	
	3. Deneme	0,02		0,03	
Disk 4 (NiCrBSi) Alev püskürtme	Kaplanmadan önce	0,02	0,02	0,04	0,03
	Başlangıç	0,02		0,04	
	1. Deneme	0,02		0,03	
	2. Deneme	0,02		0,03	
	3. Deneme	0,02		0,03	
Disk 5 (Orijinal disk)	Başlangıç	0,03	0,03	0,3	0,03
	1. Deneme	0,03		0,03	
	2. Deneme	0,03		0,03	
	3. Deneme	0,03		0,03	



Şekil 4.17 Disklerin sürtünme yüzeyinden ölçülen salgı miktarları.

4.5 OEM ve Kaplanmış Disklerin Mikro Sertlik Değerleri

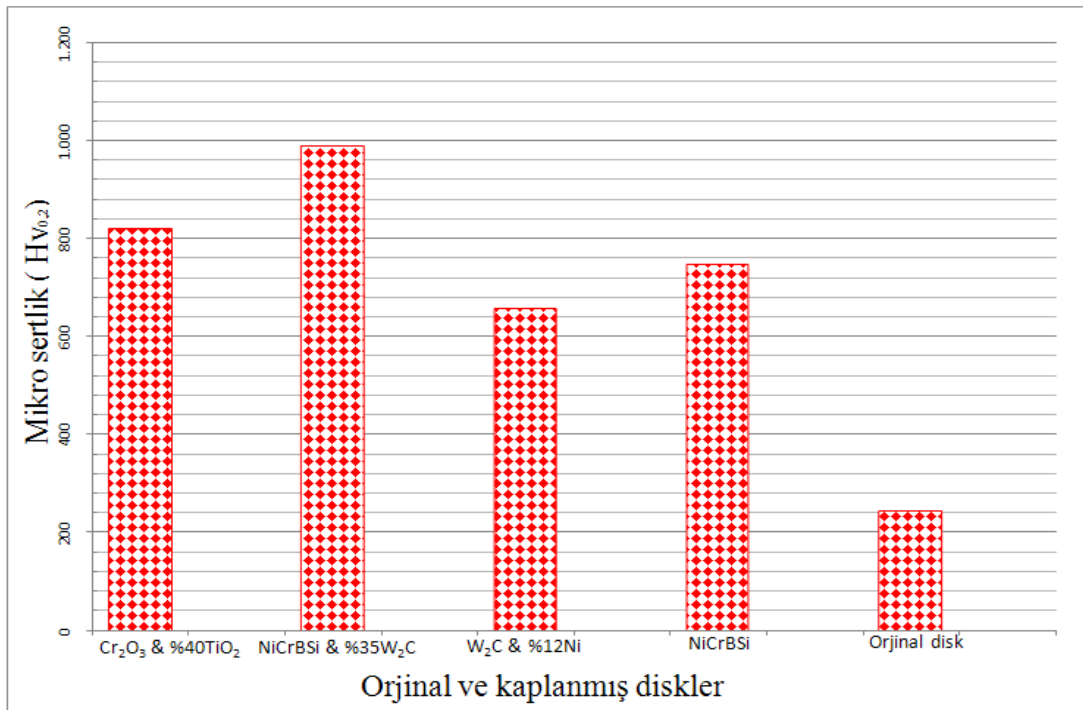
OEM ve kaplanmış disklerin mikro sertlik deneyleri TS 6503 EN ISO 4516'da "Metalik ve diğer inorganik kaplamalar-vickers ve knoop mikro sertlik deneyleri" belirtilen şartlarda yapılmıştır. OEM ve kaplanmış disklerin yüzeylerine 200 grf 15 sn uygulanarak disk yüzeyleri 36'şar derecelik mesafeye bölünerek eşit aralıklarla 10 ölçüm yapılmıştır. Ölçülen sertlik değerleri Tablo 4.9'da verilmiştir. Cr₂O₃-%40TiO₂ kaplamalar parametrelere bağlı olarak ~2300 HV_{0,5} gibi yüksek sertlik değerine sahip olabilir (Hieman 1996). Deneysel çalışmada kullanılan Cr₂O₃-%40TiO₂ kaplama ortalama 822 HV_{0,2} sertlik değeri üretmiştir. NiCrBSi-%35W₂C kaplamaların sertliği 1000-1050 HV mikro sertliğe kadar yükselir (Sulzer Metco 2013). W₂C-%12Ni kaplamalar yüzey tabakasında 1000-1200 HV_{0,3} mikro sertlik üretir (İnt. Kay. 4).

OEM ve kaplanmış disklerin sertlik değerleri Şekil 4.18'de verilen grafikte gösterilmiştir. Ölçülen sertlik değerleri kaplama parametreleri ve kaplama tozlarının

kimyasal kompozisyonuna göre değişiklik göstermesiyle birlikte kabul sınırları içerisinde olduğu Şekil 4.18'deki grafikte gösterilmiştir.

Tablo 4.9 OEM ve kaplanmış disklerin mikro sertlik değerleri.

Mikro sertlik değerleri (Hv)											
Disk ve kaplama yöntemi	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	4. Ölçüm	5. Ölçüm	6. Ölçüm	7. Ölçüm	8. Ölçüm	9. Ölçüm	10. Ölçüm	Ortalama
Disk 1 (Cr ₂ O ₃ -%40TiO ₂) Plazma püskürtme	660	675	626	869	979	695	7025	916	1040	1055	822
Disk 2 (NiCrBSi-%35W ₂ C) Alev püskürtme	880	1026	917	878	943	1091	1113	1049	1018	993	991
Disk 3 (W ₂ C-%12Ni) HVOF püskürtme	677	710	758	697	608	556	645	680	575	691	660
Disk 4 (NiCrBSi) Alev püskürtme	729	688	653	925	804	865	795	641	745	639	748
Disk 5 (Orijinal disk)	196	226	255	296	326	264	249	224	238	180	245



Şekil 4.18 OEM ve kaplanmış fren disklerin sertlik değerleri.

Dökme demir diskin sertliği 170-255 HB (~180-270 HV) değerleri arasındadır (Gemalmayan 1984). Çalışmamızda kullanılan OEM diskin sertliği ortalama 245 HV_{0,2} olarak ölçülmüştür. W₂C-%12Ni kaplamalı disk ortalama 660 HV_{0,2} sertlik değeri üretmiştir. Mikroyapı incelemelerinde de görüldüğü gibi W₂C-%12Ni kaplamanın sert karbür fazlarını içermesine rağmen sertliğinin kaplamalar arasında en düşük çıkması kaplama parametrelerine (Miguel et al.2003, Planche et al. 2003, Gonzalez et al 2007) ve W₂C fazının kaplama esnasında ıslatma kabiliyetini arttırarak saf Nikel içerisine karbürlerin çökmesinden dolayı sünek bir yapının oluşmasından kaynaklanmıştır. Kaplama parametrelerine bağlı olarak çalışmamızda NiCrBSi-%35W₂C kaplamanın sertliği ortalama 991 HV_{0,2} olarak gerçekleşmiştir. NiCrBSi kaplamaların sertlik değeri 850-900 HV mikro sertliğe kadar yükselir (Sulzer Metco 2013). NiCrBSi kaplamalı diskin sertliği ortalama 748 HV_{0,2} değerinde çıkmıştır. NiCrBSi kaplamanın metalik olmasına rağmen W₂C-%12Ni kaplamadan yüksek çıkması diğer parametrelere ek olarak Ni elementinin yeniden ergitilmesinden dolayı kaplama tabakası içerisine çökerek iyi bir bağ kurmasından kaynaklandığını söylemek mümkündür.











4.6 OEM ve Kaplanmış Disklerin ve Balataların Aşınma Değerleri

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. Bu bakımdan disk ve balata ömrünü belirleyen aşınma miktarı da en az sürtünme katsayısı kadar önemlidir.

Frenleme performansı testlerine tabi tutulan disk-balata ikilisinin resimleri Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Kullanılan OEM ve kaplanmış disklerin aşınma miktarları ağırlık ve kalınlık kaybı hesabına göre değerlendirilmiştir. Disk ve balatalara ait hassas terazilerle test öncesi ve sonrası ölçülen ağırlık kaybı değerleri Talo 4.10 ve Tablo 4.11'de, bu verilere dayanılarak çizilen grafik Şekil 4.20'de gösterilmiştir.

Performans testleri boyunca en az aşınmayı 0,47 gr ile alevle püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi-%35W₂C tozu ile kaplanmış olan 2 no'lu disk göstermiştir. Bunun

sebebinin Ni elementinin tekrar ergitme esnasında daha fazla yoğunluğa sahip olması ve kendiliğinden ıslatma kabiliyetinden dolayı Ni ve Cr difüzyonu sebebiyle bağlanma mekanizmasını güçlendirmesi olarak ifade edilebilir (Miguel et al. 2003). Ayrıca yeniden ergitme esnasında dökme demir içerisindeki karbon atomları ile yapıda bulunan W ve Cr ile sert karbür yapılarının oluşması da aşınma miktarını azaltma etkisi göstermiştir. Normalde sürtünme katsayısı arttığı zaman aşınma da artar (Mutlu et al. 2007). Bu kaplamanın sürtünme katsayısı değeri en düşük çıkması aşınma miktarının az olmasının bir başka nedenidir.

Disk Kaplama Yöntemi Kaplama Malzemesi	Disk 1 (Cr ₂ O ₃ -%40TiO ₂) Plazma püskürtme	Disk 2 (NiCrBSi- %35W ₂ C) Alev püskürtme ve ergitme	Disk 3 (W ₂ C-%12Ni) HVOF püskürtme	Disk 4 (NiCrBSi) Alev püskürtme ve ergitme	Disk 5 (Orijinal disk)
Diskler					
Balatalar					

Şekil 4.19 Frenleme performans testlerinde kullanılan disk-balata ikilisi.

İkinci olarak aşınma miktarı az olan plazma püskürtme yöntemiyle Cr₂O₃-%40TiO₂ tozu ile kaplanan 1 no'lu diskte meydana gelmiştir. Bu diskte de sürtünme katsayısı değeri diğer üç diskten daha düşüktür. Plazma püskürtme ile yapılan krom oksit kaplamalar aşınma direnci yüksek kaplamalardır (Leivo et al. 1997). Yine aynı şekilde bu oksit seramik kaplamanın sertliği diğer üç diskten de yüksek olması aşınma oranının düşük olmasının önemli sebebidir.

Tablo 4.10 OEM ve kaplanmış disklerin ağırlık kaybı değerleri.

Disklerin ağırlık aşınması miktarları				
Disk ve kaplama yöntemi	Deney aşaması	Ağırlık (gr)	Ağırlık farkı (gr)	Ortalama aşınma miktarı (gr)
Disk 1 (Cr ₂ O ₃ -%40TiO ₂) Plazma püskürtme	Kaplanmadan önce	7135,4	----	0,53
	Başlangıç	7242,1	106,7	
	1. Deneme	7241,5	0,6	
	2. Deneme	7.241,0	0,5	
	3. Deneme	7240,5	0,5	
Disk 2 (NiCrBSi-%35W ₂ C) Alev püskürtme	Kaplanmadan önce	7136,2	-----	0,47
	Başlangıç	7284,6	148,4	
	1. Deneme	7284,1	0,5	
	2. Deneme	7283,7	0,4	
	3. Deneme	7283,2	0,5	
Disk 3 (W ₂ C-%12Ni) HVOF Püskürtme	Kaplanmadan önce	7134,3	----	0,63
	Başlangıç	7269,2	134,9	
	1. Deneme	7268,5	0,7	
	2. Deneme	7267,9	0,6	
	3. Deneme	7267,3	0,6	
Disk 4 (NiCrBSi) Alev püskürtme	Kaplanmadan önce	7135,6	----	4,33
	Başlangıç	7368,7	233,1	
	1. Deneme	7364,3	4,4	
	2. Deneme	7359,8	4,5	
	3. Deneme	7355,7	4,1	
Disk 5 (Orijinal disk)	Başlangıç	7164,2	-----	4,53
	1. Deneme	7159,7	4,5	
	2. Deneme	7155,9	3,8	
	3. Deneme	7150,6	5,3	

HVOF yöntemiyle W₂C-%12Ni tozu ile kaplanan 3 no'lu diskteki aşınma miktarı üçüncü sırada gerçekleşmiştir. Bu kaplamada kullanılan NiAl intermetalik ara bağlayıcı kaplama ile dökme demir disk ara yüzeylerini iyi ıslattığından kaplama esnasında ekzotermik reaksiyondan dolayı mikro difüzyonla kimyasal bağ oluşturarak hem mekanik hemde kimyasal bağlanmayı temin etmiştir (Bilgin ve Samur 2009).

Mükemmel bağ yapısı malzemelerin aşınma direncinin arttırdığından aşınma miktarını düşürmüştür. Bu diskin en yüksek sürtünme katsayısı sergilemesine rağmen en az aşınma oranı göstermesi iyi bir bağlanma mekanizmasının olmasına bağlanabilir.

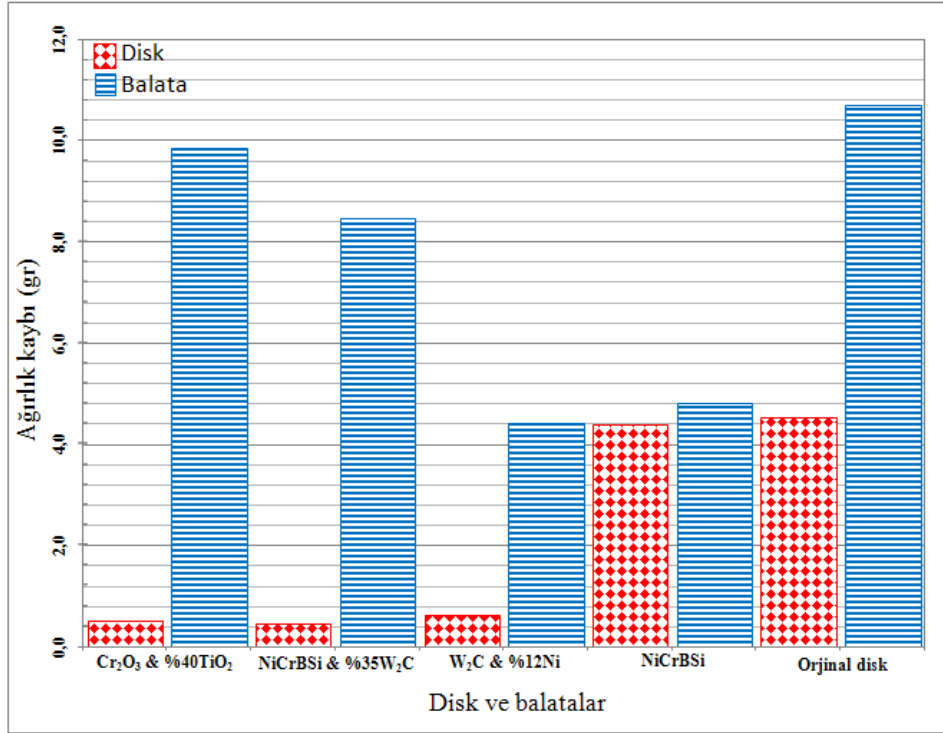
NiCrBSi tozu ile kaplanan 4 no'lu diskteki aşınma miktarı OEM diskten düşük fakat diğer ilk üç diskten çok yüksek olmasının başlıca sebebi alevle püskürtme ve ergitme yönteminin atmosferik ortamda uygulanmasından dolayı oksitli bileşiklerin ve porozitelerin oluşması söz konusudur. Matriks içindeki bu oksitli bileşikler ve porozitelerin varlığından dolayı, aşınma mukavemeti bir miktar düşmüştür. Bu diskin sürtünme katsayısı değeri OEM diskle hemen hemen aynı olmasına rağmen aşınma miktarı daha azdır. Bunun sebebinin bu diskin sertlik değerinin yüksek olması olarak izah etmek mümkündür. Genel olarak ısı püskürtme kaplamalar sert kaplamalar olduğu için kaplanmış disklerin aşınma oranları OEM diskten belirli derecede düşük meydana gelmiştir.

Balatalarda en az aşınma değerini HVOF yöntemiyle W_2C -%12Ni tozu ile kaplanan 3 no'lu diske ait balata göstermiştir. En yüksek sürtünme katsayısı sergilmesine rağmen balata aşınmasının en az olması disk-balata ikilisinin iyi uyum sağlamasına ve ara yüzeyinde oluşan ince film tabakalarına bağlanabilir. İkinci olarak NiCrBSi tozu ile kaplanan 4 no'lu diske ait balata göstermiştir.

Plazma püskürtme yöntemiyle Cr_2O_3 -%40TiO₂ tozu ile kaplanan 1 no'lu diske ait balata ve alevle püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi-%35W₂C tozu ile kaplanmış 2 no'lu diske ait balatalardaki aşınma oranlarının yüksek olması, bu disklerin sertliklerinin yüksek olmasından ve termal bariyer özelliklerinden kaynaklanmıştır. İkili sistemde karşı çift daima birbirine sürtünerek aşınmaya sebep olmaktadır. Disk yüzeyindeki temas bölgelerinin balatadaki temas bölgelerinden hem daha küçük hemde daha sert olmasından dolayı daima aşınma daha çok balatalarda olmaktadır (Eriksson et al.2002). OEM diske ait balatada aşınmanın en yüksek olmasının sebebinin, OEM diskin daha düşük sertlikte olması ve arayüzeyde daha fazla aşındırıcı partiküllerin bulunması olarak gösterilebilir.

Tablo 4.11 Balataların ağırlık kaybı değerleri.

Balataların ağırlık aşınması miktarları				
Balata	Deney aşaması	Ağırlık (gr)	Ağırlık farkı (gr)	Ortalama aşınma miktarı (gr)
Disk 1 balatası (Cr ₂ O ₃ -%40TiO ₂) Plazma püskürtme	1. Deneme takılan	18,034	10,799	9,852
	1. Deneme sökülen	7,235		
	2. Deneme takılan	18,065	10,243	
	2. Deneme sökülen	7,822		
	3. Deneme takılan	18,707	8,515	
	3 Deneme sökülen	10,192		
Disk 2 balatası (NiCrBSi-%35W ₂ C) Alev püskürtme	1. Deneme takılan	18,31	7,615	8,457
	1. Deneme sökülen	10,695		
	2. Deneme takılan	17,863	7,991	
	2. Deneme sökülen	9,872		
	3. Deneme takılan	17,453	9,761	
	3 Deneme sökülen	7,692		
Disk 3 balatası (W ₂ C-%12Ni) HVOF püskürtme	1. Deneme takılan	17,513	4,34	4,331
	1. Deneme sökülen	13,173		
	2. Deneme takılan	18,465	4,758	
	2. Deneme sökülen	13,707		
	3. Deneme takılan	18,286	3,895	
	3 Deneme sökülen	14,391		
Disk 4 balatası (NiCrBSi) Alev püskürtme	1. Deneme takılan	18,519	4,867	4,820
	1. Deneme sökülen	13,652		
	2. Deneme takılan	18,532	5,006	
	2. Deneme sökülen	13,526		
	3. Deneme takılan	18,407	4,588	
	3 Deneme sökülen	13,819		
Disk 5 balatası (Orijinal disk)	1. Deneme takılan	26,359	11,887	10,711
	1. Deneme sökülen	14,472		
	2. Deneme takılan	17,566	8,712	
	2. Deneme sökülen	8,854		
	3. Deneme takılan	17,688	11,534	
	3 Deneme sökülen	6,154		



Şekil 4.20 Disk ve balataların ağırlık kaybı değerleri.

Frenleme testi öncesi ve sonrasında disk ve balatalara ait dijital mikrometre ile ölçülen kalınlık kaybı değerleri Tablo 4.12 ve Tablo 4.13’de ve bu verilere dayanılarak elde edilen grafik Şekil 4.21’de gösterilmiştir. En fazla kalınlık kaybı kütleli aşınma miktarıyla uyumlu olarak 5 no’lu OEM diskte meydana gelmiştir. İkinci olarak kalınlık aşınması en fazla alevle püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi tozu ile kaplanan 4 no’lu diskte yine ağırlık aşınması ile uyumlu olarak meydana gelmiştir. Bu iki diskte diğer seramik karakterli tozlarla kaplanan üç diske nazaran bu denli aşınmanın yüksek olması bu disklerin ana matrislerinin metalik özellikte olmasına bağlanabilir. Alevle püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi-%35W₂C tozu ile kaplanmış 2 no’lu diske ağırlık aşınması en az olmasına rağmen kalınlık aşınma değeri diğer 1 no’lu ve 3 no’lu disklerden fazla çıkmıştır.

Kaplama yönteminin atmosfer şartlarında yapılmasından dolayı yüzeyde kalıntı ve porozite miktarının bu iki diskten daha fazla olmasıyla izah edilebilir. 2 no’lu disk ile 4 no’lu diskler aynı yöntemle kaplanmış olmalarına ve Nikel matrisli tozla kaplanmalarına rağmen 2 no’lu diskteki aşınma daha fazla gerçekleşmiştir. 2 no’lu

diskte meydana gelen termal bariyer özelliğinden dolayı ısı yayılma olmadığından yüksek sıcaklık kaplama tabakasında fazla aşınmaya sebep olmuştur.

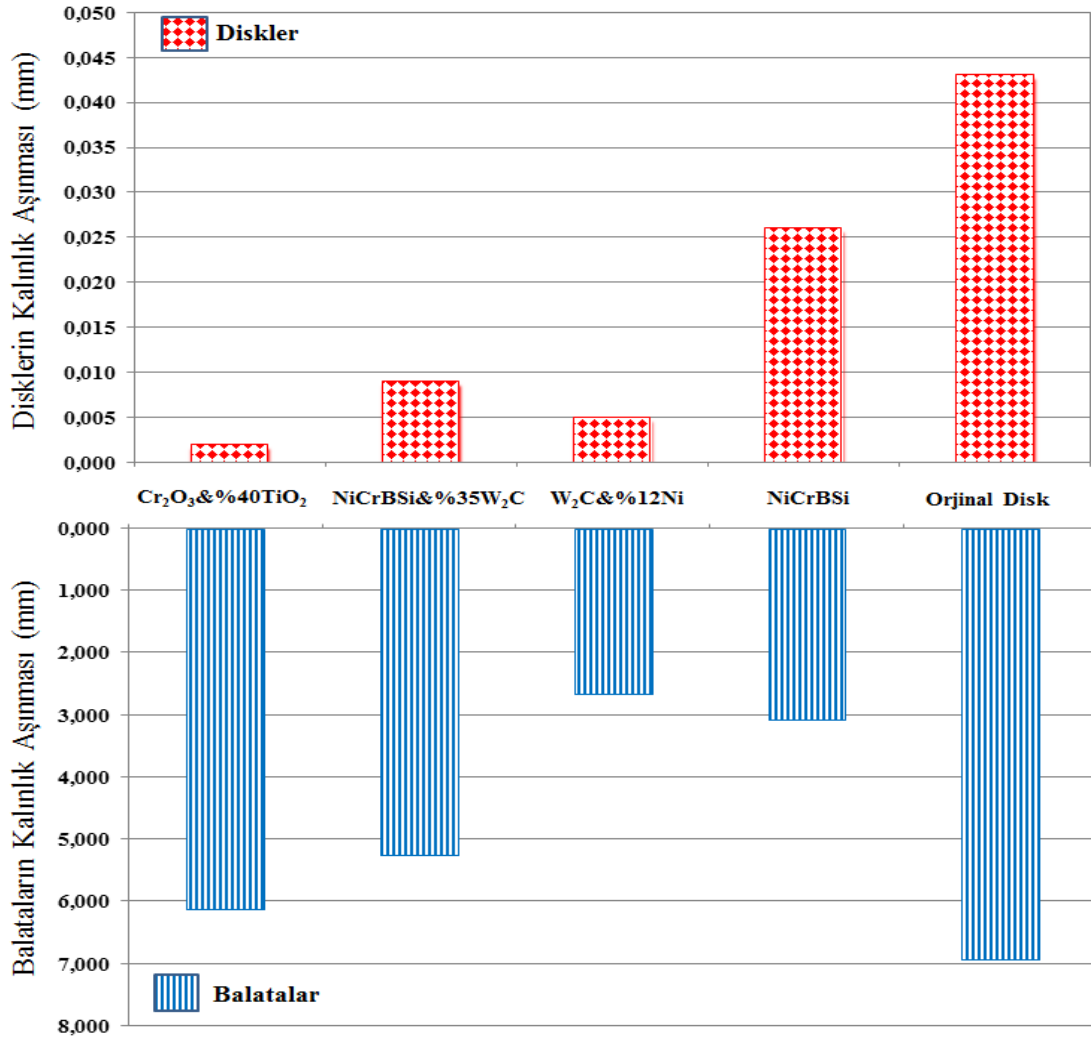
Tablo 4.12 OEM ve kaplanmış disklerin kalınlık kaybı değerleri.

Frenlemeden sonra disklerin kalınlığıdaki azalma							
Disk ve kaplama yöntemi	Deney aşaması	1	2	3	4	Kalınlık farkı (mm)	Ortalama kalınlık farkı (mm)
Disk 1 (Cr ₂ O ₃ - %40TiO ₂) Plazma püskürtme	Kaplanmadan önce	24,066	24,074	24,066	24,074	Ortalama kalınlık farkı	0,002
	Başlangıç	24,592	24,594	24,593	24,594	24,593	
	1. Deneme	24,590	24,592	24,591	24,589	0,003	
	2. Deneme	24,588	24,590	24,589	24,589	0,002	
	3. Deneme	24,586	24,588	24,587	24,587	0,002	
Disk 2 (NiCrBSi- %35W ₂ C) Alev püskürtme	Kaplanmadan önce	24,035	24,034	24,016	24,043	Ortalama kalınlık farkı	0,009
	Başlangıç	24,887	24,779	24,769	24,782	0,772	
	1. Deneme	24,879	24,769	24,757	24,774	0,009	
	2. Deneme	24,873	24,761	24,748	24,764	0,008	
	3. Deneme	24,868	24,750	24,738	24,756	0,009	
Disk 3 (W ₂ C-%12Ni) HVOF püskürtme	Kaplanmadan önce	24,085	24,107	24,102	24,079	Ortalama kalınlık farkı	0,005
	Başlangıç	24,321	24,343	24,348	24,348	0,247	
	1. Deneme	24,316	24,337	24,342	24,341	0,006	
	2. Deneme	24,312	24,332	24,337	24,337	0,004	
	3. Deneme	24,309	24,327	24,333	24,334	0,004	
Disk 4 (NiCrBSi) Alev püskürtme	Kaplanmadan önce	24,118	24,073	24,109	24,092	Ortalama kalınlık farkı	0,023
	Başlangıç	24,901	24,796	24,911	24,997	0,803	
	1. Deneme	24,875	24,764	24,895	24,978	0,023	
	2. Deneme	24,852	24,743	24,869	24,953	0,024	
	3. Deneme	24,828	24,720	24,849	24,932	0,022	
Disk 5 (Orijinal disk)	Başlangıç	24,058	24,054	24,056	24,055	Ortalama Kalınlık Farkı	0,043
	1. Deneme	24,015	24,012	24,014	24,014	0,042	
	2. Deneme	23,976	23,977	23,976	23,977	0,037	
	3. Deneme	23,927	23,926	23,929	23,928	0,049	

Tablo 4.13 Balataların kalınlık kaybı değerleri.

Frenlemeden sonra balataların kalınlığıdaki azalma				
Balata	Deney aşaması	Kalınlık (mm)	Kalınlık farkı (mm)	Ortalama kalınlık farkı (mm)
Disk 1 balatası (Cr ₂ O ₃ -%40TiO ₂) Plazma püskürtme	1. Deneme takılan	11,809	6,841	6,123
	1. Deneme sökülen	4,968		
	2. Deneme takılan	11,692	6,369	
	2. Deneme sökülen	5,323		
	3. Deneme takılan	11,812	5,158	
	3 Deneme sökülen	6,654		
Disk 2 balatası (NiCrBSi- %35W ₂ C) Alev püskürtme	1. Deneme takılan	11,654	4,696	5,260
	1. Deneme sökülen	6,958		
	2. Deneme takılan	11,647	4,782	
	2. Deneme sökülen	6,865		
	3. Deneme takılan	11,654	6,302	
	3 Deneme sökülen	5,352		
Disk 3 balatası (W ₂ C-%12Ni) HVOF püskürtme	1. Deneme takılan	11,593	2,508	2,658
	1. Deneme sökülen	9,085		
	2. Deneme takılan	11,856	2,941	
	2. Deneme sökülen	8,915		
	3. Deneme takılan	11,869	2,527	
	3 Deneme sökülen	9,342		
Disk 4 balatası (NiCrBSi) Alev püskürtme	1. Deneme takılan	11,795	3,179	3,063
	1. Deneme sökülen	8,616		
	2. Deneme takılan	11,792	3,051	
	2. Deneme sökülen	8,741		
	3. Deneme takılan	11,816	2,961	
	3 Deneme sökülen	8,855		
Disk 5 balatası (Orijinal disk)	1. Deneme takılan	18,713	7,524	6,929
	1. Deneme sökülen	11,189		
	2. Deneme takılan	11,672	5,731	
	2. Deneme sökülen	5,941		
	3. Deneme takılan	11,668	7,534	
	3 Deneme sökülen	4,134		

HVOF yöntemiyle W_2C -%12Ni tozu ile kaplanan 3 no'lu diskin kalınlık aşınması miktarı ağırlık aşınmasıyla orantılı çıkmıştır. Bu diskte sürtünme katsayısı en yüksek olmasına rağmen aşınmanın az olması çalışmada kullanılan diskler arasında tercih edilebilir disk olduğunu göstermektedir. Plazma püskürtme yöntemiyle Cr_2O_3 -%40TiO₂ tozu ile kaplanan 1 no'lu diskte kalınlık aşınması en az meydana gelmiştir. Mikroyapı incelemelerinde de görüldüğü gibi bu diskin plazma püskürtme yöntemi ile kaplanması ve kaplama esnasında NiCr ara bağlayıcı kullanılmasıyla daha yoğun bir kaplama oluşturulmuştur. Aşınmanın daha düşük olması, sürtünme yüzey tabakasında diğer kaplamalara göre kalıntı ve porozitenin az olmasına ve sert oksit tabakalarının aşınma direncinin yüksek olmasıyla izah edilebilir.



Şekil 4.21 Disk ve balataların kalınlık kaybı değerleri.

4.7 OEM ve Kaplanmış Disklerin Frenleme Performans Testleri

Frenleme performans testleri SAE J2430-BEEP “Binek Otomobilleri ve Kamyonet Frenleri İçin Dinamometre Etkinlik Karakterizasyon Testi-Fren Değerlendirme Prosedürü” kriterlerine göre yapılmıştır. SAE J2430 test prosedürüne göre frenleme performansı değerlendirilirken, cihaz kontrol (instrument checks), alıştırma (burnish), alıştırma sonrası etkinliği (effectiveness), sıcaklıkta fren zayıflaması (fade), sıcaklık etkinliği (hot performance), soğutma döngüsü (cooling), kararlılık etkinliği (recovery ramp), yeniden alıştırma etkinliği (re-burnish) ve final etkinliği (final effectiveness) kriterleri göz önüne alınmaktadır (Lee and Filip 2013).

Uygulanan kuvvet, basınç, sıcaklık ve hız gibi parametreler frenleme performansına doğrudan etki etmektedir. BEEP kriterlerine göre uygulanan kuvvet 500 N’u geçmemelidir. Cihaz kontrol bölümü test cihazını doğrulamak ve kullanılan disklerinin uyumunu sağlamak için yararlı etkinliktir. Alıştırma bölümü disk ve balata ara yüzeyinde gerçek temasın sağlanarak istikrarlı bir sürtünmenin oluşması için gereklidir. Soğuk ve sıcak etkinlik bölümleri temel değerlendirme bölümleridir. Gerçek performansın değerlendirildiği bölüm final etkinliği bölümüdür (Yun et al. 2010).

Yapılan testlerde; basınç, frenleme kuvveti, yavaşlama ivmesi, frenleme sayısı, dönme zamanı, frenleme başlangıç hızı, bırakma hızı, frenleme süresi, sürtünme katsayısı, diskin sıcaklık değerleri gibi parametreler ölçülerek kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerlere göre performans grafikleri çizilmiştir.

Frenleme performans testlerine başlamadan önce, disklerin sürtünme yüzeyleri gerekli taşlama, zımparalama işlemleri yapıldıktan sonra tane büyüklüğü 320 olan zımpara ile zımparalanmış ve tozlar kuru hava veya lif bırakmayan eş değeri malzeme ile temizlenmiştir (TSE 9076, SAE J661). Testlere başlamadan önce ve testler sonrasında disk ve balataların yüzey pürüzlülüğü, ağırlıkları, kalınlıkları ve disklerin salgı değerleri ölçülerek kayıt altına alınmıştır.

4.7.1 Plazma Püskürtme Yöntemiyle Cr₂O₃-%40TiO₂ Kaplanan Diskin Frenleme Performansı

Performans kriterlerine göre yapılan testlerden alınan verilere dayanılarak çizilen 1 no'lu diske ait grafik Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Cr₂O₃-%40TiO₂ tozu ile kaplanmış diskten düşük seyretmesi olarak tespit edilmiştir.

Cihaz Kontrol Etkinliği: Toplamda 23 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 10 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,50 ve aynı basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,48 mertebesinde seyretmiştir. 7 bar basınç ve 50 km/h hızda yapılan 3 frenlemede sürtünme katsayısı 0,62 mertebesinde seyretmiştir. 14 bar basınç ve 50 km/h hızda sürtünme katsayısı 0,55 mertebesinde sıcaklığın artmasıyla azalarak, 16 bar basınç, 100 km/h hıza yükseldiğinde 0,42 mertebesine kadar gerilemiştir. Etkinlik müddetince disk ve balatanın sıcaklığı 97 °C'den 245 °C'ye kadar yükselmiştir.

Alıştırma Etkinliği: Toplamda 200 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 80 km/h hızda ve 8 bar basınçta yapılan 200 frenlemede sürtünme katsayısı 0,60'lar civarında seyretmiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 °C ve her frenleme arasında 97 sn beklenilerek etkinlik tamamlanmıştır. Disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 190 °C civarında seyretmiştir.

Alıştırma Sonrası Etkinliği: Toplamda 16 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 12 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,58 seviyesinde, 14 bar basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,43 mertebesinde seyretmiştir. 16 bar basınç, 100 km/h hızda yapılan 6 frenlemede 0,45 seviyesinde seyretmiştir. Etkinlik müddetince disk ve balatanın sıcaklığı 97 °C'den 322 °C'ye kadar yükselmiştir.

Sıcaklıkta Fren Zayıflaması Etkinliği: Toplamda 15 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 120 km/h hızda ve 10-14 bar basınç aralıklarında artan basınçla

yapılan 15 frenlemede sürtünme katsayısı 0,60'lar civarında başlayıp sıcaklığın artmasıyla 0,48'ler civarına kadar gerilemiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 °C olup, disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 340 °C civarına kadar yükselmiştir.

Sıcaklık Etkinliği: Toplamda 2 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 100 km/h hızda ve 10 bar basınçta 0,61 sürtünme katsayısı elde edilirken, aynı hızda 18 bar basınçta sürtünme katsayısı 0,44 gerçekleşmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı 279 °C-340 °C bandında seyretmiştir. Artan basınç ve yüksek sıcaklığın etkisi ile sürtünme katsayısında ani bir düşüş meydana gelmiştir.

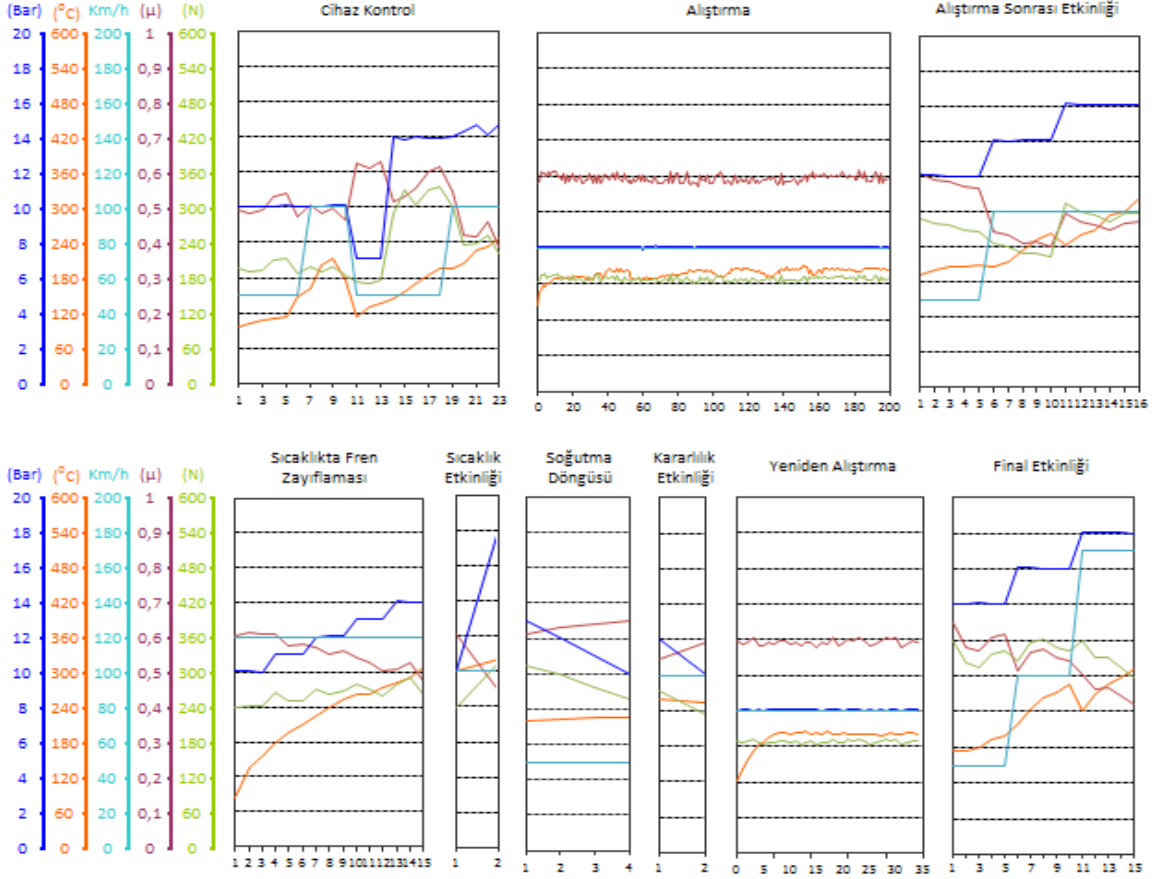
Soğutma Döngüsü Etkinliği: Toplamda 4 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 13 bar'dan 10 bar'a azalan basınç aralığında sürtünme katsayısı 0,61 seviyesinden 0,64 seviyesine yükselmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı ise 239 °C'den 199 °C seviyelerine gerilemiştir.

Kararlılık Etkinliği: Toplamda 2 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 100 km/h hızda ve 12 bar basınçta 0,54 sürtünme katsayısı elde edilirken, aynı hızda 10 bar basınçta sürtünme katsayısı 0,59 gerçekleşmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı 259 °C-289 °C bandında seyretmiştir.

Yeniden Alıştırma Etkinliği: Toplamda 35 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 80 km/h hızda ve 8 bar basınçta yapılan 35 frenlemede sürtünme katsayısı 0,60'lar civarında seyretmiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 °C ve her frenleme arasında 97 sn beklenilerek etkinlik tamamlanmıştır. Disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 190 °C civarında seyretmiştir.

Final Etkinliği: Toplamda 15 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 14 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,58 seviyesinde, 16 bar basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,56 mertebesinde seyretmiştir. 18 bar basınç, 160 km/h hızda yapılan 5 frenlemede

0,45 seviyesinde seyretmiştir. Etkinlik müddetince disk ve balatanın ara yüzey sıcaklığı 97 °C’den 354 °C’ye kadar yükselmiştir.



Şekil 4.22 Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplanmış fren diskinin (D1 diski) SAE J2430 test standardına göre frenleme performansı grafiği.

Performans kriterlerine göre yapılan test sonuçlarına dayanılarak plazma püskürtme yöntemiyle Cr_2O_3 -%40 TiO_2 oksit seramik tozu kaplanmış fren diskinin (D1 diski) SAE J2430 test standardına göre çizilen Şekil 4.22’de gösterilen frenleme performansı grafiğinin cihaz kontrol etkinliği bölümünün ilk 5 frenlemesinde 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemelerde sürtünme katsayısı nispeten düşük çıkmıştır. Bunun sebebi disk-balata ara yüzeyi temas alanının küçük olmasındandır. İkinci defa yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemelerde artan basınç ve hız değerleri ile sıcaklık değerleri yükselmiş, sürtünme katsayısı değeri düşmüştür. Üçüncü olarak yapılan 3 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g

ivmeyle yapılan frenlemede düşük basınç ve düşük hızda sürtünme katsayısı değeri artmış sıcaklık düşmüştür. Dördüncü olarak yapılan 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g ivmeden kademeli olarak yavaşlatılmıştır. Düşük hızda yüksek basınçta sürtünme katsayısı nispeten düşmüş, sıcaklık artmıştır. Beşinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g ivmeden kademeli olarak yavaşlatılmıştır. Hızın ve basıncın artmasıyla sıcaklık yükselmiş, sürtünme katsayısı düşmüştür.

Alıştırma etkinliği bölümünde, 80 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan 200 frenlemede sıcaklık ve sürtünme katsayısı kararlı hale gelmiştir. Disk-balata ikilisi uyumlu bir ara yüzeye kavuşmuştur.

Alıştırma sonrası etkinliğinde, ilk 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde basıncın artmasıyla sürtünme katsayısı düşmüş ancak sıcaklık yükselmeye devam etmiştir. Sıcaklığın yükselmesinin sebebi seramik kaplamanın ısıl iletkenliğinin düşük olmasından kaynaklanmıştır. İkinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde hızın ve basıncın artmasıyla sürtünme katsayısı daha da düşmüş sıcaklık yükselmiştir. Üçüncü olarak yapılan 6 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,65 g yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde nispeten düşük yavaşlama ivmesi sürtünme katsayısı değerinin yükselmesine neden olmuştur.

Sıcaklıkta fren zayıflaması etkinliğinde, yapılan 15 frenlemede 120 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde artan basınçla sıcaklık yükselmiştir. Yükselen sıcaklığın etkisiyle sürtünme katsayısında hissedilir derecede düşüş meydana gelmiştir. “Fade” olarak isimlendirilen (Anderson 1992) fren zayıflaması mekanizması meydana gelmiştir.

Sıcaklık etkinliğinde, yapılan 2 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde sıcaklık ve basınç arttıkça sürtünme katsayısı Filip et al. (2002)’dakine benzer şekilde düşmüştür. Seramik

kaplamanın ısı iletkenliğinin dökme demir diskten düşük olmasından dolayı sıcaklık değeri OEM diskten yüksek çıkmıştır.

Soğutma döngüsünde, yapılan 4 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde düşük hızlarda sıcaklıkta düşmüştür. Düşük hız ve sıcaklıkta sürtünme katsayısı da artış göstermiştir.

Kararlılık etkinliğinde, yapılan 2 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde kaplama 0,58 bandında sürtünme katsayısı sergilemiştir.

Yeniden alıştırma etkinliği bölümünde, 80 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan 35 frenlemede sıcaklık ve sürtünme katsayısı kararlı halini korumuştur. Disk-balata ikilisinin istikrarlı sürtünme katsayısı ürettiği tespit edilmiştir.

Final etkinliği bölümünde, ilk 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan hız ile sıcaklık yükselmiş ve sürtünme katsayısı düşmüştür. İkinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan basınç ve hızın etkisiyle sıcaklık yükselmiş ve sürtünme katsayısı düşmüştür. Son olarak yapılan 5 frenlemede 160 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan basınç ve maksimum hız sınırında sıcaklık yükselmiştir. Kayma hızının yükselmesi ile birlikte aşınmış partikül miktarında artış olmaktadır ve dolayısı ile sürtünme tabakasını oluşturan bileşikler de artmaktadır. Bu bileşikler disk-balata temasını azalttığı için (Shorowerdi et al. 2004) sürtünme katsayısı da hissedilir derecede düşmüştür. Sıcaklığın artmasıyla sürtünme katsayısındaki düşüşün nedeni aşınma miktarının artmasıdır. 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 (Ertan ve Yavuz 2010). Disk-balata ara yüzeyinde aşınmış partiküller sürtünme tabakasının kalınlaşmasına ve dolayısı ile disk-balata temasının azalmasına sebep olmaktadır (Kurt ve Boz 2004). Kullanılan balataların GG sınıfı balatalar olduğu düşünüldüğünde Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplamalar 0,8 gibi yüksek bir sürtünme katsayısı üretebilir (Hieman 1996). Final etkinliği bölümünde bu faktörlere bağlı olarak sürtünme katsayısı 0,58 değerinden 0,44 seviyelerine kadar gerilemiştir.

Mikroyapı incelemelerinden de anlaşıldığı gibi kaplama tabakası dökme demir disk ile mükemmel bir bağ kurduğu için uygulanan maksimum frenleme hız ve kuvvetlerinde kaplama tabakası kendisinden beklenen performansı göstermiştir. Sıcaklık değerleri OEM diskin seviyesinden düşük seyretmiştir. Kaplama tabakasındaki oksitli bileşiklerden kaynaklanan sertlik değerinin yüksek olmasından dolayı sürtünme katsayısı OEM diskten düşük meydana gelmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri OEM diske en yakın ve ondan düşük kaplama olmasına rağmen sürtünme katsayısı düşük çıkmıştır.

4.7.2 Alev Püskürtme ve Ergitme Yöntemiyle NiCrBSi-%35 W_2C Kaplanan Diskin Frenleme Performansı

Performans kriterlerine göre yapılan testlerden alınan verilere dayanılarak çizilen 2 no'lu diske ait grafik Şekil 4.23'de gösterilmiştir. NiCrBSi-%35 W_2C tozu ile kaplanmış diskin genel karakteristiği sürtünme katsayısının orijinal disk ve 1 no'lu diskten daha düşük, sıcaklık ve basınç altında sürtünme katsayısının düşmesi, sıcaklığın ani yükselmesi olarak tespit edilmiştir. NiCrBSi matris içerisine WC ilavesi ile yapılan kaplamalar termal bariyer kaplama alanında geniş olarak kullanılmaktadır (Simunovic 2010). Ni esaslı alaşımların termal iletkenliği yüksek iken bu kaplamanın termal bariyer özelliği göstermesi W_2C 'nin yapıda bulunmasından kaynaklanmıştır. Kaplama tabakası termal bariyer özelliği gösterdiğinden kaplama tabakası tarafında sıcaklık 255 °C civarında iken diskin kaplamasız yüzünde sıcaklık 100 °C civarında ölçülmüştür.

Cihaz Kontrol Etkinliği: Toplamda 23 frenleme dngsunden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 10 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,62 seviyesinde, aynı basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,51 mertebesinde seyretmiştir. 7 bar basınç ve 50 km/h hızda yapılan 3 frenlemede sürtünme katsayısı 0,70 mertebesinde seyretmiştir. 14 bar basınç ve 50 km/h hızda sürtünme katsayısı 0,53 mertebesinden sıcaklığın artmasıyla azalarak, 16 bar basınç, 100 km/h hıza yükseldiğinde 0,46 mertebesine kadar gerilemiştir. Etkinlik müddetince disk ve balatanın sıcaklığı 97 C'den 185 C'ye kadar yükselmiştir.

Alıştırma Etkinliği: Toplamda 200 frenleme dngsunden oluşan bu etkinlik bölümünde; 80 km/h hızda ve 8 bar basınçta yapılan 200 frenlemede sürtünme katsayısı 0,55'ler civarında seyretmiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 C, her frenleme arasında 97 sn beklenilerek etkinlik tamamlanmıştır. Disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 116 C civarında seyretmiştir.

Alıştırma Sonrası Etkinliği: Toplamda 16 frenleme dngsunden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 12 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,55 seviyesinde, 14 bar basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,46 mertebesinde seyretmiştir. 16 bar basınç, 100 km/h hızda yapılan 6 frenlemede 0,42 seviyesinde seyretmiştir. Etkinlik müddetince disk ve balatanın sıcaklığı 97 C ile 175 C arasında seyretmiştir.

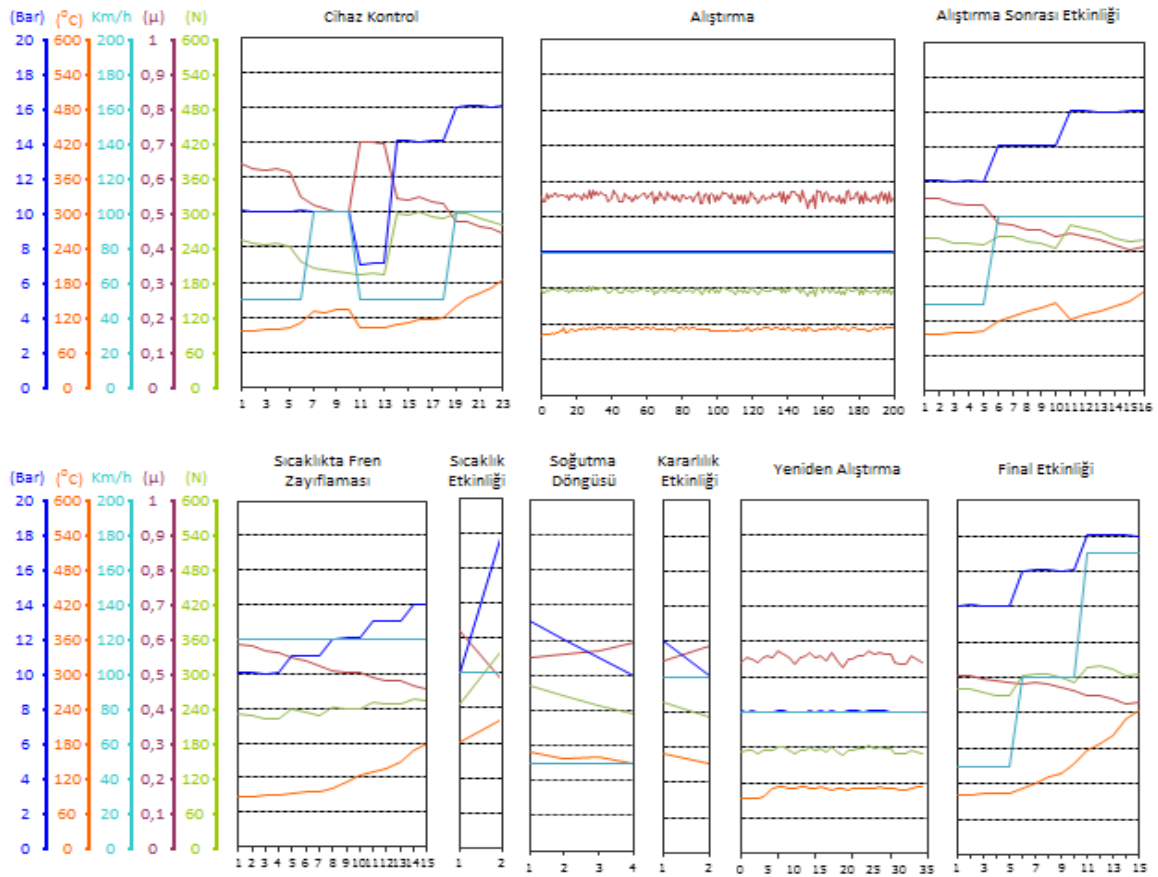
Sıcaklıkta Fren Zayıflaması Etkinliği: Toplamda 15 frenleme dngsunden oluşan bu etkinlik bölümünde; 120 km/h hızda ve 10-14 bar basınç aralıklarında artan basınçla yapılan 15 frenlemede sürtünme katsayısı 0,59'lar civarında başlayıp sıcaklığın artmasıyla 0,46'lar civarına kadar gerilemiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 C olup, disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 195 C civarına kadar yükselmiştir.

Sıcaklık Etkinliği: Toplamda 2 frenleme dngsunden oluşan bu etkinlik bölümünde; 100 km/h hızda ve 10 bar basınçta 0,62 sürtünme katsayısı elde edilirken, aynı hızda 18 bar basınçta sürtünme katsayısı 0,48 gerçekleşmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı 158 C-

235 °C bandında seyretmiştir. Artan basınç ve yüksek sıcaklığın etkisi ile sürtünme katsayısında ani bir düşüş meydana gelmiştir.

Soğutma Döngüsü Etkinliği: Toplamda 4 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 13 bar'dan 10 bar'a azalan basınç aralığında sürtünme katsayısı 0,55 seviyesinden 0,59 seviyesine yükselmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı ise 171 °C'den 157 °C seviyelerine gerilemiştir.

Kararlılık Etkinliği: Toplamda 2 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 100 km/h hızda ve 12 bar basınçta 0,54 sürtünme katsayısı elde edilirken, aynı hızda 10 bar basınçta sürtünme katsayısı 0,59 gerçekleşmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı 139 °C-172 °C bandında seyretmiştir.



Şekil 4.23 NiCrBSi-%35W₂C kaplanmış fren diskinin (D2 disk) SAE J2430 test standardına göre frenleme performansı grafiği.

Yeniden Alıştırma Etkinliği: Toplamda 35 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 80 km/h hızda ve 8 bar basınçta yapılan 35 frenlemede sürtünme katsayısı 0,55'ler civarında seyretmiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 °C ve her frenleme arasında 97 sn beklenilerek etkinlik tamamlanmıştır. Disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 112 °C civarında seyretmiştir.

Final Etkinliği: Toplamda 15 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 14 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,50 seviyesinde, 16 bar basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,48 mertebesinde seyretmiştir. 18 bar basınç, 160 km/h hızda yapılan 5 frenlemede 0,44 seviyesinde seyretmiştir. Disk ve balata arayüzey sıcaklığı 97 °C'den 255 °C'ye kadar yükselmiştir.

Performans kriterlerine göre yapılan test sonuçlarına dayanılarak alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi-%35W₂C seramik metal kompozit tozu kaplanmış fren diskinin (D2 diski) SAE J2430 test standardına göre çizilen Şekil 4.23'de gösterilen frenleme performansı grafiğinin cihaz kontrol etkinliği bölümünün ilk 5 frenlemesinde 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemelerde çalışmamızda test edilen disklerin en düşük sürtünme katsayısını üretmiştir. Bunun sebebi kaplamalar arasında sertlik değeri en yüksek kaplama olması olarak gösterilebilir. İkinci defa yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemelerde artan basınç ve hız değerleri ile sıcaklık yükselmiş, sürtünme katsayısı değeri düşmüştür. Üçüncü olarak yapılan 3 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemede düşük basınç ve düşük hızda sürtünme katsayısı değeri artmış sıcaklık düşmüştür. Dördüncü olarak yapılan 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g ivmeden kademeli olarak yavaşlatılmıştır. Düşük hızda yüksek basınçta sürtünme katsayısı nispeten düşmüş sıcaklık artmıştır. Beşinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g ivmeden kademeli olarak yavaşlatılmıştır. Hızın ve basıncın artmasıyla sıcaklık yükselmiş sürtünme katsayısı düşmüştür.

Alıştırma etkinliği bölümünde, 80 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan 200 frenlemede sıcaklık ve sürtünme katsayısı kararlı hale gelmiştir. Disk-balata ikilisi uyumlu bir ara yüzeye kavuşmuştur.

Alıştırma sonrası etkinliğinde, ilk 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde basıncın artmasıyla sürtünme katsayısı düşmüş ancak sıcaklık yükselmeye devam etmiştir. Sıcaklığın yükselmesinin sebebi karbür esaslı kaplamanın ısı iletkenliğinin düşük olmasından kaynaklanmıştır. İkinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde hızın ve basıncın artmasıyla sürtünme katsayısı daha da düşmüş sıcaklık yükselmiştir. Üçüncü olarak yapılan 6 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,65 g yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde nispeten düşük yavaşlama ivmesi sürtünme katsayısının kısmi olarak düşmesine sebep olmuştur.

Sıcaklıkta fren zayıflaması etkinliğinde, yapılan 15 frenlemede 120 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde artan basınçla sıcaklık yükselmiştir. Yükselen sıcaklığın etkisiyle sürtünme katsayısı diğer disklerle kıyaslandığında çok fazla düşmemiştir.

Sıcaklık etkinliğinde, yapılan 2 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde sıcaklık ve basınç arttıkça sürtünme katsayısı düşmüştür. Kaplama termal bariyer özelliği göstermesine rağmen sıcaklık değeri OEM diskten düşük çıkmıştır.

Soğutma döngüsünde, yapılan 4 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde düşük hızlarda sıcaklık fazla düşmemiştir. Düşük hız ve sıcaklıkta sürtünme katsayısı da artış göstermiştir.

Kararlılık etkinliğinde, yapılan 2 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde kaplama 0,57 bandında sürtünme katsayısı sergilemiştir.

Yeniden alıştırma etkinliği bölümünde, 80 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan 35 frenlemede sıcaklık ve sürtünme katsayısı kararlı halini muhafaza etmiştir. Disk-balata ikilisinin kararlı sürtünme katsayısı ürettiği tespit edilmiştir.

Final etkinliği bölümünde, ilk 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan hız ile sıcaklık yükselmiş ve sürtünme katsayısı düşmüştür. İkinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan basınç ve hızın etkisiyle sıcaklık yükselmiş ve sürtünme katsayısı düşmüştür. Son olarak yapılan 5 frenlemede 160 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan basınç ve maksimum hız sınırında sıcaklık yükselmiştir. Final etkinliği bölümünde bu faktörlere bağlı olarak sürtünme katsayısı 0,50 değerinden 0,44 seviyelerine kadar gerilemiştir.

Mikroyapı incelemelerinden de anlaşıldığı gibi kaplama tabakasının dökme demir disk ile mükemmel bir bağ kurduğu için uygulanan maksimum frenleme hız ve kuvvetlerinde kaplama tabakası kendisinden beklenen performansı göstermiştir. Sıcaklık değerleri OEM diskin seviyesinden düşük seyretmiştir. Kaplama tabakasındaki karburlu bileşikler ve kaplamanın termal bariyer etkisi göstermesi, sertlik değerinin yüksek olması sürtünme katsayısının tüm disklerden düşük meydana gelmesine sebep olmuştur. Yüzey pürüzlülük değerleri çok düşük kaplama olmasına rağmen bu disk diğer disklerden daha düşük sürtünme katsayısı üretmiştir.

4.7.3 HVOF Yöntemiyle W₂C-%12Ni Kaplanan Diskin Frenleme Performansı

Performans kriterlerine göre yapılan testlerden alınan verilere dayanılarak çizilen 3 no'lu diske ait grafik Şekil 4.24'de gösterilmiştir. W₂C-%12Ni tozu ile kaplanmış diskin genel karakteristiği sürtünme katsayısı 1, 2 ve orijinal diskten daha yüksek bulunmuştur. Sürtünme katsayısı yüksek hızlarda ani olarak düşmüştür. Sıcaklığın geç yükselmesiyle termal iletkenlik özelliği göstermiştir. Bunun sebebi NiAl ara bağlayıcının iyi ısı iletim katsayısına sahip olmasıdır. Disk ve balata ikilisi sıvama yaptığından adhesif sürtünme sergilemiştir. Tomlinson tarafından ortaya atılan teoriye göre temas eden yüzeylerin

molekülleri arasında bir bağ oluşur ve sürtünme kuvveti moleküller arası bağı yenen kuvvettir. Bu diskte yapışkan aşınmasına uygun bir sürtünme sergilemiştir. Bu durum da sürtünme kuvvetinin yüksek çıkmasına sebep olmuştur.

Cihaz Kontrol Etkinliği: Toplamda 23 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 10 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,71 seviyesinde, aynı basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,58 mertebesinde seyretmiştir. 7 bar basınç ve 50 km/h hızda yapılan 3 frenlemede sürtünme katsayısı 0,74 mertebesinde seyretmiştir. 14 bar basınç ve 50 km/h hızda sürtünme katsayısı 0,61 mertebesinden sıcaklığın artmasıyla azalarak, 16 bar basınç, 100 km/h hıza yükseldiğinde 0,53 mertebesine kadar gerilemiştir. Etkinlik müddetince disk ve balatanın sıcaklığı 97 °C'den 170 °C'ye kadar yükselmiştir.

Alıştırma Etkinliği: Toplamda 200 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 80 km/h hızda ve 8 bar basınçta yapılan 200 frenlemede sürtünme katsayısı 0,72'ler civarında seyretmiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 °C, her frenleme arasında 97 sn beklenilerek etkinlik tamamlanmıştır. Disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 116 °C civarında seyretmiştir.

Alıştırma Sonrası Etkinliği: Toplamda 16 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 12 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,69 seviyesinde, 14 bar basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,65 mertebesinde seyretmiştir. 16 bar basınç, 100 km/h hızda yapılan 6 frenlemede 0,54 seviyesinde seyretmiştir. Etkinlik müddetince disk ve balatanın sıcaklığı 97 °C ile 158 °C arasında seyretmiştir.

Sıcaklıkta Fren Zayıflaması Etkinliği: Toplamda 15 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 120 km/h hızda ve 10-14 bar basınç aralıklarında artan basınçla yapılan 15 frenlemede sürtünme katsayısı 0,72'ler civarında başlayıp sıcaklığın artmasıyla 0,59'lar civarına kadar gerilemiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 °C olup, disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 285 °C civarına kadar yükselmiştir.

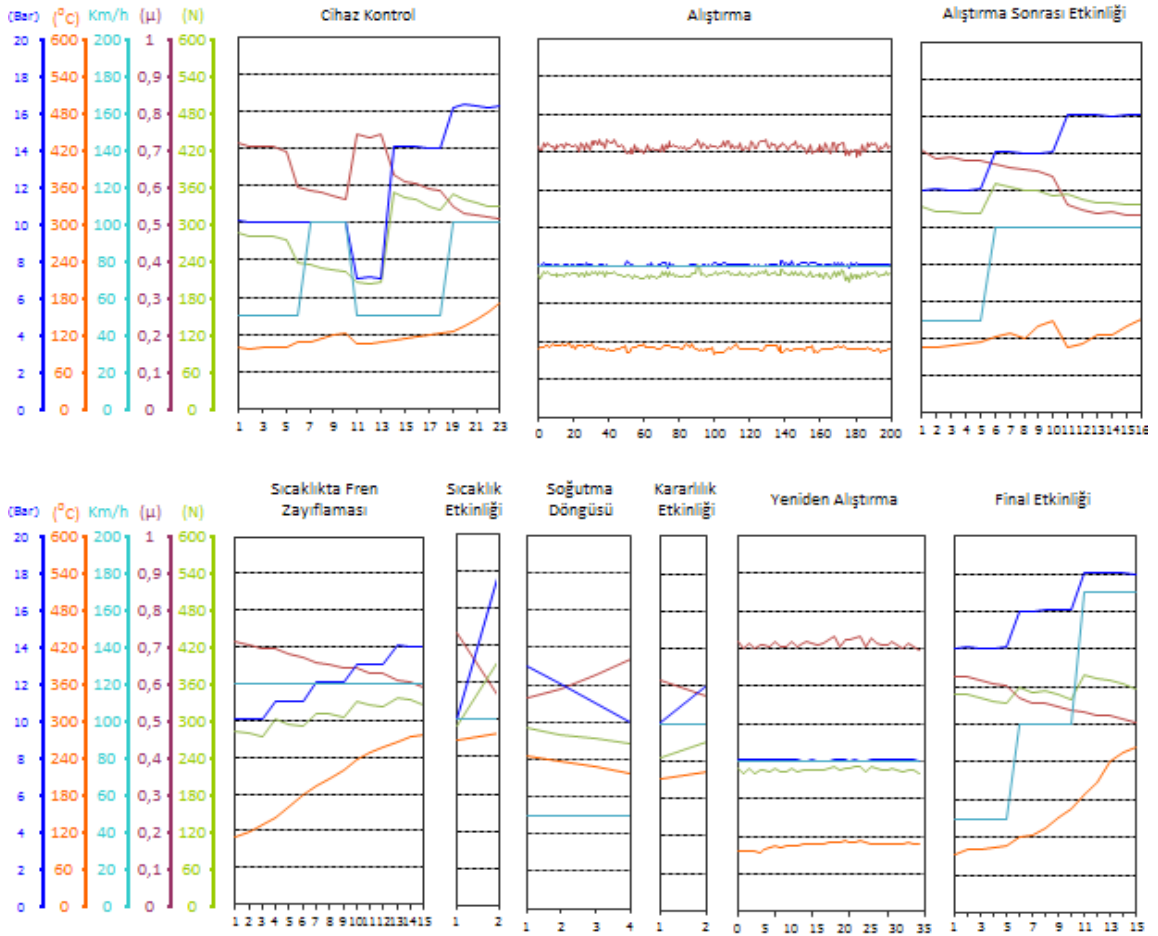
Sıcaklık Etkinliği: Toplamda 2 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 100 km/h hızda ve 10 bar basınçta 0,73 sürtünme katsayısı elde edilirken, aynı hızda 18 bar basınçta sürtünme katsayısı 0,56 gerçekleşmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı 240 °C-293 °C bandında seyretmiştir. Artan basınç ve yüksek sıcaklığın etkisi ile sürtünme katsayısında ani bir düşüş meydana gelmiştir.

Soğutma Döngüsü Etkinliği: Toplamda 4 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 13 bar'dan 10 bar'a azalan basınç aralığında sürtünme katsayısı 0,57 seviyesinden 0,67 seviyesine yükselmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı ise 246 °C'den 202 °C seviyelerine gerilemiştir.

Kararlılık Etkinliği: Toplamda 2 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 100 km/h hızda ve 12 bar basınçta 0,57 sürtünme katsayısı elde edilirken, aynı hızda 10 bar basınçta sürtünme katsayısı 0,62 gerçekleşmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı 185 °C-230 °C bandında seyretmiştir.

Yeniden Alıştırma Etkinliği: Toplamda 35 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 80 km/h hızda ve 8 bar basınçta yapılan 35 frenlemede sürtünme katsayısı 0,72'ler civarında seyretmiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 °C, her frenleme arasında 97 sn beklenilerek etkinlik tamamlanmıştır. Disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 116 °C civarında seyretmiştir.

Final Etkinliği: Toplamda 15 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 14 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,63 seviyesinde, 16 bar basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,55 mertebesinde seyretmiştir. 18 bar basınç, 160 km/h hızda yapılan 5 frenlemede 0,52 seviyesinde seyretmiştir. Etkinlik müddetince disk ve balatanın ara yüzey sıcaklığı 96 °C'den 274 °C'ye kadar yükselmiştir



Şekil 4.24 W₂C-%12Ni kaplanmış fren diskinin (D3 diski) SAE J2430 test standardına göre frenleme performansı grafiği.

Performans kriterlerine göre yapılan test sonuçlarına dayanılarak HVOF yöntemiyle W₂C-%12Ni seramik metal kompozit tozu kaplanmış fren diskinin (D3 diski) SAE J2430 test standardına göre çizilen Şekil 4.35’de gösterilen frenleme performansı grafiğinin cihaz kontrol etkinliği bölümünün ilk 5 frenlemesinde 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemelerde çalışmamızda test edilen disklerin en yüksek sürtünme katsayısını üretmiştir. Bunun sebebi kaplamalar arasında sertlik değeri en düşük kaplama olması olarak gösterilebilir. Ayrıca diskler arasında en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinden dolayı temas alanının daha büyük olması sürtünme katsayısının daha büyük olmasının bir diğer sebebidir. Sürtünmede en önemli faktör pürüzlerin etkileşmesidir. Buna göre sürtünme rijit yani deformasyona uğramayan pürüzlü noktaların teması sonucu meydana gelir (Halling 2000). İkinci defa yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemelerde artan

basınç ve hız değerleri ile sıcaklık değeri yükselmiş, sürtünme katsayısı değeri düşmüştür. Üçüncü olarak yapılan 3 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemede düşük basınç ve düşük hızda sürtünme katsayısı değeri artmış sıcaklık düşmüştür. Dördüncü olarak yapılan 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g ivmeden kademeli olarak yavaşlatılmıştır. Düşük hız ve yüksek basınçta sürtünme katsayısı nispeten düşmüş, sıcaklık artmıştır. Beşinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g ivmeden kademeli olarak yavaşlatılmıştır. Hızın ve basıncın artmasıyla sıcaklık yükselmesi OEM diskten daha düşük, sürtünme katsayısı ise daha yüksek meydana gelmiştir.

Alıştırma etkinliği bölümünde, 80 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan 200 frenlemede sıcaklık ve sürtünme katsayısı kararlı hale gelmiştir. Disk-balata ikilisi uyumlu bir ara yüzeye kavuşmuştur.

Alıştırma sonrası etkinliğinde, ilk 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli frenlemelerde basıncın artmasıyla sürtünme katsayısı düşmüş ancak sıcaklık kısmen yükselmeye devam etmiştir. İkinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde hızın ve basıncın artmasıyla sürtünme katsayısı daha da düşmüş sıcaklık fazla yükselmemiştir. Üçüncü olarak yapılan 6 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,65 g yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde nispeten düşük yavaşlama ivmesi sürtünme katsayısı değerinin kısmen düşmesine sebep olmuştur.

Sıcaklıkta fren zayıflaması etkinliğinde, yapılan 15 frenlemede 120 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde artan basınçla sıcaklık bir miktar yükselmiştir. Yükselen sıcaklığın etkisiyle sürtünme katsayısı diğer disklerle kıyaslandığında belirgin bir düşüş göstermemiştir.

Sıcaklık etkinliğinde, yapılan 2 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde sıcaklık ve basınç arttıkça sürtünme katsayısı düşmüştür.

Soğutma döngüsünde, yapılan 4 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde düşük hızlarda sıcaklık fazla düşmemiştir. Düşük hız ve sıcaklıkta sürtünme katsayısı da artış göstermiştir.

Kararlılık etkinliğinde, yapılan 2 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde kaplama 0,60 bandında sürtünme katsayısı sergilemiştir.

Yeniden alıştırma etkinliği bölümünde, 80 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan 35 frenlemede sıcaklık ve sürtünme katsayısı kararlı halini korumuştur. Disk-balata ikilisinin kararlı sürtünme katsayısı ürettiği tespit edilmiştir.

Final etkinliği bölümünde, ilk 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan hız ile sıcaklık yükselmiş ve sürtünme katsayısı düşmüştür. İkinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan basınç ve hızın etkisiyle sıcaklık yükselmiş ve sürtünme katsayısı düşmüştür. Son olarak yapılan 5 frenlemede 160 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan basınç ve maksimum hız sınırında sıcaklık yükselmiştir. Final etkinliği bölümünde bu faktörlere bağlı olarak sürtünme katsayısı 0,63 değerinden 0,52 seviyelerine kadar gerilemiştir.

HVOF yöntemiyle kaplama yapılırken NiAl intermetalik ara bağlayıcı kullanılması dökme demir disk ile kaplama tabakası arasında mekanik bağlanmayı temin ettiğinden ayrıca mikro difüzyon sebebiyle yoğun bir tabaka olduğundan sert bir kaplama elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü en düşük, sertliği en fazla olan bu disk en yüksek frenleme performansı göstermiştir.

4.7.4 Alev Püskürtme ve Ergitme Yöntemiyle NiCrBSi Tozu Kullanılarak Kaplanan Diskin Frenleme Performansı

Performans kriterlerine göre yapılan testlerden alınan verilere dayanılarak çizilen 4

no'lu diske ait grafik Şekil 4.25'de gösterilmiştir. NiCrBSi tozu ile kaplanmış diskin genel karakteristiği sürtünme katsayısının orijinal diske yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta sürtünme katsayısı fazla düşmedi. Sıcaklık geç arttı ve fazla yükselmemiştir.

Cihaz Kontrol Etkinliği: Toplamda 23 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 10 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,66 seviyesinde, aynı basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,57 mertebesinde seyretmiştir. 7 bar basınç ve 50 km/h hızda yapılan 3 frenlemede sürtünme katsayısı 0,72 mertebesinde seyretmiştir. 14 bar basınç ve 50 km/h hızda sürtünme katsayısı 0,63 mertebesinde sıcaklığın artmasıyla azalarak, 16 bar basınç, 100 km/h hıza yükseldiğinde 0,57 mertebesine kadar gerilemiştir. Etkinlik müddetince disk ve balatanın sıcaklığı 97 °C'den 133 °C'ye kadar yükselmiştir.

Alıştırma Etkinliği: Toplamda 200 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 80 km/h hızda ve 8 bar basınçta yapılan 200 frenlemede sürtünme katsayısı 0,67'ler civarında seyretmiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 °C, her frenleme arasında 97 sn beklenilerek etkinlik tamamlanmıştır. Disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 102 °C civarında seyretmiştir.

Alıştırma Sonrası Etkinliği: Toplamda 16 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 12 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,63 seviyesinde, 14 bar basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,54 mertebesinde seyretmiştir. 16 bar basınç, 100 km/h hızda yapılan 6 frenlemede 0,51 seviyesinde seyretmiştir. Etkinlik müddetince disk ve balatanın sıcaklığı 97 °C ile 167 °C arasında seyretmiştir.

Sıcaklıkta Fren Zayıflaması Etkinliği: Toplamda 15 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 120 km/h hızda ve 10-14 bar basınç aralıklarında artan basınçla yapılan 15 frenlemede sürtünme katsayısı 0,69'lar civarında başlayıp sıcaklığın artmasıyla 0,55'ler civarına kadar gerilemiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 °C olup,

disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 159 °C civarına kadar yükselmiştir.

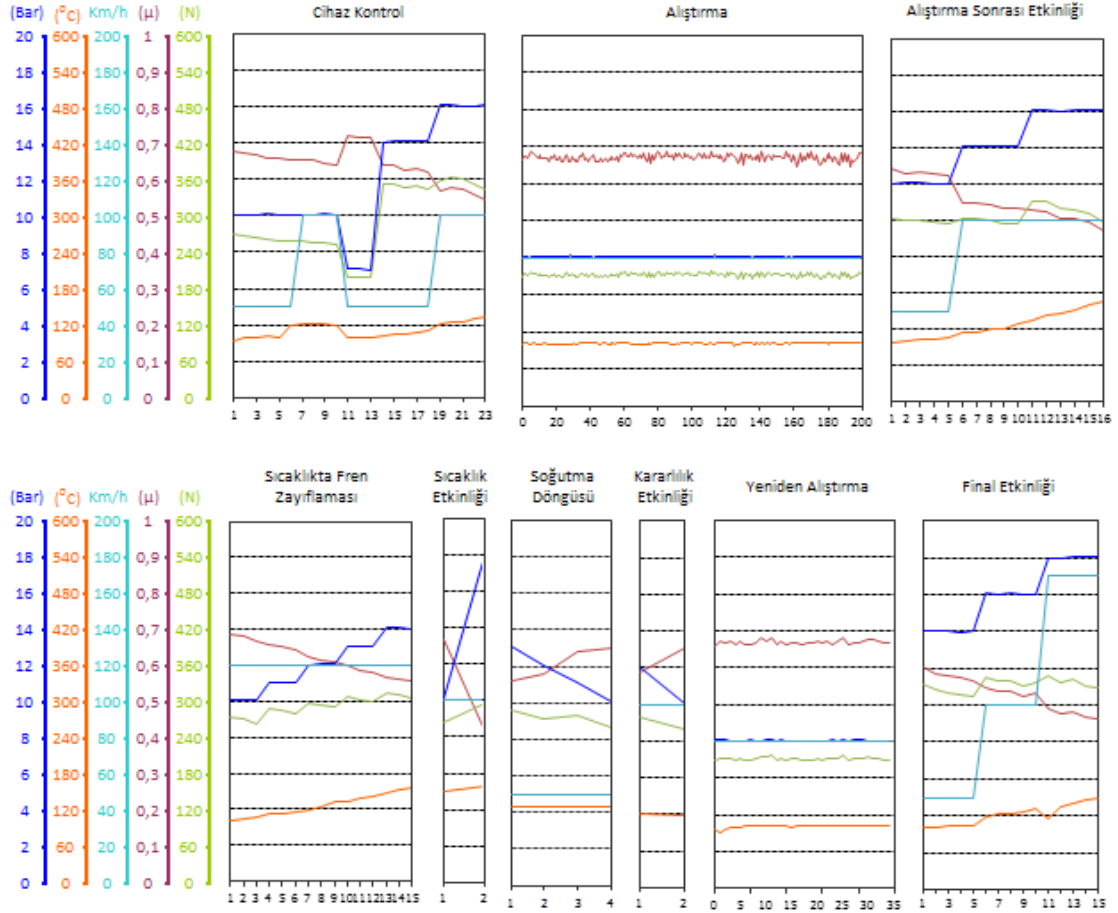
Sıcaklık Etkinliği: Toplamda 2 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 100 km/h hızda ve 10 bar basınçta 0,67 sürtünme katsayısı elde edilirken, aynı hızda 18 bar basınçta sürtünme katsayısı 0,42 gerçekleşmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı 146 °C-159 °C bandında seyretmiştir. Artan basınç ve yüksek sıcaklığın etkisi ile sürtünme katsayısında ani bir düşüş meydana gelmiştir.

Soğutma Döngüsü Etkinliği: Toplamda 4 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 13 bar'dan 10 bar'a azalan basınç aralığında sürtünme katsayısı 0,56 seviyesinden 0,65 seviyesine yükselmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı ise 130 °C'den 127 °C seviyelerine gerilemiştir.

Kararlılık Etkinliği: Toplamda 2 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 100 km/h hızda ve 12 bar basınçta 0,59 sürtünme katsayısı elde edilirken, aynı hızda 10 bar basınçta sürtünme katsayısı 0,65 gerçekleşmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı 117 °C-121 °C bandında seyretmiştir.

Yeniden Alistırma Etkinliği: Toplamda 35 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 80 km/h hızda ve 8 bar basınçta yapılan 35 frenlemede sürtünme katsayısı 0,67'ler civarında seyretmiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 °C, her frenleme arasında 97 sn beklenilerek etkinlik tamamlanmıştır. Disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 102 °C civarında seyretmiştir.

Final Etkinliği: Toplamda 15 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 14 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,58 seviyesinde, 16 bar basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,54 mertebesinde seyretmiştir. 18 bar basınç, 160 km/h hızda yapılan 5 frenlemede 0,48 seviyesine düşmüştür. Etkinlik müddetince disk ve balatanın sıcaklığı 97 °C'den 152 °C'ye kadar yükselmiştir.



Şekil 4.25 NiCrBSi kaplanmış fren diskinin (D4 diski) SAE J2430 test standardına göre frenleme performansı grafiği.

Performans kriterlerine göre yapılan test sonuçlarına dayanılarak alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi metal matrisli kompozit tozu kaplanmış fren diskinin (D4 diski) SAE J2430 test standardına göre çizilen Şekil 4.36’de gösterilen frenleme performansı grafiğinin cihaz kontrol etkinliği bölümünün ilk 5 frenlemesinde 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemelerde dökme demir diske en yakın performansı sergilemiştir. Bunun sebebi kaplamalar arasında metalik kaplama olan bu diskin faz yapısı ve morfolojisinin sert fazlar içermemesindedir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri OEM diskin yarısı kadar olması sürtünme katsayısı değerinin daha yüksek çıkmasına sebep olmuştur. İkinci defa yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemelerde artan basınç ve hız değerleri ile sıcaklık değerleri yükselmiş, sürtünme katsayısı değeri düşmüştür. Üçüncü olarak yapılan 3 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemede düşük basınç

ve düşük hızda sürtünme katsayısı değeri artmış sıcaklık düşmüştür. Dördüncü olarak yapılan 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g ivmeden kademeli olarak yavaşlatılmıştır. Düşük hızda yüksek basınçta sürtünme katsayısı nispeten düşmüş sıcaklık artmıştır. Beşinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g ivmeden kademeli olarak yavaşlatılmıştır. Hızın ve basıncın artmasıyla sıcaklık yükselmesi OEM diskten daha düşük, sürtünme katsayısı ise daha yüksek meydana gelmiştir. Ni esaslı kaplamaların ısı iletim katsayısının yüksek olmasından dolayı bu diskin sıcaklığı en düşük gerçekleşmiştir.

Alıştırma etkinliği bölümünde, 80 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan 200 frenlemede sıcaklık ve sürtünme katsayısı kararlı hale gelmiştir. Disk-balata ikilisi uyumlu bir ara yüzeye kavuşmuştur.

Alıştırma sonrası etkinliğinde, ilk 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde basıncın artmasıyla sürtünme katsayısı düşmüş ancak sıcaklık kısmen yükselmeye devam etmiştir. İkinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde hızın ve basıncın artmasıyla sürtünme katsayısı daha da düşmüş sıcaklık fazla yükselmemiştir. Üçüncü olarak yapılan 6 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,65 g yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde nispeten düşük yavaşlama ivmesi sürtünme katsayısı değeri daha da düşmüştür.

Sıcaklıkta fren zayıflaması etkinliğinde, yapılan 15 frenlemede 120 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde artan basınçla sıcaklık bir miktar yükselmiştir. Yükselen sıcaklığın etkisiyle sürtünme katsayısı diğer disklerle kıyaslandığında belirgin bir düşüş göstermiştir.

Sıcaklık etkinliğinde, yapılan 2 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde sıcaklık ve basınç arttıkça sürtünme katsayısı düşmüştür.

Soğutma döngüsünde, yapılan 4 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g

yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde düşük hızlarda sıcaklık fazla düşmemiştir. Düşük hız ve sıcaklıkta sürtünme katsayısı da artış göstermiştir.

Kararlılık etkinliğinde, yapılan 2 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde kaplama 0,62 bandında sürtünme katsayısı sergilemiştir.

Yeniden alıştırma etkinliği bölümünde, 80 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan 35 frenlemede sıcaklık ve sürtünme katsayısı değerlerindeki kararlı halini korumuştur. Disk-balata ikilisinin kararlı sürtünme katsayısı ürettiği tespit edilmiştir.

Final etkinliği bölümünde, ilk 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan hız ile sıcaklık yükselmiş ve sürtünme katsayısı düşmüştür. İkinci olarak yapılan 5 frenlemesinde 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan basınç ve hızın etkisiyle sıcaklık yükselmiş ve sürtünme katsayısı düşmüştür. Son olarak yapılan 5 frenlemede 160 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan basınç ve maksimum hız sınırında sıcaklık yükselmiştir. Final etkinliği bölümünde bu faktörlere bağlı olarak sürtünme katsayısı 0,58 değerinden 0,48 seviyelerine kadar gerilemiştir.

NiCrBSi kaplamalarda yükün artmasıyla sürtünme katsayısı düşmektedir (Guo at el. 2011). Kayma hızı arttığı zaman aşınma miktarı da artmaktadır (Peng 2013). Yüzey pürüzlülüğü dökme demir diskten düşük sertlik değeri yaklaşık 2.5 katı olmasına rağmen sürtünme katsayısı değeri hemen hemen aynı seviyelerde gerçekleşmiştir.

4.7.5 Orijinal Diskin Frenleme Performansı

Performans kriterlerine göre yapılan testlerden alınan verilere dayanılarak çizilen 5 no'lu diske ait grafik Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Kaplanmamış orijinal disk ve sürtünme ikilisi olarak tercih edilen balatanın kullanıcıların daha çok tercih ettiği kısa

duruş mesafesi için yüksek sürtünme katsayısı performansını sağlayan ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan malzemelerden olması testlerimizde genel olarak sürtünme katsayısı değerlerinin yüksek çıkmasına sebep olmuştur. Testlerde kullanılan balataların materyal metod bölümünde Tablo 3.4’de verilen farklı ticari firmalarda yapılan sürtünme katsayısı değerleri de bu durumu izah etmektedir.

Cihaz Kontrol Etkinliği: Toplamda 23 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 10 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,67 seviyesinde, aynı basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,64 mertebesinde seyretmiştir. 7 bar basınç ve 50 km/h hızda yapılan 3 frenlemede sürtünme katsayısı 0,70 mertebesinde seyretmiştir. 14 bar basınç ve 50 km/h hızda sürtünme katsayısı 0,65 mertebesinde sıcaklığın artmasıyla azalarak, 16 bar basınç, 100 km/h hıza yükseldiğinde 0,56 mertebesine kadar gerilemiştir. Etkinlik müddetince disk ve balatanın sıcaklığı 97 °C’den 148 °C’ye kadar yükselmiştir.

Alıştırma Etkinliği: Toplamda 200 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 80 km/h hızda ve 8 bar basınçta yapılan 200 frenlemede sürtünme katsayısı 0,68’ler civarında seyretmiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 °C, her frenleme arasında 97 sn beklenilerek etkinlik tamamlanmıştır. Disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 108 °C civarında seyretmiştir.

Alıştırma Sonrası Etkinliği: Toplamda 16 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 12 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,62 seviyesinde, 14 bar basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,57 mertebesinde seyretmiştir. 16 bar basınç, 100 km/h hızda yapılan 6 frenlemede 0,51 seviyesine gerilemiştir. Etkinlik müddetince disk ve balatanın sıcaklığı 97 °C ile 150 °C arasında seyretmiştir.

Sıcaklıkta Fren Zayıflaması Etkinliği: Toplamda 15 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 120 km/h hızda ve 10-14 bar basınç aralıklarında artan basınçla yapılan 15 frenlemede sürtünme katsayısı 0,66’lar civarında başlayıp sıcaklığın artmasıyla 0,59’lar civarına kadar gerilemiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 °C olup,

disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 302 °C civarına kadar yükselmiştir.

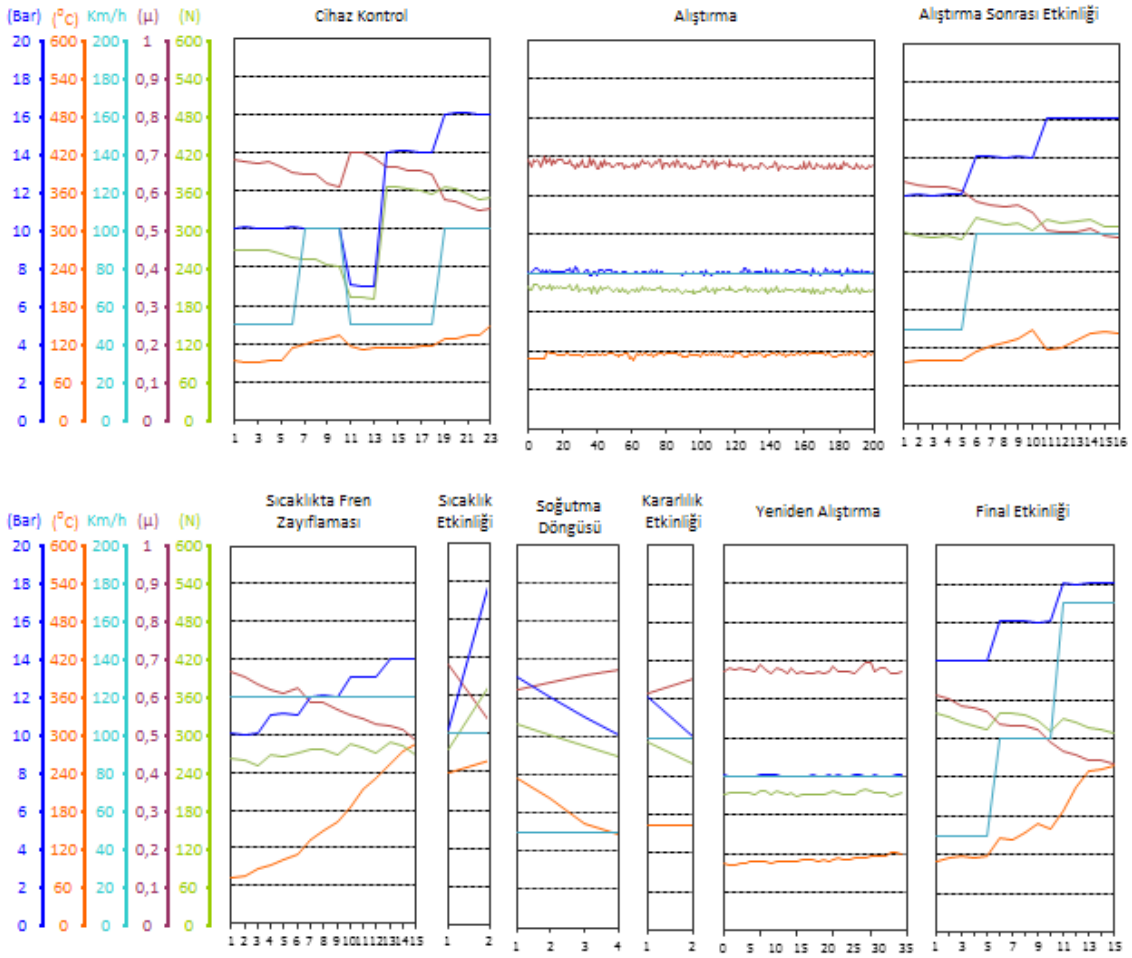
Sıcaklık Etkinliği: Toplamda 2 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 100 km/h hızda ve 10 bar basınçta 0,68 sürtünme katsayısı elde edilirken, aynı hızda 18 bar basınçta sürtünme katsayısı 0,53 gerçekleşmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı 205 °C-287 °C bandında seyretmiştir. Artan basınç ve yüksek sıcaklığın etkisi ile sürtünme katsayısında ani bir düşüş meydana gelmiştir.

Soğutma Döngüsü Etkinliği: Toplamda 4 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 13 bar'dan - 10 bar'a azalan basınç aralığında sürtünme katsayısı 0,62 seviyesinden 0,67 seviyesine yükselmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı ise 245 °C'den 144 °C seviyelerine gerilemiştir.

Kararlılık Etkinliği: Toplamda 2 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 100 km/h hızda ve 12 bar basınçta 0,61 sürtünme katsayısı elde edilirken, aynı hızda 10 bar basınçta sürtünme katsayısı 0,65 gerçekleşmiştir. Disk ve balatanın sıcaklığı 147 °C-171 °C bandında seyretmiştir.

Yeniden Alıştırma Etkinliği: Toplamda 35 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 80 km/h hızda ve 8 bar basınçta yapılan 35 frenlemede sürtünme katsayısı 0,68'ler civarında seyretmiştir. Döngü başlangıç sıcaklığı 97 °C, her frenleme arasında 97 sn beklenilerek etkinlik tamamlanmıştır. Disk ve balatanın ortalama sıcaklığı etkinlik müddetince maksimum 108 °C civarında seyretmiştir.

Final Etkinliği: Toplamda 15 frenleme döngüsünden oluşan bu etkinlik bölümünde; 50 km/h hızda ve 14 bar basınçta yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,61 seviyesinde, 16 bar basınçta 100 km/h hızda yapılan 5 frenlemede sürtünme katsayısı 0,54 mertebesinde seyretmiştir. 18 bar basınç, 160 km/h hızda yapılan 5 frenlemede 0,43 seviyesinde seyretmiştir. Etkinlik müddetince disk ve balatanın sıcaklığı 97 °C'den 274 °C'ye kadar yükselmiştir.



Şekil 4.26 Orijinal fren diskinin (D5 diski) SAE J2430 test standardına göre frenleme performansı grafiği.

Performans kriterlerine göre yapılan test sonuçlarına dayanılarak kaplanmamış fren diskinin (D5 diski) SAE J2430 test standardına göre çizilen Şekil 4.26’da gösterilen frenleme performansı grafiğinin cihaz kontrol etkinliği bölümünün ilk 5 frenlemesinde 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemelerde dökme demir disk Cr_2O_3 -%40 TiO_2 ve NiCrBSi-% W_2C kaplanmış disklerden yüksek sürtünme katsayısı üretmiş, NiCrBSi kaplama ile hemen hemen aynı ve W_2C -%12Ni kaplamadan daha düşük sürtünme katsayısı üretmiştir. OEM diskin yüzey pürüzlülük ve sertlik değerleri literatür sınırları içerisinde gerçekleşmiştir. İkinci defa yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemelerde artan basınç ve hız değerleri ile sıcaklık değerleri yükselmiş, sürtünme katsayısı değeri düşmüştür. Üçüncü olarak yapılan 3 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g ivmeyle yapılan frenlemede

düşük basınç ve düşük hızda sürtünme katsayısı değeri artmış sıcaklık düşmüştür. Dördüncü olarak yapılan 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g ivmeden kademeli olarak yavaşlatılmıştır. Düşük hızda yüksek basınçta sürtünme katsayısı nispeten düşmüş sıcaklık artmıştır. Beşinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g ivmeden kademeli olarak yavaşlatılmıştır. Hızın ve basıncın artmasıyla sıcaklık yükselmiş sürtünme katsayısı düşmüştür.

Alıştırma etkinliği bölümünde, 80 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan 200 frenlemede sıcaklık ve sürtünme katsayısı kararlı hale gelmiştir. Disk-balata ikilisi uyumlu bir ara yüzeye kavuşmuştur.

Alıştırma sonrası etkinliğinde, ilk 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde basıncın artmasıyla sürtünme katsayısı düşmüş ancak sıcaklık kısmen yükselmeye devam etmiştir. İkinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde hızın ve basıncın artmasıyla sürtünme katsayısı daha da düşmüş sıcaklık fazla yükselmemiştir. Üçüncü olarak yapılan 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,65 g yavaşlama ivmesiyle yapılan 6 frenlemede nispeten düşük yavaşlama ivmesi sürtünme katsayısı değerini daha da düşürmüştür.

Sıcaklıkta fren zayıflaması etkinliğinde, yapılan 15 frenlemede 120 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde artan basınçla sıcaklık bir miktar yükselmiştir. Yükselen sıcaklığın etkisiyle sürtünme katsayısı diğer disklerle kıyaslandığında belirgin bir düşüş göstermiştir.

Sıcaklık etkinliğinde, yapılan 2 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde sıcaklık ve basınç arttıkça sürtünme katsayısı düşmüştür.

Soğutma döngüsünde, yapılan 4 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan frenlemelerde düşük hızlarda sıcaklık belirgin derecede düşmüştür. Düşük hız ve sıcaklıkta sürtünme katsayısı da artış göstermiştir.

Kararlılık etkinliğinde, yapılan 2 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde kaplama 0,62 bandında sürtünme katsayısı sergilemiştir.

Yeniden alıştırma etkinliği bölümünde, 80 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,3 g yavaşlama ivmesiyle yapılan 35 frenlemede sıcaklık ve sürtünme katsayısı değerleri kararlılık göstermiştir. Disk-balata ikilisinin kararlı sürtünme katsayısı ürettiği tespit edilmiştir.

Final etkinliği bölümünde, ilk 5 frenlemede 50 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan hız ile sıcaklık yükselmiş ve sürtünme katsayısı düşmüştür. İkinci olarak yapılan 5 frenlemede 100 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan basınç ve hızın etkisiyle sıcaklık yükselmiş ve sürtünme katsayısı düşmüştür. Son olarak yapılan 5 frenlemede 160 km/h hızdan 3 km/h hıza 0,8 g yavaşlama ivmesinden kademeli olarak yapılan frenlemelerde artan basınç ve maksimum hız sınırında sıcaklık yükselmiştir. Final etkinliği bölümünde bu faktörlere bağlı olarak sürtünme katsayısı 0,61 değerinden 0,43 seviyelerine kadar gerilemiştir.

OEM disk seçilen ticari balata ile SAE J2430 test prosedürü kriterlerine göre yüksek sürtünme katsayısı sergilemiş olmasından dolayı kaplamalı tüm disklerden daha fazla aşınma göstermiştir. Bir disk malzemesi için yalnızca yüksek sürtünme katsayısı üretmesi yeterli bir özellik değildir. Aynı zamanda yıpranmadan uzun ömürlü olmasında aranan özelliklerindedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada disk-balata çiftinin hem sürtünme hem de termo-mekanik davranışını iyileştirerek frenleme performansını artırmak için 5 adet hava kanallı otomobil ön fren diskinden birisi orijinal haliyle dört tanesi yüzey kaplaması yapılarak kullanılmıştır. Bu disklere, Cr_2O_3 -%40 TiO_2 seramik tozu plazma püskürtme kaplama yöntemi, NiCrBSi-35 W_2C ve NiCrBSi kompozit toz alevle püskürtme ve ergitme kaplama yöntemi, W_2C -%12Ni tozu yüksek hızlı oksijen yakıtlı püskürtme (HVOF) kaplama yöntemi kullanılarak yüzey kaplaması yapılmıştır. Sonuçlara dayalı istatistiki performans değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıya çıkarılmıştır.

Tablo 5.1 Deneysel çalışmalarda elde edilen performans değerleri.

Kullanılan disklerin tribolojik özellikleri	Plazma püskürtme Cr_2O_3 -%40 TiO_2	Alev püskürtme NiCrBSi-%35 W_2C	HVOF püskürtme W_2C -%12Ni	Alev püskürtme NiCrBSi	Orijinal disk
Disklin başlangıç yüzey pürüzlülüğü (μm)	0,909	0,237	0,126	0,146	1,515
Disklin bitiş yüzey pürüzlülüğü (μm)	0,301	0,189	0,102	0,229	0,486
Balatanın başlangıç yüzey pürüzlülüğü (μm)	2,068	2,044	2,036	2,019	2,071
Balatanın bitiş yüzey pürüzlülüğü (μm)	1,710	1,875	1,740	1,976	1,942
Disklin sertliği (HV500)	842	998	667	705	237
Disklerin ağırlık kaybı (gr)	0,53	0,47	0,63	4,3	4,5
Balataların ağırlık kaybı (gr)	9,852	8,455	4,331	4,821	10,711
Disklerin kalınlık kaybı (mm)	0,002	0,009	0,005	0,023	0,49
Balataların kalınlık kaybı (mm)	6,123	5,261	2,658	5,158	7,534
Diskte oluşan en yüksek sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	340	255	293	166	297
Cihaz kontrol sürtünme katsayısı (μ)	0,52	0,55	0,62	0,64	0,52
Alıştırma sürtünme katsayısı (μ)	0,59	0,56	0,71	0,67	0,68
Alıştırma sonrası etkinliği sürtünme katsayısı (μ)	0,49	0,48	0,62	0,55	0,56
Sıcaklıkta fren zayıflaması sürtünme katsayısı (μ)	0,56	0,52	0,65	0,62	0,58
Sıcaklık etkinliği sürtünme katsayısı (μ)	0,52	0,55	0,65	0,54	0,61
Soğuk etkinlik sürtünme katsayısı (μ)	0,63	0,57	0,61	0,61	0,65
Kararlılık etkinliği sürtünme katsayısı (μ)	0,57	0,56	0,60	0,62	0,63
Yeniden alıştırma sürtünme katsayısı (μ)	0,59	0,55	0,71	0,67	0,68
Final etkinliği sürtünme katsayısı (μ)	0,54	0,47	0,56	0,53	0,52

Frenleme performans testleri SAE J2430 standardı kriterlerine göre 16 parametre, toplam 312 frenleme döngüsü ve yaklaşık 14 saat sürede yapısal bütünlük içinde frenleme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Uygulanan kuvvet, basınç ve hızlara göre oluşan sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerine ait grafikler standart kriterlerine göre geliştirilen bilgisayar programı yardımıyla çizilerek performans değerlendirmesi yapılmıştır.

Disklerin performans özelliklerini tayin edebilmek için testler öncesinde ve sonrasında bir dizi deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu deneylerle mikroyapı incelemeleri, disk ve balatalardaki ağırlık, kalınlık kaybı oranları, yüzey pürüzlülük değerleri, sertlik değerleri, yanal salgıları, balatalardaki yoğunluk değerleri ile frenleme testlerinde oluşan sıcaklık ve sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir.

5.1 Sonuçlar

1. Disklere, plazma püskürtme kaplama yöntemi ile Cr_2O_3 -%40 TiO_2 seramik tozu, alevle püskürtme ve ergitme kaplama yöntemi ile NiCrBSi-%35 W_2C ve NiCrBSi kompozit tozları, yüksek hızlı oksijen yakıtlı püskürtme (HVOF) kaplama yöntemi ile W_2C -%12Ni tozu kullanılarak yapılan dört kaplamada da dökme demir disklerle mükemmel birer bağ oluşturduğu mikroyapı incelemeleri ile tespit edilmiştir. Üretilen yüzey kaplamalarının kusursuz olmasında seçilen kaplama yöntemleri, uygun tozların seçilmesi en önemli etken olmuştur. Kaplamaların istenilen özellikte olması kaplanacak yüzeylerin literatürde belirlenen esaslara uyularak hazırlanması ve uygun kaplama parametrelerinin seçilmesi ile sağlanmıştır.
2. Kaplamaların dökme demir disk malzemesine iyi uyum sağladığı, bağlanmaların fiziksel, mekanik veya mikro difüzyonla kimyasal bağ oluşturarak meydana geldiği mikroyapı analizleri ile tespit edilmiştir. Kaplamalarda porozite, inklüzyon, mikro çatlak gibi düzensizliklerin literatür sınırlarının altında olduğu yine mikroyapı incelemeleri ile tespit edilmiştir.
3. Alevle püskürtme ve ergitme yöntemiyle kaplanan NiCrBSi-%35 W_2C ve NiCrBSi tozlarının soğuk yüzeye püskürtülmesi ile oluşan fiziksel bağlanmanın difüzyon

yoluyla daha kuvvetli kimyasal bağlanmayla desteklenmesi için 1100 °C civarında yeniden ergitilmesiyle, plazma püskürtme ile kaplanan Cr_2O_3 -%40 TiO_2 tozunun NiAl intermetalik ara bağlayıcı kullanılarak kuvvetli fiziksel bağ oluşturmasıyla, HVOF yöntemiyle kaplanan W_2C -%12Ni tozunun NiCr ara bağlayıcı kullanılarak kaplanmasıyla mükemmel bağ oluşturulması desteklenmiştir. Nikel'in yüksek ısı iletme özelliği dökme demir ve kaplamalar arasındaki termal uyumu sağlamıştır.

4. Frenleme testleri öncesi ve sonrasında yapılan yüzey pürüzlülük ölçümlerinde kaplanmamış dökme demir diskin pürüzlülük değeri literatür sınırları içerisinde gerçekleşmiştir. Kaplanmış diskler içerisinde Cr_2O_3 -%40 TiO_2 tozu ile kaplanmış olan diskin pürüzlülük değeri diğerlerinden yüksek, OEM diskten düşük çıkmıştır. Plazma püskürtme yöntemiyle kaplanan Cr_2O_3 -%40 TiO_2 tozunun pürüzlülük değerinin diğer kaplamalardan yüksek olmasının soğuk yüzeye püskürtülen seramik tozun fiziksel bağ ile bağlanması ve %1-2 porozite içermesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülük değeri HVOF yöntemiyle W_2C -%12Ni tozu ile kaplanan diskte meydana gelmiştir. Yüzey pürüzlülük değeri sürtünme ara yüzeylerinde temas alanı etkileşimini doğrudan ilgilendirdiği için en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip bu diskin en yüksek temas alanı üretmesinden dolayı en büyük sürtünme katsayısı değeri bu diskte elde edilmiştir. Balatalardaki yüzey pürüzlülükleri ortalama olarak eşit değerlerde meydana gelmiştir.
5. OEM ve kaplanmış disk yüzeylerinden ölçülen mikro sertlik değerlerinde alevle püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi-%35 W_2C tozu ile kaplanan diskte en yüksek çıkmıştır. Bu durum Nikel matrisli kaplama tozunun yeniden ergitilmesi esnasında W_2C kaplama tabakası içerisinde çökmesi ile daha mukavim kaplama oluşturulmasına bağlanmıştır. En yüksek sertliği üretmesi beklenen Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplamanın düşük sertlik göstermesi kaplama içerisinde var olan %1-2 oranındaki porozite gibi homojensizliklerden kaynaklandığı düşünülmüştür. Bütün kaplamaların mikro sertlikleri OEM diskten en az 2,5 kat daha yüksek çıkmıştır. Kaplamalar arasında en düşük mikro sertlik değeri HVOF yöntemiyle W_2C -%12Ni tozu ile kaplanan diskte meydana gelmiştir. Bu kaplamanın sertlik değerinin düşük olması kaplama parametrelerinden ve saf Nikel'in yapıda süneklik oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

6. Disklerin ağırlık aşınması ölçümlerinde tüm kaplamaların sert kaplama olmasından dolayı aşınma oranı OEM diskten daha düşük gerçekleşmiştir. Kaplamalar arasında en yüksek aşınma oranını alevle püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi tozu ile kaplanan diskte meydana gelmiştir. En düşük aşınma oranı ise alevle püskürtme ve ergitme yöntemiyle NiCrBSi-%35W₂C tozu ile kaplanan diskte meydana gelmiştir. OEM disk ve NiCrBSi kaplanan diskin metalik esaslı olması diğer disklere göre aşınma miktarının yüksek olmasına sebep olmuştur.
7. En yüksek balata ağırlık aşınması OEM diske ait balatada meydana gelmiştir. İkinci olarak sert oksit fazları içeren Cr₂O₃-%40TiO₂ ile kaplanan diske ait balatada meydana gelmiştir. En düşük balata ağırlık aşınması W₂C-%12Ni tozu ile kaplanan diskin aşınmasıyla uyumlu olarak bu diske ait balatada meydana gelmiştir.
8. Disklerin kalınlık aşınması oranlarında OEM diskin kalınlık aşınması ağırlık aşınmasıyla uyumlu olarak en yüksek çıkmıştır. En düşük kalınlık aşınması oranı Cr₂O₃-%40TiO₂ ile kaplanan diskte meydana gelmiştir.
9. Kullanılan balataların farklı firmalarda yapılan test sonuçlarına göre sürtünme katsayısı değerleri yüksek çıkmıştır. Buda ölçüle yoğunluk değerlerine göre balataların yüksek yoğunluklu olmalarından kaynaklanmıştır.
10. Balatalardaki kalınlık aşınması ağırlık aşınması ile orantılı olarak gerçekleşmiştir.
11. Frenleme testleri sırasında ölçülen sıcaklık değerlerine göre Cr₂O₃-%40TiO₂ ile kaplanan disk-balata ara yüzeyinin sıcaklığı bu seramik kaplamanın ısı iletim katsayısının diğer disklerden daha düşük olmasından dolayı en yüksek değerlerde çıkmıştır. NiCrBSi ile yapılan kaplama Nikel'in yüksek ısı iletim katsayısından dolayı disk-balata ara yüzeyinde en düşük sıcaklığı üretmiştir. NiCrBSi-%35W₂C kaplamalı disk ve W₂C-%12Ni kaplamalı disk ile OEM diskin sıcaklık değerleri birbirine yakın değerlerde meydana gelmiştir. NiCrBSi-%35W₂C tozu ile kaplanan disk termal bariyer özelliği göstermiştir. Ancak disk-balata ara yüzey sıcaklığı Nikel'in yüksek ısı iletiminden dolayı fazla yükselmemiştir.

- 12.** Cihaz kontrol etkinliğinde en yüksek sürtünme katsayısı değeri NiCrBSi kaplamalı diskte ölçülmüştür. Bunun nedeninin metalik kaplama olan disk yüzey faz yapısı ve morfolojisinin sert fazlar içermemesi olarak kabul edilmiştir. Daha sert faz yapısına sahip olan Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplamalı diskte en düşük sürtünme katsayısı değeri ölçülmüştür.
- 13.** Alıştırma etkinliğinde kaplamalar arasında en düşük sertlik ve yüzey pürüzlülük değerine sahip olmasından dolayı W_2C -%12Ni kaplamalı diskte en yüksek sürtünme katsayısı değeri ölçülmüştür. En yüksek sertlik değerine sahip olmasından ve sert karbür fazları içermesinden dolayı NiCrBSi-%35 W_2C kaplamalı diskte en düşük sürtünme katsayısı değeri ölçülmüştür.
- 14.** Alıştırma sonrası etkinliğinde en yüksek sürtünme katsayısı değeri W_2C -%12Ni kaplamalı diskte ölçülmüştür. En düşük sürtünme katsayısı değeri NiCrBSi-%35 W_2C kaplamalı diskte ölçülmüştür.
- 15.** Sıcaklıkta fren zayıflaması etkinliğinde artan sıcaklık ve basınçla azalmasına rağmen en yüksek sürtünme katsayısı değeri yine W_2C -%12Ni kaplamalı diskte ölçülmüştür. En düşük sürtünme katsayısı değerini faz yapısından ve kaplama parametrelerinden dolayı NiCrBSi-%35 W_2C kaplamalı disk üretmiştir.
- 16.** Sıcaklık etkinliğinde en yüksek sürtünme katsayısı değeri W_2C -%12Ni kaplamalı diskte ölçülmüştür. En yüksek sıcaklık değerine ulaşmasına rağmen sert oksit tabakalarından dolayı en düşük sürtünme katsayısı değeri Cr_2O_3 -%40 TiO_2 kaplamalı diskte ölçülmüştür.
- 17.** Soğuk etkinliğinde daha kararlı davranmasından dolayı OEM diskte en yüksek sürtünme katsayısı değeri ölçülmüştür. En düşük sürtünme katsayısı değeri NiCrBSi-%35 W_2C kaplamalı diskte ölçülmüştür.
- 18.** Kararlılık etkinliğinde sabit hız ve azalan basınçta en yüksek sürtünme katsayısı değeri OEM diskte ölçülmüştür. En düşük sürtünme katsayısı değeri NiCrBSi-

%35W₂C kaplamalı diskte ölçülmüştür.

19. Yeniden alıştırma etkinliğinde 12. maddede belirtilen nedenlere bağlı olarak en yüksek sürtünme katsayısı değeri W₂C-%12Ni kaplamalı diskte ölçülmüştür. En düşük sürtünme katsayısı değeri NiCrBSi-%35W₂C kaplamalı diskte ölçülmüştür.
20. Final etkinliğinde kaplama esnasında Nikel'in sert karbür fazları arasına çökmesiyle daha kararlı bir yapı elde edilmesinden dolayı en yüksek sürtünme katsayısı değeri W₂C-%12Ni kaplamalı diskte ölçülmüştür. Artan hız hassasiyeti ve yükselen basınçta ve 0,8 g yavaşlama ivmesinde en iyi kararlılığı W₂C-%12Ni kaplamalı disk göstermiştir. Kaplama parametrelerine bağlı olarak metalik fazın daha yoğun olması nedeniyle en düşük sürtünme katsayısı değeri NiCrBSi-%35W₂C kaplamalı diskte ölçülmüştür.
21. Birbirine yakın sürtünme katsayısı değerleri gösteren OEM disk ve NiCrBSi kaplamalı diskin aşınma oranları diğer üç diskten belirgin derecede fazla meydana gelmiştir. Bu durumun OEM disk ve NiCrBSi kaplamanın sert fazlar içermeyen metalik esaslı yüzey yapılarına sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.
22. İçerdiği sert karbür fazlarından dolayı en yüksek sertliği üreten NiCrBSi-%35W₂C kaplamalı diskin en düşük sürtünme katsayısı üretmesine paralel olarak aşınma oranı da en düşük değerde kalmıştır.
23. İkinci derecede düşük sürtünme katsayısı üreten Cr₂O₃-%40TiO₂ kaplamalı diskte aşınma oranı en yüksek sürtünme katsayısı üreten W₂C-%12Ni tozu ile kaplanan diskten daha düşük çıkmıştır. Bu durum oksit esaslı kaplamanın yüzey sertliğinin W₂C-%12Ni tozu ile kaplanan diskten daha yüksek olmasından kaynaklanmıştır.
24. En yüksek frenleme performansı, en yüksek sürtünme katsayısı üreterek daha kısa mesafede durmayı sağlayan, buna ilave olarak az aşınma yıpranması gösteren termal olarak ta ısı iletimi OEM diskten daha iyi olan HVOF yöntemiyle W₂C-%12Ni tozu ile kaplanan diskte meydana gelmiştir.

5.2 Öneriler

Bu çalışmanın devamı olarak;

1. Otomobillerde kullanılan dökme demir disk üzerine yapılan kaplamaların metalurjik özellikleri üzerine araştırma yapılabilir.
2. Kaplamalı disklerin tamamının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve aşınma değerleri literatür değerleri içinde olduğundan ticari alanda kullanılabilirliği araştırılabilir.
3. Kaplama tozlarının hepsi tek bir kaplama yöntemiyle kaplanarak performans değerlendirmesi yapılabilir.
4. Bir tek kaplama tozu farklı kaplama yöntemleri ve parametreleri ile kaplanarak frenleme performansı testleri yapılabilir.
5. Kaplama tozlarının herbirisinin kimyasal kompozisyonu değiştirilerek yapılan kaplamalarla frenleme performansı testleri tekrar yapılabilir.
6. Her bir kaplama disk ile farklı kompozisyonlarda üretilen balatalar ayrı ayrı performans değerlendirmesine tabi tutularak kaplamalı diskin kendisine mekanik ve metalurjik olarak daha uyumlu balatalar üretilebilir.
7. Aynı kaplama toz ve yöntemleri kullanılarak bu çalışmaya ilave olarak gürültü, korozyon, ısı iletkenlik ve yorulma dayanımı testleri yapılarak kaplamaların özellikleri geliştirilebilir.
8. Disk ve balata malzemeleri farklı deney parametrelerinde ve farklı çalışma ortamlarında (suda, yağda, vakum altında) testlere tabi tutulabilir.
9. Bu çalışmada kullanılan disklerin benzerleri gerçek araç ve yol üzerinde de performans testlerine tabi tutulabilir.

6. KAYNAKLAR

- Agudelo, C.E., Ferro, E. (2005). Technical overview of brake performance testing for original equipment and aftermarket industries in the US and Europe markets, Link Technical Report FEV 2005-01.
- A Product Line Group of Motor-Equipment Manufacturers Association, (2002). Aftermarket friction product effectiveness characterization guide.
- Anderson, A.E. (1992). Friction and wear of automotive brakes, in: ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM International, Materials Park, OH, **18**: 569-577.
- Anık, S. (1983), Kaynak Teknolojisi El Kitabı. Ergör Matbaası, İstanbul.
- Anık, S., Anık, E.S., Vural, M. (1993). 1000 soruda kaynak teknolojisi el kitabı. Cilt 1, Birsen Yayınevi, 270-290, İstanbul.
- Ashby, M., Jones, R. H. D. (1996). Friction and Wear Engineering Materials. Cambridge University, England.
- Bergmann, F., Eriksson, M., Jacobson, S. (1999). A software based measurement system for test and analysis of automotive brake squeal. *TriboTest Journal*, **5(3)**: 265-275.
- Berndt, C.C. (1985). Plasma Spray Coating. Department of Materials Engineering, Monash University, Clayton, Victoria.
- Bernecki, T. (2005). Classification of Thermal Spray Processes. Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, p: 44.
- Bettge, D., Starcevic, J. (2003). Topographic properties of the contact zones of wear surfaces in disc brakes. *Wear*, **254**: 195-202.
- Bhushan, B. (2001). Principles of Tribology, Modern Tribology Handbook. Vol. 1, CRC Press. Boca Raton, Florida.
- Bijwe, J. (1997). Composites as a friction material: recent developments in non-asbestos fiber reinforced friction materials-A review. *Polymer Composites*, **18**: 378-396.
- Bilgin, S., Samur, R. (2009). Isıl püskürtme yöntemi ile oluşturulan martenzitik paslanmaz çelik kompozit toz kaplamanın mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, Türkiye.
- Blau P.J. Jolly, B.C. Qu, J. Peter, W.H. Blue, C.A. (2007). Tribological investigation of

- titanium-based materials for brakes. *Wear*, **263**: 1202-1211.
- Blau, P.J. (2001). Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives. Technical Report, US Department of Energy (US).
- Bolelli, G., Cannillo, V., Lusvarghi, L., Manfredini, T. (2006). Wear behaviour of thermally sprayed ceramic oxide coatings. *Wear*, **261**: 1298-1315.
- Bowden, F.P., Tabor, D.,(1964). The Friction and Lubrication of Solids. 12-16, 29-31, 52-55, 78-79, 187-191.
- Boz, M. (1999). Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Bronz Esaslı Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Brakeworld, (2011). Technical Bulletin 1. Brake Judder and “Warped” Discs, Leeds, İngiltere.
- Buytoz, S., Ersöz, E., Islak, S., Orhan, N., Kurt. B., Somunkıran. İ. (2012). Plazma püskürtme yöntemiyle oluşturulan Al₂O₃-TiO₂ kompozit kaplamaların mikroyapı karakteristikleri. International Iron-Steel Symposium, Karabük, Türkiye.
- Carrasquero, E.J., Lesage, J., Puchi-Cabrera, E.S. Staia, M.H. (2008). Fretting wear of HVOF Ni-Cr based alloy deposited on SAE 1045 steel. *Surface-Coatings Technology*, **202**: 4544-4551.
- Charles, P.H.J.R. (1994). Thermal spraying processes, preparation, coating and application, *Welding Journal*, **73(4)**: 47-51.
- Cho, M. H. Kim, S. J. Basch, R. H. Fash, J. W. Jang, H. (2003). Tribological study of gray cast iron with automotive brake linings: the effect of rotor microstructure. *Tribology International*, **36**: 537-545.
- Cueva, G. Sinatora, A. Guesser, W.L. Tschiptschin, A.P. (2003). Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors. *Wear*, **255**:1256-1260.
- Çelik, E., Avcı, E., Yılmaz, F. (1997). Evaluation of interface reactions in thermal barrier ceramic coating. *Surface and Coating Tecnology*, **97**: 361-365
- Çelik, E., Özdemir I., Avcı E., Tsunekawa Y. (2005). Corrosion behaviour of plasma sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, **193**: 297-302.
- Çelik, E., Sarıkaya, Ö. (2004). The effect on residual stresses of porosity in plasma sprayed MgO-ZrO₂ coatingsfor an internal combustion diesel engine. *Materials Science and Engineering*, **379 (A)**: 11-16.

- Çelik, E., Şengil, İ.A., Avcı, E. (1997). Effect of some parameters on corrosion behaviour of plasma-sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, 97: 355-360.
- Çelik, E., Tekmen, C., Özdemir I., Çetinel, H., Karakaş, Y., Okumuş, S.C. (2003). Effects on Performance of Cr₂O₃ layers produced on Mo/cast-iron materials. *Surface and Coatings Technology*, (174-175): 1074-1081
- Deamaley, I. (1985). Adhesive, abrasive and oxidative wear in on ion implanted metals. *Materials Science-Engineering*, 69: 139-147.
- Demir, A. (2009). Fren Disklerine Uygulanan Kaplamaların Frenleme Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Dowson, D. (1979). History of tribology. Longman Inc, Newyork.
- Du, H.L., Datta, P.K., Burnell-Gray, J.S., Guo, X. (1995). Influence of plasma-sprayed Mo coating on sulphidation behaviour of inconel 600 and nimonic PE11 alloys. *Surface and Coatings Technology*, (76-77): 1-6.
- Düzgün, M., Yıldız, Y. (2009). Soğutma kanallı fren disklerinin frenleme kuvvetlerine ve ısı değişimine etkileri. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu Karabük, Türkiye.
- Eriksson, M. (2000). Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal. Comprehensive Summaries Of Uppsala Dissertations From The Faculty Of Science And Technology, Uppsala.
- Eriksson, M., Bergman, F., Jacobson, S. (1999). Surface characterisation of brake pads after runing under silent and squeling conditions. *Wear*, 232: 163-167.
- Eriksson, M., Bergman, F., Jacobson, S. (2002). On the nature of tribological contact in automotive brakes, *Wear*, 252: 26-36.
- Eriksson, M., Jacobson S. (2000). Tribological surfaces of organic brake pads. *Tribology International*, 33: 817-827.
- Ertan, R., Yavuz, N. (2010). Balata malzemelerinde kullanılan yapısalların balataların tribolojik ve fiziksel özelliklerine etkisi. Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Dergisi, 15: 169-177.
- Evcin, A. (2006). Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi, Kaplama Teknikleri Ders Notları.

- Evkaya, M. (2003). Metallere Aşınmaya Karşı Yapılan Kaplamada Uygun Toz Materyali ve Kaplama Yönteminin Bilgisayar Destekli Seçimi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bil. Enst. İstanbul.
- Fenton, J. (1996). Handbook of Vehicle Design Analysis. Warrendale
- Fernandez, J.E. Wang, Y. Tucho, R. Martin-Luengo, M.A. Gancedo, R. Rincon, A. (1996). Friction and wear behaviour of plasma sprayed Cr_2O_3 coatings against steel in a wide range of sliding velocities and normal loads. *Tribology International*, **29(4)**: 333-343.
- Fervel, B., C. Normand, C., Coddet, C. (1999). Tribological behavior of plasma sprayed Al_2O_3 -based cermet coatings. *Wear*, **230(1)**: 70-77.
- Filip, P., Weiss, Z., D. Rafaja, D. (2002). On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications. *Wear*, **252**: 189-198.
- Fitzpatrick, R. (2008) The Physics of Plasmas. Texas: The University of Texas at Austin, 6-7.
- Gediktaş, M. (1968). Sürtünme Malzemelerinin Deneysel Tayini. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul, 10-80.
- Gemalmayan, N. (1984). Sürtünme Malzemelerinin Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Gomes, J.R., O.M. Silva, O. M., Silva, C. M., Pardini, L.C., Silva, R.F. (2001). The effect of sliding speed and temperature on the tribological behaviour of carbon-carbon composites. *Wear*, **249**: 240-245.
- Gonzalez, R., Cadenas, M., Fernandez, R., Cortizo, J.L. and Rodriguez, E. (2007). Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser. *Wear*, **262(3-4)**: 301-307.
- Göktan, A.G., Güney, A., Ereke, M. (1995). Taşıt Frenleri. İTÜ Makine Fakültesi, Otomotiv Anabilim Dalı, İstanbul.
- Guo, C., Zhou, J., Zhao, J., Chen, J. (2011). Effect of ZrB_2 on the microstructure and wear resistance of Ni-based composite coating produced on pure Ti by laser cladding. *Tribology Transactions*, **54**: 80-86.
- Güleç, A. (2006). Termal Püskürtme Tekniği ile Yüksek Performanslı Zn/Al (85/15) Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Gültekin, D. (2007). Metal Matrisli Kompozit Fren Diski Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, S.Ü. F. B. E. Sakarya.
- Halderman, J.D. (2000). Automotive brake systems. Second Edition, Prentice-Hall.
- Halliday, D., Resnick, R. (1986). Fiziğin Temelleri. Ayrım Yayınları, Ankara.
- Halling, J. (2000). Principles of Tribology, The Macmillan Process. Ltd. 72-92.
- Harper, G.A. (1998). Brakes and friction materials: The history and development of technologies. Mechanical. Engineering Publications Limited, London, England.
- Hermanek, F. J. (2001). Thermal Spray Terminology and Company Origins. First Printing. Materials Park, OH: ASM International.
- Hidalgo, V.H., Varela, F.J.B., Menendez, A.C., Martinez, S.P. (2001). A comparative study of high-temperature erosion wear of plasma sprayed NiCrBSiFe and WC-NiCrBSiFe coatings under simulated coal-fired boiler conditions. *Tribology International*, **34**: 161-169.
- Hieman, R.B. (1996). Plasma spray coating-principles and applications, VCH publishers Inc., NY, USA.
- Hirota, K., Takano, Y., Yoshinaka, M., Yamaguchi, O. (2002). Fabrication and mechanical properties of almost fully-densified Cr₂O₃ ceramics. *Journal of Materials Science Letters*, **21**: 853-854.
- Holf, I.H. (1995). Thermal Spraying and Its Application. Welding and Metal Fabrication, 266-269.
- Holinski, R. (2001). Fundamentals of dry friction and some practical examples. *Industrial Lubrication and Tribology*, **53**: 61-65.
- Hutchings, I.M. (1992). Tribology: Friction and wear of engineering materials. Butterworth-Heinemann Ltd, London, İngiltere.
- Jang, H. Koa, K. Kima, S.J. Basch, R.H. Fash, J.W. (2001). The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials. *Wear*, **256**: 406-414.
- Jimbo, Y., Mibe, T., Akiyama, K. (1990). Development of high thermal conductivity cast iron for brake disc rotors. ABS Traction Control and Brake Components. SAE Paper 900002.
- Kayalı, E. S. (1993). Sürtünme ve Aşınma. Workshop on Antiwear Coatings, Tübitak, Gebze.

- Kayalı, E. S. (1996). Aşınma ve Kaplı Takımların Aşınması. Nato-TU PVD Kaplamaları Projesi, 5-8, İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- Kearns, W.H., (1984). Resistance and solid-state welding and other joining processes. *Aws Welding Handbook*, seventy edition, **3(1)**: 12, Florida, U.S.A.
- Kempton, K. (1991). Where Thermal Spray Coatings are Most Cost Effective. *Welding Journal*, 41-44.
- Kim, H.J., Hwang, S.J., Lee, C.H., Juvanon, P. (2003). Assessment of wear performance of flame sprayed and fused Ni-based coatings. *Surface and Coatings Technology*, **172**: 262-269.
- Kinkaid, N.M., O'Reilly, O.M., Papadopoulos, P. (2003). Automotive disc brake squeal, *Journal of Sound and Vibration*, **267**: 105-166.
- Kjeldsteen, P., Trilk, N. (1995). Wear map production on P/M materials and the definition of transition. *The Danish for Powder Metallurgy*, 50-110, Nordborg, Denmark.
- Koç, R. Kodambake, S. K. Euro, J. (2000). *Ceramic Materials*. **20**: 1859.
- Koutsomichalis A., Vaxevanidis, N.M., Petropoulos, G., Mourlas, A., Antoniou, S.S. (2008). Friction, wear and mechanical behaviour of plasma sprayed WC-12Co coatings on mild steel. *Proceedings of the 7. International Conference. Coatings in Manufacturing Engineering*, 259-268
- Kragelskii I. V. (1965). *Friction and Wear*. Butterworths, London.
- Kuroda, T., Kobayashi, A. (2004). Adhesion characteristics of zirconia-alumina composite coatings by gas tunnel type plasma spraying. *Vacuum*, **73**: 635-641.
- Kwin, B.F. (1989). How to Apply Thermal-Spray Coatings. *Welding Design-Fabrication*, 43-46.
- Lee, C.H., Kim, H.K., Choi, H.S., Ahn, H.S. (2000). Phase transformation and bond coat oxidation behavior of plasma-sprayed zirconia thermal barrier coating. *Surface and Coatings Technology*, **124**: 1-12.
- Lee, K. (1999). Numerical prediction of brake fluid temperature rise during braking and heat soaking. *SAE Technical Paper Series*, 1999-01-0483.
- Lee, P., W., Filip, P. (2013). Friction and wear of Cu-free and Sb-free environmental friendly automotive brake materials. *Wear*, **302**: 1404-1413.

- Leivo, E.M., Vippola, M.S., Sorsa, P.P.A., Vuoristo, P.M.J., Mäntylä, T.A. (1997). Wear and corrosion properties of plasma sprayed Al_2O_3 and Cr_2O_3 coatings sealed by aluminum phosphates. *Journal of Thermal Spray Technology*, **6(2)**: 205-210.
- Li, C.J., Yang, G.J., Ohmori, A. (2006). Relationship between particle erosion and lamellar microstructure for plasma-sprayed alumina coatings. *Wear*, **260**: 1166-1172.
- Li, T., Li Q., Fuha, J.Y.H., Yu, P. C., Wu, C.C. (2006). Effects of lower cobalt binder concentrations in sintering of tungsten carbide. *Materials Science and Engineering*, **430(A)**: 113-119.
- Link Testing, (1999). How To Read And Understand The Aftermarket Standard SAE J2430/Brake Effectiveness Evaluation Procedure-Test Report. Detroit, Michigan.
- Luo, H., Goberman, D., Shaw, L., Gell, M. (2003). Indentation fracture behavior of plasma sprayed nanostructured Al_2O_3 - 13TiO_2 coatings. *Materials Science and Engineering*, **346 (1-2) A**: 237-245.
- Mackin, T. J. and Fri. (2002). Thermal cracking in disk brakes. *Engineering Failure Analysis*. **9**: 63-76.
- Mateos, J., Cuetos, J. M., Fernandez, E., Vijande, R. (2000). Tribological behaviour of plasma sprayed WC coatings with and without laser remelting. *Wear*, **239**: 274-281.
- Merlin, M. Soffritti, C. Vazquez, R. (2012). Effect of relative humidity and applied loads on the tribological behaviour of a steel/ Cr_2O_3 ceramic coupling. Department of Engineering, University of Ferrara, Ferrara, Italy.
- Miguel, J.M., Guilemany, J.M., Vizcaino, S. (2003). Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes. *Tribology International*, **36 (3)**: 181-187.
- Ming, Q., Lim, L.C., Chen, Z.D. (1998). Laser cladding of nickel - based hardfacing alloys. *Surface Coatings Technology*, **106**: 174-182.
- Mutlu İ., Öner C., Özdin K. ve Yıldız E. (2006). Elyaf katkılı asbestsiz disk fren balatalarında frenleme veriminin incelenmesi. *Doğuanadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, **8**: 98-102, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Mutlu, İ., (2002). Seramik Katkılı Asbestsiz Otomotiv Fren Balatası Üretimi ve Frenleme Karakteristiğinin Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Mutlu, İ., Oner, C., Findik, F. (2007). Boric acid effect in phenolic composites on tribological properties in brake linings. *Materials and Design*, **28**: 480-487.
- Mutlu, İ., Çevik, İ., Öner, C. (2002). Borik asit katkılı asbestsiz otomotiv fren balatası özelliklerinin deneysel incelenmesi, 3 nd International Powder Metallurgy Conference September 4-8, Turkish Powder Metallurgy Association, 1307-1314, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Natarajan, N. Vijayarangan, S. Rajendran, I. (2006). Wear behavior of A356/25SiC_p aluminum matrix composites sliding against automobile friction material, *Wear*, **261**: 812-822.
- Navas, C., Vijande, R., Cuetos, J.M., Fernandez, M.R., Damborenea, J. D. (2007). Corrosion behaviour of NiCrBSi plasma-sprayed coatings partially melted with laser. *Surface-Coatings Technology*, **201**: 776-785.
- Ocelik, V. Oliveira, U. de. Boer M. de. Hosson, J.Th.M. de. (2007). Thick Co - based coating on cast iron by side laser cladding: Analysis of processing conditions and coating properties. *Surface and Coating Technology*, **201**: 5875-5883.
- Oda, N., Sugimoto, Y., Higuchi, T., Minesita, K. (1997). Development of disk brakerotor utilizing aluminum metal matrix composite. International Congress-Exposition, Session: Advanced Materials, Detroit, Document Number: 970787.
- Oğuz, B. (1993). Aşınma sorunları ve dolgu kaynakları teori-uygulama. Oerlikon Kaynak Elektrodları ve Sanayi A.Ş. yayınları, İstanbul, 367-491.
- Ostermeyer, G.P. (2003). On the dynamics of the friction coefficient. *Wear*, **254**: 852-858.
- Pandya, S.N. S. K. Nath, S.K. Chaudhari, G.P. (2009). Friction and wear characteristics of TIG processed surface modified grey cast iron. *Journal of Scientific Research*, **3**: 516-527.
- Parker, D.W., Kurtner, G.L. (1991). HVOF-Spray Technology. *Advanced Materials and Processes*, **139(4)**: 68-74.
- Parr, E. A. (1997). Endüstriyel Kontrol El Kitabı. MEB, İstanbul.
- Pawlowski, L. (2008). The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, John Wiley-Sons, Ltd., England
- Pektaş, İ. (1995). 21. Yüzyıl malzemeleri, karbon-karbon kompozit malzemeler. *Teknik Gelişim*, Sayı: 11-12-13.

- Peng, Li. (2013). Preparation and tribological properties of NiCrBSiC reinforced laser alloying layer. *Tribology Transactions*, **56**: 697-702.
- Persson, B. N. J. (1994). Theory of Friction. **50**: 47-71, The American Physical Society.
- Persson, B. N. J. (1999). Sliding Friction. *Surface Science Reports*, **33**: 83-119.
- Peterson, M.B. (1976). Wear Testing Objectives and Approaches, Selection and Use of Wear Tests For Metals. ASTM STP 615, R.G. Bayer Edit., American Society for Testing and Materials, 3-11.
- Planche, M.P., Liao, H., Normand, B. and Coddet, C. (2005). Relationships between NiCrBSi particle characteristics and corresponding coating properties using different thermal spraying processes. *Surface and Coatings Technology*, **200 (7)**: 2465-2473.
- Qu, J. Blau, P. J. Watkins, T. R. Cavin, O. B. Nagraj S. Kulkarni, N. S. (2005). Friction and wear of titanium alloys sliding against metal, polymer, and ceramic counterfaces, *Wear*, **258**: 1348-1356.
- Qu, J. Blau, P.J. Jolly, B.C. (2009). Oxygen-diffused titanium as a candidate brake rotor material. *Wear*, **267**: 818-822.
- Reinsch, E. W. (1970). Sintered Metal brake linings for automotive applications. Delco-Moraine Division, General motors corp dayton, **2**: 9-21, Ohio.
- Rodriguez, J., Martin, A. Fernandez, R., Fernandez, J. E. (2003). An experimental study of the wear performance of NiCrBSi thermal spray coatings. *Wear*, **255**: 950-955.
- Ronald, W.S., Ronald D.F. (1994). The Future of Thermal Spray Technology. *Welding Journal*, 43-50.
- Sahoo, P. (1993). High Performance Wear Coatings-The Quest Continues. *Powder Metallurgy International*, **25(2)**: 73-78.
- Salman, S. (1995). Plazma ve Alev Püskürtme Tekniğiyle Al₂O₃-%13TiO₂ ve Cr₂O₃-%5SiO₂-%3TiO₂ Seramik Kaplanan Malzemelerin Özellikleri. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Salman, S., Kose, R., Urtekin, L. and Fındık, F. (2006). An investigation of different ceramic coating thermal properties. *Materials and Design*, **27**: 585-590.
- Samur, R., Mindivan, H., Yıldırım, S., Çimenoglu, H. (2003). 6. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildirileri El Kitabı. Konya, Türkiye, 263-270,

- Sarı, Y.S., Yılmaz, M. (2008). Improvement of wear resistance of wire drawing rolls with Cr-Ni-B-Si+WC thermal spraying powders. *Surface and Coatings Technology*, **202**: 3136-3141.
- Sarı, Y.S., Yılmaz, M., (2004). Cr-Ni-B-Si+WC ısıp püskürtme ile yüzey sertleştirmede Ni-esaslı kaplama tozları. 10. Malzeme Sempozyumu ve Sergisi, Denizli, 467-472.
- Sarıkaya, Ö. (2007). Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri. Sakarya, 123.
- Schwartz, M. (2002). Encyclopedia of Materials. Parts and Finishes 2 nd ed., CRC Press LLC, 895.
- Serres, N. Hlawka, F., Costil, S., Langlade, C., Machi, F. (2011). Microstructures of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray and in situ Laser remelting process. *Journal of Thermal Spray Technology*, **20 (1-2)**: 336-343.
- Serres, N., Hlawka, F., Costil, S., Langlade, C., Machi, F., Cornet, A. (2009). Dry Coatings and Ecodesign. Part 2. Tribological Performances. *Surface-Coatings Technology*, **204 (1-2)**: 197-204.
- Sert, Y. (2007). Plazma Püskürtme Tekniği ile Kaplanmış Tekstil Parçasının Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Shorowordi, K.M., Haseeb, A.S.M.A., Celis, J.P. (2004). Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminium MMC sliding against phenolic brake pad, *Wear*, **256**: 1176-1181.
- Simunovic. K. (2009). Thermal Spraying. *Welding Engineering and Technology*, 1-25.
- Song, E. P., Ahn, J., Lee, S., N.J. Kim, N.J. (2008). Effects of critical plasma spray parameter and spray distance on wear resistance of Al₂O₃-8TiO₂ coatings plasma sprayed with nanopowders. *Surface and Coating Technology*, **20**: 3625-3632.
- Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W. (2000). Engineering Tribology (2nd ed.), Publisher Butterworth Heinemann, **769**: 430-440.
- Stanford, M. K. and Jain, V. K. (2001). Friction and wear characteristics of hard coatings. *Wear*, **250**: 990-996.

- Stewart, S., Ahmed, R., Itsukaichi, T. (2005). Rolling contact fatigue of post-treated WC-NiCrBSi thermal spray coatings. *Surface-Coatings Technology*, **190**: 171-189.
- Stoica, V., Ahmed, R., Itsukaichi, T. (2005). Influence of heat-treatment on the sliding wear of thermal spray cermet coatings. *Surface-Coatings Technology*, **199**: 7-21.
- Stokes, J., (2008). The Theory and Application of the HVOF Thermal Spray Process. Dublin City University, Ireland.
- Szeri, A. Z. (1980). Pres: McGraw-Hill, NY Tribology (Friction, Wear, Lubrication). 1. Edition, Washington.
- Tabor, D. (1996). Friction as a dissipated process, friction of organic polymers in fundamentals of friction, Macroscopic and Microscopic Processes, **220**: 1-3.
- Taheri-Nassaj, E. Mirhosseini, S. H. (2003). An in situ WC-Ni composite fabricated by the SHS method. *Journal of Materials Processing Technology*, **142**: 422-426.
- Tekmen, Ç. Özdemir, İ. Çelik, E. (2003), Plazma püskürtme ile dökme demir altlıklar üzerine molibden kaplamalar. D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi, *Fen ve Mühendislik Dergisi*, **5/1**: 173-179.
- Trilk, N.C., Eyre, T.S. (1993) Tribology Methodology. 114-145, Brunel University, Kingston Lane, Uxbridge, U.K.
- TS 555, (1992). Karayolu Taşıtları-Fren Sistemleri-Balatalar-Sürtünmeli Frenler İçin. T.S.E., 1. Baskı, Ankara.
- Tucker, R. C. (1994). Thermal Spray Coatings, ASM Handbook, **5**: 497-509.
- Ulutan, M. (2007). AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması. Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Unger, R.H. (1988). Comparison of Thermal Sprayed Bond Coats, Proceedings of The National Thermal Spray Conference, Ohio, USA, 365-370.
- Upadhyaya, G.S., Bhaumik, S.K. (1988). Sintering of submicron WC-%10Co hard metals containing Ni and Fe. *Material Sciences Engineering*, **249**: 105-106.
- Uygur, M, E. (1996). Balata üretim teknolojisi.1. Ulusal Toz Metalurjisi Kongresi, Bildiriler Kitapçığı, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Üstel, F. (1995). Plazma Sprey Kaplama Teknolojisi. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Vaclav, R., Helena, R., Dagmer, J., Peter, F. (2008). Wear and environmental aspects of composite materials for automotive braking industry. *Wear*, **265**: 167-175.
- Villat, M. (1986). Functionally Effective Coatings Using Plazma Spraying. Sulzer Technical Rewiev, **3**: 41-45.
- Weidmann E., Guesnier A., Duclos B. (2005). Metallographic preparation of thermal spray coatings. Struers Application Notes, www.struers.com.
- Wu, P. Chen, X. L. Jiang, E.Y. (2004). Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings. *Wear*, **257**: 142-147.
- Wu, P., Zhou, C. Z., Tang, X. N. (2003). Microstructural characterization and wear behavior of laser clad nickel-based and tungsten carbide composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, **166**: 84-88.
- Wycliffe, P. (1993). Friction and wear of duralcan reinforced aluminium composites in automotive braking systems. SAE Technical Papers, 930187.
- Xiong, Y. Lau, K. Zhou, X. Schoenung, J. M. (2008). A streamlined life cycle assessment on the fabrication of WC-Co cermets. *Journal of Cleaner Production*, **16**: 1118-1126.
- Yamabe, J. Takagi, M. Matsui, T. (2003). Development of disc brake rotors for heavy- and medium-duty trucks with high thermal fatigue strength. *Technical Review*, **15**: 42-51.
- Yang, Y., Man, U. H. C. (2000). Microstructure evolution of laser clad layers of WC - Co alloy powders. *Surface and Coatings Technology*, **132**: 130-136.
- Yavuzaslan, N. (2006). Otomobillerde Fren Sistemleri ve İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Entitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Yılmaz, F. (1997). Sürtünme ve Aşınma. 9. Ulusal Metalurji ve Malzeme Kongresi, 229-247, İstanbul.
- Yılmaz, R., Akbaş, A. (2008). WC ilavesinin NiCrBSi kaplamalarda sertlik ve mikroyapıya etkisi. VII. Seramik kongresi, Afyonkarahisar, Türkiye.
- Yin,Z.,Tao, S., Zhoua, X., Ding, C. (2008). 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.
- Yun, R., Filip, P., Lu, Y. (2010). Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials. *Tribology International*, **43**: 2010-2019.

Zhang, H., Ramesh, K.T., Chin, E.S.C. (2004). High strain rate response of aluminium 6092/B4C composites. *Materials Science and Engineering*, A384: 26-34.

Zhang, Z. Y., Wahlberg, S. M., Wang, M. S., Muhammed, M. (1999). *Nanostructured Materyals*. **12**: 163-168.

6.1 İnternet Kaynakları

1. www.sulzernetco.com, (05.04 2013).
2. [Http://www.plasmajet.ro/en/content/combustion-wire-thermal-spray-process](http://www.plasmajet.ro/en/content/combustion-wire-thermal-spray-process) (22.04.2013).
3. [Http://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-parts/brake-calipers.htm](http://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-parts/brake-calipers.htm) (23.07.2013).
4. [Http://www.gtv-mbh.de/cms/upload/downloads/GTV_Spritzpulverkatalog_05-2013.pdf](http://www.gtv-mbh.de/cms/upload/downloads/GTV_Spritzpulverkatalog_05-2013.pdf) (01.05.2013).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Bekir GÜNEY

Doğum Yeri ve Tarihi : Sincanlı-1973

Yabancı Dili : İngilizce

İletişim (Telefon/e-posta) : 0 505 854 39 43-guneyb03@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon Merkez Endüstri Meslek Lisesi-1988

Lisans : Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi-1993

Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi FBE-1999

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Milli Eğitim Bakanlığı 1993-Devam

Yayımları (SCI ve diğer) :

Diğer konular