

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

**SİLİSYUM VE MANGAN İLAVESİNİN DEMİR BAZLI SERT
DOLGU KAPLAMALARIN AŞINMA VE MİKROYAPI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil ALTINDAL

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

AĞUSTOS 2025

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

**SİLİSYUM VE MANGAN İLAVESİNİN DEMİR BAZLI SERT
DOLGU KAPLAMALARIN AŞINMA VE MİKROYAPI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil ALTINDAL

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ediz ERCENK

AĞUSTOS 2025

Halil ALTINDAL tarafından hazırlanan “Silisyum ve Mangan İlavesinin Demir Bazlı Sert Dolgu Kaplamaların Aşınma ve Mikroyapı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 15.08.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Doç. Dr. Tuba YENER**

Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Ediz ERCENK (Danışman)**

Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Eren YILMAZ**

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “SİLİSYUM VE MANGAN İLAVESİNİN DEMİR BAZLI SERT DOLGU KAPLAMALARIN AŞINMA VE MİKROYAPI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(15/08/2025)

Halil ALTINDAL



TEŞEKKÜR

Bilgi ve tecrübesiyle çalışmalarım sürecinde danışmanlığımı üstlenen ve desteğini hep hissettiğim değerli hocam Sn. Doç. Dr. Ediz ERCENK'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sürecinde desteklerini daima hissettiğim, değerli çalışma arkadaşlarım ve Gedik Kaynak Ar-Ge Merkezi çalışanlarına en içten teşekkürlerimi sunarım.



Halil ALTINDAL



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
SİMGELER	xiii
TABLO LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. SERT DOLGU YÜZEY KAPLAMA.....	3
2.1. Sert Dolgu Yüzey Kaplama.....	3
2.2. Sert Dolgu Yüzey Kaplama Alaşım Çeşitleri.....	3
2.2.1. Demir esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları	4
2.2.2. Nikel esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları.....	6
2.2.3. Kobalt esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları.....	6
2.2.4. Bakır esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları.....	6
2.2.5. Tungsten karbür esaslı sert dolgu kaplamaları	6
2.2.6. Krom karbür esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları	7
2.2.7. Yüksek silisyum esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları	7
2.2.8. Kompozit esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları.....	7
2.3. Sert Dolgu Yüzey Kaplama Kaynak Yöntemi Seçimi	7
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	11
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	13
4.1. Giriş	13
4.2. Elektrot Tasarımı	13
4.2.1. Kullanılan hammadde ler.....	13
4.3. Elektrot Tasarımı ve Gruplandırma	15
4.4. Elektrot Üretimi.....	15
4.5. Kaynak İşlemi.....	16
4.6. Karakterizasyon İşlemi	17
4.6.1. Sertlik testi ve kimyasal analizler.....	17
4.6.2. Faz analizleri	17
4.6.3. Aşınma testleri.....	18
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	19
5.1. Mikroyapı ve Faz Analizleri.....	19
5.1.1. Grup 0.....	20
5.1.2. Grup 1	21
5.1.3. Grup 2.....	22
5.1.4. Grup 3.....	24
5.2. SEM Görüntüleri	25

5.3. Mikro Sertlik Testi	27
5.3.1. Grup 0.....	28
5.3.2. Grup 1.....	28
5.3.3. Grup 2.....	29
5.3.4. Grup 3.....	30
5.4. Aşınma Testi.....	30
5.4.1. Grup 0.....	30
5.4.2. Grup 1.....	32
5.4.3. Grup 2.....	34
5.4.4. Grup 3.....	36
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	39
KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ.....	47



KISALTMALAR

Ağ.	: Ağırlıkça
FCAW	: Özlü tel ark kaynağı
GMAW	: Gaz metal arc kaynağı
GTAW	: Gazaltı tungsten ark kaynağı
HRC	: Rockwell sertlik değeri
HV	: Vickers sertlik değeri
LBW	: Lazer ışın kaynağı
MAG	: Metal aktif gaz
MIG	: Metal inert gaz
OAW	: Oksi-asetilen kaynağı
PAW	: Plazma ark kaynağı
SAW	: Tozaltı ark kaynağı
SMAW	: Örtülü elektrot ark kaynağı
SEM	: Taramalı elektron mikroskopu
TIG	: Tungsten inert gaz
VB.	: Ve benzeri
XRD	: X-ışını Difraktometresi



SİMGELER

%	: Yüzde
N	: Newton
dk	: Dakika
<	: Küçüktür
ø	: Çap [mm]
μ	: Sürtünme katsayı
mm	: Milimetre
γ-Fe	: Östenit



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. Alaşımlama toz hammaddelerin kimyasal bileşimi.	14
Tablo 4.2. Flaks malzeme bileşimi.	14
Tablo 4.3. Çekirdek tel kimyasal bileşimi.	14
Tablo 4.4. Altıklık malmzeme kimyasal bileşimi.	15
Tablo 4.5. Numunelerin hedeflenen kimyasal bileşimleri.	15
Tablo 5.1. Numunelerin kimyasal bileşimleri.	19



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 4.1. Ekstrüder pres.	16
Şekil 5.1. Grup 0 XRD paternleri.	20
Şekil 5.2. Grup 0 optik mikroskop görüntüleri (a-c) Si ₀ Mn ₀ ; (d-f) Si ₀ Mn ₁ ; (g-i) Si ₀ Mn ₂ ; (j-l) Si ₀ Mn ₃	21
Şekil 5.3. Grup 1 XRD paternleri.	21
Şekil 5.4. Grup 1 optik mikroskop görüntüleri (a-c) Si ₁ Mn ₀ ; (d-f) Si ₁ Mn ₁ ; (g-i) Si ₁ Mn ₂ ; (j-l) Si ₁ Mn ₃	22
Şekil 5.5. Grup 2 XRD paternleri.	23
Şekil 5.6. Grup 2 optik mikroskop görüntüleri (a-c) Si ₂ Mn ₀ ; (d-f) Si ₂ Mn ₁ ; (g-i) Si ₂ Mn ₂ ; (j-l) Si ₂ Mn ₃	23
Şekil 5.7. Grup 3 XRD paternleri.	24
Şekil 5.8. Grup 3 optik mikroskop görüntüleri (a-c) Si ₃ Mn ₀ ; (d-f) Si ₃ Mn ₁ ; (g-i) Si ₃ Mn ₂ ; (j-l) Si ₃ Mn ₃	25
Şekil 5.9. SEM görüntüleri (a-e) Si ₀ Mn ₀ ; (f-j) Si ₀ Mn ₃ ; (k-o) Si ₃ Mn ₀ ; (p-u) Si ₃ Mn ₃	26
Şekil 5.10. γ -Fe ve karbür kaypların ölçümleri (a) Si ₀ Mn ₀ ; (b) Si ₀ Mn ₃ ; (c) Si ₃ Mn ₀ ; (d) Si ₃ Mn ₃	27
Şekil 5.11. Kaynak metali kesit alanı ve sertlik ölçüm noktaları.	27
Şekil 5.12. Grup 0 mikro sertlik ölçümleri.	28
Şekil 5.13. Grup 1 mikro sertlik ölçümleri.	29
Şekil 5.14. Grup 2 mikro sertlik ölçümleri.	29
Şekil 5.15. Grup 3 mikro sertlik ölçümleri.	30
Şekil 5.16. Grup 0 aşınma izleri Sem ve EDS analizleri.	31
Şekil 5.17. Grup 0 numunelerin sürtünme katsayısı verileri.	31
Şekil 5.18. Grup 0 numunelerinin aşınan hacim verileri.	32
Şekil 5.19. Grup 1 numuneleri aşınan yüzeylerin SEM ve EDS analizleri.	33
Şekil 5.20. Grup 1 numunelerinin sürtünme katsayısı verileri.	33
Şekil 5.21. Grup 1 numunelerinin aşınan hacim verileri.	34
Şekil 5.22. Grup 2 numunelerine ait aşınma yüzeyi SEM ve EDS analizleri.	35
Şekil 5.23. Grup 2 numuneleri sürtünme katsayısı verileri.	35
Şekil 5.24. Grup 2 numuneleri aşınan hacim verileri.	36
Şekil 5.25. Grup 3 numunelerine ait aşınma iz SEM ve EDS analizleri.	37
Şekil 5.26. Grup 3 numuneleri sürtünme katsayısı verileri.	37
Şekil 5.27. Grup 3 numuneleri aşınma hacim verileri.	38



SİLİSYUM VE MANGAN İLAVESİNİN DEMİR BAZLI SERT DOLGU KAPLAMALARIN AŞINMA VE MİKROYAPI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Sert dolgu yüzey kaplamaları endüstride makine ekipman parçalarını korumak ve tamir-bakımlarını sağlamak için uzun yıllardır kullanılan mühendislik uygulamalarıdır. Bakım maliyetlerini düşürmek amacıyla yapılan bu uygulamada makine ekipman parçalarını aşınma, erozyon ve korozyon gibi hasarlardan koruyarak, parçaların çalışma ömürlerini uzatmak için yapılan yüzey kaplama işlemidir. Tüm bu işlemlerin yanı sıra artık makine ekipman parçaları alaşımsız malzemelerden üretilen yüzey kaplama işleminin ardından sahaya sürülmektedir. Günümüzde birçok sektörde nikel, kobalt, demir bazlı gibi farklı bileşimlerde sert dolgu yüzey kaplamaları kullanılmaktadır. Nikel ve kobalt alaşımlı sert dolgu yüzey kaplamaları maliyetlerinden dolayı sadece yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımı, kavitasyon gibi özel alanlarda kullanılırken, demir bazlı sert dolgu kaplamaları düşük maliyetleri ile artık her alanda kullanılmaktadır. Bu yüzey kaplama işlemlerinde neredeyse tüm kaynak yöntemleri kullanılabilir ancak, malzemenin hassasiyetine ve ortam koşullarına bağlı olarak örtülü elektrot, gaz altı kaynağı, TIG kaynağı ve diğer kaynak yöntemli tercih edilir. Bu amaç doğrultusunda, bu çalışmada Fe-Cr-C esaslı sert dolgu yüzey kaplamalarında Silisyum ve mangan elementlerinin ilavesi ile kaplamanın aşınma, sertlik ve mikroyapıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sert dolgu yüzey kaplama işlemleri için dünya genelinde en çok tercih edilen elektrik ark kaynağı yöntemi kullanılmıştır. Alaşım için ferro-krom, ferro-silisyum ve ferro-mangan ve arkı stabilize etmek için ise rutil, kalsit, potasyum feldspat ve florit mineralleri ile örtü karışımı hazırlanmıştır. Bu örtü karışımı ekstrüder pres yardımıyla alaşımsız S1 kalite çekirdek tel üzerine kaplatılmış ve örtülü elektrotlar üretilmiştir. Üretilen bu örtülü elektrotlar altlık malzeme olan S355J2+N alaşımsız malzeme üzerine yüzey kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yüzey kaplama yapılan numunelerin krom ve karbon sabit olacak şekilde ayarlanmıştır. Numuneler Si ve Mn miktarına göre gruplandırılmış ve metalografik olarak hazırlanmışlardır. Numunelerin TS EN ISO 15614-7 standartına göre kimyasal analizi ve 1 kg yük altında mikro sertlikleri, ASTM G133 standartına göre lineer (karşılıklı git-gel) aşınma dayanımları ve optik mikroskop ve SEM kullanılarak mikroyapıları incelenmiş ve birbirleri ile kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlar; yüzey kaplamaların alaşım miktarına bağlı olarak mekanik değerlerinde artış olduğu ve homojen faz dağılımlarına sahip olduğunu göstermektedir.



INVESTIGATION OF THE IMPACT OF SILICON AND MANGANESE ADDITIONS ON THE WEAR RESISTANCE AND MICROSTRUCTURE OF IRON-BASED HARDFACING COATINGS

SUMMARY

Hardfacing surface coatings have long been employed in industry as a critical engineering practice to extend the service life of machine components and to secure their continuous operation through repair and maintenance. This surface engineering technique is primarily intended to reduce overall maintenance costs by protecting machine elements from progressive forms of damage such as wear, erosion, and corrosion. In essence, it provides a barrier that prevents premature failure and allows machinery to maintain reliable performance even under harsh working conditions. Traditionally, many industrial components were manufactured directly from alloyed steels to achieve higher strength and wear resistance. However, in contemporary practice, it has become increasingly common to produce parts from relatively low-cost, non-alloyed base materials and then apply hardfacing coatings to the surface, thereby combining economic efficiency with superior surface properties. A wide range of alloy systems is currently available for hardfacing applications. Nickel-, cobalt-, and iron-based alloys dominate the field, each serving particular industrial requirements. Nickel- and cobalt-based hardfacing materials are well recognized for their excellent resistance to high-temperature degradation, cavitation, and severe wear environments. Nevertheless, their relatively high cost restricts their widespread use, confining them to specialized applications such as power generation, aerospace, and petrochemical processing, where extreme service conditions justify the expense. In contrast, iron-based alloys, with their favorable balance of cost and performance, have gained popularity across almost all industrial sectors. Their adaptability and affordability have made them the preferred choice for general-purpose hardfacing, particularly in industries such as mining, construction, and manufacturing. A remarkable feature of hardfacing technology is its compatibility with a broad spectrum of welding processes. Almost all welding methods can be adapted for use in surface coating applications, though the selection of the appropriate process depends largely on the characteristics of the base material, the type of alloy being deposited, and the surrounding service conditions. Among the most frequently employed methods are shielded metal arc welding (SMAW), gas metal arc welding (GMAW), and tungsten inert gas welding (TIG). Each process offers distinct advantages. For example, SMAW is widely used because of its simplicity and ability to deposit a variety of alloys, while TIG provides greater control and precision, making it suitable for applications where uniform microstructure and defect-free coatings are required. Ultimately, the choice of method is not arbitrary but is guided by a careful evaluation of metallurgical compatibility and economic feasibility. The widespread use of iron-based coatings is closely linked to their significant cost advantage. These coatings not only provide high levels of wear resistance but also ensure that equipment remains operational over longer intervals, thus minimizing downtime and unexpected failures. An additional benefit is that the uniform application of coatings results in improved performance

consistency, reducing the likelihood of localized stress concentrations or weak points that could trigger premature damage. In practice, the correct selection of hardfacing material requires engineers to carefully assess operating conditions, such as the type of wear mechanism present, the exposure to corrosive media, and the mechanical stresses to which the surface will be subjected. By tailoring the alloy composition to these factors, it becomes possible to optimize coating performance for specific industrial environments. Hardfacing technology is not static; it continues to evolve as industries demand more efficient, durable, and sustainable solutions. Recent research has particularly emphasized the development of novel alloy compositions to improve hardness, wear resistance, and microstructural stability. Among the most notable advances is the incorporation of silicon and manganese as alloying elements in Fe-Cr-C-based coatings. These elements play a decisive role in modifying the microstructure by refining carbides and improving phase distribution, thereby enhancing both hardness and wear resistance. For instance, silicon contributes to solid solution strengthening and promotes the formation of desirable carbide phases, while manganese influences toughness and stabilizes the microstructural balance. Together, these additions can yield coatings that exhibit superior mechanical performance under demanding conditions. Equally important is the selection of the most appropriate deposition method. Even the best alloy system may fail to achieve its intended performance if the coating process introduces defects such as porosity, cracks, or uneven dilution with the substrate. Thus, engineers and materials scientists are increasingly focusing on optimizing process parameters in parallel with alloy design. This integrated approach ensures not only that the coatings achieve the desired hardness and wear resistance but also that they maintain their properties over extended service periods. In conclusion, hardfacing surface coatings represent a versatile and indispensable engineering solution to modern industrial challenges. They provide a means of reconciling the need for economic efficiency with the demand for high-performance materials. With continuing advances in alloy development and welding technology, hardfacing is poised to play an even greater role in enabling sustainable production, reducing maintenance costs, and extending the operational lifetimes of critical machinery. Ongoing innovations, particularly in the design of alloy systems containing elements such as silicon and manganese, demonstrate the dynamic and forward-looking nature of this field. As industries evolve, so too will the science and practice of hardfacing, ensuring its continued relevance in meeting the diverse needs of engineering applications. In this context, the present study investigates the effects of silicon and manganese additions on the wear resistance, hardness, and microstructure of Fe-Cr-C-based hardfacing coatings. The globally preferred shielded metal arc welding (SMAW) method was employed for the coating process. For alloying, ferrochrome, ferrosilicon, and ferromanganese were used, while rutile, calcite, potassium feldspar, and fluorspar minerals were included in the coating mixture to stabilize the arc. This mixture was extruded onto unalloyed S1-grade core wire using an extruder press to produce coated electrodes. The produced electrodes were then applied onto S355J2+N unalloyed substrate material using a GEKA RKM 650 welding machine under 200 A welding parameters. In the prepared specimens, chromium and carbon were kept constant at 32.00% and 4.50%, respectively. The specimens were grouped based on Si and Mn content and prepared metallographically. Their chemical compositions were analyzed according to TS EN ISO 15614-7 standards. Following one pass of hardfacing onto the substrate, the specimens were metallographically prepared, and the microhardness of the weld metal, heat-affected zone, and substrate was measured under a 1 kg load. Results showed that increasing

alloying element content led to higher hardness values. The lowest average hardness was measured as 635 HV1 in the Si0Mn0 sample, while the highest value of 866 HV1 was recorded in the Si3Mn3 sample. Among the grouped specimens, a significant increase in hardness was observed with increasing Mn content when Si content was low. However, as the Si content increased, the influence of Mn on hardness decreased. Wear resistance tests were conducted in accordance with ASTM G133 standards using a reciprocating sliding configuration at 25 °C, 30% relative humidity, under a 5 N load, and for a total sliding distance of 100 m. The wear surfaces were examined by SEM and compared across the samples. Abrasive, adhesive, and oxidative wear mechanisms were observed, while some specimens also exhibited delamination and microcracking. Additionally, the microstructures of the test specimens were investigated and compared using optical microscopy and SEM. The microstructure analysis revealed a dendritic γ -Fe matrix with lamellar carbides of Cr_7C_3 , Fe_7C_3 , Fe_5C_2 , and $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ formed between dendrite arms. Notably, $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ was detected only in specimens containing manganese. The experimental results demonstrated that mechanical properties of the coatings improved with increasing alloy content and that homogeneous phase distributions were achieved.



1. GİRİŞ

Aşınma, onlarca yıldır teknolojik uygulamalarda önemli sorunlar teşkil etmiş ve büyük mali kayıplara neden olmuştur. Makine ekipman parçalarındaki arızaların en büyük nedeni aşınma kaynaklıdır [1]. Bu arızalar her geçen yıl artan ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Yıllar boyunca tasarımı yapılan ve geliştirilen alaşımlar, literatüre sunulan çalışmalar, makine ekipman parçalarının ömürleri uzatmak ve bu parçaların mekanik özellikleri iyileştirilmesi ve maliyetlerinin düşürülmesi yönündedir [2]. Mühendisliğin bu alanında, endüstriyel uygulamalarda kullanılan makine ekipman parçalarını yüksek sıcaklık, darbeli yükler, kimyasal etkiler ve aşındırıcı ortamlar gibi zorlu koşullardan koruyan sert yüzey kaplama işlemleri yer almaktadır. Bu makine ekipman parçalarının servis ömürlerini uzatmak için en yaygın olanı kaynak yöntemi ile yüzey kaplamadır [3], [4].

Kaynak yöntemi ile gerçekleştirilmiş sert dolgu yüzey kaplama işlemleri ticari açıdan çok önemlidir. Aşınmaya maruz kalan makine ekipman parçasının yüzeyi doldurulur ve çalışma ortamına uygun olacak şekilde ve ölçülerde işlenir. Malzeme yüzeyinde farklı kimyasal bileşimlerde ve özelliklerde yüzey kaplama elde etmek için birçok farklı yöntem kullanılabilir. Bunlar Gaz Tungsten Ark Kaynağı (GTAW), Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAW), Toz altı Ark Kaynağı, (SAW), Özlü Tel Ark Kaynağı (FCAW) ve Elektrik Ark Kaynağı (SMAW) başlıcalarıdır [5]. Kaynak yönteminin seçiminde, uygulama alanı, kaplamanın kimyasal bileşimi, ekonomik girdiler belirleyici rol oynamaktadır. Kaynak yöntemleri arasında en yaygın kullanılan, alaşımlama konusunda sınırı bulunmayan ve neredeyse her ortam koşulunda kaynak işlemi gerçekleştirmesiyle bilinen elektrik ark kaynağıdır. Örtü bileşeni kaynak banyosunu korumak ve arkı stabilize etmek dışında alaşımlama etkisiyle elektrik ark kaynağını günümüzde hala ön plana çıkarmaktadır [2], [6].

Sert dolgu yüzey kaplama işlemlerinde aşınma direnci temel performans kriteri olarak kabul edilir. Çoğunlukla kaplamanın mikroyapısı, faz dağılımı ve kaplama içerisinde oluşturulan karbür yapılarının morfolojisi, oranı ve tipi ile (M_7C_3 , $M_{23}C_6$) doğrudan ilişkilidir. Yüksek sertlik değerleride yüzey kaplamalarda genellikle iyi aşınma direnci

ile ilişkilendirilir. Fakat bu durum aşındırıcı ortamın özellikleri(ortam türü, aşındırıcı partikül boyutu, sıcaklık, vb.) ve malzemenin yapısı(iş sertleşmesi vb.) ile etkilenmektedir. Başka bir deyişle aşınma malzemenin içsel bir özelliği değildir, aşınmanın meydana geldiği koşullar çok daha önemli rol oynar [7].

Bu çalışmada Fe-Cr-C esaslı sert dolgu yüzey kaplama elektrotları üretilmiş ve bu elektrotların kaynak metaline Silisyum(Si) ve Manganez (Mn) ilavesi gerçekleştirilmiştir. Üretilen elektrotlar elektrik ark kaynağı yöntemi ile alaşımsız altlık malzeme üzerine kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan sert dolgu yüzey kaplamasının belirli bölgelerinden numune alınarak, mikroyapı, faz analizi, sertlik ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri, optik mikroskop, SEMEDS ve XRD kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan sert dolgu yüzey kaplamalarının sertliği, vickers sertlik ölçme cihazı ile mikro sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sert dolgu yüzey kaplamalarının aşınma testleri ise ball on disk yöntemiyle ölçülmüştür.

2. SERT DOLGU YÜZEY KAPLAMA

2.1. Sert Dolgu Yüzey Kaplama

İmalat, madencilik ve bir endüstriyel alanı aşınmanın zararlı etkilerinden muzdariptir. Aşınma kaçınılmaz bir süreç olmasına rağmen azaltılabilir. Bu noktada Sert dolgu yüzey kaplama işlemi önem kazanmaktadır. Sert dolgu yüzey kaplama, makine ekipman parçalarının çalışma ömürlerini uzatmak amacıyla kaynak yöntemlerinin kullanıldığı ve darbe ve aşınma dayanımı yüksek yüzey kaplamalarına verilen isimdir [8]. Sert dolgu yüzey kaplama yöntemi, makine ekipman parçalarının mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmesinin yanı sıra, bakım maliyetleri önemli ölçüde azaltır [9]. Bu yöntem ile endüstrinin birçok alanında hizmet eden çelik, dökme demir, bakır alaşımları, alüminyum gibi metallerin yüzeyleri farklı sertlik ve aşınma dayanımında sahip alaşımlar ile kaplanabilir. Kaplama işlemi ile sadece yüksek sertlik ve iyi bir aşınma dayanımının yanı sıra, korozyona karşı direnç, yüksek sıcaklık dayanımı gibi özelliklerde beraberinde malzemeye kazandırılır [10].

Sert dolgu yüzey kaplama işlemleri teknolojinin ilerlemesiyle birçok farklı kaynak yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Bunlar termal püskürtme, lazer kaplama, plazma transfer ark kaynağı, MIG/MAG, TIG, SAW ve SMAW gibi yöntemlerdir. Bütün bu yöntemlere kıyasla elektrik ark kaynağı, her ortam koşulunda uygulanabilmesi, alaşım çeşitliliğinin fazla olması ve düşük maliyeti ile öne en çok tercih edilen yöntemdir. Sert dolgu kaplama malzemesinin performansı, aşındırıcı ortam koşuluna, alaşımın mikroyapısına, içerdiği fazların dağılımına, kullanılan yönteme ve makine ekipman parçasına ile oluşturduğu metalurjik bağlıdır. Bu faktörler kaplamanın çalışma ömrünü ve dayanıklılığını etkileyen en önemli unsurlardır [11].

2.2. Sert Dolgu Yüzey Kaplama Alaşım Çeşitleri

Sert dolgu yüzey kaplama, alaşım çeşitliliği fazla fakat kullanılacağı alana göre alaşım seçimi nispeten kolay olan bir yöntemdir. Alaşımların aşınma dayanımına katkısına aşındırıcı ortamın özelliklerine de dikkat ederek seçilmesi gerekmektedir. Kimyasal bileşim ve terme-mekanik geçişler alaşımın mikroyapısını ve sertliğini belirlerken,

aşınmaya dayanımına da önemli katkıda bulunurlar [12]. Endüstride sıklıkla kullanılan alaşım türleri, demir, nikel kobalt, krom karbür, tungsten karbür, yüksek silisyum ve kompozit malzeme içeren alaşımlardır. Bu alaşımlar çalışacağı ortamın özellikleri ve maliyete göre seçilmektedir.

Günümüzde alaşım gruplarına ait birçok sert dolgu bileşimi bulunmakta ve bunların kesin bir sınıflandırılması bulunmamaktadır. Sert dolgu yüzey kaplamaların sınıflandırılmasında en çok kabul gören standart TS EN 14700 sert yüzey kaplamaları için kaynak sarf malzemelerinin yer aldığı standarttır. Sert dolgu yüzey kaplamada kimyasal kompozisyonun dışında aşınma türü ve mikroyapılarına göre sınıflandırılırlar. Aşınma türüne göre sert dolgu alaşımları;

- Dolgu Kaplama Alaşımları
- Metal-Metal Alaşımları
- Metal-Toprak Alaşımları
- Tungsten Karbürler
- Demir Dışı Alaşımlar

Sert dolgu yüzey kaplamaların mikroyapılarına göre sınıflandırılması endüstride daha fazla kabul görmektedir. Mikroyapılarına göre sert dolgu alaşımların sınıflandırılması;

- Demir Esaslı Sert Dolgu Kaplamaları
- Nikel Esaslı Sert Dolgu Yüzey Kaplamaları
- Kobalt Esaslı Sert Dolgu Yüzey Kaplamaları
- Bakır Esaslı Sert Dolgu Yüzey Kaplamaları
- Tungsten Karbür Esaslı Sert Dolgu Yüzey Kaplamaları
- Krom Karbür Esaslı Sert Dolgu Yüzey Kaplamaları
- Yüksek Silisyumlu Sert Dolgu Yüzey Kaplamaları
- Kompozit Esaslı Sert Dolgu Yüzey Kaplamaları olarak sınıflandırılabilirler [13], [14].

2.2.1. Demir esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları

Demir esaslı ser dolgu yüzey kaplamaları nikel ve kobalt bazlı sert dolgu yüzey kaplamalarına göre düşük maliyet ve geniş özellik yelpazesinden dolayı daha fazla

tercih edilirler. Ezme, öğütme, hafriyat işleri gibi şiddetli aşının görüldüğü birçok süreçte bakım maliyetleri ve sürelerini en aza indirerek endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu kaplamalar yeni makine ekipman parçaların yüzeyinin kaplanmasında kullanılacağı gibi aşınmış olan yüzeylerin restore edilmesinde kullanılmaktadır. Demir esaslı sert dolgu yüzey kaplamalarında çok fazla kimyasal bileşim olduğu için genellikle mikroyapılarına göre sınıflandırılmaktadırlar. Bunlar;

- Perlitik Çelikler
- Östenitik (manganez) çelikler
- Martenzittik çelikler
- Yüksek Alaşımli Çelikler
- Östenitik Paslanmaz Çelikler

Perlitik çelikler, düşük karbon ($\leq 0,2$ C) ve düşük alaşım elementi (örneğin %2'ye kadar krom) içermesiyle esasen kaynaklanabilirlik sağlamak ve karbon çeliği ve düşük alaşımli makine ekipman parçalarını yeniden boyutlandırmak için tercih edilirler. Perlitik bir mikroyapıya sahip olan bu alaşım grubu yüksek darbe direnci ve nispeten düşük sertlik (25-37 HRC) değerlerine sahiptir.

Östenitik (manganez) çelikler, Hadfield çelikleri örnek alınarak modellenen alaşım grubu düşük kromlu ve yüksek kromlu olarak iki alt grupta incelenebilir. Düşük kromlu çeliklerde genellikle %4'e kadar krom ve %12 ile %15 arasında manganez içer ve genellikle yüksek darbeye maruz kalan makine ekipman(kırıcı ve kepçe dudakları) parçalarında kullanılır. Yüksek kromlu östenitik çelikler, yaklaşık %15 manganez, %12 ile %17 krom içeren alaşımlardır. Östenitik manganlı çeliklerin, karbon ve düşük alaşımli çeliklerin birleştirilmesinde sıklıkla tercih edilirler.

Martenzittik çelikler, kaynak metalinin havada soğumasıyla martenzit oluşturmak için tasarımı ve 45-60 HRC sertlik değerlerine sahip çeliklerdir. Karbon içeriği martenzittik çeliklerde %0,7'ye kadar çıkabilir. Martenzit oluşumunu, sertleşebilirliği ve mukavemeti arttırmak için molibden, tungsten, nikel ve krom(en fazla %12) gibi elementler, kaynaklanabilirliği arttırmak için ise manganez ve silisyum eklenir.

Yüksek krom içeren demir esaslı sert dolgu kaplamalarında, geniş bir alaşım yelpazesi bulunmaktadır. Krom miktarı %6 ile %35 arasında, karbon miktarı ise %2 ile %6 arasında değişiklik gösterir. Krom ve karbon dışında diğer alaşım elementleri ise

molibden, silisyum ve manganezdır. Bu alaşımlarda aşınma açısından mikroyapısal özellik katılma esnasında oluşan bol miktardaki krom, demir molibden ve benzeri karbür yapılarıdır. Bu karbür yapılarının etrafındaki matris ise östenitik, perlitik ve martenzitik olabilir.

Östenitik paslanmaz çelik sert dolgu kaplamaları ise kobalt esaslı sert dolgu kaplamalarına alternatif olarak değerlendirilebilir. Bu alaşımlar aşınma dayanımının dışında kavitasyon erozyonunda dirençlidirler [15], [16], [17].

2.2.2. Nikel esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları

Nikel esaslı sert dolgu yüzey kaplaması, yüksek sıcaklık şartlarında çalışan makine ekipman parçalarının aşınma dayanımını arttırmak için kullanılmaktadır. Kobalt esaslı sert dolgu alaşımlarına alternatif bir seçenek olması için Ni-Cr-Mo-W-C alaşımları tasarlanmıştır. Nikel esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları metal-metal aşınma ve yüksek sıcaklık dayanımlarının yanı sıra, sert intermatik bileşikler içerdiği için zayıf darbe direncine sahiptirler [18].

2.2.3. Kobalt esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları

Kobalt esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları, yüksek sıcaklık ve stres altında çalışan makine ekipman parçalarının korunmasında kullanılır. Yüksek sertlik, iyi bir termal stabilitenin yanında aşınma direnci sunarlar. Stellite adıyla bilinen bu sert dolgu yüzey kaplama grubu, türbin kanatları, valf ve kesici takımlar gibi, kritik uygulamalarda kullanılırlar [9], [19].

2.2.4. Bakır esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları

Bakır alaşımları uzun süre yatak malzemesi olarak kullanılmıştır. Tribolojik malzeme olarak bilinmesine rağmen, korozyon, erozyon ve kavitasyon direncinin yanı sıra metal-metal aşınma konularının bulunduğu alanlarda makine ekipman parçalarını ilk boyutlarına döndürmek için kullanılmaktadır [13].

2.2.5. Tungsten karbür esaslı sert dolgu kaplamaları

Yüksek abrasif aşınma ve yüksek sıcaklık gibi zorlu ortam koşullarına maruz kalan mühendislik parçalarında tungsten karbür esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları sıklıkla tercih edilirler. WC-Ni ve WC-Co metal matrisli kompozitler, üstün aşınma dayanımının yanı sıra yüksek termal iletkenliği ile madencilik sektöründe kullanılırlar [20].

2.2.6. Krom karbür esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları

Yüksek sıcaklıklardaki oksidasyon direncinin yanında aşınma dayanımı gerektiren uygulamalarda sıklıkla tercih edilirler. Termal püskürtme ve kaynak yöntemi ile uygulanan bu sert dolgu yüzey kaplamaları uygulanabilir. Havacılık, enerji üretimi ve petrokimya gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılır [21].

2.2.7. Yüksek silisyum esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları

Özellikle hidrotermal türbinler ve nükleer santral valfleri gibi kavite erozyonu ve aşınma dayanımı istenilen zorlu koşullarda, sert intermetalik fazların oluşmasıyla, yüksek silisyumlu sert dolgu yüzey kaplamaları tercih edilmektedir [5].

2.2.8. Kompozit esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları

Kompozit esaslı sert dolgu yüzey kaplamaları, seramik partiküllerin metal matris içerisinde homojen dağılmasıyla elde edilen kaplamalardır. Yüksek aşınma ve darbe dayanımı sunan bu sert dolgu yüzey kaplamaları madencilik ve ağır endüstri koşullarında tercih edilmektedir [22].

Ni, Co, Fe bu sert dolgulara matris görevi görürken WC ve TiC gibi karbür yapılar katkı maddesi olarak kullanılmasıyla, kaplamanın aşınma dayanımı, oksidasyon direnci, kavite erozyonu vb. gibi özellikleri iyileştirilir [19].

2.3. Sert Dolgu Yüzey Kaplama Kaynak Yöntemi Seçimi

Sert dolgu kaplama kaynak yöntemlerinin seçimlerinde, kaplama bileşimi, uygulama ortam koşulları, ana malzeme hassasiyeti vb. birçok parametre göz önünde bulundurularak sert dolgu yüzey kaplama kaynak yöntemi tercih edilmelidir [23], [24].

TIG (GTAW) kaynak yönteminde, ana malzemede ve kaynak metalinde yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalar için tercih edilen kaynak yöntemidir. Bu yöntemde kaynak tükenmeyen tungsten elektrot üzerinden kaynak arkı sağlanır ve argon, helyum gibi inert gazlar ile kaynak metali atmosfer şartlarından izole edilir. Bu kaynak yönteminde, tükenmeyen elektrot ve iş parçası arasındaki ark kaynak banyosunu oluşması sağlanır. Kaynak dolgusu manuel olarak dışarıdan beslenir. Genellikle paslanmaz çelik, alüminyum ve magnezyum gibi hassas malzemelerin kaynağında çok fazla tercih edilmektedir. Havacılık, kimya tesisleri gibi kritik sektörlerde düşük deformasyon ve yüksek kaynak kalitesinden dolayı tercih edilir [25], [26].

MIG-MAG (GMAW) kaynak yönteminde inert ve aktif gaz kullanımına göre iki alt gruba ayrılır. Otomotiv, gemi yapımı, yapı çelikleri, boru üretimi gibi birçok olanda yaygın bir kullanıma sahiptir. Düşük sıçrama, temiz kaynak dikişi, otomasyona uyumluluğu ve yüksek kaynak hızı gibi avantajlara sahip olan yöntem, gaz korumasından dolayı açık ortam koşullarında kaynak işlemi gerçekleştirme konusunda verimsizdir [27], [28].

Toz altı kaynak yöntemi (SAW), tel ve arkin, toz (flux) altında, iş parçasıyla bulunduğu otomatik ve yarı otomatik bir kaynak yöntemidir. Yüksek akım ile çalışan bu yöntemde genellikle kalın parçalar kullanılır ve derin bir nüfuziyet söz konusudur [29].

Plazma ark kaynağı (PAW), TIG kaynak yönteminin gelişmiş versiyonu olarak düşünülür, ark bir nozzle yardımı ile daraltılır ve yoğunlaştırılarak, yüksek enerjili hale getirilir. Havacılık, medikal ve elektronik gibi hassas işlemlerde kullanılır. Yüksek yatırım maliyeti, enerji tüketimi gibi dezavantajlarının yanı sıra, derin nüfuziyet, yüksek hız ve otomasyona uyum gibi avantajlara sahiptir [30].

Özlü tel ark kaynağı (FCAW), içi flux dolu tel kullanılarak, kendiliğinden korumalı veya gaz korumalı olarak iki yöntemi bulan kaynak yöntemidir. Özellikle ağır sanayi, şantiyeler ve açık alan uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Yüksek biriktirme ve dış ortamlarda çalışma gibi avantajlara sahip olan bu kaynak yönteminde, cüruf temizliği ve duman gibi unsurlarda bulunmaktadır [31].

Lazer ışını kaynağı (LBW), yüksek enerji yoğunluğu ile metal biriktirme sağlanan bu yöntemde odaklanmış bir lazer kullanılır. Otomotiv, havacılık, mikro elektronik ve boru üretimi sektörlerinde kullanılır. Isıdan etkilenen bölgenin dar olması, yüksek hızlı kaynak işlemi gibi avantajları bulunmaktadır [32].

Oksi-asetilen kaynak yöntemi (OAW), ince sac ve borularda tamirat, kesme ve lehimleme gibi işlemler için asetilen ve oksijen gazlarının birleştirilmesi ile oluşan alev yardımıyla gerçekleşen bir kaynak yöntemidir. Düşük ekipman maliyeti ve çok yönlülük gibi avantajlarının yanı sıra düşük kaynak hızı, sınırlı nüfuziyet gibi dezavantajlara sahiptir [33].

Örtülü elektrot ark kaynağı (SMAW), elektrik ark kaynağı olarak da bilinen bu yöntem, dünya çapında en yaygın kullanılan kaynak yöntemidir. Kaynak elektrotu ve iş parçası arasında elektrik arkı oluşturularak kaynak işlemi gerçekleştirilir. Örtülü elektrotlar, çekirdek tel ve örtü malzemesi olmak üzere iki ana bileşenden

oluşmaktadır. Çekirdek tel alaşım ve kaynak dolgusunu sağlarken, örtü bileşimi ise koruyucu gaz, ark stabilizasyonu, alaşımlama ve cüruf oluşumu sağlar. Örtü bileşiminde, SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , TiO_2 vb. oksitler, alaşım elementleri (Mn, Cr, Ni), bağlayıcı maddeler bulunur. Örtü bileşiminin selülozik, bazik ve rutil gibi türleri bulunur ve bunlar, kullanılacak iş için ve kaynak pozisyonu gibi parametrelere bağlı olarak tercih edilirler.

Enerji santralleri, boru hat üretimleri, inşaat ve gemi yapımı gibi birçok sektörde açık alanlarda kullanımından dolayı idealdir. Tamir bakım işlemlerinde de kaynak hızı yavaş olmasına rağmen, kaynak bileşiminin çeşitliği ve her ortam koşulunda kaynak işleminin gerçekleştirilmesi gibi avantajları SMAW yönteminin günümüzde hala rağbet görmesini sağlamaktadır [34], [35].



3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sert dolgu yüzey kaplamalarında, ortam koşullarına karşı makine ekipman parçalarının özelliklerinin iyileştirilmesidir. Bu durum bazı uygulamalarda aşınma dayanımının iyileştirilmesi iken bazı uygulamalarda kavitasyon erozyon direncinin iyileştirilmesi olabilir. Yüzey kaplama işlemi esasen makine ekipman parçaların ömürlerini uzatmak, hasar almış parçaların onarımı gerçekleştirerek bakım maliyetlerinin düşürülmesini amaçlayan mühendislik uygulamalarıdır.

Yıldızlı ve ark. Yaptığı çalışmada östenitik-manganez sert dolgu yüzey kaplama bileşimi ile düşük karbonlu makine ekipman parçasının yüzeyi SMAW kaynak yöntemi kullanılarak 3 paso olacak şekilde kaplama işlemi gerçekleştirmiş ve bu pasoların erozyon özelliklerini incelemişlerdir. 30°, 60° ve 90° açı ile erozyon testleri ASTM G40 standartını karşılayacak şekilde ölçülmüş ve ilk pasonun erozyon direncinin çok pasolu numunelere göre 1,5 kat daha yüksek olduğu tespit etmişlerdir. Paso sayısının artmasıyla, kompozisyonun özellikle C ve Mn çeşitlenmesine yol açtığı ve sertlik ile mikroyapılar arasında farklılıklar ortaya çıktığını görmüşlerdir [36].

Kıma ve ark. Östenitik Fe-Cr-C-Si sert dolgu kaplamalarında manganez ve borun kavitasyon erozyonu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada manganez %0 ile %10, bor ise %0 ile %0,3 arasında değişiklik göstermektedir. Bor ilavesinin tane incelttiği ve martenzit oluşumunu desteklediği aynı zamanda manganez ilavesinin ise gerilim kaynaklı martenzit oluşumunu destekleyerek kavitasyon direncinin arttığını tespit etmişlerdir [37].

Atamert ve ark. Kobalt bazlı sert dolgu yüzey kaplamalarında, bileşimin ve mikroyapının aşınma dayanımı üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, kobalt bazlı sert dolgu yüzey kaplamalarına alternatif olarak demir bazlı sert dolgu alaşımlarını da incelemişlerdir. Çalışmalarında silikon ve manganezin sert intermetalik fazları stabile etmede etkili olduğu ve metal-metal aşınma üzerinde olumlu etkilere sahip olduğunu tespit etmişlerdir [38].

Jankauskas ve ark. Madencilik, tarım vb. sektörlerde kullanılan aşınmış parçanın onarımı ve yeni makine ekipman parçaların korunması için Fe-Cr-C sert dolgu yüzey

kaplamalarında aşınma dayanımını ve mikroyapıları üzerine çalışmışlardır. Kaplama bileşimlerinde %0,87 ile %2,95 arasında C, %1,3 ile %33,20 arasında Cr değişkenlik göstermesiyle beraber, Si, Mn ve Ti elementlerinde de farklı oranlar üzerine çalışmışlardır. Kimyasal bileşime bağlı olarak sert dolgu yüzey kaplamalarında, östenit, perlit ledeburit ve çeşitli karbür yapılarını görmüşlerdir. Kimyasal bileşimlerine ve mikroyapılarına bağlı olarak çalışmadaki malzemelerin sertlik değerlerinin 29,6-53,5 HRC arasındadır. Düşük gerilimli aşınma ortamında en belirgin etkiyi karbon elementi göstermiştir. Düşük, orta ve yüksek gerilimli aşınma ortamlarında TiC içeren yüzey kaplamanın iyi performans sergilediğini tespit etmişlerdir [39].

Atamert ve Bhadeshia çalışmalarında %34 Cr ve %4,5 C içeren demir esaslı sert dolgu yüzey kaplamasını elektrik ark kaynağı ile gerçekleştirilmiş ve %0,1-6,9 arasında değişen Si ilavesinin kaplamanın genel özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada Si ilavesi ile birlikte M7C3 karbür yapılarının daha eş eksenli bir morfolojiye dönüşmesi ile aşınma dayanımının artış gösterdiği desteklenmektedir. Bunun yanı sıra çalışmada silisyum elementinin ilavesi ile östenitik matris yapının ferritik matris yapıya dönüştüğü ve Si miktarının çoğunluğunun ferrit içerisinde çözüldüğünü ortaya koymuşlardır [40].

Azimi ve Ark. TIG kaynak yöntemi kullanarak, St.52 malzeme üzerine Fe-Cr-C sert dolgu yüzey kaplama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Baz olarak alınan bileşime %6 ve %10 Si ilavesi yaparak, aşınma dayanımı, sertlik ve mikroyapıdaki farklılıkları incelemişlerdir. Çalışmalarında östenitik dendrit yapı ile M7C3 karbür yapılarından oluşan bir mikro yapı elde etmişlerdir. %6 Si ilavesi ile aşınma dayanımını ve mikrosertlik en iyi sonuçları vermiştir [41].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Giriş

Yüzey alaşımlama yöntemi makine ekipman parçalarını özellikle aşındırıcı ortamlardan koruyarak yüzey performansını iyileştirerek, makine ekipman parçalarının ömürlerini ve bakım masrafları düşüren bir yüzey işlemidir. Bu sayede makine ekipman parçalarının çalışma ömürleri büyük ölçüde arttırılarak, ekonomik kayıplar engellenmekte, işçilik, bakım maliyetleri düşmekte ve üretim verimi artmaktadır. Bu amaç doğrultusunda Fe-Cr-C alaşımları büyük rol oynamakta ve önem arz etmektedir. Bu çalışmada Fe-Cr-C yüzey alaşımına Silisyum ve Manganez ilavesinin kaynak metali özelliklerine etkisi incelenecektir. Çalışma kapsamında üretilen elektrotlarda alaşımsız S1 kalite çekirdek tel kullanılmıştır. Alaşımlama elektrot örtüsünden sağlanmış ve krom içeriğini sağlamak için yüksek karbonlu Ferro-krom, manganez içeriğini sağlamak için ferro-manganez, silisyum içeriğini ayarlamak için ise Ferro-silisyum, Karbon içeriğini ayarlamak için ise grafit kullanılmıştır. Bunun yanı sıra örtülü alaşımlama elementlerinin geçişi arttırmak için Florit ve kalsit, plastiklik için sodyum karboksimetil selüloz ve sodyum aljinat, arkı stabilize etmek için ise rutil ve potasyum feldspat kullanılmıştır. Hazırlanan pastalar, ekstrüder preslerde çekirdek tel ile birleşerek, elektrotlar üretilmiştir. Sonrasında bu elektrotlar fırında kurutularak S355J2+N parça üzerine alaşıma yapılmıştır.

4.2. Elektrot Tasarımı

4.2.1. Kullanılan hammaddeler

Çalışma kapsamında tasarım süreçleri ağırlıkça yüzde olarak dikkatlice hesaplanmıştır. Kaynak metali kimyasal bileşimleri hedeflenen alaşım miktarına yaklaşıma kadar tasarım çalışmalarına devam edilmiştir. Örtü tasarımında koruma, ark stabilizatörü ve plastikleştirici ve bağlayıcı olarak, grafit, florit, kalsit, rutil, potasyum feldspat, sodyum karboksimetil selüloz, sodyum aljinat toz hammaddelerinden oluşan flaks karışımı kullanılmıştır. Alaşımlama için ise ferro-krom, ferro-manganez düşük karbon, ferro-manganez yüksek karbon ferro-silisyum, grafit ve demir tozu

kullanılmıştır. Alaşımlama olarak kullanılan toz hammaddelerin bileşimleri Tablo.4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Alaşımlama toz hammaddelerin kimyasal bileşimi.

Hammaddeler	% C	% Cr	% Mn	% Si	% Al	% Fe
Ferro-Krom	9,25	66,30	0,15	1,00	0,18	Kalan
Ferro-Manganez Düşük Karbon	0,97	-	80,72	0,59	-	Kalan
Ferro-Manganez Yüksek Karbon	6,80	-	77,50	0,18	-	Kalan
Ferro-Silisyum	0,008	-	0,16	44,40	1,26	Kalan
Grafit	99,93	-	-	-	-	Kalan
Demir Tozu	0,01	-	0,03	0,08	-	99,90

Elektrot tasarımlarının hepsi için alaşım tozları farklı oranlarda hesaplanmıştır ve flaks karışım ile karıştırılmıştır. Flaks malzemelerin örtü içerisindeki bileşimi Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Flaks malzeme bileşimi.

Hammaddeler	Miktar	% ağı.
Florit (CaF ₂)		
Kalsit (CaCO ₃)		
Rutil (TiO ₂)	Flask	
Potasyum Feldspat (KAlSi ₃ O ₈)	Karışımı	10
Sodyum Karboksimetil Selüloz		
Sodyum Aljinat		
Cam suyu (Na ₂ SiO ₂) _n O)	Bağlayıcı	15

Elektrotlarda çekirdek tel olarak 4,0mm çapında 350mm uzunluğunda soğuk çekme Filmaşın kullanılmıştır. Çekirdek telin kimyasal bileşimi Tablo 4.3’te görüldüğü gibidir.

Tablo 4.3. Çekirdek tel kimyasal bileşimi.

Çekirdek tel	% C	% Si	% Mn	% S	% P	% Fe
S1	0,05	0,04	0,52	0,002	0,006	Kalan

Üretilen elektrotlar uygulana bilmesi altlık malzeme olarak S355J2+N malzeme çekilmiş ve malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 4.4.’te verilmiştir.

Tablo 4.4. Altıklık malzeme kimyasal bileşimi.

Altıklık malzeme	% C	% Si	% Mn	% S	% P	% Fe
S355J2+N	0,15	0,30	1,40	0,003	0,014	Kalan

4.3. Elektrot Tasarımı ve Gruplandırma

Elektrotu meydana getiren iki ana unsur, çekirdek tel ve örtü bileşimidir. Çalışmada alaşımlama sadece örtü üzerinden gerçekleşeceği için örtü kalınlığı büyük önem arz etmektedir. Yapılan ön çalışmalar ve bilgi birikim sayesinde üretilecek olan örtülü elektrotların çapının 8,50 mm olarak belirlenmiş ve tez çalışması yürütülmüştür.

Belirlenen parametrelerin ardından kaynak uygulamalarında kullanılmak üzere 1 adet baz tasarım gerçekleştirilmiş ve bu tasarım üzerinden 15 farklı bileşim için tasarım çalışmaları yapılmış ve 4 farklı grup altında deneysel çalışmalar ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bu gruplar ve hedeflenen bileşim miktarları Tablo 4.5.'te belirtilmiştir.

Tablo 4.5. Numunelerin hedeflenen kimyasal bileşimleri.

Numune Adı	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Fe	Grup Adı
Si0Mn0	4,50	0	0	32	63,5	Grup 0
Si0Mn1	4,50	0	1	32	62,5	
Si0Mn2	4,50	0	2	32	61,5	
Si0Mn3	4,50	0	3	32	60,5	
Si1Mn0	4,50	1	0	32	62,5	Grup 1
Si1Mn1	4,50	1	1	32	61,5	
Si1Mn2	4,50	1	2	32	60,5	
Si1Mn3	4,50	1	3	32	59,5	
Si2Mn0	4,50	2	0	32	61,5	Grup 2
Si2Mn1	4,50	2	1	32	60,5	
Si2Mn2	4,50	2	2	32	59,5	
Si2Mn3	4,50	2	3	32	58,5	
Si3Mn0	4,50	3	0	32	60,5	Grup 3
Si3Mn1	4,50	3	1	32	59,5	
Si3Mn2	4,50	3	2	32	58,5	
Si3Mn3	4,50	3	3	32	57,5	

4.4. Elektrot Üretimi

Elektrot üretimi için kullanılacak toz hammaddeler gerçekleştirilen tasarımlardaki miktarlara göre 1/10000 hassasiyetindeki terazide tartılarak miksere alınmıştır. Toz

hammadeler homojen olana kadar 15 dk boyunca kuru karışım gerçekleştirilmiş ve sonrasında üzerine cam suyu eklenilmiş ve karışım homojen olana kadar, 15 ile 20 dakika arasında karışım ve elektrot pastası elde edilmiştir. Bu pasta briket presinde preslenerek, ekstrüder prese alınmıştır. Pres yardımıyla ø4,00x350mm ebatlarında çekirdek tel elektrot pastasıyla kaplanmış ve örtülü elektrotlar üretilmiştir. Üretim için kullanılan ekstrüder pres Şekil 4.1.'de görüldüğü gibidir.

Üretimleri gerçekleştirilen örtülü elektrotların kullanılabilmesi için önce kurutulması gerekmektedir. Kurutma işlemi için elektrotları ısıtma işlemi fırını kullanılmıştır. Elektrotlar 380 °C sıcaklıkta 2 saat olacak şekilde kurutulmuş ve kullanım için hazırlanmıştır.



Şekil 4.1. Ekstrüder pres.

4.5. Kaynak İşlemi

Çalışma kapsamında üretimleri tamamlanan elektrotlar, GekaMac RKM 650 elektrik ark kaynak makinesi kullanılarak, altlık malzeme üzerine kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Altlık malzemenin kaplama kaynağı öncesi yüzeyi temizlenerek hazırlanmıştır. Kaplama kaynak işlemi için 200-210 amper akım ve 34,5 volt gerilim olacak şekilde doğru akımda ters kutuplama ile gerçekleştirilmiştir. Bu değerler bağlı olarak, Eşitlik 4.1'de verilen formüle göre ısı girdisi hesaplanmıştır.

$$E = \frac{U.I.t.6}{100.L} \quad (4.1)$$

Eşitlikte, E ısı girdisi (kj/mm), U kaynak gerilimini (volt), I kaynak akım şiddetini (amper), t kaynak süresini (dak), L ise kaynak dikiş uzunluğunu (mm) ifade etmektedir.

4.6. Karakterizasyon İşlemi

Altlık malzeme üzerine kaplama kaynağı yapılmasının ardından çeşitli testler ve analizler için malzemeler uygun büyüklükte kesilmiştir. Kesme işlemi için sıvı soğutmalı, hassas kesme cihazında gerçekleştirilmiştir. Kaplama kaynağının kesitinden mikroyapı ve sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak metalinin kimyasal analizi için ise TS EN ISO 15614-7’de belirtildiği üzere 400x150mm ölçülerindeki altlık malzeme üzerine kaplama kaynağı gerçekleştirilerek Rigaku ZSX Primus II XRF cihazında ve Leco CS600 cihazında kaynak metali kimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapı ve mikrosertlik testleri için hazırlanan numuneler kesme işleminin ardından bakelite alınmıştır. Numuneler sırasıyla, 80, 180, 220, 320, 500, 800, 1200 ve 2000 grid zımpara ve 1 µm elmas pasta kullanılarak yüzeyleri hazırlanmıştır.

Aşınma testleri için ise altlık malzemeye paralel olacak şekilde sıvı soğutma ile taşlama işlemi gerçekleştirilmiş ve ardından 180, 220, 320, 500, 800, 1200 ve 2000 grip zımpara ve 1 µm elmas pasta yüzey hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

4.6.1. Sertlik testi ve kimyasal analizler

TS EN ISO 15614-7 standardında belirtilen veriler ışığında tüm elektrotlar 400x150mm altlık malzemeye 1 paso olacak şekilde kaplama kaynağı yapılmıştır. Her numuneden 30x30mm olacak şekilde 2 adet test parçası çıkartılmıştır. İlk test parçası ile Rigaku ZSX Primus II Marka XRF cihazı ile kimyasal analiz testleri, Leco CS 600 cihazında ise % C miktarı ölçülmüştür. gerçekleştirilmiştir. Diğer parça kaynak kesit alanından 0,5mm ölçüm aralığı ile 1 kg yük altında mikrosertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Vickers sertlik ölçümü için EMCOTEST DURASCAN marka mikrosertlik cihazı kullanılmıştır.

4.6.2. Faz analizleri

Çalışma kapsamında geliştirilen elektrotlar ile kaplanmış numuneler metalografik olarak hazırlanarak, Ferritik klorür çözeltisi(2 gr demir klorür, 5 ml HCl, 30 ml su, 60 ml metil alkol) ile dağlanmıştır. Nikon LV150N Marka optik mikroskopta 20X, 50X

ve 100X büyütmelemlerde sert dolgu kaplamalarının matrisleri incelenmiştir. Bunun yanı sıra numuneler, JEOL JSM-6060 LV taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelenmeye alınmıştır. SEM cihazına entegre olarak çalışan IXRF Systems Inc. EDS (Electron Dispersive Spectroscopy) cihazıyla noktasal ve bölgesel elementel analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.6.3. Aşınma testleri

Sert dolgu yüzey kaplamaların alt ve üst yüzeyleri paralel olacak şekilde işlenildikten sonra, test uygulanacağı kaplama yüzeyi aşınma testi için 80, 220, 320, 500, 800 ve 1200 grid zımparadan geçirilerek hazırlanmıştır. Aşınma testi salınım hareketli olacak şekilde ASTM G133 standartına göre CSM Instruments TRIBOMETER marka aşınma cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Aşınma testleri 25 °C (±2) sıcaklık ile %30 (±3) nem ihtiva eden ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerinde 10mm çapındaki Al₂O₃ (1850 HV_{0,1}) bilye kullanılmıştır. Testler 5N yük ile 100 m boyunda, 10 cm/s hız ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin testlerin bitmesinin ardından SEM’de aşınma izleri incelenmiş ve ölçümleri yapılmıştır. Ölçülen iz genişlikleri aşınma cihazının programına girişmiş ve her numune için aşınma hızı verisi elde edilmiştir. Eşitlik 4.2 uyarınca numunelerin aşınma hacimleri hesaplanmıştır.

$$A_o = \frac{V}{F.S} \quad (4.2)$$

Verilen formülde A_o aşınma hızını (mm³/Nm), V aşınma hacmini(mm³), F normal yükü (N), S ise kayma mesafesini (m) temsil etmektedir.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Çalışma kapsamında üretilen ile örtülü elektrotların hepsi TS EN ISO 15614-7 standartında yer alan verilere dayanarak Rigaku ZSX Primus II Marka XRF cihazı ile kimyasal analiz testleri, Leco CS 600 cihazında ise % C miktarı ölçülmüş ve Tablo 5.1’de bu verilere yer verilmiştir.

Tablo 5.1. Numunelerin kimyasal bileşimleri.

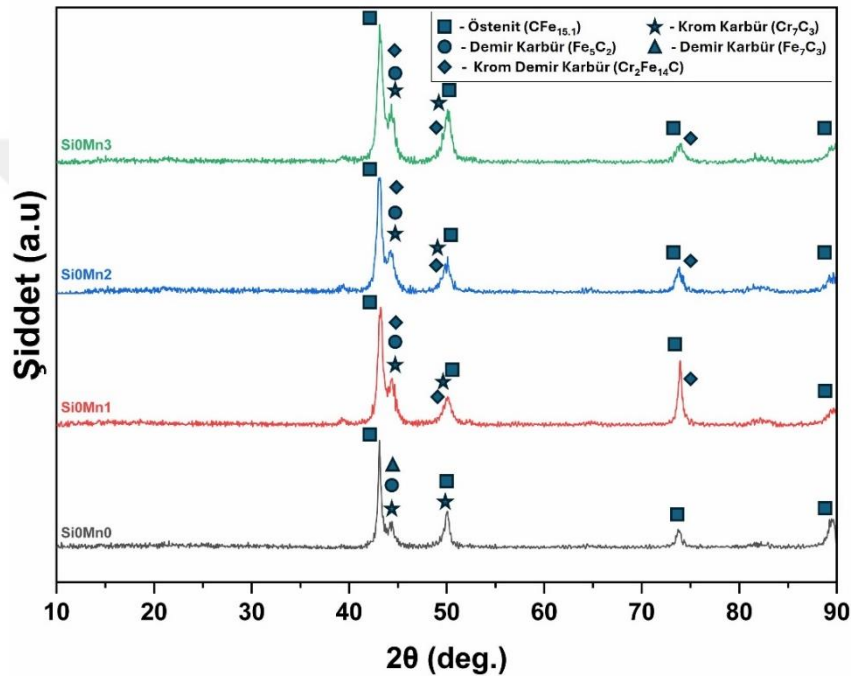
Numune Adı	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Fe	Grup Adı
Si0Mn0	4,53	0,08	0,06	32,21	Kalan	Grup 0
Si0Mn1	4,48	0,09	1,05	31,96	Kalan	
Si0Mn2	4,51	0,06	1,98	32,06	Kalan	
Si0Mn3	4,50	0,03	3,05	31,85	Kalan	
Si1Mn0	4,51	0,98	0,08	32,10	Kalan	Grup 1
Si1Mn1	4,49	1,02	0,98	32,09	Kalan	
Si1Mn2	4,46	1,06	2,06	31,75	Kalan	
Si1Mn3	4,53	0,94	3,03	32,10	Kalan	
Si2Mn0	4,48	2,08	0,09	32,18	Kalan	Grup 2
Si2Mn1	4,46	1,96	1,04	31,96	Kalan	
Si2Mn2	4,42	1,99	1,92	31,81	Kalan	
Si2Mn3	4,51	1,91	3,01	32,14	Kalan	
Si3Mn0	4,50	3,06	0,08	32,01	Kalan	Grup 3
Si3Mn1	4,46	3,03	1,06	31,93	Kalan	
Si3Mn2	4,53	2,96	2,01	32,23	Kalan	
Si3Mn3	4,54	3,01	2,93	32,15	Kalan	

5.1. Mikroyapı ve Faz Analizleri

Deneyssel çalışmalar neticesinde, 16 farklı bileşime sahip örtülü elektrot üretilmiş ve elektrik ark kaynağı ile altlık malzemeye sert dolgu yüzey kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu kaplamalar dört farklı grupta kıyaslama yapılarak analiz edilmiştir.

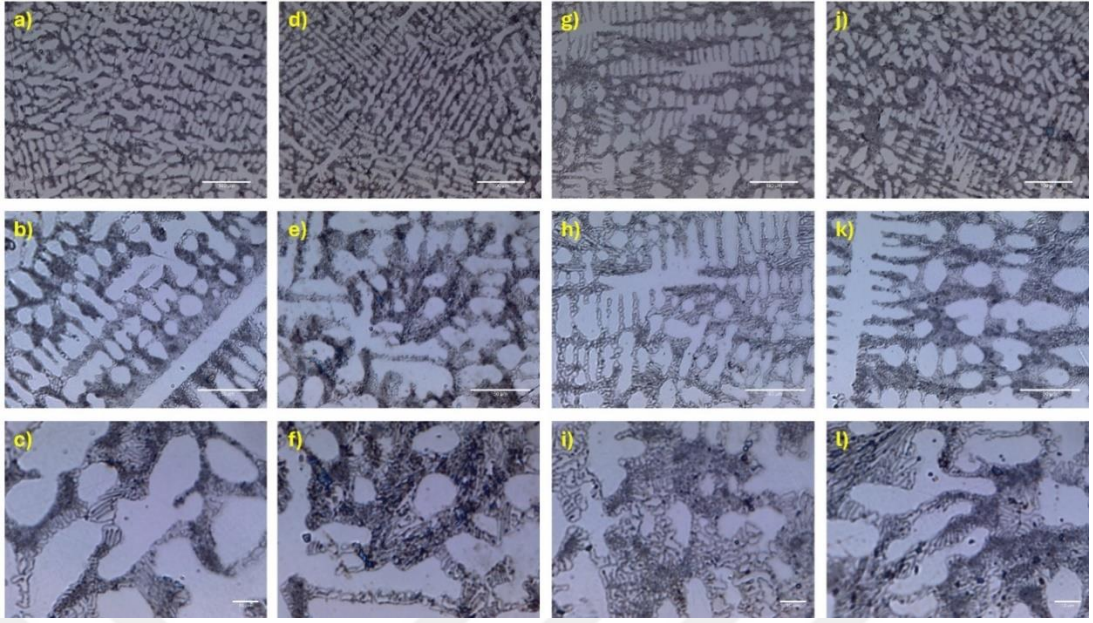
5.1.1. Grup 0

Şekil 5.1’de Grup 0 alaşımları olan Si0Mn0, Si0Mn1, Si0Mn2, Si0Mn3 sert dolgu yüzey kaplamalarının XRD paternleri görülmektedir. Fe-Cr-C esaslı Si ve Mn elementi bulunmayan kaplamada γ -Fe, krom karbür (Cr_7C_3), demir karbür (Fe_7C_3), demir karbür (Fe_5C_2) yapılarının olduğu tespit edilmiştir. Si0Mn1, Si0Mn2 ve Si0Mn3 numunelerin hepsinde aynı fazlar tespit edilmiş ve bunlar, γ -Fe, krom karbür (Cr_7C_3), demir karbür (Fe_7C_3), demir karbür (Fe_5C_2), krom demir karbür ($\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$) yapısıdır. Mn elementinin ilavesi ile yapıda $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ oluştuğu görülmüştür.



Şekil 5.1. Grup 0 XRD paternleri.

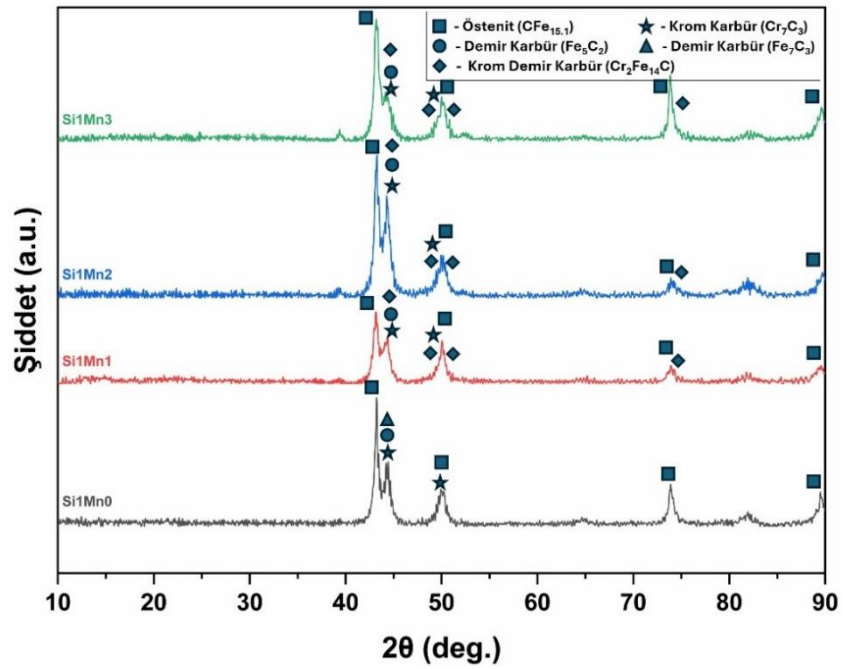
Şekil 5.2’de Grup 0 olarak adlandırılan Si0Mn0, Si0Mn1, Si0Mn2 Si0Mn3 sert dolgu yüzey kaplamalarının optik mikroskop ile alınmış mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Numunelerin hepsinde açık renk görünen dentritik östenit matris yapısı ve bu dentrit kolları arasında katılaştan karbür yapıları görülmektedir. XRD paternlerine bakıldığında bu karbür yapıları Si0Mn0 numunesi için Cr_7C_3 , Fe_7C_3 ve Fe_5C_2 yapılarıdır. Si0Mn1, Si0Mn2 Si0Mn3 numuneleri için ise bu karbür yapıları Cr_7C_3 , Fe_7C_3 , Fe_5C_2 ve $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ yapılarıdır. Grup 0 numuneleri için dentritik matris yapısının ve karbür yapılarının Mn ilavesi ile değişmediği görülmüştür.



Şekil 5.2. Grup 0 optik mikroskop görüntüleri (a-c) Si0Mn0; (d-f) Si0Mn1; (g-i) Si0Mn2; (j-l) Si0Mn3.

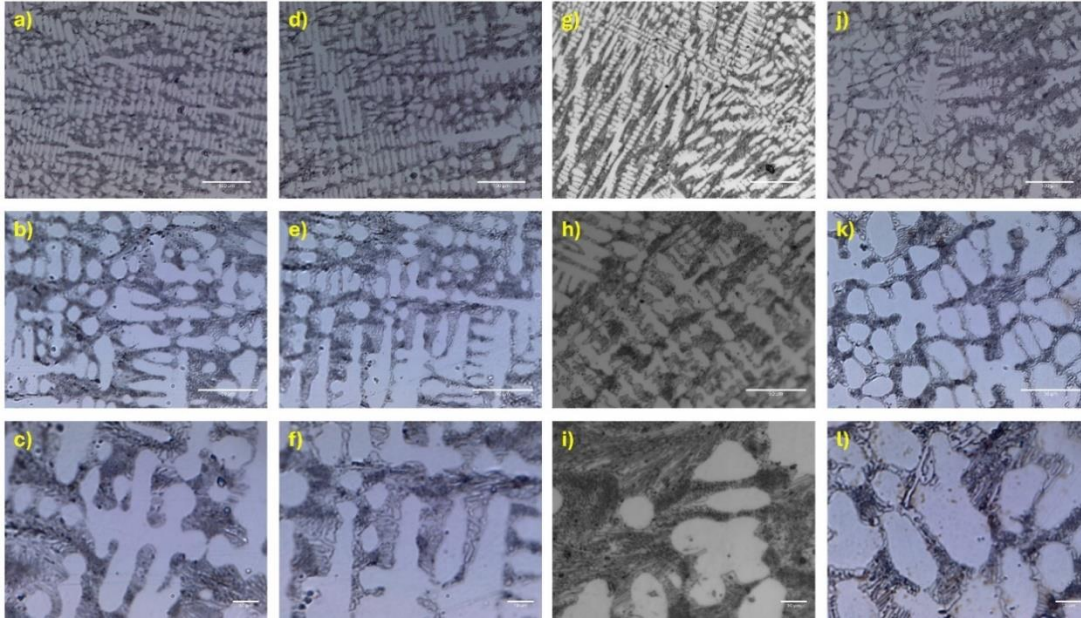
5.1.2. Grup 1

Şekil 5.2’de Grup 1 olarak adlandırılan Si1Mn0, Si1Mn1, Si1Mn2 ve Si1Mn3 e ait XRD paternleri verilmiştir. Si1Mn0 numunesinde γ -Fe, Cr_7C_3 , Fe_7C_3 ve Fe_5C_2 yapılarının bulunduğu tespit edilmiştir. Grup 1 içerisinde yer alan diğer Si1Mn1, Si1Mn2, Si1Mn3 numunelerinde ise γ -Fe, Cr_7C_3 , Fe_7C_3 , Fe_5C_2 ve $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ yapıları tespit edilmiştir. Mn elementinin ilavesi ile yapıda $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ oluştuğu görülmüştür.



Şekil 5.3. Grup 1 XRD paternleri.

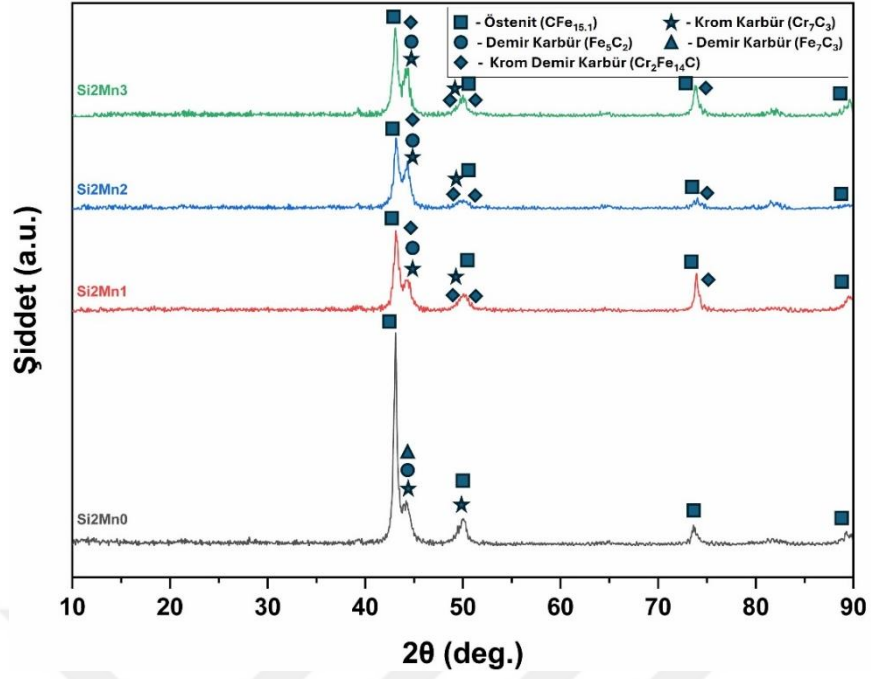
Grup 1 sert dolgu yüzey kaplamaların mikroyapı görüntüleri Şekil 5.4'te verilmiştir. Mikroyapı görüntülerinde numunelerin tamamında dentritik östenit fazı matrisi açık renkli olarak görülmektedir. Koyu renkli görünen karbür yapıları dentrit yapının etrafında katılaştığı görülmektedir. Si1Mn0 için bu karbür yapıları Cr_7C_3 , Fe_7C_3 ve Fe_5C_2 iken, Si1Mn1, Si1Mn2 ve Si1Mn3 numuneleri için ise Cr_7C_3 , Fe_7C_3 , Fe_5C_2 ve $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ karbür yapılarıdır. Grup 1 numuneleri için Mn ilavesi ile dentritik matris yapısının ve dentrik kollarında herhangi bir farklılaşma ile karşılaşmamıştır.



Şekil 5.4. Grup 1 optik mikroskop görüntüleri (a-c) Si1Mn0; (d-f) Si1Mn1; (g-i) Si1Mn2; (j-l) Si1Mn3.

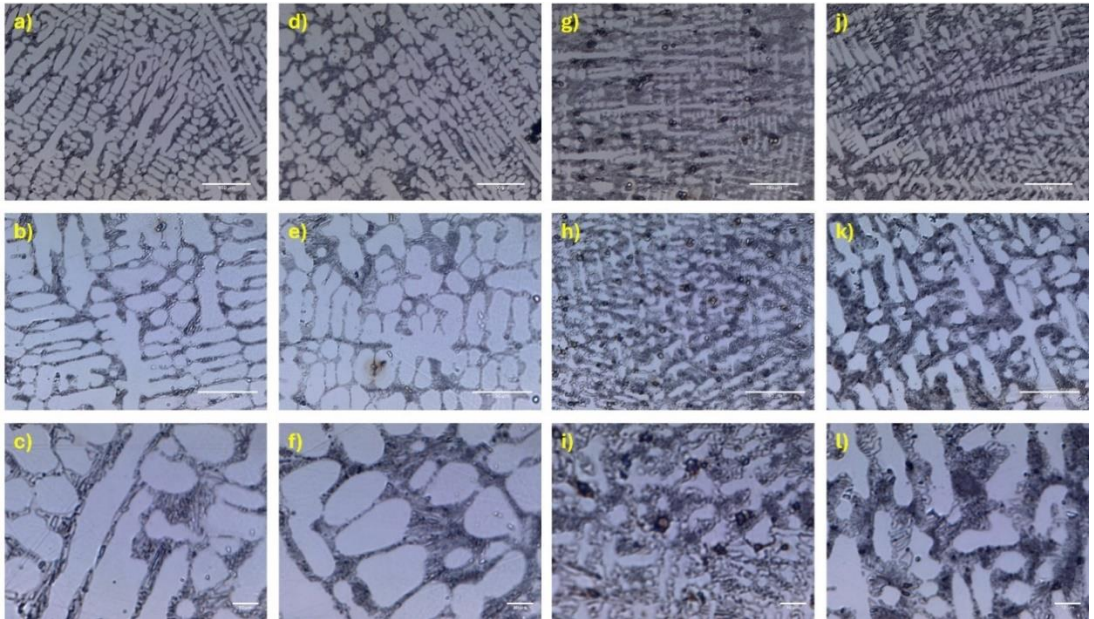
5.1.3. Grup 2

Şekil 5.5'te Grup 2 numunelerine ait XRD paternleri verilmiştir. Grup 2 içerisinde yer alan Si2Mn0, Si2Mn1, Si2Mn2 ve Si2Mn3 numunelerinin XRD paternleri incelendiğinde, Si2Mn0 numunesinde $\gamma\text{-Fe}$, Cr_7C_3 , Fe_7C_3 ve Fe_5C_2 yapılarının bulunduğu tespit edilmiştir. Grup 1 içerisinde yer alan diğer Si2Mn1, Si2Mn2, Si2Mn3 numunelerinde ise $\gamma\text{-Fe}$, Cr_7C_3 , Fe_7C_3 , Fe_5C_2 ve $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ yapıları olduğu görülmüştür. Mn elementinin ilavesi ile yapıda $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ oluştuğu görülmüştür.



Şekil 5.5. Grup 2 XRD paternleri.

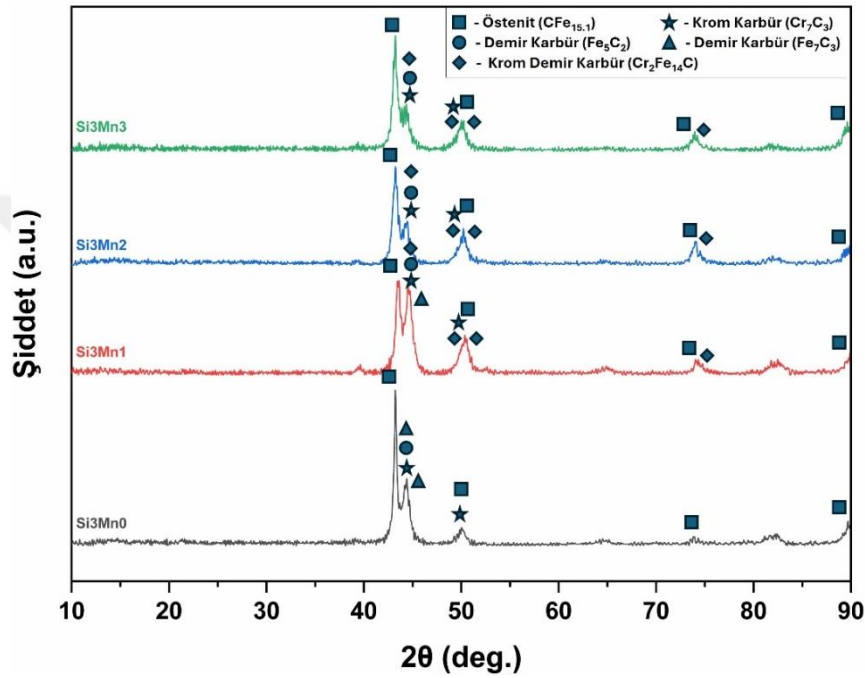
Grup 2 olarak adlandırılan sert dolgu yüzey kaplama numunelerinin mikroyapı görüntüleri, Şekil 5.6’da görülmektedir. Si2Mn0, Si2Mn1, Si2Mn2 ve Si2Mn3 numunelerinde γ -Fe matris yapısı açık renkli dentritik şekildedir. SiMn0 için bu karbür yapıları Cr_7C_3 , Fe_7C_3 ve Fe_5C_2 iken, Si2Mn1, Si2Mn2 ve Si2Mn3 numuneleri için ise Cr_7C_3 , Fe_7C_3 , Fe_5C_2 ve $Cr_2Fe_{14}C$ karbür yapılarıdır. Grup 2 numunelerinde Mn elementinin ilavesi ile dentritik kolların incelindiği ve karbür fazın arttığı görülmektedir.



Şekil 5.6. Grup 2 optik mikroskop görüntüleri (a-c) Si2Mn0; (d-f) Si2Mn1; (g-i) Si2Mn2; (j-l) Si2Mn3.

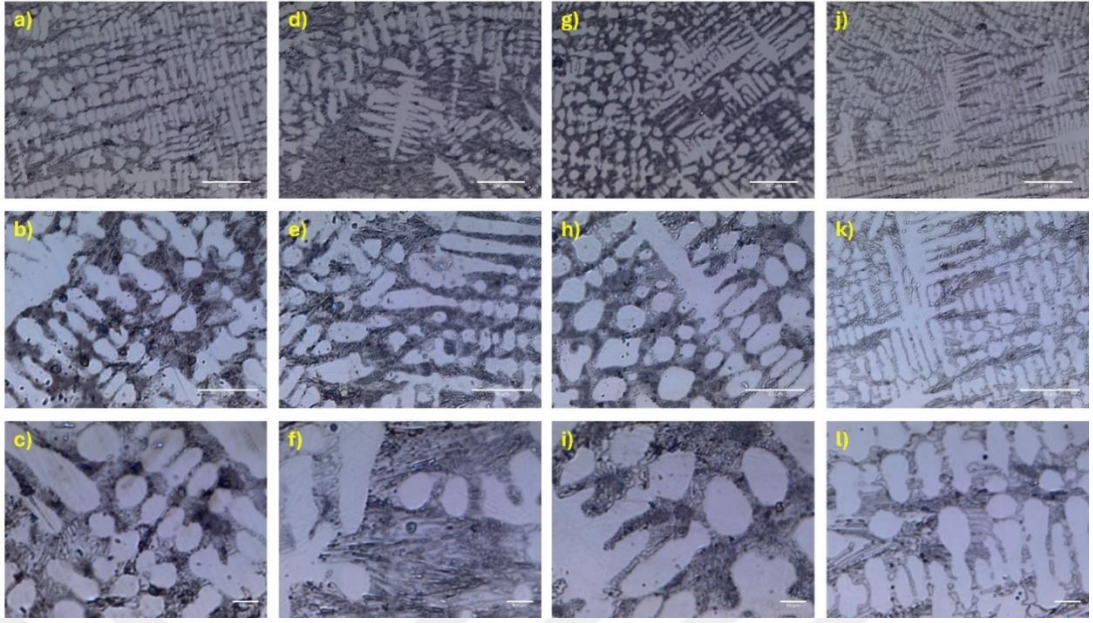
5.1.4. Grup 3

Şekil 5.7’te Grup 3 numunelerine ait XRD paternleri verilmiştir. Grup 2 içerisinde yer alan Si2Mn0, Si2Mn1, Si2Mn2 ve Si2Mn3 numunelerinin XRD paternleri bakıldığında, Si3Mn0 numunesinde γ -Fe, Cr_7C_3 , Fe_7C_3 ve Fe_5C_2 yapılarının bulunduğu tespit edilmiştir. Grup 1 içerisinde yer alan diğer Si3Mn1, Si3Mn2, Si3Mn3 numunelerinde ise γ -Fe, Cr_7C_3 , Fe_7C_3 , Fe_5C_2 ve $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ yapıları olduğu görülmüştür. Mn elementinin ilavesi ile yapıda $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ oluştuğu görülmüştür.



Şekil 5.7. Grup 3 XRD paternleri.

Şekil 5.8’de Grup 3 numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Numunelerin mikroyapıları incelendiğinde tüm numunelerin dentritik γ -Fe matrisi yapısında olduğu ve açık renkli olarak görülmektedir. Si3Mn0 numunesinde daha koyu renkte görünen karbürler Cr_7C_3 , Fe_7C_3 ve Fe_5C_2 yapısıdır. Si3Mn1, Si3Mn2 ve Si3Mn3 numunelerinde ise karbür yapıları Cr_7C_3 , Fe_7C_3 , Fe_5C_2 ve $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ şeklindedir. Mn elementinin yapıya ilavesi ile dentritik kolların incelendiği görülmüştür.



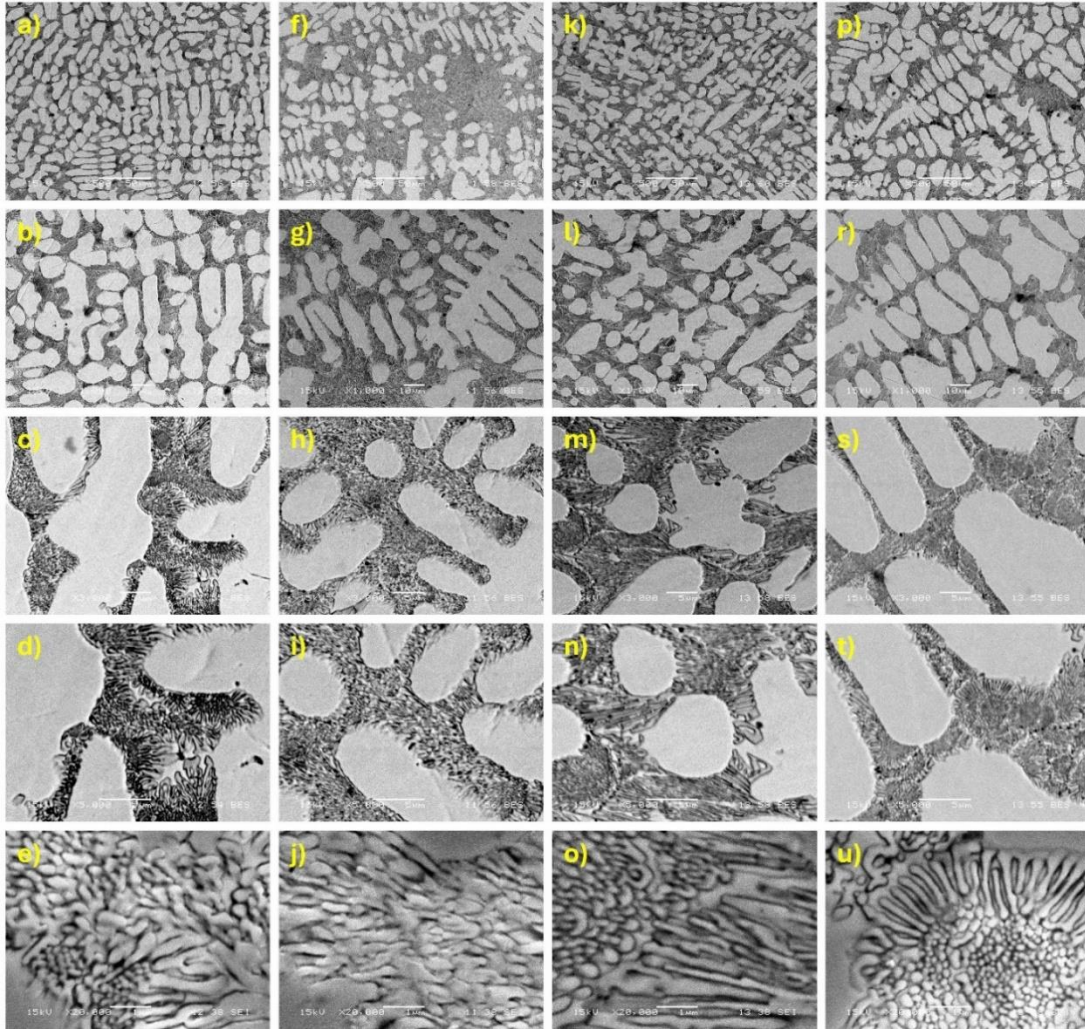
Şekil 5.8. Grup 3 optik mikroskop görüntüleri (a-c) Si3Mn0; (d-f) Si3Mn1; (g-i) Si3Mn2; (j-l) Si3Mn3.

5.2. SEM Görüntüleri

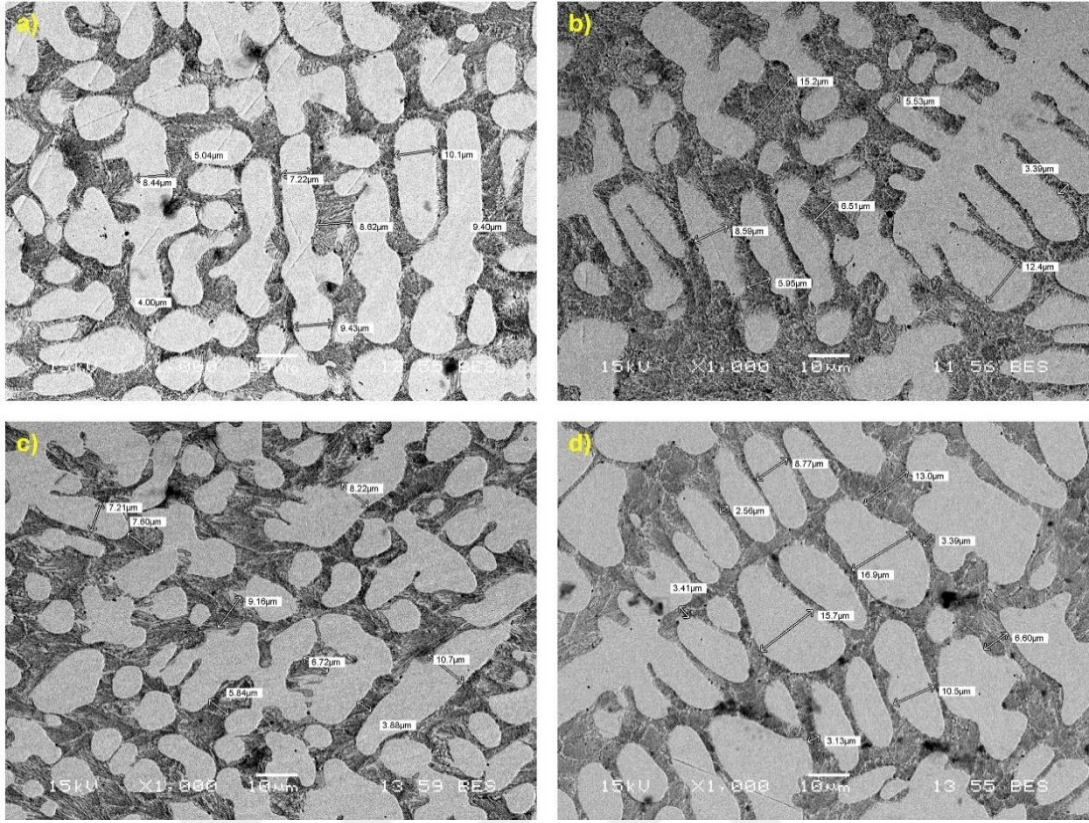
Çalışma kapsamında üretilen elektrotlar ile üretilen sert dolgu yüzey kaplamalarından Si0Mn0, Si0Mn3, Si3Mn0 ve Si3Mn3 numunelerinin SEM ile incelenen mikroyapı Şekil 5.9'da görülmektedir. Si0Mn0 numunesinin mikroyapıları Şekil 5.9 (a-e) arasında görülmektedir. Si0Mn0 numunesinde dentritik γ -Fe yapısı ve lamelli karbür yapıları görülmektedir. Şekil 5.9d'ye yakın bakıldığında karbür yapıları arasında oluşan γ -Fe yapıları görülmektedir. Şekil 5.9(f-j)'de Si0Mn3 numunesinin SEM ile görüntülenen mikroyapıları yer almaktadır. Si0Mn3 numunesinde dentritik γ -Fe yapısı ve lamelli karbür yapıları görülmektedir. Şekil5.9(k-o)'da Si3Mn0 numunesinin SEM ile görüntülenen mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Si3Mn0 numunesinin mikroyapılarına bakıldığında dentritik γ -Fe yapısı ve lamelli karbür yapılarının yanında, Şekil5.9(n) de görüldüğü üzere hiperötektik karbür katılaşmaları görülmektedir. Şekil 5.9(p-u)'da Si3Mn3 numunesinin SEM ile görüntülenen mikroyapısı yer almaktadır. Si3Mn3 numunesinde dentritik γ -Fe yapısı ve lamelli karbür yapıları görülmektedir.

Şekil 5.10'de SEM ile görüntülenen karbür yapıların ve dentritik γ -Fe yapısının genişlikleri ölçülmüştür. Şekil 5.10(a)'da Si0Mn0 numunesine ait ölçümler görülmektedir. γ -Fe yapısının genişliği 7,22 μ m ile 10,1 μ m arasında ölçülürken lamelli karbür yapıları ise 4,0 μ m ile 9,40 μ m arasında ölçülmüştür. Şekil 5.10(b)'de Si0Mn3

numunesine ait ölçümler yer almaktadır. γ -Fe yapısının genişliği $5,53\mu\text{m}$ ile $12,4\mu\text{m}$ arasında ölçülürken lamelli karbür yapıları ise $3,39\mu\text{m}$ ile $15,2\mu\text{m}$ arasında ölçülmüştür. Şekil 5.10(c)'de Si3Mn0 numunesine ait ölçümler verilmiştir. γ -Fe yapısının genişliği $7,21\mu\text{m}$ ile $10,7\mu\text{m}$ arasında ölçülürken lamelli karbür yapıları ise $3,88\mu\text{m}$ ile $9,16\mu\text{m}$ arasında ölçülmüştür. Şekil 5.10(d)'de Si3Mn3 numunesine ait ölçümler yer almaktadır. γ -Fe yapısının genişliği $8,77\mu\text{m}$ ile $16,9\mu\text{m}$ arasında ölçülürken lamelli karbür yapıları ise $2,56\mu\text{m}$ ile $13,0\mu\text{m}$ arasında ölçülmüştür.



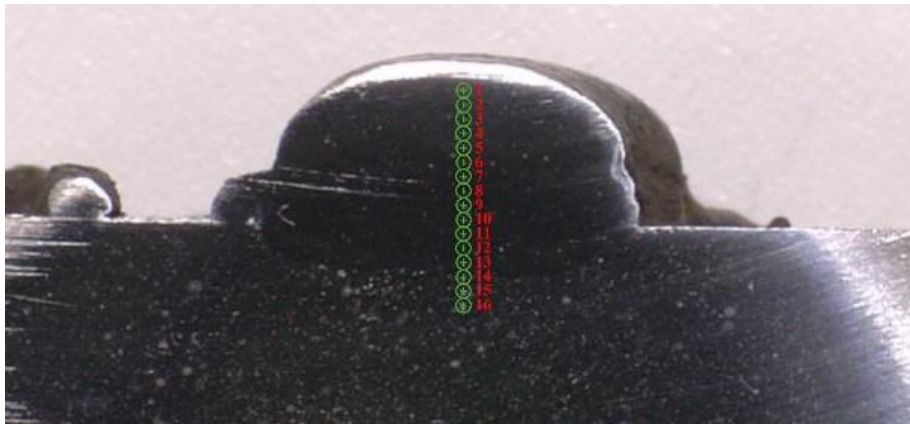
Şekil 5.9. SEM görüntüleri (a-e) Si0Mn0 ; (f-j) Si0Mn3 ; (k-o) Si3Mn0 ; (p-u) Si3Mn3 .



Şekil 5.10. γ -Fe ve karbür kaypıların ölçümleri (a) Si0Mn0; (b) Si0Mn3; (c) Si3Mn0; (d) Si3Mn3.

5.3. Mikro Sertlik Testi

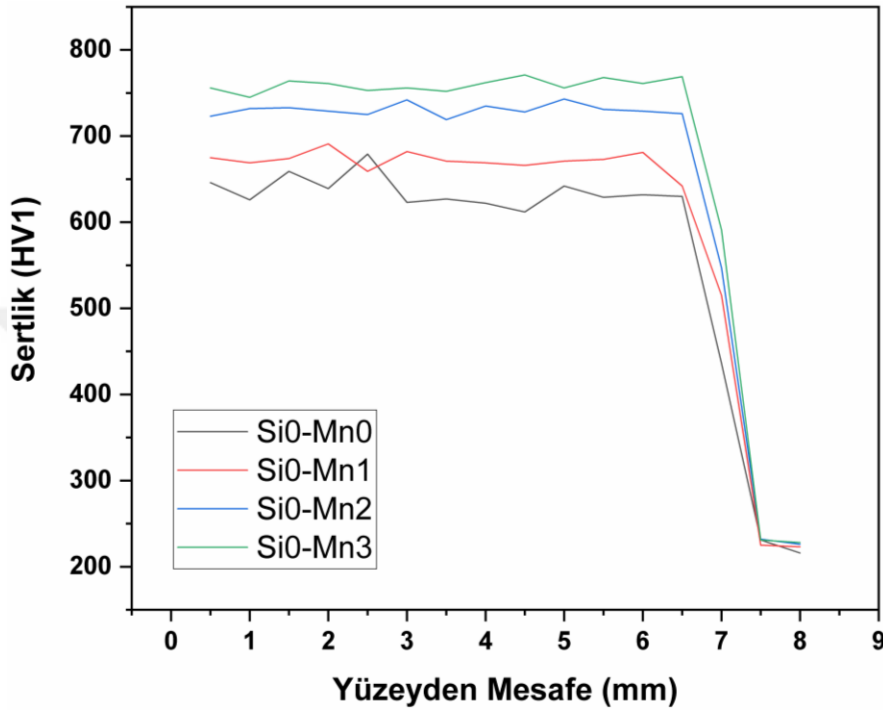
Alaşım elementlerini sert dolgu yüzey kaplamalarda sertliği arttırdığı bilinmektedir. Çalışma kapmasında yüzey kaplama işlemi yapılan numunelere Si ve Mn elementinin ilavesinin sertliğe katkısı bu aşamada incelenmiştir. Şekil 5.11’de numunelerin sertlik ölçümü gerçekleştirilen kesit alanı ve sertlik ölçüm noktaları gösterilmektedir. Tüm numunelerin sertlik testi aynı şekilde ölçülmüştür.



Şekil 5.11. Kaynak metali kesit alanı ve sertlik ölçüm noktaları.

5.3.1. Grup 0

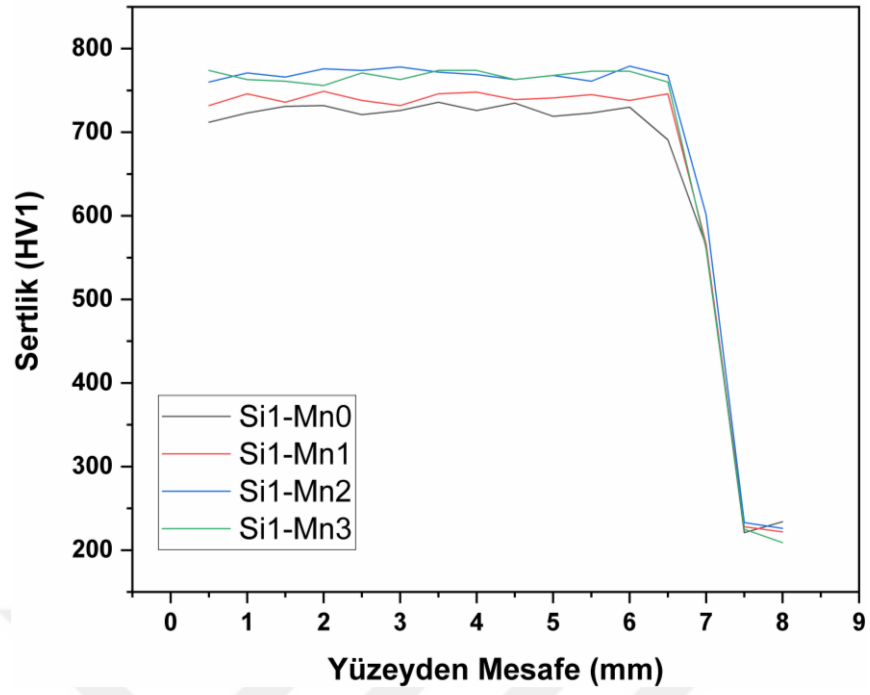
Şekil 5.12’da Grup 0 numunelerinin mikro sertlik değerleri görülmektedir. Grup 0 numuneleri arasında Si0Mn0 numunesi ortalama 635 HV1 sertlik değeri ile en düşük sertliğe sahiptir. En yüksek sertlik değeri ise Si0Mn3 759 HV1 ile numunesine aittir. Mn elementinin artmasıyla sertlik değerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 5.12. Grup 0 mikro sertlik ölçümleri.

5.3.2. Grup 1

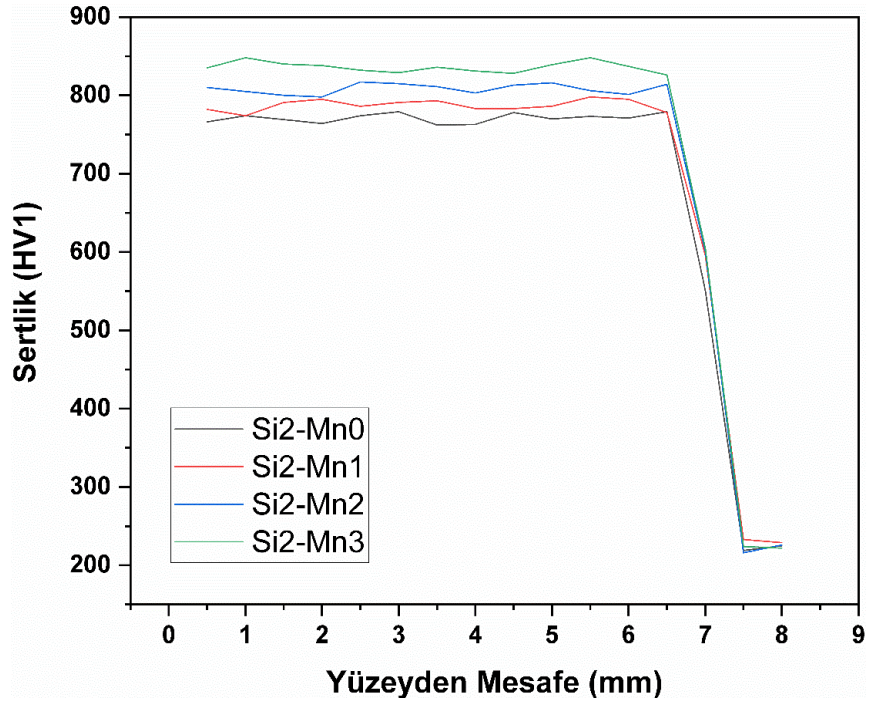
Grup 1 olarak adlandırılan numunelerin mikro sertlik ölçümleri Şekil 5.13’de verilmiştir. Sertlik ölçümleri incelendiğinde, Grup 1 numuneleri arasında en düşük sertlik değeri, Si1Mn0 numunesinin olup, ortalama 723 HV1’dir. Si1Mn2 ve Si1Mn3 numunelerinin mikro sertlik ölçümleri çok yakındır. Si1Mn2 numunesi ortalama 769 HV1 sertliğe sahip iken, Si1Mn3 numunesi ortalama 767 HV1 sertliğe sahiptir.



Şekil 5.13. Grup 1 mikro sertlik ölçümleri.

5.3.3. Grup 2

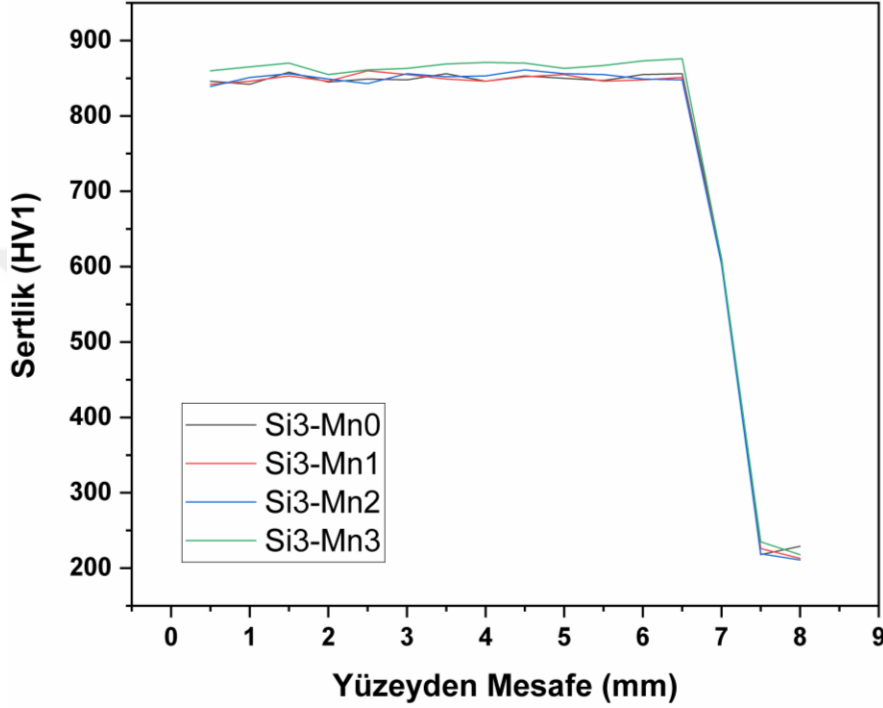
Şekil 5.14’de Grup 2 numunelerine ait sertlik ölçümleri görülmektedir. Alaşım elementinin elementi miktarının artmasıyla sertlik değerinin arttığı görülmüştür. Numuneler arasında en düşük sertlik değerine 770 HV1 ile Si2Mn0 numunesi iken en yüksek sertlik değeri Si2Mn3 numunesinde 835 HV1 olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.14. Grup 2 mikro sertlik ölçümleri.

5.3.4. Grup 3

Şekil 5.15'te Grup 3 olarak adlandırılan Si3Mn0, Si3Mn1, Si3Mn2, Si3Mn3 numunelerine ait mikro sertlik ölçümleri görülmektedir. Numunelerin sertlik ölçümleri incelendiğinde birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Bununla birlikte en düşük sertlik değeri ortalama 850 HV1 ile Si3Mn0 numunesinde ölçülmüştür. En yüksek sertlik değeri ise Si3Mn3 numunesinde ortalama 866 HV1 olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.15. Grup 3 mikro sertlik ölçümleri.

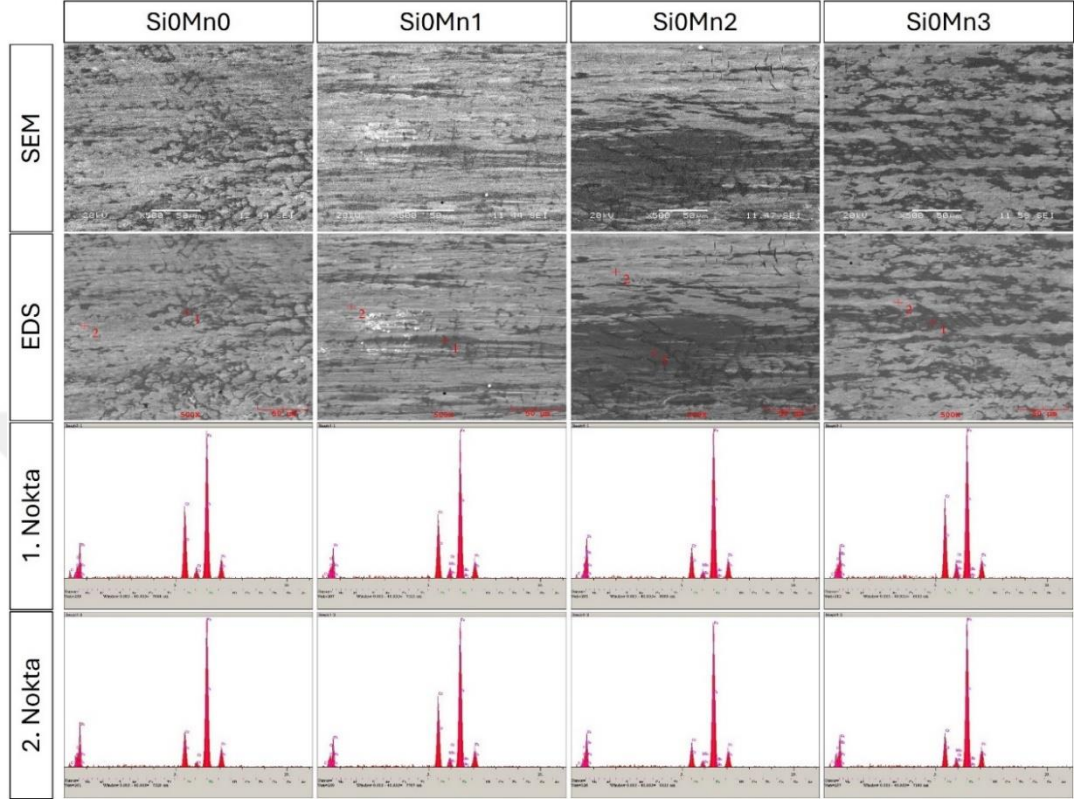
5.4. Aşınma Testi

Aşınma testleri 25 °C (± 2) sıcaklık ile %30 (± 3) nem ihtiva eden ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerinde 10mm çapındaki Al₂O₃ (1850 HV_{0,1}) bilye kullanılmıştır. Aşınma test parametreleri sabit tutularak numunelerin bileşimleri arasındaki fark incelenmesi amaçlanmıştır. Test parametreleri 5N yük, 100 m boyunda, 10 cm/s hız olacak şekilde tüm testlere aynı şartlar uygulanmıştır.

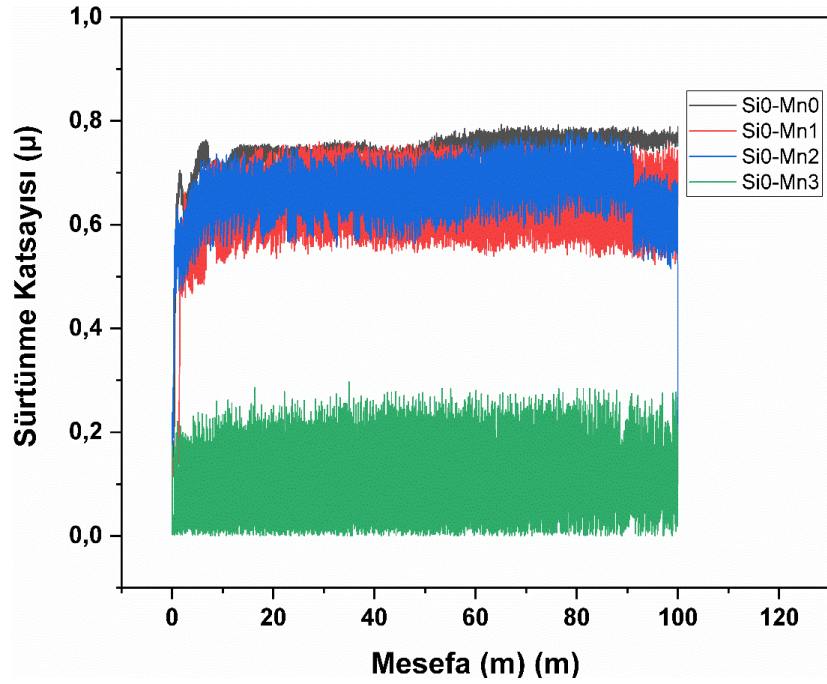
5.4.1. Grup 0

Grup 0 numunelerinin aşınma iz SEM ve EDS analizleri Şekil 5.16'te, ölçülen sürtünme katsayısı verileri Şekil 5.17'te, numunelerin aşınma hacimleri ise 5.18'da verilmiştir. Aşınma verileri incelendiğinde Si₃Mn₀, Si₃Mn₁, Si₃Mn₂ numunelerinde adhezif aşınma mekanizmasının baskın olduğu, kısmende abrasif aşınma ve oksidatif

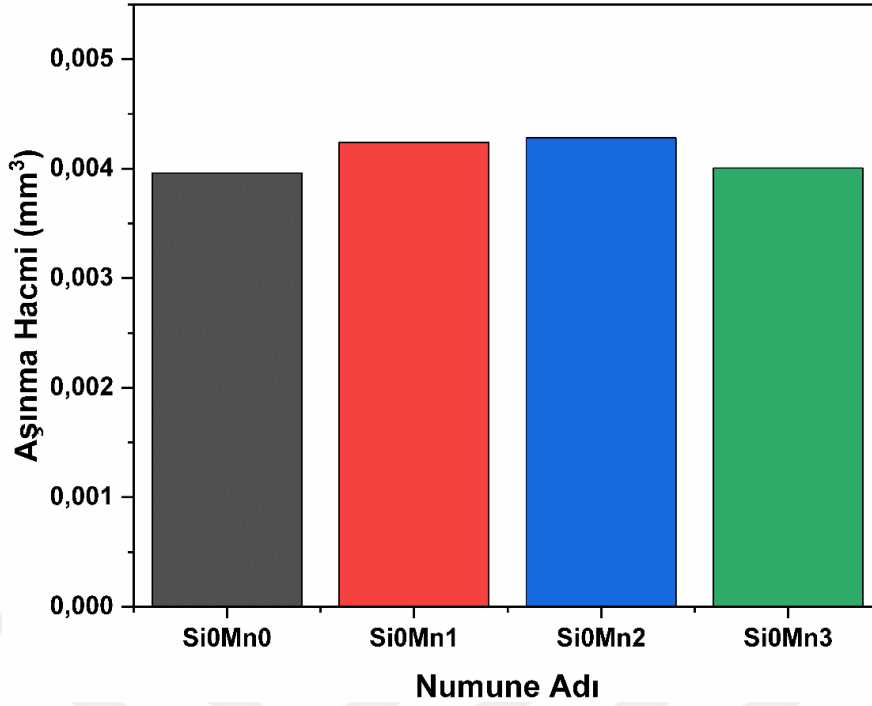
aşınmaların olduğu görülmektedir. Si0Mn1 ve Si0Mn2 numunelerinde çatlak ve mikro pullanma oluşumları görülmektedir. Si0Mn3 numunesinde ise abrasif aşınmanın baskın olduğu, adhezif ve oksidatif aşınmanın ise çok daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16. Grup 0 aşınma izleri Sem ve EDS analizleri.



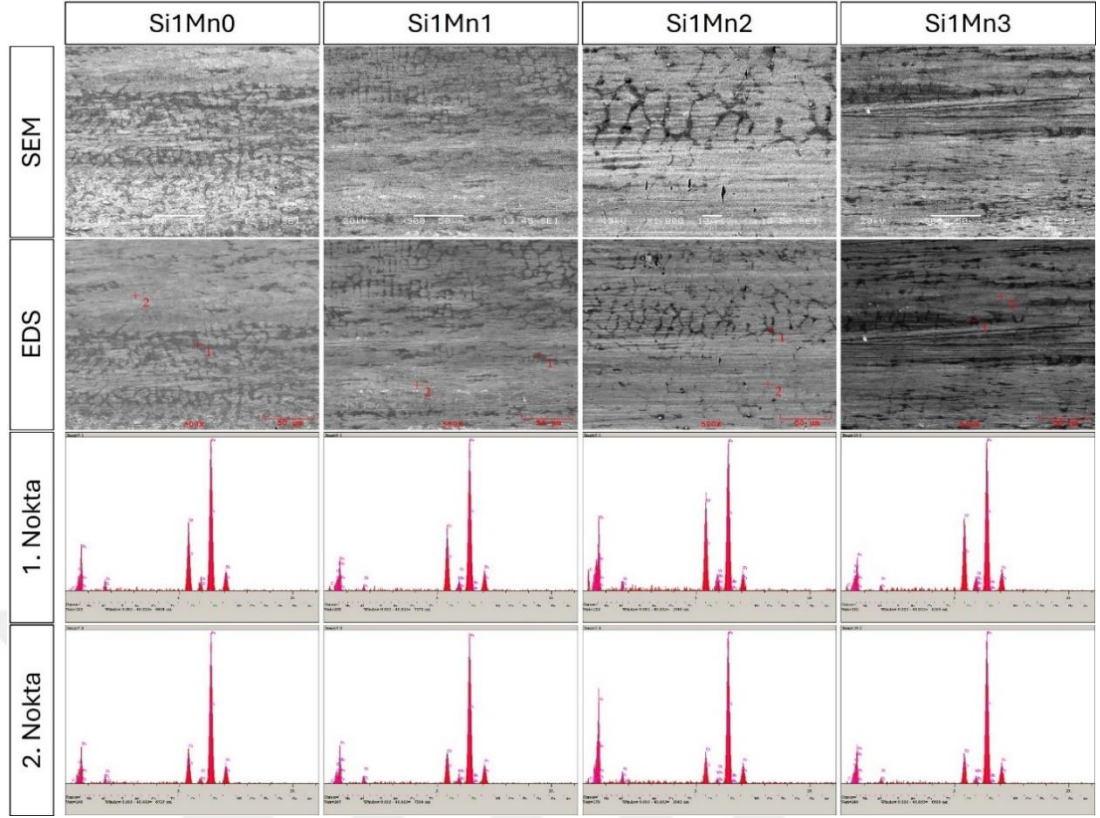
Şekil 5.17. Grup 0 numunelerin sürtünme katsayısı verileri.



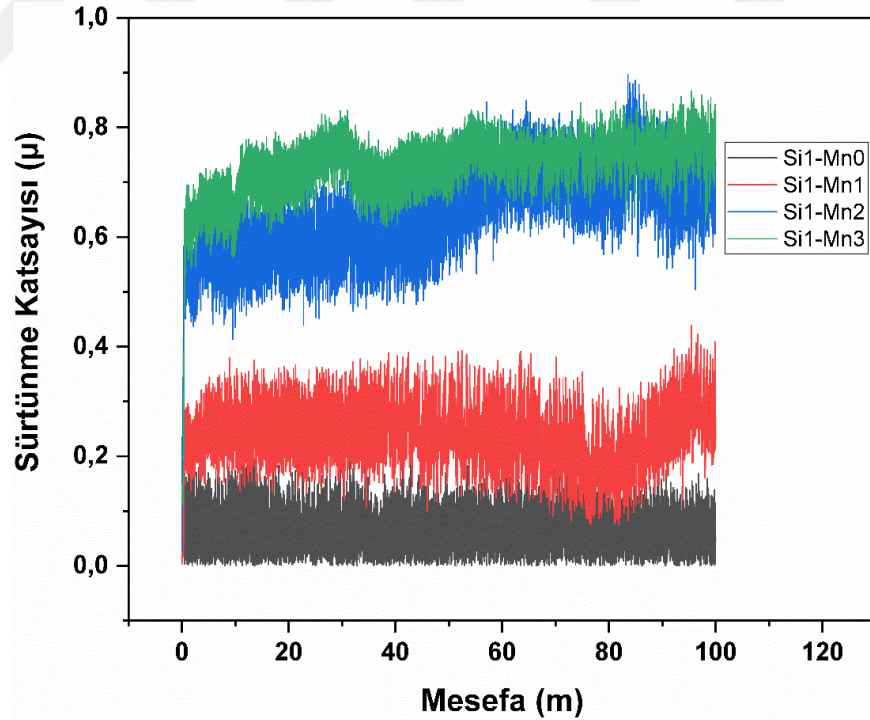
Şekil 5.18. Grup 0 numunelerinin aşınan hacim verileri.

5.4.2. Grup 1

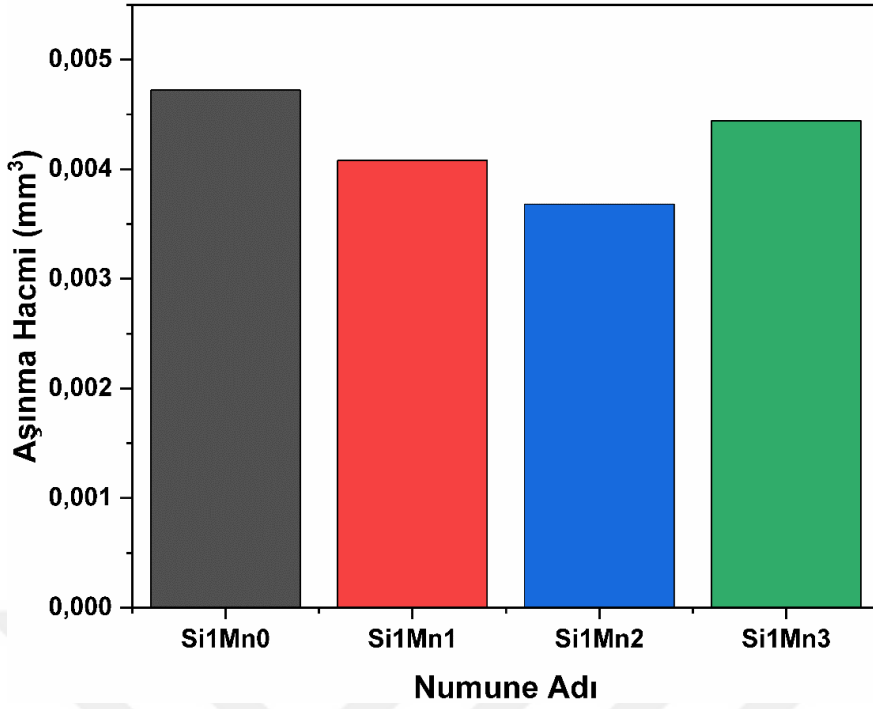
Şekil 5.19’de Grup 1 numunelerinin aşınma yüzeyine ait SEM ve EDS verileri görülmektedir. Grup 1 numunelerinin sürtünme katsayısı verileri Şekil 5.20’de, aşınan hacim verileri ise 5.21’de yer almaktadır. Si1Mn0 ve Si1Mn1 numunelerinde abrasif aşınmanın baskın olduğu ve bununla birlikte oksidatif aşınma izlerinin olduğu görülmektedir. Si1Mn2 de ise abrasif aşınma ile birlikte çok fazla çatlak ve mikro pullanma olduğu görülmektedir. Si1Mn3 numunesinde ise adhezif aşınmanın ile birlikte mikro pullanmaların pullanmalar görülmektedir.



Şekil 5.19. Grup 1 numuneleri aşınan yüzeylerin SEM ve EDS analizleri.



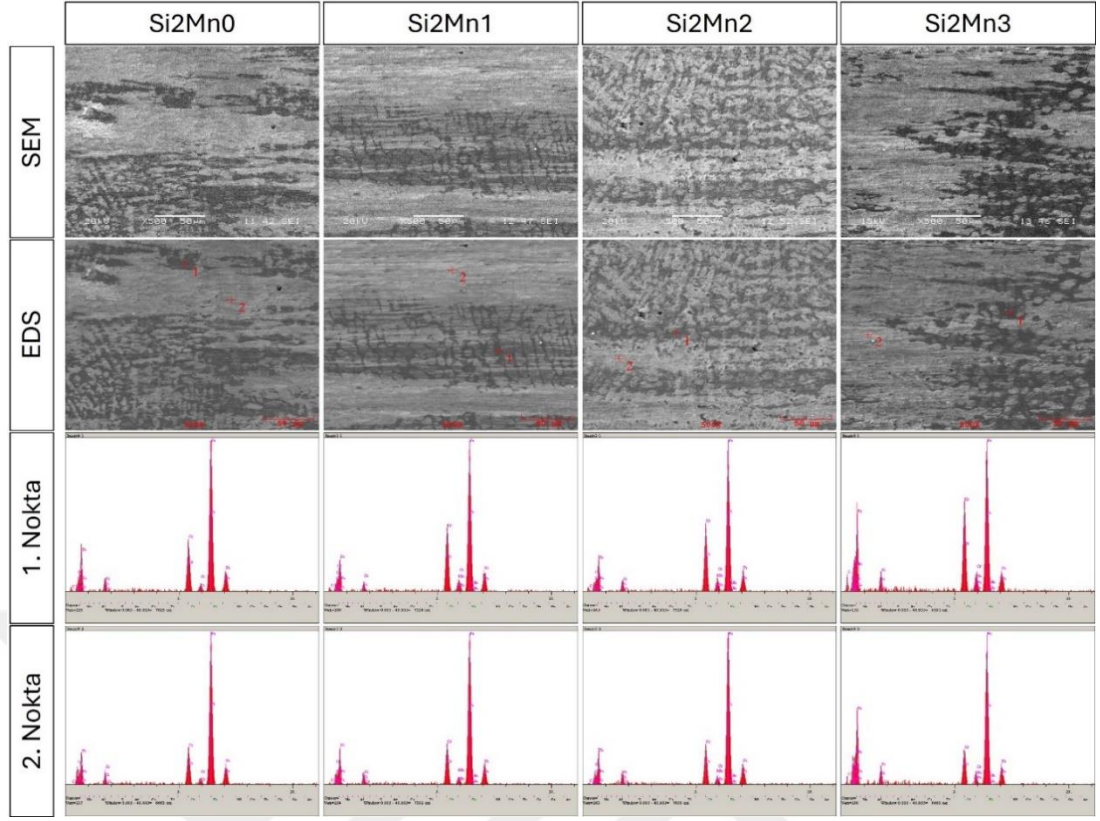
Şekil 5.20. Grup 1 numunelerinin sürtünme katsayısı verileri.



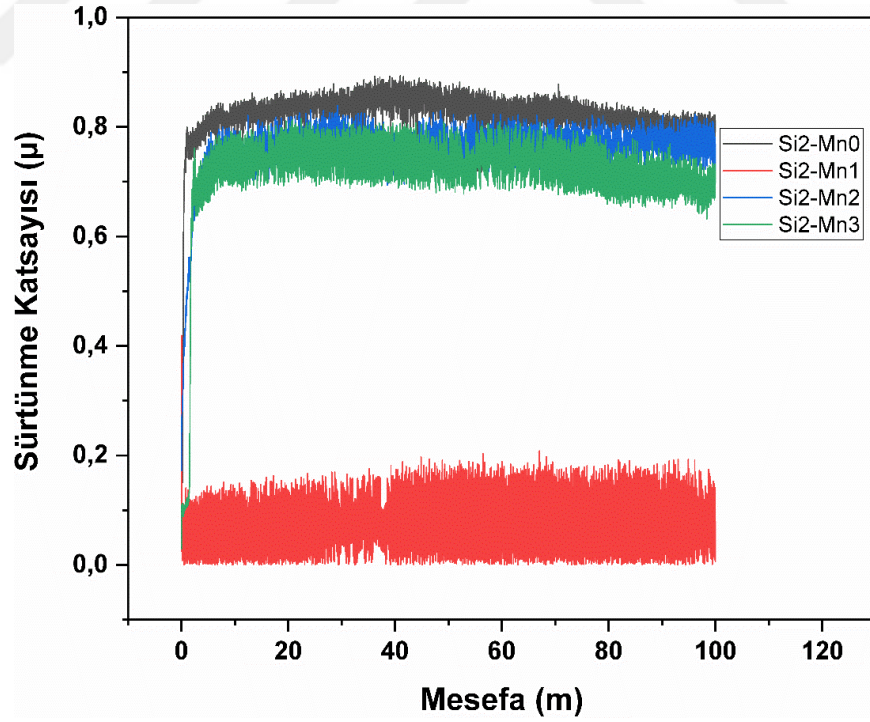
Şekil 5.21. Grup 1 numunelerinin aşınan hacim verileri.

5.4.3. Grup 2

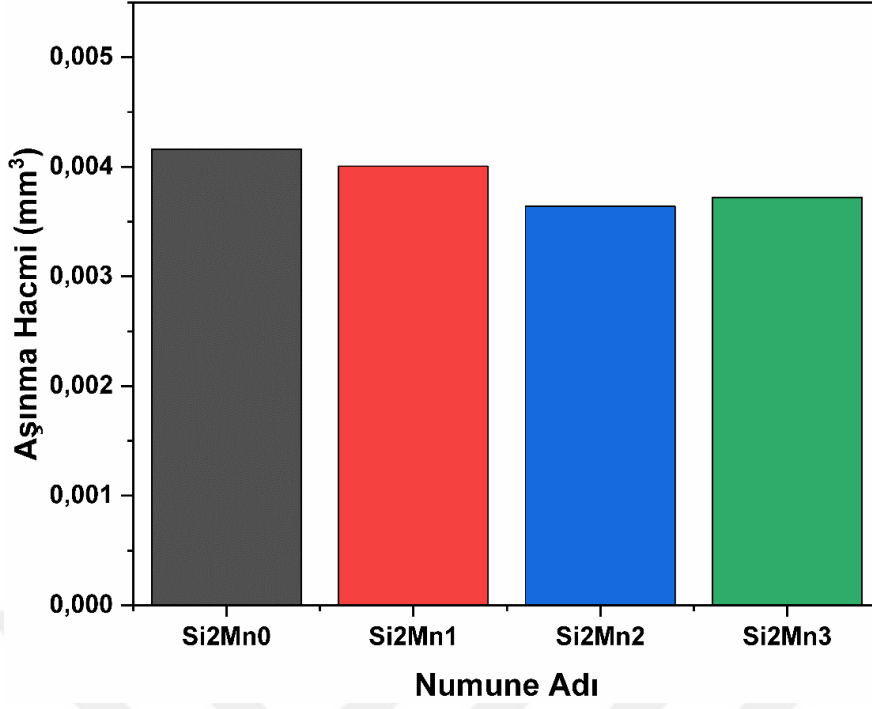
Grup 2 olarak adlandırılan Si2Mn0, Si2Mn1, Si2Mn2 ve Si2Mn3 numunelerine ait aşınma yüzeyi SEM ve EDS analizleri Şekil 5.22’de gösterilmiştir. Numunelerin aşınma testinden edilen sürtünme katsayısı verileri Şekil 5.23’de, aşınan hacim verileri ise Şekil 5.24’de verilmektedir. Si2Mn0 ve Si2Mn2 numunelerinde adhezif aşınma mekanizmasının baskın olduğu ve kısmen oksidatif aşınma mekanizmasının olduğu görülmektedir. Si2Mn1 numunesinin aşınma verileri incelendiğinde ise abrasif aşınmanın baskın olduğu ve oksidatif aşınma mekanizmasının da bulunduğu görülmüştür. Si2Mn3 numunesinde adhezif aşınma mekanizmasının yanı sıra kısmen abrasif aşınma mekanizmasının da var olduğu görülmüştür. Si2Mn3 numunesinde çatlak ve mikro pullanmalarda görülmektedir.



Şekil 5.22. Grup 2 numunelerine ait aşınma yüzeyi SEM ve EDS analizleri.



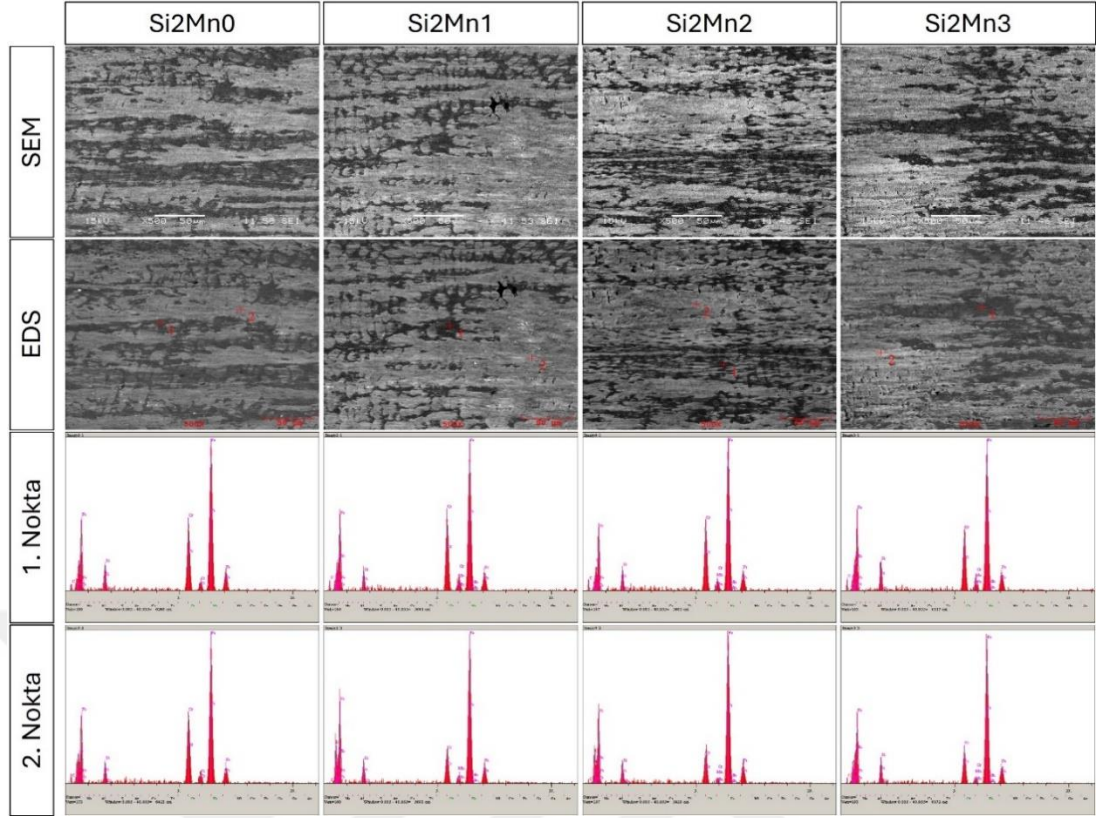
Şekil 5.23. Grup 2 numuneleri sürtünme katsayısı verileri.



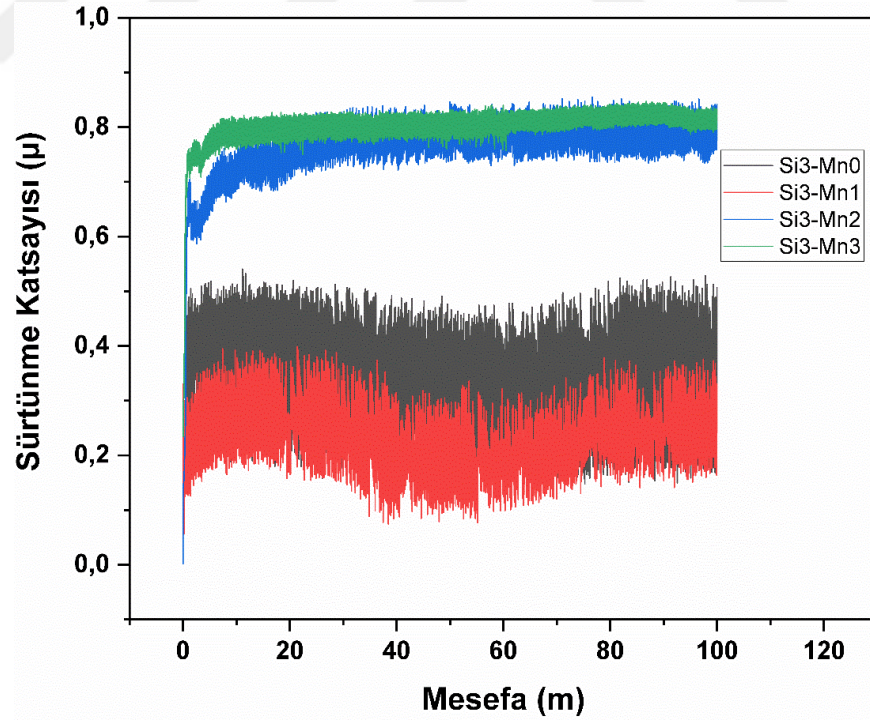
Şekil 5.24. Grup 2 numuneleri aşınan hacim verileri.

5.4.4. Grup 3

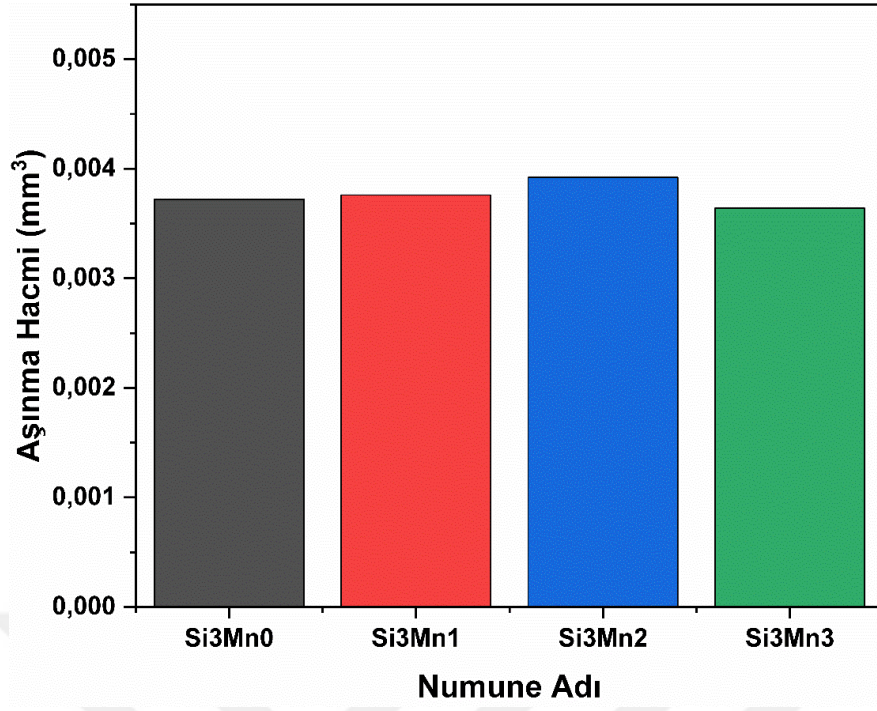
Grup 3 olarak adlandırılan numunelerin aşınma izi SEM ve EDS verileri Şekil 5.25'te verilmiştir. Numunelerin sürtünme katsayı verileri Şekil 5.26'te, aşınan hacim verileri ise Şekil 5.27'te görülmektedir. Si3Mn0 ve Si3Mn1 numunelerinde abrasif aşınma ile birlikte oksidatif aşınma mekanizması da görülmektedir. Si3Mn2 ve Si3Mn3 numunelerinde adhezif aşınmanın baskın olduğu görülmektedir. Adhezif aşınma ile birlikte oksidatif aşınma mekanizması da görülmüştür. Grup 3 olarak adlandırılan tüm numunelerde çatlak ve mikro pullanma görülmüştür.



Şekil 5.25. Grup 3 numunelerine ait aşınma iz SEM ve EDS analizleri.



Şekil 5.26. Grup 3 numuneleri sürtünme katsayısı verileri.



Şekil 5.27. Grup 3 numuneleri aşınma hacim verileri.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada örtülü elektrot ark kaynağı yöntemi kullanılarak, alaşımsız S355J2+N altlık malzeme üzerine Fe-Cr-C esaslı sert dolgu yüzey kaplama bileşiminde Si ve Mn elementlerinin etkisi incelenmiştir. Üretilen örtülü elektrotlar ile yüzey kaplama işlemi gerçekleştirilmiş ve bu kaplamaların, mikroyapı, faz analizleri, mikro sertlikleri ve aşınma dayanımları incelenerek değerlendirilmiştir. Sert dolgu yüzey kaplamaları içerdikleri Si ve Mn miktarlarına göre gruplandırılmıştır. Yapılan testler ve araştırmalar ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Grup 0 numuneleri arasında Si0Mn0, Si0Mn1, Si0Mn2 ve Si0Mn3 numuneleri yer almaktadır. XRD ile yapılan faz analizlerinde, Si0Mn0 numunesinde γ -Fe, Cr₇C₃, Fe₇C₃ ve Fe₅C₂ olduğu tespit edilmiştir. Si0Mn1, Si0Mn2 ve Si0Mn3 numunelerinde ise γ -Fe, Cr₇C₃, Fe₇C₃, Fe₅C₂ ve Cr₂Fe₁₄C olduğu tespit edilmiş ve Mn ilavesinin Cr₂Fe₁₄C oluşumunu desteklediği görülmüştür. Grup 0 numunelerinin mikroyapılarında, açık renkli dentritik yapıda γ -Fe matrisi ve bu matrisin kolları arasında lamelli karbür yapılarının oluşumu görülmektedir. Grup 0 numunelerini mikro sertlik değerleri incelendiğinde ise Mn ilavesinin sertliği arttırdığı görülmüştür. Si0Mn0 numunesi 635 HV1 sertlik ile en düşük sertlik değerine sahip iken, Si0Mn3 759 HV ile en yüksek sertlik değerine sahiptir. Yüzey kaplamaların aşınma dayanımlarına bakıldığında ise Si0Mn0, Si0Mn1 ve Si0Mn2 numunelerinde adheziv aşınma baskın iken kısmen oksidatif ve abrasif aşınmalarda görülmektedir. Si0Mn3 numunesinde ise abrasif aşınma mekanizmasının baskın olduğu görülmüştür. Si0Mn1 ve Si0Mn2 numunelerinin aşınma yüzeylerinde mikro pullanma ve çatlaklar görülmektedir.

Grup 1 olarak adlandırılan Si1Mn0, Si1Mn1, Si1Mn2 ve Si1Mn3 numunelerinin XRD ile faz analizleri incelendiğinde, Si1Mn0 numunesinde γ -Fe, Cr₇C₃, Fe₇C₃ ve Fe₅C₂ fazları, Si1Mn1, Si1Mn2 ve Si1Mn3 numunelerinde ise γ -Fe, Cr₇C₃, Fe₇C₃, Fe₅C₂ ve Cr₂Fe₁₄C fazlarının olduğu tespit edilmiştir. Mn ilavesi yapıda Cr₂Fe₁₄C oluşumunu desteklemektedir. Grup 1 numunelerinin mikroyapılarında, açık renkli dentritik yapıda γ -Fe matrisi ve bu matrisin kolları arasında lamelli karbür yapılarının oluşumu

görülmektedir. Grup 1 numunelerinin mikro sertliklerine bakıldığında, alaşım miktarının artışı ile sertliğin arttığı görülmüştür. Grup 1 içerisinde en düşük sertlik değeri, 723 HV1 ile Si1Mn0 numunesine aittir. Si1Mn2 ve Si1Mn3 numunelerin sertlik değerleri birbirine yakın olup sırasıyla 769 HV1 ve 767 HV1'dir. Grup 1 numunelerinin aşınma dayanımları incelendiğinde, Si1Mn0 ve Si1Mn1 numunelerinde abrasif aşınma mekanizmasının baskın olduğu ve kısmen oksidatif mekanizmanın var olduğu, Si1Mn3 numunesinde çatlak ve mikro pullanma oluşumunun yanı sıra adhezif aşınma mekanizmasının baskın olduğu görülmüştür. Si1Mn2 numunesinde abrasif aşınma mekanizmasının yanı sıra, mikro pullanma ve çatlak oluşumu görülmüştür.

Grup 2 olarak adlandırılan Si2Mn0, Si2Mn1, Si2Mn2 ve Si2Mn3 numuneleri yer almaktadır. XRD ile yapılan faz analizlerinde Si2Mn0 numunesinde γ -Fe, Cr₇C₃, Fe₇C₃ ve Fe₅C₂ fazları, Si2Mn1, Si2Mn2 ve Si2Mn3 numunelerinde ise γ -Fe, Cr₇C₃, Fe₇C₃, Fe₅C₂ ve Cr₂Fe₁₄C fazlarının var olduğu görülmüştür. Mn ilavesi Cr₂Fe₁₄C fazını desteklediği görülmüştür. Grup 2 numunelerinin mikroyapılarında açık renkli dentritik yapıda γ -Fe matrisi ve bu matrisin kolları arasında lamelli karbür yapılarının oluşumu görülmektedir. Numunelerin sertlik değerlerine bakıldığında alaşım elementi miktarının artmasıyla, sertlik değerinin de artış görülmüştür. Grup 2 içerisinde en düşük sertlik değeri 770 HV1 değeriyle Si2Mn0 numunesine aittir. En yüksek sertlik değeri ise 835 HV1 ile Si2Mn3 numunesinde ölçülmüştür. Numunelerin aşınma izlerine bakıldığında ise Si2Mn0 ve Si2Mn2 numunelerinde adhezif aşınma mekanizmasının yanında oksidatif aşınmanın da var olduğu görülmüştür. Si2Mn1 numunesinde abrasif aşınma mekanizmasının baskın olduğu ve oksidatif aşınma mekanizmasının olduğu görülmüştür. Si2Mn3 numunesinde ise çatlak ve mikro pullanmanın yanı sıra adhezif aşınma mekanizmasının olduğu ve kısmen abrasif aşınmalar görülmüştür.

Grup 3 numuneleri arasında Si3Mn0, Si3Mn1, Si3Mn2 ve Si3Mn3 numuneleri yer almaktadır. Numunelere yapılan XRD faz analizinde, Si3Mn0 numunesinde γ -Fe, Cr₇C₃, Fe₇C₃ ve Fe₅C₂ fazları, Si3Mn1, Si3Mn2 ve Si3Mn3 numunelerinde ise γ -Fe, Cr₇C₃, Fe₇C₃, Fe₅C₂ ve Cr₂Fe₁₄C fazlarının var olduğu görülmüştür. Mn ilavesi Cr₂Fe₁₄C fazını desteklediği görülmüştür. Grup 3 numunelerinin mikroyapılarında açık renkli dentritik yapıda γ -Fe matrisi ve bu matrisin kolları arasında lamelli karbür yapılarının oluşumu görülmektedir. Grup 3 numunelerinin sertlik değerleri analiz

edildiğinde, numunelerinin sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu ve alaşım elementi miktarının artışıyla sertliğin arttığı görülmüştür. Grup 3 numuneleri arasında en düşük sertlik değeri Si3Mn0 numunesinde 850 HV1 olarak ölçülmüştür. En yüksek sertlik değeri ise 866 HV1 değeriyle, Si3Mn3 numunesinde ölçülmüştür. Numunelerin aşınma test verileri incelendiğinde ise, Si3Mn0 ve Si3Mn1 numunelerinde, abrasif aşınma mekanizmasıyla birlikte oksidatif aşınma mekanizmasının var olduğu görülmüştür. Si3Mn2 ve Si3Mn3 numunelerinde adhezif aşınma mekanizmasının baskın olduğu kısmen de oksidatif aşınmanın var olduğu görülmüştür. Grup 3 numunelerin hepsinde çatlak ve mikro pullanma görülmüştür.

- Yapılan testlere ek olarak kavitasyon erozyonu ve korozyon testi gerçekleştirilebilir.
- Sert dolgu yüzey kaplamalarında kaynak parametreleri mikroyapı üzerinde çok etkili olduğu bilinmektedir. Daha düşük ve daha yüksek kaynak parametreleri ile mikroyapı ve aşınma testleri incelenebilir.
- Si ve Mn miktarı %12 olacak şekilde arttırılarak yapı üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Farklı alaşım elementlerinin özellikle B ve N olmak üzerine çeşitlendirilerek, mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] N. Çömez, M. Yurddaskal, C. Gül, H. Durmuş, ve S. Albayrak, “Fe-Cr-C-V hardfacing coatings with molybdenum addition: Wear, corrosion, and cavitation performances”, *Surf Coat Technol*, c. 482, Nis. 2024, doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.130715.
- [2] M. C. Cunha, H. R. Oliveira, A. Oliveira, M. da Cruz Costa de Souza, A. R. Arias, ve J. G. Fagundes, “Microstructural and wear investigation of FeCrC and FeCrC-NbB hardfacing alloys deposited with FCAW-S”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 136, sy 3, ss. 1241-1251, Oca. 2025, doi: 10.1007/s00170-024-14936-3.
- [3] J.R. Davis, *Surface engineering for corrosion and wear resistance*. 2001.
- [4] J. M. S. de Sousa, G. S. Gil, M. dos S. Barbosa, D. N. Garcia, M. Q. Lobato, ve P. C. Machado, “Tribological performance under abrasive wear of Fe-Cr-C+Nb coating deposited by FCAW process”, *Wear*, c. 523, Haz. 2023, doi: 10.1016/j.wear.2023.204824.
- [5] O. AKYILDIZ, “Fe-B ESASLI SERT DOLGU ELEKTROT ALAŞIMININ ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE W, Nb VE Cr İLAVESİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI”, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2023.
- [6] K. Bhansali ve A. E. Miller, “Resistance of pure metals to low stress abrasive wear”, *Wear*, c. 71, sy 3, ss. 375-379, Eyl. 1981, doi: 10.1016/0043-1648(81)90233-7.
- [7] H. Sabet, S. Khierandish, S. Mirdamadi, ve M. Goodarzi, “The microstructure and abrasive wear resistance of Fe-Cr-C hardfacing alloys with the composition of hypoeutectic, eutectic, and hypereutectic at Cr/C 6”, *Tribol Lett*, c. 44, sy 2, ss. 237-245, Kas. 2011, doi: 10.1007/s11249-011-9842-2.
- [8] J. L. Henderson ve J. H. Bulloch, “Alloy classification of hardfacing materials”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, c. 47, sy 2, ss. 127-158, Oca. 1991, doi: 10.1016/0308-0161(91)90096-K.
- [9] G. A. Rodríguez-Castro, C. D. Reséndiz-Calderon, L. F. Jiménez-Tinoco, A. Meneses-Amador, E. A. Gallardo-Hernández, ve I. E. Campos-Silva, “Micro-abrasive wear resistance of CoB/Co2B coatings formed in CoCrMo alloy”, *Surf Coat Technol*, c. 284, ss. 258-263, Ara. 2015, doi: 10.1016/j.surfcoat.2015.06.081.
- [10] G. Wang vd., “Brazing ZrB2-SiC ceramics to Inconel 600 alloy without and with Cu foam”, *J Manuf Process*, c. 41, ss. 29-35, May. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.03.023.

- [11] J. Kumar, S. Sharma, J. Singh, S. Singh, ve G. Singh, “Optimization of Wire-EDM Process Parameters for Al-Mg-0.6Si-0.35Fe/15%RHA/5%Cu Hybrid Metal Matrix Composite Using TOPSIS: Processing and Characterizations”, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, c. 6, sy 6, Ara. 2022, doi: 10.3390/jmmp6060150.
- [12] U. D. TURUNÇ, “YÜKSEK LİSANS TEZİ OCAK 2015 FARKLI KİMYASAL BİLEŞİMLERDEKİ SERT DOLGU AŞINMA PLAKALARININ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ, GELİŞTİRİLMESİ VE OPTİMİZASYONU”, İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, İstanbul, 2015.
- [13] R. Hocaoglu, “Fe-Mo-Ti-B-C ESASLI SERT DOLGU ALAŞIMLI ÖRTÜLÜ ELEKTROTLARIN ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ”, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2021.
- [14] E. Kocaman, “Fe-Cr-Ti-B ESASLI İN-SITU KOMPOZİT SERT YÜZEY ALAŞIMLAMA ELEKTROTLARININ GELİŞTİRİLMESİ”, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2020.
- [15] M. Vasilescu ve M. Dobrescu, “Hardfacing Corrosion and Wear Resistant Alloys”, *Adv Mat Res*, c. 1114, ss. 196-205, Tem. 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.1114.196.
- [16] K. Ralls, T. H. Courtney, ve J. Wulff, “Introduction to materials science and engineering”, 1976.
- [17] W. F. Hosford ve R. M. Caddell, *Metal forming: mechanics and metallurgy*. Cambridge university press, 2011.
- [18] S. Asad Ali DILAWARY, “AN INVESTIGATION ON ENHANCEMENT IN WEAR RESISTANCE OF HARDFACINGS”, 2018.
- [19] S. Prabanjan, K. Karthick, J. Rejvin Kumar, S. Ramkumar, ve A. Riswan Ahmed, “Wear behavior and metallurgical characteristics of particle reinforced metal matrix composites produced by hardfacing: A review”, *Mater Today Proc*, c. 33, ss. 599-606, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.527.
- [20] J. R. . Davis, *Surface hardening of steels: understanding the basics*. ASM International, 2002.
- [21] A. Zikin, I. Hussainova, C. Katsich, E. Badisch, ve C. Tomastik, “Advanced chromium carbide-based hardfacings”, *Surf Coat Technol*, c. 206, sy 19-20, ss. 4270-4278, May. 2012, doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.04.039.
- [22] A. Zikin, E. Badisch, I. Hussainova, C. Tomastik, ve H. Danninger, “Characterisation of TiC–NiMo reinforced Ni-based hardfacing”, *Surf Coat Technol*, c. 236, ss. 36-44, Ara. 2013, doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.02.027.
- [23] X. Wang, F. Han, X. Liu, S. Qu, ve Z. Zou, “Microstructure and wear properties of the Fe–Ti–V–Mo–C hardfacing alloy”, *Wear*, c. 265, sy 5-6, ss. 583-589, Ağu. 2008, doi: 10.1016/j.wear.2007.12.001.
- [24] X. Wang, Z. Zou, ve S. Qu, “Microstructure of Fe-Based Alloy Hardfacing Coating Reinforced by TiC-VC Particles”, *Journal of Iron and Steel Research International*, c. 13, sy 4, ss. 51-55, Nis. 2006, doi: 10.1016/S1006-706X(06)60078-2.

- [25] M. Vasudevan, N. Chandrasekhar, V. Maduraimuthu, A. K. Bhaduri, ve B. Raj, “Real-Time Monitoring of Weld Pool during GTAW using Infra-Red Thermography and analysis of Infra-Red thermal images”, *Welding in the World*, c. 55, sy 7-8, ss. 83-89, Tem. 2011, doi: 10.1007/BF03321311.
- [26] J. Chen ve Y. Zhang, “Gas Tungsten Arc Welding Using an Arcing Wire”, 2012. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/287418963>
- [27] N. Nishanth ve K. Venkatesan, “A Literature Review on Gas Metal Arc Welding (GMAW)”, 2022.
- [28] N. K. Singh Associate Professor, “Gas Metal Arc Welding Process: Review of Historical and Recent Development”, 2015. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.ripublication.com>
- [29] R. Chahal ve P. Sharma, “A REVIEW ON SUBMERGED ARC WELDING”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2022, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.irjet.net
- [30] M. Chithirai Pon Selvan, N. Rammohan, S. S. S, ve A. Professor, “Plasma Arc Welding (PAW)-A Literature Review”, *American International Journal of Research in Science*, ss. 15-595, 2015, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.iasir.net>
- [31] S. Sharma ve L. Singh, “A Review on the Flux Cored Arc Welding through Process Parameter”, *Int J Sci Res Sci Technol*, 2023, doi: 10.32628/IJSRMME.
- [32] S. F. Nabavi, A. Farshidianfar, ve H. Dalir, “A comprehensive review on recent laser beam welding process: geometrical, metallurgical, and mechanical characteristic modeling”, 01 Aralık 2023, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s00170-023-12536-1.
- [33] D. K. Singh, “Gas Welding Processes”, içinde *Fundamentals of Manufacturing Engineering*, Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, ss. 215-221. doi: 10.1007/978-981-99-8767-2_9.
- [34] F. Khamouli, M. Zidani, H. Farh, A. Saoudi, ve L. Atoui, “Effects of Cellulosic and Basic Flux on the Structure, Composition and Hardness of SMAW Welds on Steel X42”, *International Journal of Engineering Research in Africa*, c. 27, ss. 11-19, Ara. 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/JERA.27.11.
- [35] V. Kumar ve R. Chhibber, “Experimental investigation on SMAW electrode coatings developed using CaO–SiO₂–CaF₂–SrO based coating system”, *Ceram Int*, c. 48, sy 19, ss. 28730-28738, Eki. 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.06.187.
- [36] M. E. M. B. K. K. YILDIZLI, “Erosive Wear Behaviour of Hardfacing Austenitic Manganese Deposit”, *Tribology in industry*, c. Volume 27, ss. 15-21, 2005.
- [37] J. H. Kim, K. S. Na, G. G. Kim, J. Y. Oh, C. S. Yoon, ve S. J. Kim, “The effects of Mn and B on the cavitation erosion resistance of austenitic Fe-base hardfacing alloys”, *Materials Science and Engineering: A*, c. 477, sy 1-2, ss. 204-207, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.05.025.

- [38] S. Atamert ve J. Stekly, "MICROSTRUCTURE, WEAR RESISTANCE, AND STABILITY OF COBALT BASED AND ALTERNATIVE IRON BASED HARDFACING ALLOYS", 1993.
- [39] V. Jankauskas *vd.*, "Effect of electrode covering composition on the microstructure, wear, and economic feasibility of Fe-C-Cr manual arc-welded hardfacings", *Coatings*, c. 10, sy 3, Mar. 2020, doi: 10.3390/coatings10030294.
- [40] S. Atamert ve H. Bhadeshia, "Silicon modification of iron base hardfacing alloys", *Recent trends in welding science and technology (TWR '89)*, *Materials Park, Ohio*, ss. 273-278, 1990.
- [41] G. Azimi ve M. Shamanian, "Effect of silicon content on the microstructure and properties of Fe-Cr-C hardfacing alloys", *J Mater Sci*, c. 45, sy 3, ss. 842-849, Şub. 2010, doi: 10.1007/s10853-009-4008-4.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Halil ALTINDAL

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yükseklisans** : Devam Ediyor, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017-2022 yılları arasında Anka Seramik A.Ş. firmasında Ar-Ge Mühendisi olarak çalıştı.
- 2022 yılından itibaren Gedik Kaynak A.Ş. firmasında Ar-Ge Mühendisi olarak çalışıyor.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Altındal, H., Ercenk, E. (2025, 30-31, Mayıs). Silisyum ve Mangan İlavesinin Demir Bazlı Sert Dolgu Kaplamaların Aşınma ve Mikroyapı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *9. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi*, İstanbul, Türkiye.

DİĞER ESERLER: