T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALİK KAPLAMA TOZLARIYLA KAPLANAN OTOMOBİL FREN DİSKİNİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

HALİL KILIÇ

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cenk MISIRLI

EDİRNE-2020

Halil KILIÇ ’ın hazırladığı “METALİK KAPLAMA TOZLARIYLA KAPLANAN OTOMOBİL FREN DİSKİNİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI ” başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri: İmza

Prof. Dr. Yılmaz ÇAN ……

Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN ……

Prof. Dr. İbrahim MUTLU ……

Doç. Dr. Cenk MISIRLI ……

Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan MEŞE ……

Tez Savunma Tarihi: 16/07/2020

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Doç. Dr. Cenk MISIRLI
Tez Danışmanı ……

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

……
Prof. Dr. Murat YURTCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI DOKTORA PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

16/07/2020
Halil KILIÇ

Doktora Tezi

Metalik Kaplama Tozlarıyla Kaplanan Otomobil Fren Diskinin Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu tez çalışmasında, ticari dökme demir fren diskleri üzerine termal sprey yöntemlerle oluşturulan kaplamaların, frenleme ve aşınma davranışını belirlemek için bir dizi laboratuvar testleri yapılmış ve orijinal disk ile karşılaştırılmıştır. Fren diskleri, WC-10Co4Cr tozu, Cr_3C_2-25NiCr tozu, 20NiCrBSi-WC12Co tozu kullanılarak HVOF yöntemiyle ve Mo-NiCrBSi tozu kullanılarak Plazma püskürtme yöntemiyle kaplanarak dört adet kaplanmış disk oluşturulmuştur. Frenleme testleri, SAE-J2430 frenleme etkinlik prosedürüne göre düzenlenmiş laboratuvar ölçekli disk-balata tipi fren dinamometresinde yapılmıştır. Oluşturulan kaplamaların SEM mikroyapı incelemeleriyle birlikte EDX ve XRD analizleri yapılmıştır. Ayrıca, disk ve balatalarının aşınma süreçlerini belirleyebilmek için testler öncesi ve sonrası kütlesel, boyutsal, yüzeysel ve mikro sertlik ölçümleri yapılarak birlikte değerlendirilmiştir.

Sonuçlar doğrultusunda, WC-10Co4Cr kaplanmış fren diski yüksek sürtünme katsayısı ile iyi bir frenleme performansı sergilemiştir. Cr_3C_2-25NiCr, 20NiCrBSi-WC12Co ve Mo-NiCrBSi kaplanmış fren diskleri ise orijinal referans diske yakın frenleme performansıyla beraber sağladığı daha düşük disk-balata aşınma oranı ile taşıt kaynaklı PM oluşumunun azaltılmasında etkili olabileceğini göstermiştir. Oluşturulan kaplamaların, motorlu taşıtlardaki yeni nesil fren diskleri için iyi bir alternatif olabileceği ve bu doğrultuda yapılacak daha fazla saha testi için uygun adaylar olduğu düşünülmektedir.

Yıl : 2020

Sayfa Sayısı : 111

Anahtar Kelimeler : Termal sprey kaplama, kaplanmış disk, kompozit malzeme, triboloji, aşınma

PhD Thesis

Investigation of Tribological Properties of Automobile Brake Disc Coated with Metallic Coating Powders

Trakya University Institute of Natural Sciences

Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

In this thesis, a series of laboratory tests were conducted to determine the braking and wear behaviour of coatings created by thermal spray methods on commercial cast-iron brake discs and the findings were compared to the findings of the original disc. The brake discs were coated using WC-10Co4Cr powder, Cr_3C_2-25NiCr powder, 20NiCrBSi-WC12Co powder by HVOF method and Mo-NiCrBSi powder by Plasma Spraying method, and four coated discs were created. Braking tests were conducted on a laboratory-scale disc-pad type brake dynamometer arranged according to the SAE-J2430 braking efficiency procedure. EDX and XRD analyses were performed together with SEM microstructure analyses of the coatings. Besides, mass, dimensional, superficial and micro-hardness measurements were performed before and after the tests to determine the abrasion processes of the disc and pads.

The results showed that WC-10Co4Cr coated brake disc provide high braking performance with a high coefficient of friction. Cr_3C_2-25NiCr, 20NiCrBSi-WC12Co and Mo-NiCrBSi coated brake discs showed braking performance similar to the original reference disc and has shown that it can be effective in reducing the formation of PM caused by vehicles with lower disc-pad wear rate. It is thought that the coatings created could be a good alternative to the next generation brake discs in motor vehicles and there are suitable candidates for further field testing.

Year : 2020

Number of Pages : 111

Keywords : Thermal spray coating, coated disc, composite material, tribology, sliding wear

ÖNSÖZ

Her an yanımda olduğunu bildiğim, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmamış, doktoramı bitireceğim günü sabırsızlıkla bekleyen ve o gün bu unvanı kendisine hediye edeceğim ancak yakın bir zamanda Hakk'a kavuşan, hiçbir zaman hakkını ödeyemeyeceğim canım ANNEM 'e yüreğindeki ucu bucağı olmayan sevgisi ve sınırsız sabrı için şükranlarımı sunuyorum…

Bu tezi hazırlamamda tecrübeleri ve destekleriyle yardımcı olan başta tez danışmanım değerli hocam Doç. Dr. Cenk MISIRLI olmak üzere, Prof. Dr. Yılmaz ÇAN ve Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan MEŞE'ye emeklerinden dolayı teşekkür ederim.

Her zaman hayatımın moral kaynağı olan, gösterdiği sonsuz sabır ve anlayışla şefkat kahramanı biricik Eşime ve sevgili Kızıma, büyük fedakârlıklarla beni bugünlere getiren sevgili Anneme ve Babama, manevi destekleriyle her zaman yanımda olan Ablama şükranlarımı sunuyorum.

Akademik çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen başta değerli hocam Prof. Dr. İbrahim MUTLU'ya ve değerli çalışma arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Murat TUNA ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TİMUR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (TÜBAP) tarafından 2020/22 numaralı proje ile desteklenmiştir. Proje desteği için Trakya Üniversitesi TÜBAP birimine teşekkür ederim.

Annem'e…

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT v
ÖNSÖZ vi
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİLLER DİZİNİ x
ÇİZELGELER DİZİNİ xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xiii

BÖLÜM 1 1
GİRİŞ 1

BÖLÜM 2 9
LİTERATÜR ÖZETİ 9

BÖLÜM 3 19
MATERYAL VE YÖNTEM 19
3.1. Deneysel Çalışma Programı 19
3.2. Kullanılan Fren Diski ve Balataları 20
3.3. Kaplama Malzemelerinin Özellikleri 21
3.3.1. WC-10Co4Cr Sprey Kaplama Tozu 21
3.3.2. Cr_3C_2-25NiCr Sprey Kaplama Tozu 22
3.3.3. 20NiCrBSi-WC12Co Sprey Kaplama Tozu 23
3.3.4. Mo-NiCrBSi Sprey Kaplama Tozu 24
3.4. Sprey Kaplama Yöntemleri 25
3.4.1. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Yöntemi 26
3.4.2. Plazma Sprey (APS) Yöntemi 27
3.5. Kaplama Hazırlık İşlemleri ve Sprey Parametreleri 28
3.6. Fren Test Prosedürü 30
3.7. Fren Test Cihazı 33

3.8. Fren Diski ve Balataların Aşınma Ölçümü 34
3.8.1. Kütlesel Ölçüm 34
3.8.2. Boyutsal Ölçüm 35
3.9. Fren Disklerinin Salgı Ölçümü 35
3.10. Fren Disklerinin Mikrosertlik Ölçümü 36
3.11. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü 37
3.12. Metalografik İncelemeler 38
3.12.1. Numune Hazırlama 38
3.12.2. Mikroyapı İncelemesi 38
3.12.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM/EDX) 39
3.12.2.2. X-Işınları Kırınım Cihazı (XRD) 39

BÖLÜM 4 41
DENEYSEL ÇALIŞMALAR 41
4.1. Kaplama Tozlarının Mikroyapı Özellikleri 41
4.1.1. WC-10Co4Cr Tozunun Mikroyapı İncelemesi 41
4.1.2. Cr_3C_2-25NiCr Tozunun Mikroyapı İncelemesi 42
4.1.3. 20NiCrBSi-WC12Co Tozunun Mikroyapı İncelemesi 42
4.1.4. Mo-NiCrBSi Tozunun Mikroyapı İncelemesi 43
4.2. Fren Disklerinin Mikroyapı Özellikleri 44
4.2.1. WC-10Co4Cr Kaplanmış Diskin Mikroyapı İncelemesi 44
4.2.2. Cr_3C_2-25NiCr Kaplanmış Diskin Mikroyapı İncelemesi 47
4.2.3. 20NiCrBSi-WC12Co Kaplanmış Diskin Mikroyapı İncelemesi 49
4.2.4. Mo-NiCrBSi Kaplanmış Diskin Mikroyapı İncelemesi 52
4.2.5. Orijinal Diskin Mikroyapı İncelemesi 54
4.3. Fren Disklerinin Frenleme Performans Testleri 55
4.3.1. WC-10Co4Cr Kaplanmış Diskin Frenleme Testi 56
4.3.2. Cr_3C_2-25NiCr Kaplanmış Diskin Frenleme Testi 60
4.3.3. 20NiCrBSi-WC12Co Kaplanmış Diskin Frenleme Testi 63
4.3.4. Mo-NiCrBSi Kaplanmış Diskin Frenleme Testi 66
4.3.5. Orijinal Diskin Frenleme Testi 69
4.4. Fren Diski ve Balatalarının Aşınma Davranışı 72

4.5. Fren Diski ve Balatalarının Yüzey Pürüzlülüğü 77
4.6. Fren Disklerinin Mikrosertliği 79
4.7. Fren Disklerinin Salgı Kontrolü 80

BÖLÜM 5 82
SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME 82

KAYNAKLAR 86
ÖZGEÇMİŞ 96
TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER 97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Disk fren sistemi ve elamanları 2
Şekil 3.1. Deneysel çalışma akış şeması 19
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan OEM fren diski 20
Şekil 3.3. Testlerde kullanılan fren balatası 21
Şekil 3.4. Termal sprey kaplama oluşum mekanizması 26
Şekil 3.5. HVOF sprey kaplama tekniği 27
Şekil 3.6. Plazma sprey kaplama tekniği 28
Şekil 3.7. Kaplama sonrası fren disklerinin görünümü 30
Şekil 3.8. Fren test cihazı 34
Şekil 3.9. Kütlesel ölçümlerde kullanılan teraziler 35
Şekil 3.10. Boyutsal ölçümlerde kullanılan mikrometre 35
Şekil 3.11. Komparatör ile salgı tespiti 36
Şekil 3.12. Mikrosertlik ölçüm cihazı 37
Şekil 3.13. Yüzey pürüzlülük cihazı 37
Şekil 3.14. Metalografik numune hazırlama cihazı 38
Şekil 3.15. Taramalı elektron mikroskobu (SEM/EDX) 39
Şekil 3.16. X-ışınları kırınım cihazı (XRD) 40
Şekil 4.1. WC-10Co4Cr kaplama tozunun SEM/EDX mikrografları 41
Şekil 4.2. Cr_3C_2-25NiCr kaplama tozunun SEM/EDX mikrografları 42
Şekil 4.3. 20NiCrBSi-WC12Co kaplama tozunun SEM/EDX mikrografları 43
Şekil 4.4. Mo-NiCrBSi kaplama tozunun SEM/EDX mikrografları 44
Şekil 4.5. WC-10Co4Cr kaplanmış diskin SEM mikrografları a) kesit, b) yüzey 45
Şekil 4.6. WC-10Co4Cr kaplamanın ara kesitinin EDX analizi 45
Şekil 4.7. WC-10Co4Cr kaplama yüzeyinin SEM ve elementel dağılım haritası 46
Şekil 4.8. WC-10Co4Cr kaplamanın ve başlangıç tozunun XRD analizi 47
Şekil 4.9. Cr_3C_2-25NiCr kaplanmış diskin SEM mikrografları a) kesit, b) yüzey 48
Şekil 4.10. Cr_3C_2-25NiCr kaplamanın EDX analizi 48
Şekil 4.11. Cr_3C_2-25NiCr kaplamanın ve başlangıç tozunun XRD analizi 49

Şekil 4.12. 20NiCrBSi-WC12Co kaplanmış diskin SEM mikrografları a) kesit, b) yüzey 50
Şekil 4.13. 20NiCrBSi-WC12Co kaplamanın EDX analizi..... 51
Şekil 4.14. 20NiCrBSi-WC12Co kaplamanın ve başlangıç tozunun XRD analizi 52
Şekil 4.15. Mo-NiCrBSi kaplanmış diskin SEM mikrografları a) kesit, b) yüzey 53
Şekil 4.16. Mo-NiCrBSi kaplamanın EDX analizi 53
Şekil 4.17. Mo-NiCrBSi kaplamanın ve başlangıç tozunun XRD analizi 54
Şekil 4.18. Orijinal diskin SEM mikrografları a) kesit, b) yüzey 54
Şekil 4.19. Orjinal diskin ara kesitinin EDX analizi 55
Şekil 4.20. Dökme demir yüzeyinin SEM ve elementel dağılım haritası 55
Şekil 4.21. WC-10Co4Cr kaplanmış CD1 kodlu diskin frenleme test sonuçları..... 59
Şekil 4.22. Cr_3C_2-25NiCr kaplanmış CD2 kodlu diskin frenleme test sonuçları..... 62
Şekil 4.23. 20NiCrBSi-WC12Co kaplanmış CD3 kodlu diskin frenleme test sonuçları 65
Şekil 4.24. Mo-NiCrBSi kaplanmış CD4 kodlu diskin frenleme test sonuçları 68
Şekil 4.25. Orijinal OD kodlu diskin frenleme test sonuçları 71
Şekil 4.26. Fren diski ve balatalarının aşınma sonucu kütle kaybı 74
Şekil 4.27. Fren diski ve balatalarının aşınma sonucu kalınlık farkı 75
Şekil 4.28. Frenleme testleri sonrası fren disk ve balatalarının görünümü 76
Şekil 4.29. Fren disklerinin yüzey pürüzlülük değişimi 78
Şekil 4.30. Fren balatalarının yüzey pürüzlülük değişimi..... 79
Şekil 4.31. Fren disklerinin mikrosertliği 80

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Fren diskinin kimyasal kompozisyonu 20
Çizelge 3.2. WC-10Co4Cr tozunun kimyasal kompozisyonu 22
Çizelge 3.3. Cr_3C_2-25NiCr tozunun kimyasal kompozisyonu 23
Çizelge 3.4. 20NiCrBSi-WC12Co tozunun kimyasal kompozisyonu 24
Çizelge 3.5. Mo-NiCrBSi tozunun kimyasal kompozisyonu 25
Çizelge 3.6. HVOF sprey kaplama parametreleri 29
Çizelge 3.7. Plazma sprey kaplama parametreleri 29
Çizelge 3.8. J2430 test prosedürü 32
Çizelge 4.1. Fren diski ve balatalarının aşınma miktarı 73
Çizelge 4.2. Fren diski ve balatalarının yüzey pürüzlülük değişimi 77
Çizelge 4.3. Fren disklerinin mikrosertlik değerleri 79
Çizelge 4.4. Fren disklerinin yanal salgı değişimi 80
Çizelge 5.1. Disklerin tribolojik test sonuçları 83

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	Alüminyum
B	Bor
C	Karbon
Cr	Krom
Co	Kobalt
Fe	Demir
Mo	Molibden
Ni	Nikel
Si	Silisyum
Zn	Çinko
W	Tungsten
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
μ	Sürtünme katsayısı
μm	Mikrometre
Al_2O_3	Alüminyum oksit
CO_2	Karbondioksit
Cr_3C_2	Krom karbür
CrO_2	Krom oksit
NiCr	Nikel krom
SiC	Silisyum karbür
TiO_2	Titanyum oksit
ZrO_2	Zirkonyum oksit
WC	Tungsten karbür
APS	Atmosferik plazma sprey
CMC	Seramik matris kompozit
COF	Sürtünme katsayısı
EDX	Enerji yayılımlı X-ışını analizi
GDD	Gri dökme demir
HVOF	Yüksek hızlı oksi-yakıt

LM	Düşük metalik
MMC	Metal matris kompozit
NAO	Asbest içermeyen organik
OEM	Orijinal ekipman üreticisi
PM	Partikül madde
SAE	Amerikan otomotiv mühendisleri birliği
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SM	Yarı metalik
XRD	X-ışını difraktometresi

BÖLÜM 1

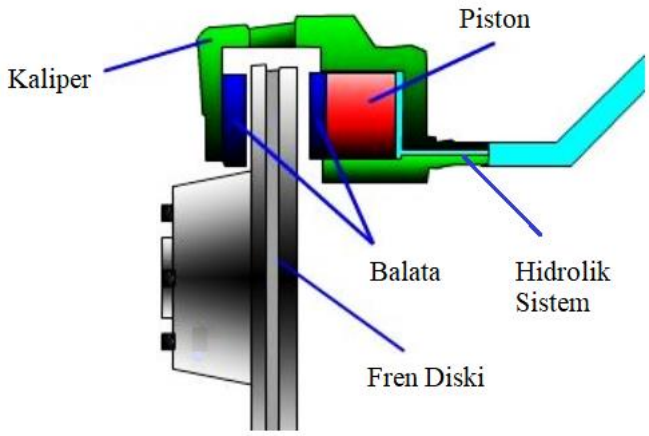
GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi, hızlı gelişen yenilikleri sürdürmek için devamlı olarak yeni tip malzeme ve gelişmelere ihtiyaç duymaktadır. Teknolojinin hızla ilerlemesi sonucu taşıtların ani ivmelenme özelliklerinin gelişmesiyle birlikte ağırlaşan çalışma koşulları altında geleneksel malzemelerin göstermiş olduğu performans yetersiz kalabilmektedir. Bu durum var olan malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesini, ayrıca yeni tip teknolojik malzemelerin üretimini ve uygulanmasını zorunlu hale getirmektedir.

Hareket halindeki taşıtların yavaşlatılabilmesi veya durdurulabilmesi için sahip oldukları hareket enerjisinin dönüştürülmesi gereklidir. Bir taşıtı değişken yol ve trafik koşullarında durdurmak veya hızını ayarlamak için bir fren sistemine ihtiyaç duyulur. Fren sistemlerinin temel ilkesi, aracın kinetik enerjisini sürtünme ve kayma yoluyla başka bir enerji türüne dönüştürmektir. Örneğin, sürtünmeli frenlemede ısıya dönüşür, rejeneratif frenlemede ise elektrik veya basınçlı havaya dönüştürülür. Frenleme işlemi sırasında kinetik enerjinin tamamı istenen forma dönüştürülemez, örneğin sürtünmeli frenlemede bir miktar enerji titreşim şeklinde yayılabilir (Rashid, 2014). Taşıtın kinetik enerjisini sürtünme yoluyla ısıya dönüştürerek hareketin kontrol altına alınması fren sistemleri ile sağlanır (Bijwe, 1997). Diskli ve kampanalı fren olmak üzere iki tip fren sistemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Kampanalı frenlere kıyasla disk frenler, daha geniş süpürme alanı ve nispeten daha fazla hava akışına maruz kalmaları nedeniyle hızlı soğur ve merkezkaç kuvvetleri nedeniyle kendi kendini temizleme kabiliyeti gösterir. Bu avantajlar nedeniyle disk frenler, otomobillerde ön frenler için evrensel bir seçim haline gelmiştir ve yakın gelecekte büyük araç grubuna da hakim olması beklenmektedir (Kinkaid et al., 2003).

Fren sistemlerinin, farklı koşullar altında taşıtı emniyetli bir şekilde durdurması beklenir. Frenleme performansının önemli bir göstergesi de sağladığı kısa durma mesafesidir. Bu mesafe maksimum yavaşlama ivmesi ile sağlanabilir (Kinkaid et al., 2003). Bu durumda fren çiftinin oluşturduğu sürtünme yüzeylerinin frenleme etkinliği, önemli rol oynamaktadır. Sürtünme yüzeylerinin performansı, yüksek sürtünme kuvveti sağlayan malzeme çiftini seçmek veya oluşturmakla mümkündür. Uygun sürtünme çiftini seçmek veya var olan özelliklerini geliştirmek için piyasada kullanılan malzeme çiftlerinin fren performansının bilinmesi gerekir. Mevcut malzeme çiftlerinin frenleme etkinliğinin bilinmesi her malzemenin frenlemeye etkisinin değerlendirilmesi ile sağlanabilir (Mutlu, 2002).

Taşıtlarda ağırlıklı olarak disk fren sistemleri kullanılır. Bu fren sistemi, genellikle dökme demirden yapılan disk/kampana, sürtünme malzemesi olarak balata ve balatayı hareket ettirerek disk yüzeyine bastıran hidrolik sistem olmak üzere üç ana bölümden meydana gelir (Eriksson & Jacobson, 2000). Fren sisteminde sürtünme ile frenleme görevini yerine getiren temel elemanlar ise disk ve balatanın oluşturduğu fren çiftidir. Basitleştirilmiş disk fren sistemi Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Disk fren sistemi ve elamanları

Disk frenler, geleneksel kampanalı frenlere göre daha fazla hava akışına maruz kalarak daha hızlı soğumaktadır. Böylelikle disk yüzeyine yapışan yabancı maddeler kolaylıkla ortam dışına atılır. Disk fren sisteminde balata ve disk arasında aktarılan

kuvvet dağılımı, kampanalı sisteme göre daha kararlı ve homojendir. Yüksek hareket hızlarındaki frenlemelerde ise ani kavrama eğilimleri daha düşüktür.

Disk fren sistemindeki frenleme sırasında, disk-balata çifti ara yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklık, fren performansının azalmasına, yüksek disk-balata aşınmasına, disk yüzeyinde termal çatlak oluşumuna, titreşim ve gürültüye sebep olur (Lee, 1999). Bu ısının sistemden hızlı bir şekilde uzaklaştırılması gerekir. Fren sisteminde sürtünme yüzey alanının arttırılması, oluşan ısının sistemden daha hızlı atılmasına yardımcı olacaktır. Bu sebeple soğutma kanallı fren diskleri kullanılmaktadır.

Hava kanallı fren diskleri, yüksek performans diskleri olarak üretilmekte ve üzerinde farklı şekillerde delik veya kanallar bulunmaktadır. Günümüz otomotiv sektöründe farklı dizayn ve şekillerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Chatterley & Macnaughtan, 1999). Zuber, karbon fiber takviyeli CMC (seramik metal matris) malzemeden üç farklı soğutma kanallı disk üreterek birbirlerine göre dayanımlarını test etmiştir (Zuber & Heidenreich, 2006). Antanaitis (Antanaitis & Rifici, 2006) bir fren diski üzerine açtıkları 90 adet dairesel kanal ile taşıt hızına bağlı olarak diskin ısı transferinde % 9-20 artış elde etmiştir. Ayrıca havalandırma delikleri sayesinde disk-balata arasında oluşan balata tozlarının yanması sonucu ortaya çıkan gaz dışarıya kolaylıkla atılmaktadır. Bununla birlikte, ıslak zemin frenleme durumlarında bu kanallar disk-balata arasında su filmi oluşumuna engel olarak daha kuru bir frenleme gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Hava soğutma kanallı diskler üzerinde oluşan gerilimler neticesinde kılcal çatlaklar meydana gelmektedir. Bu durum fren balatasında aşınma miktarının artmasına neden olmaktadır. Ancak taşıtta yavaşlama ve durma performansını da arttırmaktadır (Brecht & Egner-Walter, 1998). Frenleme esnasında oluşan yüksek ısıyı en kısa sürede ortama transfer edebilmek için farklı disk şekilleri tasarlanmıştır. En yaygın olanı ise içerisinde soğutma kanalları bulunan kendinden soğutmalı (self-cooling) fren diskleridir.

Frenleme işlemi esnasında aracın sahip olduğu kinetik enerji ısı enerjisine dönüştürülmekte ve bu enerjinin yaklaşık % 90'ı fren disklerinde ısı enerjisi olarak depolanmaktadır. Bu enerjinin bir kısmı ise ortama transfer edilir. Soğutma kanallı olmayan diskler bu ısı transferini daha yavaş gerçekleştirir. Soğutma kanallı diskler ise, ısı transferini iç kanal yapılarındaki hava sirkülasyonu sayesinde daha çabuk yaparlar (Breuer & Karlheinz, 2008). Soğutma kanallı fren disklerinin ısı transferi katsayıları,

diğer disklere göre yaklaşık iki kat daha fazladır (Limpert, 1999). Ayrıca hava kanallı disklerin oluşturduğu sürtünme kuvveti, diğerlerine göre daha büyüktür. Frenleme gücü yüksek olan araçlarda sermet, karbon veya seramik fren diskleri de kullanılmaktadır. Bunlar klasik disklere göre daha yüksek frenleme etkinliği sağlayabilmektedir. Aşınma oranı ise normal disklere nazaran daha düşük ve kullanım süresi ise daha fazla olabilmektedir.

Fren diskleri, yüksek sönümleme kabiliyeti ve iyi termo-fiziksel özelliklere sahip gri dökme demir (GDD) malzemeden üretilmektedir (Cho et al., 2003; Cueva et al., 2003). GDD sahip olduğu yüksek erime noktası, mükemmel ısı depolama ve sönümleme kabiliyeti ile popüler bir otomotiv fren disk malzemesidir. GDD, maliyet etkinliği ile birlikte iyi dökülebilirliği ve işlenebilirliği nedeniyle de caziptir. Bu nedenle, GDD iyi performansı nedeniyle fren diskleri için tercih edilen malzemedir. Bununla yanında, GDD 'nin fren titremesine sebep olan zayıf korozyon ve düşük aşınma direnci, yüksek ağırlığı, servis sırasında aşırı ısınması, insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olan fren tozu ve partikül madde gibi fren emisyonları oluşturması en büyük dezavantajlarıdır (Furusjö et al., 2007; Hjortenkrans et al., 2007; Shin et al., 2010; Stanford & Jain, 2001).

Fren balatası, TS 555'e göre sürtünmeli frenler için uygulanan fren kuvvetinin aracın tekerlekleriyle bağlantılı olan rotora sürtünme yolu ile aktarılmasını sağlayan elemanlar olarak tanımlanmaktadır (Mutlu, 2002). Ticari otomotiv fren balataları, yarı metalik (SM), düşük metalik (LM) veya asbestsiz organik (NAO) malzemeler olarak kategorize edilir. Fren balataları, sürtünme ve aşınma performanslarının optimizasyonu için gerekli olan 5-30 farklı bileşenin bir kombinasyonuyla oluşan karmaşık kompozitlerdir (Lee & Filip, 2013). Bu kompleks kompozitlerin matrisi bir veya daha fazla polimerden oluştuğu için bunların hepsi organik sürtünme malzemeleri olarak kabul edilir. Bu bileşenler, dolgu malzemeleri, takviye malzemeleri, sürtünme düzenleyiciler ve bağlayıcılar olmak üzere dört ana gruba ayrılır (Yun et al., 2010). Yüksek temas sıcaklıklarında balata malzemesindeki organik bileşenler ayrışmaya başlar, sürtünme katsayısı düşer ve aşınma miktarı artar. Bu olay sıcaklıkla fren zayıflaması (fade) olarak adlandırılır. Fren balatası tüm çalışma şartlarında sıcaklıkla fren zayıflamasına düşmeden kararlı bir sürtünme sağlamalıdır (Özen et al., 2018).

Fren sistemleri, aşınma direnci, stabil sürtünme katsayısı, düşük partikül emisyonu, düşük gürültü ve korozyon direnci gibi gereksinimleri asgari şekilde karşılamalıdır (Chandra Verma et al., 2015; Kılıc et al., 2018). Bu gereklilikleri yerine getirmek için iyi termal iletkenlik ve stabil bir sürtünme filmi oluşumu ile şekillendirilen sıcaklık koşulları anahtar özellik olarak belirtilir (Mutlu et al., 2005; Timur & Kılıc, 2013). Sürtünme malzemelerinin tribolojik davranışı, fren çiftinin temas yüzeyinde gelişen sürtünme filmi ile kontrol edilir. Yüksek güç yoğunlukları, yüksek temas sıcaklığı sonucunda aşınma artışına sebep olur ve bu durum sürtünme malzemelerine özel talepler gerektirir.

Karayolu taşıtlarından kaynaklanan emisyonların bir kısmını, fren sisteminin neden olduğu aşınma partiküllerinin oluşturduğu görülmektedir (Straffelini et al., 2015; Wahlström et al., 2012). Bu aşınma partikülleri ile çevreye salınan CO_2 miktarı arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır (Roubicek et al., 2008). Fren sisteminden kaynaklanan aşınma kalıntıları, taşıtlardan kaynaklanan egzoz dışı emisyon miktarının yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır. Fren sistemlerinden çevreye salınan aşınma partikül boyutunun çoğunlukla 10 μm'nun altında olduğu ve en az %50'sinin atmosfere karıştığı bildirilmiştir (Hagino et al., 2015; Harrison et al., 2012; Kukutschová et al., 2009). Otomobil fren sistemindeki aşınmalardan kaynaklanan partikül madde (PM) emisyonları ile ilgili yakın zamanda çıkacak yeni standartlar ve düzenlemeler, otomotiv endüstrilerindeki partikül emisyonlarını en aza indirgemek veya ortadan kaldırmak için aktif yaklaşımlar aramaya zorlamaktadır.

Malzemelerin frenleme performansından ödün vermeden disk aşınma sorununu ele almak önemlidir. GDD fren diskleri üzerine yapılacak uygun bir yüzey modifikasyonu, bu soruna umut vaat eden bir çözümü temsil eder. Bu sebeple, fren sistemi elemanlarının fonksiyonel performanslarını korurken, mekanik ve termal özelliklerini iyileştirmek için uygun yüzey geliştirme tekniklerine ihtiyaç vardır. Bu tekniklerden biriside yüzeyin farklı malzemelerle kaplanmasıdır. Malzemede bulunmayan ancak ihtiyaç duyulan özellikleri elde edebilmek için pratik uygulamalarda kaplama veya yüzey sertleştirme teknikleri ile uygulanır. Termal spreyleme bu tekniklere aittir ve yüzeylere uygulanabilen ince film kaplama işlemlerinden oluşur. Günümüzde bu sert kaplamalar, yüksek çalışma sıcaklıklarında aşınma koruması için umut verici

endüstriyel bir çözümdür (Matthews & James, 2010a; Szymański et al., 2015; Vernhes et al., 2013).

Termal sprey kaplama tekniği, sahip olduğu yüksek partikül hızı, yüksek bağ mukavemeti, düşük gözeneklilik ve yüksek yoğunluğu ile aşınma direnci yüksek malzemeler meydana getirir (Matthews & James, 2010b). Bu teknikler, matris de bıraktığı daha fazla karbür partikülü ile yüksek yoğunluğa sahip karbür esaslı kaplamaların oluşturulmasında, mükemmel yapışma mukavemeti, düşük porozite ve yüksek oksidasyon direnci gibi birçok ayırt edici avantaj sağlar (Kamali & Binesh, 2009).

GDD fren disklerinin aşınma ve korozyonu ile ilgili problemlerin dikkate alınması gerekmektedir. Çünkü atmosferdeki toz ve partikül emisyonu nedeniyle sağlık üzerindeki olumsuz etkileri bilinmektedir (Pope et al., 2002). Ticari fren disklerinin düşük aşınma ve korozyon direnci ile oluşturduğu çevresel problemler nedeniyle daha fazla araştırılması gereken unsurlar olduğu görülmüştür. Bu nedenle, tribolojik özellikleri iyileştirilmiş yeni nesil fren disk malzemelerinin geliştirilmesindeki kilit faktörlerden biri de ilişkili tribo-yüzey özelliklerini optimize etmek olacaktır. Bu durumda, geleneksel otomotiv fren disk yüzeylerinin kaplanarak daha iyi frenleme etkinliğine sahip sürtünme çifti oluşturma çabası bu çalışmanın önemini belirlemektedir.

Literatürde, fren disk-balata çifti üzerine yapılan çalışmalarda, fren balatasının kimyasal kompozisyonun optimizasyon çalışmaları oldukça kapsamlı, fren disk malzemesi ve yüzey modifikasyonu üzerine yapılan çalışmalar ise sınırlı kalmıştır. Termal sprey kaplamalar üzerine yapılan çalışmalarda genellikle altlık malzeme olarak çelik numuneler kullanılmıştır. Testlerde, karşı yüzey olarak genellikle çelik veya seramik malzemeler kullanılmıştır. Karşı yüzey olarak fren sürtünme malzemesinin kullanıldığı çalışmalar ise sınırlıdır (Federici et al., 2016, 2017). Bu kaplamaların sürtünme testleri ise genellikle pin-on disk tipi test cihazında yapılmıştır.

Bu çalışmada, piyasadan tedarik edilen beş adet OEM (Orijinal Ekipman Üreticisi) Megane II otomotiv fren diski kullanılmıştır. Bunlardan dört tanesi farklı malzeme ve yöntemlerle kaplanmış diğeri ise orijinal haliyle kullanılmıştır. Disklerden ilki WC-10Co4Cr kaplama tozu kullanılarak yüksek hızlı oksi-yakıt (HVOF) yöntemiyle,

ikincisi Cr_3C_2-25NiCr sermet tozu kullanılarak HVOF yöntemiyle, üçüncüsü NiCrBSi-WC12Co kompozit tozu kullanılarak HVOF yöntemiyle, dördüncü disk ise Mo-NiCrBSi kaplama tozu kullanılarak Plazma Püskürtme yöntemiyle kaplanmıştır. Kaplanmış diskler "CD" harfleriyle, referans orijinal disk ise "OD" harfleriyle kodlanmış ve yanındaki rakamlar ise disk numaralarını ifade etmektedir. Orijinal ve kaplanmış disklerin fren performans testleri, SAE-J2430 "Fren Etkinliği Değerlendirme Test Prosedürü" alt bölümlerini simule eden laboratuvar ölçekli fren dinamometresinde yapılmıştır. Dinamometre testlerinde, disk-balata ikilisinin farklı çalışma koşulları altında, uygulanan frenleme basıncı ve hıza karşılık gelen frenleme kuvveti, sürtünme katsayısı ve sıcaklık parametreleri belirlenerek her bir disk için frenleme performans grafikleri oluşturulmuştur. Ayrıca her diskin tribolojik ve mikro yapı özellikleri belirlenerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışma, farklı spreyleme tozu ve yöntemlerle oluşturulan kaplamaların frenleme karakteristiğini belirlemek ve disk-balata çiftini oluşturan ikilinin sürtünme ve aşınma davranışı arasındaki ilişkiyi derinleştirmeyi amaçlar. Çalışmadan çıkan veriler, kompozit kaplamaların yüksek sıcaklık sürtünme-aşınma uygulamalarında alternatif bir malzeme olarak kullanılması olasılığını araştırmada faydalı olacaktır.

Çalışmanın girişinde; disk fren sistemleri hakkında genel genel bilgiler verilerek, çalışmanın konusu ve kapsamı özetlenmiştir. İkinci bölüm; literatüre son yıllarda sunulan çalışmaları kapsamaktadır. Burada sürtünme çifti üzerine yapılan çalışmalar ve termal sprey kaplama uygulamaları incelenmiştir. Üçüncü bölümde; testlerde kullanılan fren disk ve balatalarının genel özellikleri, uygulanan kaplama tozlarının yapısı ve özellikleri, kaplama öncesi disk yüzeylerinin hazırlanması, kaplama yöntemleri ve uygulama parametreleri, fren test cihazının özellikleri ve kullanılan SAE-J2430 test prosedürünün işletme şartları, aşınma ölçüm ekipmanları, yüzey pürüzlülük, mikro sertlik ve yanal salgı ölçüm cihazları, disk ve kaplama yüzeylerinin metalografik incelemelerdeki metot ve cihazlar yer almaktadır. Dördüncü bölümde; fren disklerinin test prosedürüne uygun olarak yapılan frenleme testlerinden elde edilen karakteristik grafiklerinin oluşturulması, disk-balata çiftinin aşınma miktarı, yüzey pürüzlülük ölçümleri, mikro sertlik değerleri ile orijinal ve kaplanmış disklerin mikro yapı analizleri incelenmiştir. Son bölümde; orijinal ve kaplanmış disklerin frenleme

testlerinden elde edilen tribolojik sonuçları yorumlanmıştır. Son kısımda, bu çalışmanın devamı olabilecek çalışmalar hakkında öneriler paylaşılmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ÖZETİ

Son yıllarda, metal matris kompozitler (MMC), seramik matris kompozitler (CMC) ve titanyum alaşımları gibi çeşitli alternatif malzemeler düşük ağırlıklarından dolayı fren disk malzemesi olarak önerilmiş ve test edilmiştir.

Thornton ve Adebisi'nin yaptıkları çalışmalarda alüminyum MMC 'nin korozyon ve aşınma direncinin yanında ağırlıkta önemli bir azalma sağladığı görülmüştür (Adebisi et al., 2011; Thornton et al., 2011). Ancak gri dökme demir ile karşılaştırıldığında daha düşük erime sıcaklığı ve daha yüksek termal genleşme katsayısı gibi sorunları ortaya çıkmıştır (Kim et al., 2008; Nakanishi et al., 2002). Hafif titanyum alaşımları dökme demire kıyasla ağırlıkça %37 azalma göstermiş fakat aşınma oranının ise dökme demirden daha yüksek olduğu görülmüştür (Blau et al., 2007). C-C kompozitler, ağırlıklı olarak uçak ve yarış uygulamaları için kullanılan diğer bir malzeme sınıfını temsil etmektedir ancak doğası gereği yüksek maliyetleri ve düşük sıcaklıklardaki zayıf davranışları uygulama alanlarını sınırlamıştır (Hutton et al., 1999). Karbon fiber takviyeli silisyum karbür (C/SiC) kompozitler, CMC'lerin 1300 ^{o}C'ye kadar mükemmel termal stabiliteye, daha iyi tribolojik özelliklere ve iyi ağırlık tasarruflarına sahip olmasına rağmen yüksek maliyetleri sebebiyle yüksek performanslı yarış otomobillerinde ve lüks araçlarla kullanımı sınırlı kalmıştır (Jang et al., 2010; Krenkel et al., 2002).

Lazer kaplama ile yüzey modifikasyon işlemleri, son zamanlarda aşınma ve korozyon direncini iyileştirmek için çeşitli uygulamalarda kullanılan diğer bir yöntem olmuştur (Gao et al., 2007; S. Zhou et al., 2008). Ocelik vd. yaptıkları çalışmada yüksek güçlü lazer kaplama ile GDD yüzeyine biriktirdikleri Co esaslı kaplamaların aşınma

direncini incelemiştir (Ocelík et al., 2007). Aşınma ve korozyon direncinde artış sağlandığı, sürtünme katsayısının sınırlarda olduğu fakat kaplama sırasında kademeli oluşan iç gerilimler nedeniyle kaplama içinde çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir.

Sun vd. yaptıkları çalışmada sıkıştırılmış GDD altlıklar üzerine lazer ile biriktirilen farklı kaplamaların sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemiş, mikroyapıda, bileşimde ve kaplamanın kalınlığı boyunca sertliğin arttığını bildirmişlerdir (Sun et al., 2012).

Nowotny vd. yaptıkları çalışmada lazer ile biriktirilen WC-Co ve WC-Ni kompozitlerinde sırasıyla Co ve Ni'nin hacim içeriğini incelemişler ve Co için maksimum % 35, Ni için % 45 olduğunu belirtmiştir (Nowotny et al., 2018). Daha yüksek değerlerin büyük gözenekler, çatlaklar ve zayıf bağlanma ile sonuçlandığını tespit etmiştir.

Zhou vd. yaptıkları çalışmada lazerle kaplama sırasında aşırı ısı girdisinin WC'nin W_2C dekarbürizasyonuna yol açabileceğini ve bunun gözeneklilik ile çatlak oluşumuna neden olduğunu belirtmiştir (Zhou et al., 2008). Lazer kaplamaların, altlık malzeme ve kaplama arasındaki termal genleşme katsayısı uyumsuzluğunun neden olduğu çatlama hassasiyetinin gelişmesi, kullanımını sınırlandırmıştır.

Alnaqi vd. yaptıkları çalışmada plazma elektrolitik kaplı Al alaşımı ve Al-MMC'nin ısıl performansını ve sürtünme özelliklerini GDD fren diskiyle karşılaştırmıştır (Alnaqi et al., 2018). Her iki kaplama da yüksek sertlik ve kararlı sürtünme katsayısı sergilemiştir. Al-MMC kaplamanın daha yoğun ve homojen olduğu görülmüştür. Kaplanmış Al alaşımlı disk, referans GDD fren diski kadar iyi olmasa da yüksek sıcaklıklarda iyi yapısal bütünlük göstermiştir. Dinamometre testi sonuçlarına göre kaplanmış disklerin sürtünme katsayısının GDD fren diskinden düşük olduğu ancak yine de karşılaştırılabilir olduğu görülmüştür.

Watremez vd. yaptıkları çalışmada 4130 çelik diskler üzerine Atmosferik Plazma Sprey (APS) ile biriktirilen ZrO_2, YSZ ve Cr_3C_2-25NiCr gibi farklı seramik esaslı kaplamaların sürtünme özelliklerini karşılaşmıştır (Watremez et al., 1996). Kaplanmış disklerin metal matrisli balatalara karşı sürtünme özelliği, 1000 rpm'ye kadar olan hızlarda kaplanmamış fren diskinden (sırasıyla 0.65, 0.55 ve 0.45) daha yüksek

sürtünme katsayısı sergilemiştir. Cr_3C_2-25NiCr kaplama ise 0.35 ile en düşük sürtünme katsayısını göstermiştir.

Du vd. yaptıkları çalışmada GDD altlık üzerine APS yöntemiyle biriktirdiği WC12Co kaplamanın tribolojik özelliklerini belirlemek amacıyla ball-on tipi test cihazı üzerinde bir dizi sürtünme testleri yapmıştır (Du et al., 2008). Oluşturulan kaplamanın sürtünme katsayısının GDD'ye benzer olmasına rağmen altı kat daha düşük aşınma hacmi gösterdiğini belirlemişlerdir.

Demir vd. yaptıkları çalışmada GDD fren diskinin sürtünme performansını incelemek amacıyla plazma sprey yöntemiyle oluşturulan Al_2O_3-TiO_2 ve Cr_3C_2-NiCr kaplamasını kaplanmamış disk ile karşılaştırmıştır (Demir et al., 2009). Dinamometre testlerinde Al_2O_3-TiO_2 kaplamanın ihmal edilebilir aşınma gösterdiğini, referans ve Cr_3C_2-NiCr kaplı disklerde ise sırasıyla 2 ve 4 gr aşınma meydana geldiğini tespit etmiştir. Kaplanmış disk balatalarının daha yüksek frenleme sıcaklıklarına maruz kalmasına rağmen, Cr_3C_2-NiCr kaplı diskin sürtünme katsayısının orijinal diske kıyasla % 6 arttığı görülmüştür.

Benzer araştırmada Samur vd. Al_2O_3 sürtünme malzemesine karşı tuz çözeltisi içinde aşınma testleri gerçekleştirmiştir (Samur & Demir, 2012). Testler sonucunda referans disk $1.74x10^{-5}mm^3/Nm$ aşınma oranı sergilemiştir. Al_2O_3-TiO_2 ve Cr_3C_2-NiCr kaplamaları ise sırasıyla $1.52x10^{-5}$ ve $1.33x10^{-5}$ mm^3/Nm ile daha düşük aşınma oranına sahip olduğunu göstermiştir.

Güney vd. yaptıkları çalışmada plazma sprey yöntemiyle Cr_2O_3-40TiO_2 kaplanmış dökme demir fren diskinin, kaplanmamış diske kıyasla frenleme performansını incelemiştir (Güney & Mutlu, 2019). Kaplanmış diskin mikro sertliğinin kaplanmamış diske göre üç kat arttığını belirtmiştir. Ayrıca balata aşınmasını büyük ölçüde değiştirmeden kaplanmış diskin aşınma miktarının azaldığını gözlemlemiştir. Dinamometre testlerinde ise kaplanmış disk kaplanmamış diske göre karşılaştırılabilir bir sürtünme katsayısı sergilemiştir.

Abhinav vd. yaptıkları çalışmada plazma sprey ile GDD disk üzerine püskürtülen Al_2O_3+ZrO_2·5CaO kaplamalarının korozyon direncini incelemiştir (Abhinav et al., 2017). Tuz püskürtme testi sonuçlarından oluşturulan tüm kaplamalarda ihmal edilebilir aşınma gözlemlenmiştir. Yaygın endüstriyel kullanımlarına rağmen, plazma sprey

kaplamaların belirgin bir dezavantajının oluşturulan tabakaların genellikle yüksek gözeneklilik, çatlak ve oksit gibi kusurlar içerdiğini belirtmiştir (Murthy et al., 2001).

Stanford vd. yaptıkları çalışmada HVOF yöntemiyle stellite alaşım tozu ile kaplanmış GDD disklerin sürtünme ve korozyon davranışını incelemek amacıyla oluşturulan üç alev püskürtme kaplamayı Ni-17Cr-2.5Fe-2.5Si-2.5B-0.15C, Fe-30Mo-2C, Zn-50SiC karşılaştırmıştır. Stellite kaplama, alev püskürtmeli kaplamaların aksine daha düşük bir sürtünme katsayısı, kararlı sürtünme davranışı ve mükemmel korozyon direnci sergilemiştir.

Priyan vd. yaptıkları çalışmada GDD altlık üzerinde HVOF yöntemiyle oluşturduğu Cr_3C_2-NiCr kaplamaların pin-on disk test cihazı ile aşınma davranışını incelemiştir (Priyan et al., 2016). Cr_3C_2-20NiCr ve Cr_3C_2-25NiCr olmak üzere iki farklı içerik ile kaplamalar oluşturulmuştur. Testler sonucunda, oluşturulan kaplamaların altlık malzemenin sertliğini yaklaşık 3.5 kat arttırdığı, Cr_3C_2 içeriğinin artmasıyla kaplama sertliğinin de arttığı ayrıca kaplanmış disklerin daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı sergilediği görülmüştür.

Federici vd. yaptıkları çalışmada dökme demir diskler üzerine HVOF yöntemiyle oluşturduğu farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip WC-CoCr kaplamaların, pin-on disk test cihazı ile ticari bir sürtünme malzemesine karşı kuru kayma aşınma davranışını incelemiştir (Federici et al., 2016). Testlerden sonra disklerin aşınma izi profilleri incelenerek kaplamaların aşınmaya karşı yüksek direnç sergilediğini görmüşlerdir. Ayrıca sürtünme malzemesinin aşınma oranının, kaplamanın pürüzlülüğünü arttırdığını ve pürüzlülük azaldıkça sürtünme katsayısının arttığını tespit etmişlerdir.

Federici vd. yaptıkları diğer bir çalışmada ticari yarı metalik sürtünme malzemesinin, pin-on disk test cihazı üzerinde orijinal dökme demir disk ve HVOF yöntemiyle kaplanmış disklerin oda sıcaklığındaki ve 300 °C'deki kuru kayma davranışlarını incelemiştir (Federici et al., 2017). Sürtünme malzemelerinin aşınma oranları oda sıcaklığında hafif, 300 °C'de ise termal yumuşama nedeniyle artmıştır. Oda sıcaklığında kaplanmamış diske karşı kayan sürtünme malzemesinin, kararlı bir sürtünme oluşturabilmesi için nispeten uzun bir süre geçmiştir. Kaplanmış disklerde ise sertliği daha düşük olan kaplama, daha hızlı kararlı sürtünme etkinliği oluşturmuştur. Kaplanmış disklerin aşınma oranı 300 °C'de ihmal edilebilir düzeyde gerçekleşmiştir.

Sonucunda sadece aşınma miktarını değil, daha önemlisi ortama PM salınımını azaltmak için fren sistemlerinde HVOF kaplamaların olumlu göstergelere sahip olduğu sunulmuştur.

Öz vd. yaptıkları çalışmada HVOF yöntemiyle WC-12Co kaplanmış fren disklerinin frenleme performansını, gürültü seviyelerini ve sürtünme katsayısını bir GDD disk ile karşılaştırmıştır (Öz et al., 2017). NiCr ara bağlayıcı kullanılarak oluşturulan WC-12Co kaplama referans GDD fren diskinden, daha yüksek frenleme performansı, homojen yüzey sıcaklık dağılımı, daha düşük gürültü seviyesi ile daha yüksek sürtünme katsayısı sergilemiştir.

Wahlström vd. yaptıkları çalışmada HVOF tekniğiyle oluşturulan WC-CoCr kaplanmış disk ve nitrürlenmiş diskin aşınma ve parçacık emisyonunu incelemiştir (Jens et al., 2017). Fren diskleri, pin-on disk test cihazı üzerinde düşük metalik ve TiO_2 gömülü nano parçacıklara sahip iki farklı malzemeden yapılmış sürtünme pimlerine karşı test edilmiştir. Sürtünme katsayısı ve disk sıcaklıkları çalışmadan sonra tüm temas çiftleri için aynı seviyede gerçekleşmiştir. SEM analizi sonucunda, kaplanmış diskin spesifik aşınma oranı negatif olmuştur, bu da aşınma kalıntılarının pim malzemesinden diske aktarılabileceğini gösterir. Ayrıca modifiyeli disk üzerine sabitlenmiş tribometre ile test sırasında partikül emisyonlarını yakalayarak, kaplanmış diskin referans GDD diske kıyasla partikül emisyonlarında %50 azalmanın mümkün olduğunu göstermiştir. Çalışma sonuçlarından HVOF kaplamaların zorlu frenleme uygulamaları için uygun çözümlerden biri olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Bolelli vd. yaptıkları çalışmada HVAF yöntemiyle oluşturdukları 300 µm kalınlığındaki WC-10Co4Cr kaplamanın kayma ve aşınma davranışını benzer kalınlığa sahip elektrolizle sertleştirilmiş bir krom kaplama ile karşılaştırmıştır (Bolelli et al., 2015). Pin-on disk test sonuçlarına göre yoğun HVAF kaplama, elektroliz sert krom kaplamaya kıyasla çok düşük kayma aşınma oranı sergilemiştir. HVAF sprey WC-10Co4Cr kaplama, HVOF kaplama ile benzer bir aşınma oranı, 300M çelik altlık ile karşılaştırıldığında ise beş kat daha düşük aşınma oranı göstermiştir. Ayrıca HVAF WC-10Co4Cr kaplamanın düşük işlem sıcaklığı nedeniyle WC ’nin dekarbürizasyonunu sınırlandırdığı teyit edilmiştir.

Bolelli vd. yaptıkları diğer bir çalışmada HVOF ve HVAF sprey yöntemiyle biriktirilen iki farklı toz boyutuna sahip Cr_3C_2–25NiCr sert metal kaplamanın kayma ve aşınma davranışı arasındaki ilişkiyi incelemiştir (Bolelli et al., 2016). Yüksek hızlı püskürtme sırasında Cr_3C_2 bakımından zengin bazı partiküllerin geri sekmesinden dolayı altlık üzerinde, püskürtülen hammadde tozundan daha az Cr_3C_2 içeriği görülmüştür. Testler oda sıcaklığında ve 400 ^oC'de, sinterlenmiş Al_2O_3 sürtünme malzemesine karşı ball-on-disk test cihazı üzerinde yapılmıştır. Küçük boyutlu tozdan elde edilen kaplamalar daha düşük ($5x10^{-6}$ mm^3/Nm) aşınma oranı göstermiştir. 400°C'de yapılan testlerde sıcaklık artışıyla aşınma oranı artmış ve sürtünme katsayıları 0.7 'den 0.5 'e düşmüştür.

Hulka vd. yaptıkları çalışmada disk malzemeleri üzerine HVOF ve HVAF ile biriktirilen CrC esaslı sermet kaplamaların aşınma davranışı incelemiştir (Hulka et al., 2012). HVAF kaplamaların, HVOF örneklere kıyasla aşındırıcı ve kayma aşınma testlerinde daha düşük aşınma kaybı gösterdiğini belirtmiştir.

Tillman vd. yaptıkları çalışmada HVOF yöntemiyle üretilen geleneksel, ince ve nano yapılı WC-12Co kaplamaların, kayma ve yuvarlanma aşınması altındaki tribolojik davranışını C45 çeliğiyle karşılaştırmıştır (Tillmann et al., 2014). Optimize edilmiş püskürtme parametreleri altında, ince ve nano yapılı WC-12Co kaplamaların geleneksel kaplamalardan daha yüksek aşınma direnci ve daha düşük sürtünme katsayısı sergilediği görülmüştür.

Liam vd. yaptıkları çalışmada karbon çelik yüzeyler üzerine biriktirdiği üç adet WC esaslı sermet kaplamanın (WC-12Ni, WC-20Cr_2C_3-7Ni ve WC-10Co4Cr) kuru kayma aşınma davranışı hakkında karşılaştırmalı bir çalışma yapmıştır (Ward & Pilkington, 2014). Bağlayıcı olarak ilave edilen Co ve Cr 'nin, Ni/Cr_2C_3 'e kıyasla kaplamanın kayma aşınma direncini önemli ölçüde geliştirdiğini tanımlamıştır.

Liu vd. yaptıkları çalışmada Cr13Ni5Mo paslanmaz çelik üzerine HVAF tekniği ile biriktirdiği NiCrBSi kaplamanın sürtünme aşınma özelliklerini incelemiştir (Liu et al., 2010). Oluşturulan Ni esaslı kaplamanın daha düşük porozite ve çatlak oluşumu ile 1086 HV gibi yüksek sertliğe ulaştığı görülmüştür. Pin-on disk test cihazında yapılan aşınma testlerinde, NiCrBSi kaplamanın paslanmaz çeliğin aşınma dayanımını arttırdığı ve Cr 'nin pasif film oluşturma etkisi ile de korozyon direncinin arttığı görülmüştür.

Planche vd. yaptıkları çalışmada HVOF, APS ve alev ergitme yöntemleriyle oluşturduğu NiCrBSi kaplamanın, mikroyapı, bileşim, sertlik, elastisite modülü, gözeneklilik ve oksit seviyesini incelemiştir (Planche et al., 2005). Parçacık sıcaklığının aksine en düşük altlık sıcaklığının HVOF tekniğinde, plazmadan 100 K alev püskürtmeden ise 500 K daha düşük olduğu görülmüştür. Çalışma sonunda, HVOF kaplamaların sertlik, gözeneklilik, elastisite modülü ve oksit seviyelerinin plazma veya alev püskürtme kaplamalarına göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, yoğun kaplamaların oluşturulmasına imkan tanıyan yüksek parçacık hızının olduğu belirtilmiştir. Hem partikül sıcaklığının hem de jet içinde kalma süresinin azaltılması oksit seviyesini düşürmüştür.

Djafri vd. yaptıkları çalışmada dökme demir, krom çeliği ve metal matris kompozit fren disklerinin termal yorulma etkisi altında aşınma davranışını incelemiştir (Djafri et al., 2018). Aşınma testleri, pin-on disk tipi test cihazı üzerinde organik ve yarı metalik sürtünme malzemelerine karşı yapılmıştır. Çalışma sonuçları, termal yorulmanın tüm disk numunelerinin yüzey pürüzlülüğünü artırarak temas yüzeylerinin yapısını etkilediğini, dökme demire karşı sürtünen yarı metalik sürtünme malzemesinin aşınma oranının azaldığını diğer sürtünme malzemelerinin aşınma oranının arttığını ve termal yorulmanın sürtünme katsayısı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir.

Uyyuru vd. yaptıkları çalışmada sürtünme malzemesine karşı kayan Al–Si/SiC kompozitlerin, pin-on disk test cihazı üzerinde sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemiştir (Uyyuru et al., 2007). Disk malzemesi olarak Al-MMC, karşı sürtünme malzemesi olarak fren balataları kullanılmıştır. Test sonuçlarında aşınma oranı ve sürtünme katsayısının hem uygulanan normal yükle hem de kayma hızıyla değiştiği ve uygulanan normal yükün artışı ile aşınma oranının arttığı, sürtünme katsayısının ise azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca aşınma oranı ve sürtünme katsayısının kayma hızıyla orantılı olarak değiştiği görülmüştür.

Karaoğlanlı vd. yaptıkları çalışmada kuru koşullar altında Al_2O_3 gövdeye karşı kayan beş farklı HVOF sprey kaplamanın sürtünme ve aşınma davranışını incelemiştir (Karaoglanli et al., 2017). Paslanmaz çelik üzerine oluşturulan 50NiCrBSi-WC, Ni20Cr, WC-12Co, WC-CoCr ve Cr_3C_2-25NiCr beş farklı kaplamanın 5-15 N normal yük altında ve 10-20 cm/s hızda ball-on disk test cihazında sürtünme testleri yapılarak

sonuçları karşılaştırılmıştır. Yüksek sıcaklık ve aşınma koşullarında çalışan bileşenlerin kullanım ömrünü uzatmak için en uygun kaplamanın, sırasıyla en düşük sürtünme katsayısı ve en yüksek aşınma direncine sahip WC-CoCr, WC-Co, Cr_3C_2-NiCr ve NiCrBSi-WC olduğunu göstermiştir. NiCr kaplama her koşulda en düşük performansı sergilemiştir. Kaplamaların aşınma hacmi genellikle hem normal yükte hem de kayma hızındaki artışla artmıştır. Kayma hızının azalması ve normal yükün artmasıyla aşınma oranı azalmıştır. NiCr gibi daha yumuşak kaplamaların yüzeyinde plastik deformasyon gözlenmiştir.

Giovanni vd. yaptıkları çalışmada düşük metalik sürtünme malzemesine karşı kayan dökme demir diske uygulanan ısıl işlemin rolünü araştırmak için pin-on disk test cihazı üzerinde kuru kayma testleri yapmıştır (Straffelini et al., 2016). Fren diski ve sürtünme malzemesinin aşınma oranı ısıl işlem öncesine göre büyük oranda azaltılmıştır. Disk aşınma oranının azalması, yüzey sertliğindeki artıştan kaynaklanırken, sürtünme malzemesinde de görülen eş zamanlı aşınma oranının azalmasını, hareket eden aşınma mekanizması ve özellikle demir oksit tabakasının oluşumu ile açıklamışlardır. İşlem görmemiş dökme demir diskin kararlı durum sürtünme katsayısı 0.5 iken, ısıl işlem görmüş diskin sertliğindeki güçlü artış nedeniyle sürtünme katsayısı 0.4 ’e düşmüştür. Isıl işlem görmüş diskte en düşük sürtünme katsayısı ve en düşük sıcaklık artışı kaydedilmiştir. Sonuçlar ışığında, ısıl işlemin gerçek fren sistemlerine uygulanması açısından umut verici olduğu ve PM salınımının azaltılmasında olumlu etkisinin olacağı bildirilmiştir.

Zhang vd. yaptıkları çalışmada H13 çelik altlık malzeme üzerine HVOF sprey yöntemiyle oluşturduğu WC-10Co4Cr ve Cr_3C_2-25NiCr kaplamaların ball-on tipi test cihazında sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemiştir (Zhang et al., 2015). WC-10Co4Cr kaplama daha yoğun bir yapı sergilemesine rağmen her iki kaplamanın da yapışma mukavemetinin yakın olduğu görülmüştür. 500 °C ve 600 °C’de yapılan sürtünme testlerinde, Cr_3C_2-25NiCr kaplaması WC-10Co4Cr kaplamasından daha yüksek sürtünme katsayısı ve daha yüksek aşınma direnci sergilemiştir.

Gruzdys vd. yaptıkları çalışmada termal püskürtme ile oluşturulan NiCrBSi-WC/Co kaplamanın içeriğindeki WC/Co konsantrasyonunun yapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini farklı analitik yöntemlerle değerlendirmiştir (Gruzdys & Juraitis,

2009). Çelik altlık üzerine alev püskürtme ve ergitme yöntemiyle % 0-45 aralığında değişen WC/Co konsantrasyonları ile bir dizi kaplama oluşturulmuştur. Kaplamaların aşınma testleri pin-on disk tipi test cihazında yapılmış ve aşınma izleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, kaplama içeriğindeki WC/Co konsantrasyon artışının makro sertlikte önemli bir artış sağlamadığı ancak en iyi aşınma direncinin %25 WC/Co konsantrasyonu ile sağlandığı görülmüştür. WC/Co konsantrasyonun daha fazla artışı, düşük kohezyon nedeniyle karbür partiküllerinin yüzeyden ayrılmasını kolaylaştırdığı tespit edilmiştir. NiCrBSi-WC/Co kaplamaların üstün özellikleri nedeniyle aşınma koruması için uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Mishra vd. yaptıkları çalışmada AISI 1020 düşük karbonlu çelik üzerine HVOF sprey ile oluşturulan WC-12Co ve WC-10Co4Cr kaplama numunelerinin, pin-on disk test cihazı üzerinde EN32 çelik diske karşı kuru kayma ve aşınma davranışlarını incelemiştir (Mishra et al., 2018). WC-12Co kaplama WC-10Co4Cr kaplamadan daha yoğun ve daha yüksek sertlik göstermiştir. SEM görüntülerinden WC 'nin W ve W_2C fazlarına ayrışması sonucunda aşınma dayanımının arttığı görülmüştür. Deney sonuçlarında AISI 1020 numunesinin en yüksek aşınma oranı sergilediği görülmüştür. WC-Co ve WC-CoCr kaplamalarının negatif aşınma ile daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmüştür. WC-12Co daha yüksek sürtünme katsayısı göstermiştir. AISI 1020 altlık malzemesi sürtünme katsayısını doğrudan etkileyen W, Co ve Cr oksit oluşumuna bağlı olarak daha düşük sürtünme katsayısı göstermiştir.

Ozkavak vd. yaptıkları çalışmada üç farklı Al alaşımı üzerine HVOF sprey yöntemi ile oluşturulan WC-Co ve WC-CoCr kaplamaların ball-on test cihazı üzerinde sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemiştir (Özkavak et al., 2019). WC-CoCr kaplamaları, WC-Co kaplamalarından daha ince bir kaplama tabakasıyla daha yüksek sertlik sergilemiştir. Kaplamanın yapısındaki Cr'nin varlığı karbür ve matrisin bağ kuvvetini arttırmıştır. WC-CoCr kaplamalar, WC-Co kaplamalara kıyasla tüm Al alaşımlı altlıklar için daha iyi aşınma direnci göstermiştir. Daha sert WC-CoCr kaplamaları, tüm Al alaşımlı alt tabakaya göre daha düşük aşınma oranı sergilemiştir. Kaplama işlemi sırasında mikro yapıdaki WC 'nin dekarbürizasyonu aşınma direncini arttırmıştır. En yüksek aşınma direnci WC-CoCr kaplı Al-7075 altlık malzemede elde edilirken, en düşük aşınma direnci Al-6082 altlık malzemede üzerinde oluşturulan WC-Co kaplamasında görülmüştür. Ayrıca en yüksek sürtünme katsayısı Al-6082 altlık üzerine biriktirilen

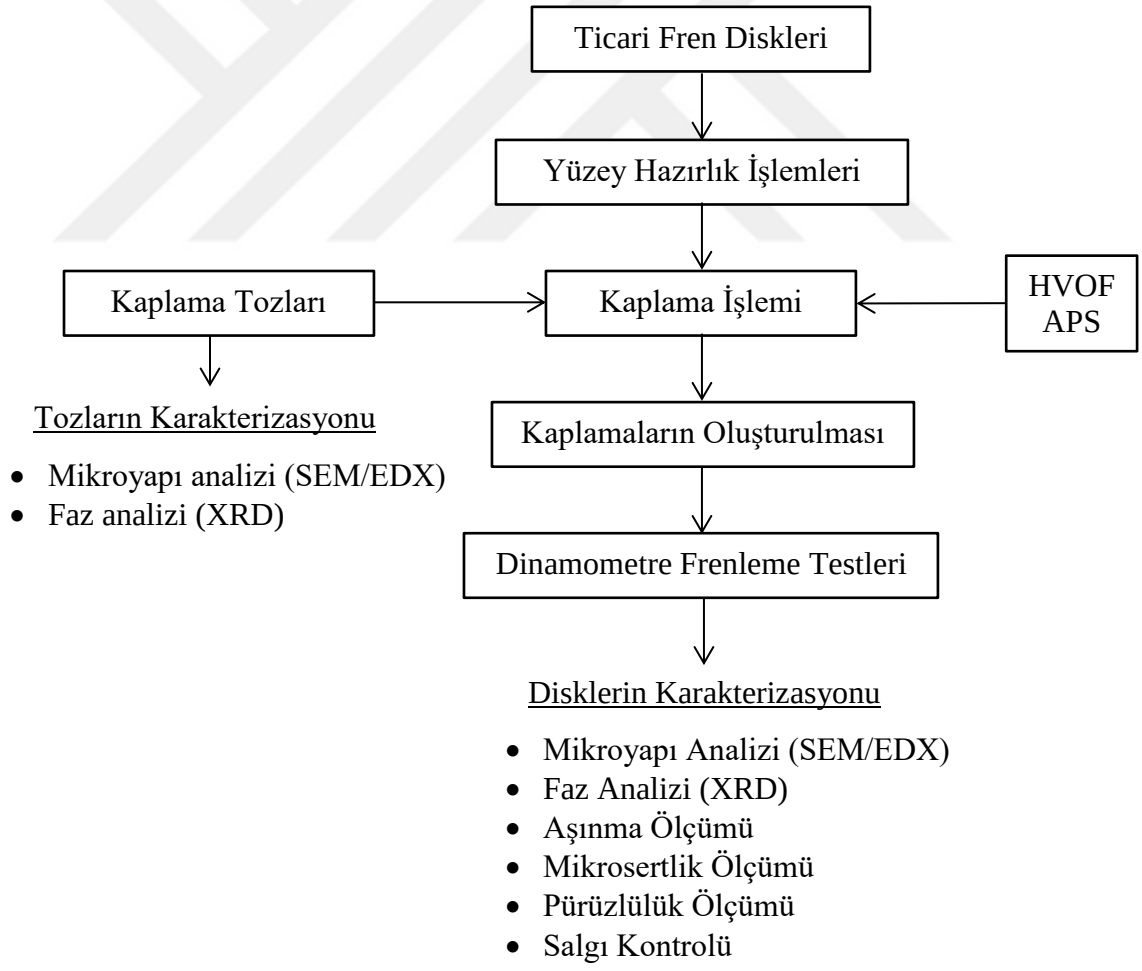
WC-Co kaplamasında görülmüştür. Testlerde artan yük ile aşınma oranının arttığı gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneysel Çalışma Programı

Bu çalışmada takip edilen deneysel akış programı Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışma akış şeması

3.2. Kullanılan Fren Diski ve Balataları

Bu çalışmada, piyasadan tedarik edilen ticari OEM fren diskleri ve balataları kullanılmıştır. Bu diskler serbest ferrit içeren tipik gri dökme demir malzemeye sahiptir. Testlerde kullanılan fren diskleri, Ø 280mm x 24mm boyutlara ve ortalama 7200 gr kütleye sahiptir. Ayrıca soğutma kanallı olup standart yüzey özellikleri göstermektedir. Testlerde kullanılan fren diskinin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1'de, fiziksel özellikleri ise Şekil 3.2'de görülmektedir.

Çizelge 3.1. Fren diskinin kimyasal kompozisyonu (% kütlesel)

Element	C	Si	Mn	P	Cr	S	Fe
%	3.40	1.88	0.54	0.18	0.12	0.10	Den.



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan OEM fren diski

Deneysel çalışmalarda disk sürtünme malzemesi olarak aynı formülasyona sahip ticari fren balataları kullanılmıştır. Yoğunluk testi sonucunda balataların yaklaşık 2.5 gr/cm^3 yüksek yoğunluğa sahip olduğu tespit edilmiştir. Testlerde kullanılmak üzere piyasadan tedarik edilen fren balataları, SAE-J661 "Fren Balata Kalite Test Prosedürü" uygun olarak 1 inch^2 yüzey alanı ve yaklaşık 12 mm kalınlığında kesilerek hazırlanmıştır. Şekil 3.3'te testlere uygun olarak hazırlanan fren balatası görülmektedir.



Şekil 3.3. Testlerde kullanılan fren balatası

3.3. Kaplama Malzemelerinin Özellikleri

Bu çalışmada havalandırma kanallı otomobil fren disklerinin frenleme performansını geliştirebilmek amacıyla fren disk yüzeyleri kaplanmıştır. Sprey kaplama malzemesi olarak, WC-10Co4Cr sermet, Cr_3C_2-25NiCr karbür, 20NiCrBSi-WC12Co sermet ve Mo-NiCrBSi kompozit toz malzemeleri kullanılmıştır. Sprey kaplama tozlarının seçiminde ticari olması ve fren disklerinin tribolojik özelliklerinin gelişimine imkan vermesi dikkate alınmıştır.

3.3.1. WC-10Co4Cr Sprey Kaplama Tozu

Termal püskürtme yöntemleriyle oluşturulan seramik-metalik (sermet) malzemeler, iyi aşınma performansının gerekli olduğu farklı endüstriyel bileşenlerde başarıyla kullanılmıştır. Bu malzeme sınıfı sertlik ve tokluğun bir kombinasyonunu sağlar. Sermet malzemelerdeki karbür veya oksit formundaki takviye partikülleri, sertlik sağlarken bağlayıcı matris ise tokluğu geliştirir. Kobalt bağlayıcıya krom eklenmesinin WC-Co'nun korozyon direncini arttırdığı bilinmektedir (Mishra et al., 2018). İyi aşınma performansının yanı sıra iyi korozyon direnci, WC-CoCr kaplamayı hem korozyon hem de aşınma direncinin kritik olduğu uygulamalar için uygun aday haline getirir (Souza & Neville, 2006).

Çalışmada kullanılan WC-10Co4Cr (Metco-3652) kaplama tozu 15-45 µm tane boyutlarına sahiptir. Bu kompozit tozlar, sert malzeme olarak %86 tungsten karbür-karbür parçacıkları ve bağlayıcı olarak kobalt-krom matrisi içeren termal püskürtme için küresel formda, topaklanma ve sinterleme ile üretilir. Mükemmel aşınma, sıcaklık ve

korozyon direnci sağlar. Yüksek kırılma tokluğu ve yüksek sıcaklık direnci özelliklerini 500 °C'ye kadar muhafaza eder. İnce karbür taneleri tungsten karbür kobalt bazlı bir malzemenin abrazif, erozyon ve titreşimli aşınma özelliklerini iyileştirirken, matristeki krom korozyon direncini arttırır. Bu malzemelerin termal püskürtme kaplamaları, sert krom kaplamaların mükemmel alternatifleridir. Bu kaplamalar mükemmel aşınma ve korozyon direnci ile krom kaplamaya benzer yüzey özelliklerine sahip olabilir. Bu malzemelerin HVOF kaplamaları yoğun ve iyi yapışma mukavemetine sahiptir. Ayrıca öğütmenin yapılamadığı veya gerekmediği uygulamalarda ise pürüzsüz yüzeyler gösterirler. CD1 kodlu fren diskinin kaplanmasında kullanılan WC-10Co4Cr tozunun kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.2'de görülmektedir.

Çizelge 3.2. WC-10Co4Cr tozunun kimyasal kompozisyonu (% kütlesel)

Metco 3652	Co	Cr	C_{top}	Fe (max)	W
WC-10Co4Cr	8.5-11.5	3.4-4.6	4.8-5.6	0.2	Denge.

3.3.2. Cr_3C_2-25NiCr Sprey Kaplama Tozu

Saf metal veya kobalt, nikel, krom, demir içeren metal karışımı ile bağlanmış krom karbür (Cr_3C_2) gibi sert metal karbürler yüksek hızlı termal sprey işlemleriyle aşınmaya karşı dirençli kaplamalar üretmek için sık kullanılan sermetlerdir (Sahraoui et al., 2003). Semente karbürler olarak da adlandırılan bu sermetler, yüksek aşınma ve korozyon direnci istenen uygulamalar için cazip hale getiren optimum sertlik, tokluk ve süneklik karışımına sahiptir. Genellikle sermet kaplamaların aşınma direncinin mikro yapılarındaki karbür boyutu, karbür içeriği, karbür dağılımı ve gözeneklilikten etkilendiği düşünülmektedir. Birçok araştırmada, yüksek miktarda ince karbür gömülü termal püskürtmeli yoğun sermet kaplamaların daha iyi bir aşınma performansına sahip olduğu bildirilmiştir (Kermc et al., 2005). Günümüzde HVOF termal sprey yönteminin, semente karbür püskürtüme kaplamaların oluşturulmasında en uygun yöntemlerden biri olduğu kabul edilmektedir. Bu kaplamalar bir Ni, NiCr matris fazına gömülü karbür Cr_3C_2 fazından oluşur ve karbür partiküllerinin yüksek sertliği ile aşınma direnci sağlar (Xie et al., 2013). Yaygın olarak aşınma ve korozyonu minimize etmek için uygulanır.

Oda sıcaklıklarından 870 °C'ye kadar düşük sürtünme katsayısı ve abrazif aşınmaya karşı yüksek dirence sahiptir (Matthews et al., 2003).

CD2 kodlu fren diski kaplanmasında kullanılan 15-53 μm boyut dağılımına sahip Cr_3C_2-25Ni20Cr (Metco-7302) sermet tozunun kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.3'te görülmektedir.

Çizelge 3.3. Cr_3C_2-25NiCr tozunun kimyasal kompozisyonu (% kütlesel)

Metco 7302	Ni	C_{top}	Fe	O	Cr
Cr_3C_2-25NiCr	17.5-22.5	9-10.2	< 0.5	-	Denge.

3.3.3. 20NiCrBSi-WC12Co Sprey Kaplama Tozu

Termal sprey teknikleri ile biriktirilen sermet kaplamalar arasında WC-Co iyi aşınma direncine sahip olması nedeniyle ilgi görmektedir. WC bazlı kaplamalar, genellikle erozyon ve aşınma direnci istenen yerlerde kullanılır (Miguel et al., 2003). Eşsiz yüksek ve orta sertlik kombinasyonundan dolayı WC-Co kaplamalar kayma, erozyon ve aşınma yıpranması gibi çeşitli aşınma türlerine karşı yüksek direnç gösterir (Stoica et al., 2004). Ni esaslı kaplamalar, yüksek sıcaklık, korozyon ve aşınma direnci uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. 540 ºC'ye kadar olan sıcaklıklarda, aşınma, korozyon ve sertlik özelliklerini muhafaza ederler.

NiCrBSi sprey tozu içerisine farklı malzeme ilavesiyle sertlik ve aşınma özellikleri geliştirilebilir. Bu malzemelerden biri olan WC yüksek mikro sertlik, yüksek aşınma ve korozyon direnci sağladığından araştırmacılar tarafından ilgi görmüştür (Huang et al., 2015). NiCrBSi-WC12Co tozunun bileşenlerindeki, Nikel mükemmel ıslanabilirlik özelliği ile iyi bir bağlanma sağlarken, Krom tribo-mekanik özellikleri geliştirir. Bor, ergime sıcaklığını düşürür ve sert fazların oluşumuna katkı sağlar. Silisyum, ergime sıcaklığını düşürürken akışkanlığı arttırır. Matris içerisine bor ve silisyum ilavesi, tungsten karbürün kaplamada çözülmesini en aza indirirken, alt tabakayı ıslatmak ve kaynaşma sırasında ilave akıya gerek kalmadan düşük sıcaklıklarda bağlanmayı sağlar. Ayrıca bor ve silisyum bulunması özellikle HVOF tekniği için uygun olan kendiliğinden akma özelliği sağlar (Tobar et al., 2006). Demir, difüzyon oranını

düzenlerken, karbon sert karbürlerin oluşmasını sağlayarak sertlik ve aşınma direncini arttırır. Kobalt ise yüzeyi aşınmaya karşı korumak için yüzey üzerinde sünek, yoğun ve iyi yapışmış bir tribo-film oluşturmak üzere bağlayıcı görevi görür. Genellikle bağlayıcı olarak Co ve Cr kullanılması, Cr_2C_3 'e kıyasla kaplamanın kayma aşınma direncinin gelişimine etki eder (Ward & Pilkington, 2014). WC ilaveli Ni esaslı kaplanmaların termal sprey yöntemi ile oluşturulmasının daha uygun olduğu bildirilmiştir (Stewart et al., 2005).

CD3 kodlu fren diskinin kaplanmasında kullanılan 15-45 μm boyut dağılımına sahip 20NiCrBSi-WC12Co kompozit tozunun kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.4'te görülmektedir.

Çizelge 3.4. 20NiCrBSi-WC12Co tozunun kimyasal kompozisyonu (% kütlesel)

Metco 15F-3102	Cr	B	Si	C_{top}	Fe_{max}	Co	W
NiCrBSi	17	3.5	4	1	4	-	-
WCCo	-	-	-	5-5.8	0.2	10.5-13.5	Denge.

3.3.4. Mo-NiCrBSi Sprey Kaplama Tozu

Aşınmaya dirençli kaplamalar üretebilmek için araştırılan birçok metal ve alaşım malzemelerinden biri olan Mo ve NiCrBSi, üstün karakteristik özellikleri nedeniyle son yıllarda kullanılmıştır (Guo et al., 2011; Laribi et al., 2007). Refrakter metal olan Mo temel formunda yumuşaktır. Ancak yüksek sıcaklıkta, örneğin termal spreyleme işlemi sırasında MoO_2 gibi ince bir oksit tabakası oluşturarak kaplamanın sertliğini arttırır. Termal olarak oluşturulan Mo kaplama, birçok pratik mekanik uygulamada yaygın olarak kullanılan aşınma direnci kaplamalarından biridir. Metal yüzeyler arasında kayma aşınmasının problem olduğu birçok uygulamada Mo kaplama uygun bir çözüm olarak kullanılmıştır (Hwang et al., 2004). Bu kaplama tozu hafif oksitleyici ortamlarda sürtünme ve aşınmaya dayanıklı sert, yoğun kaplamalar oluşturmak için kendiliğinden akabilen bir bileşenle harmanlanmış Mo içeren bir termal sprey tozudur. Yüksek aşınma direnci uygulamaları için idealdir. Bu iki bileşenli karışım, topaklanmış ve sinterlenmiş bir molibden bileşeninden ve inert bir gaz ile atomize olmuş nikel-krom-demir

kendiliğinden akıcı bileşenden oluşur. Molibden, kaplamaya tokluk, çizilme direnci ve düşük sürtünme katsayısı sağlarken, kendiliğinden akan alaşım bileşeni, kaplamaya ek yüksek sıcaklıkta korozyon, erozyon ve oksidasyon direnci sağlar. Bu kaplamalar yüzey üzerine kendiliğinden yapışırlar.

CD4 kodlu fren diskinin kaplanmasında kullanılan 45-125 µm boyut dağılımına sahip Mo-NiCrBSi kompozit tozunun kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.5'te görülmektedir.

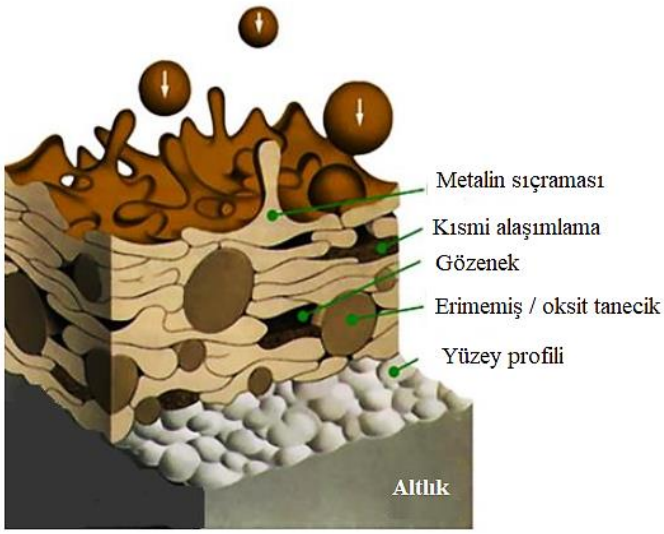
Çizelge 3.5. Mo-NiCrBSi tozunun kimyasal kompozisyonu (% kütlesel)

GTV 80.05.1	Ni	Cr	B	Si	Fe	O	Mo
Mo-NiCrBSi	18	4.5	0.8	2	1	-	Denge.

3.4. Sprey Kaplama Yöntemleri

Yüzey işlemleri ve kaplamalar bileşenlerin kullanım süresini uzatmak için uygulanan pratik bir yaklaşımdır ve özellikle de yüzey özelliklerinin önemli olduğu mühendislik uygulamaları en çok talep gören kısmıdır. Ayrıca yüzey kaplamalarının kullanımı, belirli özelliklerin en çok ihtiyaç duyulduğu yerlere yerleştirildiği bir malzeme tasarımında dirençli kaplamaların oluşturulmasında pratik bir imkan sağlar.

Termal sprey kaplama yöntemleri, çoğu zaman agresif ortamlara karşı koruma olarak çeşitli fonksiyonel uygulamalar için bileşen yüzeylerine çeşitli metalik, intermetalik veya seramik kaplamalar üretmek için termal bir ısı kaynağı tarafından üretilen ısı ile ergimiş/kısmen erimiş katı parçacıkların spreylenerek mekanik bağlanma ile altlık malzeme üzerinde biriktirilmesidir. Çok yönlülüğü nedeniyle havacılık, petrol ve gaz, biyomedikal ve otomotiv endüstrilerini kapsayan geniş bir uygulama yelpazesi için ticari olarak kullanımdadır (Matthews & James, 2010b). Şekil 3.4'te termal sprey kaplamanın oluşum mekanizması şematik olarak görülmektedir.

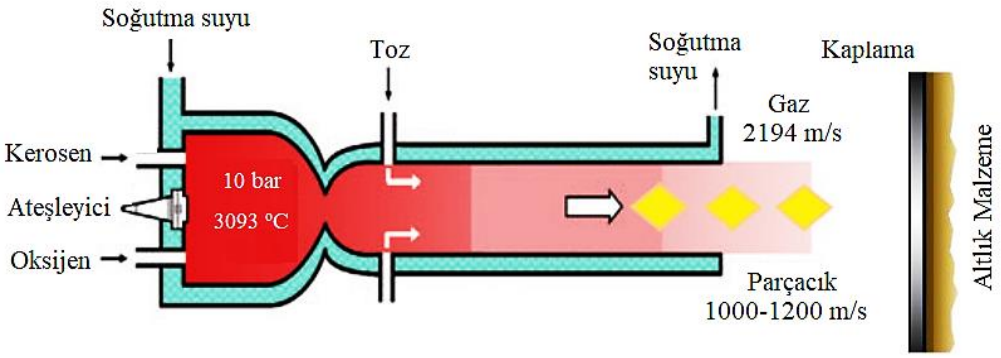


Şekil 3.4. Termal sprey kaplama oluşum mekanizması

Testlerde kullanılan üç fren diskinin kaplanmasında Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) yöntemi, dördüncü diskin kaplanmasında ise Plazma Sprey (APS) kaplama yöntemi kullanılmıştır. Kaplama yöntemlerinin seçiminde sprey tozlarının cinsi ve boyut dağılımı da etkili olmuştur.

3.4.1. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Yöntemi

HVOF sprey yöntemi, toz partiküllerinin bir püskürtme tabancasına enjekte edildiği ve yoğun kaplamalar üretmek için yüksek sıcaklıktaki süpersonik gaz akışı ile hızlandırılan hem ticari hem de araştırma amaçlı kullanılan bir termal sprey kaplama işlemidir (Ang et al., 2016). Bu yöntemdeki tabancanın tipik alev sıcaklığı, metalik tozları eritmek ve sermet besleme stoğu tozunu yarı eritmek için yeterli olan 3000 °C civarındadır. Propilen, asetilen, metan, kerosen ve bunların kombinasyonları gibi yakıtlar kullanılmasına rağmen propan yanma için en yaygın kullanılan yakıttır. Hammadde toz parçacıklarının boyutu tipik olarak 10-63 μm aralığındadır ve parçacıklar 800 m/s hızlara erişebilir (Sidhu et al., 2005). Tipik HVOF sprey kaplama tekniğinin şematik resmi Şekil 3.5'te görülmektedir.



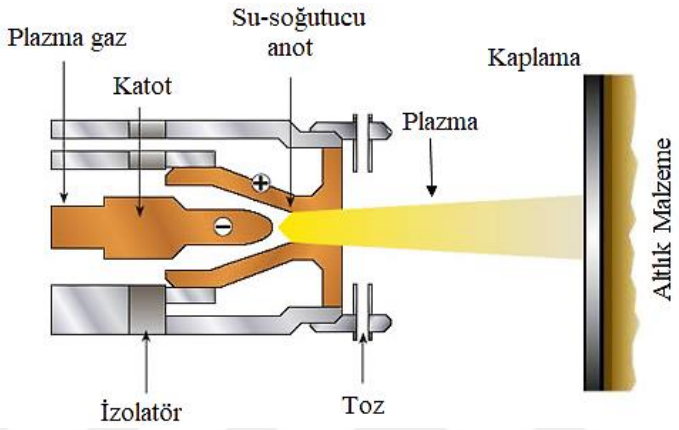
Şekil 3.5. HVOF sprey kaplama tekniği

İşlem çok düşük gözeneklilik, yüksek sertlik, iyi yapışma ve yapışma mukavemeti ile birlikte mükemmel aşınma direncine sahip metal ve sermet kaplamaların biriktirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bolelli et al., 2015). İşlemin ayrıca geleneksel sert krom kaplamalar için de uygun olduğu kanıtlanmıştır. Üstün aşınma direnci sergileyen WC-Co ve WC-CoCr ile belirgin bir şekilde kullanılmış ve şu anda endüstriyel aşınma uygulamalarında tercih edilen bir süreçtir. Cr_3C_2-NiCr, Cr_3C_2-WC-FeCoNi gibi diğer sermetlerin ve demir alaşımı bazlı tozların kaplanması da aşınma direnci açısından umut verici sonuçlar göstermiştir (Hulka et al., 2012; Matikainen et al., 2017). Mükemmel aşınma koruması, hem oda sıcaklığında (özellikle WC bazlı sermetler ile) hem de yüksek sıcaklıkta (Cr_3C_2-NiCr sermetleri, ≈800 °C'ye kadar) HVOF sprey sermet kaplamaları ile elde edilebilir. Her ne kadar aşırı ısınmaya bağlı ince toz parçacıklarının dekarburizasyon riski ve genellikle çatlak oluşumuna neden olabilecek kırılgan karbür fazlarının oluşumu mümkün olsa da, plazma sprey yönteminden çok daha düşüktür (Schwetzke & Kreye, 1999).

3.4.2. Plazma Sprey (APS) Yöntemi

Plazma sprey kaplama yöntemi çok sayıda fonksiyonel uygulama için kaplamaların biriktirilmesinde yaygın olarak kullanılan ticari bir işlemdir. Plazma püskürtme yöntemiyle oluşturulan kaplamalar iyi aşınma ve erozyon direncine sahiptir ayrıca sürtünme-aşınma uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar. Hammadde tozunun tipik tanecik boyutu 10-100 µm arasında değişir, bu durum yüzlerce mikron kalınlığa sahip kaplama tabakasına imkan verir (Güney & Mutlu, 2019). APS'nin yaygın endüstriyel

kullanımı, plazma jetinin 20.000 ^{o}C'yi aşabilen yüksek sıcaklığı nedeniyle çeşitli metalik, sermet veya seramik malzemeleri püskürtme kabiliyetine bağlanabilir. APS kaplamalar, piston segmanları, silindir blokları ve diğer çeşitli binek araç parçalarının sürtünme ve aşınma özelliklerini geliştirmek için otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır (Tung & McMillan, 2004). Plazma sprey kaplama tekniğinin şematik resmi Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6. Plazma sprey kaplama tekniği

3.5. Kaplama Hazırlık İşlemleri ve Sprey Parametreleri

Kaplama öncesinde altlık malzeme yüzeyinin hazırlanması güçlü bir mekanik bağ elde etmede önemli bir parametredir. Kaplama hazırlık işleminde, disk yüzeyleri yağ, kir, pas vb. etmenlerin uzaklaştırılması amacıyla temizlenerek sıcak hava ile kurutulmuştur. Kaplama öncesinde yüzeyler, 30-50 mesh boyutlarında alümina abrasif malzemesi ile 5 bar basınç altında, yüzey pürüzlülüğü Ra:10-12 olacak şekilde 10 dk süreyle kumlanmıştır. Kaplama sırasında oluşan aşırı ısıyı önlemek için 3-5 atm basınçlı hava ile soğutma yapılmıştır. Kaplama işleminden sonra disk yüzeylerini orijinal standart yüzey kalitesine getirebilmek amacıyla kaplanmış yüzeyler 60, 200 ve 400 grite kadar olan SiC zımpara kağıtları ile leplenerek parlatılmıştır. HVOF sprey kaplamaların oluşturulmasında JP-5000 Tafa-Praxair HVOF tabancası ve Plazma sprey kaplamanın oluşturulmasında ise Metco-3MB Plazma tabancası kullanılmıştır. Maksimum biriktirme verimliliği ve kaplama yoğunluğu için optimize edilmiş püskürtme

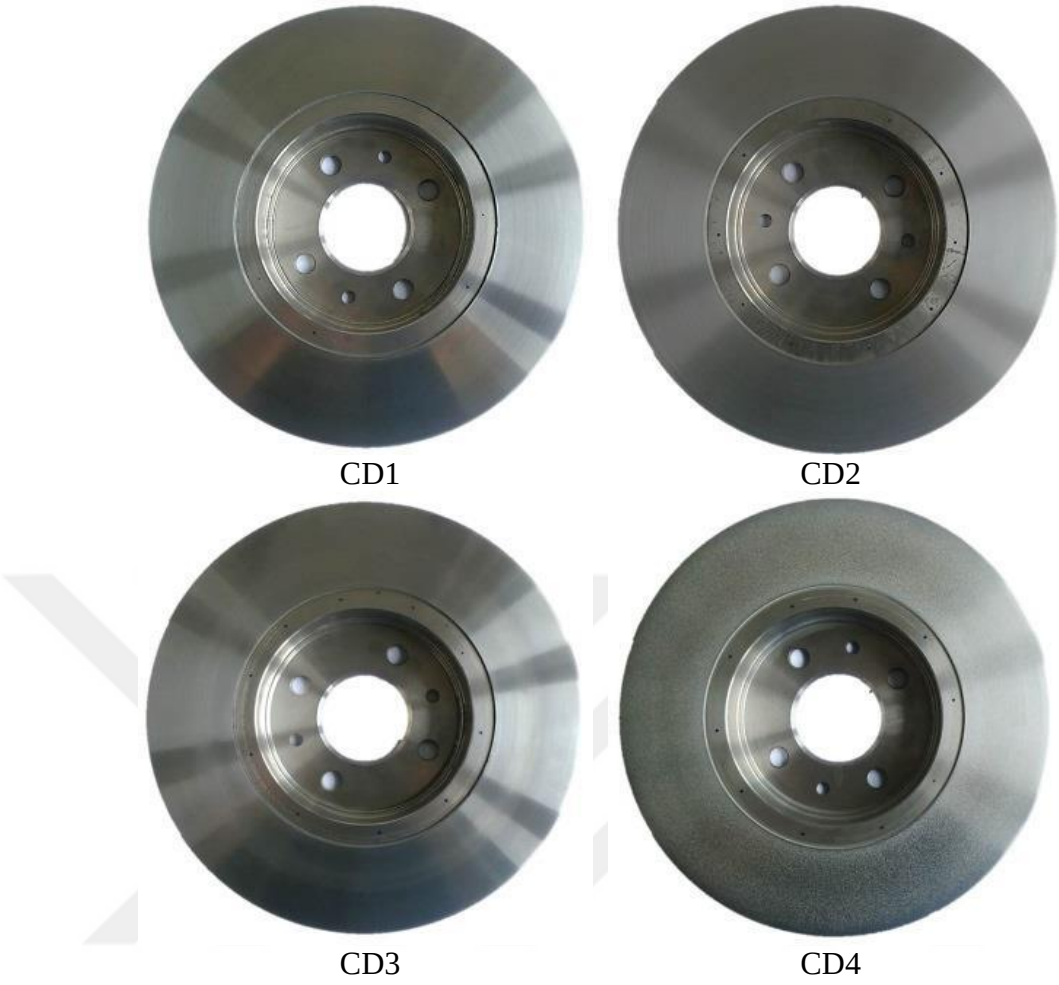
parametreleri Çizelge 3.6 ve 3.7'de, kaplama sonrası fren disklerinin son durumu ise Şekil 3.7'de görülmektedir.

Çizelge 3.6. HVOF sprey kaplama parametreleri

JP-5000	WC-10Co4Cr	Cr_3C_2-25NiCr	20NiCrBSi-WC12Co
Oksijen basıncı (bar)	9.4 ±0.6	9.4 ±0.6	9.4 ±0.6
Kerosen basıncı (bar)	8.3 ±0.6	8.3 ±0.6	7.6 ±0.6
Kerosen akış hızı (l/h)	30	30	25
Oksijen akış hızı (m^3/ h)	54	54	50
Soğutma basıncı (bar)	3-5	3-5	3-5
Toz akış hızı (gr/dk)	75	75	75
Disk dönme hızı (rpm)	200	150	150
Püskürtme mesafesi (mm)	380	350	380
Püskürtme açısı	90	90	90
Toz boyutu (µm)	15/45	15/53	15/53
Geçiş kalınlığı (µm)	10-12	10-12	10-12
Barrel uzunluğu (mm)	200	200	200

Çizelge 3.7. Plazma sprey kaplama parametreleri

3MB	Mo-NiCrBSi
Plazma gaz akış hızı (lt/dk)	Ar:80 H_2:15
Akım(A) x voltaj(v) = güç(kw)	500 x 80 = 40
Nozul / elektrod	Cu / Cu-W
Nozul çapı (mm)	6.7
Taşıyıcı gaz ve akış hızı (lt/dk)	Ar, 10
Toz akış hızı (gr/dk)	42
Soğutma basıncı (bar)	3-5
Disk dönme hızı (rpm)	35
Püskürtme mesafesi (mm)	120
Püskürtme açısı	90
Toz boyutu (µm)	45/125
Geçiş kalınlığı (µm)	10-12



Şekil 3.7. Kaplama sonrası fren disklerinin görünümü; CD1:WC-10Co4Cr, CD2: Cr_3C_2-25NiCr, CD3: 20NiCrBSi-WC12Co, CD4: Mo-NiCrBSi

3.6. Fren Test Prosedürü

Komponent üreticileri ve sürtünme malzeme tedarikçileri tarafından uygulanan testlerde genellikle SAE, ISO ve FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards) test prosedürleri kullanılmaktadır. Fren test cihazında disk-balata ikilisinin sürtünme performansı; alıştırma etkinliği, hız duyarlılığı, sıcaklıkla fren zayıflama direnci (fade), etkin sürtünmenin yeniden oluşturulması ve sürtünme kararlılığı faktörleriyle belirlenmektedir.

Bu çalışmada disklerin frenleme performansını belirlemek amacıyla yapılan sürtünme testleri, SAE-J2430 prosedürüne uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, SAE-J2430 prosedürünün farklı bölümlerindeki frenleme durumlarına karşılık gelen,

sıcaklık, sürtünme katsayısı (μ) ve hız verileri ile oluşturulmuştur. Her bir frenleme testi toplam 312 frenleme çevriminde ve 12 saat süresince yapısal bütünlük bozulmadan tamamlanmıştır. Test süresince veri toplama sistemi ile sürtünme katsayısı, hız, basınç, kuvvet ve sıcaklık verileri toplanarak performans grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan karakteristik grafikler J2430 prosedürünün cihaz kontrolü ile başlayan ve final etkinliği ile son bulan test sürecinin her bir bölümünü gösterir. J2430'a göre, sürtünme çiftinin frenleme performansı değerlendirilirken benzer fren mesafesi için ilk etkinlik, fade (sıcaklıkla fren zayıflaması), sıcak performans, kararlılık dizileri ve final etkinliği bölümleri dikkate alınır (Roubicek et al., 2008). Test prosedürünün cihaz kontrolü ile başlayan ve final etkinliği ile son bulan bölümleri aşağıda gösterilmiştir.

- Cihaz kontrol
- Alıştırma
- İlk etkinlik
- Fade-Sıcaklıkla fren zayıflaması
- Sıcak performans
- Soğutma
- Kararlılık
- Yeniden alıştırma
- Final etkinliği

Cihaz kontrol bölümü, uygun dinamometre ayarlarının tespiti için yapılır. Alıştırma bölümünde istikrarlı bir sürtünme yüzeyi oluşturmak için disk-balata yüzeyleri birbirine alıştırılır. Göreceli olarak sabit bir temas alanı disk-balata yüzeyinin alıştırılması amacıyla devam eder. Birinci etkinlik bölümü, rampa uygulamasının ardından alıştırma sonrası soğuk etkinlik kısımlarını içerir. Soğuk etkinlik testi sırasında toplanan veriler BEEP değerlendirmesinde sıcak performans değerlendirmesi için temel olarak kullanılır (Yun et al., 2010). Sürtünme malzemelerinin sıcaklıkla fren zayıflama direncini belirlemek için fade bölümü kullanılır. Gerekli gerçek basınç, solma sapmaları değerlendirmesinde izin verilen maksimum basınçtan daha düşüktür. Sıcak etkinlik, gerçek torkun gereken minimum seviyeden yüksek olması gereken durma mesafesi gereksinimlerine ve pedal kuvveti sınırlarına dayanır. Final etkinliği bölümü, frenlerin

160 km/h taşıt hızına kadar olan hız hassasiyetini yansıtır. Ayrıntılı test koşulları SAE-J2430 standardında tanımlanmış ve Çizelge 3.8'de listelenmiştir.

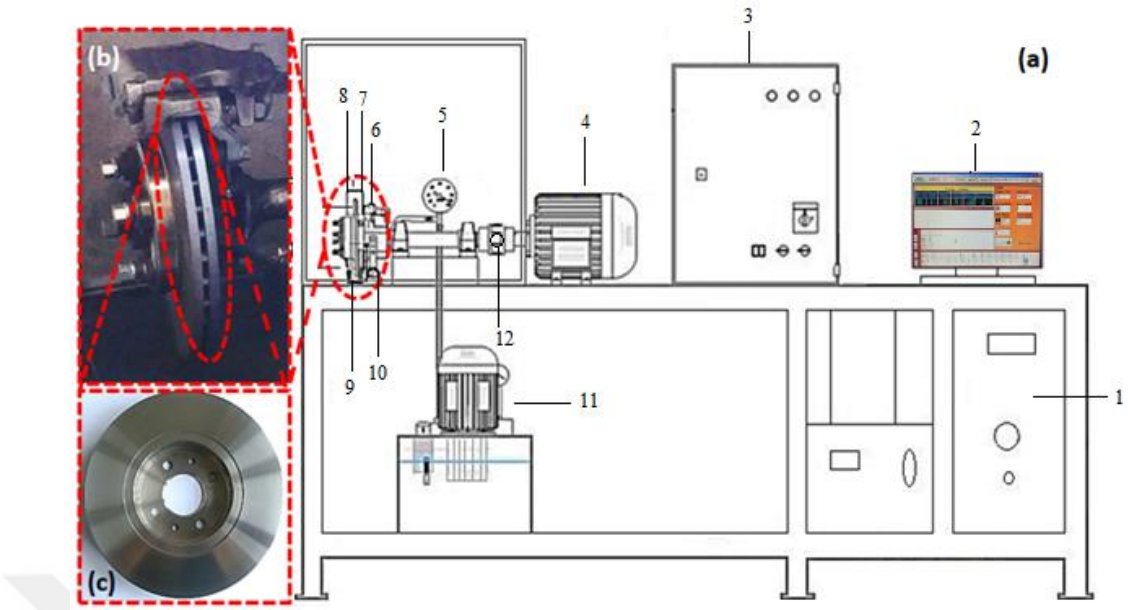
Çizelge 3.8. J2430 test prosedürü

Bölüm		Durma Sayısı	Frenleme / Bırakma Hızı (km/h)	Frenleme Başlangıç Sıc. (^{o}C)	Fren Uyg. Kontrolü (Bar)	Toplam Frenleme Sayısı
1	Cihaz Kontrol (50 km/h tork kontrol)	5	50-3	< 100	10	23
	Cihaz Kontrol (100 km/h tork kontrol)	5	100-3	100	10	
	Cihaz Kontrol (50km/h basınç kontrol)	3	50-3	100	7	
	Cihaz Kontrol (50 km/h)	5	50	100	14	
	Cihaz Kontrol (100 km/h)	5	100	100	16	
-	Cihaz Kontrol (80 km/h soğutma)	18	80	-	-	18
2	Alıştırma	200	80-3	100	8	200
3	İlk Etkinlik (50 km/h)	5	50	100	12	16
	İlk Etkinlik (100 km/h)	5	100	100	14	
	Soğuk Etkinlik (100 km/h)	6	100-3	100	16	
4	Fade	15	120-56	55	10-11…14	15
5	Sıcak Performans	2	100-3	-	10-18	2
6	Soğutma	4	50-3	-	13-12…10	4
7	Kararlılık	2	100	-	12-10	2
8	Yeniden Alıştırma	35	80-3	100	8	35
9	Final Etkinliği (50 km/h)	5	50	100	14	15
	Final Etkinliği (100 km/h)	5	100	100	16	
	Final Etkinliği (160 km/h)	5	160	100	18	

3.7. Fren Test Cihazı

Disk-balata ikilisinin fren performansı, temelde fren mesafesine veya fren verimliliğine göre belirlenir. Frenleme performansını değerlendirmek için yapılan testler; farklı yük, hız, sıcaklık ve fren basıncı altında dinamometre veya taşıt üzerinde yapılır. Dinamometre üzerinde yapılan yaygın testler; performans, dayanıklılık, kapasite ve gürültü testlerdir. Bu dinamometreler; tahrik ünitesi, atalet oluşturma ünitesi, frenleme ünitesi, otomasyon ünitesi, soğutucu sistem ve fren sistemi bileşenlerinden oluşur.

Oluşturulan sürtünme çiftinin frenleme performansını belirlemek amacıyla SAE-J2430 test prosedürü kullanılarak laboratuvar ölçekli tek diskli disk-balata tipi test cihazında sürtünme testleri yapılmıştır. Oluşturulan test cihazı, SAE-J2430 "Fren Etkinliği Değerlendirme Test Prosedürü" göre tek diskli bir dinamometreden istenen teknik özellikleri simule etmektedir. Test cihazının şematik konfigürasyonu Şekil 3.8'de görülmektedir. Test sırasında fren diski, 5.5 kW gücündeki AC motor tarafından ayarlanan hıza kadar döndürülür, daha sonra fren balataları pistonlar tarafından oluşturulan belirli bir basınç altında disk yüzeyine bastırılır ve disk-balata arasında oluşan sürtünme kuvveti ile frenleme gerçekleştirilmektedir. Test sırasında oluşan, fren basıncı, hız ve yavaşlama ivmesi değişiminin moment kolu ile yük hücresi üzerine aktarılmasıyla elde edilen verilerle program tarafından sürtünme katsayısı belirlenmektedir. Disk yüzeyinin sıcaklığı, temassız K tipi termokupl ile ölçülmüştür. Test süresince veri toplama sistemi ile edilen verilerle, sürtünme katsayısı, hız, basınç, tork ve sıcaklık grafikleri oluşturulmuştur. Her bir disk için dinamometre testleri aynı koşullarda üç kez tekrarlanmıştır Test sırasında, fren çiftine prosedür tarafından önerilen 80 km/h hızda soğutma havası da uygulanmıştır. Testlerde orijinal ekipman üreticisi olan gri dökme demir diskler, fren kaliperleri ve ticari fren balataları kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Fren test cihazı a) Şematik görünüşü, b) Fren bileşenleri, c) Fren diski; 1-Otomasyon Ünitesi, 2-Kontrol ekranı, 3-Pano, 4- Motor, 5-Manometre, 6-Balata, 7-Kaliper, 8-Disk, 9-Yük hücresi, 10-Termokupl, 11-Hidrolik ünite, 12-Devir sensörü

Deney düzeneği ile diskin farklı frenleme koşulları altındaki, hız ve frenleme basıncına karşılık gelen kuvvet, sıcaklık ve sürtünme katsayısı parametreleri belirlenerek performans grafikleri oluşturulmuştur.

3.8. Fren Diski ve Balataların Aşınma Ölçümü

Fren diski ve balatalarının aşınma miktarı, dinamometre testlerinden önce ve sonra ölçülerek kütle ve kalınlık farkı esasına göre belirlenmiştir. Her örnek için birkaç ölçüm tekrarlanarak ortalama değer belirlenmiştir.

3.8.1. Kütlesel Ölçüm

Fren diskleri ve balatalarının kütlesel aşınma miktarı, dinamometre testlerinden önce ve sonra 0.01 gr hassasiyete sahip tartı ile tartılarak kütlesel fark olarak belirlenmiştir. Disklerin tartılmasında 20 kg kapasiteli, balataların tartılmasında ise 200 gr kapasiteli tartım cihazları kullanılmıştır. Kütlesel ölçümlerde kullanılan elektronik teraziler Şekil 3.9'da görülmektedir.



Şekil 3.9. Kütlesel ölçümlerde kullanılan teraziler

3.8.2. Boyutsal Ölçüm

Fren diskleri ve balatalarının boyutsal (kalınlık) aşınma miktarı, dinamometre testlerinden önce ve sonra 0.001 mm hassasiyetine sahip dijital mikrometre ile ölçülerek kalınlık farkı olarak belirlenmiştir. Her bir fren diskinin kalınlık ölçümleri, disk yüzeyi eşit aralıklara bölünerek 10 farklı bölgesinden iç, orta ve dış noktalar olmak üzere toplam 30 ölçüm yapılarak belirlenmiştir. Fren balatalarının kalınlık değişimi balataların 5 farklı bölgesinden yapılan kalınlık ölçümü ile belirlenmiştir. Kalınlık ölçümlerinde kullanılan dijital mikrometre Şekil 3.10'da görülmektedir.

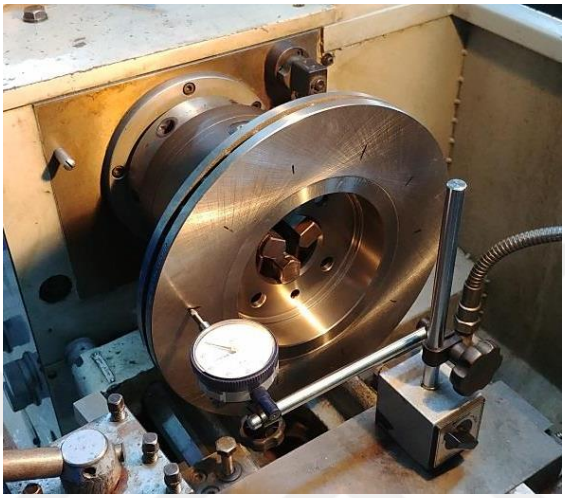


Şekil 3.10. Boyutsal ölçümlerde kullanılan mikrometre

3.9. Fren Disklerinin Salgı Ölçümü

Frenleme sırasında disk-balata ara yüzeyinde meydana gelen yüksek sıcaklık, hız ve fren basıncının oluşturduğu kuvvet ile disk üzerinde çarpılma sonucu salgı meydana gelebilmektedir. Salgı miktarının izin verilen sınırlar dışında olması diskin aşınmasına

ve bunun sonucunda disk kalınlık değişimine sebep olabilmektedir. OEM fren disk üreticileri diskin yanal salgı miktarının 0.05-0.10 mm sınırları aralığında olması gerektiğini bildirmişlerdir. Testlerde kullanılan disklerin salgı miktarları, frenleme testi öncesi ve sonrası diskin iç ve dış sürtünme yüzeyinden 0.01 mm hassasiyete sahip saatli komparatör ile Şekil 3.11'de görüldüğü gibi belirlenmiştir.



Şekil 3.11. Komparatör ile salgı tespiti

3.10. Fren Disklerinin Mikrosertlik Ölçümü

Testlerde kullanılan fren disklerinin mikrosertlik ölçümleri Şekil 3.12'de görülen Vickers Shimadzu-HMV marka sertlik ölçme cihazıyla yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri, 15 sn tutma süresinde 300 gr yük altında gerçekleştirilmiş ve her disk için yapılan 10 ölçüm sonunda ortalama sertlik değeri belirlenmiştir.



Şekil 3.12. Mikrosertlik ölçüm cihazı

3.11. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Testlerde kullanılan fren diski ve balatalarının yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 3.13'te görülen Teskon TR-220 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile belirlenmiştir. Pürüzlülük ölçümleri, sürtünme testleri öncesi ve sonrası fren disk ve balata yüzeylerinin kayma yönüne dik olacak şekilde farklı bölgelerinden yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri, disklerin sürtünme yüzeyleri eşit aralıklara bölünerek 6 farklı bölgesinden, balataların sürtünme yüzeylerinin ise 4 farklı bölgesinden ölçülerek belirlenmiştir.



Şekil 3.13. Yüzey pürüzlülük cihazı

3.12. Metalografik İncelemeler

Malzemelerin sahip olduğu mikro yapılar, sertlik, porozite, termal iletim vb. gibi mekanik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir.

3.12.1. Numune Hazırlama

Mikroyapı incelemelerindeki önemli husus incelenecek amaca uygun bölgeden numune alabilmektir. Alınan numune fiziksel ve kimyasal yönden ana malzemeyi temsil etmelidir. Fren disklerinin mikroyapı incelemelerine yönelik numune hazırlanmasında, disklerin kesme sırasında aşırı ısınması sonucu meydana gelebilecek mikroyapı bozulmalarını engellemek amacıyla kesme işlemleri su jetiyle gerçekleştirilmiştir. Kesilen numuneler Şekil 3.14'te görülen numune hazırlama cihazında 100, 200, 400, 800 ve 1000 numaralı su zımparaları inceden kabaya doğru zımparalanmış ve kadife üzerinde temizlenerek yüzeyleri parlatılmıştır.



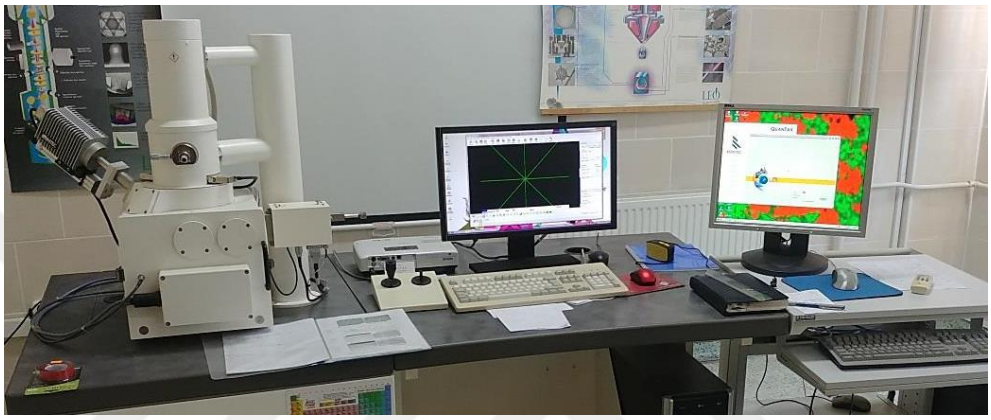
Şekil 3.14. Metalografik numune hazırlama cihazı

3.12.2. Mikroyapı İncelemesi

Hazırlanmış disk numunelerinin ara kesiti ve yüzeylerindeki farklı bölgelerinden yapılan elemental analiz, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve SEM e bağlı bir enerji dispersif (EDX) ile mikro analizleri yapılmıştır. Ayrıca disklerin üzerine yapılan kaplamaların ve kaplama tozlarının mikroyapıları X-ışınları kırınımı (XRD) ile karakterize edilmiştir.

3.12.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM/EDX)

Testlerde kullanılan disklerin mikroyapı incelemeleri Şekil 3.15'te görülen LEO-1430 VP marka taramalı elektron mikroskobunda (SEM) yapılmıştır. Değişken basınç prensibine sahip olan cihaz tungsten flament ile çalışmaktadır. Cihaz üzerinde ikincil elektron (secondary electron), geri saçınım elektron (backscattered electron) ve X ışınları (Energy Dispersive X-ray microanalysis-EDX) detektörü bulunmaktadır.



Şekil 3.15. Taramalı elektron mikroskobu (SEM/EDX)

3.12.2.2. X-Işınları Kırınım Cihazı (XRD)

Fren diskleri üzerine biriktirilen kaplamaların ve kaplama toz numunelerinin faz ve elemental analizleri Şekil 3.16'da görülen BRUKER D8 ADVANCE marka yüksek sıcaklık aparatlı X-ışınları kırınım (XRD) cihazı ile yapılmıştır. Cihaz 1500 °C'ye kadar çıkabilen fırını ile yüksek sıcaklık faz dönüşümlerinin tespitini yapabilmektedir. XRD sistemi ile; inorganik katı malzemelerin kalitatif ve yarı kantitatif faz (mineralojik) içeriği, altlık üzerine kaplanmış ince film kaplamalarının mineralojik içeriği ve kalınlığı tespit edilebilmektedir. Ayrıca sıfır arka plan (zero background) numune tutucusu ile 1 gr altındaki toz numunelere XRD analizi yapabilmektedir.



Şekil 3.16. X-ışınları kırınım cihazı (XRD)

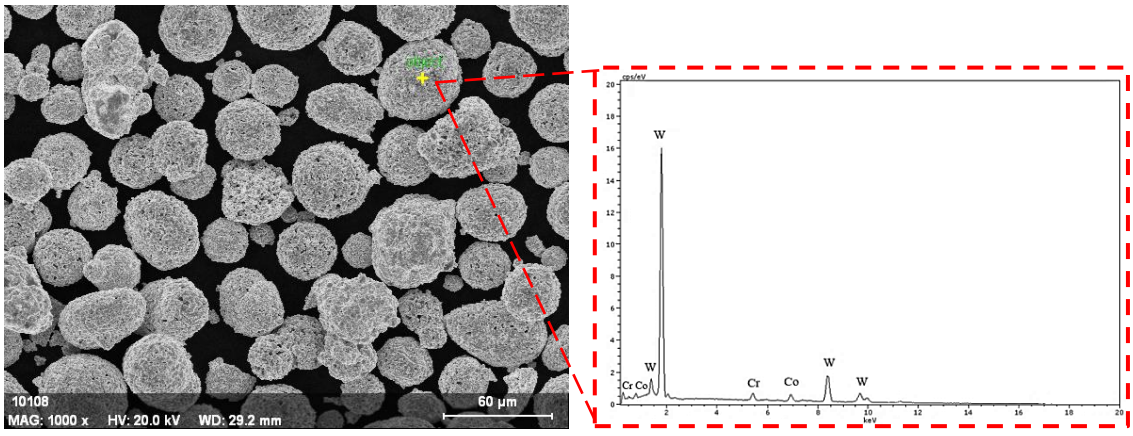
BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Kaplama Tozlarının Mikroyapı Özellikleri

4.1.1. WC-10Co4Cr Tozunun Mikroyapı İncelemesi

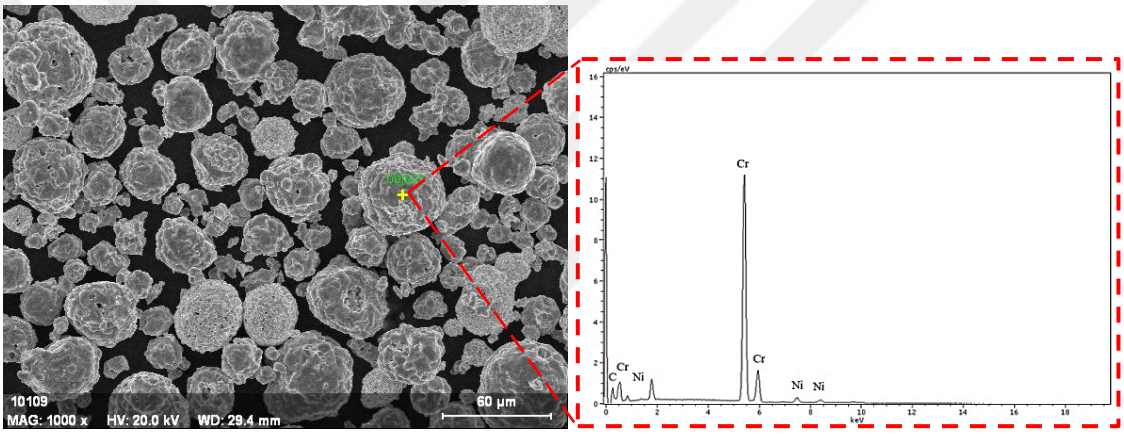
Kaplama işleminde kullanılan Co:8.5-11.5, Cr:3.4-4.6, C_{top}:4.8-5.6, Fe_{max}:0.2, W:denge. % kimyasal içeriğe sahip WC-10Co4Cr toz partiküllerinin SEM/EDX mikrografları Şekil 4.1'de görülmektedir. Bu sermet malzeme tozu, karbür parçacıkları ve bağlayıcı olarak kobalt-krom matrisi içeren termal püskürtme için küresel formda, topaklanma ve sinterleme ile üretilmiştir. SEM mikrografından, toz partikül boyutlarının 15-45 µm aralığında olduğu ve parçacıkların çoğunlukla küresel formda olduğu görülebilir.



Şekil 4.1. WC-10Co4Cr kaplama tozunun SEM/EDX mikrografları

4.1.2. Cr_3C_2-25NiCr Tozunun Mikroyapı İncelemesi

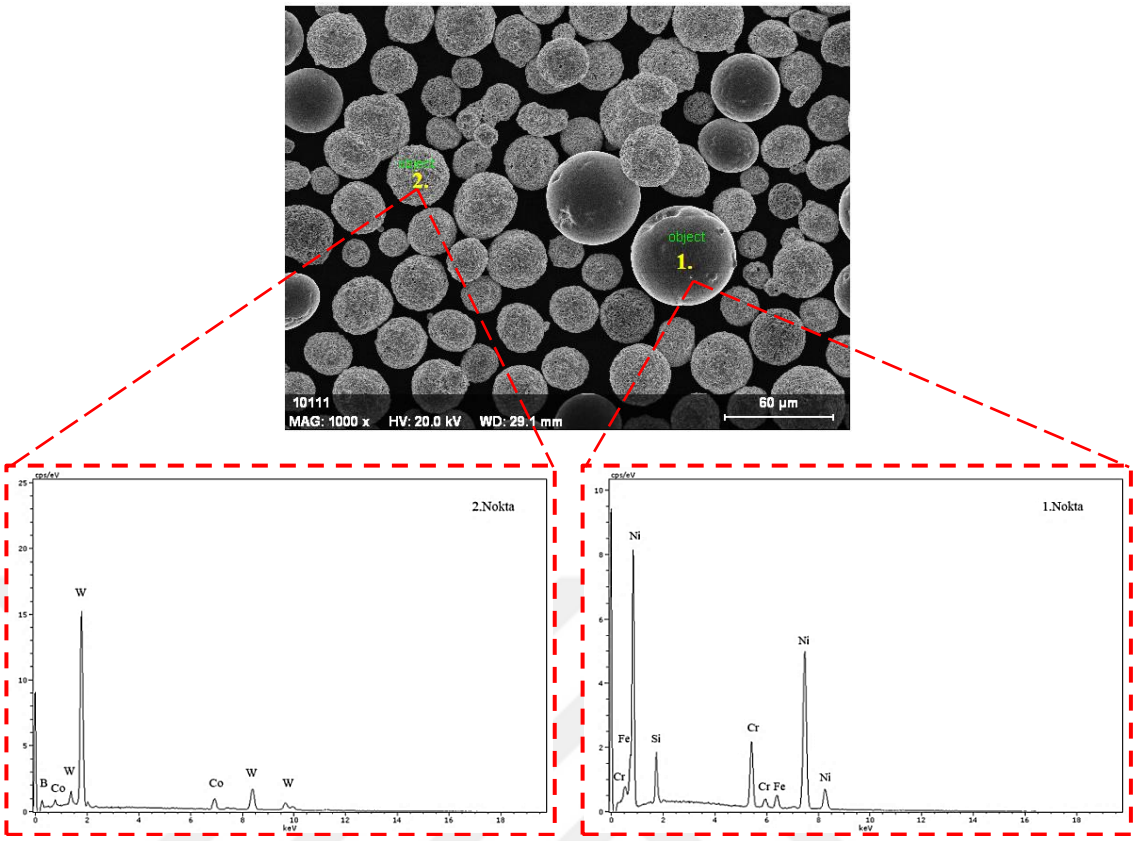
Kaplamanın oluşturulmasında ticari olarak temin edilen Ni:17.5-22.5, C:9-10.2, Fe:<0.5, Cr:denge. % kimyasal kompozisyona sahip Cr_3C_2-25NiCr toz partiküllerinin SEM/EDX mikrografları Şekil 4.2'de görülen sonuçlarla incelenmiştir. Hammadde tozu metal matris içinde oldukça düzensiz dağılmış olan krom karbür taneleri içerir. Cr_3C_2-25NiCr toz partikülleri belli bir gözeneklilik derecesinde neredeyse küresel bir şekle sahiptir. Bu durum topaklanma ve sinterleme işlemiyle elde edilen tipik yapısıdır. Görüntü yazılım programıyla yapılan analizler sonucunda toz partikül boyut dağılımının 8-45 µm arasında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Cr_3C_2-25NiCr kaplama tozunun SEM/EDX mikrografları

4.1.3. 20NiCrBSi-WC12Co Tozunun Mikroyapı İncelemesi

Kaplama sisteminin oluşturulmasında ticari olarak temin edilen, Cr:17, B:3.5, Si:4, C:1, Fe:4, Ni:denge., Co:<13.5, C:<5.8, Fe:<0,2, W:denge.; % içeriğe sahip olan 20NiCrBSi-WC12Co toz partikülünün SEM/EDX mikrografları Şekil 4.3'te görülmektedir. Bu malzemeler, kobalt veya nikel matrisinde tungsten karbürün sert bir fazı ile harmanlanarak kendiliğinden akan bir alaşımdan oluşur. Harmanlanarak üretilen kaplama tozunun SEM mikrografından, parçacıkların çoğunluğunun küresel formda ancak farklı morfolojilere sahip birkaç parçacık grubunun da olduğu tanımlanabilir. Küresel parçacıklar yoğun bir şekilde paketlenmiştir ve yapısında birkaç gözenek görülmektedir. Ayrıca görüntü yazılım programıyla yapılan analizler sonucunda toz partikül boyut dağılımının 12-45 µm arasında olduğu belirlenmiştir.

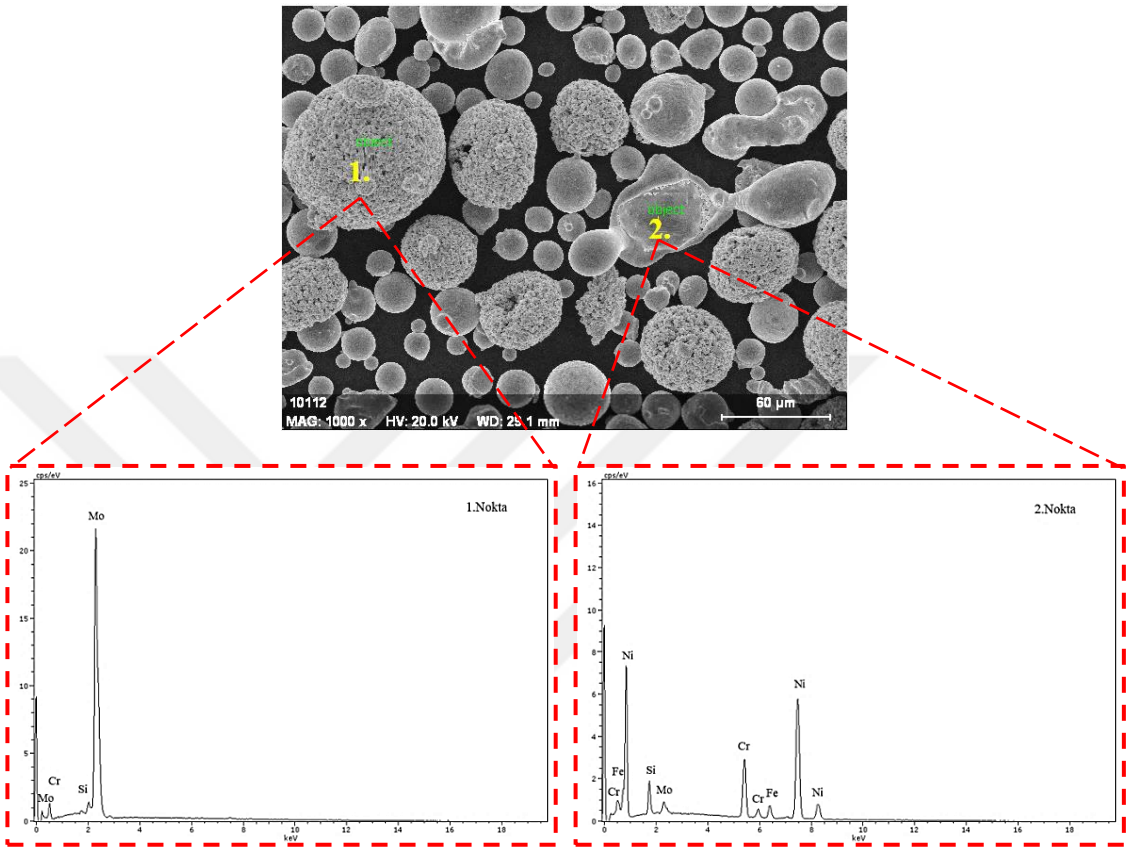


Şekil 4.3. 20NiCrBSi-WC12Co kaplama tozunun SEM/EDX mikrografları

4.1.4. Mo-NiCrBSi Tozunun Mikroyapı İncelemesi

İki bileşenli Ni:18, Cr:4.5, B:0.8, Si:2, Fe:1, Mo:denge. % içeriğe sahip Mo-NiCrBSi toz karışımı, topaklanmış ve sinterlenmiş Mo bileşeninden ve inert bir gaz ile atomize olmuş Ni-Cr-Fe kendiliğinden akıcı bileşenden oluşan toz partiküllerinin SEM/EDX mikrografları Şekil 4.4'te görülmektedir. SEM mikrografından, toz partikül boyutlarının 45-125 µm aralığında olduğu ve parçacıkların büyük çoğunluğunun düzgün küresel formda olduğu ancak karışık formlarında bulunduğu görülebilir. Düzensiz morfoloji birkaç parçacık için gözlemlenebilir başka bir morfolojidir; bunlar gözeneklidir ve ortak bir geometrik şekle sahip değildir. Bu parçacıklar genellikle diğer morfolojilerin parçacıklarından daha büyük olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklık alevi ile etkileşim sırasında farklı erime davranışları sergileyebilirler çünkü daha ince olanları kaba parçacıklar tarafından kaplanır ve daha az ısı alır. Ayrıca, yüksek gözeneklilik ve boşluk içeren morfolojilerde sınıflandırılan parçacıklar, püskürtme işlemi sırasında kaplamaların dekarburizasyon hızını veya gözeneklerin oluşumunu artırabilecek yüksek

sıcaklıklar yaşayabilir. Bu nedenle, parçacıklardaki gözenekleri ve boşlukları ortadan kaldırmak ve birbirlerine topaklanmayı önlemek için ek önlemler alınmalıdır (Asgari et al., 2017).



Şekil 4.4. Mo-NiCrBSi kaplama tozunun SEM/EDX mikrografları

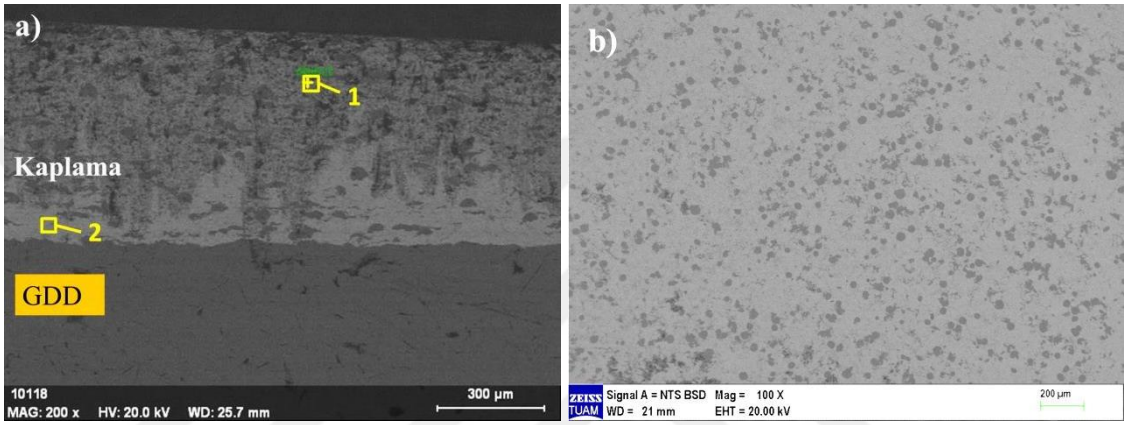
4.2. Fren Disklerinin Mikroyapı Özellikleri

Testlerde kullanılan fren disklerinin kesit ve yüzey topografyasını belirlemek için taramalı elektron mikroskobu ve buna bağlı bir enerji dispersif detektörü (SEM/EDX) ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca oluşturulan kaplamaların faz kompozisyonu X-ışınları kırınım (XRD) ölçümleriyle karakterize edilmiştir.

4.2.1. WC-10Co4Cr Kaplanmış Diskin Mikroyapı İncelemesi

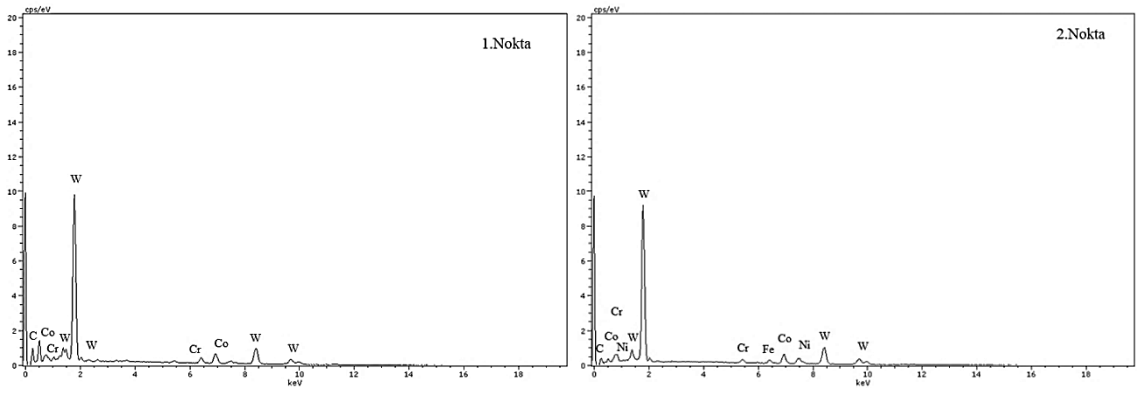
Biriktirilen WC-CoCr kaplamanın tipik enine kesit ve yüzey mikrografları Şekil 4.5'te görülmektedir. Yaklaşık 350 µm kalınlığında oluşturulan kaplamanın SEM ile yüksek büyütmedeki kesit görünümü, standart parametreler kullanılarak HVOF

yöntemiyle üretilen bu tür kaplamalar için oldukça tipik olduğunu göstermektedir (Federici et al., 2016). Mikroyapı, HVOF kaplamanın tipik lamel yapısıyla sahip olduğu düşük gözeneklilik ve yoğun yapısıyla alt tabakaya iyi bağlandığını ortaya koymaktadır. WC tanelerinin Co ve Cr bağlayıcı fazına gömülü olduğu karbürler, daha koyu olan metal matriste dağılmış ve siyah alanlar ise boşluklar veya gözeneklerdir. WC partiküllerinin sertliği ve CoCr bağlayıcının karbürlere yüksek yapışma gücüyle kaplamanın abrasif aşınma direnci yükselir.



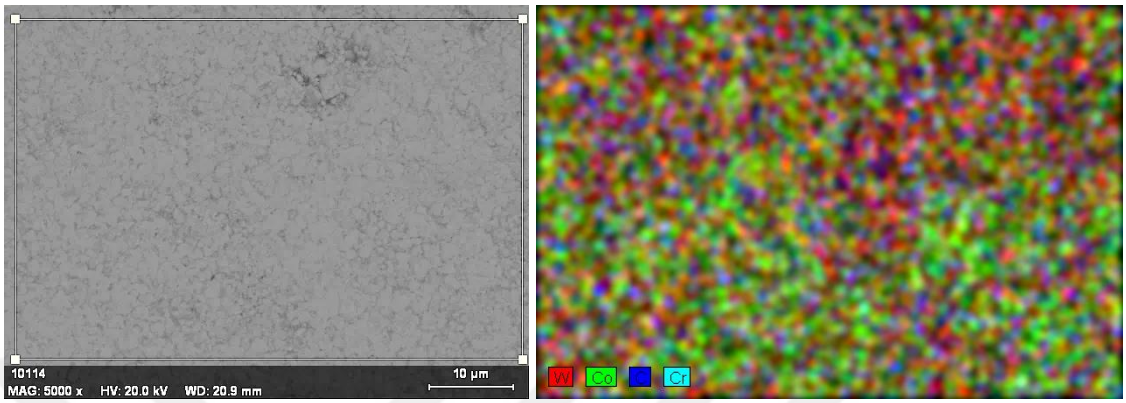
Şekil 4.5. WC-10Co4Cr kaplanmış diskin SEM mikrografları a) kesit, b) yüzey

Kaplama kesitinin numaralandırılmış bölgelerinden yapılan EDX analizleri Şekil 4.6'da görülmektedir. Kaplama matrisini temsil eden 1 numaralı bölgede, ağırlıklı olarak CoCr matrisi içinde çökelmiş W parçacıklarının varlığı görülebilir. 2 numaralı altlığa yakın bölgedeki Fe, Ni ve C varlığı, difüzyon için yeterli ısı ve süreyle dökme demir altlık malzemeden kaplamaya difüzyon ile yayılmasıyla açıklanabilir.



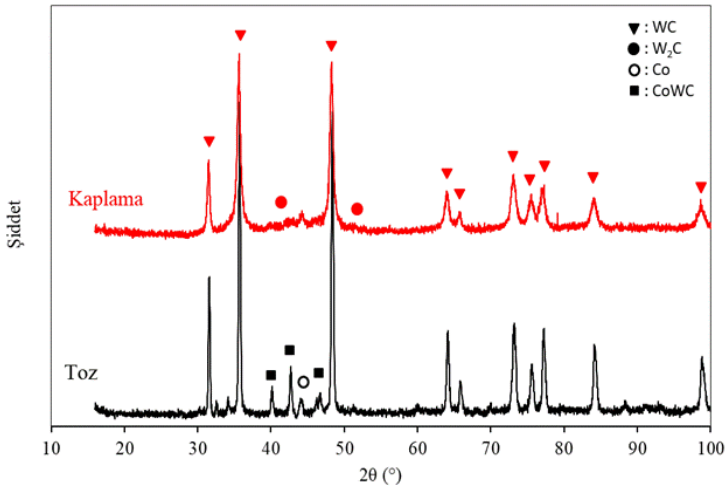
Şekil 4.6. WC-10Co4Cr kaplamanın ara kesitinin EDX analizi

Oluşturulan sermet kaplamanın SEM görüntüsüne karşılık gelen elementel dağılım haritası Şekil 4.7'de görülmektedir. W, Co ve Cr 'nin mikroyapı içindeki dağılımları nispeten homojendir.



Şekil 4.7. WC-10Co4Cr kaplama yüzeyinin SEM ve elementel dağılım haritası

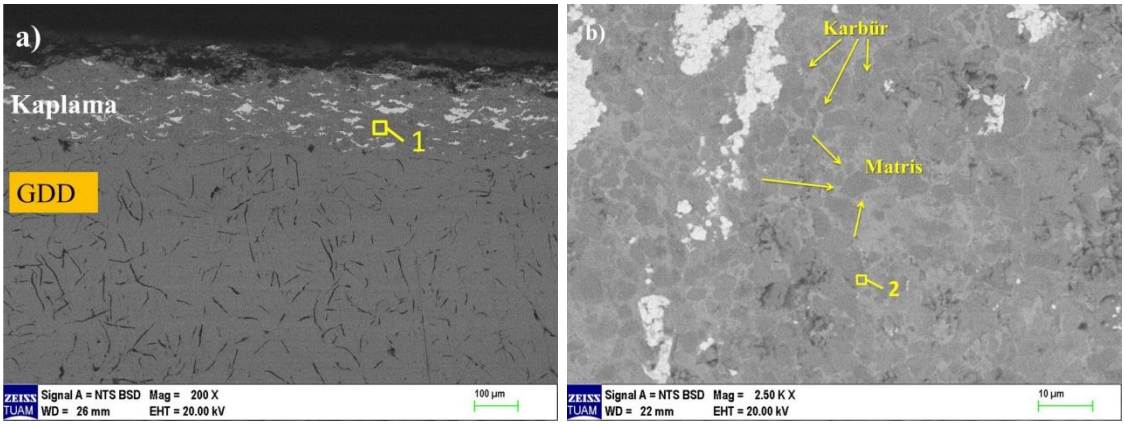
Kaplamanın ve hammadde tozunun XRD analizleri ise Şekil 4.8'de görülmektedir. XRD analizi, WC 'den oluşan ana faz ve WC 'nin dekarbürizasyonunun bir sonucu olarak düşük miktarda oluşan W_2C'nin varlığını gösterir (Yuan et al., 2013). Hammadde tozu içerisinde hiçbir W_2C fazı tespit edilmedi ve bu durum birincil karbürlerin püskürtme sırasında W_2C'ye dönüştüğünü gösterir. Biriktirme işlemi sırasında dekarbürizasyonun sınırlı olduğu sonucuna varılmıştır. WC faz yoğunluklarının oldukça yüksek seviyede olduğu görülmüştür, bu durum karbürlerin difüzyon reaksiyonuna atfedilir (Hong et al., 2017). Kaplama içerisinde çözünmenin iyi olması sonucu Co piki görülmemiştir. Co, WC fazlarına kıyasla daha yumuşak bir faza sahiptir ve plastik deformasyona eğilimlidir. Kaplama matrisinde, tungsten karbür taneleri metalik faz yani kobalt ile kaplamada tutulur. Bu metalik fazın kaplamadan çıkarılmasıyla karbür taneleri de yapıdan ayrılır. Bununla birlikte kaplama içerisinde hiçbir oksit fazı saptanmamıştır.



Şekil 4.8. WC-10Co4Cr kaplamanın ve başlangıç tozunun XRD analizi

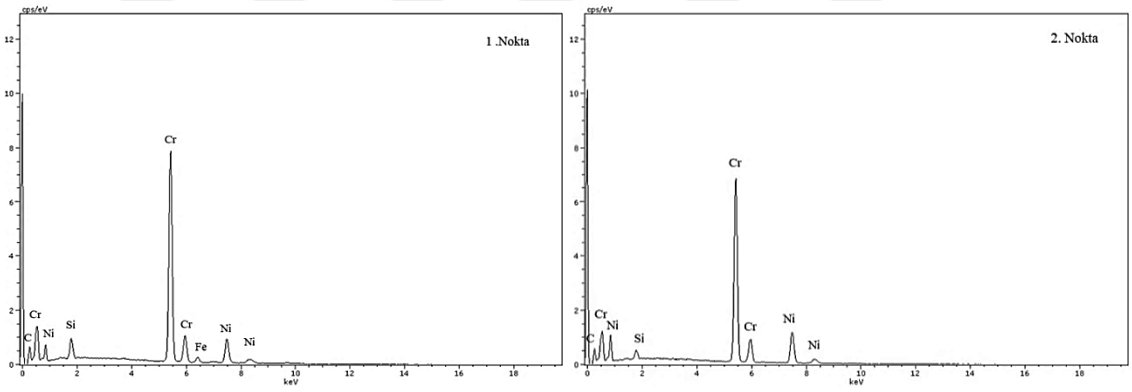
4.2.2. Cr_3C_2-25NiCr Kaplanmış Diskin Mikroyapı İncelemesi

Biriktirilen Cr_3C_2-25NiCr kaplamanın enine kesit ve yüzey mikrografları Şekil 4.9'da görülmektedir. Ortalama 200 µm kalınlığında biriktirilen kaplama mikrografları, kaplamanın düşük gözenekli katmanlı bir yapıya ve altlık ile hatasız ara yüzeye sahip olduğunu göstermiştir. Yüzeyde görülen gözenek ve kılcal çatlakların varlığı, sert karbür tanelerinin kırılgan ve tok olmayan yapısından kaynaklanmaktadır. Yüzey mikrografı, kaplamanın metal matrisle çevrili koyu karbür parçacıklarından oluşan yapılarını temsil eder. Karbür parçacıkları (Cr_3C_2) matris fazı ile çevrilidir. Bu durum, altlık üzerinde yüksek hızlı erimiş veya yarı erimiş parçacıkların birikmesi nedeniyle HVOF püskürtme ile oluşturulan karbür esaslı kaplamaların tipik yapısıdır (Lee et al., 2010; Zhou et al., 2017). SEM mikrografları, matriste yoğun karbür çözünmesinin karbür konsantrasyonunu azalttığını ve matris bileşimindeki belirgin değişimin göstergesi olan yaygın gri tonlamalı bir varyasyon ürettiğini göstermiştir. Bu gri alanlar NiCr bakımından zengin, parlak alanlar karbür açısından zengindir. Bu nedenle kaplama tozunun yapısı çoğunlukla kaplamada tutulabilir. Ayrıca, Ni matrisinin iyi ıslatma kabiliyeti ve güçlü difüzyonu sayesinden dökme demir ile kaplama arasında iyi bir fiziksel bağın oluştuğu gözlenmektedir.



Şekil 4.9. Cr_3C_2-25NiCr kaplanmış diskin SEM mikrografları a) kesit, b) yüzey

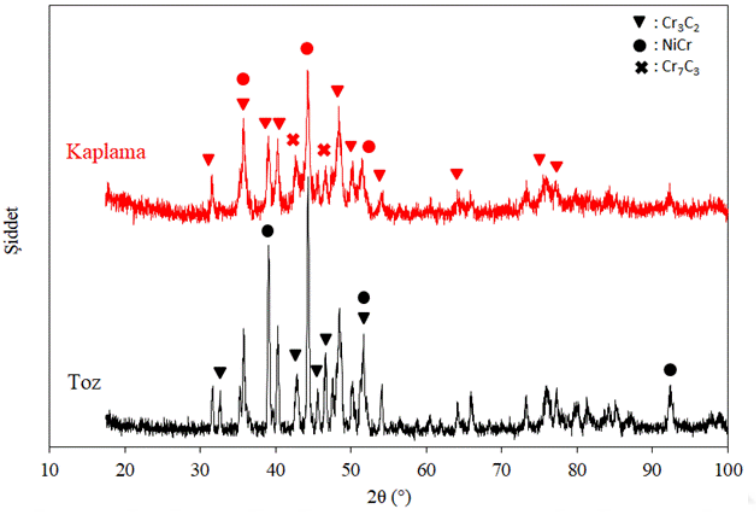
Kaplama mikrograflarının numaralandırılmış bölgelerinden yapılan EDX analizleri Şekil 4.10'da görülmektedir. 1 numaralı bölge, sermet kaplama olarak adlandırılan kaplama ile karakterize edilmiş ve Cr bakımından zengin mikroyapıya sahiptir. Kaplama tabakası içindeki Fe ve C varlığı, altlık malzemeden difüzyon ile kaplamaya yayıldığını gösterir. 2 numaralı bölge Ni ve Cr içeren matris fazını temsil etmektedir.



Şekil 4.10. Cr_3C_2-25NiCr kaplamanın EDX analizi

Kaplama ve hammadde tozunun XRD analizleri Şekil 4.11'de görülmektedir. Sert Cr_3C_2 ve NiCr matris fazları, oluşturulan kaplamada X ışını analizi ile saptanmıştır. Görülebilen kristal fazlar Cr_3C_2, NiCr ve az miktarda Cr_7C_3 oluşmuş olsa da konsantrasyonu diğer XRD piklerinden ayırt edilmektedir. Kaplamada saptanan fazlar tozun fazlarına benzerdir. HVOF sprey yönteminin yüksek işleme sıcaklığının, önemli ölçüde karbür çözünmesi ile sonuçlandığı anlaşılmaktadır. Mikroyapı ve XRD grafiğinde görüldüğü gibi kaplama, matris karbon içeriğinde artışı sağlayan Cr_3C_2 ve

Cr_7C_3 fazlarını içermektedir (Matthews, 2014). Ayrıca, püskürtme sırasında meydana gelen dekarbürizasyon reaksiyonu ile oluşan Cr_7C_3 karbürlerinin varlığını doğrular (Matthews & Berger, 2016). Oksit kompozitler, karbür fazları ve düşük miktardaki gözeneklilik varlığı önceki çalışmalara benzer şekilde incelenmiştir (Bolelli et al., 2016; Matikainen et al., 2017). Hakim karbür fazın Cr_3C_2, metal matris fazın ise NiCr olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar önceki çalışma bulgularıyla tutarlıdır (Hong et al., 2013; Matthews et al., 2003).

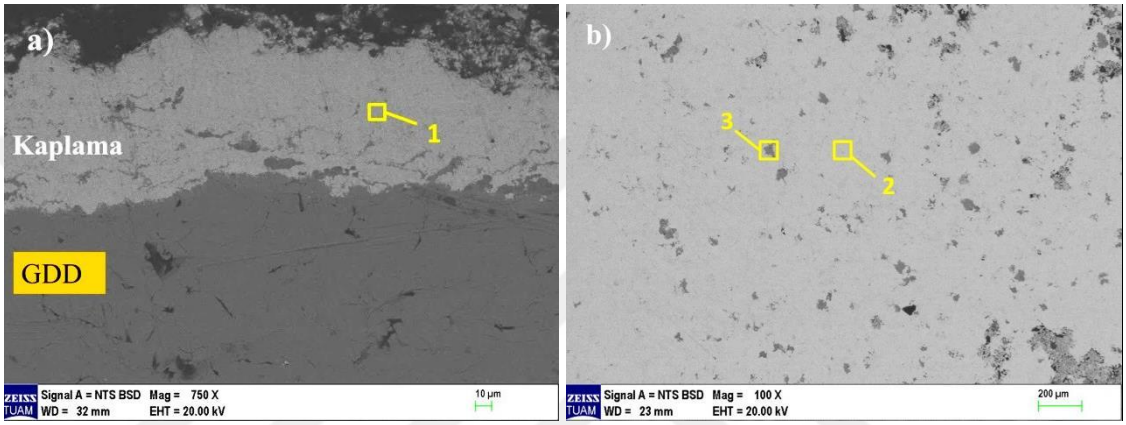


Şekil 4.11. Cr_3C_2-25NiCr kaplamanın ve başlangıç tozunun XRD analizi

4.2.3. 20NiCrBSi-WC12Co Kaplanmış Diskin Mikroyapı İncelemesi

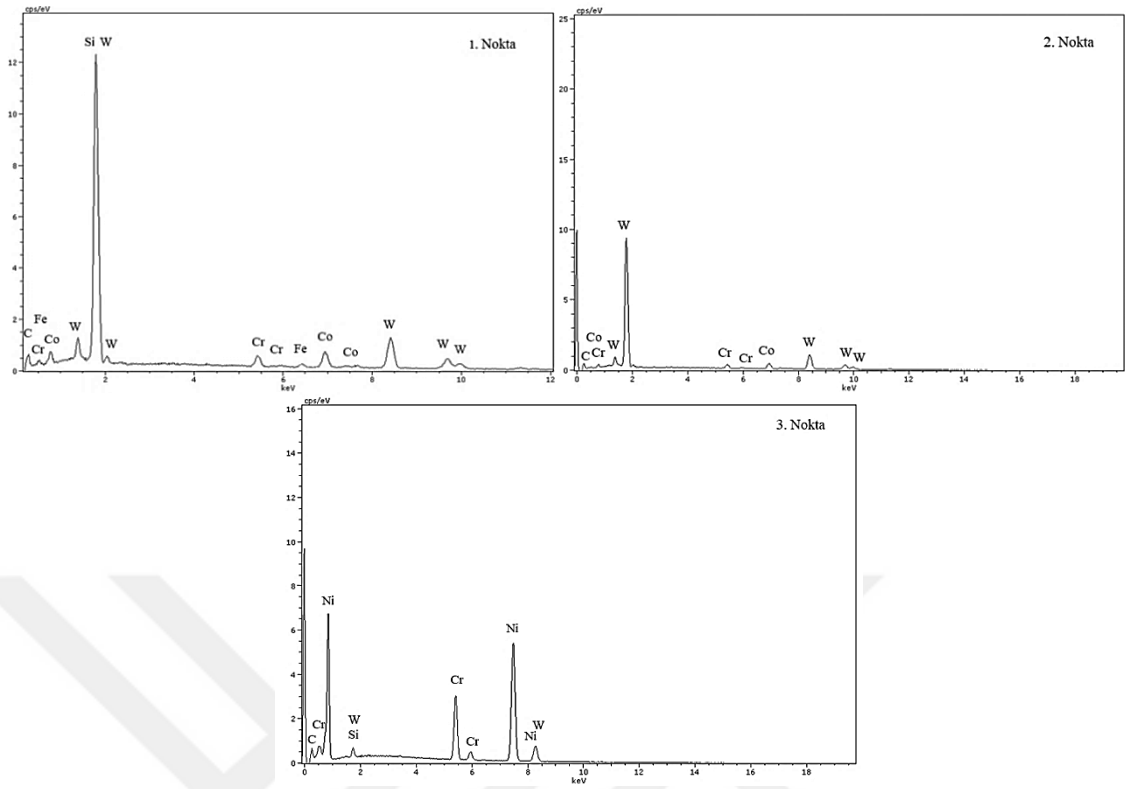
Oluşturulan termal püskürtme kaplamanın enine kesitinin tipik SEM mikrografları Şekil 4.12'de görülmektedir. Yüksek büyütme oranına sahip kesitsel mikrograf, yoğun kaplama tabakası ile altlık arasında iyi bağlanma göstermiştir. Bazı sınırlı gözenekler koyu kontrast noktaları olarak görülebilir ancak genel olarak kaplamanın kompakt bir yapısı görülmektedir. WCCo partikülleri, NiCrBSi matrisinde nispeten homojen bir şekilde dağılmıştır. Kesit mikrografından, kaplama tabakası üzerindeki NiCrBSi parçacıklarının püskürtme zamanında tamamen eridiği söylenebilir. Ni elementinin çökelmesiyle, kaplama ile alt tabaka arasında iyi bir metalurjik bağ oluşmuştur. NiCrBSi parçacıklarının tamamen erimesi kaplamanın homojenliğine katkıda bulunmuştur. Ayrıca mikroyapı görüntülerinden, kaplama tabakasının laminer bir yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu durum, erimiş veya yarı erimiş kaplama tozlarının

yeniden katılaşmasından kaynaklanmıştır. Kaplama yapısında veya kaplama-altlık ara yüzünde görülen bazı karanlık alanlar inklüzyonlar olabilir. Yarı erimiş kaplama malzemelerinin altlık üzerindeki yüksek hız etkisi, ciddi plastik deformasyona ve hızlı katılaşmaya eşlik eder. Bu nedenle termal sprey katmanların gözeneklere ve mikro çatlaklara sahip olması muhtemeldir (Liu et al., 2010). Mükemmel süneklik ve tokluğa sahip olan Ni matrisi karbür parçacıklarının ayrılmasını önlemede baskın bir rol oynar ve kaplamanın aşınma direncini arttırmadaki temel faktörlerdendir (Guo et al., 2011).



Şekil 4.12. 20NiCrBSi-WC12Co kaplanmış diskin SEM mikrografları a) kesit, b) yüzey

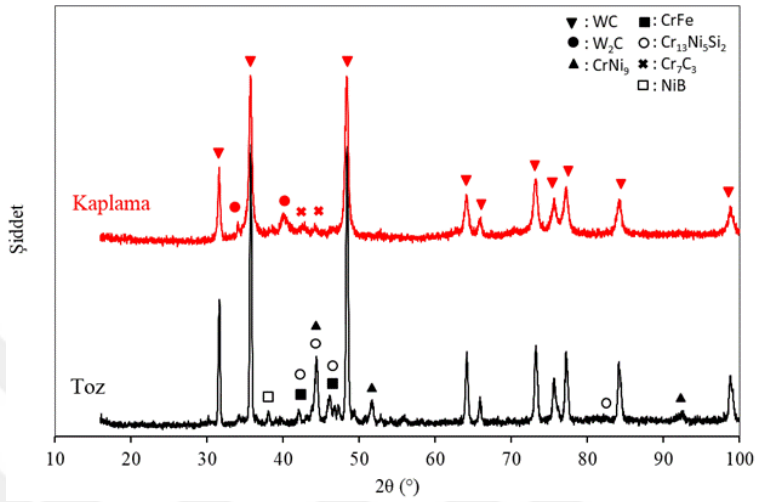
Kaplama üzerindeki numaralandırılan bölgelerin EDX analizleri Şekil 4.13'te görülmektedir. 1 numaralı bölge, W bakımından zengin ve ağırlıklı olarak Co, Cr içeren mikroyapı göstermiştir. Kaplama tabakası içindeki Fe ve C elementlerinin varlığı, altlık malzemeden difüzyon ile kaplamaya yayıldığını gösterir. Kaplama yüzeyinden yapılan analizlerde, 2 numaralı bölgedeki açık gri alanlar daha yüksek miktarda W ve Co gösterir. 3 numaralı bölgedeki koyu gri alanlar az miktarda Cr, C, B, Fe, Co, Si, W ve yüksek miktarda Ni içerir. Analizin sonuçları WC tanelerinin kısmen çözüldüğünü göstermiştir.



Şekil 4.13. 20NiCrBSi-WC12Co kaplamanın EDX analizi

Kaplama ve hammadde tozunun XRD analizleri Şekil 4.14'te görülmektedir. Kaplamadaki ana fazın WC olduğu görülmüştür. WC fazının pik yoğunluğu, WC12Co tozunun kütle miktarına atfedilebilir. Ayrıca, B ve Si 'nin akışkanlığı arttırarak karbür oluşumuna katkıda bulunduğu söylenebilir. Çünkü füzyon sıcaklığını düşürerek kaplama tozunun viskozitesini arttırdığı belirtilmiştir (Carrasquero et al., 2008). Kaplamanın spektrumu, W_2C ve Cr_7C_3 gibi karbür fazlarının varlığını göstermektedir. Hammadde tozu içerisinde W_2C'ye rastlanmamıştır. Dolayısıyla püskürtme sırasında birincil karbürler W_2C dönüşmüştür. W_2C'nin varlığı genellikle HVOF sprey sırasında meydana gelen sınırlı bir dekarburizasyona atfedilebilir (Zhang et al., 2015). Bu oluşum, biriktirme koşullarına, oksitleyici atmosfere, yüksek soğutma oranlarına ve özellikle yüksek sıcaklığa bağlıdır. HVOF tekniğinde, sıcaklık ve püskürtme parametrelerinin bir fonksiyonu olarak oluşan W_2C sınırlı kalmıştır. Bu durum WC'nin matris içinde çözünme eğiliminin yüksek olması ile ilişkilendirilebilir. Kaplama içinde Cr_7C_3 gibi sert karbürün oluşması, kaplama tozunun yeterli miktarda Cr ve C içermesine atfedilebilir. Cr_7C_3 (hexagonal) kararlı bir karbürdür ve kaplamanın aşınma direncini arttırmada etkilidir. Kaplamada Ni-B bazlı bileşiklerin oluşmamasının veya çok az

miktarda oluşmamasının nedeni, Cr miktarının %8 'i aşması ve B'nin Cr ile bileşik oluşturmaya yatkın olmasıdır. Yüksek mikrosertlik, kaplama içerisindeki WC, W_2C, Cr_3C_7 sert fazların dağılımı ile ilişkilidir. Analiz sonuçları, WC fazının kaplama içerisinde dağıldığını göstermektedir.

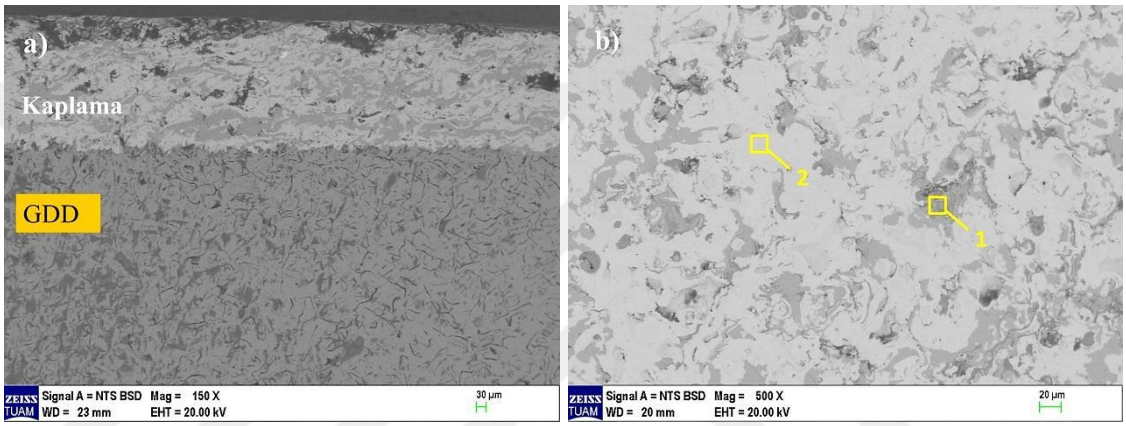


Şekil 4.14. 20NiCrBSi-WC12Co kaplamanın ve başlangıç tozunun XRD analizi

4.2.4. Mo-NiCrBSi Kaplanmış Diskin Mikroyapı İncelemesi

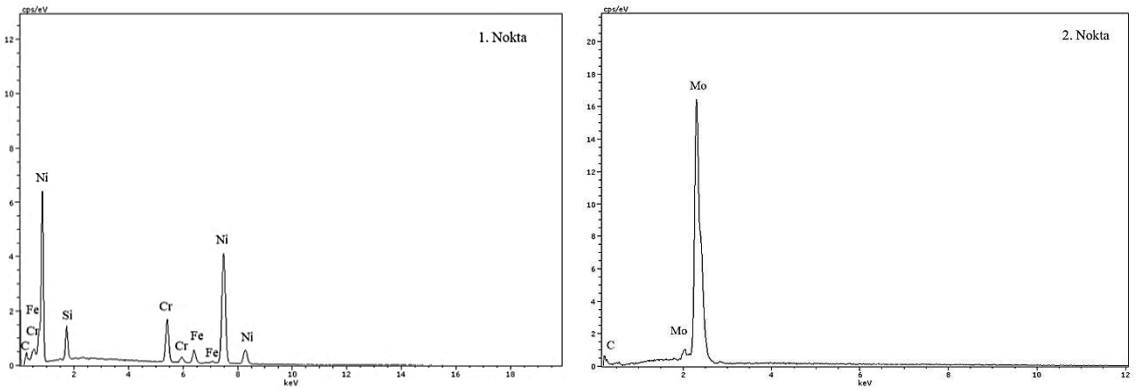
Plazma püskürtme sistemiyle oluşturulan kaplamanın kesit ve yüzeyinin SEM mikrografları Şekil 4.15'te görülmektedir. Kaplama ortalama 250 µm kalınlığındadır. Kaplama, püskürtülmüş toz partiküllerinin katmanlı bir yapı oluşturmak için altlık yüzeye çarptığında deforme olmasıyla oluşturulan plazmaya püskürtme kaplamaların tipik tabakalı yapısını gösterir (Niranatlumpong & Koiprasert, 2010). Mo'nun (açık gri), NiCrBSi (koyu gri) matrisinde homojen bir şekilde dağılarak kompozit tozların eridiğini ve iyi yayıldığını gösterir. Kaplamada görülen bazı siyah boşluklar, gözeneklere ve metalografik parlatma sırasında oksit parçacıklarının soyulmasına atfedilebilir. Mo çok yüksek bir erime noktasına sahiptir. Ancak plazma jetindeki Mo, başlangıç tozunun büyük boyutları sonucunda düşük bir erime sıcaklığıyla eriyik duruma dönüşmüştür. Bu nedenle Mo, düşük bir deformasyon sıcaklığına maruz kalarak alt tabaka üzerinde katılaşması sonucu yüksek gözeneklilik oluşturur. Mo düşük deformasyonu ile yüksek gözeneklilik gösterir. Mo, kendi kendine bağlanma özelliğiyle kendisi de dahil olmak üzere birçok metal ve alaşım ile kimyasal bağlar oluşturabilir. Bu nedenle Mo, demir

esaslı altlık ile güçlü bir şekilde bağlanabilir ve yüksek bir yapışma mukavemeti sağlar. Mikrograflarda da görüldüğü gibi kaplamada ve kaplama/altlık ara yüzeyinde büyük gözenekler oluşur, bu da yapışma mukavemetinin zayıflamasına sebep olur. Erime sıcaklığı yaklaşık 1025 °C olan NiCrBSi ise plazma jetinde kolayca eriyebilir. NiCrBSi matris malzemenin kendiliğinden akan bir alaşım olduğundan, Mo malzemeyle birlikte iyi bütünlüğe sahip bir yapı oluşturmuştur. Ayrıca, NiCrBSi'nin varlığı, Mo tarafından bırakılan boşlukları doldurarak gözenekliliğin azaltılmasına yardımcı olur (Niranatlumpong & Koiprasert, 2010).



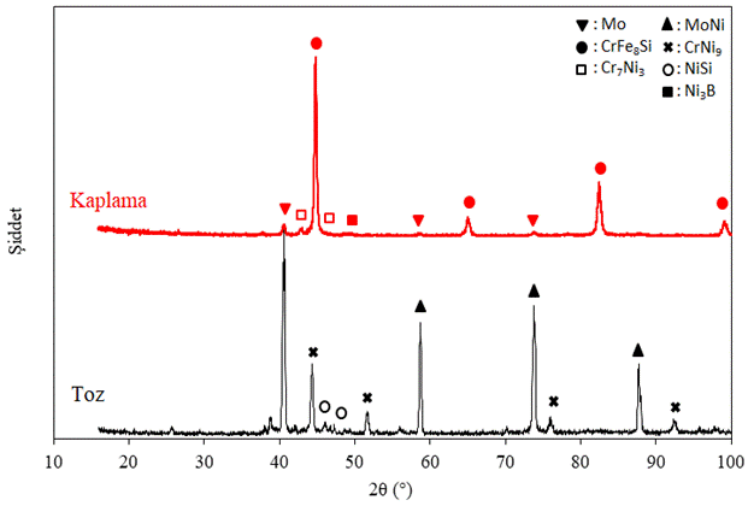
Şekil 4.15. Mo-NiCrBSi kaplanmış diskin SEM mikrografları a) kesit, b) yüzey

Kaplamanın numaralandırılan bölgelerindeki EDX analizleri Şekil ise 4.16'da görülmektedir. Açık renkli fazlar Mo ve koyu renkli fazlar ise NiCrBSi'dir. 1 numaralı koyu renkli bölgeler, ağırlıklı olarak Ni-Cr içeren matris yapısını temsil eder. 2 numaralı açık renkli bölgeler ise Mo 'nun hakim olduğu mikro yapıyı göstermektedir.



Şekil 4.16. Mo-NiCrBSi kaplamanın EDX analizi

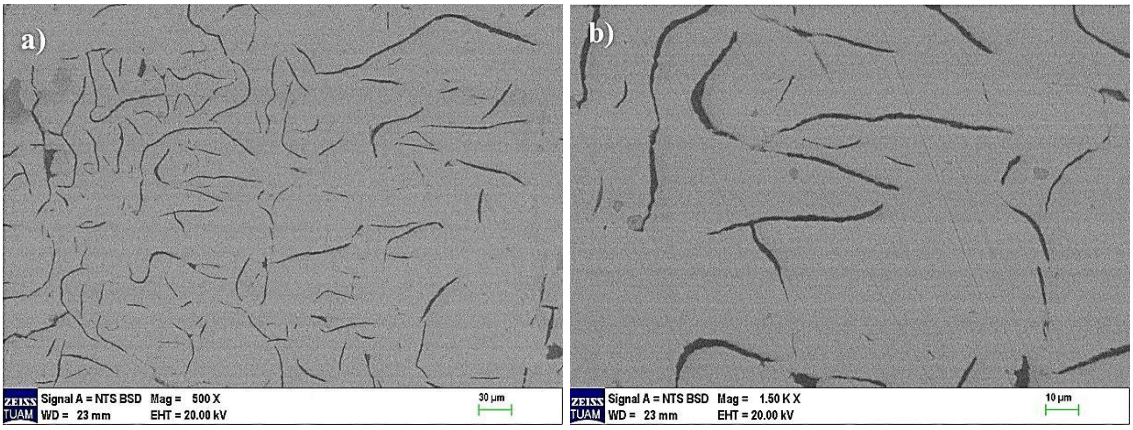
Kaplama ve hammadde tozunun XRD analizleri Şekil 4.17'de görülmektedir. Yüksek sıcaklık prosesi sırasında bazı oksitlerin oluşması beklenirken, mikrograflardan oksit içeriğinin çok düşük olduğu görülmektedir. Kaplamanın ana piklerinin Mo ve CrFeSi olduğu gözlemlenebilir. Ayrıca Ni_3B, $CrNi_9$ ve Cr_7Ni_3 gibi sert fazları da tanımlanmıştır. Sert fazların kaplamanın sertliği üzerinde olumlu bir rolü olmuştur.



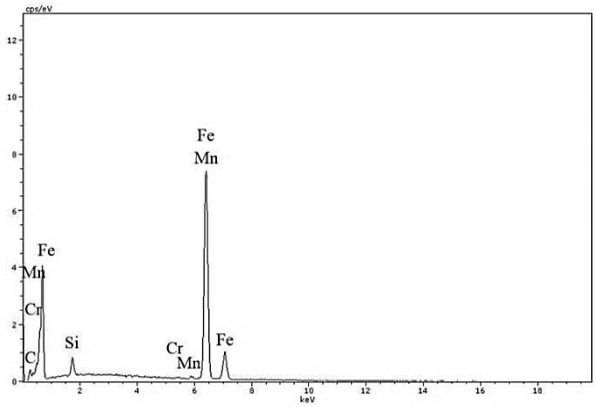
Şekil 4.17. Mo-NiCrBSi kaplamanın ve başlangıç tozunun XRD analizi

4.2.5. Orijinal Diskin Mikroyapı İncelemesi

Orijinal dökme demir diskin, perlitik matrise serbest ferrit içeren grafit yapılarının tipik mikrografları Şekil 4.18'de, EDX analizi ise Şekil 4.19'da görülmektedir.

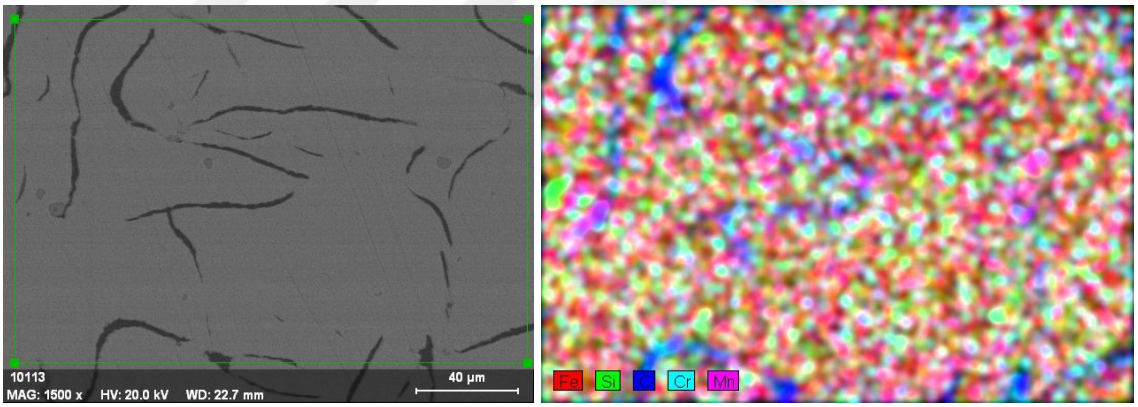


Şekil 4.18. Orijinal diskin SEM mikrografları a) kesit, b) yüzey



Şekil 4.19. Orjinal diskin ara kesitinin EDX analizi

Şekil 4.20'de ise dökme demir malzemenin SEM mikrografından oluşturulan elementel dağılım haritası görülmektedir. Dökme demir diskin C:3.40, Si:1.88, Mn:0.54, P:0.18, Cr:0.12, S:0.10 ve Fe:denge % kütlesel kimyasal kompozisyona sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.20. Dökme demir yüzeyinin SEM ve elementel dağılım haritası

4.3. Fren Disklerinin Frenleme Performans Testleri

Disklerin frenleme performansını belirlemek amacıyla yapılan sürtünme testleri SAE-J2430 "Fren Sürtünme Malzemeleri/Fren Etkinliği Değerlendirme Prosedürü" takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan karakteristik grafikler, J2430 prosedürünün cihaz kontrolü ile başlayan ve final etkinliği ile son bulan test sürecinin her bir bölümünü göstermektedir (Yun et al., 2010). Grafikler, test prosedürünün farklı bölümlerindeki frenleme durumlarına

karşılık gelen sürtünme katsayısı, sıcaklık, hız, fren basıncı ve kuvvet parametrelerinin ortalama değerleri ile oluşturulmuştur. J2430'a göre frenleme performansı değerlendirilirken benzer fren mesafesi için ilk etkinlik, fade (termal solma), sıcak performans, kararlılık dizileri ve final etkinliği bölümleri dikkate alınmaktadır (Roubicek et al., 2008). Her bir frenleme sürtünme testi, toplam 312 frenleme çevriminde ve 12 saat süresince yapısal bütünlük bozulmadan tamamlanmıştır. Dinamometre testleri her disk için aynı koşullarda tekrarlanarak ortalama değerleri alınmıştır.

4.3.1. WC-10Co4Cr Kaplanmış Diskin Frenleme Testi

WC-10Co4Cr tozu ile kaplanmış CD1 kodlu fren diskine ait frenleme test sonuçlarına göre oluşturulan performans grafikleri Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Cihaz kontrol bölümünde, sırasıyla 50-100 km/h hızlarda ve 10 bar frenleme basıncı altında yapılan 10 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.62 'den 0.64 'e yükselmiştir. İkinci kısmında 50 km/h ve 7 bar basınçta yapılan 3 frenleme çevriminde basıncın düşmesiyle sürtünme katsayısı 0.7 seviyelerine yükselme eğiliminde olmuştur. Ancak son kısımda hızın 50 km/h'den 100 km/h artması, frenleme basıncının da 14 bar'dan 16 bar'a yükseltilmesi sonucu temas ara yüzey sıcaklığı maksimum seviyelerine ulaşmış ve sürtünme katsayısı 0.6 'dan 0.5 seviyelerine düşerek dengelenmiştir. Bu bölümde yapılan 23 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 43 ^{o}C'den 125 ^{o}C'ye yükselmiştir.

Alıştırma bölümünde, 80 km/h hız ve 8 bar sabit frenleme basıncı altında yapılan 200 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.68 seviyelerinde dengelenmiştir. Disk-balata arasında istikrarlı bir sürtünme yüzeyi oluşturmak için yapılan bu bölümde sürtünme katsayısında dalgalanmalar görülmüştür. Bu durum sürtünme çiftinin temas yüzeyindeki pürüzlerin birleşmesi, büyümesi ve ayrılması ile açıklanır. Sürekli olarak bir yapışma ve bırakma halinin tekrarlanmasıyla sürtünme katsayısında dalgalanmaya sebep olur (Mutlu et al., 2007). 200 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından max 128 ^{o}C seviyesine ulaşmıştır.

İlk etkinlik bölümünün giriş kısmında 50 km/h hız ve 12 bar frenleme basıncında yapılan 5 frenleme çevriminde sürtünme katsayısı 0.64 seviyelerinde yükselme

eğilimindedir. Ancak ikinci kısımda hızın 50 km/h'den 100 km/h hıza artması ve frenleme basıncının da kademeli olarak 12 bar'dan sırasıyla 14 ve 16 bar basınca yükseltilmesiyle yapılan 11 frenleme ile temas sıcaklığı artmış ve sürtünme katsayısı aşamalı olarak 0.53 ve 0.42 seviyelerinde seyretmiştir. Yapılan 16 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından 135 ^{o}C seviyesine yükselmiştir.

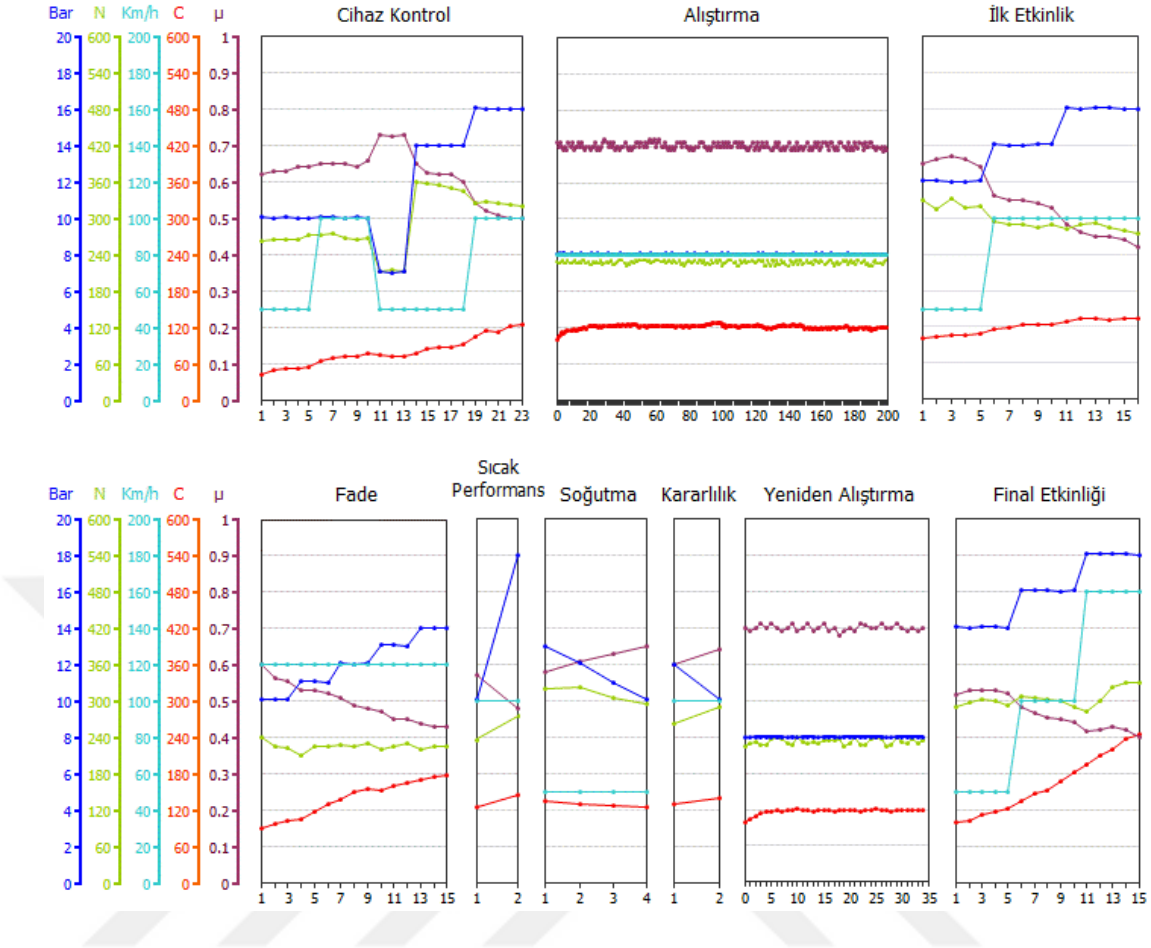
Fade bölümünde, 120 km/h hızda ve kademeli olarak 10-14 bar aralığında artan frenleme basıncında yapılan 15 frenleme çevriminde sıcaklığın artışıyla beraber sürtünme katsayısı 0.57 'den 0.43 seviyelerine düşmüştür. 15 frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 90 ^{o}C başlangıç sıcaklığından 177 ^{o}C seviyesine yükselmiştir. Sıcak performans bölümünde, 100 km/h sabit hızda ve frenleme basıncının 10 bar'dan 18 bar'a yükseltilerek yapılan 2 frenleme çevriminde sıcaklığın artmasıyla beraber sürtünme katsayısı 0.57'den 0.48 seviyelerine gerilemiştir. Yapılan 2 frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı fade bölümünde kaldığı sıcaklık olan 125 ^{o}C ile 145 ^{o}C aralığında seyretmiştir. Soğutma bölümünde 50 km/h hızda ve frenleme basıncı 13-10 bar aralığında kademeli olarak azaltılarak yapılan 4 frenleme çevriminde sürtünme katsayısı 0.58 'den 0.63 seviyesine yükselmiştir. Disk yüzey sıcaklığı 136 ^{o}C'den 126 ^{o}C'ye düşmüştür. Kararlılık bölümünde, 100 km/h hızda ve 12 bar'dan 10 bar frenleme basınçlarına azaltılarak yapılan 2 frenleme çevriminde sürtünme katsayısı düşük sıcaklığında etkisiyle 0.6 'dan 0.63 'e yükselmiştir. Frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 130-140 ^{o}C aralığında gerçekleşmiştir.

Yeniden alıştırma bölümünde, 80 km/h hız ve 8 bar sabit frenleme basıncı altında yapılan 35 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.69 seviyelerinde seyretmiştir. Yapılan 35 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100°C başlangıç sıcaklığından maksimum 121 ^{o}C seviyesine ulaşmıştır.

Final etkinliği bölümünün giriş kısmında 50 km/h hız ve 14 bar frenleme basıncında yapılan 5 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.52 seviyelerinde yükselme eğilimindedir. Ancak ikinci kısımda hızın 50 km/h'den 100 km/h'ye artması ve frenleme basıncının da kademeli olarak 14 bar'dan sırasıyla 16 ve 18 bar'a yükseltilmesiyle temas sıcaklığı artış göstermiş ve ortalama sürtünme katsayısı aşamalı olarak 0.44 ve 0.40 seviyelerine gerilemiştir. Yapılan 15 frenleme döngüsü boyunca

disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından maksimum 246 ^{o}C seviyesine kadar yükselmiştir.

Testin başlangıç bölümünde, sürtünme filmi oluşumuyla sürtünme katsayısı yükselme eğilimindedir. Bu durum sürtünme çifti arasındaki pürüzlülüklerin birbirleriyle etkileşimi sonucu temas yüzey alanının artması ve sürtünme katsayısının yükselmesiyle açıklanabilir (Eriksson et al., 2002). Sürtünme çifti arasındaki temas yüzeyinde oluşan sürtünme tabakası, birincil ve ikincil platolar tarafından oluşturulur (Österle & Urban, 2006). Genel olarak birincil platolar, metalik lifler ve seramik parçacıkları gibi sürtünme malzemesinin büyük ve sert bileşenleri tarafından yapılırken, ikinci platolar, birincil platolar tarafından bloke edilen aşınma parçalarının sıkıştırılmasıyla oluşturulur. Oluşan aşınma partikülleri, sürtünme malzemesinden ve fren diskinden kaynaklanır. Basınç ve kayma hızının düşmesiyle sıcaklık azalmış ve sürtünme katsayısı maksimum seviyeye ulaşmıştır. Kayma hızının sürtünme katsayısı üzerindeki etkileri birbiriyle ters orantılıdır, yani kayma hızı arttıkça sürtünme katsayısı azalır (Uyyuru et al., 2007). Ancak kademeli olarak basınç ve hızın artmasıyla sıcaklık yükselmiş ve sürtünme katsayısı μ=0.50 seviyelerine gerilemiştir. Alıştırma bölümünde göreceli olarak sabit bir temas alanı oluşturulmuştur. İlk etkinlik bölümünde basınç ve hızın kademeli olarak artmasıyla sıcaklık artmış ve sürtünme katsayısı düşme eğilimindedir. Basınç artışıyla, disk balata arasındaki gerçek temas alanı azalacağından sürtünme katsayısında düşme görülür (Eriksson et al., 2002). Etkinlik sonunda sürtünme katsayısı μ=0.41 ’de oldukça yüksek seviyede kalmıştır.



Şekil 4.21. WC-10Co4Cr kaplanmış CD1 kodlu diskin frenleme test sonuçları

Fade bölümünde, sıcaklık artışıyla sürtünme katsayısı düşük sıcaklık değerlerine göre azalmıştır. Bu durum, temas basınç artışına ve yüksek sıcaklıklarda diski mekanik aşınmaya karşı koruyan oksit veya termal film oluşumuna atfedilebilir. Fren diski yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir solma direnci göstermiştir. Sıcak performans bölümünde görülen keskin basınç artışı ile yüksek sıcaklık frenlemesinde daha yüksek bir pedal kuvveti gereksinimi görülmüştür. Soğutma ve kararlılık bölümlerindeki sürtünme katsayılarında artış meydana gelmiştir. Bu durum final etkinliğinden önce beklenen etkinlik performansına ulaşıldığını gösterir (Yun et al., 2010). Final etkinliği bölümünde hız ve basınç artışıyla sürtünme katsayısı azalmıştır. Test boyunca en yüksek disk yüzey sıcaklığı 246 ^{o}C'ye final etkinlik bölümünde ulaşmıştır. En yüksek yüzey sıcaklığı CD1 kodlu diskte görülmüştür. Sıcaklık artışıyla sürtünme çiftinin ara yüzey yapısı değişmiş ve sürtünme katsayısı düşmüştür. Bu durum yüksek sıcaklıklardaki sürtünme katsayısı azalmasının başlıca sebebidir. Diskin sürtünme

katsayısı artan hızla azalmış ve hala μ=0.40 'ta yüksek bir seviyeyi korumuştur. Tüm diskler arasındaki en yüksek ortalama sürtünme katsayısı μ=0.57 ve en yüksek sıcaklık 246 ^{o}C ile CD1 kodlu diskte meydana gelmiştir. Frenleme testi süresince CD1 fren diski nispeten kararlı bir sürtünme etkinliği ile karakterize, iyi bir solma direnci ve düşük hız duyarlılığı sergilemiştir.

4.3.2. Cr_3C_2-25NiCr Kaplanmış Diskin Frenleme Testi

Cr_3C_2-25NiCr tozu ile kaplanmış CD2 kodlu fren diskine ait frenleme test sonuçlarına göre oluşturulan performans grafikleri Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Cihaz kontrol bölümünde, 50 km/h ile 100km/h hızlarda ve 10 bar frenleme basıncı altında yapılan 10 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.61 'den 0.63 'e yükselme eğilimindedir. Devamında 50 km/h hız ve 7 bar basınçta yapılan 3 frenleme çevriminde basıncın düşmesiyle sürtünme katsayısı 0.68 seviyelerine yükselmiştir. Ancak son kısımda hızın 50 km/h'den 100 km/h artması, frenleme basıncının da kademeli olarak 14 bar'dan 16 bar'a yükseltilmesi sonucu temas ara yüzey sıcaklığı maksimum seviyelerine ulaşmış ve sürtünme katsayısı 0.45 seviyelerine gerilemiştir. Bu bölümde yapılan 23 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 80 ^{o}C'den 135 ^{o}C'ye kadar yükselmiştir.

Alıştırma bölümünde, 80 km/h hız ve 8 bar sabit frenleme basıncı altında yapılan 200 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.59 seviyelerinde dengelenmiştir. 200 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı, 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından 110 ^{o}C'de dengelenerek maksimum 120 ^{o}C seviyesine ulaşmıştır.

İlk etkinlik bölümünün giriş kısmında 50 km/h hız ve 12 bar frenleme basıncında yapılan 5 frenleme çevriminde sürtünme katsayısı 0.56 seviyelerindedir. İkinci kısımda hızın 50 km/h'den 100 km/h artması ve frenleme basıncının da kademeli olarak 12 bar dan sırasıyla 14 ve 16 bar'a yükseltilmesiyle yapılan 11 frenleme sonucu temas sıcaklığı artmış ve sürtünme katsayısı aşamalı olarak 0.47 ve 0.41 seviyelerinde seyretmiştir. Yapılan 16 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100°C başlangıç sıcaklığından maksimum 150 ^{o}C seviyesine yükselmiştir.

Fade bölümünde, 120 km/h hızda ve kademeli olarak 10-14 bar aralığında artan frenleme basıncında yapılan 15 frenleme çevriminde sıcaklık artışıyla beraber sürtünme

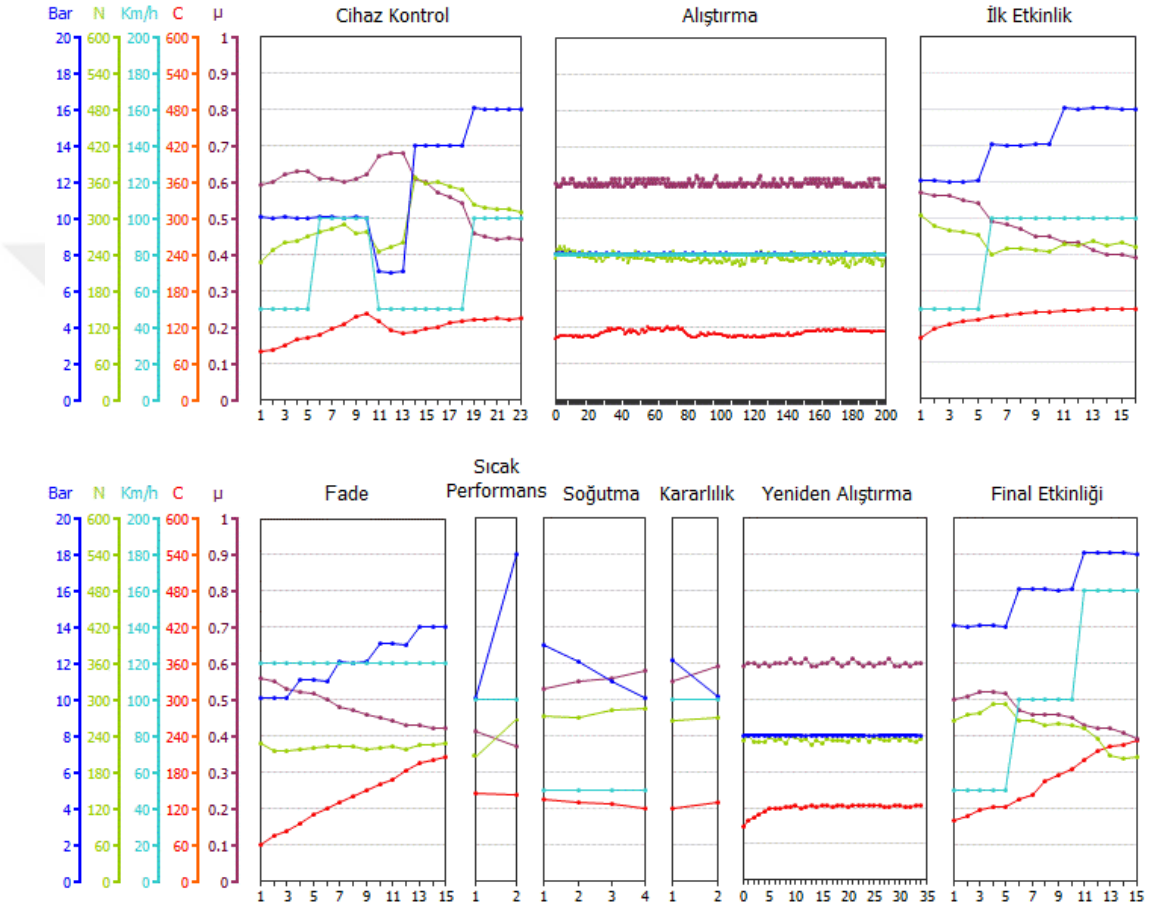
katsayısı 0.55 ’ten 0.42 seviyelerine düşmüştür. Yapılan 15 frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 60 ^{o}C başlangıç sıcaklığından 204 ^{o}C seviyesine yükselmiştir. Sıcak performans bölümünde, 100 km/h sabit hızda ve frenleme basıncı 10 bar’dan 18 bar’a yükseltilerek yapılan 2 frenleme çevriminde basıncın yükselmesiyle beraber sürtünme katsayısı 0.41 ’den 0.37 seviyelerine gerilemiştir. Frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı fade bölümünde kaldığı sıcaklık olan 145 ^{o}C ile 141 ^{o}C aralığında seyretmiştir. Soğutma bölümünde 50 km/h hızda ve frenleme basıncı 13-10 bar aralığında kademeli olarak azaltılarak yapılan 4 frenleme çevriminde sürtünme katsayısı 0.53’den 0.58 seviyesine yükselmiştir. Disk temas yüzeyi ise 136 ^{o}C ’den 121 ^{o}C’ye gerilemiştir. Kararlılık bölümünde, 100 km/h hızda ve 12 bar’dan 10 bar frenleme basıncına azaltılarak yapılan 2 frenleme çevriminde sürtünme katsayısı düşük sıcaklığında etkisiyle 0.55 ’ten 0.58 ’e yükselmiştir. Frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 119-130 ^{o}C aralığında gerçekleşmiştir.

Yeniden alıştırma bölümünde, 80 km/h hız ve 8 bar sabit frenleme basıncı altında yapılan 35 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.60 seviyelerinde seyretmiştir. Yapılan 35 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından maksimum 125 ^{o}C seviyesine yükselmiştir.

Final etkinliği bölümünün giriş kısmında 50 km/h hız ve 14 bar frenleme basıncında yapılan 5 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.51 seviyelerinde yükselme eğilimindedir. Ancak ikinci kısımda hızın 50 km/h’den 100 km/h artması ve frenleme basıncının da kademeli olarak 14 bar’dan sırasıyla 16 ve 18 bar’a yükseltilmesiyle temas sıcaklığı artış göstermiş ve ortalama sürtünme katsayısı aşamalı olarak 0.46 ve 0.41 seviyelerine düşmüştür. Yapılan 15 frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından maksimum 238 ^{o}C seviyesine kadar yükselmiştir.

Test başlangıç aşamasında sürtünme filmi gelişimi ile sürtünme katsayısı artmıştır. Başlangıç teması disk yüzeyi ile karşı yüzey arasında olduğundan, ilk temas sadece pürüzlerde olur. Bu durum daha yüksek temas gerilimlerine neden olur ve daha yüksek bir başlangıç sürtünmesine yol açar. Daha sonra hız ve basıncın kademeli olarak artması sonucu sıcaklık yükselmiş sürtünme katsayısında düşme görülmüştür. İlk etkinlik bölümünde oldukça yüksek bir sürtünme katsayısı oluşmuş ancak yükün ve kayma

hızının artmasıyla sürtünme katsayısı düşüş göstermiştir (Guo et al., 2011). Kayma hızı arttığında yükselen sıcaklıkla beraber temas yüzeyinin yapısı değişerek oksit tabakasının oluşumu başlar ve bu durum gerçek temas alanını azaltacağından sürtünme katsayısında azalma görülür (Peng, 2013). Bu kısımda sürtünme katsayısı hız değişiminden kısmen etkilenmiştir.



Şekil 4.22. Cr_3C_2-25NiCr kaplanmış CD2 kodlu diskin frenleme test sonuçları

Fade bölümünde sıcaklığa bağlı belirgin bir solma (fren zayıflaması) gelişmemiştir (Lee & Filip, 2013). Oluşan yüksek temas yüzeyi sıcaklıklarına rağmen sürtünme katsayısı μ=0.42 seviyesinde kalarak artan sıcaklıkla önemli bir termal solma direnci göstermiştir. Sıcak performans bölümünde yüksek basınçta yüksek frenleme kuvveti ile sürtünme katsayısında bir miktar düşme olmuştur. Soğutma ve kararlılık bölümlerinde ise kararlı bir sürtünme filmi gelişmiştir. Final etkinliği bölümünde 160 km/h kadar olan hız ve basınç değişimlerinden etkilenmiştir. Toplam etkinlik boyunca disk yüzey sıcaklığı 238 ^{o}C'ye yükselmiş olmasına rağmen, çevrim sonunda sürtünme katsayısı

μ=0.40 iyi bir seviyede kalmıştır. Test süresince CD2 fren diski, μ=0.52 ortalama sürtünme katsayısı ile iyi bir solma direnci göstermiştir.

4.3.3. 20NiCrBSi-WC12Co Kaplanmış Diskin Frenleme Testi

20NiCrBSi-WC12Co tozu ile kaplanmış CD3 kodlu fren diskine ait frenleme test sonuçlarına göre oluşturulan performans grafikleri Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Cihaz kontrol bölümünde, 50 km/h ve 100 km/h hızlarda 10 bar frenleme basıncı altında yapılan toplam 10 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.62 ile 0.60 aralığında seyretmiştir. Devamında 50 km/h hız ve 7 bar basınçta yapılan 3 frenleme çevriminde basıncın düşmesiyle sürtünme katsayısı 0.69 seviyelerine yükselmiştir. Ancak son kısımda hızın 50 km/h'den 100 km/h'ye yükselmesi, frenleme basıncının da kademeli olarak 14 bar'dan 16 bar'a yükseltilmesi sonucu temas disk yüzey sıcaklığı yükselmiş ve sürtünme katsayısı 0.56 'dan 0.47 seviyelerine gerilemiştir. Bu bölümde yapılan 23 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 56 ^{o}C'den 140 ^{o}C'ye kadar yükselmiştir.

Alıştırma bölümünde, 80 km/h hız ve sabit 8 bar frenleme basıncında yapılan 200 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.65 seviyelerinde dengelenmiştir. Bu bölümde yapılan 200 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından maksimum 128 ^{o}C seviyesine kadar yükselmiştir.

İlk etkinlik bölümünün giriş kısmında 50 km/h hız ve 12 bar frenleme basıncında yapılan 5 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.64 seviyelerindedir. İkinci kısımda hızın 50 km/h'den 100 km/h artması ve frenleme basıncının da kademeli olarak 12 bar'dan sırasıyla 14 ve 16 bar'a yükseltilmesiyle yapılan 11 frenleme sonucu temas sıcaklığı artış göstermiş ve sürtünme katsayısı aşamalı olarak 0.55 ve 0.45 seviyelerinde seyretmiştir. Yapılan 16 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100°C başlangıç sıcaklığından maksimum 145°C seviyesine yükselmiştir.

Fade bölümünde, 120 km/h hızda ve kademeli olarak 10-14 bar aralığında artan frenleme basınçlarında yapılan 15 frenleme çevriminde sıcaklık artışıyla sürtünme katsayısı 0.65 'ten 0.50 seviyelerine düşmüştür. Yapılan 15 frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 55 ^{o}C'den 207 ^{o}C seviyelerine yükselmiştir. Sıcak performans bölümünde, 100 km/h sabit hızda ve frenleme basıncı 10 bar'dan 18 bar'a yükseltilerek

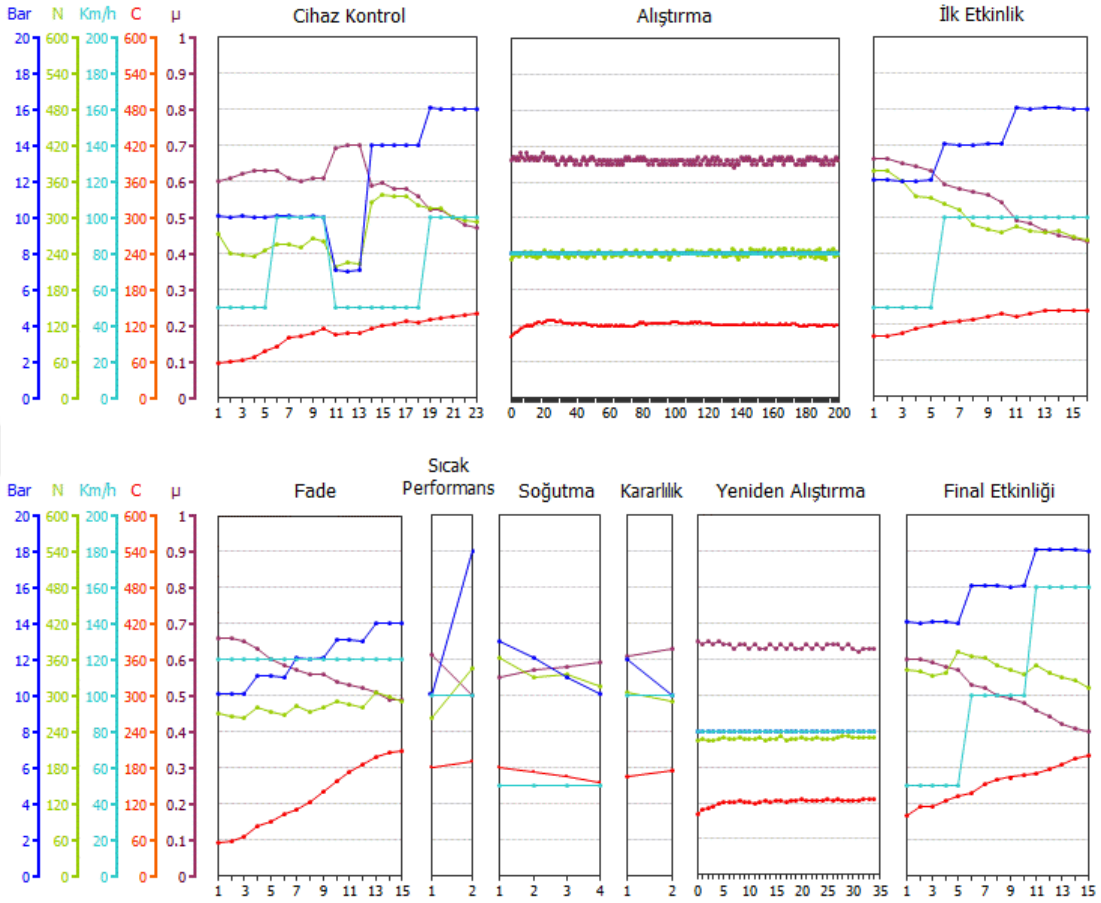
yapılan 2 frenleme çevriminde basıncın yükselmesiyle sürtünme katsayısı 0.61 'den 0.50 seviyelerine gerilemiştir. Yapılan 2 frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı fade bölümünde kaldığı sıcaklık olan 180 ^{o}C ile 190 ^{o}C aralığında artarak seyretmiştir. Soğutma bölümünde 50 km/h hızda ve frenleme basıncı 13-10 bar aralığında kademeli olarak azaltılarak yapılan 4 frenleme çevriminde sürtünme katsayısı 0.55 'den 0.59 seviyesine yükselmiştir. Disk yüzey sıcaklığı ise 180 ^{o}C 'den 155 ^{o}C'ye düşmüştür. Kararlılık bölümünde, 100 km/h hızda ve 12 bar'dan 10 bar frenleme basıncına azaltılarak yapılan 2 frenleme çevriminde sürtünme katsayısı 0.61 'den 0.63 'e yükselmiştir. Frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 165-175 ^{o}C aralığında gerçekleşmiştir.

Yeniden alıştırma bölümünde, 80 km/h hız ve sabit 8 bar frenleme basıncında yapılan 35 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.64 seviyelerinde seyretmiştir. Bu bölümde yapılan 35 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından maksimum 127 ^{o}C seviyesine yükselmiştir.

Final etkinliği bölümünün giriş kısmında 50 km/h hız ve 14 bar frenleme basıncında yapılan 5 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.57 seviyelerindedir. Ancak ikinci kısımda hızın 50 km/h'den 100 km/h'ye artması ve frenleme basıncının da kademeli olarak 14 bar'dan sırasıyla 16 ve 18 bar'a yükseltilmesiyle temas sıcaklığı artış göstermiş ve ortalama sürtünme katsayısı aşamalı olarak 0.48 ve 0.40 seviyelerinde seyretmiştir. Yapılan 15 frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından maksimum 201 ^{o}C seviyesine kadar yükselmiştir.

Test başlangıcında sürtünme filmi oluşumuyla sürtünme katsayısı yükselme eğilimindedir. Basınç ve kayma hızının düşmesi ile sürtünme katsayısı da maksimum seviyesine ulaşmıştır. Daha sonra basınç ve hızın kademeli olarak yükseltilmesiyle sürtünme katsayısı düşme eğilimine girmiştir. Bu bölümde görülen sürtünme karakteristiği CD1 ve CD2 diskleriyle benzerlik göstermiştir. Ancak CD3 fren diskinin hız duyarlılığı daha düşüktür. Alıştırma evresinde sürtünme çifti arasında stabil bir sıcaklık ile kararlı sürtünme katsayısı oluşmuştur. Birinci etkinlik bölümünde basınç ve kayma hızının kademeli olarak arttırılmasıyla temas sıcaklığı artarken sürtünme katsayısı düşmüştür. Kademeli frenlemelerde yükselen basınç ve maksimum sürtünme

hızı ile temas alanı değişmekte bu da sürtünme davranışını etkilemektedir. Ancak çevrim sonunda sürtünme katsayısı μ=0.42 iyi bir seviyede tutunmuştur.



Şekil 4.23. 20NiCrBSi-WC12Co kaplanmış CD3 kodlu diskin frenleme test sonuçları

Fade bölümünde yüksek sıcaklıklardaki sürtünme katsayıları düşük sıcaklık değerlerine göre azalma eğilimindedir. Bu bölümde çevrimin en yüksek disk yüzey sıcaklığı olan 201 ^{o}C'ye ulaşılmıştır. Oluşan yüksek temas yüzeyi sıcaklıklarına rağmen sürtünme katsayısı μ=0.48 seviyesinde kalarak önemli bir solma direnci göstermiştir. Sıcak performans bölümünde sıcaklığın artması ve yüksek frenleme kuvveti ile sürtünme katsayısında bir miktar düşme olmuştur. Soğutma ve kararlılık bölümlerinde birbirini takip eden oldukça kararlı bir sürtünme davranışı gelişmiştir. Final etkinliği bölümünde 160 km/h kadar olan hız ve basınç değişimlerinden etkilenmiştir. Etkinlik boyunca disk yüzey sıcaklığı 200 ^{o}C'ye yükselmiş ve sürtünme katsayısının hala μ=0.40 'da oldukça iyi bir seviyede tutunduğu görülmektedir. Frenleme testi süresince CD3 fren diski, μ=0.56 ortalama sürtünme etkinliği ile düşük hız duyarlılığı sergilemiştir.

4.3.4. Mo-NiCrBSi Kaplanmış Diskin Frenleme Testi

Mo-NiCrBSi tozu ile kaplanmış CD4 kodlu fren diskine ait frenleme test sonuçlarına göre oluşturulan performans grafikleri Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Cihaz kontrol bölümünde, 50 km/h ve 100 km/h hızlarda 10 bar frenleme basıncında yapılan toplam 10 frenlemede ortalama sürtünme katsayısı 0.64 ile 0.61 aralığında seyretmiştir. Devamında 50 km/h hızda ve 7 bar basınçta yapılan 3 frenleme çevriminde basıncın düşmesiyle sürtünme katsayısı 0.68 seviyelerine yükselmiştir. Ancak son kısımda hızın 50 km/h'den 100 km/h artması, frenleme basıncının da kademeli olarak 14 bar 'dan 16 bar'a yükseltilmesi, temas sıcaklığının yükselmesine ve ortalama sürtünme katsayısının 0.60 'dan 0.49 seviyelerine gerilemesine neden olmuştur. Bu bölümde yapılan 23 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 58 ^{o}C'den 135 ^{o}C'ye kadar yükselmiştir.

Alıştırma bölümünde, 80 km/h hız ve sabit 8 bar frenleme basıncı altında yapılan 200 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.57 seviyelerinde dengelenmiştir. Bu bölümde yapılan 200 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C'den 130 ^{o}C seviyesine kadar yükselmiş ve ortalama 122 ^{o}C'de dengelenmiştir.

İlk etkinlik bölümünün giriş kısmında 50 km/h hız ve 12 bar frenleme basıncında yapılan 5 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.50 seviyelerindedir. İkinci kısımda hızın 50 km/h'den 100 km/h artması ve frenleme basıncının da kademeli olarak 12 bar'dan sırasıyla 14 ve 16 bar'a yükseltilmesiyle yapılan 11 frenleme sonucu temas sıcaklığı artış göstermiş ve ortalama sürtünme katsayısı 0.39 ve 0.36 seviyelerine gerilemiştir. Yapılan 16 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100°C başlangıç sıcaklığından max 133°C seviyesine yükselmiştir.

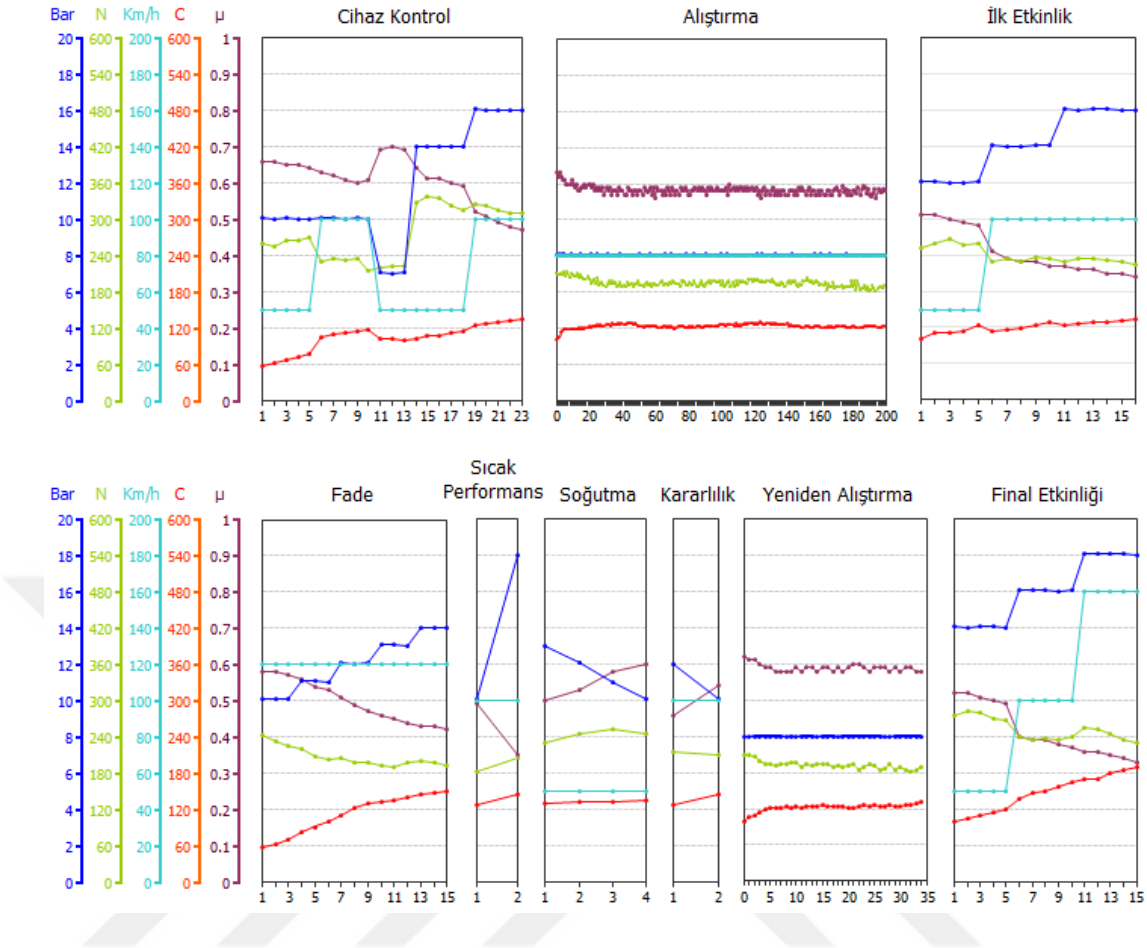
Fade bölümünde, 120 km/h hızda ve kademeli olarak 10-14 bar aralığında artan frenleme basınçlarında yapılan 15 frenleme çevriminde sıcaklık artışıyla ortalama sürtünme katsayısı 0.58 'den 0.43 seviyelerine düşmüştür. Yapılan 15 frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 56 ^{o}C başlangıç sıcaklığından maksimum 150 ^{o}C seviyesine yükselmiştir. Sıcak performans bölümünde, 100 km/h sabit hızda ve frenleme basıncı 10 bar'dan 18 bar'a yükseltilerek yapılan 2 frenleme çevriminde basıncın yükselmesiyle sürtünme katsayısı 0.49 'dan 0.35 seviyelerine gerilemiştir. Yapılan 2 frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı fade bölümünde kaldığı sıcaklık olan 126 ^{o}C ile 144 ^{o}C aralığında artarak seyretmiştir. Soğutma bölümünde 50

km/h hızda ve frenleme basıncı 13-10 bar aralığında kademeli olarak azaltılarak yapılan 4 frenleme çevriminde sürtünme katsayısı 0.50 ’den 0.60 seviyesine yükselmiştir. Disk yüzey sıcaklığı ise 130 ^{o}C’den 135 ^{o}C’ye yükselmiştir. Kararlılık bölümünde, 100 km/h hızda ve 12 bar’dan 10 bar frenleme basıncına azaltılarak yapılan 2 frenleme çevriminde sürtünme katsayısı 0.46 ’dan 0.54 seviyesine yükselmiştir. Frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 128-144 ^{o}C aralığında gerçekleşmiştir.

Yeniden alıştırma bölümünde, 80 km/h hız ve sabit 8 bar frenleme basıncı altında yapılan 35 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.58 seviyelerinde seyretmiştir. Bu bölümde yapılan 35 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından maksimum 132 ^{o}C seviyesine yükselmiştir.

Final etkinliği bölümünün giriş kısmında 50 km/h hız ve 14 bar frenleme basıncında yapılan 5 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.51 seviyelerindedir. Ancak ikinci kısımda hızın 50 km/h’den 100 km/h artması ve frenleme basıncının da kademeli olarak 14 bar’dan sırasıyla 16 ve 18 bar’a yükseltilmesiyle ara yüzey sıcaklığı artış göstermiş ve ortalama sürtünme katsayısı aşamalı olarak sırasıyla 0.39 ve 0.35 seviyelerinde seyretmiştir. Yapılan 15 frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından maksimum 190 ^{o}C seviyesine kadar yükselmiştir.

Test başlangıcında sürtünme filmi oluşumu oldukça yavaş geliştiğinden sürtünme katsayısı düşme eğilimindedir. Ancak kayma hızı ve basıncın düşmesiyle tekrar yükselmiştir. Kayma hızının 100 km/h’ye yükselmesi ve basıncın da kademeli olarak artmasıyla sıcaklık yükselmiş ve temas alanı değişimiyle sürtünme katsayısı tekrar düşmeye başlamıştır. Giriş kısmı OD orijinal fren diski ile benzer sürtünme karakteristiği geliştirmiştir. Alıştırma evresinde sürtünme çifti arasında nispeten düşük bir sürtünme katsayısı oluşmuştur. İlk etkinlik bölümünde basınç ve kayma hızının kademeli olarak arttırılmasıyla termokupl tarafından ölçülen disk sıcaklığı yükselmiş ve sürtünme katsayısı düşmüştür. İlk etkinlik sonunda sürtünme katsayısı μ=0.35 seviyesinde kalmıştır.



Şekil 4.24. Mo-NiCrBSi kaplanmış CD4 kodlu diskin frenleme test sonuçları

Fade bölümünde sürtünme katsayısı ani basınç değişimlerine karşı düşük duyarlılık göstermiştir. Bu durum iyi bir sürtünme yüzeyi oluşturulduğuna atfedilebilir. Fade ve sıcak performans testi dizilerinden kolayca görülebileceği gibi artan sıcaklıkla sürtünme katsayısı azalmıştır. Bu durum sürtünme yüzeyinde oluşan sürtünme filminin fiziksel ve kimyasal değişikliklerine atfedilebilir (Filip et al., 2002). Disk, soğutma ve kararlılık rampası bölümlerinde iyi bir geri kazanım kabiliyeti sergilemiştir. Yeniden alıştırma işleminden sonra final etkinliği bölümünde, frenlerin 160 km/h'ye hıza kadar olan hız hassasiyeti görülür. Burada sürtünme katsayısı artan hız ile azalmış ve disk yüzey sıcaklığı 190 ^{o}C'ye yükselmiş olmasına rağmen hala μ=0.33 oldukça yüksek bir seviyeyi korumuştur. Burada CD4 kodlu fren diski hız artışından etkilenmiştir. Diskler arasında en düşük ortalama sürtünme katsayısı μ=0.49 ve en düşük yüzey sıcaklığı 190 ^{o}C ile CD4 diskte görülmüştür. Test süresince fren diski nispeten kararlı sürtünme etkinliğine sahip iyi bir solma direnci göstermiştir.

4.3.5. Orijinal Diskin Frenleme Testi

Kaplanmamış OD kodlu orijinal fren diskine ait frenleme test sonuçlarına göre oluşturulan performans grafikleri Şekil 4.25'te görülmektedir. Cihaz kontrol bölümünde, 50 km/h ve 100 km/h hızlarda 10 bar frenleme basıncında yapılan toplam 10 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.65 ile 0.60 aralığında seyretmiştir. Devamında 50 km/h hızda ve 7 bar basınçta yapılan 3 frenleme çevriminde basıncın düşmesiyle sürtünme katsayısı 0.68 seviyelerine yükselmiştir. Ancak son kısımda hızın 50 km/h'den 100 km/h artması, frenleme basıncının da kademeli olarak 14 bar'dan 16 bar'a yükseltilmesi sonucu temas ara yüzey sıcaklığının yükselmesiyle ortalama sürtünme katsayısı 0.56 'dan 0.45 seviyelerine gerilemiştir. Bu bölümde yapılan 23 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 48 ^{o}C'den maksimum 150 ^{o}C'ye kadar yükselmiştir.

Alıştırma bölümünde, 80 km/h hız ve sabit 8 bar frenleme basıncında yapılan 200 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.60 seviyelerinde dengelenmiştir. Bu bölümde yapılan 200 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından maksimum 126 ^{o}C seviyesine kadar yükselmiş ve ortalama 120 ^{o}C'de dengelenmiştir.

İlk etkinlik bölümünün giriş kısmında 50 km/h hız ve 12 bar frenleme basıncında yapılan 5 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.61 seviyelerindedir. İkinci kısımda hızın 50 km/h'den 100 km/h artması ve frenleme basıncının da kademeli olarak 12 bar'dan sırasıyla 14 ve 16 bar'a yükseltilmesiyle yapılan 11 frenleme sonucu temas sıcaklığı artış göstermiş ve ortalama sürtünme katsayısı aşamalı olarak 0.49 ve 0.40 seviyelerine gerilemiştir. Yapılan 16 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından max 135 ^{o}C seviyesine yükselmiştir.

Fade bölümünde, 120 km/h hızda ve kademeli olarak 10-14 bar aralığında artan frenleme basınçlarında yapılan 15 frenleme çevriminde sıcaklık artışıyla ortalama sürtünme katsayısı 0.53 'den 0.42 seviyelerine düşmüştür. Yapılan 15 frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 60 ^{o}C başlangıç sıcaklığından maksimum 224 ^{o}C seviyelerine kadar yükselmiştir.

Sıcak performans bölümünde, 100 km/h sabit hızda ve frenleme basıncı 10 bar'dan 18 bar'a yükseltilerek yapılan 2 frenleme çevriminde basıncın yükselmesiyle sürtünme

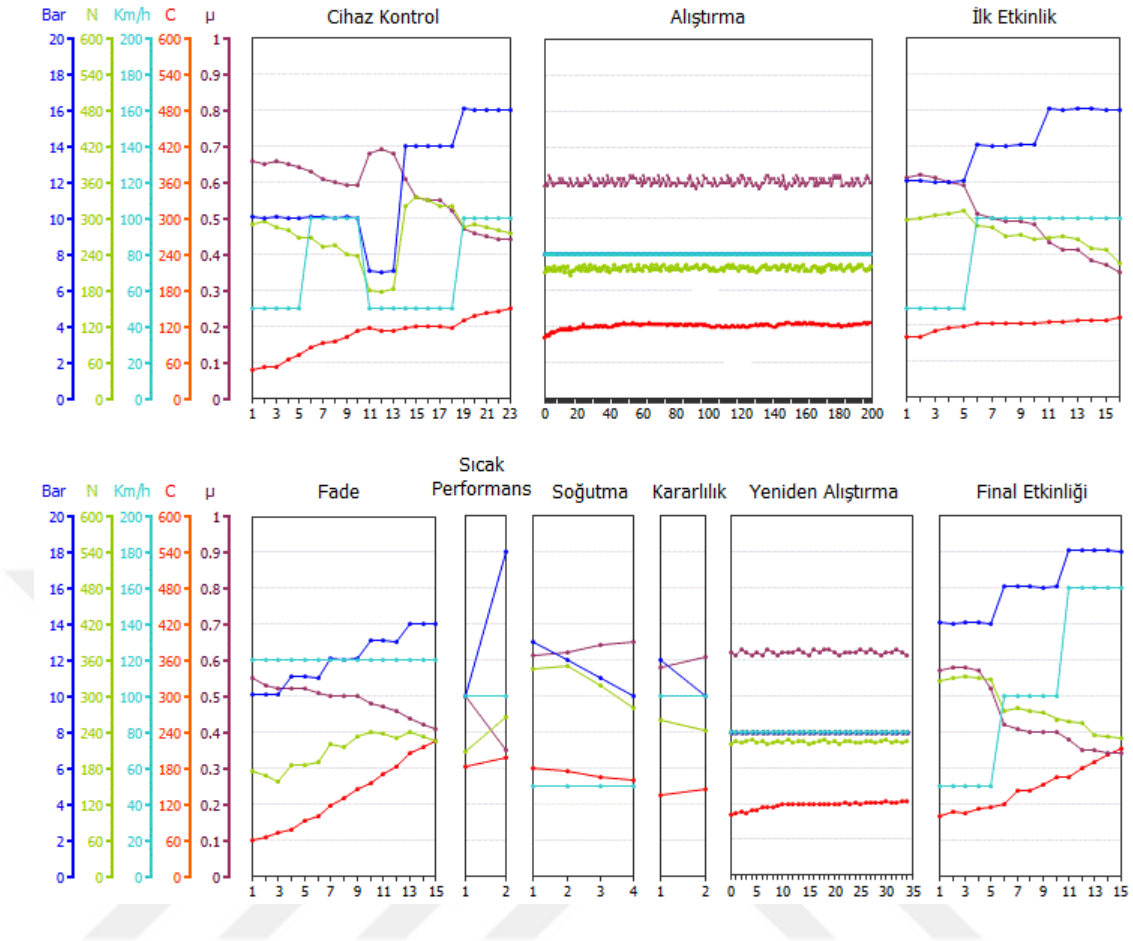
katsayısı 0.50 ’den 0.36 seviyelerine gerilemiştir. Yapılan 2 frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı fade bölümünde kaldığı sıcaklık olan 182 ^{o}C ile 196 ^{o}C aralığında seyretmiştir.

Soğutma bölümünde 50 km/h hızda ve frenleme basıncı 13-10 bar aralığında kademeli olarak azaltılarak yapılan 4 frenleme çevriminde sürtünme katsayısı 0.61 ’den 0.65 seviyesine yükselmiştir. Disk yüzey sıcaklığı ise 180 ^{o}C’den 160 ^{o}C’ye gerilemiştir.

Kararlılık bölümünde, 100 km/h hızda ve 12 bar’dan 10 bar frenleme basıncına azaltılarak yapılan 2 frenleme çevriminde sürtünme katsayısı 0.58 ’den 0.61 seviyelerine yükselmiştir. Frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 134-144 ^{o}C aralığında gerçekleşmiştir.

Yeniden alıştırma bölümünde, 80 km/h hız ve sabit 8 bar frenleme basıncı altında yapılan 35 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.62 seviyelerinde seyretmiştir. Bu bölümde yapılan 35 frenleme döngüsünde disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından maksimum 123 ^{o}C seviyesine yükselmiştir.

Final etkinliği bölümünün giriş kısmında 50 km/h hız ve 14 bar frenleme basıncında yapılan 5 frenleme çevriminde ortalama sürtünme katsayısı 0.56 seviyelerinde yükselme eğilimindedir. Ancak ikinci kısımda hızın 50 km/h’den 100 km/h artması ve frenleme basıncının da kademeli olarak 14 bar’dan sırasıyla 16 ve 18 bar’a yükseltilmesiyle ara yüzey sıcaklığı artış göstermiş ve ortalama sürtünme katsayısı aşamalı olarak 0.41 ve 0.36 seviyelerinde seyretmiştir. Yapılan 15 frenleme döngüsü boyunca disk yüzey sıcaklığı 100 ^{o}C başlangıç sıcaklığından maksimum 212 ^{o}C seviyesine kadar yükselmiştir.



Şekil 4.25. Orijinal OD kodlu diskin frenleme test sonuçları

Frenleme testinin başlangıç bölümünde, sürtünme filmi oluşumuyla sürtünme katsayısı yükselme eğiliminde olmuş ancak hızlı sıcaklık artışından etkilenerek bir miktar düşmüştür. Basınç ve hızın düşmesiyle sıcaklık azalmış ve sürtünme katsayısı maksimum μ=0.68 seviyesine ulaşmıştır. Ancak kademeli olarak basınç ve hızın artmasıyla sıcaklık yükselmiş ve sürtünme katsayısı μ=0.44 seviyelerine gerilemiştir. Alıştırma bölümünde sıcaklığında stabil kalmasıyla μ=0.60 kararlı bir sürtünme katsayısı oluşmuştur. İlk etkinlik bölümünde basınç ve hızın kademeli olarak artması sonucu sıcaklık artmış ve sürtünme katsayısı düşme eğilimine girmiştir. Ancak dökme demirin sahip olduğu iyi ısı iletim özelliği ile sıcaklık düşük seviyelerde stabil kalmıştır. Basınç artışıyla disk balata arasındaki gerçek temas alanının azalması sonucu sürtünme katsayısı μ=0.36 seviyesinde tutunmuştur. Ancak ilk etkinlik bölümünde diskin hız değişimlerine karşı duyarlı olduğu söylenebilir.

Fade bölümünde, sıcaklık en yüksek değer olan 224 ^{o}C seviyesine ulaşmış olmasına rağmen belirgin bir solma (fren zayıflaması) gelişmemiştir. Burada orijinal diskin

yüksek solma direncine sahip olduğu görülmüştür. Sıcak performans bölümünde ani basınç artışı ile değişen tribolojik etkenler sebebiyle sürtünme katsayısında bir miktar düşme olmuştur. Soğutma ve kararlılık bölümlerinde oldukça yüksek bir sürtünme ile iyi bir geri kazanım kabiliyeti sergilemiştir. Bu durum final etkinliğinden önce beklenen etkinlik performansına ulaşıldığını gösterir. Final etkinliği bölümünde 160 km/h kadar olan hız ve basınç artışlarında sıcaklığında etkisiyle sürtünme katsayısında düşme görülmüştür. Final etkinliğinde disk yüzey sıcaklığı maksimum 212 ^{o}C'ye yükselirken sürtünme katsayısı μ=0.35 'te oldukça iyi bir seviyede kalmıştır. Orijinal fren diski, frenleme testi süresince, μ=0.55 ortalama sürtünme katsayısına sahip kararlı bir sürtünme etkinliği ile yüksek solma direnci göstermiştir. Frenleme testleri sonunda, orijinal fren diski CD2 ve CD4 fren disklerinden yüksek, CD3 fren diskine benzer ve CD1 diskinden ise daha düşük ortalama sürtünme katsayısı sergilemiştir.

4.4. Fren Diski ve Balatalarının Aşınma Davranışı

Aşınma yüzeyleri çalışma döngüleri boyunca bir gelişim sürecinden geçer. Yüzeyler arasında gelişen sürtünme filmi ile yüzeyin kimyasal ve fiziksel özelliklerinde değişimler meydana gelir. Temas durumunda metalik bir fiber veya balata yüzeyindeki sert bir parçacık, yeni bir temas yaması için bir çekirdek görevi görür. Parçacık diskle temas ettiğinde, parçacığın etrafındaki temas alanı aşınma artıklarını ve malzemelerini biriktirip dönüştürerek büyür. Bu işlem temas platosunun ön alanını genişletir ve yükseltir. Bir süre kaydıktan sonra temas platosu üzerindeki baskı artar ve sonucunda dağılır. Bazı döküntü parçacıkları sistemden ayrılırken, diğerleri diskten döküntülerle birlikte yeni temas yamaları oluşturmak için kullanılır. Temas platolarının dinamik olarak gelişmesi, büyümesi ve dağılması aşınma mekanizmalarını ortaya çıkarır (Bettge & Starcevic, 2003).

Fren diski ve balatalarının aşınma miktarı, frenleme testlerinden önce ve sonra yapılan ölçümlerle ortalama kütle kaybı ve kalınlık farkı olarak belirlenmiştir. Her örnek için birkaç frenleme testi tekrarlanmış ve sonucunda benzer eğilimler elde edilmiştir. Frenleme testleri sonunda disk yüzey kaplamalarında ve fren balatalarında herhangi bir ayrılma veya parçalanma gözlemlenmemiştir. Test prosedürünün

tamamlanmasından sonra disk ve balata çiftine ait aşınma ölçümü sonuçları ortalama değerler olarak Çizelge 4.1'de görülmektedir.

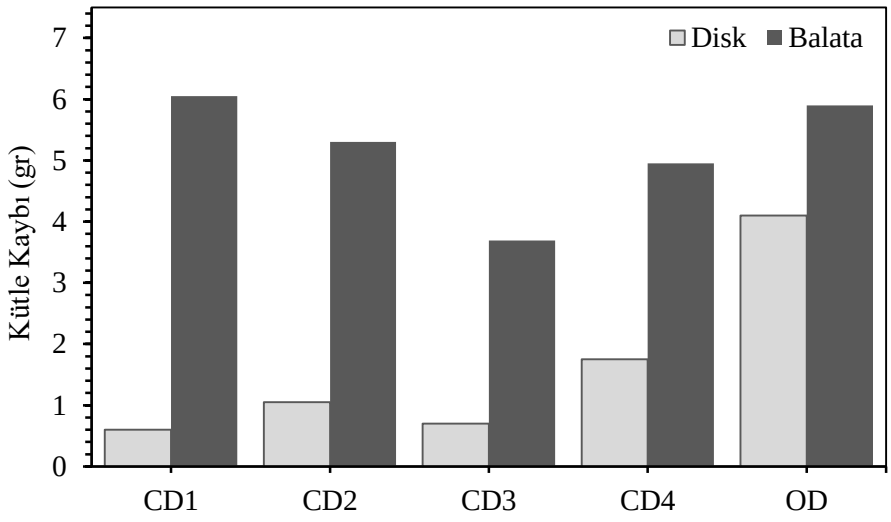
Çizelge 4.1. Fren diski ve balatalarının aşınma miktarı

Aşınma	CD1	CD2	CD3	CD4	OD
Diskin kütle kaybı (gr)	0.60	1.05	0.70	1.75	4.10
Balatanın kütle kaybı (gr)	6.05	5.30	3.70	4.95	5.90
Diskin kalınlık farkı (mm)	0.003	0.005	0.003	0.011	0.016
Balatanın kalınlık farkı (mm)	3.708	3.176	2.327	3.081	3.626

Fren diski ve diske ait balatanın kütlesel aşınma miktarı grafiksel olarak Şekil 4.26'da birlikte görülmektedir. Sürtünme testlerinden sonra en düşük kütlesel aşınma CD1 kodlu diskte meydana gelmiştir. HVOF kaplama yönteminin yüksek püskürtme hızı ile sağlamış olduğu yoğun yapı ve yüksek sertlik aşınma direncini arttırmıştır. Ayrıca yapı içerisinde oluşan WC ve W_2C fazları da aşınma direncinin artmasında ana etken olmuştur. CD1 diskin yüksek sürtünme katsayısına rağmen en düşük kütlesel aşınma göstermesi literatür çalışmalarına benzerlik göstermiştir (Federici et al., 2016). Bu durum kaplama tabakasının iyi bir bağlanma özelliği oluşturmasına atfedilebilir. CD4 fren diski ise kaplanmış diskler arasında en yüksek kütlesel aşınma göstermiştir. Bu durum plazma püskürtmenin atmosferik ortamda yapılmasıyla kaplama içerisinde porozite oluşmasına bağlanabilir. Mikro yapıdan da görüldüğü gibi kaplama içerisindeki oluşan boşluklar ve Mo 'nun yumuşak yapısı, sertliğin düşmesine ve aşınma miktarının yükselmesine sebep olmuştur. Ayrıca bu diskin aşınma miktarının yüksek olmasına rağmen sürtünme katsayısının düşük olması, gözenekli yapısının neden olduğu yüzey pürüzlülüğünden kaynaklandığı söylenebilir. Sürtünme katmanlarının kimyasal bileşimindeki fark, farklı sürtünme seviyelerinden de sorumlu olabilir. CD2 ve CD3 kodlu diskler ise içeriğinde bulunan Ni matrisinin iyi ıslatma kabiliyeti sonucu bağlanmayı arttırması ve içerdikleri karbür fazlarıyla sertliğinin yüksek olması bu disklerin aşınma direncini arttırmıştır. En yüksek kütlesel aşınma miktarı OD kodlu orijinal diskte görülmüştür. Sprey kaplamalar sert kaplamalar olduğu için kaplanmış

disklerin aşınma direnci orijinal diskten yüksektir. Orijinal diskin sahip olduğu nispeten düşük sertlik ve oluşan yüksek sıcaklık aşınma miktarını arttırmıştır.

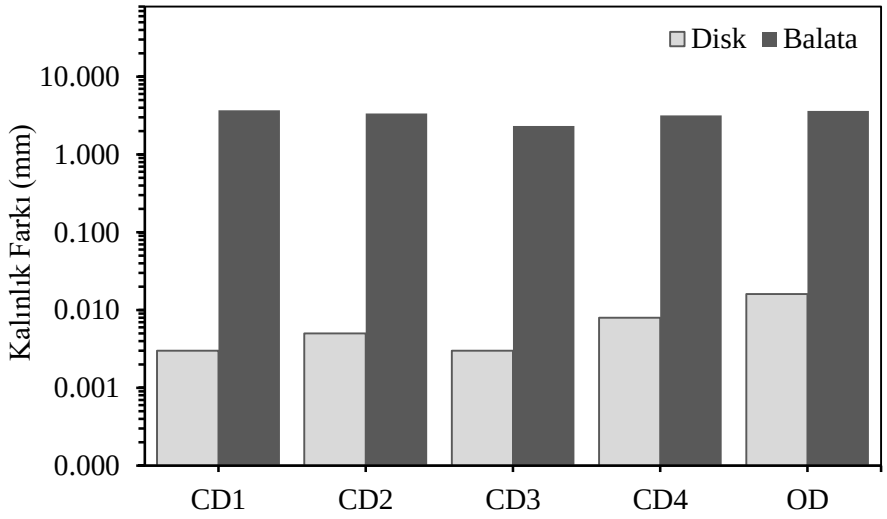
Balatalar arasında en yüksek kütlesel aşınma CD1 kodlu diskin balatasında meydana gelmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı CD1 kodlu disk ve balatası arasında oluştuğu için balatadaki aşınma miktarı da yüksek gerçekleşmiştir. Termal yorulma ile disk temas yüzeyindeki yapısal değişikliklerden dolayı balata aşınma oranı artmıştır. Ayrıca balata aşınma oranının artmasında, CD1 kodlu diskin termal bariyer etkisi göstermesiyle yüksek sıcaklığın etkili olduğu söylenebilir. CD3 kodlu disk iyi bir sürtünme performansı geliştirmiş ve en düşük kütlesel aşınma bu diskin balatasında görülmüştür. Burada disk-balata arasında iyi bir sürtünme filmi oluşumuyla aşınma miktarının azaldığı söylenebilir (Uyyuru et al., 2007). CD4 kodlu diskin gözenekli yapıya sahip olması, literatürde belirtildiği gibi fren balatasının aşınma performansı üzerinde olumlu etki göstermiştir (Ghabchi et al., 2010; Zhang et al., 2017). CD2 ve OD kodlu disklerin balatalarının kütlesel aşınma miktarları nispeten yakın gerçekleşmiştir.



Şekil 4.26. Fren diski ve balatalarının aşınma sonucu kütle kaybı

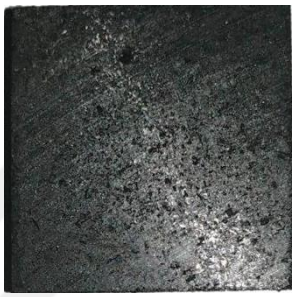
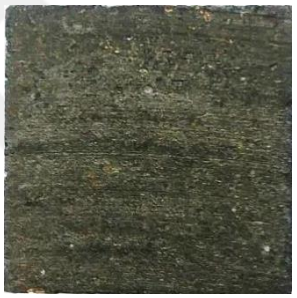
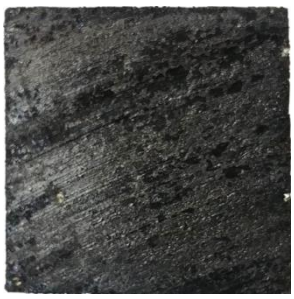
Fren diski ve diske ait balatanın aşınma sonucu oluşan kalınlık değişimi grafiksel olarak Şekil 4.27'de birlikte görülmektedir. Fren disklerinde meydana gelen aşınma sonucu oluşan kalınlık farkları, kütlesel aşınma miktarıyla orantılı olarak gerçekleşmiştir. En fazla kalınlık değişimi sertliği en düşük olan OD kodlu orijinal diskte görülmüştür. OD kodlu diskin balatasının kalınlık değişiminin daha yüksek

olmasının sebebi olarak, sertliğinin düşük ve yapışma aşınması sonucu temas ara yüzeyinde daha fazla üçüncü elemanın bulunmasıyla ifade edilebilir. Sert fazların varlığı nedeniyle yüksek sertliğe sahip CD1 kodlu diskte, kütlesel aşınmasıyla uyumlu olarak düşük kalınlık değişimi görülmüştür. Testler süresince fren balatalarında herhangi bir parçalanma olmadığı için aşınma sonucu meydana gelen kalınlık farkları kütlesel kayıplarıyla uyumluluk göstermiştir. Bu değişimin benzerliği, balataların aynı kimyasal kompozisyona sahip olmasına da atfedilebilir. Sürtünme çiftlerinde oksidatif olmayan aşınma mekanizmalarının geliştiği söylenebilir. Çünkü temas sıcaklığı, kaplamaların yumuşamasına veya oksidatif hasarına neden olacak kadar yüksek değildir.



Şekil 4.27. Fren diski ve balatalarının aşınma sonucu kalınlık farkı

Frenleme test prosedürünün tamamlanmasından sonra fren diskleri ve ait olduğu balatalarının aşınmış yüzeyleri Şekil 4.28'de birlikte görülmektedir.

Kodu	Fren Diski	Fren Balatası
CD1 WC-10Co4Cr		
CD2 Cr_3C_2-25NiCr		
CD3 20NiCrBSi-WC12Co		
CD4 Mo-NiCrBSi		
OD Orijinal Disk		

Şekil 4.28. Frenleme testleri sonrası fren disk ve balatalarının görünümü

4.5. Fren Diski ve Balatalarının Yüzey Pürüzlülüğü

Sürtünme çiftlerinin aşınma yüzeyleri çalışma döngüleri boyunca bir geliştirme sürecinden geçer. Temas yüzey filminin fiziksel, kimyasal ve topografik özelliklerinde değişimler meydana gelir (Eriksson & Jacobson, 2000). Temas halinde birbiri üzerinde kayan yüzeyler arasında zamanla geniş boyut dağılımına sahip temas platoları oluşur. Bu temas platolarının oluşma ve ayrılma döngüsü sonucunda yüzey üzerinde oluşan yükseklik farklılıklardan dolayı sürtünme yüzeylerinde yeni bir topografya meydana gelir. Oluşan yüzey geometrisi, sürtünme çifti arasındaki temas basıncı, sertliği, kayma hızı, frenleme kuvveti, aşınma davranışı ve kimyasal özelliklerine göre şekillenir.

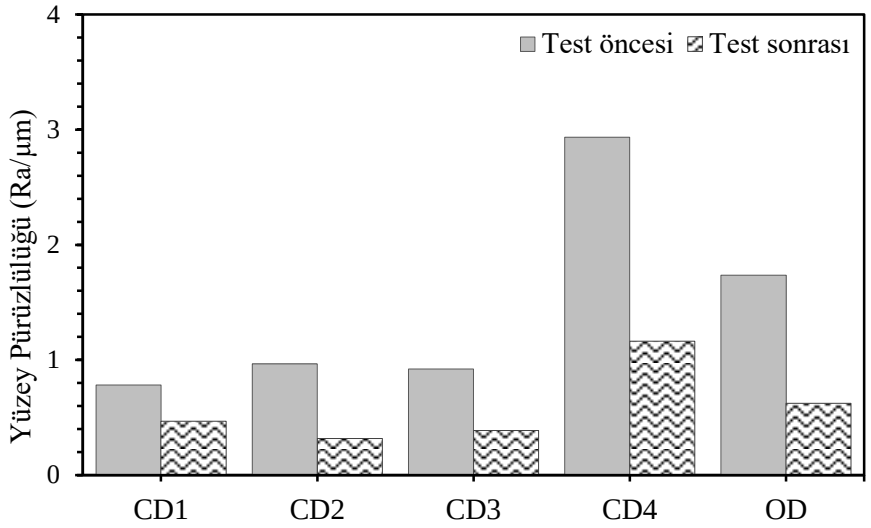
Testlerde kullanılan fren disk ve balatalarının yüzey pürüzlülük ölçümleri, frenleme testleri öncesi ve sonrası kayma yönüne dik olarak farklı bölgelerden yapılmış ve ölçüm sonuçları ortalama yüzey pürüzlülük değişimi olarak Çizelge 4.2'de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Fren diski ve balatalarının yüzey pürüzlülük değişimi

Pürüzlülük (Ra)	CD1	CD2	CD3	CD4	OD
T.Ö. disk yüzey pürüzlülüğü (µm)	0.781	0.966	0.922	2.933	1.737
T.S. disk yüzey pürüzlülüğü (µm)	0.466	0.317	0.385	1.163	0.623
T.Ö. balata yüzey pürüzlülüğü (µm)	2.043	2.085	2.130	2.203	2.121
T.S. balata yüzey pürüzlülüğü (µm)	1.628	1.704	1.842	2.011	1.960

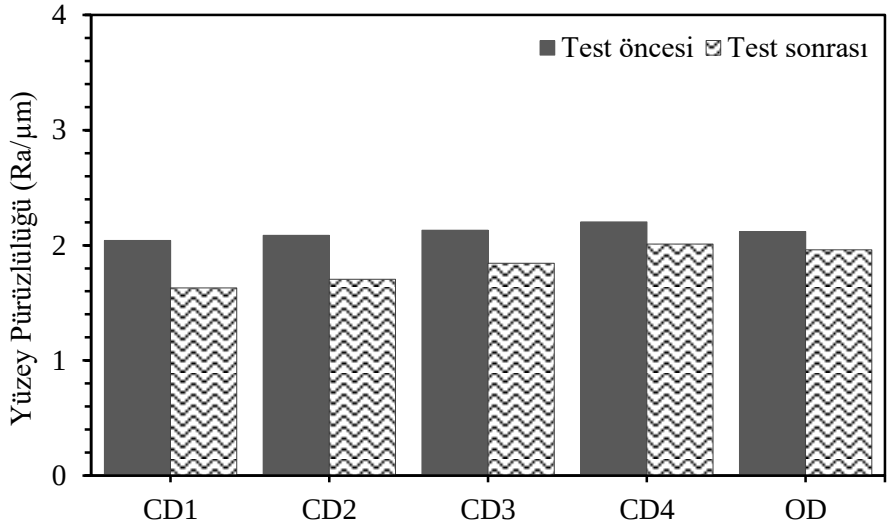
Frenleme testleri sonunda fren disklerine ait yüzey pürüzlülük değişimleri grafiksel olarak Şekil 4.29'da görülmektedir. Fren disklerinin testler sonunda yüzey pürüzlülük miktarında düzelmeler görülmüştür. Aşınma izlerinin bu şekilde düzeltilmesi literatürde bildirilmiştir (Mosleh et al., 2004). Bunun sebebi, frenleme sonucu sürtünme temas yüzeylerindeki pürüzlerin birleşmesiyle tribo-katmanların oluşması şeklinde ifade edilebilir (Shorowordi et al., 2004). CD1 ve CD3 diskleri arasındaki ortalama sürtünme katsayısı nispeten daha yüksek gerçekleştiğinden dolayı disk-balata arasında etkili bir sürtünme filmi gelişmiş ve pürüzlülük oranlarında daha fazla düşüş olmuştur. Kaplama pürüzlülüğünün 1 µm'den düşük veya eşit olduğu durumlarda karşı sürtünme malzemesinin aşınma oranı hafiftir ve dökme demir diske doğru kayma esnasındaki

özelliklere çok benzerken, disk aşınma oranı göz ardı edilebilir (Federici et al., 2016). Bu diskler arasındaki farklılığın ise kaplama tozlarının kimyasal yapısından kaynaklandığı söylenebilir. Orijinal diski yüzey pürüzlülük değişimi sürtünme katsayısıyla orantılı olarak iyileşmiştir. CD4 diskinin yüzey pürüzlülük değerinin yüksek olması, plazma püskürtme kaplamanın düşük püskürtme hızından kaynaklanan yüzey porozlarının sebep olduğu söylenebilir. Bu sebeple CD4 diskinin sürtünme katsayısı da düşük gerçekleşmiştir.



Şekil 4.29. Fren disklerinin yüzey pürüzlülük değişimi

Fren balatalarının frenleme testleri öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değişimleri grafiksel olarak Şekil 4.30'da görülmektedir. Disk yüzeyleri balata yüzeylerinden çok daha düzgün olduğundan, fren balataları daha büyük yükseklik farklılığı göstermiştir. Ayrıca balataların yüzey pürüzlülük değişimleri birbirine yakın seyretmiştir. Bu değişimin benzerliği, balataların aynı kompozisyona sahip olmasına atfedilebilir.



Şekil 4.30. Fren balatalarının yüzey pürüzlülük değişimi

4.6. Fren Disklerinin Mikrosertliği

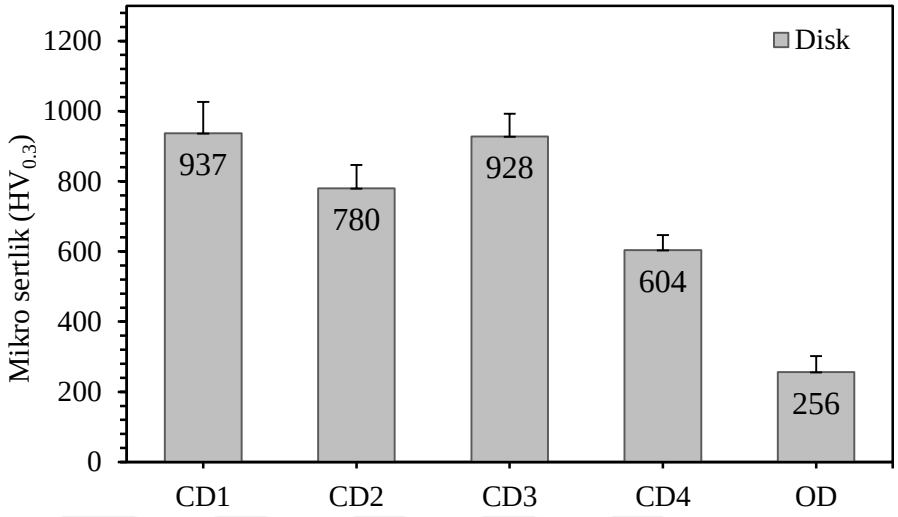
Testlerde kullanılan orijinal ve kaplanmış fren disklerinin Vickers mikrosertlik ölçümleri, disk yüzeyleri on eşit aralıklara bölünerek, 15 sn tutma süresinde 300 gr yük altında gerçekleştirilmiş ve her disk için yapılan on ölçüm sonunda belirlenen ortalama sertlik değerleri Çizelge 4.3'de görülmektedir.

Çizelge 4.3. Fren disklerinin mikrosertlik değerleri (ort. ±standart sapma)

$HV_{0.3}$	CD1	CD2	CD3	CD4	OD
Mikrosertlik	937 ±88	780 ±67	928 ±65	604 ±43	256 ±46

Ölçümlerden elde edilen ortalama sertlik değerleri grafiksel olarak Şekil 4.31'de görülmektedir. CD1 ve CD2 kodlu kaplanmış diskler sert tungsten karbür ve metal karbür fazlarının ihtiva etmesiyle sertlik değerleri oldukça yüksek ve literatür değerleri dahilindedir (Berger et al., 2008; Vashishtha et al., 2017). CD3 kodlu diskin içeriğinde kuvvetli bağ oluşturabilen Ni matris içerisine WC ilavesiyle sertlik değeri oldukça yükselmiştir. CD4 kodlu fren diskinin nispeten düşük sertliği, kaplama yöntemi ve Mo elementinin düşük sertliğinden kaynaklanmaktır. NiCrBSi içerisine katılan Mo 'nun büyük tane yapısı ve plazma püskürtme hızının etkisiyle porozite oluşumunun artması sertlik değerini olumsuz etkilemiştir. OD kodlu orijinal dökme demir diskin düşük

sertliği literatür sınırlarındadır (Riahi & Alpas, 2003). Oluşturulan kaplamaların sertlik değerleri, kaplama tozlarının kompozisyonu ve kaplama parametrelerinden etkilenmektedir. Oluşturulan kaplamaların sertliği bildirilen literatürle uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 4.31. Fren disklerinin mikrosertliği

4.7. Fren Disklerinin Salgı Kontrolü

Yüksek sıcaklık ve diğer etkenler sonucu fren disklerinde oluşabilecek yanal salgı diğer adıyla kaçıklık, sürtünme çiftinin dengesiz aşınmasını ve buna bağlı olarak frenleme performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Testler sürecinde oluşan yüksek basınç, hız ve sıcaklık etkisiyle fren disklerinde meydana gelebilecek salgı değişimini incelemek amacıyla test öncesi ve sonrası tüm disklerin iç ve dış yüzeylerinden komparatör yardımıyla yapılan ölçümün sonuçları Çizelge 4.4'te görülmektedir.

Çizelge 4.4. Fren disklerinin yanal salgı değişimi

	CD1		CD2		CD3		CD4		OD	
	İç	Dış	İç	Dış	İç	Dış	İç	Dış	İç	Dış
T.Ö.	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03
T.S.	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03

Literatürde disk yüzeyinin dönme merkezine göre yanal salgısı 0.05-0.10 mm aralığında olduğu bildirilmiştir. Ölçümlerden elde edilen veriler sonucunda, frenleme testlerinde oluşan yüksek basınç ve sıcaklık ile disklerin fiziksel özelliklerinin etkilenmediği görülmektedir.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, otomobil fren diskleri termal sprey yöntemleriyle kaplanmış ve fren test cihazı üzerinde oluşturulan farklı frenleme koşulları altındaki sürtünme performansı ve aşınma davranışı incelenmiştir. Piyasadan tedarik edilen ticari dört adet fren diski, termal sprey yöntemleri kullanılarak kompozit kaplama tozlarıyla kaplanmıştır. Çalışmalarımızda kullandığımız CD1 kodlu disk, WC-10Co4Cr sermet tozu ile, CD2 kodlu disk Cr_3C_2-25NiCr sermet tozu ile, CD3 kodlu disk 20NiCrBSi-WC12Co metalik tozu ile ve CD4 kodlu disk ise Mo-NiCrBSi kompozit metalik tozu ile kaplanmıştır. OD kodlu disk ise herhangi bir kaplama yapılmadan orijinal haliyle referans olarak kullanılmıştır. İlk üç fren diskinin kaplanmasında HVOF, dördüncü diskin kaplanmasında ise Plazma püskürtme yöntemleri kullanılmıştır. Kaplamaların mikrografları, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile oluşturulmuş, buna bağlı bir enerji dispersif (EDX) ve X-ışınları kırınımı (XRD) ile karakterize edilmiştir.

Disklerin frenleme testleri, SAE-J2430 prosedürüne uygun olarak düzenlenmiş laboratuvar ölçekli disk-balata tipi dinamometre üzerinde 312 frenleme çevriminde yapısal bütünlüğü bozulmadan tamamlanmıştır. Testler süresince benzer fren mesafesinde oluşturulan grafikler, test prosedürünün farklı bölümlerindeki frenleme durumlarına karşılık gelen sürtünme katsayısı, sıcaklık, hız, fren basıncı ve kuvvet parametrelerinin ortalama değerleri ile oluşturulmuştur. Disklerin mekanik özelliklerini belirleyebilmek için mikro sertlik incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca frenleme testlerinden önce ve sonra yapılan ölçümlerle disk ve balatalarının kütlesel ve boyutsal aşınma farkı belirlenerek yüzey pürüzlülük değişimiyle değerlendirilmiştir.

Disklerin mikroyapı incelemelerinde, optimize edilmiş püskürtme parametreleriyle oluşturulan CD1, CD2 ve CD3 kaplamaları, düşük porozite ve yüksek yoğunluğa sahip olmasıyla dökme demir altlıkla iyi bir bağlanma oluşturmuştur. HVOF kaplamaların sahip olduğu tipik lamel katmanları ve yoğun yapısı sayesinde iyi bir fiziksel ve mekanik bağlanma oluştuğu görülmüştür. CD4 kaplamada, plazma püskürtme yönteminin nispeten daha düşük püskürtme hızı ve oluşan oksit bileşikleriyle diğer kaplamalara göre daha gözenekli bir yapısı izlenmiştir. Ancak, CD4 kaplamanın literatürdeki Mo kaplamaların tipik yapısıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Kaplamaların mikrograflarında görülen porozite ve diğer düzensizlikler literatürle benzerlik içerisindedir. Ayrıca testler süresince kaplamalarda herhangi plastik deformasyon ile ayrılma veya parçalanma gözlemlenmemiştir.

Frenleme performans sonuçlarına göre, test boyunca CD1 diski, orijinal OD diskten daha yüksek ortalama sürtünme katsayısı geliştirmiştir. CD3 diski, OD disk ile benzer sürtünme katsayısı geliştirirken, en düşük sürtünme katsayısı ise CD4 diski üzerinde oluşmuştur. CD1, CD2, CD3 disklerde benzer sürtünme filmi oluşum eğilimleri görülmüştür. Orijinal ve kaplanmış diskler, sıcaklık artışıyla belirgin bir frenleme zayıflaması geliştirmeyerek iyi solma direnci göstermişlerdir. Frenleme testlerinde, frenleme basıncı ve sıcaklık artışıyla sürtünme katsayısında görülen azalma tüm disklerde limitler dâhilinde kalmıştır. Orijinal OD ve CD4 disklerinin hız değişimlerine karşı nispeten daha duyarlı olduğu söylenebilir. Testler sonunda fren disklerinin yüzeylerinde herhangi bir dökülme veya ayrılma oluşmamıştır. CD1 diski, termal bariyer etkisiyle en yüksek temas sıcaklığına ulaşmıştır. En düşük temas sıcaklığı ise en düşük sürtünme gösteren CD4 diskinde oluşmuştur.

Çizelge 5.1. Disklerin tribolojik test sonuçları

Karakteristik özellikler	CD1	CD2	CD3	CD4	OD
Mikrosertlik ($HV_{0.3}$)	937±88	780±67	928±65	604±43	256±46
Disk kütle kaybı (gr)	0.60	1.05	0.70	1.75	4.10
Balata kütle kaybı (gr)	6.05	5.30	3.70	4.95	5.90
T.S. disk yüzey pürüzlülüğü (Ra)	0.466	0.317	0.385	1.163	0.623
T.S. balata yüzey pürüzlülüğü (Ra)	1.628	1.704	1.842	2.011	1.960

Disk ve fren balatalarının aşınma davranışlarında, kaplanmış disklerin yüzeyleri sert malzemelerle kaplandığından aşınma miktarları düşük gerçekleşmiş, orijinal diskin aşınma miktarı ise nispeten daha yüksek olmuştur. Kaplamalar arasında en düşük aşınma, WC-10Co4Cr kaplanmış sert karbür fazı içeren CD1 diskinde, en yüksek aşınma ise Mo-NiCrBSi kaplanmış CD4 diskinde görülmüştür. Orijinal disk OD ve CD4 kaplaması metalik bazlı olması daha düşük yüzey sertliği sonucunda düşük aşınma direnci sergilemişlerdir. En yüksek balata aşınması CD1 diskinin balatalarında meydana gelmiştir. Termal bariyer etkisiyle oluşan yüksek sıcaklık ve yüksek sürtünme katsayısı aşınmanın artışında etkili olmuştur. En düşük balata aşınması ise düşük sıcaklık ve ortalama sürtünme katsayısı gösteren CD3 diskinin fren balatasında görülmüştür. Fren balatalarında oluşan boyutsal ve kütlesel aşınma miktarı birbiriyle uyumluluk göstermiştir. Testler süresince fren balatalarında herhangi bir parçalanmanın görülmemesi ve balataların aynı kompozisyona sahip olması da bu durumda etkili olmuştur.

Disk ve fren balatalarının aşınma sonucu yüzey pürüzlülük değişimlerinde, en yüksek pürüzlülüğe sahip CD4 diski en düşük sürtünme özelliği göstermiştir. Bu duruma plazma püskürtme yönteminin oluşturduğu nispeten gözenekli yapının sahip olduğu düşük yüzey alanının etkili olduğu söylenebilir. CD1 diski, en düşük yüzey pürüzlülüğüyle paralel olarak en yüksek sürtünme katsayısı sergilemiştir. Fren balatalarının yüzey pürüzlülük değişimlerinin ise benzer eğilimde olduğu olmuştur.

En yüksek mikro sertlik değeri CD1 ve CD3 disklerinde elde edilmiştir. Bu durum, HVOF sprey yönteminin yüksek püskürtme hızı ve kaplamaların sahip olduğu WC ve W_2C gibi sert karbür fazlarının oluşumu ile açıklanabilir. Kaplanmış diskler arasında en düşük sertliği nispeten yüksek poroziteye sahip CD4 diski göstermiştir. En düşük sertliği ise dökme demir orijinal OD diski sergilemiştir. Yapılan kaplamalar ile dökme demir diskin yüzey sertliğinde yaklaşık dört kata kadar artış gözlenmiştir.

Yüksek temas sıcaklıklarına rağmen CD1 diskinin orijinal diskten daha yüksek sürtünme katsayısı sergilemesi, bu diskin fren mesafesini azaltarak emniyetli bir durma sağlayacağının göstergesidir. CD2, CD3 ve CD4 disklerinin ise sergiledikleri rekabetçi frenleme performansı ve gösterdikleri daha düşük disk-balata aşınma oranıyla da taşıt kaynaklı partikül madde salınımının azaltılmasında faydalı olacağı görülmüştür.

Sonuç olarak, her tasarımın güçlü ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Bu çalışmada oluşturulan kaplamaların, motorlu taşıtlardaki yeni nesil fren diskleri için iyi bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.

- Çalışmanın devamı olarak, oluşturulacak kaplamaların taşıt üzerindeki gerçek ortam şartları altında frenleme testleri yapılabilir.
- Sonuçlara bağlı olarak, frenleme testlerine ilave edilecek bir ısı detektörü ile kaplanmış disklerin ısı dağılım haritası oluşturularak, ısı transferini arttırıcı etkenlerin göz önüne alınması önerilir.
- Ayrıca test düzeneğine ilave edilecek bir partikül tutucu ile disk-balata ikilisinin neden olduğu PM emisyonunun özellikleri belirlenerek, fren tozu oluşumunu azaltma konusunda çalışmalar yapılabilir.
- Yüksek hızlı taşıtlarda kullanılan C/C kompozit balataları ile frenleme testleri gerçekleştirilerek gerekli düzenlemeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

Abhinav, Krishnamurthy, N., & Jain, R. (2017). Corrosion kinetics of Al_2O_3+ZrO_2· 5CaO coatings applied on gray cast iron substrate. *Ceramics International*, *43*(17), 15708–15713.

Adebisi, A. A., Maleque, M. A., & Rahman, M. M. (2011). Metal matrix composite brake rotors: Historical development and product life cycle analysis. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, *4*, 471–480.

Alnaqi, A. A., Kosarieh, S., Barton, D. C., Brooks, P. C., & Shrestha, S. (2018). Material characterisation of lightweight disc brake rotors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, *232*(7), 555–565.

Ang, A. S. M., Howse, H., Wade, S. A., & Berndt, C. C. (2016). Development of processing windows for HVOF carbide-based coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, *25*(1–2), 28–35.

Antanaitis, D., & Rifici, A. (2006). The effect of rotor crossdrilling on brake performance. *Journal of Passenger Car: Mechanical Systems Journal*, *115*(6), 571–596.

Asgari, H., Saha, G., & Mohammadi, M. (2017). Tribological behavior of nanostructured high velocity oxy-fuel (HVOF) thermal sprayed WC-17NiCr coatings. *Ceramics International*, *43*(2), 2123–2135.

Berger, L. M., Saaro, S., Naumann, T., Wiener, M., Weihnacht, V., Thiele, S., & Suchánek, J. (2008). Microstructure and properties of HVOF-sprayed chromium alloyed WC-Co and WC-Ni coatings. *Surface and Coatings Technology*, *202*(18), 4417–4421.

Bettge, D., & Starcevic, J. (2003). Topographic properties of the contact zones of wear surfaces in disc brakes. *Wear*, *254*(3–4), 195–202.

Bijwe, J. (1997). Composites as friction materials: Recent developments in non-asbestos fiber reinforced friction materials - A review. *Polymer Composites*, *18*(3), 378–396.

Blau, P. J., Jolly, B. C., Qu, J., Peter, W. H., & Blue, C. A. (2007). Tribological investigation of titanium-based materials for brakes. *Wear*, *263*(7–12), 1202–1211.

Bolelli, G., Berger, L. M., Börner, T., Koivuluoto, H., Lusvarghi, L., Lyphout, C., Markocsan, N., Matikainen, V., Nylén, P., Sassatelli, P., Trache, R., & Vuoristo, P. (2015). Tribology of HVOF- and HVAF-sprayed WC-10Co4Cr hardmetal coatings: A comparative assessment. *Surface and Coatings Technology*, *265*, 125–144.

Bolelli, G., Berger, L. M., Börner, T., Koivuluoto, H., Matikainen, V., Lusvarghi, L., Lyphout, C., Markocsan, N., Nylén, P., Sassatelli, P., Trache, R., & Vuoristo, P. (2016). Sliding and abrasive wear behaviour of HVOF- and HVAF-sprayed Cr_3C_2-NiCr hardmetal coatings. *Wear*, *358–359*, 32–50.

Brecht, J., & Egner-Walter, A. (1998). Influence of material selection on stresses in ventilated brake discs. *SAE Technical Paper Series*, *980595*.

Breuer, B., & Karlheinz, H. B. (2008). Brake Technology Handbook, First English Edition. *SAE International*.

Carrasquero, E. J., Lesage, J., Puchi-Cabrera, E. S., & Staia, M. H. (2008). Fretting wear of HVOF Ni–Cr based alloy deposited on SAE 1045 steel. *Surface and Coatings Technology*, *202*(18), 4544–4551.

Chandra Verma, P., Menapace, L., Bonfanti, A., Ciudin, R., Gialanella, S., & Straffelini, G. (2015). Braking pad-disc system: Wear mechanisms and formation of wear fragments. *Wear*, *322–323*, 251–258.

Chatterley, T. C., & Macnaughtan, M. P. (1999). Cast iron brake discs-current position, performance and future trends in Europe. *Journal of Passenger Cars, Part 1*, *108*(6), 505–514.

Cho, M. H., Kim, S. J., Basch, R. H., Fash, J. W., & Jang, H. (2003). Tribological study of gray cast iron with automotive brake linings: The effect of rotor microstructure. *Tribology International*, *36*(7), 537–545.

Cueva, G., Sinatora, A., Guesser, W. L., & Tschiptschin, A. P. (2003). Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors. *Wear*, *255*(7–12), 1256–1260.

Demir, A., Samur, R., & Kılıçaslan, I. (2009). Investigation of the coatings applied onto brake discs on disc-brake pad pair. *Metalurgija*, *48*(3), 161–166.

Djafri, M., Bouchetara, M., Busch, C., Khatir, S., Khatir, T., Weber, S., Shbaita, K., & Abdel Wahab, M. (2018). Influence of thermal fatigue on the wear behavior of brake discs sliding against organic and semimetallic friction materials. *Tribology Transactions*, *61*(5), 861–868.

Du, L., Xu, B., Dong, S., Zhang, W., Zhang, J., Yang, H., & Wang, H. (2008). Sliding wear behavior of the supersonic plasma sprayed WC-Co coating in oil containing sand. *Surface and Coatings Technology*, *202*(15), 3709–3714.

Eriksson, M., Bergman, F., & Jacobson, S. (2002). On the nature of tribological contact in automotive brakes. *Wear*, *252*(1–2), 26–36.

Eriksson, M., & Jacobson, S. (2000). Tribological surfaces of organic brake pads. *Tribology International*, *33*(12), 817–827.

Federici, M., Menapace, C., Moscatelli, A., Gialanella, S., & Straffelini, G. (2016). Effect of roughness on the wear behavior of HVOF coatings dry sliding against a friction material. *Wear*, *368–369*, 326–334.

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 300 °C. *Tribology International*, *115*, 89–99.

Filip, P., Weiss, Z., & Rafaja, D. (2002). On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications. *Wear*, *252*(3–4), 189–198.

Furusjö, E., Sternbeck, J., & Cousins, A. P. (2007). PM10 source characterization at urban and highway roadside locations. *Science of the Total Environment*, *387*(1–3), 206–219.

Gao, Y. li, Wang, C. shan, Yao, M., & Liu, H. bin. (2007). The resistance to wear and corrosion of laser-cladding Al_2O_3 ceramic coating on Mg alloy. *Applied Surface Science*, *253*(12), 5306–5311.

Ghabchi, A., Varis, T., Turunen, E., Suhonen, T., Liu, X., & Hannula, S. P. (2010). Behavior of HVOF WC-10Co4Cr coatings with different carbide size in fine and coarse particle abrasion. *Journal of Thermal Spray Technology*, *19*(1–2), 368–377.

Gruzdys, E., & Juraitis, A. (2009). Influence of WC/Co concentration on structure and mechanical properties of the thermally sprayed WC/Co-NiCrBSi coatings. *Materials Science*, *15*(1), 35–39.

Güney, B., & Mutlu, I. (2019). Tribological properties of brake discs coated with Cr_2O_3-40% TiO_2 by plasma spraying. *Surface Review and Letters*, *26*(10).

Guo, C., Zhou, J., Chen, J., Zhao, J., Yu, Y., & Zhou, H. (2011). High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings. *Wear*, *270*(7–8), 492–498.

Hagino, H., Oyama, M., & Sasaki, S. (2015). Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating. *Wear*, *334–335*, 44–48.

Harrison, R. M., Jones, A. M., Gietl, J., Yin, J., & Green, D. C. (2012). Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to nonexhaust traffic particles derived from atmospheric measurements. *Environmental Science & Technology*, *46*(12), 6523–6529.

Hjortenkrans, D. S. T., Bergbäck, B. G., & Häggerud, A. V. (2007). Metal emissions from brake linings and tires: Case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005. *Environmental Science & Technology*, *41*(15), 5224–5230.

Hong, S., Wu, Y., Wang, B., Zhang, J., Zheng, Y., & Qiao, L. (2017). The effect of temperature on the dry sliding wear behavior of HVOF sprayed nanostructured WC-

CoCr coatings. *Ceramics International*, *43*(1), 458–462.

Hong, S., Wu, Y., Wang, Q., Ying, G., Li, G., Gao, W., Wang, B., & Guo, W. (2013). Microstructure and cavitation-silt erosion behavior of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) sprayed Cr_3C_2-NiCr coating. *Surface and Coatings Technology*, *225*, 85–91.

Huang, S., Sun, D., Xu, D., Wang, W., & Xu, H. (2015). Microstructures and properties of NiCrBSi/WC biomimetic coatings prepared by plasma spray welding. *Journal of Bionic Engineering*, *12*(4), 592–603.

Hulka, I., Şerban, V. A., Secoşan, I., Vuoristo, P., & Niemi, K. (2012). Wear properties of CrC-37WC-18M coatings deposited by HVOF and HVAF spraying processes. *Surface and Coatings Technology*, *210*, 15–20.

Hutton, T. J., McEnaney, B., & Crelling, J. C. (1999). Structural studies of wear debris from carbon-carbon composite aircraft brakes. *Carbon*, *37*(6), 907–916.

Hwang, B., Lee, S., & Ahn, J. (2004). Correlation of microstructure and wear resistance of molybdenum blend coatings fabricated by atmospheric plasma spraying. *Materials Science and Engineering A*, *366*(1), 152–163.

Jang, G. H., Cho, K. H., Park, S. B., Lee, W. G., Hong, U. S., & Jang, H. (2010). Tribological properties of C/C-SiC composites for brake discs. *Metals and Materials International*, *16*(1), 61–66.

Jens, W., Lyu, Y., Matjeka, V., & Söderberg, A. (2017). A pin-on-disc tribometer study of disc brake contact pairs with respect to wear and airborne particle emissions. *Wear*, *384–385*, 124–130.

Kamali, R., & Binesh, A. R. (2009). The importance of sensitive parameters effect on the combustion in a high velocity oxygen-fuel spray system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *36*(9), 978–983.

Karaoglanli, A. C., Oge, M., Doleker, K. M., & Hotamis, M. (2017). Comparison of tribological properties of HVOF sprayed coatings with different composition. *Surface and Coatings Technology*, *318*, 299–308.

Kermc, M., Kalin, M., & Vižintin, J. (2005). Development and use of an apparatus for tribological evaluation of ceramic-based brake materials. *Wear*, *259*(7–12), 1079–1087.

Kim, S. W., Park, K., Lee, S. H., Kang, K. H., & Lim, K. T. (2008). Thermophysical properties of automotive metallic brake disk materials. *International Journal of Thermophysics*, *29*(6), 2179–2188.

Kinkaid, N. M., O'Reilly, O. M., & Papadopoulos, P. (2003). Automotive disc brake squeal. *Journal of Sound and Vibration*, *267*(1), 105–166.

Kılıc, H., Mısırlı, C., & Mutlu, I. (2018). Investigating of braking and tribological features of granite powder additive brake linings. *Journal of the Balkan Tribological Association*, *24*(1), 52–63.

Krenkel, W., Heidenreich, B., & Renz, R. (2002). C/C-SiC composites for advanced friction systems. *Advanced Engineering Materials*, *4*(7), 427–436.

Kukutschová, J., Roubíček, V., Malachová, K., Pavlíčková, Z., Holuša, R., Kubačková, J., Mička, V., MacCrimmon, D., & Filip, P. (2009). Wear mechanism in automotive brake materials, wear debris and its potential environmental impact. *Wear*, *267*(5–8), 807–817.

Laribi, M., Vannes, A. B., & Treheux, D. (2007). Study of mechanical behavior of molybdenum coating using sliding wear and impact tests. *Wear*, *262*(11–12), 1330–1336.

Lee, C. W., Han, J. H., Yoon, J., Shin, M. C., & Kwun, S. I. (2010). A study on powder mixing for high fracture toughness and wear resistance of WC-Co-Cr coatings sprayed by HVOF. *Surface and Coatings Technology*, *204*(14), 2223–2229.

Lee, K. (1999). Numerical prediction of brake fluid temperature rise during braking and heat soaking. *SAE Technical Paper Series*, *01–0483*.

Lee, P., & Filip, P. (2013). Friction and wear of Cu-free and Sb-free environmental friendly automotive brake materials. *Wear*, *302*(1–2), 1404–1413.

Limpert, R. (1999). Brake design and safety, Second Edition. *Society of Automotive Engineers, Inc. Warrendale*.

Liu, S., Zheng, X., & Geng, G. (2010). Dry sliding wear behavior and corrosion resistance of NiCrBSi coating deposited by activated combustion-high velocity air fuel spray process. *Materials and Design*, *31*(2), 913–917.

Matikainen, V., Bolelli, G., Koivuluoto, H., Sassatelli, P., Lusvarghi, L., & Vuoristo, P. (2017). Sliding wear behaviour of HVOF and HVAF sprayed Cr_3C_2-based coatings. *Wear*, *388–389*, 57–71.

Matthews, S. (2014). Development of high carbide dissolution/low carbon loss Cr_3C_2-NiCr coatings by shrouded plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, *258*, 886–900.

Matthews, S., & Berger, L. M. (2016). Long-term compositional/microstructural development of Cr_3C_2-NiCr coatings at 500°C, 700°C and 900°C. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *59*, 1–18.

Matthews, S., Hyland, M., & James, B. (2003). Microhardness variation in relation to carbide development in heat treated Cr_3C_2-NiCr thermal spray coatings. *Acta Materialia*, *51*(14), 4267–4277.

Matthews, S., & James, B. (2010a). Review of thermal spray coating applications in the steel industry: Part 1 - Hardware in steel making to the continuous annealing process. *Journal of Thermal Spray Technology*, *19*(6), 1267–1276.

Matthews, S., & James, B. (2010b). Review of thermal spray coating applications in the steel industry: Part 2 - Zinc pot hardware in the continuous galvanizing line. *Journal of Thermal Spray Technology*, *19*(6), 1277–1286.

Miguel, J. M., Guilemany, J. M., & Vizcaino, S. (2003). Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes. *Tribology International*, *36*(3), 181–187.

Mishra, K. T., Kumar, A., Sinha, S., & Sharma, S. (2018). Investigation of sliding wear behaviour of HVOF carbide coating. *Materials Today: Proceedings*, *5*(9), 19539–19546.

Mosleh, M., Blau, P. J., & Dumitrescu, D. (2004). Characteristics and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials. *Wear*, *256*(11–12), 1128–1134.

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. *Wear*, *249*(7), 592–600.

Mutlu, I., Eldogan, O., & Findik, F. (2005). Production of ceramic additive automotive brake lining and investigation of its braking characterisation. *Industrial Lubrication and Tribology*, *57*(2), 84–92.

Mutlu, I., Oner, C., & Findik, F. (2007). Boric acid effect in phenolic composites on tribological properties in brake linings. *Materials & Design*, *28*(2), 480–487.

Mutlu, I. (2002). *Seramik katkılı asbestsiz otomotiv fren balatası üretimi ve frenleme karakteristiğinin deneysel incelenmesi*. (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Nakanishi, H., Kakihara, K., Nakayama, A., & Murayama, T. (2002). Development of aluminum metal matrix composites (Al-MMC) brake rotor and pad. *JSAE Review*, *23*(3), 365–370.

Niranatlumpong, P., & Koiprasert, H. (2010). The effect of Mo content in plasma-sprayed Mo-NiCrBSi coating on the tribological behavior. *Surface and Coatings Technology*, *205*(2), 483–489.

Nowotny, S., Techel, A., Luft, A., & Reitzenstein, W. (2018). Microstructure and wear properties of laser clad carbide coatings. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, *1993*(1), 985–993.

Ocelík, V., de Oliveira, U., de Boer, M., & de Hosson, J. T. M. (2007). Thick Co-based coating on cast iron by side laser cladding: Analysis of processing conditions and

coating properties. *Surface and Coatings Technology*, *201*(12), 5875–5883.

Österle, W., & Urban, I. (2006). Third body formation on brake pads and rotors. *Tribology International*, *39*(5), 401–408.

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.

Özen, A., Topuz, A., Kurt, Y. U., & Zekeriyabeyoğlu, N. (2018). Tribological study of sintered iron based and copper based brake materials by pin-on-disc method. *Materials Testing*, *60*(2), 191–196.

Özkavak, H. V., Şahin, Ş., Saraç, M. F., & Alkan, Z. (2019). Comparison of wear properties of HVOF sprayed WC-Co and WC-CoCr coatings on Al alloys. *Materials Research Express*, *6*, 096554.

Peng, L. (2013). Preparation and tribological properties of NiCrBSiC reinforced laser alloying layer. *Tribology Transactions*, *56*(4), 697–702.

Planche, M. P., Liao, H., Normand, B., & Coddet, C. (2005). Relationships between NiCrBSi particle characteristics and corresponding coating properties using different thermal spraying processes. *Surface and Coatings Technology*, *200*(7), 2465–2473.

Pope, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, *287*(9), 1132–1141.

Priyan, M. S., Azad, A., & Araffath, S. Y. (2016). Influence of HVOF parameters on the wear resistance of Cr_3C_2-NiCr coating. *Journal of Materials Science & Surface Engineering*, *4*(2), 355–359.

Rashid, A. (2014). Overview of disc brakes and related phenomena - a review. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, *10*(4), 257.

Riahi, A. R., & Alpas, A. T. (2003). Wear map for grey cast iron. *Wear*, *255*(1–6), 401–409.

Roubicek, V., Raclavska, H., Juchelkova, D., & Filip, P. (2008). Wear and environmental aspects of composite materials for automotive braking industry. *Wear*, *265*(1–2), 167–175.

Sahraoui, T., Fenineche, N. E., Montavon, G., & Coddet, C. (2003). Structure and wear behaviour of HVOF sprayed Cr_3C_2-NiCr and WC-Co coatings. *Materials and Design*, *24*(5), 309–313.

Samur, R., & Demir, A. (2012). Wear and corrosion performances of new friction materials for automotive industry. *Metalurgija*, *51*(1), 94–96.

Schwetzke, R., & Kreye, H. (1999). Microstructure and properties of tungsten carbide coatings sprayed with various high-velocity oxygen fuel spray systems. *Journal of Thermal Spray Technology*, *8*(3), 433–439.

Shin, M. W., Cho, K. H., Kim, S. J., & Jang, H. (2010). Friction instability induced by corrosion of gray iron brake discs. *Tribology Letters*, *37*(2), 149–157.

Shorowordi, K. M., Haseeb, A. S. M. A., & Celis, J. P. (2004). Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminum MMC sliding against phenolic brake pad. *Wear*, *256*(11–12), 1176–1181.

Sidhu, T. S., Prakash, S., & Agrawal, R. D. (2005). State of the art of HVOF coating investigations - A review. *Marine Technology Society Journal*, *39*(2), 53–64.

Souza, V. A. D., & Neville, A. (2006). Mechanisms and kinetics of WC-Co-Cr high velocity oxy-fuel thermal spray coating degradation in corrosive environments. *Journal of Thermal Spray Technology*, *15*(1), 106–117.

Stanford, M. K., & Jain, V. K. (2001). Friction and wear characteristics of hard coatings. *Wear*, *251*(1–12), 990–996.

Stewart, S., Ahmed, R., & Itsukaichi, T. (2005). Rolling contact fatigue of post-treated WC–NiCrBSi thermal spray coatings. *Surface and Coatings Technology*, *190*(2–3), 171–189.

Stoica, V., Ahmed, R., Itsukaichi, T., & Tobe, S. (2004). Sliding wear evaluation of hot isostatically pressed (HIPed) thermal spray cermet coatings. *Wear*, *257*(11), 1103–1124.

Straffelini, G., Chandra, P. V., Metinoz, I., Ciudin, R., Perricone, G., & Gialanella, S. (2016). Wear behavior of a low metallic friction material dry sliding against a cast iron disc: Role of the heat-treatment of the disc. *Wear*, *348–349*, 10–16.

Straffelini, G., Ciudin, R., Ciotti, A., & Gialanella, S. (2015). Present knowledge and perspectives on the role of copper in brake materials and related environmental issues: A critical assessment. *Environmental Pollution*, *207*, 211–219.

Sun, N., Shan, H., Zhou, H., Chen, D., Li, X., Xia, W., & Ren, L. (2012). Friction and wear behaviors of compacted graphite iron with different biomimetic units fabricated by laser cladding. *Applied Surface Science*, *258*(19), 7699–7706.

Szymański, K., Hernas, A., Moskal, G., & Myalska, H. (2015). Thermally sprayed coatings resistant to erosion and corrosion for power plant boilers - A review. *Surface and Coatings Technology*, *268*, 153–164.

Thornton, R., Slatter, T., Jones, A. H., & Lewis, R. (2011). The effects of cryogenic processing on the wear resistance of grey cast iron brake discs. *Wear*, *271*(9–10), 2386–2395.

Tillmann, W., Baumann, I., Hollingsworth, P. S., & Hagen, L. (2014). Sliding and rolling wear behavior of HVOF-sprayed coatings derived from conventional, fine and nanostructured WC-12Co powders. *Journal of Thermal Spray Technology*, *23*, 262–280.

Timur, M., & Kılıc, H. (2013). Marble waste using produced of automotive brake pad of friction coefficient different pad brake pads with comprasion. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, *19*(1), 10–14.

Tobar, M. J., Álvarez, C., Amado, J. M., Rodríguez, G., & Yáñez, A. (2006). Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi-WC coatings on stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, *200*(22–23), 6313–6317.

Tung, S. C., & McMillan, M. L. (2004). Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future. *Tribology International*, *37*(7), 517–536.

Uyyuru, R. K., Surappa, M. K., & Brusethaug, S. (2007). Tribological behavior of Al-Si-SiCp composites/automobile brake pad system under dry sliding conditions. *Tribology International*, *40*(2), 365–373.

Vashishtha, N., Khatirkar, R. K., & Sapate, S. G. (2017). Tribological behaviour of HVOF sprayed WC-12Co, WC-10Co-4Cr and Cr_3C_2–25NiCr coatings. *Tribology International*, *105*, 55–68.

Vernhes, L., Lee, D. A., Poirier, D., Li, D., & Klemberg-Sapieha, J. E. (2013). HVOF Coating case study for power plant process control ball valve application. *Journal of Thermal Spray Technology*, *22*(7), 1184–1192.

Wahlström, J., Olander, L., & Olofsson, U. (2012). A pin-on-disc study focusing on how different load levels affect the concentration and size distribution of airborne wear particles from the disc brake materials. *Tribology Letters*, *46*(2), 195–204.

Ward, L. P., & Pilkington, A. (2014). The dry sliding wear behavior of HVOF-sprayed WC: Metal composite coatings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *23*(9), 3266–3278.

Watremez, M., Marguet, B., Bricout, J. P., & Oudin, J. (1996). Friction, temperature, and wear analysis for ceramic coated brake disks. *Journal of Tribology*, *118*(3), 457–465.

Xie, M., Zhang, S., & Li, M. (2013). Comparative investigation on HVOF sprayed carbide-based coatings. *Applied Surface Science*, *273*, 799–805.

Yuan, J., Zhan, Q., Huang, J., Ding, S., & Li, H. (2013). Decarburization mechanisms of WC-Co during thermal spraying: Insights from controlled carbon loss and microstructure characterization. *Materials Chemistry and Physics*, *142*(1), 165–171.

Yun, R., Filip, P., & Lu, Y. (2010). Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials. *Tribology International*, *43*(11), 2010–2019.

Zhang, C., Liu, L., Xu, H., Xiao, J., Zhang, G., & Liao, H. (2017). Role of Mo on tribological properties of atmospheric plasma-sprayed Mo-NiCrBSi composite coatings under dry and oil-lubricated conditions. *Journal of Alloys and Compounds*, *727*, 841–850.

Zhang, W. C., Liu, L. Bin, Zhang, M. T., Huang, G. X., Liang, J. S., Li, X., & Zhang, L. G. (2015). Comparison between WC-10Co-4Cr and Cr_3C_2-25NiCr coatings sprayed on H13 steel by HVOF. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, *25*(11), 3700–3707.

Zhou, S., Zeng, X., Hu, Q., & Huang, Y. (2008). Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization. *Applied Surface Science*, *255*(5), 1646–1653.

Zhou, W., Zhou, K., Li, Y., Deng, C., & Zeng, K. (2017). High temperature wear performance of HVOF-sprayed Cr_3C_2-WC-NiCoCrMo and Cr_3C_2 -NiCr hardmetal coatings. *Applied Surface Science*, *416*, 33–44.

Zuber, C., & Heidenreich, B. (2006). Development of a net shape manufacturing method for ventilated brake discs in single piece design. *Materials Science & Engineering Technology*, *37*(4), 301–308.

ÖZGEÇMİŞ

Halil KILIÇ 1986 yılında Balıkesir'in Gönen ilçesinde doğmuştur. İlk ve orta öğrenimi aynı şehirde tamamlamıştır. 2008 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Öğretmenliği Bölümünden mezun olmuştur. 2008 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında başladığı Yüksek Lisans eğitimini 2010 yılında tamamlamıştır. 2017 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. Askerlik hizmetini tamamladıktan sonra, 2011 yılında Kırklareli Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak göreve başlamıştır. Halen Kırklareli Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulunda görev yapmaktadır.

TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER

Kılıç, H., & Mısırlı, C. (2020). Investigation of tribological behavior of 20NiCrBSi-WC12Co coated brake disc by HVOF method. *Materials Research Express*, *7*(1), 016560.

Kılıç, H., Mısırlı, C., & Mutlu, I. (2018). Investigating of braking and tribological features of granite powder additive brake linings. *Journal of the Balkan Tribological Association, 24*(1), 52–63.

Kılıç, H., & Mısırlı, C. (2018). Investigation of the effect of the coating performed by thermal spraying techniques on the automotive brake disc. *3rd Organic Electronic Material Technologies (OEMT),* Kırklareli.

Mısırlı, C., & Kılıç, H. (2018). Investigation of the use of intermetallic compounds as brake disc coating material. *3rd Organic Electronic Material Technologies (OEMT),* Kırklareli.