



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HVOF TERMAL SPREY KAPLAMA
YÖNTEMİ İLE YENİ NESİL DÖKME
DEMİRLERİN (SSF) AŞINMA VE
KOROZYON DİRENCİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Tarık Ziyad UYSAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Anabilim Dalı**

Temmuz-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Tarık Ziyad UYSAL tarafından hazırlanan “HVOF Termal Sprey Kaplama Yöntemi ile Yeni Nesil Dökme Demirlerin (SSF) Aşınma ve Korozyon Direncinin Geliştirilmesi” adlı tez çalışması 03/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ARICI
(Selçuk Üniversitesi)

.....

Danışman

Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Şahin ATAŞ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından 241019014 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Tarık Ziyad UYSAL

03.07.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HVOF TERMAL SPREY KAPLAMA YÖNTEMİ İLE YENİ NESİL DÖKME DEMİRLERİN (SSF) AŞINMA VE KOROZYON DİRENCİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Tarık Ziyad UYSAL

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM

2025, 75 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ARICI
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Şahin ATAŞ**

Bu tez çalışmasında katı çözeltiler ile güçlendirilmiş yeni nesil ferritik sünek dökme demirlerde (SSF) geleneksel kaplama yöntemlerine kıyasla daha kaliteli yüzey özellikleri sunan HVOF (Yüksek Hızda Oksi Yakıt Püskürtme, High Velocity Oxygen Fuel) termal spreycaplama yöntemi kullanılarak aşınmaya ve korozyona karşı dirençli, yüksek sertliğe sahip yüzey geliştirilmesi amaçlanmıştır. SSF (Solid solution strengthened ferritic ductile cast iron) olarak adlandırılan katı çözeltiler ile güçlendirilmiş ferritik sünek dökme demirler yeni (ikinci) nesil dökme demirler olup dövme ve döküm çeliklere alternatif olarak düşünülmektedir. Nispeten düşük maliyet, düşük erime noktası, hafiflik, akışkanlık, dökülebilirlik, işlenebilirlik ve parça boyunca homojen mekanik özellikler gibi üstünlüklere sahip olmalarına rağmen zorlayıcı koşullarda aşınma, korozyon ve yorulma direnci nispeten zayıftır. Bu noktada yüksek yüzey kalitesine sahip parçaların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda yüksek kaliteli yüzey özellikleri sunan HVOF termal spreycaplama yöntemi kullanılarak aşınmaya ve korozyona karşı dirençli, yüksek sertliğe sahip yüzeyler geliştirilmektedir. Önerilen çalışmada EN-GJS-600-10 standardına sahip yeni nesil dökme demirlere HVOF yöntemi ile WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplama yapılarak yüksek yüzey sertliğine, yüksek aşınma ve korozyon direncine sahip parçaların geliştirilmesi amaçlanmıştır.

HVOF termal spreycaplama yöntemiyle SSF dökme demirlere uygulanan WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalar, altlık malzemeye kıyasla önemli performans iyileştirmeleri sağlamıştır. Sertlikte belirgin bir artış gözlemlenmiştir; WC-Co kaplaması 1176 HV, WC-Co(Cr) kaplaması ise 1248 HV sertlik değerine ulaşarak, altlık malzemenin (~199 HV) yaklaşık 6 katı sertlik sağlamıştır. Aşınma direnci açısından, kaplamasız numunede 200 µm derinliğinde aşınma izi oluşurken, kaplamalı numunelerde yalnızca yüzeysel çizikler tespit edilmiş ve SEM-EDS analizleri aşınma bölgelerinde altlık malzemeye (Fe) ulaşılmadığını doğrulamıştır. Korozyon direncinde özellikle WC-Co kaplama öne çıkmıştır. -0,230 V açık devre potansiyeli (OCP) ile altlığa (-0,481 V) kıyasla daha asil davranış sergilemiş, PDP ve EIS analizleri de düşük korozyon akım yoğunluğu ve yüksek yük transfer direnci göstererek üstün koruma sağladığını kanıtlamıştır. Yapışma dayanımı çizik testlerinde net olarak görülmüştür; WC-Co(Cr) kaplama 30,1 N kritik yük değerine ulaşarak kırılma direncinde Cr katkısının olumlu etkisini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, her iki HVOF kaplaması da SSF dökme demirin yüzey performansını sertlik, aşınma ve korozyon direnci açısından bütüncül bir şekilde geliştirmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma direnci, HVOF termal spreycaplama, Katı çözeltiler ile güçlendirilmiş ferritik sünek dökme demirler (SSF), Korozyon direnci,

ABSTRACT

MS THESIS

IMPROVING THE WEAR AND CORROSION RESISTANCE OF NEW GENERATION CAST IRONS (SSF) WITH HVOF THERMAL SPRAY COATING METHOD

Tarık Ziyad UYSAL

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Metallurgical and Materials Engineering**

Advisor: Assoc.Prof. Dr. Mehmet YILDIRIM

2025, 75 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Mehmet YILDIRIM

Assist. Prof. Dr. Gökhan ARICI

Assist. Prof. Dr. Mehmet Şahin ATAŞ

In this thesis, it is aimed to develop a wear and corrosion resistant, high hardness surface on solid solution strengthened ferritic ductile cast iron (SSF) by using HVOF (High Velocity Oxy Fuel Spraying) thermal spray coating method which offers better surface properties compared to conventional coating methods. Solid solution strengthened ferritic ductile cast iron (SSF) is a new (second) generation of cast iron and is considered as an alternative to forged and cast steels. Although they have advantages such as relatively low cost, low melting point, light weight, fluidity, castability, machinability and homogeneous mechanical properties throughout the part, they have relatively poor wear, corrosion and fatigue resistance under harsh conditions. At this point, it is necessary to develop parts with high surface quality. In this context, wear and corrosion resistant, high hardness surfaces are developed by using HVOF thermal spray coating method which offers high quality surface properties. In the proposed study, it is aimed to develop parts with high surface hardness, high wear and corrosion resistance by coating WC-Co and WC-Co(Cr) with HVOF method on new generation cast irons with EN-GJS-600-10 standard.

WC-Co and WC-Co(Cr) coatings applied to SSF cast irons using the HVOF thermal spray coating method have provided significant performance improvements compared to the base material. A noticeable increase in hardness has been observed; the WC-Co coating achieved a hardness value of 1176 HV, while the WC-Co(Cr) coating reached 1248 HV, providing approximately six times the hardness of the base material (~199 HV). In terms of wear resistance, while a wear mark 200 µm deep formed on the uncoated sample, only superficial scratches were detected on the coated samples, and SEM-EDS analyses confirmed that the substrate material (Fe) was not reached in the wear areas. The WC-Co coating stood out particularly in terms of corrosion resistance. With an open-circuit potential (OCP) of -0,230 V, it exhibited more noble behavior compared to the substrate (-0,481 V), and PDP and EIS analyses also demonstrated superior protection by showing low corrosion current density and high charge transfer resistance. Adhesion strength was clearly evident in scratch tests; the WC-Co(Cr) coating reached a critical load value of 30,1 N, demonstrating the positive effect of Cr addition on fracture resistance. In conclusion, both HVOF coatings comprehensively improved the surface performance of SSF cast iron in terms of hardness, wear resistance, and corrosion resistance.

Keywords: Corrosion resistance, HVOF thermal spray coating, Next generation cast irons, Solid solution strengthened ferritic ductile cast irons (SSF)

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, “HVOF Termal Sprey Kaplama Yöntemi ile Yeni Nesil Dökme Demirlerin (SSF) Aşınma ve Korozyon Direncinin Geliştirilmesi” başlığı altında, malzeme bilimi ve mühendisliği alanında gerçekleştirilmiştir. Gelişen teknoloji ve sanayinin ihtiyaçları doğrultusunda, yüksek performanslı yüzey kaplama yöntemlerinin önemi her geçen gün artmaktadır. Bu bağlamda, çalışmam HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) termal sprej kaplama teknolojisinin, yeni nesil dökme demirlerin yüzey özelliklerini iyileştirmedeki etkinliğini araştırmayı amaçlamaktadır.

Tez sürecim boyunca hem teorik bilgi hem de pratik laboratuvar deneyimi açısından önemli kazanımlar elde ettim. Aşınma ve korozyon gibi endüstride sıkça karşılaşılan problemlerin çözümüne katkı sunmak amacıyla yürüttüğüm bu çalışma, aynı zamanda akademik gelişimimde de önemli bir basamak olmuştur.

Bu süreçte bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren, her zaman destekleyici ve sabırlı yaklaşımıyla beni yönlendiren değerli tez danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM ‘a en içten teşekkürlerimi sunarım. Numune üretim ve laboratuvar çalışmalarında teknik desteklerini esirgemeyen başta DİRİNLER DÖKÜM A.Ş. ailesine, DEKA KAPLAMA firmasına, değerli meslektaşlarım Sayın Malik UĞUR ve Hüseyin ATASAYAN’ a ve her aşamada desteğini hissettiren tüm çalışma arkadaşlarıma ayrıca minnettarım.

Bu akademik yolculuğumda her zaman yanımda olan, sabır ve anlayışla beni destekleyen aileme ve sevdiklerime sonsuz teşekkür ederim.

Tüm bu destekler sayesinde ortaya çıkan bu tezin, ilgili alanda yapılacak olan çalışmalara katkı sunmasını ve uygulama alanında fayda sağlamasını temenni ederim.

Tarık Ziyad UYSAL
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET IV

ABSTRACT.....	V
ÖNSÖZ	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Yeni Nesil (Katı Çözelti ile Güçlendirilmiş) Küresel Grafitli Dökme Demirler 3	
1.1.1. Yeni nesil (katı çözelti ile güçlendirilmiş) küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması ve genel özellikleri	4
1.1.2. Yeni nesil dökme demirlerin katı çözelti ile sertleştirme mekanizması	6
1.1.3. Yeni nesil sfero dökme demirlerin özellikleri	8
1.2. HVOF (Yüksek Hızda Oksi Yakıt Püskürtme, High Velocity Oxygen Fuel) Termal Sprey Kaplama Prosesi.....	9
1.2.1. HVOF termal sprey kaplama prosesi çalışma mekanizması	9
1.2.2. HVOF püskürtme yönteminde kullanılan başlıca toz alaşımları:	12
1.2.3. HVOF püskürtme yönteminin avantajları.....	12
1.2.4. HVOF püskürtme yönteminin dezavantajları	13
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM	25
3.1. EN-GJS-600-10 Standardı Yeni Nesil Dökme Demir Parçaların Geleneksel Kum Kalıba Döküm Yöntemi ile Üretimi	25
3.1.1. Kalıplama.....	27
3.1.2. Ocak hazırlama	28
3.2. Kaplama Öncesi Yeni Nesil Dökme Parçaların Yapısal ve Mekanik Karakterizasyonu	28
3.2.1. Kimyasal analiz ve mikro yapı analizi.....	28
3.2.2. Sertlik testi	30
3.2.3. Çekme testi	30
3.3. HVOF Kaplama	31
3.4. HVOF Kaplama Sonrası Karakterizasyon	31
3.4.1. XRD analizi	31
3.4.1. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDS) analizleri	32
3.4.2. Mikrosertlik ölçümleri	33
3.4.3. Aşınma testleri	33
3.4.4. Korozyon testleri.....	34
3.4.5. Çizik testleri.....	35
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	36
4.1. SSF Altlık	36

4.2. HVOF Termal Sprey Kaplama Yöntemi ile Kaplama.....	40
4.3. Aşınma Testi.....	47
4.3.1. Aşınma testi sonuçları.....	50
4.4. Çizik Testi.....	51
4.4.1. Çizik testi sonuçları	59
4.5. Korozyon Testi	60
4.5.1. Açık devre potansiyeli (OCP) sonuçları	64
4.5.2. Potansiyodinamik polarizasyon (PDP) sonuçları	65
4.5.3. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) sonuçları.....	65
4.5.4. Genel değerlendirme.....	65
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
5.1. Sonuçlar	67
5.2. Öneriler	67
6. KAYNAKLAR	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al	: Alüminyum
C	: Karbon
Co	: Kobalt
CO	: Karbon Monoksit
Cr	: Krom
Cr ₃ C ₂	: Krom Karbür
CrC	: Krom Karbür
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
NaCl	: Sodyum Klorür
Ni	: Nikel
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
WC	: Tungsten Karbür

Kısaltmalar

CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition)
DPH	: Vickers Sertliği (Diamond Pyramid Hardness)
EIS	: Elektrokimyasal Empedans Spektrometresi
FESEM-EDS	: Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu- Enerji Dağılımlı Spektrometresi
Gpa	: Gigapaskal
HCl	: Hidroklorik Asit
HV	: Vickers Sertliği (Hardness Vickers)
HVOF	: Yüksek Hızda Oksi Yakıt Püskürtme (High Velocity Oxygen Fuel)
MPa	: Megapaskal
OCP	: Açık devre potansiyeli (Open Circuit Potential)
OES	: Optik Emisyon Spektrometresi
PDP	: Potansiyodinamik Pola
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SSF	: Katı Çözelti ile Güçlendirilmiş Ferritik Sünek Dökme Demirler (Solid Solution Strengthened Ferritic Ductile Cast Iron)
XRD	: X-ışınları yöntemi (X-Ray Diffraction)

1. GİRİŞ

20. yüzyılın sonunda ortaya çıkan dökme demir türü olan küresel grafitli dökme demirler, grafit yapısının küresel halde olmasından dolayı bu tip dökme demir türlerine “küresel grafitli dökme demir” adı verilmiştir. Bu dökme demirler yaklaşık olarak %2-3 oranları arasında silisyum içeren dökme demirlerdir. Matris yapısı ferrit, perlit ya da bu iki yapının karışımından meydana gelmektedir. Malzemenin yapısında bulunan perlit yapı malzemeyi güçlendiren, aynı zamanda malzemenin sünekliğini de düşüren bir etkisi bulunmaktadır. Bundan dolayı matris yapıda ferrit ve perlit oranında değişimler yapılarak, istenen mekanik özellikler (% uzama miktarı, sertlik ve dayanım miktarı vb.) yakalanması sağlanabilir. Geleneksel dökme demirlerin homojen bir matris yapısının olmayışı, doğal olarak uzama ve sertlik gibi mekanik özelliklerin de malzeme yapısında homojen bir dağılım göstermeyeceğidir. Tam olarak ferritik bir yapıda bulunan yeni nesil dökme demirler ise parçanın genelinde mekanik özelliklerin tam anlamıyla homojen olduğu görülmektedir. Ferritik sfero dökme demirlerde perlitin sağladığı güçlendirici etkiden yararlanamadığımız için, katı çözelti sertleşmesi ile mekanik dayanım artırılmaktadır. Katı çözelti sertleşmesi mekanizmasının çalışması silisyum elementi ile sağlanmaktadır. Ferritik sfero dökme demir malzemelerin dayanımları içerdikleri yüksek miktardaki silisyum sayesinde oluşturdukları katı çözelti sertleşmesi ile artmaktadır.

Mekanik özellikleri optimize edebilmek için birinci nesil sfero dökme perlit/ferrit oranını ayarlarken yaşanan problemler vardır. Yapıda bulunan perlit miktarı tek başına kimyasal birleşime bağlı olarak değil, aynı zamanda soğuma hızına bağlı bir şekilde değiştiğinden dolayı, kesit kalınlığı farkından kaynaklanan soğuma hızı değişimleri perlit miktarını da değiştirmektedir. Bundan dolayı farklı kesit kalınlıklarına sahip bir paraca da kalın kesitli bölgelerin geç soğuması farkından kaynaklı ferrit miktarı yüksek iken, ince kesitli bölgelerde hızlı katılaşma sonucu perlit miktarı yüksek olacaktır. Matris yapısının homojen olmamasından kaynaklı uzama, dayanım, sertlik gibi mekanik özelliklerde parça genelinde homojen bir yapıda olmayacağını gösterecektir. Bu durum bir yandan istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesinde zorluk yaratırken, bir yandan da parçaların işlenmesi tarafında sorunlarla karşılaşılmasına neden olmaktadır. Tam da bu noktada yeni nesil katı çözelti ile sertleştirilmiş sfero dökme demirlerin üstün tarafı ortaya çıkmaktadır. Tamamen ferritik

bir matris yapısına sahip SSF malzeme grubunun en iyi tarafı parça üzerinde homojen mekanik özellikler elde edilmesidir. Bu malzeme grubunda matrisin tamamen ferritik bir yapıda oluşu, ferrit fazının yumuşak ve oldukça sünek oluşu yeni nesil dökme demirlerin geleneksel sfero dökme demirlere kıyasla büyük avantajlar sağlamaktadır. Yeni nesil dökme demirlerin dayanımlarının yüksek oluşu ise katı çözelti mekanizmasından gelmektedir. Yeni nesil dökme demirler içeriğindeki yüksek silisyum nedeniyle benzer seviyede uzama gösteren birinci nesil sfero dökme demirlere kıyasla daha yüksek dayanım göstermektedir. Katı çözelti sertleşmesi aynı zamanda akma dayanımını da artırdığı bilinmektedir. Yeni nesil dökme demirlerin matris yapısında bulunan yüksek silisyum içeriği de aynı zamanda, parçada karbür oluşturma eğilimini de çok büyük oranda azalmaktadır. Yüksek miktarda bulunan silisyum elementinin bir diğer avantajı ise ötektoid dönüşüm sıcaklığının artırılması sonucu parçaların yüksek sıcaklıkta çalışma performanslarının artırılmasında rol oynadığı bilinmektedir. Literatür araştırmalarında çelik parçalara bir alternatif olarak kullanılması sonucu ortaya çıkmıştır. Buna bağlı olarak geliştirilen bu alternatif sayesinde parça ağırlıklarında ve işleme maliyetlerinde azalış gösteren sonuçlarda elde edildiği gözlenmiştir.

Yeni nesil dökme demirlerin sağladığı avantajlar nedeniyle dövme parçaların yerine kullanılması kullanılımasının önü de açılmıştır. Rüzgâr türbini parçaları, biçerdöver, traktör ve iş makinası parçaları, ağır vasıta araçların arka aks, diferansiyel mafsallı ve şasi elemanları gibi kaba ve nispeten ağır parçaların çelik dövme yerine yeni nesil dökme demirden geleneksel kum kalıba döküm yöntemi ile üretilerek büyük oranlarda parça ağırlıklarında azaltma sağlanmıştır. Ancak yeni nesil sfero dökme demirlerin sağladığı birçok üstün yeteneklerine rağmen giderilmesi gereken problemler ve geliştirilmesi gereken yanları da aşıkardır. Özellikle birbiri ile eş çalışan parçalarda temas eden yüzeyler de oluşan çatlak, boşluk gibi kusurların hem aşınmaya hem de oksijenin parça iç kısmına difüzyonu sonucu oksidasyona ve korozyona sebebiyet vermesidir. Bu amaçla bu prensipte çalışan parçaların aşınmaya ve korozyona karşı sert, dirençli ve koruyucu kaplamalara ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır.

Dayanım ve işlenebilirlik özelliklerinin üstün oluşu nedeniyle yeni nesil dökme demirler son yıllarda çelik malzemeler yerine kullanılarak hem ağırlık hafifletme hem de düşük maliyetli işlenebilirlik avantajlarından dolayı hızla yayılmaktadır. Endüstriyel açıdan yeni nesil dökme demirlerden imal edilmiş parçaların performanslarını ve kullanım ömürlerinin artırılması için talepler bulunmaktadır. Bu nedenler non yıllarda geleneksel kaplama yöntemlerine kıyasla popülerliği artan HVOF (Yüksek Hızda Oksi

Yakıt Püskürtme, High Velocity Oxygen Fuel) termal sprey kaplama yöntemi kullanılarak korozyona ve aşınmaya karşı dirençli, yüksek yüzey kalitesi ve sertliğine sahip parçalar geliştirilmektedir.

1.1. Yeni Nesil (Katı Çözelti ile Güçlendirilmiş) Küresel Grafitli Dökme Demirler

Sfero dökme demir malzemenin matris yapısında homojen olarak dağılmamış ferrit ve perlit yapısı neticesinde malzemenin mekanik özelliklerinin de genel dağılımda homojen olmamasına neden olmaktadır. Bu problem sonucunda birinci nesil olarak adlandırılan sfero dökme demirlere alternatif olarak “Yeni Nesil Dökme Demirler” diye adlandırılan ikinci nesil katı çözelti ile sertleştirilmiş sfero dökme demirler geliştirilmeye başlanmıştır. Yeni nesil sfero dökme demirler tamamen ferritik bir matrise yakın olmakla birlikte üretilen parçaların homojen bir dağılıma ve mekanik değerlere sahip olduğu gözlenmiştir.

Yeni nesil sfero dökme demirler de maksimum %5 perlit yapısına izin verildiğinden dolayı, kalan %95’lik ferrit yapısı parçaya homojen dağılımlı olarak uzama, dayanım ve sertlik özellikleri kazandırmaktadır. Bu sebepten dolayı çelik malzemeye yakın mekanik özellikler sergileyen yeni nesil sfero dökme demirler döküm endüstrisinde yoğun ilgi görmektedir. Yeni nesil sfero dökme demirlerin en önemli özelliklerinden bir tanesi katı çözelti ile güçlendirilmiş yapısı sayesinde akma dayanımında da ciddi artışlar sağlamasıdır. Bu nedenle içeriğinde bulunan yüksek silisyum sayesinde ötektoid dönüşüm sıcaklığının ötelenmesi sonucu yüksek sıcaklıkta çalışma performansları da göstermektedir. Ayrıca döküm parça ağırlığındaki azalış hem de işleme maliyetlerindeki düşüş çelik döküme göre daha fazla avantaj sağlamaktadır (Kallbom ve diğ., 2006; Stets ve diğ., 2014)

Küresel grafitli dökme demirlerin dayanımını artırmak için yapıda bulunan ferrit/perlit oranı değiştirilmesi malzeme dayanımı ile uzama arasında bir tercih yapmaya zorlar. Sfero dökme demirlerde uzama miktarını çok büyük miktarda oynamadan matris içerisindeki ferrit miktarını artırmaktan geçiyor. Bu da katı çözelti sertleşmesi adı verilen bir mekanizma yardımıyla elde edilmektedir. Bu mekanizma ile ferritik matris güçlendirilerek dökme demirin dayanımı artırılırken uzama miktarında da önemli bir azalış olmamaktadır.

2000’li yılların başındaki araştırmalar sonucunda geliştirilen yeni nesil dökme demirler Cu, Sn, Mn gibi elementler kullanılmadan, bunların yerine %3,2 ila %4,3 arasında Si ilave edilerek ferritik bir matrise sahip katı çözeltiliyle güçlendirilmiş bir malzeme oluşturulması sağlanmıştır. Birinci nesil olarak adlandırılan sfero dökme demirlerde yapıya ilave edilen Cu, Sn, Mn gibi elementler farklı kesit kalınlığına sahip parçalarda oransal anlamda farklılık gösterebiliyorken, yeni nesil sfero dökme demirlerde bu elementler kullanılmadığı gibi farklı kesit kalınlığına sahip parçalarda yapıya ilave edilen Si ile ferritik matris elde edilerek homojen bir yapıya sahip, homojen mekanik özellikler elde edilebilmektedir. Yeni nesil dökme demirlerde mekanik dayanımın ferrit fazının sertleştirilmesi ile elde edilmektedir. Bu faz sertleştirilmesinin de Si ilave edilmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Ferrit fazının sertleşmesi sonucu süneklik miktarında azalış düşük olduğu için, mukavemet ile birlikte uzama değerleri de yüksek miktarlarda elde edilebilmektedir (Çetin, 2016).

1.1.1. Yeni nesil (katı çözeltili ile güçlendirilmiş) küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması ve genel özellikleri

Yeni nesil sfero dökme demirler için matris içerisinde perlit içeriği maksimum %5 olmalıdır. Serbest sementit oranı %1’i geçmemelidir. Grafit morfolojisi EN ISO 945-1’e göre grafit morfolojisi esas olarak V ve VI şeklinde olmalıdır. Artan silisyum içeriği nedeniyle, katı çözeltili ile güçlendirilmiş ferritik küresel grafitli dökme demirler kalın kesitlerde grafit sapmaları (V ve VI formlarından) gösterebilir. Bununla birlikte, ferritik matrisler, silikonla daha yüksek düzeyde çözeltili güçlendirmesi için, önemli miktarda perlitle güçlendirilmiş dökme demirlere göre, azaltılmış nodülariteye karşı çok daha az duyarlıdır. Form III’ün bir kısmı, bu Avrupa Standardında belirtilen minimum çekme özelliklerini yerine getirmek için, geri kalanının esas olarak form V ve VI olması koşuluyla kabul edilebilir. Ayrıca mekanik özelliklerine göre sınıflandırılmış olan EN 1563:2018 standardına göre katı çözeltili ile güçlendirilmiş malzeme grubunun sınıflandırılması Çizelge 1.1.’de belirtilmiştir.

Çizelge 1.1. EN 1563:2018 standardına göre yeni nesil sfero dökümlerin sınıflandırılması

Malzeme Cinsi	Kesit Kalınlığı (t) (mm)	Akma Dayanımı (Mpa)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Uzama (%)
EN GJS 450-18	$t \leq 30$	350	450	18
	$30 < t \leq 60$	340	430	14
	$60 < t \leq 200$	Alıcı ve üretici arasında anlaşma ile karar verilir.		
EN GJS 500-14	$t \leq 30$	400	500	14
	$30 < t \leq 60$	390	480	12
	$60 < t \leq 200$	Alıcı ve üretici arasında karar verilir.		
EN GJS 600-10	$t \leq 30$	470	600	10
	$30 < t \leq 60$	450	580	8
	$60 < t \leq 200$	Alıcı ve üretici arasında anlaşma ile karar verilir.		

EN 1563:2018 standardına göre katı çözeltili ile güçlendirilmiş malzeme grubunun sertlik değerleri Çizelge 1.2.'de belirtilmiştir. En düşük sertlik ferritik matris ve düşük silisyum içeriği ile elde edilir. Sertlik, perlit miktarı veya artan silisyum içeriği ile artar. Ötektik karbürler sertliği artırır fakat matris yapıda istenmeyen yapılardır. Sadece az miktarda bulunmasına izin verilir.

Çizelge 1.2. EN 1563:2018 standardına göre yeni nesil sfero dökümlerin sertlik değerleri

Malzeme Cinsi	Birinel Sertlik Aralığı Et Kalınlığı (t)	
	$t \leq 60$ mm	60 mm $< t \leq 200$ mm
EN GJS 450-18	170 - 200 HB	160 - 190 HB
EN GJS 500-14	185 - 215 HB	170 - 200 HB
EN GJS 600-10	200 - 230 HB	190 - 220 HB

EN 1563:2018 standardına göre katı çözeltili ile güçlendirilmiş malzeme grubuna göre içerdiği silisyum miktarları Çizelge 1.3.'te belirtilmiştir.

Alaşım içerisinde bulunan diğer alaşım elementleri veya kesit kalınlığına bağlı olarak, kalın kesitler nedeniyle silisyum içeriği daha düşük olabilir. Silisyum miktarındaki değişime göre, artan silisyum içeriği ile karbon içeriği buna uygun olarak azaltılmalı ya da azalan silisyum içeriğine göre karbon içeriği artırılmalıdır.

Çizelge 1.3. EN 1563:2018 standardına göre katı çözeltilerle güçlendirilmiş ferritik sfero dökümlerin malzeme grubuna göre içerdiği silisyum miktarları

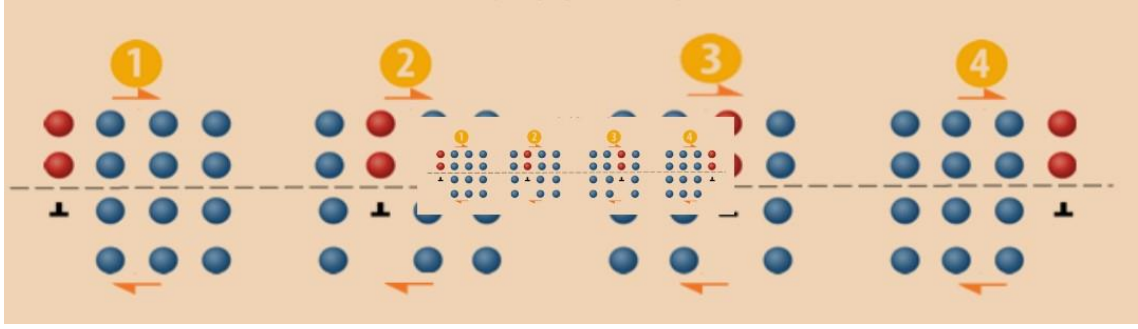
Malzeme Cinsi	Silisyum İçeriği (% yaklaşık)
EN GJS 450-18	3,20
EN GJS 500-14	3,80
EN GJS 600-10	4,20

Yeni nesil sfero dökme demirlerin malzeme cinslerine göre mekanik özellikleri değişkenlik gösterse de temel olarak genel özellikleri şu şekilde de ifade edilebilir (EN, 2018).

- Elastisite modülü 170 GPa'dır. Grafit yapısının matris içinde gösterdiği farklılıklara bağlı olarak bazı özellikler değişkenlik gösterebilir.
- Poisson oranı yaklaşık olarak 0,28 ile 0,29 aralığındadır.
- Yorulma dayanımı; yüzeyin pürüzlülüğü, çentik etkisi, parça boyutu gibi faktörlere bağlıdır. Çentiksiz, yüksek silisyum içeren dökme demirlerin yorulma sınırı, çekme dayanımının yaklaşık %45'ine karşılık gelir. Malzemenin genel dayanımı farklılık gösterse bile bu oran sabit kalmaktadır.
- Kırılma tokluğu değerleri 65 ile 75 MPa arasında değişmektedir.

1.1.2. Yeni nesil dökme demirlerin katı çözeltilerle sertleştirme mekanizması

Yeni nesil dökme demirlerin mekanik mukavemetlerindeki yükseklik katı çözeltilerle sertleşmesi adı verilen mekanizma ile gerçekleşir. Bu mekanizma malzemeyi oluşturan atomların düzlemleri üzerinde kaymasını sağlayan dislokasyon hareketinin engellenmesi sonucu oluşmaktadır. Kristal yapıdaki metal ve alaşımlar atomlardan oluşan düzlemlerden meydana gelmektedir. Atomlardan oluşan bu düzlemler birbiri üzerinde kayma hareketi yapabilmektedirler. Kayma hareketinin engellenmesi kimyasal kompozisyonun içerisinde alaşım elementi ilavesiyle yapılmaktadır. Böylece alaşım elementi saf metal içerisinde çözünerek tek fazlı bir yapı oluşturulur. Bu mekanizmaya ise "katı çözeltilerle sertleştirme mekanizması" adı verilir.



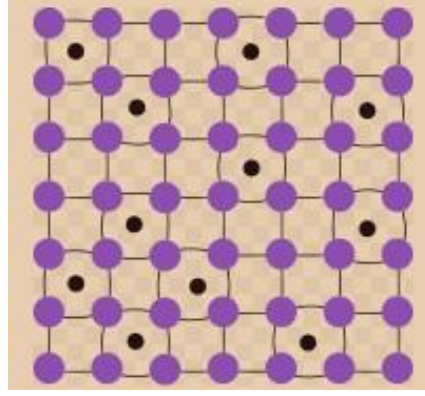
Şekil 1.1. Yarım düzlem dislokasyon hareketi şematik gösterimi (Çetin, 2016)

Kırmızı renkle gösterilen yarım düzlem mavi düzlemlerle yer değiştirerek alt ve üst kısımların birbirlerine referansla kaymalarını sağlıyor. Bu yarım düzlemin alt kısmına (ters T ile gösterilen) dislokasyon çizgisi adı veriliyor (Çetin, 2016).

Kristal yapı içerisinde kalan yarım düzlemler diğer düzlemler ile yer değişimi yaparak dislokasyon çizgisinin alt ve üst kısımlarının birbiri içerisinde yer değişimini sağlıyor. Bu yer değişimi dislokasyon hareketi olarak adlandırıldığımız bu mekanizma sayesinde yük altında kalan parça şekil değişimine uğramaktadır. Bu mekanizma sayesinde düzlemlerin kaymasını zorlaştırıp, dislokasyon hareketleri kısıtlandığı zaman malzemeye mukavemet kazandırılmış olunmaktadır.

Katı çözelti sertleşmesinde dislokasyon hareketini engellemek, düzlemlerin kaymalarını sınırlandırmak için matris içerisinde farklı atomlardan yararlanılarak kristal yapı içerisine verdiğimiz anda farklı boyutlardaki atomların malzeme genelinde düzlemlerin kusursuz yapısı değiştirilerek bozulmuş olur. Bu düzlemlerin değişimi ile düzlemlerin birbiri üzerinde kayması zorlaşarak akma dayanımı artırılır. Kayma hareketinin devam edilebilmesi için uygulamadaki kuvvet miktarı artırılarak çekme dayanımı da yükselmiş olur (Stets ve diğ., 2014).

Yeni nesil küresel grafitli dökme demirlerde katı çözelti sertleşmesi mekanizmasının çalışma prensibi ise şu şekildedir;



Şekil 1.2. Katı çözelti mekanizmasını temsili görüntüsü (Çetin, 2016)

Sıvı halde bulunan dökme demire silisyum elementi ilavesi ile, silisyumun çözünmesi sağlanır. Çözünen silisyum sıvı metalin içerisinde homojen bir şekilde dağılması ile katılaşması sırasında homojen bir şekilde katı içerisinde dağılması beklenir. Bu mekanizma “katı çözelti ile sertleşme” mekanizmasının oluşumunu sağlar. Silisyum elementinin büyük bir ferrit yapıcı element olması, aynı zamanda karbonun grafit olarak ayrışmasına yol açtığı için yüksek mukavemete sahip yüksek silis ihtiva eden ferritik bir dökme demir türü ortaya çıkmaktadır (Orkas ve Peura, 2016).

1.1.3. Yeni nesil sfero dökme demirlerin özellikleri

Düşük erime noktası, hafiflik, akışkanlık, dökülebilirlik, işlenebilirlik ve parça boyunca homojen mekanik özellikler gibi üstünlüklere sahiptir. Homojen sertlik dağılımına sahip olması ve yine aynı sertlik değerlerinde klasik sfero dökme demirlere göre daha yüksek akma mukavemetine sahiptir. Buna bağlı olarak yüksek % uzama miktarlarına sahiptir. Yeni nesil dökme demirlerde akma mukavemetinin kopma mukavemetine oranı %75-80 iken bu oran klasik sfero dökme demirlerde %55-65 arasındadır. Bu yüksek akma mukavemeti daha ince et kalınlığında parçalar tasarlanmasını ve ağırlıktan kazanç sağlanmasıdır. Ayrıca yeni nesil sfero dökme demirlerin avantajlarını sıralayacak olursak;

- Dövme çeliğe kıyasla %10 daha hafif
- Dövme çeliğe kıyasla daha ekonomik
- Daha yüksek işlenebilirlik kabiliyeti, daha uzun takım ömrü, daha düşük işleme maliyeti

şeklinde açıklanabilir (Çetin, 2016).

1.2. HVOF (Yüksek Hızda Oksi Yakıt Püskürtme, High Velocity Oxygen Fuel) Termal Sprey Kaplama Prosesi

Yüksek hızlı oksijen yakıtı (HVOF) püskürtme, bir yanma odasına beslenen ve ateşlenen sıvı yakıt ve oksijeni karıştırarak çalışır. Ortaya çıkan gaz, süpersonik hızlarda bir nozuldaki dışarı atılan son derece yüksek bir sıcaklığa ve basınca sahiptir. Yüksek hızlı gaz akımına, kısmen eriyen toz enjekte edilir. Sıcak gaz ve toz akışı, kaplanacak yüzeye doğru yönlendirilir. Ortaya çıkan yoğun kaplama, düşük gözenekliliğe ve yüksek bağ gücüne sahiptir.

HVOF püskürtme, öncelikle WC/Co ve WC/Co/Cr gibi yüksek kaliteli sermet kaplamaları uygulamak için kullanılır. Kaplama kalınlığı genellikle 0,1-2 mm aralığındadır. HVOF püskürtmeli kaplamaların karakteristik özellikleri arasında, hacimce yaklaşık %1-2'lik düşük seviyedeki gözeneklilik ve ağırlıkça %1-2 aralığındaki düşük oksit içeriği yer almaktadır. Bağ kuvveti genellikle 80MPa'yı aşar. Bu kaplamalar, bileşenlerin yüzey özelliklerini geliştirmek için çeşitli mühendislik ve imalat uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu yöntem, işlevsel bir yüzeye sahip düşük maliyetli veya hafif malzemelerden yapılan uygun maliyetli, yüksek performanslı parçaların hazırlanmasına imkân sağlamaktadır (Kurodo ve diğ., 2008).

1.2.1. HVOF termal sprej kaplama prosesi çalışma mekanizması

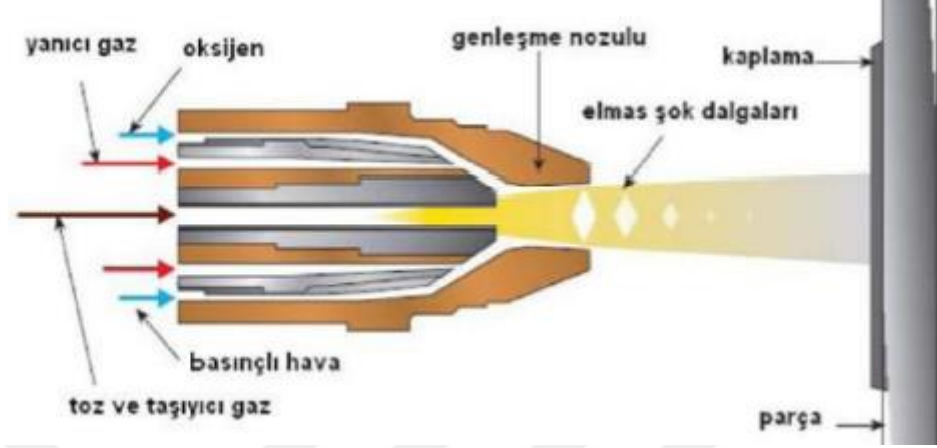
Yüksek hızlı oksijen yakıtlı püskürtme metodu 1980'li yıllarda D-Gun patlatma metoduna alternatif olarak geliştirilmiş ve günümüzde metal püskürtme kaplamalarında kullanılan en önemli yöntemdir. Bu metod ile yüksek gaz debisi ve sıcaklıkta mekanik özellikler açısından üstün özellikli kaplamalar elde edilebilmektedir (Stokes, 2003).

Sistemin çalışma mekanizması; toz halinde bulunan kaplama malzemesi, taşıyıcı gaz (N, Ar) sayesinde sprej tabanca içinden yanma odasına (60-120 psi) transfer edilmesi ile gerçekleşmektedir (Gök, 2015).

Oksijen ile sıvı yakıtın karışım odasında yanmasından sonra tozlar besleyici kanalla nozula yönlendirilir. Kaplama toz boyutları 4-45 μm ve hızları ise 20-120 gr/dk olabilmektedir. Sprej tabancası ucundaki tozların kinetik enerjisi sayesinde kaplanacak yüzey üzerine çok hızlı bir biçimde (1525-1825 m/sn) püskürtülen partiküllerin mekanik olarak birbirine bağlanması sonucunda gerçekleşen yöntemdir. Püskürtülen toz parçacıklarının sıcaklığı 2300°C-3000°C gibi yüksek değerlere ulaşmaktadır (Kaya, 2007; Özel, 2013).

HVOF metodunda 0.2-2 mm arasında kaplama kalınlığı elde edilebilmektedir (Avcı, 2015).

Sistemin çalışma düzeneği Şekil 1.3.'te gösterilmektedir (Özel, 2013).



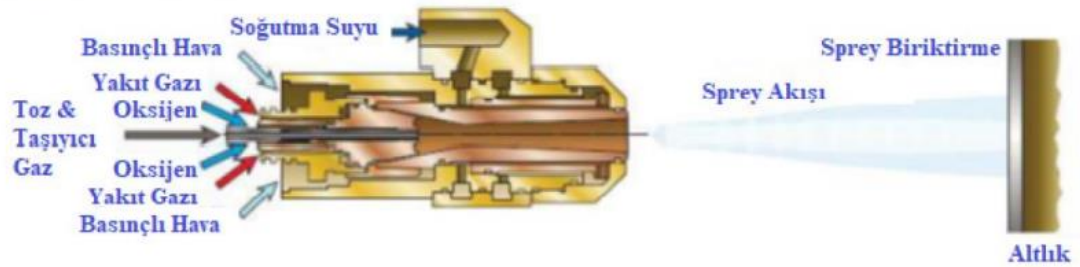
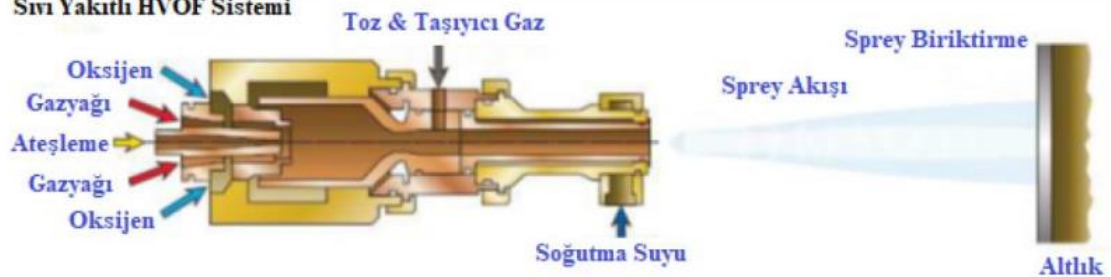
Şekil 1.3. HVOF püskürtme yönteminin şematize edilmesi

HVOF püskürtmeli numunelerin mikro yapısal incelemelerinde HVOF kaplamalı örneklerin aşınma dayanımlarının daha fazla ve daha iyi olduğu görülmüştür (Subbiah ve diğ., 2019).

HVOF sisteminde, gaz kontrol ünitesi (gaz debisini ayarlama), toz besleme ünitesi, kompresör (basınçlı hava temini), soğutma ünitesi (tabancanın soğuması için) ve sprej tabancası bulunmaktadır. Bu metotta sprej işlemi sırasında metal yüzeyinin ortalama sıcaklığı 100°C'yi aşmadığından dolayı malzemede bozunma ve metalurjik olarak değişiklikler olmamaktadır. Ana yüzey ile sprej torcu mesafesinin ayarlanması sonucu ana yüzeyde anormal sıcaklık artışı engellenebilmektedir (Kaya, 2007). HVOF metodunun aşınma ve sürtünme mukavemetlerine ihtiyaçlarına cevaplar vermesi, ekonomik olması ve esnekliği sayesinde havacılık, otomotiv, tekstil ve enerji endüstrisi gibi birçok alanda kullanılabilmektedir. HVOF püskürtme metodunda gaz ve sıvı yakıt kullanılmaktadır. Gaz yakıt çeşitlerinde propan, doğalgaz, hidrojen gazı ve propilen kullanılmaktadır. Sıvı yakıt çeşitlerinde ise kerosen ve gaz yağı kullanılmaktadır. Yakıt farklılığının HVOF sisteminde oluşturabileceği farklar Çizelge 1.3.'te verilmektedir, Şekil 1.4. ve Şekil 1.5.'te ise gaz ve sıvı yakıtlı HVOF sistem görsel olarak şematize edilmiştir (Davis, 2004).

Çizelge 1.3. Sıvı yakıtlı HVOF ile gaz yakıtlı HVOF kıyaslaması (Davis, 2004)

	Gaz Yakıtlı HVOF	Sıvı Yakıtlı HVOF
Genel Karakteristik Özellikler		
Yakıt Çeşitleri	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₆ , C ₃ H ₈	Jet veya Kerosen
Yanma Basıncı	~ 55 Mpa	55 -0,83 Mpa
Gaz Hızı	1800 – 2100 m/s	2000 – 2200 m/s
Tanecik Hızı	450 – 600 m/s	475 – 700 m/s
Toz Yedirme	Eksenel	Radyal
Toz Yedirme Hızı	Yüksek	Düşük
Sprey Oranı	<120 g/dk	<200 g/dk
Tüketim Değeri		
Yakıt	438000 lt H ₂ veya 5280 lt Propilen / Propan	28 lt Kerosen
Oksijen	18420 lt	61400 lt
Su	600 lt	2375 lt

Gaz Yakıtlı HVOF Sistemi**Şekil 1.4.** Gaz yakıtlı HVOF şematik gösterimi (Davis, 2004)**Sıvı Yakıtlı HVOF Sistemi****Şekil 1.5.** Sıvı yakıtlı HVOF şematik gösterimi (Davis, 2004)

1.2.2. HVOF püskürtme yönteminde kullanılan başlıca toz alaşımları:

- Karbürler, (Tungsten Karbür, Krom Karbür)
- Nikel-Krom alaşımları
- Paslanmaz çelik,
- Al-Bronz
- Süper alaşımlar (Inconel, Stellite, Hastelloy C Triballoy 800, MCrAlY). (Anonim, 2025).

1.2.3. HVOF püskürtme yönteminin avantajları

- Yüksek bağ kuvveti (83 Mpa-12000 psi)
- Yüksek yoğunluk, düşük porozite, düşük oksit içeriği
- Yüksek sertlik değerleri (WC / Co için 500-1300 DPH'a kadar)
- Tekstür, üst yüzey veya koruyucu katman olmak üzere kaplanabilme (0,1-0,2 μ)
- Aşınma ve erozyona karşı çok yüksek direnç

Metal püskürtme teknolojileri arasında öne çıkan HVOF yöntemi, kalın kaplamaların ekonomik olarak uygulanabilmesi ve parça boyutunda herhangi bir kısıtlama bulunmaması gibi avantajlar sunmaktadır. Bu teknikle Fe, Cr, Mo, W, C, Co/Ni, Cr ve Mo gibi malzemelerle kaplama yapılabilmektedir. Bu malzemelerle kaplanan yüzeylerin korozyona karşı dirençli olduğu ve yüksek yapışma gücüne sahip oldukları gözlemlenmiştir. HVOF yöntemi, yüksek kaplama hızı ve düşük maliyet avantajları sayesinde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu yöntemle, parçaların ömrünü artıran kalın kaplamalar üretilmektedir (Kaya, 2007).

HVOF yönteminin sağladığı başlıca avantajlar aşağıda sıralanmıştır:

- Kaplamalardaki gözeneklilik oranı genellikle %2'nin altında olup, bazı durumlarda bu oran %0,5'e kadar düşebilmektedir.
- HVOF yöntemiyle elde edilen kaplamalar, diğer tekniklere göre daha yüksek bağ mukavemeti ve yoğunluk sunmaktadır.
- Düşük sıcaklıklarda ve yüksek hızlarda uygulandığında, aşınmaya karşı dirençli ve darbe dayanımı yüksek kaplamalar elde edilebilmektedir.

- Aynı kaplama malzemesi kullanılarak, diğer yöntemlere göre daha yüksek birikme verimi sağlanabilir. Ayrıca özel uygulamalarda farklı kimyasal kaplamalarla da kullanılabilir. Yüksek kaliteli kaplamalar için geniş bir uygulama alanı sunmaktadır.
- Yorulma ömrünü artırır ve darbe hassasiyetini azaltır.
- Ek bir işleme ihtiyaç duymadan düzgün yüzeyler elde edilebilir.
- Yüksek dayanımları sayesinde aşınma, oksidasyon, korozyon ve sıvı kaynaklı aşındırıcılara karşı etkili koruma sağlar.

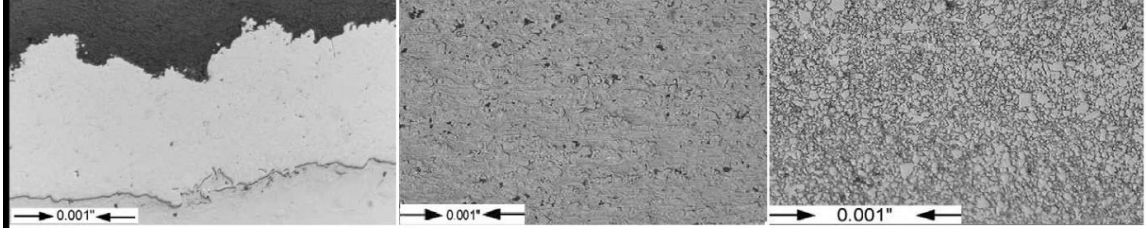
HVOF yöntemi, sunduğu bu avantajlarla mevcut termal sprey teknolojileri arasında en kullanışlı, en pratik ve en az bakım gerektiren yöntemlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Kaplama teknolojisinde yapılacak yeniliklere az sayıda parametre ile kolayca uyum sağlaması da bu yöntemin öne çıkan diğer bir üstünlüğüdür (Kılıç, 2021).

1.2.4. HVOF püskürtme yönteminin dezavantajları

HVOF prosesinin diğer yöntemlere kıyasla bazı dezavantajları da bulunmaktadır:

- HVOF yönteminde ortaya çıkan yüksek ısı, ana malzemenin aşırı ısınma riskini beraberinde getirir. Bu nedenle, ana malzemenin ideal sıcaklık aralığında kalması için soğutma işlemlerine dikkat edilmesi gerekmektedir.
- Yüksek gözenekliliğe sahip kaplamalar elde edebilmek için, sürece yardımcı malzemelerin (örneğin polyester) dahil edilmesi gerekir. Bu durum, HVOF yönteminin Termal Bariyer Kaplama üretiminde kullanılmasını zorlaştırmaktadır (Özbek ve Kayral, 2017; Bohur, 2018).
- HVOF püskürtmeli kaplamalar, çok sayıda değişken uygulama parametrelerine bağlıdır.
- Toz boyutları, dar boyut dağılımlarına ihtiyaç duyarak yaklaşık 5-60µm aralığıyla sınırlıdır.
- HVOF ekipmanı, alev ve ark püskürtme gibi diğer termal püskürtme işlemlerinden daha fazla yatırım gerektirir.
- Bir HVOF püskürtme tabancasının manuel olarak çalıştırılması önerilmez ve genellikle tabancanın otomatik olarak çalıştırılması gerekir.

- Küçük silindirik bileşenlerin iç yüzeylerinde veya diğer kısıtlı erişim yüzeylerinde kaplamaların biriktirilmesi zor veya imkansızdır. HVOF püskürtme, yüzeye görüş hattı ve 150-300 mm'lik bir püskürtme mesafesi gerektirir (Kuroda ve diğ., 2008).



Şekil 1.6. HVOF yöntemi ile kaplanmış SEM görüntüleri

HVOF ile yüksek yoğunluklu ve yüksek kinetik enerji sayesinde düşük poroziteli kaplamalar üretilebildiği taramalı elektron mikroskobu (SEM) altında da gösterilmiştir (Şekil 1.6) (Anonim, 2025)

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

20. yüzyılın ilk yarısının sonlarında geliştirilen dökme demir çeşidine “küresel grafitli dökme demir” adı verilmiştir. Bu tür dökme demirler, yaklaşık %2 ila %3 oranında silisyum içerir ve matris yapıları ferrit, perlit ya da her iki fazın kombinasyonundan oluşur. Malzeme yapısındaki perlit, mekanik dayanımı artıran bir unsur olmakla birlikte sünekliği azaltıcı bir etki yaratır. Bu nedenle, ferrit ve perlit oranlarının kontrolüyle istenen mekanik özellikler (örneğin, mukavemet, sertlik ve uzama) elde edilebilir. Klasik dökme demirlerde matris yapısının homojen olmaması, malzemenin farklı bölgelerinde dayanım, süneklik ve sertlik gibi özelliklerin değişkenlik göstermesine yol açar. Buna karşın tamamen ferritik yapıya sahip yeni nesil dökme demirlerde, tüm parça boyunca mekanik özelliklerin daha homojen dağıldığı gözlenmektedir. Ferritik sfero dökme demirlerde perlitin güçlendirici rolü bulunmaz; bunun yerine malzemenin dayanımı, katı çözültü sertleşmesi ile sağlanır. Bu sertleşme mekanizmasının gerçekleşmesini sağlayan temel element ise silisyumdur. Ferritik sfero dökme demirler, içerdiği yüksek silisyum miktarı sayesinde katı çözültü sertleşmesi ile artırılmış dayanım sunar.

Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla ferrit/perlit oranının ayarlandığı birinci nesil sfero dökme demirlerde sıkça karşılaşılan bir sorun vardır: Bu yapılardaki perlit oranı yalnızca kimyasal bileşime değil, aynı zamanda soğuma hızına da bağlı olarak değiştiğinden, farklı kesit kalınlıklarında farklı miktarlarda perlit oluşmaktadır. Bu nedenle, kalın kesitlerde yavaş soğuma nedeniyle ferrit oranı artarken, ince ve hızlı soğuyan kesitlerde perlit miktarı daha fazla olmaktadır. Matris yapısındaki bu heterojenlik, parçanın genelinde dayanım, süneklik ve sertlik gibi mekanik özelliklerin de eşit dağılmamasına yol açar. Bu durum, hem hedeflenen mekanik özelliklerin sağlanmasını güçleştirir hem de parçaların işlenebilirliğinde çeşitli zorluklar ortaya çıkarır.

Bu noktada, katı çözültü sertleşmesi ile güçlendirilmiş yeni (ikinci) nesil sünek sfero dökme demirlerin üstünlükleri ön plana çıkmaktadır. Tamamen ferritik matris yapısına sahip olan bu malzemelerde, tüm parça boyunca mekanik özelliklerin oldukça homojen olduğu görülmektedir. Ferrit fazının yumuşak ve oldukça sünek yapısı sayesinde, bu yeni nesil dökme demirler, geleneksel sfero dökme demirlere göre daha yüksek süneklik göstermektedir. Malzemenin dayanımı ise katı çözültü sertleşmesi yoluyla sağlanmaktadır. Yüksek silisyum içeriği sayesinde, bu dökme demirler benzer

uzama seviyesine sahip birinci nesil dökme demirlere göre daha yüksek dayanım sunmaktadır. Katı çözelti sertleşmesi aynı zamanda akma dayanımının artmasını da sağlar.

Ayrıca, yüksek silisyum içeriği karbür oluşum eğilimini önemli ölçüde düşürür. Silisyumun bir diğer avantajı ise ötektoid dönüşüm sıcaklığını artırmasıdır. Bu etki, yeni nesil dökme demirlerin yüksek sıcaklıklardaki performansını da bir miktar iyileştirmektedir. Son olarak, teknik literatürdeki çeşitli araştırmalar, bu yeni nesil dökme demirlerin çelik döküm parçalara alternatif olarak kullanıldığında hem parça ağırlığında azalma hem de işleme maliyetlerinde düşüş sağladığını göstermektedir.

Yeni nesil dökme demirler sahip oldukları büyük avantajlarından ötürü çelik dövme parçaların yerine rüzgâr türbini parçalar ile biçerdöver, traktör, iş makinası, ağır vasıta araçların arka aks, diferansiyel, direksiyon mafsalı ve şasi elemanları gibi kaba ve nispeten ağır parçaları çelik dövme yerine yeni nesil dökme demirden geleneksel kum kalıba döküm yöntemi ile üretilerek ciddi oranda hafifletme sağlanmıştır. Ancak tüm bu üstün özelliklere rağmen giderilmesi gereken problemler ya da geliştirilmesi gereken özellikler de bulunmaktadır. Özellikler birbiri ile eş çalışan parçalarda temas eden yüzeylerde oluşan kusurlar hızlı hasara yol açabilmektedir. Birbiri ile temas eden parçaların yüzeylerinde oluşan boşluk ve çatlak gibi kusurların oluşumu hem aşınmaya hem de oksijenin parça iç kısmına difüzyonu sonucu oksidasyon ve korozyona sebep olabilmektedir. Bu amaçla yeni nesil dökme demirden imal edilen parçaların yüzeylerine aşınmaya ve korozyona karşı dirençli sert kaplamaların uygulanması gerekmektedir.

Son yıllarda, geleneksel kaplama yöntemlerine kıyasla daha kaliteli yüzey özellikleri sunan HVOF (Yüksek hızda oksijen yakıt püskürtme, high velocity oxygen fuel) termal sprey kaplama yöntemi kullanılarak aşınmaya ve korozyona karşı dirençli, yüksek sertliğe sahip yüzeyler geliştirilmektedir. HVOF, termal sprey kaplama yöntemlerinin en yenilerinden bir tanesi olup PVD, CVD ve nitrürleme gibi yüzey işlem yöntemlerine alternatiftir. HVOF yönteminde oksijen ve yakıt gazı (propan, propilen ve hidrojen) yüksek basınçlarda kullanılmaktadır, yanan gaz karışımı süpersonik hızlara ulaşmakta ve kaplama tozu aleve beslenmektedir. HVOF, termal enerji girişini minimize ederken, kinetik enerjiyi en yüksek derecelere ulaştırmaktadır. Böylece yüksek bağ mukavemetli, yoğun ve çok düzgün yüzeye sahip porozitesi az kaplamalar elde edilmektedir. HVOF yönteminin avantajları şu şekilde sıralanmıştır:

- Maliyetlerin azaltılması
- Performans seviyesinin artırılması
- Geliştirilmiş elektriksel özellikler
- Parçaların daha yüksek ya da düşük sıcaklık koşullarında çalışabilmesi
- Zorlayıcı kimyasal ortamlarda parça dayanımının sağlanması
- Artırılmış sistem verimliliği
- Uyumlu parçaların kullanım ömrünün uzatılması

Bu çalışmada EN-GJS-600-10 standardına sahip (Akma mukavemeti: 470 MPa, çekme mukavemeti: 600 MPa ve % uzama: 10) hem dayanımı yüksek hem de yüksek uzamaya sahip katı çözelti ile güçlendirilmiş ferritik sünek dökme demirlere HVOF termal sprey kaplama yöntemi ile aşınmaya ve korozyona dirençli Ni esaslı süper alaşım kaplamalar uygulanacaktır. Ni esaslı süper alaşımlar yüksek korozyon/oksidasyon direnci, yüksek dayanımı, yüksek aşınma direnci, yüksek sürünme ve yorulma direnci ile üstün yüksek sıcaklık özelliklerinden ötürü bu çalışmada kaplama malzemesi olarak seçilmiştir.

Dayanım, dökülebilirlik ve işlenebilirlik özelliklerinin üstün olmasından ötürü yeni nesil dökme demirler son yıllarda çelik malzemeler yerine kullanılarak hem ağırlık hafifletme hem de nispeten düşük maliyetli parçaların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Çelik parçalara kıyasla nispeten daha hafif (~%10) olan yeni nesil dökme demir parçalar hem yakıt tasarrufuna hem de düşük CO emisyon değerlerinin ortaya çıkmasına katkı sağlamaktadır. Endüstriyel açıdan yeni nesil dökme demirden imal edilmiş parçaların performansının ve ömrünün arttırılması için yoğun bir talep bulunmaktadır. Bu parçaların çalışma ömrünün arttırılması için aşınma, korozyon ve oksidasyon direncinin arttırılması için yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Son zamanlarda ileri kaplama teknikleri ve malzemelerine yönelik artan bir talep görülmektedir. Farklı türdeki bileşenlerin yüzeylerini iyileştirmek veya yenilemek, ekipmanın ömrünü uzatarak enerji ve malzeme tasarrufu sağlamak için ideal bir yöntemdir. HVOF yöntemi ile erimiş ya da yarı eriyik malzemeler yüksek sıcaklık ve yüksek hızdaki gaz akışı ile yüzeye püskürtülerek çok düzgün yüzeye sahip yoğun bir kaplama oluşturulmaktadır. HVOF kaplaması ile hem ortam hem yüksek sıcaklıklarda çalışabilen, yüksek sertliğe, üstün aşınma ve korozyon/oksidasyon dirençlerine sahip,

yüksek yoğunluklu ve düşük poroziteli üstün kaplamalar üretilecektir. Yaptığımız araştırmalar neticesinde bugüne kadar SSF olarak bilinen yeni nesil katı çözeltili ile güçlendirilmiş ferritik sünek dökme demirlere HVOF termal spreylere kaplama uygulanmamıştır.

Daha iyi aşınma ve korozyon/oksidasyon özellikleri sergileyecek olan kaplama uygulanmış yeni nesil dökme demirler ülkemizde başta rüzgâr enerji santrallerine ve ağır vasıta, iş makinası ve biçerdöver parçaları üreten firmaların uluslararası rekabet gücünü artırarak ihracat değerlerini artırıcı etkisi olacağı beklenmektedir. Geleneksel kum kalıba döküm yöntemi ile üretilecek parçalara nitelikli yüzey işlemleri uygulanarak katma değeri yüksek ürünler ortaya çıkacaktır.

SSF (Solid solution strengthened ferritic ductile cast iron) olarak adlandırılan katı çözeltili ile güçlendirilmiş ferritik sünek dökme demirler yeni (ikinci) nesil dökme demirlerdir. Özelliklerinden dolayı dövme ve döküm çeliklere alternatif olarak düşünülmektedir.

Dezavantajı olarak, zorlayıcı koşullarda aşınma, korozyon ve yorulma direnci nispeten zayıftır. Bu noktada yüksek yüzey kalitesine sahip parçaların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda yüksek kaliteli yüzey özellikleri sunan HVOF (Yüksek hızda oksijen yakıt püskürtme, high velocity oxygen fuel) termal spreylere kaplama yöntemi kullanılarak aşınmaya ve korozyona karşı dirençli, yüksek sertliğe sahip yüzeyler geliştirilmektedir (Arias ve diğ., 2016; Li ve diğ., 2018; Vasudev ve diğ., 2019; Zhu ve diğ., 2020; Li ve diğ., 2021).

Endüstriyel parçaların kullanımında, uygulamalarda karşılaşılan zorluklara istinaden malzeme yüzeylerinin aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklıklara karşı korunması büyük bir öneme sahiptir. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmaya yönelik kaplama teknolojilerinden biri olan Yüksek Hızlı Oksijen-Yakıt Alevi (HVOF) yöntemi, özellikle tungsten karbür (WC) esaslı kaplamalarda öne çıkmaktadır.

Yüksek Hızlı Oksijen-Yakıt Alevi (HVOF) yöntemiyle uygulanan WC-Co-Cr kaplamalar yüksek aşınma direnci, mükemmel korozyon kabiliyeti ve üstün mekanik özellikler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle uzay ve havacılık sanayi, kimya ve enerji sanayi ve bunu gibi daha birçok alanda kullanılmaktadır (Wu ve diğ., 2012; Szymański ve diğ., 2015). Yüksek hızlı oksijen yakıtlı (HVOF), kaplama yöntemi yüksek yoğunluklu malzeme birikimi ve altlık malzeme ile kaplama arasında güçlü bir bağ oluşturma kabiliyeti WC bazlı kaplamalar elde etmek için en iyi termal yüzey kaplama tekniği olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tip kaplamaların endüstriyel

uygulaması kobalt (Co) ve genellikle krom (Cr) içeren tungsten karbür (WC) bazlı kaplamalar olarak uygulanmaktadır.

WC/Co/Cr kaplamalar endüstriyel uygulamalarda çok yönlü sorunların da çözümünü beraberinde getirmektedir (Davis, 2004; Pawlowski, 2008). Karşılaşılan çok yönlü sorunlara örnek verecek olursak;

1. **Geliştirilmiş Mekanik Özellikler:** Kobalt bağlayıcı görevi görerek tokluğu ve yapışmayı artırırken, krom ek korozyon direnci sağlar.
2. **Üstün Korozyon Direnci:** WC/Co/Cr kaplamalar korozyon direnci artırır, bu da onları agresif ortamlardaki uygulamalar için ideal hale getirir.
3. **Yüksek Sıcaklık Kararlılığı:** Bu kaplamalar önemli bir bozulma olmaksızın yüksek sıcaklıklara (250°C/480°F'ye kadar) dayanabilir, bu da onları gaz türbinleri ve egzoz sistemleri gibi sıcak ortamlardaki uygulamalar için uygun hale getirir.
4. **Düşük Sürtünme Katsayısı:** WC/Co/Cr kaplamalar düşük sürtünme katsayısı sergileyerek aşınmayı azaltır ve hareketli parçalarda verimliliği artırır.

Teze konu olan amaç kapsamında literatür incelemeleri ele alındığında çok çeşitli çalışmaların olduğu görülmektedir. Popüler bir araştırma konusu olmasındaki en önemli etkenlerden bir tanesi yüzey mühendisliği uygulamaları ile parçanın mekanik dayanımının artırılması ve çalışma süresi bakımından artış sağlaması sonucu ekonomik kazanımlar elde edilmesidir.

Literatür incelemelerinde HVOF kaplama yönteminde birçok işlem parametreleri de ele alınmıştır. Örneğin; Tungsten karbür boyutlarının minimize edilerek, WC/Co/Cr kaplamalarda sertliğin artırılması sağlayarak aşınmaya karşı direnç göstermesini sağladı (Yuan ve diğ., 2015). WC-Co'nun kimyasal bileşiminin WC-Co-Cr'ye dönüşmesi, yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı ve korozif ortamlara karşı yüksek direnç gibi mükemmel tribolojik özelliklere sahip kaplanmış malzemeler üretilmesini sağladı (Thakur ve diğ., 2011).

Liu ve diğ. (2017) ve Ozbek ve diğ. (2017) çalışmalarında, WC tozu ile kaplamalarda yüksek yüzey sertliği ve yüksek aşınma direncini sağladığı, Co-Cr tozunun ise tokluk ve istenen şartlarda sertliği sağladığını belirtmişlerdir. Krom ilavesinin bir noktaya kadar WC tozu tane dağılımlarını değiştirilerek karbonsuzlaşmayı önlediği ve WC tozu tanelerinin Co matris yapısında yapışma direncini iyileştirdiği gösterilmiştir (Varis ve diğ., 2014; Gong ve diğ., 2016; Pulsford ve diğ., 2018). Ayrıca bu tip kaplamalar temas gerilimlerini dağıtarak daha iyi bağ kurulmasını sağlar.

Başka bir çalışmada HVOF işleminde üretilen nanoyapılı WC-12Co kaplamaya Al eklenmesi, bir kaplamanın mekanik özelliklerinde bir iyileşmesine ek olarak aşınma direncinde bir artışla sonuçlanmıştır (Basak, 2012).

Tokluk, yüksek derece sertlik, korozyon ve aşınma direncinin birlikte gerekli olduğu durumlarda kaplama için en uygun metaller WC-Co sert metallerdir (García ve diğ., 2019; Enneti ve Prough, 2019; Sandoval ve diğ., 2019a; Sandoval ve diğ., 2019b). Aşındırıcı çalışma ortamları için WC-Co sert metallerinin tribokorozyon direnci için Co bağlayıcı faza Ni ve/veya Cr ilave edilerek WC tane boyutu ayarlanarak geliştirmeler yapılabilir (Katiyar ve Randhawa, 2019; Zhang ve diğ., 2019). Özellikle yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) püskürtme ile kaplama WC toz tanelerinin nano boyutta ayarlanması ile termal çözünmesi artırılarak dekarbürizasyon önleme etkisinin sonucu geliştirme potansiyelleri bulunmaktadır (Hong ve diğ., 2017; Bhosale ve Rathod, 2020).

Çelik malzemelerde kaplamaların kullanılması özellikleri önemli ölçüde değiştirmeden aşınma direncini büyük oranda artırdığı gösterilmiştir. Özellikle yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) püskürtme ile kaplama yoğun, az gözenekli, yüksek derece bağlı kaplamaların biriktirilmesine olanak sağlayarak aktif ve aşındırıcı kullanımlarda mükemmel derecede korozyon ve aşınma direnci sağlar (Awang ve diğ., 2019; Fotovvati ve diğ., 2019; Fu ve diğ., 2024; Eskandari ve diğ., 2025).

WC-Co kaplama malzemeleri ile çok sayıda mikroyapı ve tribolojik özellik araştırmaları, tek bileşimden çoklu bileşimlere kadar farklı oranlarda yapılmıştır. İşlem optimizasyonları gerekliliklere göre değiştirilmiştir (Al-Asadi ve Al-Tameemi, 2022; Li ve diğ., 2024; Xu ve diğ., 2024; Pan ve diğ., 2025). WC-12 Co ve WC-10 ve Co-4 Cr kaplama malzemelerinin kimyasal değişimleri, kaplama sonrası malzeme performansı üzerine etki araştırmaları, kontrollü ve standartlaştırılmış HVOF püskürtme ile kaplama yapılan kapsamlı karşılaştırmalar bulunmaktadır (Li ve Yang, 2013; Lorenzo-Martin ve diğ., 2013; Kumar ve diğ., 2022; Singh ve diğ., 2024).

Kaplama malzeme seçimi ve oransal miktarı, son kaplama parçasının çalışma şartlarının belirlenmesinde rol oynar. WC-10 Co-4 Cr kaplamalarda olduğu gibi kobalt bağlayıcı fazına krom eklenmesinin, korozyon direncini artırdığı, püskürtme sırasında dekarbürizasyonu azalttığı ve WC fazını stabilize ederek gelişmiş mekanik performans ve çevresel dayanıklılığa ulaştığını bildirilmiştir (Shibuki ve diğ., 1994; Ariharan ve diğ., 2022). Daha yüksek Co içeriğine sahip, Cr içermeyen WC-12 Co kaplama malzemesi yüksek sertlik sunmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda düşük oksidasyon direnci göstermesi, faz dönüşümüne duyarlılığın fazla olması kaynaklıdır. Bileşimin

etkilerinin araştırılması, mekanik, aşındırıcı ve korozyon gerilimlerin bulunduğu ortam şartlarında, hidrotürbinler gibi endüstriyel uygulama alanlarında kaplama seçimi optimizasyonu önemli parametrelerden bir tanesidir (Singh ve diğ., 2022; Kant, 2024).

Singh ve diğerleri (2025) yaptıkları bir çalışmada IS-2062 çelik altlık malzemenin aşınma direncini artırmada HVOF püskürtmeli WC-12 Co ve WC-10 Co-4 Cr kaplamaların etkinliğini vurgulayarak bu parçaların hidrotürbin endüstriyel uygulamalarında kullanılmasının önünü açmışlardır. İki kaplamada da düzgün karbür dağılımı ve yoğun yapılar sergilenmiştir. Fakat WC-10 Co-4 Cr kaplamalar, WC-12 Co kaplamalara kıyasla daha düşük gözenekliliğe ulaşmıştır. Malzemelerin sertlik ölçüm sonuçlarını karşılaştırmak gerekirse, kaplanmamış çelik için 280 HV, WC-12 Co ve WC-10 Co-4 Cr kaplamalar için sırasıyla 1176 HV ve 1248 HV şeklindedir. Bu da Co ve Cr bulunmasının malzemede sertlik artışına imkân tanınması olarak görülmüştür. Aşınma testi sonuçlarında ise WC-10 Co-4 Cr kaplamalar en düşük aşınma oranına ulaşmış ve en kararlı ve en düşük sürtünme kuvveti davranışını göstermiştir. Genel olarak, WC-10 Co-4 Cr kaplamalar, değerlendirilen tüm mekanik testlerde WC-12 Co kaplamalarından daha iyi performans göstererek, aşındırıcı ortam şartlarında yüksek uyum sağlamıştır.

Huang ve diğerlerinin (2020) çalışmasına göre, kaplama malzemesi ile altlık arasında bağlanma gücü aşınma direncini etkileyen en temel faktörlerdendir. Kaplama ile altlık arasındaki bağın iyileştirilmesi, korozyon direncinin iyileştirmesine olanak sağlar (Yang ve diğ., 2004; Huang ve diğ., 2020).

Wang ve diğerleri (2011), bir paslanmaz çelik alt tabaka üzerindeki HVOF püskürtmeli WC-10Co-4Cr kaplamanın aşınma direncinin paslanmaz çelik alt tabakanınkinden daha iyi olduğunu bulmuştur.

HVOF püskürtme ile kaplamanın mekanik dayanım aralığını, altlık malzemesi ile kaplamanın bağlanma miktarı ve özellikleri belirler (Yang ve diğ., 2012). Bu sebeple kaplama malzemesini alt tabakanın yüzeyine bağlayan mekanik bağ noktalarının sayısı, kaplama malzemesi ile altlık malzemesinin yapışmasını etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesidir. Kaplamanın alt tabaka yüzeyine tutunmasını sağlayan en önemli bağ mekanizmalarından biri mekanik kenetlenmedir. Bu kenetlenme, kaplama sırasında alt tabakanın yüzeyine "ısıran" mikro ölçekteki girinti ve çıkıntıların oluşturduğu mekanik bağlantı noktaları sayesinde gerçekleşir. Bu bağ mekanizmasında mekanik ısırik noktalarının sayısı ve yoğunluğu arttıkça, kaplama ile alt tabaka arasındaki bağ dayanımı artar. Yüzey pürüzlülüğü yeterli değilse veya yüzey

kontaminasyon (yağ, oksit, nem) içeriyorsa, bu mekanik kenetlenme zayıflar. Bu nedenle, yüzey hazırlığı kaplamanın uzun vadeli performansı açısından kritik bir adımdır (Yang ve diğ., 2012; Zhang ve diğ., 2020).

Çalışmalar, erken kaplama örneklerinin arızalarının %80-%90'ının uygunsuz alt tabaka ön işleminden kaynaklandığını göstermiştir. Bu nedenle, alt tabaka yüzey ön işlem sürecinin kalitesi, HVOF püskürtme kaplamalarının performansını etkileyen ana faktörlerden biridir. Yapılan çalışmalar, kaplama numunelerinin başarısızlıklarının %80-90'ının sebebi olarak uygun olmayan alt tabaka ön işleminden kaynaklandığını göstermiştir (Zhang ve diğ., 2003).

Kaplamanın hizmet ömrü, yalnızca kaplama malzemesine veya uygulama yöntemine değil, aynı zamanda alt tabakanın hazırlık kalitesine de doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, HVOF gibi yüksek performanslı kaplama tekniklerinde, alt yüzeyin uygun pürüzlülüğe ve temizlik seviyesine sahip olması, kaplamanın başarısı için ön koşuldur (JI ve diğ., 2018).

Termal kaplama uygulamaları düşük maliyet ve yüzey mühendisliği tekniklerindeki çok sayıda uygulama neticesinde aşınma ve korozyon yüzey koruması için de kullanılır. Termal kaplama yöntemleri ve uygulama esasları ile ilgili çok sayıda yayın da bulunmaktadır (Amin ve Panchal, 2016; Keshavamurty ve diğ., 2018; Łatka ve diğ., 2020).

Richert, (2024) yaptığı araştırmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

En yüksek erozyon dayanımı, WC ve CrC karbürlerinin bir araya gelmesiyle oluşturulan WC-Co-CrC-Ni kaplamasında gözlemlenmiştir. WC-CrC-Ni toz karışımıyla elde edilen kaplama, sertlik ve dayanıklılığı aynı anda sağlayarak partikül darbe ortamlarında ideal çözüm sunmaktadır. Bu, özellikle gaz türbinleri, kompresör fanları, çimento ve madencilik ekipmanları gibi yüksek erozyon riski taşıyan alanlar için önemlidir. Tungsten karbür ve krom karbür bazlı kaplamaların çeşitli, yeni kimyasal bileşimlerinin ve bu karbürlerin bir karışımının kullanılması, hipotezin doğrulanmasını sağladı ve karbür bileşiminin sinerjik etkisiyle aşındırıcı aşınmaya karşı direnci artırma olasılığını belirledi. En uygun aşınma direnci özellikleri, tungsten karbür ve krom karbür WC-CrC-Ni tozlarının karışımından oluşan kaplama ile yakalandığı gösterilmiştir.

Wang ve diğ.'leri (2013) yaptığı bir başka çalışmada HVOF püskürtme yöntemi ile kaplamada karbür bazlı malzemeler arasında en yaygın WC-Co, WC-Co-Cr, WC-Ni, WC-Cr₃C₂-Ni ve Cr₃C₂-Ni olarak belirtmiştir. WC-Ni kaplaması genellikle darbeli

ortamlarda çalışan parçaların yüzeyinde aşınmaya karşı direnç oluşturmak için kullanılır. WC-Cr₃C₂-Ni, Cr₃C₂-NiCr kaplamalar da aşınmaya karşı direnç sağlamak için kullanılır. Çalışma ortam sıcaklıkları 650°C ve 875°C'den yüksek değildir. En sık kullanılan kaplamalar, 500°C'nin altındaki sıcaklıklarda WC-Co ve WC-Co-Cr'dir. WC-Co kaplamasıyla karşılaştırıldığında, WC-Co-Cr birikimi, korozif bir ortamda yüzeyinde bir pasifleştirme tabakası oluşturabilen Cr'ye sahip olduğundan daha yüksek korozyon direncine sahiptir (Puchi-Cabrera ve diğ., 2013; Wang ve diğ., 2013; Siller ve diğ., 2020). HVOF işlemiyle hazırlanan krom içeren WC kaplamanın hem NaCl (Chişiu ve diğ., 2023) hem de HCl çözeltilerinde (Wang ve Walsh, 2020) elektro kaplama sert krom kaplamadan daha üstün olduğu ve çevreye ciddi kirliliğe neden olacak elektrokaplama sert krom işleminin yerini alabileceği bildirilmiştir.

Silva ve diğerleri (2016) yaptığı çalışma sonucunda WC-4Co-10Cr kaplaması, incelenen üç kaplama (WC-4Co-10Cr, WC-7Co-7Cr ve WC-10Co-4Cr) arasında en düşük sertlik ve kırılma tokluğu değerlerine sahip olmakla birlikte, en yüksek gözeneklilik oranını göstermiştir. Bu durum, kaplamanın düşük kobalt (Co) bağlayıcı içeriği ile ilişkilendirilebilir. Co, krom (Cr) ile karşılaştırıldığında daha iyi plastisite, WC partikülleri ile üstün ıslanma kabiliyeti, daha ince tane boyutu ve daha düşük erime sıcaklığına sahiptir (Silva ve diğ., 2016). Bu nedenle, WC-7Co-7Cr ve WC-10Co-4Cr tozlarında bulunan Co-Cr bağlayıcı faz, ergime sırasında WC partikülleri arasındaki boşlukları daha etkili bir şekilde doldurarak daha kompakt bir mikroyapı ve dolayısıyla daha yüksek sertlik değerleri sağlamaktadır.

Cr içeriği arttıkça kırılma tokluğu azalmıştır. Bunun temel nedeni, Cr'nin yüksek sertliği ve Co'ya kıyasla WC ile zayıf ıslanma kabiliyetidir (Silva ve diğ., 2016). Bu durum; metal bağlayıcı fazın kırılma tokluğunu artırır, WC ile bağlayıcı faz arasındaki adhezyon kuvvetini azaltır. Kırılma tokluğu testi sırasında çatlakların indenter etkisi altında kolayca yayılmasına yol açar.

Ayrıca, bu çalışmada elde edilen kırılma tokluğu değerleri, literatürdeki WC-10Co-4Cr kaplamaları ile tutarlılık göstermekle birlikte (Wang ve diğ., 2013; Chişiu ve diğ., 2023), WC-Co kaplamalarına kıyasla daha düşüktür (Hu ve diğ., 2022). Bu fark, yukarıda belirtilen Co ve Cr'nin bağlayıcı özelliklerindeki farklılıklarla açıklanabilir. Sonuç olarak Co içeriğinin artması, bağlayıcı fazın plastisitesini ve WC ile etkileşimini iyileştirerek mikroyapı sıklığını ve mekanik performansı artırır; Cr içeriğinin yükselmesi ise kaplamaların kırılma tokluğunu artırarak kırılma tokluğunu olumsuz etkiler;

optimize edilmiş Co/Cr oranları hem sertlik hem de tokluk dengesi için kritik öneme sahiptir.

Bu bulgular, yüksek performanslı kaplama tasarımlarında bağlayıcı faz kompozisyonunun stratejik seçiminin önemini vurgulamaktadır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

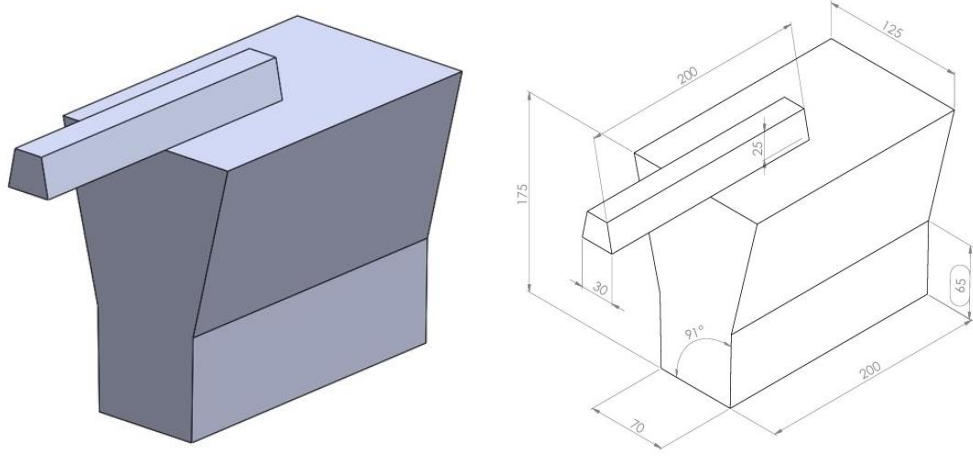
Bu çalışmada EN-GJS-600-10 standardına sahip katı çözelti ile güçlendirilmiş yeni nesil ferritik sünek dökme demirlere HVOF termal spreycaplama yöntemi ile aşınmaya dirençli WC-Co ve WC-Co(Cr) esaslı kaplamalar uygulanmıştır. Tez çalışması planı aşağıda belirtilen adımları içermektedir.

1. Adım: EN-GJS-600-10 standardı yeni nesil dökme demir parçaların geleneksel kum kalıba döküm yöntemi ile üretimi
2. Adım: Kaplama öncesi yeni nesil dökme parçaların yapısal ve mekanik karakterizasyonu
3. Adım: HVOF yöntemi ile termal spreycaplama
4. Adım: Kaplama sonrası yapısal karakterizasyon
5. Adım: Aşınma testi
6. Adım: Korozyon testi
7. Adım: Çizik testi

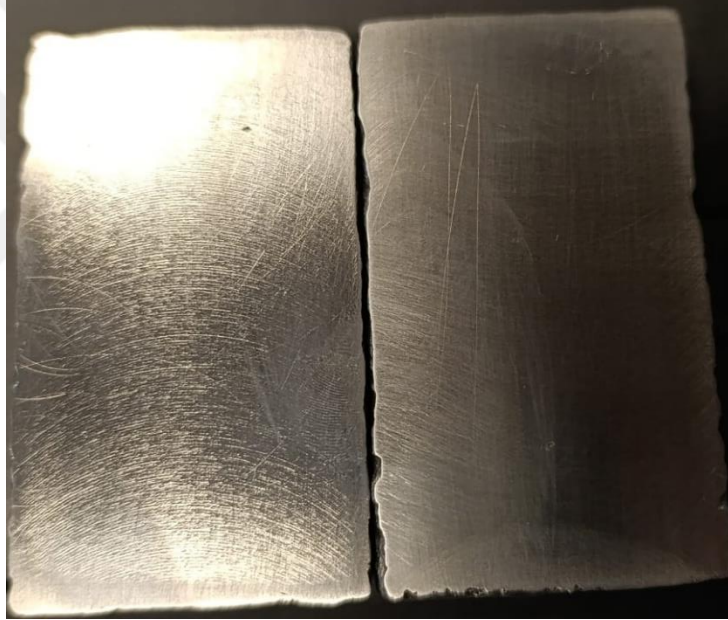
3.1. EN-GJS-600-10 Standardı Yeni Nesil Dökme Demir Parçaların Geleneksel Kum Kalıba Döküm Yöntemi ile Üretimi

EN-GJS-600-10 standardına sahip katı çözelti ile güçlendirilmiş yeni nesil ferritik sünek dökme demir (SSF) parçalar geleneksel kum kalıba döküm yöntemi ile standart Keel blok şeklinde (Şekil 3.1) üretilmiştir. Numunelerin dökümü İzmir Çiğli Atatürk Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren Dirinler Döküm firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Sonrasında Keel bloklardan talaşlı imalat yöntemi ile prizmatik parçalar (Şekil 3.2) ve standart çekme çubukları işlenmiştir.

GGG-60 (EN-GJS-600-10) kalite SSF, Dirinler Döküm 'de (İzmir, Türkiye) 6 ton kapasiteli Eges marka orta frekanslı indüksiyon fırını kullanılarak üretilmiştir. Ocak şarjı olarak çelik hurdaları, pik demir, ferro-karbon, silisyum-karbür ve dökümhane hurdaları (besleyici ve yolluk) kullanılmıştır. Küreselleştirme işlemi için %0.45 FeSiMg kullanılmıştır. Aşılama işlemi kalıp içi ASK Chemicals Germalloy ve VP216 aşılایıcılar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra eriyik 1348°C sıcaklıkta, Keel blok şeklinde kum kalıplara dökülmüştür. Son olarak, kalıp bozma işlemi ile besleyici ve yolluklar çıkarılmış ve düzgün bir yüzey elde etmek taşlama ve kumlama yapılmıştır.



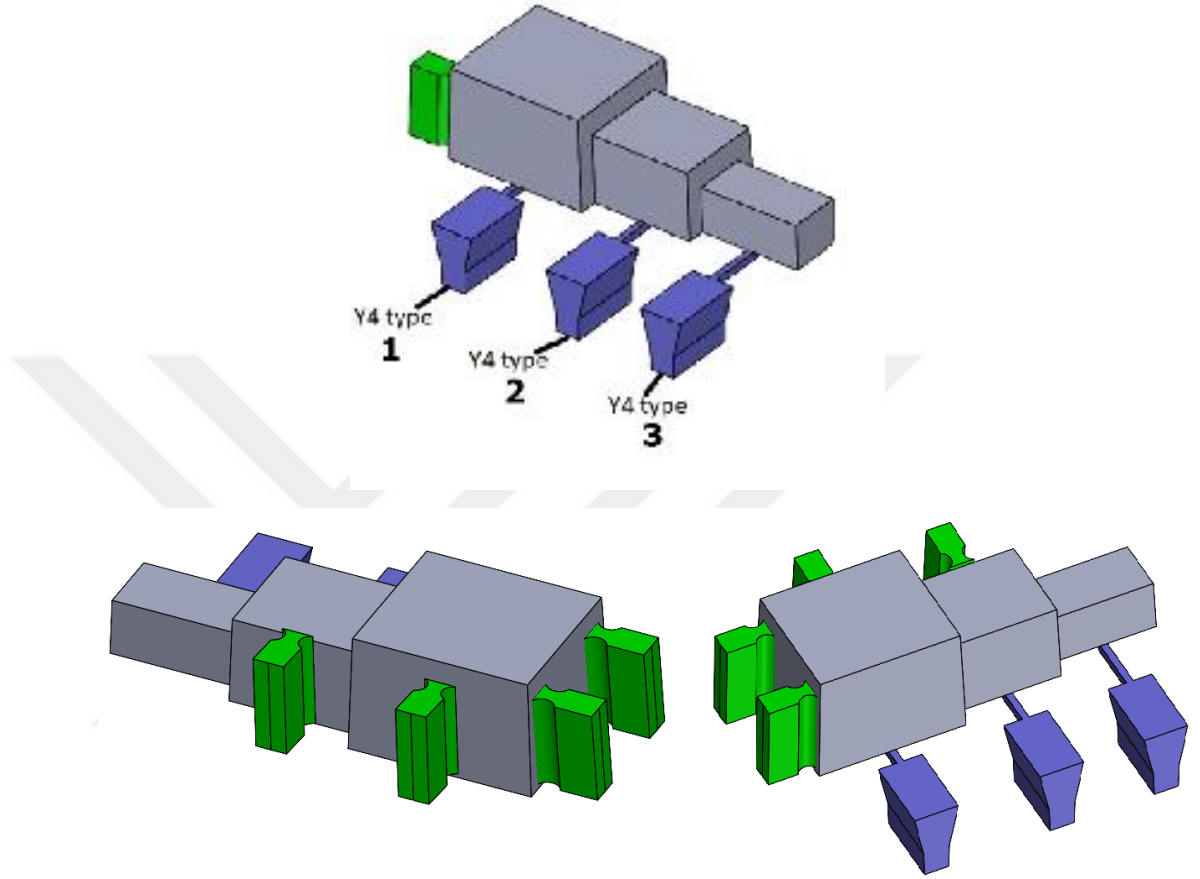
Şekil 3.1. Standart Keel blok teknik resim ve ölçüleri (mm)



Şekil 3.2. Keel bloklardan kaplama öncesi kesilmiş ve hazırlanmış parçalar

3.1.1. Kalıplama

Kalıplama sırasında (Şekiller 3.3-3.5) döküm ağzına (havşaya) kalıp içi blok aş (Ask Chemicals Germalloy) P5 (5 kg) + P800 (800 gr) + P300 (300 gr) konulmuştur. Aşı oranı %0,15'tir.



Şekil 3.3. Şematik kalıplama gösterimi



Şekil 3.4. Kalıplama şekli

3.1.2. Ocak hazırlama

Ocakta 2600 kg sıvı metal hazırlanmıştır. Ocak şarjında 700 kg sfero piki, 1500 kg DKP sac (çelik hurdası), 200 kg dökümhane hurdaları (besleyici ve yolluk), 100 kg SiC, 32 kg FeSi, 10 kg karbon ve 12 kg nikel kullanılmıştır.

Şarj oranı;

- %27 pik,
- %57,6 dkp,
- %7,6 yolluk,
- %7,8 ferro-alyaj (100 kg SiC, 10 kg C, 32 kg FeSi) olarak ifade

edilmektedir.

Küreselleştirme işleminde Tel tretman olarak 83 m Mg tel kullanılmıştır. İstenilen kimyasal analiz doğrultusunda indüksiyon ocağından 5 tonluk tretman potasına 1500°C sıcaklıkta 4100 kg sıvı metal alınarak 1430°C sıcaklıkta tretman işlemi başlamıştır. Tretman sonrası pota sıcaklığı 1384°C olarak ölçülmüştür. Tretman işleminden sonra %0,2 tel VP216 (Çizelge 3.1) aşılması yapılmıştır. Aşılama işlemi 1348°C’de 83 saniyede döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1. HVOF Kaplama tozlarının özellikleri (Küreselleştirme işlemi sırasında uygulanan tel VP216 aşının kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)

% Si	% Al	% Ca	% Mg	% Fe
68-73	3,2-4,5	0,3-1,5	Eser miktarda	Arta kalan

3.2. Kaplama Öncesi Yeni Nesil Dökme Parçaların Yapısal ve Mekanik Karakterizasyonu

3.2.1. Kimyasal analiz ve mikro yapı analizi

Dökümü yapılan parçaların kimyasal analizi OBLF RS1000-162 model optik emisyon spektrometresi (OES) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikro yapısal incelemesi Nikon Eclipse MA 100 model ters metal mikroskobu (Şekil 3.5) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikro yapısal incelemeden önce numuneler standart metalografik numune hazırlama teknikleri kullanılarak hazırlanmıştır. İlk olarak, dökümü yapılan parçalardan Metkon Metacut M-250 Metalografik Numune Kesme Cihazı kullanılarak yaklaşık 12 cm kenar uzunluğuna sahip küp şeklindeki numuneler kesilmiştir, daha sonra numuneler SiC zımpara kağıtları (180 ila 1200 grit arasında)

kullanılarak zımparalanmış, 1 μm alümina süspansiyonu ile parlatılmış ve son olarak %3 nital çözeltisi ile dağlanmış. Numunelerin zımparalama ve parlatma işlemleri Konya Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Metkon marka Forcipol 2V model numune hazırlama cihazı (Şekil 3.6) kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 0.5. Nikon Eclipse MA100 model ters metal mikroskobu



Şekil 3.6. Metkon Forcipol 2V model zımpara-parlatma cihazı

Ayrıca, küresellik, küre sayısı, küre boyutu, küre dağılımı, grafit miktarı ve ferrit/perlit oranı gibi dökme demirlerin temel mikro yapısal özellikleri Clemex görüntü analiz yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Küresellik, küre sayısı, küre boyutu, küre dağılımı ve grafit miktarı parlatılmış yüzeylerden hesap edilmiştir. Ferrit/perlit oranı ise dağlanmış yüzeylerden görüntüdeki zıtlık (contrast) farklılığına göre hesap edilmiştir. Koyu renkli bölgelerden grafit + perlit oranı hesap edilmiş olup sonrasında parlatılmış yüzeyden hesap edilen grafit miktarı çıkarılarak nihai perlit oranı bulunmuştur. Ferrit oranı ise parlatılmış yüzeylerdeki açık renkli bölgelerin oranı hesaplanarak belirlenmiştir.

3.2.2. Sertlik testi

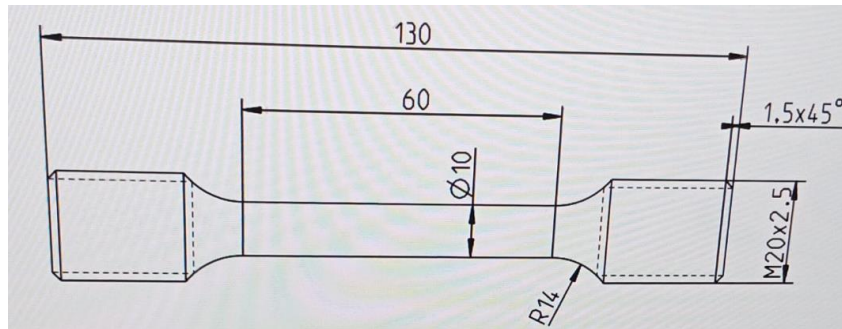
Döküm numunelerin Brinell sertlik ölçümleri, 62,5 kgf yük altında ve 2,5 mm çapında bilye ile Konya Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Bulut Makine Digirock RBOV model Brinell sertlik test cihazı (Şekil 3.7) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Döküm numunelerin parlatılmış yüzeylerinden birbirinden bağımsız 5 iz alınarak ortalaması alınmıştır.



Şekil 0.7. Digirock RBOV model sertlik ölçüm cihazı

3.2.3. Çekme testi

Döküm numunelerin çekme testi ASTM E8/E8M-16a (Metalik malzemelerin çekme test standartları) standardına göre oda sıcaklığında yapılmıştır. Testler Motus Otomotiv firması bünyesinde bulunan Alşa KTM 1000 model universal test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8'de verilen ölçülerdeki standart numunelere 2 mm/dak deformasyon hızı ile çekme testi uygulanmıştır. Test sonucu akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.8. Standart çekme çubuğu geometrisi ve boyutları (mm)

3.3. HVOF Kaplama

Tez çalışması kapsamında SSF numunelere WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalar uygulanmıştır. Kaplama işlemi İzmir Çiğli Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren DEKA Kaplama firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Metal altlık ile kaplama arasında Ni-Al esaslı bağlayıcı katman (astar) uygulanmıştır. Kullanılan kaplama tozlarına ait detaylı bilgiler Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. HVOF kaplama işlemi yaklaşık 200 mm nozul mesafesinde 10 pasoda uygulanmıştır.

Çizelge 3.2. HVOF Kaplama tozlarının özellikleri

Özellikler	WC-Co tozu	WC-Co(Cr) tozu	Ni-Al esaslı astar
Kimyasal Bileşim (ağ. %)	88WC-12Co	86WC-10Co-4Cr	95Ni-5Al
Yoğunluk (gr/cm ³)	2,9-5,3	2,9-5,8	3,7
Parçacık boyutu (µm)	~11	~15	~45
Çalışma Sıcaklığı (°C)	500	500	800
Toz morfolojisi	Küresel	Küresel	Küresel
Toz formu	Kompozit	Kompozit	Kompozit

3.4. HVOF Kaplama Sonrası Karakterizasyon

3.4.1. XRD analizi

WC-Co ve WC-Co(Cr) HVOF kaplamalar ile SSF metal altlığın faz analizleri X-ışınları kırınımı (XRD) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Analizler Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma Uygulama Merkezi'nde (BİTAM) bulunan Malvern Panalytical Empyrean model difraktometre kullanılarak yapılmıştır. XRD analizleri 2°/dakika tarama hızında, 2θ=30-90° aralığında ve 1.5406 Å dalga boyuna sahip Cu-K α ışınması kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Malvern Panalytical Empyrean Difraktometre Cihazı

3.4.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDS) analizleri

WC-Co ve WC-Co(Cr) HVOF kaplamalar ile Ni-Al esaslı astar tabakanın kimyasal analizlerinin yapılması ve kaplama kalınlığının belirlenmesi için enine kesit SEM-EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz öncesi kaplamalı numuneler Metkon Micracut 201 model hassas kesicide (Şekil 3.10) elmas disk kullanılarak kesilmiştir. Sonrasında bakalite alınan numunelere Bölüm 3.2.1’de bahsedilen standart metalografik numune hazırlama işlemleri uygulanmıştır. Analizler Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM’da bulunan Zeiss GeminiSEM 500 model alan emisyonlu SEM (Şekil 3.11) kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.10. Kaplamalı numunelerin enine kesit incelemesi için kesilmesinde kullanılan Metkon Micracut 201 model hassas kesici



Şekil 3.11. Zeiss Gemini 500 model SEM cihazı

3.4.2. Mikrosertlik ölçümleri

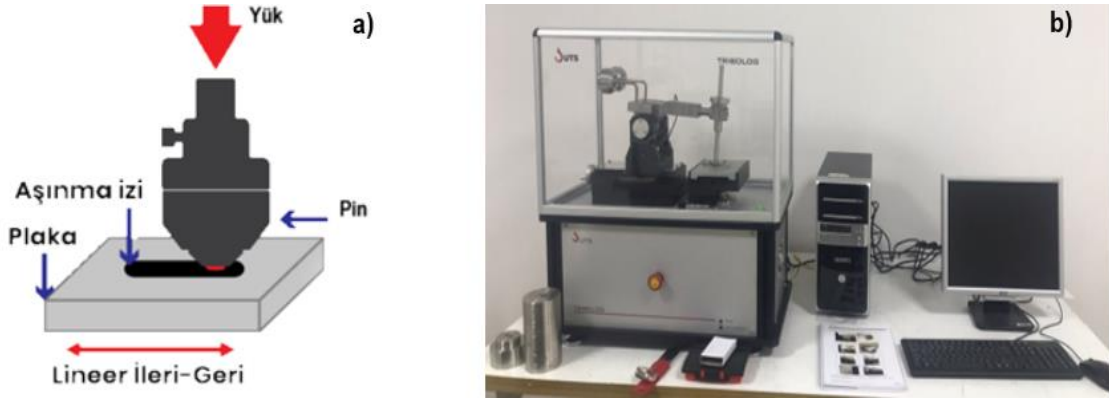
WC-Co ve WC-Co(Cr) HVOF kaplamaların yüzey sertliği Emco DuraScan-80 G5 model mikro sertlik cihazı kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3.12). Mikro sertlik ölçümleri Konya Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren Tekelioğlu Cıvata firmasında gerçekleştirilmiştir. Yüzey sertlikleri 50 g yük altında 10 s uygulanarak alınmıştır. Mikro Vickers sertlik değerleri, parlatılmış numuneler üzerinde 3 farklı bölgeden ölçülen sertlik değerlerinin ortalaması hesap edilerek belirlenmiştir.



Şekil 3.12. Emco DuraScan-80 G5 model mikro sertlik cihazı

3.4.3. Aşınma testleri

Kaplamasız ve kaplamalı numunelerin aşınma testleri Konya Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan UTS Tribolog model tribometre cihazıyla (Şekil 3.13) gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri ASTM G133-22 (Doğrusal kayma aşınması için standart test metodu) standardına uygun olarak WC bilye (6 mm çap) kullanılarak, bilye üzeri gidip-gelme (reciprocating) aşındırma yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Aşınma yükü olarak 10 N, kayma mesafesi olarak ise 50 m kullanılmıştır. Aşınma sonrası aşınmış yüzeyler optik mikroskop ve SEM kullanılarak ile incelenmiştir.



Şekil 3.13. Aşınma deney metodunun şematik gösterimi (a) ve cihazı (b)

3.4.4. Korozyon testleri

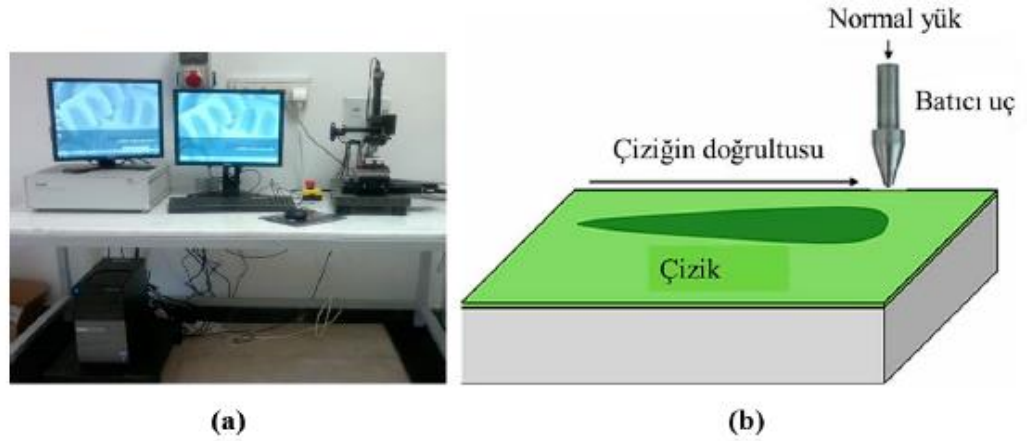
Korozyon özelliklerinin belirlenmesinde klasik üç elektrot sisteminde açık devre potansiyeli (OCP) ve potansiyono-dinamik polarizasyon (PDP) analiz yöntemlerinden faydalanılmıştır. Deneyler Konya Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde yer alan Gamry Interface 1010B Potansiyostat-Galvanostat cihazı (Şekil 3.14) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Veri analizi ise aynı cihazın yazılımı olan Echem Analyst ile yapılmıştır. Korozyon deneylerinin tümü oda sıcaklığında ve karıştırma yapılmadan 0.1 M NaCl (sodyum klorür) çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. OCP numunelere bağlı olarak en az 300 s şeklinde uygulanmıştır. PDP deneyleri ise, numunenin OCP değerinden ± 250 mV aralığında ve 1 mV/s tarama hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14. Gamry Interface 1010B Potansiyostat-Galvanostat elektrokimyasal korozyon deney düzeneği

3.4.5. Çizik testleri

Yapışma testi olarak da bilinen çizik (scratch) testi, dışarıdan gelen kuvvetlere ve diğer çevresel etkenlere bağlı olarak kaplamanın metalik altlığa tutunma (adezyon) kuvveti hakkında bilgi vermektedir. Çizik testi prensibinde, numune sabit bir hızla hareket ederken batıcı bir uç ile artan yük ile uygulanmaktadır. Adeziv hasarın oluştuğu kritik yük değeri (L_{c1}) tespit edilmekte ve böylelikle altlık ile kaplama arasındaki yapışma dayanımı bulanabilmektedir. (Delaunois ve Lienard, 2002). Çizik testleri Atılım Üniversitesi Bor Kaplama Yetkinlik Merkezi'nde bulunan CSM Macro Scratch test cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.15). Deneyler 1-150 N yük aralığında 6 mm/dk tabla hızında gerçekleştirilmiştir. Çizik testlerinde 200 μ m yarıçapa sahip Rockwell elmas uç kullanılmıştır. Toplam çizik boyu 3 mm'dir. Test sonrasında oluşan çizikin Ni-Al esaslı astara veya SSF altlığa ulaşp ulaşmadığı SEM-EDS analizleri ile incelenmiştir.



Şekil 3.15. (a) Çizik test cihazı ve (b) çizik testi uygulamasının şematik görüntüsü (Şahin, 2021)

EIS (Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi) ölçümleri, 0,1 M NaCl çözeltisi içerisinde, 10 mV genliğinde sinüzoidal gerilim uygulanarak 10^4 Hz ile 10^{-2} Hz arasındaki frekans aralığında gerçekleştirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. SSF Altlık

Çalışma kapsamında üretilen ve altlık olarak kullanılan EN-GJS-600-10 kalite SSF dökme demirin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Geleneksel dökme demir bileşimine kıyasla nispeten daha yüksek Si ve daha düşük C değerlerine sahiptir. Ayrıca geleneksel EN-GJS-600-3 (GGG-60) bileşimine kıyasla perlit yapıcı Cu da perlit miktarının %5’i aşmaması için eser miktardadır. Dökme demirlerin hatasız üretiminde önemli bir faktör olan C eşdeğeri ($C_{eş}$) de eşitlik 4.1 kullanılarak %4,36 olarak hesap edilmiştir. Hesap edilen %4,36 değeri dökme demirlerde ideal $C_{eş}$ değeri olan ötektik kompozisyon %4,3’e çok yakındır.

Çizelge 4.1. Kimyasal analiz spektrometre sonuçlar

Elementler	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	Mg	Mo	Sn
Miktarlar (ağ.%)	3.10	3.76	0.169	0.015	0.007	0.042	0.245	0.034	0.017	0.038	0.003	0.003

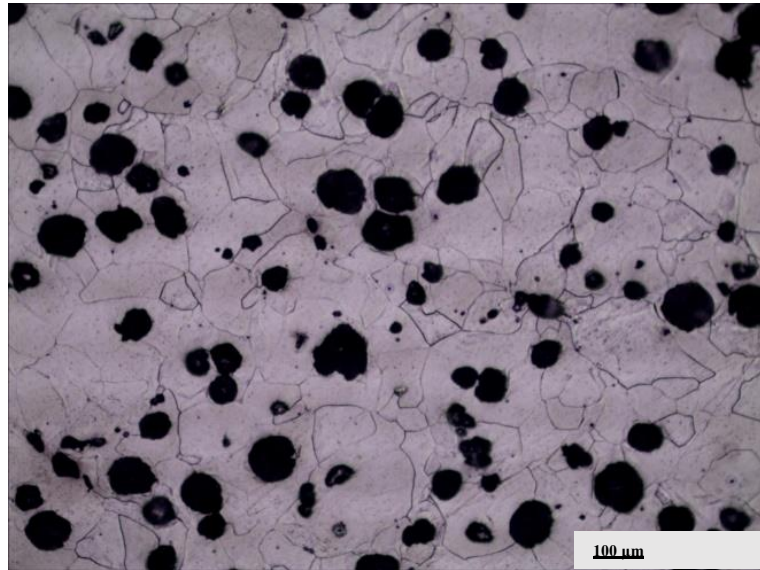
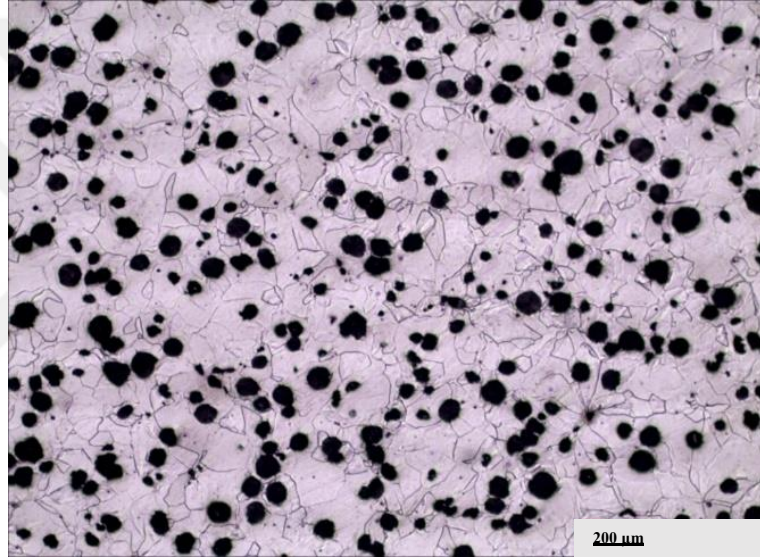
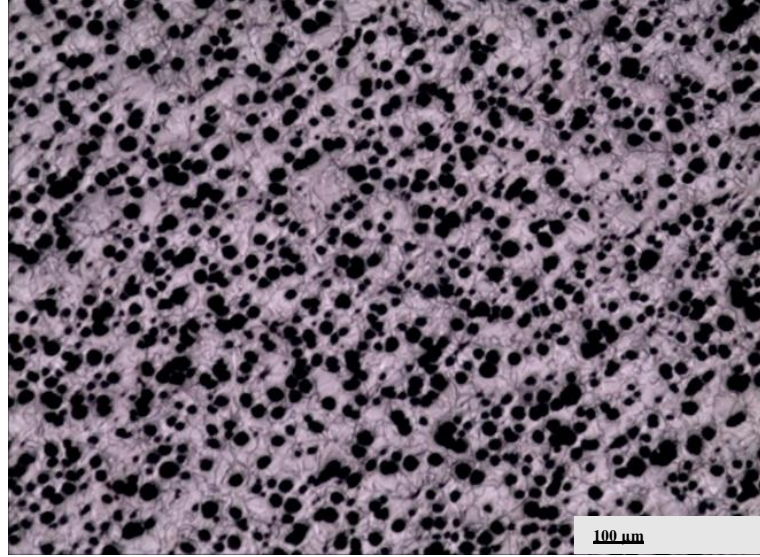
$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (4.1)$$

Küresel grafitli dökme demir üretiminde ocaktan alınan analiz değerleri ile parçadan alınan analiz değerleri küreselleştirici ve aşılایıcı ilaveleri neticesinde farklılık göstermektedir. Yapılan çalışmada ocaktan alınan analizde %3,10 C ve %3,32 Si bulunmaktadır. Küreselleştirme işlemi sonrasında FeSiMg esaslı küreselleştiriciden kaynaklı Si miktarında %0,29 artış olmuş ve Si miktarı %3,61’e çıkmıştır. Aşılardan gelen Si ile birlikte nihai Si değeri %3,76 olmuştur.

Altlık olarak kullanılan yeni nesil dökme demirin mikroyapısı optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. 50X, 100X ve 200X büyötmeye sahip mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Dökme demirin mikroyapısı küresel grafitler ve ferrit (açık renkli) fazlarından meydana gelmektedir. Ferritik matrise sahip yeni nesil sünek dökme demir olması dolayısıyla eser miktarda perlit fazına sahiptir. Altlık dökme demirin incelenen mikroyapısal özellikleri Çizelge 4.2’de listelenmiştir. Geleneksel dökme demire kıyasla yüksek Si içeriğinden ferritik matrisli olması gereken SSF %2,5 gibi çok az perlit miktarına sahiptir. SSF’lerde maksimum perlit oranı %5 olması gerektiği için incelenen dökme demirin başarılı bir şekilde üretildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Küresellik değeri (%73) nispeten düşük olarak gözüktüğü de yeni nesil dökme demirlerin yüksek Si içeriği küresel grafitlerin morfolojisini bozmakta ve küresellik değerlerinin geleneksel küresel grafitli dökme demire kıyasla daha az olmasına sebep olmaktadır. İncelenen mikroyapısal özelliklerden bir tanesi de küre sayısıdır. İncelenen SSF malzemedeki oldukça yüksek nodül sayısı gözlemlenmiştir (mm^2 'de 363). Nodül sayısı veya yoğunluğu, küresel grafitli dökme demirlerin termal, korozyon ve mekanik özellikleri üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir (Guzel, 2014 ve Lekakh, 2013). Ayrıca, yüksek nodül sayısı küresel grafitli dökme demirde hızlı soğumayı engelleyerek çil (karbür) oluşumunu önlemekte, mikro segregasyonu engellemekte ve mikro yapısal homojensizliği azaltmaktadır (Fras, 2016 ve Fras, 2016). Nodül sayısı ISO 945-1:2019'a göre hesaplanmıştır.





Şekil 4.1. EN GJS 600-10 kalite SSF'e (yeni nesil dökme demir) ait 50X, 100X ve 200X büyütme optik mikroyapı fotoğrafları

Çizelge 4.2. EN GJS 600-10 kalite dökme demire ait mikroyapısal özellikler

Küresellik (%)	73
Küre Sayısı (mm²'de)	363
C oranı (%)	14,4
Ferrit oranı (%)	83,1
Perlit Oranı (%)	2,5

Çalışma kapsamında üretilen EN-GJS-600-10 kalite yeni nesil dökme demirin akma dayanımı, çekme dayanımı, % uzama değeri, darbe enerjisi ve Brinell sertlik değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir ve ayrıca EN 1563 dökme demir standardında verilen yeni nesil EN-GJS-600-10 kalite ile geleneksel EN-GJS-600-3 (GGG-60) kalite küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri ile de kıyaslanmıştır. Standartta verilen geleneksel (EN-GJS-600-3) ve yeni nesil (EN-GJS-600-10) küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri karşılaştırıldığında şu farklılıklar göze çarpmaktadır. Yeni nesil dökme demir daha yüksek (1,14 kat) çekme dayanımına, çok daha yüksek % uzama (3 kat) değerine, daha yüksek darbe enerjisine (1,75 kat) ve daha dar Brinell sertlik aralığına sahiptir. Yeni nesil SSF'nin dar sertlik aralığına sahip olması şu şekilde açıklanabilir. Perlit fazı kimyasal bileşimin yanı sıra soğuma hızına da bağlı olduğu için döküm parçaların ince kesitleri nispeten hızlı soğuma neticesinde perlitik mikro yapıya ve daha yüksek sertliğe sahiptir. Bununla birlikte yeni nesi SSF'lerde perlit fazının ortadan kalkmasıyla veya çok az oranda olması ile kesitler arası mikro yapısal farklılıklar ortadan kalmıştır. Böylelikle parça tüm kesitlerde neredeyse homojen sertliğe sahip olmaktadır.

Tez çalışmasında altlık olarak üretilen SSF'nin mekanik özellikleri EN 1563 standardında EN-GJS-600-10 kalite SSF için verilen değerler ile kıyaslandığında akma dayanımı, % uzama, darbe enerjisi ve sertlik değerlerinin standarda uygun olduğu, çekme dayanımının ise bir miktar az olduğu belirlenmiştir. Ölçülen % uzama değerinin (%19,2) standartta belirtilen minimum % uzama değerinden (%10) neredeyse 2 katı olması çekme dayanımında bir miktar azalmaya sebep olmuştur.

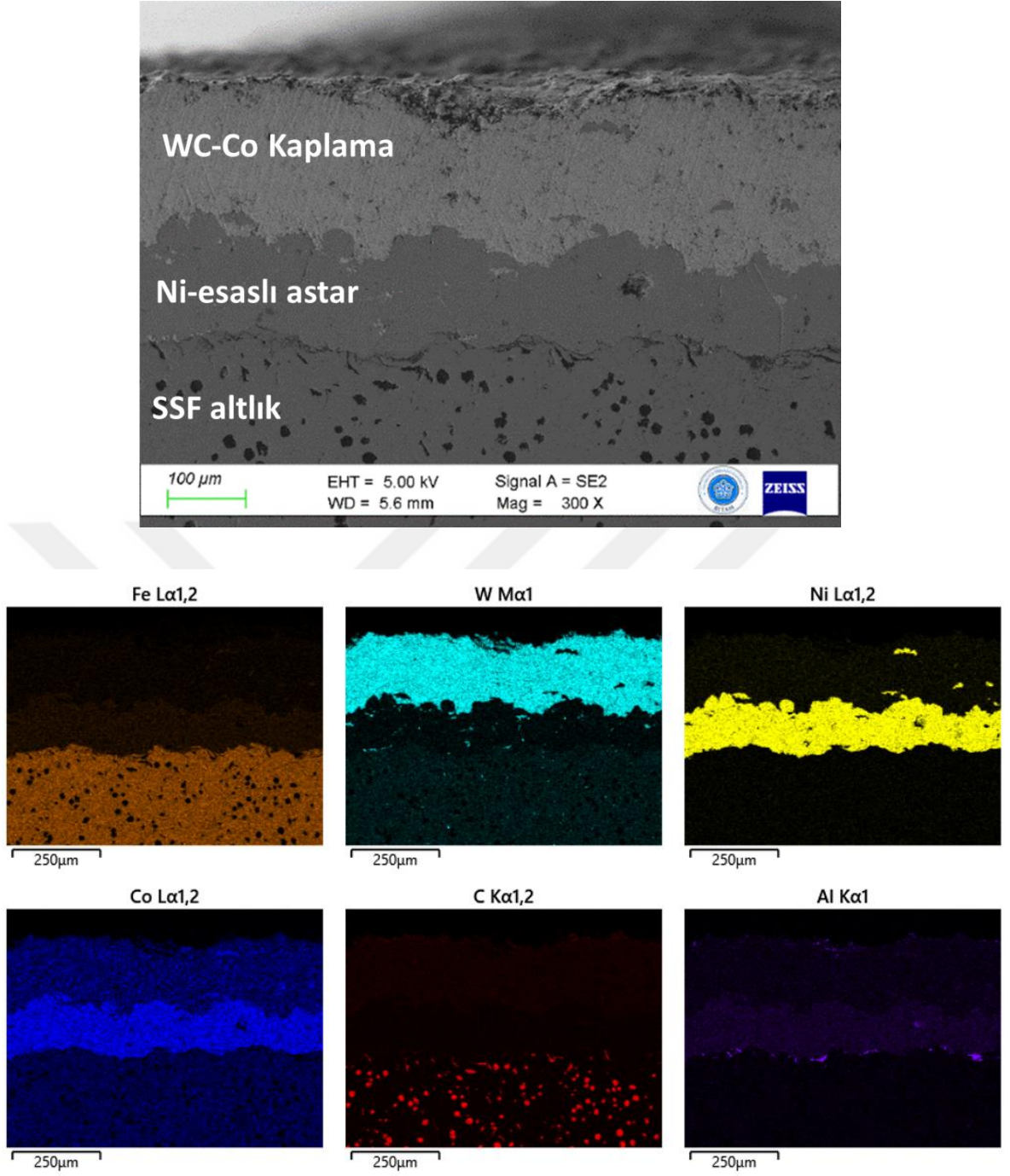
Çizelge 4.3. EN GJS 600-10 kalite dökme demire ait mekanik özellikler ve EN 1563 standardı ile kıyaslanması

Dökme Demir	Akma Dayanımı (MPa, min.)	Çekme Dayanımı (MPa, min.)	% Uzama (min.)	Darbe Enerjisi (J, min.)	Sertlik (HB)
Çalışmada üretilen EN-GJS-600-10	447	545	19,2	102	201,3
EN 1563 standardı (EN-GJS-600-10)	420	600	10	70	200-230
EN 1563 standardı (EN-GJS-600-3, GGG-60)	370	600	3	40	190-270

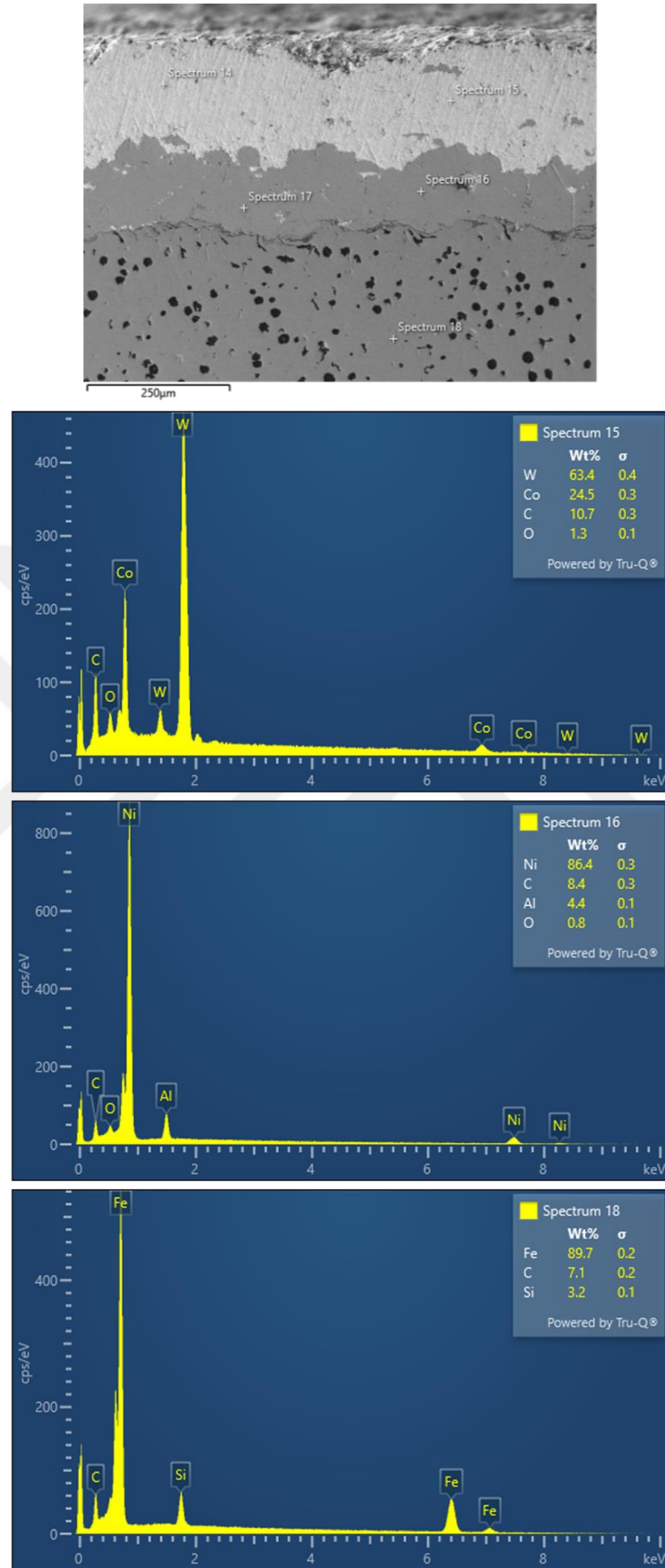
4.2. HVOF Termal Sprey Kaplama Yöntemi ile Kaplama

Tez çalışmasında EN-GJS-600-10 kalite yeni nesil sünek dökme demire yüzey sertliğini, aşınma ve korozyon direncini arttırmak amacıyla HVOF yöntemi ile WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalar uygulanmıştır. Ayrıca HVOF kaplamaların SSF altlığı iyi yapışması için Ni-Al esaslı bağlayıcı katman (astar) uygulanmıştır. WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalar ile Ni-Al esaslı bağlayıcıların kimyasal formülleri şu şekildedir: (i) 88WC-12Co, (ii) 86WC-10Co-4Cr ve (iii) 95Ni-5Al.

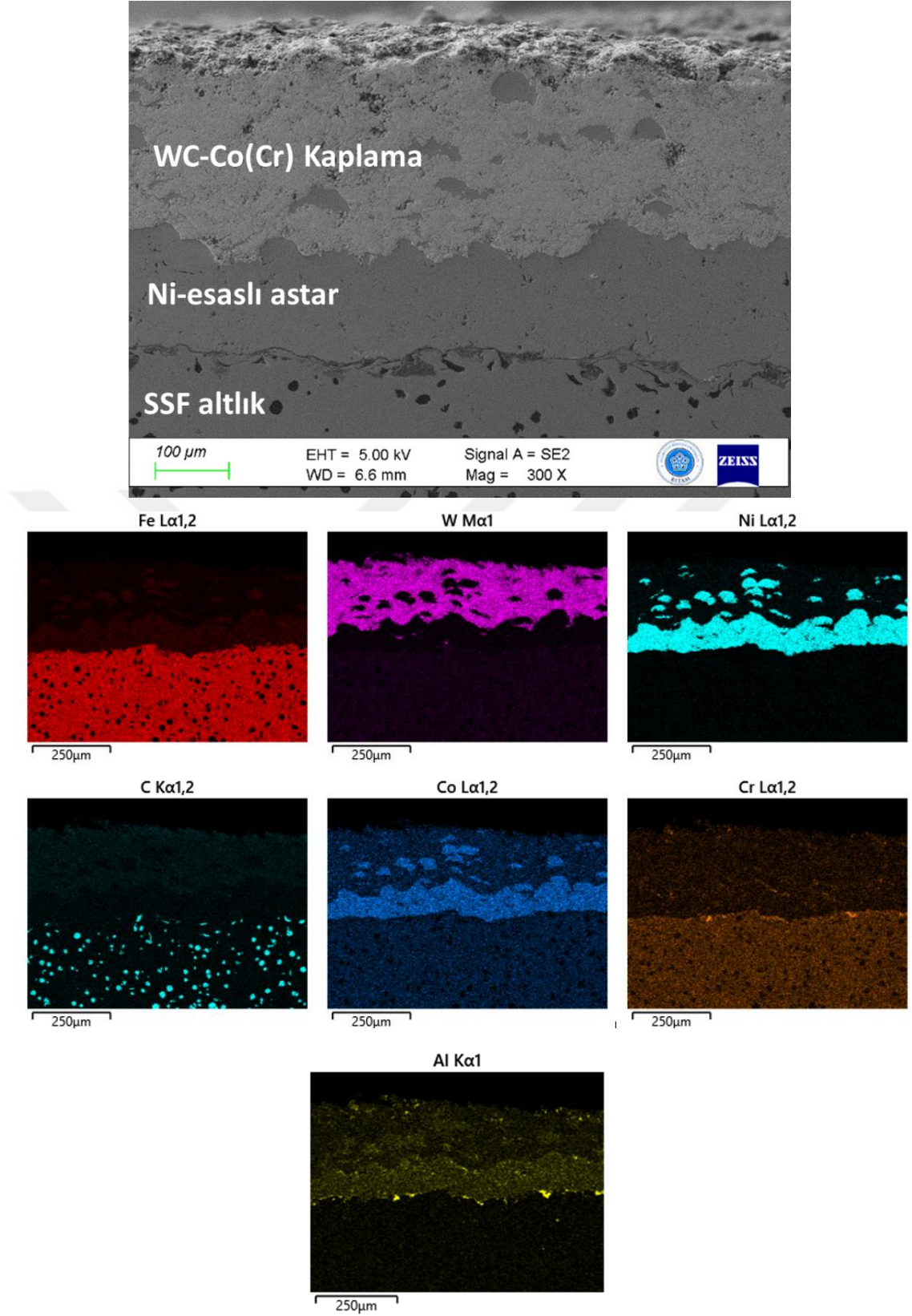
HVOF yöntemi ile kaplanmış WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamaların kimyasal analizi ve kaplama kalınlıkları enine kesit SEM-EDS analizleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. WC-Co kaplamaya ait enine kesit elementel haritalama ve nokta analizleri sırasıyla Şekiller 4.2 ve 4.3'te gösterilmiştir. WC-Co(Cr) kaplamaya ait enine kesit elementel haritalama ve nokta analizleri ise sırasıyla Şekiller 4.4 ve 4.5'te gösterilmiştir. Bununla birlikte enine kesit analizlerinden Ni-Al esaslı astara ait kimyasal analiz ve kalınlık inceleme çalışmaları da gerçekleştirilmiştir.



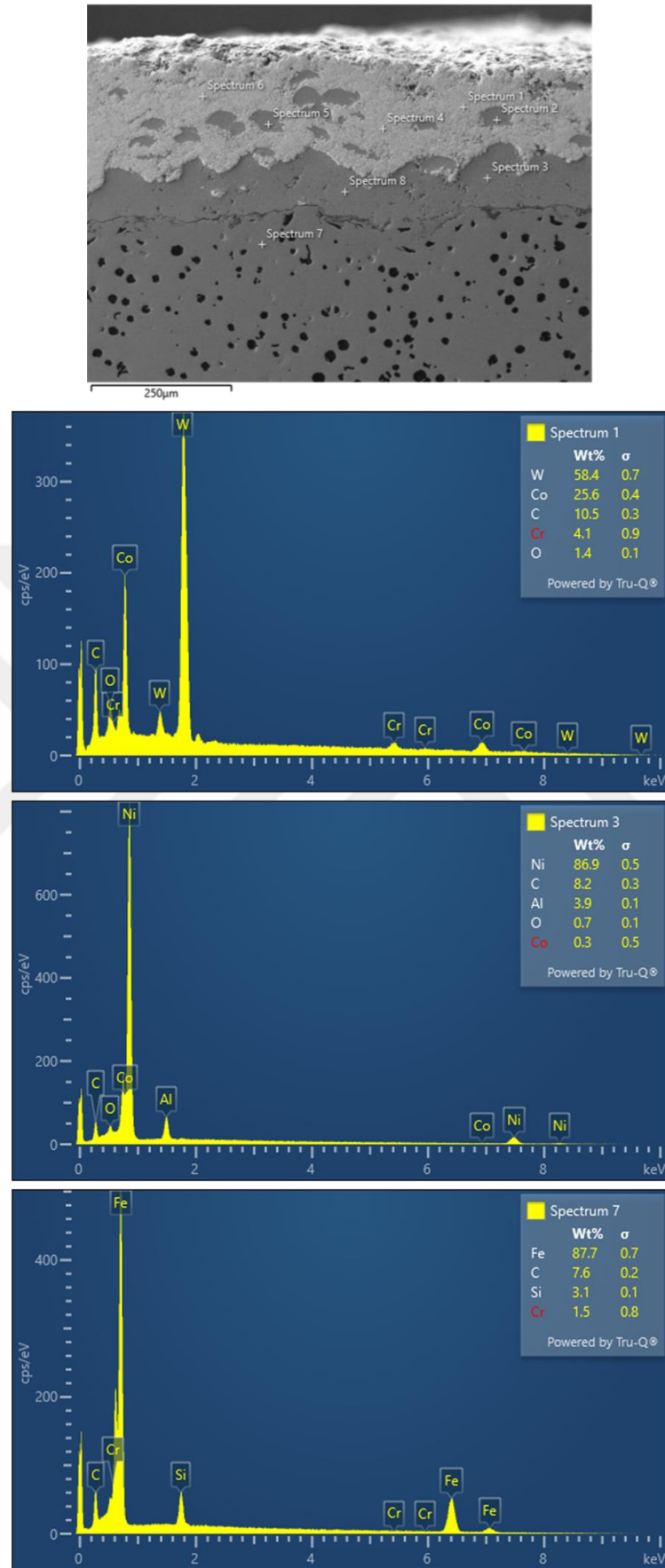
Şekil 4.2. WC-Co kaplamaya ait enine kesit SEM-EDS elemental haritalama analizleri



Şekil 4.3. WC-Co kaplamaya ait enine kesit SEM-EDS nokta analizleri



Şekil 4.4. WC-Co(Cr) kaplamaya ait enine kesit SEM-EDS elementel haritalama analizleri



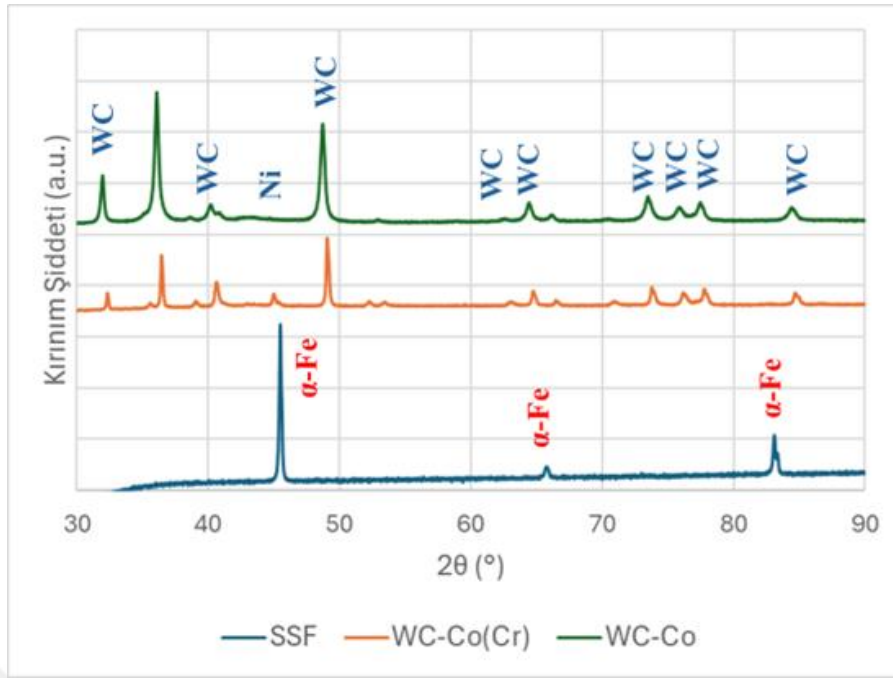
Şekil 4.5. WC-Co(Cr) kaplamaya ait enine kesit SEM-EDS nokta analizleri

EDS haritalama elementel analiz sonuçlarına göre WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamaların başarılı bir şekilde uygulandığı görülmüştür. Altlığın hemen üzerinde Nikelce zengin (95Ni-5Al) astar tabakası ve en üst kısımda da kaplamanın varlığı tespit edilmiştir. Fe atomları beklenildiği üzere tamamen SSF altlıkta bulunmaktadır. Karbon atomları grafit küreleri halinde SSF altlıktadır. SEM-EDS elementel haritalama analizlerine (Şekiller 4.2 ve 4.4) göre kaplamada karbon varlığı çok net değildir. Fakat SEM-EDS nokta analizlerine (Şekiller 4.3 ve 4.5) göre kaplamada WC içerisindeki karbon varlığı ispat edilmiştir. Ayrıca WC-Co(Cr) kaplamada bulunan Cr elementinin varlığı yine SEM-EDS nokta analizleri ile belirlenmiştir (Şekil 4.3). Bununla birlikte enine kesit incelemelerinden kaplama ve astar kalınlıkları da hesap edilmiş ve Çizelge 4.4'te listelenmiştir. WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamaların hesap edilen kaplama kalınlıkları sırasıyla $207,5 \pm 6,0 \mu\text{m}$ ve $234,5 \pm 4,3 \mu\text{m}$ olup astar kalınlıkları ise $121,0 \pm 5,8 \mu\text{m}$ ve $144,5 \pm 5,3 \mu\text{m}$ 'dir.

Çizelge 4.4. WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalara ait hesap edilen astar ve kaplama kalınlıkları

Kaplama	Astar Kalınlığı (μm)	Kaplama Kalınlığı (μm)
WC-Co	$121,0 \pm 5,8 \mu\text{m}$	$207,5 \pm 6,0 \mu\text{m}$
WC-Co(Cr)	$144,5 \pm 5,3 \mu\text{m}$	$234,5 \pm 4,3 \mu\text{m}$

Kaplamaların faz analizleri XRD tekniği ile analiz edilmiş ve elde edilen kırınım eğrileri Şekil 4.6'da verilmiştir. Kaplamaların faz dağılımlarının büyük çoğunlukla WC (JCPDS Kart No: 25-1047) kırınım piklerinden meydana geldiği görülmüştür. Kırınım piklerinde az da olsa düşük şiddetli Ni esaslı astara ait pikler (JCPDS Kart No: 03-1051) de mevcuttur. Altlık SSF'in kırınım analizleri incelendiğinde sadece α -Fe (ferrit, JCPDS Kart No: 06-069) fazına ait kırınım pikleri bulunmaktadır. Başka bir faza ait herhangi bir pik bulunmamaktadır.



Şekil 4.6. Altlık SSF ile WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalara ait XRD kırınım desenleri

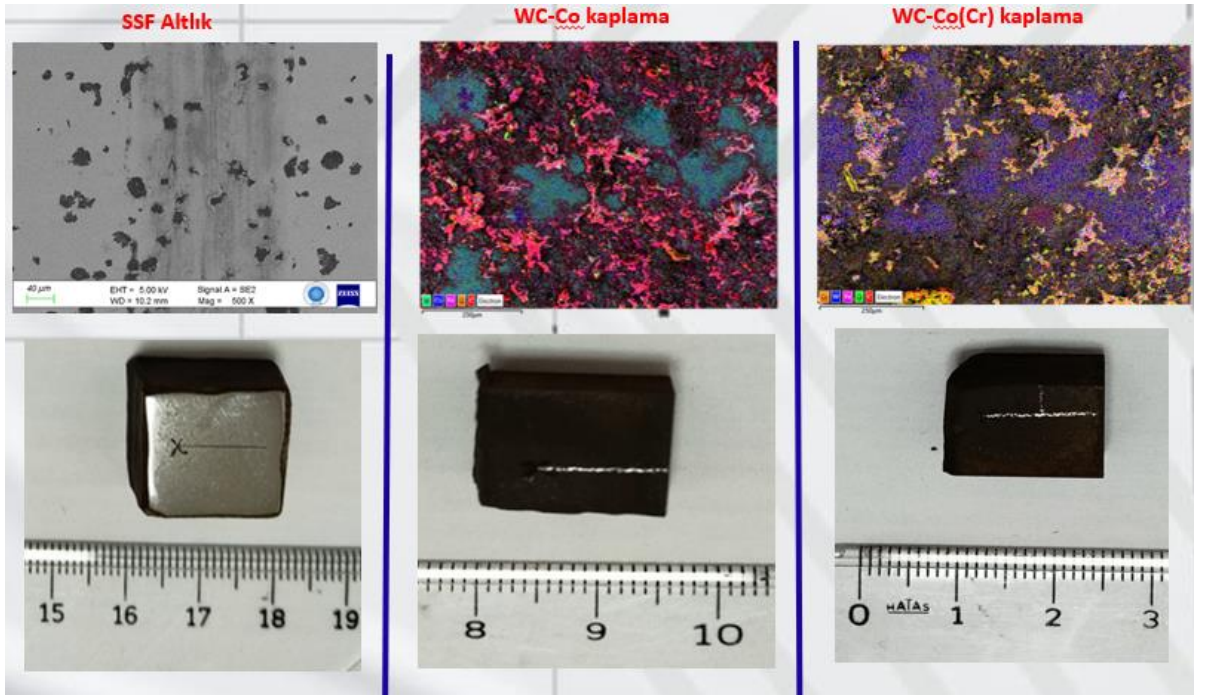
Kaplama ve astar tabaka sertlikleri Mikrovickers yöntemine göre belirlenmiş ve Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. SSF altlığın sertliği ortalama 201,3 HB olarak ölçülmüştür. Brinell-Vickers dönüşümüne göre bu değer yaklaşık 199 HV değerine denk gelmektedir. Uygulanan kaplamaların amacına uygun olarak altlık metale kıyasla oldukça yüksek sertlik değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Cr içeren kaplamanın sertliği Cr içermeyen kaplama sertliğinin yaklaşık 1,3 katıdır. WC-Co esaslı kaplamalara Cr ilavesinin sebebi Co içerisinde çözünerek katı çözelti sertleşmesi sağlamaktır. Bu amaca uygun olarak Cr ilavesi ile kaplama sertliği de ciddi oranda artmıştır.

Çizelge 4.5. WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalara ve astara ait sertlik değerleri

Sertlik HV 0,05								
Bölge	WC-Co(Cr)				WC-Co			
	1	2	3	Ortalama	1	2	3	Ortalama
Kaplama	691,6	763	739,7	731,4	564,1	583,8	550,6	566,2
Astar	211,5	209,3	187,6	202,8	188,7	170,9	216,3	192,2

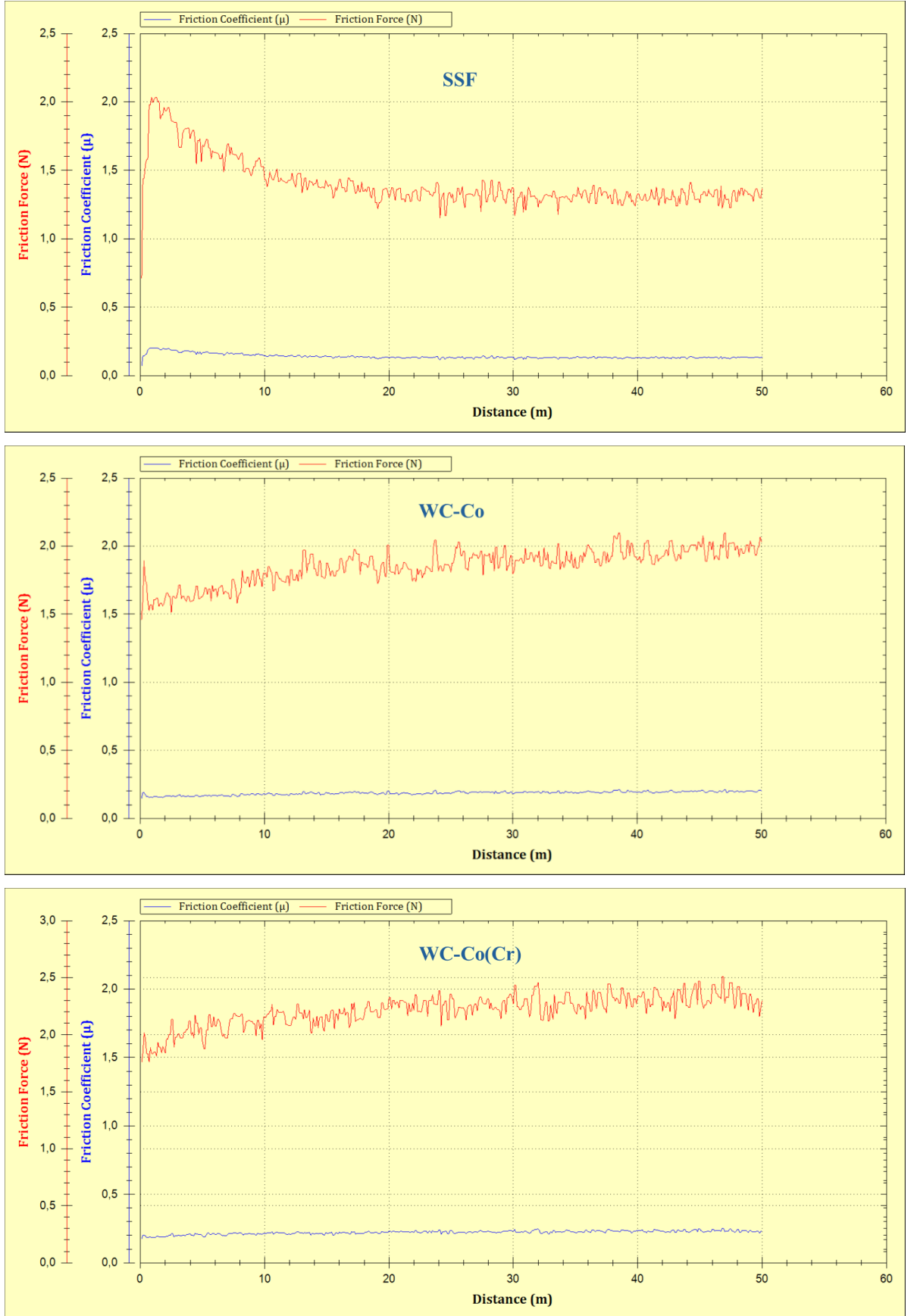
4.3. Aşınma Testi

Altlık metal ve kaplamaların aşınma davranışları abrasif aşınma testleri ile belirlenmiştir. Aşınma izlerinin makro ve mikro görüntüleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Aşınma kaybı altlık metale kıyasla kaplamalarda çok düşüktür. Altlık metalde yaklaşık 200 μm kalınlığında belirgin aşınma izi mevcut iken, kaplamaların aşınma izleri çok belirgin değildir. Bu durum kaplamaların altlık metalin aşınma direncini arttırdığı gözlemlenmiştir. Altlık metalin aşınma izi civarında grafitler küresel morfolojilerini kaybetmiş durumda iken, kaplamalı numunelerde kaplama sonrası çok derin olmayan çizikler mevcuttur.

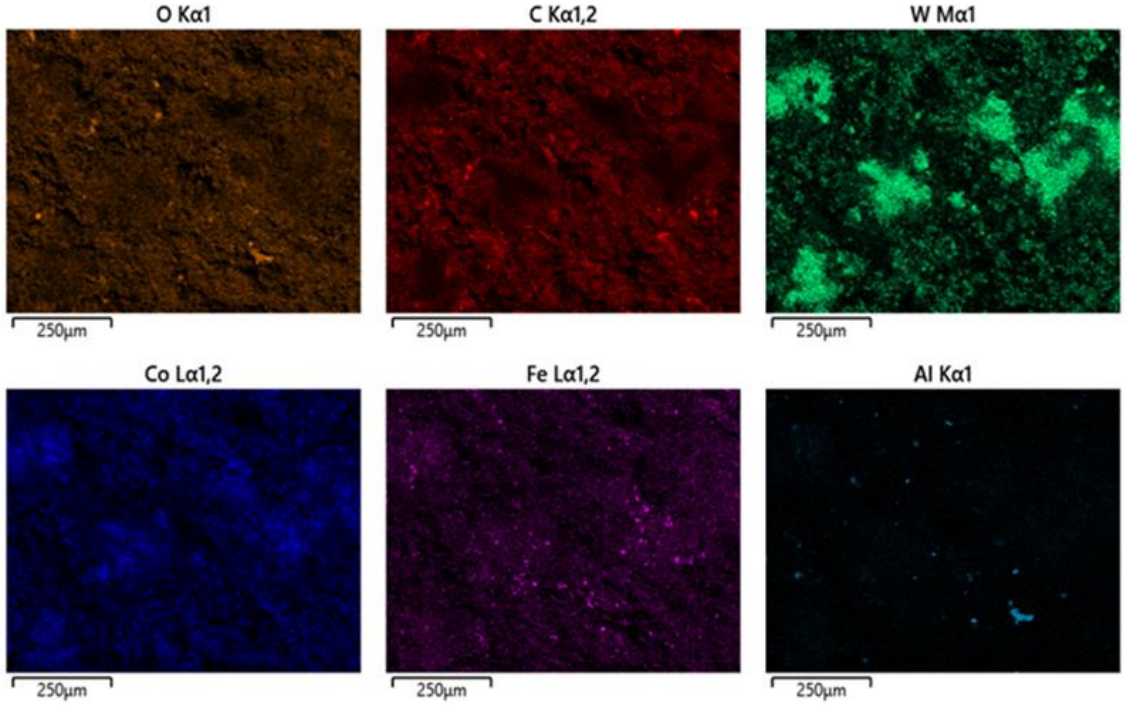


Şekil 4.7. Altlık SSF ile WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalara ait aşınma izlerinin makro ve mikro görüntüleri

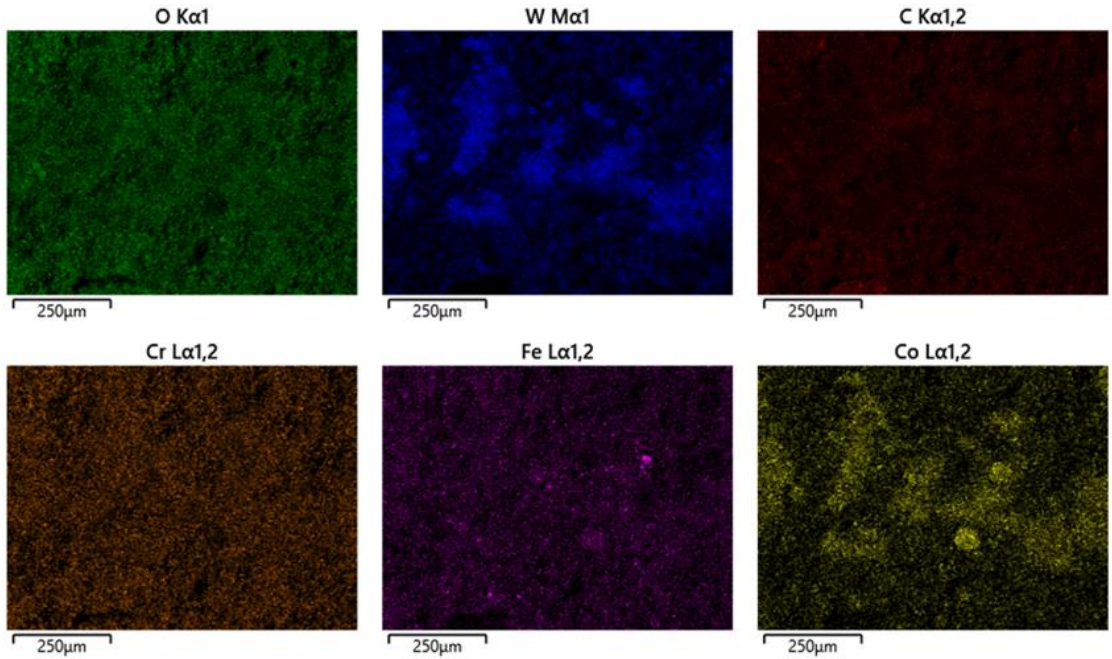
Altlık SSF ile WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalara ait sürtünme katsayıları- ve sürtünme kuvvetleri-kayma mesafesi grafikleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Sürtünme katsayısı ilk hızlı artışından sonra neredeyse sabit kalmıştır. İlk hızlı artışın sebebi aşınma başlangıcında bilye ile yüzey arasındaki temas alanının az olmasından kaynaklanmaktadır. Ortalama sürtünme katsayıları SSF altlık, WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalar için sırasıyla 0,14, 0,20 ve 0,22 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.8. Altlık SSF ile WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalara ait sürtünme katsayıları ve sürtünme kuvvetleri-kayma mesafesi grafikleri



Şekil 4.9. WC-Co kaplamaya ait aşınma izlerinin FESEM-EDS analizleri



Şekil 4.10. WC-Co(Cr) kaplamaya ait aşınma izlerinin FESEM-EDS analizleri

WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamaların aşınma izleri SEM-EDS (Şekiller 4.9 ve 4.10) analizleri ile araştırılmıştır. Kaplamaların aşınma dirençlerinin yüksek olması aşınma izlerinin EDS alan analizleri ile de doğrulanmıştır. Aşınma izlerinin olduğu bölgelerde altlık Fe elementine ait herhangi bölge görülmediği, aşınma izinin olduğu

bölgelerde kaplama içeriğinde bulunan W ve Co elementlerinin hala yoğun miktarda var olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum aşınma testi sonrasında kaplamanın aşınıp altlığa ulaşmadığını belirtmiştir.

4.3.1. Aşınma testi sonuçları

4.3.1.1. Makro-mikro görünüm ve aşınma davranışı

SSF altlık ile HVOF yöntemiyle kaplanmış WC-Co ve WC-Co(Cr) numunelerin abrasif aşınma performansları incelenmiştir. Şekil 4.7'de görüldüğü üzere:

- Altlık metalde ~200 µm derinliğinde belirgin aşınma izi oluşurken,
- Kaplamalı numunelerde yalnızca yüzeysel çizikler gözlenmiştir.
- Grafitlerin morfolojik bozulması (altlıkta) ile karşılaştırıldığında, kaplamaların abrasif hasara karşı etkin koruma sağladığı tespit edilmiştir.

4.3.1.2. Sürtünme davranışı analizi

Kayma mesafesiyle değişen sürtünme katsayıları (Şekil 4.8):

1. Başlangıç ani yükselme: Kontak alanının dar olması nedeniyle literatürle uyumlu (Stachowiak ve Batchelor, 2013).
2. Sabit davranış: Ortalama değerler:
 - SSF altlık: 0,14
 - WC-Co kaplama: 0,20
 - WC-Co(Cr) kaplama: 0,22

WC bazlı kaplamaların yüksek sürtünme katsayısı, sertliğin artmasıyla korelasyon gösterir (Toma ve diğ., 2018).

4.3.1.3. Mikroyapısal destekli aşınma mekanizması

FESEM-EDS analizleri (Şekil 4.9-4.10) kritik bulgular sunmaktadır:

1. **Aşınma bölgesinde Fe tespit edilememesi** → Kaplamanın delinmediğini,
2. **Yoğun W/Co varlığı** → Aşınmanın yalnızca kaplama yüzeyinde gerçekleştiğini,
3. **Grafit bozulmasının olmaması** → Altlık korumasının etkinliğini kanıtlamaktadır.

Çizelge 4.6. Aşınma testinin literatür ile karşılaştırmalı değerlendirmesi

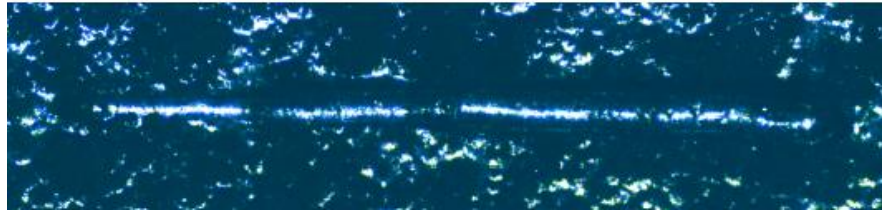
Parametre	SSF Altlık	WC-Co	WC-Co(Cr)	Literatür Desteği
Aşınma İzi	Derin (200µm)	Yüzeyel	Yüzeyel	HVOF kaplamalar abrasif kayıpları 5-10x azaltır (Bolelli et al., 2015)
Ort. COF	0,14	0,20	0,22	WC kaplamalarda COF artışı sert faz varlığıyla açıklanır (Matik et al., 2017)
Mekanizma	Grafit bozulması	Yüksek W/Co	Yüksek W/Co	EDS ile aşınma derinliği doğrulaması standart metodolojidir (Gant et al., 2020)

4.4. Çizik Testi

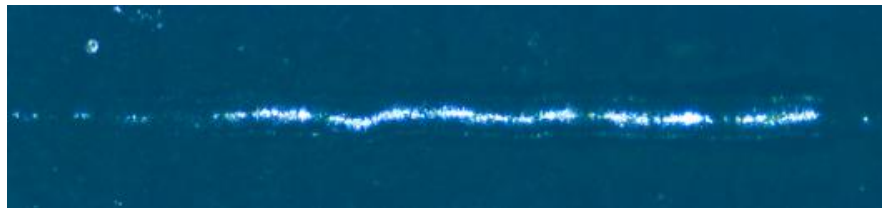
Çizik testi sırasında belirlenen kritik yük değerleri (L_{c1}) Çizelge 4.7’de verilmiştir. Kritik yük değeri kaplamalardaki büyük çatlakların ilk oluştuğu yük değerini belirtmektedir. Şekil 4.11’de HVOF kaplamalara ait çiziklerin optik mikroskop görüntüleri verilmektedir. Optik mikro yapı görüntülerinden her iki kaplamada meydana gelen hasarın oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Her iki kaplamada da eksik yapışma veya kırılğan özellik gösteren herhangi bir iz tespit edilmemiştir.

Çizelge 4.7. WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalara ait kritik yük değerleri

WC-Co	WC-Co(Cr)
8,3 N	30,1 N



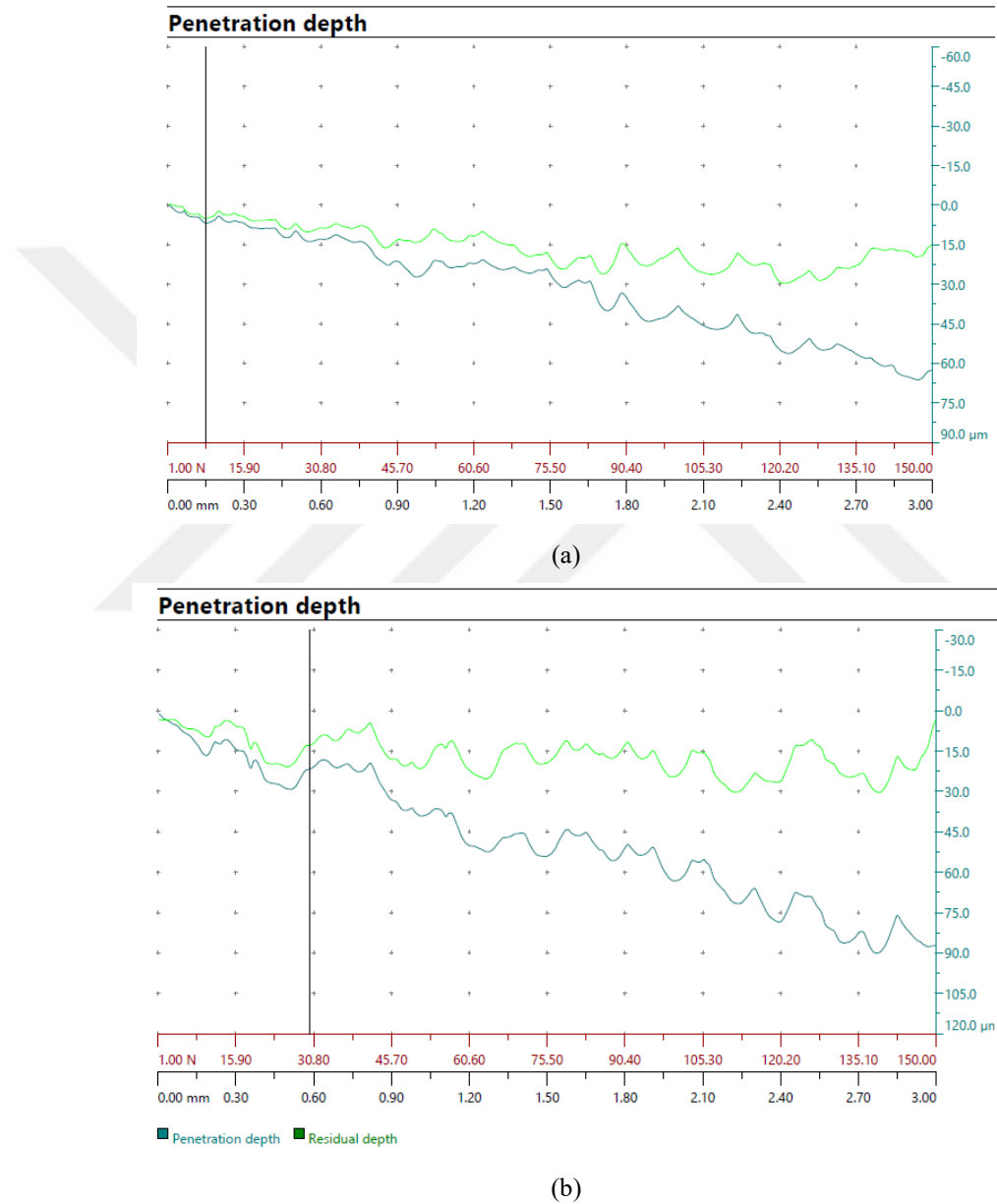
(a)



(b)

Şekil 4.11. WC-Co(Cr) kaplamaya ait aşınma izlerinin FESEM-EDS analizleri

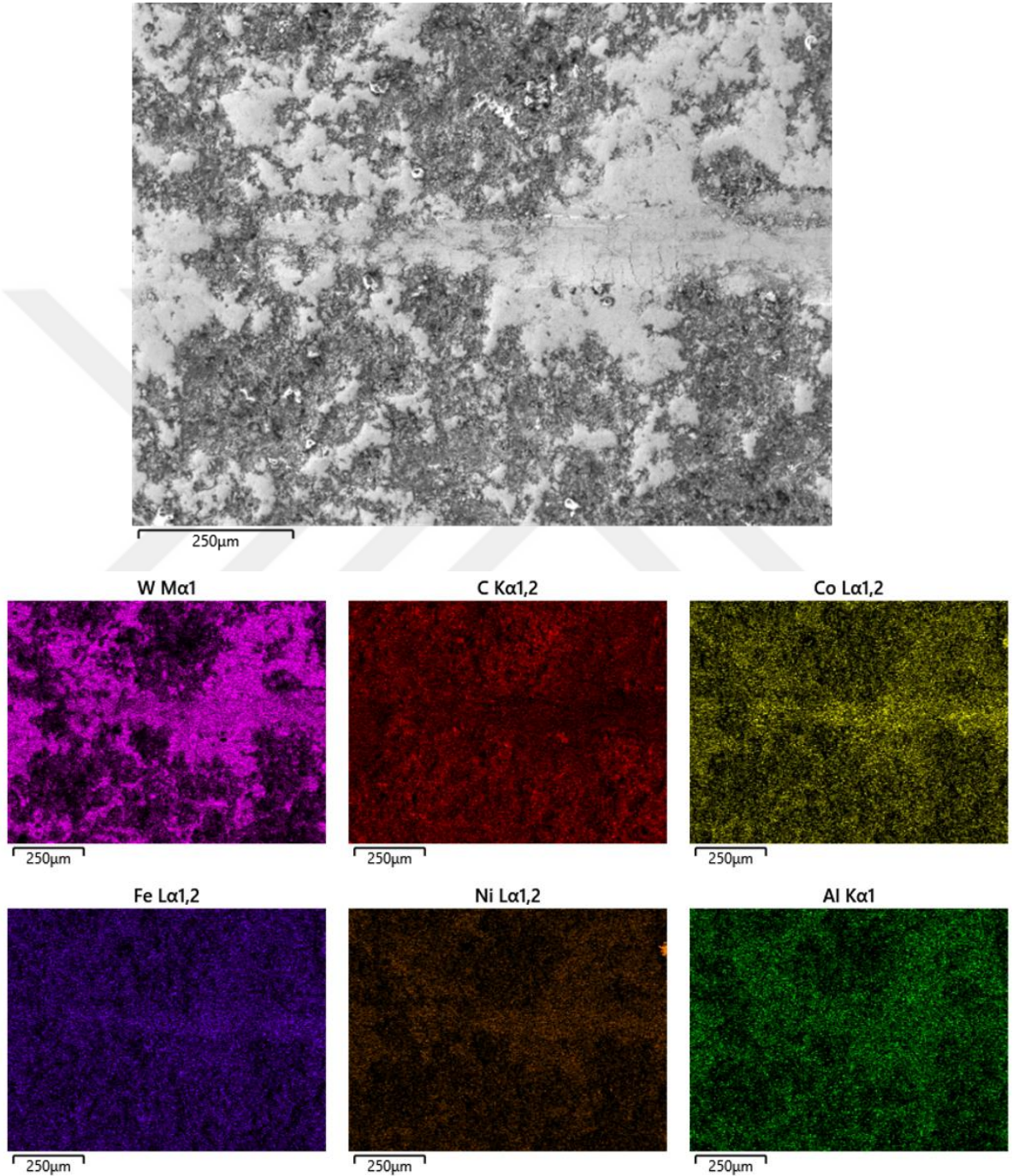
WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalara ait penetrasyon derinliği-çizik mesafesi grafikleri sırasıyla Şekiller 4.12 ve 4.13'te verilmiştir. WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalar için penetrasyon derinliği sırasıyla 60 ve 85 μm olarak gözlemlenmiştir. Kaplama kalınlıklarının 205-235 μm olduğu düşünülürse batıcı uç derinliğinin kaplama kalınlığı içerisinde olduğu altlık metale ve hatta Ni-Al esaslı astara dahi ulaşmadığı görülmüştür.



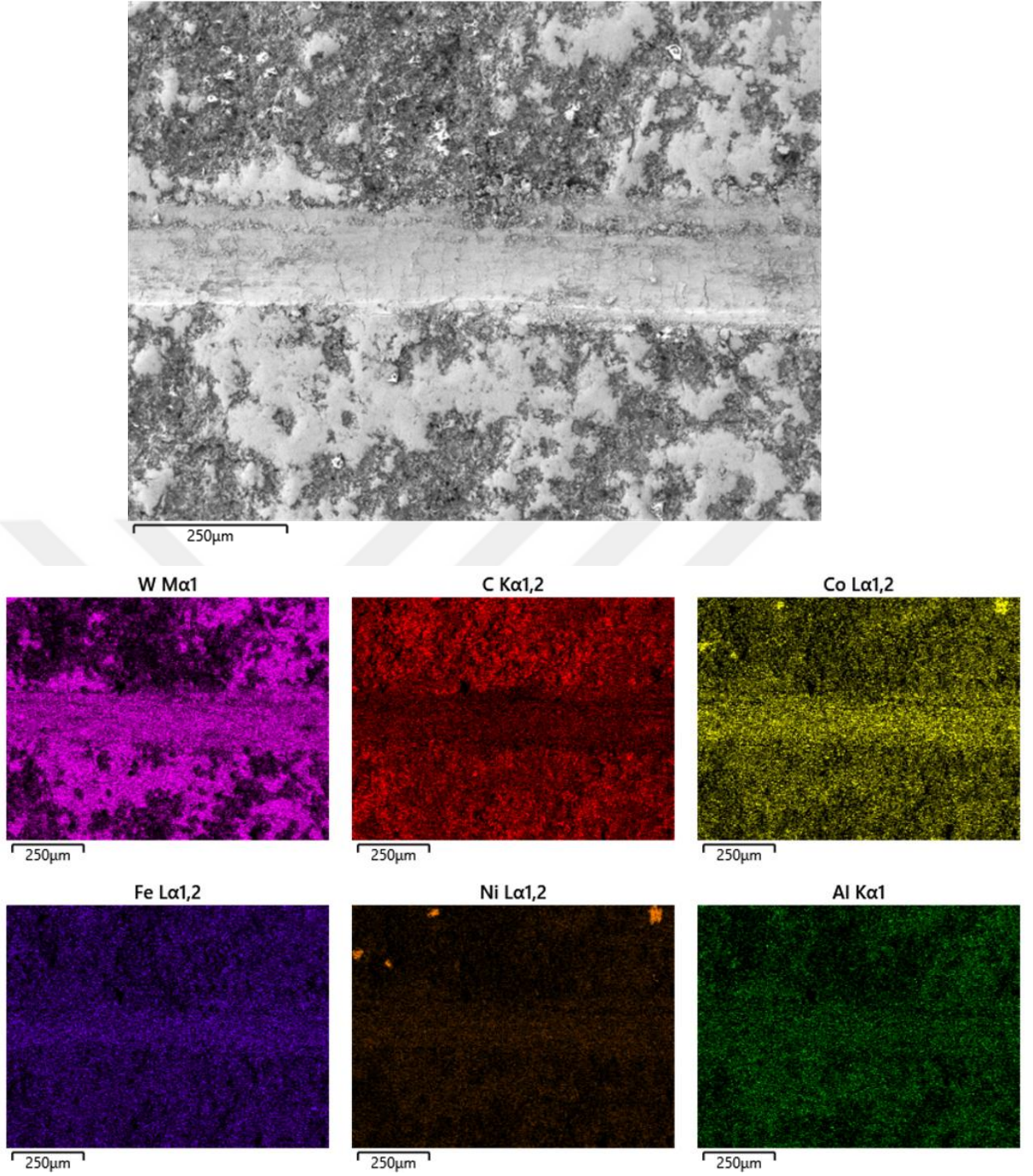
Şekil 4.12. WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalara penetrasyon derinliği-çizik mesafesi eğrileri

Çizik testi sonrasında penetrasyon incelemesi amacıyla çizik etrafında SEM-EDS haritalama analizleri (Şekiller 4.3-4.18) gerçekleştirilmiştir. 150 μm uzunluğundaki çizik taramalı elektron mikroskobu için çok uzun olduğu için çizik 3 bölgede incelenmiştir: (i) düşük yük bölgesi ($\sim 0-50$ N), (ii) orta yük bölgesi ($\sim 50-100$

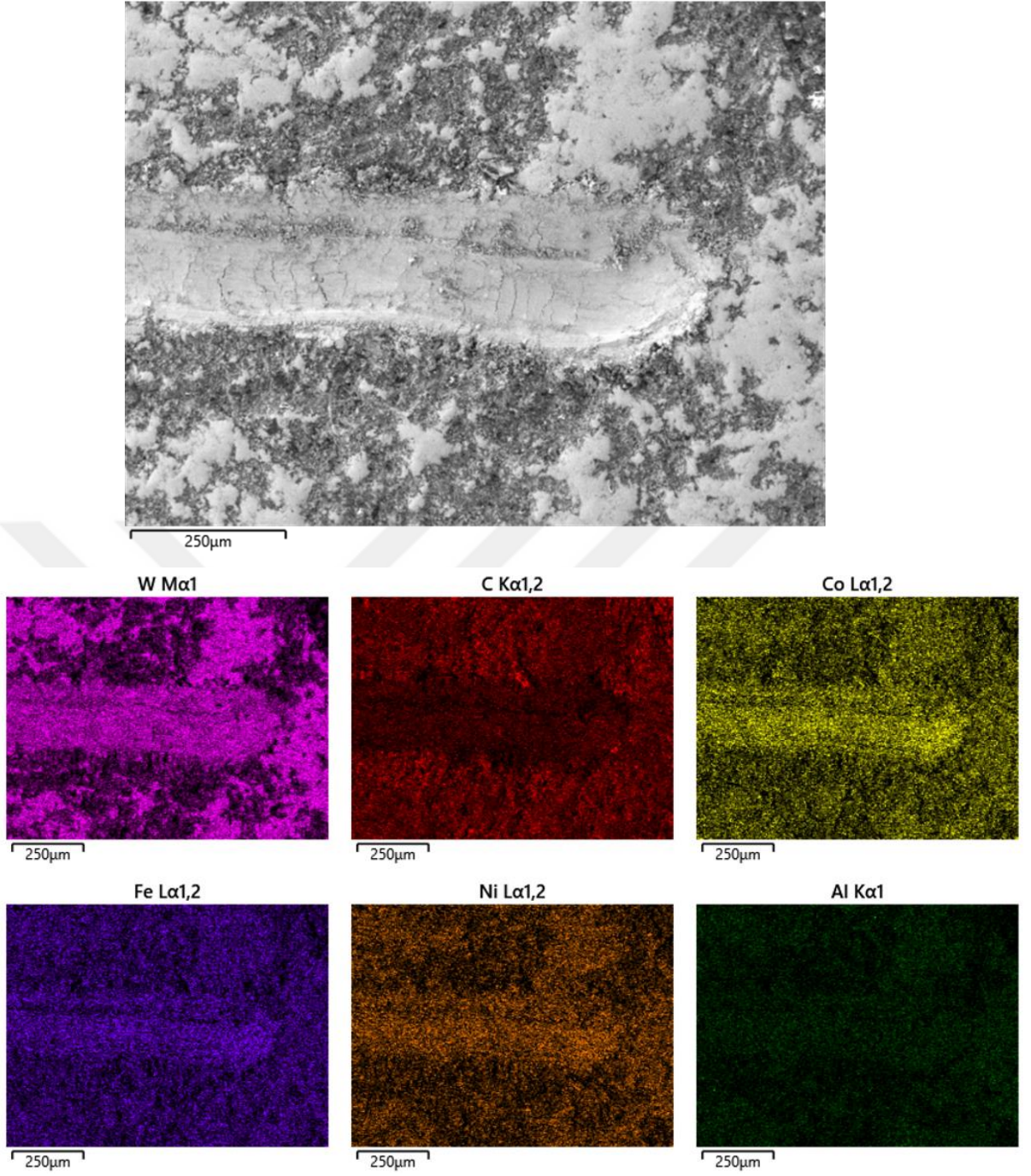
N), ve (iii) yüksek yük bölgesi ($\sim 100-150$ N). SEM-EDS haritalama analizleri sonuçlarına göre her iki kaplamada da yüksek yüklerde dahi çizikğin SSF altlığı inmediği, 150 N yük değerinde bile HVOF kaplamaların dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir.



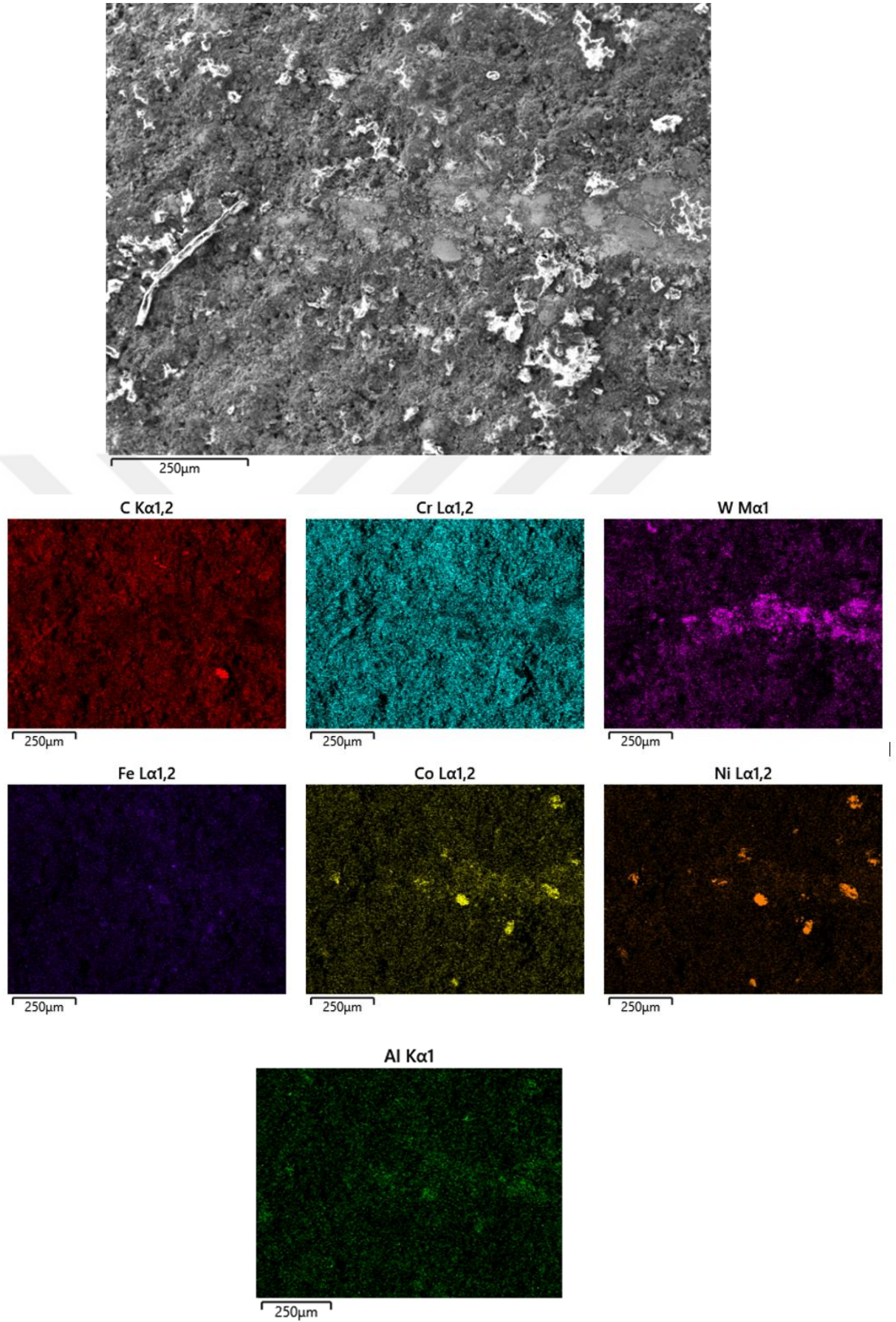
Şekil 4.13. WC-Co kaplamaya ait çizik testi düşük yük bölgesi SEM-EDS haritalanma analizleri



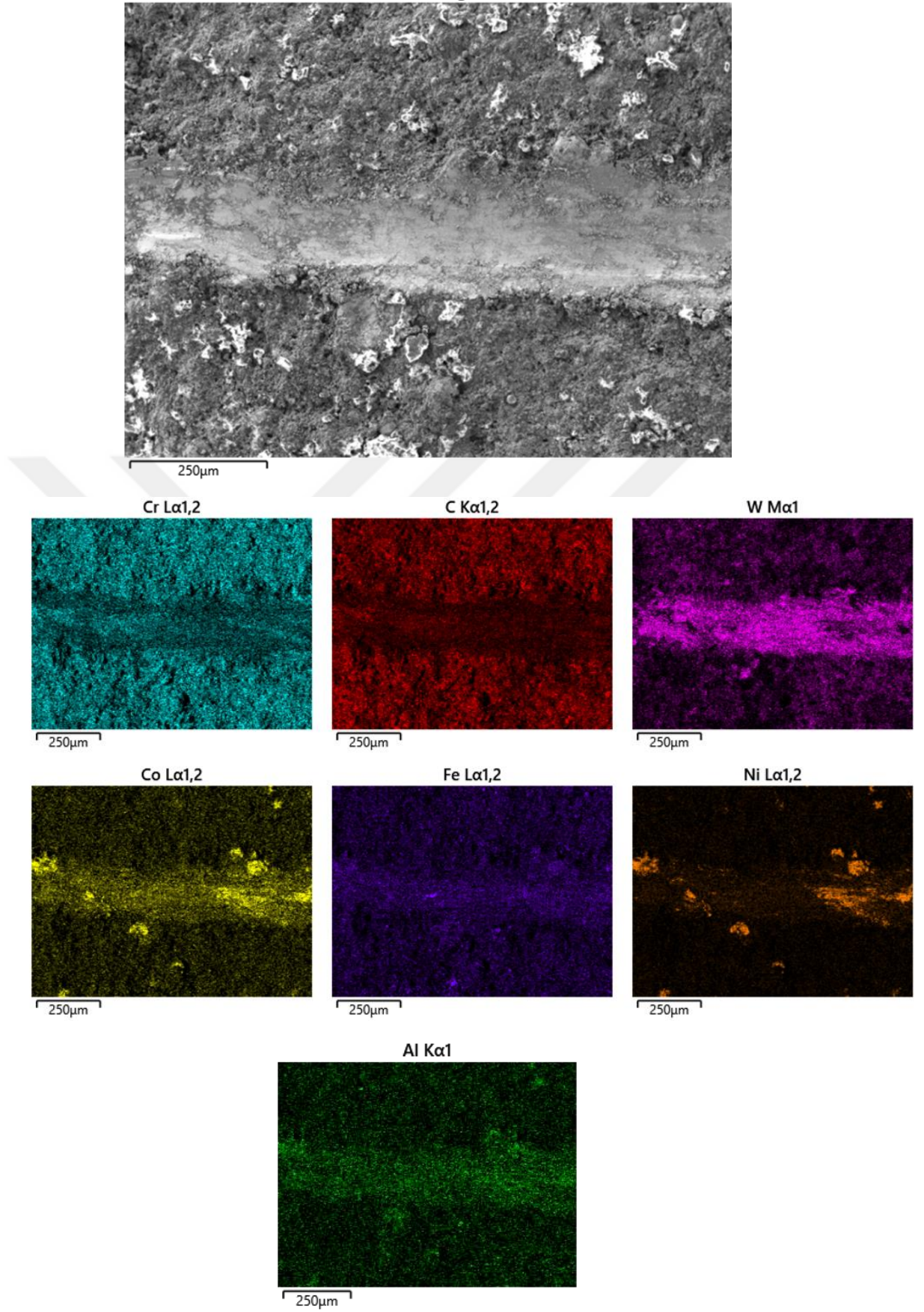
Şekil 4.14. WC-Co kaplamaya ait çizik testi orta yük bölgesi SEM-EDS haritalanma analizleri



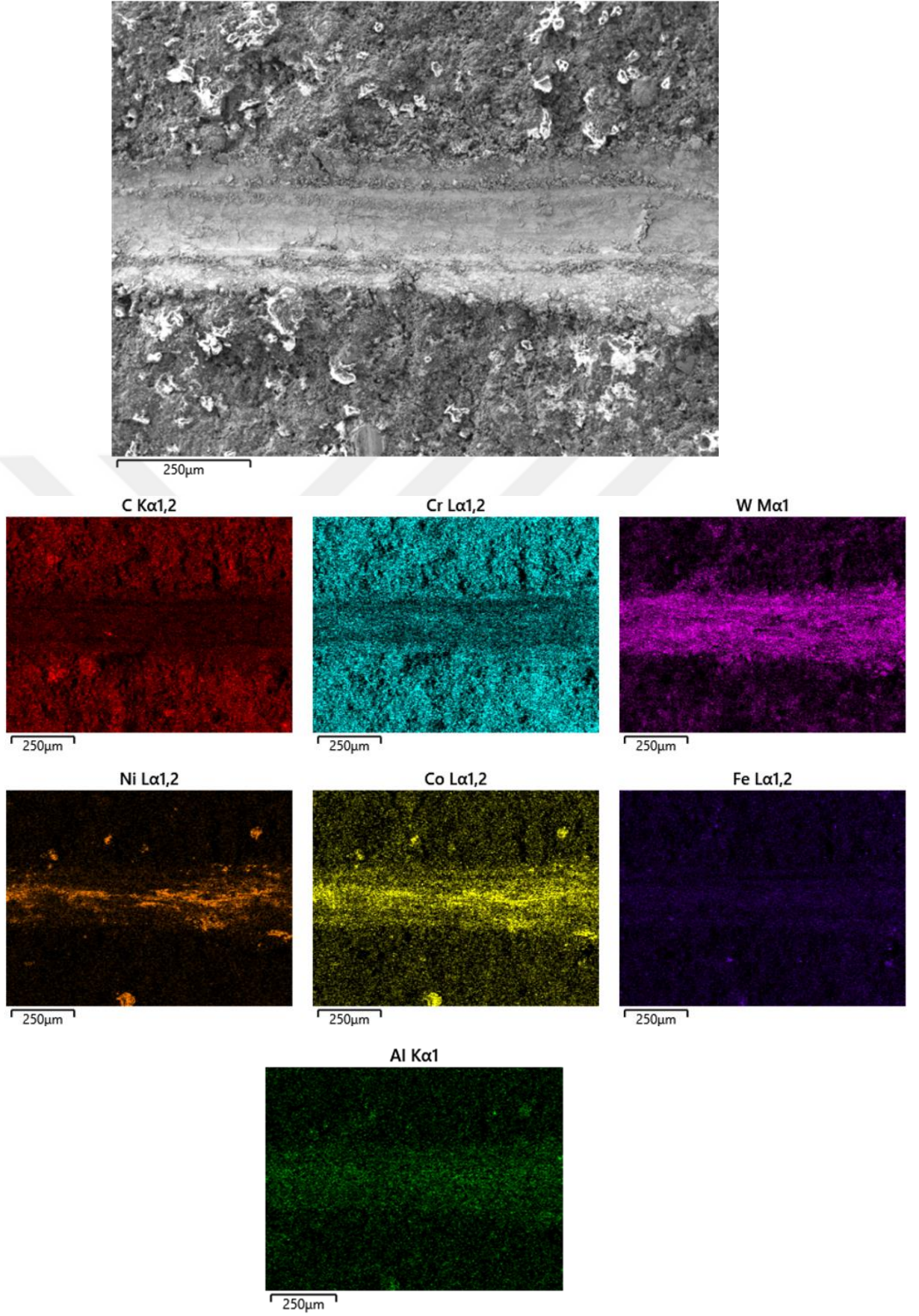
Şekil 4.15. WC-Co kaplamaya ait çizik testi yüksek yük bölgesi SEM-EDS haritalanma analizleri



Şekil 4.16. WC-Co(Cr) kaplamaya ait çizik testi düşük yük bölgesi SEM-EDS haritalanma analizleri



Şekil 4.17. WC-Co(Cr) kaplamaya ait çizik testi orta yük bölgesi SEM-EDS haritalanma analizleri



Şekil 4.18. WC-Co(Cr) kaplamaya ait çizik testi yüksek yük bölgesi SEM-EDS haritalanma analizleri

4.4.1. Çizik testi sonuçları

4.4.1.1. Kritik yük (L_{c1}) ve optik mikroyapı analizi

- Kritik yük değerleri (Çizelge 4.6):

Kaplama	L_{c1} (N)
WC-Co	8,3
WC-Co(Cr)	30,1

WC-Co(Cr)'nin **3,6 kat daha yüksek** kritik yüke sahip olması, Cr ilavesinin kaplama tokluğunu ve adhezyon direncini artırdığını göstermektedir (Souza ve diğ., 2003a).

- Optik görüntüler (Şekil 4.11):
 - Her iki kaplamada da **eksik yapışma/kırılma kırılma izi yoktur**.
 - Hasarın lokalize olması, kaplamaların homojen yapısını kanıtlar (Bull, 1997).

4.4.1.2. Penetrasyon derinliği ve mekanik dayanım

- Maksimum penetrasyon:
 - WC-Co: **60 μm**
 - WC-Co(Cr): **85 μm**
 - **Altlık/Astar teması yoktur** (kaplama kalınlığı: 205-235 μm).

HVOF WC-CoCr kaplamalar, saf WC-Co'ya kıyasla %50-70 daha yüksek çizik direnci sergiler. Cr, kırılma tokluğunu artırarak çatlak ilerlemesini engeller (Ghabchi ve diğ., 2014)

4.4.1.3. SEM-EDS haritalama ile adhezyon değerlendirmesi

Tüm yük aralıklarında (0-150 N):

1. **Fe elementi tespit edilememiştir** → Altlık teması yok (Şekil 4.13-4.18).

2. **W/Co yoğunluğu korunmuştur** → Kaplama bütünlüğü sağlam.

3. **Ni-Al astar tabakasına ulaşılmamıştır** → Üstün mekanik direnç.

150 N yüke dayanım, endüstriyel standartların (ASTM C1624) üzerindedir (Roa ve diğ., 2015).

EDS haritalama ile adhezyon doğrulaması, termal püskürtme kaplamalarda altın standarttır (Andrews ve diğ., 2000).

Çizelge 4.8. Çizik testinin literatür ile değerlendirmesi

Parametre	WC-Co	WC-Co(Cr)	Bilimsel Yorum
Lc₁	8,3 N	30,1 N	Cr ilavesi kırılma enerjisini ↑ (Ghabchi ve diğ., 2014)
Penetrasyon	60 µm	85 µm	Yüksek tokluk → Daha fazla plastik deformasyon (Roa ve diğ., 2015)
Mekanizma	Yüzeyel çatlak	Kontrollü çatlak	Kohezyon gücünde artış (Bull, 1997)

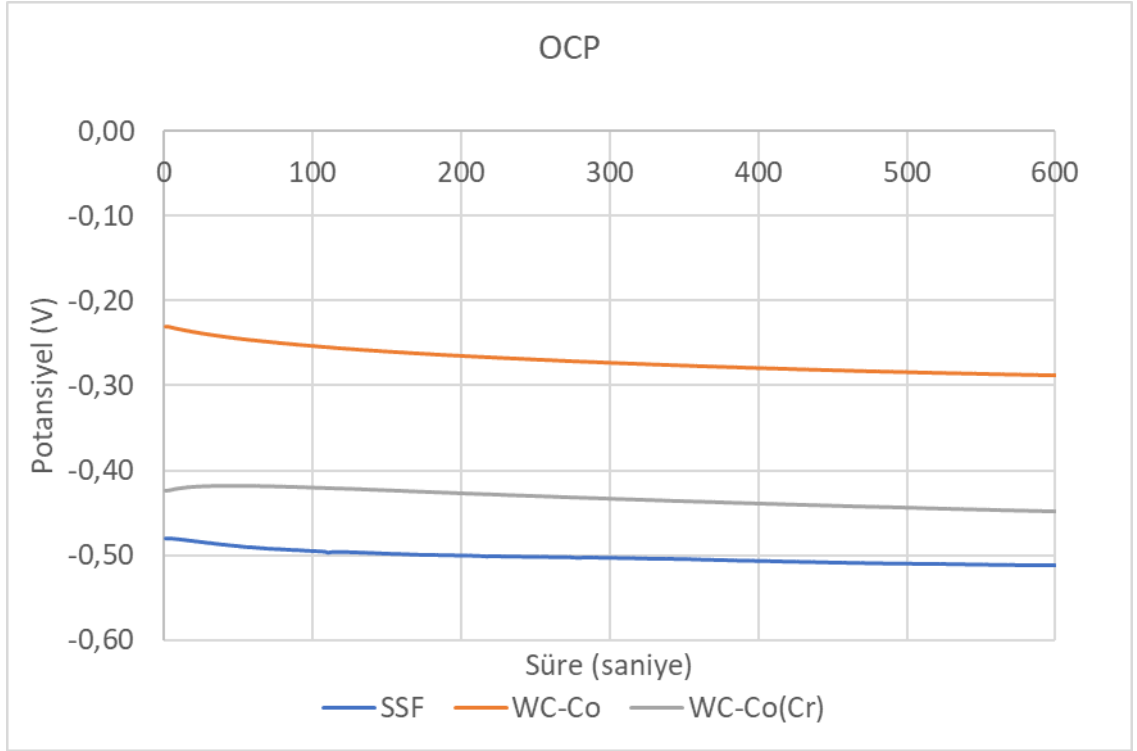
WC-Co(Cr)'nin üstün kritik yük değeri, **Cr alaşım elementinin:**

1. Bağlayıcı faz-tane sınırı etkileşimini güçlendirmesi,
2. Oksidasyon direncini artırması,
3. Artık gerilimleri azaltması ile açıklanabilir (Souza ve diğ., 2003; Ghabchi ve diğ., 2014).

4.5. Korozyon Testi

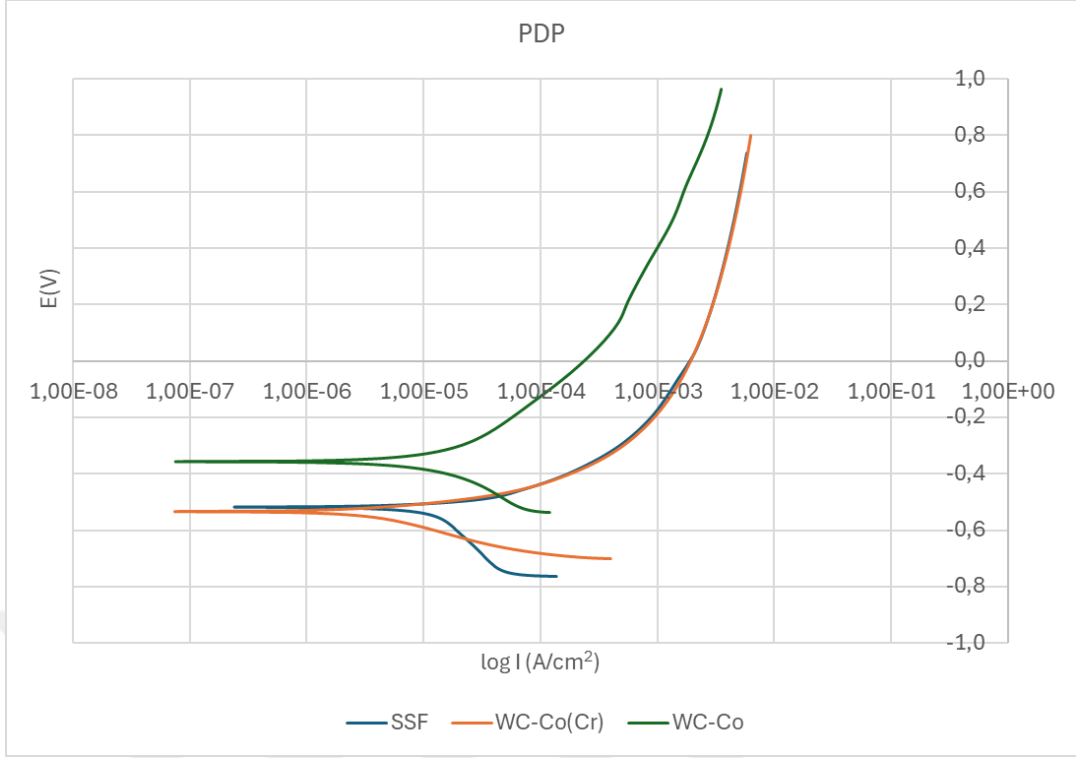
SSF altlık ile HVOF kaplama yapılmış numunelerin korozyon dirençleri OCP (Şekil 4.19), PDP (Şekil 4.20) ve EIS (Nyquist) (Şekil 4.21) yöntemleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Kaplamasız ve kaplamalı numunelerin OCP ölçümleri, 0,1 M NaCl çözeltisi içerisinde kararlı duruma ulaşmaları için 600 saniye (10 dakika) süresince izlenmiştir. Tuz gibi iyonik çözeltilerde ölçülen açık devre potansiyeli (OCP), anodik ve katodik reaksiyonların denge potansiyelini temsil etmektedir. Başka bir ifadeyle, çözeltideki indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonlarının dengesini yansıtmaktadır. Eğer kullanılan çözeltinin ortamı korozif özellik gösteriyorsa, kaydedilen OCP değeri genellikle korozyon potansiyeli olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, daha pozitif OCP değerine sahip numunelerin, daha negatif OCP değerlerine sahip olanlara kıyasla korozyona karşı daha yüksek direnç gösterdiği ifade edilmektedir (Fontana, 1986;

Jones, 1996). Şekil 4.19’da verilen OCP eğrileri incelendiğinde kaplamasız SSF altlığın en alt (en negatif tarafta) bulunduğu, kaplamalı numunelerin ise daha pozitif tarafta yer aldıkları belirgin bir şekilde gözükmemektedir. SSF altlık, WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalar için OCP değerleri sırasıyla -0,481V, -0,230V ve -0,424V olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre HVOF kaplama uygulamasının yeni nesil sünek dökme demirin korozyon direncini artırdığı söylenebilmektedir. HVOF kaplamaların korozyon dirençleri birbiri ile kıyaslandığında WC-Co kaplamanın korozyon direncinin daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 4.19. SSF altlık ve HVOF kaplamalara ait OCP eğrileri

Kaplamalı numuneler (özellikle WC-Co) kaplamasız SSF altlığa göre daha pozitif OCP değerleri gösterdi. WC-Co (-0,230 V) > WC-Co(Cr) (-0,424 V) > SSF (-0,481 V). Daha pozitif (daha asil) OCP değerleri, genellikle malzemenin korozyona karşı daha yüksek direnç gösterdiğinin bir göstergesidir. Bu, korozyon hızının daha düşük olacağı beklentisini doğurur. Bu ilişkiyi doğrulayan sayısız deneysel çalışma mevcuttur. Örneğin, benzer kaplama sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda da pozitif OCP kayması gözlenmiştir (Souza ve diğ., 2003b).

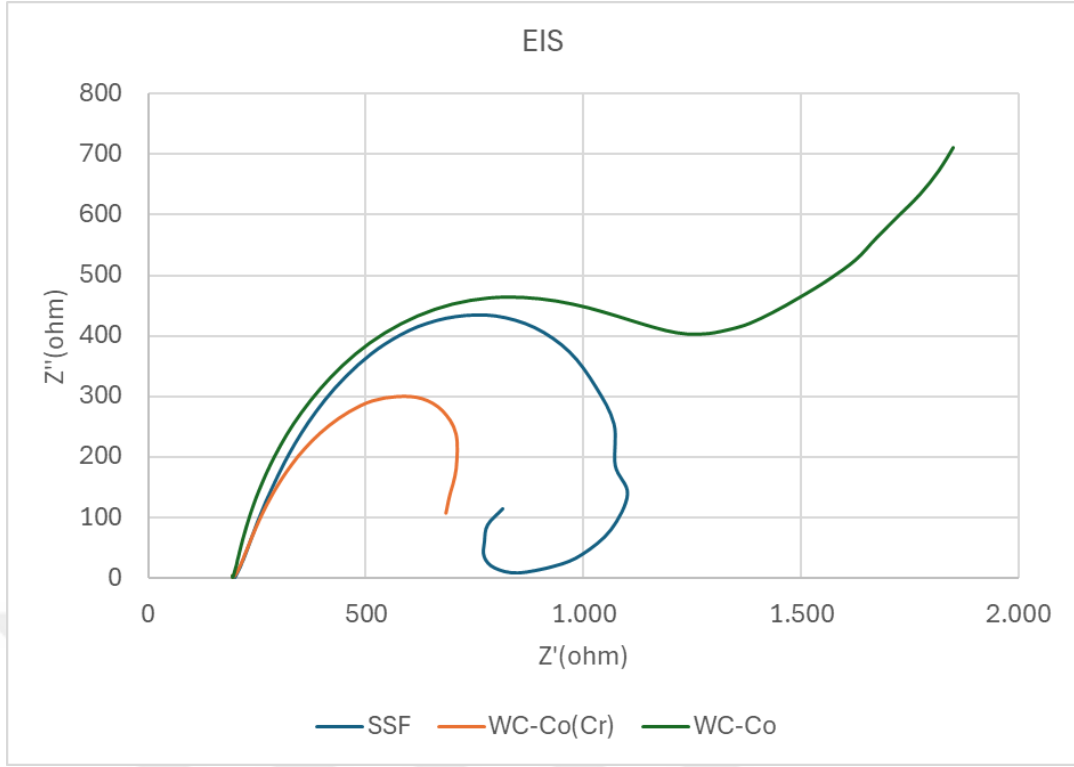


Şekil 4.20 SSF altlık ve HVOF kaplamalara ait PDP eğrileri

PDP analizi, korozyon kinetiğini ve mekanizmasını anlamak için temel bir yöntemdir. Daha pozitif E_{corr} (OCP ile uyumlu) ve özellikle daha düşük i_{corr} , açıkça daha düşük korozyon hızı ve daha yüksek direnç anlamına gelir. PDP eğrileri WC-Co kaplamanın en pozitif E_{corr} 'a ve muhtemelen en düşük i_{corr} 'a sahip olduğunu (daha dirençli) gösterdi. WC-Co(Cr) ve SSF benzer davranış sergiledi.

ASTM G59 gibi standartlar PDP test metodolojisini tanımlar. WC-Co HVOF kaplamalarının karbon çeliği veya paslanmaz çelik gibi altlıklara kıyasla genellikle daha düşük i_{corr} gösterdiği birçok çalışmada rapor edilmiştir (Matthews ve diğ., 2007; Thakur ve Arora, 2017).

PDP eğrileri (Şekil 4.20) incelendiğinde ise SSF altlık ile WC-Co(Cr) kaplamanın benzer davranış sergilediği WC-Co kaplamanın ise daha pozitif tarafta yer alarak korozyona daha dirençli olduğu görülmüştür. OCP ve PDP analizleri beraber incelendiği zaman WC-Co kaplamanın korozyon direnci açısından daha üstün olduğu görülmüştür.



Şekil 4.21 SSF altlık ve HVOF kaplamalara ait EIS Nyquist eğrileri

EIS Nyquist (Şekil 4.21) eğrilerinde her kaplama için benzer eğri profilleri gözlemlenmiş olsa da yarıçap büyüklüklerinde farklılıklar mevcuttur. Bu durum, tüm kaplamalarda benzer bir korozyon mekanizmasının etkin olduğunu, ancak korozyon dirençlerinin farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Nyquist diyagramlarında tek bir yarım dairenin oluşması, korozyon sürecinin tek bir zaman sabiti ile kontrol edildiğini ve elektrokimyasal tepkinin basit bir yük-transfer mekanizması ile sınırlı olduğunu göstermektedir (Macdonald, 2006).

Nyquist diyagramlarında gözlenen yarıçap büyüklükleri $\text{WC-Co} > \text{WC-Co(Cr)} > \text{SSF}$ sırasını gösteriyor. Tek bir yarım daire gözlemlendi. Tek bir baskın yarım daire, genellikle tek bir zaman sabiti ve korozyon arayüzeyinde basit bir yük transferi ile kontrol edilen bir süreci gösterir. Bu, kaplama/elektrolit arayüzeyinin göreceli homojenliğine işaret edebilir. Nyquist yayınının çapı (veya düşük frekanstaki gerçek eksen kesim noktası) genellikle yük transfer direnci (R_{ct}) ile orantılıdır. Daha büyük yarıçap/çap, daha yüksek R_{ct} ve dolayısıyla daha yüksek korozyon direnci anlamına gelir. Bu ilişkiyi vurgulayan temel elektrokimya ve korozyon kitapları (Bard ve Faulkner, 2001; Orazem ve Tribollet, 2008) ve WC bazlı HVOF kaplamalarında R_{ct} 'nin korozyon direnci ile korelasyonunu gösteren özel çalışmalar (Qiao ve diğ., 2003) kullanılabilir.

WC-Co kaplamanın WC-Co(Cr) ve SSF altlığına kıyasla önemli ölçüde daha pozitif OCP değeri göstermesi (Fontana, 1986; Jones, 1996), bu kaplamanın en yüksek korozyon direncine sahip olduğunu güçlü bir göstergesidir.

Elde edilen PDP eğrileri, WC-Co kaplamasının en asil E_{corr} ve en düşük i_{corr} değerlerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, benzer HVOF WC-Co kaplamaların karbon çeliği altlıklar üzerinde koruyucu etkisini gösteren çalışmalar ile uyumludur.

Nyquist diyagramlarında gözlenen tek yarım daireler (Macdonald, 2006), korozyon sürecinin elektrot arayüzeyinde baskın olarak tek bir zaman sabiti ile karakterize edildiğini düşündürmektedir. WC-Co kaplamasına ait diyagramın en büyük yarıçapa sahip olması, bu numunenin en yüksek yük transfer direncine (R_{ct}) ve dolayısıyla en yüksek korozyon direncine sahip olduğunu göstermektedir (Orazem ve Tribollet, 2008; Qiao ve diğ., 2003).

Tüm elektrokimyasal test sonuçları (OCP, PDP, EIS), HVOF ile uygulanan WC bazlı kaplamaların SSF altlığın korozyon direncini belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. Bu durum, HVOF kaplamaların mekanik aşınma korumasının yanı sıra korozyon koruması da sağladığı literatürde yaygın olarak rapor edilen bir bulgudur (Pawlowski, 2008; Guilemany ve diğ., 2006).

WC-Co kaplamasının WC-Co(Cr) kaplamasına kıyasla daha iyi korozyon performansı göstermesi, [olası nedenler- örn.: daha düşük gözeneklilik, Co bağlayıcı fazın bu spesifik ortamdaki davranışı, Cr karbür oluşumu] ile ilişkilendirilebilir.

SSF altlık ve HVOF kaplamalı numuneler üzerinde gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon testleri (OCP, PDP, EIS), HVOF kaplamaların altlığın korozyon direncini önemli ölçüde artırdığını ve kaplamalar arasında performans farklılıkları bulunduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, korozyon biliminin temel prensipleri ve ilgili literatür bulguları ile tutarlılık göstermektedir.

4.5.1. Açık devre potansiyeli (OCP) sonuçları

Kaplamasız SSF altlık en negatif OCP değerini (-0,481 V) gösterirken, WC-Co (-0,230 V) ve WC-Co(Cr) (-0,424 V) kaplamaları daha pozitif değerlere sahiptir. Literatürde, daha pozitif (daha asil) OCP değerlerinin, malzemenin korozyona karşı daha yüksek direnç potansiyeline işaret ettiği yaygın olarak kabul edilmektedir (Fontana, 1986; Jones, 1996). Bu durum, HVOF kaplama uygulamasının, özellikle WC-

Co kaplamanın, SSF altlığı korozif ortamda koruma yeteneğinin güçlü bir göstergesidir. WC-Co kaplamanın WC-Co(Cr)'ye kıyasla daha pozitif OCP değeri, bağlayıcı faz bileşiminin (Co vs CoCr) korozyon davranışı üzerinde belirleyici bir etkisi olabileceğini düşündürmektedir.

4.5.2. Potansiyodinamik polarizasyon (PDP) sonuçları

PDP eğrileri (Şekil 4.20), OCP sonuçları ile uyumlu bir şekilde, WC-Co kaplamanın en asil korozyon potansiyeline (*E_{korr}*) ve muhtemelen en düşük korozyon akım yoğunluğuna (*i_{korr}*) sahip olduğunu, dolayısıyla en yüksek korozyon direncini sergilediğini göstermiştir. WC-Co(Cr) kaplama ve SSF altlık benzer polarizasyon davranışı sergilemiştir. Daha asil *E_{korr}* ve özellikle daha düşük *i_{korr}* değerleri, bir malzemenin korozyon hızının daha düşük olduğunu temel elektrokimyasal göstergeleridir. WC-Co HVOF kaplamaların çeşitli altlıklar üzerinde korozyon hızını düşürdüğü, literatürde benzer PDP eğilimleri ile rapor edilmiştir (Matthews ve diğ., 2007; Thakur ve Arora, 2017).

4.5.3. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) sonuçları

Nyquist diyagramlarında (Şekil 4.21) tüm numuneler için tek bir baskın yarımlar daire gözlenmiştir. Bu, korozyon sürecinin elektrot/çözelti arayüzeyinde tek bir zaman sabiti ile karakterize edildiğini ve korozyonun temel olarak basit bir yük transfer mekanizması ile kontrol edildiğini göstermektedir (Macdonald, 2006). Diyagramlardaki yarıçap büyüklükleri, kaplamaların yük transfer direnci (*R*) sıralaması ile doğrudan ilişkilidir: WC-Co > WC-Co(Cr) > SSF. Daha büyük yarıçap, daha yüksek *R* ve dolayısıyla daha yüksek korozyon direnci anlamına gelir (Orazem ve Tribollet, 2008; Qiao ve diğ., 2003). EIS sonuçları da OCP ve PDP bulgularını destekleyerek WC-Co kaplamanın en yüksek koruma performansını doğrulamaktadır.

4.5.4. Genel değerlendirme

Tüm elektrokimyasal testler, HVOF ile uygulanan WC bazlı kaplamaların (özellikle WC-Co), SSF altlığın korozyon direncini belirgin şekilde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, HVOF kaplamaların başlıca işlevlerinden birinin altlığı korozyondan korumak olduğu ve bu tür kaplamaların fiziksel bariyer etkisi ile korozif iyonların altlığa ulaşmasını engellediği yönündeki literatür konsensüsü ile uyumludur.

(Pawlowski, 2008; Guilemany ve diğ., 2006). WC-Co kaplamanın WC-Co(Cr)'ye göre daha iyi performans göstermesi, bağlayıcı fazın korozyon direnci, kaplamanın mikro gözeneklilik/mikro çatlak yapısı veya bağlayıcı/sert faz etkileşimleri gibi faktörlerden kaynaklanıyor olabilir. Bu spesifik sonuç, bağlayıcı faz optimizasyonunun korozyon performansı üzerindeki kritik rolünü vurgulaması açısından önemlidir ve bazı çalışmalarda Co bağlayıcılı kaplamaların belirli ortamlarda CoCr bağlayıcılılara üstünlüğü bildirilmiştir (Lima ve Guilemany, 2007). WC-Co(Cr)'nin performansı, kaplama parametreleri ve ortam koşulları optimize edilerek daha da iyileştirilebilir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

SSF Altlık Üretimi EN-GJS-600-10 standartlarına uygun ferritik sünek dökme demir başarıyla üretildi. Standart değerler ile uyumlu mekanik değerler sağlandı. Akma dayanımı 447 MPa, sertlik 201,3 HB, perlit oranı $\leq 5\%$

Kaplama performansı, WC-Co(Cr) kaplama için sertlik 731,4 HV olarak ölçülmüş SSF malzemedan yaklaşık 3,7 kat yüksektir. Kritik çizik yükü (Lc): 30,1 N (WC-Co'dan 3,6 kat yüksek).

Aşınma direnci; SSF'de 200 μm aşınma izine karşılık kaplamalarda yüzeysel çizikler (aşınma hacmi 10 kat azaldı). EDS analizine göre aşınma bölgesinde Fe tespit edilmedi.

Korozyon direnci; WC-Co(Cr) kaplama, SSF'ye kıyasla daha pozitif OCP potansiyeli sergiledi. WC-Co kaplamanın korozyon potansiyeli (E_{kor}): -0,230 V (SSF'ye kıyasla +251 mV iyileşme).

5.2. Öneriler

- Kaplamaların aşınma testi farklı yükler altında gerçekleştirilebilir.
- EN-GJS-500-14 kalite yeni nesil sünek dökme demirlere de HVOF kaplama yapılabilir
- WC-Co ve WC-Co(Cr) kaplamalara ilaveten Inconel 725 Ni-esaslı süperalaşım kaplanabilir
- Kaplama sertlikleri nanoindentasyon testi ile ölçülebilir.

6. KAYNAKLAR

- Al-Asadi, M. M., & Al-Tameemi, H. A. (2022). A review of tribological properties and deposition methods for selected hard protective coatings. *Tribology International*, 176, 107919.
- Amin, S., & Panchal, H. (2016). A review on thermal spray coating processes. *transfer*, 2(4), 556-563.
- Andrews, P., et al. (2000). Scratch adhesion testing of HVOF coatings. *Surface Engineering*, 16(2), 147–151.
- Anonim <https://teslab.sakarya.edu.tr/tr/icerik/10716/42049/hvof> (Ziyaret Tarihi: 4 Mayıs 2025)
- Anonim <http://www.senkronyuzey.com/hvof/> (Ziyaret Tarihi: 4 Mayıs 2025)
- Arias-González, F., Del Val, J., Comesaña, R., Penide, J., Lusquiños, F., Quintero, F., ... & Pou, J. (2016). Fiber laser cladding of nickel-based alloy on cast iron. *Applied Surface Science*, 374, 197-205.
- Ariharan, S., Hassan, R., Bhadauria, A., Tiwari, A., Tandon, R., Keshri, A. K., & Balani, K. (Eds.). (2022). *Fundamentals of thermal spraying*. CRC Press.
- Avcı, A., (2015). Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon ve Sıcaklık Korozyonu Davranışlarının İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi.
- Awang, M., Khalili, A. A., & Pedapati, S. R. (2019). A review: Thin protective coating for wear protection in high-temperature application. *Metals*, 10(1), 42.
- Bard, A.J., & Faulkner, L.R. (2001). *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*.
- Basak, A. K., Celis, J. P., Vardavoulis, M., & Matteazzi, P. (2012). Effect of nanostructuring and Al alloying on friction and wear behaviour of thermal sprayed WC–Co coatings. *Surface and Coatings Technology*, 206(16), 3508-3516.
- Bhosale, D. G., & Rathod, W. S. (2020). Tribological behaviour of atmospheric plasma and high velocity oxy-fuel sprayed WC–Cr₃C₂–Ni coatings at elevated temperatures. *Ceramics International*, 46(8), 12373-12385.
- Bohur, B.G., (2018). HVOF Tekniğiyle Ti6Al4V Metal Altlık Yüzeyine Farklı Silika Kaynağı İçeren Biyoseramiklerin Kaplanması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi.
- Bolelli, G., et al. (2015). Abrasive wear behaviour of HVOF-sprayed WC-based coatings. *Wear*, 338-339, 80–94.

- Bull, S.J. (1997). Failure modes in scratch adhesion testing. *Surface and Coatings Technology*, 50(1), 25–32.
- Chişiu, G., Gheţa, R. A., Stoica, A. M., & Stoica, N. A. (2023). Comparative Micro-Scale Abrasive Wear Testing of Thermally Sprayed and Hard Chromium Coatings. *Lubricants*, 11(8), 350.
- Çetin, A. 2016 “Katı Çözeltiyle Güçlendirilmiş Ferritik Sfero Dökme Demirleri”, Dökümcünün El Kitabı, Dökümhane.net
- Davis, J. R. (Ed.). (2004). *Handbook of thermal spray technology*. ASM international.
- Delaunois, F., & Lienard, P. (2002). Heat treatments for electroless nickel–boron plating on aluminium alloys. *Surface and Coatings Technology*, 160(2-3), 239-248.
- EN 1563 (2018). Founding-Spheroidal graphite cast irons, European Standard.
- Enneti, R. K., & Prough, K. C. (2019). Wear properties of sintered WC-12% Co processed via Binder Jet 3D Printing (BJ3DP). *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 78, 228-232.
- Eskandari, A., Gupta, M., & Joshi, S. (2025). Hybrid thermal spray: A pathway to realize novel coating microstructures and properties. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1-28.
- Fontana, M.G. (1986). *Corrosion Engineering*. McGraw-Hill Education.
- Fotovvati, B., Namdari, N., & Dehghanghadikolaei, A. (2019). On coating techniques for surface protection: A review. *Journal of Manufacturing and Materials processing*, 3(1), 28.
- Fras E., Górný M., and Lopez H. F. (2006). Chilling tendency and nodüle count in ductile cast iron: Part I Theoretical background. *AFS Transactions*, 114: 575-594.
- Fras E., Górný M., and Lopez H. F. (2006). Chilling tendency and nodüle count in ductile cast iron Part II - Experimental verification. *AFS Transactions*, 114: 595–603.
- Fu, J., Zhang, L., Wang, H., Zhao, Y., Yang, X., Zhang, J., ... & Li, X. (2024). Microstructure and mechanical properties of WC-12Co cemented carbide fabricated by laser powder bed fusion on a WC-20Co cemented carbide substrate. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 9093-9101.
- Gant, A.J., et al. (2020). Micro-scale abrasion and scratch response of HVOF WC-based coatings. *Tribology International*, 143, 106091.
- García, J., Ciprés, V. C., Blomqvist, A., & Kaplan, B. (2019). Cemented carbide microstructures: a review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 80, 40-68.

- Ghabchi, A., et al. (2014). Influence of microstructure on scratch resistance of HVOF WC-based coatings. *Tribology International*, 79, 19–30.
- Gong, T., Yao, P., Zuo, X., Zhang, Z., Xiao, Y., Zhao, L., ... & Zhong, A. (2016). Influence of WC carbide particle size on the microstructure and abrasive wear behavior of WC–10Co–4Cr coatings for aircraft landing gear. *Wear*, 362, 135–145.
- Gök, M. G., (2015). Çok Katmanlı ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş CYSZ/GD2Zr2O7 Esaslı Yeni Nesil Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Doktora Tezi.
- Guilemany, J.M., et al. (2006). Corrosion behaviour of thermal spray cermet coatings. *International Materials Reviews*, 51(2), 107–128.
- Guzel E., Yuksel C., Bayrak Y., (2014) Effect of section thickness on the microstructure and hardness of ductile cast iron. *Materials Testing*, 56(4): 285-288
- 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.
- Hu, Q., Ji, D., Shen, M., Zhuang, H., Yao, H., Zhao, H., ... & Zhang, Y. (2022). Three-body abrasive wear behavior of WC-10Cr3C2-12Ni coating for ball mill liner application. *Materials*, 15(13), 4569.
- Huang, D., He, W., Lyu, C., Cao, X., Liao, B., & Wang, S. (2020). Effects of ions implantation on adhesion strength and sand erosion resistance of TiN/Ti coatings on TC4 titanium alloy. *Surf. Technol*, 49, 184–191.
- Ji, Z., WANG, H., SUN, Z., & DING, K. (2018). Effect of interfacial bonding properties of WC-17Co/Ti-6Al-4V after roughening on the face of substrate. *TRANSACTIONS OF THE CHINA WELDING INSTITUTION*, 39(5), 77–81.
- Jones, D.A. (1996). *Principles and Prevention of Corrosion*. Prentice Hall.
- Kallbom, R., Hamberg, K., Wessen, M., & Björkegren, L. E. (2006). On The Solidification Sequence Of Ductile Iron Castings Chunky Graphite. *Materials Science and Engineering A*, 413–414.
- Kant, S. (2024). Introduction: Thermal Spray Coatings and their Historical Developments. In *Thermal Spray Coatings: Materials, Techniques & Applications* (pp. 1–24). Bentham Science Publishers.
- Katiyar, P. K., & Randhawa, N. S. (2019). Corrosion behavior of WC-Co tool bits in simulated (concrete, soil, and mine) solutions with and without chloride

- additions. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 85, 105062.
- Kaya, A.Ö., (2007). Plazma Püskürtme ve HVOF Yöntemleri Kullanılarak, Cr₃C₂-NiCr(75/25) ve CrNiBSi+%80 WC-Co Tozlarıyla Kaplanan Çeliğin Yapısı ve Yüzey Özellikleri, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Keshavamurthy, R., Naveena, B. E., & Sekhar, N. (2018). Thermal spray coatings for erosion-corrosion protection. In *Production, properties, and applications of high temperature coatings* (pp. 246-267). IGI Global.
- Kılıç, E. HVOF Püskürtme Yöntemi ile A1sı 304 Paslanmaz Çelik Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2021.
- Kumar, V., Verma, R., Sharma, V. S., & Prasad, A. D. V. S. (2022). Investigations into Lattice Strain and Hardness of WC-10Co-4Cr Coating on Laser Surface Textured 420 Stainless Steel. *Lasers in Engineering (Old City Publishing)*, 53.
- Kuroda, S., Kawakita, J., Watanabe, M., & Katanoda, H. (2008). Warm spraying—a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles. *Science and technology of advanced materials*.
- Łatka, L., Pawłowski, L., Winnicki, M., Sokołowski, P., Małachowska, A., & Kozerski, S. (2020). Review of functionally graded thermal sprayed coatings. *Applied Sciences*, 10(15), 5153.
- Lekakh S., Qing J., Richards V. (2013). Graphite nodule size distribution in ductile iron. In: Proc. 117th Metalcasting Congress, American Foundry Society, Schaumburg, IL USA.
- Li, C. J., & Yang, G. J. (2013). Relationships between feedstock structure, particle parameter, coating deposition, microstructure and properties for thermally sprayed conventional and nanostructured WC–Co. *International journal of refractory metals and hard materials*, 39, 2-17.
- Li, P., He, W., Ju, P., Ji, L., Liu, X., Wu, F., ... & Chen, J. (2024). Acquisition of molecular rolling lubrication by self-curling of graphite nanosheet at cryogenic temperature. *Nature Communications*, 15(1), 5747.
- Li, Y., Dong, S., Liu, X., He, P., Ren, X., Yan, S., & Xu, B. (2021). Interface phase evolution during laser cladding of Ni-Cu alloy on nodular cast iron by powder pre-placed method. *Optics & Laser Technology*, 135, 106684.
- Li, Y., Dong, S., Yan, S., Liu, X., He, P., & Xu, B. (2018). Microstructure evolution during laser cladding Fe-Cr alloy coatings on ductile cast iron. *Optics & Laser Technology*, 108, 255-264.

- Lima, C.R.C., & Guilemany, J.M. (2007). Adhesion improvements of thermal barrier coatings with HVOF thermally sprayed bond coats. *Surface and Coatings Technology*, 201(8), 4694–4701.
- Liu, Y., Liu, W., Ma, Y., Meng, S., Liu, C., Long, L., & Tang, S. (2017). A comparative study on wear and corrosion behaviour of HVOF-and HVAF-sprayed WC–10Co–4Cr coatings. *Surface Engineering*, 33(1), 63-71.
- Lorenzo-Martin, C., Ajayi, O., Erdemir, A., Fenske, G. R., & Wei, R. (2013). Effect of microstructure and thickness on the friction and wear behavior of CrN coatings. *Wear*, 302(1-2), 963-971.
- Macdonald, D.D. (2006). *Reflections on the history of electrochemical impedance spectroscopy*. *Electrochimica Acta*, 51(8-9), 1376–1388
- Matik, M.K., et al. (2017). Friction characteristics of thermal spray coatings. *Surface Engineering*, 33(8), 621–629.
- Matthews, S.J., et al. (2007). Corrosion performance of HVOF cermet coatings with different binder phases. *Wear*, 263(1-6), 1182–1194.
- Orazem, M.E., & Tribollet, B. (2008). *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. John Wiley & Sons.
- Orkas J., Peura P. (2016). Optimization of Solid Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron Production by Thermal Analysis and Solidification Simulation.
- Ozbek, Y., Canikoğlu, N., & Ipek, M. (2017). The surface properties of WC-Co-Cr based coatings deposited by high velocity oxygen fuel spraying. *Acta Physica Polonica A*, 131(1), 186-189.
- Özbek, T. ve Kayral, S.A., (2017). Termal sprej kaplama yöntemlerine genel bakış: Yüksek hızlı oksit yakıt (HVOF) sprej kaplama. *The Journal of International Manufacturing And Production Technologies*, 1: 46-53.
- Özel, S., (2013). Yüzey Kaplama İşlemlerinde Kullanılan Isıl Püskürtme Yöntemleri, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 88–97.
- Pan, Y., Xin, C., Wu, W., Guan, M., & Wang, X. (2025). Microstructural and mechanical analyses of YBCO coated conductor tapes in high-irradiation environments. *Fusion Engineering and Design*, 211, 114802.
- Pawlawski, L. (2008). *The science and engineering of thermal spray coatings*. John Wiley & Sons.
- Puchi-Cabrera, E. S., Staia, M. H., Santana, Y. Y., Mora-Zorrilla, E. J., Lesage, J., Chicot, D., ... & Villalobos-Gutierrez, C. J. (2013). Fatigue behavior of AA7075-T6 aluminum alloy coated with a WC–10Co–4Cr cermet by HVOF thermal spray. *Surface and Coatings Technology*, 220, 122-130.

- Pulsford, J., Kamnis, S., Murray, J., Bai, M., & Hussain, T. (2018). Effect of particle and carbide grain sizes on a HVOAF WC-Co-Cr coating for the future application on internal surfaces: microstructure and wear. *Journal of thermal spray technology*, 27, 207-219.
- Qiao, Y., et al. (2003). Electrochemical impedance spectroscopy of thermal-sprayed cermet coatings. *Materials Science and Engineering: A*, 357(1-2), 348–356.
- Richert, M. (2024). Thermally Sprayed Coatings for the Protection of Industrial Fan Blades. *Materials*, 17(16), 3903.
- Roa, J.J., et al. (2015). Critical load and toughness evaluation of WC-Co coatings. *Materials Science and Engineering: A*, 645, 437–443.
- Sandoval, D. A., Rinaldi, A., Notargiacomo, A., Ther, O., Roa, J. J., & Llanes, L. (2019b). WC-base cemented carbides with partial and total substitution of Co as binder: Evaluation of mechanical response by means of uniaxial compression of micropillars. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 84, 105027.
- Sandoval, D. A., Rinaldi, A., Notargiacomo, A., Ther, O., Tarrés, E., Roa, J. J., & Llanes, L. (2019a). Influence of specimen size and microstructure on uniaxial compression of WC-Co micropillars. *Ceramics International*, 45(13), 15934-15941.
- Shibuki, K. K. M. T., Sasaki, K., Yagi, M., Suzuki, T., & Ikuhara, Y. (1994). Diamond coating on WC-Co and WC for cutting tools. *Surface and Coatings Technology*, 68, 369-373.
- Siller, M., Schatte, J., Gerzskovitz, S., Knabl, W., Pippan, R., Clemens, H., & Maier-Kiener, V. (2020). Microstructural evolution of W-10Re alloys due to thermal cycling at high temperatures and its impact on surface degradation. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 92, 105285.
- Silva, V. L., Fernandes, C. M., & Senos, A. M. R. (2016). Copper wettability on tungsten carbide surfaces. *Ceramics International*, 42(1), 1191-1196.
- Singh, H., Bhowmik, A., Singh, B., Kumar, N., Khanna, V., Kumar, K., ... & Shah, M. A. (2025). Enhancing abrasive wear resistance of IS-2062 steel in hydroturbine applications with WC-12 Co and WC-10 Co-4 Cr HVOF coatings. *Scientific Reports*, 15(1), 1-11.
- Singh, H., Kumar, M., & Singh, R. (2022). An overview of various applications of cold spray coating process. *Materials Today: Proceedings*, 56, 2826-2830.
- Singh, V., Kumar, V., Bansal, A., Singla, A. K., Kaur, S., & Vishnoi, M. (2024). Investigating the Effect of Poly-tetra-fluoro-ethylene on the Cavitation-Erosion and Corrosion Resistance of HVOF Sprayed TiC Coatings on Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(23), 12990-13003.

- Souza, V.A.D., et al. (2003a). Microstructure and adhesion of HVOF cermet coatings. *Surface Engineering*, 19(2), 94–98.
- Souza, V.A.D., et al. (2003b). Microstructure and corrosion behaviour of thermal spray cermet coatings... *Surface and Coatings Technology*, 168(2-3), 191-199.
- Stachowiak, G.W., & Batchelor, A.W. (2013). *Engineering Tribology* (4th ed.). Butterworth-Heinemann. (Bölüm 7).
- Stets, W., Löblich, H., Gassner, G., & Schumacher, P. (2014). Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application. *International Journal of Metalcasting*, 8, 35-40.
- Stokes, J. (2003). Production of coated and free-standing engineering componenets using the HVOF process. Dublin City University, Phd Thesis.
- Subbiah, R., Arun, A., Lakshmi, A. A., Harika, A. N. S., Ram, N., & Sateesh, N. (2019). Experimental study of wear behaviour on Al-2014 alloy coated with thermal spray HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) and plasma spray process–A review. *Materials Today: Proceedings*, 18, 5151-5157.
- 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.
- Şahin, E. F., 2021, Akımsız Ni-B Kaplamalara Tungsten ve Bor Karbür İlavelerinin Kaplamanın Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Thakur, L., & Arora, N. (2017). A study on processing and hot corrosion behaviour of HVOF sprayed WC–Co coating. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(1), 360–371.
- Thakur, L., Arora, N., Jayaganthan, R., & Sood, R. (2011). An investigation on erosion behavior of HVOF sprayed WC–CoCr coatings. *Applied Surface Science*, 258(3), 1225-1234.
- Toma, F.L., et al. (2018). Tribology of WC-Co HVAF coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 27(7), 1165–1187.
- Varis, T., Suhonen, T., Ghabchi, A., Valarezo, A., Sampath, S., Liu, X., & Hannula, S. P. (2014). Formation mechanisms, structure, and properties of HVOF-sprayed WC-CoCr coatings: An approach toward process maps. *Journal of Thermal Spray Technology*, 23, 1009-1018.
- Vasudev, H., Thakur, L., Bansal, A., Singh, H., & Zafar, S. (2019). High temperature oxidation and erosion behaviour of HVOF sprayed bi-layer Alloy-718/NiCrAlY coating. *Surface and Coatings Technology*, 362, 366-380.

- Wang H.R., Zhang G.H., Li S., Liu Y. (2011). Study on Sandwear-withstand Test with HVOF Spraying WC-10Co-4Cr Coating. *Dongfang Electr. Rev.* 25:41–47.
- Wang, Q., Zhang, S., Cheng, Y., Xiang, J., Zhao, X., & Yang, G. (2013). Wear and corrosion performance of WC-10Co4Cr coatings deposited by different HVOF and HVAF spraying processes. *Surface and Coatings Technology*, 218, 127-136.
- Wang, S., Ma, C., & Walsh, F. C. (2020). Alternative tribological coatings to electrodeposited hard chromium: a critical review. *Transactions of the IMF*, 98(4), 173-185.
- Wu, Y., Hong, S., Zhang, J., He, Z., Guo, W., Wang, Q., & Li, G. (2012). Microstructure and cavitation erosion behavior of WC–Co–Cr coating on 1Cr18Ni9Ti stainless steel by HVOF thermal spraying. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 32, 21-26.
- Xu, K., Xiao, X., Wang, L., Lou, M., Wang, F., Li, C., ... & Chang, K. (2024). Data-Driven Materials Research and Development for Functional Coatings. *Advanced Science*, 11(42), 2405262.
- Yang, Q., Seo, D. Y., Zhao, L. R., & Zeng, X. T. (2004). Erosion resistance performance of magnetron sputtering deposited TiAlN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 188, 168-173.
- Yang, Z. X., Liu, M., Deng, C. M., Deng, C. G., & Che, X. Z. (2012). Review on the pretreatment of substrate for thermal spray process. *Zhinggao Biaomian Gongcheng (China Surface Engineering)*, 25(2), 8-14.
- Yuan, J., Ma, C., Yang, S., Yu, Z., & Li, H. (2016). Improving the wear resistance of HVOF sprayed WC-Co coatings by adding submicron-sized WC particles at the splats' interfaces. *Surface and Coatings Technology*, 285, 17-23.
- Zhang, K., Guo, X., Wang, C., Liu, F., & Sun, L. (2020). Effect of plasma-assisted laser pretreatment of hard coatings surface on the physical and chemical bonding between PVD soft and hard coatings and its resulting properties. *Applied Surface Science*, 509, 145342.
- Zhang, X. C., Gong, J. M., Tu, S. D., & Kong, F. Y. (2003). Study on the Effect of Coating Defects on the Coating Failure and Corrosion Behavior of Substrate. *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING-HANGZHOU-*, 21(6), 922-926.
- Zhang, X., Zhou, J., Liu, C., Li, K., Shen, W., Lin, Z., ... & Lin, N. (2019). Effects of Ni addition on mechanical properties and corrosion behaviors of coarse-grained WC-10 (Co, Ni) cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 80, 123-129.
- Zhu, L., Liu, Y., Li, Z., Zhou, L., Li, Y., & Xiong, A. (2020). Microstructure and properties of Cu-Ti-Ni composite coatings on gray cast iron fabricated by laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 122, 105879.