

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FREN DİSKLERİNDE PLAZMA SPREY ALÜMİNA ESASLI
KAPLAMALARIN UYGULANABİLİRLİĞİ VE KAPLAMALI DİSK- BALATA
ARASI SÜRTÜNME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zekeriya KOLBASAR

Enstitü Anabilim Dalı : **METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Ekrem ALTUNCU**

Şubat 2020

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FREN DİSKLERİNDE PLAZMA SPREY ALÜMİNA ESASLI
KAPLAMALARIN UYGULANABİLİRLİĞİ VE KAPLAMALI DİSK- BALATA
ARASI SÜRTÜNME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zekeriya KOLBASAR

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ ve MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 13/02/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Ahmet ATASOY
Jüri Başkanı

Doç. Dr.
Armağan ARICI

Dr. Öğr. Üyesi
Ekrem ALTUNCU

Üye

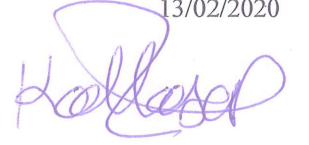
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Zekeriya KOLBASAR

13/02/2020



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ekrem ALTUNCU'ya teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışma danışman hocam yönetiminde Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Malzeme ve Üretim Teknolojileri Araştırma Uygulama Merkezi araştırma geliştirme faaliyetleri kapsamında yürütülmüştür.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve desteğini esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Fatih ÜSTEL'e ve Termal Sprey Teknolojileri Araştırma Uygulama Laboratuvarı (TESLAB) çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Araç üzeri fren testlerinin yürütülmesinde ve raporlanmasında desteklerinden dolayı TOFAŞ A.Ş. Arge Merkezinden Mehmet GÜRER ve Recep AKYÜZ'e, disk-balata sürtünme davranışının analizinde gerçekleştirilen testlerde desteklerinden dolayı KALE BALATA A.Ş. Fabrika Müdürü Kubilay ATUK ve Ar-Ge Müdürü Ozan DEMİRDALMIŞ'a teşekkür ederim.

Bu zamana kadar verdikleri maddi, manevi destek, gösterdikleri ilgi, sabır bu günlere gelmemde harcadıkları sonsuz emek dolayısıyla babam Ahmet KOLBASAR, annem Selma KOLBASAR, kardeşim Ayşegül KOLBASAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez aşamında yardımlarını esirgemeyen Tekin ÇALIŞKAN, Ayyüce TECİR, Huzeyfe ÖZVEREN, Ömer SÜLEYMANOĞLU, Kadircan ARICI'ya yardımlarından dolayı minnetle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

BEYAN.....	i
TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
KISALTMALAR.....	v
SİMGELER.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Küresel Otomotiv Pazarı ve Beklentiler.....	1
1.2. Türkiye’de Otomotiv Pazarı ve Gelecek Beklentileri	3
1.3. Disk Tipi Fren Sistemleri ve Temel Bileşenleri	6
BÖLÜM 2.	
FREN DİSKİ ALAŞIMLARI	10
2.1. Fren Disklerinde Kullanılan Alaşım lar.....	10
2.1.1. Gri dökme demirler ve türleri	10
BÖLÜM 3.	
FREN DİSKLERİNDE HASAR MEKANİZMALARI.....	12
3.1. Disk Üzerinde Aşırı Aşınma, Kalınlık Azalması	16
3.2. Disk Üzerinde Aşırı Aşınma, Yüzeyde Çizikler	16
3.3. Disk Üzerinde Aşırı Aşınma, Balata ve Disk Arasında Derin Kanallar	16
3.4. Termal Nedenli Hasar, Yanlış Kullanım Sonucu Çatlaklar.....	18
3.5. Termal Nedenli Hasar, Yanlış Kullanım Sonucu Disk üzerinde Renklenme.....	18

3.6. Uygun Olmayan Montaj, Temas Yüzeyindeki Bozulma ve Görsel Çatlaklar.....	18
3.7. Frenleme Yüzeyinden Ayrılan Disk Kafası	19
3.8. Diskte Derin Kanal Açma	19
BÖLÜM 4.	
TERMAL SPREY KAPLAMA YÖNTEMLERİ	20
4.1. Termal Sprey Kaplama Yöntemlerinin Sınıflandırılması	21
4.1.1. Alev sprej	22
4.1.2. Elektrik ark sprej	23
4.1.3. HVOF (Yüksek hızda oksij yakıt sprej).....	24
4.1.4. Plazma sprej	25
4.1.5. Lazer kaplama	26
4.1.6. Soğuk sprej kaplama.....	27
BÖLÜM 5.	
LİTERATÜRDE FREN DİSKLERİ ÜZERİNDE KAPLAMA UYGULAMALARI.....	29
BÖLÜM 6.	
KAPLAMALARIN ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER, TEST VE KARAKTERİZASYONUNDA KULLANILAN YÖNTEMLER.....	37
6.1. Altlık Malzemesi Özellikleri.....	37
6.2. Üst Katmanda Kullanılan Toz Özellikleri	38
6.3. Bağ Tabaka ve Toz Özellikleri	39
6.4. Plazma Sprej Kaplama Prosesi.....	40
6.5. Kaplama Öncesi İşlemler: Kumlama	41
6.6. Kaplama Test ve Analizleri.....	42
BÖLÜM 7.	
DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	47
7.1. Kaplamaları Mikroyapı Kesit ve Üst Yüzey İncelemeleri.....	47
7.2. Plazma Sprej Kaplamaların Kalınlık ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları.....	58

7.3. Plazma Sprey Kaplamaların Mekanik Özellikleri.....	60
7.4. Plazma Sprey Kaplamalı Disklerin Kalınlık, DTV, Salınım Ölçüm Sonuçları.....	63
7.5. Plazma Sprey Kaplamalı Disklerin Tuz Testi Sonucu.....	68
7.6. Kaplamalı ve Kaplamasız Disklerin Dinamometre Testi Sonuçları.....	68
BÖLÜM 8.	
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	78

KISALTMALAR

APS	: Atmosferik Plazma Sprey
BSE	: Geri Saçılan Elektronlar
EDX	: Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
GG	: Gri Dökme Demir
GPA	: Gigapascal
Gr	: Gram
HB	: Brinell Sertlik Birimi
HV	: Vickers Sertlik Birimi
HVOF	: Yüksek Hızlı Oksi Yakıt Kaplama
HZ	: Hertz
Km	: Kilometre
Kw	: Kilowatt
M	: Metre
Mm	: Milimetre
μm	: Mikrometre
Nm	: Newtonmetre
N	: Newton
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Sn	: Saniye
NPLM	: Kütle Akışı

SİMGELER

C : Karbon

Si : Silisyum

Mn : Mangan

P : Fosfor

S : Kükürt

% : Yüzde

°C : Santigrat Derece

K : Kelvin

μ : Mikron

W : Tungsten

Cr : Krom

Ni : Nikel

O : Oksijen

H : Hidrojen

Ar : Argon

Fe : Demir

B : Bor

Al : Alüminyum

Mg : Magnezyum

Ca : Kalsiyum

Na : Sodyum

Cl : Klo

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 : Dünya otomotiv sektörü üretim ve satışlar (bin adet) [1].	1
Şekil 1.2 : Otomotiv üretici firmaların payları [1].	2
Şekil 1.3 : Türkiye’de otomotiv sektöründe yıllık büyüme oranları [1].	4
Şekil 1.4 : Türkiye’de Otomotiv üretiminde firma payları [1].	4
Şekil 1.5 : Türkiye’de yıllık otomobil üretimi sayıları (x1000adet) [1].	4
Şekil 1.6 : Emisyon düzeyleri ve gelecek hedefleri [3].	5
Şekil 1.7 : Otomotiv sektöründe üretici ve tedarikçilerin gelecekte odaklanacakları alanlar [3].	5
Şekil 1.8 : Fren performans testleri (Porsche).	6
Şekil 1.9 : Disk tipi fren sistemi ve örnek diskler (Brembo).	7
Şekil 1.10 : Basit bir fren diski üzerinde temel kavramlar ve genel ölçüler [6].	9
Şekil 3.1 : Fren ve disk arasındaki sürtünme ve aşınma ilişkisi.	13
Şekil 4.1 : Termal sprej tabakasının oluşumunun gösterimi [13].	21
Şekil 4.2 : Isı kaynaklarına göre termal sprej kaplama yöntemleri.	21
Şekil 4.3 :Termal sprej yöntemlerinin sıcaklık -gaz hızı grafiği.	22
Şekil 4.4 : Tel /Toz alev sprejin şematik görünümü [15].	23
Şekil 4.5 : Elektrik ark termal sprej sistemi [12].	24
Şekil 4.6 : HVOF yöntemi [12].	25
Şekil 4.7 : Plazma sprej sistemi [12].	26
Şekil 4.8 : Lazer kaplama sistemi.	27
Şekil 4.9 : Soğuk sprej sistemi.	27
Şekil 5.1 : Stellite6 (a) ve WC-Co (b) esaslı kaplamaların gri dökme demir fren diski ile karşılaştırmalı olarak hacimsel aşınma kaybı grafikleri [18].	30
Şekil 5.2 : Stellite6 ve WC-Co esaslı kaplamaların gri dökme demir fren diski ile karşılaştırmalı olarak hacimsel aşınma kaybı grafikleri 60N yük altında [18].	30
Şekil 5.3 : Gri dökme demir üzerinde a) Plazma Sprej ve b) HVOF kaplamaların SEM kesit görüntüleri [21].	31

Şekil 5.4 : Gri dökme demir üzerinde a) Plazma Sprey ve b) HVOF kaplamaların SEM kesit görüntüleri [21].	31
Şekil 5.5 : Dinamometre test sistemi şematik [25].	33
Şekil 5.6 : Kaplamalı ve kaplamasız disklere uygulanan dinamometre test sonuçları a. sürtünme katsayısı b. fren gürültü değişimi [25].	34
Şekil 6.1 : Deneysel çalışmalarda ön deneme kaplama numuneleri ve disk.	38
Şekil 6.2 : Fren diskinin Plazma Sprey ile Kaplamadan Önceki ve Sonraki Görüntüsü.	38
Şekil 6.3 : Kumlama Kabini.	42
Şekil 6.4 : Metalografik hazırlık aşamasında kullanılan cihazlar.	42
Şekil 6.5 : Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.	43
Şekil 6.6 : Elektron Mikroskopu (SEM-EDX) cihazı.	44
Şekil 6.7 : Sertlik cihazı.	44
Şekil 6.8 : Yapışma testi cihazı.	45
Şekil 6.9 : Dinamometre testi cihazı.	45
Şekil 6.10 : Tuz püskürtme test cihazı.	46
Şekil 6.11 : Yol testleri (Fiat Egea) ve disk, balata kontrolleri.	46
Şekil 7.1 : X1 kodlu kaplamaların kesit SEM görüntüleri ve kaplama kalınlığı.	48
Şekil 7.2 : X1 kodlu kaplamanın SEM-EDX Analizleri (Noktasal ve Element Haritaları).	49
Şekli 7.3 : X1 kodlu kaplamaların üst yüzey SEM görüntüleri.	50
Şekil 7.4 : X2 kodlu kaplama kesit görüntüleri kaplama kalınlıkları ve ölçümleri SEM analizi.	51
Şekil 7.5 : X2 kodlu kaplamanın EDX analizi (noktasal) ve element haritaları.	52
Şekil 7.6 : X2 kodlu kaplamanın üst yüzey görüntüleri ve topografik yüzey fotoğrafı.	53
Şekil 7.7 : X2 kodlu kaplamanın EDX analizi (noktasal) ve harita element dağılımı.	54
Şekil 7.8 : X3 kodlu kaplamanın kesit görüntüleri, kaplama ve bağ tabaka kalınlıkları.	55
Şekil 7.9 : X3 kodlu kaplamada kesit EDX analizi, paso mesafeleri ve splat boyutları.	56
Şekil 7.10 : X3 üst yüzey görüntüleri, EDX analizi.	57
Şekil 7.11 : X1 kodlu kaplama kesit görüntüleri.	58
Şekil 7.12 : Plazma sprej kaplamaların sertlik ölçüm dağılım grafiği.	61

Şekil 7.13 : Araç üzerinde kaplamalı disk üzerinde et kalınlığı ölçümü ve görsel kontrol (toplam 20.000 km).....	64
Şekil 7.14 : Kaplamalı ve kaplamasız disk üzerinde 20.000 km test sürüşü sonrasında kalınlık değişimlerinin karşılaştırması.....	66
Şekil 7.15 : Kaplamalı disk üzerinde 20.000km test sürüşü sonrasında disk yüzeyi ve balataların görüntüsü.....	66
Şekil 7.16 : Kaplamasız disk üzerinde dinamometre testi sonrasında sürtünme katsayısının değişimi.....	69
Şekil 7.17 : Kaplamasız disk üzerinde dinamometre testi sonrasında disk ve balata malzeme yüzeylerinin görünümü.	70
Şekil 7.18 : Kaplamalı disk üzerinde dinamometre testi sonrasında sürtünme katsayısının değişimi.....	71
Şekil 7.19 : Kaplamalı disk üzerinde dinamometre testi sonrasında disk ve balata malzeme yüzeylerinin görünümü.	71
Şekil 7.20 : İnce kaplamalı disk üzerinde dinamometre testi sonrasında disk ve balata malzeme yüzeylerinin görünümü.	72

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1 : Otomotivde Kullanılan Gri Dökme Demir Alaşımlarının Kimyasal Bileşimi ve Mekanik Özellikleri [6].	11
Tablo 3.1 : Disk hasar mekanizmaları [11].	17
Tablo 4.1 : Termal Sprey Kaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması.	28
Tablo 5.1 : Fren testi esnasında kaplama kalınlığı değişimi.	32
Tablo 5.2 : Sürtünme katsayısının ve aşınma hızının karşılaştırması [29].	35
Tablo 5.3 : Aşınma testlerinde karşılıklı yüzeylere malzeme aktarımı ve yüzde oranı [30].	36
Tablo 6.1 : Dökme demir kimyasal kompozisyonu ve mikro yapısı.	37
Tablo 6.2 : Toz Özellikleri.	39
Tablo 6.3 : Bağ Tabaka Toz Özellikleri.	40
Tablo 6.4 : Plazma Sprey kaplamaların üretim parametreleri.	40
Tablo 6.5 : Kaplama üretim sistemi ve bileşenleri.	41
Tablo 7.1 : Kaplama Kalınlık Ölçüm Sonuçları.	59
Tablo 7.2 : Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları.	60
Tablo 7.3 : Farklı parametreler ile üretilen plazma sprej kaplamaların sertlik ölçüm sonuçları.	61
Tablo 7.4 : Yapışma testi numuneleri ve uygulaması.	62
Tablo 7.5 : Kaplamaların yapışma testi ölçüm sonuçları (mpa).	63
Tablo 7.6 : Araç üzerinde servis ömrü testinde kaplamalı disk kalınlığı ölçümleri.	65
Tablo 7.7 : Seramik kaplamalı ve kaplama yapılmamış fren diskinde disk kalınlık değişimi (DTV).	67
Tablo 7.8 : Tuz testi sonuçları.	68
Tablo 7.9 : Kaplamasız disk-balata arasında balata aşınma kaybı ve sürtünme katsayısı değişimi sonuçları.	69
Tablo 7.10 : Kaplamalı disk-balata arasında balata aşınma kaybı ve sürtünme katsayısı değişimi sonuçları.	71

Tablo 7.11 : İnce kaplamalı disk-balata arasında balata aşınma kaybı ve sürtünme katsayısı değişimi sonuçları..... 72



FREN DİSKLERİNDE PLAZMA SPREY ALÜMİNA ESASLI KAPLAMALARIN UYGULANABİLİRLİĞİ VE KAPLAMALI DİSK- BALATA ARASI SÜRTÜNME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Yeni nesil otomobil fren sistemlerinde (rejeneratif fren sistemlerinde) kullanılacak disklerden aşınma ve korozyona karşı daha uzun kullanım ömrü ve yüksek fren performansı istenmektedir. Bunun yanında diskin ve balata malzemesinin zaman içerisinde aşınmasından kaynaklı fren tozlarının neden olduğu çevresel kirlilik önemli bir problem haline gelmiştir. Disk yüzeylerinde koruyucu ve aşınmaya dirençli bir kaplama gereksinimi artmıştır. Bu çalışmada, gri dökme demir fren diskleri üzerine plazma sprej yöntemi ile farklı kalınlıklarda $Al_2O_3-TiO_2$ esaslı seramik kaplama tabakası biriktirilmiştir. Farklı proses parametreleri ile kaplama tabakasının mikro yapısı ve kalınlığı kontrol edilmiştir. Optimize edilmiş plazma sprej parametreleri sonrasında kaplamaların karakterizasyonu ve mekanik testleri gerçekleştirilmiş ve gerçek diskler üzerinde test ve analiz çalışmaları yürütülmüştür. Fren diski ile balata malzemesi arasında sürtünme davranışını incelemek için farklı sıcaklıklarda uygulanan dinamometre testlerinden yararlanılmış ve sürtünme katsayısının değişimi incelenmiştir. Elde edilen bulgular sonucunda plazma sprej yöntemi ile disk üzerinde arzulanan özelliklerde ve kalınlıklarda seramik kaplamanın üretilebildiği ve mikro yapının kontrol edilebildiği anlaşılmıştır. Kaplamalı disklerde dökme demire göre üstün performans ve kullanım ömrüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Plazma sprej yöntemi ile üretilen seramik esaslı kaplamaların disk yüzeylerinde önemli avantajlara sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Fren diski, Atmosferik plazma sprej, Seramik kaplama, Triboloji

THE APPLICABILITY OF PLASMA SPRAY ALUMINA BASED COATINGS IN BRAKE DISCS AND INVESTIGATION OF COATED DISC-PAD FRICTION BEHAVIOR

SUMMARY

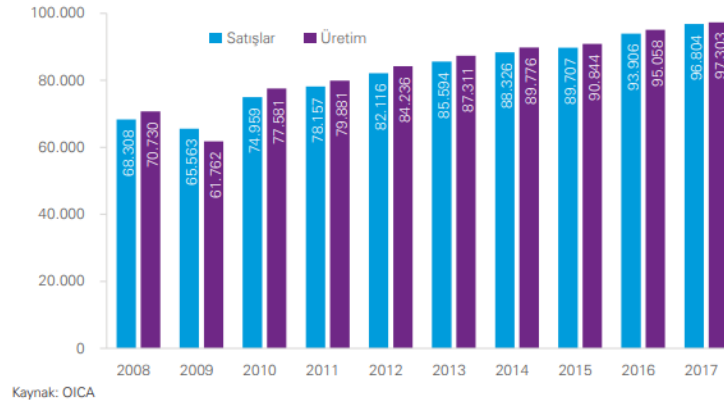
Brake discs to be used in new generation automobile braking systems (regenerative braking systems) require longer service life against to wear and corrosion, and higher braking performance. In addition, environmental pollution caused by brake dust due to the wear of the disc and friction material over time has become an important problem. The requirement for a protective and wear-resistant coating on the disk surfaces has increased. In this study, Al₂O₃-TiO₂ based ceramic coating layer of different thicknesses has been deposited on the gray cast iron brake discs by plasma spray method. Microstructure and thickness of the coating layer were controlled with different process parameters. After the optimized plasma spray parameters, the characterization and mechanical tests of the coatings were carried out and test and analysis studies were carried out on real discs. Dynamometer tests applied at different temperatures were used to examine the friction behavior between the brake disc and the friction material and the change of the friction coefficient was examined. As a result of the obtained findings, it has been understood that the ceramic coating with the desired properties and thicknesses on the disc can be produced and the microstructure can be controlled by the plasma spray method. It has been observed that coated disc has superior performance and lifetime compared to cast iron. It is understood that ceramic-based coatings produced by plasma spray method have important advantages on disk surfaces.

Keywords: Brake Disc, Plasma Spraying, Ceramic Coating, Tribology

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Küresel Otomotiv Pazarı ve Beklentiler

Dünya ekonomisinde otomotiv sektörü en önemli pazarlardan bir tanesidir. Dünyada otomotiv sektörü gerek büyüklüğü gerekse etki alanı açısından en önemli sanayi dallarından biri olarak görülmektedir. Bu doğrultuda otomotiv sanayi, insanların ulaşım ihtiyacının karşılayan ürünler üretmenin ötesinde pek çok teknolojik ve toplumsal gelişmede anahtar bir rol üstlenmektedir [1-3]. Sektör 2017 yılı içerisinde 1,9 trilyon dolar brüt katma değer üretirken 84,8 milyar dolar tutarında ar-ge yatırımları yapmıştır. Bu sayede dünya genelinde bir yıl içerisinde otomotiv sektörü üzerinden kamuya 400 milyar dolar üzerinde vergi geliri sağlanmıştır. Bununla birlikte, toplam imalat sanayi istihdamının %5'lik bir kısmını sağlayan sektörde sayıları milyonlara ulaşan pek çok insan da istihdam edilmektedir. Üretilen araç sayısı 70 milyonlardan 100 milyonlara yaklaşmıştır. Küresel ekonomik koşullara göre üretim ve satışlarda değişimler gözlenmektedir (Şekil 1.1) [1].

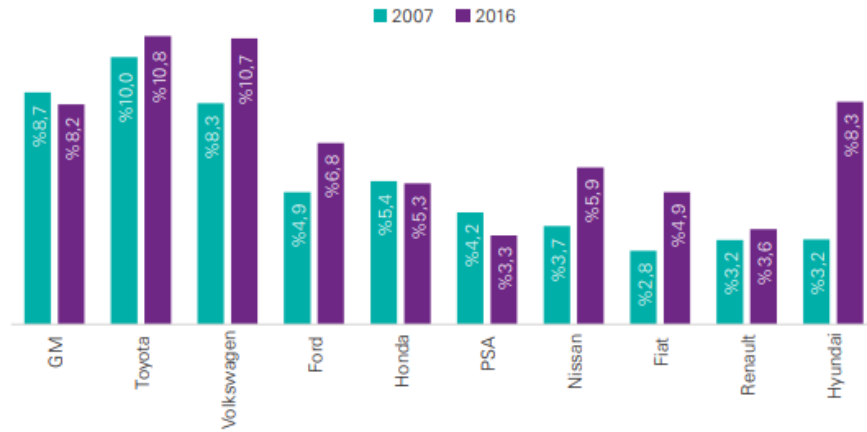


Şekil 1.1 : Dünya otomotiv sektörü üretim ve satışlar (bin adet) [1].

Dünya otomotiv sektöründe son 10 yılda üretim Avrupa ve ABD'den Asya'ya kayarken, bölgeler içinde de gelişmiş ekonomilerden gelişmekte olan ekonomilere doğru bir yönelim olduğu görülmektedir. Dünya otomotiv üretiminde küresel kriz öncesinde

Amerika ve Avrupa’da sırasıyla %26 ve %31’lik paya sahiplerken, 2017 yılına gelindiğinde söz konusu ekonomilerde otomotiv üretiminin payları sırasıyla %21,2 ve %22,8’e geriledi. Buna karşın Asya ekonomilerinin küresel otomotiv üretimindeki payı bu 10 yıllık dönemde %42’den %55 seviyesine çıkmıştır. Küresel krizi öncesi ve sonrası dönemde dünya otomotiv üretiminde ilk 10 sıradaki üretici aynı kalırken, sıralamada Asyalı firmaların daha çok öne çıktığı görülüyor. Söz konusu 10 büyük üretici, geçmişte olduğu gibi bugün de dünya toplam otomotiv üretiminin yaklaşık yüzde 68’ini gerçekleştiriyor. Aşağıda Şekil 1.2’de ana üreticilerin 2007-2016 yılları arasında paylarının değişimi sergilenmektedir [1].

Düşük karbon emisyonlu, çevre dostu hibrit ve elektrikli araçların daha çok tercih edilmesi dünya genelinde geleneksel üreticileri yeni yatırımlara zorlamaktadır. Firmaların mevcut üretim yapısında hızlı değişiklikleri getirememeleri durumu da için üretim üzerinde baskı oluşturmaktadır. Yoğun bir rekabetin yaşandığı bu sektörde otomotiv üreticileri yeni teknolojiler, yeni malzemeler ve yeni uygulamalar üzerinde kapsamlı araştırma geliştirme faaliyetleri sürdürmektedirler. Gerek çevresel faktörler gerekse sürüş konforu ve emniyeti ar-ge faaliyetlerine yön vermektedir. Dünya otomotiv sektörünün yakın dönemdeki seyri açısından rekabeti düzenleyen ve tüketici haklarını koruyan yasal gelişmelerin yanında yakıt tüketimini azaltan, güvenliği ve verimliliği artıran ve sıkılaşan çevre düzenlemelerini ön planda tutan teknolojilerin kullanımı önem taşımaktadır [1].

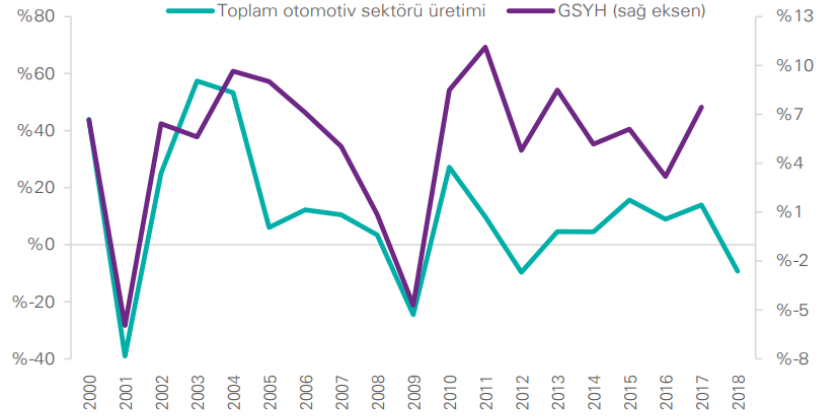


Kaynak: OICA (2016’DAN BERİ BU ALANDA VERİ AÇIKLANMIŞ DEĞİL)

Şekil 1.2 : Otomotiv üretici firmaların payları [1].

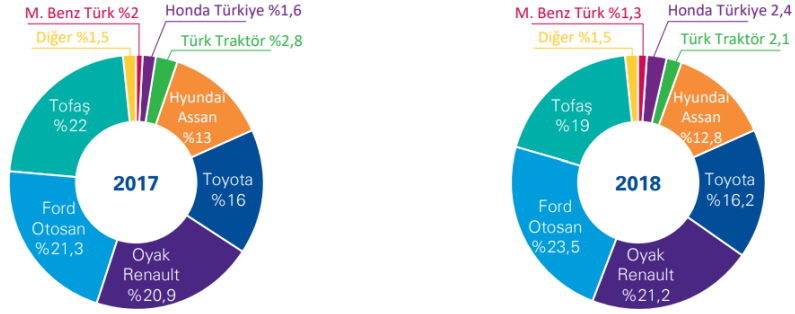
1.2. Türkiye’de Otomotiv Pazarı ve Gelecek Beklentileri

Otomotiv sektörü yüksek katma değeri, yarattığı istihdamı ve küresel ticaretten aldığı pay ile Türkiye ekonomisi açısından büyük bir önem taşımaktadır. Çok sayıda ülkeye ihracat gerçekleştiren sektör dış ticaret dengesi açısından fazla verirken demir-çelik başta olmak üzere, elektronik, yazılım, plastik, akaryakıt, enerji, tekstil ve kimya gibi pek çok sektörün de gelişimine katkıda bulunmaktadır. Otomotiv ana sanayindeki güçlü küresel oyuncular ve dünyadaki diğer otomotiv üreticilerinin tedarikçisi konumundaki yerli yan sanayi üreticileri küresel değer zincirinde oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Türkiye’de otomotiv sektörünün son 20 yıldaki üretimine bakıldığında, yurtiçi gelişmelerden daha çok küresel eğilimlerden etkilendiği görülüyor. 2008-2009 küresel finansal krizinin ardından, 2012 yılındaki borç krizi ve son olarak 2018 yılında küresel ekonomide görülen yavaşlamanın Türk otomotiv sanayinde daralmaya yol açtığı gözlenmektedir (Şekil 1.3). Şekil 1.4’de görüleceği üzere 2018 yılı verilerine göre otomobil üretiminde en büyük pay OYAK Renault’ta olurken, toplam otomotiv üretiminde ise 2018 yılında sektör liderliği ticari araçlardaki üstünlüğü nedeniyle Ford Otosan’a geçmiştir. Bunu OYAK Renault ve 2017’nin lideri olan Tofaş izlerken, otomobil üretiminde yüksek paya sahip Toyota ve Hyundai Assan da sıralamada yer almaktadırlar. Şekil 1.5’de ise toplam otomotiv payları sergilenmektedir. Türk otomotiv sanayi, üretimin yaklaşık dörtte üçünü ihraç etmektedir [1]. Küresel pazarda olası risklerden etkilenmemek, rekabet edebilmek için ve sürdürülebilir bir sektör ekosistemi oluşturulması gerekmektedir. Bunun için arge ve yatırım faaliyetlerinin ve teşviklerinin devam etmesi, artırılması yanında, nitelikli insan kaynağının artırılması ve teknolojik yatırımların devam ettirilmesi, vergi ve kredi sisteminin revizyonuna ihtiyaç duyulmaktadır.

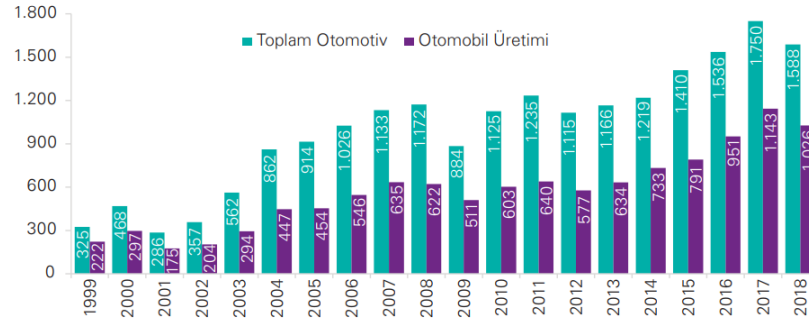


Kaynak: OSD, TÜİK

Şekil 1.3 : Türkiye’de otomotiv sektöründe yıllık büyüme oranları [1].



Şekil 1.4 : Türkiye’de Otomotiv üretiminde firma payları [1].



Kaynak: OICA

Şekil 1.5 : Türkiye’de yıllık otomobil üretimi sayıları (x1000adet) [1].

Artan çevre kirliliği karşısında sıkılaştırılan emisyon kuralları; otomotiv üreticilerinin tasarımlarında daha hafif araçlara (farklı malzeme gruplarına) ve alternatif güç sistemlerine yönelmesi için ana etkenlerden bir tanesidir. Aşağıdaki şekil 1.6’da

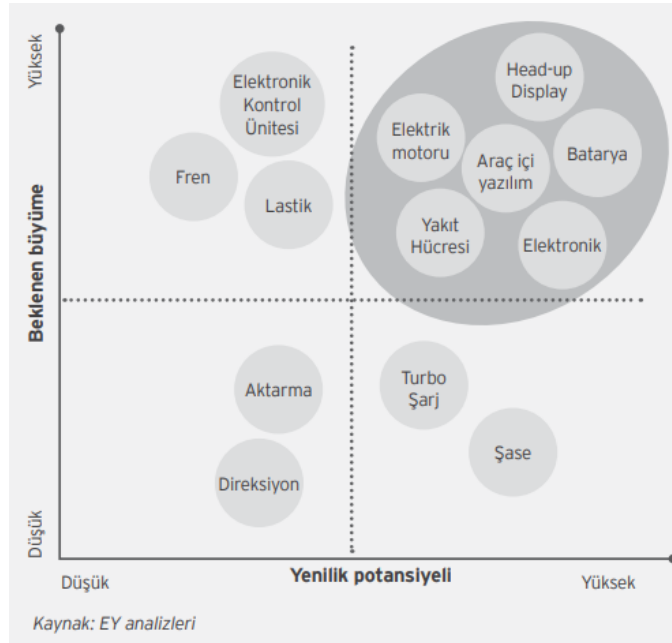
geçmişten günümüze emisyon hedefleri sunulmaktadır [3]. Yeni nesil elektrikli araçlar (BEV), hibrit sistemler (HEV), hidrojen yakıt hücresel elektrikli araçlar (FCEV) öncelikle yakıt ekonomisi ve emisyon kurallarına uyum hedeflerini sağlaması nedeniyle başta Avrupa ve Çin pazarında ve küresel pazarda popülerliğini artırmaktadır.

Ana pazarlarda geçmiş emisyon düzeyleri ve gelecek hedefleri (In gCO ₂ /km)							
	2012	2014	2015	2020	2021	2024	2025
AB	140g/km		130g/km		95g/km		2025'te -%15 2021 2030'da -%20 baz yılı
ABD	180g/km			160g/km			103g/km sonuçlanmadı
Japonya	110g/km		130g/km		106g/km		sonuçlanmadı
Çin	180g/km		130g/km		117g/km		sonuçlanmadı

Kaynak: EY analizleri, haber çalışmaları, Navigant Research, Canalys

Şekil 1.6 : Emisyon düzeyleri ve gelecek hedefleri [3].

Otomobil üreticileri, elektrikli araçları geliştirmek için çeşitli üretim yaklaşımları oluşturmaktadırlar. Üretici ve tedarikçilerin gelecekte odaklanacakları alanlar aşağıda şekilde gösterilmektedir. Bunlar arasında fren sistemlerinde yüksek orandan bir büyüme ve yenilik beklenmektedir [3]. Özellikle elektrikli araçlara olan ilgi doğrultusunda rejeneratif fren sistemleri için yeni malzeme ve yüzey geliştirilmesi kaçınılmazdır.



Şekil 1.7 : Otomotiv sektöründe üretici ve tedarikçilerin gelecekte odaklanacakları alanlar [3].

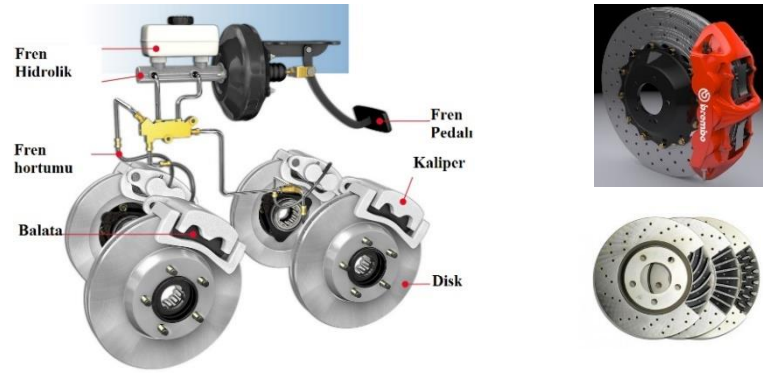
1.3. Disk Tipi Fren Sistemleri ve Temel Bileşenleri

Trafiğe çıkan araç sayısı ile trafik kazaları ilişkili olarak artmakta ve sürüş güvenliği konusu daha fazla ön plana çıkmaktadır. Özellikle araçlarda lastik tipi ve seçimi yanında fren sistemi ve bileşenleri emniyetli sürüş açısından oldukça kritiktir. Tüm sürücüler trafikte, kavşak ve virajlarda kontrollü bir geçiş sağlamak için hız azaltmak, öndeki aracın aniden fren ışıklarının yanması, aracın önüne beklenmedik bir şekilde insan, hayvan ve araç çıkması halinde ani fren yaparak aracı durdurmak için, eğimli yollarda kontrollü bir geçiş sağlamak için, aracın yüksek hızlardan düşük hızlara kontrollü bir geçişi için frene başvurmaktadır (Şekil 1.8). Tüm sürücülerin beklentisi fren sisteminin ve güvenilirliğinin yüksek olmasıdır. Kullanılan aracın sınıfına, modeline, motor hacmi ve gücüne, araç yaşına, ağırlığına, hızına, fren kullanımına, yol durumuna bağlı olarak fren performansı değişmektedir [4].



Şekil 1.8 : Fren performans testleri (Porsche).

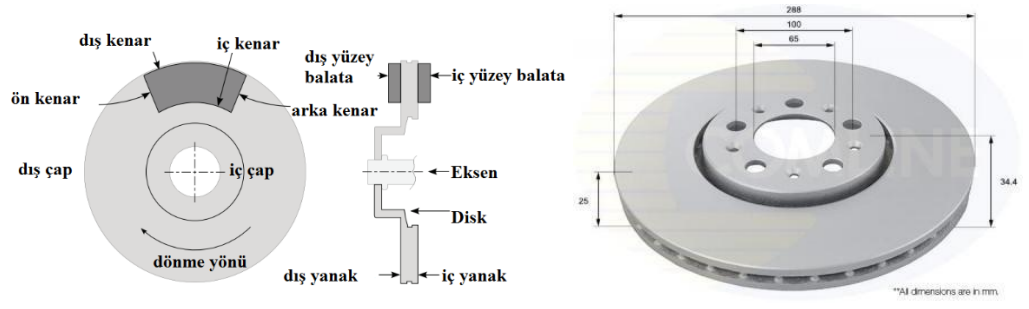
Geçmişten günümüze çok çeşitli fren sistemleri geliştirilmiştir. Araç hızlarına, fren sayısına ve performansına bağlı olarak günümüzde birçok araçta disk tipi fren sistemleri kullanılmaktadır. Disk, kaliper, balata ve hidrolik bileşenlerden oluşan disk sistemi (Şekil 1.9) ve örnek diskler aşağıda sergilenmektedir. Disk sistemleri üzerinde ısının kontrollü bir dağıtımı için özel havalandırma kanalları açılmıştır. Bunun dışında daha eski bir teknoloji ise kanpana tipi (drum) fren sistemleridir. Disk fren sistemleri kanpana sistemlere göre daha fazla yüzey alanına sahip olmalarından dolayı daha hızlı soğumaktadırlar. Aynı zamanda yüzeyleri santrifüj etkisinden dolayı kendini daha hızlı bir şekilde temizleyebilmektedir [4-6].



Şekil 1.9 : Disk tipi fren sistemi ve örnek diskler (Brembo).

Fren kullanımı kullanıcıdan kullanıcıya değişmektedir. Bazı kullanıcılar çok sık ve sert fren kullanırken bazı kullanıcılar ise daha az sayıda frenleme ile aracı yavaşlatarak kontrollü bir sürüş sağlamaktadır. Dolayısıyla fren sistemi ve bileşenlerinin ömrü kullanıcıdan kullanıcıya değişmektedir. Araçta fren sisteminin ömrü disk ve balata ikilisi arasında tribolojik davranışlara bağlıdır. Disk ve balata arasındaki sürtünme davranışları nedeniyle stabil olmayan sürtünme ve aşınma nedenli kayıplar, harcanan enerji ve frenleme mesafesi fren performansı ve ömrünü belirlemektedir. Bir fren sistemi; aracın kontrollü ve güvenli bir şekilde hızının azaltılması ve durdurulması için tasarlanmaktadır. Kısa mesafede çok yüksek hızdan düşük hıza aracın indirilebilmesi hayati öneme sahiptir. Günümüzde hala birçok kaza uygun olmayan takip mesafesi, ani hız düşümü, dalgınlık ve panik anında meydana gelmektedir. Bunun sonucunda hem maddi kayıplar hem de can kayıpları ortaya çıkmaktadır. Düzenli servis bakımı olmayan araçlarda zayıf frenleme sistemleri, çeşitli dış etkenler nedeni ile (yoğun kar, don, yağmur, kum ve çamur vs.) fren sisteminin zayıflaması da fren performansının azalmasına kontrolden çıkmasına ve bunun sonucunda kazalara yol açabilmektedir. Güvenli bir sürüş için fren sisteminin performansı disk ve balata arası sürtünme davranışına bağlı olarak kontrol edilmektedir (araç lastiklerinin uygun özelliklere sahip olması koşuluyla). Sürtünme nedeni ile ortaya çıkan ısı oldukça kritik öneme sahiptir. Fren diski üzerinde mekanik ve termal gerilmeler, bunun yanında atmosferik yol şartları sürtünme ve aşınma performansını belirlemektedir. Günümüzde en çok disk tipi fren sistemleri kullanılmaktadır. Frenleme esnasında kinetik enerji termal enerjiye dönüşerek frenleme gerçekleşmektedir. Disk sisteminde belirli et kalınlığı ve çapına sahip metalik esaslı disk (rotor) ve bir kaliper tarafından sabitlenen ve taşınan polimerik esaslı balatalar (ped veya sürtünme malzemesi) diski her iki yüzeyine

frenleme esnasında basarak diskin hareketini sınırlandırmakta ve frenleme yaptırmaktadır (Şekil 1.10). Bu esnada disk ve balata arasında oluşan sürtünme etkisiyle kontrollü bir fren yapılmasına olanak sağlanmaktadır. Disk ve balata arasında belirli bir sürtünme katsayısına ihtiyaç duyulmaktadır. Aksi halde çok düşük sürtünme katsayısı karşısında fren kontrolü ortadan kalkmaktadır. Çok yüksek sürtünme katsayısı olması durumunda ise fren hidroliğine olumsuz etkiler, gereğinden fazla enerji ve yakıt sarfiyatı meydana gelmektedir. Bu nedenle fren sistemi tasarımcıları belirli bir sürtünme katsayısı aralığında çalışmayı sağlayacak tasarım ve malzeme çiftleri üzerinde yoğunlaşmaktadırlar. Bu noktada sınırlayıcı ana faktör metalik olmayan ve daha düşük termal dayanıma sahip olan balata malzemesinin çalışma sıcaklığıdır. Sürtünme nedeni ile artan ısı balata malzemesinin dayanımının ve yüzey direncinin azalmasına bağlı olarak stabil olmayan bir sürtünme rejimine yol açmaktadır. Bu durumda disk balata arası sürtünme kontrol dışına çıkmaktadır. Ani frenleme ve aracın durdurulması emniyet koşullarının dışına çıkmaktadır [4]. Fren performansının yanında disk tipi fren sistemlerinden beklentiler arasında disk-balata arasına giren partiküllerin neden olduğu gürültünün belirli bir düzeyde olması, disk aşınmasından kaynaklı partikül salınımının az olması çevresel kirlilik açısından oldukça kritik öneme sahiptir. Diskin belirli bir et kalınlığının birçok noktada sınır değerlerin altına düşmesi veya disk-balata arası mesafenin belirlenen sınır değerlerin altına inmesi durumunda değiştirilmesi, yenilenmesi önerilmektedir. Bu nedenle servise giren araçlarda fren diski et kalınlığı, kalınlık değişkenliği, çap ölçümleri (dış ve iç çap), paralellik kontrolü zorunlu olarak yapılmaktadır. Bunun yanında balata malzemesi et kalınlığı, yüzey durumu da kontrol edilmektedir [4-6]. Balata malzemesi aşınan bir malzeme olması nedeniyle kullanıcı şartnameleri doğrultusunda düzenli olarak değiştirilmektedir. Genel olarak disk ömrüne göre balata ömrü 1/2-1/3 oranında değiştirilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşık olarak 80-100.000km disk ömrü, 25-50.000 km balata ömrü verilmektedir. Kullanıma ve yol şartlarına göre değişkenlik göstermektedir. Periyodik bakımlar sırasında kontrolü mutlaka yapılan fren balatasının durumu temelde sürücü tarafından da kolayca anlaşılabilir. Fren yaptığınız zaman yoğun ve rahatsız edici bir ses geliyorsa balatalarda bir sıkıntı olabilir, fren pedalına bastığınızda araç hemen tepki vermiyorsa, fren boşluğu yaşıyorsa balatalarda sorun var demektir. Bu durumda balata değişimi kaçınılmazdır [5].



Şekil 1.10 : Basit bir fren diski üzerinde temel kavramlar ve genel ölçüler [6].

BÖLÜM 2. FREN DİSKİ ALAŞIMLARI

2.1. Fren Disklerinde Kullanılan Alaşımlar

Fren disk sistemleri bir aracın hareketiyle oluşan kinetik enerjiyi sönümleyerek ısı enerjisine çevirmekte ve bunu yaparken sürtünmeyle ortaya çıkan ısının hızlı şekilde diskten ve karşı yüzeyde balatalardan atılması gerekmektedir. Bu nedenle fren disklerinin termal özellikleri (ısı iletkenlik, ısı kapasitesi vb.) yanında tekrarlı gerilmelere karşı yorulma dayanımı, aşınma direnci, korozyona karşı dayanıklılık gibi özellikleri göz önünde bulundurulmaktadır. Sektörde alüminyum alaşımı diskler mevcut olup, artan sürtünme ısı nedeniyle deforme olmakta ve yeterli dayanım sağlayamamaktadır. Kompozit esaslı diskler üstün performans göstermesine karşın yüksek maliyetleri nedeniyle lüks segment araçlarda tercih edilebilmektedir. Disk malzemesi olarak çoğunlukla fayda-maliyet analizleri göz önüne alındığında gri dökme demirler yüksek ergime noktasına sahip olması, iyi bir titreşim sönümleme özelliği ve termal özellikleri ile öne çıkmaktadır. Bunun yanında kolaylıkla dökülebilir ve işlenebilmektedirler. En zayıf özellikleri atmosferik koşullarda zayıf korozyon direnci ve aşınma performanslarıdır [7,8].

2.1.1. Gri dökme demirler ve türleri

Katılaştıktan sonra bileşimindeki karbonun büyük bir kısmı serbest grafit lamelleri hâlinde bulunan bir dökme demir çeşididir. Kırıldığı zaman kırılma yüzeyi gri renkli olmasından dolayı gri dökme demir olarak veya lamel yapısından dolayı lamel grafitli dökme demir olarak adlandırılmaktadır [7, 8]. Gri dökme demirin bileşiminde ana yapısı demirden başka karbon, silisyum, manganez, fosfor ve kükürt elementleri bulunmaktadır. Kimyasal kompozisyonunda bulunan elementler tablo 2.1’de sergilenmektedir. Kükürt ve Fosfor elementleri gri dökme demirin içinde bulunması arzu edilmeyen ve sınırlı oranda kabul edilen elementlerdir [7, 8].

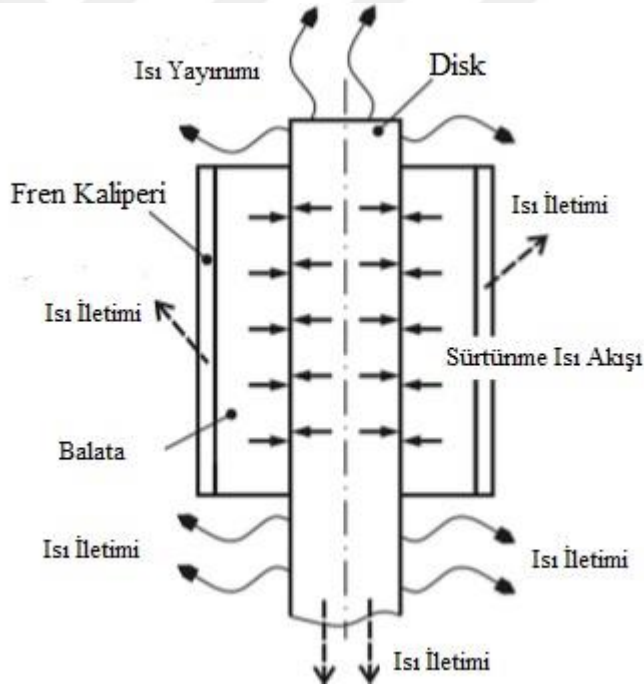
Tablo 2.1 : Otomotivde Kullanılan Gri Dökme Demir Alaşımlarının Kimyasal Bileşimi ve Mekanik Özellikleri [6].

Kalite	GG15	GG20	GG25
Kimyasal kompozisyon (%)			
Karbon, C	3.5 - 3.7	3.3 - 3.5	3.2 - 3.4
Silisyum, Si	2 - 2.4	1.4 - 2.4	1.4 - 2.2
Mangan, Mn	0.5 - 0.8	0.7 - 1	0.7 - 1
Fosfor, P	max 0.2	max 0.2	max 0.2
Kükürt, S	max 0.15	max 0.15	max 0.15
Mekanik Özellikler			
Çekme (MPa)	150	200	250
Uzama (%)	0.3-0.8	0.3-0.8	0.3-0.8
Brinell Sertlik (HB)	150-200	170-210	180-240
Basma Muk. (MPa)	500-700	800	950
Elastik Modül (GPa)	75-90	100	110
Termal özellikler			
Ergime noktası	1200 °C	1380 °C	1380 °C
Isıl iletkenlik kats.	50 W/m.K	46 W/m-K	46 W/m-K
Termal genişleme kats.	10 µm/m-K	11 µm/m-K	13 µm/m-K
Isıl kapasite	0.42 J/(kg·K)	0.46 J/(kg·K)	0.49 J/(kg·K)

BÖLÜM 3. FREN DİSKLERİNDE HASAR MEKANİZMALARI

Fren sistemi, bir aracın tasarım ve imalatında en önemli emniyet parçalarından bir tanesidir. Fren sisteminin işlevi, aracın hareketini yavaşlatmak veya durdurmaktır. Fren sistemi, sürücünün, yolcuların ve yoldaki insanların güvenliği ile doğrudan ilgilidir. Genel olarak, disk frenler ve kampana frenler gibi otomobil sektörlerinde iki tip fren sistemi kullanılmaktadır. Fren sisteminin temel prensibi, aracın hızlanması ile sahip olduğu kinetik enerjisini termal enerjiye dönüştürerek kontrollü bir duruş ve yavaşlama sağlamaya yardımcı olmaktır. Aracı durdurmak için iki mekanik bileşen (disk-balata) arasında sürtünme kuvvetleri meydana gelir, bu iki bileşen arasında oluşan sürtünme sonucunda ortaya çıkan ısının fren bileşenlerinden kontrollü bir şekilde uzaklaşması oldukça önemlidir. Disk freni, otomobil endüstrisinde en yaygın kullanılan teknolojilerden biridir. Fren pedalına basıldığında, ana silindirdeki hidrolik sıvı, pistonu kaliperden iter ve balata dönen disk ile temas eder, aralarındaki sürtünme, aracın hareketini geciktirir ve son olarak araç durmasına yardımcı olmaktadır [10]. Fren balataları ve disk fiziksel olarak birbirleriyle temas halindeyken, aralarında sürtünme meydana gelir ve bu da ısı oluşumuna neden olur. Normal frenlemede, kaliper pistonunda üretilen basınç miktarı çok daha azdır, bu nedenle üretilen ısı miktarı daha azdır. Bu nedenle, disk freninin performansı ciddi şekilde engellenmez ve diskin kullanım ömründe de önemli bir azalma olmaz. Ancak ani veya sert frenleme kuvveti uygulandığında, aracı durdurmak için balata ve disk arasındaki sürtünme artar. Bu, disk ve balata arasında büyük miktarda ısı üretir. Isı üretim miktarı arttığında, fren sisteminin performansını etkiler. Bu nedenle, üretilen ısının dağıtılması, fren sisteminin doğru çalışması için önemlidir. Isı, yüzeyden konveksiyon, iletme ve radyasyon gibi üç farklı ısı transfer modunda dağılır. İletim, ısının bir katıdan aktarıldığı ısı aktarım modudur. Disk freni durumunda, iletim diskten göbeğe ve ayrıca balata vasıtasıyla gerçekleşir. Göbek, diskin uzatılmış bir kısmı veya tamamen ayrı bir bileşen olabilir, nispeten daha küçük bir çapa sahip ancak daha büyük bir kalınlığa sahipken, balatalar, yüksek sürtünme katsayısına sahip olan bir kompozit malzeme ile doldurulur ve gerçekte aracı durdurmaktan sorumludur. Isı iletimi,

balata ve disk malzemenin termal iletkenliğine bağılı olarak aktarılmaktadır. Isı iletkenliği farklı malzemeler için ısı iletimi farklı olduğundan, ısı transfer hızı disk fren malzemesine de bağılıdır. Konveksiyonda ısı, katı yüzey ile katı yüzeye bitişik bir sıvı tabakası arasında iletilir ve daha sonra ısı, konveksiyon yoluyla sıvı ortamından akar. Disk freni durumunda, yüzey üzerinde akan hava ısıyı yayar ve diskin sıcaklığını azaltır. Araç hareket halindeyken, fren diskinin yanında daha fazla türbülans gelişir. Bu da ısı transfer hızını arttırmaktadır (Şekil 3.1). Isı transferinin kapasitesi, konveksiyon katsayısına ve diskin alanına bağılıdır. Konveksiyon katsayısı farklı akışkanlar için de farklıdır [10]. Dolayısıyla güvenilir bir frenleme için disk üzerinde oluşan ısının kontrolü ve ısı dağılımı frenleme performansını önemli ölçüde etkileyen faktörlerin başında yer almaktadır. Fren balata arasında uygun olmayan ısıl dağılımı hem frenleme performansını hem de duruş süresini olumsuz etkilemektedir.



Şekil 3.1 : Fren ve disk arasındaki sürtünme ve aşınma ilişkisi.

Yeterli frenleme kuvveti sağlamak için diski ve balata çifti arasında sıcaklıklar ortalama 300°C'ye kadar uygun şekilde çalışmaktadır. Bu sıcaklıkların üzerine çıkılması halinde disk yüzeyinde sıcak noktalar oluşmakta ve bunun sonucunda mikro termal çatlaklara, yüzeyden parça kopmalarına, yoğun gürültü ve titreşimlere yol açabilmektedir. Termal kamera ile yapılan ölçümlerde bu sıcak bölgelerde sıcaklıkların 500 °C'ye ulaştığı tespit

edilmiştir. Çevresinde ise ısı dalgalanmalar 300-600 °C arasında değişmektedir. Bu sıcaklıklarda gri dökme demir yapısında perlitten martenzite doğru kalıcı bir faz değişikliği söz konusu olmaktadır. Martenzit (sert faz) oranının artması sonucunda disk üzerinde boyutsal değişimlere, çarpılmalara, kalınlığında bölgesel değişimlere neden olmaktadır. Orijinal diskin boyutları değiştikçe ve diskteki kalınlık farklılıkları arttıkça normal fren kuvveleri ve performansı da değişmektedir [10]. Bu nedenle ısının belirli sınırlar arasında tutulması veya kontrollü bir şekilde uzaklaştırılması emniyetli bir frenleme açısından oldukça kritiktir. Fren disk üzerindeki kontrolsüz ısı dağılımı ve bunun olumsuz etkileri termal olarak homojen olmayan bir ısı dağılımına neden olmaktadır. Aracın hızı, yükü, yol şartları gibi birçok etken disk-balata arasındaki sürtünme davranışını kontrol etmektedir. Uygun olmayan sürtünme koşullarında araçta direksiyonda titreşim artışı, fren zayıflaması, sürücü ve yolcular için konfor kaybolması gibi teknik problemler ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle disk üzerinde düzenli bir şekilde kalınlık değişimi, çarpılma, yüzey kontrol edilmesi önerilmektedir. Fren diskleri ile balata yüzey arasında karşılıklı malzeme transferi söz konusu olabilmektedir. Balata malzemesi içerisinde sert ve katı bileşenler disk yüzeyinde kontrolsüz bir aşınmaya veya erozyona yol açabilmektedir. Bu durum disk üzerinde aşınma kraterleri ile kalınlık değişimlerinin artmasına yol açmaktadır. Bazen "soğuk erozyon" olarak da adlandırılan frensiz aşınma, disk kalınlığı değişkenliğine bağlıdır ve "soğuk titremeye" yol açabilir [10]. Diskin çeşitli nedenler ile deformasyonu, çarpılması, yanlış montajı, uygun olmayan disk-balata mesafesi, araya giren yabancı parçacıklar, artan ısı etkisiyle genleşme, faz dönüşümü ve balata yüzeyinden ısı nedeniyle ayrılan parçacıkların diske yapışması gibi birçok kontrolü zor olan süreksizlikler sürtünme ısısının hızla artışına, araçta gürültüye ve kontrolsüz bir aşınmaya yol açmaktadır. Fren konforunda araç lastik basıncı ve lastik tipi gibi birçok etkende fren performansını etkilemektedir. Aracın yapısı, süspansiyonları, lastik kuvvetindeki dengesiz ve değişkenlik, tekerlek göbeği ve yatak ünitesinin esnekliği nedeniyle diskin yuvarlanan sert gövde hareketine neden olabilir. Bu tür dinamik sapmalar, geometrik düzensizlikler ile aynı tip titreşimlere neden olur. Bu nedenle, titreşim artışına katkıda bulunabilirler. Tekerlek göbeği taşıyıcı tasarımı ve sertliği, disk üzerinde deformasyon, kalınlık değişimine de katkıda bulunmaktadır [10]. Bunun yanında kullanıcı nedenli faktörlerde önem taşımaktadır. Fren sayısı, periyodu, sert fren kullanımı, uzun süre frene baskı, yokuş aşağı ilerleme ve ani frenleme gibi birçok faktör

de disk ömrünü etkilemektedir. Düzensiz aşınma ve termal etkiler birleşince disk üzerinde aşınma kontrolsüz bir şekilde devam etmektedir. Diskten kopan metalik parçacıkları (metalik esaslı fren tozu) ısının etkisiyle hızla oksitlenmekte yüzeyde bir tabaka halinde sürtünme ara yüzeyine girebilmektedir. Metalik disk yüzeyi yerine bu oksit esaslı film tabakası sürtünme davranışını kontrol etmeye başlamaktadır. Sıcaklığın artması ile balata malzemesinin yumuşaması, yüzeyden kopan parçacıkların etkisi ile balata yüzey özellikleri bozulmakta, sürtünme kaybına neden olmakta ve bunun sonucunda frenleme performansı azalmaktadır [10]. Belirli bir fren torkunu elde etmek için, daha düşük sürtünme katsayısına sahip bir balata malzemesi daha yüksek bir fren basıncı seviyesine ihtiyaç duyar. Bu, temas yüzeyinde daha düzgün dağılmış basınç ve sıcaklık alanlarını gerektirir. Benzer şekilde, sürtünme katsayısı seviyesinin azaltılması titreme problemlerini ve aynı zamanda çatlak olasılığını azaltmaktadır. Fren tork değişimi ve fren basıncı değişimi arasındaki ilişki mutlak sürtünme seviyesinden etkilenmektedir [10]. Disk malzemesi olarak gri dökme demirin termal kararlılığı da üzerinde durulması gereken önemli noktalar arasındadır. Diskin tasarımı kadar alaşımın talaşlı işlem öncesi ısıl işlemi ve malzeme kalitesi diskin ömrünü etkileyen önemli faktörler arasında yer almaktadır. Yüksek karbon disk malzemesinin seçimi ve üretim sırasında gerilim azaltıcı ısıl işleminin uygulanması, termal kararsızlık ve distorsiyon problemlerini en aza indirebilmektedir. Havalandırılmalı fren diskleri, ağırlık azaltma ve ek konvektif ısı transferi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durum ısının dağılımı açısından olumlu olmasına karşın disk etrafındaki eşit olmayan bir sıcaklık alanını etkileyerek titreme problemlerini artırabilmektedir. Bu diskler yalnızca nispeten hafif örneğin 1000 kg'ın altında binek otomobiller için kullanılabilir. Alüminyum kompozit disklerin kullanımına ilgi olmasına karşın yüksek termal genleşme katsayısı ve düşük ısı kapasitesi nedeniyle büyük olasılıkla daha büyük titreşim, çarpılma problemler yaratacaktır. Bununla birlikte, seramik malzemeler gibi titreşimi azaltma kabiliyetine sahip olabilecek karbon fiber kompozit malzemeler vardır. Düşük ısıl genleşme katsayısı ve düşük aşınma nedeniyle titremeden kaçınılabilmektedir. Ancak, yüksek maliyeti nedeniyle endüstrilerde yaygın olarak kullanılmamaktadır [10]. Disk tipi frenler normal frenleme sırasında büyük termal gerilmelere ve ani ve sert frenleme sırasında çok yüksek termal gerilmelere maruz kalır. Tipik binek araçlarında anlık 900 °C sıcaklığa kadar çıktığı görülebilmektedir. Yüksek sıcaklıkta çıkımların olası sonuçları şunlardır: Isıl gerilmeler nedeniyle oluşan yüzey

çatlakları; disk üzerinde büyük miktarlarda plastik deformasyon. Termal şokun etkisi ile disk kalınlığı boyunca ve disk frenin yarıçapı boyunca artan makroskopik çatlaklar [10]. Aşağıda disk üzerinde meydana gelebilecek olası hasar mekanizmaları kısaca özetlenmektedir.

3.1. Disk Üzerinde Aşırı Aşınma, Kalınlık Azalması

Disk et kalınlığı minimum kalınlıktan daha düşük olması durumu disk üzerinde aşırı aşınmanın işaretidir. Disklerin düzenli olarak kontrol edilmemesi veya doğru zamanda değiştirilmemesi durumunda karşımıza çıkmaktadır (Tablo 3.1.a). Bunun sonucunda fren yaparken daha düşük performans, aşırı gürültü ve titreşim ortaya çıkmaktadır. Bu durumu engellemek için fren sistemini ve ilgili bileşenleri düzenli olarak kontrol etmeli, uygun zamanda değişim yapılmalıdır. Yeni diskleri sıkma işlemi sırasında üretici tarafından önerilen doğru tork ve sıra ile takılmalıdır [11].


3.2. Disk Üzerinde Aşırı Aşınma, Yüzeyde Çizikler

Disk üzerinde yoğun çizik ve derin kanallar (Tablo 3.1.b) gözleniyorsa balatanın hızla aşındığı ve balata plakasının diske temas ederek çizmesine neden olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum frenleme verimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Fren esnasında çok yüksek gürültü oluşumuna neden olabilmektedir. Bunun engellemek için disk ve balataların uygun zamanda değiştirilmesi önerilmektedir [11].

3.3. Disk Üzerinde Aşırı Aşınma, Balata ve Disk Arasında Derin Kanallar

Aşırı balata ve disk aşınması, arka plakanın kaliper içinde hareket etmesine neden olabilir. Bu durumda, aşınmış balatanın arka plakası kaliper içerisindeki oturma yerinden ayrılarak şapka ve disk yüzeyi arasında derin oyuklara (Tablo 3.1.c) neden olmuştur. Daha uzun pedal vuruşu ve daha fazla gürültü ile daha düşük frenleme verimine yol açmaktadır. Diskleri ve balataları değiştirip, gerekirse kaliperi kontrol edilmeli ve onarılmalıdır [11].

Tablo 3.1 : Disk hasar mekanizmaları [11].

		
a	b	c
		
d	e	f
		
g	h	i
		
j	k	l
		
m	n	o

3.4. Termal Nedenli Hasar, Yanlış Kullanım Sonucu Çatlaklar

Disk yüzeyinde mavi renkli lekeler oluşmakta ve bunun sonucunda metalurjik değişimin neden olduğu sert ve kırılğan hale gelen makroskobik boyutlarda çatlaklar (Tablo 3.1.d) gözlenmektedir. Bunun ana nedeni frenlerin normal sınırlarının ötesine aşırı yüklenmesinden kaynaklanmaktadır. Bu, agresif sürüş, aşırı yük taşıma veya yoğun/olağandışı fren kullanımından kaynaklanabilir. Fren performansını azaltır, gürültüyü ve titreşimleri artırır. Disklerin değiştirilmesi, fren sisteminin yanlış kullanılmasını önlenmesi önerilmektedir [11]

3.5. Termal Nedenli Hasar, Yanlış Kullanım Sonucu Disk üzerinde Renklenme

Disk in alıştıırılması sürecinde sürtünme görünen yüzeyler aşırı ısınmakta ve renk tonu değişmektedir (Tablo 3.1.e). Bu, sürtünme yüzeyinde metalurjik bir değişikliğe yol açar. Azalan sürtünme katsayısından kaynaklanan düşük fren verimi balatanın ve disk in ömrünü azaltabilecek titreşimler oluşabilir. Diskleri değiştirme ve doğru alıştıırma prosedürünün uygulanması önerilir. Yani ilk 200 km boyunca orta derecede fren kullanılmalıdır [11].

3.6. Uygun Olmayan Montaj, Temas Yüzeyindeki Bozulma ve Görsel Çatlaklar

Disk in montajı esnasında sıkma sırası yanlış, uygun olmayan sıkma torku uygulanması halinde temas yüzeyleri hasar görebilmekte ve çatlama riski (Tablo 3.1.f) oluşturmaktadır. Bunun sonucunda ilk fren uygulamalarında titreşim meydana gelmektedir [11]. Uygun olmayan montaj, göbek temas yüzeyindeki bozulma (Tablo 3.1.g) da gerektiğinden fazla sıkma ve sıkma işleminin sırasında üretici tarafından önerilen tork ve sırayı dikkate almamak bu hatanın başlıca sebeplerindedir. Tam fren arızası, disk temas yüzeyinden ayrılmalara yol açabilmektedir. Disk üzerinde lokal alanlarda bazı mavi lekeler, daha koyu renkler (Tablo 3.1.h) gözlenebilmektedir. Bu durum yerel aşırı ısınma belirtisidir. Sürekli artan gürültü ve titreşime yol açmaktadır. Göbek temas yüzeyinin bozulması ve/veya etrafındaki çatlamlar (Tablo 3.1.ı) konumlandırma vidasında çok fazla şiddetli sıkma torku kullanılmış olmasından kaynaklanmaktadır [11]. Disk üzerinde kir ve paslı göbek yüzeyi (Tablo 3.1.j) montaj sırasında balata ve disk yüzeyleri arasında düzensiz temasa ve disk in düzensiz aşınmasına yol açan yanlış hizalamaya neden olur. Disk yüzeyinin

salınımına yol açan, gürültü ve titreşime neden olacak disk kalınlığı değişimine etki eder. Disk çıkarılıp, tekerlek göbeği ve diskin yüzeylerini dikkatlice temizlenmesi önerilmektedir [11].

3.7. Frenleme Yüzeyinden Ayrılan Disk Kafası

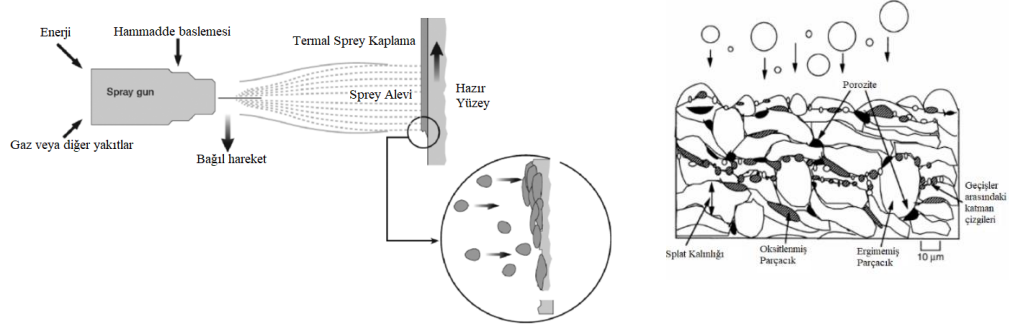
Yanlış hizalama ve kaliperin ve diskin yanlış montajı, yanlış konumlandırmasından kaynaklanan mekanik baskılar bu hasarı oluşturabilmektedir. Bu, fren yüzeyinin (Tablo 3.1.k) asimetrik aşınmasına neden olur. Ayırma işleminden sonra mekanik arıza ile birlikte frenleme sırasında yüksek ses ve titreşim oluşur. Arızalı bileşenleri değiştirilmesi ve üretici tarafından önerilen tork ve sırayı izleyerek yeni diskler takılması önerilmektedir. [11]

3.8. Diskte Derin Kanal Açma

Yol şartlarına bağlı olarak kir, pas, katı ve sert parçacıklar balata ve disk arasında çok karışık sürtünme malzemesinin olması durumunda derin kanal oluşumuna (Tablo 3.1.l) neden olmaktadır [11]. Disk yüzeyinde balata (karşı sürtünme) malzemesi birikmesi sonucunda yüzey kirlenmesi (Tablo 3.1.m) meydana gelmektedir. Bu genellikle kötü kalitede veya uygun olmayan özelliklerde fren balatalarının takıldığı yerlerde ortaya çıkmaktadır [11]. Bunun yanı sıra montaj esnasında kaliperin yanlış montajı hizalanmaması ve uygun ara yüzey mesafesinin sağlanmaması sürtünme nedenli aşırı ısı artışı ve yüzeyde lokal lekelenme ve renk değişimleri ile birlikte dengesiz aşınmaya (Tablo 3.1.n) yol açmaktadır. Benzer şekilde hızla aşınan balata sonrasında balata metali ile diskin teması da kontrolsüz bir aşınmaya (Tablo 3.1.o) neden olmakta ve aşırı gürültü oluşturarak diske zarar vermektedir [11]

BÖLÜM 4. TERMAL SPREY KAPLAMA YÖNTEMLERİ

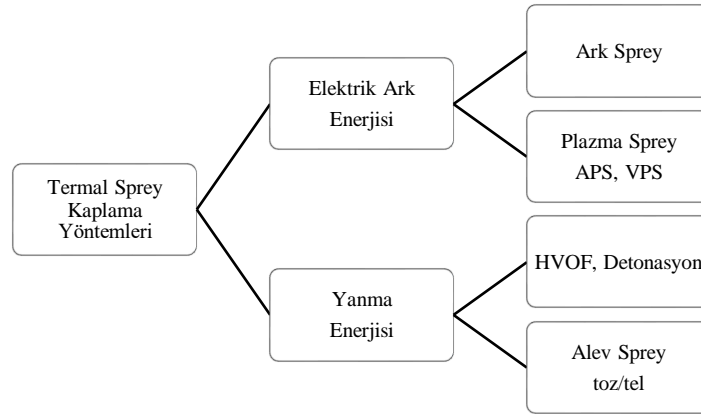
Termal sprej kaplama yöntemi metalik veya metalik olmayan malzemelerin bir ısı kaynağı (alev, plazma, ark vb.) yardımı ile eriyik ya da yarı eriyik halde bir altlık üzerine yüksek hızlarda biriktirilmesini sağlayan kaplama yöntemleri ailesidir. Bu yöntemler ile oluşturulan yüksek özellikli kaplamalar, sertlik, aşınma, tribolojik özellikler, yüksek sıcaklığa karşı direnç, çeşitli kimyasallardan ileri gelebilecek dış etkiler ve çevresel oksidasyon, korozyon gibi durumlara karşı koruma sağlamaktadır. Kaplama malzemeleri toz, çubuk, tel şeklinde olabilmektedir [12, 13]. Ergiyik veya yarı ergiyik formundaki partiküllerin yüksek enerji ile altlık yüzeyine çarpması sonucu hızlı katılaşması gerçekleşir ve oluşan katmanlar birbiri üzerinde lamelli bir kaplama yapısını meydana getirmektedir [17]. Termal sprej ile yüzeyde biriken kaplama tabakasının porozite, oksit, tamamen ergimemiş, ergimemiş veya yarı ergimemiş parçacıklar ve mikro çatlaklardan oluştuğu şekil 4.1'de gösterilmiştir. Oksit kalıntıları, püskürtme jetindeki sıcak partiküllerin dış atmosfer ile reaksiyonundan dolayı oksitlenmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Milyonlarca partikül aynı anda ısıtıldığından her biri aynı ısı derecesine gelmediğinden taneciklerin bir kısmı tamamen ergimemekte ve kaplamada porozite ve ergimemiş tanecikler meydana gelebilmektedir. Bu durum termal sprej yöntemine, seçilen proses parametrelerine (sprej mesafesi, besleme oranı, gaz akış hızları vb.) ve püskürtülen malzemeye (toz türü, toz boyutu, yoğunluğu, morfolojisi, üretim şekli vb.) bağlı olarak değişmektedir [13]. Bunun yanında uygulamaya ve amaca bağlı olarak termal sprej yöntem seçimi ve sistem ekipmanları kaplama kalitesini etkilemektedir. Kaplamanın yüzeye tutunması mekanik bir tutunma ve kilitleme ile gerçekleşmektedir. Dropletlerin soğuk altlık yüzeyine çarpması ile hızlı katılaşan parçacıklara splat adı verilmektedir. Splatlar birbiri üzerinde ve altlık üzerinde mekanik bir tutunma ile kaplama tabakasının oluşturulmasına ve yapışma dayanımına etki etmektedir. Robotik veya plc kontrollü uygulamalar ile kaplama tabakası kalınlıkları homojen bir şekilde elde edilebilmektedir.



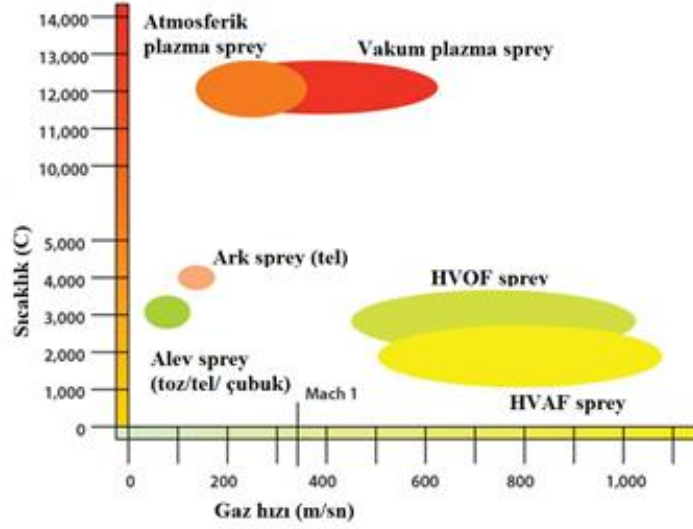
Şekil 4.1 : Termal sprej tabakasının oluşumunun gösterimi [13].

4.1. Termal Sprej Kaplama Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Termal sprej yöntemleri ısı kaynaklarına göre farklı şekilde adlandırılmakta ve sınıflandırılmaktadır (Şekil 4.2). Genel olarak elektrik ark enerjisi ve alev yanma enerjisine bağlı olarak iki grupta toplayabiliriz. Elektrik ark enerjisi ile metalik esaslı kaplamaların üretiminde tercih edilen elektrik ark sprej kaplamalar ve çoğunlukla yüksek ergime noktasına sahip malzemelerin kaplanmasında tercih edilen plazma sprej kaplamalar üretilebilmektedir. Yanma enerjisine bağlı olarak düşük hızlarda alev sprej ve yüksek hızlarda alev sprej kaplama yöntemleri bulunmaktadır. Her yöntemin birbirine göre üstünlükleri ve sınırlı uygulamaları mevcuttur. Prosesler arasında genel farklılıklar sprej hızı ve proses sıcaklığına (Şekil 4.3) bağlı olarak değişmektedir [17].



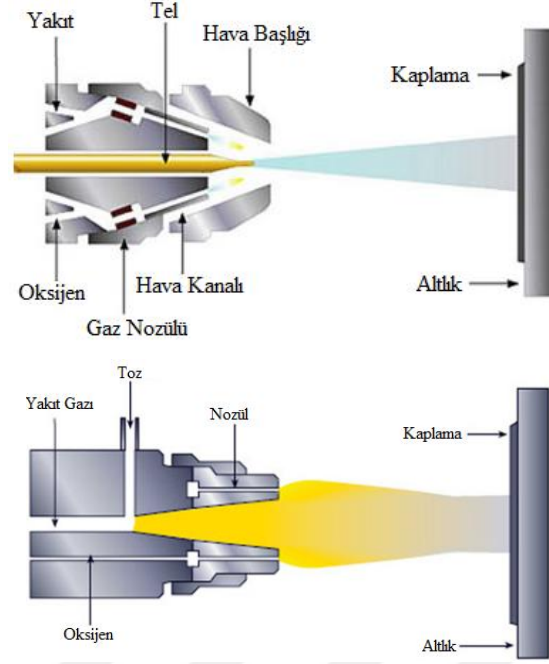
Şekil 4.2 : Isı kaynaklarına göre termal sprej kaplama yöntemleri.



Şekil 4.3 :Termal sprey yöntemlerinin sıcaklık -gaz hızı grafiği.

4.1.1. Alev sprey

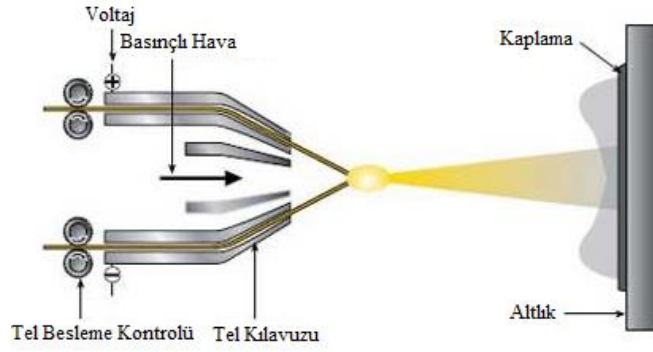
Tel veya toz formdaki kaplama malzemesini eritmek için ısı kaynağı olarak alev kullanılmaktadır. Tel şeklindeki malzemeler bir besleme düzeneği yardımıyla alev jeti içerisine ulaştırılır, eritilir ve sistemdeki gazların yüksek debisinden faydalanarak kaplanacak yüzey üzerine püskürtülür. Toz formdaki kaplama malzemeleri ise bir taşıyıcı gaz yardımıyla yanma odası içerisine beslenmektedir [12]. Toz kullanılması durumunda toz alev sprey, tel kullanılması durumunda tel alev sprey adını almaktadır (Şekil 4.4). Tel alev sprey prosesinde tel, spreyye kullanılan torç ucunda yakıt gazı (asetilen, propan, metan vb.) ve oksijen kombinasyonu ile alev jeti oluşturulmaktadır. Dropletler hava basıncı ile atomize olmaktadır. Bu akış ile partiküller altlık malzemesine itilerek kaplama tabakası yüzeyde oluşturulmaktadır. Burada unutulmaması gereken durum, plazma sprey kaplama sistemine kıyasla alev sprey kaplama yönteminin mekanik özellikleri açısından yetersiz kaldığı ve temelinde yapışma dayanımını daha zayıf, porozite oranı yüksek kaplamalar elde edilebilmekte çoğunlukla yüksek gerilme altında çalışmayan yüzeylerde tamir ve korozyondan koruma amaçlı uygulamalarda tercih edilmektedir. Yüksek kalitede yüksek yapışma gerektiren uygulamalarda yüksek hızda alev sprey (HVOF) veya plazma sprey prosesleri tercih edilmektedir. Kaplama yapısı yoğun ve oldukça yüksek aşınmaya dirençli kaplamalar bu iki yöntemle üretilmektedir [15].



Şekil 4.4 : Tel /Toz alev spreynin şematik görünümü [15].

4.1.2. Elektrik ark spreynin

Bu yöntemde altlık malzemeyi kaplamak için tel şeklinde metalik esaslı kaplama malzemeleri kullanılabilir. Bir elektrik arkının içerisinde iki metal telinin beslenmesi ve aralarında ark oluşturulması ile ergitilmesi ve bu ergime oluşan partiküllerin önceden hazırlanmış (kumlanarak) yüzeye doğru yönlendirilmesi ile bir kaplama tabakası oluşturulmaktadır. Ark spreynin sistemi eş zamanlı ve devamlı bir şekilde iki metal teli aynı hız oranıyla besleyen ekipmandan oluşur. Teller sırasıyla anod ve katod olarak görev yapmakta olup temas noktasında 6000 °C civarında sıcaklığa sahip bir ark meydana gelmektedir. Bu sıcaklık telleri eritmeye yeterlidir. Daha sonra eriyik haldeki malzeme yüksek basınçlı hava ile atomize edilerek yüzeye püskürtülür. Ark spreynin sistemi için sünek ve elektriksel olarak iletken malzemeler kullanılabilir. Şekil 4.5 elektrik ark termal spreynin sistemini göstermektedir [12].



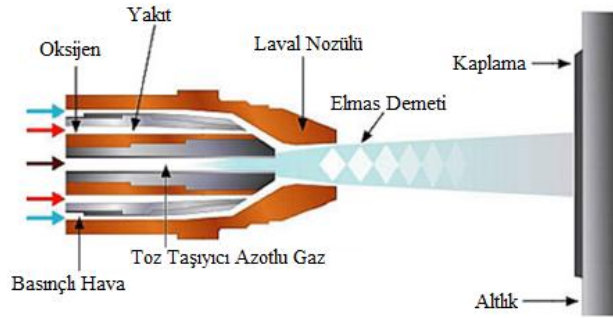
Şekil 4.5 : Elektrik ark termal sprej sistemi [12].

Ark sprejin avantajları; altlığa ısı girdisinin az olması sebebiyle düşük gerilme, alev sprejden daha yüksek bağ mukavemeti, daha kalın kaplamaların yapılabilme kabiliyeti, metalik olmayan malzemelerin üzerine (plastik, seramik, cam) kaplama yapılabilmesi, yoğun kaplama oluşturulabilmesi ve tamamen ergimiş partiküllerin elde edilmesidir. Elektrik ark sprej kaplama teknolojisi ile üretilen kaplama tabakaları, kesin olarak tamamen ergimiş metalden oluşmaktadır. Bunun yanında eriyen metalin oksijen afinitesi yüksek olduğu için, püskürtülen metal katılaşana kadar hızla oksitlenebilmektedir. Kaplama yapısında yoğun oksit kalıntıları gözlenebilmektedir. Proses sırasında azot gibi gazlar kullanılırsa metal-nitrür bileşikler kaplamada elde edilebilmektedir [16].

4.1.3. HVOF (Yüksek hızda oksijen yakıt sprej)

HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) sprej prosesi; termal sprej kaplama yöntemleri arasında en önemli proseslerden bir tanesi olup, toz alev sprej yönteminin özel bir nozül vasıtasıyla yüksek hızlarda gerçekleştirilen şeklidir. Kaplama malzemesi olarak genel olarak toz formdaki malzemeler kullanılmaktadır. Son yıllarda ekipman geliştirme çalışmaları kapsamında tel beslemeli HVOF sprej prosesleri de gözlenmektedir. Bu yöntemle eriyik haldeki partiküller süpersonik hızlara çıkabilirler ve kazandıkları kinetik enerji sayesinde yoğun, düşük poroziteli, yüksek yapışma mukavemetine sahip yoğun kaplamalar (WC-Co, CrC-NiCr gibi sermet esaslı) üretilmektedir [12]. HVOF sprej prosesinde alev sıcaklığı sıcaklığı 2500 °C ile 4000 °C arasındadır. Ergimiş veya yarı ergimiş partiküller daha sonra 600 m/sn 'den 1350 m/s'ye varan süpersonik hızlarda tabanca nozulünden altlık malzemeye doğru püskürtülebilmektedir. Propilen, propan, doğal gaz veya hidrojen gibi gaz haldeki yakıtlar kullanılabilmesi gibi, kerosen gibi sıvı

yakıtlara da uygun sistemlerde mevcuttur. Toz haldeki kaplama malzemesi tabanca içerisindeki yanma odasına, azot gazı ile kullanılarak iletilir. Yakıt, oksijen ile tabanca içerisinde karıştıktan sonra nozülde dışarıya püskürtülür (Şekil 4.6). Ateşleme işlemi tabanca dışında gerçekleştirilir. Ateşlenen yakıt kaplama malzemesini çevreleyerek, kaplama tozunu ısıtır ve altlık malzeme üzerine iletir. HVOF yönteminde, 0,75 MPa gibi yüksek basınçlarda iş parçasına çarpan taneciklerin ortaya çıkardıkları kinetik enerji etkisiyle diğer püskürtme yöntemlerine göre çok yüksek bir yapışma mukavemeti elde edilebilmektedir. Böylece bu yöntemdeki parçacıkların kinetik enerjilerinin etkisi, plazmadaki ısı enerjisinin etkisine göre daha yüksek yapışma mukavemeti sağladığından yoğunluğu çok yüksek olan kaplamalar üretilebilmektedir [12, 13]. HVOF spreynin en önemli özellikleri şöyle sıralanabilir: Yüksek sertliğe, yoğunluğa, yüksek bağ mukavemetine, üstün korozyon ve aşınma direncine sahip yüksek kalitede metalik, sermet esaslı kaplamalar üretilebilmesi, kalıntı gerilmelerin oldukça düşük seviyede tutulabilmesi, kompleks geometrilerin kaplanmasına olanak vermesi ve sistemin tam otomatik olarak kullanılabilir olması en önemli avantajları arasındadır [12].

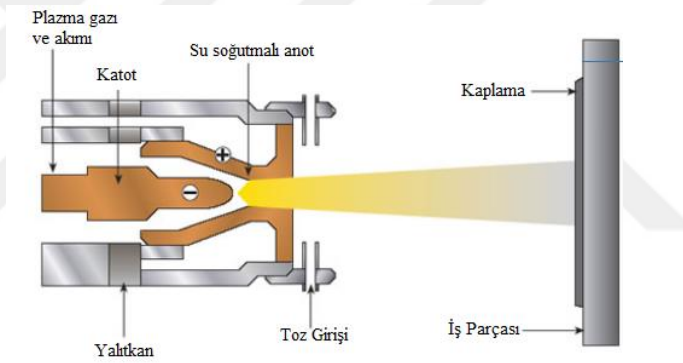


Şekil 4.6 : HVOF yöntemi [12].

4.1.4. Plazma spreynin

Plazma spreynin prosesi yüksek ergime noktasına sahip seramik ve metalik malzemelerin püskürtülmesinde tercih edilen yüksek enerjili bir termal spreynin prosesidir. Uçak ve gaz türbin parçalarının maruz kaldığı termal etkilere karşı plazma spreynin ile zirkonyum oksit esaslı termal bariyer kaplamalar üretilebilmektedir. Plazma enerjisi ile 10.000 K üzeri sıcaklıklara çıkılabilmemesi her tür malzemenin ergitilmesine olanak sağlamaktadır. Plazma (atom-altı partiküllere sahip bir iyonize gaz kümesi) gazın yüksek yoğunluklu bir elektrik alanından geçmesi sonucu oluşmaktadır (Şekil 4.7). Büyük miktarda enerji yoğunlukla

ultraviyole radyasyon ile açığa çıkartmaktadır. Bu proseste partiküller enerji sağlayan ekipmana bağlı olarak 300 m/s hıza ve 13,000 ila 30,000 K'e kadar çıkan sıcaklıklara ulaşabilmektedir [14]. Plazma ile yüksek ısı elde imkanı sağlanması yüksek ergime noktasına sahip seramik ve metal esaslı alaşım tozlarının kaplama uygulamalarında kullanılmasını mümkün kılar. Seramikler (oksit esaslı), yüksek aşınma ve sertlik özellikleri, hammaddesinin yaygınlığı ve ucuzluğu, korozyona, oksitlenmeye karşı direnci, düşük termal iletkenlikleri ve yüksek termal çevrim ömrü özelliklerinin avantajıyla önemli bir kaplama malzemesi konumundadırlar [12]. Alüminyum oksit, titanyum oksit, krom oksit, magnezyum oksit ve benzeri bir çok oksit esaslı seramik endüstriyel uygulamalarda plazma sprej prosesi ile amaca uygun kompozisyon ve kalınlıklarda üretilebilmektedir. Plazma sprej prosesinde birkaç mikrometreden birkaç milimetreyi bulan kalınlıklara kadar kaplamalar elde edilebilmektedir [14].

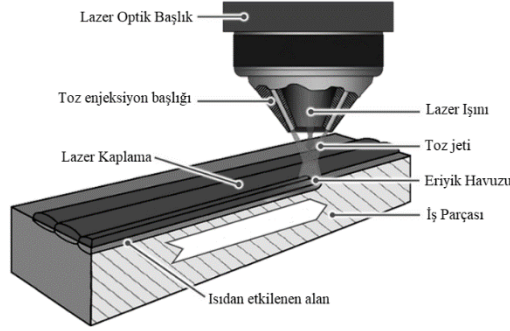


Şekil 4.7 : Plazma sprej sistemi [12].

4.1.5. Lazer kaplama

Lazer kaplama tekniği, düşük ısı girişinden dolayı malzeme meydana gelen termal çarpıklığın düşük olması, daha iyi mikro yapıya sahip kaplama tabakaları meydana getirmesi ve seyrekliğin kontrol edilebilmesinden dolayı bu sorunların üstesinden gelebilen tekniklerden bir tanesidir. Lazer kaplama, yüzey özellikleri iyi olmayan bir alt tabaka üzerine daha üstün özelliklere sahip başka bir malzemeyi aralarında metalurjik bir bağ oluşturacak şekilde eriterek alt tabaka üzerine yapıştırma işlemidir (Şekil 4.8) [16]. Lazer kaplama yönteminde kaplama malzemesinin özelliklerini kullanmak için, altlık malzeme yüzeyinin çok ince bir katmanın erimesiyle metalurjik bağ oluşturulmaktadır. Bu kaplama yönteminde lazer, bir ısı kaynağı olarak kullanılarak kaplanmak istenen

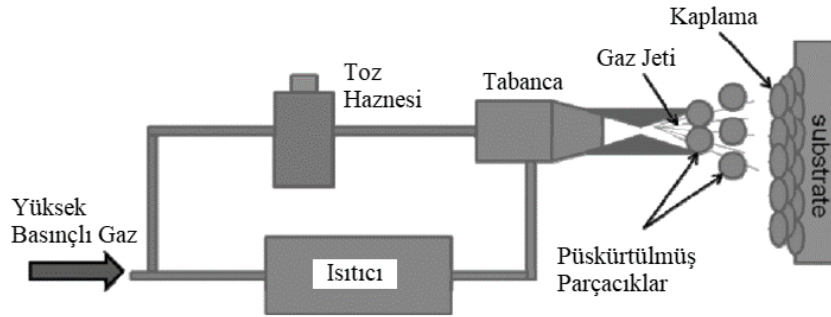
metal, altlık malzeme üzerine, ince bir katman olarak püskürtülür. Yüzeyle kaplanacak malzeme toz enjeksiyonu, önceden yüzey üzerine yapıştırılmış toz veya tel besleme yoluyla yüzeye eklenebilir [16].



Şekil 4.8 : Lazer kaplama sistemi.

4.1.6. Soğuk sprey kaplama

Soğuk sprey prosesi toz parçacıklarının (1 ile 50 μm) bir gaz akımı içinde, çok yüksek hızla (300 ile 1200 m/s) ivmelendirilerek yüzeye çarpmaları sonucunda parçacıkların deformasyon kabiliyetine bağlı olarak yüzeyde birikmesine olanak sağlayan bir ergime olmaksızın gerçekleşen bir termal sprey kaplama prosesidir. Bu yüksek ivmelenme proses gazlarının (hava, azot, helyum ve karışım kombinasyonu) önce ısıtılması ve basınç altında sıkıştırılmasını takiben nozülde (Laval Nozul) genişler çıkışı ile sağlanmaktadır (Şekil 4.9). Soğuk sprey metalik ve metalik olmayan altlık üzerine kaplama yapılmasına olanak vermektedir [14].



Şekil 4.9 : Soğuk sprey sistemi.

Termal sprey kaplama yönteminde yukarıda anlatıldığı üzere birbirinden farklı kaplama yöntemleri mevcuttur. Kaplama yapısında amaç porozite oranı düşük, ergimemiş parçacık olmayan, oksitlenmemiş, istenilen kaplama kalınlığında kaplamalar üretebilmektir. Bunlar göz önünde bulundurulduğunda kaplama yöntemi seçiminin, altlık ve kaplama malzemesinin özellikleri dikkate alınarak yapılması oldukça önem taşımaktadır. Kaplama ve altlık malzemesini özelliklerine göre yöntemin alev sıcaklığı, gaz ve partikül hızları, kaplama hammaddesinin formu gibi parametreler göz önünde tutularak kaplama yöntemi seçilebilmektedir. Tablo 4.1’de termal sprey kaplama yöntemlerinin karşılaştırmalı özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.1 : Termal Sprey Kaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması.

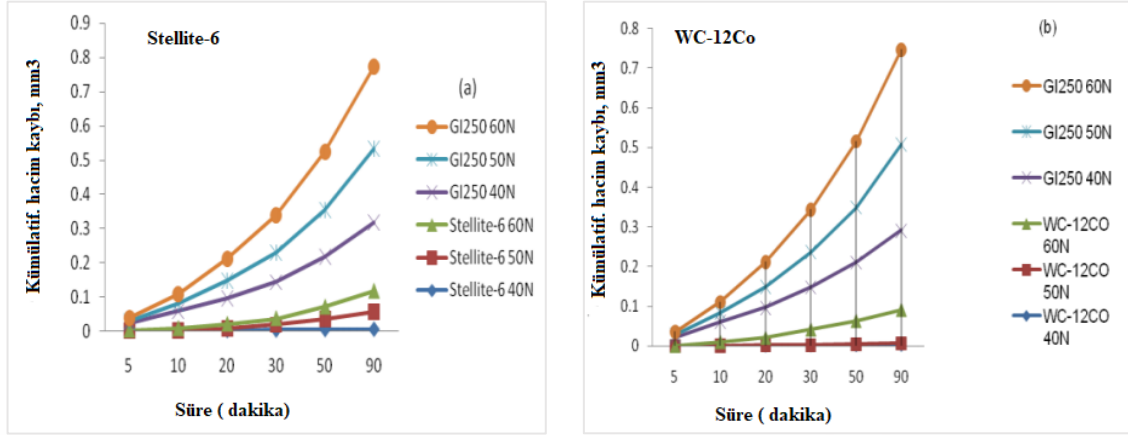
Proses	Kaplama Malzeme Formu	Enerji Kaynağı	Alev Sıcaklığı °C	Gaz Hızı m/s	Porozite %	Kaplama Yapışması MPa
Plazma Sprey	Toz	Plazma Alevi	12000-16000	500-600	2-5	40-70
Elektrik Ark Sprey	Tel	Elektrik Arkı	5000-6000	<300	5-10	28-41
Alev Sprey	Toz/Tel	Oksijen-yakıt alevi	3000	<300	5-10	14-21
HVOF	Toz	Oksijen-gaz yakıt alevi	3200	1200	1-2	>70
Soğuk sprey	Toz	Kinetik enerji	-	>1000	<1	<70

BÖLÜM 5. LİTERATÜRDE FREN DİSKLERİ ÜZERİNDE KAPLAMA UYGULAMALARI

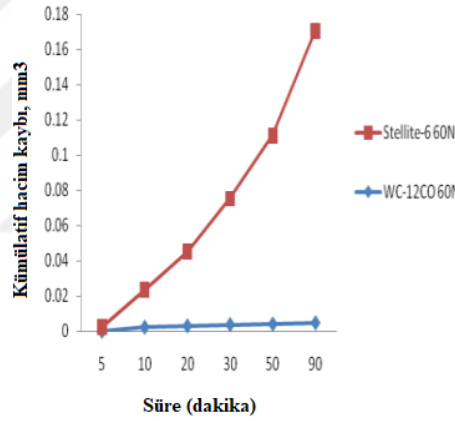
Bu bölümde fren diskleri üzerinde tribolojik özellikleri iyileştirmek amacıyla uygulanan kaplama türleri ve yöntemleri üzerinde yapılan çalışmalar ve çalışma sonuçları özetlenmektedir. Genel olarak dökme demir diskler üzerinde HVOF, detonasyon sprej kaplama yöntemleri ile yüksek sertliğe sahip kaplama tabakaları, alüminyum alaşımı diskler üzerinde ise soğuk sprej, ark sprej ve plazma elektrolitik oksidasyon yöntemleri gibi kaplama uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Aşağıda bu çalışmalar kapsamında deneysel sonuçlar ortaya konmakta ve yöntemleri olumlu ve olumsuz yönleri tartışılmaktadır.

Baljit ve arkadaşları (2012); GI250 gri dökme demir fren diski üzerinde detonasyon sprej yöntemi ile WC-12Co ve Stellite-6 (%1C, %6 W, %5Fe, %30Cr, %58Co) olarak tanımlanan ticari kaplamaların aşınma performanslarını incelemişlerdir. Kaplamalarda kullanılan toz boyutları 15-35µm aralığındadır. Detonasyon sprej prosesi yüksek hızlı termal sprej kaplama yöntemlerinden bir tanesi olup, yüksek sertliğe ve yapışma dayanımına sahip düşük poroziteli kaplamalar üretilebilmektedir. Kaplanan silindirik numuneler üzerinde kuru kayma aşınma testleri kaplamasız ve kaplamalı numuneleri karşılaştıracak şekilde ASTM G99 (pin (EN31 sertleştirilmiş çelik) disk üzerinde) standardında oda sıcaklığında uygulanmıştır. Testler 40-60 N arasında yük altında 5400m toplam kayma mesafesi sürecinde gerçekleştirilmiştir. Test sonrasında aşınma kaybı, sürtünme katsayısı değişimi, mikroskop altında aşınma izleri ve kaplama yüzey incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1 ve 5.2’de Stellite6 (a) ve WC-Co (b) esaslı kaplamaların gri dökme demir fren diski ile karşılaştırmalı olarak hacimsel aşınma kaybı grafikleri sergilenmektedir. Her iki grafikte de kaplamalı disklerin kaplamasız disklerle göre üstün bir aşınma direnci gösterdiği görülmektedir. Kaplamalar arasında bir karşılaştırma yapılırsa WC esaslı kaplamaların Stellite-6 kaplamalara göre daha düşük aşınma kaybına sahip olduğu bir başka deyişle yüksek aşınma direnci sergilediği

görülmektedir. Aşınma testlerinde yük artışının aşınma hızını artırdığı görülebilmektedir [18].



Şekil 5.1 : Stellite6 (a) ve WC-Co (b) esaslı kaplamaların gri dökme demir fren diski ile karşılaştırmalı olarak hacimsel aşınma kaybı grafikleri [18].

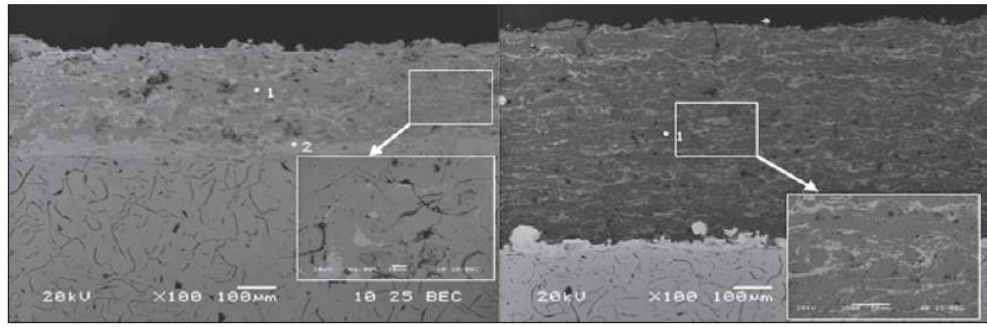


Şekil 5.2 : Stellite6 ve WC-Co esaslı kaplamaların gri dökme demir fren diski ile karşılaştırmalı olarak hacimsel aşınma kaybı grafikleri 60N yük altında [18].

Çalışmanın sonucunda detonasyon prosesi ile disk malzemeleri üzerinde yüksek aşınma direncine sahip kaplamaların üretilebildiği görülmektedir. Benzer çalışmaların Murthy, Venkataraman (2006), Sundararajan (2005), Cueva (2003) ve Jun Wang (2000) tarafından da gerçekleştirilecek kaplamaların aşınma direncini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir [18-20].

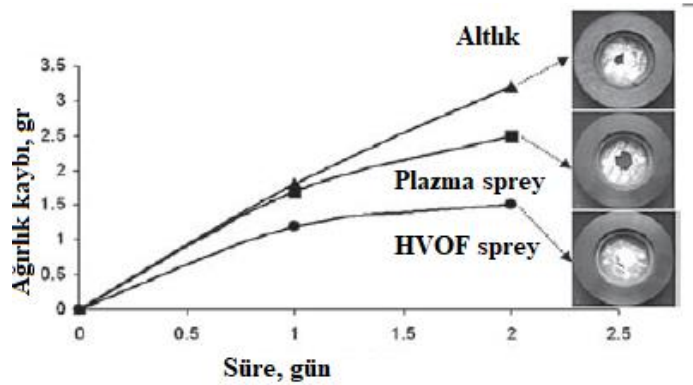
R. Samur ve arkadaşları (2012), incelemelerinde fren diskleri üzerinde tribolojik testlerin öneminden bahsetmektedirler [21-23]. Deneysel çalışmalarında hedef bir uygulama alanı

için (Toyota Corolla araçlarında kullanılan fren diskleri) gri dökme demir üzerinde HVOF ve plazma sprey prosesi ile karbür ve oksit esaslı kaplamaların aşınma sürtünme davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada, dökme demir altlıklar üzerine önce NiCr bağ tabakası sonrasında ise bu tabakanın üzerine iki farklı kaplama uygulanmıştır. Disklerden bir tanesine plazma sprey prosesi ile $Al_2O_3-TiO_2$ ($500\mu m$) ve diğer bir diske ise yüksek hız oksijen yakıt (HVOF) prosesi ile NiCr- Cr_3C_2 tabakası ($300\mu m$) ile kaplanmıştır. Kaplamalı disklerin kaymalı aşınma testleri (1,5N, $\varnothing 10mm$ alümina, kayma süresi 25 dakika) gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların mikro yapı (Şekil 5.3), sertlik ve korozyon testleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Aşınma sonrası izler 2D tarayıcı ile yüzey profili incelenmiştir [21].



Şekil 5.3 : Gri dökme demir üzerinde a) Plazma Sprey ve b) HVOF kaplamaların SEM kesit görüntüleri [21].

Şekil 5.4'te farklı prosesler ile üretilen kaplamaların aşınma kaybı karşılaştırmalı olarak sergilenmektedir. Plazma sprey kaplamaya göre daha yüksek sertliğe sahip HVOF sprey kaplamanın daha düşük bir aşınma kaybı sergilediği gözlenmektedir. Çalışmanın sonucunda korozif aşınma koşullarından HVOF kaplamaların daha üstün performans sağladığını işaret etmektedirler. [21].



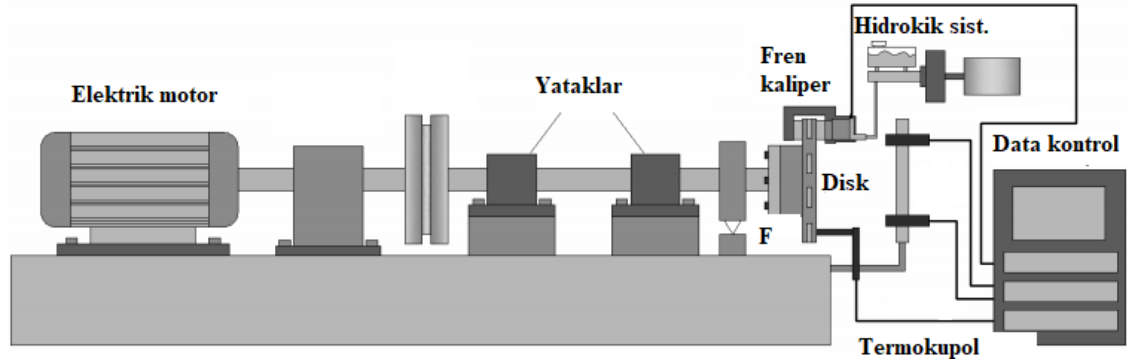
Şekil 5.4 : Gri dökme demir üzerinde a) Plazma Sprey ve b) HVOF kaplamaların SEM kesit görüntüleri [21].

M. Çakmakkaya'nın çalışmalarında (2017); farklı karbür esaslı kaplamaların aşınma performansı incelenmiştir. C40 karbon çeliği üzerine Cr_3C_2 -25%NiCr ve WC-12%Co esaslı tozlar HVOF prosesi ile kaplanmıştır. SAE J4230 test standartlarına uygun laboratuvar ölçeğinde bir test düzeneği oluşturularak kaplamalı ve kaplamasız numuneleri test etmiştir. Testlerde kalınlık azalması ve balata aşınmasına bağlı yüzey pürüzlülüğünün değişimi izlenmiştir. Tablo 5.1'de kaplamalı ve kaplamasız numuneler üzerinde fren testleri esnasında disk kalınlık değişimleri sergilenmektedir. Çalışmada WC-Co esaslı kaplamaların en az kalınlık değişimi, en az yüzey pürüzlülüğü sergilediğini tespit etmiştir. Kaplamasız numunelere göre fren diski ve balata aşınma performansında önemli oranda bir iyileşme gözlemlendiğini ileri sürmektedir [24].

Tablo 5.1 : Fren testi esnasında kaplama kalınlığı değişimi.

Disk	Test Tekrarı	1	2	3	4	Kalınlık değişimi (mm)	Ortalama (mm)
	Başlangıç değeri	24.6					
Kaplamasız	Test I	24.37	24.36	24.37	24.36	0.24	
	Test II	24.15	24.14	24.15	24.15	0.21	0.22
	Test III	23.95	23.96	23.95	23.95	0.2	
	Başlangıç değeri	24.12					
Cr ₃ C ₂ -25%NiCr	Test I	24.08	24.09	24.09	24.08	0.04	
	Test II	24.04	24.05	24.05	24.04	0.04	0.03
	Test III	24.03	24.04	24.04	24.03	0.01	
	Başlangıç değeri	24.22					
WC-12%CO	Test I	24.2	24.19	24.2	24.19	0.015	
	Test II	24.19	24.18	24.19	24.18	0.005	0.01
	Test III	24.18	24.17	24.18	24.17	0.005	

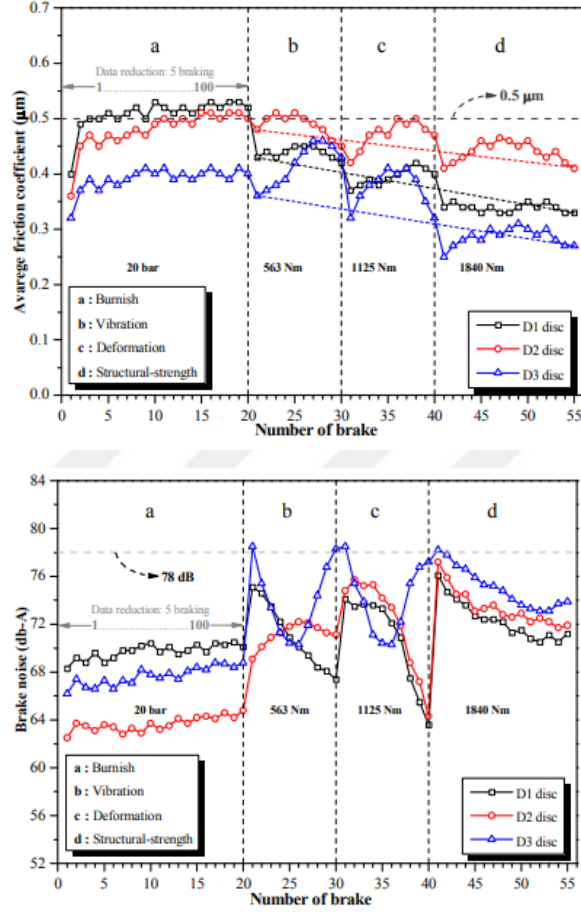
A. Öz ve arkadaşları (2017) frenleme performansı ve fren gürültüsüne HVOF kaplamaların etkisini kullanılmış ve aşınmış disk yüzeylerinde incelemiştir. Fren sistemlerinde önemli bir nokta karşılıklı yüzeylerin (disk ve balata) birbirleri ile etkileşimi, aşınma esnasında ortaya çıkan fren tozu, titreşim ve gürültü (100-3500 Hz) etkisidir. Bu durum otomotivde standartlar ile tanımlanmakta ve tasarım kriteri olarak ön plana çıkmaktadır [25-28]. Frenlemenin gerçekleşebilmesi için yüksek bir sürtünme katsayısına gereksinim duyulmaktadır. Fakat çalışma koşullarında ısı ve atmosferik şartlar (su, nem vb.) sürtünme katsayısının değişimine neden olabilmektedir. Fren testleri simüle yol tanımlanmış dinamometre testleri ile gerçekleştirilmekte ve gürültü, sürtünme katsayısı ve aşınma davranışları izlenmektedir. Deneysel çalışmalarında HVOF prosesi ile dökme demir kullanılmış aşınmış diskler (çap 257 mm, kalınlık 21.8 mm) üzerine D2: WC-12Co esaslı kaplama ve altına bağ tabaka olarak NiCr (80-20) kaplama (50 μ m) toplamda 500 μ m kalınlıkta kaplanmıştır. Diğer aşınmış disk ise D3: Ni-W-Cr-B-Si esaslı bir kaplama tabakası (600 μ m) ile kaplanmıştır. Orijinal disk ise D1 olarak adlandırılmaktadır. Dinamometre testleri. 2400 rpm, maks. moment 166 kgm², maks. güç 140 kW, ve mak. Tork 5000 Nm test sisteminde gerçekleştirilmiştir. Test esnasında sıcaklık ölçümleri K tipi termokupl ile yapılmıştır (Şekil 5.5). Test 4 kademede gerçekleştirilmektedir: 1. Başlangıç 2. Titreşim 3. Deformasyon 4. Mak. Yükleme [25]



Şekil 5.5 : Dinamometre test sistemi şematik [25].

Şekil 5.5’de görüldüğü üzere dinamometre testlerinde 4 farklı kademede sürtünme ve fren gürültüsünün değişimi karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. D2 kaplamaların en düşük fren gürültüsüne sahip olduğu ve kaplamasız D1’e göre daha iyi performans sağladığı gözlenmektedir. En zorlu test koşullarında sürtünme katsayısı karşılaştırıldığında D2’nin D1’den kısmen daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlenmektedir. Bu

durum 55 kez tekrarlanan frenleme performansı açısından oldukça önem taşımaktadır. Disk yüzeyinde frenlenmeye bağlı olarak sıcaklık değişimi D2 ve D1 için benzer seviyelerdedir (Şekil 5.6).



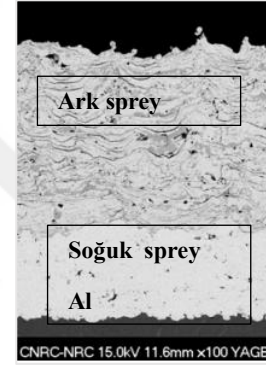
Şekil 5.6 : Kaplamalı ve kaplamasız diskler için uygulanan dinamometre test sonuçları a. sürtünme katsayısı b. fren gürültü değişimi [25].

Dominique ve arkadaşları (2018), otomobil endüstrisinde gelecekte alüminyum kullanımının artması sonucunda fren disklerinin de alüminyum alaşımlarından üretilerek ağırlık kazanımı sağlanacağı düşüncesini savunmaktadırlar. Bu noktada alüminyum A356 alaşımı üzerinde iki farklı proses ile metalik termal sprey kaplama uygulamalarını gerçekleştirmişlerdir. Kaplamalar 304 (tel) ve 316 (toz) kalite paslanmaz çelik kompozisyonuna sahip olup, ark sprey sistemi ve soğuk sprey yöntemleri ile uygulanmıştır. Kaplamaların üretimi sonrasında aşınma hızı, sürtünme katsayısı değişimi ile birlikte korozyon ve termal çevrim koşullarında performanslarını karşılaştırmışlardır. Tablo 5.2’de kaplamaların ve kütle malzemelerin sürtünme katsayısının ve aşınma hızının karşılaştırması sunulmaktadır. Paslanmaz çelik kütleyle göre ark sprey veya soğuk sprey

ile üretilen kaplamaların sürtünme katsayısı daha düşük ve gri dökme demir ile benzer sürtünme katsayısı sergilemektedir. Yapılan çalışmalarda ark sprej ile üretilen kaplamaların alternatif aşınmaya karşı dirençli bir yüzey sağlayacağı öngörülmesine karşın kaplamanın heterojen bir mikro yapısı korozif etkilere oldukça hassastır. Termo mekanik çevrimlerde bu durumun risk yaratabileceği düşünülmektedir. Soğuk sprej prosesi termal sprej yöntemleri arasında en yeni teknolojilerden bir tanesidir. Isı girdisi olmadan toz malzemelerin deformasyon kabiliyetine bağlı olarak çok yoğun kaplama tabakası oluşturulabilmektedir. Korozyon açısından avantaj sağlamasına karşın aşınma performansı yeterli değildir. Çift katmanlı kaplamaların gelecekte aday olacağını öngörmektedirler [29]

Tablo 5.2 : Sürtünme katsayısının ve aşınma hızının karşılaştırması [29].

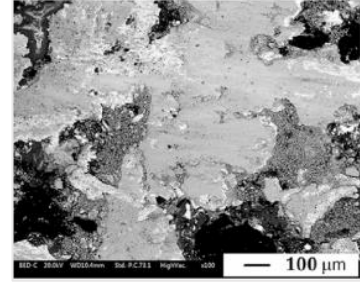
Numune	Aşınma hızı (10^{-5} mm ³ /m)	Sürt. kats
Gri dökme demir	1.294±0.116	0.36
304 paslanmaz	45.303±25.483	0.72
Ark sprej-304	1.524±0.672	0.36
Ark sprej-M304	0.73±0.27	0.35
Soğuk Sprej	4.774±1.664	0.38
Çift katmanlı	0.751±0.067	0.42



M. Federici ve arkadaşları (2017), çalışmalarında HVOF prosesi ile kaplanan (A: WC10Co-4Cr ve B: Cr₃C₂-25NiCr) disklerin farklı sıcaklıklarda kuru aşınma test sonuçlarını irdelemektedirler. Oda sıcaklığında test koşullarında balata ile kaplamasız disk arasında kararlı bir sürtünme davranışı gözlenmektedir. Kaplamalı diskler ile balata arasında etkileşimlerde balata aşınmasının azaldığı tespit edilmiştir. 300 °C'den sonra balata malzemesinde reçinenin bozunması sonucunda balata yüzeyinde aşınma ve karşı yüzeye partikül aktarımı başlamaktadır (Tablo 5.3). 300 °C'de kaplamalı disklerin aşınma direnci hala yüksek seviyededir. 400 °C'den sonra kaplamalarda da aşınma hızlanmakta olduğu tespit edilmiştir [30].

Tablo 5.3 : Aşınma testlerinde karşılıklı yüzeylere malzeme aktarımı ve yüzde oranı [30].

Aşınma yüzeyinde balata malzemesinden karşı yüzeye malzeme aktarımı		
	Oda Sıcaklığı	300 C
Kaplamasız	2.4	83.9
Kaplama-A	15.1	30.1
Kaplama-B	26.5	50.0



BÖLÜM 6. KAPLAMALARIN ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER, TEST VE KARAKTERİZASYONUNDA KULLANILAN YÖNTEMLER


Bu bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, kaplama prosesi ve ekipmanları, üretilen kaplamaların özelliklerini belirlemek için yapılan test ve deneysel çalışmalar anlatılmıştır. Bir sonraki bölümde ise yapılan test ve analizlerin sonucu ve bilimsel tartışmalara yer verilmiştir.

6.1. Altlık Malzemesi Özellikleri

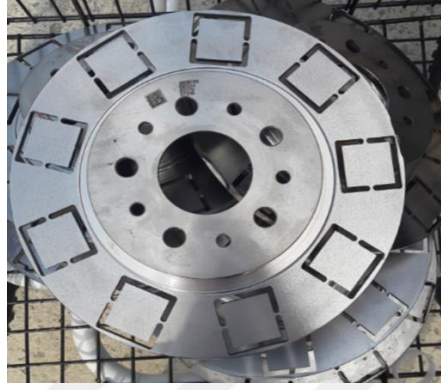
Disk tipi fren sistemlerinde en çok tercih edilen Fe-C alaşımları genel olarak gri dökme demirlerdir. Gerek ekonomik olması gerekse termofiziksel özellikleri nedeni ile disk malzemesi olarak GG20 tercih edilmektedir. Lamelli grafit yapısına sahip bu dökme demirlerin kimyasal kompozisyonu, mikroyapısı ve uluslararası standardı Tablo 6.1’de sergilenmektedir. Deneysel çalışmalarda dairesel (30x30mm boyut, 4mm kalınlık) formda numuneler üzerinde ön kaplama deneme çalışmaları ve disk üzerinde (çap 260mm) kaplama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Disk üzerinde 9 plaka ön deneme kaplamaları için hazırlanmıştır. Farklı kaplama parametreleri ile kaplanmıştır.

Tablo 6.1 : Dökme demir kimyasal kompozisyonu ve mikro yapısı.

DIN1691- GG20		
Kimyasal kompozisyon		
C	2.9-3.65 [%]	
Si	1.8-2.9	[%]
Mn	0.5-0.7	[%]
S	0.10 max.	[%]
P	0.30 max.	[%]
Fe	Geri kalan	
Mikro yapısı		
Lamelli grafitli dökme demir		



Deneysel çalışmalarda kaplama öncesinde plakaların lazer kesme tezgahında uygun boyutlarda hazırlanması sonrasında (Şekil 6.1) yüzey temizliği ve yüzey kumlama ile yüzey kaplama işlemine hazırlanmıştır (Şekil 6.2).



Şekil 6.1 : Deneysel çalışmalarda ön deneme kaplama numuneleri ve disk.



a. Kaplamadan Önce



b. Kaplamadan Sonra

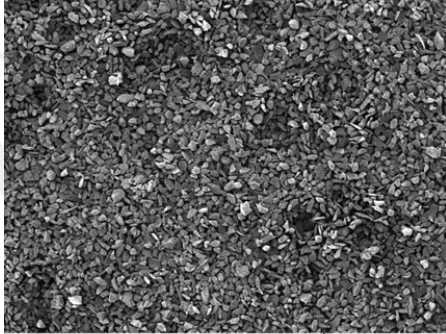

Şekil 6.2 : Fren diskinin Plazma Sprey ile Kaplamadan Önceki ve Sonraki Görüntüsü.

6.2. Üst Katmanda Kullanılan Toz Özellikleri

Kaplama işlemlerinde Alumina-Titanya esaslı 5-40 μ m aralığında karmaşık geometrik formlarda seramik tozlar kullanılmıştır. Aşağıda tablo 6.2’de tozların özellikleri ve kimyasal kompozisyonları sergilenmektedir.

Tablo 6.2 : Toz Özellikleri.

Sınıflandırma	Oksit seramik, Alümina bazlı				
Kimyasal Bileşimi	Al_2O_3 -%8-15 wt. TiO_2				
Kullanım Amacı	Aşınma, korozyon, kimyasal dirençli uygulamalar				
Ergime Derecesi	2000°C				
Toz morfolojisi	Kırılmış, öğütülmüş				
Toz Boyutu	-40+5 μm				
Toz Kimyasal Bileşimi					
Al_2O_3	TiO_2	SiO_2 (max)	Fe_2O_3 (max)	MgO (max)	CaO (max)
Geri Kalan	12.0 – 14.0	0.5	0.2	0.2	0.1

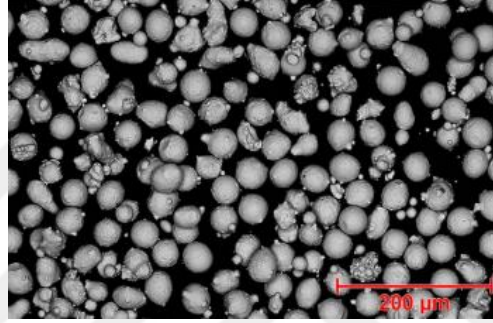



6.3. Bağ Tabaka ve Toz Özellikleri

Seramik üst katmanın altlık ile farklı termal genleşme özellikleri nedeniyle yapışmayı artırmak ve termal genleşme uyumsuzluğunu azaltmak için metalik esaslı bir bağ tabaka uygulanmaktadır. Kaplama ve altlık arasında oluşabilecek termal ve mekanik gerilme farklarını minimuma indirmek, yapışma sorunlarını ortadan kaldırmak amacıyla genel olarak NiCr veya NiAl esaslı bağ tabaka uygulaması yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında altlık yüzeyine ilk olarak öncelikle plazma sprej prosesi ile bağ tabaka kaplanmakta sonrasında seramik tabaka oluşturulmaktadır. Nikel-Krom esaslı bağ tabaka tozları 5-45 μm boyut aralığında küresel formlarda tozlar kullanılmıştır. Aşağıda Tablo 6.3'de tozların özellikleri ve kimyasal kompozisyonları sergilenmektedir.

Tablo 6.3 : Bağ Tabaka Toz Özellikleri.

Sınıflandırma	Nikel esaslı alaşım				
Kimyasal Bileşimi	Ni20Cr				
Kullanım Amacı	Korozyona dayanıklı bağ tabaka				
Ergime Derecesi	1400°C				
Toz Morfolojisi	Küresel veya düzensiz				
Proses	Atmosferik plazma sprey, HVOF				
Toz Boyutu	-45+5 µm				
Toz Kimyasal Bileşimi					
Ni	Cr	Si	Fe	Mn	Diğer (Maks.)
Geri Kalan	19.5	1.2	1.0	1.5	0.5



6.4. Plazma Sprey Kaplama Prosesi

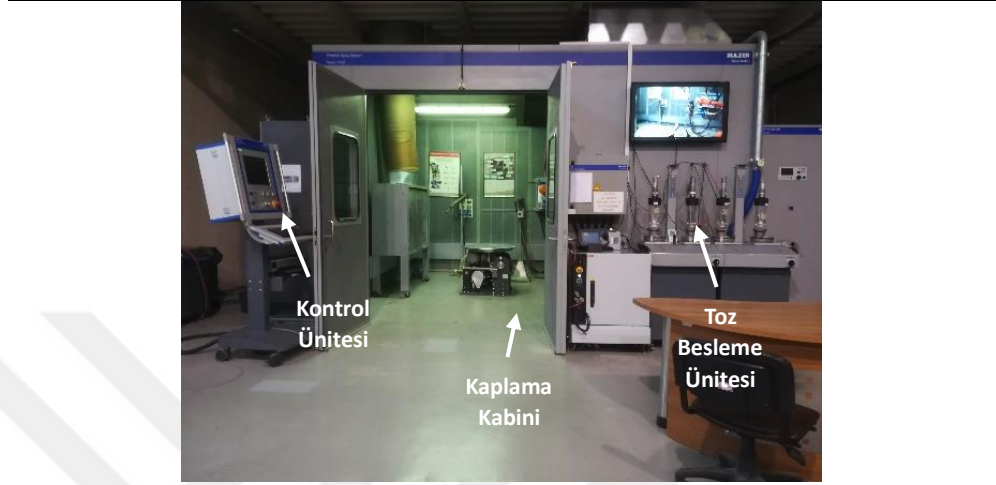
Kaplama işlemleri plazma sprey kaplama yöntemiyle yapılmıştır. Atmosferik plazma sprey kaplama yöntemi bölüm 4'te detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Aşağıda Tablo 6.4'de yapılan kaplamaların proses parametreleri verilmiştir.

Tablo 6.4 : Plazma Sprey kaplamaların üretim parametreleri.

Kaplama Prosesi	Atmosferik Plazma Sprey (MultiCoat)		
Sprey Tabancası	F4 MB (Oerlikon Metko)		
Plazma Gazları	Ar+H ₂		
Besleme Hızı gr/dk.	25-40		
DeneySEL parametreler: Seramik tabaka için proses parametreleri			
Deneme kodu	Ar/H ₂ Gaz Akış Oranı nlpm/nlpm	Spray Mesafesi mm	Akım Amper
X1	40/12	100	610
X2	32/8	110	630
X3	36/10	120	590
Bağ tabaka	40/8	115	550

Tablo 6.5'te kaplamanın uygulanmasında kullanılan sistem ve ekipmanlar sergilenmektedir. Kaplamalar multicoat kaplama ünitesinde robot kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sprey tabancası olarak F4MB plazma sprey tabancası kullanılmıştır.

Tablo 6.5 : Kaplama üretim sistemi ve bileşenleri.



a.Kaplama Kabini Dış Görünümü



b.Sprey Tabancası



c.Robotik Kol

6.5. Kaplama Öncesi İşlemler: Kuşlama

Kuşlama prosesi malzemenin üzerindeki kir, pas ve pislikleri temizleyerek malzemenin yüzeyini kaplama için ön hazırlık aşamasıdır. Burada aynı zamanda malzemenin yüzeyi pürüzlü hale getirilerek kaplamanın daha iyi yapışması sağlanmaktadır. Aşağıda şekil 6.3'de kuşlama sistemi gösterilmiştir. Yüzey kuşlama amacıyla 6 bar basınç, 150 mm mesafeden Alumina esaslı 80 mesh gritler kullanılarak uygulanmıştır.



Şekil 6.3 : Kuşlama Kabini.

6.6. Kaplama Test ve Analizleri

Üretilen kaplamalar öncelikle mikro yapısal analizler için metalografik olarak hazırlanmıştır (Şekil 6.4). Kaplama yapılan numuneler önce uygun boyutlarda kesme diski ile kesilmiş kesildikten sonra bakalit cihazında kalıplama yapılmıştır. Sonrasında malzemeler metalografik hazırlık aşamalarına tabi tutulmuştur. Parlatılmış numuneler üzerinde elektron mikroskobunda farklı büyütmelerde üst yüzey ve kesitlerde mikro yapı görüntüsü alınmıştır.



a. Hassas kesme cihazı

b. Kalıba alma cihazı

c. Otomatik zımparalama ve parlatma cihazı

Şekil 6.4 : Metalografik hazırlık aşamasında kullanılan cihazlar.

Hassas kesme cihazı ile fren disklerinden ayrılan numuneler daha küçük parçalara ayrılmıştır. Kesme işlemi esnasında deformasyon ve çatlak oluşmaması için soğutucu sıvı olarak bor yağı+su karışımı kullanılmıştır. Kalıba alma cihazında malzemeler metalografik işlemler için kalıba alınmıştır. Sıcak kalıplama işlemi 180°C’de 250 bar basınçta 3 dakika sürede yapılmaktadır. Sonrasında 1,5 dakika soğutma yapılarak işlem sonlandırılmıştır. Sonrasında otomatik zımparalama ve parlatma cihazında malzemelere metalografik aşamalar takip edilmiştir. Burada malzemeler sırasıyla 320, 500, 800, 1000’lik zımparalarla yüzeyleri hazırlanmıştır. Zımparalama işlemi 25N kuvvetle aynı yönde döndürülerek 4 dakika boyunca, su soğutmalı yapılmıştır. Sonrasında 9µm ve 3µm’lik elmas pasta içeren parlatma keçeleriyle malzemeler 15N kuvvetle 3 dakika boyunca parlatılmıştır.

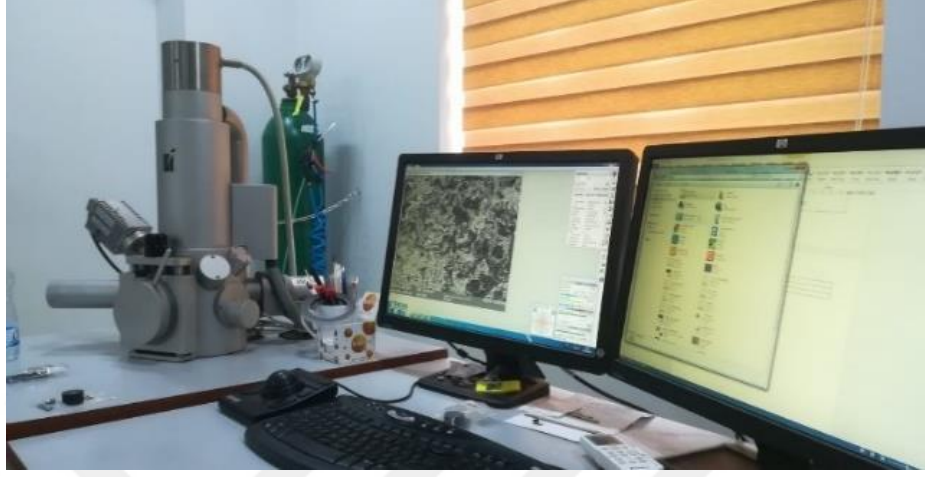
Kaplamaların yüzey pürüzlülüğü yüzey profilometre cihazında (Şekil 6.5) gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü sonucunda Ra ve Rz değerleri tespit edilmiştir. Taşlama öncesi ve sonrası ölçümler gerçekleştirilerek ortalama değerler belirlenmiştir.



Şekil 6.5 : Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.

Kaplamaların mikroyapısal (porozite, ergimemiş parçacık, katman ve arayüzey özellikleri, üst yüzey morfolojisi) incelemelerinde elektron mikroskopunda üst yüzey ve kesit incelemeleri detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.6). SEM cihazında ayrıca EDX analiz yöntemi ile kaplama içerisinde olan mevcut elementlerin analizi saptanabilmektedir. Farklı büyütme oranlarında alınan mikroyapı görüntüleri BSE modunda

20kV gücünde alınmıştır. Kaplama kalınlıkları SEM kesit incelemelerinde alınan ölçümlerin ortalaması ile gerçekleştirilmiştir.



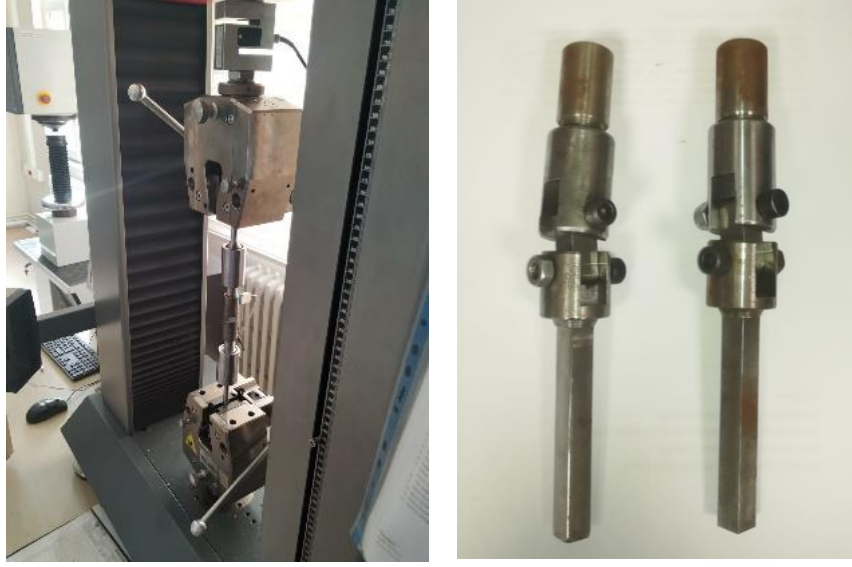
Şekil 6.6 : Elektron Mikroskobu (SEM-EDX) cihazı.

Kaplamaların mekanik özelliklerinin tespitinde en çok kullanılan test mikrosertlik ölçümüdür. Vickers sertlik ucu ile 300 gr 15 sn süresi ile en az 9 ölçüm alınarak ortalama mikro sertlik değeri tespit edilmeye çalışılmıştır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7 : Sertlik cihazı.

Kaplamaların mekanik özellikleri arasında bir diğer en önemli test ise ASTM C633 standartlarına bağlı olarak uygulanan yapışma testidir. 1 inç boyutunda numuneler üzerine uygulanan kaplamalı numunelerin üst ve alt yüzeylerine yapıştırıcı uygulanarak yapışma dayanımı ölçülmektedir (Şekil 6.8). Üç numune ölçüm sonucun ortalaması alınmıştır.



Şekil 6.8 : Yapışma testi cihazı.

Kaplamalı fren diskleri üzerinde sürtünme davranışının belirlenmesi için Kale Balata Arge Merkezi alt yapısında mevcut olan dinamometre cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.9). Farklı sıcaklık (100-500 °C arasında) koşullarında sürtünme katsayısının değişimi ve orjinal balata malzemesi ile disk arasında aşınma kayıpları ölçülerek değerlendirilmiştir. Sürtünme katsayısının farklı frenleme rejimlerine bağlı değişimi gözlemlenerek yol şartları için uygun kullanıcı şartnameleri doğrultusunda test ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sonrasında balata aşınması ve üst yüzey görünümü incelenmiştir.



Şekil 6.9 : Dinamometre testi cihazı.

Kaplamalı disklerde tasarım kriterleri arasında en çok beklenen özellikler yüksek korozyon direncidir. Açık atmosfer koşullarında ve yol şartlarında disklerde korozyif etkiler disk ömrünü azaltmakta ve aşınma kayıplarını artırmaktadır. Kaplamalı diskler tuz püskürtme (%5NaCl çözeltisi) testerine (ASTM B117) tabi tutularak kırmızı korozyonun başladığı şartlar test süresi olarak değerlendirilmektedir (Şekil 6.10).



Şekil 6.10 : Tuz püskürtme test cihazı.

Kaplamalı diskler gerçek araç üzerine uygulanmış ve araç üzerinde 20.000 km test sürüşü gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte her 5000 kmde gözle kontrol ve et kalınlığı değişimleri (DTV) karşılaştırmalı olarak sağ ve sol teker diskleri için incelenmiştir (Şekil 6.11). Bunun yanında disk üzerinde salgı oluşup oluşmadığı gözlenmiş ve ölçüm alınmıştır.



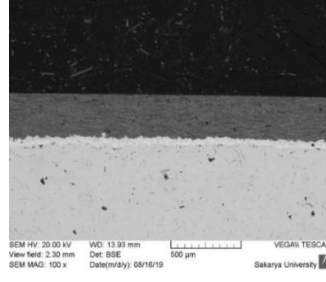
Şekil 6.11 : Yol testleri (Fiat Egea) ve disk, balata kontrolleri.

BÖLÜM 7. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

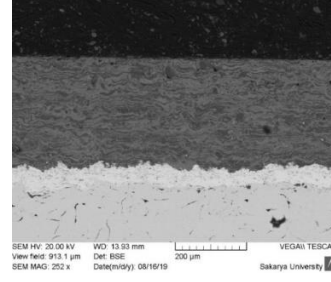
7.1. Kaplamaları Mikroyapı Kesit ve Üst Yüzey İncelemeleri

Metalografik hazırlık süreci sonrasında kaplamaların elektron mikroskobunda yapılan incelemelerde farklı parametreler ile uygulanmış kaplamaların kesit ve üst yüzey incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Kaplama yapısı, kalınlığı ve olası süreksizlikler incelenmiştir. Parametrelerin değişiminde kaplama yapısında olası farklılıklar gözlenmeye çalışılmıştır. Tekrarlanabilir kalitede kaplama eldesi hedefi için optimum parametrelerin belirlenmesi amacıyla deneysel çalışma planı çerçevesinde kaplamalar üretilmiştir. Bu süreçte farklı parametreler ile üretilen kaplama uygulamaları arasından arzulan kesit ve üst yüzey özelliklerini sağlayan parametreler set edilerek optimum kaplama parametreleri olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Kaplama işlemleri kontrollü bir ön ısıtma ve uygun soğutma koşulları çerçevesinden gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi sonrasında yüzey morfolojisi ve elemental analiz gerçekleştirilmiştir.

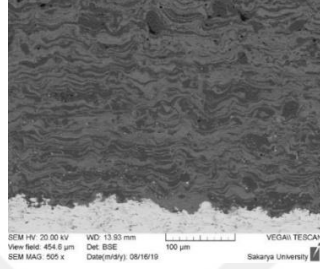
X1 kodlu kaplama kesitinde, dökme demir altlık ile seramik kaplamanın kesit görüntüsünü Şekil 7.1'de gözlenmektedir. Kaplama kesit görüntüsünde (Şekil 7.1 a ve b) homojen kalınlıklarda bir kaplama tabakasının elde edilebildiği görülebilmektedir. Koyu renkli tabaka seramik tabaka olup altında açık gri renkli tabaka bağ tabakasıdır. Koyu renkli tabakada iki farklı renk tonu kaplama kompozisyonunda iki farklı bileşen olduğunu işaret etmektedir. Alumina- titanya esaslı tozların püskürtülmesi ile elde edilen kaplamalarda EDX analiz ile bu yapıların varlığı rahatlıkla belirlenebilmektedir. Altlık-kaplama tabakası arayüzeyinin iyi bir tutunma sergilediği gözlenmektedir (Şekil 7.1 c). Şekil 7.1 d.'de tipik plazma sprey kaplama yapısı ve lamelsi tabaka oluşumu gözlenmektedir. Genel olarak kaplama tabakasında makro boyutlarda bir süreksizlik, porozite gözlenmemektedir. Şekil 7.1 e.'de kaplama tabakası kalınlıkları ölçülmüş ortalama 305µm kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. Bağ tabaka kalınlıklarının 100µm altında olduğu görülebilmektedir.



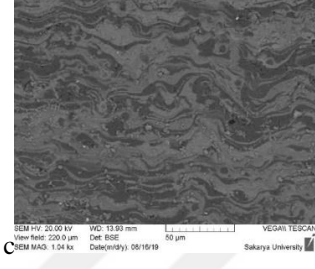
a. Kesit görüntüsü (genel)



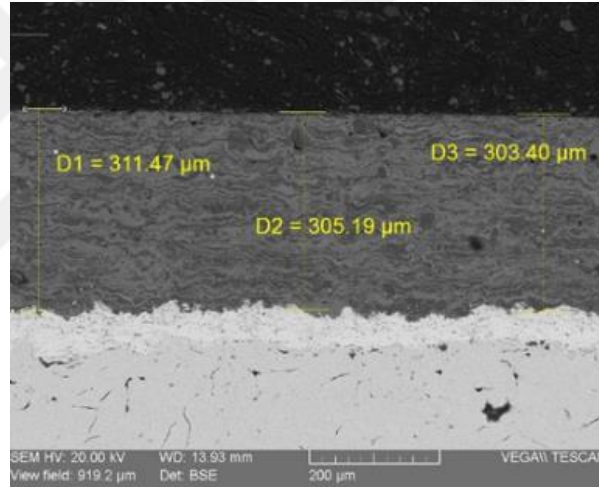
b. Kaplama kesiti ve kalınlığı



c. Altlık- kaplama ara yüzey



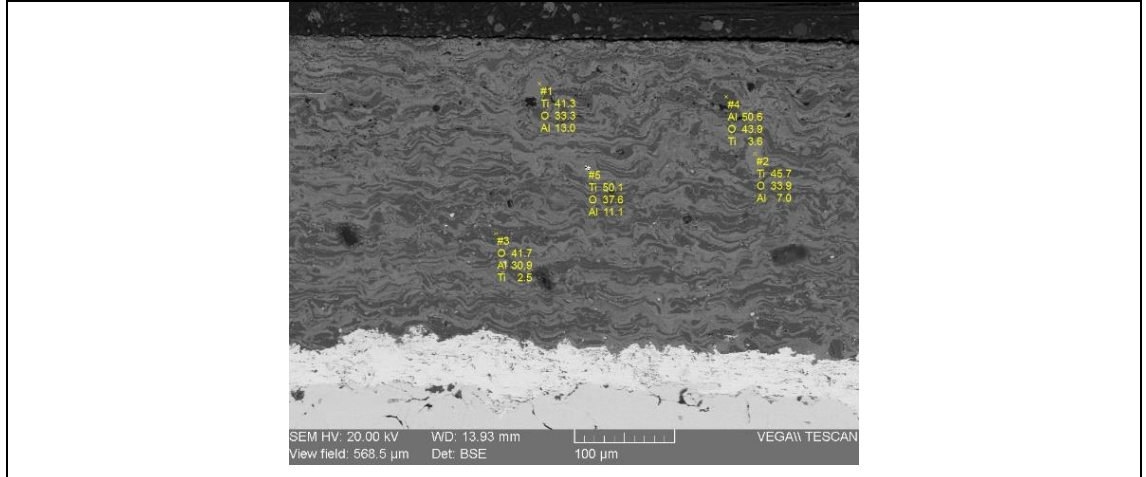
d. Kaplama yapısında lamelli yapı



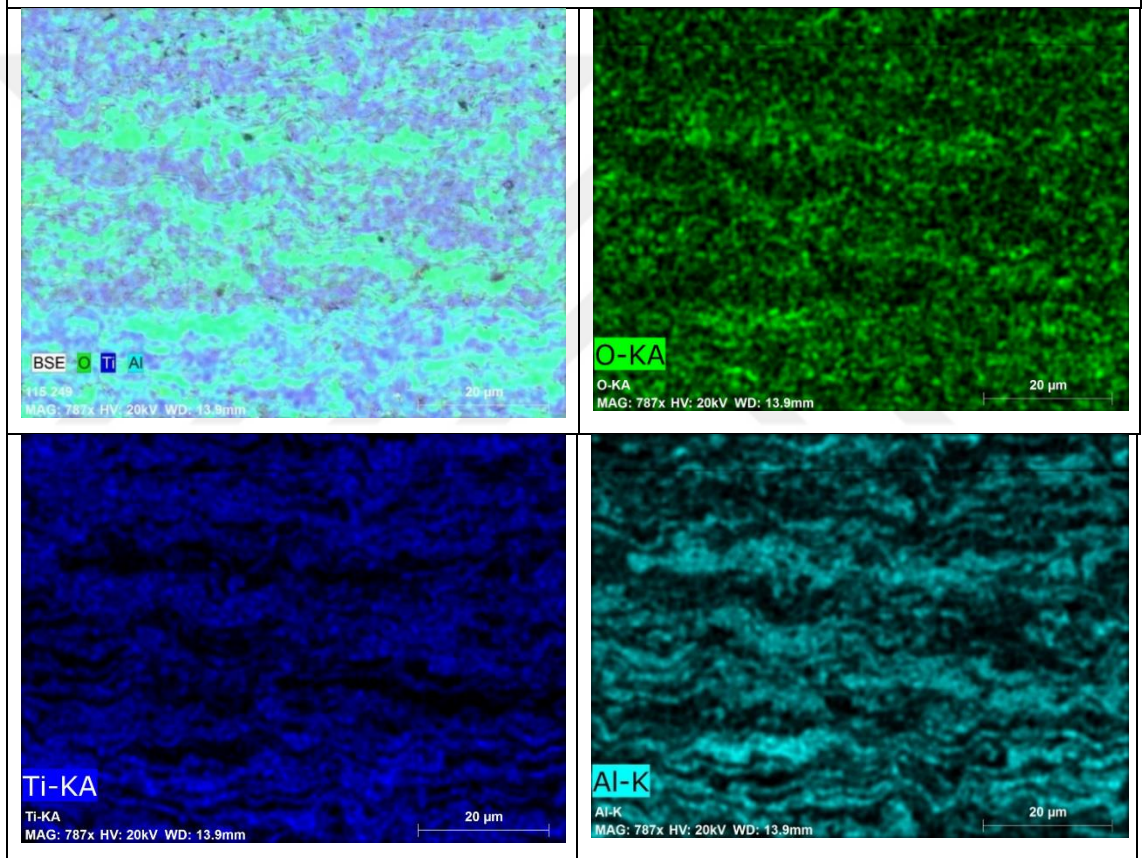
e. Kaplama kalınlığı

Şekil 7.1 : X1 kodlu kaplamaların kesit SEM görüntüleri ve kaplama kalınlığı.

Kaplama kesiti üzerinde noktasal ve haritalama EDX yöntemi ile element analizinde (Şekil 7.2) Titanyum, Alüminyum ve Oksijen elementleri gözlemlenmiştir. Açık gri olan yerlerde titanya koyu gri olan yerlerde alümina olduğu gözlemlenmiştir. Kesit üzerinde daha büyük büyütmelelerde çok küçük boyutlarda ergimemiş parçaların varlığı dikkat çekmektedir. Proseste kaplamanın yüksek enerjili püskürtüldüğü ve toz parçacıkların ergimeye zaman bulamadan yüzeyde katılaştığını işaret etmektedir. Harita EDX ölçümlerinde alumina zengin faz yapısı ve titanya zengin faz yapısının varlığı, lamelsi yapı açık bir şekilde gözlenebilmektedir.

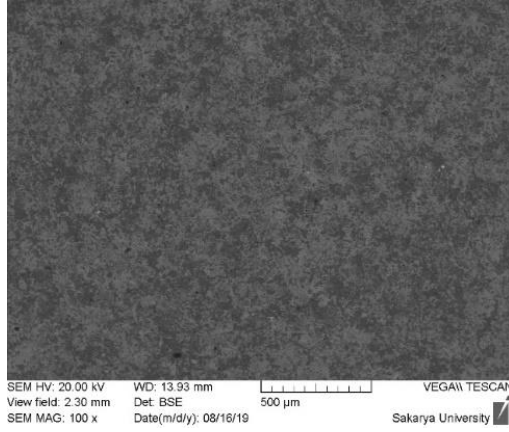


EDX analizi (noktasal)

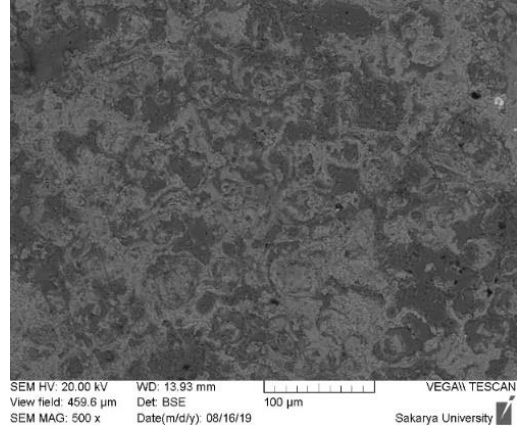


Şekil 7.2 : X1 kodlu kaplamanın SEM-EDX Analizleri (Noktasal ve Element Haritaları).

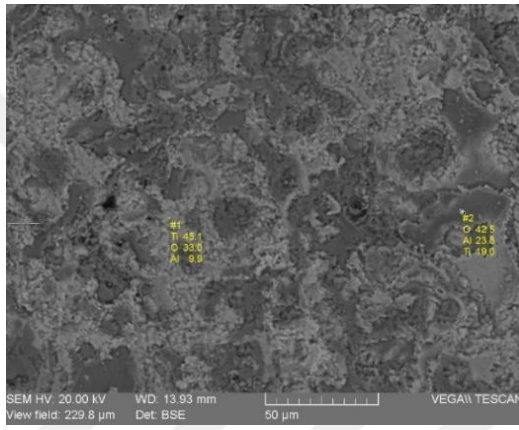
Şekil 7.3’de X1 kodu ile tanımlanan kaplamanın üst yüzey görüntüsü sergilenmektedir. Üst yüzey incelemelerinde homojen bir ergime olduğu gözlenebilmektedir. Splat yapıları yüksek sıcaklıkta ergiyik halde yüzey çarptıktan sonra hızla katılmış ve aşağıdaki yüzey morfolojisini oluşturmuştur. Genel olarak kaplama arzulan mikro yapısal özellikleri taşımaktadır.



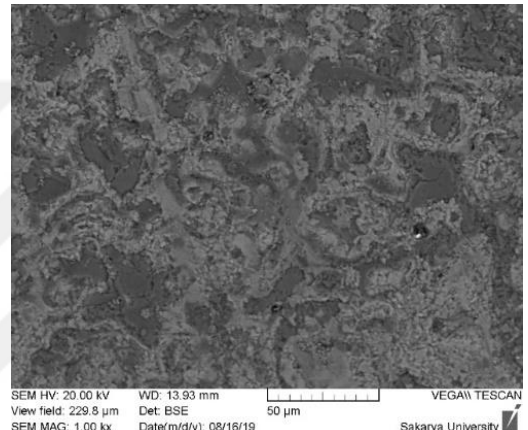
a. Kaplama üst yüzey görüntüsü (genel)



b. Kaplama üst yüzey morfolojisi



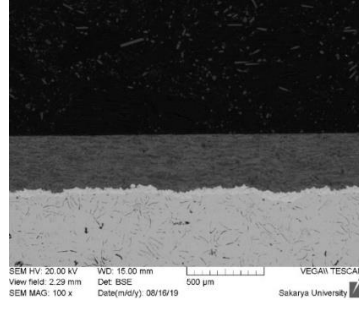
c. EDX (noktasal) analizi



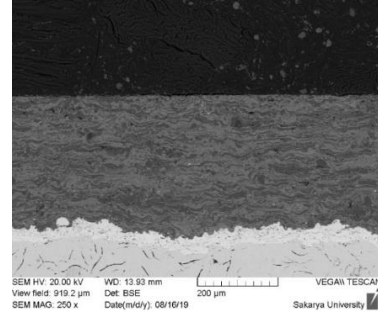
d. Kaplama üst yüzeyi (yüksek büyütme)

Şekli 7.3 : X1 kodlu kaplamaların üst yüzey SEM görüntüleri.

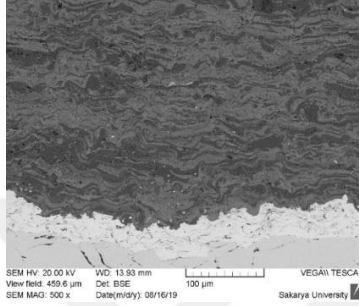
Şekil 7.4'te X2 kodu ile belirtilen sprej parametrelerine bağlı olarak üretilen kaplamaların kesit incelemeleri sergilenmektedir. Kaplama kesit mikroyapısında lamelli grafitli dökme demir üzerinde bağ tabaka ve onun üzerinde seramik üst tabaka gözlenmektedir. Benzer şekilde tipik bir plazma sprej mikroyapısı gözlenmektedir. Arayüzeyde kaplamanın altlığa iyi bir şekilde tutunduğu gözlenmektedir. Kaplama yapısında makro ölçeklerde süreksizlik ve porozite gözlenmemektedir. Şekil 7.4 e.'de kaplama kalınlıkları ölçülmüş ortalama 340 µm kaplama kalınlığı gözlenmiştir. Bağ tabaka kalınlığıda ölçülmüş, ortalama 40 µm bağ tabaka kalınlığı gözlenmiştir. Kaplama kalınlıklarının aynı paso sayısına bağlı olarak X1 parametrelerine göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum X2 parametreleri ile daha yüksek kaplama biriktirilebildiğini işaret etmektedir.



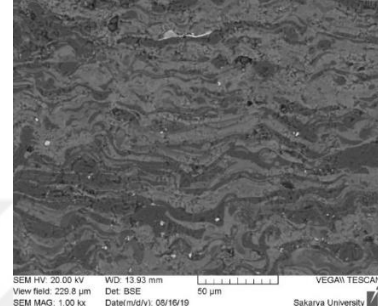
a. Kaplama kesit görüntüsü (genel)



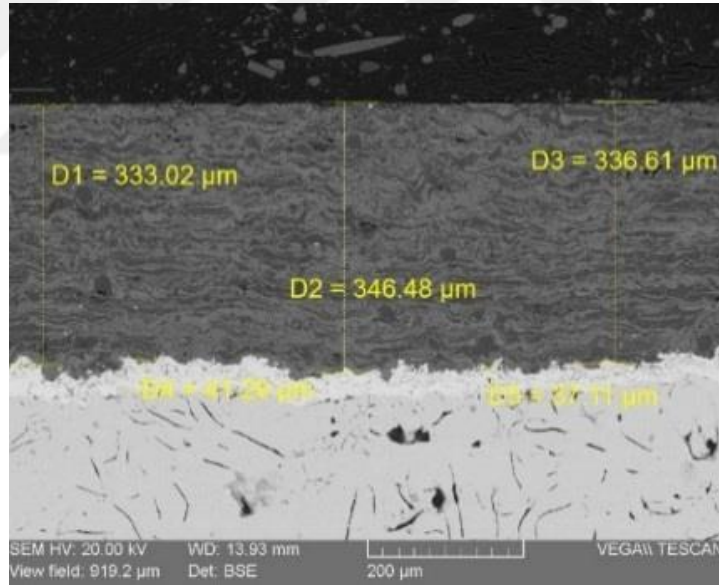
b. Altlık ve kaplama görüntüsü



c. Kaplama ve arayüzey görüntüsü



d. Tozların ergimesinden oluşan lamelli yapı

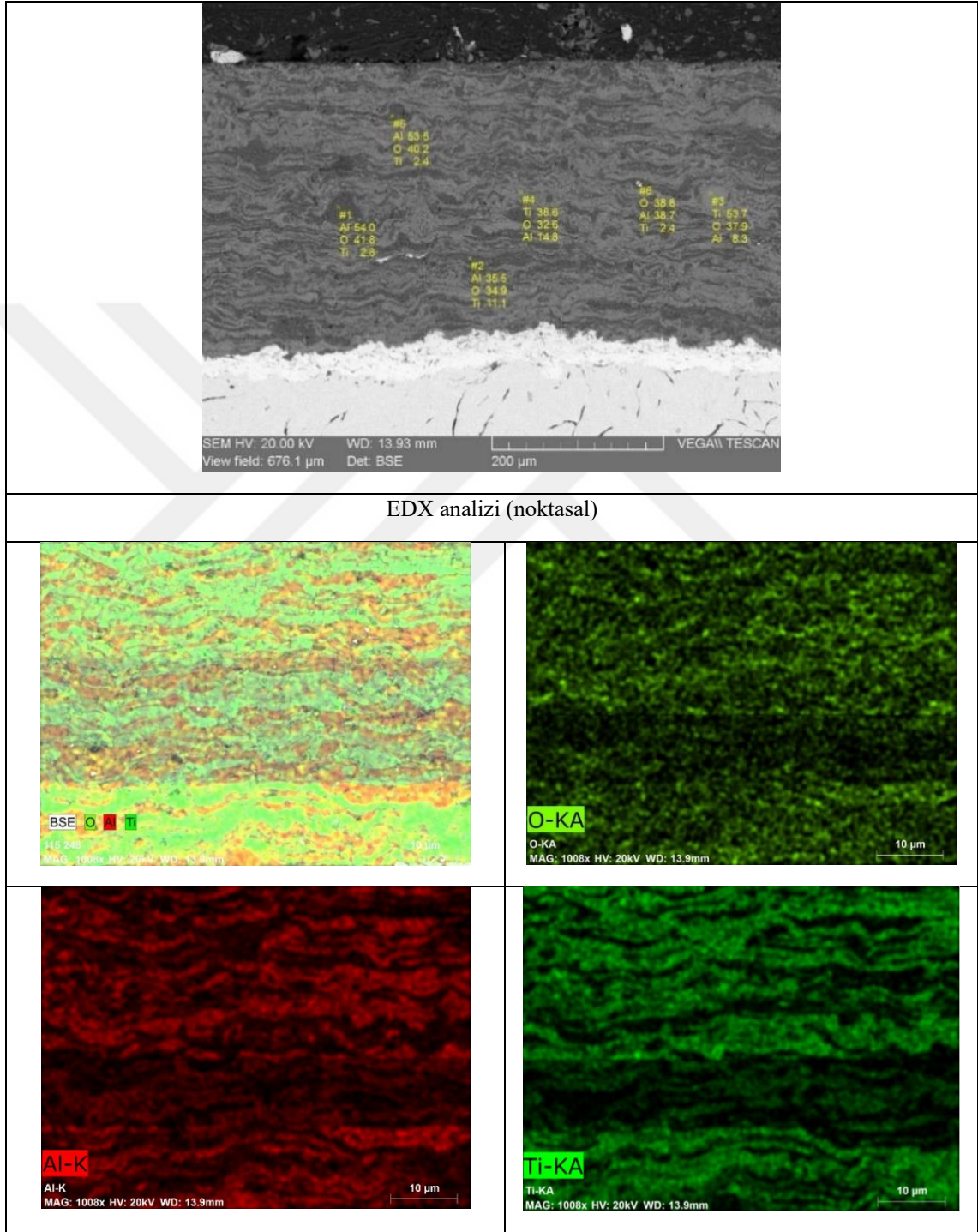


e. Kaplama ve bağ tabaka kalınlıkları

Şekil 7.4 : X2 kodlu kaplama kesit görüntüleri kaplama kalınlıkları ve ölçümleri SEM analizi.

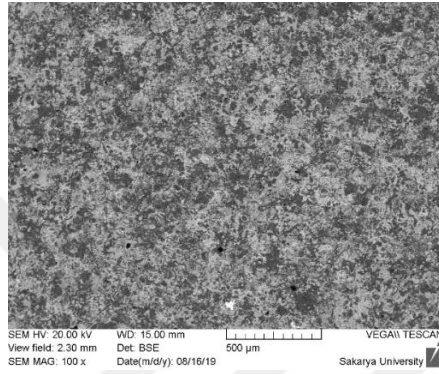
Benzer şekilde noktasal EDX analizinde (Şekil 7.5) koyu alanlar alümina esaslı açık alanlar tintanya esaslı olarak gözlenmektedir. Ergimemiş partiküllere bakıldığında daha yüksek ergime noktasına sahip olan alümina esaslı tozlar olduğu gözlenmektedir. Genel olarak kaplama kabul edilebilir mikroyapısal özellikleri taşımaktadır. Noktasal EDX alınan bölgelerde ergimemiş partikül oranının X1'e göre daha fazla olduğu açıkça

görülebilmektedir. Koyu renkte öbek şeklinde alüminaca zengin fazlar ve açık renkte yayılmış ve ergimemiş titanyaca zengin faz bölgeleri gözlenmektedir. X2 sprej parametrelerinde akımın yüksek olması sprej hızını artırmış buna karşın ergimemiş parçacık oranının artmasına neden olmuştur.

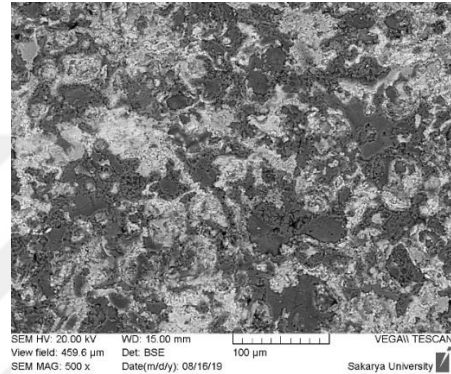


Şekil 7.5 : X2 kodlu kaplamanın EDX analizi (noktasal) ve element haritaları.

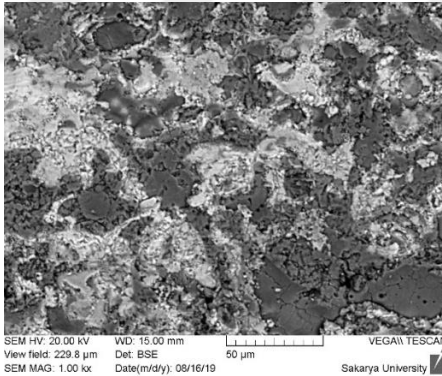
Şekil 7.6'da X2 kodlu kaplamanın üst yüzey mikro yapısı gözlenmektedir. Kesit mikro yapısında gözlenen süreksizliklerin burada da mevcudiyeti söz konusudur. Şekil 7.6 a.'da kaplamanın üst yüzeyinde de yeterli seviyede ergimemiş partiküller gözlenmektedir. Şekil 7.6 b.'de kaplamanın üst yüzey özelliklerinin X1'e göre daha heterojen dağılımı ve küçük ölçekli hatalar gözlenmektedir. Şekil 7.6 c.'de kaplamanın heterojen yapısı detaylı bir şekilde gözlemlenmiş hatalar detaylı şekilde ortaya çıkmıştır. Şekil 7.6 d.'de topografik yüzey incelenmiş kaplamanın homojen olmadığı gözlenmiştir.



a. Kaplama üst yüzey görüntüsü



b. Kaplamanın küçük hataları



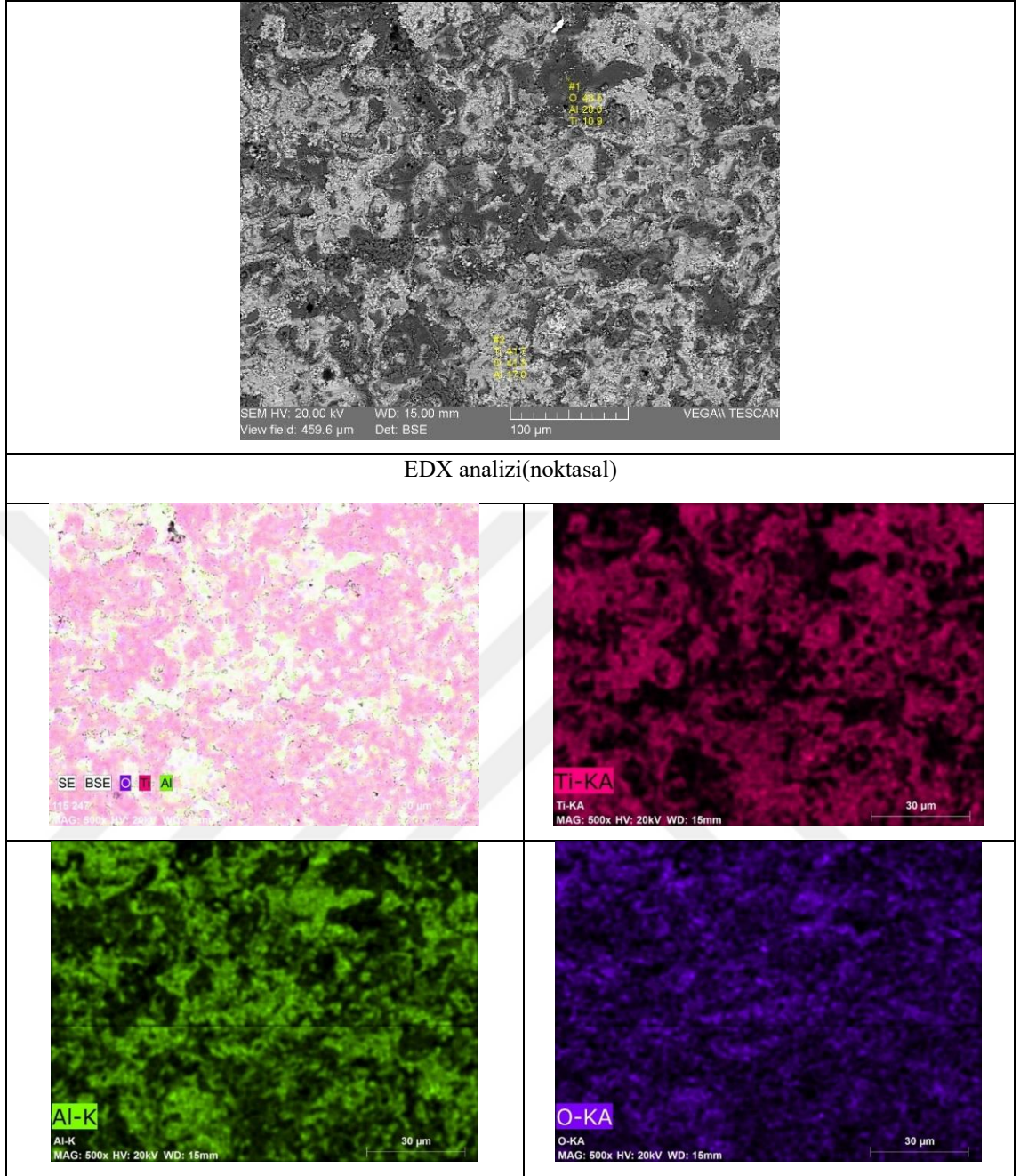
c. Kaplama yapısı



d. Topografik yüzey görüntüsü

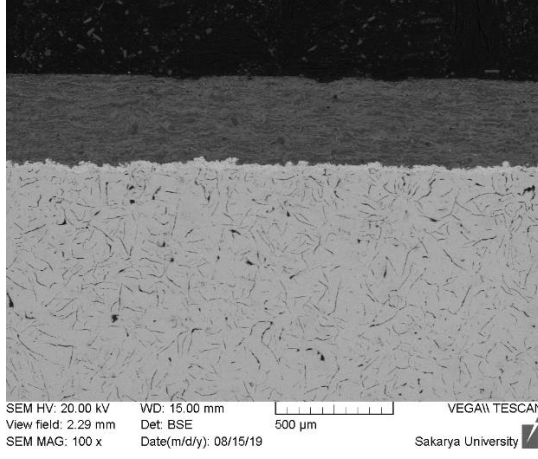
Şekil 7.6 : X2 kodlu kaplamanın üst yüzey görüntüleri ve topografik yüzey fotoğrafı.

Şekil 7.7'de X2 parametreleri ile üretilen kaplama üzerinde yapılan EDX analizinde (noktasal ve harita) benzer şekilde açık renkler titanya koyu renkler alumina esaslı olduğu gözlemlenmiştir.

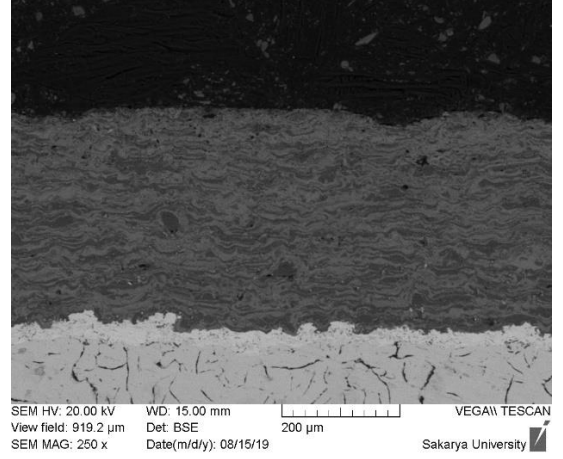


Şekil 7.7 : X2 kodlu kaplamanın EDX analizi (noktasal) ve harita element dağılımı.

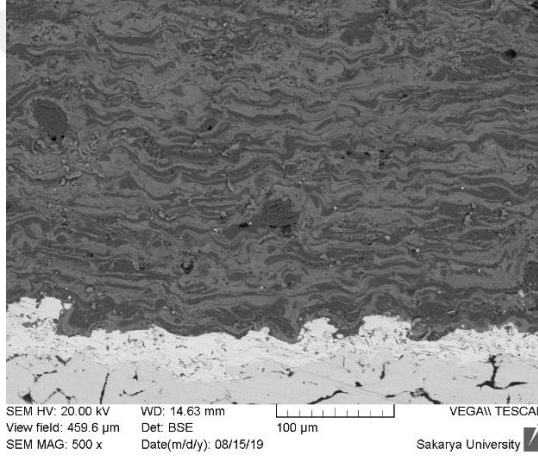
Şekil 7.8’de X3 parametreleri ile üretilen kaplamaların kesit görüntüsü sergilenmektedir. Benzer plazma sprey yapısı ve lameller açıkça görülebilmektedir. Kaplama kalınlığı 360µm (seramik tabaka) ve 35µm (bağ tabaka) mertebesindedir.



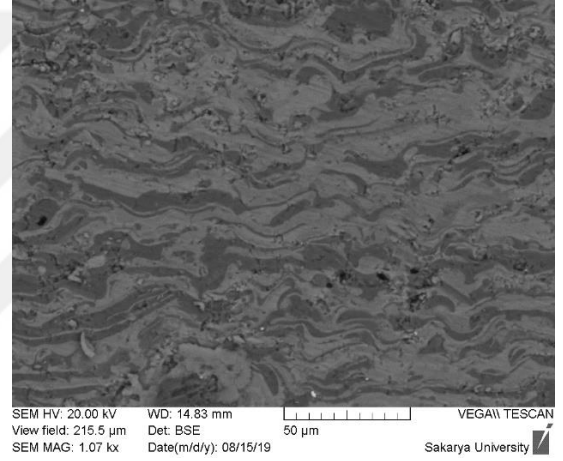
a.Altlık malzeme ve kaplama yapısı



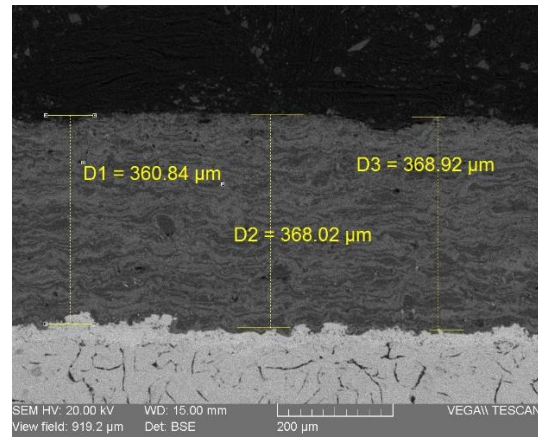
b.Kaplama görüntüsü



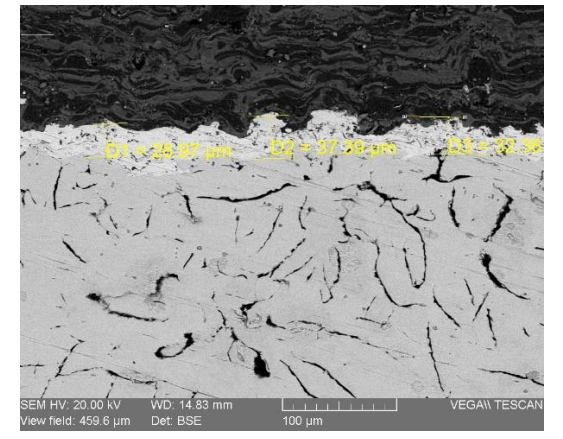
c.Bağ tabaka ve kaplama yapısı



d.Kaplamanın lamelli yapısı



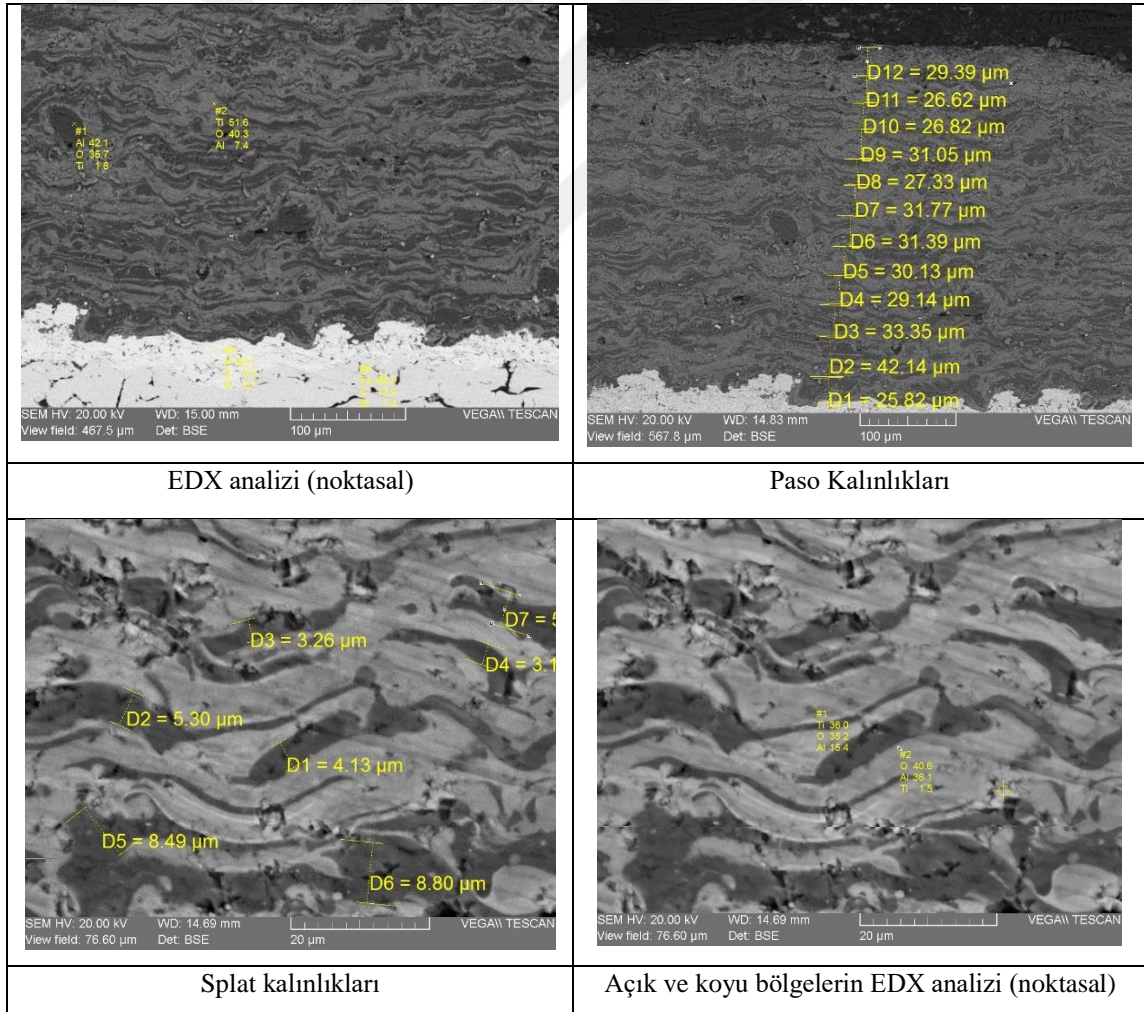
e.Kaplama kalınlıkları



f.Bağ tabaka kalınlığı

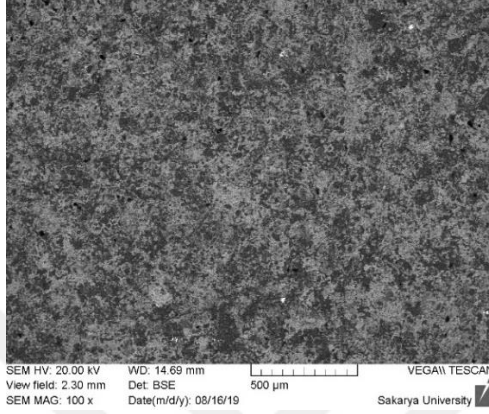
Şekil 7.8 : X3 koldu kaplamanın kesit görüntüleri, kaplama ve bağ tabaka kalınlıkları.

Şekil 7.9’da noktasal EDX analizi ve splat lamelleri incelenmiştir. Görüleceği üzere splat lamel kalınlıkları ortalama 30µm mertebesinde. Yaklaşık 12 paso sayısında kaplama işleminin gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Alumina esaslı splatların (koyu renkli) kalınlıklarının 3-9 µm aralığında olduğu açıkça görülebilmektedir. X1 ve X2 parametrelerine göre daha düşük akım (590A) ve daha uzun sprej mesafesinde (120mm) de püskürtme gerçekleştirilmiştir. Sprej mesafesinin artması plazma jeti içerisinde toz parçacıkların daha uzun süre kalmasına ve ergimesi için yeterli süreye neden olmaktadır. Sıvı hale geçen toz parçacıkların yüzey çarpması ile splatların yayılması daha fazladır. Bu mikroyapıda mikron ölçekli porozitelere yol açmaktadır. Genel olarak kaplama yapısı kabul edilebilir olmasına karşın mikron ölçekli süreksizlikler yanında kısmen ergimemiş parçacıklar gözlenmektedir.

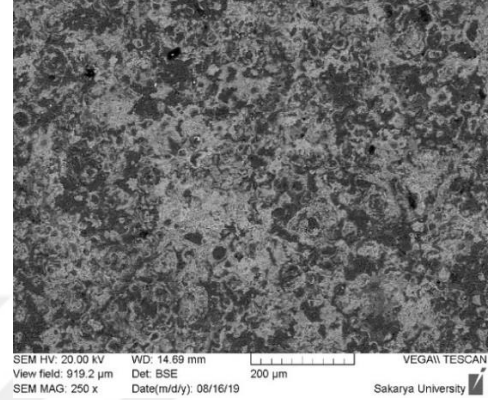


Şekil 7.9 : X3 kodlu kaplamada kesit EDX analizi, paso mesafeleri ve splat boyutları.

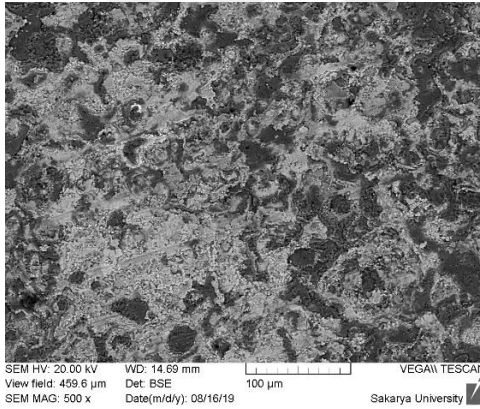
Şekil 7.10'da X3 kodlu kaplamanın üst yüzey özellikleri sergilenmektedir. Heterojen bir üst yüzey görünümü söz konusudur. Yüksek sıcaklıkta ve yüksek hızda kaplamanın püskürtüldüğü ve splatların çok fazla yayılmasından kaynaklı olarak yüzey homojenliğinin azaldığı gözlenmektedir.



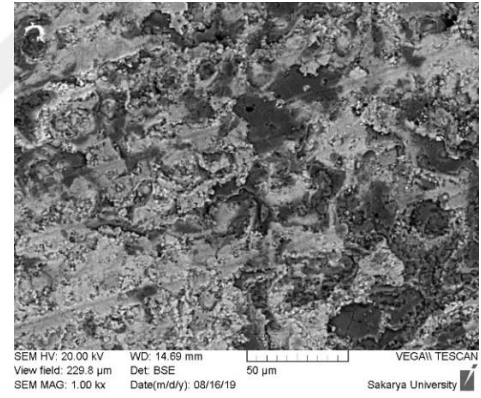
a. Üst yüzey görüntüsü



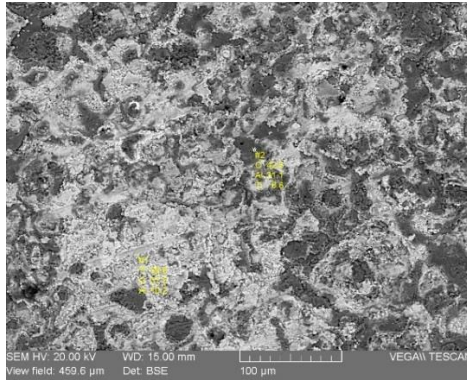
b. Genel görünüş ve ergimemiş partiküller



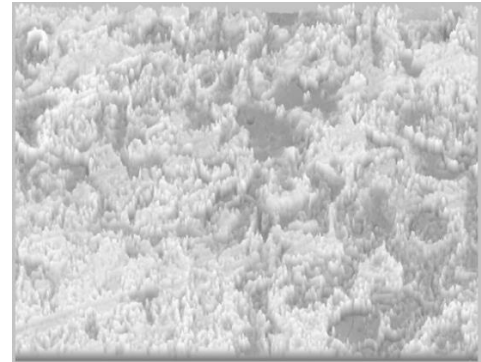
c. Kaplama yapısı



d. Kaplama yapısı (detay)



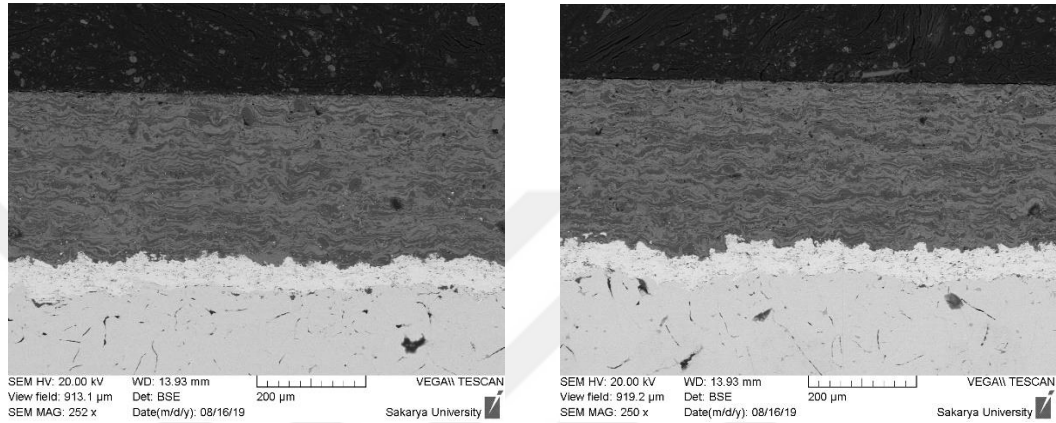
e. EDX analizi (noktasal)



f. Topografik görüntü

Şekil 7.10 : X3 üst yüzey görüntüleri, EDX analizi.

Genel olarak farklı plazma sprey parametreleri ile üretilen kaplamaların mikroyapısal karşılaştırması sonucunda X1 kodlu kaplamanın en uygun kaplama özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Gerçek disk üzerinde yapılacak kaplamalarda X1 proses parametrelerinin uygulanmasına karar verilmiştir. X1 kodu ile tanımlanan kaplama parametreleri (610 amper, 100mm mesafe, Ar/H₂: 40nlpm/12nlpm gaz oranı) parametreleri ile tekrarlanabilir kalitede kaplamalar elde edilebilmiştir (Şekil 7.11).



Şekil 7.11 : X1 kodlu kaplama kesit görüntüleri.

7.2 Plazma Sprey Kaplamaların Kalınlık ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Plazma sprey yöntemi ile üretilen disk kaplamaların kalınlığı parçaların kesit yüzeyinden 4 farklı bölgeden (alt, üst, sağ ve sol) ikişer ölçüm alınarak yapılmıştır. Aşağıda Tablo 7.1’de X1, X2 ve X3 parametreleri için ölçülen kaplama kalınlıkları verilmiştir. Burada kaplama kalınlıklarının sprey parametrelerine bağlı olarak değiştiği gözlenmektedir. Kaplama kalınlıkları talaşlı işlem sonrasında arzulanan kalınlığa getirilebilmektedir. Elde edilen ölçüm sonuçları kapsamında en yüksek birikme veriminin X3 kodlu parametreler ile elde edilmesine karşın kaplama yapısında süreksizliklerin mevcudiyeti karşısında optimum kaplama özellikleri X1 kodlu parametreler ile elde edilmiştir. Görüleceği üzere sprey parametreleri ile kaplama mikroyapısı kontrol edilebilmekte ve birikme hızı değiştirilebilmektedir.

Tablo 7.1 : Kaplama Kalınlık Ölçüm Sonuçları.

Ölçüm	Konum	X1	X2	X3
1	Alt	313	333	360
2		303	346	368
3	Üst	307	334	356
4		310	329	362
5	Sol	305	336	371
6		311	330	368
7	Sağ	315	342	357
8		300	338	361
Ortalama kalınlık (μm)		307,12	336	362,87

Kaplama kalitesinin kontrolünde bir diğer önemli özellik ise yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzey pürüzlülük ölçümleri iki aşamada yapılmıştır. Talaşlı işlem öncesinde ve sonrasında ölçümler yapılmış aşağıda Tablo 7.2’de verilmiştir. Talaşlı işlem sonrasında kaplama yüzeylerinin istenilen düşük ($R_a < 1\mu\text{m}$) pürüzlülük değerlerine geldiği gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü disk-balata malzemesi arasında aşınma sürtünme davranışları açısından oldukça kritik öneme sahiptir. Talaşlı işlem öncesinde en düşük yüzey pürüzlülüğü X1 kodlu parametreler ile elde edilebilmiştir. Bu durum kaplamanın homojen bir şekilde ergitilerek yüzeyde biriktirebildiğinin bir göstergesidir. Talaşlı işlem sonrasında sürtünme davranışlarında farklılık olması nedeniyle yüzey pürüzlülükleri elmas taşlama ile eş bir değere (yaklaşık $0,5\mu\text{m}$) getirilmiştir.

Tablo 7.2 : Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları.

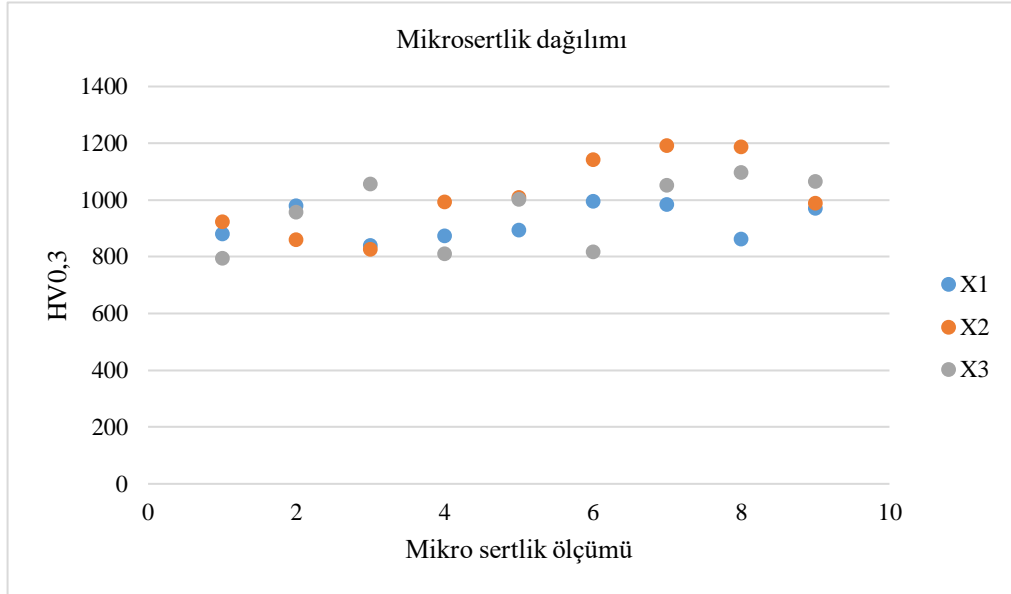
Kaplama Sonrası Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları			
Ra	X1	X2	X3
1	2,43	3,57	3,21
2	3,27	3,3	3,32
3	2,75	3,54	3,3
Ortalama	2,816667	3,47	3,276667
Taşlama Sonrası Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları			
Ra	X1	X2	X3
1	0,49	0,58	0,56
2	0,63	0,56	0,55
3	0,64	0,64	0,56
Ortalama	0,586667	0,593333	0,556667

7.3. Plazma Sprey Kaplamaların Mekanik Özellikleri

Termal sprej kaplamalarda genel olarak mekanik özelliklerin ölçümünde ilk olarak tercih edilen yöntem mikrosertliktir. Tablo 7.3’de farklı parametreler ile üretilen plazma sprej kaplamaların kesit mikrosertlik ölçüm sonuçları (9 ölçüm sonucu, ortalaması ve standard sapma) sergilenmektedir. Mikrosertlik değerlerine bakıldığında üç kaplama arasında sertlikler arasında farklar mevcut olup, yapısal süreksizliklere, lamel morfolojisine, porozite ve lameller arası yapışma özelliklerine bağlı olarak değişim söz konusudur. Mikro sertlik değerleri 900-1100 HV_{0,3} aralığındadır. Burada en yüksek sertliğin sırasıyla X2 ve X3 sprej parametreleri ile üretilen kaplamalarda elde edilmesine karşın sertlik değerlerinin dağılımının homojen olmadığı tespit edilmiştir. Buna karşın X1 kodlu kaplamanın sertlik değeri daha düşük olmasına karşın sertlik standard sapması daha küçük ve homojen bir sertlik dağılımı sergilediği anlaşılmaktadır (Şekil 7.12).

Tablo 7.3 : Farklı parametreler ile üretilen plazma sprey kaplamaların sertlik ölçüm sonuçları.

Sertlik ölçüm HV _{0,3}	X1	X2	X3
1	880	925	796
2	980	860	957
3	841	826	1057
4	875	994	812
5	895	1010	1003
6	996	1142	818
7	986	1193	1053
8	864	1188	1097
9	972	990	1067
ort	921	1014,222	962,2222
std	57,7846	135,4038	121,9906



Şekil 7.12 : Plazma sprey kaplamaların sertlik ölçüm dağılım grafiği.

Kaplamaların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ikinci en önemli test yapışma test sonuçlarıdır. Splatların altlığı ve birbirleri arasında tutunmasında önemli bir göstergedir. Tablo 7.4’de yapışma testi için kaplanmış numuneler, test için numunelerin birbirine yapıştırılmış fotoğrafları, test aşamasından ve sonrasında fotoğraflar ve testin nasıl yapıldığı sergilenmektedir. ASTM C633 standartlarında uygulanan test sonucunda tablo 7.5’de elde edilen değerler ve ortalama yapışma dayanımları sergilenmektedir. Görüleceği üzere yapışma test sonuçları arasında belirgin bir fark söz konusu olmamasına karşın en yüksek yapışma X1 değerlerinde gözlenmektedir. Ayrılma splatlar arasında gerçekleşmiştir. Kohezif ayrılma şeklinde olup, altlıktan ayrılma gerçekleşmemiştir.

Tablo 7.4 : Yapışma testi numuneleri ve uygulışı.



Kaplanmış numuneler



Test için hazırlanmış ve yapıştırılmış numuneler



Yapışma testi yapılmış numuneler

Tablo 7.5 : Kaplamaların yapışma testi ölçüm sonuçları (mpa).

Parametreler/ Ölçüm	X1	X2	X3
1	9,12	8,4	8,2
2	9,3	8,46	8,24
3	9,35	8,42	8,28
Ortalama Değer	9,256666	8,426667	8,24
Ayrılma Türü	Kohezif		
Ayrılma bölgesi	Splatlar arasında		



7.4. Plazma Sprey Kaplamalı Disklerin Kalınlık, DTV, Salınım Ölçüm Sonuçları

Gerçek fren diskleri üzerinde X1 (optimize sprej parametreleri) ile üretilen kaplamalar Fiat Egea marka araca takılarak 20.000 km sürüş testine tabi tutulmuştur. Her 5000 km’de diskler üzerinde ölçüm alınarak disklerde et kalınlığı değişimleri Şekil 7.13’de sergilenmektedir. Kaplamalı disk aracın kullanımına bağlı olarak zamanla aşınmakta ve yüzeyde parlaklık etkisi oluşturmaktadır. Orijinal balata ile temas halinde karşılıklı olarak malzeme transferi ve ısı dağılımı söz konusudur. Bu durum da disk yüzeyinde renk ve ton farklılıkları oluşturabilmektedir.



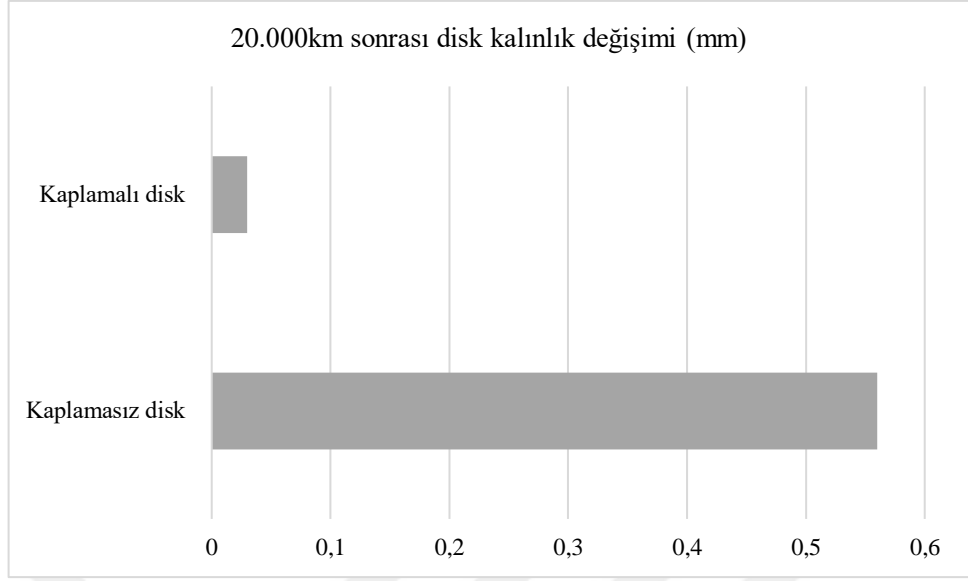
Şekil 7.13 : Araç üzerinde kaplamalı disk üzerinde et kalınlığı ölçümü ve görsel kontrol (toplam 20.000 km).

Kaplamalı diskler (sağ ön disk ve sol ön disk) üzerinde yapılan kalınlık ölçüm sonuçları Tablo 7.6’de sergilenmektedir. Otomotiv sektöründe disk aşınması kalınlık kontrolü ile gerçekleştirilmektedir. Diskin başlangıç kalınlıkları yaklaşık 26.5 mm olup, 20.000 km sonrasında 0.015-0,03 mm arasında azalma gözlenmiştir. Bu değerler kaplamasız disklerle

göre oldukça düşük seviyelerdedir. Karşılaştığımızda kaplamasız disklerde kalınlık değişimleri 0,45-0,55 mm seviyesindedir. Bu durumda kaplamalı disklerin 18-20 kat daha uzun ömürlü olduğu ortaya çıkmaktadır (Şekil 7.14).

Tablo 7.6 : Araç üzerinde servis ömrü testinde kaplamalı disk kalınlığı ölçümleri.

Araç Sürüş Mesafesi (km)	Sağ Disk Kalınlığı (mm)				Sol Disk Kalınlığı (mm)			
	Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3	Bölge 4	Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3	Bölge 4
0	26,45	26,46	26,46	26,45	26,5	26,5	26,5	26,49
300	26,44	26,45	26,45	26,45	26,5	26,5	26,5	26,49
500	26,45	26,46	26,45	26,45	26,5	26,5	26,5	26,48
1600	26,45	26,46	26,46	26,45	26,5	26,5	26,5	26,49
5000	26,45	26,44	26,45	26,45	26,5	26,51	26,5	26,49
7500	26,44	26,45	26,45	26,44	26,49	26,51	26,5	26,49
10.000	26,44	26,45	26,44	26,44	26,49	15-26,49	26,49	26,49
15.000	26,425	26,43	26,44	26,43	26,48	26,49	26,49	26,48
20.000	25,425	26,43	26,43	26,425	26,48	26,48	26,48	26,475
Toplam kalınlık kaybı	-0,015	-0,03	-0,03	-0,025	-0,020	-0,020	-0,020	-0,015



Disk durumu	0 km	20.000 km sonrası	Değişim
Kaplamasız disk	26,5	25,94	0,56
Kaplamalı disk	26,46	26,43	0,03

şekil 7.14 : Kaplamalı ve kaplamasız disk üzerinde 20.000 km test sürüşü sonrasında kalınlık değişimlerinin karşılaştırması.

şekil 7.15’de kaplamalı disk üzerinde 20.000 km test sürüşü sonrasında disk yüzeyi ve balataların görüntüsü sergilenmektedir. Görüleceği üzere disk yüzeyinde hiçbir hasar oluşmazken balata malzemesinde aşınma ve dökülmeler açıkça görülebilmektedir. Disk ile balata arasında artan ısının balatanın daha fazla aşınmasında etkili olduğu gözlenmektedir. Kaplamalı diskler için balata malzemesi geliştirilmesi önemli bir diğer konudur.



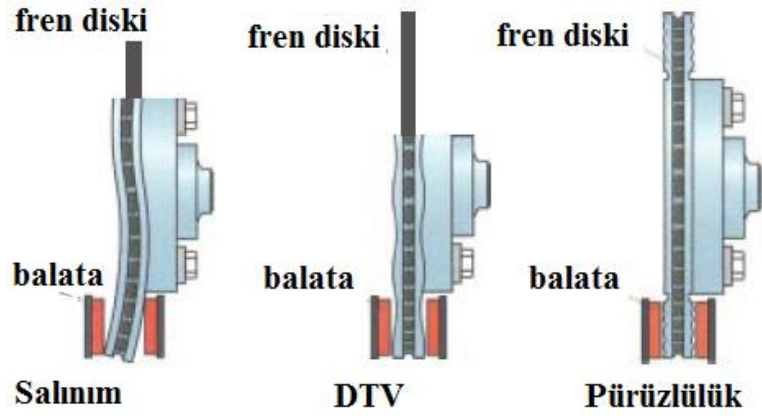
şekil 7.15 : Kaplamalı disk üzerinde 20.000km test sürüşü sonrasında disk yüzeyi ve balataların görüntüsü.

Fren disk kalite kontrolünde en önemli testlerin başında yer alan disk kalınlık değişimi ve salınım oranlarının ölçümüdür. DTV ölçüm sonuçları Tablo 7.7’de verilmektedir.

Kaplamasız disklerde 20.000 km sonrasında DTV değerlerinde 20 μm üzerinde değişimler gözlenirken, kaplamalılarda bu 8 μm seviyesindedir. Bunun yanında salınım değerleri karşılaştırıldığında kaplamasız disklerde çok daha yüksek salgılar oluşmaktadır.

Tablo 7.7 : Seramik kaplamalı ve kaplama yapılmamış fren diskinde disk kalınlık değişimi (DTV).

Seramik kaplamalı		DTV (μm)			Salgı Runout (μm)
0 km	17	21	29	55,5	
20000 km	8	10	19	35	
0 km	16	20	21	20	
20000 km	8	8	9	20,5	
Kaplamasız		DTV (μm)			Runout (μm)
0 km	1,6	3,5	2,93	8,80	
20000 km	21	31	25,7	32	
0 km	2,9	2	2,8	11	
20000 km	24,3	27	41,5	37,7	

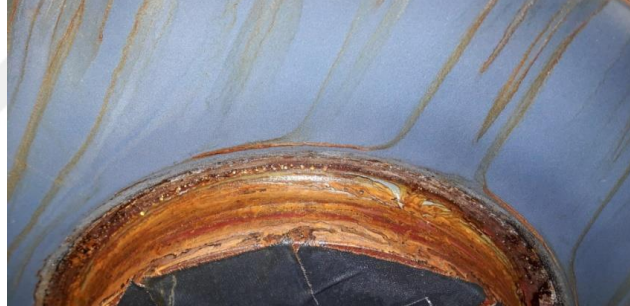
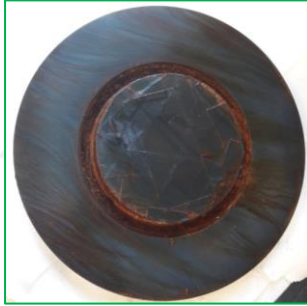


7.5. Plazma Sprey Kaplamalı Disklerin Tuz Testi Sonucu

Kaplamalı diskler üzerinde korozyon testi gerçekleştirilmiştir. Tuz püskürtme testlerinde seramik kaplamalı diskler üstün performans sergilemiştir (Tablo 7.8). 720 saat sonra kaplama yüzeyinde kırmızı pas gözlenmemiştir. Kaplamalı diskler 72 saat içerisinde kırmızı pas göstermektedir.

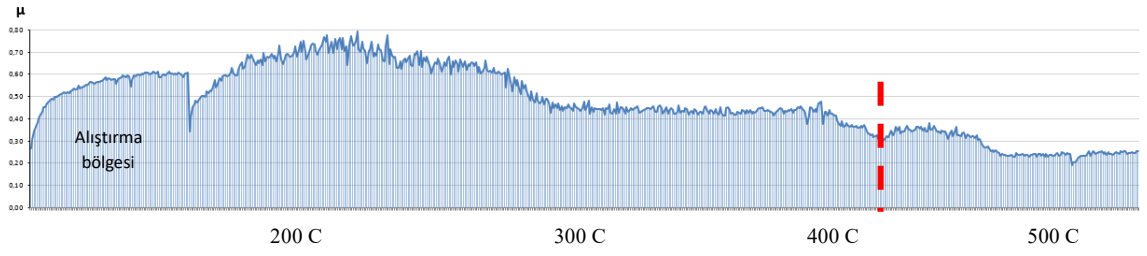
Tablo 7.8 : Tuz testi sonuçları.

Kontrol Saatleri	Sonuç
72 saat	Seramik kaplı yüzeylerde korozyon gözlemlenmemiştir.
172 saat	Seramik kaplı yüzeylerde korozyon gözlemlenmemiştir.
240 saat	Seramik kaplı yüzeylerde korozyon gözlemlenmemiştir.
312 saat	Seramik kaplı yüzeylerde korozyon gözlemlenmemiştir.
480 saat	Seramik kaplı yüzeylerde korozyon gözlemlenmemiştir.
600 saat	Seramik kaplı yüzeylerde korozyon gözlemlenmemiştir.
720 saat	Seramik kaplı yüzeylerde korozyon gözlemlenmemiştir.



7.6. Kaplamalı ve Kaplamasız Disklerin Dinamometre Testi Sonuçları

Kaplamalı ve kaplamasız disklerin original balata malzemesi ile karşılıklı etkileşimlerini belirlemek amacıyla farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının değişimi dinamometre test sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test sonucunda balata yüzeyleri incelenmiş ve balata malzemesi kütle ve kalınlık değişimleri gözlemlenmiştir. Şekil 7.16'da kaplamasız disk üzerinde dinamometre testi sonrası sürtünme katsayısının değişim profili sergilenmektedir. Alıştırma sürecinde sürtünme katsayısı disk yüzeyindeki pürüzlülükler azalana kadar artış göstermektedir. Alıştırma bölgesi sonrasında 200-400 °C arasında sürtünme katsayısı arzulanan tutunmayı sağlamaktadır.



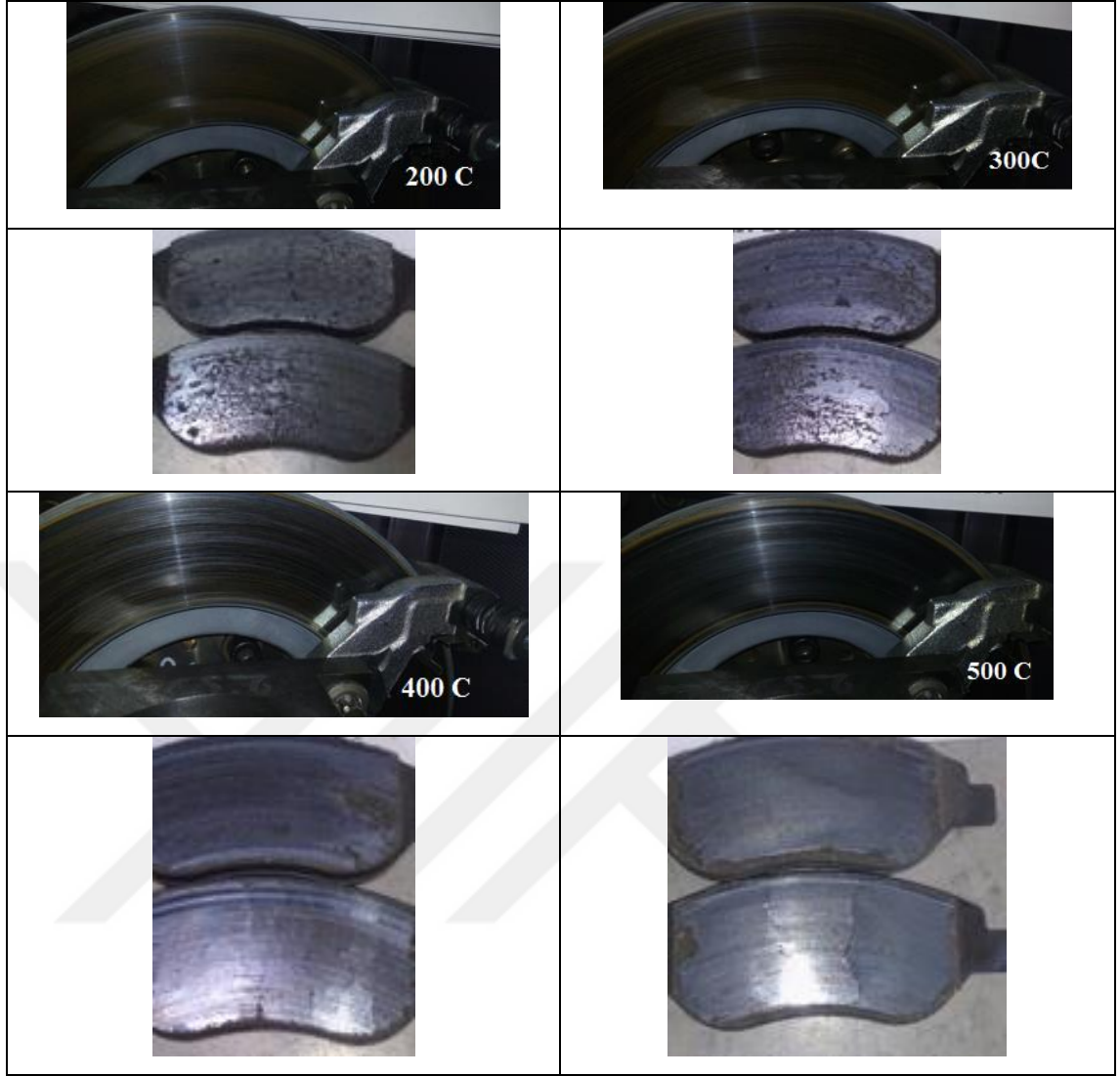
Şekil 7.16 : Kaplamasız disk üzerinde dinamometre testi sonrasında sürtünme katsayısının değişimi.

Görüleceği üzere genel olarak sürtünme katsayısı sıcaklığın artışı ile azalmaktadır. Sürtünme katsayısı (μ değeri) başlangıçta 0,65 olup 500 °C'lerde 0,30 seviyesindedir (tablo 7.9). Balata malzemesi 400 °C'nin üzerinde degrade olmakta ve aşınma kaybı artmaktadır.

Tablo 7.9 : Kaplamasız disk-balata arasında balata aşınma kaybı ve sürtünme katsayısı değişimi sonuçları.

Disk sıcaklık	Kütle kaybı (gr)	Sürt. Kats (μ)
200 °C	0,67	0,65
300 °C	1,10	0,66
400 °C	6,42	0,45
500 °C	28,74	0,30
Toplam	36,92	-

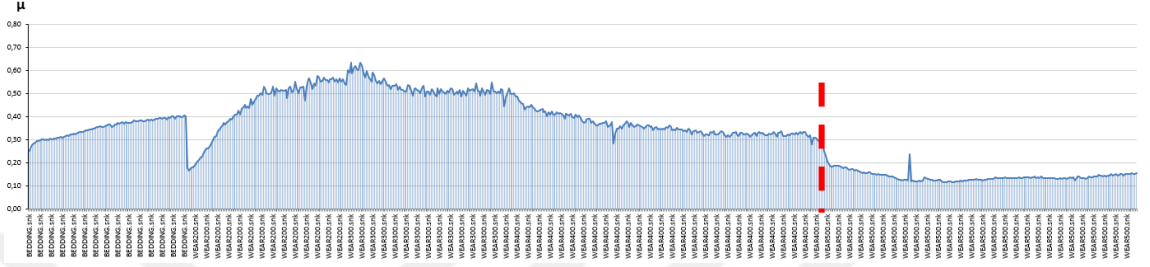
Şekil 7.17'de kaplamasız disk ile balata arasında sürtünme etkisiyle aşınma sonrasında yüzey görünümleri sergilenmektedir. Görüleceği üzere sıcaklığın artması ile balata yüzeylerinde degradasyon ve camsılaşma görünüm açığa çıkmakta ve bu durum sürtünme katsayısının düşmesine neden olmaktadır. Belirli bir kütle kaybı sonrasında balatanın ağırlığının azalması aralarındaki mesafenin değişmesine neden olmaktadır Bu durum fren performansını da olumsuz etkilemektedir. Balata malzemesi içerisinde polimerik esaslı bileşenlerin ısının etkisi ile bozulması bu duruma yol açmaktadır. Bu nedenle ısıl kararlılığa sahip balata malzemesi geliştirilmesi ve kullanımı emniyetli fren açısından önem taşımaktadır. Fren tozu olarak tanımlanan kirletici unsurlar disk aşınması ve balata aşınması nedeniyle çevreye salınan paritküllerdir.



Şekil 7.17 : Kaplamasız disk üzerinde dinamometre testi sonrasında disk ve balata malzeme yüzeylerinin görünümü.

Kaplamalı disk üzerinde aynı fren rejimi için gerçekleştirilen dinamometre testi sonucu sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 7.18’de sergilenmektedir. Alıştırma sürecinde kaplamasız diskte olduğu gibi sürtünme katsayısı disk yüzeyinde pürüzlülük etkisiyle artış göstermektedir. Alıştırma sürecini takiben artan sıcaklık etkisi ile benzer şekilde sürtünme katsayısının azaldığı gözlenmektedir. 400 °C’ye kadar sürtünme katsayısı frenleme için gerekli sürtünme değerini sağlamaktadır. Sıcaklığın 500 °C’nin üzerine çıkılması durumunda sürtünme katsayısının aniden düşüş gösterdiği tespit edilmiştir (Tablo 7.10). Test şartlarında bu sıcaklıklarda ortalama 100 fren gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığın artışı balata malzemesinin degradasyonunu artırmıştır. Bu durum aşınma kayıplarının da artmasına neden olmaktadır. Kaplamalı diskler karşısında balata malzemesinin daha fazla aşındığı gözlenmektedir. Disk yüzeyinde sert ve

koruyucu bir kaplama tabakasının mevcudiyeti disk yerine balatanın aşınmasına neden olmaktadır. Şekil 7.19'dan da görüleceği üzere disk aşınması söz konusu olmazken balata yüzeylerinin ısı artışıyla daha hızlı aşındığı gözlenmektedir. Kaplamanın ısı bariyeri görevi gösterdiği ve diskin ısıyı uzaklaştırmakta zorlandığı anlaşılmaktadır. Bunun üzerine kaplama kalınlığının azaltılmasına karar verilmiştir.



Şekil 7.18 : Kaplamalı disk üzerinde dinamometre testi sonrasında sürtünme katsayısının değişimi.

Tablo 7.10 : Kaplamalı disk-balata arasında balata aşınma kaybı ve sürtünme katsayısı değişimi sonuçları.

Disk sıcaklık	Kütle kaybı (gr)	Sürt. Kats (μ)
200 °C	1,77	0,44
300 °C	2,13	0,53
400 °C	12,41	0,36
500 °C	70,61	0,14
Toplam	86,91	-



Şekil 7.19 : Kaplamalı disk üzerinde dinamometre testi sonrasında disk ve balata malzeme yüzeylerinin görünümü.

Kaplama kalınlığı 1/2 oranında azaltılarak 150 µm altında kalınlıklarda disk üzerinde kaplama tabakası oluşturulmuştur. Bu sayede kaplamanın ısı bariyeri etkisi azaltılmaya çalışılmıştır. Tablo 7.11’de 500 °C’de sürtünme katsayısı 0,44 seviyesinde olup arzulanan sürtünme katsayısına ulaşılabilmiştir. Yüzeyde ısınmanın kontrol altına alınması balata malzemesinin aşınmasını ve kütle kaybını da azaltmıştır. Şekil 7.20’de ince kaplamalı disk üzerinde dinamometre testi sonrasında disk ve balata malzeme yüzeylerinin görünümü sergilenmektedir.

Tablo 7.11 : İnce kaplamalı disk-balata arasında balata aşınma kaybı ve sürtünme katsayısı değişimi sonuçları.

Disk sıcaklık	Kütle kaybı (gr)	Sürt. Kats (µ)
200 °C	0,58	0,56
300 °C	0,92	0,71
400 °C	4,76	0,63
500 °C	16,45	0,44
Toplam	22,70	



Şekil 7.20 : İnce kaplamalı disk üzerinde dinamometre testi sonrasında disk ve balata malzeme yüzeylerinin görünümü.

BÖLÜM 8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması Alümina-Titanya esaslı seramik tozların plazma sprej yöntemi ile dökme demir fren diskleri üzerinde optimize sprej parametreleri elde edildikten sonra farklı katman kalınlıklarında biriktirilmesi ve sonrasında tribolojik açıdan kaplamalı diskler ile balata malzemesi arası sürtünme davranışının farklı sıcaklıklarda değişimleri irdelenmeye çalışılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar genel olarak aşağıda özetlenmektedir:

Fren diskleri için plazma sprej yöntemi ile üretilen kaplama kompozisyonu A13 olarak belirlenmiştir. A13 ($Al_2O_3-TiO_2$ ağı.%13) için kaplama kalınlıklarının 600-700µm olup, taşlama sonrası 300 ± 50 µm olarak, %1> porozite, 900 ± 50 HV_{0,3} belirlenmiştir. Daha sonraki çalışmalarda disk üzerinde termal yüklerin azaltılması ve proses maliyetinin azaltılması için kaplama kalınlığının (taşlama sonrasında) 120 ± 20 µm olmasına karar verilmiştir. Arzulanan kaplama kalitesi ve kalınlıkları elde edilebilmiştir. Kaplamaların birikme verimi sprej parametrelerine bağlı olarak ortalama %65-70 seviyesindedir. Plazma sprej prosesi ile gri dökme demir alaşımları üzerinde korozyona ve aşınmaya karşı dirençli kaplama tabakası başarı ile uygulanabilmiştir. Kalın kaplamaların disk yüzeyinde termal bariyer etkisi oluşturması ısının uzaklaştırılmasını geciktirmiştir. Bu durum balata malzemesinin hızla degrade olmasına ve daha hızlı aşınmasına neden olmuştur. Kaplama kalınlığının azaltılması ile bu etki önemli ölçüde kontrol altına alınarak sürtünme katsayısı değerleri yüksek sıcaklıklarda bile yeterli performansı gösterebilmiştir.

Kaplamalı diskler üzerinde dinamometre testleri (orjinal balata ile) toplamda 1000 fren için farklı hızlarda ve farklı sıcaklık koşullarında (200-500 °C) gerçekleştirilmiştir. Sürtünme katsayısı 0,3-0,5 arasında değişmektedir. 500 °C'nin üzerinde (2 saat boyunca frenlemeye maruz kalması nedeniyle) sürtünme katsayısı balata malzemesinin bileşenleri arasında polimerik yapıların degrade olması nedeniyle düşmektedir. Bu bağlamda daha yüksek performanslı metalik bileşen (Fe, Cu gibi) içermeyen ve ısıya dirençli yeni nesil

kompozit balata malzemesi geliştirilmesi ihtiyacı bulunmaktadır. Bu tür kaplamalı disklerin kullanımında uygun balata seçimi ve kullanımı zorunlu kılınmalıdır.

Bu tez çalışması kapsamını takiben yapılması önerilen çalışmalar aşağıda sunulmaktadır: kaplamalı disk üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile termal analiz yapılarak disk üzerinde ısıl dağılımların ve ısı etkisiyle meydana gelen termal gerilmelerin belirlenmesi, disk üzerinde sıcaklığın termal kamera yöntemi ile ölçülerek ısınma hızı ve soğuma hızının etkilerinin incelenmesi ve doğrulama testlerinin yapılması önerilmektedir. Bunun yanısıra plazma sprej yöntemi ile farklı kaplama kompozisyonları üzerinde çalışmalar yürütülebilir. Kaplama kalınlığı, yüzey özellikleri, kimyasal kompozisyonu ve mikroyapısal özelliklerine bağlı sürtünme davranışının etkisi kapsamlı bir şekilde karşılaştırmalı olarak irdelenebilir. Termal sprej yöntemleri arasında bir diğer ekonomik çözüm olan ark sprej yöntemi ile metalik karakterde kaplama uygulamaları ve kaplamanın fren performansına etkileri detaylı bir şekilde incelenmesi bir diğer ilgi çekici çalışma konusudur. Lazer ışını ile metalik tozların yüzeyde biriktirilmesi ve oluşan tabakanın performansının izlenmesi gelecekte katmanlı imalat uygulamaları açısından önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Ölekli H., (2019) KPMG, *Otomotiv- Sektörel Bakış*, Rapor
- [2] Pişkin S., (2017) OSD, Otomotiv Sektör Raporu: *Türkiye Otomotiv Sanayii Rekabet Gücü ve Talep Dinamikleri Perspektifinde 2020 İç Pazar Beklentileri*, Rapor, Ocak.
- [3] T.C. Cumhurbaşkanlığı Yatırım Ofisi (2019), *Otomotiv Sektöründe Gündem*, Özel Sayı;
- [4] Fred P. (1985) *Brake Handbook*, HPBooks.
- [5] Brembo SpA (1999); *The Brembo Guide To Brake Disc Assembly And Maintenance Book*.
- [6] Asim R., (2014), Overview of Disc Brakes and Related Phenomena—a review, *Int. Journal Vehicle Noise and Vibration*, Vol.10, No.4, pp.257-301.
- [7] Maleque M.A., Dyuti S., Rahman M.M.,(2010) Material Selection Method in Design of Automotive Brake Disc, *Proceedings of the World Congress on Engineering, London, UK*. Vol III, 2322-232.
- [8] Omkar A., Algenaid W., Awe S., Josh S., (2019) *Coatings for Automotive Gray Cast Iron Brake Discs: A Review*, *Coatings* 9, 552, 1-27.
- [9] Hans B., **Theisen**, W. (2008) *Werner Theisen, Ferrous Materials, Steel and Cast Iron*, Springer-Verlag Berlin 125-147.
- [10] Shreyas D., Aniket K., Rohan D., Yash De., (2017) Review on Thermal Cracking Phenomenone in Brake Disc; *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*; Vol. 6 Issue 06, June,233-236.
- [11] Brake Discs Trouble Tracer Chart; *Federal-Mogul Motorparts PRMCM1738-EN*.
- [12] R. Knight and R.W. Smith, (1998) Thermal Spray Forming of Materials, Powder Metal Technologies and Applications, Vol 7, *ASM Handbook*, ASM International, pp. 408–419

- [13] R.C. Tucker, (1994) Jr., Thermal Spray Coatings, Surf. Eng., Vol.5, *ASM Handbook, ASM International*, pp. 497–509
- [14] Heimann, B., (1996), Plasma Spray Coating, *VCH Publishers*, New York, Chapter 3.
- [15] J. R. Davis, (2004), *Handbook of Thermal Spray Technology*, First. Materials Park, OH 44073-0002: ASM International.
- [16] Santo L., (2008) Laser cladding of metals: a review, *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2008 Vol.2 No.5, pp.327- 336
- [17] Ekrem ALTUNCU, (2011) *YSZ VE CSZ Esaslı Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi, Karakterizasyonu ve Termal Çevrim Performanslarının Karşılaştırılması*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi
- [18] Baljit S., Neel K. G., Jwala P. S., (2012) Wear behavior of GI250 grade of grey cast iron coated by WC– 12CO and Stellite-6 coatings, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)* Vol. 2, Issue. 5, Sep.-Oct. pp-3232-3236
- [19] Murthy J. K. N., Rao D.S., Venkataraman B., (2001) “*Effect of grinding on the erosion behaviour of a WC–Co–Cr coating deposited by HVOF and detonation gun spray processes*” Volume 249, Issue 7, Pages 592–600
- [20] 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.
- [21] Samur R., Demir A.; (2012) Wear and corrosion performances of new friction materials for automotive industry, *Metalurgija -Sisak Then Zagreb* (2012)- 51(1):94-96
- [22] Kermca M., Kalina M., Vižintina J.: (2005) *Development and use of an apparatus for tribological evaluation of ceramic-based brake materials*, *Wear* 259, 1079–1087.
- [23] Høyer L. G., Bach A., Nielsen G. T., Morgen P., (1999) *Tribological properties of automotive disc brakes with solid lubricants*, *Wear* 232, 168–175.
- [24] Çakmakkaya M., (2017) Wear Resistance and Brake Performance of Brake Discs Coated with Cr₃C₂-25%NiCr and WC-12%Co using the HVOF method, *International Journal Of Automotive Science And Technology*, Vol. 1, No: 3, 1-7.

- [25] Öz A., Gürbüz H., Yakut A. K., Sağiroğlu S., (2017) Braking performance and noise in excessive worn brake discs coated with HVOF thermal spray process, *Journal of Mechanical Science and Technology* 31 (2) 535~543.
- [26] Eriksson M., Bergman F., Jacobson S., (2002) *On the nature of tribological contact in automotive brakes*, *Wear*, 252 26-36.
- [27] Jha S. K., Sharma A., (2013) Optimal automobile muffler vibration and noise analysis, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 7 864-881.
- [28] Rabia A. M., Ghazaly N. M., Salem M. M., Tawwab A. M. A., (2013) Experimental studies of automotive disc brake noise and vibration: *A review*, *Int. J. Modern Eng. Res.*, 3 (1) 199-203
- [29] Dominique P., Gabriel L. J., Eric I., Danick G., Jimmy J., (2018) Development of protective thermal spray coatings for lightweight Al brake rotor discs, *NRC Publications Archive, International Thermal Spray Conference 2018, ITSC 2018, May 7-10, 2018*.
- [30] Federici M., Menapace C., Moscatelli A., Gialanella S., Straffelini G., (2017) Pin-on-disc study of a friction material dry sliding against HVOF coated discs at room temperature and 300C, *Tribology International* 115 (2017) 89–99

ÖZGEÇMİŞ

Zekeriya KOLBASAR, 09/12/1996'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamlamıştır. 2014 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden 2018 yılında mezun olmuştur. Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Teknolojileri Araştırma Uygulama laboratuvarı ve Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Malzeme ve Üretim Teknolojileri Araştırma Uygulama Merkezi bünyesinde Dr. Öğr. Üyesi Ekrem Altuncu'nun danışmanlığında yüzey işlemler, malzeme test ve analizleri kapsamında arge faaliyetlerinde ve laboratuvar çalışmalarında görev almıştır. 2018 yılında başladığı Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisanüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği'nde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.