

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Fe-Mo-Ti-B-C ESASLI SERT DOLGU ALAŞIMLI
ÖRTÜLÜ ELEKTROTLARIN ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Recep HOCAOĞLU

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur ŞEN

Kasım 2021

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Fe-Mo-Ti-B-C ESASLI SERT DOLGU ALAŞIMLI
ÖRTÜLÜ ELEKTROTLARIN ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Recep HOCAOĞLU

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

**Bu tez 17.11.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile
kabul edilmiştir.**

Jüri Başkanı

Üye

Üye

BEYAN

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

Recep HOCAOĞLU

17.11.2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Uğur ŞEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında yaptıkları yönlendirmelerle büyük katkılar sağlayan Prof. Dr. Şaduman ŞEN ve Dr. Öğr. Üyesi Bülent KILINÇ'a teşekkür ederim.

Hayatımın birçok alanında kendilerini örnek aldığım ve çalışmalarım sırasında büyük desteklerini gördüğüm çok değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Engin KOCAMAN ve Arş. Gör. Mustafa DURMAZ'a en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, Fuat KAYIŞ, Erkut TAŞ ve Murat KAZANCI'ya teşekkür ederim.

Bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Ulusal Bor Araştırma Enstitüsüne (BOREN), sağladığı destekten dolayı teşekkür ederim.

Üzerimdeki emekleri büyük olan, desteklerini her zaman yanımda hissettiğim anneme, babama ve özellikle ağabeyim Barış HOCAOĞLU'na teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLOLAR LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
SERT YÜZEY ALAŞIMLAMA	4
2.1. Sert Yüzey Alaşımlama	4
2.2. Sert Yüzey Alaşımlama Malzemeleri	5
2.2.1. Aşınma türüne göre sert dolgu alaşımları	6
2.2.2. Mikroyapısına göre sert dolgu alaşımları	7
2.2.2.1. Demir esaslı sert dolgu elektrotları	7
2.2.2.2. Kobalt esaslı sert dolgu elektrotları	9
2.2.2.3. Nikel esaslı sert dolgu elektrotları	9
2.2.2.4. Bakır esaslı sert dolgu elektrotları	10
2.2.2.5. Kompozit esaslı sert dolgu elektrotları	10
2.3. Kaynakla Sert Yüzey Alaşımlama Yöntemleri	10
2.3.1. Elektrik ark kaynağı ile sert yüzey alaşımlama	10
2.3.2. Tungsten ark kaynağı ile sert yüzey alaşımlama	17

2.3.3. Lazer ark kaynağı ile sert yüzey alaşımlama	18
2.3.4. Özlü tel ark kaynağı ile sert yüzey alaşımlama	18
2.3.5. Plazma transfer ark kaynağı ile sert yüzey alaşımlama	19
2.3.6. Tozaltı ark kaynağı ile sert yüzey alaşımlama	19
2.3.7. Oksi asetilen kaynağıyla sert yüzey alaşımlama	20
2.3.8. Gazaltı ark kaynağıyla sert yüzey alaşımlama	20
2.4. Kaynakla Sert Yüzey Alaşımlama İşleminde Seyrelme	21

BÖLÜM 3.

LİTERATÜR İNCELEMESİ	22
3.1. Giriş	22
3.2. Fe-B-C Esaslı Sert Dolgu Alaşımları	23
3.3. Fe-Mn-C Esaslı Sert Dolgu Alaşımları.....	23
3.4. Fe-Mo-B Esaslı Sert Dolgu Alaşımları.....	23
3.5. Fe-Mo-C Esaslı Sert Dolgu Alaşımları.....	24
3.6. Fe-Ti-C Esaslı Sert Dolgu Alaşımları.....	24
3.7. Fe-Ti-B Esaslı Sert Dolgu Alaşımları.....	25
3.8. Fe-Ti-B-C Esaslı Sert Dolgu Alaşımları.....	25
3.9. Fe-Ti-Mo-B-C Esaslı Sert Dolgu Alaşımları.....	26

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
4.1. Giriş	27
4.2. Tasarım ve Üretim	27
4.2.1. Hammaddeler ve altlık malzeme	27
4.2.2. Örtülü elektrot üretimi için kalıp imalatı	29
4.2.3. Bileşim belirleme ve elektrot üretimi	30
4.3. Karakterizasyon İşlemleri.....	33
4.3.1. Mikroyapı incelemeleri	33

4.3.2. Faz analizleri	33
4.3.3. Sertlik testleri	34
4.3.4. Aşınma testleri	34

BÖLÜM 5.

ARAŞTIRMA BULGULARI	36
5.1. Arayüzey İncelemeleri	36
5.2. Mikroyapı ve Faz Analizleri	37
5.2.1. $Fe_{(15-x)}MoTi_xBMn_2C$ ($x=0,1,2,3$) esaslı alaşımlar.....	37
5.2.2. $Fe_{(15-x)}Mo_xTiBMn_2C$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı alaşımlar.....	45
5.2.3. $Fe_{(15-x)}MoTiB_xMn_2C$ ($x=0,1,2,3$) esaslı alaşımlar.....	50
5.2.4. $Fe_{(17-x)}MoTiBMn_{0,66x}C_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı alaşımlar.....	55
5.3. Sertlik Testleri	57
5.4. Aşınma Testleri	63
5.4.1. $Fe_{(15-x)}MoTi_xBMn_2C$ ($x=0,1,2,3$) esaslı alaşımlar.....	63
5.4.2. $Fe_{(15-x)}Mo_xTiBMn_2C$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı alaşımlar.....	70
5.4.3. $Fe_{(15-x)}MoTiB_xMn_2C$ ($x=0,1,2,3$) esaslı alaşımlar.....	75
5.4.4. $Fe_{(17-x)}MoTiBMn_{0,66x}C_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı alaşımlar.....	81

BÖLÜM 6.

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	84
6.1. Sonuçlar	84
6.2. Öneriler	87
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	97

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

α -demir	: Ferrit (alpha)
δ	: Delta
EDS	: Enerji dağılımı spektrometresi
γ	: Gama
HRC	: Rockwell sertlik değeri
HV	: Vickers sertlik değeri
MAG	: Metal aktif gaz
MIG	: Metal inert gaz
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TIG	: Tungsten inert gaz
μ	: Sürtünme katsayısı
μm	: Mikrometre

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 4.1. Başlangıç tozların SEM görüntüleri a) ferro-molibden, b) ferro-titanyum, c) ferro-manganez, d) ferro-bor ve e) demir tozu	28
Şekil 4.2. Çalışma için üretilen kalıp görseli	30
Şekil 4.3. Sert dolgu elektrotlarının üretim adımları.....	32
Şekil 5.1. Alaşımlama işlemi sonrası numunelerin kesitinden alınan SEM görüntüleri.....	36
Şekil 5.2. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTi}_x\text{BMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamaların x- ışınları difraksiyon paternleri.....	38
Şekil 5.3. $\text{Fe}_{15}\text{MoBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi	39
Şekil 5.4. $\text{Fe}_{14}\text{MoTiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi.....	41
Şekil 5.5. $\text{Fe}_{13}\text{MoTi}_2\text{BMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi	43
Şekil 5.6. $\text{Fe}_{12}\text{MoTi}_3\text{BMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi.....	44
Şekil 5.7. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{Mo}_x\text{TiBMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı sert dolgu kaplamaların x-ışınları difraksiyon paternleri.....	46
Şekil 5.8. $\text{Fe}_{15}\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi.....	47
Şekil 5.9. $\text{Fe}_{13}\text{Mo}_2\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi.....	48
Şekil 5.10. $\text{Fe}_{12,5}\text{Mo}_{2,5}\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi.....	49
Şekil 5.11. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTiB}_x\text{Mn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamaların x-ışınları difraksiyon paternleri.....	51

Şekil 5.12. $\text{Fe}_{15}\text{MoTiMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi.....	52
Şekil 5.13. $\text{Fe}_{13}\text{MoTiB}_2\text{Mn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi	53
Şekil 5.14. $\text{Fe}_{12}\text{MoTiB}_3\text{Mn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi.....	54
Şekil 5.15. $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamaların x-ışınları difraksiyon paternleri.....	55
Şekil 5.16. $\text{Fe}_{17}\text{MoTiB}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi.....	56
Şekil 5.17. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTi}_x\text{BMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı kaplamaların mikro sertlik verileri.....	58
Şekil 5.18. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTi}_x\text{BMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara ait makro sertlik ölçümleri.....	59
Şekil 5.19. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{Mo}_x\text{TiBMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı sert dolgu kaplamaların mikro sertlik verileri	60
Şekil 5.20. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{Mo}_x\text{TiBMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı sert dolgu kaplamalara ait makro sertlik ölçümleri.....	60
Şekil 5.21. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTiB}_x\text{Mn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı kaplamaların mikro sertlik verileri.....	61
Şekil 5.22. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTiB}_x\text{Mn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara ait makro sertlik ölçümleri.....	61
Şekil 5.23. $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamaların mikro sertlik verileri.....	62
Şekil 5.24. . $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara ait makro sertlik ölçümleri.....	62
Şekil 5.25. $\text{Fe}_{15}\text{MoBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri.....	65
Şekil 5.26. $\text{Fe}_{14}\text{MoTiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri.....	66
Şekil 5.27. $\text{Fe}_{13}\text{MoTi}_2\text{BMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri.....	67

Şekil 5.28. $\text{Fe}_{12}\text{MoTi}_3\text{BMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri.....	68
Şekil 5.29. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTi}_x\text{BMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri	69
Şekil 5.30. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTi}_x\text{BMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası yüke bağlı aşınma oranı değerleri.....	70
Şekil 5.31. $\text{Fe}_{15}\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri.....	72
Şekil 5.32. $\text{Fe}_{13}\text{Mo}_2\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri.....	73
Şekil 5.33. $\text{Fe}_{12,5}\text{Mo}_{2,5}\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri.....	74
Şekil 5.34. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{Mo}_x\text{TiBMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri	75
Şekil 5.35. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{Mo}_x\text{TiBMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası yüke bağlı aşınma oranı değerleri.....	75
Şekil 5.36. $\text{Fe}_{15}\text{MoTiMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri.....	77
Şekil 5.37. $\text{Fe}_{13}\text{MoTiB}_2\text{Mn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri.....	78
Şekil 5.38. $\text{Fe}_{12}\text{MoTiB}_3\text{Mn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri.....	79
Şekil 5.39. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTiB}_x\text{Mn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri	80
Şekil 5.40. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTiB}_x\text{Mn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası yüke bağlı aşınma oranı değerleri.....	80

Şekil 5.41. $\text{Fe}_{17}\text{MoTiB}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri.....	82
Şekil 5.42. $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri	83
Şekil 5.43. $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası yüke bağlı aşınma oranı değerleri.....	83



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Ferro alaşımlar ve demir tozunun kimyasal bileşimleri (% ağı.).....	27
Tablo 4.2. Örtü bileşimi içerisindeki flaks ve bağlayıcı oranları	29
Tablo 4.3. Elektrot çekirdek metalinin kimyasal bileşimi (% ağı.).....	29
Tablo 4.4. Altlık malzemenin spektral analiz sonucu (% ağı.)	29
Tablo 4.5. Tasarlanan sert dolgu elektrodu bileşimleri (% at.).....	31

ÖZET

Anahtar kelimeler: Sert dolgu, sert yüzey kaplama, örtülü elektrot, mikroyapı, sertlik, aşınma

Sert dolgu kaplama, yaklaşık 100 yıllık bir geçmişe sahip olan ve maden, hafriyat, tarım gibi agresif çalışma koşullarında çalışan makine parçalarını; aşınma, erozyon ve korozyon gibi hasarlara karşı korumak amacıyla uygun bir kaynak prosesi kullanılarak gerçekleştirilen yüzey modifikasyon yöntemidir. Günümüzde çok sayıda sert dolgu kaplama bileşimi ticari olarak kullanılmakta ve yeni alaşımlar geliştirilmeye devam etmektedir. Bu çalışmada ticari olarak kullanılan sert dolgu kaplama bileşimlerine alternatif olarak kullanılabilecek Fe-Mo-Ti-Mn-B-C esaslı yeni sert dolgu bileşimleri geliştirilmiştir. Literatür taraması ve ön çalışmalar sonucunda on bir farklı bileşimde örtülü sert dolgu elektrodu üretilmiştir. Çalışmada ekonomik faktörler göz önüne alınarak ferro alaşım tozları ve düşük maliyetli katkı maddeleri kullanılmıştır. Sert dolgu elektrotları elektrik ark kaynağı tekniği ile AISI 1010 çelik üzerine kaplanmıştır. Kaplama sonrasında standart metalografik işlemlere göre hazırlanan deneysel numunelerin mikroyapısal incelemeleri yapılmıştır. Makro ve mikro sertlikler sırasıyla vickers ve rockwell sertlik yöntemleriyle ölçülmüş ve aşınma direnci karşılıklı aşınma test cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar; yüzey aşınmalı tabakanın altlık malzeme ile metalurjik olarak uyumlu olduğunu ve kaplama tabakasının homojen faz dağılımına sahip olduğunu göstermiştir.

THE PRODUCTION AND INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF Fe-Mo-Ti-B-C BASED HARDFACING ALLOY COVERED ELECTRODES

SUMMARY

Keywords: Hardfacing, covered electrode, microstructure, hardness, wear

Hardfaced machine parts that have a history of about 100 years and work in aggressive working conditions such as mining, excavation and agriculture; It is a surface modification method using a suitable welding process to protect against failure such as abrasion, erosion and corrosion. Numerous hardfacing compositions are in commercial use today, and new alloys continue to be developed. In this study, Fe-Mo-Ti-Mn-B-C based new hardfacing compositions were developed that can be used as an alternative to commercially used hardfacing compositions. As a result of literature review and preparatory studies, covered hardfacing electrodes with eleven different compositions were produced. Considering the economic factors ferro alloy powders and low-cost additives were used as raw materials. The hardfacing electrodes were coated on AISI 1010 steel with electric arc welding technique. Then, microstructural examinations were carried out experimental samples which were prepared according to standard metallographic processes. Macro and micro hardness were measured with Vickers and Rockwell hardness method respectively and wear resistance was measured by using a reciprocal wear test machine. Experimental findings showed that the surface alloyed layer was metallurgically compatible with the substrate and the phase distribution of coating layer was homogeneous.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Her geçen gün artan talep nedeniyle hammadde ve enerji modern dünyanın en büyük sorunları haline gelmektedir. Enerji, hammadde varolduğu sürece üretilebilecektir. Bu sebeple enerji sorununun temelinde de aslında hammadde yatmaktadır. Bilim insanları bu büyük sorunun önüne geçebilmek için az hammaddeden çok yarar sağlamayı hedef olarak verimliliği yüksek yeni maddeler üretmek veya var olanların özelliklerini geliştirmek üzere çalışmaktadır [1].

Dünyada üretilen enerjinin; %35'i tarım, ormancılık ve ev işlerinde, %29'u sanayide, %27'si ulaşımda, %6,2'si ise madencilikte kullanıldığı tahmin edilmektedir. Madencilikte tüketilen enerjinin ise yaklaşık olarak %40'ı (küresel olarak 4,6 EJ) sürtünmenin üstesinden gelmek için kullanılmaktadır. Yine küresel ölçekte; aşınma hasarları, aşınan parçaların değişimi veya yeniden üretimi için yıllık 2 EJ' lik enerji tüketilmektedir. Sürtünme ve aşınmadan kaynaklı ekonomik kayıplar ise yıllık 210 milyon Euro civarındadır. Tüm bunların yanında yine madencilikte sürtünme ve aşınma kaynaklı olarak dünyadaki CO₂ emisyonunun %2,7'sine karşılık gelen 970 milyon tonluk CO₂ salınımı açığa çıkmaktadır [2]. Endüstriyel ürünlerdeki hasarlar veya kayıplar yalnızca sürtünme veya aşınma ile sınırlı değildir. Küresel bazda ekonomik karşılığının 2,5 trilyon dolar olduğu düşünülen ve endüstriyel ürünlerin %3,4'ünü tahribata uğratan korozyon hasarları da önemli kayıplardandır [3].

Tüm bu kayıpları azaltmak veya önüne geçmek için kendinden beklenen özellikleri gösteremeyen malzemeler, niteliği daha yüksek olan malzemelerle değiştirilebilir. Ancak bu çözüm kaynakların tüketimi ve maliyet açısından verimsizdir. Çünkü malzemelerin kullanıldıkları yerlerde ortamla ilk teması yüzeyleri üzerinden gerçekleşir ve yalnızca yüzeyde yapılacak olan değişikliklerle istenen özellikleri daha az kaynak kullanarak ve daha düşük maliyetle elde etmek mümkündür [4,5].

Yüzeylerin özelliklerini değiştirmenin; borlama, nitrüleme, alev ve indüksiyonla sertleştirme, lazer alaşımlama, fiziksel veya kimyasal buhar biriktirme, akımlı akımsız kaplamalar, kaynak kaplamaları gibi birçok yöntemi bulunmaktadır. Yöntem seçiminde ana malzemenin özellikleri, yapılacak olan kaplama cinsi, uygulanacak olan ortam, kaplama yüzeyinden beklenen özellikler, kaplama kalınlığı, ekonomi gibi birçok parametre yer almaktadır. Çelik malzemelerdeki aşınma, korozyon, erozyon gibi kayıpların önüne geçmek için kaynakla sert yüzey alaşımlama işlemi; kaplama tabakasının altlık malzeme ile olan metalurjik bağı, yüksek kalınlıklarda kaplama tabakası oluşturabilme, hasara uğrayan parçaların onarımını yerinde sağlayabilme ve tüm bunları düşük maliyetlerle gerçekleştirebilme gibi özellikleri sebebiyle avantajlı bir kaplama tekniğidir [6-8].

Kaynak ile sert yüzey kaplama; korumalı metal ark kaynağı (SMAW), oksigaz kaynağı (OFW), tungsten inert gaz kaynağı (GTAW veya TIG), özlü tel ark kaynağı (FCAW), tozaltı ark kaynağı (SAW), plazma transfer ark kaynağı (PTA), lazer ark kaynağı gibi birçok kaynak yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir [9]. Geleneksel yöntemler arasında bulunan elektrik ark kaynağı yöntemi yüz yılı aşkın süredir kullanılmaktadır. Ekipman maliyetinin düşük olması, küçük ve mobil olması, uygulama kolaylığı gibi diğer yöntemlere göre üstünlük olarak sayılabilecek sebeplerle halen popülerliğini korumakta ve yaygın olarak kullanılmaktadır [10].

Sert yüzey alaşımlama işlemlerinde yüzey kaplama yönteminin yanısıra yüzeyden beklenen performans sağlayabilecek olan alaşım türünün seçimi ve ortaya çıkacak olan mikroyapının; sertlik, aşınma ve korozyon direnci üzerinde doğrudan etkisi bulunmaktadır. Yüksek sertlik, yüksek aşınma ve korozyon direnci gibi sebeplerle alaşım malzemesi olarak metal karbürlerin kullanımı yaygındır ancak son yıllarda karbürlerden daha iyi performansa sahip olan borürlerin sert yüzey kaplama alaşımlarında kullanımı için araştırmalar devam etmektedir [11]. Ayrıca yine çalışmalar arasında yer alan yüksek entropili [12] alaşımlar, kompleks borür/karbür [13] içeren alaşımlar ve karboborür [14] fazları içeren alaşımlar üzerine yapılan çalışmalar dikkat çekicidir. Sert yüzey alaşımlarında eser miktardaki alaşım elementinin kaplama özelliklerini değiştirdiği bilinmektedir [15]. Bu sebeple sınırsız

sayıda yeni bileşim geliştirmek mümkündür. Literatürde kompleks borür/karbür ve karboborürler üzerine yapılan araştırmalarda elektrik ark kaynağı yönteminin kullanımına dair çalışmalar sınırlıdır. Bu sebeple yapılacak olan çalışma kendi alanında öncü olabilecek niteliktedir.

Bu çalışmada, Fe-Mo-Ti-Mn-B-C esaslı sert dolgu alaşımlarının sertlik ve aşınma dirençleri üzerine molibden, titanyum, bor, manganez ve karbonun etkileri araştırılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda farklı bileşimlere sahip on bir sert dolgu elektrodu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bileşimlere uygun olarak üretimi yapılan elektrotlar, elektrik ark kaynağı yöntemi ile AISI 1010 çelik altlık üzerine kaplanmıştır. Alaşımlama işlemi sonrasında in-situ olarak oluşan karbür, borür ve/veya karboborür fazlarının yer aldığı kaplama tabakasının sert ve aşınma direncinin yüksek olması beklenmektedir. Oluşturulan kaplamaların mikroyapı incelemeleri; taramalı elektron mikroskobu (SEM), EDS ve x-ışını elementel dağılım haritaları ile yapılmıştır. Ortaya çıkan fazların analiz işlemleri x-ışınları difraktometresi (XRD) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Kaplama tabakasının mikro sertlikleri Vickers (HV), makro sertlikleri ise Rockwell (HRC) sertlik ölçüm yöntemleriyle belirlenmiştir. Kaplamaların tribolojik özelliklerini belirlemek üzere yapılan aşınma testleri, salınım hareketli (karşıt- git gel hareketli) aşınma olarak gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 2. SERT YÜZEY ALAŞIMLAMA

2.1. Sert Yüzey Alaşımlama

1896 yılında J. W. Spencer tarafından bulunan ve gelişerek günümüze kadar gelen sert yüzey kaplama işlemi; yüzeylerde oluşan aşınma, darbe, korozyon, erozyon, abrazyon, kavitasyon gibi kayıpları azaltmak veya engellemek üzere istenen özellikleri sağlayacak olan alaşımın kaynak, termal püskürtme ya da benzeri yöntemlerle yüzeyler üzerine biriktirilmesidir [16]. İşlem için kaplama alaşımı seçimi ve uygulama yönteminin belirlenmesi kaplama sonrasında oluşacak olan yüzeyin özellikleri ve performansı açısından önemlidir. Farklı türlerdeki birçok alaşım grubunun yüzeyler üzerine kaplanabilmesi, nispeten düşük maliyetli olması ve kolay ulaşılabilir olması sebebiyle kaynakla sert yüzey alaşımlama yaygın kullanıma sahiptir [17]. Kaynakla sert yüzey alaşımlama işleminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar; tungsten inert gaz kaynağı, tozaltı ark kaynağı, özlü tel ark kaynağı, elektrik ark kaynağı, plazma ya da lazer ışın kaynağı gibi yöntemlerdir [18]. Kaynakla yapılan yüzey alaşımlama işlemlerini temelde dört gruba ayırmak mümkündür. Bunlar;

- Aşınma, sürtünme, darbe, erozyon gibi kayıpları azaltmak amacıyla yapılan altlık malzeme ve kaplama tabakası bileşiminin birbirinden tamamen farklı olduğu ve kalın bir örtü tabakasına sahip sert yüzey alaşımlama (hardfacing) olarak adlandırılan kaplamalar,
- Boyutsal olarak hasara uğramış olan parçaların yeniden eski haline döndürülmesi amacıyla altlık malzeme ve kaplama tabakasının bileşimlerinin birbirine tamamen yakın olduğu dolgu kaplama olarak adlandırılan (build up) kaplamalar,
- Kullanım sırasında oluşabilecek olan hasara karşı daha dirençli yüzeyler elde etmek amacıyla altlık malzemeyle kaplama tabakasının birbirine yakın

bileşime sahip ve güçlü metalurjik bağlarla bağlandığı koruyucu kaplama (weld claddings) olarak adlandırılan kaplamalar,

- Nihai kaplama tabakasını tek seferde oluşturmak yerine katmanlı olarak kademeli kaplama (buttering) olarak adlandırılan kaplamalardır [16,19].

Sert yüzey kaplama işleminde tercih edilen yöntemin yanında alaşımlanmış yüzeyden beklenen özellikleri karşılamak üzere seçilen alaşım türü de önem taşımaktadır. Kaplama işleminde kullanılacak olan alaşımları genel anlamda mikroyapılarına ya da aşınma türüne göre sınıflandırmak mümkündür. Bunlar da kendi aralarında gruplara ayrılmakta ve her bileşim türünün kendine özgü spesifik kullanım alanları bulunmaktadır.

Temel amacı aşınma, korozyon, darbe gibi etkilere maruz kalacak olan henüz kullanılmamış parçalar ya da servis ömrünü tamamlamış olan parçaları yeniden kullanıma geri döndürebilmek olan sert yüzey alaşımlama işlemi genellikle düşük karbonlu, orta karbonlu ya da düşük alaşımlı çeliklerin yüzeylerine uygulanır [20,21]. Madencilik, taş ocakçılığı, petrokimya, çimento, inşaat ve elektrik üretimi gibi endüstrilerde geniş kullanım alanına sahip olan sert yüzey alaşımlama işlemi; tarım aletleri, ekskavatör dişlileri, demiryolu araç tekerleri, türbin kanatları, beton mikseri bıçakları, yüksek hızlı kum karıştırma kazanları gibi aşınma, darbe ve/veya korozyonun olumsuz etkilerine maruz kalan parçaların yüzeylerine uygulanır [8,10,22].

2.2. Sert Yüzey Alaşımlama Malzemeleri

Kaynak ile gerçekleştirilen yüzey işlemleri sırasında oluşan tabakanın sertliğinin 200 HV üzerinde olduğu durumlar sert dolgu olarak adlandırılmaktadır [11]. Sert dolgu işleminde kaplamadan beklenen özelliğe göre dolgu malzemesi ana metalle aynı özelliklerde veya yeni özellikler kazandırmak amacıyla farklı özelliklerde olabilir. Sert dolgu işlemiyle malzemenin; sertlik, aşınma dayanımı, korozyon direnci, darbe dayanımı ve abrazyon dayanımı gibi özellikleri geliştirilebilmektedir. İşlemin birçok amaca hizmet edecek biçimde kullanılabiliyor olması dolgu alaşımlarının geniş bir

yelpazeye sahip olmasını sağlamaktadır. Bu sebeplerle sert dolgu alaşımları için net bir sınıflandırma bulunmamakla birlikte, belirli özelliklerine göre çeşitli sınıflandırmalar mevcuttur [23]. Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW) tarafından mikroyapılarına göre sınıflandırılmakla birlikte endüstride en çok, kaynak için sarf malzemeleri içeren TS EN 14700 standardı kullanılmaktadır. Bir başka sınıflandırma ise aşınma mekanizmasına göre yapılmıştır [24].

2.2.1. Aşınma türüne göre sert dolgu alaşımları

Kullanım sırasında ortaya çıkan aşınma mekanizmasına göre sert dolgu alaşımlarını temelde 5 gruba ayırmak mümkündür. Bunlar;

- Dolgu kaplama alaşımları
- Metal-metal aşınma alaşımları
- Metal-toprak aşınma alaşımları
- Tungsten karbürler
- Demir dışı alaşımlar'dır [24].

Dolgu kaplama alaşımları; aşınmaya uğramış olan yüzeylerin eski boyutlarına geri döndürülmesi veya yüzeye uygulanacak olan ana kaplama öncesi tabaka oluşturmak üzere kullanılmaktadır. Endüstride; aşınma sonrası deforme olmuş olan rayların kaplanmasında, düşük devirde çalışan dişlilerin geniş yüzeylerinin kaplanmasında kullanılmaktadır.

Metal- metal aşınma alaşımları; sürtünmenin metal-metal arasında olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Endüstride; ekskavatör ana iskeleti, hadde merdaneleri ve vinç tekerleri gibi yerlerde kullanılmaktadır.

Metal-toprak aşınma alaşımları; çalışma esnasında kayma, darbe ve çarpma gibi etkilere maruz kalan ekipmanların yüzeylerine uygulanmaktadır. Endüstride; pullukların bıçaklarında, maden kırma makinelerinin kırıcılarında ve konveyör bıçağı gibi ekipmanların yüzey aşındırma işlemlerinde kullanılmaktadır.

Tungsten karbür alaşımları, kesme ve sürtünmenin bulunduğu ortamlarda çalışan ekipmanlarda kullanılmaktadır. Endüstride; taş ocakçılığında kullanılan delicilerin uçlarında, kazı işlerinde kullanılan dozerlerin ilgili bölümlerinde kullanım alanı bulmaktadır.

Demir dışı alaşımlar, aşınma direnci açısından demir esaslı alaşımların yeterli gelmediği durumlarda kullanılmaktadır. Demir esaslı alaşımlara nazaran daha maliyetlidirler ancak özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında demir esaslı alaşımlara göre üstün performanslar sergilemeleri sebebiyle tercih edilmektedirler [25].

2.2.2. Mikroyapısına göre sert dolgu alaşımları

Sert dolgu alaşımlarının sınıflandırmaları arasında daha çok kabul görmekte olan mikroyapısına göre sınıflandırma, kaplama sonrası oluşan yapının nihai mikroyapısına göre gruplandırılmaktadır.

2.2.2.1. Demir esaslı sert dolgu alaşımları

Uygulandığı yüzeylerdeki yüksek performanslarına karşı maliyetlerinin düşük olması ve kolayca uygulanabilir olması gibi sebeplerle demir esaslı sert dolgu alaşımları endüstride en çok kullanılan alaşım ailesidir. Demir esaslı alaşımlar içerisinde düşük alaşımlı çeliklerden yüksek alaşımlı çeliklere kadar birçok ürün grubu yer almaktadır. Yüksek alaşımlı çelikler, içeriğinde %50'ye kadar alaşım elementi bulundurabilecek olmalarına karşı genellikle %20'den daha az alaşım elementi içeren çelikler kullanılmaktadır. Bu alaşım grubunun yüksek sıcaklıklar altındaki çalışma performansları kobalt ve nikel esaslı alaşımlar kadar yüksek olmayıp, genellikle 200°C sıcaklığın altındaki uygulamalarda abrazif aşınmaya karşı direnç gösterecek şekilde tasarlanmışlardır. Demir esaslı sert dolgu alaşımları kendi içerisinde; [26,27].

- Perlitik çelikler
- Ostenitik (manganez) çelikler

- Martenzitik çelikler
- Yüksek krom çelikleri
- Östenitik paslanmaz çelikler şeklinde sınıflandırılabilir.

Perlitik çelikler, yapısı içerisinde % 0,2 den daha az karbonla birlikte düşük oranlarda alaşım elementi barındıran, ilave alaşım elementleri sayesinde perlitik mikroyapıya sahip hale gelen çeliklerdir. Yüksek kaynak kabiliyetine sahip olan alaşımlar, uygulama sonrasında yüksek darbe direncine ve 25-37 HRC sertliğe sahip yüzeyler oluşturmaktadır.

Ostenitik (manganez) çelikler, yapısı içerisinde %12-15 manganezin yanında krom da bulunduran, içerdiği krom miktarına göre düşük kromlu veya yüksek kromlu olarak 2 gruba ayrılan alaşım ailesidir. Düşük kromlu ostenitik (manganez) çelikler içeriğinde %12-15 manganez, %4'e kadar krom ve bir miktar molibden ile nikel içermektedir. Yüksek kromlu ostenitik (manganez) çelikler ise yapısında %15 manganez ve %12-17 krom içeren alaşım grubudur. Ostenitik (manganez) çelikleri çalışma sertleşmesi özelliğine sahiptir. Ayrıca yüksek kromlu olan grup düşük kromlu olan gruba göre daha fazla çökelme sertleşmesine uğramaktadır. Bu grup alaşımlar genellikle demir yolu rayları ve kırıcı uçlar gibi yüksek darbe altında çalışan ekipmanların sert dolgu işleminde kullanılmaktadır.

Martenzitik çelikler; yapısında %0,7 ye kadar karbon içerebilen, bunun yanında sertleşebilirlik, mukavemet artışı ve martenzit oluşumunu arttırmak için yapı içerisine molibden, tungsten, nikel ve kromun (%12'ye kadar) eklendiği alaşım ailesidir. Kaplama işlemi sonrasında havada soğutularak martenzitik mikroyapı elde edilecek şekilde tasarlanabilirler. 45-60 HRC sertliğe sahip olan alaşım grubunun darbe direnci perlitik ve ostenitik alaşımlara göre daha düşüktür. Yapı içerisinde yer alan karbonun artışı abrazif ve adhezif aşınma direncini arttırmaktadır. Endüstride tuğla ve çimento sanayiindeki araçlarda ve kırma gereçlerinde kullanılmaktadır.

Yüksek krom çelikleri, yapısında %6-35 krom, %2-6 karbon içeren geniş bileşim aralığına sahip alaşımlardır. Ayrıca yapı içerisinde molibden, mangan gibi alaşım

elementleri de yer alabilmektedir. Sertlikleri 52-62 HRC aralığında olan yüksek krom çelikleri, yapısı içerisinde katılaşma esnasında oluşan ve aşınma dayanımına katkı sağlayan M_7C_3 tipi karbürler barındırırlar.

Ostenitik paslanmaz çelikler, bir kısmı genel kullanım amaçlı bir kısmı ise nükleer santral vanaları gibi kritik yerlerde kullanılmak üzere üretilen alaşım grubudur. Kobalt esaslı sert dolgu alaşımlarına alternatif olarak kullanılabilecek olan ostenitik paslanmaz çelik alaşımları 600°C gibi yüksek çalışma sıcaklıklarında kullanılabilmektedir [16,26].

2.2.2.2. Kobalt esaslı sert dolgu alaşımları

İlk kullanımının 1900'li yılların başlarına kadar dayandığı kobalt esaslı sert dolgu alaşımları parlaklıklarından dolayı “stellite” olarak adlandırılmıştır [28]. Bu alaşım ailesinin en önemli özelliği kaplama işleminin yapıldığı yüzeylerde aşınma direncinin yanında mükemmel korozyon ve oksidasyon direnci sağlayabilmesidir. Stellite olarak adlandırılan kobalt-krom-tungsten grubu bileşimleri özellikle yüksek sıcaklıklar altındaki aşınma ve korozyon direnciyle öne çıkmaktadır. Kobalt-krom-tungsten- nikel grubu ise yüksek sıcaklıktaki korozyon ve aşınma direncinin yanında yüksek termal şok özellikleri ile öne çıkmaktadır. Sahip olduğu mükemmel özelliklere karşı kobalt esaslı sert dolgu alaşımlarının en önemli dezavantajı diğer alaşım ailelerinden daha pahalı olmalarıdır. Bu alaşım ailesi nükleer santral parçalarından cerrahi teçhizatlara, dokuma endüstrisinden türbin kanatlarına kadar geniş bir yelpazede kendine kullanım alanı bulmaktadır [16,26,27,29].

2.2.2.3. Nikel esaslı sert dolgu alaşımları

Genellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan nikel esaslı sert dolgu alaşımları, demir esaslı sert dolgu alaşımlarına göre daha iyi performans gösterirken kobalt esaslı alaşımlara göre performansları daha düşüktür. Ancak kobalt esaslı sert dolgu alaşımlarına kıyasla daha ucuz olduğu için tercih sebebi haline gelmektedir. Nikel esaslı alaşımlar bünyelerinde %70-80 nikel, %11-17 krom, %2,5-3,7 bor ve eser

miktarlarda silisyum ihtiva etmektedir. Alaşım ailesi ile yapılan kaplamaların matris fazı içerisinde borür ve karbür fazları yer almaktadır. Yapı içerisinde bulunan borür ve karbür fazları sayesinde metal-metal aşınmasına karşı üstün performans göstermektedirler [30,31].

2.2.2.4. Bakır esaslı sert dolgu alaşımları

Uzun zaman yatak malzemelerinde kullanılan bakır esaslı sert dolgu alaşımlarının belirli tribolojik alanlarda performansı yüksektir. Alaşım ailesinin çeşitli bileşimleri bünyesinde Sn, Zn, Si veya Al içermektedir. Genel anlamda kavitasyon, korozyon, erozyon, ve metal-metal aşınmasına karşı kullanılmakta olup, alüminyum bronzları yatak malzemelerinde, kalay bronzları rulman yüzeylerinde kullanılmaktadır. Abrazif aşınma dirençlerinin düşük olması sebebiyle abrazif ortamlarda kullanılamaması bakır esaslı sert dolgu alaşımları için dezavantaj oluşturmaktadır [32].

2.2.2.5. Kompozit sert dolgu alaşımları

Genel anlamda sert yüzey alaşımlama yapılmış olan yüzeyin tokluk ve abrazif aşınma direncini arttırmak üzere geliştirilen kompozit esaslı sert dolgu alaşımları, yapıları içerisinde takviye fazı olarak aşınma direnci ve sertlikleri yüksek olan titanyum, molibden, krom, tungsten, vanadyum gibi elementlerin karbür, borür veya karboborürlerini barındırmaktadır.

Takviye fazı olan karbür, borür veya karboborür yapıları sentezlenmiş olarak prosese dışarıdan ilave edilir veya bu yapıları oluşturacak olan elementler işlem esnasında dolgu bileşimine katılarak yerinde (in-situ) olarak oluşturulabilmektedir [32].

2.3. Kaynakla Sert Yüzey Alaşımlama Yöntemleri

2.3.1. Elektrik ark kaynağı ile sert yüzey alaşımlama

Yöntem, ilk olarak 1881 yılında karbon elektrot ile iş parçası arasında ark oluşturmak

suretiyle uygulanmıştır. Yıllar içerisinde farklı denemeler ve geliştirmeler yapılmış ancak kaynak dikişi atmosferin zararlı etkilerinden korunamamıştır. 1904 yılında isveçli Oscar Kjellberg metal bir çekirdek çubuk üzerine kapladığı örtü tabakası sayesinde dikişi atmosferik şartlardan korumuş ve genel hatlarıyla örtülü elektrot ark kaynağı ortaya çıkmıştır [23].

Yöntemde ısı kaynağı olarak kullanılan elektrik arkı, kullanılan elektrot ile iş parçası arasında oluşur. Doğru akım veya alternatif akımın kullanıldığı yöntemde elektrik arkı, katot ve anodun kapalı devre olarak çalıştığı sistemde kızgın bir katottan çıkan elektronların anodu bombardımana uğratması sonucu ortaya çıkar. Elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümü ise elektrotla iş parçasının birbirine temas ettiği, direncin yüksek olduğu noktada gerçekleşir. Açığa çıkan ısı sayesinde moleküller iyonize hale geçer ve hava iletken bir hal alır. Üzerinden geçen akım miktarıyla birlikte ortamdaki ark gücü de artar ve kaynak için gerekli olan ısı tam anlamıyla ortaya çıkmış olur. Teoride açığa çıkan enerjinin %85'i ısı, %15'i ise ışık enerjisine dönüştüğü kabul edilmektedir [33].

Elektrik ark kaynağı yönteminde; yalnızca arkı oluşturmak üzere tasarlanmış karbon, tungsten grubu ergimeyen elektrotlar veya hem arkı hem de kaynak için gerekli olan ilave metali oluşturmak üzere örtülü veya örtüsüz olarak tasarlanmış ergiyen elektrotlar kullanılmaktadır. Ergimeyen elektrotlarla yapılan işlemlerde elektrotla iş parçası arasında veya kullanılan iki elektrot arasında ark oluşturulmaktadır. Kenarı bükülmüş ince saçlarda ilave metale gerek olmadan kullanım sağlanabilirken, kaynak ağzı doldurma işlemlerinde ilave metal kullanılmaktadır. Ergiyen elektrotlar grubundaki örtüsüz elektrotlarla yapılan kaynak işlemlerinde atmosferin olumsuz şartlarından korunmak üzere toz veya koruyucu gaz kullanılmaktadır. Ergiyen elektrotların bir diğer grubu olan örtülü elektrotlar ise çekirdek adı verilen çıplak bir tel üzerine presleme veya daldırma yöntemiyle örtü tabakası kaplanmış elektrotlardır.

Örtülü elektrotlar, örtü içerisinde bulunan bileşenlere göre yani örtü karakterine göre ve örtünün kalınlığına göre sınıflandırılabilir. Örtünün karakterine göre elektrotlar; rutil, oksit, bazik, asidik, sülülozik ve özel elektrotlar olarak gruplara

ayrılmaktadır. Örtü kalınlığına göre ise ince, orta kalın ve kalın elektrotlar olarak gruplara ayrılmaktadır.

Rutil elektrotlar; örtü içerisinde yaklaşık %35 TiO_2 içeren elektrotlardır. Farklı kalınlıklarda üretilebilirler ve örtü kalınlığının artışı kaynak dikişinin kalitesini arttırmaktadır. Rutil karakterli elektrotlarla yapılan kaynak işlemlerinde curuf hızlıca katılaşır ve kaynak dikişinden kolayca sökülebilir. Doğru akım veya alternatif akım kullanılarak çalışmaya uygun olan elektrotlar, düşük sıçrama oranlarına sahip ve arkın kolayca tutuşabileceği şekilde tasarlanmışlardır. Yapısında orta derecede oksijen bulundurması sebebiyle iyi bir dikiş profiline sahiptir. İşlem sonrasında curuf kolayca sökülebilir özelliktedir.

Oksit karakterli elektrotlar; örtü içerisinde yaklaşık %60 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4$ barındıran elektrotlardır. Kalın olarak üretilen elektrotlar ince kaynak dikişine sahip ve kaynağın duş akışı şekline göre gerçekleştirileceği yönde geliştirilmiştir.

Bazik karakterli elektrotlar; örtü tabakası bileşiminin büyükçe kısmını CaF_2 , Ca ve toprak alkali grubunun karbonatları oluşturmaktadır. Kalın örtülü olarak üretilen elektrotlar, birçok kaynak pozisyonunda çalışma olanağı sağlar ancak kaynak sonrası oluşan curuf tabakası diğer elektrot türlerine göre daha zor sökülmetedir.

Asidik karakterli elektrotlar; örtü tabakası bileşiminde manganez ve demir oksiti yüksek oranda bulunduran elektrotlardır. Oksit ve silikat gruplarından meydana gelen bu elektrotlar oldukça fazla oksijen içerirler. İç bükey kaynak dikişi görüntüsü açığa çıkarırlar. Kalın olarak üretilen elektrotlar, dikey kaynak hariç birçok pozisyonda kaynaklanabilme özelliğine sahiptir ve kaynak işlemi sonrasında ortaya çıkan curuf bal peteği görünümünde olup yüzeyden kolayca sökülebilmektedir.

Selülozik karakterli elektrotlar; örtü tabakası bileşiminde yanma olayı sonrasında organik bileşikler ortaya çıkarmak üzere bileşenler bulunduran elektrotlardır. Yapılarında yüksek oranda selüloz bulundururlar ve özellikle yukarıdan aşağıya doğru yapılan kaynak işlemlerinde tercih edilmektedirler. Kaynak sonrası örtü tabakasında

bulunan maddelerin çoğu ayrıştığından dikiş üzerinde ince bir curuf tabakası oluşmaktadır ve yüksek sıçrama oranlarına sahiptirler.

Özel elektrotlar grubuna örtü içerisinde demir tozu bulunan elektrotlar ve derin nüfuziyet elektrotları girmektedir. Derin nüfuziyet elektrotları saclara kaynak ağzı açmadan alın kaynağı yapılabilmesini sağlayan örtü tabakası kalın olacak şekilde üretilen elektrotlardır. Örtü bileşeninde demir tozu bulunan elektrotlar ise kaynak işlemi esnasında, yapısındaki demir tozunun çekirdek metalle birlikte kaynak dikişine karıştığı yüksek verimli elektrotlardır [33-35].

Elektrik ark kaynağı ile sert yüzey alaşımlama işlemlerinde dolgu materyali elektrodun bizzat kendisi tarafından sağlanmaktadır. Elektrodun çekirdek ve örtü bileşenleri sert dolgu tabakasının özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir. Ekipman maliyetlerinin düşük olması, mobil olarak taşınabilir olması ve çok çeşitli kaynak pozisyonlarında kullanıma elverişli olması gibi sebeplerle sert dolgu işlemlerinde en çok kullanılan yöntemdir. Yöntem ile yapılan kaplama işlemlerinde maksimum verimi elde edebilmek için çok pasolu kaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır [11].

Örtü bileşenlerinin kaynak işlemi sonrasında ortaya çıkan kaynak dikişinin metalurjik özellikleri üzerinde büyük etkisi vardır. Piyasada çeşitli bileşenlerle farklı kompozisyonlarda hazırlanmış birçok örtü bileşimi kullanılmaktadır.

Örtülü elektrot ark kaynağı, tozaltı ark kaynağı, özlü telle ark kaynağı gibi yöntemlerde kullanılan elektrotların formları birbirinden farklı olsa da tümünde düzgün bir kaynak dikişi elde etmek için flakslar kullanılmaktadır. Kullanılan flaksların oluşturduğu curuf, işlem sırasında kaynak havuzunun yüzeyini tamamen kaplayacak biçimde ve kaynak metalinden daha geç katılaşacak şekilde tasarlanmaktadır [36]. Örtü tabakasından beklenen temel özellikler;

- Kaynak işleminde ısı kaynağı olacak olan arkın tutuşmasını ve oluşumunu kolaylaştırmak,
- Kaynak işlemi esnasında ergimiş metalin yüzey gerilimine etki ederek

- yöntemle yapılabilecek olan kaynak pozisyonu yelpazesini geliştirmek,
- İşlem esnasında ortaya çıkardığı gazlar sayesinde kaynak banyosunu atmosferin zararlı etkilerinden korumak,
 - Kaynak banyosu üzerini tamamen sararak katılaşmak ve kaynak dikişinin yavaş soğumasını sağlamaktır [37,38].

Bileşenlerin veya oranların değişimi farklı pirometalurjik özellikler ortaya çıkaracağından kaynak metalinin özelliklerini değiştirmektedir. Bu sebeple örtü bileşenleri ve bunların oranları dikkatlice seçilmelidir [34,38,39]. Örtü İçerisinde yer alan bileşenler ve görevleri;

Curuf yapıcılar, kaynak işlemi esnasında kaynak banyosunu atmosferin zararlı etkilerinden koruyan ve kaynak bölgesinin hızlı soğumasını engelleyen maddelerdir. Örtü tabakası içerisinde yüksek oranlarda bulunan ve işlem sırasında curufu oluşturan bileşikler; karbonatlar, florürler, oksitler ve silikatlar olarak sıralanabilir [40]. Örtü bileşimi içerisinde yer alan bağlayıcının bozunmasına sebep olduğu için suda çözünen maddeler örtüye ilave edilmemektedir. Curuf yapıcı olarak yaygın kullanıma sahip olan karbonatlar; kalsiyum karbonat ve magnezyum karbonattır. Yapı içerisine baryum karbonat, stronsiyum karbonat, sodyum karbonat ve potasyum karbonat gibi bileşikler bazı durumlarda düşük miktarlarda ilave edilmektedir. Silikat olarak kuvars, potasyum feldispat ve sodyum feldispat gibi ekonomik ve erişimi kolay olan mineraller kullanılmaktadır. Oksitler grubunu hematit, manyetit, ilmenit gibi demir oksitler ve rutil gibi titanyum oksitler oluşturmaktadır. Oksit grubu olarak mangan, silisyum, alüminyum, krom gibi metallerin oksitleri de kullanılabilir. Florürler grubunda ise en yaygın olarak kalsiyum florür ve bunu takiben sodyum ve alüminyum florür kullanılmaktadır [33,38].

Curuf viskozitesi; temelde curufun akış biçimini, kaynak banyosunun örtülme şeklini belirleyen olgudur. Bunların yanında gözenek giderme, deoksidasyon ve alaşım ilavelerinin tutulması gibi süreçleri de kontrol altında tutan önemli bir parametredir. Büyük ölçüde sıcaklık ve örtü tabakasının bileşimine bağlıdır [38,40]. Curuf, ergiyik haldeki flaks ve metal arasında oluşan gazları çözebilecek kadar akışkan, kaynak

havuzunun uygun şekilde kaplanabileceği kadar da viskoz olmalıdır. Curuf içerisinde yer alan MnO , Fe_2O_3 , CaF_2 miktarları arttığında viskozite azalmakta, alüminyum oksit grubu ve SiO_2 miktarları artışıyla ise viskozite artmaktadır [40-42]. Ayrıca curuf oluşturuca olarak kullanılan $CaCO_3$ ' ın ayrışması sonucu açığa çıkan CaO ergimiş curufun viskozitesini arttırarak curufun akışkanlığını kontrol edebilmektedir [43].

Curufun yüzey gerilimi kaynak esnasında dikiş profilinin kontrolünün sağlanmasında önemli role sahiptir. Yüzey geriliminin yüksek olması durumunda sıvı ile katı arasında oluşun temas açısı 90° ye kadar çıkabilmektedir. Bu durumda kaynak metali altlık malzemeyi ıslatamaz ve curufun katılaşması daha hızlı hale gelir. Bu da kaynak esnasında açığa çıkan gazların çıkışını engeller. Yüzey geriliminin düşük olması durumunda ise sıvı ile katı arasında oluşun temas açısı çok küçük değerlere düşer ve kaynak dikiş çok düz hale gelir. Bu sebeple kaynak işlemi esnasında ne çok yüksek yüzey gerilimi ne de çok düşük yüzey gerilimi istenir [35,44].

Curufun sökülebilirliği özellikle çok pasolu kaynak işlemlerinde curuf oluşumu kadar önem taşımaktadır. Çünkü yüzeyde curufun varlığı kaynak bütünlüğüne önemli ölçüde etki edecektir. Curufun sökülebilirliği; örtü bileşimi, kaynak metaliyle curuf arasındaki termal genleşme ve baziklik indeksiyle yakından alakalıdır. Düşük baziklik indeksine sahip olan kaplamalarda üretilen curuf kalın ve kolayca yüzeyden sökülebilir özellikteyken, daha yüksek baziklik indeksine sahip olan kaplamalardaki curuf ince ve kaynak yüzeyinden daha zor sökülebilir özelliktedir. Örtü içerisindeki Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 gibi bileşiklerin miktarlarının artışı curufun sökülebilirliğini arttırmakta, CaF_2 ise negatif etki göstererek sökülebilirliği azaltmaktadır [37,45].

Arkın kararlılığı, kaynak işleminin başlangıcında arkın kolayca tutuşabilmesi şeklinde kısaca tanımlanabilmektedir. Alternatif akım kullanılan kaynak işlemlerinde her yarım çevrimde bir yani saniyede 50-60 kez ark tekrar tutuşmaktadır. Stabilize olmuş ark ile çalışma sırasında dikiş boyunca ark şartları kendi kendine değişmez [35]. Kaynak esnasında kullanılacak olan akımın cinsine göre özel eklemeler yapılması gerekse de örtü bileşimi içerisinde titanyum oksit, zirkonyum karbonat, lityum, manganez, magnezyum, lityum karbonat gibi ilavelerin yapılması arkın kararlılığını ve

sürekliliğini sağlamada olumlu etki yaratmaktadır. Örtüye katılan demir tozunun da elektrodu iletken hale getirme, erime verimini arttırma gibi özelliklerinin yanında arkın stabilizasyonuna katkı sağladığı bilinmektedir. Ayrıca yine elektrot örtüsüne başka amaçlarla katılan sodyum silikat, potasyum silikat gibi maddeler de arkın kararlılığını sağlamada rol oynamaktadır [33,35,38,46].

Kaynakta nüfuziyet, iş parçasının yüzeyi ile füzyon olayının gerçekleştiği derinlik arasındaki maksimum mesafedir. Nüfuziyetin yüksekliği kaynak işlemini tamamlamak için gereken geçiş sayısını azaltmaktadır. Kaynak nüfuziyeti; akı bileşimi, kaynak hızı, polarite, hareket hızı ve baziklik indeksinden etkilenmektedir. Örtü tabakası içerisine katılan CaCO_3 , K_2CO_3 , ve CaF_2 sığ nüfuziyet, MgO , SiO_2 , Na_2CO_3 , MnO_2 ve Al_2O_3 orta derece nüfuziyet, MgCO_3 ise derin nüfuziyet özellikleri kazandırmaktadır [47].

Gaz oluşturmalar, kaynak işlemi sırasında kaynak havuzunu atmosferin zararlı etkilerinden korumak üzere, arkın ortaya çıkardığı ısı ile ayrışarak veya yanarak gaz atmosferi oluşturan katkılardır. Koruyucu gaz oluşturmak üzere örtü içerisine; kireç taşı, dekstirin ve odun tozu gibi katkılar yapılmaktadır. Diğer bir katkı maddesi ise CaCO_3 'tür. CaCO_3 yüksek sıcaklıklarda parçalanarak CaO ve CO_2 'e dönüşür. Yüksek oranlarda CaCO_3 kullanımı curuf içerisindeki CaO miktarının artışına sebep olacaktır. Yükseklen CaO miktarı ile curuf yoğunluğunda artış meydana gelecek ve katılaşma daha hızlı gerçekleşebilecektir. Hızlı katılaşma sonucunda istenmeyen poroziteler ortaya çıkabilmektedir [33].

Baziklik indeksi, flaksın fiziksel ve kimyasal özelliklerini karakterize etmek için kullanılan bir terimdir. Kaynaklanma kabiliyeti veya kaynak viskozitesi baziklik indeksinin bir fonksiyonudur. Baziklik indeksi ile ilgili çeşitli teoriler bulunmakla birlikte Uluslararası Kaynak Enstitüsü tarafından da kabul gören formül Eşitlik 2.1'de verilmiştir.

$$B. I. = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO} + \text{SrO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O} + \text{CaF}_2 + (\text{MnO} + \text{FeO})}{\text{SiO}_2 + 0.5(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)} \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1’de verilen, bazik oksitlerin asidik oksitlere oranlanmasıyla elde edilen baziklik indeksi değeri 1.0’dan küçükse flaksın asidik özelliklere, 1.0-1.2 arasında ise nötr özelliklere, 1.2’den büyükse bazik özelliklere sahip olduğu düşünülmektedir. Asidik özellikteki flakslar ile sorunsuz kaynak dikişleri elde edilebilmekte ancak kaynak dikişleri kırılabilirlik gösterebilmektedir. Bazik özellikteki flakslar ile kaynak işlemleri zor olmakla beraber kaynak işlemi sonrasında elde edilen kaynak dikişi kırılabilirlik göstermez [48].

Deoksidantlar ve istenmeyen element süpürücüler; kaynak işlemi esnasında oksijene karşı afinitesi yüksek olan ergiyik banyoda istenmeyen metal oksitlerin oluşumunu engellemek üzere örtüye yapılan katkılar ve istenmeyen elementleri süpürmek üzere yapılan katkılardır. Geliştirilen alaşım bileşimine de bağlı olarak kullanılan katkı maddeleri; ferro-silisyum, ferro-manganez, ferro-molibden, ferro-niobyum olarak sıralanabilmektedir. Ferro silisyum ayrıca yapı içerisindeki CaO, kükürt ve fosfor gibi istenmeyen element ve bileşiklerin süpürülmesinde rol oynamaktadır [49].

Bağlayıcılar ve plastisite arttırıcılar, elektrot üretim işlemi adımlarında örtünün birarada tutulması ve istenen mukavemeti sağlayabilmesi adına yapılan katkılardır. Endüstride mukavet arttırmak için genellikle lifli yapıya sahip olan muskovit gibi katkı maddeleri kullanılmakla beraber bağlayıcı olarak sodyum ve potasyum silikat yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan silikatların nem tutma özellikleri yüksektir, bu sebeple üretilen elektrotlar nem oranının düşük olduğu ortamlarda depolanmalı ve kullanım öncesi ön ısıtma işlemine tabi tutulmalıdır [49].

2.3.2. Tungsten inert gaz kaynağıyla sert yüzey alaşımlama

Tungsten inert gaz (TIG) kaynağı, işlem için gerekli olan ısıyı ergimeyen Tungsten elektrot ile iş parçası arasında oluşan arkın sağlandığı kaynak yöntemidir. Kaynak işlemi esnasında ortaya çıkan arkın yüksek sıcaklığı kaynak banyosunu oluşturmaktadır. İşlem; argon, helyum veya bunların karışımından oluşan inert bir gaz ortamında gerçekleşir ve bu sayede kaynak banyosu atmosferin kirlетici etkilerinden korunmuş olur. İşlem sırasında kullanılan elektrot, saf tungsten veya alaşımlarından

üretilmektedir. Kaynak işlemi ilave bir kaynak metali kullanılarak veya kullanılmadan gerçekleştirilebilmekle birlikte, yöntem ile yapılan sert yüzey kaplama işlemlerinde dolgu alaşımı toz veya çubuk formunda olabilmektedir. Yöntem; paslanmaz çelikler, alüminyum, magnezyum, bakır ve reaktif metallerin (titanyum, tantal) kaynak ve dolgu işlemlerinde kullanılabilir. Yöntem ekipmanı elektrik ark kaynağına kıyasla daha maliyetlidir ve TIG kaynağı ile yapılan kaplamalarda ortaya çıkan şiddetli lokalize ısı ana metal seyrilmesine sebep olabilmektedir [38,50,51].

2.3.3. Lazer kaynağıyla sert yüzey alaşımlama

Diğer yöntemlere göre daha yeni olan lazer kaynağı, işlem için gerekli olan ısıyı parça üzerine noktasal halde odaklanmış lazer ışınından sağlandığı kaynak yöntemidir. Yöntemde kullanılan lazerin gücü uygulanacak malzemeye ve biriktirme hızına göre ayarlanabilmektedir. Toz veya tel formundaki kaplama bileşimi ana metal üzerine önceden beslenir ve ardından istenen özelliklere göre ayarlanan lazerin gücü iş parçası üzerine aktararak hızlıca ergime ve katılma işlemi gerçekleştirilir. Isı girdisi kontrolünün ayarlanabildiği sistem sayesinde PTA ve TIG gibi yöntemlere göre daha düşük ısı girdisi sağlanarak ana metal ile kaplama tabakası arasındaki seyrilme olayı en aza indirilebilir. Bu sayede kaplama tabakasında oluşan fazlar yapı içerisinde daha ince taneli olarak oluşur. Tüm bu düşük seyrilme, ince ısı tesiri altında kalan bölge ve iyi metalurjik bağlanma gibi özellikler aşınma ve korozyona dayanıklı kaplama yüzeyleri üretmek için avantaj sağlar fakat birçok kaynak yöntemine göre lazer yönteminin bileşenleri daha karmaşık ve ilk yatırım maliyeti daha yüksektir [52-56].

2.3.4. Özlü tel ark kaynağıyla sert yüzey alaşımlama

İşlem için gerekli olan ısıyı elektrotla iş parçasının arasında oluşan arkta sağlandığı kaynak yöntemidir. İşlem sırasında kaynak dikişi gaz veya öz içerisinde bulunan flakslarla korunmakla birlikte otomatik veya yarı otomatik sistemlerle uygulanmaktadır. Yöntemin MIG-MAG kaynağı ile arasındaki tek fark kullanılan elektrottur. Özlü tel ark kaynağında elektrot olarak ön alaşımlanmış kaynak telleri veya içerisinde öz bulunan boru şeklindeki elektrotlar kullanılır. Uygulaması kolay ve

operatör eğitim sürelerinin kısa olduğu yöntem; birçok pozisyonda ark kararlılığı, öz içerisinde yer alan flaks ile daha fazla penetrasyon imkanı, düşük sıçrama, yüksek biriktirme imkanları sağlar.

Özlü tel ark kaynağıyla yapılan sert yüzey kaplama işlemlerinde kaplama alaşımı boru şeklindeki elektrodun içerisine doldurulur ve kaynak işlemi esnasında oluşan ark ısıyla yapı içerisindeki alaşım da ergir ve yüzeyde biriktirilir [7,38,57].

2.3.5. Plazma transfer ark kaynağıyla sert yüzey alaşımlama

Plazma ark kaynağı, ısı kaynağı olarak tungsten elektrot ile iş parçası arasında oluşan gaz korumalı arkın ve ilave olarak yüksek enerji yoğunluklu plazmanın kullanıldığı kaynak yöntemidir. Yöntem ile yapılan kaplamalarda alaşım malzemesi tozları plazma içerisine yönlendirilir. Plazma transfer ark kaynağı ile çok yüksek sıcaklıklara çıkılabilmekle beraber derin kaplamalar yapılabilir. Yöntem ile yapılan yüzey alaşımlama işlemlerinde yüksek ergime sıcaklığına sahip refrakter metaller hızlı bir şekilde kaplanabilmektedir. Kaplama işlemi sonrasında optimum derecede nüfuziyet sağlanmış homojen dağılımlı bir mikroyapı açığa çıkmaktadır. Tüm bunların yanında yöntemin ekipmanları nispeten pahalıdır [38,58].

2.3.6. Tozaltı ark kaynağıyla sert yüzey alaşımlama

Tozaltı ark kaynağı, sürekli olarak beslenen çıplak tel ve iş parçası arasında oluşan arkın sağlanan ısıya kullanıldığı kaynak yöntemidir. İşlem sırasında kaynak dikişini atmosferin zararlı etkilerinden koruyacak olan flaks içerikli toz, otomatik bir sistem ile dikiş üzerine beslenir. İşlem esnasında ortaya çıkan arkın tamamı tozun altında ortaya çıkar. Bu sebeple işlem esnasında sıçrama, kıvılcım oluşumu gibi olaylar ortaya çıkmaz.

Oldukça yüksek ark gücüne sahip olan yöntem, refrakter karakterli metallerin yüzeyler üzerine rahatlıkla kaplanmasına olanak sağlar. Ancak yüksek ark gücü sonucu ortaya çıkan yüksek ısı girdisi kaplama işlemi sırasında oluşan seyrelme etkisini artırır. Bu

sebeple aşınma, korozyon direnci gibi özellikleri arttırmak için yapılan kaplamalar tabakalar halinde birkaç kat olarak yapılmaktadır. Otomatik bir kaynak yöntemidir ve operatörün yüksek becerisine ihtiyaç yoktur. İşlem için gerekli ekipmanlar büyüktür ve elektrik ark kaynağına göre pahalı bir sitemdir. Aynı zamanda yöntem sınırlı kaynak pozisyonlarında çalışmaya müsaittir [7,38].

2.3.7. Oksi asetilen kaynağıyla sert yüzey alaşımlama

Oksi gaz kaynağı, işlem için gerekli olan ısıyı yanıcı ve yakıcı olmak üzere iki gaz karışımının kaynak ucunda oluşturduğu alevle sağlandığı kaynak yöntemidir. Yöntem oldukça eski olmasına rağmen halen kullanımı devam etmektedir. İşlem sırasında yakıcı gaz olarak oksijen, yanıcı gaz olarak ise asetilen, metan, propan gibi gazlar kullanılmaktadır. Ancak yakıcı gaz olarak asetilen yaygın bir kullanıma sahiptir, bu sebeple yöntem oksi-asetilen kaynağı olarak anılmaktadır.

Oksi asetilen yöntemiyle yapılan sert yüzey kaplama işlemlerinde alev sağlayan üfleç ve kaynak çubuğu ayrı ayrı yönlendirilmektedir. İşlem manuel olarak gerçekleştirildiğinden kaliteli kaplamalar için kaynak operatörü önemli bir parametredir. Ekipman maliyeti düşük olan yöntem aynı zamanda sert lehimleme, ön ısıtma gibi işlemlerde de kullanılmaktadır [16,34,38].

2.3.8. Gazaltı ark kaynağıyla sert yüzey alaşımlama

Gazaltı ark kaynağı, ısı kaynağı olarak sürekli beslenen tel elektrot ile iş parçası Gazaltı ark kaynağı, ısı kaynağı olarak sürekli beslenen tel elektrot ile iş parçası arasında oluşan arkın kullanıldığı yöntemdir. Ergiyen elektrodun kullanıldığı yöntemde, kaynak dikişi atmosferin olumsuz şartlarından koruyucu gaz kullanılarak korunmaktadır. Kullanılan koruyucu gaz helyum, argon gibi inert bir gaz ise yöntem metal inert gaz (MIG) kaynağı, karbondioksit gibi aktif bir gaz veya karışım gaz kullanılıyorsa metal aktif gaz (MAG) kaynağı olarak adlandırılır. Yöntemde kullanılan bobin halindeki sürekli elektrot, üretim hızını arttırmaktadır ve aynı zamanda kesintisiz kaynak dikişlerinin oluşumuna olanak sağlamaktadır. Yöntem ile birçok

kaynak pozisyonunda çalışmak mümkündür ancak koruyucu olarak gazın kullanılıyor olması rüzgarlı ortamlarda kaynak dikişinin özellikleri açısından sıkıntı yaratabilmektedir. Biriktirme oranı örtülü elektroda göre daha fazla olan MIG-MAG kaynağıyla yapılan sert yüzey alaşımlama işlemlerinde çapı küçük teller kullanılmaktadır. Yöntem ile yüksek alaşımlı çelikler, paslanmaz çelik alaşımları, kobalt ve nikel esaslı alaşımlar kullanılarak sert dolgu işlemi gerçekleştirilebilmektedir [23,38,59].

2.4. Kaynakla Sert Yüzey Alaşımlama İşleminde Seyrelme

Sert yüzey alaşımlama işlemiyle malzeme yüzeylerinin aşınma direncini önemli ölçüde arttırmak mümkündür. Bu direnci sağlayabilmek, altlık malzeme ve kaplama tabakası arasında güçlü metalurjik bağlar oluşturmaktan geçmektedir. Sert yüzey kaplamada kullanılan alaşımlar ile ana metalin ergime sıcaklıkları genellikle birbirinden farklıdır. Ana metal yüzeyinde kaplama alaşımını eritmek için oluşturulan yüksek ısı, ana metal yüzeyinin bir miktar ergimesine sebep olur. Bu olaylar sırasında temel difüzyon kuralları gereğince ana metalden kaplama tabakasına bir miktar element transferi gerçekleşir. Tüm bu ergime katılma olayları sırasında ana metal ile kaplama tabakası arasında güçlü metalurjik bağlar oluşurken bir yandan da difüzyon etkisiyle kaplama tabakası bileşiminde seyrelme denen olgu açığa çıkar [54,60,61].

BÖLÜM 3. LİTERATÜR İNCELEMESİ

3.1. Giriş

Sert dolgu kaplama işleminde temel felsefe, bir malzemenin tamamını aşınma, erozyon veya korozyon hasarına karşı dayanaklı bir malzemeden üretmek yerine ekonomik bir malzemeden üreterek sadece olası hasar riskine maruz kalacak kısımlarını daha dirençli malzemeler ile kaplayarak ekonomik kazanç elde etmektir. Fakat bu durum aynı kaplamadan farklı hasar türlerine ve mekanizmalarına karşı aynı anda koruma beklenmesi sebebiyle oldukça karmaşık bir hal almaktadır. Bu sebeple ticari olarak kullanılan çok sayıda kaplama bileşimi geliştirilmiştir ve hala bu gelişim devam etmektedir.

Endüstride sert yüzey kaplama işlemlerinde nispeten yüksek krom ve karbon içeriğine sahip demir esaslı sert dolgu alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımların tipik mikroyapısı; α -Fe, M_7C_3 , $M_{23}C_6$ ve kompleks karbürlerden oluşmaktadır. Yapı içerisinde oluşan krom karbürler vb. tane sınırlarında çökelme gösteren fazlar kaplama tabakasının tokluğunun azalmasına sebep olmaktadır. Matris tokluğu düşük bir kaplama, yüksek makro sertlik değerlerine sahip olsa dahi aşınma esnasında sert fazların kırılması veya matris içerisinden düşmesi sonucunda beklenen performansı sağlayamayacaktır [62].

Aşınma direnci yüksek olan kaplamalar üretmenin yolu kaplama tabakası içerisindeki karbür/borür oranını ve matris tokluğunu arttırmaktan geçmektedir. Literatürde Cr, Mo, W, Nb, V, Ti, Mn gibi elementlerin bor ve/veya karbonla çeşitli kombinasyonlarını içeren pek çok çalışma yer almaktadır [53,63,64,65]. Bu bölümde, yapılan çalışmaya katkı sağlayabilecek benzer çalışmaların incelemeleri yer almaktadır.

3.2. Fe-B-C Esaslı Sert Dolgu Alaşımları

Shoushtari, Fe-B ve Fe-B-C esaslı sert dolgu alaşımlarındaki bor oranının mikroyapı ve fazlar üzerine etkisini araştırmak üzere farklı bor oranlarına sahip alaşımlar geliştirerek özlü tel elektrot haline getirmiş ve sert yüzey alaşımlama işlemi gerçekleştirmiştir. Fe-B esaslı alaşımların tipik mikroyapılarının eliptik biçimdeki α -Fe ve sütunsal yapıdaki Fe_2B fazlarından oluştuğunu, yapı içerisindeki Fe_2B 'nin sütunsal haldeki gelişimi ve hacim oranının bor oranıyla paralel olarak arttığını gözlemlemiştir. Fe-B-C esaslı alaşımların mikroyapılarının iskelet görünümlü Fe_2B ve papatya benzeri $Fe_3(C,B)$ fazlarından oluştuğunu, artan bor oranıyla beraber yapıda bir miktar FeB fazının da oluştuğunu gözlemlemiştir [66].

3.3. Fe-Mn-C Esaslı Sert Dolgu Alaşımları

Yılmaz, Fe-Mn-C esaslı sert dolgu alaşımlarındaki karbon oranının mikroyapısal ve tribolojik özellikler üzerine etkisini araştırmak üzere farklı karbon oranlarına sahip bileşimler geliştirerek, TIG kaynağı yöntemiyle sert yüzey alaşımlama işlemi gerçekleştirmiştir. Yapı içerisindeki karbon oranının artışıyla birlikte mikroyapının değiştiğini, yapı içerisindeki Fe_3C ve martenzit miktarının arttığını gözlemlemiştir. Düşük karbon oranlarına sahip olan kaplamaların mikrosertliği 224-300 HV aralığında olmakla birlikte, karbon oranının ağı. %3.2'ye çıkması durumunda 3200 HV gibi yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu ani yükselişi ağı. %3.2 C içeren kaplamanın yapısında oluşan yüksek oranlardaki martenzit ve sementite bağlamaktadır. Aşınma testleri sonucunda ağı. %1 C ve ağı. %1.7 C içeren kaplamalarda deformasyon sertleşmesi olduğunu ve artan yüklerle beraber yer yer aşınma oranlarının düştüğünü belirtmektedir. Ancak genel anlamda yük ve kayma hızının artışı aşınmanın şiddetini arttırmaktadır [67].

3.4. Fe-Mo-B Esaslı Sert Dolgu Alaşımları

Abakay ve ark. Fe-Mo-B esaslı sert dolgu alaşımlarındaki molibden oranının mikroyapısal ve tribolojik özellikler üzerindeki etkisini araştırmak üzere farklı

molibden bileşimlerine sahip alaşımlar geliştirerek TIG kaynağı ile sert yüzey alaşımlama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Oluşan kaplama tabakasında Fe_2B , $\text{Fe}_{13}\text{Mo}_2\text{B}_5$, Mo_2FeB_4 ve $\alpha\text{-Fe}$ fazlarının varlığını tespit etmişler ve artan molibden oranıyla birlikte yapı içerisinde oluşan borür fazlarının arttığını gözlemlemişlerdir. Farklı yüklerde yapılan aşınma testlerine göre artan yük ile birlikte aşınma oranının arttığını, artan molibden oranıyla birlikte aşınma türünün şiddetli abrazif aşınmadan zayıf abrazif çiziklere dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca molibden içeriği en yüksek olan kaplamanın en yüksek aşınma direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir[68].

3.5. Fe-Mo-C Esaslı Sert Dolgu Alaşımları

Heidary ve ark. Fe-Mo-C esaslı sert dolgu alaşımlarındaki karbon oranının mikroyapısal ve tribolojik özellikler üzerindeki etkisini araştırmak üzere farklı karbon oranlarındaki alaşımlar geliştirerek TIG kaynağı yöntemiyle sert yüzey alaşımlama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Yapı içerisindeki karbon oranına göre ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü olmak üzere 3 farklı mikroyapı oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Ötektik altı mikroyapıda $\alpha\text{-(Fe,Mo)}$ ve $(\text{Mo,Fe})_6\text{C}$ fazları, ötektik bileşime sahip mikroyapıda $\alpha\text{-(Fe,Mo)}$, $(\text{Mo,Fe})_6\text{C}$, Fe_2MoC ve Mo_2C fazları, ötektik üstü mikroyapıda ise $\alpha\text{-(Fe,Mo)}$, Mo_2C ve Fe_2MoC fazları oluşmuştur. Ancak karbon oranındaki artışla birlikte mikroyapının tamamen $\alpha\text{-(Fe,Mo)}$ ve Mo_2C fazlarından oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Yapılan aşınma testleri sonucunda ise karbon oranının artışıyla birlikte sert yüzey alaşımlanmış yüzeyin aşınma direncinin arttığını tespit etmişlerdir[69].

3.6. Fe-Ti-C Esaslı Sert Dolgu Alaşımları

Wang ve ark. Fe-Ti-C esaslı sert dolgu alaşımlarındaki karbon oranının mikroyapısal ve tribolojik özellikler üzerine etkilerini araştırmak üzere farklı karbon oranlarına sahip alaşımlar geliştirerek SMAW yöntemiyle sert yüzey alaşımlama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Karbon miktarının %12 olduğu kaplamada TiC , Fe_3C , $\alpha\text{-Fe}$ ve $\gamma\text{-Fe}$ fazlarının bulunduğunu, karbon oranının %15'e çıkması durumunda yapı

içerisindeki sementit ve ostenit fazlarının miktarlarının arttığını gözlemlemişlerdir. Kaplamadaki ostenitin artışı sertliği, sementitin artışının ise çatlak direncini azalttığını belirtmişlerdir. Bu sebeple kaplama için en uygun karbon oranının %10-12 arasında olması gerektiğini düşünmektedirler. Yapılan aşınma testleri sonucunda kaplama tabakasının sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin altlık malzemeye göre daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir [70].

3.7. Fe-Ti-B Esaslı Sert Dolgu Alaşımları

Kaptanoğlu ve ark. Fe-Ti-B esaslı sert dolgu alaşımlarındaki titanyum ve bor oranının mikroyapısal ve tribolojik özellikler üzerine etkisini incelemek üzere farklı titanyum ve bor oranlarına sahip sert dolgu alaşımları geliştirerek TIG kaynağı yöntemiyle sert yüzey alaşımlama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Oluşan kaplama tabakasında TiB_2 , TiC , Fe_2B ve α -Fe fazlarının yer aldığını saptamışlardır. Titanyum ve bor açısından en düşük ve en yüksek oranlara sahip olan bileşimlerden elde edilen kaplamalarda Fe_2B fazına rastlanmamıştır. TiC ise yalnızca en yüksek titanyum ve bor oranına sahip olan bileşime ait kaplamada oluşmuş ve oluşum nedenini başlangıç tozlarındaki karbonun varlığına işaret ederek açıklamışlardır. Kaplamalar arasındaki ortak fazların TiB_2 ve α -Fe olduğunu, artan titanyum ve bor ile yapı içerisinde oluşan TiB_2 fazı altıgen ve dikdörtgen formdan plaka benzeri bir yapıya dönüştüğünü bildirmişlerdir. Artan titanyum ve bor oranına karşılık makro sertliğin arttığını, bu artışın yapı içerisindeki TiB_2 'nin morfolojisinin değişiminden ziyade hacimce artışından kaynaklandığını belirlemişlerdir. Farklı yüklerde yapılan aşınma testlerinde artan yüklerle birlikte aşınma miktarının arttığını, en yüksek titanyum ve bor oranına sahip olan kaplamanın en yüksek aşınma direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir [71].

3.8. Fe-Ti-B-C Esaslı Sert Dolgu Alaşımları

Zong ve ark. Fe-Ti-B-C esaslı sert dolgu alaşımlarındaki bor oranının mikroyapısal ve tribolojik özellikler üzerindeki etkisini incelemek üzerine farklı bor oranlarına sahip alaşımlar geliştirerek plazma transfleri ark kaynağı ile sert yüzey alaşımlama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Kaplama sonrası oluşan mikroyapıların tümünde; martenzit,

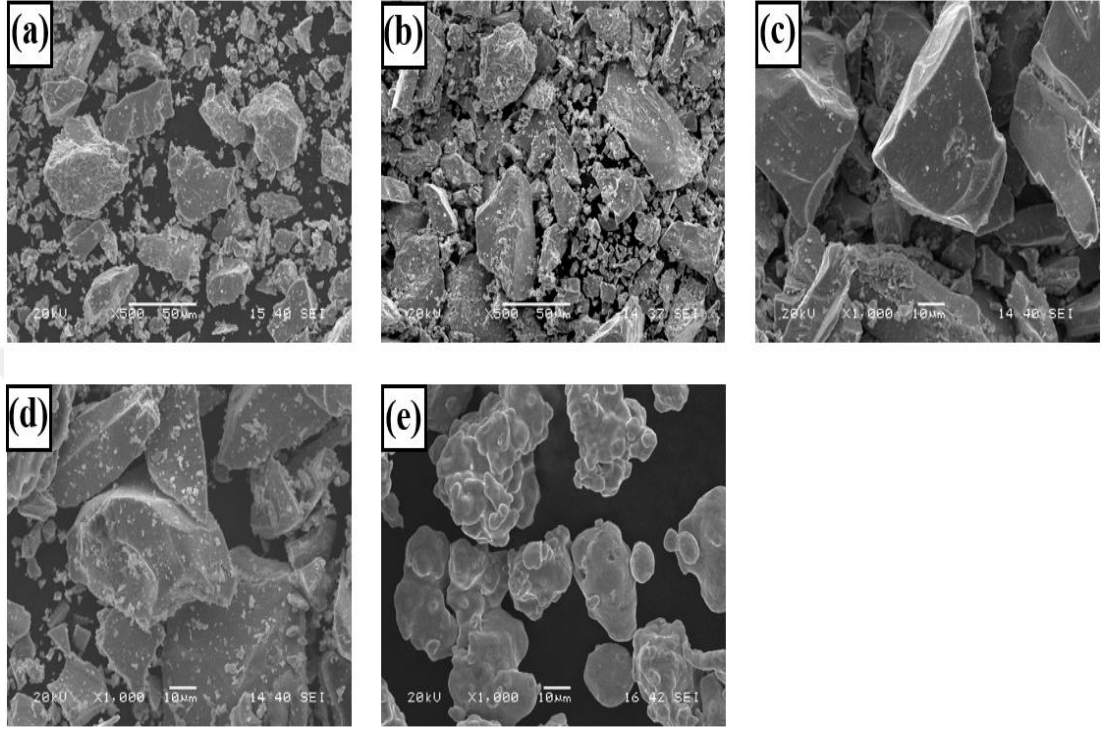
ostenit, $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$, Fe_2B ve $\text{Ti}(\text{C},\text{B})$ fazlarının oluştuğunu ancak artan bor oranıyla birlikte Fe_2B ve TiC oranının arttığını, ostenit ve martenzit fazlarının azaldığını gözlemlemişlerdir. Yapılan aşınma testleri sonucunda artan bor oranıyla birlikte bir noktaya kadar aşınma direncinin arttığını, yapı içerisinde oluşan sert ve kırılğan Fe_2B fazının artışıyla birlikte aşınma direncinin düşüş gösterdiğini gözlemlemişlerdir [72].

3.9. Fe-Ti-Mo-B-C Esaslı Sert Dolgu Alaşımları

Prysyazhnyuk ve ark. endüstride yaygın olarak kullanılan Fe-Cr-C esaslı sert dolgu alaşımlarının döngüsel yükler ve abrazif aşınma koşulları altında yetersiz kaldığını düşünerek Fe-Ti-B-C ve Fe-Ti-Mo-B-C esaslı özlü tel elektrotlar geliştirerek piyasadaki alaşımlar ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Fe-Ti-B-C esaslı alaşımın mikroyapısının TiB_2 , TiC ve demir bakımından zengin, çubuk benzeri ötektik matristen oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Fe-Ti-Mo-B-C esaslı alaşımın mikroyapısında ise molibden ilavesiyle birlikte MB_2 fazının tane boyutunun küçüldüğünü MC fazının ise tane boyutunda değişiklik olmadığını gözlemlemişlerdir. Piyasadan alınan elektrotlar ve alaşım bileşimi kendileri tarafından geliştirilen elektrotlarla yapılan kaplamalar sonrasında yapılan sertlik ve aşınma testlerinin sonucunda daha ince taneli mikroyapıya sahip olmasına rağmen Fe-Ti-Mo-B-C esaslı sert dolgu alaşımdan daha yüksek aşınma direnci elde etmişlerdir. Elde edilen aşınma direncinin piyasada hazır halde bulunan elektrotlardan 2,2-2,4 kat daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [73].

Toz	Mn	Mo	Ti	B	Si	C	Al	Fe	Firma
Ferro-molibden	-	60,00	-	-	1,50	-	-	Kal.	Gensa Kimya
Ferro- titanyum	-	-	70,95	-	-	0,126	3.69	Kal.	Aveks
Ferro-manganez	75,00	-	-	-	1,50	8,00	-	Kal.	Aveks
Ferro- bor	-	-	-	18,58	0,39	0,312	0,065	Kal.	Aveks
Demir tozu	-	-	-	-	-	-	-	99,99	Gensa Kimya

Firmalardan temin edilen ferro alaşım kayaçları halkalı değirmen yardımıyla öğütölmüş ve 100 µm elek altı olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan tozlara ait SEM görüntüleri Şekil 4.1.'de görölmektedir.



Şekil 4.1. Başlangıç tozların SEM görüntüleri a) ferro-molibden, b) ferro-titanyum, c) ferro-manganez, d) ferro-bor ve e) demir tozu

Örtü bileşimi içerisinde ferro tozlar haricinde bağlayıcı ve flaks yer almaktadır. Kaynak işlemi esnasında arkın oluşumu ve kararlılığı, ergiyik banyonun korunması gibi sebeplerle flaks miktarı önem taşımaktadır. Öte yandan örtü malzemelerini birarada tutan ve arkın kararlılığı üzerinde etkiye sahip olan bağlayıcı miktarı da önemlidir. Örtü bileşenlerinden flaks ve bağlayıcıyı görevlerini yerine getirebilecekleri minimum miktarlara çekilerek, maksimum miktarda metal (ferro alaşım bileşiminde yer alan) tozu kullanılmaya çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda literatür taraması [49] gerçekleştirilmiş ve çeşitli ön çalışmalar yapılmıştır. alışmalar sonucunda Tablo 4.2.'deki optimum flaks ve bağlayıcı bileşimleri belirlenmiştir. Kaynak işlemleri esnasında elektrot içerisindeki çekirdek metal, dolgu metali görevini görmektedir ve genellikle düşük karbonlu çelikten imal edilmektedir. Sert dolgu işlemlerinde ise çekirdek metal, alaşımlı veya alaşımsız çubuk formunda olabilmektedir.

Tablo 4.2. Örtü bileşimi içerisindeki flaks ve bağlayıcı oranları
Bileşen İlave Miktarı (%Ağ.)

Rutil (TiO_2)	5
Kuars (SiO_2)	
Alumina (Al_2O_3)	
Fluşıpat (CaF_2)	
Potasyum Aljinat ($\text{C}_6\text{H}_7\text{KO}_6$)	
Kalsiyum Karbonat (CaCO_3)	
Potasyum Titanat (K_2TiO_3)	
Sodyum-feldispat ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)	
Potasyum-silikat ($\text{K}_2\text{Si}_2\text{O}_5$)	17,5

Bu çalışmada bileşimi Tablo 4.3.'te verilen 2,5 mm çapında ve 350 mm uzunluğundaki soğuk çekilmiş filmaşın tel, elektrot çekirdek malzemesi olarak kullanılmıştır.

Tablo 4.3. Elektrot çekirdek metalinin kimyasal bileşimi (% ağ.)

Çekirdek metal	C	Cr	Mn	Si	P	S	Fe
H08A	<0,1	0,064	0,37	0,1	<0,02	<0,02	Kalan

Sert yüzey alaşımlama işlemi alaşımlı veya alaşımsız malzemelerin yüzeyine uygulanabilmekle birlikte bu çalışmada kaynak kabiliyeti yüksek olan, düşük maliyetli AISI 1010 çelik altlık malzeme kullanılmıştır. Altlık malzeme olarak kullanılan AISI 1010 çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Altlık malzemenin spektral analiz sonucu (% ağ.)

Altlık	C	Mn	Si	P	S	Fe
AISI 1010	0,09	0,4	0,024	0,026	0,022	Kalan

Altlık malzeme 70x30x6 mm ölçülerinde kesilmiş ve kaplama öncesi yüzeyler yağ ve kirden arındırılmak için ultrasonik banyo içerisinde aseton ve alkol ile beş dakika boyunca yıkanmıştır.

4.2.2. Örtülü elektrot üretimi için kalıp imalatı

Endüstride örtülü elektrot üretiminde elektrot presleri kullanılmaktadır. Seri imalata uygun olarak tasarlanan makinelerin haznelere viskoz haldeki örtü pastası şarj

edilmekte ve her şarjda onlarca elektrot üretilmektedir. En küçüğünün dahi yaklaşık 5 kg'lık örtü pastasıyla çalıştığı göz önüne alındığında, tez çalışması kapsamında farklı bileşimlere sahip elektrotlar üretmek için yüksek miktarlarda hammadde ihtiyacı doğmaktadır. Bu durum büyük bir ekonomik külfet oluşturacağı için bir elektrodun dahi üretiminin yapılabilmesi için yeni bir kalıp tasarımı yapılmıştır. Solidworks bilgisayar destekli tasarım programı ile tasarımı yapılan kalıp modeli için AA7075 alüminyum alaşımının blok halde tedariği sağlanmıştır. Ardından CNC freze tezgahı ile tasarıma uygun olarak alt ve üst kalıp olacak şekilde iki parçalı kalıbın üretimi gerçekleştirilmiştir. İmal edilen kalıbın görseli Şekil 4.2.'de görülmektedir. İmal edilen kalıpta çalışma için planlanan çapta (5,5 mm) 4 adet örtülü elektrot aynı anda üretilbilecektir.



Şekil 4.2. Çalışma için üretilen kalıp görseli

4.2.3. Bileşim belirleme ve elektrot üretimi

Sert dolgu elektrotlarında alaşım tozları elektrodun örtü tabakası içerisinde yer almaktadır. Bu sebeple örtülü elektrot üretiminde elektrodun çapı bileşimin tasarımında önemli bir sınırlayıcı etmendir. Farklı elektrot çapları ile yapılan ön çalışmalar neticesinde optimum sonuçlar 5,5 mm çapında örtülü elektrotlar ile alınmıştır. Bu sebeple çalışmada 5,5 mm çapındaki sert dolgu elektrotları tercih edilmiştir. Bileşimlerin belirlenmesi aşamasında literatür taraması yapılmış ve ilgili

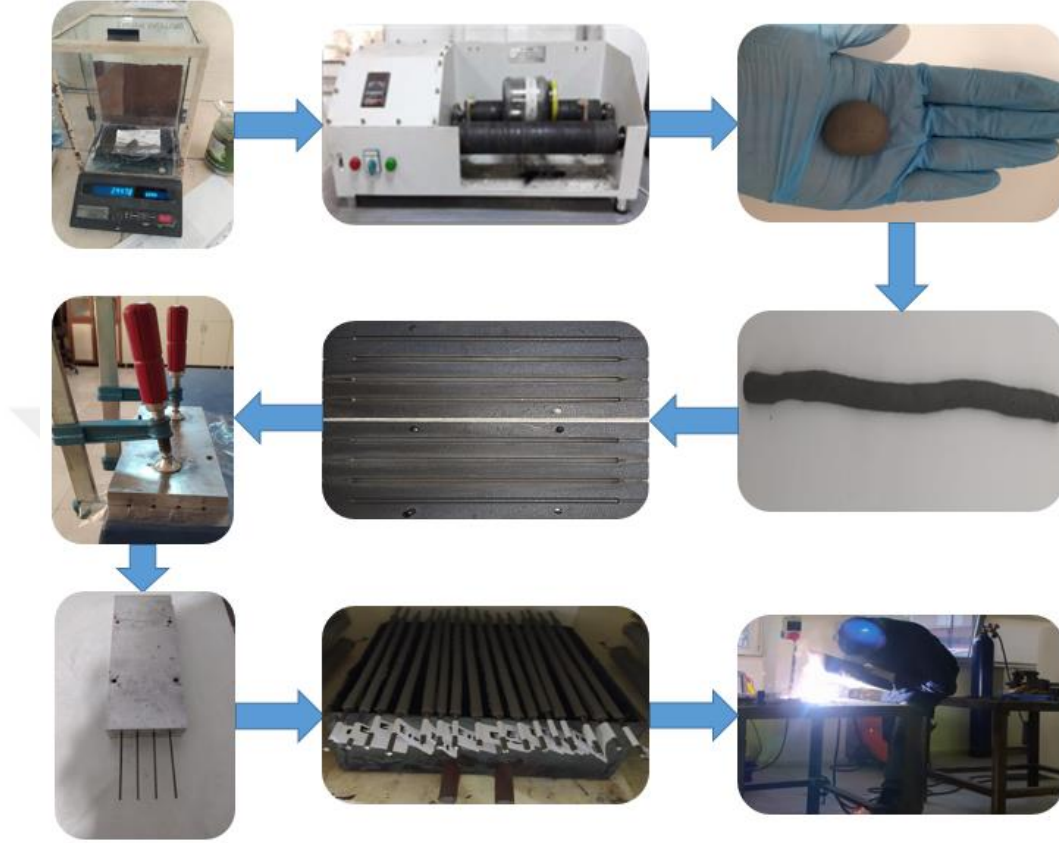
faz diyagramları göz önüne alınmıştır. Belirlenen elektrot çapı doğrultusunda Tablo 4.5.'te bileşimleri verilen 11 farklı sert dolgu elektrodu, özel olarak geliştirilen program yardımıyla tasarlanmıştır. Bileşim içerisinde yer alan elementlerin sistematik olarak artış gösterdiği elektrotlar, 4 farklı gruba ayrılmıştır. $\text{Fe}_{14}\text{MoTiBMn}_2\text{C}$ bileşimi tüm elementlerin sistematik artışında ortak bileşimdir. Bu sebeple çalışmanın tamamında her grup içerisinde yer almaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında üretilen elektrotlardaki temel karbon kaynağı yüksek karbonlu (HC) ferro-manganezdır.

Tablo 4.5. Tasarlanan sert dolgu elektrodu bileşimleri (% at.)

Alaşım sistemi	Mo	Ti	B	Mn	C	Fe	Gösterim
	5	-	5	10	5	Kal.	$\text{Fe}_{15}\text{MoBMn}_2\text{C}$
Fe-Mo-B-Mn-C	5	5	5	10	5	Kal.	$\text{Fe}_{14}\text{MoTiBMn}_2\text{C}$
sistemine Ti ilavesi	5	10	5	10	5	Kal.	$\text{Fe}_{13}\text{MoTi}_2\text{BMn}_2\text{C}$
	5	15	5	10	5	Kal.	$\text{Fe}_{12}\text{MoTi}_3\text{BMn}_2\text{C}$
	-	5	5	10	5	Kal.	$\text{Fe}_{15}\text{TiBMn}_2\text{C}$
Fe-Ti-B-Mn-C	5	5	5	10	5	Kal.	$\text{Fe}_{14}\text{MoTiBMn}_2\text{C}$
sistemine Mo ilavesi	10	5	5	10	5	Kal.	$\text{Fe}_{13}\text{Mo}_2\text{TiBMn}_2\text{C}$
	12,5	5	5	10	5	Kal.	$\text{Fe}_{12,5}\text{Mo}_{2,5}\text{TiBMn}_2\text{C}$
	5	5	-	10	5	Kal.	$\text{Fe}_{15}\text{MoTiMn}_2\text{C}$
Fe-Mo-Ti-Mn-C	5	5	5	10	5	Kal.	$\text{Fe}_{14}\text{MoTiBMn}_2\text{C}$
sistemine B ilavesi	5	5	10	10	5	Kal.	$\text{Fe}_{13}\text{MoTiB}_2\text{Mn}_2\text{C}$
	5	5	15	10	5	Kal.	$\text{Fe}_{12}\text{MoTiB}_3\text{Mn}_2\text{C}$
Fe-Mo-Ti-B sistemine	5	5	5	-	-	Kal.	$\text{Fe}_{17}\text{MoTiB}$
Mn+C ilavesi	5	5	5	10	5	Kal.	$\text{Fe}_{14}\text{MoTiBMn}_2\text{C}$

Sert dolgu elektrotlarının üretimi için ilk adım tozların uygun miktarlarda hazırlanmasıdır. 0,0001 gr tartım hassasiyetindeki Shimadzu hassas terazi kullanılarak belirlenen bileşimlerde ferro alaşım tozları ve flaksların tartımları yapılmıştır. Tartımları gerçekleştirilen tozlar kuru olarak karıştırılmış ve ardından bağlayıcı eklenerek yaş karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Yaş karıştırma işlemi sonrasında viskoz bir çamur haline gelen karışım ön şekillendirme işlemine tabi tutularak üretimi gerçekleştirilen kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Ardından kalıp kapatılarak sıkıştırılmış ve tam olarak kalıbın şeklini alan viskoz çamur içerisinden elektrot çekirdek teli geçirilmiştir. Şekillendirme işlemi tamamlanan elektrotlar kalıp içerisinden çıkarılarak 24 saat açık atmosferde kurutulmuş, sonrasında 2,5 saat süre ile 350 °C'de argon

atmosferinde fırınlanmıştır. Sert dolgu elektrotlarının üretim işlemine ait akış şeması Şekil 4.3.'te görülmektedir.



Şekil 4.3. Sert dolgu elektrotlarının üretim adımları

Üretimi gerçekleştirilen örtülü sert yüzey alaşımlama elektrotları Magmaweld RD 650 E elektrik ark kaynak makinesi kullanılarak, ön hazırlıkları yapılmış olan altlık malzemelerin yüzeyine kaplanmıştır. Kaynak işlemi sırasında altlık ve kaplama tabakası arasında oluşan seyrelmeyi en aza indirmek üzere ön çalışmalar yapılmış ve işlem için optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir. Kaplama işlemi, belirlenen parametrelere uygun olarak 125-130 A kaynak akımı, 25 V kaynak gerilimi ve doğru akım ters kutuplama ile gerçekleştirilmiştir [74]. Yaklaşık 0,3 m/dk hızda gerçekleştirilen kaynak işlemi sırasında oluşan ısı girdisi Eşitlik 4.1'de verilen formüle göre hesaplanmıştır.

$$IG = \frac{60.E.I.f}{1000.V} \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1’de, E kaynak gerilimini (V), I kaynak akımını (A), V kaynak hızını (m/dk) ve f ısı iletimini temsil etmektedir. Ark kaynağı için f değeri 0,8 olarak alınmış ve tüm değerler yerine yazıldığında altlık malzemeye 500 kJ/m’ lik bir ısı girdisi olduğu açığa çıkmıştır.

4.3. Karakterizasyon işlemleri

Sert yüzey alaşımlanmış numunelerin yüzeyleri çeşitli test ve analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Test ve analiz işlemleri için öncelikle numuneler Metkon MICRO CUT 201 su soğutmalı hassas kesme cihazıyla uygun boyutlarda kesilmiştir. Mikroyapı incelemeleri ve mikro sertlik testleri için kullanılacak olan numuneler, kesme işleminin ardından kesitinden incelenmek üzere bakalite alınmıştır. Aşınma ve makro sertlik ölçümü için uygun boyutlarda kesilen numuneler kaplama bölgesi zarara uğramayacak şekilde satıh taşlama işlemine tabi tutulmuştur. Tüm numuneler test ve analizler için uygun hale getirilmek üzere 120, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200 grid SiC zımpara ile zımparalanmış ve 1-6 µm elmas pasta ile parlatılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde kullanılacak olan numuneler parlatma işleminin ardından %3 Nital çözeltisi dağlanmıştır.

4.3.1. Mikroyapı incelemeleri

Kesitinden incelenmek üzere bakalite alınarak metalografik numune hazırlama işlemlerine tabi tutulan mikroyapı numuneleri JEOL JSM-6060 LV taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Ayrıca SEM cihazına entegre halde bulunan IXRF Systems Inc. EDS (Electron Dispersive Spectroscopy) ile noktasal ve bölgesel olarak elementel analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir.

4.3.2. Faz analizleri

Faz analizleri için RIGAKU D/MAX/2200/PC marka x-ışınları difraktometresi ($\text{CuK}\alpha$ $\lambda=1,5408 \text{ \AA}$) kullanılmıştır. Analiz işlemleri sonrasında elde edilen ham veriler bilgisayar yazılımları (MDI Jade 6 ve X’pert Highscore) kullanılarak çözümlenmiş ve

yapı içerisinde var olan fazlar belirlenmiştir.

4.3.3. Sertlik testleri

Alaşımlama işlemi sonrasında elde edilen yüzeylerin sertlikleri iki farklı analiz yöntemi kullanılarak tayin edilmiştir. İlk olarak; kesitinden inceleme yapılabilecek şekilde bakalite alınan ve metalografik hazırlıkları tamamlanan numunelerin, altlık bölgesinden (AISI 1010) başlanarak kaplamanın tepe noktasına kadar Vickers sertlik ölçümleri yapılmıştır. Bu işlem FutureTech FM700 marka mikro sertlik cihazı ile 100 gr yük altında 0,5 mm aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Sert dolgu çalışmalarında mikro ölçekteki fazların sertliklerinin yanında kaplamanın yüzeyinin genel sertliğini belirlemek üzere makro sertlik ölçümü tavsiye edilmektedir [49]. Çalışma kapsamında Bulut Makine BMS-DIGIROCK-RB sertlik cihazı kullanılarak kaplama yüzeyinden 5 mm aralıklarla Rockwell C sertlik ölçümü yapılmıştır. Ardından elde edilen verilerin ortalamaları alınarak makro sertlik değerleri belirlenmiştir.

4.3.4. Aşınma Testleri

Sert yüzey alaşımlama işlemi ardından, kesilerek aşınma testleri için ön hazırlıkları yapılan numunelere ASTM G133 standardına uygun olarak TRIBOtechnic-TRIBOtester aşınma cihazı ile salınım hareketli (karşılıklı-gitgel hareketli) aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri 25°C (±2) sıcaklık ve %30 (±3) neme sahip ortam koşullarında, 5 mm git gel mesafesinde 200 m yol boyunca 30 mm/sn hızda gerçekleştirilmiştir. İşlem sırasında 10 mm çapında Al₂O₃ (1850 HV_{0,1}) bilye kullanılmış ve 3N, 6N, 9N olacak şekilde 3 farklı yük altında testler gerçekleştirilmiştir. Testlerin tamamlanmasının ardından TaylorHobson marka 2D yüzey profilometresi ile iz ölçümleri gerçekleştirilerek sonuçlar doğrulanmıştır. Aşınma iz hacmi hesaplamaları Eşitlik 4.2' de verilen formüle göre hesaplanmıştır.

$$V = A \cdot l \quad (4.2)$$

Verilen formülde V iz hacmini (mm³), A iz kesit alanını (mm²) ve l (mm) iz

uzunluğunu temsil etmektedir. Sürtünme katsayısı hesaplamalarında ise Eşitlik 4.3' te verilen formül kullanılmıştır.

$$SK = \frac{FS}{FN} \quad (4.3)$$

Verilen formülde SK sürtünme katsayısını, FS yanal yükü (N), FN normal yükü temsil etmektedir. Aşınma oranı (AO) hesaplamaları ise Eşitlik 4.4 uyarınca gerçekleştirilmiştir.

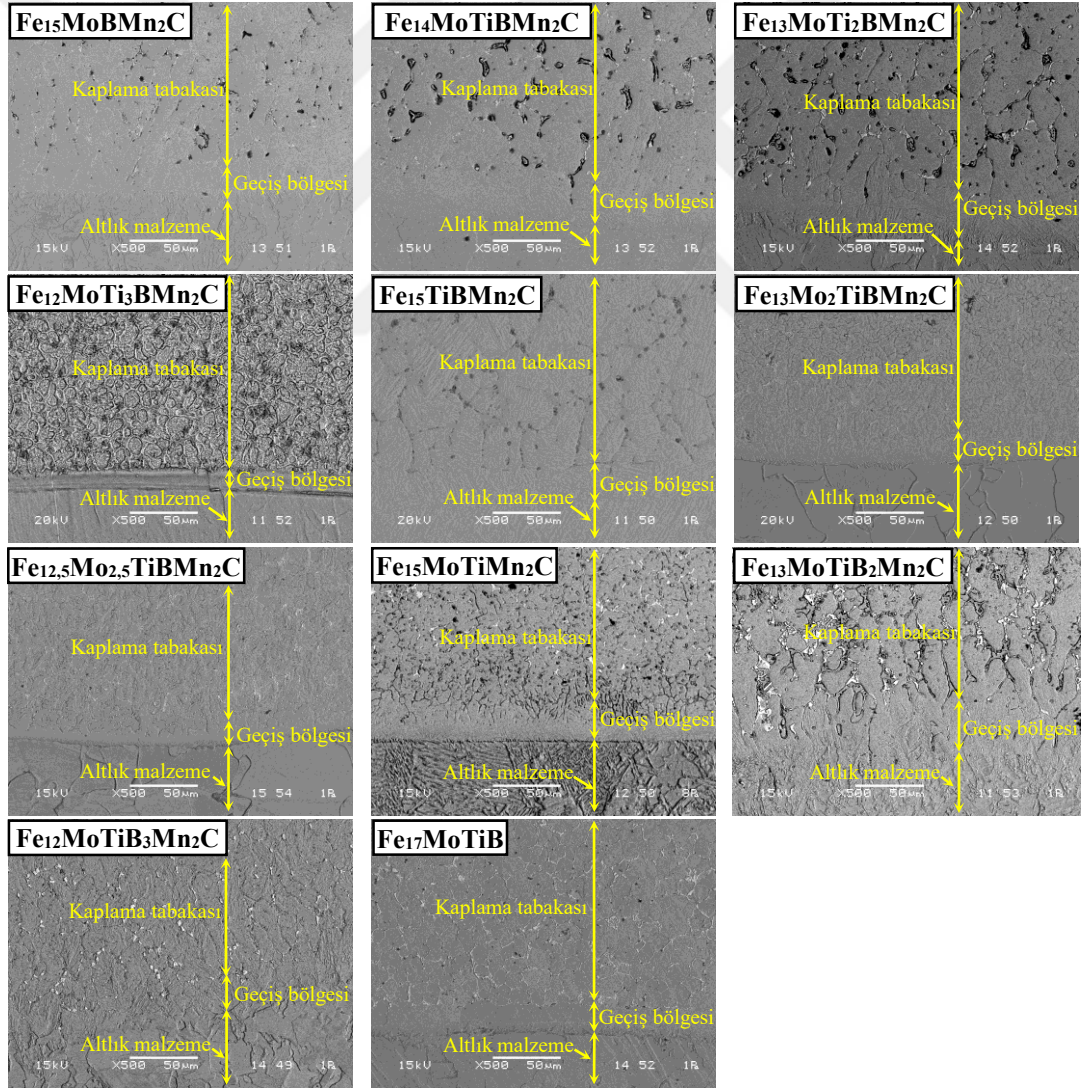
$$AO = \frac{V}{S} \quad (4.4)$$

Verilen eşitlikte V aşınma hacmini, S kayma mesafesini temsil etmektedir [75,76]

BÖLÜM 5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Arayüzey İncelemeleri

Şekil 5.1.'de AISI 1010 çelik yüzeylerinde oluşturulan kaplama tabakalarının kesitinden alınan SEM mikroyapı görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5.1. Alaşımlama işlemi sonrası numunelerin kesitinden alınan SEM görüntüleri

SEM görüntülerinde altlık, geçiş bölgesi ve kaplama tabakası olmak üzere üç farklı mikroyapı görülmektedir. Kaynak işlemi ergime, katılaşma esasına dayanmaktadır. Bu yönüyle küçük çaplı bir döküm olarak değerlendirilebilmektedir. Kaynakla sert dolgu işlemlerinde dolgu malzemesi dışında altlık metalin yüzeyinde de kısmi bir ergime söz konusudur. Bu sebeple kaplama tabakası ve altlık malzeme arasında güçlü metalurjik bağların oluşması beklenmektedir. SEM mikroyapılarında görülen altlık malzeme ve kaplama tabakası arasındaki parlak bant görünümü, kaplamanın altlık malzeme ile güçlü metalurjik bağlar kurduğunun işareti olduğu bildirilmektedir [77]. Kaplama bileşimine göre daha fazla demir içeren ve daha seyreltik yapıya sahip olan bölge, geçiş bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Tıpkı döküm işleminde olduğu gibi kaynak işleminde de büyüme hızı (R), sıcaklık gradyanı (G), aşırı soğuma (ΔT) ve alaşım kompozisyonu mikroyapı gelişiminde önemli parametrelerdir. Bu parametrelere göre katı-sıvı ara yüzeyindeki taneler düzlemsel, hücrel veya dendritik olarak büyüme gösterebilmektedir. SEM görsellerinden arayüzeylerde daha çok dendritik katılaşmanın hakim olduğu görülmektedir. Kaynakta dökümden farklı olarak dinamik bir katılaşma söz konusudur. Bu sebeple farklı bölgelerde farklı sıcaklık gradyanları ve büyüme hızları oluşabilmektedir. Bunun sonucunda SEM mikroyapı görsellerinde de görüldüğü gibi bölgesel olarak katılaşma ve mikroyapı farklılıkları ortaya çıkabilmektedir [77-79].

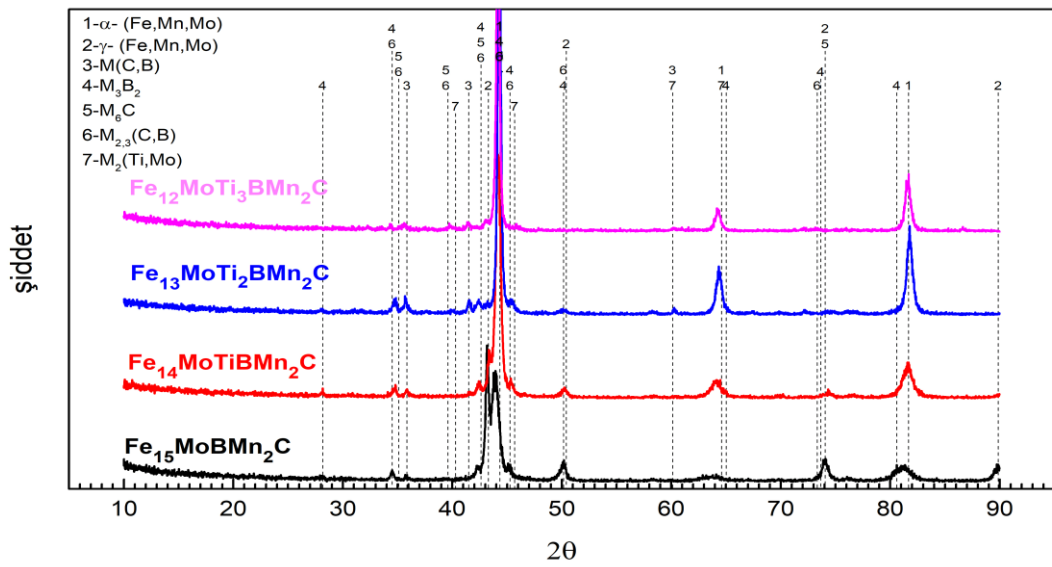
5.2. Mikroyapı ve Faz Analizleri

Çalışmada on bir farklı bileşimde sert dolgu elektrodu üretilmiştir. Bileşim içerisinde yer alan elementlerin sistematik olarak artış gösterdiği elektrotlar 4 farklı gruba ayrılmıştır. $Fe_{14}MoTiBMn_2C$ bileşimi, gruplar içerisinde sistematik olarak artış gösteren elementler açısından ortak bileşimdir. Bu sebeple bu bileşim incelemelerde tüm gruplar içerisinde ortak bileşim olarak yer almaktadır.

5.2.1. $Fe_{(15-x)}MoTi_xBMn_2C$ (x=0,1,2,3) esaslı alaşımlar

$Fe_{(15-x)}MoTi_xBMn_2C$ (x=0,1,2,3) esaslı sert dolgu kaplamaları içerisinde yer alan bileşimlerde molibden, bor, mangan ve karbon oranları sabit kalıp titanyum oranları

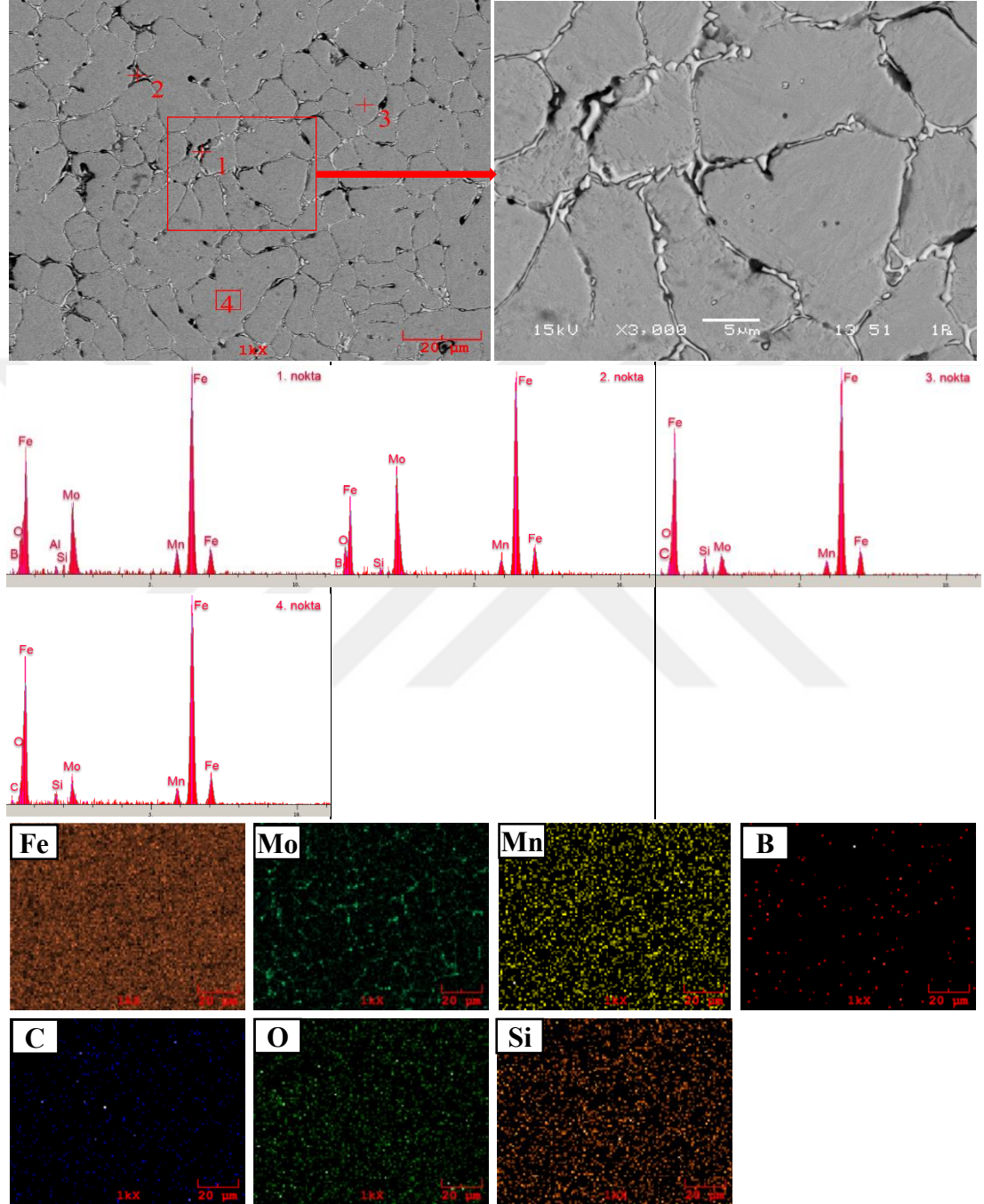
artış göstermektedir. Artan titanyum oranının sert yüzey kaplama işlemi sonrasında oluşacak olan mikroyapı ve fazlara olan etkisi incelenmiştir. Şekil 5.2.'de $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTi}_x\text{BMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalardan alınan XRD analizi verilmiştir. XRD analizinde majör olarak $\text{M}(\text{C},\text{B})$ ($M=\text{Ti}, \text{Mo}$), M_3B_2 ($M=\text{Mo}, \text{Fe}$), α - $(\text{Fe}, \text{Mo}, \text{Mn})$, γ - $(\text{Fe}, \text{Mo}, \text{Mn})$ fazlarının ve minör olarak ise M_6C ($M=\text{Mo}, \text{Fe}$), $\text{M}_2(\text{Ti}, \text{Mo})$ ($M=\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Si}$) ve $\text{M}_{2,3}(\text{C}, \text{B})$ ($M=\text{Mo}, \text{Fe}, \text{Mn}$) fazlarının yer aldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.2. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTi}_x\text{BMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamaların x- ışınları difraksiyon paternleri

Şekil 5.3.'te $\text{Fe}_{15}\text{MoBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamadan alınan SEM, EDS ve MAP görüntüleri yer almaktadır. Mikroyapıda matris faz ve tane sınırlarında yer alan farklı kontrastta fazların yer aldığı görülmektedir. SEM resminde görülen mikroyapının genel olarak ötektik altı bir katılaşma sergilediği söylenebilir. Bu sebeple kaplama sonrası ergiyik metalin katılaşması sırasında ilk olarak matris fazının oluşması beklenir. Matris fazdan alınan 3 ve 4 numaralı EDS analizi demir, molibden ve bir miktar karbon sinyali vermektedir. Ostenit stabilizatörleri olarak bilinen Mn ve C elementleri γ -faz bölgesini genişleterek nihai yapıdaki γ -Fe içeriğini arttırabilmektedir [80,81]. Nitekim Şekil 5.2.'de verilen XRD analizine göre ilgili bileşimde güçlü γ -Fe piklerinin yer aldığı görülmektedir. 3 ve 4 numaralı EDS analizinden alınan molibden ve manganez sinyallerinin ise matris fazı içerisinde çözünerek matrisi güçlendiren

molibden [62] ve manganez [7] olduğu düşünülmektedir. Ortaya çıkan matris fazının γ -(Fe,Mo,Mn) ve α -(Fe,Mo,Mn) dan oluştuğu düşünülmektedir.



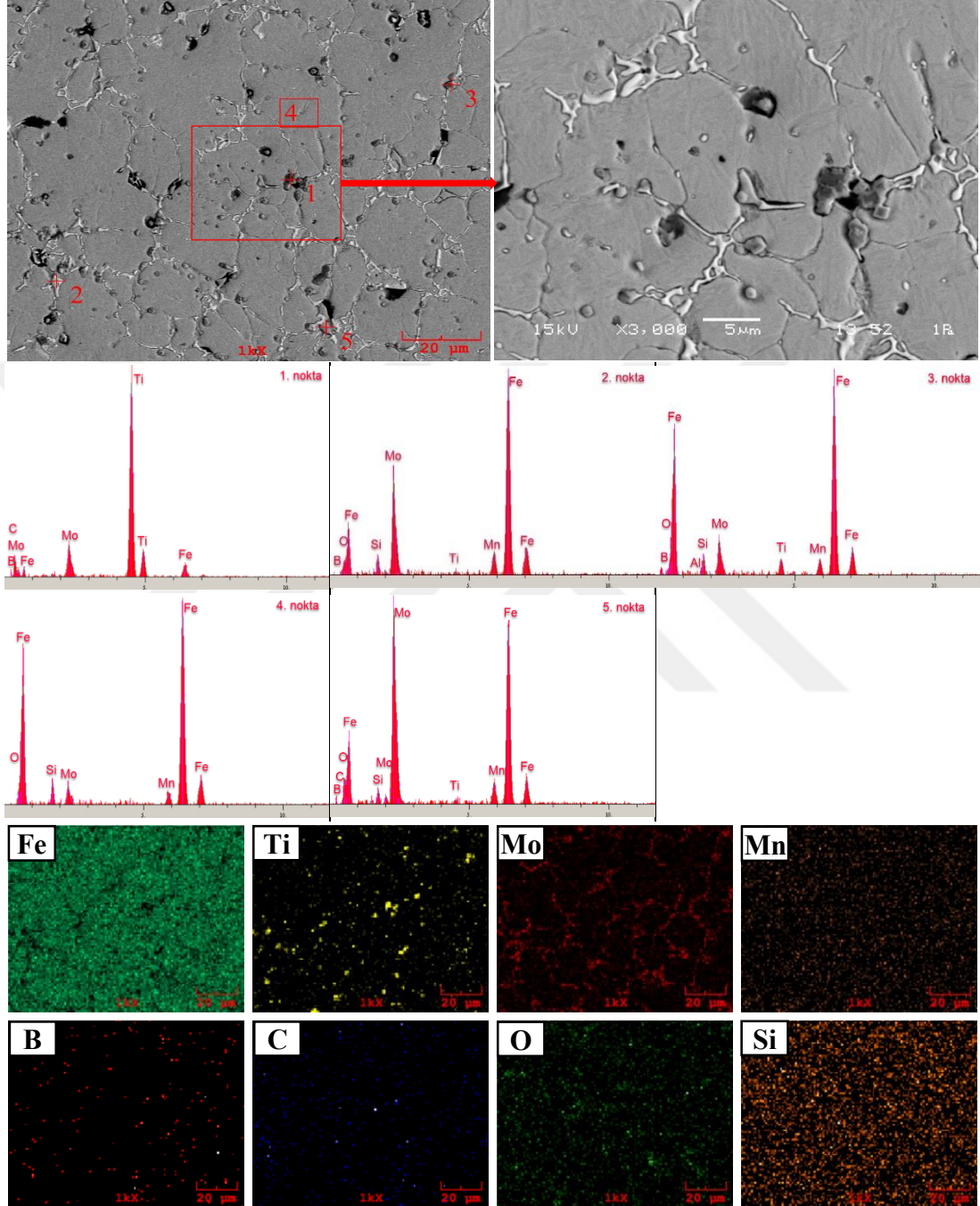
Şekil 5.3. $\text{Fe}_{15}\text{MoBMn}_2\text{C}$ esashı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi

Katılaşmanın devamında SEM görüntüsünde tespit edilen tane sınırı fazlarının oluşması beklenir. Şekilde verilen tane sınırlarından alınan 1 ve 2 numaralı EDS analizleri demir ve molibden sinyalleri vermektedir. Bununla birlikte EDS analizi ile

bor ve karbon gibi düşük atom numaralı elementler kantitatif olarak analiz edilememesine rağmen kalitatif olarak analiz edilebilmektedir. İlgili bölgelere uygulanan EDS analizinde bor elementine ait piklerin de yer aldığı görülmektedir. Bu bölgelerin XRD analizinde tespit edilen M_3B_2 (Mo_2FeB_2) fazı olması muhtemeldir.

Gerçekleştirilen çalışma, elementlerin sistematik artışına göre 4 ayrı gruba ayrılmıştır. Şekil 5.4.'te $Fe_{14}MoTiBMn_2C$ esaslı sert dolgu kaplamaya ait SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi verilmiştir. Bu bileşim elementlerin sistematik artışına göre yapılan gruplandırmada ortak bileşimdir. SEM görüntülerinden; matris fazı, düzensiz olarak dağılım gösteren koyu renkli küçük bloklar, tane sınırlarında dağılım gösteren beyaz renkli yapılar ve matrise göre daha koyu renkte olan düzensiz yapılar görülmektedir. Titanyum ve molibden güçlü karbür/borür oluşturan elementlerdir. Ancak titanyum borür ve karbürlerinin serbest enerjilerinin, molibden borür ve karbürlerinin serbest enerjisine göre daha düşük olduğu bildirilmektedir [55]. Bu sebeple katılaşma esnasında ilk oluşacak olan yapıların titanyum borür ve/veya karbürlerinden meydana gelmesi beklenmektedir. Bununla birlikte Wang ve ark. TiC içerisinde bir miktar molibdenin çözünebileceğini [53], Zong ve ark. ise TiC içerisinde bir miktar borun çözünebilir olduğunu bildirmişlerdir [72]. Mikroyapıdaki düzensiz dağılım gösteren koyu renkli blok yapılardan alınan 1 numaralı EDS analizi yüksek oranda titanyumla birlikte molibden ve bor sinyalleri vermektedir. Oluşan yapının Şekil 5.2'de verilen XRD analizinde de yer alan $M(C,B)$ yani $(Ti,Mo)(C,B)$ olduğu düşünülmektedir. Sistem içerisinde hem alfa elementler (Mo [82], Ti [83]), hem de gamma elementler (Mn,C [81]) elementler yer almaktadır. XRD analizi güçlü alfa demir sinyalleri ile birlikte bir miktar ostenit sinyali de vermektedir. Normal şartlarda manganezin hem α -Fe hem de γ -Fe içerisinde katı çözelti oluşturduğu [80] molibdenin ise α -Fe içerisindeki çözünürlüğünün oldukça düşük olduğu bilinmekle beraber 1450 °C'de ~%24 molibden çözünürlüğü rapor edilmiştir [84,85]. Kaynak gibi dinamik katılaşmaya sahip olan proseslerde yapısal ve bölgesel hızlı katılaşmalar gerçekleşebilmektedir [86]. Bu sebeple elementlerin çözünürlükleri artış gösterebilmektedir. Matris fazdan alınan 4 numaralı EDS analizi demir, manganez, molibden sinyalleri vermektedir. Ortaya çıkan matris fazının α -(Fe,Mo,Mn) ve γ -(Fe,Mo,Mn)'dan oluştuğu düşünülmektedir.

Katılaşmanın tane sınırlarında düzensiz olarak dağılım gösteren beyaz renkli fazla devam etmesi beklenmektedir.



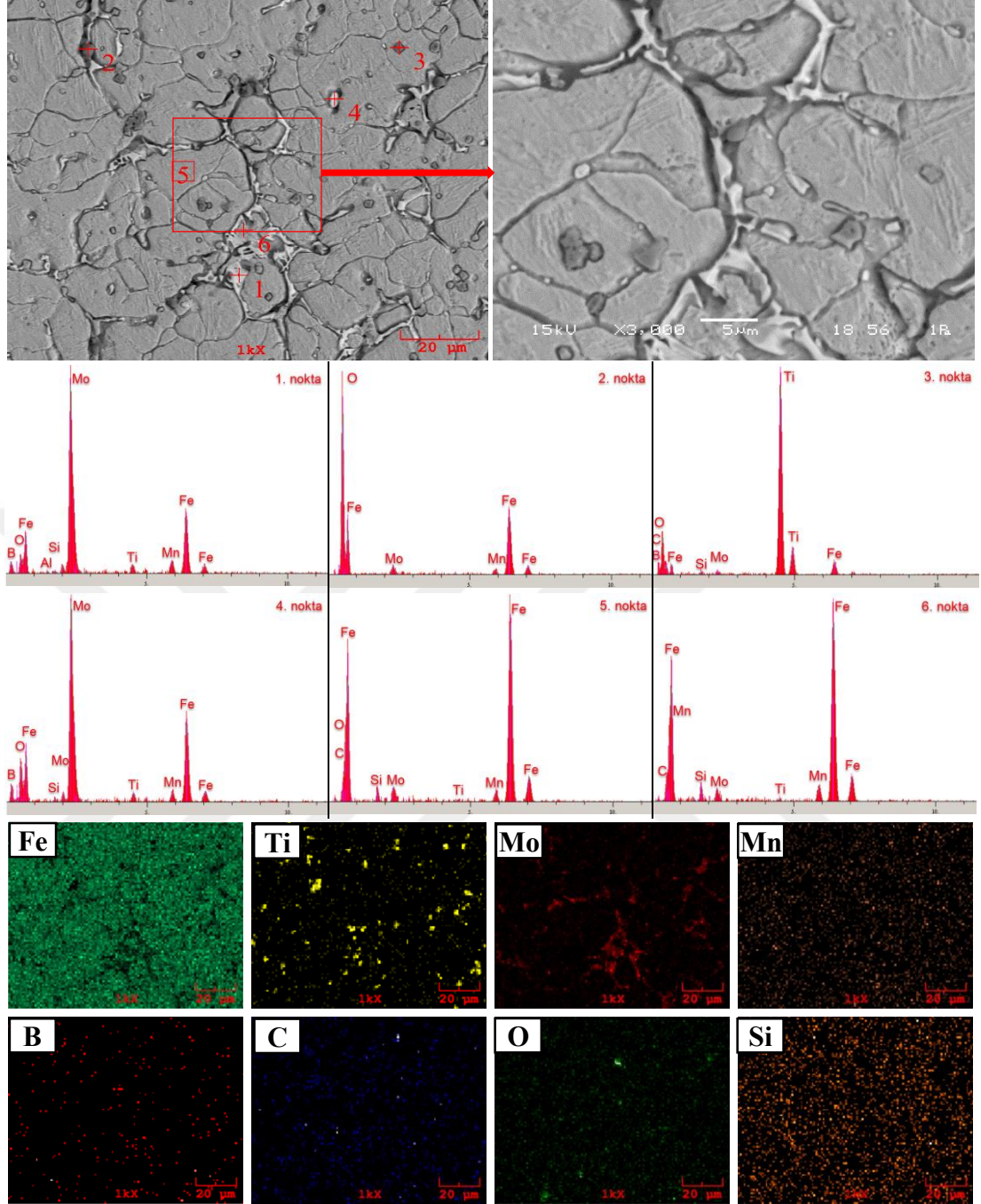
Şekil 5.4. $\text{Fe}_{14}\text{MoTiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi

İlgili bölgeden alınan 2 numaralı EDS analizi demir, molibden, manganez ve bor sinyalleri vermektedir. Aynı zamanda MAP analizlerinden molibdenin daha çok tane sınırlarında dağılım gösterdiği görülmektedir. Fe-Mo-B sisteminde geniş bir bileşim

aralığında varlığından söz edilebilen ve en düşük serbest enerjiye sahip olan fazın M_3B_2 (Mo_2FeB_2) olduğu bildirilmiştir [87]. Tane sınırlarında oluşan fazın XRD analizinde de yer alan M_3B_2 (Mo_2FeB_2) olduğu düşünülmektedir. EDS sinyallerinde yer alan manganezin M_3B_2 fazı içerisinde çözünen manganez [80] olduğu düşünülmektedir. SEM görüntüsünde, matris ve beyaz fazdan farklı bir kontrastta görülen ve 5 nolu EDS analizinin alındığı faz; demir, molibden, manganez, bor ve karbon sinyali vermektedir. Oluşan fazın XRD analizinde de yer alan M_2B ($(Fe,Mo,Mn)_2B$) fazı olduğu düşünülmektedir.

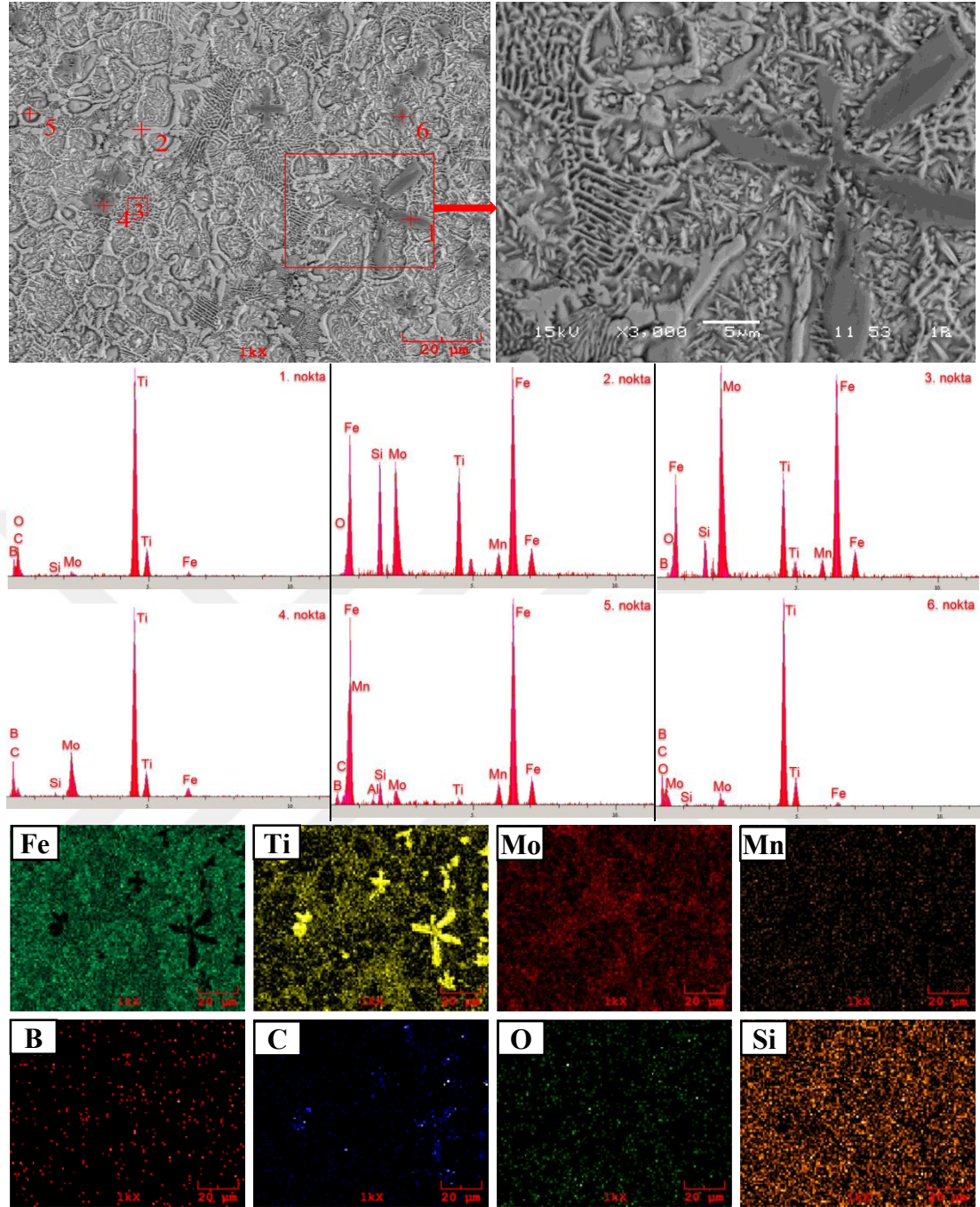
Şekil 5.5'te $Fe_{13}MoTi_2BMn_2C$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi verilmiştir. Mikroyapının koyu renkli noktasal fazlardan, matris fazından ve tane sınırı fazlarından oluştuğu görülmektedir. Oluşan mikroyapı, bir önceki $Fe_{14}MoTiBMn_2C$ esaslı sert dolgu kaplamanın mikroyapısına benzer olmakla birlikte $Fe_{13}MoTi_2BMn_2C$ esaslı sert dolgu kaplamada artan titanyum ile matris tane boyutunun azaldığı ve daha parçalı bir mikroyapı oluştuğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte katılaşmanın bir önceki bileşime benzer şekilde 3 numaralı EDS analizinin alındığı ve $M(C,B)$ olduğu düşünülen faz ile başlaması beklenmektedir. Artan titanyum miktarıyla birlikte yapı içerisinde oluşan $M(C,B)$ miktarının arttığı görülmektedir. Katılaşmanın devamında matris fazı ve tane sınırı fazları oluşacaktır. Matris fazın $\alpha-(Fe,Mo,Mn)$ olduğu, tane sınırı fazının ise bir önceki $Fe_{14}MoTiBMn_2C$ bileşimine benzer şekilde M_3B_2 olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.6'da $Fe_{12}MoTi_3BMn_2C$ esaslı sert dolgu kaplamaya ait SEM görüntüsü EDS ve MAP analizi verilmiştir. Sert dolgu elektrot bileşimindeki titanyum miktarının atomik olarak %15'e çıkarılmasıyla diğer üç kaplama mikroyapısından tamamen farklı bir mikroyapı açığa çıktığı görülmektedir. Bununla birlikte $Fe_{12}MoTi_3BMn_2C$ esaslı sert dolgu bileşimi içerisinde katılaşma sırasında oluşacak ilk fazın yine sistem içerisindeki fazlara göre serbest enerjisi en düşük ve ergime sıcaklığı en yüksek $M(C,B)$ fazı olması beklenmektedir. Ortaya çıkan faz EDS analizinde verilen 1 numaralı faza tekabül etmektedir. İn-situ olarak ergiyik içerisinden katılaşma esnasında oluşan blok yapılı fazların sıvı içerisinde yüzebileceği ve birbirine temas ederek birleşebileceği bildirilmektedir [49,88].



Şekil 5.5. $\text{Fe}_{13}\text{MoTi}_2\text{BMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi

SEM mikroyapı görselleri de artan titanyum oranı ile eş eksenli görünümünden çubuk şeklinde yapılara dönüşümün olduğunu göstermekte ve bu oluşumu desteklemektedir. Titanyum elementinin büyük bir kısmı sistem içerisindeki bor ve karbon ile $\text{M}(\text{C},\text{B})$ fazını oluşturduktan sonra kalan titanyum $\alpha\text{-(Fe,Mo,Mn)+M}_2(\text{Ti,Mo})$ ötektik yapısını oluşturmuştur. Titanyum elementinin özellikle çelik mikroyapısını rafine edici ve tane inceltici bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir [89,90].



Şekil 5.6. $\text{Fe}_{12}\text{MoTi}_3\text{BMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi

Nitekim ilk üç bileşime göre dördüncü bileşimde α -Fe fazlarının belirgin bir şekilde daha ince tanelerden oluştuğu görülmektedir. Katılaşma esnasında alaşım sistemi içerisindeki titanyumun bor ve karbon elementleri ile $\text{M}(\text{B,C})$ fazını oluşturmamasından sonra, kalan sıvı içerisindeki demir, molibden, manganez ve bir miktar titanyum daha çok ötektik yapılarda dağılım göstermiştir. Özellikle daha önceki bileşimlerde molibden elementi primer α -(Fe,Mo,Mn) taneleri arasında yer alan ötektik yapılarda

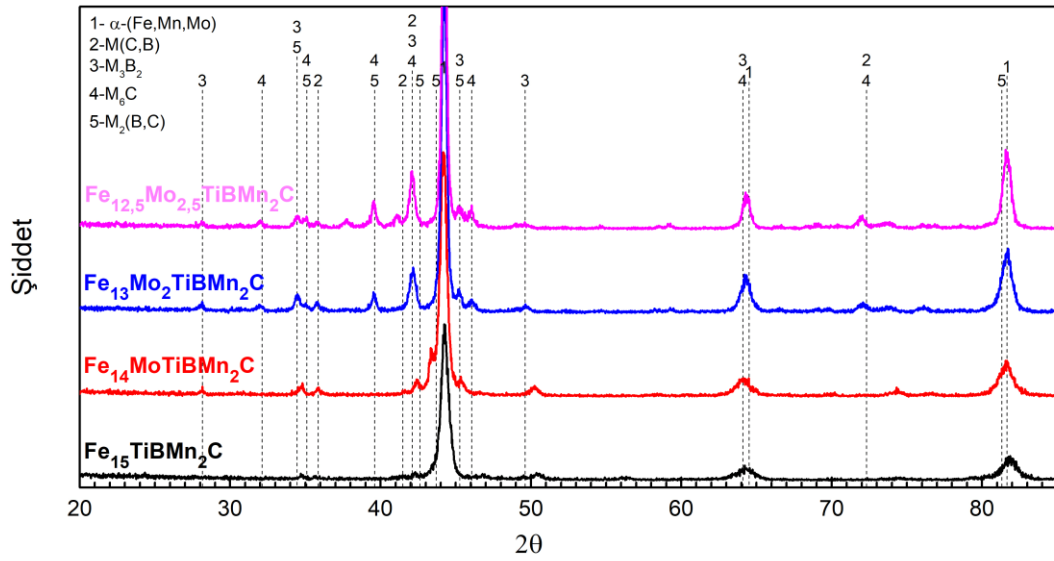
toplanmışken bu bileşimde EDS ve MAP analizlerinden de görüldüğü üzere daha geniş bir bölgede dağılmıştır. Borür veya karbür oluşturmamayan molibdenin özellikle diğer metallerle katı eriyik oluşturduğunu söylemek mümkündür. Nitekim X-ışınları analizinde molibden borür/karbür fazına rastlanmamıştır. Sistemin primer M(C,B) fazı ile birlikte α -(Fe,Mo,Mn) ve ötektik yapılardan oluştuğunu söylemek mümkündür.

Grup içerisinde Fe-Mo-B-Mn-C sistemine titanyum ilavesinin mikroyapı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Titanyum içermeyen mikroyapının matris fazında hakim olan yapı γ -Fe iken sistem içerisine titanyum ilave edilmesiyle birlikte γ -Fe yapısı yerini α -Fe yapısına bırakmıştır. Titanyum oranının artmasıyla birlikte α -Fe yapısı da daha ince taneler halinde katılaşmıştır. Sistem içerisinde artan titanyum oranıyla birlikte oluşan M(C,B) fazı hacimce artış göstermiştir ve morfolojisi eş eksenli tane yapısından uzun çubuksu bir yapıya dönüşmüştür. Yine titanyum oranının artışıyla birlikte daha çok tane sınırlarında oluşum gösteren M_3B_2 yapısı azalmıştır. Genel olarak sistem içerisinde M(C,B), M_3B_2 , α -(Fe,Mo,Mn), γ -(Fe,Mo,Mn) gibi major fazlar ve M_6C , $M_{2,3}(C,B)$, $M_2(Ti,Mo)$ gibi minör fazların yer aldığından söz etmek mümkündür.

5.2.2. $Fe_{(15-x)}Mo_xTiBMn_2C$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı alaşımlar

$Fe_{(15-x)}Mo_xTiBMn_2C$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı sert dolgu kaplamaları içerisinde yer alan bileşimlerde titanyum, bor, manganez ve karbon oranları sabit kalıp molibden oranları artış göstermektedir. Artan molibden oranının sert yüzey kaplama işlemi sonrasında oluşacak olan mikroyapı ve fazlara olan etkisi incelenmiştir. Şekil 5.7.'de $Fe_{(15-x)}Mo_xTiBMn_2C$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı sert dolgu kaplamalardan alınan XRD analizi verilmiştir. XRD analizinde majör olarak M_3B_2 ($M=Mo,Fe$), M(C,B) ($M=Ti, Mo$), α -(Fe,Mo,Mn), fazlarının ve minör olarak ise M_6C ($M=Mo,Fe$) ve $M_2(C,B)$ ($M=Mo,Fe$) fazlarının yer aldığı tespit edilmiştir.

Şekil 5.8.'de $Fe_{15}TiBMn_2C$ esaslı sert dolgu kaplamaya ait SEM, EDS ve MAP görüntüleri yer almaktadır. Mikroyapının matris fazı, siyah renkli küresel yapılar ve tane sınırlarında yer alan ötektik benzeri bir yapıdan oluştuğu görülmektedir.

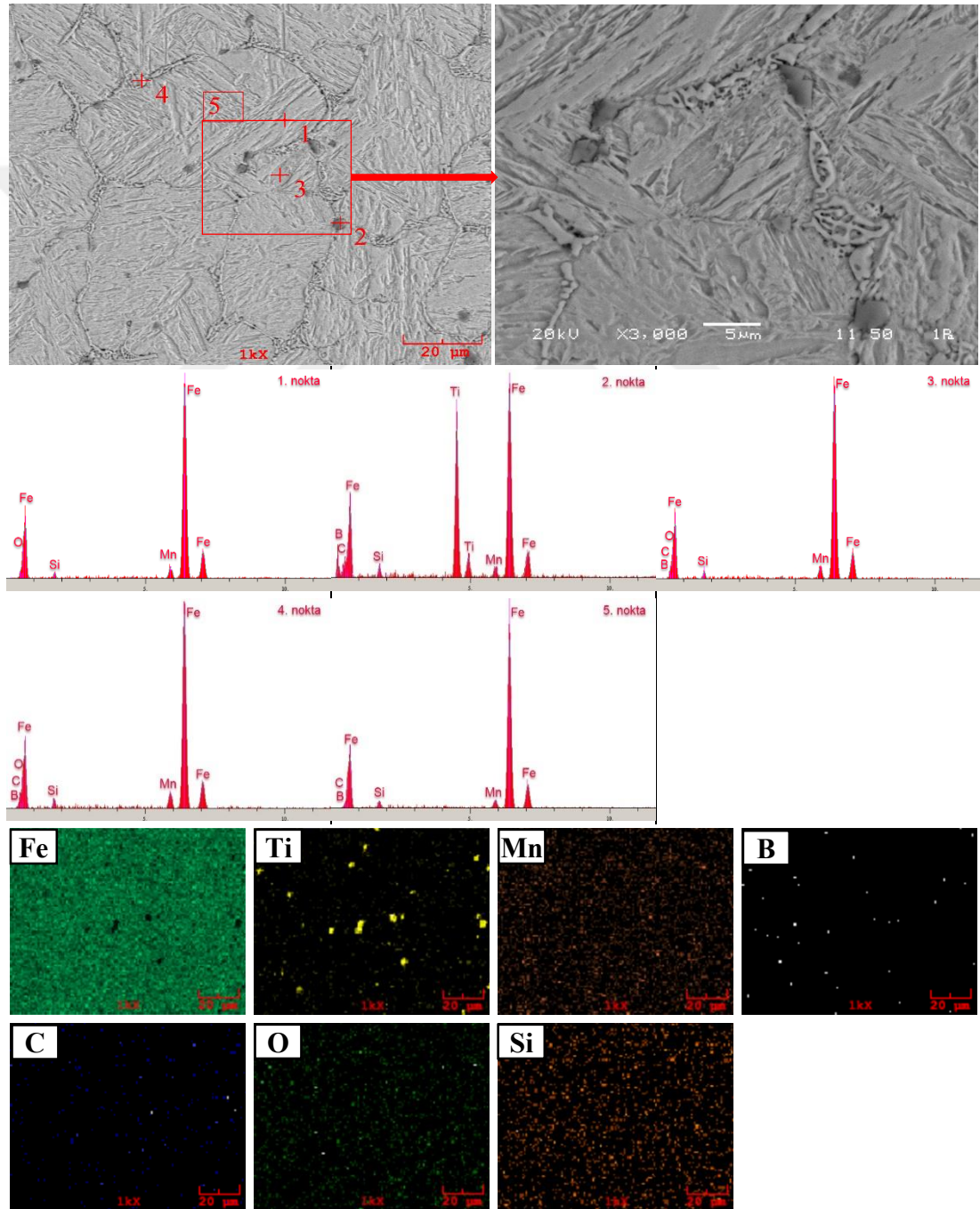


Şekil 5.7. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{Mo}_x\text{TiBMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı sert dolgu kaplamaların x- ışınları difraksiyon paternleri

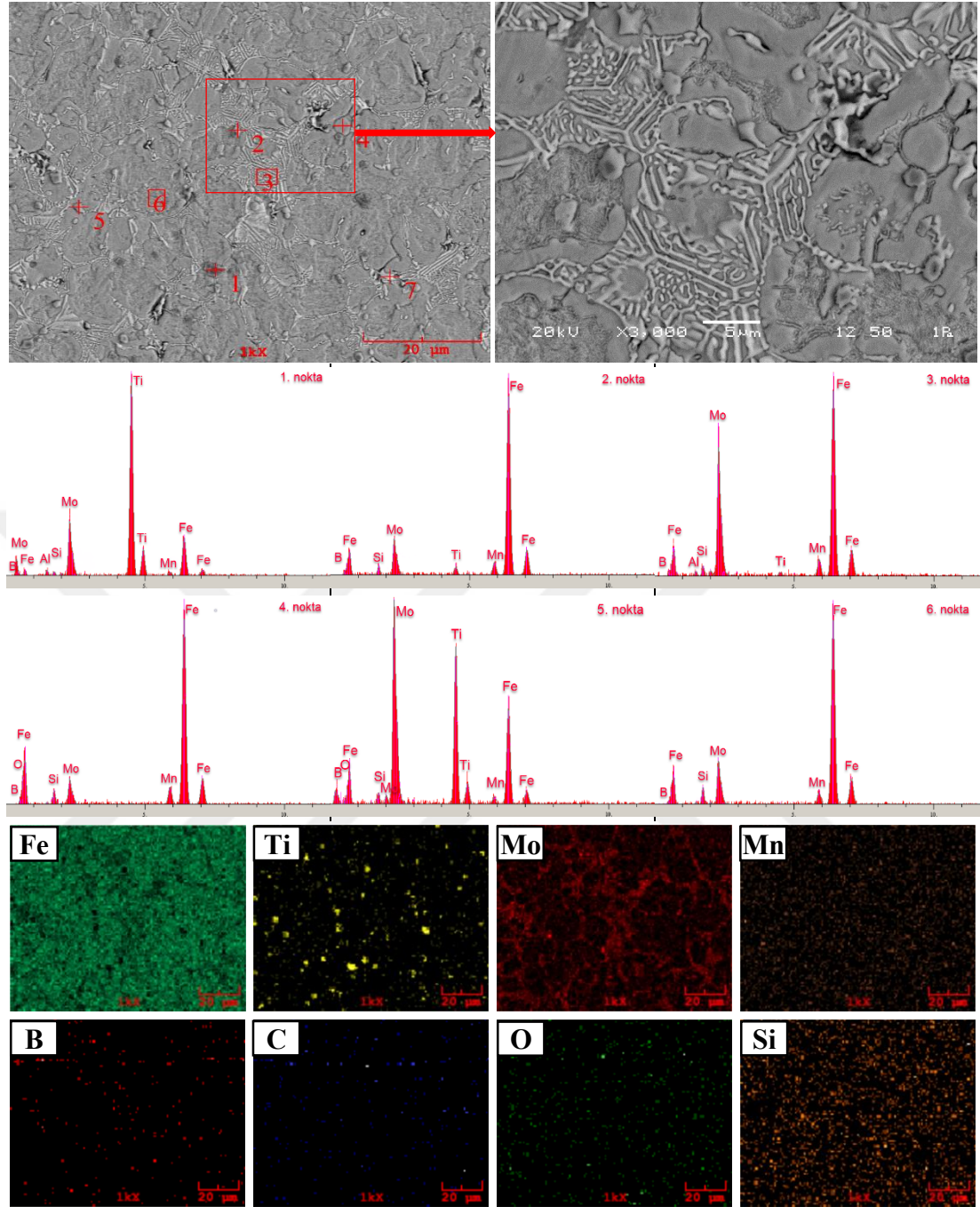
Siyah renkli küresel fazdan alınan 2 numaralı EDS analizi titanyum, demir, karbon ve bor sinyali vermektedir. Katılaşmanın diğer bileşimlerde olduğu gibi $\text{M}(\text{C},\text{B})$ olduğu düşünülen bu faz ile başlaması beklenmektedir. SEM görüntülerinden matris fazının martenzit benzeri bir yapı olarak katılaştığı görülmektedir. 1 ve 5 numaralı EDS analizlerine göre matris fazın; demir, mangan ve karbon sinyali verdiği görülmektedir. Literatürde mangan ve karbonun; ostenit stabilizatörleri olarak ostenit alanını genişlettiği, martenzit başlangıç sıcaklığını (M_s) düşürdüğü ve martenzit dönüşümüne katkı sağladıkları rapor edilmektedir [81,86,91]. Oluşan matris faz martenzit olarak değerlendirilmektedir. SEM mikroyapı görüntüsünde taneler arasında oluşan öktik benzeri yapıdan alınan 4 numaralı EDS analizi demir, mangan ve bor sinyalleri vermektedir. Fe-B faz diyagramı uyarınca [92] sistemde kalan bor ve demirin $\alpha\text{-Fe}+\text{Fe}_2\text{B}$ öktikliği olarak katılaşması beklenmektedir. EDS analizinde yer alan mangan ise sistem içerisinde Mn_2B olarak katılaşabilmektedir. Fe_2B ve Mn_2B birbiri içerisinde tam çözünürlüğe sahiptir ve oluşan faz M_2B olarak adlandırılabilir [93]. Ortaya çıkan öktik yapı $\alpha\text{-Fe}+\text{M}_2\text{B}$ olarak tanımlanabilir.

Şekil 5.9.'da $\text{Fe}_{13}\text{Mo}_2\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya ait SEM, EDS ve MAP görüntüleri yer almaktadır. %10 at. molibden ilavesi sonucu ortaya çıkan mikroyapının; matris fazı, düzensiz olarak dağılım gösteren koyu renkli küresel yapılar, beyaz renkli öktik yapı ve matrise göre daha koyu renkte olan düzensiz

yapılar görülmektedir. Koyu renkli küçük bloktan alınan 1 nolu EDS analizinden titanyum, karbon ve bir miktar molibden sinyalleri alınmıştır. Oluşan fazın M(C,B) fazı olduğu düşünülmektedir. Matris fazı üzerinden alınan 6 numaralı EDS analizi demir, molibden, manganez ve bir miktar bor sinyali vermekte ve α -(Fe,Mo,Mn) olarak katılaştığı düşünülmektedir. Borun %5 at. olarak sabit kaldığı sistemde molibden oranının %10'a çıkmasıyla mikroyapıda düzensiz dağılım gösteren küresel



Şekil 5.8. $\text{Fe}_{15}\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi

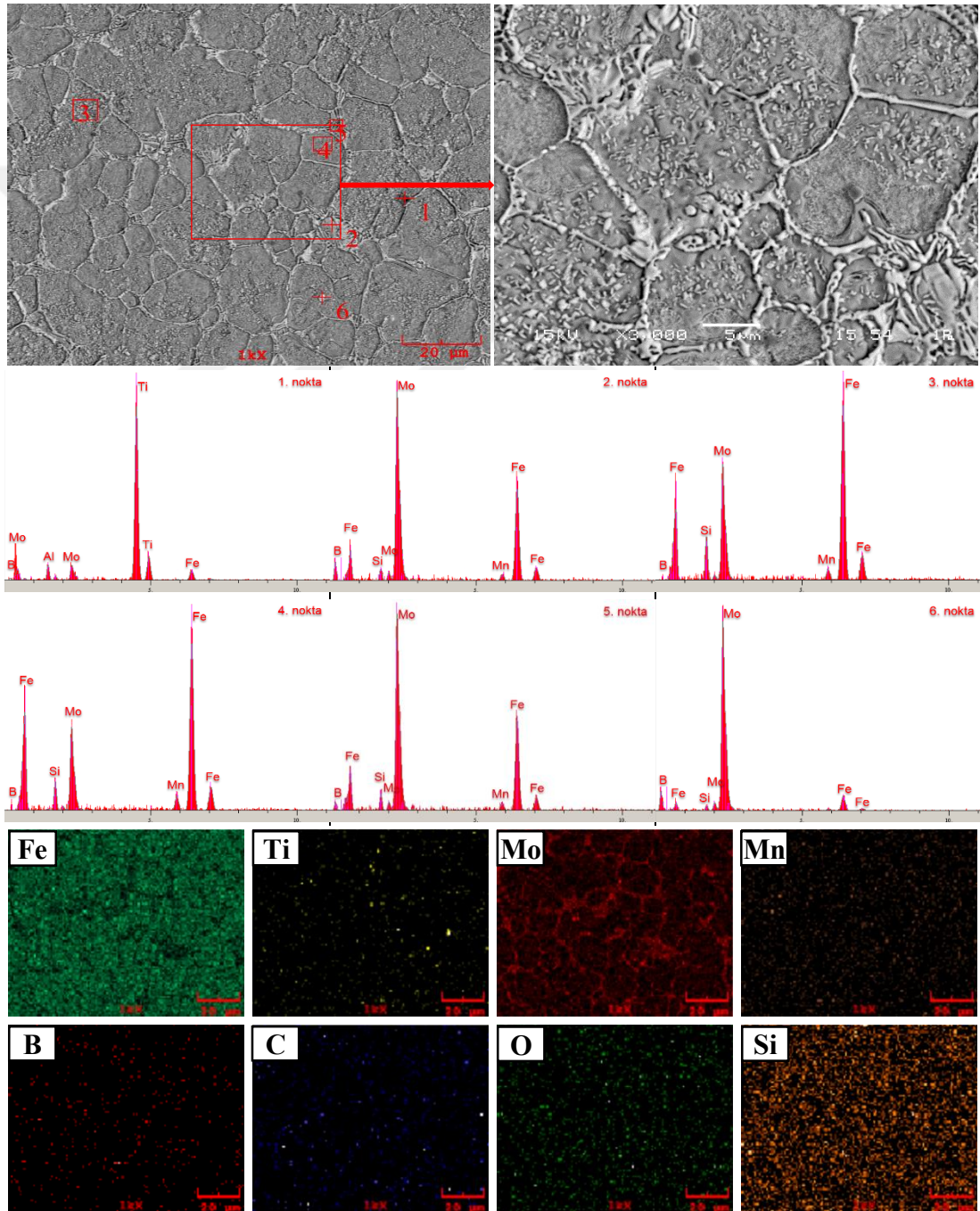


Şekil 5.9. $\text{Fe}_{13}\text{Mo}_2\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi

fazların oluştuğu görülmektedir. Küresel faz üzerinden alınan 5 numaralı EDS analizi; demir, molibden, titanyum ve bor sinyali vermektedir. Molibden oranının artışıyla birlikte açığa çıkan küresel fazın küçük bloklar halindeki M_3B_2 olduğu düşünülmektedir. Artan molibden oranıyla birlikte tane sınırlarında oluşan ötektik yapının mikroyapıda yoğunlaştığı görülmektedir. MAP analizlerine göre molibden ve bor daha çok küresel fazlarda dağılım göstermektedir. Oluşan yapının Ou Yang ve ark.

belirttiği gibi α -Fe+M₃B₂ ötektik fazı [94] olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.10.'da Fe_{12,5}Mo_{2,5}TiBMn₂C esaslı sert dolgu kaplamaya ait SEM, EDS ve MAP görüntüleri yer almaktadır. %12,5 at. molibden ilavesi sonucu ortaya çıkan mikroyapının; matris fazı, düzensiz olarak dağılım gösteren koyu renkli küresel faz ve ağsı yapıda dağılım gösteren beyaz renkli yapılar görülmektedir.



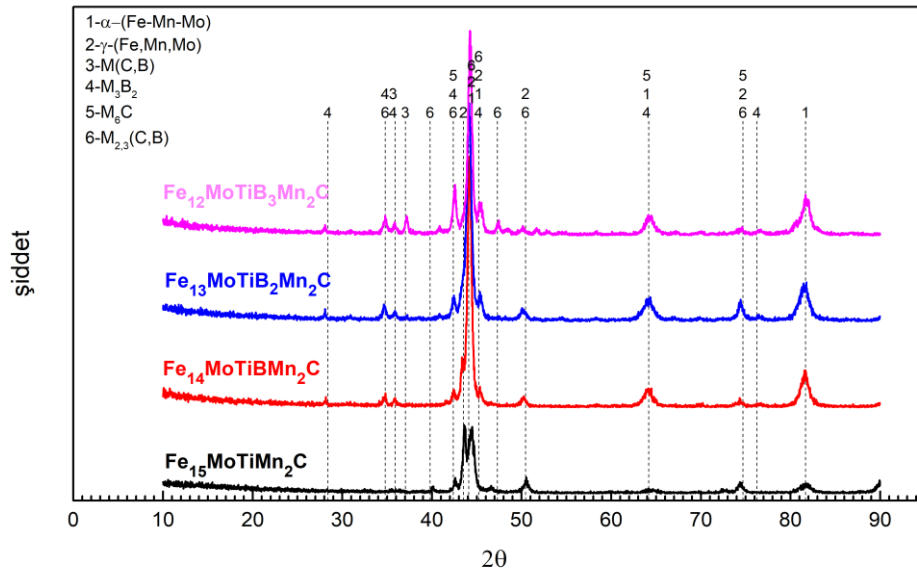
Şekil 5.10. Fe_{12,5}Mo_{2,5}TiBMn₂C esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi

Koyu renkli küresel yapıların diğer bileşimlerde olduğu gibi sistem içerisinde ilk katılan $M(C,B)$ olduğu düşünülmektedir. %5 at. ve %10 at. molibden ilavesine sahip olan bileşimlere kıyasla, MAP analizlerinden matris fazı içerisinde çözünen molibden miktarının arttığı görülmektedir. Artan molibden oranına karşı bor ve karbon oranının tüm bileşimlerde sabit kalması, molibdenin oluşturabileceği borür/karbürleri sınırladığı ve bu sebeple matris fazında çözünen molibden miktarının arttığı, matrisin $\alpha-(Fe,Mo,Mn)$ olarak katıldığı düşünülmektedir. Artan molibden oranı Balaguru ve arkadaşlarının belirttiği gibi mikroyapıda önemli değişikliklere sebep olarak yapıyı ağsı hale getirmiştir. Oluşan ağsı yapı ötektik $\alpha-Fe+M_3B_2$ olduğu düşünülmektedir [54].

5.2.3. $Fe_{(15-x)}MoTiB_xMn_2C$ ($x=0,1,2,3$) esaslı esaslı alaşımlar

$Fe_{(15-x)}MoTiB_xMn_2C$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamaları içerisinde yer alan bileşimlerde molibden, titanyum, manganez ve karbon oranları sabit kalıp bor oranları artış göstermektedir. Artan bor oranının sert yüzey kaplama işlemi sonrasında oluşacak olan mikroyapı ve fazlara olan etkisi incelenmiştir. Şekil 5.11.'de $Fe_{(15-x)}MoTiB_xMn_2C$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalardan alınan XRD analizi verilmiştir. XRD analizinde majör olarak $M(C,B)$ ($M=Ti, Mo$), M_3B_2 ($M=Mo,Fe$), $\alpha-(Fe,Mo,Mn)$, $\gamma-(Fe,Mo,Mn)$ fazlarının ve minör olarak ise M_6C ($M=Mo,Fe$), $M_{2,3}(C,B)$ ($M=Mo,Fe,Mn$) fazlarının yer aldığı tespit edilmiştir.

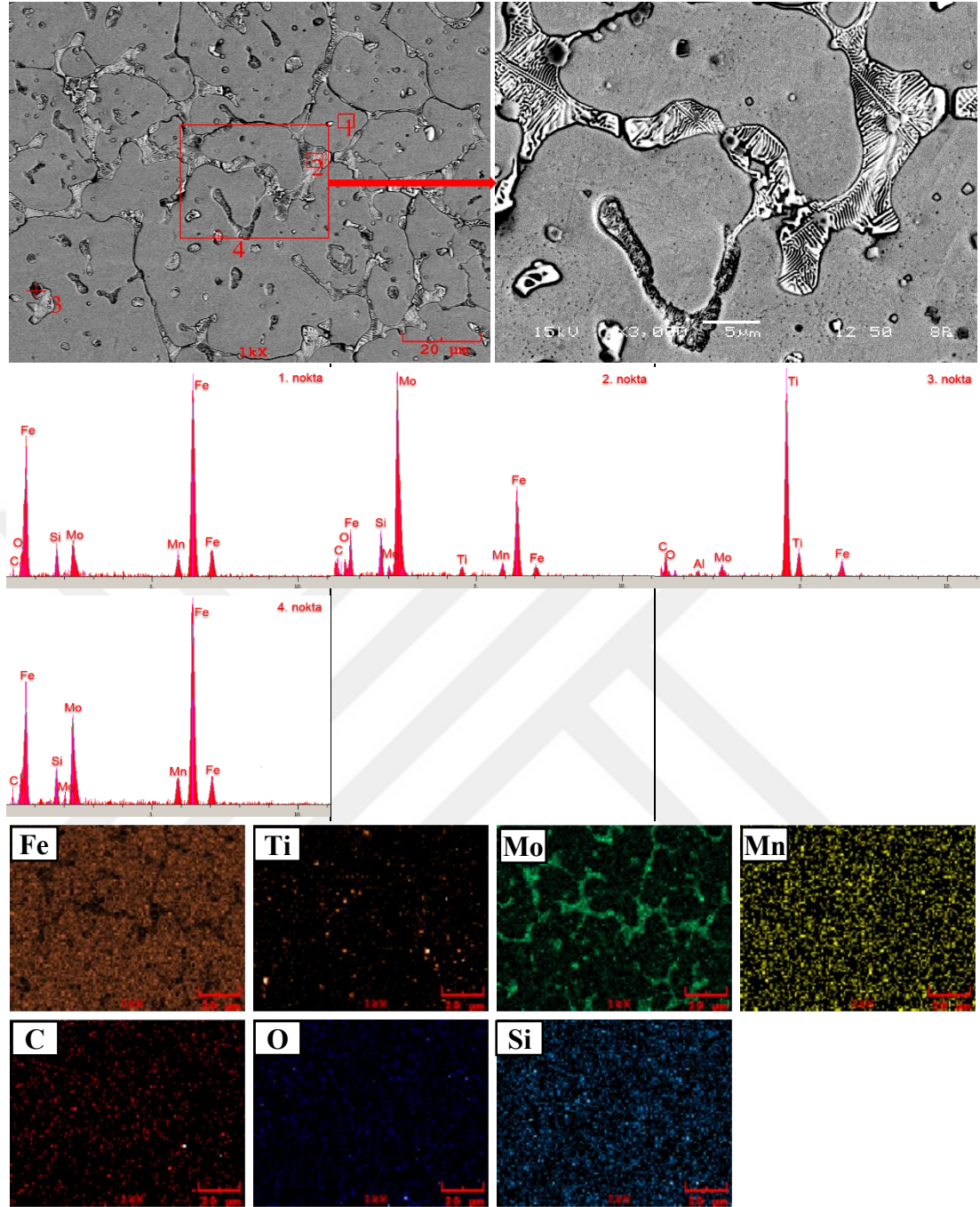
Şekil 5.12.'de $Fe_{15}MoTiMn_2C$ esaslı sert dolgu kaplamaya ait SEM, EDS ve MAP görüntüleri yer almaktadır. Mikroyapının matris fazı, düzensiz olarak dağılım gösteren koyu renkli, küresel geometrili faz ve tane sınırlarında ötektik beyaz renkli bir yapıdan oluştuğu görülmektedir. Koyu renkli küresel geometrili fazdan alınan 3 nolu EDS analizinden titanyum, karbon ve bir miktar molibden sinyali alınmaktadır. Diğer bileşimlerde de olduğu gibi katılanın MC olduğu düşünülen faz ile başladığı düşünülmektedir. Matris fazdan alınan 1 nolu EDS analizi demir ile birlikte bir miktar manganez, molibden ve karbon sinyali vermektedir. Aynı zamanda MAP analizlerinde de manganez ve bir miktar molibdenin matris fazda dağılım gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.11. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTiB}_x\text{Mn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamaların x- ışınları difraksiyon paternleri

Oluşan matris fazın $\text{Fe}_{15}\text{MoBMn}_2\text{C}$ esaslı kaplamada olduğu gibi γ -(Fe,Mo,Mn) ve α -(Fe,Mo,Mn)'dan oluştuğu düşünülmektedir. Katılaşmanın devamında, tane sınırlarındaki iskelet tipi ötektik yapının oluştuğu düşünülmektedir. MAP analizine göre molibdenin daha çok tane sınırlarında dağılım gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte tane sınırlarındaki beyaz bölgeden alınan 2 nolu EDS analizi; molibden, demir, mangan, titanyum ve karbon sinyali vermektedir. Oluşan ötektik yapının yüksek hız takım çeliklerinde kararlı faz olarak yer aldığı bilinen iskelet tipi [95] α -(Fe,Mo,Mn)+ $\text{M}_6\text{C}(\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C})$ ötektiği olduğu düşünülmektedir.

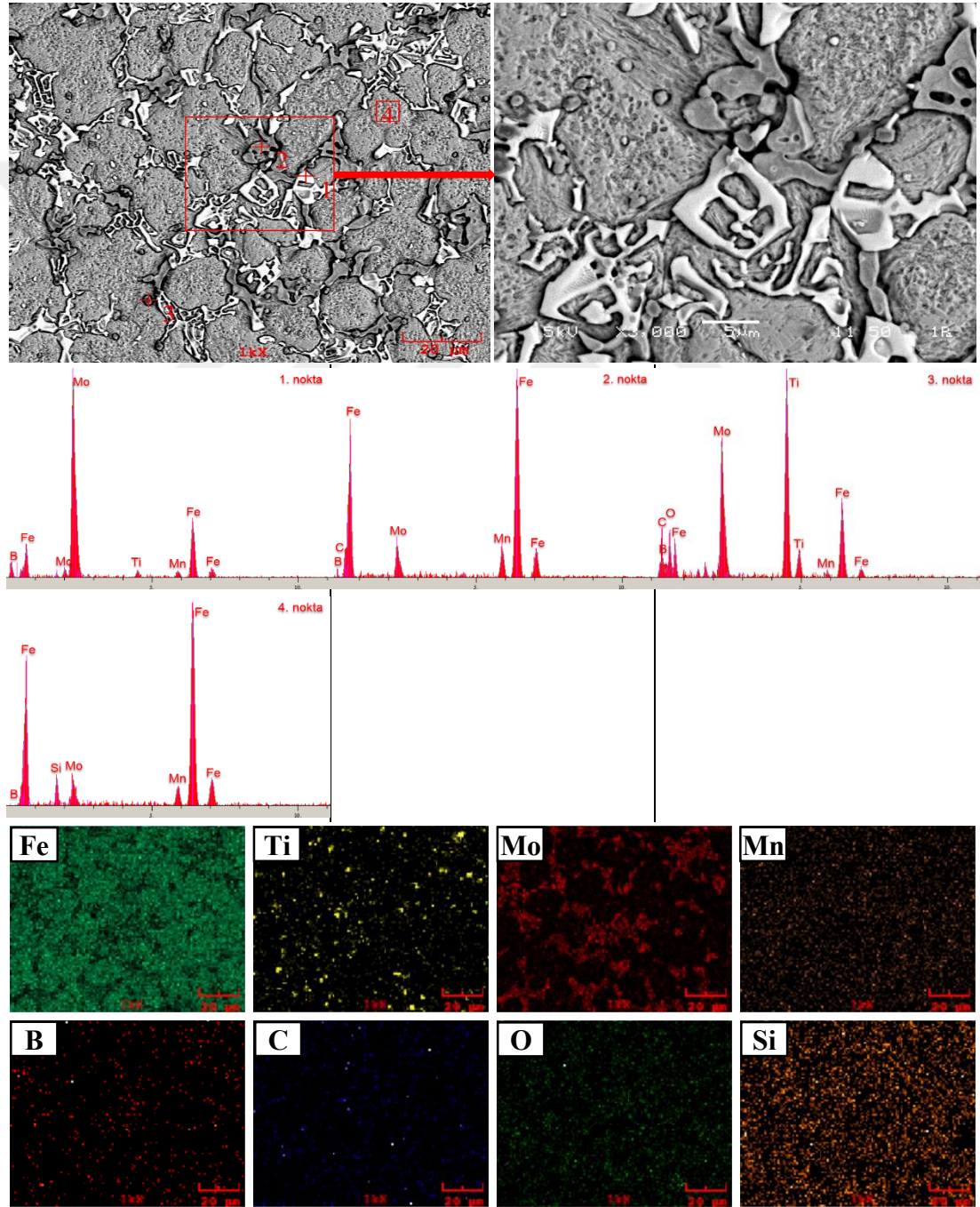
Şekil 5.13.'te $\text{Fe}_{13}\text{MoTiB}_2\text{Mn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya ait SEM, EDS ve MAP görüntüleri yer almaktadır. %10 at. bor ilavesi sonucu ortaya çıkan mikroyapının matris fazı, düzensiz olarak dağılım gösteren nispen koyu renkli küresel faz, düzensiz dağılım gösteren beyaz renkli faz ve matrise göre daha koyu renkte olan fazlardan oluştuğu görülmektedir. Diğer bileşimlerde olduğu gibi bu bileşimde de katılaşmanın 3 numaralı EDS analizinin alındığı $\text{M}(\text{C,B})$ fazıyla başladığı düşünülmektedir. Matris fazdan alınan 4 nolu EDS analizi; demir, mangan ve molibden sinyali vermektedir. Oluşan fazın α -(Fe,Mo,Mn) olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.12. $\text{Fe}_{15}\text{MoTiMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi

Mikroyapıda oluşan beyaz renkli fazdan alınan 1 numaralı EDS analizi molibden, demir, bor ve bir miktar titanyum sinyali vermektedir. Ouyang ve ark. ağırlıkça %8'in üzerinde molibden içeren ve ağırlıkça %3,5 bor içeren alaşımlarda M_3B_2 sert blok fazlarının oluştuğunu bildirmişlerdir [96]. MAP analizlerine göre molibden ve bor daha çok blok benzeri yapılarda dağılım göstermektedir. Oluşan fazın M_3B_2 olduğu düşünülmektedir. EDS analizlerindeki titanyumun Shen ve ark. [97] çalışmalarında

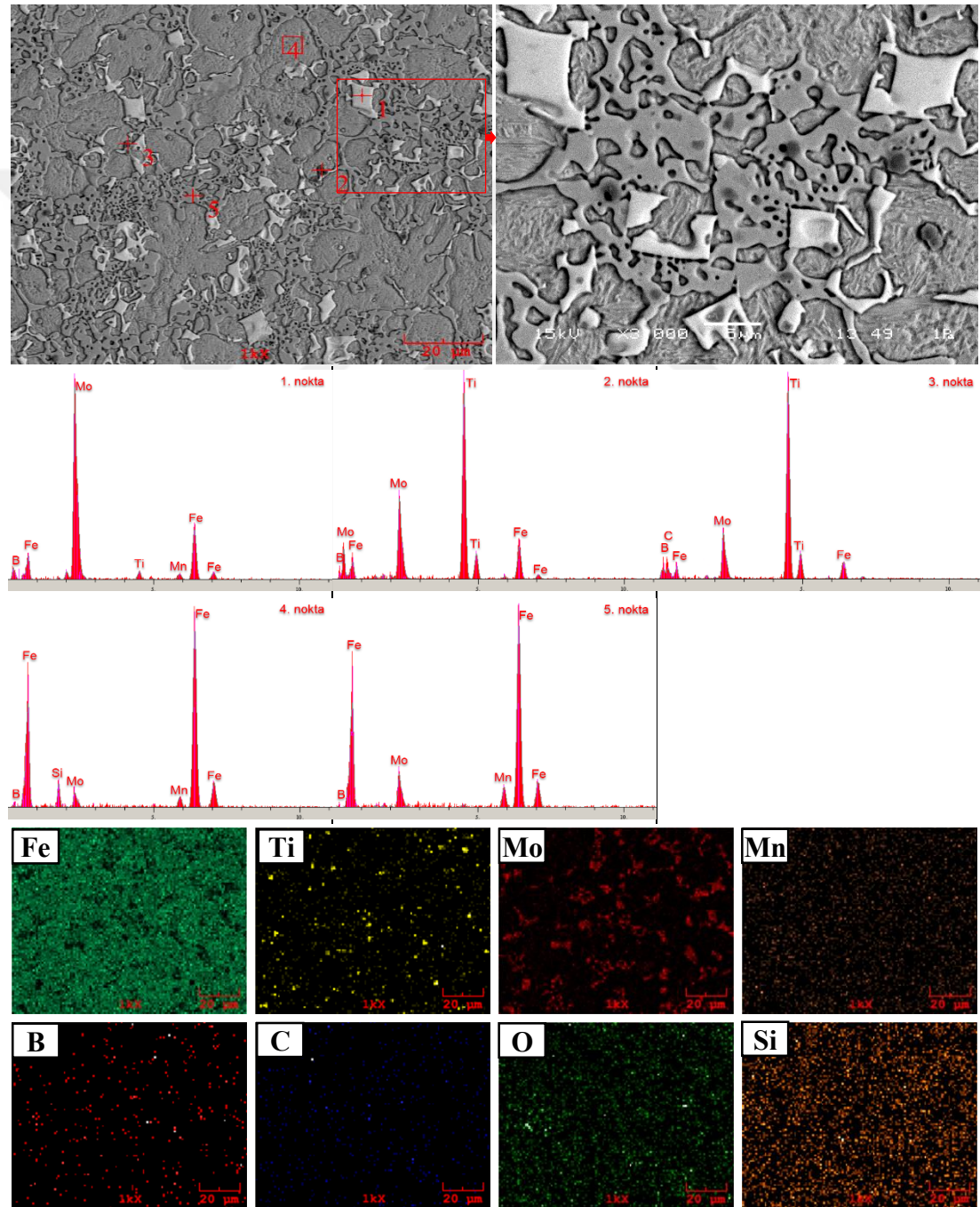
belirttiği gibi M_3B_2 fazı içerisinde çözünen titanyum olduğu düşünülmektedir. 2 nolu EDS analizinin alındığı faz; demir, molibden, manganez, bor ve karbon sinyali vermektedir. Shoushtari ve ark. borun α -Fe içerisindeki çözünürlüğünün ağı. %0,008, γ -Fe içerisindeki çözünürlüğünün ise ağı. %0,02 olduğunu belirterek, sistem içerisinde bileşik oluşturmadan kalan borun aşınma direncine katkı sağlayacak şekilde Fe_2B şeklinde katılaşacağını belirtmişlerdir [66].



Şekil 5.13. $Fe_{13}MoTiB_2Mn_2C$ esaslı sert dolgu kaplamasının SEM, EDS ve MAP analizi

Jin ve ark. ise alaşım içerisindeki atomik bor içeriğinin molibdenden daha yüksek olduğu durumlarda sistem içerisinde artan borun Fe_2B olarak katılaştığını bildirmişlerdir [93]. Artan bor oranıyla birlikte mikroyapıda artış gösteren fazın XRD analizinde de yer alan M_2B ($(\text{Fe},\text{Mo})_2\text{B}$) olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.14.'te $\text{Fe}_{12}\text{MoTiB}_3\text{Mn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya ait SEM görüntüsü, EDS

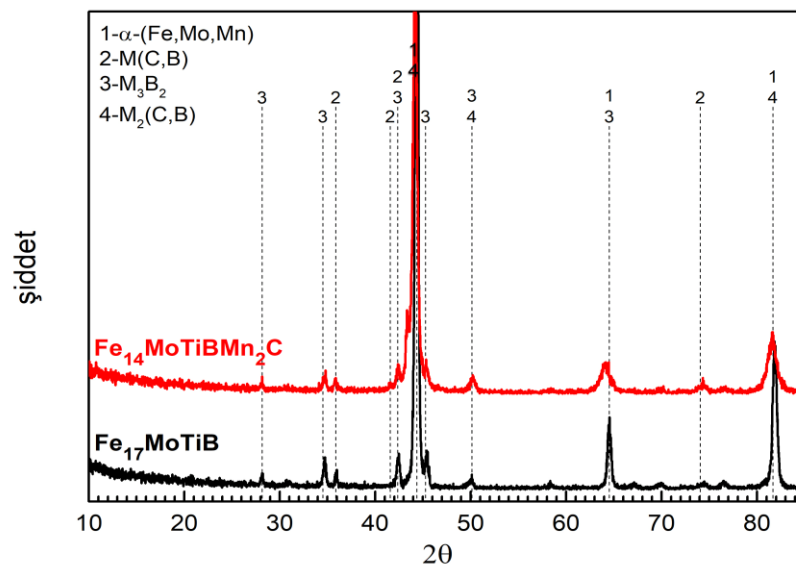


Şekil 5.14. $\text{Fe}_{12}\text{MoTiB}_3\text{Mn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi

ve MAP analizi yer almaktadır. %15 at. bor ilavesi sonucu ortaya çıkan mikroyapının; matris fazı, düzensiz olarak dağılım gösteren koyu renkli küresel faz, düzensiz dağılım gösteren beyaz renkli blok yapılar ve matrise göre daha koyu renkte olan düzensiz yapılardan oluştuğu görülmektedir. Koyu renkli küresel fazdan alınan 2 ve 3 numaralı EDS analizleri titanyum, molibden, bor ve karbon sinyalleri vermektedir. Oluşan fazın M(C,B) olduğu düşünülmektedir. Matris fazdan alınan 4 nolu EDS analizi demir, manganez ve molibden sinyali vermektedir. Oluşan fazın α -(Fe,Mo,Mn) olduğu düşünülmektedir. 1 numaralı EDS analizinin alındığı beyaz renkli fazın ise $\text{Fe}_{13}\text{MoTiB}_2\text{Mn}_2\text{C}$ esaslı bileşimde olduğu gibi blok yapılı M_3B_2 olduğu düşünülmektedir. 5 numaralı EDS analizinin alındığı koyu gri renkli fazın M_2B olduğu düşünülmektedir. Artan bor oranıyla birlikte mikroyapıda oluşan fazın hacimsel fraksiyonunun arttığı görülmektedir.

5.2.4. $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı alaşımlar

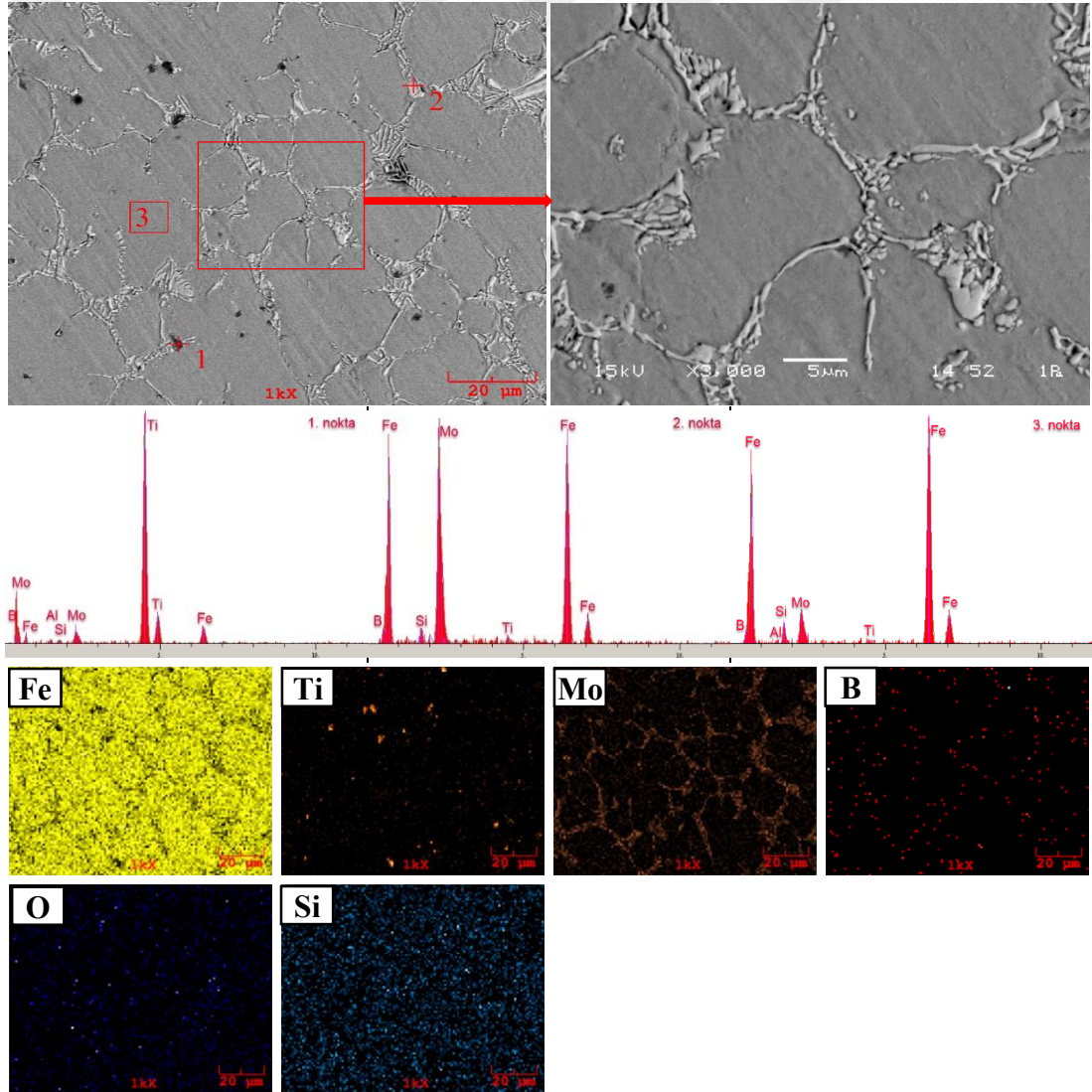
$\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamalarda Fe-Mo-Ti-B sistemine manganez+karbonun etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında temel karbon kaynağı yüksek karbonlu ferro-manganezdir. Bu sebeple manganez ve karbonun etkisi birlikte incelenecektir. Şekil 5.15.'te $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamalardan alınan XRD analizi verilmiştir.



Şekil 5.15. $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamaların x-ışınları difraksiyon paternleri

XRD analizinde majör olarak $M(C,B)$ ($M=Ti, Mo$), M_3B_2 ($M=Mo, Fe$), $\alpha-(Fe, Mo, Mn)$ fazlarının ve minör olarak ise $M_2(C,B)$ ($M=Mo, Fe, Mn$) fazlarının yer aldığı tespit edilmiştir.

Şekil 5.16.'da $Fe_{17}MoTiB$ esaslı sert dolgu kaplamaya ait SEM, EDS ve MAP görüntüleri yer almaktadır. Mikroyapının matris fazı, düzensiz dağılım gösteren koyu renkli faz ve tane sınırlarındaki beyaz renkli ötektik fazlardan oluştuğu görülmektedir. 1 numaralı EDS analizinin alındığı koyu renkli faz diğer bileşimlerde olduğu gibi titanyum, molibden ve bor sinyali vermektedir. Oluşan fazın diğer bileşimlerde olduğu gibi XRD'de yer alan $M(C,B)$ olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.16. $Fe_{17}MoTiB$ esaslı sert dolgu kaplamanın SEM, EDS ve MAP analizi

Matris üzerinden alınan 3 numaralı EDS analizi demir ve molibden sinyali vermektedir. Oluşan matris faz α -(Fe,Mo) olarak değerlendirilmektedir. MAP analizlerine göre molibden ve borun daha çok tane sınırlarında dağılım gösterdiği görülmektedir. Oluşan ötektik yapının α -Fe+M₃B₂ olduğu düşünülmektedir.

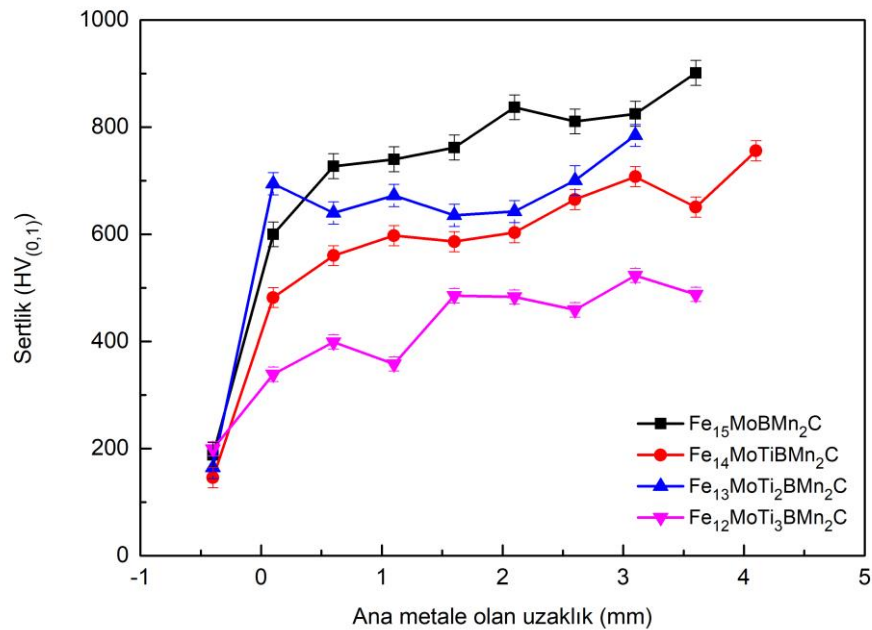
5.3. Sertlik Testleri

Çalışma kapsamında Fe-Mo-Ti-Mn-B-C esaslı, 11 farklı bileşimde sert dolgu elektrodu üretilmiştir. Üretilen elektrotlar ile AISI 1010 çelik altlık malzeme yüzeyine elektrik ark kaynak yöntemiyle kaplama işlemi tek paso olacak biçimde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kaplamaların ara kesit yüzeyinden Vickers (HV_{0,1}) mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik ölçümleri altlık malzemedan başlayarak kaplamanın tepe noktasına kadar 0,5 mm aralıklarla alınmıştır. Ölçümler sonucu ortaya çıkan eğrilerden, altlık malzemedan itibaren kaplama tabakasının tepe noktasına doğru genel olarak mikro sertliğin arttığı tespit edilmiştir. Bu durum; sert dolgu işleminin uygun kaynak akımıyla gerçekleştirildiğinin ve seyrelme oranının düşük olduğunun bir göstergesidir. Bununla birlikte sertlik değerlerinde dalgalanmaların olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun kaplama tabakası içerisinde yer alan M₃B₂, M(C,B) gibi sert fazlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

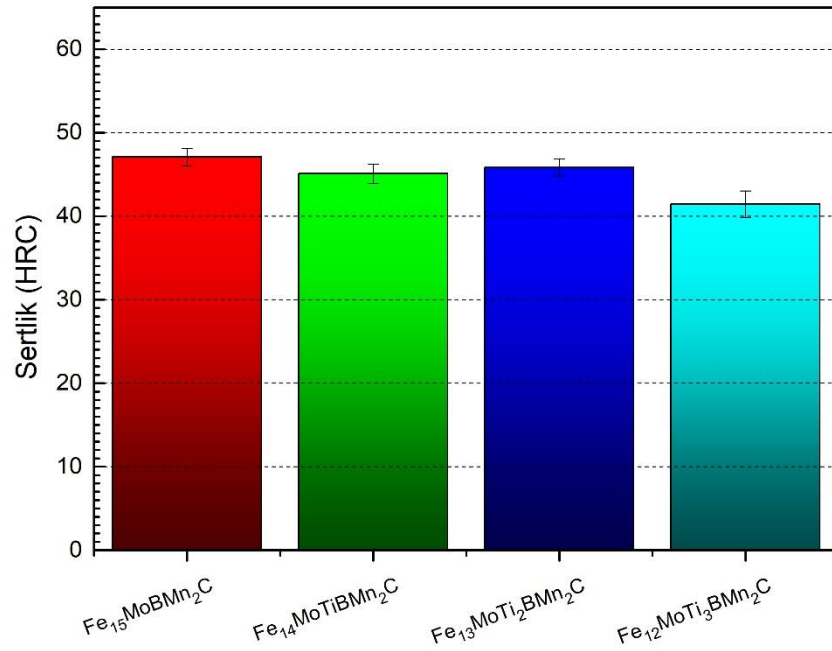
Kaplamanın genel sertlik değerlendirmesini yapabilmek için kaplanmış numunelerin yüzeyinden 5 mm aralıklarla Rockwell C makro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması alınarak kaplamaların ortalama makro sertlik değerleri belirlenmiştir.

Şekil 5.17.'de Fe_(15-x)MoTi_xBMn₂C (x=0,1,2,3) esaslı kaplamaların mikro sertlik verileri, Şekil 5.18.'de ise ortalama makro sertlik verileri yer almaktadır. Mikro sertlik verilerinden, genel olarak altlık malzemedan kaplamanın tepe noktasına doğru sertliğin arttığı görülmektedir. Ortalama makro sertlik değerleri ise birbirine yakın olmakla beraber mikro sertlik verilerini destekler niteliktedir. Grup içerisinde yer alan bileşimlerde bor ve karbon oranları sabit olup atomik olarak toplamda %10'dur. Bileşimler içerisindeki sert borür/karbür oluşturmaları beklenen elementler ise molibden

ve titanyumdur. $\text{Fe}_{15}\text{MoBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu alaşım sistemi içerisinde titanyum bulunmamaktadır. Sistemde sert borürlerin/karbürlerin molibden tarafından oluşturulması beklenmektedir. Nitekim yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda molibdenin daha çok tane sınırlarında dağılım gösterdiği ve sertliği 2200-2800 HV [12] olduğu bilinen M_3B_2 fazını oluşturduğu tespit edilmiştir. Grup içerisinde yer alan diğer bileşimlerde sistematik olarak artacak şekilde titanyum yer almaktadır. Titanyum [52] ve molibdenin [98] güçlü borür/karbür oluşturan elementler olduğu bilinmektedir. Bunun yanında titanyum borür/karbürlerinin molibden borür/karbürlerinden daha düşük serbest enerjiye sahip olduğu ve sıvı içerisinde birlikte bulunmaları halinde titanyum borür/karbürlerinin daha önce oluşacağı bildirilmektedir [55]. Gerçekleştirilen mikroyapı analizleri sonucunda, bor+karbonun atomik olarak %10 olacak şekilde sabit olduğu bileşimlerde titanyum ilavesi ile birlikte yapı içerisinde sertliği 3000-3200 HV [99,100] olduğu bilinen $\text{M}(\text{C},\text{B})$ fazlarının oluştuğu ve artan titanyum oranıyla birlikte $\text{M}(\text{C},\text{B})$ fazının hacimsel fraksiyonunun arttığı görülmektedir. Yine bununla birlikte artan $\text{M}(\text{C},\text{B})$ 'ye karşılık M_3B_2 fazının azaldığı, %15 titanyum (at.) içeren $\text{Fe}_{12}\text{MoTi}_3\text{BMn}_2\text{C}$ bileşimde ise M_3B_2 nin yer almadığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak grup içerisinde yer alan bileşimlerin tümünde sert borür/karbür fazları yer almaktadır. Bu sebeple Şekil 5.18.'deki ortalama makro sertlik verilerinin birbirine yakın olması normaldir.

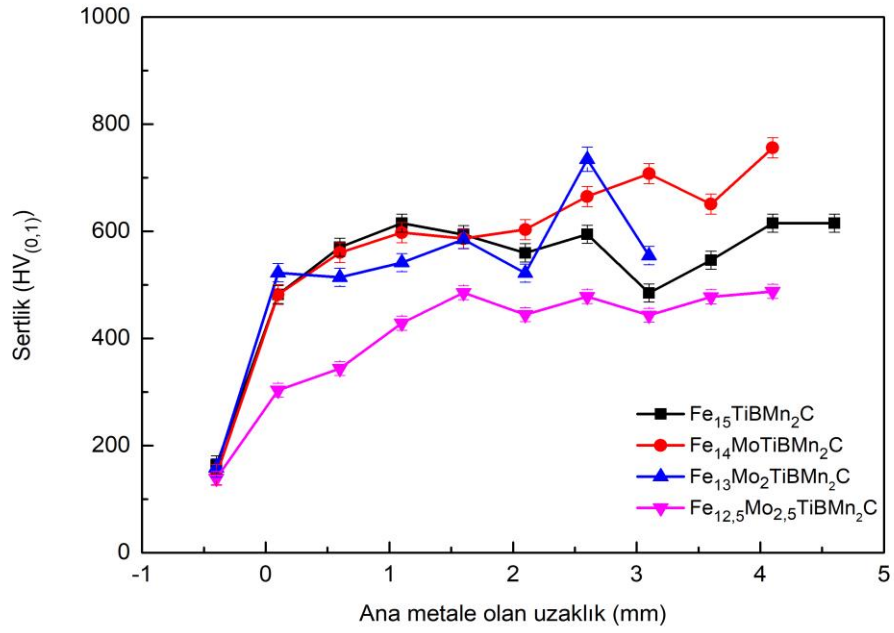


Şekil 5.17. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTi}_x\text{BMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı kaplamaların mikro sertlik verileri

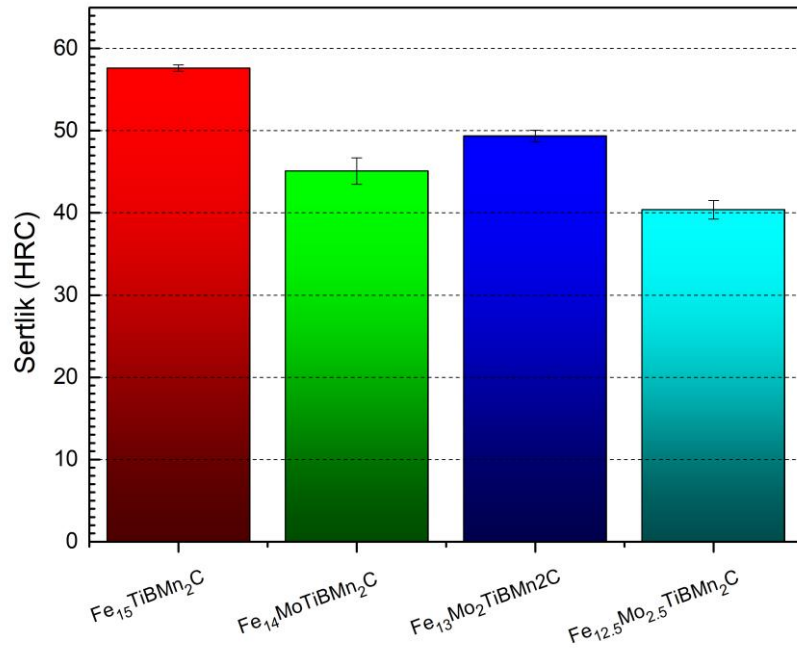


Şekil 5.18. $Fe_{(15-x)}MoTi_xBMn_2C$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara ait makro sertlik ölçümleri

Şekil 5.19.'da $Fe_{(15-x)}Mo_xTiBMn_2C$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı kaplamaların mikro sertlik verileri, Şekil 5.20.'de ise ortalama makro sertlik verileri yer almaktadır. Bor+karbon oranının atomik olarak toplamda %10 olduğu grup içerisinde, ilk üç bileşimin mikro sertlik verileri birbirine yakın değerlerdedir. Makro sertlik verilerinde ise farklılıkların olduğu görülmektedir. Molibdenin bulunmadığı $Fe_{15}TiBMn_2C$ esaslı kaplama, grup içerisindeki en yüksek makro sertlik değerlerine sahiptir. Kaplamanın mikroyapısının martenzitik matris içerisindeki TiC ve $\alpha-Fe+M_2B$ ötektik yapılarından oluştuğu tespit edilmiştir. Ortaya çıkan yüksek makro sertlik verilerinin $\alpha-Fe$ 'ye göre daha yüksek sertliğe sahip olan martenzitik [101] matris ve ötektik yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Atomik olarak %5 molibden ilavesi ile birlikte kaplamanın matris fazı $\alpha-(Fe,Mo,Mn)$ ve bir miktar $\gamma-(Fe,Mo,Mn)$ olarak katılmıştır. Ayrıca sistem içerisinde tane sınırlarında M_3B_2 fazları oluşmuştur. Ötektik yapı içermeyen ve martenzite göre daha yumuşak bir matristen oluşan kaplamanın makro sertliğinde bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. %10 molibden içeren kaplamada ise $\alpha-Fe+M_3B_2$ şeklinde katılan ötektik miktarı artmıştır. Bu sebeple %5 molibden içeren kaplamaya göre daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. %12,5 molibden içeren kaplamada molibden borür/karbürler ağısı yapıda katılma göstermiş ve sertlik değerinde düşüş meydana gelmiştir.

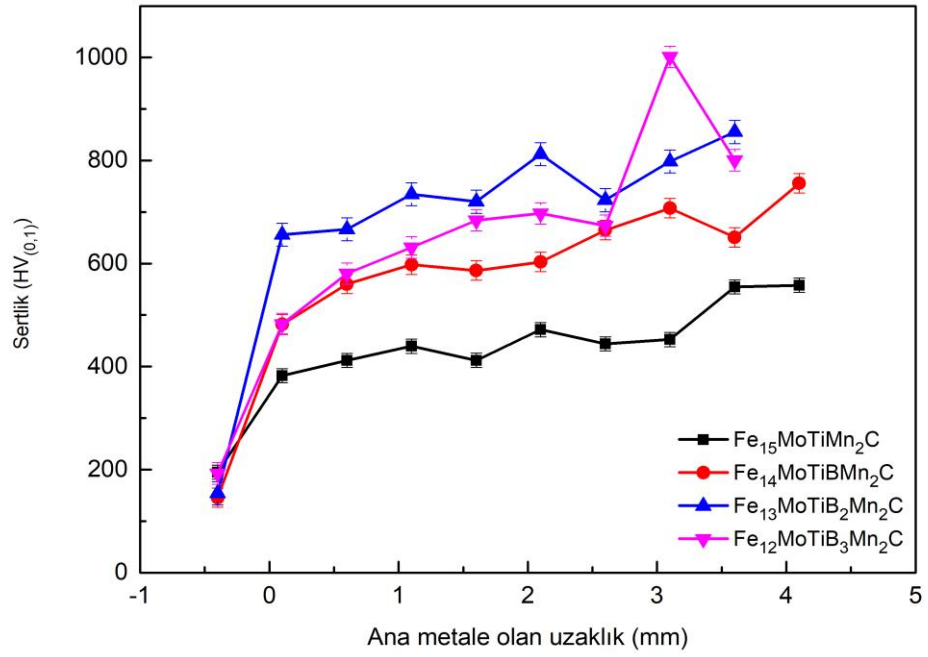


Şekil 5.19. Fe_(15-x)Mo_xTiBMn₂C (x=0,1,2,(5/2)) esaslı sert dolgu kaplamaların mikro sertlik verileri

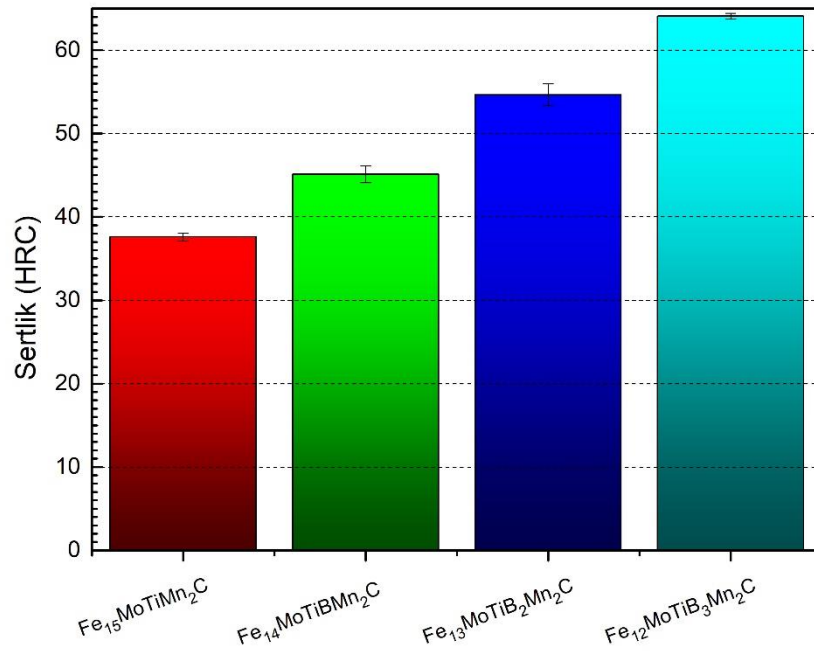


Şekil 5.20. Fe_(15-x)Mo_xTiBMn₂C (x=0,1,2,(5/2)) esaslı sert dolgu kaplamalara ait makro sertlik ölçümleri

Artan molibden oranıyla birlikte mikroyapıda oluşan molibden borür/karbürlerinin ağısı yapıya dönüşümü ve sertliğin azalması Balaguru ve ark. [54] çalışması ile uyum içerisinde. Şekil 5.21.'de Fe_(15-x)MoTiB_xMn₂C (x=0,1,2,3) esaslı kaplamaların mikro sertlik verileri, Şekil 5.22.'de ise ortalama makro sertlik verileri yer almaktadır.



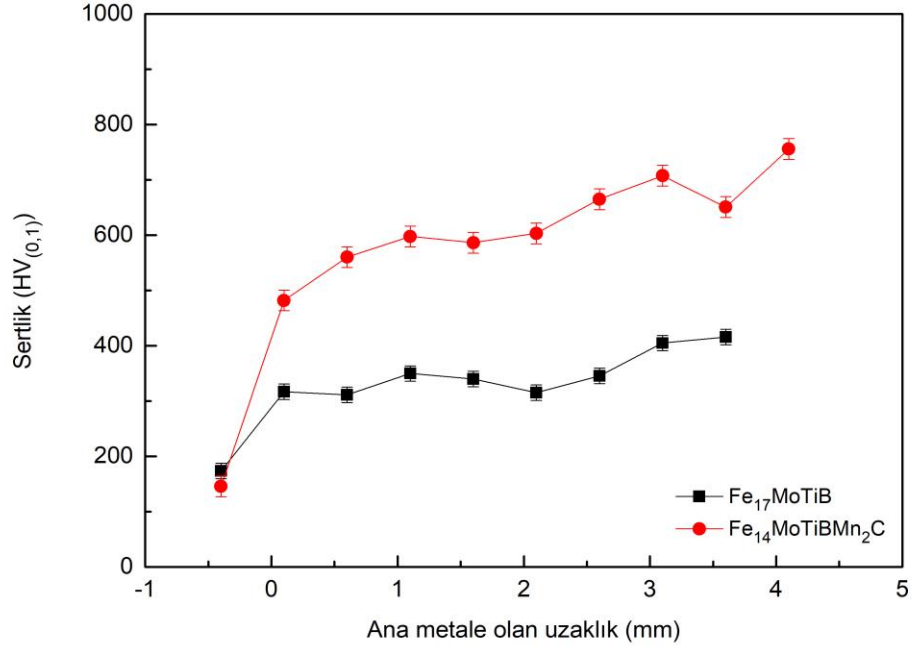
Şekil 5.21. Fe_(15-x)MoTiB_xMn₂C (x=0,1,2,3) esaslı kaplamaların mikro sertlik verileri



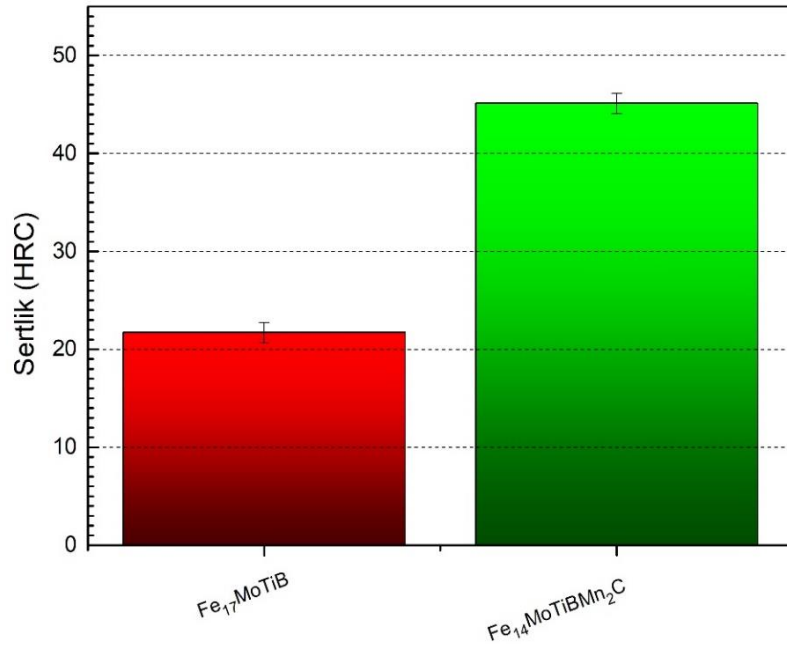
Şekil 5.22. Fe_(15-x)MoTiB_xMn₂C (x=0,1,2,3) esaslı sert dolgu kaplamalara ait makro sertlik ölçümleri

Elde edilen grafiklerden artan bor oranıyla birlikte sertliğin arttığı görülmektedir. Artan bor oranıyla birlikte yapı içerisinde oluşan sert M₃B₂ fazının morfolojisi değişmiş ve hacimsel fraksiyonu artış göstermiştir. Benzer çalışmalarda da olduğu gibi [11,49] artan bor oranıyla birlikte yapı içerisinde hacimsel fraksiyonu artış gösteren M₂B fazının sertliğin artmasına katkıda bulunduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.23.'te $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamaların mikrosertlik verileri, Şekil 5.24.'te ise ortalama makro sertlik verileri yer almaktadır.



Şekil 5.23. $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamaların mikro sertlik verileri



Şekil 5.24. $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara ait makro sertlik ölçümleri

Grafiklerden Fe-Mo-Ti-B sistemine manganez+karbon ilavesiyle birlikte sertliğin arttığı görülmektedir. Elektrot bileşimine ilave edilen manganez+karbon sonrasında

kaplama tabakasında oluşan M(C,B) fazının hacimsel fraksiyonunda artış gözlemlenmiştir. Sertliği 3000-3200 HV olduğu bilinen M(C,B)'nin hacimsel fraksiyonunun artmasıyla birlikte kaplamanın sertlik değerinde artış tespit edilmiştir.

5.4. Aşınma Testleri

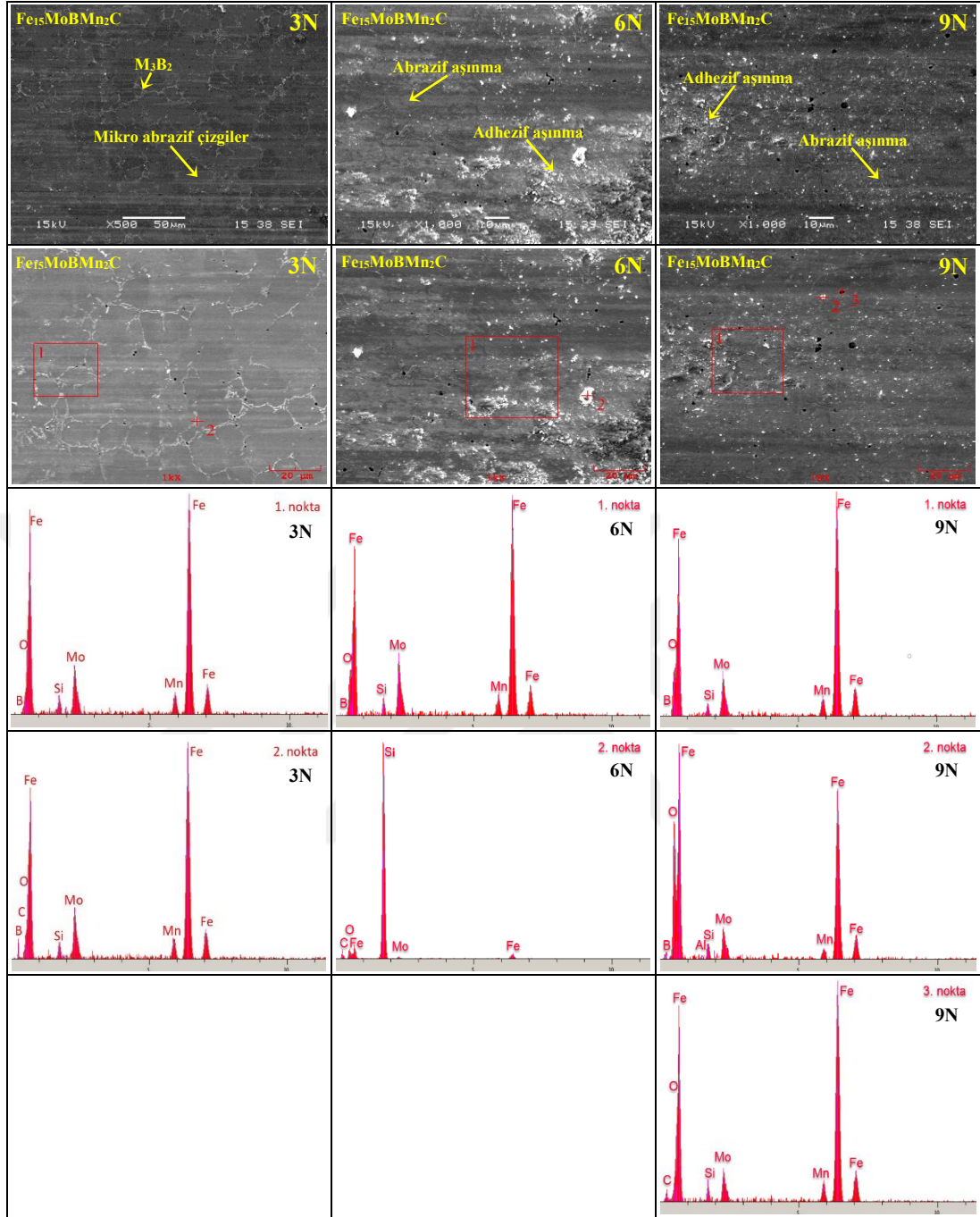
Çalışma kapsamında, üretilen 11 farklı bileşimdeki sert dolgu elektroduyla yapılan kaplamalar sonrasında elde edilen yüzeylere aşınma testleri uygulanmıştır. Aşınma testleri, salınım hareketli olarak Al_2O_3 aşındırıcı bilyeye karşı 200 m aşınma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. 30mm/sn hızda 3N, 6N, 9N olacak şekilde üç farklı yükte gerçekleştirilen testler sonrasında aşınmış yüzeylerden SEM görüntüleri ve EDS analizleri alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, kaplamanın aşınma özelliklerinin elektrot bileşiminden önemli derecede etkilendiğini göstermiştir.

$Fe_{14}MoTiBMn_2C$ esaslı bileşim, elementlerin sistematik artışında ortak olan bileşimdir. Bu sebeple çalışma kapsamında yer alan tüm gruplarda yer almaktadır. İlgili bileşime ait aşınma sonrası SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 5.26.'da yer almaktadır.

5.4.1. $Fe_{(15-x)}MoTi_xBMn_2C$ (x=0,1,2,3) esaslı alaşımlar

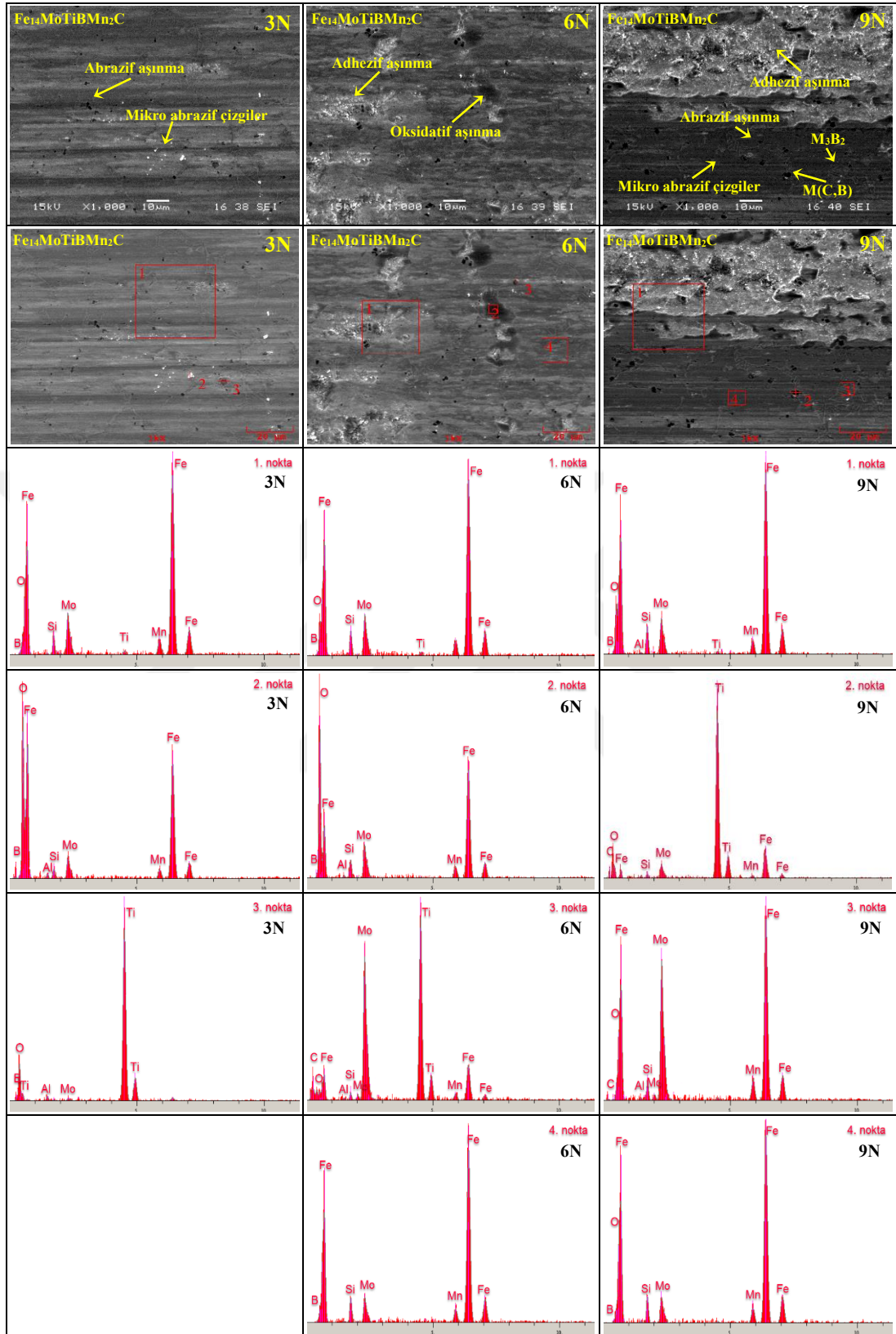
Şekil 5.25.-Şekil 5.28.'de $Fe_{(15-x)}MoTi_xBMn_2C$ (x=0,1,2,3) esaslı sert dolgu kaplamalara değişken yükler altında uygulanan aşınma testleri sonrasında yüzeyler üzerinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri yer almaktadır. Şekil 5.25.'te $Fe_{15}MoBMn_2C$ esaslı sert dolgu kaplamanın farklı yüklerde gerçekleştirilen aşınma testleri sonrası SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmektedir. Genel olarak, kayma doğrultusunda mikro-abrazif çiziklerin varlığı görülmekle birlikte 6N ve 9N' luk yüklerde kısmen adhezif aşınma mekanizması da görülmektedir. EDS analizlerinde tespit edilen oksijen sinyali, oksidatif aşınmanın da bu bileşim için etkili olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak bu bileşim için abrazif, adhezif ve oksidatif aşınma mekanizmalarının varlığından söz etmek mümkündür. Şekil 5.26.'da $Fe_{14}MoTiBMn_2C$ esaslı sert dolgu kaplamanın farklı yüklerde gerçekleştirilen aşınma

testleri sonrası SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmektedir. Bu bileşimde düşük yüklerde abrazyif aşınma mekanizması hakimken özellikle 9N'da abrazyif aşınmanın yanı sıra adhezif aşınma da görülmektedir. M(C,B) olarak tespit edilen sert fazların matris tarafından desteklendiği görülmektedir. Ayrıca tane sınırlarında bulunan M_3B_2 fazlarının da kaplamanın aşınma direncinde önemli rol oynadığı düşünülmektedir. Yine EDS analizlerinde tespit edilen oksijenin varlığı oksidatif aşınma mekanizmasının da olduğunu göstermektedir. $Fe_{13}MoTi_2BMn_2C$ esaslı kaplamanın aşınma sonrası SEM görüntülerinde abrazyif çiziklerin daha derin olduğu görülmektedir. Üç yük altında da abrazyif aşınmanın yanı sıra adhezif aşınma gözlemlenmiştir. Adhezif aşınma mekanizmasının diğer bileşimlere göre çok daha şiddetli olduğu bu kaplamada, delaminasyon aşınması da tespit edilmiştir. Ayrıca EDS analizlerinden alınan oksijen sinyali kaplamada oksidatif aşınmanın da etkili olduğunu göstermektedir. Atomik olarak %15 titanyum içeren $Fe_{12}MoTi_3BMn_2C$ esaslı kaplamanın mikroyapısı diğer kaplamalara göre oldukça farklıdır. Mikroyapı incelemeleri sırasında bu bileşimde ötektik yapının daha hakim olduğu görülmüştür. Nitekim 9N yük altında aşınma sonrası yüzeyde kırışıklıkların olduğu tespit edilmiştir. Bu da ötektik yapının aşınmaya karşı önemi bir rol oynadığını göstermektedir. Yine bu bileşimde tüm yükler için abrazyif ve adhezif aşınma mekanizması tespit edilmiştir. Ayrıca EDS analizlerine göre oksidatif aşınmanın varlığından da söz etmek mümkündür. Titanyum artışıyla birlikte M(C,B) fazlarının oranları artmış buna karşılık M_3B_2 fazlarının oranları azalmıştır. Tane sınırlarında ötektik oluşum şeklinde karşımıza çıkan M_3B_2 'nin kaplamanın aşınma direncini daha fazla arttırdığını söylemek mümkündür. Kaplama içerisinde bulunan yumuşak matris fazı aşınma sonrası yüzeyden kalkmış, sert fazlar ise aşındırıcıya karşı direnerek tepe noktaları olarak kalmıştır. Bu da genel olarak kaplama tabakasının aşınma direncini arttırmaktadır. Ancak titanyum oranının artmasına bağlı olarak kaplama içerisinde M(C,B) sert fazları artarken M_3B_2 fazları azalmaktadır. Matris fazı ile daha uyumlu olduğu düşünülen M_3B_2 fazının azalmasıyla aşınma dirençlerinin kısmen azaldığı görülmektedir. SEM izlerinde özellikle titanyum oranının artmasıyla abrazyif çizgilerinin derinleşerek arttığı görülmüştür. Ayrıca adhezif aşınmanın da şiddetlendiği tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak yer yer delaminasyon aşınmasının gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

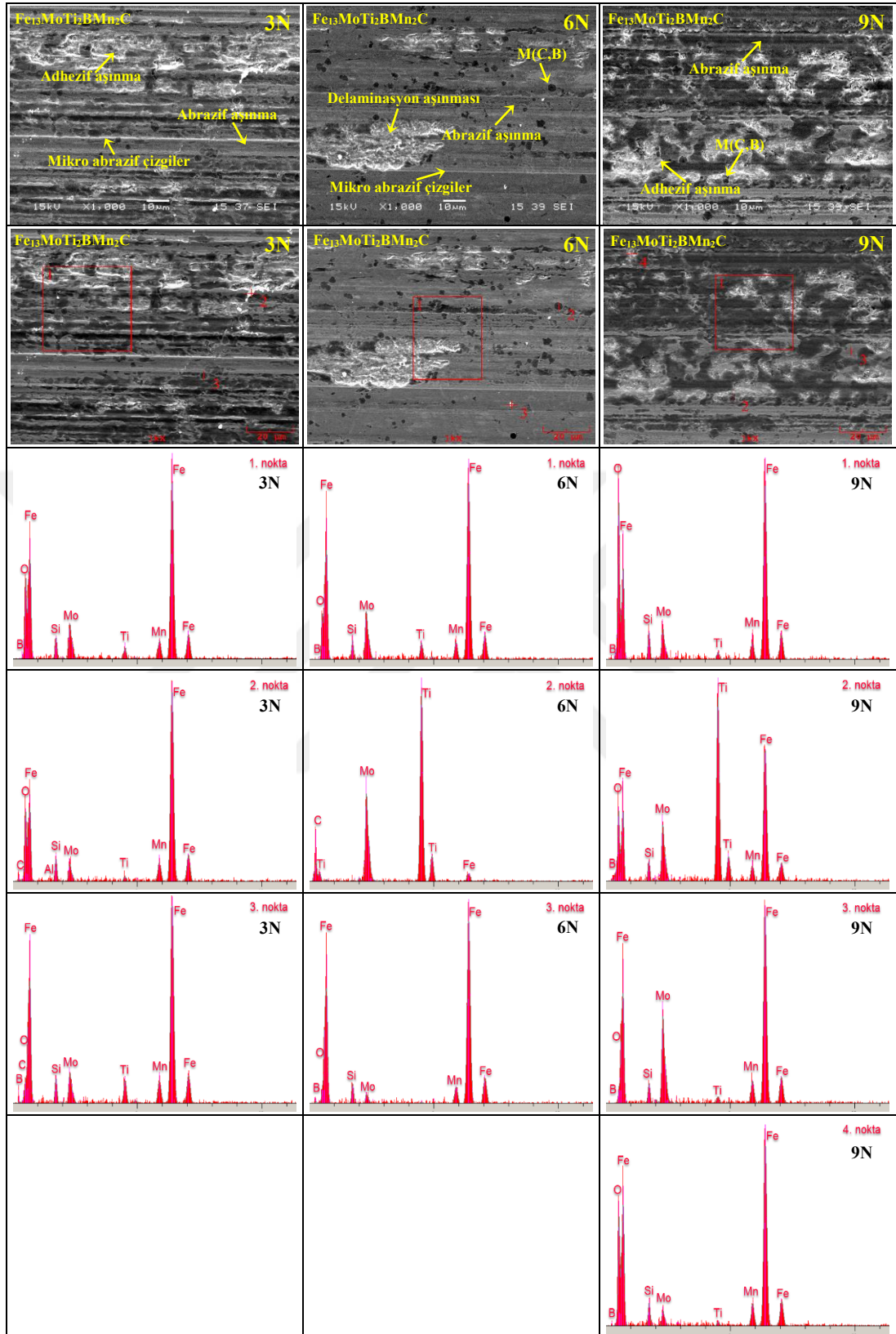


Şekil 5.25. $\text{Fe}_{15}\text{MoBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri

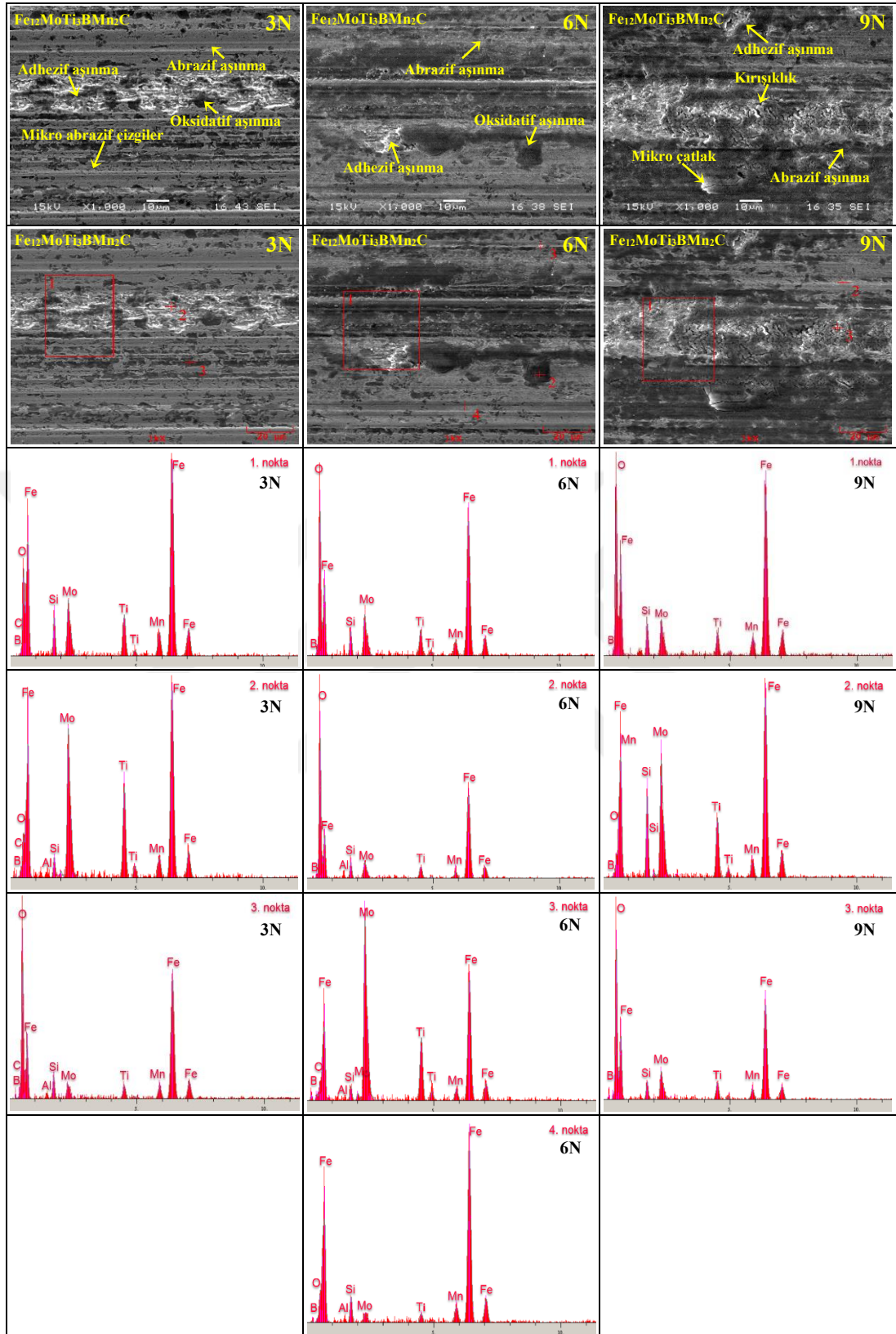
Şekil 5.29.'da $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTi}_x\text{BMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara uygulanan aşınma testleri sonucu elde edilen sürtünme katsayısı-yük grafiği yer almaktadır. Genel olarak artan aşınma yüküne karşılık sürtünme katsayısının azaldığını söylemek mümkündür. Ancak örtü bileşimindeki elementel değişimin sürtünme katsayısı üzerinde doğrusal bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.26. $\text{Fe}_{14}\text{MoTiBMn}_2\text{C}$ esası sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri

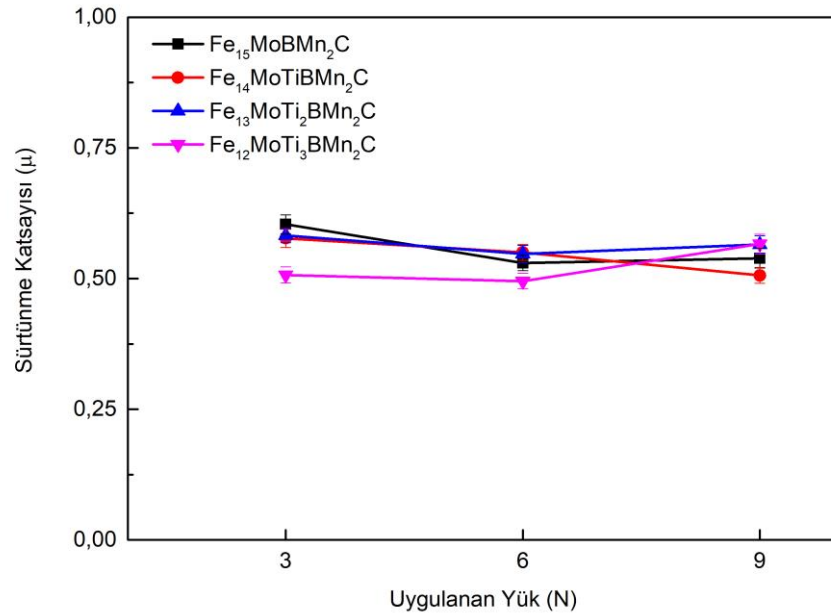


Şekil 5.27. $\text{Fe}_{13}\text{MoTi}_2\text{BMn}_2\text{C}$ eşaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri



Şekil 5.28. $\text{Fe}_{12}\text{MoTi}_3\text{BMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri

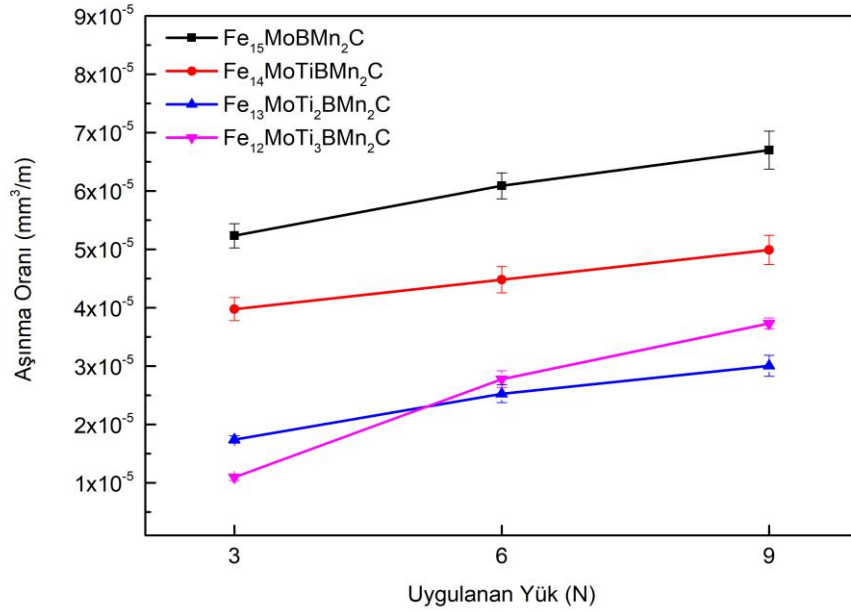
Titanyumun kolay oksitlenebilir olması sebebiyle yüzeyde oluşan oksit tabakası sonucu sürtünme katsayısında düşüş meydana gelebilmekte olduğu, ancak artan oksit tabakasının artan yüklerle birlikte parçalanarak sürtünme katsayısını arttırma yönünde hareket edebileceği bildirilmiştir [102]. Genel durumdan farklı olarak artan yük ile birlikte artış gösteren sürtünme katsayısı eğrileri literatür ile uyum içerisindedir.



Şekil 5.29. Fe_(15-x)MoTi_xBMn₂C (x=0,1,2,3) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri

Şekil 5.30.'da Fe_(15-x)MoTi_xBMn₂C (x=0,1,2,3) esaslı sert dolgu kaplamaların değişken yükler altında gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda elde edilen yüke bağlı aşınma oranı grafiği yer almaktadır. Şekil 5.17.-Şekil 5.18.'de yer alan sertlik değerlerinden grup içerisinde yer alan kaplamaların ortalama sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Literatürde sertlik değerleri aynı olan yüzeylerin, mikroyapı ve kimyasal bileşim gibi faktörlere bağlı olarak aşınma oranlarının farklı olabileceği bildirilmektedir [10,103]. Nitekim grup içerisinde yer alan kaplamaların sertlik değerleri birbirine yakinken aşınma oranları birbirinden farklıdır. Tüm kaplamalarda artan yüklerle beraber aşınma oranı değerleri artış göstermiştir. Aynı zamanda literatüre uygun olarak [104] artan titanyum oranıyla birlikte kaplamaların aşınma direncinin de genel anlamda arttığını söylemek mümkündür. Artan titanyum oranına karşılık kaplamalardaki M(C,B) fazı artış gösterirken M₃B₂ fazı azalmış ve bunun yanında M₂(Ti,Mo) fazı oluşmaya başlamıştır.

Literatürde $M_2(Ti,Mo)$ fazının darbe direnci düşük olan kırılğan bir faz olduğu ve yüke bağlı olarak sürtünme katsayısını arttırabileceği ve aşınma direncini azaltabileceği bildirilmektedir [105,106]. $Fe_{12}MoTi_3Mn_2C$ esaslı kaplamanın 6N ve 9N yükler altındaki artan aşınma oranı davranışı bu şekilde açıklanabilir.



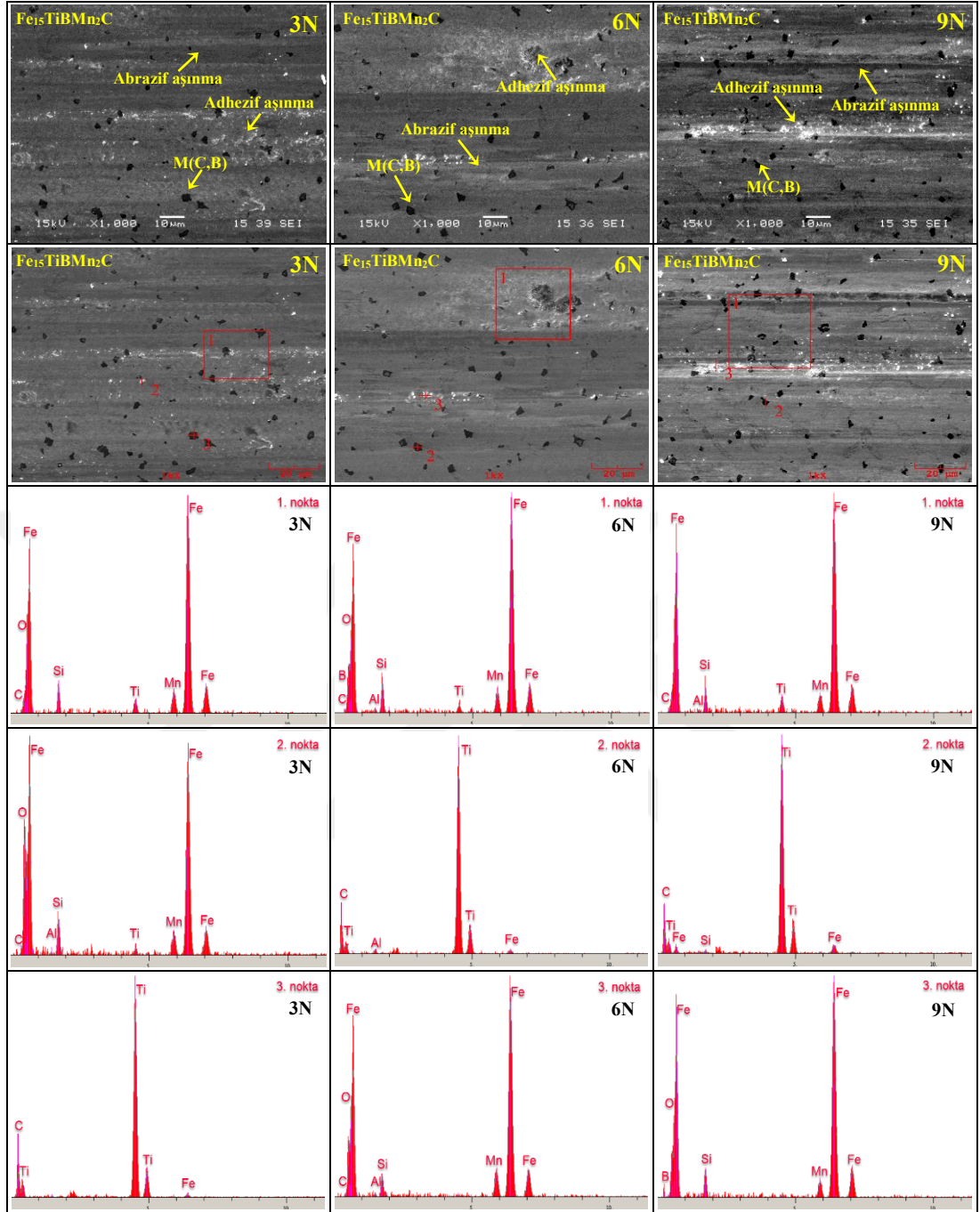
Şekil 5.30. $Fe_{(15-x)}MoTi_xBMn_2C$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası yüke bağlı aşınma oranı değerleri

5.4.2. $Fe_{(15-x)}Mo_xTiBMn_2C$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı alaşımlar

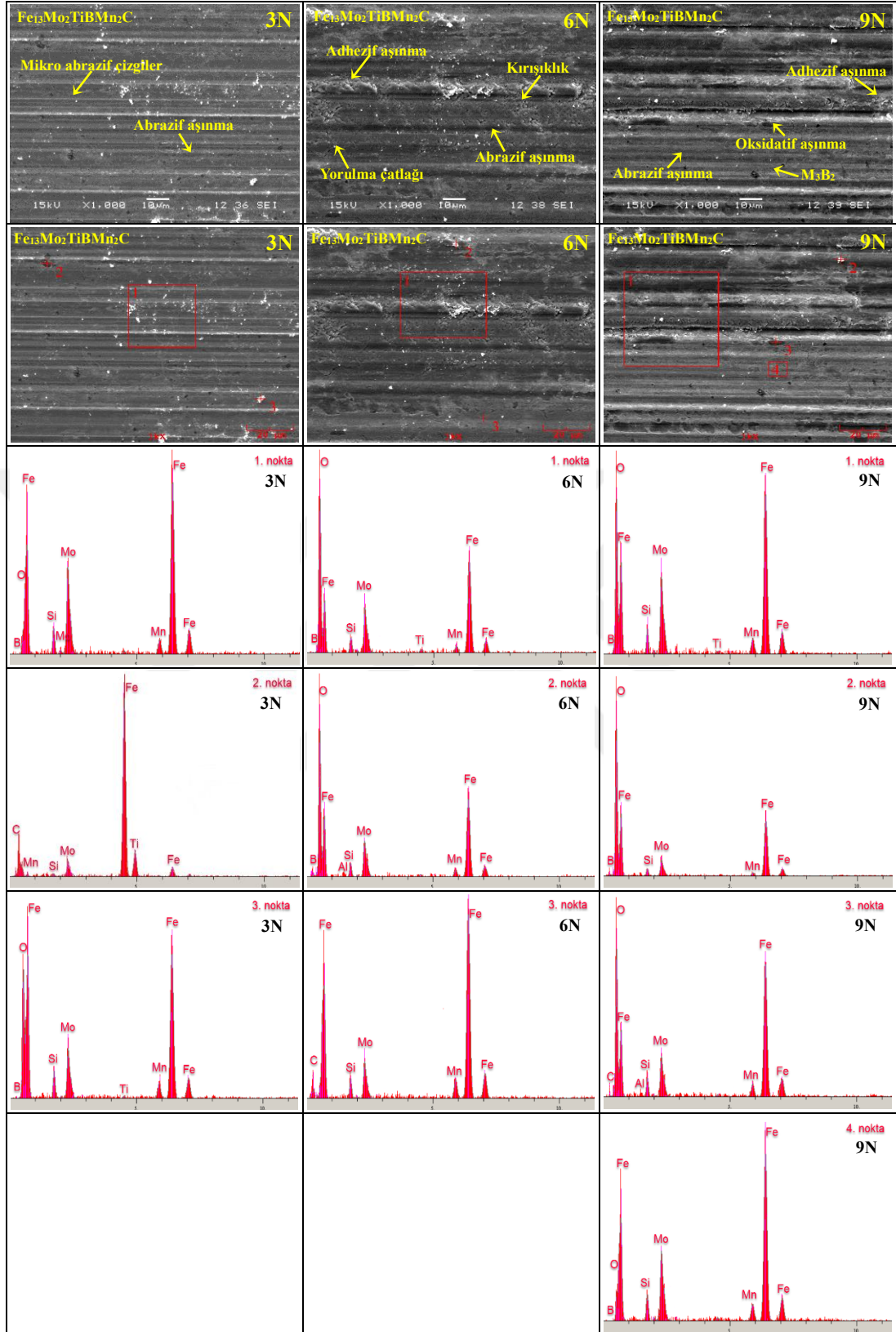
Şekil 5.31.- Şekil 5.33. ve Şekil 5.26.'da $Fe_{(15-x)}Mo_xTiBMn_2C$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı kaplamalara değişken yükler altında uygulanan aşınma testleri sonrasında yüzeyler üzerinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri yer almaktadır. $Fe_{15}TiBMn_2C$ esaslı kaplamanın SEM görüntülerinde aşınma yönüne paralel uzanan hafif çizikler, abrazif aşınmanın hakim olduğunu göstermektedir. Matrisin şiddetli aşınması sebebiyle $M(C,B)$ sert fazları tepe noktaları olarak kalmıştır. Ayrıca 6N ve 9N yükler altında abrazif aşınmanın yanı sıra yer yer adhezif aşınma da görülmektedir. Şekil 5.31.'de verilen EDS analizleri, bu kaplama için oksidatif aşınmanın da olduğunu göstermektedir. $Fe_{13}Mo_2TiBMn_2C$ esaslı bileşimde molibden ilavesiyle nispeten daha sağlam bir matris $M(C,B)$ 'ye daha güçlü bir destek sağlamış ve aşınma direncini etkili bir şekilde arttırmıştır. Şekil 5.32.'de görülen SEM görüntülerinden aşınma mekanizmasının abrazif karakterde olduğu görülmektedir. Ayrıca yükün artmasıyla

birlikte abrazif çiziklerin derinliği ve genişliği de artmıştır. Molibden ilavesinin at. %12,5 olduğu $\text{Fe}_{12,5}\text{Mo}_{2,5}\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı kaplamanın SEM görüntülerinde abrazif aşınmayla birlikte adhezif aşınmanın da etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca şiddetli adhezif aşınma sonrası delaminasyon aşınması da gözlemlenmiştir. Yine nispeten sağlam bir matris sert fazları desteklemiş ve bu sayede aşınma direncini arttırmıştır.

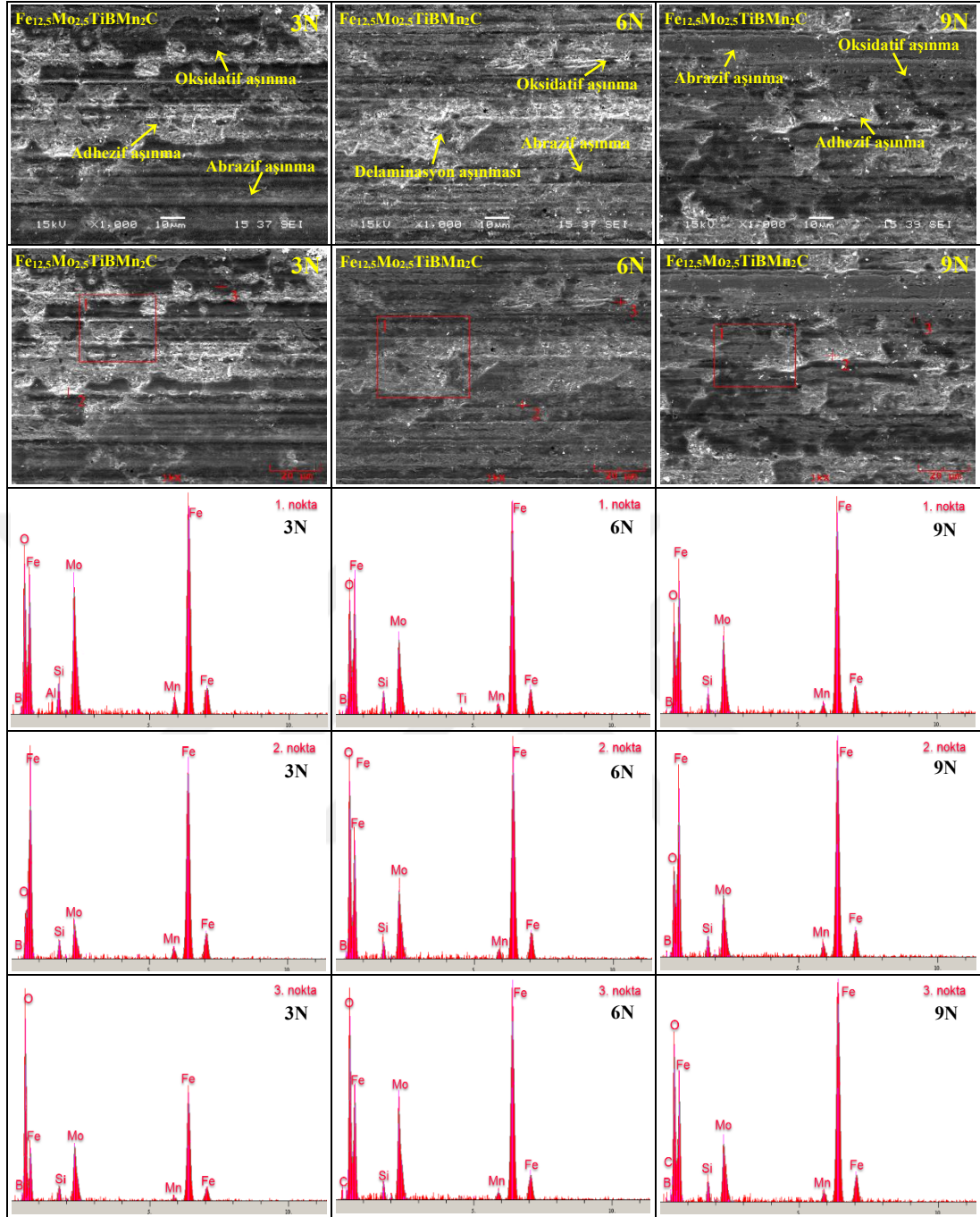
Şekil 5.34.'te $\text{Fe}_{(15-x)}\text{Mo}_x\text{TiBMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı kaplamalara uygulanan aşınma testleri sonucu elde edilen sürtünme katsayısı-yük grafiği yer almaktadır. Grafikten elektrot örtü bileşiminde yapılan değişikliğin ve aşınma yükünün değiştirilmesinin sürtünme katsayısı üzerinde doğrusal bir etki oluşturmadığı anlaşılmaktadır. 3N yük için en düşük sürtünme katsayısı değeri 0,519 ile $\text{Fe}_{13}\text{Mo}_2\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı kaplamadan, 6N ve 9N yük için ise sırasıyla 0,512 ve 0,506 değerleri ile en düşük sürtünme katsayısı değeri $\text{Fe}_{14}\text{MoTiBMn}_2\text{C}$ esaslı kaplamalardan elde edilmiştir. Sert dolgu kaplamalar kompozit mikroyapı özelliklerine sahiptir ve oluşan fazlar sürtünme katsayısı üzerinde etkilidir. Bu sebeple sürtünme katsayısı değeri elektrot bileşimi ve aşınma yükünden bağımsız davranabilmektedir [49]. Şekil 5.35.'te $\text{Fe}_{(15-x)}\text{Mo}_x\text{TiBMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı sert dolgu kaplamaların değişken yükler altında gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda elde edilen yüke bağlı aşınma oranları grafiği yer almaktadır. Elde edilen grafikten, genel olarak aşınma direncinin; artan molibden oranıyla arttığı, artan yükle birlikte ise azaldığı söylenebilir. $\text{Fe}_{15}\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı kaplamada molibden bulunmamaktadır. Molibdenin bulunmadığı bu yapının aşınma sonrası SEM görüntülerinden matrisin yoğun aşınması sonucu M(C,B) tepe noktalarının açığa çıktığı görülmektedir. Artan molibden oranıyla birlikte kaplamada M(C,B) sert fazının yanında M_3B_2 sert fazı oluşmaya başlamıştır. Ayrıca aşınma direnci yüksek yüzeylerin eldesi için kaplamadaki sert fazların yanında matris sertliğinin de etkili olduğu bildirilmektedir [104].



Şekil 5.31. $\text{Fe}_{15}\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri

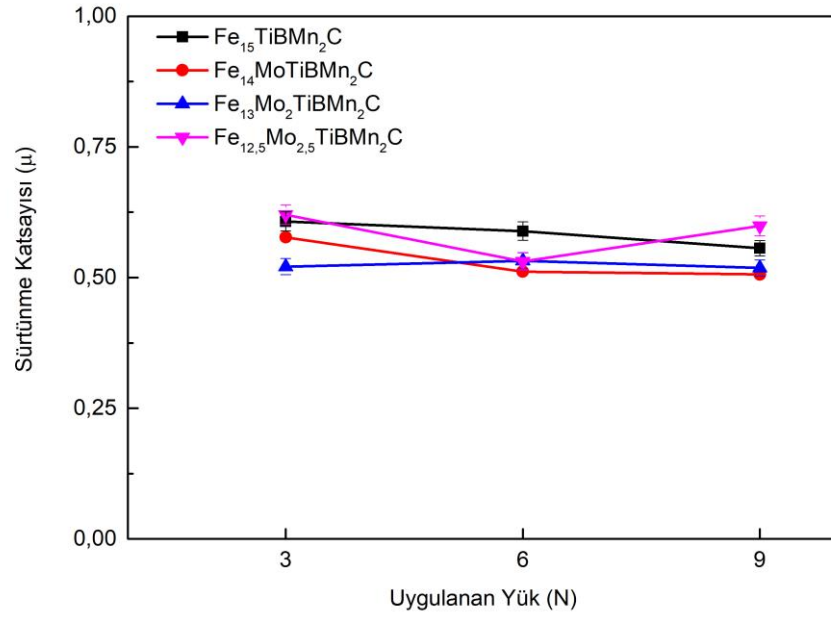


Şekil 5.32. $\text{Fe}_{13}\text{Mo}_2\text{TiBMn}_2\text{C}$ eşaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri

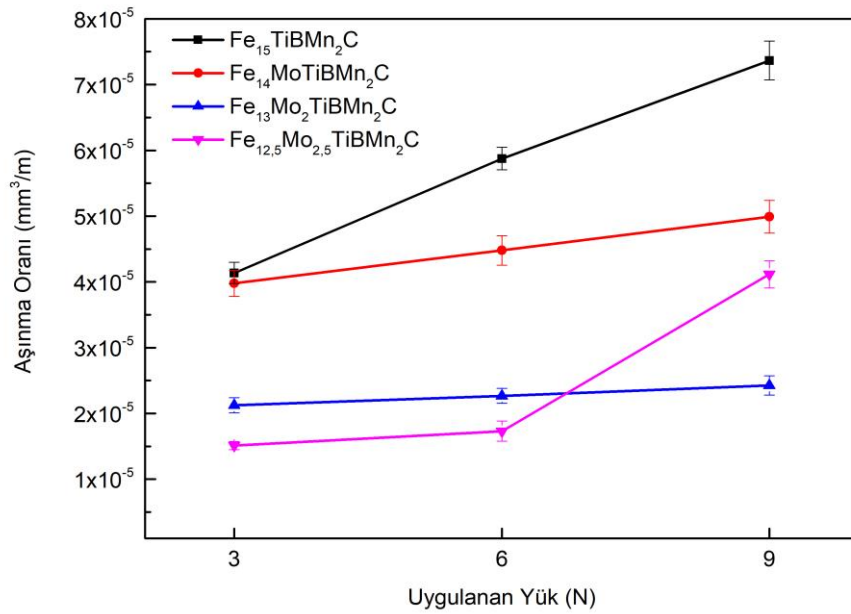


Şekil 5.33. $\text{Fe}_{12.5}\text{Mo}_{2.5}\text{TiBMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri

Buna paralel olarak Şekil 5.8.-Şekil 5.10 ve Şekil 5.4.'te verilen MAP analizlerine göre molibden artışıyla birlikte matris sertliğinin artışında olumlu etkiye sahip olan molibden miktarının arttığı görülmektedir. Artan molibden oranıyla birlikte mikroyapının ağsı görünümüne sahip sert fazlardan oluştuğu görülmüştür. Elde edilen ağsı yapı sonucu sertliğin düşmesi ancak aşınma direncinin artması Balaguru ve ark. çalışması ile uyum içerisindedir [54].



Şekil 5.34. Fe_(15-x)Mo_xTiBMn₂C (x=0,1,2,(5/2)) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri



Şekil 5.35. Fe_(15-x)Mo_xTiBMn₂C (x=0,1,2,(5/2)) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası yüke bağlı aşınma oranı değerleri

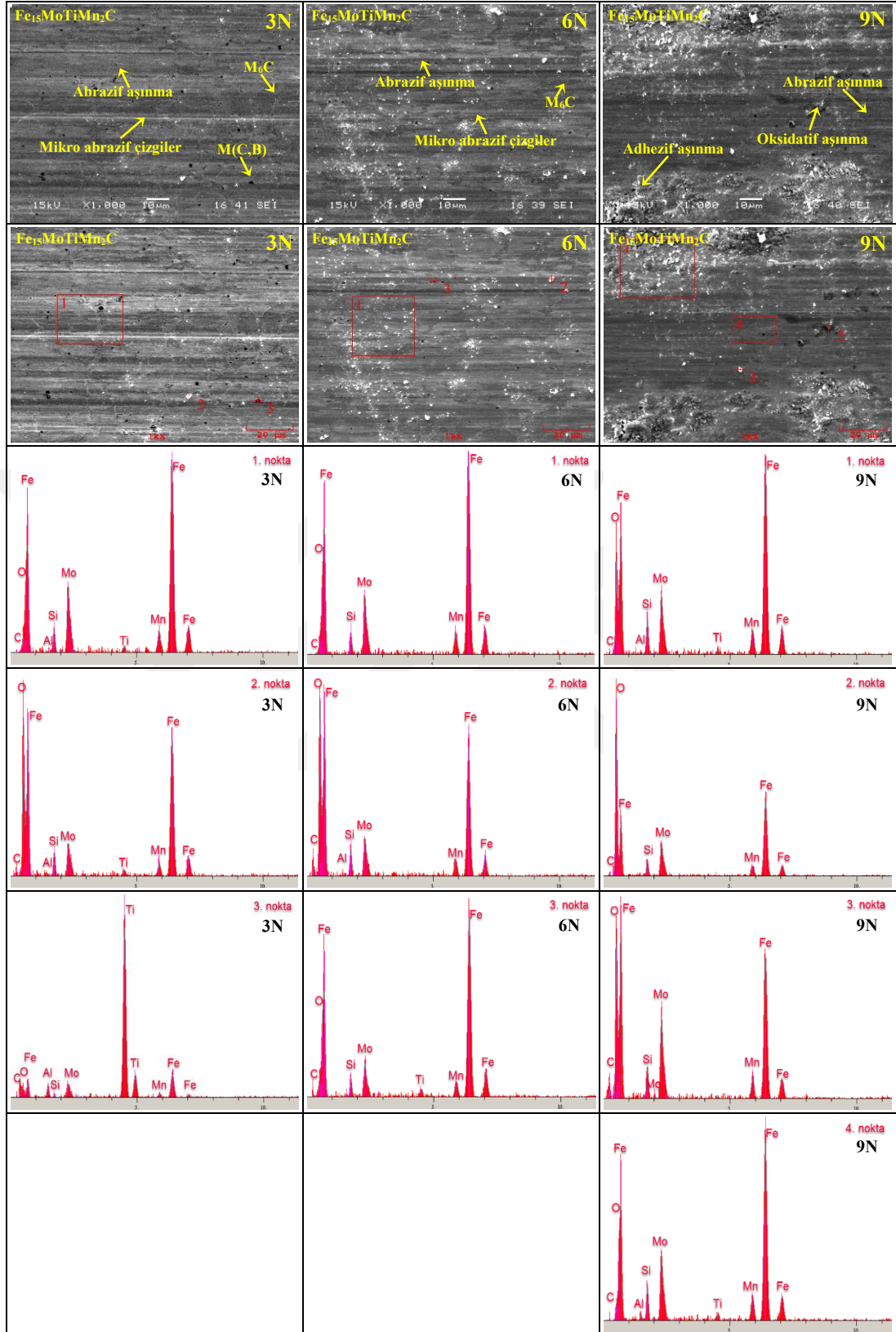
5.4.3. Fe_(15-x)MoTiB_xMn₂C (x=0,1,2,3) esaslı alaşımlar

Şekil 5.36.-Şekil 5.38. ve Şekil 5.26.'da Fe_(15-x)MoTiB_xMn₂C (x=0,1,2,3) esaslı sert dolgu kaplamalara değişken yükler altında uygulanan aşınma testleri sonrasında yüzeyler üzerinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri yer almaktadır. 3N'luk

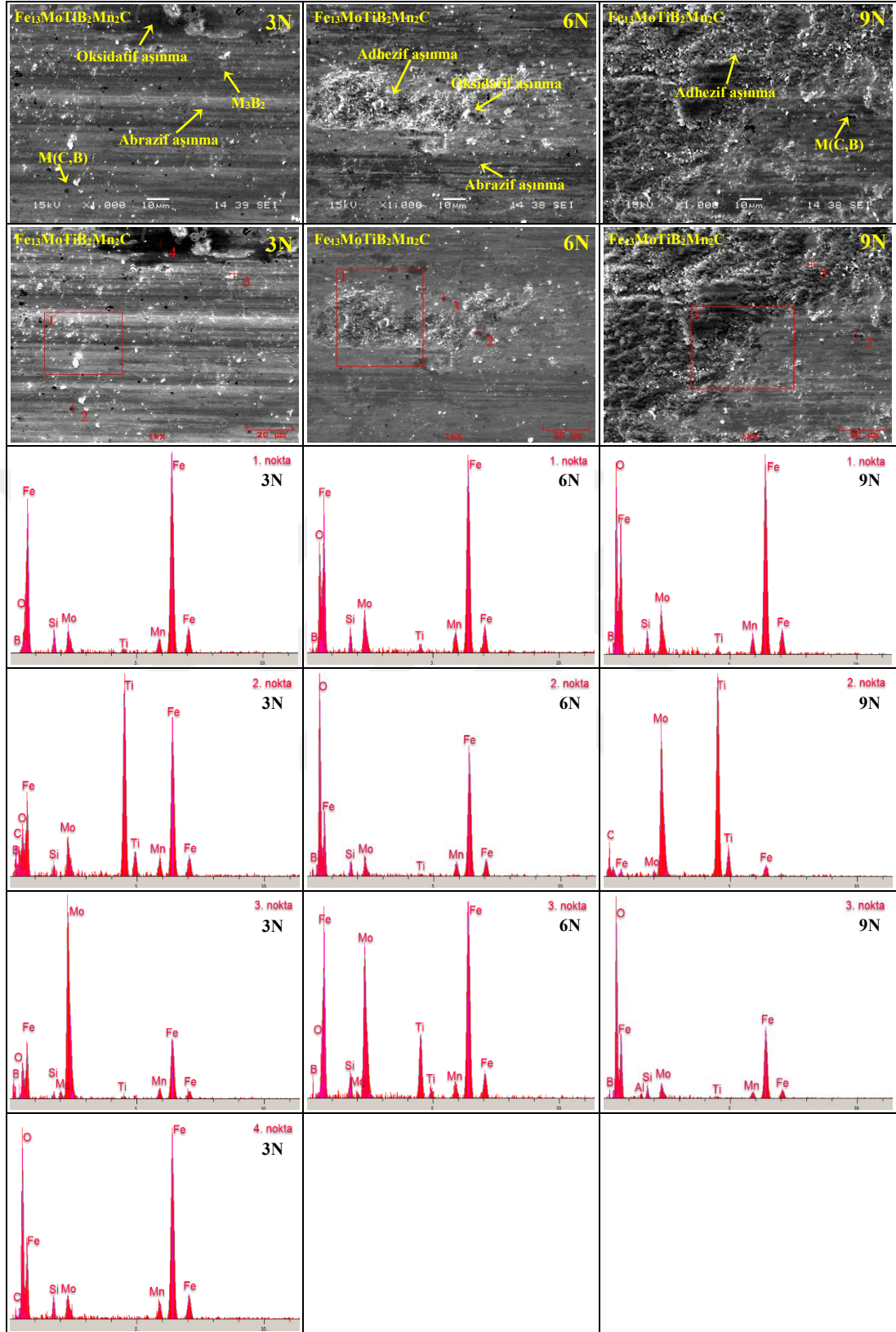
yük ile gerçekleştirilen aşınma testlerinin SEM görüntülerinde genel olarak kayma doğrultusunda oluşan çiziklerin varlığı görülmekte ve bu da mikro abrazif aşınmayı işaret etmektedir. EDS analizleri sonucunda $\text{Fe}_{13}\text{MoTiBMn}_2\text{C}$ esaslı kaplamanın belirli bölgeleri oksijen sinyali de vermektedir. Bu durum kaplamada oksidatif aşınmanın da hakim olduğunu göstermektedir. SEM görüntüleri artan yük ile birlikte kaplamalarda adhezyon sonrası döküntü ve pullanmaların olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca EDS analizlerinden artan yük ile birlikte oksijen sinyalinin arttığı görülmektedir. Bu da kaplamalarda oksidatif aşınma mekanizmasının da hakim olduğunun göstergesidir. Sonuç olarak $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTiB}_x\text{Mn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı kaplamalarda etkili olan aşınma mekanizmalarının; mikro abrazif, adhezif ve oksidatif karakterli olduğu söylenebilir.

Şekil 5.39.'da $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTiB}_x\text{Mn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara uygulanan aşınma testleri sonucu elde edilen sürtünme katsayısı-yük grafiği yer almaktadır. Genel olarak artan bor oranı ve artan yük ile birlikte sürtünme katsayısının azaldığı söylenebilir. Literatürde M_3B_2 içeren kaplamaların aşınma sırasında kararlı bir hal alana kadar sürtünme katsayısının arttığı, kararlı hale geldikten sonra sürtünme katsayısında az da olsa düşüş görülebildiği belirtilmektedir [107]. Artan yük ile birlikte sürtünme katsayısında görülen azalma trendi, sürtünmenin ileri safhalarında yüzeydeki pürüzlülüğün azalmasıyla birlikte artan sıcaklığa bağlı olarak yoğun oksit tabakasının oluşumu şeklinde açıklanabilir. Nitekim aşınma sonrası alınan EDS analizlerinde artan yük ile birlikte oksijen sinyalinin arttığı görülmektedir.

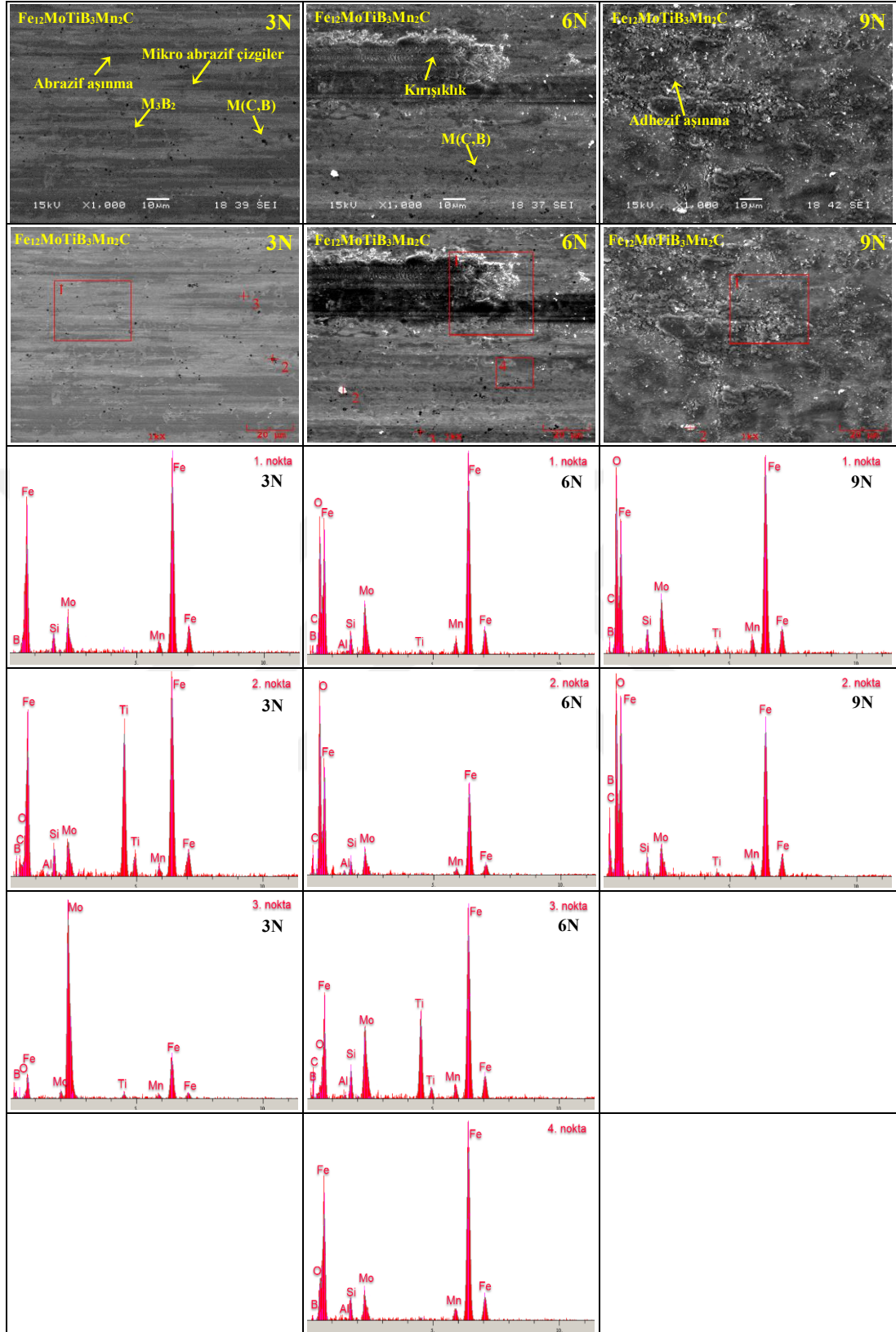
Şekil 5.40.'ta $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTiB}_x\text{Mn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamaların değişken yükler altında gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda elde edilen yüke bağlı aşınma oranları grafiği yer almaktadır. Artan bor oranına karşılık kaplamaların aşınma oranlarının azaldığı görülmektedir. $\text{Fe}_{15}\text{MoTiMn}_2\text{C}$ esaslı kaplamada bor bulunmamaktadır ve grup içerisinde en yüksek aşınma oranı bu kaplamadan elde edilmiştir. Mikroyapıda hakim olan fazlar M_6C ve MC 'dir. İskelet formunda katılan M_6C 'nin mikro sertliği ~ 1500 HV'dir ve aşınma performansının daha yüksek sertlikteki karbürlere göre daha kötü olduğu bildirilmektedir [108].



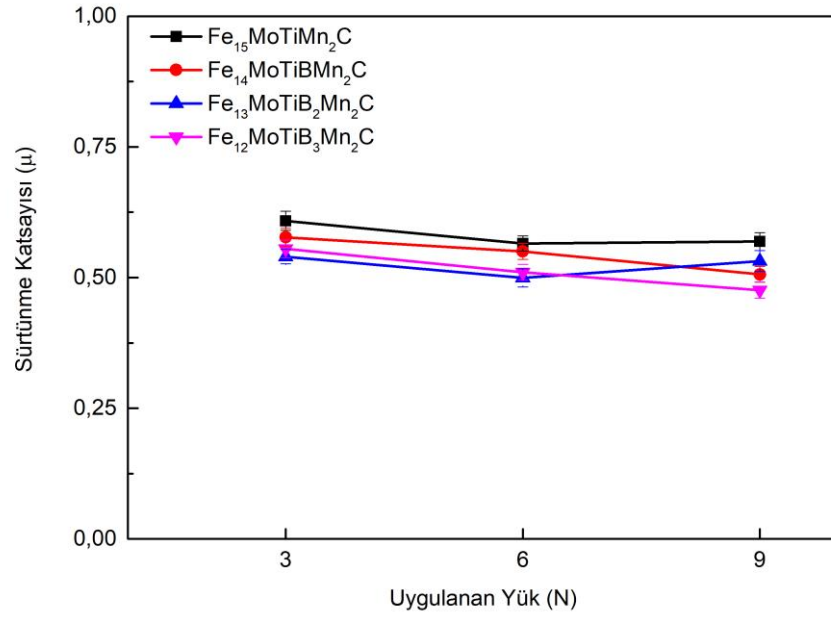
Şekil 5.36. $\text{Fe}_{15}\text{MoTiMn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri



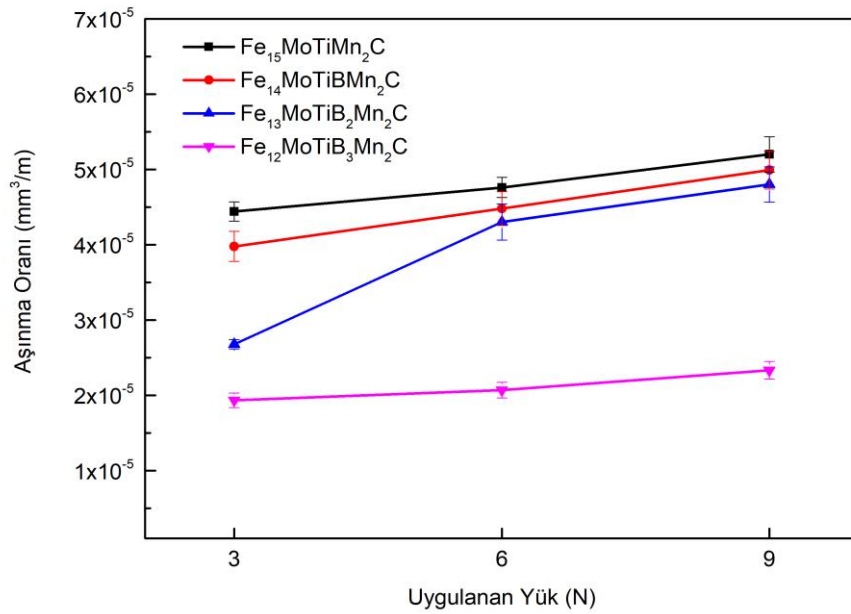
Şekil 5.37. $\text{Fe}_{13}\text{MoTiB}_2\text{Mn}_2\text{C}$ esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri



Şekil 5.38. $\text{Fe}_{12}\text{MoTiB}_3\text{Mn}_2\text{C}$ eşaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri



Şekil 5.39. $Fe_{(15-x)}MoTiB_xMn_2C$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri



Şekil 5.40. $Fe_{(15-x)}MoTiB_xMn_2C$ ($x=0,1,2,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası yüke bağlı aşınma oranı değerleri

Grup içerisinde yer alan diğer bileşimler sistematik olarak artacak şekilde bor ihtiva etmektedir. Bor ilavesiyle birlikte sistemde $M(C,B)$ 'nin yanında sertliği, 2200-2800 HV olduğu bilinen M_3B_2 fazı ve ~1500-1780 HV olduğu bilinen $M_2(C,B)$ [49], [108] fazı oluşmaya başlamıştır. Artan bor oranıyla birlikte kaplama tabakasında bulunan sert fazların hacimsel oranları artış göstermiş ve sertlik artmıştır. Artan sertlikle

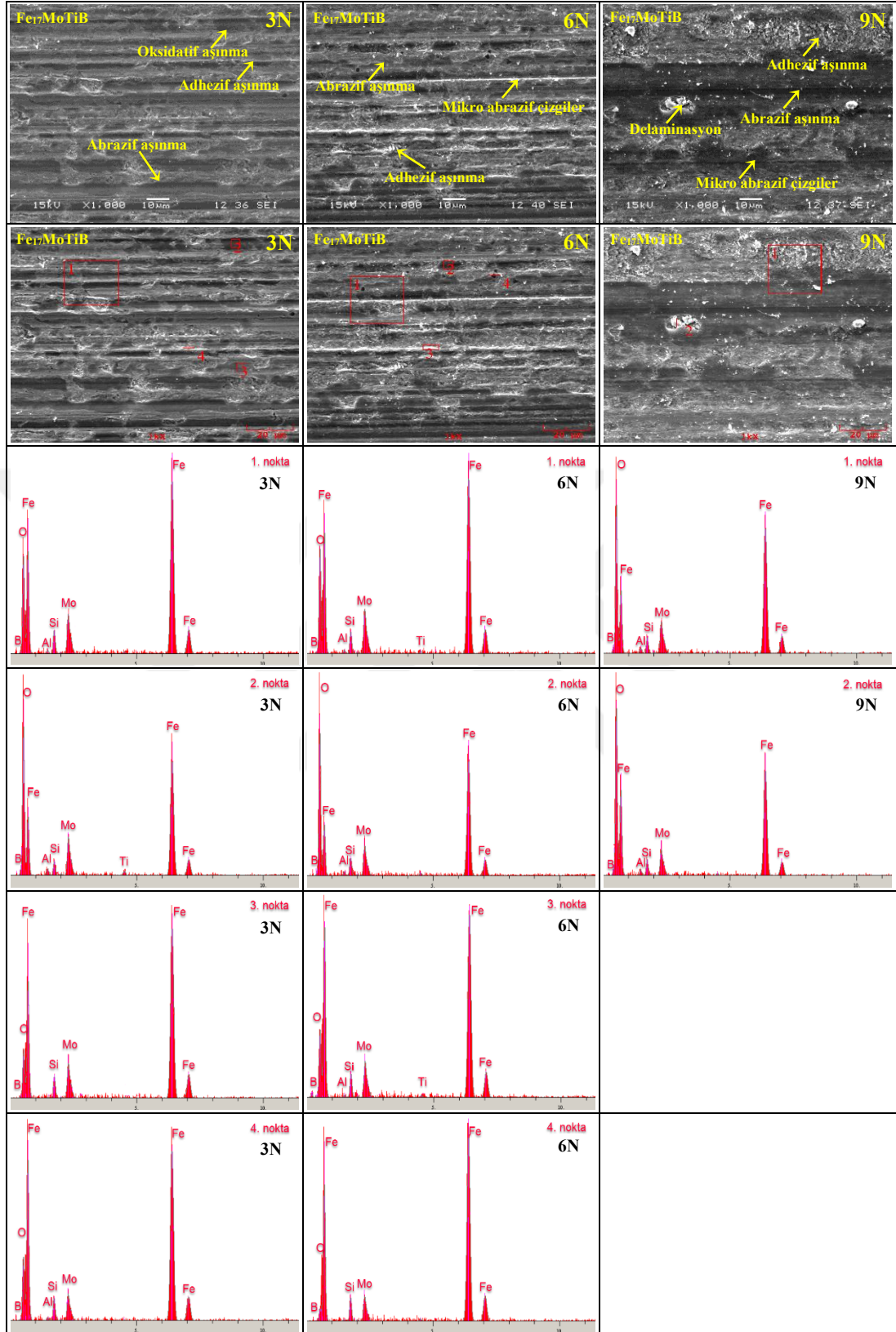
beraber kaplamaların aşınma dirençleri de artmıştır. Elde edilen sonuçlar Wang ve ark. yapmış oldukları çalışma ile uyum içerisinde [87].

5.4.4. $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı alaşımlar

Şekil 5.41. ve Şekil 5.26.'da $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara değişken yükler altında uygulanan aşınma testleri sonrasında yüzeyler üzerinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri yer almaktadır. SEM görüntülerinden, $\text{Fe}_{17}\text{MoTiB}$ esaslı kaplamada düşük yükler (3N-6N) altında abrazyif ve adhezif aşınmanın hakim olduğu görülmektedir. Ayrıca EDS analizlerinde yer alan oksijen sinyali kaplamada oksidatif aşınmanın da hakim olduğunun göstergesidir. 9N yük altında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası alınan SEM analizinde ise adhezif aşınmanın arttığı, yer yer delaminasyon aşınmasının da olduğu görülmektedir. Bunun yanında yine kaplamada abrazyif aşınma ve EDS analizlerine göre oksidatif aşınmanın da hakim olduğu görülmektedir.

Şekil 5.42.'de $\text{Fe}_{(17-3x)}\text{MoTiBMn}_{2x}\text{C}_x$ ($x=0,1$) esaslı esaslı kaplamalara uygulanan aşınma testleri sonucu elde edilen sürtünme katsayısı-yük grafiği yer almaktadır. Elde edilen grafikten artan yük ile birlikte sürtünme katsayısının azaldığını söylemek mümkündür. Buna karşı elektrot örtü bileşiminde yapılan değişikliğin sürtünme katsayısı üzerine doğrusal bir etkisi olmadığını söylemek mümkündür. 3N ve 9N'luk yükler için $\text{Fe}_{17}\text{MoTiB}$ esaslı kaplamanın, 6N'luk yük için ise $\text{Fe}_{14}\text{MoTiBMn}_2\text{C}$ esaslı kaplamanın daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğunu söylemek mümkündür. Kompozit karakterli mikroyapılarda sürtünme katsayısının yük ve/veya bileşimden bağımsız davranması olası bir durum olarak değerlendirilebilmektedir [11].

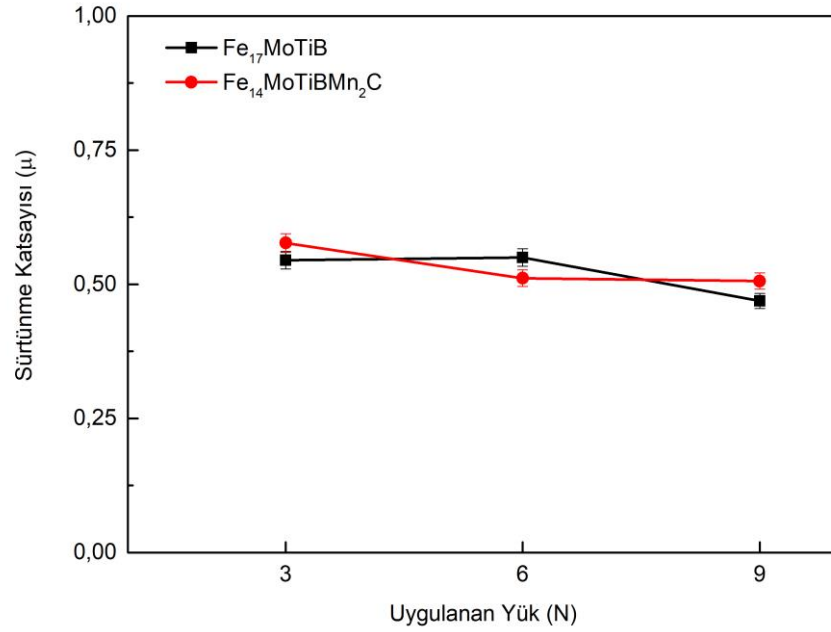
Şekil 5.43.'te $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamaların değişken yükler altında gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda elde edilen yüke bağlı aşınma oranları grafiği yer almaktadır. Elde edilen grafikten 3N ve 6N'luk yüklerde $\text{Fe}_{17}\text{MoTiB}$ esaslı kaplamanın daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu, 9N'luk yükte ise $\text{Fe}_{14}\text{MoTiBMn}_2\text{C}$ esaslı kaplamanın daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; Fe-Mo-Ti-B sistemine



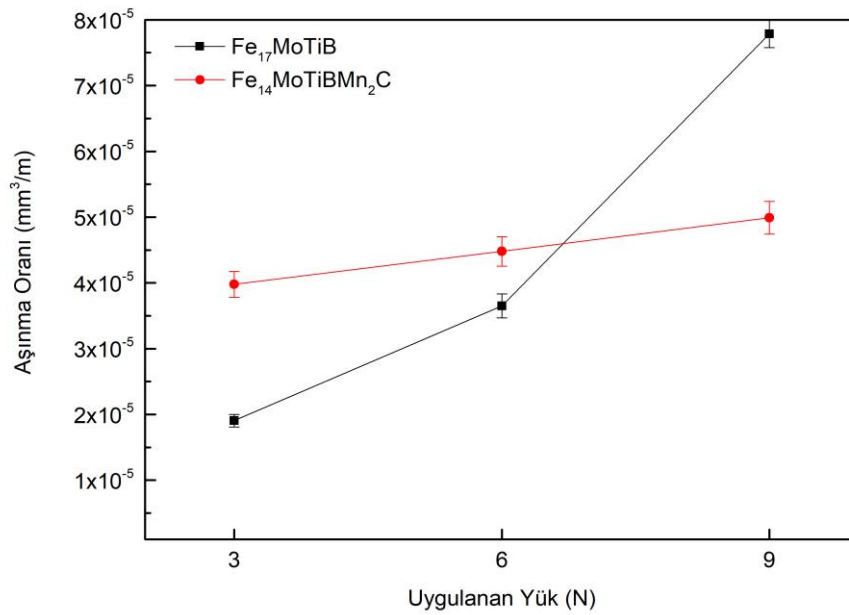
Şekil 5.41. Fe₁₇MoTiB esaslı sert dolgu kaplamaya 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası SEM ve EDS analizleri

manganez+karbon ilavesi sonucu M(C,B)'nin hacimsel fraksiyonu artış gösterirken

ötektik formdaki α -Fe+ M_3B_2 fazı mikroyapıda azalan yönde hareket edecek şekilde yerini M_3B_2 'ye bırakmıştır. Sonuç olarak $Fe_{17}MoTiB$ sistemindeki borür ötektiklerinin düşük yükler altında $M(C,B)$ fazına göre aşınmada daha etkili olduğu ancak yük arttırıldığında sertliği M_3B_2 'ye göre daha yüksek olan $M(C,B)$ fazının daha etkili olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 5.42. $Fe_{(17-x)}MoTiBMn_{0,66x}C_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri



Şekil 5.43. $Fe_{(17-x)}MoTiBMn_{0,66x}C_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı sert dolgu kaplamalara 3N, 6N ve 9N yük altında uygulanan aşınma testi sonrası yüke bağlı aşınma oranı değerleri

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada; Fe-Mo-Ti-B-Mn-C esaslı 11 farklı bileşimde örtülü sert dolgu elektrodu üretilmiştir. Başlangıç malzemesi olarak ferro alaşım tozlarının kullanıldığı çalışmada kaplama için altlık malzeme olarak AISI 1010 çelik plakalar kullanılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen sert dolgu elektrotlarının örtülerinde optimum seviyede flaks ve bağlayıcı kullanılırken maksimum seviyede ferro alaşım tozları kullanılmıştır. Elektrot üretimi esnasında tek bir elektrodun dahi üretiminin yapılabileceği özel bir kalıp kullanılmıştır. Yüzey alaşımlama işlemleri sonrasında mikroyapı incelemeleri, sertlik testleri ve aşınma testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

- Sert yüzey alaşımlama işlemi sonrasında kaplama ile altlık malzeme arasında güçlü metalurjik bağlanmanın olduğu ve kaplama ile altlık malzemenin birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca yüzeyde tek pasoda oluşturulan kaplama kalınlığının 4-6 mm arasında olduğu belirlenmiştir.
- $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTi}_x\text{BMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı kaplamalarda artan titanyum oranının kaplamaya etkisi incelenmiştir. Titanyum içermeyen kaplamanın matris fazında γ -Fe fazı hakimken titanyum artışıyla birlikte matris fazda α -Fe hakim hale gelmiştir. Artan titanyum oranıyla birlikte M(C,B) fazının morfolojisi eş eksenli tanelerden uzuk çubuksu yapıya dönüşmüştür. Yine artan titanyum oranıyla birlikte daha çok tane sınırlarında dağılım gösteren M_3B_2 yapısı azalmıştır. XRD analizlerine göre kaplamaların majör olarak α -(Fe,Mn,Mo), γ -(Fe,Mn,Mo), M(C,B), M_3B_2 minör olarak ise M_6C , $\text{M}_{2,3}(\text{C,B})$, $\text{M}_2(\text{Ti,Mo})$ fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{Mo}_x\text{TiBMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı kaplamalarda artan molibden oranının yapıya etkisi incelenmiştir.

Molibden içermeyen kaplamanın matris fazının martenzit olduğu, artan molibden oranıyla birlikte matris fazın α -Fe olarak katılaştığı tespit edilmiştir. Artan molibden oranıyla M_3B_2 fazının morfolojisi değişime uğramıştır. XRD analizlerine göre kaplamaların majör olarak α -(Fe,Mn,Mo), M(C,B), M_3B_2 minör olarak ise M_6C , $M_2(C,B)$ fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir. $Fe_{(15-x)}MoTiB_xMn_2C$ ($x=0,1,2,3$) esaslı kaplamalarda artan bor oranının kaplama üzerine etkisi incelenmiştir. Bor içermeyen kaplamanın matrisinde γ -(Fe,Mo,Mn) fazı hakimken, bor oranının artmasıyla birlikte α -(Fe,Mo,Mn) fazı hakim hale gelmiştir. Ayrıca bor içermeyen kaplamada yüksek hız takım çeliklerinde görülen α -(Fe,Mo,Mn)+ M_6C ötekliği genişçe yer teşkil etmektedir. Bileşime ilave edilen bor ile birlikte kaplamada M(C,B), M_3B_2 , ve $M_2(C,B)$ fazları yer almaya başlamış ve artan bor oranıyla birlikte M_3B_2 ve $M_2(C,B)$ fazlarının morfolojileri büyük ölçüde değişime uğramıştır. XRD analizlerine göre kaplamaların majör olarak α -(Fe,Mn,Mo), γ -(Fe,Mn,Mo), M(C,B), M_3B_2 minör olarak ise M_6C , $M_{2,3}(C,B)$, $M_2(Ti,Mo)$ fazlarından oluştuğunu söylemek mümkündür. Sonuç olarak alaşım bileşimindeki elementlerin ve oranlarının, kaplama tabakasının mikroyapı özelliklerini önemli derecede etkilediği tespit edilmiştir. $Fe_{(17-x)}MoTiBMn_{0,66x}C_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı kaplamalarda manganez+karbonun kaplama üzerindeki etkileri incelenmiştir. Manganez+karbon ihtiva etmeyen kaplamalarda α -Fe matris fazı içerisinde M(C,B) fazının yer aldığı, tane sınırlarında ise α -Fe+ M_3B_2 ötekliğinin oluştuğu tespit edilmiştir. Sisteme ilave edilen manganez+karbon ile birlikte yapı içerisindeki M(C,B) fazlarının hacimsel fraksiyonunun arttığı, tane sınırlarında ise M_3B_2 fazının yer aldığı tespit edilmiştir. XRD analizlerine göre kaplamanın majör olarak α -(Fe,Mo,Mn), M(C,B) ve M_3B_2 minör olarak ise $M_2(C,B)$ fazlarından oluştuğunu söylemek mümkündür.

- Sert yüzey alaşımlama işlemi sonrasında elde edilen yüzeylerin kesitinden gerçekleştirilen mikro sertlik testleri sonucunda, oluşturulan kaplama tabakasının altlık malzemeye göre sertlik değerlerinin çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Mikro sertlik ölçümleri sırasında altlık malzemedan kaplama tabakasına geçildiğinde önemli bir sertlik artışı olduğu gözlenmiştir. Kompozit karakterli mikroyapıya sahip olan kaplamalarda oluşan küçük sert fazlar

sebebiyle mikro sertlik verilerinde sertliğin alındığı noktaya göre doğal bir dalgalanma mevcuttur. Bu tür kaplamalarda mikro sertliğin yanında makro sertlik ölçümleri de tavsiye edilmektedir. Gerçekleştirilen makro sertlik ölçümleri sonucunda kaplama tabakasının altlık malzemeden çok daha yüksek sertliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Testler sonucunda en yüksek sertlik 64,10 HRC ile $\text{Fe}_{12}\text{MoTiB}_3\text{Mn}_2\text{C}$ esaslı kaplamadan, en düşük sertlik ise 21,70 HRC ile $\text{Fe}_{17}\text{MoTiB}$ esaslı kaplamadan elde edilmiştir. Titanyumun artış gösterdiği grupta ortalama makro sertlik değerlerinin çok değişim göstermediği, bunun durumun sistem içerisinde artan M(C,B) fazına karşılık azalan M_3B_2 fazından kaynaklandığı düşünülmektedir. Molibdenin etkisinin incelendiği grupta ise molibden içermeyen kaplama martenzitik matris içerisinde dağılan M(C,B) fazlarından oluşmaktadır. Bu sebeple en yüksek ortalama makro sertlik değerlerine sahip olduğu düşünülmektedir. Artan molibden oranına karşılık sertlik değerlerinde doğrusal bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. Bu durumun artan molibden oranına karşılık sistemde değişen ötektik oluşumlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bor etkisinin incelendiği grupta ise artan bor oranına karşılık sistem içerisinde oluşan sert fazların hacimsel fraksiyonunun arttığı tespit edilmiştir. Sert fazların hacimsel fraksiyonundaki artışın sertliğin artışı desteklediği düşünülmektedir. Manganez+karbon etkisinin incelendiği kaplamada sistem içerisine ilave edilen manganez+karbonun M(C,B) fazının hacimsel fraksiyonunun artışına sebep olduğu, buna karşılık olarak sertliğin arttığı tespit edilmiştir.

- Alaşımlanmış yüzeylere uygulanan aşınma testleri sonucu sürtünme katsayısı değerleri $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTi}_x\text{BMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı kaplamalar için 0,495-0,604 arasında değişim göstermiştir. Sürtünme katsayısının genel olarak artan yüklerle birlikte azaldığını söylemek mümkündür. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{Mo}_x\text{TiBMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı kaplamalar için sürtünme katsayısı değerleri 0,506-0,621 arasında değişim göstermiştir. Elde edilen sürtünme katsayısı verilerinin molibden veya yük artışı ile birlikte doğrusal bir değişim göstermediğini söylemek mümkündür. $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTiB}_x\text{Mn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı kaplamalar için sürtünme katsayısı değerleri 0,476-0,608 arasında değişim göstermiştir. Elde edilen verilerden artan bor oranı ve artan yük ile birlikte sürtünme katsayısı

değerlerinin düştüğü söylenebilir. $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı kaplamalar için 0,469-0,577 değerleri arasında değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Elde edilen verilerden sürtünme katsayısı değerlerinin doğrusal olarak değişim göstermediğini söylemek mümkündür. Aşınma testleri sonrası alınan SEM görüntülerinden kaplamalarda genel olarak abrazif, mikro-abrazif, adhezif ve oksidatif aşınma mekanizmalarının hakim olduğu, bunların yanında delaminasyon ve kırışıklık gibi aşınma mekanizmalarının da etkili olduğu tespit edilmiştir. Aşınma testleri sonrasında $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTi}_x\text{BMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı kaplamalar için $6,7 \times 10^{-5}$ - $1,095 \times 10^{-5}$ mm³/m, $\text{Fe}_{(15-x)}\text{Mo}_x\text{TiBMn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,(5/2)$) esaslı kaplamalar için $7,365 \times 10^{-5}$ - $1,512 \times 10^{-5}$ mm³/m, $\text{Fe}_{(15-x)}\text{MoTiB}_x\text{Mn}_2\text{C}$ ($x=0,1,2,3$) esaslı kaplamalar için $5,20 \times 10^{-5}$ - $1,932 \times 10^{-5}$ mm³/m, $\text{Fe}_{(17-x)}\text{MoTiBMn}_{0,66x}\text{C}_{0,33x}$ ($x=0,3$) esaslı kaplamalar için $7,785 \times 10^{-5}$ - $1,905 \times 10^{-5}$ mm³/m’lik aşınma oranı değerleri elde edilmiştir. Genel olarak artan yük ile birlikte kaplama tabakalarının aşınma direncinin azaldığını söylemek mümkündür. Bunun yanında her grup için genel olarak artan element oranına karşılık aşınma direncinin arttığını söylemek mümkündür.

6.2. Öneriler

- Çalışma kapsamında kullanılan ferro alaşım tozları, kimyasal bileşimleri sebebiyle elektrot bileşimi tasarımına belirli sınırlandırmalar getirmektedir. Saf tozlar kullanılarak elektrot bileşimi tasarımları yapılabilir.
- Analiz yöntemleri çeşitlendirilerek daha detaylı sonuçlar elde edilebilir.
- Elektrik ark kaynağı prosesinde kaynak parametreleri kaplama tabakası üzerinde önemli etkiye sahiptir. Farklı kaynak parametreleri veya farklı kaynak yöntemleri ile çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Çeşitli bilgisayar destekli yazılımlarla katılaşma şartları detaylandırılarak incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] M. Yildirim, “Plazma daldırma iyon implantasyon yöntemi ile metallerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi,” 2011.
- [2] K. Holmberg, P. Kivikytö-Reponen, P. Härkisaari, K. Valtonen, and A. Erdemir, “Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry,” *Tribol. Int.*, vol. 115, pp. 116–139, 2017, doi: 10.1016/j.triboint.2017.05.010.
- [3] G. Koch, J. Varney, N. Thopson, O. Moghissi, M. Gould, and J. Payer, “International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study,” *NACE Int.*, p. A-19, 2016.
- [4] E. Keleşoglu, *Sert kaplamalar üretim teknikleri ve özellikleri*. 2011.
- [5] E. M. Özcan, “Bor karbür ve titanyum karbür ilaveli sürtünmeli kaplamanın karakteristik özelliklerinin incelenmesi,” 2020.
- [6] J. Nath, “Process Selection Guidelines,” *Alum. Cast. Eng. Guid.*, no. Eq 1, pp. 247–252, 2020, doi: 10.31399/asm.tb.aceg.t68410247.
- [7] D. K. Dwivedi, *Surface engineering: Enhancing life of tribological components*. 2018.
- [8] R. Jia et al., “Microstructure and wear resistance of WC and high chromium cast iron hardfacing layers,” *Coatings*, vol. 10, no. 9, pp. 1–9, 2020, doi: 10.3390/coatings10090852.
- [9] B. K. Narayanan and F. Califee, “(12) United States Patent,” 2016.
- [10] A. Czupryński, “Comparison of properties of hardfaced layers made by a metal-core-covered tubular electrode with a special chemical composition,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 23, pp. 1–26, 2020, doi: 10.3390/ma13235445.
- [11] B. Kılınç, “Fe-M-B esaslı sert yüzey alaşımlarının çelik yüzeyinde TIG kaynak yöntemiyle oluşturulması ve özelliklerinin incelenmesi,” 2018.
- [12] H. Abed, F. Malek Ghaini, and H. R. Shahverdi, “Characterization of Fe₄₉Cr₁₈Mo₇B₁₆C₄Nb₆ high-entropy hardfacing layers produced by gas tungsten arc welding (GTAW) process,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 352, no. April, pp. 360–369, 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.08.019.

- [13] H. I. Steel, "Effect of rare earth on microstructure and wear resistance of in-situ synthesized Mo₂FeB₂ ceramics reinforced Fe based cladding," 2020.
- [14] Y. Feng, C. Yao, C. Shen, Y. Feng, K. Feng, and Z. Li, "Influence of in-situ synthesized carboroborides on microstructure evolution and the wear resistance of laser clad Fe-base composite coatings," *Mater. Charact.*, vol. 164, no. 800, p. 110326, 2020, doi: 10.1016/j.matchar.2020.110326.
- [15] J. C. Shin, J. M. Doh, J. K. Yoon, D. Y. Lee, and J. S. Kim, "Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of cobalt-base Stellite hardfacing alloys," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 166, no. 2–3, pp. 117–126, 2003, doi: 10.1016/S0257-8972(02)00853-8.
- [16] M. Roy, *Surface engineering for enhanced performance against wear*, vol. 9783709101. 2013.
- [17] H. Abed, F. Malek Ghaini, and H. R. Shahverdi, "Characterization of Fe₄₉Cr₁₈Mo₇B₁₆C₄Nb₆ high-entropy hardfacing layers produced by gas tungsten arc welding (GTAW) process," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 352, pp. 360–369, 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.08.019.
- [18] R. Zahiri, R. Sundaramoorthy, P. Lysz, and C. Subramanian, "Hardfacing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 260, pp. 220–229, 2014, doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.076.
- [19] M. Yaz, "Düşük karbonlu yumuşak çeliklerin Co esaslı süper alaşım elektrotları ile kaplanabilirliğinin araştırılması," 2005.
- [20] W. Wu and L. T. Wu, "The wear behavior between hardfacing materials," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 27, no. 11, pp. 3639–3648, 1996, doi: 10.1007/BF02595455.
- [21] R. Ghasemi Owsalou, "Aşınmaya Maruz Parçaların Aşınma Dayanımlarının Araştırılması," 2012.
- [22] B.-C. Coo and Y.-J. Lee, "Railway Vehicle Wheel Restoration by Submerged Arc Welding and Its Characterization," *Sci*, vol. 2, no. 2, p. 33, 2020, doi: 10.3390/sci2020033.
- [23] S. Anık, *Kaynak tekniği el kitabı*. 1981.
- [24] U. D. Turunç, "Farklı Kimyasal Bileşimlerdeki Sert Dolgu Aşınma Plakalarının Özelliklerinin İncelenmesi, Geliştirilmesi ve Optimizasyonu," p. 2015, 2015, [Online]. Available: <http://weekly.cnbnews.com/news/article.html?no=124000>.
- [25] K. Weman and L. Ab, *Repair and Maintenance Welding Handbook*. 2012.
- [26] J. Davis, *Surface Hardening of Steels- Understanding the Basics*. 2002.

- [27] American welding society, Welding Handbook-Materials and applications, vol. 4. 1991.
- [28] M. Kaptanoğlu, “Titanyum ve Bor İçeren Özlü Tellerle Yapılan Kaplamaların Mikro Yapı ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması,” 2011.
- [29] American welding society, Welding Handbook, Welding Science & Technology, vol. 1. 2001.
- [30] ESAB yayınları, “Basic Welding Filler Metal Technology- Hardsurfacing Electrodes,” pp. 1–15, 2000.
- [31] E. Yöntem, “Demir Çelik Sanayinde Kullanılan Sert Dolgu Kaplamalarının Yüksek ve Düşük Sıcaklık Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi,” 2014.
- [32] Y. Yavuz, “Fe-Cr-W-B-C esaslı sert dolgu örtülü elektrot üretimi ve karakterizasyonu,” 2018.
- [33] S. Anık, K. Tülbentçi, and E. Kaluç, Örtülü Elektrod ile Elektrik Ark Kaynağı. 1991.
- [34] S. Anık, S. Anık, and M. Vural, 1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Cilt 1. 1993.
- [35] İ. B. Eryürek, Çelikler için örtülü elektrod seçimi. .
- [36] C. A. Natalie and D. L. Olson, “Physical and Chemical Behaviour Of Welding Fluxes,” pp. 389–413, 1986.
- [37] K. Sham and S. Liu, “Flux-coating development for SMAW consumable electrode of high-nickel alloys,” Weld. J., vol. 93, no. 8, 2014.
- [38] N. Xu, S. Saied, J. Sullivan, and C. Pearce, ASM Handbook: Welding, Brazing, Soldering, vol. 6. 1989.
- [39] A. D. Adeyeye and A. J. Allu, “A compromise programming approach to welding flux performance optimization,” Proc. Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manag., vol. 2017, no. OCT, pp. 53–63, 2017.
- [40] D. D. Schwemmer, D. L. Olson, and D. L. Williamson, “Relationship of Weld Penetration To the Welding Flux,” Weld J (Miami Fla), vol. 58, no. 5, pp. 2–9, 1979.
- [41] A. Kumar, H. Singh, and S. Maheshwari, “XRD and DTA analysis of developed agglomerated fluxes for submerged arc welding,” 2014.
- [42] VISVANATH PS, “Submerged Arc Welding Fluxes,” Indian Weld J, vol. 1, no. 2, pp. 27–32, 1969, doi: 10.21275/02014158.
- [43] C. M. Chang, S. H. Wu, C. Fan, M. C. Chen, and W. Wu, “Effect of carbonate

- in electrode coating on the microstructure and mechanical properties of weld,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 112, no. 3, pp. 783–788, 2008, doi: 10.1016/j.matchemphys.2008.06.041.
- [44] J. P. Farias, A. Scotti, P. S. D. S. Bálamo, and E. Surian, “The effect of wollastonite on operational characteristics of AWS E6013 electrodes,” *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 26, no. 3, pp. 317–322, 2004, doi: 10.1590/S1678-58782004000300008.
- [45] S. Mahajan and R. Chhibber, “Design and development of CaO–SiO₂–CaF₂ and CaO–SiO₂–Al₂O₃ based electrode coatings to weld low alloy ferritic steels for power plant applications,” *Ceram. Int.*, vol. 45, no. 18, pp. 24154–24167, 2019, doi: 10.1016/j.ceramint.2019.08.124.
- [46] L. Wang, J. Qiao, L. Zhu, and J. Chen, “Effects of flux bands on arc stability in flux bands constricting arc welding,” *J. Manuf. Process.*, vol. 54, no. March, pp. 190–200, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.03.012.
- [47] B. Singh, “Review on effect of flux composition on its behavior and bead geometry in submerged arc welding (SAW),” *J. Mech. Eng. Res.*, vol. 5, no. 7, pp. 123–127, 2013, doi: 10.5897/jmer2013.0284.
- [48] E. Bauné, C. Bonnet, and S. Liu, “Reconsidering the Basicity of a FCAW Consumable - Part 1 : Solidified Slag Composition of a FCAW Consumable as a Basicity Indicator,” *Weld. J. (Miami, Fla)*, vol. 79, no. 3, 2000.
- [49] E. Kocaman, “Fe-Cr-Ti-B Esaslı İn-Situ Kompozit Sert Yüzey Alaşımlama Elektrotlarının Geliştirilmesi,” 2020.
- [50] A. K. Singh, V. Dey, and R. N. Rai, “Techniques to improveweld penetration in TIG welding (A review),” *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 2, pp. 1252–1259, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.01.145.
- [51] N. S. Patel, “A Review on Parametric Optimization of Tig Welding Naitik S Patel , 2 Prof . Rahul B Patel,” pp. 27–31, 2014.
- [52] X. H. Wang, S. L. Song, Z. D. Zou, and S. Y. Qu, “Fabricating TiC particles reinforced Fe-based composite coatings produced by GTAW multi-layers melting process,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 441, no. 1–2, pp. 60–67, 2006, doi: 10.1016/j.msea.2006.06.015.
- [53] X. Wang, M. Zhang, and S. Qu, “Development and characterization of (Ti, Mo)C carbides reinforced Fe-based surface composite coating produced by laser cladding,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 48, no. 9, pp. 893–898, 2010, doi: 10.1016/j.optlaseng.2010.03.017.
- [54] S. Balaguru and M. Gupta, “Hardfacing studies of Ni alloys: a critical review,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 10, pp. 1210–1242, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.12.026.

- [55] M. Zhang, X. Wang, S. Liu, and K. Qu, "Microstructure and high-temperature properties of Fe-Ti-Cr-Mo-B-C-Y₂O₃ laser cladding coating," *J. Rare Earths*, vol. 38, no. 6, pp. 683–688, 2020, doi: 10.1016/j.jre.2019.05.013.
- [56] P. Cavaliere, *Laser Cladding of Metals*. 2021.
- [57] P. P. Psyllaki, "An introduction to wear degradation mechanisms of surface-protected metallic components," *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 10, 2019, doi: 10.3390/met9101057.
- [58] M. Ulutan, "AISI 4140 çeliğinin yüzey sertleştirme işlemleri ve kaplama yöntemleri sonrası mekanik davranışlarının araştırılması," 2007.
- [59] S. Kara and M. H. Korkut, "Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan zırh plakalarında kaynak sonrası ısıtılma işleminin birleşim mukavemetine etkisinin araştırılması," *Savun. Bilim. Derg.*, vol. 11, no. 2, pp. 159–171, 2012.
- [60] K. Günther and J. P. Bergmann, "Influencing microstructure of vanadium carbide reinforced FeCrVC hardfacing during gas metal Arc welding," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 10, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/met10101345.
- [61] J. N. Lemke, L. Rovatti, M. Colombo, and M. Vedani, "Interrelation between macroscopic, microscopic and chemical dilution in hardfacing alloys," *Mater. Des.*, vol. 91, pp. 368–377, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.11.117.
- [62] X. H. Wang, F. Han, X. M. Liu, S. Y. Qu, and Z. D. Zou, "Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 489, no. 1–2, pp. 193–200, 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.12.020.
- [63] M. Zhang, K. L. Qu, S. X. Luo, and S. Liu, "Effect of Cr on the microstructure and properties of TiC-TiB₂ particles reinforced Fe-based composite coatings," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 316, pp. 131–137, 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.03.026.
- [64] X. Wang, F. Han, X. Liu, S. Qu, and Z. Zou, "Microstructure and wear properties of the Fe-Ti-V-Mo-C hardfacing alloy," *Wear*, vol. 265, no. 5–6, pp. 583–589, 2008, doi: 10.1016/j.wear.2007.12.001.
- [65] W. Xinhong, C. Lin, Z. Min, and Z. Zengda, "Fabrication of multiple carbide particles reinforced Fe-based surface hardfacing layer produced by gas tungsten arc welding process," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 203, no. 8, pp. 976–980, 2009, doi: 10.1016/j.surfcoat.2008.09.020.
- [66] M. R. Tavakoli Shoushtari, "Investigation on Composition and Microstructural Morphology of the Fe-BC Hardfacing Layers," *J. Environ. Friendly Mater.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–7, 2019.
- [67] R. Yılmaz, "Microstructure and wear behaviour of Fe-Mn-C hardfacing alloys," pp. 13–15, 2009.

- [68] E. Abakay, S. Sen, and U. Sen, "Wear properties of the surface alloyed AISI 1020 steel with Fe 15-x15 MoxB5 by TIG welding technique," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 125, no. 2, pp. 587–589, 2014, doi: 10.12693/APhysPolA.125.587.
- [69] D. Sohrabi Baba Heidary, F. Madadi, and M. Shamanian, "Study of the Microstructures and Abrasive Characteristics of Mo-Fe-C Hardfacing Alloys Fabricated by Gas Tungsten Arc Welding," *Tribol. Trans.*, vol. 58, no. 2, pp. 225–230, 2015, doi: 10.1080/10402004.2014.963771.
- [70] X. H. Wang, Z. D. Zou, S. Y. Qu, and S. L. Song, "Microstructure and properties of the TiC/Fe-based alloy hardfacing layers," *J. Mater. Sci.*, vol. 40, no. 14, pp. 3629–3633, 2005, doi: 10.1007/s10853-005-0740-6.
- [71] M. E. Mustafa KAPTANOĞLU, "Microstructure And Wear of In-Situ Synthesised TiB₂ Particles Reinforced Iron-Based Hardfacings," *Kov. Mater*, vol. 55, no. 2, pp. 123–131, 2017, doi: 10.4149/km 2017_2 _123.
- [72] L. Zong, N. Guo, R. Li, and H. Yu, "Effect of B content on microstructure and wear resistance of Fe-3Ti-4C Hardfacing alloys produced by Plasma-Transferred Arc Welding," *Coatings*, vol. 9, no. 4, 2019, doi: 10.3390/coatings9040215.
- [73] P. Prysyazhnyuk, O. Ivanov, D. Lutsak, and L. Lutsak, "Wear Resistance Improvement of Equipment for Production of Building Ceramics by Hardfacing with Flux-Coerd Electrodes based on Fe-Ti-B-C System," *Multidiscip. Asp. Prod. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 263–273, 2020, doi: 10.2478/mape-2020-0023.
- [74] J. Nowacki and P. Rybicki, "The influence of welding heat input on submerged arc welded duplex steel joints imperfections," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 164–165, pp. 1082–1088, 2005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.079.
- [75] J. F. Archard, "Contact and rubbing of flat surfaces," *J. Appl. Phys.*, vol. 24, no. 8, pp. 981–988, 1953, doi: 10.1063/1.1721448.
- [76] J. Ding, S. B. Leen, and I. R. McColl, "The effect of slip regime on fretting wear-induced stress evolution," *Int. J. Fatigue*, vol. 26, no. 5, pp. 521–531, 2004, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2003.09.001.
- [77] C. Liu, P. Xu, C. Pang, G. Zha, Z. Ouyang, and J. Chen, "Phase transformation in Fe–Mn–Si SMA/WC composite coating developed by laser cladding," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 267, 2021.
- [78] M. I. Hussain et al., *Corrosion resistance of nanostructured metals and alloys*. Elsevier Inc., 2020.
- [79] J. M. Sá de Sousa, M. Q. Lobato, D. N. Garcia, and P. C. Machado, "Abrasion resistance of Fe–Cr–C coating deposited by FCAW welding process," *Wear*, vol. 476, no. September 2020, p. 203688, 2021, doi: 10.1016/j.wear.2021.203688.

- [80] F. Yang, Y. Wu, J. Han, and J. Meng, "Microstructure, mechanical and tribological properties of Mo₂FeB₂ based cermets with Mn addition," *J. Alloys Compd.*, vol. 665, pp. 373–380, 2016, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.01.053.
- [81] K. Yildizli, M. Eroglu, and M. B. Karamiş, "Microstructure and erosive wear behavior of weld deposits of high manganese electrode," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 201, no. 16–17, pp. 7166–7173, 2007, doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.01.024.
- [82] R. Ernst, J. Breyer, J. T. Tchoufang, and J. Lecomte-beckers, "Improvement in HSS Rolls for early Stands of Hot Strip Mills Metallurgical Features and Mechanical Properties Assessment."
- [83] V. Shankar, T. P. S. Gill, A. L. E. Terrance, S. L. Mannan, and S. Sundaresan, "Relation between microstructure, composition, and hot cracking in Ti-stabilized austenitic stainless steel weldments," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 31, no. 12, pp. 3109–3122, 2000, doi: 10.1007/s11661-000-0090-6.
- [84] B. A. F. Guillermet, "The Fe-Mo (Iron-Molybdenum) System," vol. 3, no. 3, pp. 359–367, 1982.
- [85] I. Cho, K. D. Savelyev, and V. M. Golod, "Development of thermophysical calculator for stainless steel casting alloys by using CALPHAD," pp. 353–358, 2017.
- [86] E. Kocaman, B. Kılınç, Ş. Şen, and U. Şen, "Effect of chromium content on Fe (18-x) Cr x B 2 (X = 3 , 4 , 5) hardfacing electrode on microstructure , abrasion and corrosion behavior Effect of chromium content on Fe (18-x) Cr x B 2 (X = 3 , 4 , 5) hardfacing electrode on," vol. 1, pp. 177–190, 2021, doi: 10.17341/gazimmfd.689230.
- [87] H. Q. Wang, J. S. Sun, C. N. Li, S. N. Geng, H. G. Sun, and G. L. Wang, "Microstructure and mechanical properties of molybdenum–iron–boron–chromium cladding using argon arc welding," *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)*, vol. 32, no. 16, pp. 1694–1701, 2016, doi: 10.1080/02670836.2016.1140926.
- [88] E. O. Correa, N. G. Alcantara, D. G. Tecco, and R. V. Kumar, "Development of an iron-based hardfacing material reinforced with Fe-(TiW)C composite powder," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 38, no. 5, pp. 937–945, 2007, doi: 10.1007/s11661-007-9141-6.
- [89] Y. Gencer, M. Tarakci, and A. Calik, "Effect of titanium on the boronizing behaviour of pure iron," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 203, no. 1–2, pp. 9–14, 2008, doi: 10.1016/j.surfcoat.2008.07.009.

- [90] M. J. Balart, C. L. Davis, and M. Strangwood, "Fracture behaviour in medium-carbon Ti-V-N and V-N microalloyed ferritic-pearlitic and bainitic forging steels with enhanced machinability," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 328, no. 1, pp. 48–57, 2002, doi: 10.1016/S0921-5093(01)01679-3.
- [91] P. V. Moghaddam, J. Hardell, E. Vuorinen, and B. Prakash, "The role of retained austenite in dry rolling/sliding wear of nanostructured carbide-free bainitic steels," *Wear*, vol. 428–429, no. March, pp. 193–204, 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.03.012.
- [92] H. Okamoto, "Supplemental Literature Review of Binary Phase Diagrams: B-Fe, Cr-Zr, Fe-Np, Fe-W, Fe-Zn, Ge-Ni, La-Sn, La-Ti, La-Zr, Li-Sn, Mn-S, and Nb-Re," *J. Phase Equilibria Diffus.*, vol. 37, no. 5, pp. 621–634, 2016, doi: 10.1007/s11669-016-0465-z.
- [93] J. Jin, J. Sun, and G. Wang, "Effect of Mo content on microstructure and Wear resistance of Mo-Fe-B claddings," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 81, no. February, pp. 233–241, 2019, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2019.02.028.
- [94] X. Ou Yang, F. Yin, J. Hu, M. Zhao, and Y. Liu, "Experimental investigation and thermodynamic calculation of the B-Fe-Mo ternary system," *Calphad Comput. Coupling Phase Diagrams Thermochem.*, vol. 59, no. August, pp. 189–198, 2017, doi: 10.1016/j.calphad.2017.10.007.
- [95] A. S. Chaus, M. Braëik, M. Sahul, and V. Tittel, "High-Temperature Transformation of Carbides in Skeleton Eutectic and Delta-Eutectoid of Cast High-Speed Steel," *Met. Sci. Heat Treat.*, vol. 62, no. 7–8, pp. 489–497, 2020, doi: 10.1007/s11041-020-00590-5.
- [96] X. Ouyang, G. Chen, F. Yin, Y. Liu, and M. Zhao, "Effect of molybdenum on the microstructures of as-cast Fe-B alloys and their corrosion resistance in molten zinc," *Вестник Новосибирского Государственного Университета. Серия: История. Филология*, vol. 11, no. 5, pp. 1–30, 2012.
- [97] Y. Shen et al., "Sintering Mechanism, Microstructure Evolution, and Mechanical Properties of Ti-Added Mo₂FeB₂ -Based Cermets," 2020.
- [98] M. Zhang, S. X. Luo, S. S. Liu, and X. H. Wang, "Effect of molybdenum on the wear properties of (Ti,Mo)C-TiB₂-Mo₂B particles reinforced Fe-based laser cladding composite coatings," *J. Tribol.*, vol. 140, no. 5, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1115/1.4039411.
- [99] H. Berns and A. Fischer, "Microstructure of Fe-Cr-C hardfacing alloys with additions of Nb, Ti and, B," *Mater. Charact.*, vol. 39, no. 2–5, pp. 499–527, 1997, doi: 10.1016/S1044-5803(97)00142-3.
- [100] M. A. Maleque, N. Idris, M. M. Rahman, and M. S. Hossain, *Particulate Composite Protective Coating Using Conventional Melting Approach*. Elsevier Ltd., 2020.

- [101] I. Hemmati, V. Ocelík, and J. T. M. De Hosson, “Correlation between cladding speed, microstructure and hardness of laser-deposited steel coatings: The role of strengthening mechanism,” no. January, pp. 403–409, 2018, doi: 10.2351/1.5063089.
- [102] S. R. Chauhan and K. Dass, “Dry sliding wear behaviour of titanium (Grade 5) alloy by using response surface methodology,” *Adv. Tribol.*, vol. 2013, 2013, doi: 10.1155/2013/272106.
- [103] J. Brezinová, D. Draganovská, A. Guzanová, P. Balog, and J. Viňáš, “Influence of the hardfacing welds structure on their wear resistance,” *Metals (Basel)*, vol. 6, no. 2, 2016, doi: 10.3390/met6020036.
- [104] V. Jankauskas et al., “Effect of electrode covering composition on the microstructure, wear, and economic feasibility of Fe-C-Cr manual arc-welded hardfacings,” *Coatings*, vol. 10, no. 3, 2020, doi: 10.3390/coatings10030294.
- [105] S. Fukumoto, T. Inoue, S. Mizuno, K. Okita, T. Tomita, and A. Yamamoto, “Friction welding of TiNi alloy to stainless steel using Ni interlayer,” *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 15, no. 2, pp. 124–130, 2010, doi: 10.1179/136217109X12577814486692.
- [106] W. Li et al., “Ti-Fe intermetallics analysis and control in joining titanium alloy and stainless steel by Laser Metal Deposition,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 242, pp. 39–48, 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.11.010.
- [107] Z. Hu, W. Li, and Y. Zhao, “The effect of laser power on the properties of M3B2-type boride-based cermet coatings prepared by laser cladding synthesis,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 8, 2020, doi: 10.3390/MA13081867.
- [108] L. Xu, S. Wei, F. Xiao, H. Zhou, G. Zhang, and J. Li, “Effects of carbides on abrasive wear properties and failure behaviours of high speed steels with different alloy element content,” *Wear*, vol. 376–377, pp. 968–974, 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.01.021.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Recep HOCAOĞLU

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2018
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği	2020
Lise	Kocaeli Anadolu Teknik Lisesi	2012

YABANCI DİL

İngilizce

ESERLER

1. ‘Titanyum ilavesinin demir krom borür esaslı sert yüzey alaşım kaplanmış çeliğin yapısal özellikleri üzerine etkisi’ EFIS 2020, 4. Geleceğin Mühendisleri Uluslararası Öğrenci Sempozyumu, 7-8 Mayıs 2020, Zonguldak, Türkiye
2. ‘Fe-Mo-Ti-B esaslı sert dolgu alaşımlarına Mn-C etkisi’ EFIS 2021, 5. Geleceğin Mühendisleri Uluslararası Öğrenci Sempozyumu, 9-11 Temmuz 2021, Zonguldak, Türkiye
3. ‘Fe-M-B esaslı sert kaplamaların TIG kaynağı ile çelik yüzeyinde oluşturulması’ TÜBİTAK 2209/A, Üniversite öğrencileri araştırma projeleri destek programı, 2017-2018
4. ‘Fe-Mo-Ti-B-C esaslı sert dolgu alaşımlı örtülü elektrotların üretimi ve özelliklerinin incelenmesi’ BOREN, Bor bursu programı konulu çağrısı (BK1), 2020-2021