

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**YÜKSEK FIRIN CÜRUFLLARININ RUTİL TİPTEKİ ÖRTÜLÜ
ELEKTROT ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Serhat KAYA

Yüksek Lisans Tezi

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Malzeme Bilim Dalı

TEMMUZ 2024

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFLLARININ RUTİL TİPTEKİ ÖRTÜLÜ
ELEKTROT ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Tez Yazarı
Serhat KAYA

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KAPTANOĞLU

TEMMUZ 2024
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Yüksek Fırın Cüruflarının Rutil Tipteki Örtülü Elektrot Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması
Yazarı:	Serhat KAYA
İlk Teslim Tarihi:	24.06.2024
Savunma Tarihi:	24.07.2024

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KAPTANOĞLU Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi	İmza Onayladım
Başkan:	Dr. Öğr. Üyesi Akın ODABAŞI Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Kürşad Oğuz OSKAY Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Yüksek Fırın Cüruflarının Rutil Tipteki Örtülü Elektrot Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

24.07.2024

Serhat KAYA



ÖNSÖZ

Ham demir üretimi esnasında açığa çıkan yüksek fırın cüruflarının, rutil tipteki örtülü elektrot üretiminde flaks olarak kullanılabilirliği hedeflenmektedir. Bu doğrultuda; işletmelerde yığınlar halinde saha işgaline neden olan yüksek fırın cüruflarının yeniden kazanımı sağlanarak yüksek fırın cüruflarına mevcut durumda bilinmeyen, katma değer oluşturma potansiyeli bulunan bir kullanım sahası oluşturulması amaçlanmaktadır. Hedeflenen örtülü elektrotların üretilmesiyle, cürufların işletmelerde kapladığı alanlar azaltılarak, cürufların çevreye ve ekosisteme olan etkilerinin azaltılmasına da katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Ayrıca, yüksek fırın cüruflarının birim maliyetlerinin çok düşük olması nedeniyle, rutil tipteki örtülü elektrot maliyetlerinin düşürülmesine de katkı sağlayacaktır.

Ham demir üretimi esnasında açığa çıkan yüksek fırın cürufları, işletmelere hem yer işgali açısından sorun oluşturmakta hem de içerdiği zararlı kimyasallar nedeniyle çevresel etkilere (toprak ve su kirliliği) neden olmaktadır. Yüksek fırın cürufları her ne kadar çeşitli kullanım alanlarına sahip olsa da bu kullanım alanları yetersiz seviyede kalmaktadır. 2015 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve Türkiye Çelik Üreticileri Derneği tarafından yayınlanan demir-çelik cüruf raporuna göre; Türkiye’de yıllık yaklaşık 55.000 ton yüksek fırın cürufunun geri kazanımının yapılamadığı belirtilmektedir. Dolayısıyla, açığa çıkan bu cüruflara kullanım amacı bulmak, geri dönüştürmek ve çevresel etkilerini asgari seviyeye düşürmek bir zorunluluk haline gelmiştir.

Rutil elektrot örtülerinde esas madde olarak, çoğunlukla rutil şeklinde bulunan titanyum dioksit veya ilmenit (demir ve titan oksidi) ve bununla birlikte silikatlar, karbonatlar, metal oksitler, organik maddeler ve ferro alaşımlar bulunmaktadır. Görüldüğü üzere; yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonu ile rutil elektrot üretiminde kullanılan flaks kimyasal kompozisyonları birbiri ile büyük oranda uyumaktadır. Bu hipotez doğrultusunda; proje önerisinin amaçlarına ulaşacağı ve hedeflenen rutil tipteki örtülü elektrotların daha ekonomik olarak üretilebileceği ve yüksek fırın cürufunun çevresel etkilerinin azaltılabileceği öngörülmektedir.

Yüksek lisans çalışmalarıma devam ederken Kahramanmaraş merkezli 7.7 ve 7.6 büyüklüğünde depremler meydana geldi. Ben deprem zamanı ve halen TCDD 5. Bölge Müdürlüğünde (Malatya) Metalürji ve Malzeme Mühendisi olarak görev yapmaktayım. Kahramanmaraşlı olan danışman hocam Mustafa KAPTANOĞLU ile Kahramanmaraş merkezli 7.7 ve 7.6 büyüklüğündeki depremlerden ciddi şekilde etkilendik. 12 ili etkileyen ve Kahramanmaraş ile Malatya’da da ciddi yıkıma sebep olan depremlerden sonra yüksek lisans eğitimimi tamamlamam için beni motive eden ve eğitimci kimliğinin yanında bana arkadaş gibi davranan danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Kaptanoğlu’na çok teşekkür ederim. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında bana yardımcı olan Ümmühan KAYA ve Ali İhsan Sayın’a çok teşekkür ederim.

Yine hayatımın her alanında olduğu gibi yüksek lisans eğitimim için de beni motive eden, destek olan değerli eşime ve kızlarım Hazel ve Helin’e teşekkür ediyorum.

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 122M824 numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK’a teşekkürlerimizi sunarız.

Serhat KAYA
ELAZIĞ, 2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE KULLANILDIĞI ALANLAR	10
2.1. Yüksek Fırın Cürufu	10
2.1.1. Yüksek Fırının Bölümleri.....	10
2.1.2. Yüksek Fırın Cürufu ve Kompozisyonu.....	14
2.1.3. Cürufun Esasları.....	15
2.1.4. Cürufun Oluşma Şekli.....	15
2.1.5. Haznedeki Cürufun Akışı.....	16
2.1.6. Yüksek Fırın Cürufunun Tipik Karakteristik Özellikleri	17
2.1.7. Yüksek Fırın Cürufunun Bileşimi	18
2.1.8. Cürufun Bazitesi.....	22
2.1.9. Cüruf Hacmi ve Baziklik, Sıcaklık Etkileri - [Si]	23
2.1.10. Cürufta Olan Katılma	23
2.1.11. Cürufun Özellikleri	25
2.1.11.1 Cürufun Sıvılaşmadaki Sıcaklığı	25
2.1.12. Yüksek Fırın Cürufunun Oluşumu	28
2.2. Demir Çelik Sektöründen Kaynaklanan Cürufların Kullanım Alanları	29
2.2.1. Türkiye’deki Demir ve Çelik İşletmelerinin Durumu	29
2.2.2. 2014 Yılında Oluşan Cüruf Atıklarının Türlerine Göre Miktarı ve İl Bazında Gösterimi ..	30
2.2.3. Türkiye’de Mevcut Kullanım Alanları	31
2.2.4. Avrupa’da Kullanım Alanları.....	32
2.2.5. Dünya’daki Kullanım Sahaları	37
3. KAYNAK ELEKTROTLARI	39
3.1. Kaynak Elektrotlarının Gruplandırılması	39
3.2. Erimeyen Elektrotlar.....	39
3.3. Eriyen Elektrotlar	40
3.3.1. Çıplak Elektrotlar	40
3.3.2. Özlü Elektrotlar	40
3.3.3. Örtülü Elektrotlar	41
3.4. Elektrot Örtüsünde Kullanılan Malzemeler	41
3.4.1. Cüruf Oluşturucu Maddeler.....	42
3.4.2. Karbonatlar.....	42
3.4.3. Silikatlar	42
3.4.4. Oksitler.....	43
3.4.5. Fluorürler.....	43

3.4.6. Arkı Stabilize Edici Maddeler.....	43
3.4.7. Gaz Atmosferi Oluşturan Maddeler	43
3.4.8. Ekstrüzyon İşlemini Kolaylaştırıcı Maddeler.....	43
3.4.9. Bağlayıcı Maddeler	43
3.4.10. Kurutma Esnasında ve Kuruma Sonrası Örtüye Dayanım Kazandırıcı Maddeler.....	43
3.4.11. Alaşımlayıcı ve Dezoksidasyon Yapıcı Maddeler.....	44
3.5. Örtü Çeşitleri	44
3.5.1. Rutil Elektrotlar	45
3.5.2. Asit Elektrotlar	46
3.5.3. Oksit Elektrotlar	46
3.5.4. Bazik Elektrotlar	47
3.5.5. Selülozik Elektrotlar.....	51
3.5.6. Demir Tozlu Elektrotlar	51
3.5.7. Derin Nüfuziyet Elektrotları.....	52
3.5.8. Elektrot Çekirdek Teli Malzemesi.....	52
4. MATERYAL VE METOT.....	53
4.1. Deneysel Çalışmanın Amacı	53
4.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	53
4.3. Örtülü Elektrot Üretimi	56
4.4. Üretilen Yüksek Fırın Cürufu İçeren Örtülü Elektrotlarla Kaynak Testlerinin Yapılması	60
4.5. Üretilen Rutil Tipteki Örtülü Elektrotların Karakterizasyonu	63
4.5.1. Üretilen Rutil Tipteki Örtülü Elektrotların Çıplak Gözle Muayene Yoluyla Karakterizasyonu	63
4.5.2. Mikroyapı, X-Işını ve Kimyasal Kompozisyon Analizleri.....	63
4.5.3. Sertlik Ölçümleri	64
4.5.4. Çekme Testi	64
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	66
5.1. Üretilen Rutil Tipteki Örtülü Elektrotların Çıplak Gözle Muayene Yoluyla Elde Edilen Karakterizasyon Sonuçları	66
5.2. Mikroyapı, XRD ve Kimyasal Analiz Sonuçları	67
5.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları	74
5.4. Çekme Test Sonuçları.....	74
6. SONUÇLAR.....	76
ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR.....	78
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Yüksek Fırın Cüruflarının Rutil Tipteki Örtülü Elektrot Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Serhat KAYA

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2024, Sayfa: xiii + 79

Bu tez çalışmasında, rutil tipteki örtülü elektrot üretiminde, yüksek fırın cüruflarının örtü karışımında flaks olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda, kalıpta-presleme yöntemi ile rutil tipte örtülü elektrot üretimleri yapılmıştır. Üretilen örtülü elektrotlar kullanılarak elektrik ark kaynak yöntemi ile AISI 1020 çelik plaka üzerine tek paso kaynak işlemi yapılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak testlerinde 80A akım ve elektrot pozitif kutup tercih edilmiştir. Üretilen elektrotlar öncelikle, performans kriterleri baz alınarak değerlendirilmiştir. Performans kriterlerinden olumlu sonuç alan elektrotlar sonrasında, ticari üreticilerle ve ilgili standartlar ile uyumlu olacak şekilde, mikroyapı, sertlik, kimyasal kompozisyon ve çekme testine tabi tutularak karakterize edilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, kaynak sonrası oluşan cürufların kısmen gözenekli olduğu, kaynak metalinin parlak, gözeneksiz ve düzgün olduğu ve kaynak esnasında arkın kararlılığının yeterli olduğu tespit edilmiştir. Üretilen yüksek fırın cürufu içeren örtülü elektrotların mikroyapılarının beklendiği şekilde, ferrit ve perlit faz/faz karışımından oluştuğu ve mikroyapılarda kaynak çekme yönüne doğru bir yönelme olduğu tespit edilmiştir. Sertlik test sonuçlarında ise, 180-190 HV aralığında sonuçlar elde edilmiştir. Çekme test sonuçlarından elde edilen akma, çekme ve yüzde uzama sonuçları ile ticari piyasa ve standartlara ait sonuçlar büyük oranda birbirine paralel sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak, yüksek fırın cüruflarının örtülü elektrot üretiminde flaks olarak kullanılabilirliği yapılan bu tez çalışmasıyla ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yüksek fırın cürufu, Rutil elektrot, Flaks.

ABSTRACT

Investigation Of The Usability Of Blast Furnace Slags In The Production Of Rutile-Type Covered Electrodes

Serhat KAYA

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

July 2024, Pages: xiii + 79

In this thesis study, the usability of blast furnace slag as a flux in the electrode cover in the production of rutile-type covered electrodes was investigated. In this context, rutile-type covered electrodes were produced by the mold-pressing method. It was carried out by single pass welding on the AISI 1020 steel plate by electric arc welding method using the produced covered electrodes. In welding tests, 80A current and electrode positive pole were preferred. The produced electrodes were primarily evaluated based on performance criteria. The electrodes that received positive results from the performance criteria were then characterized by subjecting them to microstructure, hardness, chemical composition, and tensile tests in compliance with commercial manufacturers and relevant standards. When the results were evaluated, it was determined that the slag formed after welding was partially porous, the weld metal was shiny, non-porous, and smooth, and the stability of the arc during welding was sufficient. It has been determined that the microstructures of the coated electrodes containing blast furnace slag produced consist of ferrite and pearlite phase/phase mixture, as expected, and that the microstructures are oriented towards the welding direction. As for the hardness test results, results were obtained in the range of 180-190 HV. The yield, tensile, and percent elongation results obtained from the tensile test results and the results of the commercial market and standards gave largely parallel results. As a result, the usability of blast furnace slag as a flux in coated electrode production has been demonstrated in this thesis study.

Keywords: Blast furnace slag, Rutile electrode, Flux.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1. Yüksek fırın genel görünümü	11
Şekil 2. 2. Yüksek fırının sıcaklık bölgeleri.....	13
Şekil 2. 3. Yüksek fırında gerçekleşen reaksiyonlar	14
Şekil 2. 4. Yüksek fırındaki cüruf bölgeleri	15
Şekil 2. 5. Yüksek fırındaki cüruf bölgeleri ve meydana gelen reaksiyonlar.....	16
Şekil 2. 6. Haznede cüruf akışı	17
Şekil 2. 7. Cürufun silika morfolojisi.....	19
Şekil 2. 8. Cürufun silika kristalografik görüntüsü	20
Şekil 2. 9. Ergiyik haldeki cürufun silika yapısı	20
Şekil 2. 10. Eriyik silikaya bazik oksitlerin eklenmesi	21
Şekil 2. 11. Orthosilikat olarak adlandırılanyapı ($2\text{MO} \cdot \text{SiO}_2$)	21
Şekil 2. 12. Yüksek fırın cüruf tipik görüntüleri (a) havada atmosfere açık ortamda soğutulan (b) hızlı soğutma şartlarında soğutulan.....	22
Şekil 2. 13. Cüruf hacmi ve sıcaklığın etkileri.....	23
Şekil 2. 14. Cüruf katılaşmasının faz diyagramı	25
Şekil 2. 15. Cürufun sıvılaşmadaki sıcaklığı(B/A)	26
Şekil 2. 16. Cürufun sıvılaşmadaki sıcaklığı($\%10\text{Al}_2\text{O}_3$)	26
Şekil 2. 17. Viskozite ile B/A arasındaki ilişki	27
Şekil 2. 18. Viskozite ile sıcaklık arasındaki ilişki	27
Şekil 2. 19. Bölgelere göre Türkiye çelik üretim haritası	29
Şekil 2. 20. Çelik cürufunun (BOF ve EAF cürufu) Avrupa’da kullanım alanları (2012 yılı)	33
Şekil 2. 21. Yüksek fırın cüruflarının kullanım alanları (2012 yılı).....	34
Şekil 2. 22. Karayolunda asfalt malzemesi olarak cürufun kullanımı.....	38
Şekil 2. 23. Cürufun demiryolunda balast olarak kullanılması	38
Şekil 3. 1. Örtülü elektrot ile kaynak şematik gösterimi	40
Şekil 3. 2. Örtülü elektrot görünümü	41
Şekil 3. 3. Bazik ve rutil elektrot kullanımında iş parçası ile elektrot arasındaki açı.....	49
Şekil 3. 4. Bazik elektrotlarla yapılan kaynaktaki ark boyu.....	49
Şekil 3. 5. Bazik elektrotlar ile kaynak yapılırken kraterin ön tarafında elektrodun tutuşturulması	50
Şekil 3. 6. Kükürt, manganez ve karbon miktarının çatlamaya etkisi	52
Şekil 4. 1. Örtülü elektrot üretiminde kullanılan filmaşın teller	54

Şekil 4. 2.	Yüksek fırın cürufu.....	55
Şekil 4. 3.	Örtülü elektrot üretimi için kullanılan kalıp.....	56
Şekil 4. 4.	Örtülü elektrot üretiminde kullanılan presleme makinesi	57
Şekil 4. 5.	Presten çıkan elektrodun ilk görüntüsü	57
Şekil 4. 6.	Magma therm laboratuvar fırını.....	58
Şekil 4. 7.	Kalıpta presleme yöntemi ile üretilen örtülü elektrotların tipik görselleri	58
Şekil 4. 8.	Yüksek fırın cürufu içeren örtülü elektrot üretim şeması	59
Şekil 4. 9.	Magmaweld kaynak makinesi.....	60
Şekil 4. 10.	Numune 1 kaynak dikişi görüntüsü	61
Şekil 4. 11.	Numune 2 kaynak dikişi görüntüsü	61
Şekil 4. 12.	Numune 3 kaynak dikişi görüntüsü	62
Şekil 4. 13.	Numune 4 kaynak dikişi görüntüsü	62
Şekil 4. 14.	Zımparalama ve parlatma amaçlı kullanılan diskler	64
Şekil 4. 15.	Sertlik ölçümleri ve mikroyapı karakterizasyonu amaçlı hazırlanan numune görselleri	64
Şekil 4. 16.	Çekme testlerinde kullanılan test numunelerin tipik bazı görselleri	65
Şekil 5. 1.	1 nolu numunenin mikro yapı fotoğrafları a) geçiş bölgesi b-c) kaynak metali	68
Şekil 5. 2.	2 nolu numunenin mikro yapı fotoğrafları a) geçiş bölgesi b-c) kaynak metali	69
Şekil 5. 3.	3 nolu numunenin mikro yapı fotoğrafları a) geçiş bölgesi b-c) kaynak metali	70
Şekil 5. 4.	4 nolu numunenin mikro yapı fotoğrafları a) geçiş bölgesi b-c) kaynak metali	71
Şekil 5. 5.	Magmaweld rutil elektrodun mikro yapı fotoğrafları a) geçiş bölgesi b) kaynak metali	72
Şekil 5. 6.	1 ve 4 nolu elektrotlarla elde edilen kaynak metallerinin XRD analiz sonuçları	73
Şekil 5. 7.	Kaynak metalinden alınan sertlik ölçüm sonuçları.	74

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2. 1. Değişik ülkelere ait cüruf kompozisyonları	18
Tablo 2. 2. 2014 yılı verilerine göre çelikhane cürufunun kullanımına ait bilgiler (ton)	30
Tablo 2. 3. Yüksek fırınlardan elde edilen cürufun geri kazanım verileri (ton) (2014 yılı)	31
Tablo 2. 4. Yüksek fırın cürufunun yüksek fen kurulundaki fiyat listesi	32
Tablo 2. 5. Yüksek fırınlardan elde edilen cürufların Avrupa'daki kullanım alanları	35
Tablo 2. 6. Çelik üretiminden çıkan cürufların Batı'daki uygulama alanları (Avrupa)	36
Tablo 3. 1. Elektrot örtüsüne ilave edilen alaşım elementlerinin verimleri.....	44
Tablo 4. 1. Filmaşın tel kimyasal analizi	53
Tablo 4. 2. Elektrot örtü bileşiminde kullanılan hammaddeler	54
Tablo 4. 3. Yüksek fırın cürufu kimyasal kompozisyonu	55
Tablo 4. 4. AISI 1020 çelik plakaya ait kimyasal kompozisyon	55
Tablo 4. 5. Kaynak parametreleri.....	60
Tablo 4. 6. Örtülü Elektrotların Uygulama Performans Kriterleri	63
Tablo 5. 1. Üretilen elektrotların uygulama performans kriterleri	66
Tablo 5. 2. Kaynaklı test numunelerden alınan kimyasal analiz sonuçları	73
Tablo 5. 3. Numunelerin test sonuçları	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

MPa	: Megapaskal
pH	: Potansiyel Hidrojen
µm	: Mikrometre

Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Standartları Derneği
AWS	: American Welding Society (Amerikan Kaynak Derneği)
BOF	: Bazık Oksijen Fırını
ÇED	: Çevresel Etki Değerlendirmesi
DIN	: Alman Standartları
EAO	: Elektrik Ark Ocağı
EN	: Europan Norm (Avrupa Normu)
IO	: İndüksiyon Ocağı
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
MAG	: Metal Aktif Gaz Kaynağı
MAM	: Marmara Araştırma Merkezi
MIG	: Metal İnert Gaz Kaynağı
Mt	: Milyar Ton
PÇ	: Portland Çimento
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
TIG	: Tunsten Asal Gaz Kaynağı
TS	: Türk Standardı
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
USEPA	: United States Environmental Protection Agency(Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı)
YF	: Yüksek Fırın

1. GİRİŞ

Ülkelerin lokomotif endüstrisi konumunda olan demir-çelik endüstrisi, nihai ürünlerinin kullanım alanları ve farklı sektörlerle olan katkıları nedeniyle, ülkelerin kalkınmasının ve gelişmişliğinin bir göstergesidir. Dünyada 2021 yılı itibari ile ortalama olarak 1.95 milyar ton (mt) çelik üretilmiştir. Türkiye’de ise 2021 yılında bu rakam 40.4 milyon ton mertebesinde [1]. Hurda tipteki demirlerin ve çeliklerin yeniden ergitilmesi dışındaki tüm çelik üretimleri, yerkabuğundan çıkarılan ekonomik değeri olan demir cevherlerinin yüksek fırında rafinasyonu yoluyla üretilmektedir. Yüksek fırın rafinasyonunda, kok kömürü ile birlikte kireçtaşı, dolomit ve silis kumu gibi çeşitli cüruf oluşturuçular kullanılarak ham demir üretilmektedir. Bu esnada, rafine edilen 1 ton ham demir başına ortalama olarak 200-600 kg yüksek fırın cürufu ortaya çıkmaktadır [2]. İyi bilindiği üzere; yüksek fırın cürufu, ekonomik olarak değerli demir metali içeren cevherlerin, ergitme yoluyla rafine edilmesiyle sıvı metal yüzeyinde oluşan, metalden daha hafif oksitler ve silikatlar olarak tanımlanır [3]. Dünyadaki ve ülkemizdeki demir-çelik üretim rakamları göz önüne alındığında, demir-çelik üretimi esnasında ciddi miktarlarda da yüksek fırın cürufunun ortaya çıktığı çok açıktır. Bu nedenle de, açığa çıkan bu cüruflara kullanım alanı bulmak, geri dönüştürmek ve çevresel etkilerini asgari seviyeye düşürmek bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu kapsamda, yüksek fırın cürufları çeşitli alanlarda geri dönüşüm amaçlı kullanılmaktadır. Geri dönüşümü yapılan ve ticari olarak değeri olan yüksek fırın cürufları; yol için ihtiyaç olan temel malzemesi, yol beton agregası, yüksek kayma direncine sahip agrega, karayollarında asfaltta kullanılan beton agregası, demiryolunda kullanılan balast, zeminlerin iyileştirme (stabilizasyonu) malzemesi, yapısal dolgularda dolgu malzemesi gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Yüksek fırınların cürufları, kendi başına bağlayıcılığı olmayan ancak inşaat sektöründe kullanılan Portland Çimentosuna katıldığında bağlayıcı özelliği olan bir malzemedir. Yüksek fırınların cüruflarının, özellikle betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine olumlu katkılar sağladığı bilinmektedir [2,4].

Dünyada demir-çelik üretimi esnasında meydana gelen yüksek fırın cürufları, işletmelere hem yer işgali açısından sorun oluşturmakta hem de içerdiği kimyasallar nedeniyle zararlı çevresel etkilere (su ve toprak kirliliği) neden olmaktadır. Yüksek fırın cürufları her ne kadar çeşitli kullanım alanlarına sahip olsa da bunlar yetersiz seviyede kalmaktadır. 2015 yılında, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve Türkiye Demir-Çelik Üreticileri Derneği tarafından yayınlanan demir-çelik cüruf raporuna göre Türkiye’de yıllık yaklaşık 55.000 ton yüksek fırın cürufunun geri kazanımının yapılamadığı belirtilmektedir [5].

Yüksek fırın cüruflarının ortalama kompozisyonu; ağırlıkça %35-40 SiO₂, %35-42 CaO, %8-15 Al₂O₃, %8-9 MgO, %1-2 TiO₂, %0,3-1,0 MnO, %0,5-1 Fe₂O₃ şeklindedir [2,4,5].

Elektrot örtü bileşimlerinde ise, hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), alümina (Al_2O_3), ilmenit (FeTiO_3), rutil (TiO_2), kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO), mangan oksit (MnO), sodyum silikat (Na_2SiO_3), alüminyum silikatlar (Al_2SiO_5), kuvars (SiO_2) ve feldispatlar (KAlSi_3O_8 - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), karbonatlar (CaCO_3 ve MgCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), selüloz ($\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_{10}$), kalsiyum florür (CaF_2), ferromangan (FeMn) ve ferrosilis (FeSi) gibi deoksiderler, demir tozu ve sodyum silikat ($\text{Na}_2(\text{SiO}_3)$) ve potasyum silikat ($\text{K}_2\text{O}_3\text{Si}$) bağlayıcılar ve burada bahsedilmeyen çok sayıda seramik esaslı bileşen kullanılmaktadır. Bu örtü bileşenlerinin belirli oranlarda kullanılmasıyla asidik, oksit, bazik, selülozik, özel ve rutil elektrotlar üretilebilmektedir [6-8].

Tez çalışmasında, ham demir üretimi esnasında açığa çıkan yüksek fırın cüruflarının, rutil tipteki örtülü elektrot üretiminde flaks olarak kullanılabilirliği hedeflenmektedir. Bu doğrultuda; işletmelerde yığınlar halinde saha işgaline neden olan yüksek fırın cüruflarının yeniden kazanımı sağlanarak yüksek fırın cüruflarına mevcut durumda bilinmeyen, katma değer oluşturma potansiyeli bulunan bir kullanım sahası oluşturmaya amaçlanmaktadır. Hedeflenen örtülü elektrotların üretilmesiyle, cürufların işletmelerde kapladığı alanlar azaltılarak, cürufların çevreye ve ekosisteme olan etkilerinin azaltılmasına da katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Ayrıca, yüksek fırın cüruflarının birim maliyetlerinin çok düşük olması nedeniyle rutil tipteki örtülü elektrot maliyetlerinin düşürülmesine de katkı sağlanması beklenmektedir.

Ham demir üretimi esnasında açığa çıkan yüksek fırın cürufları, işletmelere hem yer işgali açısından sorun oluşturmakta hem de içerdiği zararlı kimyasallar nedeniyle çevresel etkilere (toprak ve su kirliliği) neden olmaktadır. Yüksek fırın cürufları her ne kadar çeşitli kullanım alanlarına sahip olsa da bu kullanım alanları yetersiz seviyede kalmaktadır. 2015 yılında, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve Türkiye Demir-Çelik Üreticileri Derneği tarafından yayınlanan demir-çelik cüruf raporuna göre Türkiye’de yıllık yaklaşık 55.000 ton yüksek fırın cürufunun geri kazanımının yapılamadığı belirtilmektedir. Dolayısıyla, açığa çıkan bu cüruflara kullanım alanı bulmak, geri dönüştürmek ve çevresel etkilerini asgari seviyeye düşürmek bir zorunluluk haline gelmiştir.

Rutil elektrot örtülerinde, temel madde olarak genellikle rutil olarak bulunan titanyumdioksit ya da ilmenit ve bununla birlikte karbonatlar, silikatlar, organik maddeler, metal oksitler ve ferro alaşımlar bulunmaktadır. Görüldüğü üzere; yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonu ile rutil elektrot üretiminde kullanılan flaks kimyasal kompozisyonları birbiri ile büyük oranda uyumaktadır. Bu hipotez doğrultusunda; proje önerisinin amaçlarına ulaşılacağı ve hedeflenen rutil tipteki örtülü elektrotların daha ekonomik olarak üretilebileceği ve yüksek fırın cürufunun çevresel etkilerinin azaltılabileceği öngörülmektedir.

Yapılan literatür taraması sonucunda tez çalışmasına yakın çalışmalar özetlerini de içerecek şekilde aşağıda verilmiştir. Yüksek fırın cüruflarının rutil tipteki örtülü elektrot üretiminde

kullanımına dair herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak, literatürde çok sayıda yüksek fırın cürufunun çeşitli alanlarda kullanımına dair çalışma bulunmaktadır.

Yüksek fırın cürufu ve kullanım alanları ile ilişkili en yakın literatür çalışmaları şu şekildedir;

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve Türkiye Demir-Çelik Üreticileri Derneği (2015), bir araştırma raporu sunarak çelik cüruflarının ve yüksek fırın cüruflarının durumu ve kullanıldığı uygulama alanları ile ilgili bilgilendirme çalışması yayınlamışlardır. Bu kapsamda, yüksek fırın cüruflarının karayolunda üstyapı malzemesi olarak kullanılması, cürufun demiryolunda balast yerine kullanılması, betonda çimento agregası olarak kullanılması, denizlerde dolgu yapımında ve limanlarda cürufun kullanımı, inşaat sektöründe çimentoda cürufun kullanımı, gübrelerin üretiminde kullanılması ve refrakter malzeme üretiminde kullanım alanları olduğunu belirtilmiştir [5].

Uysal ve Bahar (2018) yayınladıkları derleme makalesinde, cüruf çeşitlerinden ve 2018 yılından geriye gitmek üzere, hangi sektörlerde cürufların kullanım alanlarının olduğuna dair bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, yüksek fırın cüruflarının kerpiç, tuğla, portland çimentosu, jeopolimer üretiminde ve çimento üretiminde kullanımına dair çalışmalardan bahsetmiştir. Benzer şekilde, metalürjik işletmelerden açığa çıkan cüruflarında çeşitli kullanım alanlarına dair veriler paylaşılmıştır. Çalışma sonucunda ise, işletmelerde oluşan cüruf dağlarının fazlaca yer işgal ettiği ve toprak, su ve hava kirliliği gibi çevre problemleri yoluyla insan sağlığı ve bitki sağlığını etkilediği belirtilerek cüruflara alternatif kullanım alanlarının bulunmasının elzem olduğu sonucuna varıldığı belirtilmiştir [2].

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve Türkiye Demir-Çelik Üreticileri Derneği (2015) ve Uysal ve Bahar (2018) sırasıyla 2015 ve 2018 yıllarına kadar ki literatüre dair rapor ve derleme makalesi yayınladıkları için, 2018 yılı sonrasına ait yüksek fırın cüruflarını içeren en yakın çalışmalara daha fazla odaklanılarak literatür ele alınmıştır. Ayrıca, literatürde yüksek fırın cüruflarının çimento ve beton özelliklerine etkisi ile ilişkili çok fazla sayıda çalışma bulunduğu için, bu kapsamdaki çalışmaların büyük bir kısmı mecburen proje önerisinde verilmemiştir. Öte yandan, yüksek fırın cürufunun kullanımı ile ilgili derleme çalışmalarına daha fazla sayıda yer verilmeye çalışılmıştır. Böylece, daha fazla sayıda çalışmanın ele alınarak literatürün özetlenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, proje önerisinin konu kapsamına yakın, sınırlı sayıda araştırma çalışmalarına yer verilerek konu kapsamının dağılmasına engel olunmaya çalışılmıştır.

Demirsöz vd. (2019) yayınlamış oldukları araştırma makalesinde, yüksek fırın granüle cürufunun, St 37-2 referans standart borulardaki malzeme, Hardox 400 ve W2 C-NiCrBSi malzemelerinin kaplaması üzerindeki aşındırıcılığını incelemişlerdir. Çalışmada, cüruflar ortalama olarak 505 µm partikül büyüklüğünde öğütülerek elenmiş ve yüzde ağırlık olarak %10,

%20 ve %30 oranlarında cüruf bulunduran sulu çamur örnekleri hazırlanmıştır. Testler 2 m/s ve 4 m/s çevresel hız değerleri ve (90°) partikül normal çarpma açısı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, belli partikül boyutlarında hazırlanmış olan cürufun aşındırma özelliğinin, partikül bileşimi ve dönme hızıyla doğrudan ilişkili olduğu, konsantrasyonun ve dönme hızının artmasına bağlı olarak aşınma miktarının da arttığı ve kullanılmış olan malzemelerde aşınma kayıplarının çoktan aza doğru sıralandığında Hardox 400, St 37-2 ve W2 C-NiCrBSi şeklinde olduğu belirtilmiştir [9].

Aydın (2020) yayınlamış olduğu araştırma makalesinde, Ereğli Demir Çelik Fabrikasına ait yüksek fırın cürufu (YFC) ile mermer fabrikasından alınmış mermer tozunu, duvarların seramik karosu üretilmesinde alternatif bir hammadde olarak kullanımını araştırmıştır. Çalışmada, duvar seramik karosu bileşimlerinde maksimum % 10 oranında kullanılan kalsitin yerine, yüksek fırın cürufu ile mermer toz maddesi kullanılmıştır. Numuneler 60 dakika süre ile 1130 °C de laboratuvar şartlarında pişirilmiştir. Numunelerde pişme ufalması, eğme dayanımı ve su emme gibi özelliklerinin yanı sıra, sinterleme analizleri de araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, YFC ilavesinin porselen karoya da vitrifiye gibi ürünlerde teknik, termal ve mikroyapısal özelliklere olumlu katkılar sağladığı, seramik duvar karosunda teknik açıdan ürün stabilitesinin sağlanması ve üretim bantlarında ürün kaybının önlenmesi açısından kuru mukavemetlerdeki artışa neden olduğu belirtilmiştir [10].

Bilici vd. (2020) yapmış oldukları araştırma makalesinde, Eskişehir’de kiremit üretiminde kullanılan zemin kil numunesinin dayanımı üzerine, yüksek fırın (YF) cürufu ve uçucu kül kullanımının etkisini araştırmıştır. Çalışmada, çeşitli oranlarda yüksek fırın (YF) cürufu ve uçucu kül kullanarak elde edilen serilerin dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, en büyük dayanımların elde edildiği seriler ile kür uygulanmadan yapılan deney sonuçlarının dayanımlarının neredeyse eşit olduğu, kür süresine bağlı olarak ise uçucu kül katkısının yüksek fırın cürufu katkılı serilere oranla serbest basınç dayanımı üzerinde daha önemli seviyede dayanım artışına neden olduğu belirtilmiştir [11].

Eken ve Avşaroğlu (2021) yapmış oldukları araştırma makalesinde, ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YF), üleksit ve bazalt katkılarıyla üretilen beton numunelerinin yüksek sıcaklık altındaki özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada, TS 802 standardı ile belirlenen şartlara uygun beton karışımında ince agreganın yerine kütlece yüksek fırın cürufu %10-20, bazalt %10-20 ve üleksit %1-2 oranlarında eklenerek, 7 ve 28 günlük örnekler bir saat 600 ve 800 °C sıcaklık etkisinde bırakılarak havada ve suda olmak üzere iki farklı soğutma rejimine tabi tutulmuştur. Çalışma sonunda, yüksek fırın cürufu ve üleksit katkısının ince agrega olarak, beton karışımında yüksek sıcaklık etkilerine karşı dayanıklı beton üretiminde kullanılabileceği belirtilmiştir [12].

Bingöl ve Balaneji (2019) yapmış oldukları araştırma makalesinde, yüksek fırın cürufu(YF) ve zeolitin betonların sülfat direncine etkisini incelemiştir. Çalışmada, üretilen

betonlarda yüksek fırın cürufu(YF) ve zeolit çimentonun yerine, ağırlık olarak %10, %20 ve %30 oranlarında kullanılmıştır. Elde edilen betonlardan hazırlanmış olan örnekler üzerinde 28 gün, 90 gün ve 180 günlük kürler sonrasında eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve birim ağırlık deneyleri yapılarak sülfat testine tabi tutulmuştur. Çalışma sonunda, basınç ve eğilme dayanımı performansını en iyi %10 yüksek fırın cürufu ve zeolit içeren numunelerin gösterdiği belirtilmiştir [13].

Eker vd. (2020) yapmış oldukları araştırma makalesinde, yeraltı madenciliğinde atık depolama amaçlı kullanılan çimentolu macun dolgular için gerekli olan dayanımın elde edilmesi ve daha da geliştirilmesi için yüksek fırın cürufu(YF) kullanmış, kısa ve uzun vadede çimentolu macun dolguların dayanım özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, ÇMD numuneleri önce, % 3, 5, 7, 9 ve 11 portland çimentosu ile hazırlanmış, daha sonra ise yüksek fırın cürufu ikamesi olarak çimentonun yerine ağırlıkça % 25, % 50 ve % 75'i ile karıştırılmış ve 3, 7, 14, 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine göre tek eksenli basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Çalışma sonunda, yüksek fırın cürufunun çimentolu macun dolgular ile birlikte kullanımının tam olarak yeterli olmadığı ve bu konuda dayanımı geliştirebilmek için daha farklı katkı malzemelerinin de kullanılmasının gerekliliği belirtilmiştir [14].

Duan vd. (2022) yapmış oldukları araştırma makalesinde, çöktürme yöntemi kullanarak cüruftan hidrotalsit benzeri bileşikler elde etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, hidrotalsit benzeri bileşiklerin sentezi için optimum işlem koşulları, kendi kendine tasarlanmış bir laboratuvar ölçekli sistemde tek faktör kullanılarak, hidrotalsit benzeri bileşiklerin sentez mekanizması kurulmuştur. Çalışma sonunda, 11,5 pH, 343 K çökeltme sıcaklığı, 383 K kristalizasyon sıcaklığı ve 6-10 saatlik kristalizasyon süresinin hidrotalsit benzeri bileşiklerin sentezi için optimum proses koşulları olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, demir-çelik endüstrisinin enerji tasarrufu ve emisyon azaltımına daha elverişli olan yüksek fırın cürufunun kullanımı için yeni bir teknolojik yol sağladığı belirtilmiştir [15].

Cechin vd. (2021) yapmış oldukları araştırma makalesinde, kum ve kil – yapı endüstrisi malzemelerinde kullanmak amaçlı Fundão Barajı'nın demir cevheri atıkları, yüksek fırın cürufu ve kömürü ve dökümhane kumu kullanılarak seramik kompozit üretmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, kompozitler dikdörtgen numunelerde kalıplanmış ve 900, 950, 1000, 1050 ve 1200 °C sıcaklıklarda fırınlanarak çeşitli analiz teknikleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Çalışma sonunda, üretilen malzemelerin 12.19 MPa'ya kadar eğilme mukavemet modülüne, %2 ila 22 arasında değişen su emmeye, %0.02 ila %6.50 arasında değişen doğrusal büzölmeye ve 2.03 ila 1.63 g/cm³ arasında değişen görünür yoğunluğa sahip olduğu ve kompozit içyapılarında amorf yapıların oluştuğu belirtilmiştir [16].

Giergiczny (2019) yapmış olduğu derleme makalesinde, düşük kalsiyumlu ve yüksek kalsiyumlu uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufunun, çimento ve beton bileşiminde

kullanımına dair bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, son yıllarda yapılan, bilimsel çalışmaların, büyük miktarlarda FA, HCFA ve GBFS içeren bağlayıcı özelliklerinin (örn. uzun sertleşme süresi, düşük erken dayanım vb.) iyileştirilmesine odaklanıldığı belirtilmiştir. Bu doğrultuda yapılan iyileştirme çalışmalarında, nano malzemeler, kimyasal ve mekanik aktivasyon gibi beton bileşimine yüksek seviyeli katkı maddelerinin eklenmesinin hedeflendiği belirtilmiştir. FA ve GBFS'ye sınırlı erişim nedeniyle, FA, HCFA, GBFS ve kireçtaşı arasında sinerji arayışına yönelik çok sayıda çalışma da bulunduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde, FA, HCFA ve GBFS içeren kompozit çimentoların dayanıklılık özelliklerine de odaklanıldığı belirtilmiştir. Ayrıca, çalışmada çimento ve betonda diğer uçucu kül ve cüruf türlerinin gelecekteki uygulamalarına ilişkin beklentilere de yer verilmiştir [17].

Oge vd. (2019) yapmış oldukları derleme makalesinde, yüksek fırın cürufu ve çelik üretim cürufu gibi büyük miktarlardaki endüstriyel yan ürünlerin, demir-çelik üretimi ve inşaat gibi enerji ve malzeme yoğun endüstrilerde yeniden kullanımına dair çalışmada bulunmuşlardır. Çalışmada, bu yan ürünlerin, atık ısı geri kazanımı, çimento üretiminde klinker ikamesi ve bir dizi nispeten daha fazla katma değerli uygulama dâhil olmak üzere çeşitli alanlarda kullanımına dair bugüne kadar çok sayıda araştırma yapıldığı belirtilmiştir. Ayrıca, son yıllarda, cürufaların özellikle yüzey mühendisliği uygulamalarında ve alternatif seramik kaplama malzemeleri gibi daha teknolojik kullanımlar için sınırları zorlayan bir noktaya geldiği belirtilmiştir. Yapılan derleme çalışması sonucunda, yüksek fırın ve çelik üretim cürufunun çeşitli kullanımlarına dair mevcut girişimlere güncel durum hakkında fikir sağlamanın amaçlandığı belirtilmiştir [18].

Buddhdev ve Timani (2021) yapmış oldukları derleme bildirisinde, yüksek fırın cürufunun zayıf ve problemlili zemin koşullarındaki duruma bağlı olarak çeşitli jeoteknik uygulamalarda kullanımı için kritik bir inceleme yapıldığı belirtilmiştir. Çalışmada, yüksek fırın cürufunun, her tür toprakla uyumlu olması ve herhangi bir toprak stabilizasyon işlemi için uygun çözüm sağlaması açısından çok yönlü özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir. Çalışma sonunda, özellikle Hindistan bağlamında, bu yeterince kullanılmayan malzeme kullanılarak çeşitli jeoteknik problemler için bazı önerilerde bulunabileceği ve doğal kaynakların korunması ve sürdürülmesinde faydalı olduğu kadar teknik avantaja da sahip olacağı belirtilmiştir [19].

Cheah vd. (2021) yapmış oldukları derleme çalışmasında, beton için bağlayıcı olarak ögütölmüş yüksek fırın cürufunun (GGBFS) kullanımının önceki çalışmalarda kapsamlı bir şekilde gözden geçirildiğini ancak, çeşitli alkali aktivatörlerin GGBFS bazlı betonun davranışı üzerindeki etkisinin kapsamlı bir incelemede henüz konsolide edilmediğini belirtmişlerdir. Bu nedenle, çeşitli ticari ve yan ürün tiplerindeki alkali aktivatörlerin, zemin granüllü yüksek fırın cüruf esaslı betonun fresh özelliklerine, mekanik özelliklerine ve dayanıklılığı üzerindeki etkisinin kapsamlı bir incelemesini sunduklarını belirtmişlerdir. Çalışmada öngörülen ticari alkali aktivatörlerin; hidroksit bazlı, silikat bazlı, karbonat bazlı ve oksit bazlı alkali aktivatörler olduğu

ve yan ürün aktivatörlerinin de doğrudan elde edilebilir veya endüstriyel yan üründen elde edilebilir olduğu belirtilmiştir. Çalışma sonunda, yan üründen türetilen sodyum silikat, ticari sodyum silikata kıyasla GGBS'ye neredeyse benzer mekanik özellikler verdiği, kireç fırını tozu, alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin alkali aktivasyonunda oksit ve karbonat bazlı alkali aktivatörler ile benzer özelliklere sahip sonuçlar verdiği belirtilmiştir [20].

Ulugöl (2015) yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında, Kardemir'e ait yüksek fırınlardan (YF) elde edilen cürufun, çimento üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, üretilen yüksek fırın cürufu çimento harçlarının mekanik özellikleri ve içyapıları incelenmiştir. Çalışma sonunda, belli bir miktarda yüksek fırın cürufu kullanımı ile çimento harcının durabilite performansına olumlu etki ettiği ve optimum cüruf kullanım oranının %20 olarak tespit edildiği belirtilmiştir [21].

Rutil tipte örtülü elektrot üretimi ve/veya yüksek fırın cürufu katkılı örtülü elektrot üretimi ile ilişkili en yakın literatür çalışmaları ise şu şekildedir;

Hocaoğlu (2018) yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında, ticari uygulamalarda kullanılan sert dolgulu kaplama bileşimlerinin yanı sıra Fe-Mo-Ti-Mn-B-C esaslı sert dolgulu bileşimler geliştirmeyi hedeflemiştir. Çalışmada, literatür taraması ve ön çalışmalar sonucunda on bir farklı bileşimde örtülü sert dolgu elektrodu üretildiği belirtilmekte ve sert dolgu elektrotlarının elektrik ark kaynak yöntemi ile AISI 1010 çelik üzerinde kaplama yapıldığı belirtilmiştir. Kaplama sonrasında elde edilen kaplamalar, mikroyapı analizleri, makro ve mikro sertlikler ve aşınma testleri ile karakterize edilmiştir. Çalışma sonucunda; yüzey alaşımlı tabakanın altlık malzeme ile metalurjik olarak uyumlu olduğu ve kaplama tabakasının homojen faz dağılımına sahip olduğu belirtilmiştir [22].

Eroğlu (2009) yapmış olduğu araştırma makalesinde, örtülü elektrot örtüsüne ferrobör (FeB) ilavesi katarak elektrot üretmeyi ve bu doğrultuda; borür içeren kaplama yapılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmada, SAE 1020 çelik yüzeyler üzerinde elde edilen kaplamalar mikroyapısal analizler, X-ışını (WDX) ve mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Çalışma sonunda, kaplama mikroyapılarında hedeflenen borür tabakalarının olduğu böylece de kaplamaların sertlik özelliklerinin geliştirildiği belirtilmiştir [23].

Kocaman vd. (2022) yapmış oldukları araştırma makalesinde, FeTi ve FeB içeren örtülü elektrotları üreterek, ark kaynak tekniğinde AISI 1010 çelik yüzeylere kaplama amaçlı kaynak işlemleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, substrat-kaplama arayüzünün gelişimi, katılma davranışı ve numunelerin mikroyapısal koşulları çeşitli karakterizasyon yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışma sonunda, kaplama mikroyapılarında TiB₂ ve Fe₂Ti gibi intermetalik fazlar, α -Fe + Fe₂Ti ötektik yapısı ve eser miktarda denge dışı fazlar tespit edildiği ve mikroyapıda oluşan bu fazların kaplamanın sertliği, aşınma ve korozyon direnci üzerinde önemli etkileri olduğu belirtilmiştir [24].

Nagentrau vd. (2019) yapmış oldukları araştırma makalesinde, örtülü elektrot ark kaynak tekniğinde karbon çeliklerini WC ile kaplayarak, kaynak akımı, kaynak katman sayısı, elektrot kurutma ve ana malzeme ön ısıtması gibi kaynak parametrelerinin, WC'nin mikro yapısı ve karbür dağılımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, kaplama sertliği, mikroyapı ve kimyasal kompozisyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, kaplama bölgesindeki karbür büyümesinin, yüksek akım (200 A), artan kaynak katman sayısı (3 katman) ve ana malzeme ön ısıtma parametreleriyle ilişkili olduğu ve elektrotların kurutmadan kullanılmasının matris bölgesinde tek tip daha küçük karbür dağılımına yol açtığı belirtilmiştir [25].

Vaz vd. (2012) yapmış oldukları araştırma makalesinde, örtülü elektrot üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan potasyum ve sodyum silikatlar yerine optimum özellikteki geçirimsiz polimerleri kullanarak düşük hidrojen içeren kaynak metali mikro yapısını elde etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, polimer bağlayıcılı örtülü elektrotlarla kaynak testleri yapılmış ve kaynak metalinin yayılabilir hidrojen, mikro yapı ve mekanik özellikler değerlendirilerek geleneksel düşük hidrojen veren E7018 elektrotlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda, geçirimsiz polimer bağlayıcılı örtülü elektrot ile elde edilen kaynak metalinin daha düşük hidrojen içerdiği, çekme ve akma mukavemeti, uzama değerlerinin daha iyi olduğu, asiküler ferrit miktarının daha yüksek olduğu, E7018 düşük hidrojen kaplı elektrot ile elde edilen kaynak metali ile aynı morfolojiye ve tipik mikro yapıya sahip olduğu belirtilmiştir [26].

Singh ve Kumar (2020) yapmış oldukları araştırma makalesinde, yumuşak çelikler üzerine ark kaynağı kullanılarak yapılan kaynak işlemlerinde, kaynak akımının ve soğutma şartlarının ana metalin sertliği ve kimyasal bileşimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, voltaj, kaynak hızı ve besleme hızı vb. diğer değişkenler sabit tutulurken, akım değeri 90A, 100A ve 110A olarak belirlenmiş ve soğutma ortamı ise 300° C'deki su ortamı tercih edilmiştir. Çalışma sonunda, ısıdan etkilenen bölgenin ana metalden daha fazla sertliğe sahip olduğu, kaynak bölgesinin ise maksimum sertliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, karbon yüzdesinin de malzemelerdeki sertlik sonuçları ile doğrudan ilişkili olduğu belirtilmiştir [27].

Yukarıdaki literatür bilgilerinden de anlaşılaacağı üzere; yüksek fırın cürufalarının kerpiç üretiminde, tuğla üretiminde, portland çimentosu üretiminde, refrakter üretiminde, grit üretiminde, gübre üretiminde, jeopolimer ve çimento üretiminde kullanımına dair çokça çalışma ve uygulama bulunmaktadır. Benzer şekilde, karayolu üstyapılarında, demiryolu balast malzemelerinde, çimento betonu agregalarında, deniz dolgularında, liman inşaatı dolgu malzemelerinde ve biyooksidasyon prosesi ph dengeleyicilerinde kullanımına dair de çokça çalışma ve uygulama bulunmaktadır [2, 4, 5]. Çalışmanın en temel özgünlüğü temsil eden yüksek fırın cürufundan rutil tipteki örtülü elektrot üretimine dair ise hem ticari piyasada hem de literatürde herhangi bir bilgiye rastlanmamıştır. Öte yandan, örtülü elektrot üretimi ile ilişkili çalışma sayısının da sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Sınırlı sayıdaki elektrot üretimi ile ilgili

Çalışmada, genel olarak alaşım elementleri vasıtasıyla kaplama yapımına dair çalışmalar yapılmıştır [15-18]. Eser sayıdaki çalışmalarda ise örtü bileşenlerinin ve bağlayıcı değişiminin kaynak metalinin özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır [19,20]. Bu tez önerisinin konu kapsamı dışında tutulan ve örtülü elektrot üretimi ile ilişkili olmayan literatürdeki örtülü elektrot kullanımı ile gerçekleştirilen ark kaynak tekniği çalışmaların ise daha çok ticari işletmelerin ürettiği elektrotların uygulamalarda gösterdiği performans, makine ve ortam parametrelerinin kaynak metallerine etkisi ve kaplama amaçlı çalışmalar ne çıkmaktadır.



2. YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE KULLANILDIĞI ALANLAR

Kapasitelerine göre boyutları 30 m ile 90 m arasında olan ve demir içeren ürünlerin kireç taşı ve kokun aynı anda ergitilmesi işleminde kullanılan dikey ergitme fırınlarına yüksek fırın adı verilmektedir.

Yüksek fırınlar kullanılarak sıvı dökme demir elde edilmesi için demir(Fe) içeren ürünler (pelet, cevher, sinter v.b) cüruf elde edilmesi ve cüruf özelliklerinin belirlenmesi için oksit içeren ürünler (flaks ürünleri; dolomit, kireçtaşı v.s), ısı elde edilmesi için karbon içeren ürünlerin (kömür, kok, fuel oil, katran v.s) kullanılması gerekmektedir. Yüksek fırın devamlı olarak ters akım prensibiyle çalışan bir fırın türüdür. Ergitilen kok, cevher ile katkı maddelerinden oluşan ürünler yukarı- aşağı yönünde iner, aşağı taraftan verilen hava suretiyle yanan kok ile meydana gelen redükleyici gaz ise aşağıdan yukarıya taşınır.

Yüksek fırınlar kullanılarak ham demir üretmenin iki amacı bulunmaktadır;

- Ham demir elde etmek
- Çelik üretiminde kullanmak amacıyla sıvı demir üretmek (ham demir)

Yüksek fırın silindirik şeklinde ve fırın gövde kısmı kalın sacdan imal edilir (çelik sac) ve iç kısmı ateşe dayanan refrakter tuğla kullanılarak örülür. Taban ve hazne ve kısmı için de refrakter tuğlalar(ateşe dayanıklı) kullanılır. Fırın içindeki refrakter tuğlaların(ateşe dayanıklı) kalınlıkları karın bölgesinde 75 cm olup gövde bölgesi 90 cm ile 100 cm taban bölgesi ise 160 cm ile 180 cm ebatları arasında değişir. Teknik yüksek fırınlar gündüz ve gece sürekli çalıştırılarak 3 ile 7 yıl süre kullanılabilir. Bu zaman zarfından sonra fırın çalıştırılmaz ve fırın temizlenip tuğlaları yeniden örülerek tekrar kullanılır.

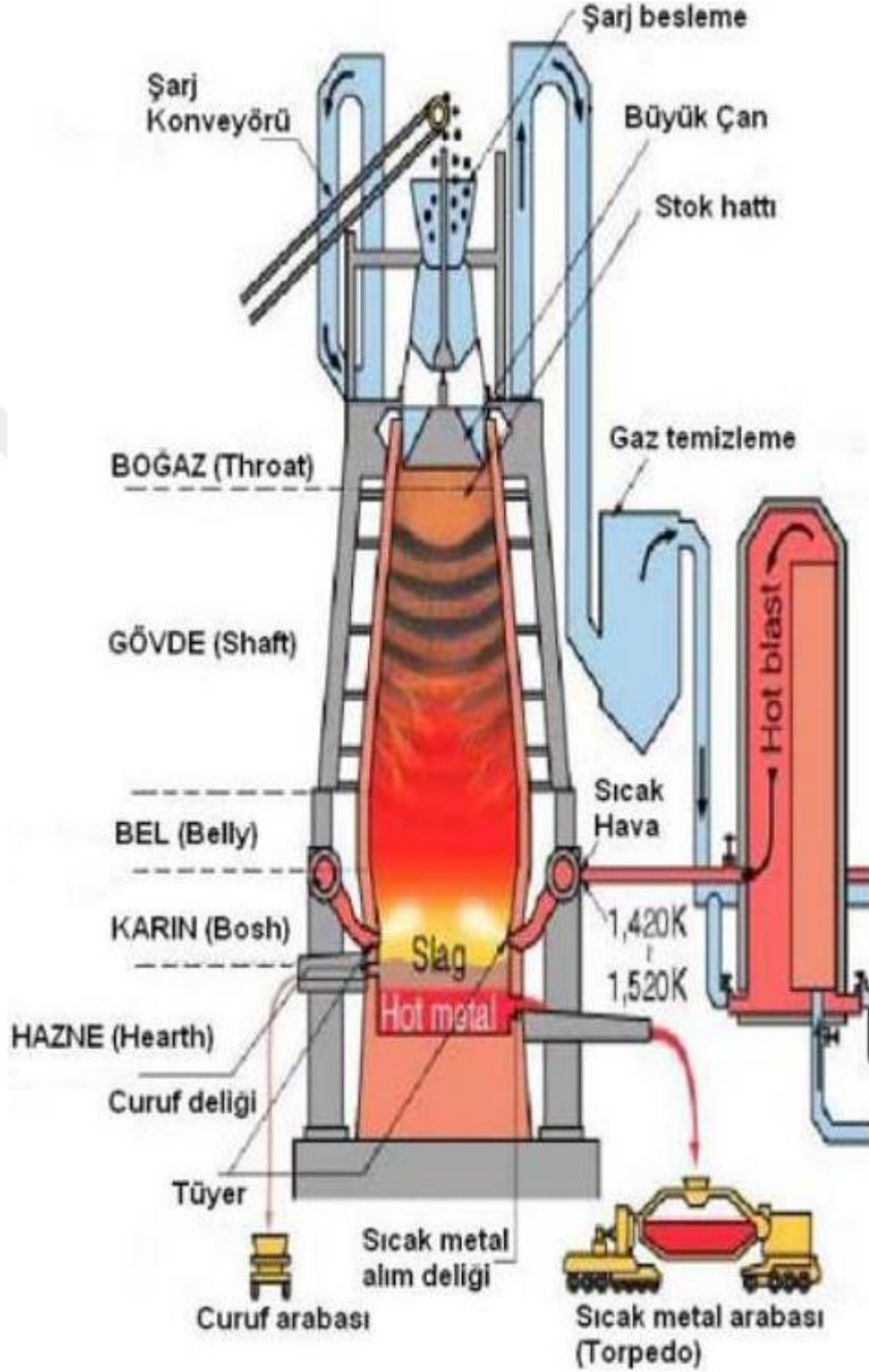
Yüksek fırındaki ana ürünleri büyük oranda Fe içerikli olan ham demir (C, As, Mn, Cr, Ni, Cu, Si, P, S) ve cüruf ile baca gazlarıdır [28].

2.1. Yüksek Fırın Cürufu

2.1.1. Yüksek Fırının Bölümleri

Yüksek fırın; gövde, boğaz, karın, bel ve hazne olmak üzere 5 kısımdan oluşur. Ürünler fırının üst tarafından fırın içerisine gönderilir. Isınma sonucunda oluşan hacim genişlemesinden dolayı hareketin rahat gerçekleşmesi için fırın aşağı tarafa genişleyecek şekilde tasarlanmıştır. Fırının genişleyen bölgesine gövde adı verilir. Gövdenin sona erdiği yerde fırın çapının en geniş olduğu bölge başlar. Bu bölgeye bel adı verilir. Metalin ve cürufun ergimesi sonucunda hacimdeki daralma bu bölgede başlar. Hazne ile bel ile arasında karın bölgesi bulunur ve karın

bölümünde ergime işlemiyle cüruf alma işlemi tamamlanmış olur. Ergimiş olan metal karın altındaki hazne bölgesinde birikir. Yüksek fırının şematik gösterimi Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2. 1. Yüksek fırın genel görünümü

Üst Kısım: Yüksek fırının üst kısmında çan, silo ve çan kapağı sistemi bulunur. Ayrıca yüksek fırında bulunan gazlar borular ile buradan dışarı atılır. Bu bölgede yer alan çan kapakları ile buradaki gazlar dışarı atılmadan yüksek fırına gönderilir. Yüksek fırın ürünleri fırının üst kısmından bu sistemler vasıtasıyla fırın içine gönderilmektedir. Malzemeler ve gazın ısınması neticesi hacimlerindeki genişleme nedeni ile rahatça hareket etmeleri için gövdenin çapının aşağı yönde genişlediği görülmektedir. [28]

Gövde: Yüksek fırının uzun, aşağı doğru genişlemiş bölümüdür. Burada cevher kokun oluşturmuş olduğu karışım aşağı yönde hareketine devam eder. Fırın içerisindeki ergiyik yaklaşık olarak 9 saatlik zaman içinde fırın içerisine dağılır. Gövdenin bitiminde başlayan ve dik ekseninde sabit çaplı bölge yüksek fırındaki en geniş kısımdır. Metalin ve cürufun ergimesi ve ergime sonucu hacim değişimi (azalması) bu kısımda başlamaktadır [28].

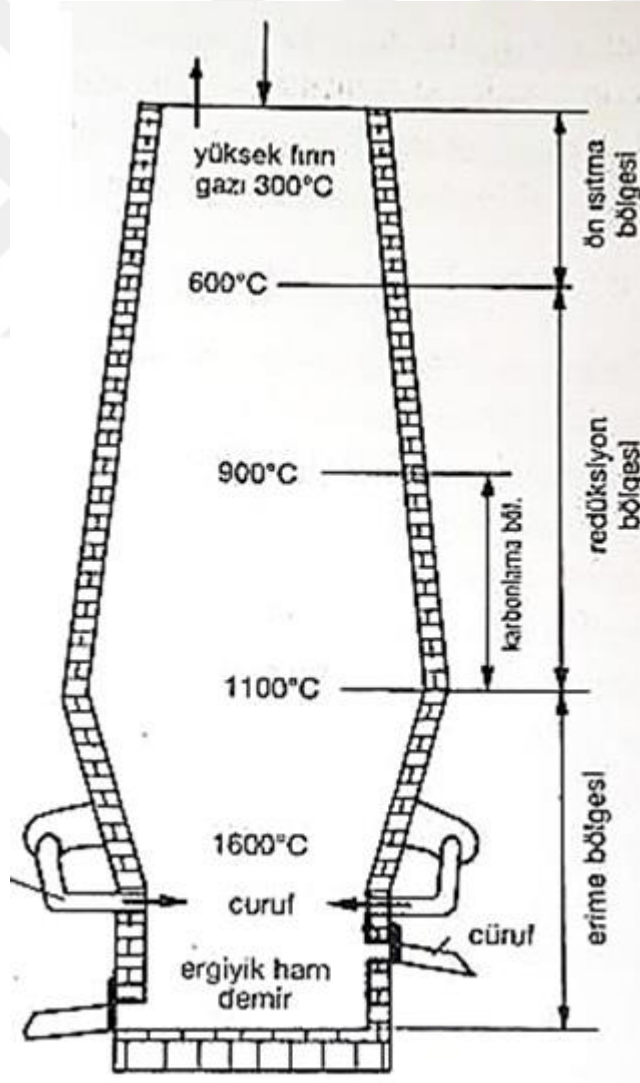
Karın: Karın kısmı ters koni biçimindedir. Üst bölgesi bel ile, alt bölgesi ise hazneyle birleşmektedir. Yüksek fırının alt kısmında yeniden daralmanın başladığı kısım olarak bilinir. Kısmi ergimenin olabilmesi için bu bölgedeki fırın hacminin küçültüldüğü görülmektedir. Karın kısmında ergime işlemi ile son cürufun oluşma işlemi tamamlanmış olur. Eriyen cüruf ve metal, karın kısmının alt tarafında bulunan ve dik ekseninde sabit çapa sahip olan hazne kısmında birikmektedir. Fırın bölümleri ve şekil ölçüleri, çalışma sistemi, hava sıcaklığı ile kullanılacak malzemelerin türüne göre değişir. Malzemelerin rahat hareket etmesi ve yukarı yönelen gazın malzeme ve fırın çapı arasındaki temasının düzgün olabilmesi adına bu ölçülere dikkat edilmesi gerekir [28].

Hazne: Yüksek fırının alt tarafında bulunan silindir şeklindeki bölgedir. İçinde sıvı demir ile cüruf toplanır. Haznenin yukarı kısmında bakırdan malzemeden yapılmış 22 ile 24 adet arasında değişen hava üfleme borusu bulunmaktadır. Bu üfleme boruları suyla soğutulurlar ve tüyerler yardımı ile fırına hava verilmesinde kullanılırlar. Biraz daha aşağı bölgede yine su ile soğutulan borulardan yapılmış(bakır boru) cüruf boşaltma delikleri yer alır. Haznenin alt bölgesinde yer alan delikten ise ham demir boşaltılır. Burada bulunan delik yapılan her boşaltma uygulamasından sonra ateşe karşı dirençli malzemeler ile kapatılır. Fırının karın bölgesinin alt tarafında yer alan tüyerler ile fırın içine sıcak hava gönderilir. Bu tüyerler fırının etrafını saracak şekilde ve eşit aralıklar ile yerleştirilmiştir. Metalürjik yüksek fırınlarda genellikle sayıları 10-16 adet arasında değişen tüyer (hava borusu) bulunur. Yüksek fırının etrafını saran ve içi genellikle refrakter tuğlayla örülü ve çember şeklinde olan ana hava borusu ile tüyerlere gerekli olan sıcak hava verilmektedir. Bronz veya bakırdan yapılan hava borularının çapları (iç çap)10-18 cm arasında değişmektedir. Çalışma esnasında suyla soğutulan hava borularının ömürleri fırınların çalışma şartlarına göre birkaç gün ile birkaç ay arasında değişebilmektedir.

Yüksek fırının yukarı tarafında sıcaklık tahmini 200 °C olup bu kısımda şarj ürünleri ısınmaktadır. Gaz akımına göre malzemeler ters şekilde aşağıya inerken bazı kimyasal tepkimeler

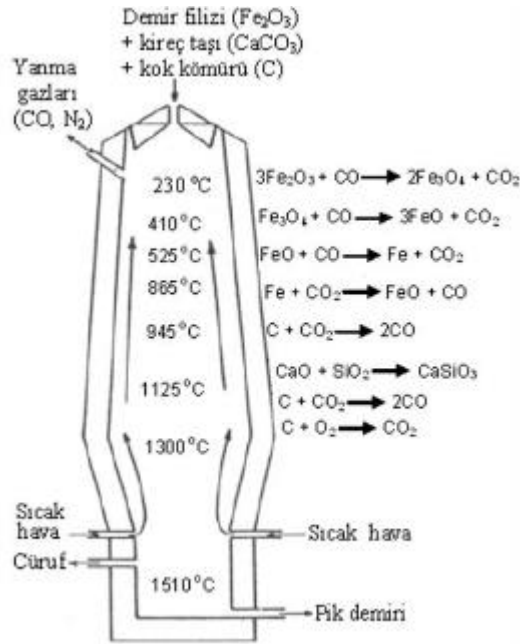
meydana gelir ve fırının en alt tarafında sıcaklık 1800 °C değerine kadar çıkar. Ergimiş metal bu bölgede toplanır. Yoğunluk farkından dolayı hazne bölgesinin üst tarafında olan delikten cüruf alınır, daha alt kısımdaki delikten ise erimiş metal alınmaktadır. Kimyasal tepkimeler için gereken hava yaklaşık olarak 900-1000°C sıcaklık ve 1-1.5 atm. basınç altında fırının orta bölgesinin hemen altında bulunan ve çevresel şekilde dağıtılmış olan deliklerden üflenmektedir.

Hava bir yandan fırın içerisinde yukarı doğru çıkarken bir yandan da kimyasal tepkimelerin oluşumu sağlanır. Diğer taraftan ise fırına yeni şarj edilmiş olan şarj malzemeleri ısıtılır. Baca gazları ise fırının üst bölgesinden alınır. Tozlardan ve yabancı maddelerden temizlenen baca gazları hava ısıtma kulelerinde değerlendirilir [30]. Yüksek fırınlardaki sıcaklık bölgeleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 2. Yüksek fırının sıcaklık bölgeleri

Yüksek fırında meydana gelen kimyasal tepkimeler Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. 3. Yüksek fırında gerçekleşen reaksiyonlar

2.1.2. Yüksek Fırın Cürufu ve Kompozisyonu

Yüksek fırın cürufları karmaşık bir yapıya sahiptir. Oksijen, cüruf içerisinde %40 ağırlıklı olarak en geniş elementtir. Bu yüzden, cürufun yapısı oksit ve iyonik davranış gösterir. Cüruf, fiziksel ve kimyasal özelliklere bağlı olarak oluşan ve meydana gelen oluşumlara bağlı olarak, 4 farklı bileşenden oluşmaktadır. Cürufun tipik diğer miktarca daha az olan bileşenleri, sıcak metal kimyası özellikleri açısından ve fırını daha iyi kontrol etmek için önemli bileşenlerdir ve cürufun fiziko-kimyasal özelliklerini daha karmaşık hale getirirler [29].

Cevher içerisindeki demir oksitten demir elde edebilmek için, cevherle birlikte, kok kömürü, cüruf yapıcılar (flaks) ve ısıtılmış hava yüksek fırınlara şarj edilir. Redüklenme sonucunda demir oksitteki oksijen, kok kömürünün karbonuyla birleşerek karbon monoksit olarak cevheri terk eder, geride ise eriyik halinde altta demir olmak üzere, onun üzerinde silis, kireç, alümina, kok kömürünün külü ve diğer safsızlıkları içeren ve cüruf adı verilen malzeme bileşenlerinin oluşması sağlanmaktadır.

Kavrulmuş olan cevher ile konsantrelerin ya da zengin cevherlerin ergitilmesi sonucunda birbiri ile karışmayan üç farklı faz oluşur. Bu fazlar;

- Metalin içinde bulunduğu ergiyik faz
- Gaz fazı

c) Çeşitli silikatların bulunduğu cüruf fazıdır.

Metalurjik yüksek fırında eriyik şeklinde çıkarılan cüruf soğutma yöntemine ve soğuma hızına bağlı olarak farklı özellikler gösterir ve buna göre sınıflandırılır. Önce normal atmosfer koşullarında ve sonradan su ile soğutulan cüruflara “havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu”; basınçlı hava, su ve buharla soğutulanlara “genleştirilmiş yüksek fırın cürufu”; ve suda ani olarak soğutulmuş cüruflara ise “granüle yüksek fırın cürufu” denilmektedir.

2.1.3. Cürufun Esasları

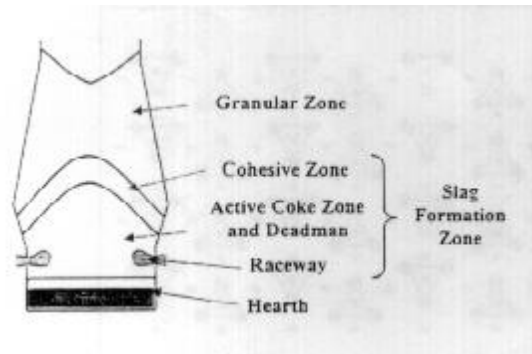
Aşağıda belirtilmiş olan içerikler; cürufun meydana gelmesi, moleküler yapısı, hazne kısıma akması ve bu yapının baziklik (bazisite) şeklinde literatürde yer alan indeks ile olan ilişkisi, cürufun sıvı-katı dönüşümü ve cüruf karışımına fırın içerisindeki termal değişikliklerin etkileri ile doğrudan ilişkilidir [29].

2.1.4. Cürufun Oluşma Şekli

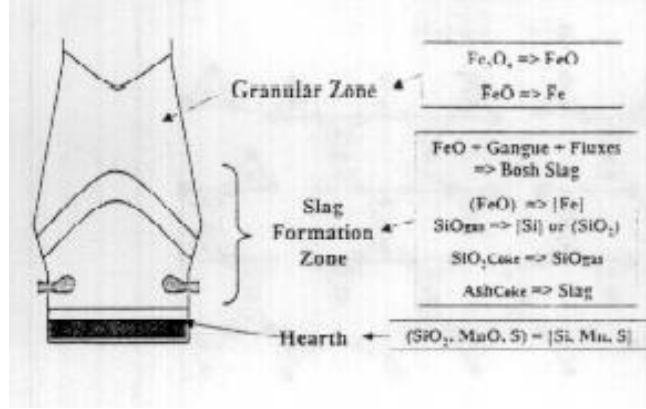
Metalurjik yüksek fırınlarda demir cevheri; havanın aksine, hava basıncını optimize eden, ısı alışverişini ayarlayan ve tüm katı-sıvı-gaz dönüşümlerinin de gerçekleşmesini sağlayan bir yatak reaktördür. Demir hammaddesinin üç önemli özelliğine değinecek olursak;

- 1- Demir oksit formdaki hammaddeleri metalik formdaki demire indirger,
- 2- Metalik formdaki demir ve oksitlerin füzyon reaksiyonuna olanak sağlar,
- 3- Ergimiş haldeki demirin kalıntılardan ayrılmasını sağlar.

Metalurjik işletmelerdeki bu tipik özellikler nedeniyle, fırın atmosferinde (cürufun özelliğine bağlı olarak) üç farklı bölge oluşur. Cürufun oluştuğu bölge, granüle bölge ve hazne bölgesidir. Bu bölgelerdeki reaksiyonlar Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te detaylı olarak verilmektedir.



Şekil 2. 4. Yüksek fırındaki cüruf bölgeleri



Şekil 2. 5. Yüksek fırındaki cüruf bölgeleri ve meydana gelen reaksiyonlar

Cürufun oluştuğu bölge; seçici bölgede ilk defa başlar. Bu bölgede, hammadde ürünleri kısmi olarak sünekleşmeye başlar ve hava üfleme borularının bulunduğu kısma kadar sürer. Buna bağlı olarak; cürufun oluştuğu bölge, seçici bölgeyi, aktif kok kömürü bulunan bölgeyi, ölü bölge ve tüyer bölgesini kapsar.

Granüle formdaki bölge; bu bölgedeki bütün oluşumlar katı formda olup ve yüksek fırında üst kısımda yer alır. Bu bölge, üst tarafta stok hattı, alt tarafta sıvı dönüşümlerinin başladığı seçici bölge ile sonlanır. Besleme hammaddeleri granüler bölgeye girdiği durumda oksitli formdaki demirin indirgenmesi sonucunda oluşan ve daha alt tabakalardan gelen gazlar vasıtasıyla ısınır. Granüle formdaki bölge içinde olan indirgeme reaksiyonlarının sayısı; demirin hammadde davranışı, fırın içindeki dağılımının, gaz formdaki bileşiminin ve gaz formdaki bileşenlerin akış hızının bir fonksiyonudur [29].

2.1.5. Haznedeki Cürufun Akışı

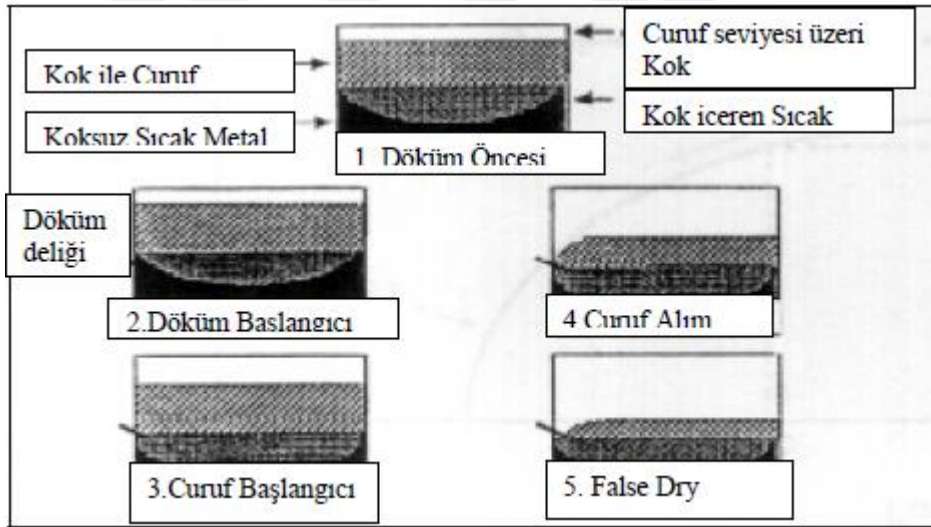
Depo (hazne) içerisindeki cüruf ayarı; sıcak haldeki metal üretimindeki artışta önemli rol oynayarak, sürekli fırın idaresini kontrolünde önemli yer tutar. Yüksek fırın içindeki cüruf seviyesine bağlı olarak, hava basıncı yükselir. Kafa alanı çalışma kısmı ile besleme ürünlerinin düzgün akışı değişime uğrar.

Cüruf seviyesinin önemli kontrol süreçlerinden biri de, depodaki (hazne) cürufun döküm prosesi esnasındaki ilerleyişidir. Depoda (hazne) döküm ucuna doğru ilerleyiş kıyaslandığında metal akış hızı cüruf akış hızına göre daha kolay gerçekleşir. Burada, metalik malzemelerin yoğunluğunun, cürufa göre daha yüksek olmasından dolayı, metaller daha fazla itici güç oluşturur. Metallerin akış doğrultusu, öncelikli olarak serbest kok kısmından ve deadman olarak adlandırılan kokunun alt tarafından ya da kenarlarındandır. Cürufun akış doğrultusu ise, deadman kokunun içindendir.

Bir hazne yapılandırmasında, döküm prosesi esnasında peşi peşine oluşacak muhtemel süreçler ve döküm prosesi nihayetinde dry-hearth konumu numuneleri Şekil 2.6’da verilmiştir.

Sıcak haldeki metal yüzey kısmı; yüksek yoğunluğa sahip olması ve döküm ucuna serbest haldeki kok içerisinde ilerleyişi nedeniyle, bütün döküm prosesi süresince hazne alanına göre epey düzgün kaldığı varsayılır. Cürufun kapladığı yüzey alanı, hazne içindeki diğer kısımlara göre, döküm ucuna yakın yerlerde daha az önem arz eder. Döküm ucundan alınan cüruf oransal miktarının hazneye doğru olan cüruf akışı oransal miktarından daha büyük olduğu şartlarda, cürufun yüzey kısmı, döküm ucunun alt kısmına doğru eğilmeye meyilli olur. Cürufun devam eden bu akışı, döküm ucu üstünde cüruf kalmayana dek sürer. Bu şartlar altında, depo (hazne) boş gibi görünür ancak halen depoda (hazne) geride kalan cürufun varlığı önem arz eder.

Cüruf akışındaki azalan direnç döküm sonrasında depoda (hazne) geriye kalan cürufu en alt düzeye düşürür. Cürufun viskozitesi, haznedeki kok bölgesindeki gözenekliliğinin yükselmesi ve akışkanlığın azalması durumunda düşer [29].



Şekil 2. 6. Haznede cüruf akışı

2.1.6. Yüksek Fırın Cürufunun Tipik Karakteristik Özellikleri

Metalurjik işletmelerdeki yüksek fırından çıktığı zaman tahmini olarak 1400-1600°C aralığında ergiyik formda olan cüruf, açık atmosferde sakin olarak soğutulduğunda kristal morfolojide, gri, renkte ve taş benzer bir malzemeye dönüşmektedir. Sıvı haldeki cüruf kontrollü miktarda su ile soğutularak, bu işlem esnasında içerisine buhar veya hava püskürtülerek elde edilen genleştirilmiş yüksek fırın cürufu, pomza taşı gibi gözenekli ve hafif bir yapıya dönüşmektedir. Yüksek fırın cürufunun yoğunluğu 1-3,8 gr/cm³ arasında değişmektedir. Cürufun bağlayıcı madde (pozolan) olarak kullanılması isteniliyorsa soğutma işleminin çok hızlı bir

şekilde yani ani olarak yapılması gerekmektedir. Bu şekilde soğutulduğu zaman atomlar bir kristal yapı oluşturmak için gerekli zaman bulamayarak düzensiz bir sisteme göre yer alacak ve böylelikle amorf (camsı) bir yapı oluşturacaktır. Yüksek fırın cürufu başlıca kireç, silika ve alümina içermektedir. Değişik ülkelerdeki cürufların yaklaşık kimyasal bileşenleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Kimyasal kompozisyon, granüle yüksek fırın cüruflarının hidrolik özelliklerinin belirlenmesi için önemli bir parametre teşkil etmektedir. Bir granüle yüksek fırın cürufunun hidrolik özelliği belli bir değere kadar CaO/SiO₂ oranının artması ile artmakta ancak sınır değer aşıldığında yani CaO miktarının çok artması durumunda granülasyon güçleştiği için hidrolik özellikte bir azalma görülmektedir. Cüruf içerisindeki mangan ve demir oksitler dayanım özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir.

Tablo 2. 1. Değişik ülkelere ait cüruf kompozisyonları

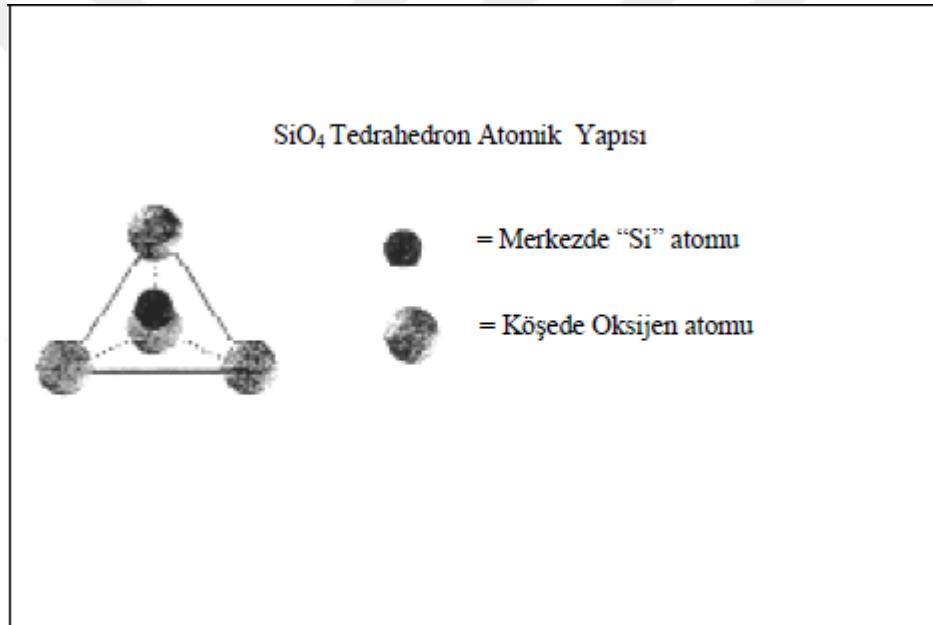
Bileşen	Kanada	G.Afrika	Avustralya	Erdemir	TÜRKİYE	
					Kardemir	İsdemir
CaO	29-50	30-40	38-44	35-40	33-42	33-39
SiO ₂	30-40	30-36	33-37	33-38	35-45	36-44
Al ₂ O ₃	7-18	9-16	15-18	13-17	10-15	7-13
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5	-	0-0.7	0-1.0	0-0.8	0.1-0.3
MgO	0-19	8-21	1-3	5-10	5-11	6-10
MnO	0.2-1.5	-	0.3-1.5	0-1.5	-	1-2
S	0-0.2	1-1.6	0.6-0.8	0-1.5	0-1.5	0.5-1.0
K ₂ O	-	-	-	0-2.0	0-1.8	1-1.5
TiO ₂	-	-	-	0-1.0	0-0.5	0.4-0.6

2.1.7. Yüksek Fırın Cürufunun Bileşimi

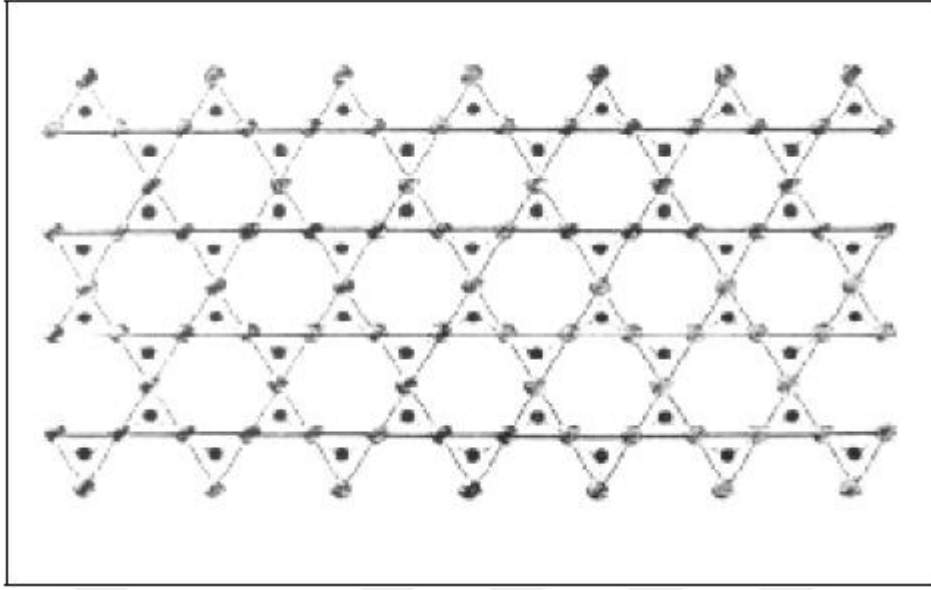
Cürufun yapısı kavramsallaştığında silika yani SiO₂ yapısı üzerine kurulu olduğu tespit edilmiştir. Moleküler yapısına bakıldığında zaman, Silis 4 oksijen atom tarafından oluşmuş tetrahedron yapısına sahiptir. Şekil 2.7’de verildiği üzere, oksijen atomları tetrahedron tipteki yapının her bir köşesinde ve iki Silis atomu her bir oksijen atomuna bağlıdır. Ağ şeklindeki yapısı ise üç eksen de sürekli. Her köşedeki oksijen atomu paylaşıldığında oluşan kristal yapı içinde tetrahedronlar sadece köşeleri ortak kullanıma kabul eder. Bu şartlardaki tüm köşeler Şekil 2.8’de verilmektedir. Silis ısıtıldığında, köşelerdeki bağların bazıları kısmi olarak bozulur ancak doğal polimer davranıştaki yapısı ergiyik durumda dahi bozulmadan kararlı kaldığı Şekil 2.9’da verilmektedir.

CaO, MgO ve bunlardan başka öteki metal oksitlerin eklenmeleri ile polimer yapı kırılır. Bu oksit formdaki metaller, oksijen verici rolüne girerek tetrahedron yapının köşesindeki bir oksijenin yerini geçer ve Şekil 2.10'da gösterildiği gibi bozulmuş durumdaki tetrahedronların aralarını (köşelerini) tamamlar.

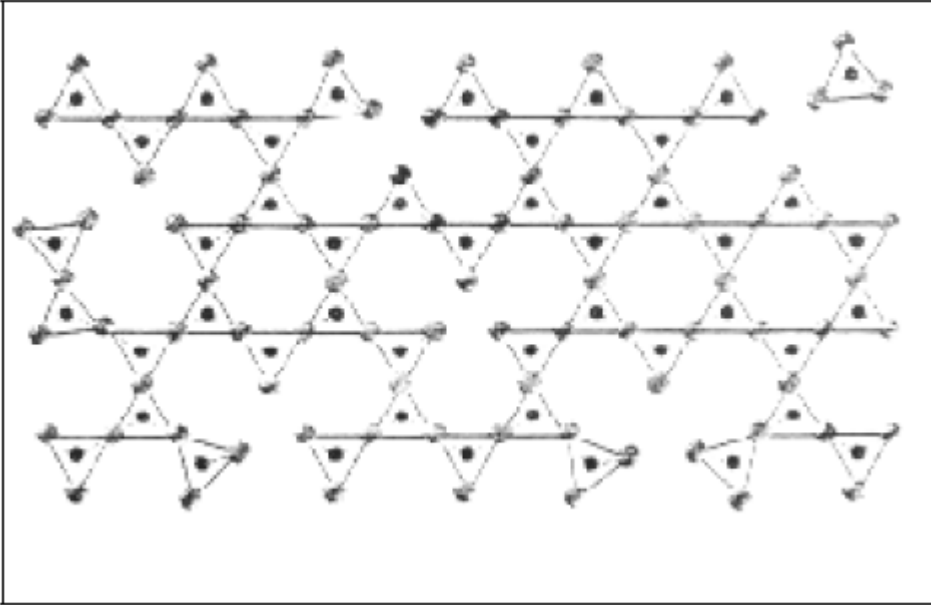
Moleküler bazdaki metal oksitlerin oranı iki katı silise ulaşınca kadar, daha fazla metal-oksit ilave edilmesiyle beraber polimer tipteki yapının bozulma süreci devam eder. Bu süreçte, tüm tetrahedronların arasındaki köşe noktaları kırılır. Şekil 2.11'de verilen moleküler oranı ortosilikat olan $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ ve $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ dir. Al_2O_3 , bazik davranıştaki oksitlerden oksijen atomlarını alır ve SiO_2 oluşturduğu polimer yapısına paralel bir davranış gösterir. Oksijen almaya meyilli olan oksitler SiO_2 ve Al_2O_3 asit oksitler şeklinde, oksijen vermeye meyilli oksitler olan CaO ve MgO ise, bazik oksitler şeklinde isimlendirilir [29].



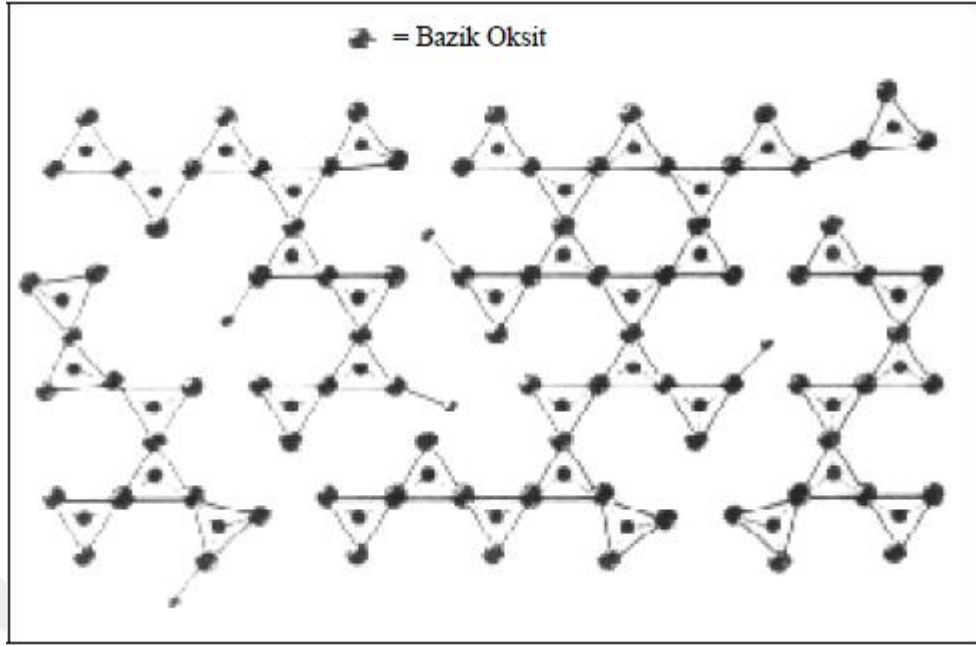
Şekil 2. 7. Cürufun silika morfolojisi



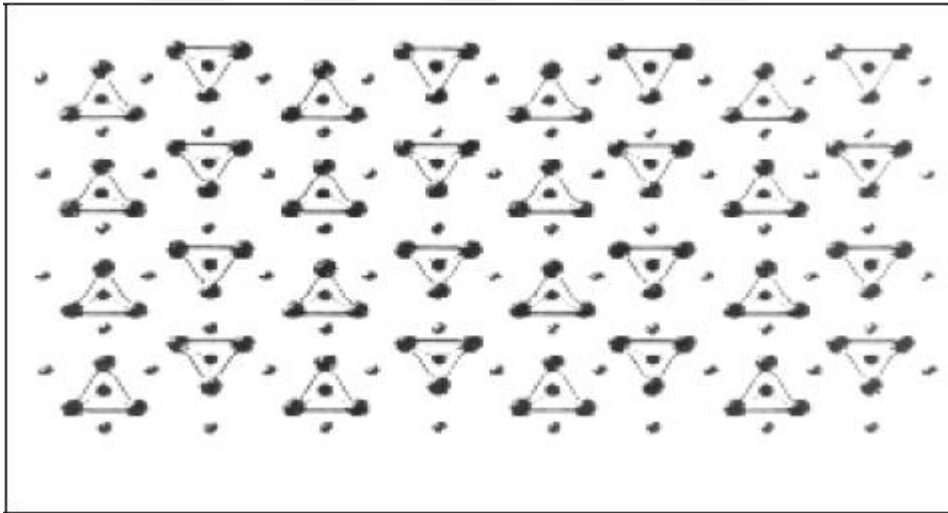
Şekil 2. 8. Cürufun silika kristalografik görüntüsü



Şekil 2. 9. Ergiyik haldeki cürufun silika yapısı



Şekil 2. 10. Eriyik silikaya bazık oksitlerin eklenmesi



Şekil 2. 11. Orthosilikat olarak adlandırılanyapı ($2MO.SiO_2$)

Şekil 2.12’de Erdemir İşletmesinde yan ürün tabiriyle kullanılan (a) havada atmosfere açık ortamda soğutulan (b) hızlı soğutma şartlarında soğutulan granüle haldeki yüksek fırın cürufu görüntüleri paylaşılmıştır.



Şekil 2. 12. Yüksek fırın cüruf tipik görüntüleri (a) havada atmosfere açık ortamda soğutulan (b) hızlı soğutma şartlarında soğutulan

2.1.8. Cürufun Bazitesi

Çok bileşenli yapıların özelliklerine ait bileşenlerine ilişkin temel bir yöntem geliştirmek oldukça faydalı olduğu halde buradaki sorun, indeks içindeki sistemin her etmeninin öneminin nasıl yansıtıldığıdır. Bazik ve asit oksitlerin tabiatındaki değişiklikler genelde bazite şeklinde adlandırılmıştır ve cüruf bileşiminin gelişiminde kullanılmıştır. Geliştirilen baziklik hesap formülleri 1. eşitlikten 4. eşitliğe kadar aşağıda gösterilmiştir [29].

$$\text{Bazlık Farklılığı} = [(MgO) + (CaO)] - [(Al_2O_3) + (SiO_2)] \quad (1)$$

$$\text{Baziklik} = [(MgO) + (CaO)] / [(Al_2O_3) + (SiO_2)] \quad (2)$$

$$\text{Bell's oranı} = [0,7*(MgO) + (CaO)] / [0,18*(Al_2O_3) + 0,94*(SiO_2)] \quad (3)$$

$$\text{Optical Bazite 3} = \frac{[1,11*(MgO) + (CaO) + 1,03*(Al_2O_3) + 0,915*(SiO_2)]}{[1,42*(MgO) + 1,95*(SiO_2) + (CaO)]} \quad (4)$$

Genel kategoriler içinde bazite indeksleri tasniflendirilebilir.

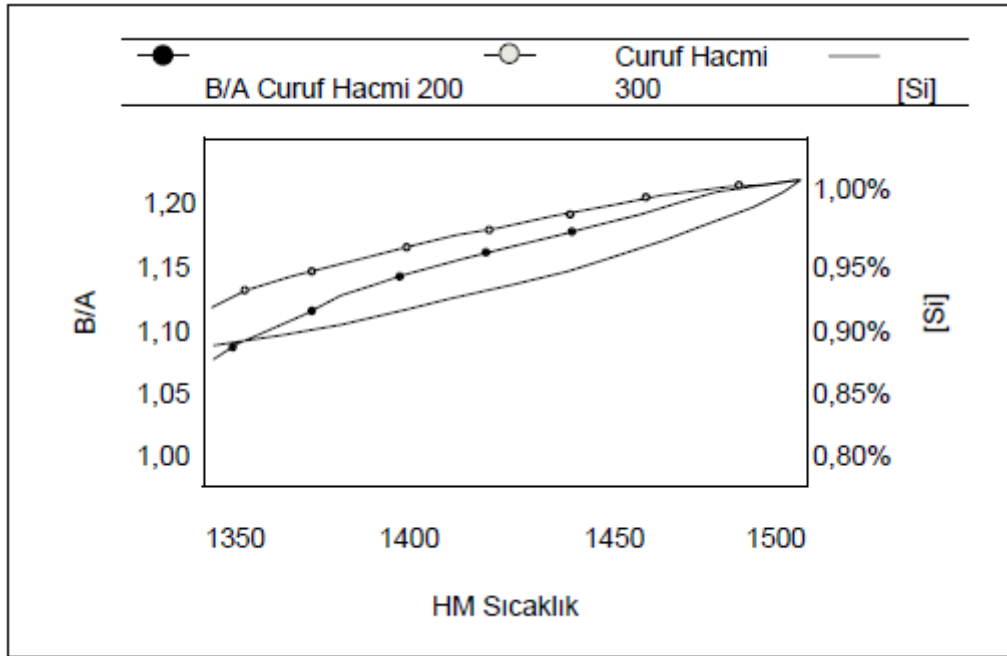
- Asidik ve bazik değerler arasındaki farklılıklar, (örnek-1)
- Asidik ve bazik oranlarının % ağırlık üzerindeki yansıması, (örnek-2)
- Asidik ve bazik oranlarının molar konsantrasyon üzerindeki yansıması, (örnek-3)
- Her bir bileşenin ve bileşenlere sahip molar konsantrasyon özeti, (örnek-4)

Cüruf bileşeninin moleküler bileşimini belirleyen ve örnek-3 ile örnek-4'teki eşitliklerin cüruf bileşiminin daha önce varsayılan temeller üzerindeki cüruf özelliklerine bağlı daha çok eğilimin

olması varsayılabilir. Bunun yanı sıra 2. örnekteki eşitlik baziklik olarak bilinir ve (B/A) olarak gösterilir [29].

2.1.9. Cüruf Hacmi ve Baziklik, Sıcaklık Etkileri - [Si]

Tüm metalürjik yüksek fırınlarda metal sıcaklığının artması ile [Si] artar (Şekil 2.13). Sıcaklık değerlerine göre [Si] miktarında meydana gelen artış farklı fırınlara göre değişir ama genel kanı hep aynı yöndedir. [Si] arttığı zaman (SiO_2) düşer, bunun sonucunda B/A artar ve cüruf hacmi düşer. [Si] de meydana gelen artışta B/A'da olan artma oranı cüruf hacminin sonucudur. Cürufların hacmi (200 kg/THM ile 300 kg/THM) için B/A'da meydana gelen değişim ve metal sıcaklığı ile [Si] arasında olan durumlar Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2. 13. Cüruf hacmi ve sıcaklığın etkileri

Buradaki genel kanı, metalin sıcaklığı veya [Si] de olan değişiklikler için B/A'da gözlenen küçük değişimlerdir [29].

2.1.10. Cürufta Olan Katılaşma

Cüruf çok kompleksli bir yapı olduğundan, belli bileşenlerinin haricinde erime sıcaklığının belli bir tanımlaması yoktur. Birçok cüruf bileşeni belli sıcaklık değerlerinin üstünde hem katı hem de sıvı halde bulunabilirler. Belli kompozisyonlarda tek sıvı fazın olduğu en düşük sıcaklık “sıvılaşma sıcaklığı” şeklinde belirtilir.

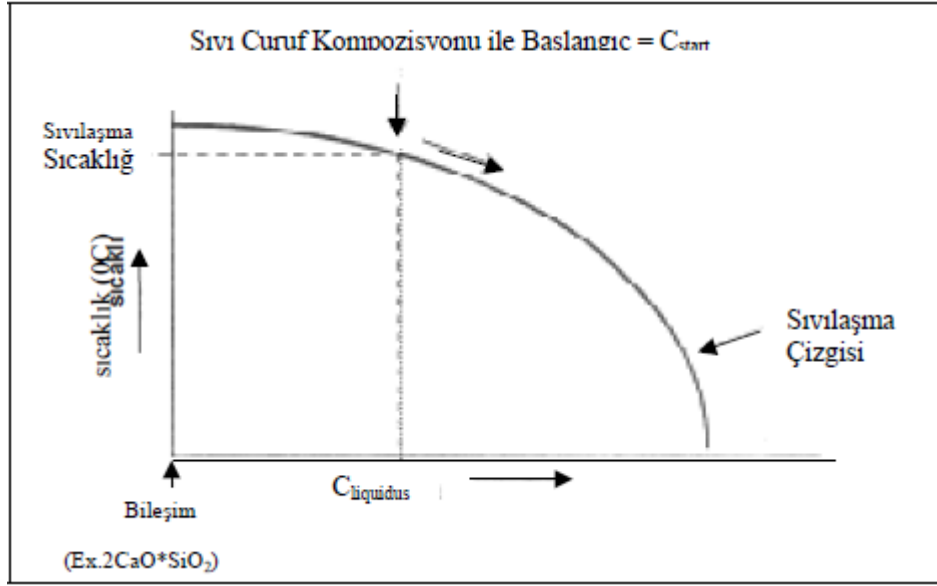
Cüruftaki katılaşmanın basite indirgenmiş faz diyagramı aşağıdaki Şekil 2.14'te verilmiştir. Cüruf kompozisyonunun başladığı sıcaklıkta sadece sıvı haldeki cüruf bulunmaktadır. Cüruf soğutulduğunda Şekil 2.14'te görüldüğü gibi dikey bir şekilde düşme olur ve sıvılaşma çizgisiyle kesişene kadar cüruf kompozisyonunda bir değişme olmaz. Sıvılaşma çizgisiyle olan birleşme Cstart kompozisyonunda bulunan cürufun sıvılaşma sıcaklığı olarak adlandırılır. Sol tarafta sıvılaşma sıcaklığındaki olan oluşumlarda eser miktarda katılaşmış parçalar belirir. Sıvılaşma sıcaklığı altında bulunan ve indirgenmenin daha çok olması sırasında sıcaklıkla ilgili üç farklılık olur.

- a) Katı ilavesi daha çok olur
- b) Sıvı haldeki cüruf miktarında azalma olur
- c) Sıvı cüruf bileşimindeki değişiklikler sıvılaşma bölgesinin sağ tarafına doğru yönelir.

Örneğin kompleks yapısı $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ şeklindeki cüruf soğutulduğu zaman sıvı cürufun bazikliği düşer. Katılaşma; sıvı cürufun kompozisyonunun kompleks kompozisyonundan ciddi değişiklikler gösterdiği zamanlarda dahi, ne şekilde bir kompozisyon oluşturabileceğini göstermektedir. CaO/SiO_2 oranı dikalsiyum silikat $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ bileşiği için 1,86 değeridir. CaO/SiO_2 oranı bu değere yakın olan cürufu iyi bir çalışma yapan yüksek fırın yokken, üretim sırasında meydana gelen cüruf içinde ciddi bir miktar dikalsiyum silikat meydana gelebilir. Bu değişim, soğuma sonucunda bozularak(kırılarak) toz haline gelen ve “dusting” ya da “falling” cüruf adıyla da hatırlanan katı cüruf neticesidir. Kırılmanın nedeni 675°C sıcaklıkta değişmiş olan bir faz içinden geçerken dikalsiyum silikatta %10 hacim genişlemesinin olmasıdır. Falling cüruf oluşumuna engel olmak için gerekli olan formülizasyon aşağıda verilmiştir.

$$(\text{CaO}) < 0,9 * (\text{SiO}_2) + 0,6 * (\text{Al}_2\text{O}_3) + 1,75 * (\text{S}) \quad (5)$$

Denge şartları üzerine kurulmuş olan faz diyagramları önemlidir. Zira soğumadaki denge şartları, dikalsiyum silikat yapılanmasında olduğu gibi tepkimedeki orana göre nispeten daha yavaştır. Düşük orandaki cürufun granülizasyon ve peletlenme işleminde soğuma oranı hayli yüksek olduğunda katılaşmanın yönü “by pass” üstünde olduğu tarif edilmektedir. Burada bileşik yapıda olan tepkime kinetiği bir hayli azalır, hızlı soğuma ile bileşim cam faz bünyesinde kilitli kalır [29].



Şekil 2. 14. Cüruf katılaşmasının faz diyagramı

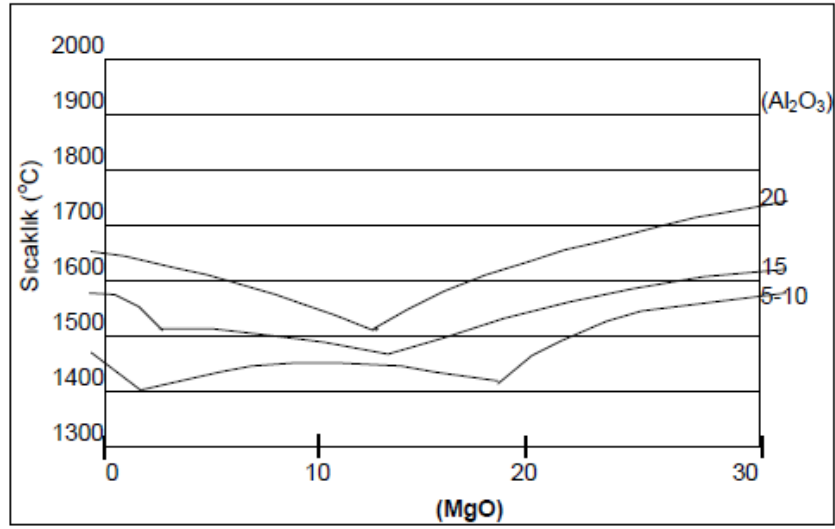
2.1.11. Cürufun Özellikleri

Cüruftaki kimyasal ve fiziksel özellikler en başta sıcaklığın ve cüruf bileşiminin bir sonucudur. Aşağıda belirtilen bazı tanımlamalar bu ilişkilerin genel işleyişlerini göstermektedir [29].

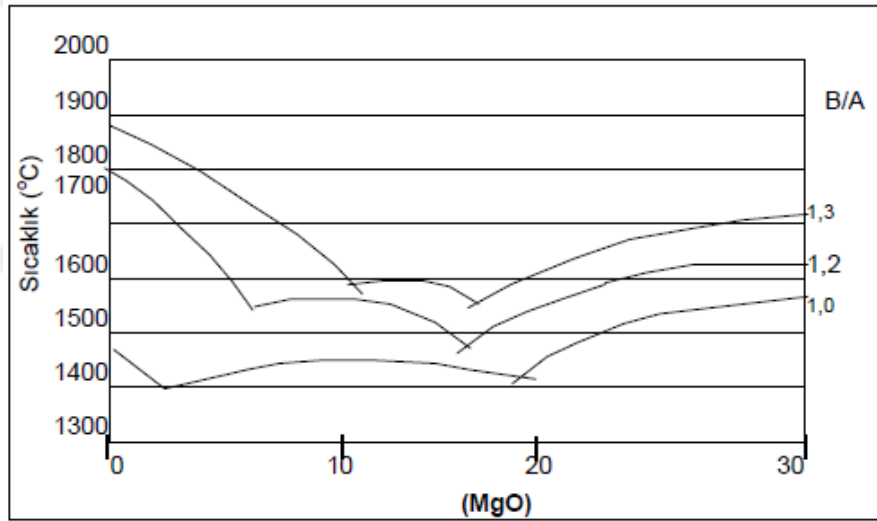
2.1.11.1 Cürufun Sıvılaşmadaki Sıcaklığı

Katılaşma öncesindeki durum metalürjide sıvılaşma sıcaklığı şeklinde ifade edilmektedir. Cürufun dört ana bileşeni olarak sıvılaşma sıcaklığı analiz bağlantıları dörtlü faz diyagramı üzerinde gösterilmiştir. Şekil 2.15 ve Şekil 2.16 dörtlü denge diyagramının üçlü yerinden oluşturulmuştur. Ancak denge diyagramı değildir.

Burada şu sonuçlar ortaya çıkmıştır. İlkinde, sıvılaşmadaki sıcaklık Al_2O_3 ve B/A'nın artması ile artmaktadır. İkincisinde ise MgO oranının %8 ile %14 arasında olması durumunda Al_2O_3 ve B/A'nın her birinin artmasıyla sıvılaşmada meydana gelen artış en aza doğru yönelmektedir [29].



Şekil 2. 15. Cürufun sıvılaştırmadaki sıcaklığı(B/A)

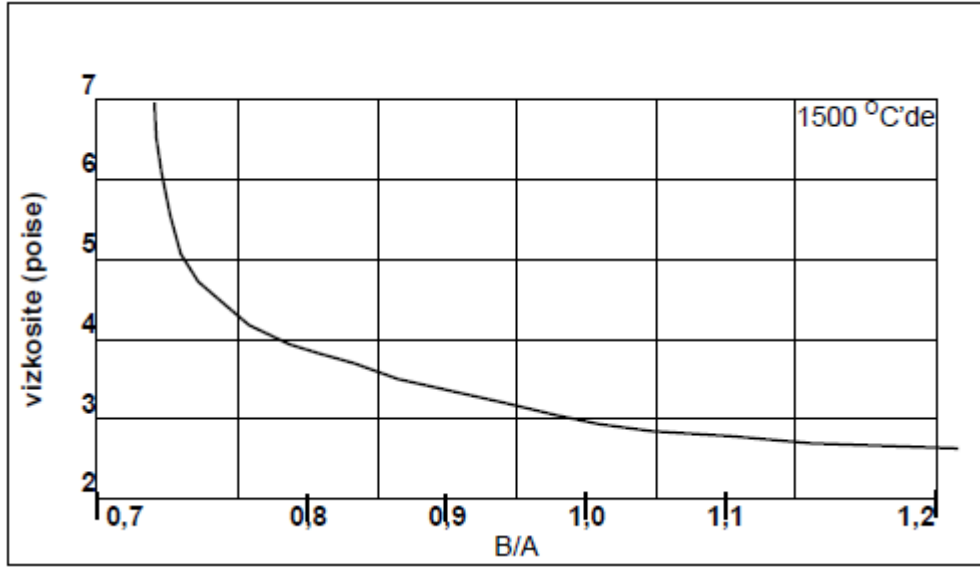


Şekil 2. 16. Cürufun sıvılaştırmadaki sıcaklığı(%10 Al_2O_3)

2.1.11.2 Cürufun Viskozitesi

Malzemelerin şekillerindeki değişiklikler için gereken olan güç miktarının ölçülmesi viskozite olarak adlandırılır ve viskozitenin birimi de poise olarak ifade edilmektedir. Yüksek viskoziteye sahip sıvıların akışını sağlayabilmek için çok daha fazla güç gerektirmektedir. Örneğin 20°C'de karışım yapılmış kabul edilebilen cüruf viskozitesi 2 ile 5 poise olurken suyun viskozite değeri ise 0,01002 poise olmaktadır. Aynı koşullarda sıvı SiO_2 'nin viskozite değeri de 100.000 poise'nin üstündedir.

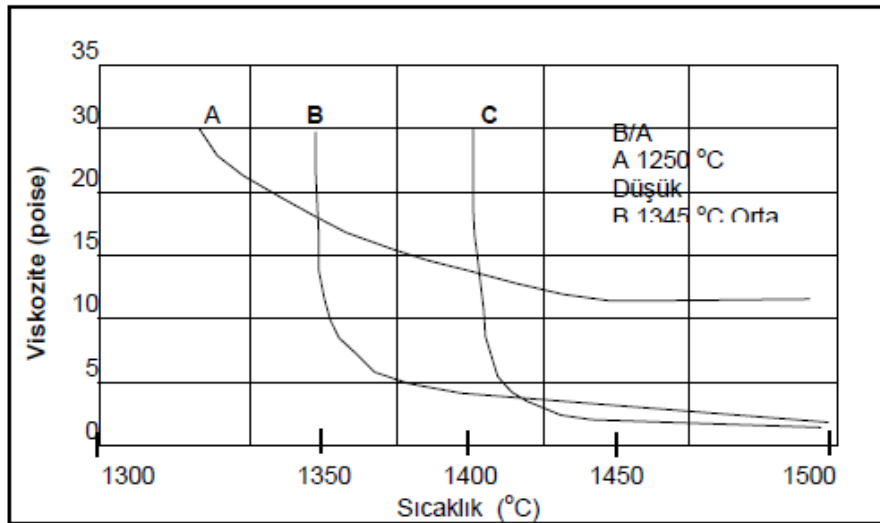
SiO_2 'deki yüksek viskozitenin nedeni önceden de belirtildiği üzere polimer yapıdan kaynaklanmaktadır. Bazı yapıdaki oksitler polimer yapıları kırarak viskoziteyi düşürmektedirler. Şekil 2.17'de belirtildiği gibi B/A değerinin artmasıyla tüm sıvı cürufların viskoziteleri azalır.



Şekil 2. 17. Viskozite ile B/A arasındaki ilişki

Genellikle katı-sıvı karışımlarının viskozitesi asılı olan katı miktarının artmasıyla artmaktadır. Şekil 2.18'de görüldüğü gibi sıvılaşma sıcaklığının altında olan sıcaklık değerlerinde cürufun viskozite değerinin üzerine sıcaklığının etkisi, sıvılaşma sıcaklığının üstündeki sıcaklıklardan çok daha önemlidir.

Viskozitede iki genel durum bulunmaktadır. Sıvı cürufların viskoziteleri, sıvılaşmanın başladığı sıcaklığın üzerinde B/A ile sıcaklığın artmasıyla düşmektedir. Sıvılaşmaya başlama sıcaklığının altında olan sıcaklık değerlerinde ise sıcaklığın artmasıyla veya B/A'nın azalmasıyla düşer [29].



Şekil 2. 18. Viskozite ile sıcaklık arasındaki ilişki

2.1.12. Yüksek Fırın Cürufunun Oluşumu

Endüstriyel cüruflar kompleks sistemlerdir. Gerek cevherin ihtiva ettiği gang mineralleri, gerek flaks olarak katılan maddelerin içerdiği empüriteleri, gerekse kok cüruflarının değişik bileşimleri cürufları çoklu sistemler içerisine sokmaktadır. Diğer yandan kompleks cevherler, işlenmesi esnasında cüruf-mat veya cüruf-metal teması devamlı olduğundan cüruflar mat veya metal bileşiklerini de kısmen kimyasal çözelti halinde, kısmen mekanik katkılar olarak ihtiva etmektedir.

Buna rağmen genelleştirilmiş şekliyle önemli cüruf bileşenlerinin uygun bir seçimi ile endüstriyel cürufların üçlü denge sistemlerinde mütalaa edilme imkânı vardır. Demir-çelik üretim cürufları CaO-SiO_2 , demir dışı metallerin üretim cürufları da FeO-SiO_2 ana bileşenlerinden teşekkül etmektedir.

Demir-çelik üretim metalürjisindeki cüruflarda üçüncü önemli bileşen olarak Al_2O_3 yer almaktadır. Mevcutta bulunan diğer oksitler ise FeO , MgO , Fe_2O_3 , TiO_2 şeklindedir. Cürufların baziklik derecesini tüm oksitlerin etkileriyle birlikte kapsayacak ve bunu ağırlık yüzdeleri cinsinden ifadelerle;

$$\text{B.D.}_1 = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$$

$$\text{B.D.}_2 = \frac{\text{CaO}+\text{MgO}}{\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2} \quad (\text{MgO konsantrasyonu yüksek})$$

$$\text{B.D.}_3 = \frac{\text{CaO}+\text{MgO}}{\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (\text{Çok bazik cüruflarda) belirtmek mümkündür.}$$

Bu şekilde bir basitleştirme ile demir-çelik üretim cüruflarının bileşimini $-\text{SiO}_2-\text{CaO}(+\text{MgO})-\text{Al}_2\text{O}_3(\text{TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ şeklinde üçlü bir sistemin içerisinde göstermek mümkündür. İdeali yakalamak her zaman mümkün olmasa da uygun olan cüruf bileşeni ve sıcaklığı, fırının yakıt tüketimini ve performansını olumlu yönde etkiler ve şu özellikleri kontrol eder;

- 1- Ham demir sıcaklığını,
- 2- Ham demir kalitesini, (C, Mg, Si, S ve FeO dağılımı)
- 3- Homojenliği,
- 4- Besleme malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki ve sıcaklıklardaki dalgalanmaların kontrolünü,
- 5- Düşük viskozite, (çalışma sıcaklığında cüruf fırından kolaylıkla akıp gidebilmelidir, akışkanlığı iyi olmalıdır, bu yakıt ekonomisine olumlu etki yapmaktadır)
- 6- Stok ve fırın gazının rahat hareketi

Diğer taraftan birinci cüruf ve bosh cürufunun oluşması, çalışma koşulları ve diğer koşullar tarafından etkilenir. Bunlar; cevherin indirgenebilirliği, cürufun hacmi, alev

sıcaklığı, malzemelerin tepedeki dağılımı, sinter ve pelet (süper flakslı veya asidik flakslı), demir bazlı şarj maddelerinin yumuşama sıcaklığı, kok külü miktarı, fırın astarı vb.

Tüm bu çalışma koşulları, düzgün fırın rejimini yakalandığı zaman, maksimum üretimi, minimum cüruf hacmini, minimum kükürt miktarını ve yakıt tüketimini sağlar.

Yüksek fırındaki cüruf oluşum bölgeleri 3 bölüme ayrılır;

- 1- Bosh cürufü füzyon alanı,
- 2- Birincil cüruf füzyon alanı,
- 3- Finish cüruf ve depo cürufü alanı

2.2. Demir Çelik Sektöründen Kaynaklanan Cürufların Kullanım Alanları

2.2.1. Türkiye'deki Demir ve Çelik İşletmelerinin Durumu

Türkiye'de mevcutta bulunan demir ve çelik üretim tesisleri genellikle Karadeniz, Ege, Marmara ve Akdeniz bölgesinde yer almaktadır. Demir ve çelik sektöründe 2014 yılındaki 50,2 milyon ton olan ham çelik kapasitesinin bölgelere göre dağılımı incelendiğinde 15,8 milyon ton ham çelik kapasitesiyle Akdeniz bölgesi, 14,5 milyon ton ham çelik kapasitesiyle Marmara bölgesi, 11,3 milyon ton ham çelik kapasitesiyle Ege bölgesi ve 8,6 milyon ton ham çelik kapasitesiyle Karadeniz bölgesinin olduğu görülmektedir (Şekil 2.19). Türk çelik sektörü 2014 yılı itibarıyla Dünya'da 8. ve Avrupa'da 2. sırada bulunmaktadır [31].



Şekil 2. 19. Bölgelere göre Türkiye çelik üretim haritası

2.2.2. 2014 Yılında Oluşan Cüruf Atıklarının Türlerine Göre Miktarı ve İl Bazında Gösterimi

Türkiye genelinde demir-çelik sektöründe, 24 tanesi elektrik ark ocaklı (EAO), 3 tanesi entegre ve geri kalan 4 tanesi de indüksiyon ocaklı (IO) olmak üzere 27'si Türkiye Çelik Üreticileri Derneği üyesi olan 31 tesisin faaliyeti bulunmaktadır.

Çelik üretiminde çelikhane cürufu İO, EAO ya da bazik olan oksijen fırınlarında (konvertörde) metal ergiliğinin rafine edilmesi ve oksitlenmesi sırasında, yoğunluğunun çeliğin yoğunluğundan daha düşük çıkması nedeniyle çeliğin üstünde toplanır. Çeliğin üstünde toplanan cüruf 1300 °C'den daha yüksek sıcaklık değerlerinde ocaktan alınır. Potada meydana gelen ikincil metalürjik işlemlerde, indirgeme, deoksidasyon, alaşımlama ve desülfürizasyon gibi işlemler neticesinde de cüruf oluşmaktadır.

Ton ham çelik başına çelikhane cürufu miktarı 150-200 kg arasında değişmektedir. Türkiye genelinde 2014 yılında 5,4 milyon tona yakın çelikhane cürufu meydana gelmiştir. 2014 yılı verilerine göre çelikhane cüruflarının kullanımına ait veriler Tablo 2.2'de verilmiştir.

YF (yüksek fırın) cürufu ise yüksek fırında demir cevherinin indirgenmesi sonucu sıvı ham demir elde edilmesi sırasında, cüruf yapıcı elementlerin oksitlenip sıcak madenin üstünde toplanması ile meydana gelir.

Granüle edilmiş yüksek fırınların cürufları suyla hızlı soğutuldukları için cama benzer yapıya sahip özellikleri nedeniyle çimento piyasasında hammadde şeklinde kullanılmaya uygundur.

Tablo 2. 2. 2014 yılı verilerine göre çelikhane cürufunun kullanımına ait bilgiler (ton)

	Çelikhane cüruf miktarı	Bertaraf/Atık miktarı	Geri kazanım miktarı
Hatay	1.131.695	901.155	230.540
Osmaniye	619.819	608.745	11.074
İzmir	490.580	182.907	307.673
Çanakkale	459.343	50.529	408.814
Zonguldak	449.848	261.327	188.521
Karabük	266.760	0	243.540
Samsun	150.206	150.206	0
Tekirdağ	132.000	47.000	85.000
Kocaeli	87.327	494.117	380.210
Bursa	35.500	7.500	28.000
Bilecik	8.400	4.000	4.400

Ülkemizde 2014 yılında Zonguldak, Hatay ve Karabük illerinde faaliyette bulunan 3 entegre tesisinden elde edilen 2.7 milyon ton granüle halindeki yüksek fırınlardan elde edilen

cürufun hemen hemen tamamı klinker yapımında kullanılmak amacıyla çimento fabrikalarına verilmektedir (Tablo 2.3).

Tablo 2. 3. Yüksek fırınlardan elde edilen cürufun geri kazanım verileri (ton) (2014 yılı)

	Cürufun miktarı	Atık miktarı	Geri kazanım miktarı
Hatay			
Granüle halindeki cüruf	1.342.848	0	1.221.678
Havada soğutulan cüruf	54.154	53.721	433
Zonguldak			
Granüle halindeki cüruf	822.627	0	822.627
Havada soğutulan cüruf	0	0	0
Karabük			
Granüle halindeki cüruf	561.570	0	561.570
Havada soğutulan cüruf	405.480	0	405.480

Çelikhane cürufunun bordür, parke, hazır beton malzemeleri, mikronize edilmiş granül ürünleri, asfalt agregası, yağmur oluğu, raspa kumu, alt-üst temel ürünleri ile çeşitli ebatlarda yapılmış dolgu malzeme ürünü şeklinde geri kazanımı yapılabilmektedir.

Geri kazanım için gönderilen çelikhane cürufları, yeterli alanı olan kuruluşlarca tesis bünyesi içinde geçici olarak depolanmakta, alanı müsait olmayan tesislerde ise belirlenen depolama alanlarında bertaraf edilmeleri sağlanmaktadır [31].

2.2.3. Türkiye’de Mevcut Kullanım Alanları

2.2.3.1 Yüksek Fen Kurulu Birim Fiyat Listesi

Çelikhane cürufundan üretilen yapay agrega, Yüksek Fen Kurulu birim fiyat listesinde 2015 yılında yer almıştır. “Sunı Beton Agregası Ürünleri” ve “Yol Yapım İşlerinde Kullanılan Bağlayıcı Kullanılmamış ve Hidrolik Bağlayıcı Olan Ürünler İçin Sunı Agregalar” standartlarına uygun bir şekilde, suni agregaların ürün olacak şekilde kullanılması, uygunluk onayı veren kuruluşlar tarafından ürün onay belgesi alınmasıyla mümkün olabilmektedir [31]. Yüksek fırın cürufunun yüksek fen kurulundaki 2015 yılına ait fiyat listesi Tablo 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2. 4. Yüksek fırın cürufunun yüksek fen kurulundaki fiyat listesi

	Yapay Beton Agregaları (TS 706 EN 12620+A1)			
04.007/100A	Demir cürufu ince agrega	m3	Depoda	11,00 TL
04.007/100B	Demir cürufu iri agrega	m3	Depoda	11,00 TL
04.007/100C	Demir cürufu karışık agrega	m3	Depoda	10,00 TL
	Yol Yapımında Kullanılan Bağlayıcısız ve Hidrolik Bağlayıcılı Malzemeler İçin Yapay Agregalar (TS EN 13242+A1)			
04.007/110C	Demir cürufu karışık agrega	m3	Depoda	10,00 TL
04.007/A	Silis (kuvars) kumu ve çakılı (TS EN 12904)	kg	İşbaşında	0,22 TL

2.2.4. Avrupa'da Kullanım Alanları

2.2.4.1. Cüruf Türlerine Göre Atık Olarak Kullanımı (Geri Kazanım/Bertaraf)

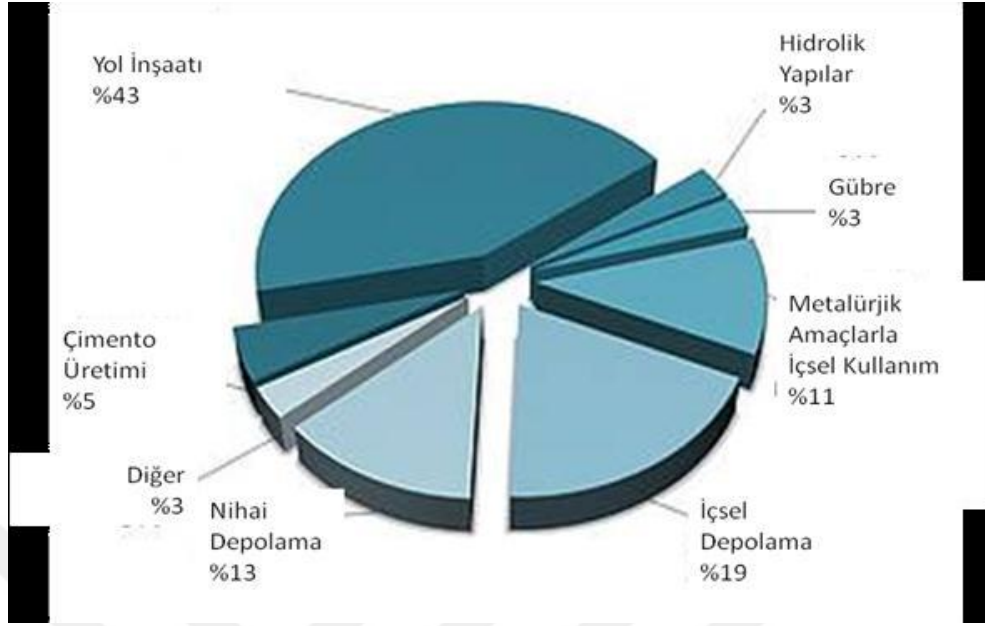
Avrupa Komisyonu tarafından 3 Mayıs 2000 tarihinde oluşturulan Avrupa Atık Kataloğu, Atık Yönetimi Yönetmeliği çerçevesinde de ulusal mevzuatta yerini almıştır. Katalog çerçevesinde cürufların atık kodları belirtilmiş ve yönetmelik eklerinde belirtildiği şekliyle, Cüruf İşleme Atıkları (100201) ve İşlenmemiş Cüruf (100202) kodları ile yer almaktadır. Ancak, Avrupa Atık Kataloğu kapsamında cüruflar ile ilgili en önemli gelişmelerden biri, Almanya Avrupa Birliği Komisyonu yetkililerince önerilmiş olan ve Avrupa Komisyonu tarafından da kabul gören cüruf tanımlamalarıdır. Katalog kapsamında belirtilmiş olan hususlar;

- ✓ Pelletizasyon,
- ✓ Granülasyon,
- ✓ Isıl arıtmada katılaştırma ve kırma/öğütme
- ✓ Köpürtme şeklindedir.

Bu proseslerden bir veya daha fazlası yapılan cürufların atık olarak değerlendirilmeyeceği belirtilmiştir. Dolayısıyla Avrupa Atık Kataloğunda belirlenen prosesler için uygulanan cüruflara ait herhangi bir atık koduna yer verilmemiştir.

Avrupa Birliği Komisyonunun 2007 yılındaki kataloğunda da yüksek fırınlardan elde edilen cürufun yan ürün devamlı talep görmesi, üretim işleminin vazgeçilmez parçası olarak değerlendirilmesi ve başka işlemlere gerek olmadan doğrudan doğruya proseste kullanılabilir olması sebebiyle yan ürün olacak şekilde değer bulmaktadır.

Elektrik Ark Ocağı (EAO) cürufu ve Bazik Oksijen Fırın (BOF) cürufu çelik cürufları olarak adlandırılmaktadır. Avrupa'da 2012 yılında çelik cürufunun kullanılma oranları Şekil 2.20'de yer almaktadır.

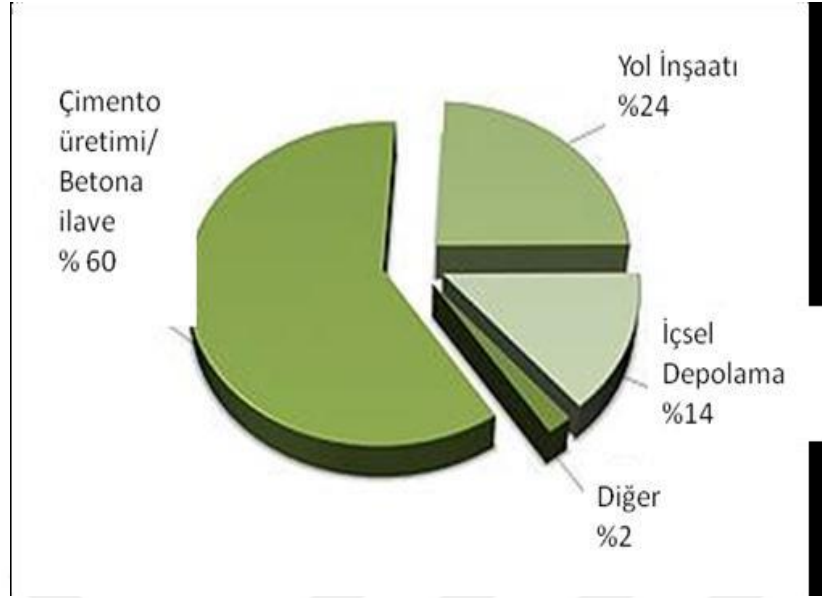


Şekil 2. 20. Çelik cürufunun (BOF ve EAF cürufu) Avrupa’da kullanım alanları (2012 yılı)

2012 yılındaki verilere göre Avrupa’da çelik cüruflarının %68’i belirli uygulama alanlarında kullanılır iken, %19’u sonradan kullanılmak üzere geçici olarak stoklanmış, geriye kalan %13’ü ise nihai depolanmaktadır. Çelik cürufunun uygulama alanı genellikle, %43’lük oran ile yol inşaatlarındaki agrega üretimidir. Metalürjik alanlardaki kullanma oranı %11 olup %3-5 gibi bir oranda da çimento üretiminde, gübre üretiminde ve hidrolik yapılarda kullanılmaktadır. Almanya’da çelik üretiminden çıkan cürufların %68,3’lük kısmı inşaat ve yapı malzemesi olarak (hidrolik mühendislik işlerinde, toprak hafriyatında, yol inşaatında), %17,4’lük kısmı geri dönüşüm uygulamalarında, %5,5’i gübre malzemesi olarak, %8,8’i ise depolanmada kullanılmıştır [31].

2.2.4.2 Cüruf Türlerine Göre Yeniden Kullanım

Bilindiği üzere; yüksek fırın cürufları Avrupa’da atık olarak değil, genellikle yan ürün olarak kullanılmaktadır. Avrupa Cüruf Birliği, cürufların geri kazanımı için çalışmalar yürütmekte olup, 2000 yılından beri her iki yılda bir cürufların kullanım alanlarına yönelik araştırmalar yapmaktadır. Bu kapsamda 2012 yılı verilerine göre yüksek fırın cüruflarının kullanım alanları Şekil 2.21’de gösterilmektedir.



Şekil 2. 21. Yüksek fırın cüruflarının kullanım alanları (2012 yılı)

Avrupa Cüruf Birliği verilerine göre 2012 yılında yüksek fırın cüruflarının %60'ı çimento üretimi veya beton ilavesi olarak kullanılmış %24'ü yol inşaatında agrega olarak yer almış ve yan ürün olarak değerlendirilmiştir. Yüksek fırın cüruflarının %14'ü de içsel depolama yapılmaktadır. Batı ülkelerinde yüksek fırınların cüruflarının üretim süreci ve uygulama sahaları Tablo 2.5'te, çelik cürufları uygulama sahaları da Tablo 2.6'da gösterilmiştir [31].

Tablo 2. 5. Yüksek fırınlardan elde edilen cürufların Avrupa'daki kullanım alanları

Cüruf	İmalat Aşaması	Çalışmalar (Örnekler)
Parça Şeklindeki Cüruf (Hava İle Soğutulan Yüksek Fırın Cürufu)	Parçalama, Eleme Bunun yanı sıra parça halindeki cüruf da vardır	Çimento harcı olarak; - Hidrolik ve bitümlü bağlayıcılarda (beton, asfalt ve yol bağlayıcı) - Bağlayıcı kullanılmayan karışımlarda - Atık suların arıtılmasında - Demiryolunda kullanılan balastlarda - Dolgulardaki yapılarda - Çatı kaplamalarında - Zemin iyileştirmelerinde Üretim olarak; - Kaya yünü - Cam yapımında - Gübre yapımında
Granüle Edilmiş Yüksek Fırın Cürufları	Yüksek basınçta, yüksek hacimli su spreyi kullanılarak ergiyik cürufun hızlı bir şekilde söndürülmesi ve granüle edilmiş cürufun çimento küçüklüğünde öğütülmesi	Çimento harcı olarak; - Hidrolik ve bitümlü bağlayıcılarda (beton, asfalt ve yol bağlayıcı) - Bağlayıcı kullanılmayan karışımlarda - Dolgulardaki yapılarda - Kumlama işlemlerinde - Zemin iyileştirmelerinde Üretim olarak; - Çimento ve diğer hidrolik bağlayıcılar - Beton üretiminde - Gübre üretiminde - Kaya yünü yapımında - Cam yapımında

Tablo 2. 6. Çelik üretiminden çıkan cürufların Batı'daki uygulama alanları (Avrupa)

Cüruf	Üretim Süreci	Çalışmalar (Örnekler)
Bazik Oksijen Fırın Cürufu (BOS)	Parçalama, Eleme Hava kullanılarak soğutulan ve su verilmiş cüruf	Çimento harcı olarak; - Hidrolik ya da bitümlü bağlayıcılarda (beton, asfalt ve yol bağlayıcı) - Büyük kayma direncine sahip üst tabakalarda - Bağlayıcı kullanılmayan karışımlarda - Baraj yapılarında - Atık suların arıtılmasında - Atık suların arıtılmasında - Dolgu yapılarında - Gürültü sönümleyici duvarlar ve istihkam duvarlarında - Zemin iyileştirmelerinde Üretim olarak; - Çimento, başka hidrolik bağlayıcılarda - Kaya yünü - Cam üretiminde - Gübre yapımında
Elektrikli Ark Fırınlarından Elde Edilen Cüruf (EAFÇ) Çelik karbon üretimi	Parçalama, Eleme Hava kullanılarak soğutulan ve su verilmiş cüruf	Çimento harcı olarak; - Hidrolik ya da bitümlü bağlayıcılarda (beton, asfalt ve yol bağlayıcı) - Büyük kayma direncine sahip üst tabakalarda - Bağlayıcı kullanılmayan karışımlarda - Baraj yapılarında - Atık suların arıtılmasında - Atık suların arıtılmasında - Dolgu yapılarında - Gürültü sönümleyici duvarlar ve istihkam duvarlarında - Zemin iyileştirmelerinde Üretim olarak; - Çimento, başka hidrolik bağlayıcılarda - Kaya yünü - Cam üretiminde
Elektrikli Ark Fırınlarından Elde Edilen Cüruf (EAFS) Paslanmaz/yüksek alaşımlı çelik üretimi	Parçalama, Eleme Hava kullanılarak soğutulan ve su verilmiş cüruf	Çimento harcı olarak; - Hidrolik ya da bitümlü bağlayıcılarda (beton, asfalt ve yol bağlayıcı) - Bağlayıcı kullanılmayan karışımlarda - Baraj yapılarında - Dolgu yapılarında - Büyük kayma direncine sahip üst tabakalarda - Çatıların kaplamalarında - Gürültü sönümleyici duvarlar ve istihkam duvarlarında - Zemin iyileştirmelerinde Üretim olarak; - Çimento, başka hidrolik bağlayıcılarda - Kaya yünü - Cam üretiminde

2.2.5. Dünya'daki Kullanım Sahaları

Dünya Çelik Birliği(worldsteel)'nin çelik sanayisinin yan ürünlerle ilgili yayımladığı olduğu bildiride, çelik cüruflarının (EAO ve BOF cürufları) bazılarının geri dönüştürülerek fırınlarda veya sinterlemede kullanıldığı, yaklaşık olarak %50'si geri dönüştürülen cürufun ise inşaat çalışmalarında ve yol yapımlarında kullanıldığı belirtilmiştir. Çelik üretiminde açığa çıkan cüruf büyük oranda doğal kireç içerdiği için inşaat uygulamalarında sınırlı kullanılmaktadır. Serbest haldeki kireci ayrıştırmak için de çeşitli teknik çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıştırılan kireç gübre yapımında veya beton ve çimentoya katkı maddesi olarak, atık suların arıtılmasında ve denizlerdeki kıyı tahkimatlarında kullanılabilmektedir. Öncelikli işletmelerin atık sahalarında kullanılmaz durumda olan cüruf, artık satılabilir ve ekonomik değeri olan bir ürün haline gelmiştir. Çelik cürufunun dünyada geri dönüşüm oranı yaklaşık olarak %80 iken demir cürufunda geri dönüşüm oranı %100'dür. Ekonomik ve çevresel etki bakımından çoğu ülkede çelik cürufunun geri dönüşümde kullanılması için birçok çalışma yapılmaktadır.

Amerika Ulusal Cüruf Birliği'nin yayımlamış olduğu bilgi notunda; demir ve çelik üretiminde ortaya çıkan cürufların inşaat, yerleşim, endüstri ve tarım alanlarının kullanımına uygun olan agrega materyallerinden oluştuğuna yer verilmiştir. Cüruflara, USEPA ve ASTM teknikleri uygulanarak bazı testler yapılmış ve demir-çelik üretiminde ortaya çıkan cürufun farklı alanlarda kullanılmasında bir sakınca olmadığı belirtilmiştir. Metalürjik yüksek fırın cürufları 1600 °C sıcaklıkta oluştuğundan organik, uçucu bileşikler ve yarı organik maddeler içermez iken; demir, kalsiyum, alüminyum, silisyum, kalsiyum silikat, magnezyum oksitler, alüminoferrit ve alüminosilikat bileşiklerini içermektedir. Çoğu cüruf teste tabi tutulmuş ve çıkan test sonuçları incelendiğinde; cüruflarının endüstri, inşaat, yerleşim ve tarım alanlarında kullanılmasının insan sağlığı ve çevre için bir zarar oluşturmadığı tespit edilmiştir. Cürufta bulunan metallerin canlılar tarafından alınması veya bitkilerdeki birikiminden bahsetmek mümkün değildir.

Cürufun başarıyla ve güvenle yol dolgusu, asfalt betonu, toprak yol, portlant çimento, yürüme yolu, otopark gibi birçok alanda yapı agrega maddesi şeklinde kullanımı yapılmaktadır. Portland çimento üretiminde, toprağın remineralizasyonu ve pH ilavesi şeklinde tarım uygulamaları ve teknolojik atık suların arıtılması gibi alanlarda da cüruf kullanılmaktadır. Demir ve çelik üretiminde ortaya çıkan cüruflar suyun kalitesine ve akuatik alana zarar vermeden akarsu ve göllerde de güvenli bir şekilde kullanılabilmektedir [31]. Yüksek fırın cüruflarının karayolunda asfalt malzemesi ve demiryollarında balast malzemesi olarak kullanılması Şekil 2.22 ve Şekil 2.23'te gösterilmiştir.



Şekil 2. 22. Karayolunda asfalt malzemesi olarak cürufun kullanımı



Şekil 2. 23. Cürufun demiryolunda balast olarak kullanılması

3. KAYNAK ELEKTROTLARI

3.1. Kaynak Elektrotlarının Gruplandırılması

Elektrik ark kaynak yönteminde kullanılan elektrotlar, kaynak ihtiyacına göre dolgu kaynağı elektrotları ve birleştirme elektrotları olarak gruplandırılabilirler. Birleştirme kaynağında kaynak metalinin sünek ve tok olması; dolgu kaynağında ise kaynak dikişinin sert ve aşınmaya karşı dayanıklı olması istenir. Elektrotlar birleştirilen malzemenin çeşidine göre de gruplandırılabilir:

- Çelik malzemelerin kaynak işleminde kullanılan elektrotlar,
- Dökme demirlerin kaynak işleminde kullanılan elektrotlar,
- Paslanmaz çeliklerin kaynağında ve korozyona karşı dayanıklı olan çeliklerin kaynak işleminde kullanılan elektrotlar,
- Alüminyum ile alaşımlarının kaynak işleminde kullanılan elektrotlar,
- Bakır ile alaşımlarının kaynak işleminde kullanılan elektrotlar,
- Nikel ile alaşımlarının kaynak işleminde kullanılan elektrotlar.

Elektrik ark kaynak yönteminde kullanılan elektrotların bazıları sadece arkı oluştururken, diğer elektrotlar ise bir yandan arkı oluştururken bir yandan da kaynak metalini oluştururlar. Bundan dolayı kaynakta kullanılan elektrotlar, eriyen elektrotlar ve erimeyen elektrotlar sınıflandırılabilir [32].

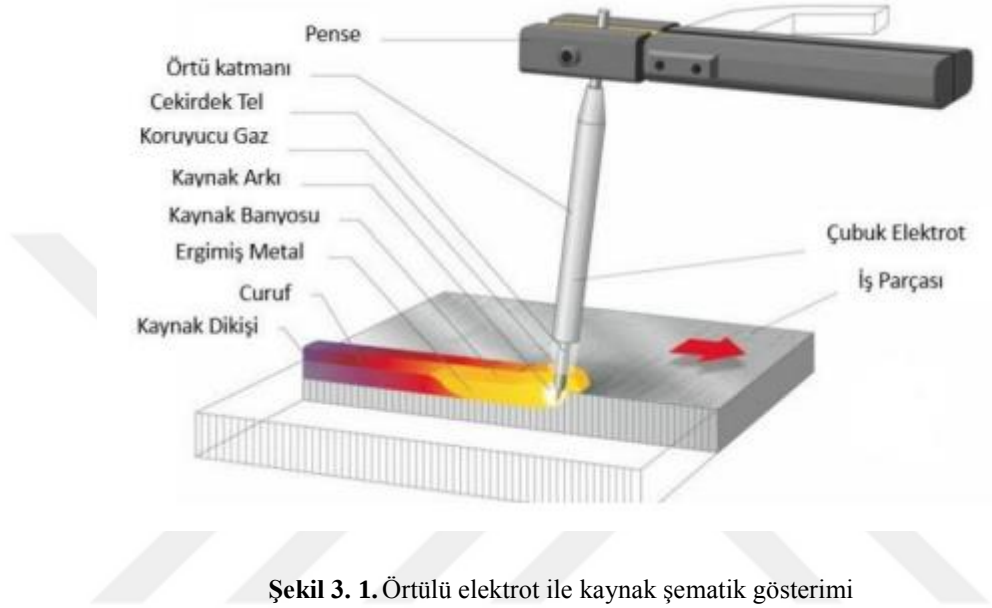
3.2. Erimeyen Elektrotlar

Bu elektrotların kullanım amacı sadece arkı oluşturmaktır, ihtiyaç halinde kaynak metali tel çubuk gibi (oksi-asetilen kaynak yöntemindeki gibi) dışarıdan kaynak bölgesine eklenir. Bu tür elektrotlar elektrik ark kaynağında tungsten veya karbondan yapılır.

İnce parçaların kaynağında ve özel kaynak yöntemlerinin bazılarında karbon elektrotlar kullanılmaktadır. Genellikle dairesel kesite sahip karbon elektrotlar grafit, elektro-grafit ve amorf gibi farklı çeşitlerde olabilir. Grafit ile elektro-grafit elektrotların üretimi grafit kömüründen olmaktadır ve amorf elektrotlara göre daha yüksek akım şiddetiyle yüklenebilirler. Ömürleri ise amorf elektrotlara göre daha uzundur. Amorf elektrotlar en ucuz, elektro-grafit elektrotlar ise en pahalı olanlarıdır. Tungsten elektrotlar, TIG kaynağında kullanılmaktadır [32].

3.3. Eriyen Elektrotlar

Eriyen elektrotlar hem arkı oluşturur, hem de eriyip ihtiyaç olan kaynak metalini oluştururlar. Eriyen elektrot ile yapılan kaynağın şematik gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir. Çeliklerin kaynak işleminde kullanılan elektrotlar örtülü, özlü ve çıplak olarak üç farklı türde üretilirler [32].



3.3.1. Çıplak Elektrotlar

Bu elektrotlar, belirli alaşımlar katılarak hazırlanan, tozaltı ve MIG-MAG kaynak yöntemleri için kangala sarılı olarak, oksit-asetilen ve TIG kaynağı için ise belli boylarda kesilen dolu tel elektrotlardır. Günümüzde çok farklı elektrot türleri kullanıldığından elektrik ark kaynak yöntemi için artık çıplak tel elektrot üretilmemektedir [32].

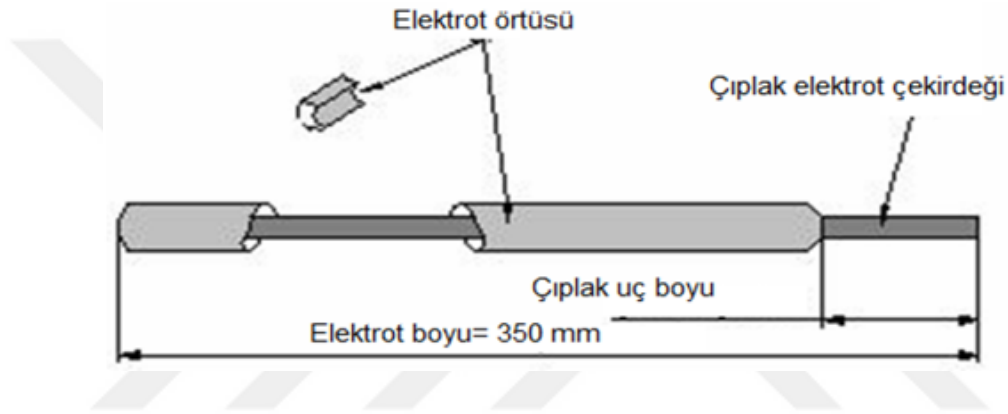
3.3.2. Özlü Elektrotlar

Bu elektrot türleri de bir çeşit çıplak elektrottur. Bu elektrotlar boru halinde üretilirler, içlerinde ise öz olarak adlandırılan ve kaynak metalini alaşımlandıran ve arkın stabil olmasını sağlayan bir maddeye sahiptir. Elektrot özünün yanması ile meydana gelen gazdan dolayı bu elektrotlarda havanın, kaynak banyosuna daha az olumsuz etkisi vardır. Çubuk halinde olan özlü elektrotların yalnızca bazı sert dolgu kaynak işlemleri için üretimi yapılmaktadır. Günümüzde

özellikle MIG-MAG kaynağı için çeşitli şekillerde makaraya sarılmış halde yaygın olan özlü tel üretimi bulunmaktadır [32].

3.3.3. Örtülü Elektrotlar

İsveçli Oscar Kjelberg tarafından ilk olarak 1904 senesinde üretilen örtülü elektrotlarda, eriyen kaynak teli üzerine ekstrüzyon, daldırma ve sarma ile geçirilmiş olan örtü malzemesi bulunur. Örtülü elektrotların üretilmesi için yukarıda bahsedilen yöntemlerin tamamı olumlu sonuç vermesine rağmen, günümüz teknolojisi, birçok üstünlüğünden dolayı ekstrüzyon yöntemini uygulamaktadır [32]. Örtülü elektrotun genel görünümü Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 2. Örtülü elektrot görünümü

3.4. Elektrot Örtüsünde Kullanılan Malzemeler

Elektrotların kaynak özellikleri tamamıyla bu örtünün bileşimine bağlıdır. Elektrot örtüsünün faydaları şu şekilde sıralanabilir;

- Arkın tutuşması ve oluşumuna yardımcı olur. Hem alternatif akımda, hem de doğru akımda kaynak yapılabilmesini sağlar,
- Erimiş metal damlacıklarının yüzey gerilimlerine ve viskozitelerine etki ederek, hem tavan kaynaklarının yapılmasını sağlar, hem de düşey kaynakların yapılmasını kolaylaştırır,
- Kaynak dikişini atmosferin olumsuz etkilerinden koruyan bir gaz atmosferi oluşturur,
- Kaynak sonrasında dikişin üzerine cüruf tabakası ile kapatarak dikişin yavaş soğumasına yardımcı olur,

- Ergiyen kaynak banyosunu deokside ederek gereken hallerde kaynak dikişini alaşımlandırma etkisi vardır.

Elektrot örtüsünde bulunan maddelerin türleri bir hayli karışıktır. Günümüzde elektrot örtüsü, çeliklerin üretim metotlarıyla yakın ilgisi olan bilim dalı halini almıştır. Elektrot örtüsü gerek üretim ve gerekse kaynak tekniği açısından aşağıdaki şartları karşılayabilmelidir.

- Üretiminin kolaylığı,
- Taşıma ve depolama kolaylığı,
- Kaynağın tekniği,
- Cürufun kolayca temizlenebilmesi,
- Kaynak bölgesine metalürjik etki etmesi.

Elektrotun kullanılma prensiplerini, kaynak metalindeki mekanik özellikleri ve kaynak metalinin kimyasal analizlerini elektrot standartları belirler. Kullanılan elektrotların örtü bileşimleri ise üreticilere bırakılmıştır. Kaynak elektrotları üretiminde günümüzde en çok kullanılan örtü bileşenlerini şu şekilde sıralanabilir [32].

3.4.1. Cüruf Oluşturucu Maddeler

Bir kaynak banyosu üstünde cüruf tabakası oluşturup ergimiş metalin hızlı soğumasına engel olmak ve havanın zararlı etkilerinden korumak için ilave edilen bu maddeler dört ana grupta değerlendirilebilir [32].

3.4.2. Karbonatlar

Cüruf oluşturmak için elektrot örtü bileşiminde genellikle magnezyum ve kalsiyum karbonat ya da bunların karışımı olan suda çözünmeyen inorganik maddeler kullanılır. Suda çözülen mineraller bağlayıcı amacıyla katılan cam suyunu bozdukları için örtü bileşen malzemesi olarak kullanılmazlar. Baryum ve stronsiyum karbonat da bazen, örtüye belirli oranlarda girer. Sodyum ve potasyum karbonat da eser miktarda kullanılır (%1'den az) [32].

3.4.3. Silikatlar

Cüruf oluşturmak için 1400°C sıcaklık altında eriyen tüm silikat çeşitleri örtüye katılabilir. Pahalı ve elde edilmesi zor olan silikatlar örtüye artı bir özellik kazandırmadıklarından genelde feldspat (alüminyum /sodyum/ potasyum -silikat) ve kuvars gibi kolayca bulunan türler kullanılır [32].

3.4.4. Oksitler

Bu örtü çeşitlerinde, demir oksit ve titan dioksit cüruf oluşturuıcı bileşiklerdir. Hematit, manyetit, rutil ve ilmenit bu oksitlerin çevrede var oldukları halidir. Silisyum, alüminyum, krom, manganez gibi metal oksitler de örtüye eklenebilir [32].

3.4.5. Fluorürler

Fluorürler genelde suda çözündükleri için, bazı flüorür türleri örtü içinde kullanılabilir. Fluspat (kalsiyum florür) kullanılan flüorürler içinde en çok kullanılan bileşiktir. Örtü içinde bulunan diğer bir flüorür çeşidi ise kriyolittir [32].

3.4.6. Arkı Stabilize Edici Maddeler

Lityum karbonat, potasyum bileşikleri, zirkonyum karbonat ve potasyum okzalat ile titan bileşikleri arkı stabil etmede ve alternatif akım ile sürekliliği sağlamada için örtüye ilave edilen maddelerdir [32].

3.4.7. Gaz Atmosferi Oluşturan Maddeler

Selüloz, kireçtaşı, odun tozu ve dekstrin kaynaklı bölgenin havanın kötü etkilerinden korumak amacıyla ark sıcaklık değerinden ayrılarak ya da yanarak örtüye koruyucu gaz tabakası oluştururlar [32].

3.4.8. Ekstrüzyon İşlemini Kolaylaştırıcı Maddeler

Bentonit, mika, gliserin, talk, kaolen

3.4.9. Bağlayıcı Maddeler

Potasyum silikat, sodyum silikat, şeker, dekstrin

3.4.10. Kurutma Esnasında ve Kuruma Sonrası Örtüye Dayanım Kazandırıcı Maddeler

Kuruma esnasında ve kuruma sonrası örtünün mukavemetini arttırmak amacıyla örtüye bağlayıcı elemanlara ilave olarak asbest türü lifli mineraller de katılmaktadır. Asbestin insan sağlığına zararlı etkilerinden dolayı son yıllarda asbest yerine örtüye mika benzeri levhacıklar şeklinde mineraller katılabilmektedir. Bu minerallerin miktarı, örtü çeşidine göre değişmekle birlikte genelde çok azdır. Kullanılan mineraller bir silikat çeşidi olduklarından kaynak sırasında cürufa geçip cüruf oluşturuıcı bir etki oluştururlar [32].

3.4.11. Alaşımlayıcı ve Dezoksidasyon Yapıcı Maddeler

Ferrokrom, ferrosilisyum, ferromolibden, ferroniyobyum, ferromanganez deoksidasyon ve alaşımlama işlemlerini gerçekleştirmek için ilave edilen maddelerdir.

Elektrot örtüsüne ilave edilen alaşımlayıcı elementler, kaynak esnasında kaynak metaline belirli bir oranda geçerler. Elektrot örtü bileşimine ilave edilen alaşımlayıcı elementlerin kaynak bölgesini alaşımlandırma verimleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Örtü bileşimindeki alaşım elementleri öğütülerek 100 meş açıklıklı bir elekten geçecek hale getirilir ve örtü pastasına ilave edilir. Alaşım elementlerinin boyutları küçüldükçe alaşımlandırmanın verimi de artar. Bir kaynak işleminde mukavemetli kaynak dikişine sahip olmak için bazen alaşımlı tel kullanmak yerine normal tel ile bünyesinde alaşım elementi olan örtü kullanarak yapılan kaynak daha ekonomik olmaktadır. Bu şekilde üretilen elektrotlar sentetik elektrot olarak tanımlanmaktadır [32].

Tablo 3. 1. Elektrot örtüsüne ilave edilen alaşım elementlerinin verimleri

Alaşım Elementleri	Örtü İçindeki Alaşımın Formu	Alaşım Verimleri	Elementlerinin Yaklaşık
Karbon	Grafit	75	
Manganez	Ferromangan	75	
Fosfor	Ferrofosfor	100	
Kükürt	Demirsülfür	15	
Silisyum	Ferrosilisyum	45	
Krom	Ferrokrom	95	
Nikel	Elektrolitik Nikel	100	
Bakır	Bakır	100	
Niyobyum	Ferroniyobyum	70	
Titanyum	Ferrotitan	5	
Molibden	Ferromolibden	97	
Vanadyum	Ferrovandiyum	80	
Berilyum	Bakır-Berilyum	0	
Bor	Ferrobora	2	
Azot	Nitritli manganez	50	
Tungsten	Ferrotungsten	80	
Aluminyum	Ferroaluminyum	20	
Zirkonyum	Nikel-zirkon	5	

3.5. Örtü Çeşitleri

Elektrot örtülerinin hazırlanmasında örtü maddelerinden belirli miktarlarda karıştırılır ve ekstrüzyon presi ile veya diğer yöntemlerden biri uygulanarak elektrot teli çekirdeğine sıvanır. Bu maddeler karıştırılırken rastgele karıştırılmaz. Her çeşit elektrot örtüsü üretimi için özellikle temel malzeme bileşenlerinin bazı oranlar içinde kalması gerekir. Aksi halde elektrot örtüsünde

istenen özellikler sağlanamaz. Bulunan karışım oranları yılların tecrübeleri sonucu formüle edilmişlerdir.

Örtülü elektrotlar, sahip oldukları örtülerinin ana bileşenin cinsine, cürufaların bazlık ve asitlik durumuna göre farklı gruplara ayrılır [32].

3.5.1. Rutil Elektrotlar

Bu tipteki elektrotlar, örtü bileşimlerinde ana madde olarak çoğu zaman rutil şeklinde olan titanyum dioksit ya da ilmenit (titan ve demir oksit) ve bununla birlikte elektrotları kolay kullanılır duruma getiren yüksek oranda iyonlaştırıcı maddeler içerirler. Örtü bileşiminde, titan dioksitten başka kuvars, feldspat ve biraz selüloz, bunun yanı sıra bir miktar ferromangan, bağlayıcı olarak ise potasyum ve sodyum silikat bulunur. Çok amaçlı kullanılma olanağına sahip bu elektrotlar, örtüleri tüm kalınlıklarda, yani ince örtülü, orta kalınlık örtülü, kalın örtülü ve çok kalın örtülü olarak imâl edilirler. Farklı örtü kalınlıklarında imal edilen rutil elektrotlarda eriyen kaynak metali, artan örtü kalınlığına bağlı olarak ince damlalar şeklinde geçer, örtü kalınlığı arttıkça kaynak dikişinin mekanik özelliklerinde de iyileştirmeler olur. Bu örtü çeşitleri, tamamen dikişi örten, bayağı kalın, rengi kahverengiden siyaha kadar olabilen, çabuk katılaştıran bir cüruf oluştururlar. Oluşturulan bu cürufun özellikleri, örtüyü meydana getiren maddelerin miktarına ve cinsine bağlıdır. Örtü bileşimine katılan asbest ve feldspat gibi silis içeren maddeler cürufu çok akıcı hale getiren titan dioksitle karışım cürufun viskozitesinin uygun bir değerde olmasını sağlar. Cürufun görüntüsü örtü kalınlığı ile örtü içinde bulunan elementlerle ilişkili olup sıkı görüntüden petek benzeri gözenekli bir görüntüye kadar değişebilir ve buna bağlı olarak da kaynak metalinin mukavemet değerleri değişiklik gösterir. Kaynak işleminden sonra, cüruf kaynak metalinden kolayca kalkar ve düzgün hazırlanmayan kaynak ağızlarında bile bu tipteki elektrotlar kaynak yapmaya uygundurlar.

Bu elektrotlar kullanılarak hem alternatif akım ile hem de doğru akım ile kaynak yapılabilir. Bu elektrotlar ile her kaynak pozisyonu için kaynak yapılabilir, elektrot örtüsü kalınlaştıkça aralık doldurma yetenekleri artar.

Aralık birleştirme kabiliyeti ince örtülü ve orta örtülü elektrotlarda çok iyi olup kalın örtülü elektrotlarda iyi seviyededir. Benzer özellikteki asit elektrotlardan daha iyi mekanik özelliklere sahip kaynak metali verirler. Sıcak çatlama hassasiyeti ise aynı oranda manganez içeren asit elektrotlardan daha düşük seviyededir. Örtü içerisinde bulunan rutil daha çok iyonlaştırıcı olarak kullanıldığından, ark çok kararlıdır, arkın tutuşması kolaydır ve alternatif akım altında dahi ark gerilimi nispeten düşük olmaktadır.

Kalın örtülü elektrotlarda çok miktarda cüruf oluştuğu zaman koruyucu gaza çok fazla gereksinim duyulmaz; dolayısıyla bu tür elektrotlar az miktarda organik madde içermektedirler [32].

3.5.2. Asit Elektrotlar

Bu elektrotların örtü bileşenlerinde çok miktarda demir oksit, ferromangan, kuartz ve diğer deoksitan maddeler bulunur. Asit karakterli olan cüruf; silisik asit, demir oksit ve mangan oksit bulunur. Cüruf tabakası, petek benzeri gözenekli olup, kaynak metalinden çok kolay kalkar. Bu elektrotlar genellikle kalın örtülü olacak şekilde üretilir, örtü kalınlığı arttıkça kaynak esnasındaki metali geçişi incelmektedir.

Cürufların katılma skalası oldukça geniştir, akıcılığı fazladır ve kaynak dikişleri düzgün olan bir elektrottur. Kaynak dikişinin yüzeyi parlak olup dikiş dövülebilir ve röntgen muayenesi yoluyla incelemeye uyumlu sonuçlar vermektedir. Kaynak esnasında oluşan ark, yüksek sıcaklığa sahip olduğundan, büzülme fazla olur. Düşey kaynak pozisyonu hariç (yukarıda aşağıya doğru) bütün kaynak pozisyonlarında kullanılabilir. Hem alternatif akımda hem de doğru akımda kullanılabilir. Bu elektrotlarda aralık doldurma özelliği çok iyi değildir, bu yüzden kaynak ağzının iyi bir şekilde hazırlanması ve birbiri ile uyumlu olması gerekmektedir.

Çok pasolu derin kaynaklarda, araya cüruf sıkışması olasılığının az olması nedeniyle, bu elektrotlar özellikle, radyografik muayenenin uygulanacağı yüksek kaliteli uygulamalara uygundur. Ergitilecek cüruf hacminin fazla olması istendiğinde, elektrot ucundaki fazla ısıdan faydalanmak amaçlı elektrot artı kutba bağlanabilir. Yüksek karbonlu çeliklerde, fosforlu çeliklerde, kükürtlü çeliklerde ve Thomas çeliklerinde itina ile uygulanmalıdır. Örtü bileşenlerinde cüruf oluşturu elementlerin miktarı diğer çeşitlerde olduğu gibi değiştirilebilmektedir. Ancak genellikle demir oksit, karbonat ve silikatların toplam miktarı çok fazla değişmez. Bazen ferromangan yerine ferrosilisyum eklenebilir, bunun yanı sıra asit karakterli olan her örtüde biraz ferromangan bulunması gereklidir. Çünkü örtü oksit karakterli olduğu için, kaynak banyosunda bulunan alaşım elementlerinin önemli bir kısmı yanmaktadır [32].

3.5.3. Oksit Elektrotlar

Örtüleri genellikle kalın olup, örtü demir oksit ve/veya mangan oksit içerir. Ark oluşumu esnasında metal geçişleri ince yağmur şeklinde olmaktadır. Kuvvetli asit davranışta, demir oksit içeren bir cüruf oluşturlar ve örtüleri kuvvetli oksitleyici etkiye sahiptir. Kaynak işlemi esnasında oluşan arkta, mangan ve karbon çokça yanar, bu nedenle, dikiş mangan geçişi nispeten daha düşük seviyelerde olur. Oluşan cüruf tabakası, sıkı olup soğuduğunda kendiliğinden kalkar. Bazı durumlarda cüruf sıçrama tehlikesi ile karşılaşılır. Çok düzgün dikişlere sahip olup özellikle ince tırtıllı, ama az nüfuziyetli özelliktedir. Bu elektrotlar çok akıcı özellikte olduklarından kaynak dikişleri çok düzgün olur. Bu tipteki elektrotlar, genellikle alaşımsız ve karbon oranı düşük olan çeliklerin birleştirilmesinde ve yatay pozisyonda kaynak yapmaya uygundur. Diğer

elektrot tiplerine göre sıcak çatlama tehlikesi daha çok olduğundan, oldukça dikkatli bir hazırlık çalışması gerektirirler. Doğru (elektrot eksi kutupta) ve alternatif akımda çalışabilirler. Ancak, aralık doldurma kabiliyeti iyi değildir. Özellikle, güzel ve düzgün görünüşlü dikişler arzu edildiği durumlarda bu tipteki elektrotların kullanımı tavsiye edilir. Manyetit (Fe_2O_3), kalsiyum karbonat (CaCO_3), kuvars (SiO_2), cam suyu ve kaolen kullanılarak oksit türde elektrot örtüleri elde edilmektedir [32].

3.5.4. Bazik Elektrotlar

4.5.4.1 Bazik Elektrot Örtülerinin Özellikleri

Örtülerinde bol miktarda kalsiyum(Ca) ve çeşitli toprak alkali karbonatlar (CaCO_3 ve MgCO_3 , dolomit), ve feldspat (KAlSi_3O_8 – $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) bulunur. Kalın örtülü elektrotlarda, ark içinde metal geçişi orta büyüklükte damlalar halinde olur. Cüruf kahverengi veya siyah olabilir ve kaynak metalinden cüruf kalkması kolay olmaz. Kaynak dikişi hafif bombelidir. En çok doğru akım (elektrot artı kutupta) ile kaynak yapımına izin verir. Bazik elektrotların örtülerinde hidrojen oluşturmaya maddeler bulunmadığı için kaynak sırasında dikişin hidrojen kopma olasılığı çok azdır. Hidrojenin, geçiş bölgesinde dikiş altında ince çatlaklara neden olduğu göz önüne alındığında bazik elektrotların kullanılmasının önemi kendini göstermektedir.

Kaynakta hidrojen oluşturmaya ve bağlayıcı olarak kullanılan potasyum veya sodyum silikatın içindeki nemin tamamen yok edilebilmesi için bu elektrotlar 400-500 °C'lik kurutma işlemine tabi tutulurlar. Bazik elektrotlar kuru yerlerde muhafaza edilmeli ve elektrotlar nemlenmiş ise kullanılmadan önce mutlaka 250 °C'de 30 dakika kurutulmalıdır.

Genellikle yukarıdan aşağı dik kaynak işlemleri dışında, bütün pozisyonlarda kullanıma uygun elektrotlardır. Mekanik özellikleri diğer elektrot türlerine kıyasla çok üst seviyededir. Bu tipteki elektrotlar, iyi aralık doldurma kabiliyetini sahiptirler. Dikiş içerisine cüruf girişi söz konusu olmaz ve bu tipteki örtülerle elde edilen dikişlerde sıcak ve soğukta çatlamaya meyil bulunmaz.

Bazik elektrotların aralık doldurma kabiliyetleri çok iyidir. Bu elektrotlarla yapılmış olan kaynak dikişleri oldukça iyi mekanik özelliklere sahiptir. Bazik elektrotlar ile 0 °C'nin altında kaynak yapılırken dahi gayet iyi kaynak dikişleri verirler.

Bazik elektrot örtüsü kullanılmasıyla sıvı haldeyken oldukça akışkan olan bir cüruf oluşur, cürufun akışkanlığı nedeniyle kaynak dikişi konkav ve kaba görümlü olur. Cürufun viskozitesini artırmak için örtüye biraz zirkonyum silikat veya zirkonyum oksit eklenir. Örtü bileşimine zirkonyum silikat veya zirkonyum oksit yerine ilmenit veya rutil ilavesi de cürufun akıcılığını ayarlamının başka bir yoludur [32].

4.5.4.2 Bazik Elektrotların Kullanılma Yerleri

Tüm kaynak pozisyonlarında kaynak yapmaya uygun bazik örtülü elektrotların kullandıkları alanlar;

- ✓ Bileşimi belli olmayan, düşük alaşımlı ve karbonlu çeliklerin kaynağı,
- ✓ Yüksek oranda karbon, fosfor, azot ve kükürt içeriğine sahip çeliklerin kaynağında,
- ✓ Değişik karbon oranlarına sahip çeliklerin kaynak ile birleştirilmelerinde,
- ✓ Çatlama ihtimalini azaltmak amacıyla kalın parçaların kaynağı,
- ✓ Çeşitli kuvvetler altında kaynak dikişlerinde yüksek mukavemet değerleri istendiğinde,
- ✓ Sert/katı konstrüksiyon kaynaklarında

Bazı durumlarda bazik örtülü elektrotlarla yapılmış kök paso kaynaklarında küçük gözenekler bulunabilmektedir. Bunun nedeni elektrot seçiminin hatalı olması, elektrotun yanlış kullanılması ve yanlış işlem uygulanması neticesinde oluşmaktadır. Kaynaklı bağlantının kaliteli olması ve kaynak dikişinde gözenek olmaması için bazik elektrotlarla kaynak yaparken şu hususlara dikkat edilmelidir [32].

▪ Örtü Nem Derecesi

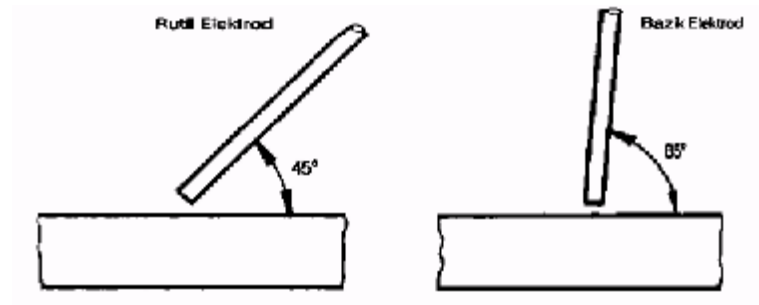
Kaynak işleminde kullanılan bazik elektrotların örtüleri kuvvetli düzeyde higroskopik olduğu için muhafaza edilmelerine dikkat edilmelidir. Örtüsü nemlenmiş olan elektrotlar kaynak işlemine başlamadan önce en az 250 °C’de 30 dakika süre ile kurutulmalıdır. Aksi takdirde elektrot örtüsündeki nem kaynak banyosuna geçerek gözenek oluşumuna ve hidrojen gevrekliği sorununa neden olur [32].

▪ Kaynak Akım Şiddeti

Bazik elektrot kullanılarak kaynak yapılırken mümkün olduğunca yüksek akım şiddeti kullanılmalıdır. Elektrot örtüsü bazı elektrot çeşitlerine göre daha büyük akım değeri ile yüklenebilir. Akım şiddetinin yüksek seçilmesi ile hem elektrotun tutuşması daha kolay olur hem de verilen ısıнын yüksekliğinden dolayı kaynak banyosunun sıvı halde kalması uzun süre alır; buda gazların kaynak banyosundan kolayca çıkmasını ve kaynak dikişinin gözeneklerden temizlenmesini sağlar. Kaynakçı akım şiddetini ayarlarken elektrotla iş parçasının yapışmaması için uygun akım değerini seçmelidir; bu akım şiddeti aralığında kaynak yapılırken elektrodun kızarmaması gerekmektedir [32].

▪ Elektrot Eğimi

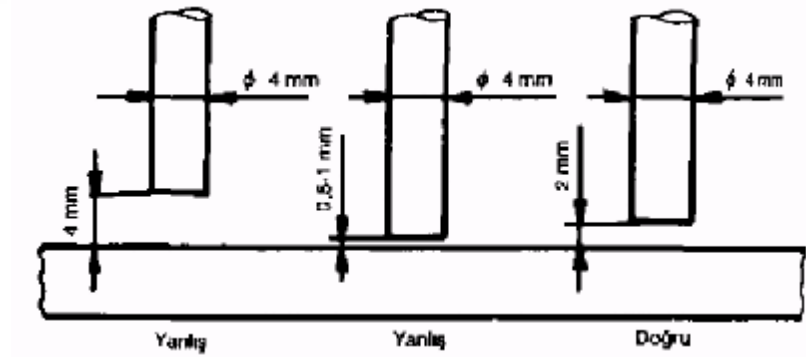
Asit ve rutil karakterli elektrotlarda kaynak yapılırken elektrot ile parça yüzeyi arasında Şekil 3.3’te gösterildiği gibi yaklaşık 45° açı olmalıdır. Bazik karakterli elektrotlarda ise bu eğim 85-90° arasında olmalıdır[32].



Şekil 3. 3. Bazik ve rutil elektrot kullanımında iş parçası ile elektrot arasındaki açı

▪ Arkın Boyu

Bazik elektrotlar ile kaynak yapılırken ark boyunun olabildiğince kısa olması gerekir, aksi durumda kalsiyum karbonatın ayrışmasıyla oluşan CO_2 atmosferi kaynak banyosunu koruyamaz. Kaynakta ark boyunun çok kısa olması halinde kaynak bölgesinde olması gerekenden çok esas metalin erimesine sebep olur. Kaynakta olması gereken en ideal ark boyu Şekil 3.4'te gösterilmiş ve genel olarak elektrot tel çapının yarısı oranında olmalıdır [32].

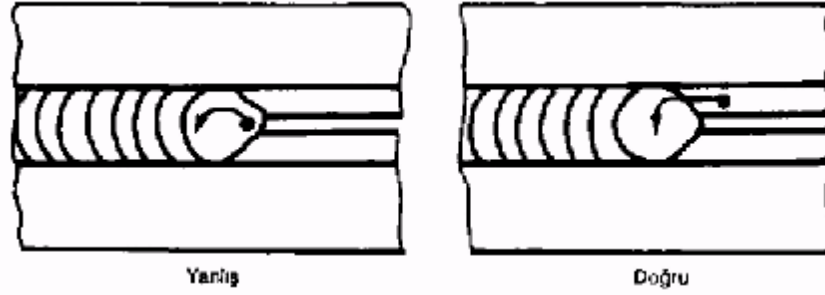


Şekil 3. 4. Bazik elektrotlarla yapılan kaynaktaki ark boyu

▪ Kaynak Arkının Tutuşturulması

Bazik elektrotlar ile yapılan kaynaklarda ark Şekil 3.5'te gösterildiği gibi daha önce bitmiş olan kaynak dikişi kraterinden 5-6 milimetre kadar ön veya yan bölgede tutuşturulmalı ve önceki elektrot ile yapılan kaynak dikişinin cürufu temizlenen krater getirilerek kaynak işlemine devam edilmelidir, yoksa kullanılan elektrot parçalarının kraterin cürufuna karışması gözenek oluşmasına sebep olur. Tutuşma, elektrot iş parçası ile temas ettirilerek ve geri çekilerek gerçekleştirilmelidir. Elektrot parçaya teğet

geçilerek kaynak yapılacak bölgeye götürülmelidir. Bu hususa dikkat edilmez ise kaynak banyosuna hava girebilir ve gözenek oluşumuna sebep olur [32].



Şekil 3. 5. Bazik elektrotlar ile kaynak yapılırken kraterin ön tarafında elektrodun tutuşturulması

▪ Kaynağın Hızı

Bazik elektrotlar ile kaynak yapılırken, kaynak hızı asit ve rutil karakterli elektrotlara göre daha küçük tutulmalıdır, aksi halde kaynak hızı yüksek olduğunda cüruf kaynak dikişini örtemez. Bazik karakterli elektrotlarda kaynak hızı asit ve rutil elektrot çeşitlerinin yaklaşık 2/3'ü oranında olmalıdır. Bu yüzden kaynak dikişi öteki elektrotlarla yapılan kaynak dikişine göre daha geniş olmaktadır. Kaynak dikişinin çok geniş istenmediği hallerde biraz daha küçük çaplı elektrotlar kullanılmalıdır [32].

▪ Cüruf Temizliği

Bazik elektrotlarla yapılan kaynaklarda cürufun temizlenmesi öteki elektrotlara göre daha zordur. Bilhassa kök paso kaynaklarında bu konu çok daha önemlidir. Kaynak hızı yüksek olan pasolardaki kaynak dikişi, cüruf tarafından tamamıyla kapatılamaz ve kenarlarda meydana gelen yanma oluklarına biriken cürufun temizlenmesi zorlaşır. Normal hız ile yapılan kaynak pasolarında daha düzgün dikiş şekli olur, cüruf tabakası ise kalın olduğu için kolayca temizlenir [32].

▪ Puntalama

Parçalar kaynak yapılmadan önce genellikle parçaların puntalanması gerekir. Puntalama için çoğu zaman elektrot artıkları kullanılmaktadır. Bazik karakterli elektrotlar şiddetli higroskopik oldukları için bu artık elektrotlarda da nem olabilmekte ve elektrodun uç tarafındaki katılaşmış cüruf pisliliği temizlenirken örtü de zarar görmektedir. Yapılan bu işlemler nedeniyle punta bağlantılarında gözenekler meydana gelmektedir. Puntalama işlemi yapılırken aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- Kaynak ile birleştirilen çelik parça uygunsa puntalama işleminde rutil elektrot kullanılmalıdır,
- Puntalarda gözenek varsa kaynak işleminden evvel taşlanarak temizlenmelidir,

- Bazik karakterli elektrotlar ile puntalama yapılmasının zorunlu olduğu durumlarda bu iş deneyimli olan kaynakçılara yaptırılmalı ve elektrot artıkları kullanmaktan kaçınılmalıdır.

Her kaynak pozisyonunda kullanılan bazik elektrotlarla yukarıda bahsedilen hususlara dikkat edilmesi ile oldukça iyi mekanik özelliklere sahip kaynak dikişleri elde etmek mümkündür [32].

3.5.5. Selülozik Elektrotlar

Bu elektrot örtülerinde yandığı vakit gaz haline geçebilen organik maddeler bulunmaktadır. Örtü ağırlığı %30 oranında selülozdan oluşur. Genelde kalın ve orta kalınlıkta örtülü olarak üretilmektedirler. Kaynak esnasında metal geçişi damlacıklar şeklinde olur. İnce örtülü üretilen elektrotlarda cürufun hareketli damlacıklara koruma etkisi çok azdır.

Bu elektrotlar ile yapılmış olan kaynak dikişi üzerinde oluşan cüruf miktarı çok azdır, sıçrama kaybı ise oldukça yüksektir. Bunun aksine bu elektrotlarla yapılan kaynak dikişlerinde aralık doldurma kabiliyeti ve nüfuziyet derinliği oldukça iyidir. Bütün pozisyonlarda kaynak yapımına uygundur. Kaynak yapılırken yanan selüloz gaz atmosferi oluşturarak kaynak dikişini çok iyi korur fakat kaynak dikişine az miktarda hidrojen girer, bu durum ise kaynak işleminde istenmeyen bir durumdur.

Örtü bileşiminde bulunan titan bileşikleri hem arkın stabilizasyonunu sağlar hem de cürufun rahatça kalkmasında önemli rol oynar. Örtüye katılan manganez, kaynak esnasında oksitlenerek eksilen manganezi tamamlar [32].

3.5.6. Demir Tozlu Elektrotlar

Bu elektrotlarda örtü malzemesi olarak büyük oranda demir tozu kullanılmaktadır. Bazı durumlarda demir tozu elektrot örtüsü ağırlığının yarısını oluşturabilmektedir. Elektrot örtüsünün özelliklerini iyileştiren demir tozu, farklı oranlarda bulunmak üzere her örtü bileşiminde bulunmaktadır. Demir tozu, bir yandan örtüye iletkenlik kazandırırken bir yandan da elektroda kontak elektrodu özelliği sağlayarak arkın stabilizasyonunu arttırmaktadır. Aynı zamanda kaynak dikişinin erime verimini de iyileştirmektedir. Kaynağın akabinde erimiş metal tartıldığı zaman elektrot çekirdek telinden ağır olduğu görülür; çünkü örtü bileşiminde bulunan demir tozu eriyip dikişe karışmaktadır. Demir tozlu elektrot çeşitlerinde erime verimi %120'nin üzerindedir, bu yüzden bu elektrotlara aynı zamanda yüksek verimli elektrotlar da denilmektedir [32].

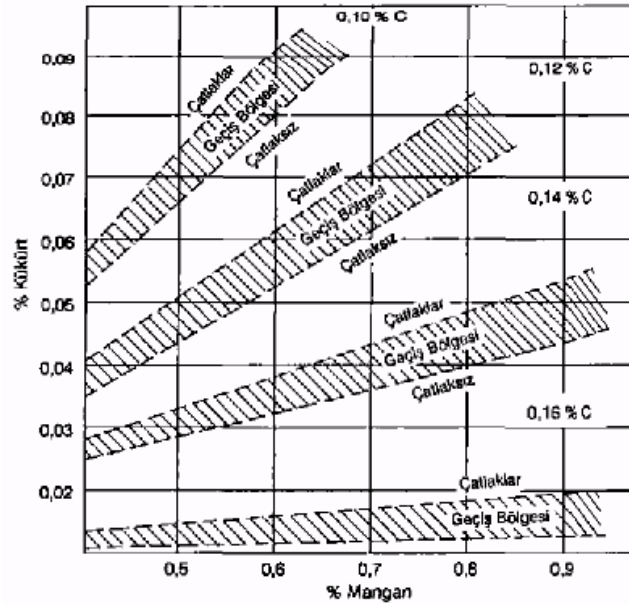
3.5.7. Derin Nüfuziyet Elektrotları

Bu elektrotlarla kalın saclara kaynak ağzı açmadan iki tarafından birer paso çekerek alın kaynağı yapılabilir. Bu gibi durumlarda her iki taraftaki kaynak pasosunun sacın yarı kalınlığından büyük olması gerekiyor. Derin nüfuziyet elektrotları genellikle kalın örtülü olarak üretilirler [32].

3.5.8. Elektrot Çekirdek Teli Malzemesi

Düşük karbonlu çeliklerin kaynağında kullanılan örtülü elektrotlardaki çekirdek tellerinin bileşimi, kaynak dikişinin istenen özelliklerde olabilmesi için belirli sınırlar içinde olmalıdır. Alaşım ve gayri safiyet elementlerinin fazla olması dikişin mekanik özelliklerine zararlı etkisi olur. Çekirdek teli bileşiminde kükürdün fazla olması dikişte gözenek aynı zamanda çatlak oluşumuna neden olur, bu yüzden elektrot tellerinde kükürdün mümkün olduğunca az tutulması gerekir. Karbon, manganez ve silisyumun da belirli bir miktarda olması gerekir.

Karbonun fazla olması, kaynakta çatırdamalara ve kıvılcımların etrafa sıçramasına neden olur. Dolayısıyla kaynakçı kaynak yaparken kaynak banyosuna hâkim olamaz. Çekirdek teli bileşiminde alaşım elementlerinin belli bir miktarın üstünde olması dikişte istenmeyen martenzit fazının oluşumuna sebep olur. Kükürt, manganez ve karbon miktarının kaynak dikişinde oluşacak çatlamaya etkileri Şekil 3.6'da gösterilmiştir [32].



Şekil 3. 6. Kükürt, manganez ve karbon miktarının çatlamaya etkisi

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Deneysel Çalışmanın Amacı

Dünyada demir-çelik üretimi esnasında meydana gelen yüksek fırın cürüfları, işletmelere hem yer işgali açısından sorun oluşturmakta hem de içerdiği kimyasallar nedeniyle zararlı çevresel etkilere (su ve toprak kirliliği) neden olmaktadır. Yüksek fırın cürüfları her ne kadar çeşitli kullanım alanlarına sahip olsa da bunlar yetersiz seviyede kalmaktadır. 2015 yılında, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve Türkiye Çelik Üreticileri Derneği tarafından yayınlanan demir-çelik cüruf raporuna göre Türkiye’de yıllık yaklaşık 55.000 ton yüksek fırın cürufunun geri kazanımının yapılamadığı belirtilmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı yüksek fırın cürüflarının flaks bileşeni olarak rutil tipteki örtülü elektrot üretilebilirliği ve kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu doğrultuda tez çalışmasının kapsamı yüksek fırın cürufu içeren rutil tipte örtülü elektrotların üretimi, üretilen elektrotların elektrik ark kaynağı yöntemi ile AISI 1020 çelik plakalar üzerine kaynak testlerinin gerçekleştirilmesi ve üretilen elektrotların çeşitli analiz ve test yöntemleri kullanılarak karakterize edilmesi şeklindedir.

4.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Örtülü elektrot üretiminde kullanılan ve elektrot örtüsünün altında çekirdek görevi gören teller DIN 17145 standardına göre filmaşinden soğuk haddeleme yöntemi ile üretilen Ø3,25 mm çapında ve 350 mm uzunluğundaki tellerdir. DIN 17145 standardına göre üretilen filmaşin tellerin kimyasal kompozisyonları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4. 1. Filmaşin tel kimyasal analizi

Malzeme	C	Si	Cu	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
Filmaşin Tel (% ağı.)	0,081	0,022	0,089	0,544	0,009	0,011	0,046	0,041	Kalan

Örtülü elektrot üretiminde çekirdek görevi gören Ø3,25 mm çapında ve 350 mm uzunluğundaki filmaşın teller Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 1. Örtülü elektrot üretiminde kullanılan filmaşın teller

Yüksek fırın cürufu içeren rutil tipteki örtülü elektrot üretiminde örtü pastasındaki hammaddeler Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4. 2. Elektrot örtü bileşiminde kullanılan hammaddeler

Örtü bileşenleri Numara	% ağırlıkça						
	Yüksek fırın cürufu	TiO ₂ - Rutil	CaCO ₃ - MgCO ₃	Selüloz	FeMn	Feldispat- SiO ₂	Demir tozu
1	50	35	0-5	2-5	0-15	2-15	0-5
2	45	40	0-5	2-5	0-15	2-15	0-5
3	40	45	0-5	2-5	0-15	2-15	0-5
4	35	50	0-5	2-5	0-15	2-15	0-5

Örtü bileşiminde yüksek fırın cürufu haricinde, cüruf oluşturucu feldispat ($KAlSi_3O_8$ – $NaAlSi_3O_8$ – $CaAl_2Si_2O_8$), kuvars (SiO_2), rutil (TiO_2), gaz oluşturarak koruyucu atmosfer oluşturan hammaddeler olarak, kalsit ($CaCO_3$) veya dolomit ($CaMg(CO_3)_2$) ve selüloz ($C_6H_{10}O_5$), deoksidan ve alaşımlama amaçlı kullanılacak hammadde olarak düşük karbonlu ferromangan (FeMn:%75 Mn, %0.2-0.7 C) bağlayıcı özellikte sodyum silikat ($Na_2(SiO_3)$) ve potasyum silikat (K_2O_3Si) ve elektrot verimini arttırmak için % 99 saflıkta demir tozu kullanılmıştır.

Elektrot örtüsünde kullanılan yüksek fırın cürufu Ciner İnşaat ve Taşımacılık Ltd. Şti. firmasından temin edilen İskenderun Demir ve Çelik A.Ş ürünüdür. Yüksek fırın cürufu Ciner İnşaat ve Taşımacılık Ltd. Şti. firmasından kayaç halinde ve granüle formda temin edilmiş olup kullanılmadan önce -100 mikron tane boyutuna gelecek şekilde öğütülmüştür. Kayaç ve toz halindeki yüksek fırın cürufu Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 2. Yüksek fırın cürufu

İskenderun Demir ve Çelik A.Ş. firmasına ait yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu Tablo 4.3’de verilmiştir. Kimyasal analiz sonuçları Ciner İnşaat ve Taşımacılık Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir.

Tablo 4. 3. Yüksek fırın cürufu kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Kompozisyon (% ağırlıkça)									
SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	Diğer
39±0.5	37.50±0.40	12.40±0.20	5±0.10	1.60±0.20	0.90±0.10	0.40±0.5	0.4±0.05	0.7±0.05	Kalan

Üretilen örtülü elektrotların kaynağı için altlık malzeme olarak 20x150x3 mm ölçülerindeki AISI 1020 çelik plakalar kullanılmıştır. Örtülü elektrotların kaynak işlemi için kullanılan AISI 1020 çelik plakanın kimyasal analizi Tablo 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4. 4. AISI 1020 çelik plakaya ait kimyasal kompozisyon

Malzeme	C	Mn	Si	S	Cr	P	N	Fe
AISI 1020 (% ağı.)	0,20	0,4	0,001	0,022	0,064	0,026	0,1	Kalan

4.3. Örtülü Elektrot Üretimi

Örtülü elektrot üretimindeki temel prensip, filmaşından üretilmiş çekirdek görevi gören tel ile bu telin üzerine saran örtü kaplamasıdır. Örtülü elektrottaki çekirdek tel hem kaynak işlemi için gerekli olan kaynak akımını elektrot üzerinden ileterek ark oluşturur hem de eriyerek gerekli kaynak metalini sağlar. Çekirdek telin kimyasal bileşiminde tercih edilen alaşım çeşidine göre kaynak dolgusuna alaşım takviyesi yapmak da mümkündür. Bundan dolayı örtülü elektrotlarda alaşımlama, hem çekirdek tel hem de örtü bileşimi tarafından sağlanmaktadır.

Tez çalışmasında örtülü elektrot üretimindeki ilk aşama örtüyü oluşturan bileşenlerin kuru olarak 15 dakika süreyle karıştırılmasıdır. Örtü bileşiminde kullanılan malzemeler Z bıçak sistemine sahip döner karıştırıcılarda 15 dakika boyunca homojen olarak kuru karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonrasında toz karışımına %5-25 oranında bağlayıcı ve eser miktarda su ilave edilerek 15 dakika süreyle elde edilen karışım yaş olarak karıştırılmıştır.

Yaş karıştırma işlemi sonrasında pasta haline gelen örtü malzemesi ve çekirdek tel Şekil 4.3'te gösterilen örtülü elektrot üretimi için hazırlanan kalıp içerisinde konularak uygulama için en uygun hale getirilmiştir. Bu esnada pastanın kalıba yapışmaması için kalıbın her iki yüzüne gelecek şekilde ara katmana naylon veya plastik poşet düz olacak şekilde yerleştirilmiştir. Böylece tekrarlı uygulamalar için hem pratiklik oluşmuş hem de temizlik sorunu ortadan kalkmıştır.



Şekil 4. 3. Örtülü elektrot üretimi için kullanılan kalıp

Şeffaf plastik, elektrot örtü malzemesi ve çekirdek tel örtülü elektrot üretimi için hazırlanan kalıp içerisine yerleştirildikten sonra İmer Çelik Makine & Kalıp Sanayi firması tarafından imal edilen presleme makinesinde (Şekil 4.4) 150 bar basınç altında sıkıştırma işlemi yapılarak örtülü elektrot üretiminin ilk aşaması tamamlanmıştır. Kalıptan çıkan elektrotların tipik görüntüsü Şekil 4.5'te verilmektedir.

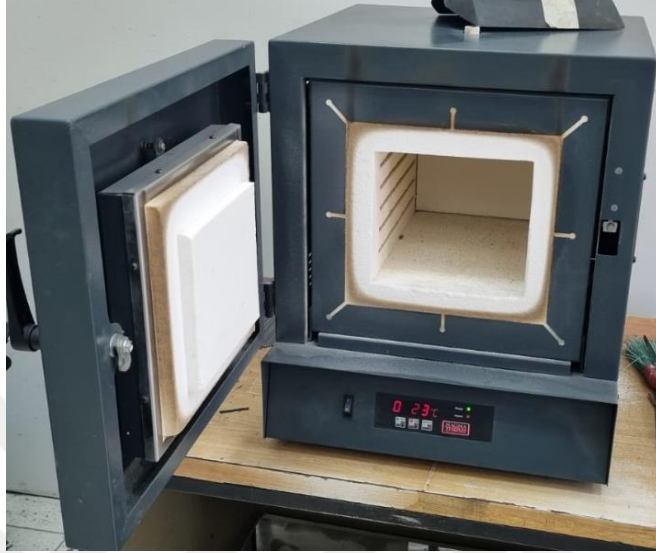


Şekil 4. 4. Örtülü elektrot üretiminde kullanılan presleme makinesi



Şekil 4. 5. Presten çıkan elektrodun ilk görüntüsü

Kalıptan çıkarılan elektrotların örtü çapının dışında kalan fazlalıkları temizlendikten sonra 24 saat açık atmosferde kurumaya bırakılmıştır. Sonrasında ise MTS-1200-10-Px model ve ST10-231110-01 nolu Magma Therm marka laboratuvar fırın içerisinde 150° C’de 2 saat süre ile pişirme işlemi uygulanarak elektrot üretimi tamamlanmıştır (Şekil 4.6).



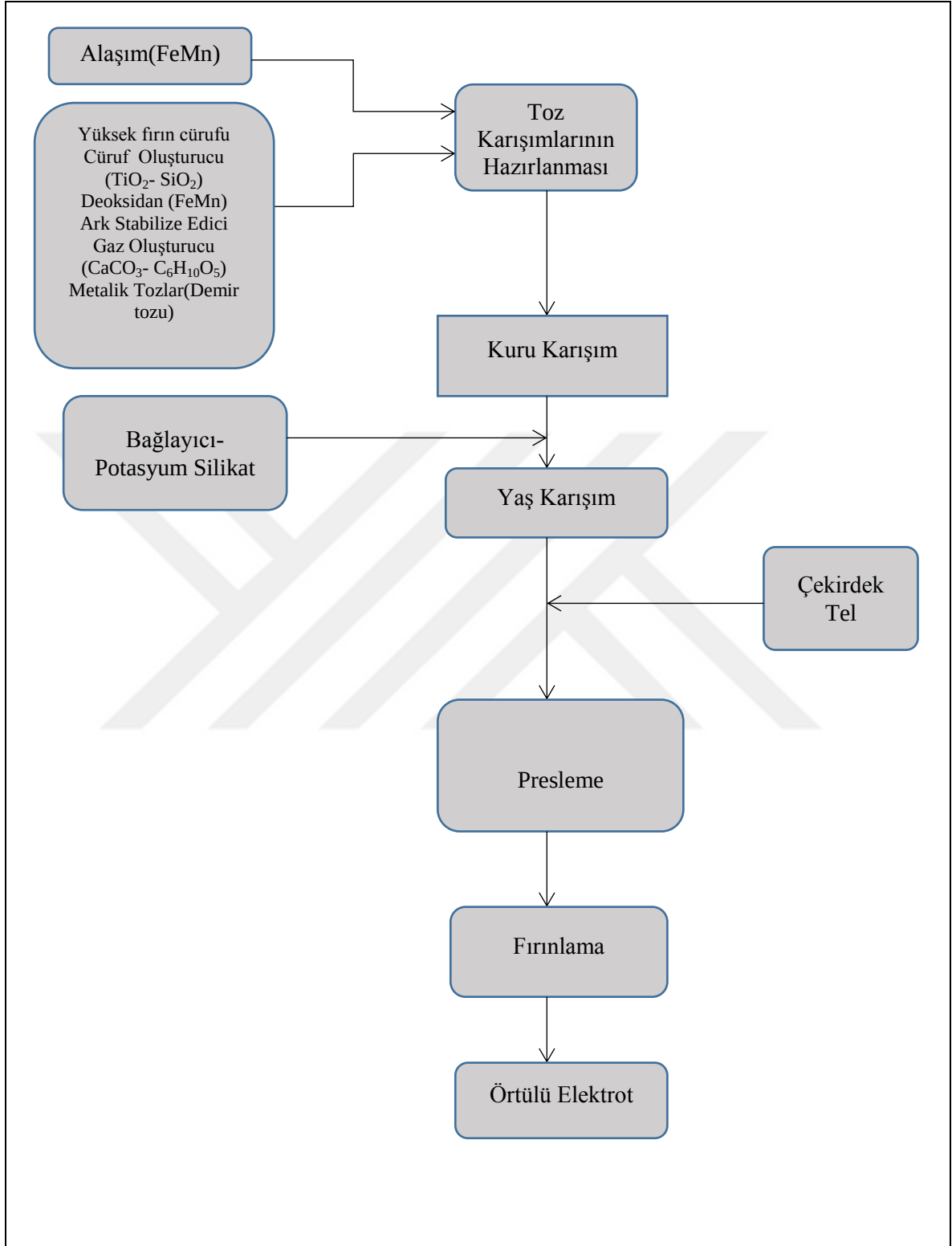
Şekil 4. 6. Magma therm laboratuvar fırını

Kalıpta-presleme yöntemiyle üretilen elektrotların tipik görselleri Şekil 4.7.’de verilmektedir.



Şekil 4. 7. Kalıpta presleme yöntemi ile üretilen örtülü elektrotların tipik görselleri

Şekil 4.8’de yüksek fırın cürufu içeren rutil tipte örtülü elektrot üretimine dair akış şeması verilmektedir.



Şekil 4. 8. Yüksek fırın cürufu içeren örtülü elektrot üretim şeması

4.4. Üretilen Yüksek Fırın Cürufu İçeren Örtülü Elektrotlarla Kaynak Testlerinin Yapılması

Kalıpta-presleme yöntemi ile üretilen rutil tipteki örtülü elektrotlar ile 20x150x3 mm ebatlarındaki AISI 1020 çelik plaka üzerine Şekil 4.9.'da verilen Magmaweld Megastick 200i marka ve model numaralı kaynak makinesi kullanılarak tek paso halinde kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. 9. Magmaweld kaynak makinesi

Kaynak testlerinde kullanılan kaynak parametreleri Tablo 4.5’de verilmektedir.

Tablo 4. 5. Kaynak parametreleri

Parametreler	Özellikler
Elektrot Çeşidi	Rutil Elektrot
Elektrot Örtü Çapı (Dış Çap)	5.17 mm
Elektrot Çekirdek Tel Çapı	3,25 mm
Kaynak Makinesi	Magmaweld
Akım	80 A
Kaynak Açısı	45°
Kutup	(+)
Malzeme	AISI 1020
Malzeme Ebatları	20x150x3 mm

AISI 1020 çelik plaka üzerine tek paso ile yapılan kaynak görselleri Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te gösterilmiştir.



Şekil 4. 10. Numune 1 kaynak dikişi görüntüsü



Şekil 4. 11. Numune 2 kaynak dikişi görüntüsü



Şekil 4. 12. Numune 3 kaynak dikişi görüntüsü



Şekil 4. 13. Numune 4 kaynak dikişi görüntüsü

4.5. Üretilen Rutil Tipteki Örtülü Elektrotların Karakterizasyonu

4.5.1. Üretilen Rutil Tipteki Örtülü Elektrotların Çıplak Gözle Muayene Yoluyla Karakterizasyonu

Yapılan kaynak testleri esnasında üretilecek örtülü elektrotların ark kararlılığı, telin yanma özelliği, sıçrama, cürufun kaynak metali üzerindeki düzgünlüğü, cürufun kendiliğinden kalkması, dikiş görüntüsü ve telin ergimesi-yayılması gibi parametrelerde çıplak gözle muayene yoluyla karakterize edilerek 1-10 arasında puanlanmıştır. Üretilen örtülü elektrotların kaynak öncesi ve kaynak sonrası elde edilecek cüruf ve kaynak metali verileri Tablo 4.6’da verilen performans kriterleri baz alınarak puanlama yoluyla değerlendirilmiştir. Tablo 4.6’ya göre 1-4 arasında puan alanlar “başarısız”, 5-6 arasında puan alanlar “geliştirilebilir” ve 7-10 arasında puan alanlar ise “başarılı” olarak değerlendirilecektir [35-37].

Tablo 4. 6. Örtülü Elektrotların Uygulama Performans Kriterleri

Puan	Ark kararlılığı	Elektrodun yanma performansı	Sıçrama	Cürufun düzgünlüğü	Cürufun kalkması	Dikiş görüntüsü	Koku ve duman	Dikişte gözenek
1-2	Kötü	Çok zor	Çok fazla	Çok kötü	Çok zor	Mat	Çok fazla	Çok fazla
3-4	Orta	Zor	Fazla	Kötü	Zor	Az parlak	Fazla	Fazla
5-6	İyi	Orta	Orta	Orta	Kolay	Orta	Orta	Orta
7-8	Çok iyi	Kolay	Çok az	İyi	Çok kolay	Parlak	Az	Az
9-10	Mükemmel	Çok kolay	Yok	Çok iyi	Kendiliğinden	Çok parlak	Çok az	Yok

4.5.2. Mikroyapı, X-Işını ve Kimyasal Kompozisyon Analizleri

20x100x3 mm ebatlarında kaynak testi yapılan parçalar 20x5x3 mm ebatlarında kesilerek mikroyapı incelemelerinde kullanmak amaçlı metalografik işlem basamaklarına tabi tutulmuştur. Bu kapsamda, sırasıyla 80, 200, 400, 600, 800 ve 1200 grid numaralı zımparalar ile zımparalandıktan sonra 3µm ve 1µm’lik elmas pasta solüsyonu ile çuha kullanarak parlatma işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 4.14). Parlatma işleminden sonra mikro yapıların ortaya çıkarılması için dağlama işlemi %2 nital (%98 etil alkol, %2 nitrik asit) çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. 14. Zımparalama ve parlatma amaçlı kullanılan diskler

Dağlanan numunelerin mikroyapı incelemeleri TRONIC XJL-17AT marka ve modele sahip ters trinoküler metalürji optik mikroskoku vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Kaynak metallerinin kimyasal kompozisyon analizlerinde ise, optik emisyon spektrometresi ve Joel JMS-7001F IncX-Act marka ve modele sahip elektron mikroskopunun SEM-EDX yöntemiyle analizleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak metalinin XRD faz tayinlerinde ise, Rigaku RadB-Dmax2 cihazından yararlanılmıştır.

4.5.3. Sertlik Ölçümleri

20x5x3 mm ebatlarında mikro yapı karakterizasyonu amaçlı hazırlanan numuneler, sertlik ölçümlerinde de kullanılarak sertlik ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.15). Sertlik ölçümleri kaynak metalinin 5 farklı bölgesinden alınan sertlik sonuçlarının ortalaması alınarak belirlenmiştir. Sertlik ölçümlerinde, Tronic marka DHV-1000 modeli Dijital Vickers Sertlik Ölçüm Cihazında 9.8 Newton yük uygulanarak sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. 15. Sertlik ölçümleri ve mikroyapı karakterizasyonu amaçlı hazırlanan numune görselleri

4.5.4. Çekme Testi

Akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzama oranını tespit etmek amaçlı gerçekleştirilen testler, Mohr+Federhaff+Losenhausen markalı azami 400 kN kapasiteli çekme

test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde 50 kN' a kadar uygulanan yükler kullanılarak otomatik olarak ölçümler yapılmıştır. Çekme test numuneleri 20x100x3 mm ebatlarında ve bead-on-plate olacak şekilde plaka üzerine çekilen kaynak dikişinin referans numune ile karşılaştırması yapılarak gerçekleştirilmiştir. Çekme testlerinde altlık malzemenin etkisini belirlemek için altlık malzeme referans numune olarak belirlenmiş olup, elde edilen sonuçlar referans numune ile karşılaştırılmıştır. Çekme testlerinde kullanılan test numunelerinin görselleri Şekil 4.16'da verilmektedir.



Şekil 4. 16. Çekme testlerinde kullanılan test numunelerin tipik bazı görselleri

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Üretilen Rutil Tipteki Örtülü Elektrotların Çıplak Gözle Muayene Yoluyla Elde Edilen Karakterizasyon Sonuçları

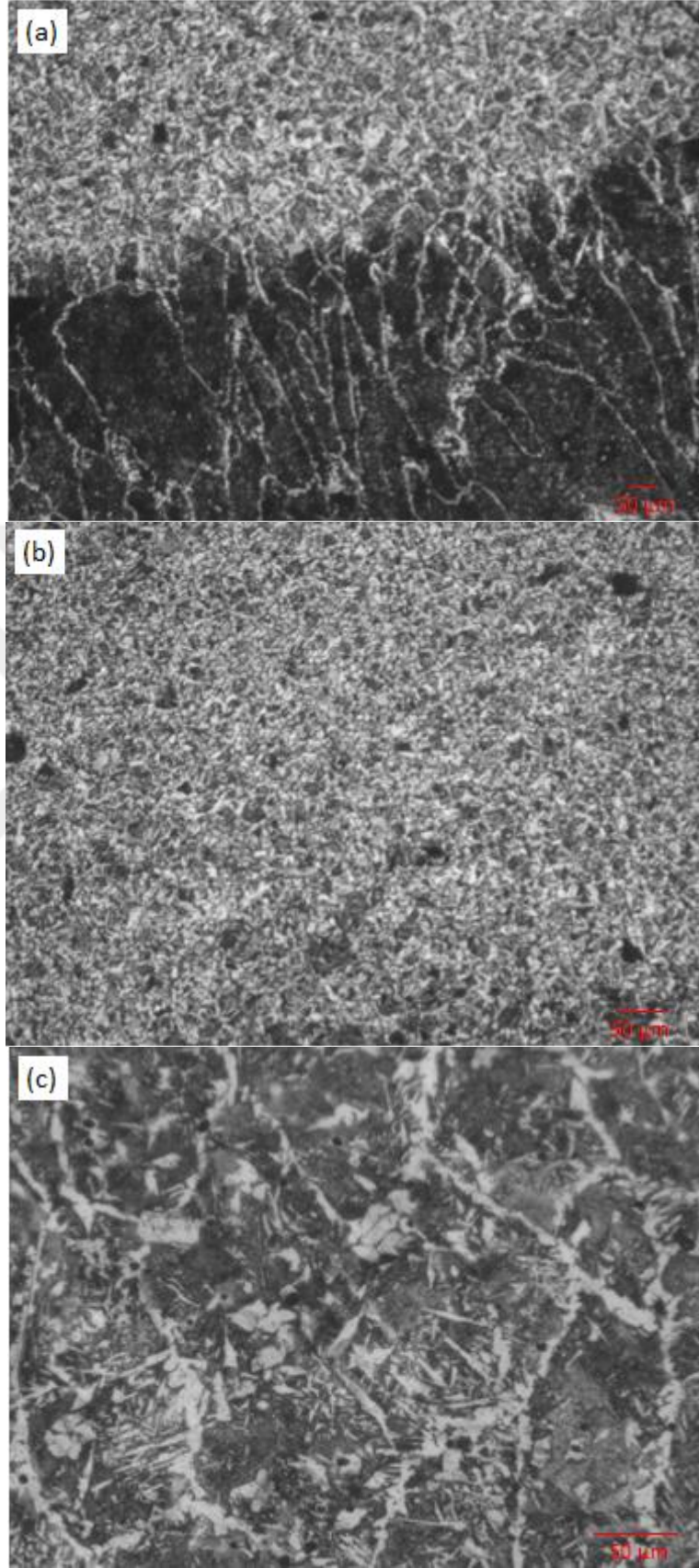
Yüksek fırın cürufu içeren rutil tipteki örtülü elektrotların çıplak gözle yapılan muayene sonuçları Tablo 5.1’de verilmektedir. Görüldüğü üzere; üretilen yüksek fırın cürufu katkılı rutil elektrotların ark kararlılığının çok iyi seviyede, yanma performansının çok iyi seviyede, kaynak testi esnasında meydana gelen sıçrama miktarının orta ve çok az seviyede, kaynak sonrası oluşan cürufun düzgünlüğünün orta seviyede, kaynak sonrası oluşan cürufun kaynak metalinden kalkma davranışının çok kolay seviyede, kaynak metalinin parlaklık açısından görüntüsünün parlak ve çok parlak seviyede, kaynak testi esnasında oluşan koku ve duman miktarının az seviyede ve kaynak metalinde oluşan gözenek varlığının ise az ve yok seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu durum, literatürdeki çalışmalar ve ticari piyasadaki Askaynak, Gedik Kaynak ve Magmaweld gibi üreticilerin beyan ve sonuçları ile büyük oranda paralellik göstermektedir [6-8]. Literatür ve ticari piyasaya göre, kaynak sonrası oluşan cürufun gözenekli ve düzgünlüğünün kısmi olarak düşük olması üretilen elektrotların negatif yanlarını oluştururken, diğer parametrelerde literatür ve ticari piyasa parametreleriyle benzer sonuçlar vermesi de pozitif yanlarını oluşturmaktadır.

Tablo 5. 1. Üretilen elektrotların uygulama performans kriterleri

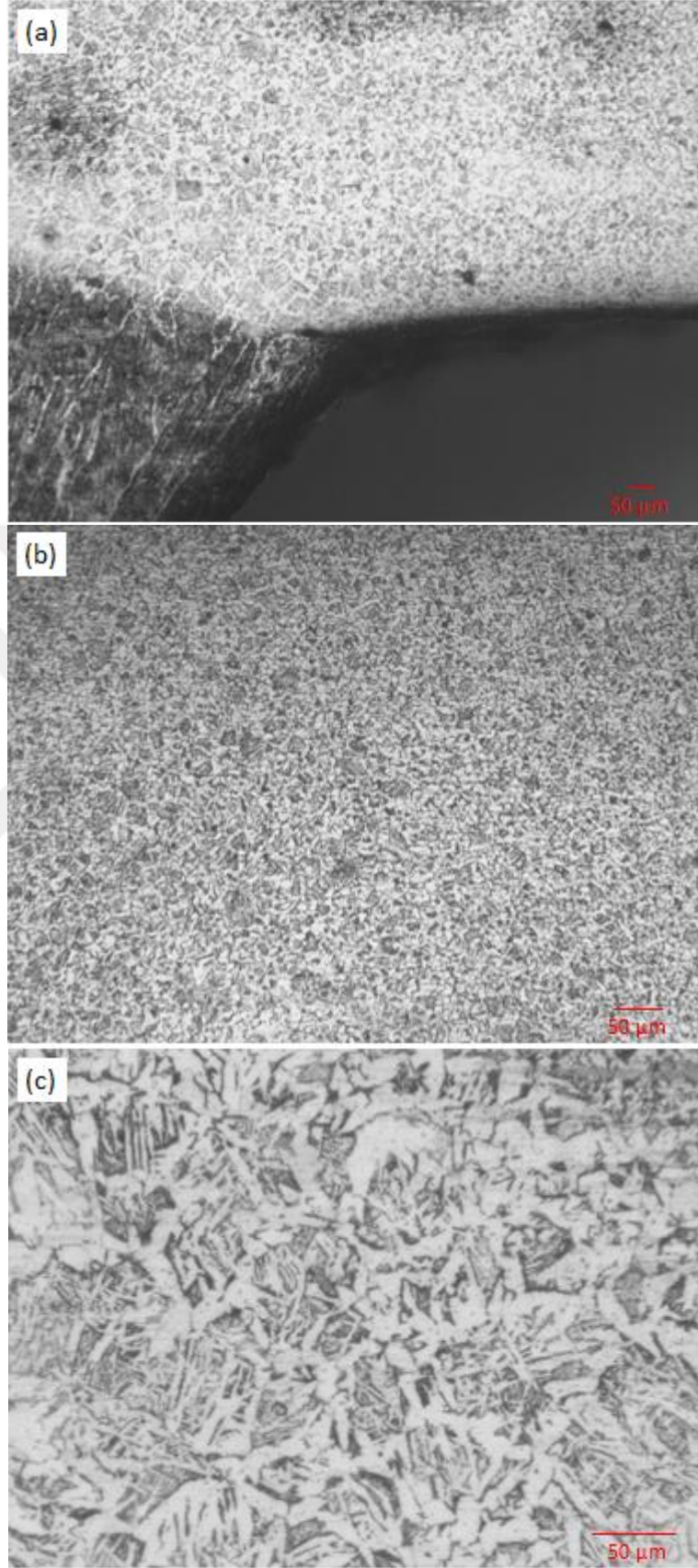
Puan	Ark kararlılığı	Elektrodun yanma performansı	Sıçrama	Cürufun düzgünlüğü	Cürufun kalkması	Dikiş görüntüsü	Koku ve duman	Dikişte gözenek
1-2	Kötü	Çok zor	Çok fazla	Çok kötü	Çok zor	Mat	Çok fazla	Çok fazla
3-4	Orta	Zor	Fazla	Kötü	Zor	Az parlak	Fazla	Fazla
5-6	İyi	Orta	Orta	Orta	Kolay	Orta	Orta	Orta
7-8	Çok iyi	Kolay	Çok az	İyi	Çok kolay	Az	Az	Az
9-10	Mükemmel	Çok kolay	Yok	Çok iyi	Kendiliğinden	Çok az	Çok az	Yok
Numune No	Ark kararlılığı	Elektrodun yanma performansı	Sıçrama	Cürufun düzgünlüğü	Cürufun kalkması	Dikiş görüntüsü	Koku ve duman	Dikişte gözenek
1	8	8	6	6	8	9	7	9
2	9	8	7	6	8	9	7	9
3	9	8	8	6	8	9	7	8
4	9	8	8	6	8	8	7	8

5.2. Mikroyapı, XRD ve Kimyasal Analiz Sonuçları

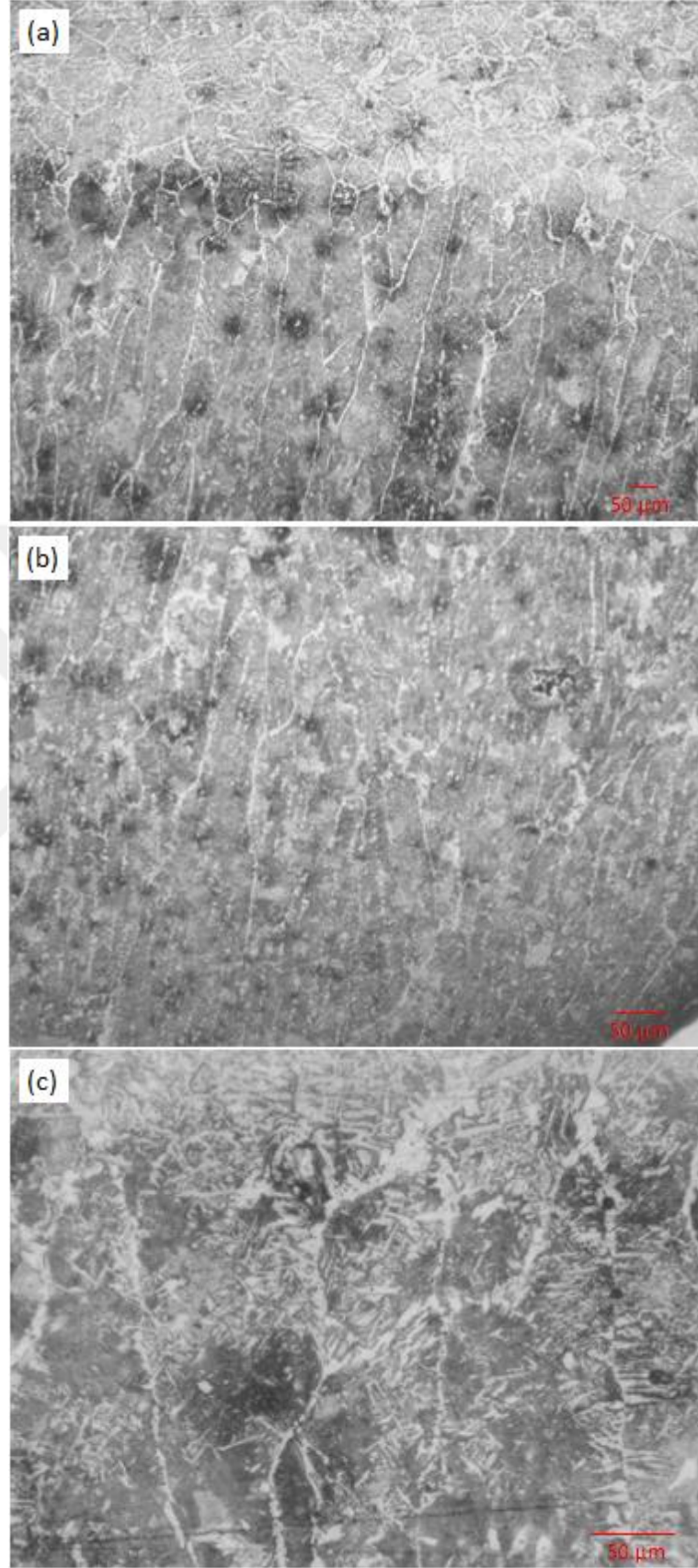
Üretilen rutil elektrotlarla yapılan kaynak testleri neticesinde elde edilen kaynak metallere alınan mikroyapı sonuçları Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te, piyasadan temin edilen Magmaweld marka rutil elektrot ile yapılan kaynak metalinin mikroyapısı ise Şekil 5.5'te verilmektedir. Görüldüğü üzere, mikro yapılarda kararlı olan yapılar beklendiği şekilde yüksek oranda ferrit fazı içeren (ferrit+perlit) faz/faz karışımı şeklindedir. Bu durum, Şekil 5.6'da verilen 1 ve 4 numaralı numunelerden alınan XRD analiz sonuçları ve Tablo 5.2'de verilen kimyasal kompozisyon analiz sonuçları ile de desteklenmektedir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer konu kapsamındaki çalışma sonuçları ve ticari piyasadaki firmaların beyanları ve TS EN ISO 2560-1A (2020) Türk standardı ile de uyumaktadır [6-8,34]. Kimyasal kompozisyon analizlerinde kükürt (S), fosfor (P), mangan (Mn), silis (Si) değerleri standartlarla uyumlu iken, karbon (C) miktarı standartlardan yüksek çıkmıştır. TS EN ISO 2560-1A (2020) Türk standardı ağırlıkça ≤ 0.12 C miktarını belirtirken, sırasıyla 1 den 4 nolu numunelere doğru 0.22, 0.20, 0.19 ve 0.21 C şeklinde sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, filmanın telin kimyasal kompozisyonundaki karbon değerinin beklenenden yüksek olmasıyla, gaz oluşturuşu olarak selüloz kullanımıyla, kısmi olarak AISI 1020 substratın seyreltme etkisiyle ve düşük karbonlu FeMn içerisindeki karbonların kaynak metaline geçme ihtimali ile açıklanabileceği öngörülmektedir[6-8]. Öte yandan, SEM-EDX ile yapılan kaynak metal oksijen analizlerinde, ağırlıkça %1.41 ile 0.24 arasında değerler elde edilmiş olup, artan yüksek fırın cürufu kullanımının kaynak metalindeki oksijen seviyesini arttırdığı tespit edilmiştir. Bu durum, rutil miktarı artışının ve aynı miktardaki deoksidan kullanımının oksijen seviyesini düşürmesi ile açıklanmaktadır. Öte yandan, AISI 1020 çeliğinin ise ağırlıkça % 1.39 oranında oksijen içerdiği tespit edilmiştir. Kimyasal analizlerdeki azot (N) miktarı ise göz ardı edecek seviyede olduğu tespit edilmiştir.



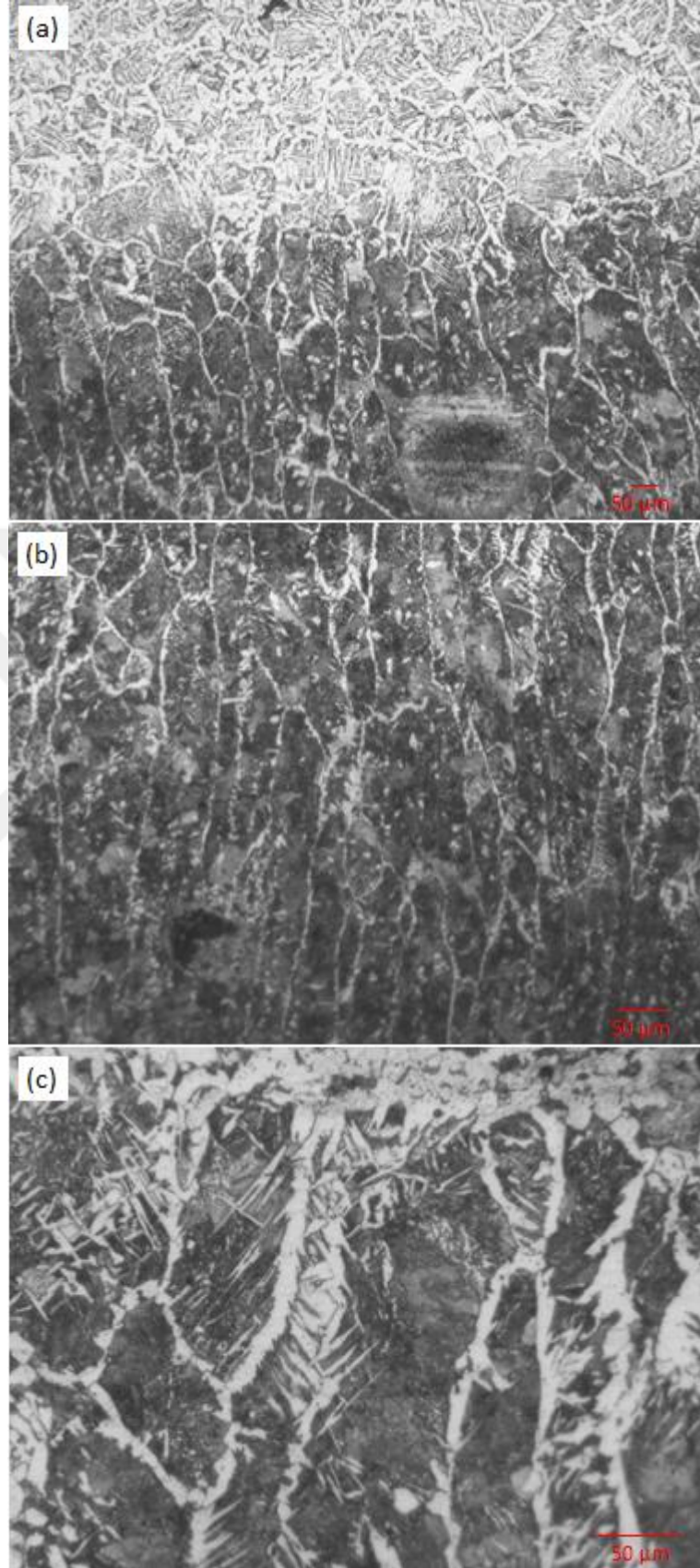
Şekil 5. 1. 1 nolu numunenin mikro yapı fotoğrafları a) geçiş bölgesi b-c) kaynak metali



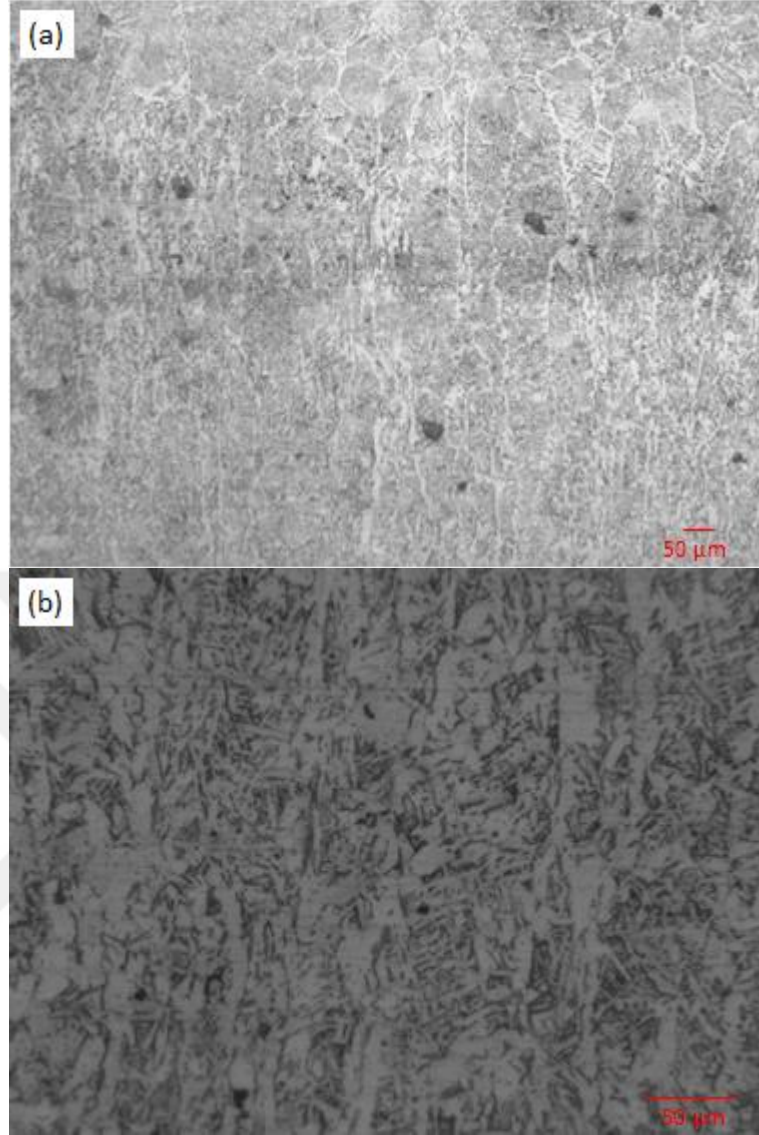
Şekil 5. 2. 2 nolu numunenin mikro yapı fotoğrafları a) geçiş bölgesi b-c) kaynak metali



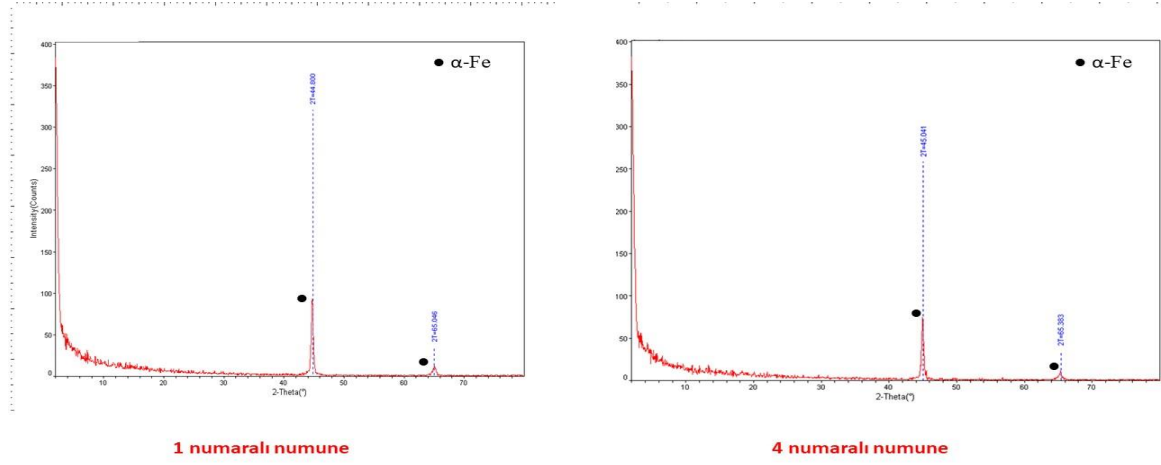
Şekil 5. 3. 3 nolu numunenin mikro yapı fotoğrafları a) geçiş bölgesi b-c) kaynak metali



Şekil 5. 4. 4 nolu numunenin mikro yapı fotoğrafları a) geçiş bölgesi b-c) kaynak metali



Şekil 5. 5. Magmaweld rutil elektrodun mikro yapı fotoğrafları a) geçiş bölgesi b) kaynak metali



Şekil 5. 6. 1 ve 4 nolu elektrotlarla elde edilen kaynak metallerinin XRD analiz sonuçları

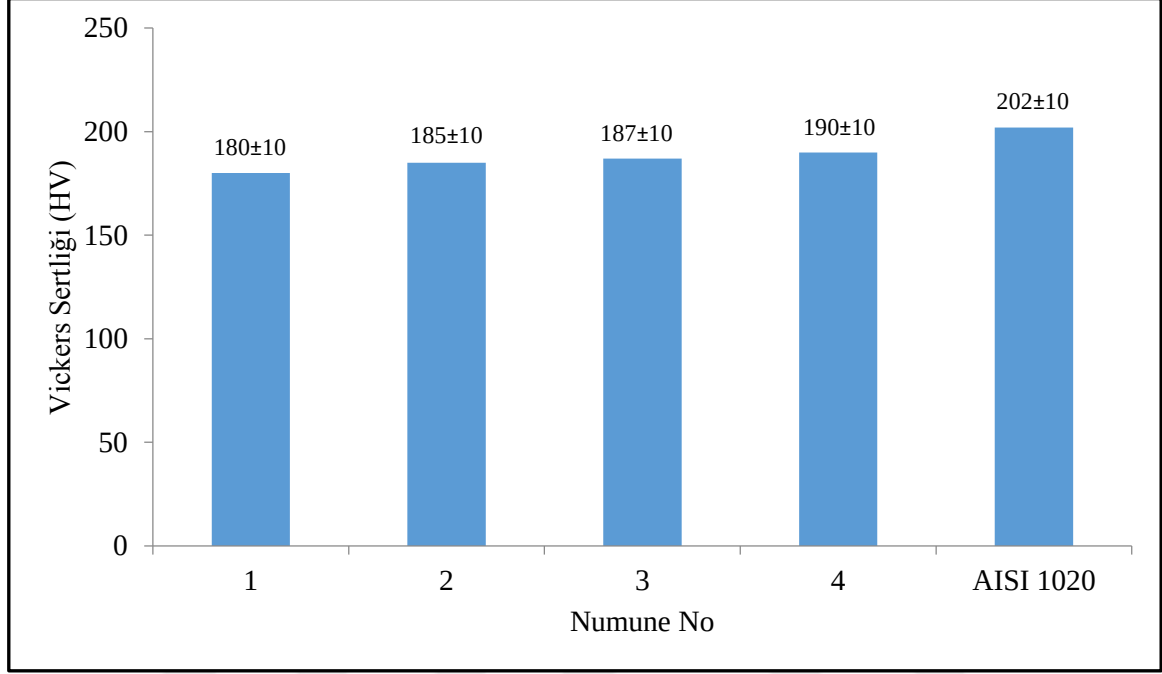
Tablo 5. 2. Kaynaklı test numunelerden alınan kimyasal analiz sonuçları

Numune No	S	P	Si	Mn	C	O	N	Fe
1	0,03	0,04	0,39	0,58	0,22	1,41	0,01	Kalan
2	0,04	0,01	0,33	0,70	0,20	0,68	0,01	Kalan
3	0,03	0,01	0,36	0,64	0,19	0,24	0,01	Kalan
4	0,03	0,06	0,33	0,58	0,21	0,57	0,01	Kalan
AISI 1020	0,04	0,04	0,12	0,50	0,19	1,39	0,01	Kalan

* SEM-EDX yöntemiyle gerçekleştirilen oksijen(O) ve azot(N) ölçüm sonuçları yarı kantitatif deney sonuçları olup, bu sonuçlar sadece karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır

5.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Tronic DHV- 1000 Dijital Vickers Sertlik Ölçüm Cihazında 9.8 Newton yük uygulanarak 5 farklı bölgeden alınan ortalama sonuçlar alınarak belirlenen sertlik ölçüm sonuçları Şekil 5.7’de verilmektedir.



Şekil 5. 7. Kaynak metalinden alınan sertlik ölçüm sonuçları.

Görüldüğü üzere; rutil tipteki örtülü elektrotlarla yapılarak elde edilen kaynak metallerinin sertlik ölçüm sonuçları 180 HV ile 190 HV değerleri arasında değişmektedir. Bu değerler, beklenen sonuçlar olup standartlar ve ticari piyasa açısından ideal sonuçlara yakın sonuçlardır. Öte yandan, sertlik sonuçları standartlarda ele alınan bir parametre olmayıp, diğer karakterizasyon ve testleri doğrulama amacıyla bu çalışma kapsamında ilave olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, altlık malzeme olarak kullanılan AISI 1020 çeliğinin sertlik sonuçları diğer 4 kaynak metali sertlik ölçüm sonucuna benzer sonuç vermektedir.

5.4. Çekme Test Sonuçları

UTEST UTM-3000 markalı universal çekme test cihazı ile 50 KN’ a kadar uygulanan yüklerle yapılan çekme test sonuçları Tablo 5.3’te verilmiştir. Görüldüğü üzere; akma dayanımı değerleri sırasıyla 497, 502, 507, 511 (N/mm²) aralığında, çekme dayanımı değerleri ise sırasıyla 580, 589, 594, 600 (N/mm²) aralığındadır. % uzama değerleri ise, sırasıyla %20, %21, %21, %21 şeklinde ölçülmüştür. TS EN ISO 2560-1A (2020) Türk standardı Akma dayanımına ve 47 J

darbe enerjisine göre yaptığı sınıflandırmada, akma dayanımını ≥ 380 (N/mm²), çekme dayanımını 470-600 (N/mm²) aralığında ve % uzama (A5) değerini de ≥ 20 olarak belirtilmektedir. Görüldüğü üzere; kaynak metalinden alınan akma ve çekme dayanımı değerleri beklenen asgari akma dayanımından oldukça yüksek, çekme değerinin en üst noktasına yakın ve uzama değerlerimiz de asgari uzama değerinin en alt seviyesinde olduğu görülmektedir [6-8,34].

Bu perspektifte, akma ve çekme dayanımı değerlerinin beklenenden yüksek çıkması ve yüzde uzama değerlerinin düşük çıkması durumunun, kaynak metallerindeki karbon miktarının beklenenden yüksek çıkmasıyla, kükürt ve fosfor kimyasal kompozisyon sonuçlarının TS EN ISO 2560-1A (2020) standardının akma dayanımına ve 47 J darbe enerjisine göre verdiği sınır değerlerde olması (standartın verisi % S: ağırlıkça ≤ 0.035) (P: % ağırlıkça ≤ 0.040) ve her ne kadar standartlarda belirtilmese de oksijen seviyelerindeki yükseklikle doğrudan ilişkili olduğu öngörülmektedir [6-8,34].

Tablo 5. 3.Numunelerin test sonuçları

Numune No	Akma Dayanımı N/mm ²	Çekme Dayanımı N/mm ²	% Uzama miktarı
1	497	580	20
2	502	589	21
3	507	594	21
4	511	600	21
AISI 1020	450	590	26

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında; rutil tipte yüksek fırın cürufu içeren 4 farklı örtülü elektrot üretilmiştir. Üretilen elektrotlar kaynak testleri yapılarak, görsel analizlerle, mikroyapı, sertlik, kimyasal kompozisyon, XRD ve çekme testleri gibi mekanizmalar kullanılarak karakterize edilmiştir. Karakterizasyon yoluyla edilen sonuçlar, TS EN ISO 2560-1A (2020) Türk standardı ile karşılaştırılarak üretilen elektrotların performansı belirlenmiştir. Buna göre;

- 1- Üretilen rutil tipteki yüksek fırın cürufu içeren örtülü elektrotların, kimyasal kompozisyon analizinde karbon elementi miktarının yüksek olması dışında, TS EN ISO 2560-1A (2020) standardına büyük oranda uygun sonuçlar verdiği,
- 2- Ticari piyasada üretilen rutil elektrotlara oranla elektrot örtüsünde %35-50 oranında yüksek fırın cürufu kullanarak, piyasadan yaklaşık %35 civarında daha ekonomik elektrotların üretilebileceği,
- 3- Rutil ve diğer tipteki örtülü elektrot üretimlerinde, yüksek fırın cüruflarının ve olası alaşım elementi içermeyen diğer metalürjik işletme cüruflarının kullanımının mümkün olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

ÖNERİLER

- 1- Elektrot üretiminde çekirdek tel, ferro alaşımlar ve elektrot üretiminde kullanılan tüm diğer bileşenlerin çok daha detaylı olarak kimyasal analizlerinin yapılarak elektrot üretim süreçlerinin yapılması,
- 2- Üretilen elektrotların karbon konsantrasyonu, % uzama, akma ve çekme dayanımı değerlerinin standartların önerdiği optimum seviyelere getirilmesi için, karbon, kükürt, fosfor ve oksijen konsantrasyonu verilerini düşürmeyi amaçlayan çözümler üretilmelidir.



KAYNAKLAR

- [1] <http://www.cib.org.tr/istatistikler.html>
- [2] Uysal F.F, Bahar S. 2018. Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları, Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19,37-52.
- [3] Ünal, A. 2017. Atık'tan Ürün'e Demir Çelik Cürufu (Order No. 28942324). Available from ProQuestDissertations&Theses Global (2628833742) Retrieved from <https://www.proquest.com/dissertations-theses/atiktan-urune-demir-çelik-cürufu/docview/2628833742/se-2?accountid=15927>
- [4] Reuter, M., Xiao, Y., Boin, U. 2004. Recycling and environmental issues of metalurgical slags and salt fluxes, VII. International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts,349-356 p. 2004.
- [5] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı-Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, Demir-Çelik Cüruf Raporu, 16 kasım 2015.
- [6] <https://askaynak.com.tr> , Son erişim tarihi: 10.06.2024
- [7] <https://www.magmaweld.com.tr> , Son erişim tarihi: 10.06.2024
- [8] <https://gedikkaynak.com.tr> , Son erişim tarihi: 10.06.2024
- [9] Demirsöz, R., Polat, R., Türk, A., Erdoğan, G. 2019. Yüksek fırın granüle cürufunun sert kaplama uygulanmış ve uygulanmamış çeliklere karşı erozif aşındırma davranışının incelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34 (1) , 103-114.
- [10] Aydın, T. 2020. Yüksek Fırın Cürufunun Seramik Duvar Karosu Bünyesi Üzerine Etkilerinin Araştırılması . International Journal of Engineering Research and Development,12 (2), 764-768.
- [11] Bilici, H., Okur, D. V., Türköz, M., Savaş, H. 2020. Kil zeminin dayanımı üzerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılarının etkisi ve karşılaştırmalı analizi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9 (2), 910-919.
- [12] Eken, M., Avşaroğlu, E. 2021. Yüksek fırın cürufu, bazalt ve üleksit katkılı beton örneklerin yüksek sıcaklık etkisi altında özelliklerinin incelenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Ek Sayı, 306-320.
- [13] Bingöl, A. F., Balaneji, H. H. 2019. Yüksek fırın cürufu ve zeolit katkılı betonların sülfat direncinin belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi , 7 (2) , 254-264
- [14] Eker, H., Başçetin, A., Tüylü, S., Adıgüzel, D. 2020. Yüksek fırın cürufu ikamesinin çimentolu macun dolgunun dayanım özelliklerine etkisi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 11- 2, 701-714,
- [15] Duan, W., Li, G., Wang, Z., Wang, D., Yu, Q., Zhan, Y. 2022. Highly efficient production of hydrotalcite-like compounds from blast furnace slag, Applied Clay Science, 219, 106441.
- [16] Cechin, L., Mymrine, V., Avanci, M.A., Povaluk, A.E. 2021. Ceramics composites from iron ore tailings and blast furnace slag, Ceramics International.
- [17] Giergiczny, Z. 2019. Fly ash and slag, Cement and Concrete Research, 124, 105826.
- [18] Oge, M., Ozkan, D., Celik, M.D., Gok, M.S., Karaoglanli, A.C. 2019. An overview of utilization of blast furnace and steelmaking slag in various applications, Materials Today: Proceedings, 11-1, 516-525.
- [19] Buddhdev, B.G., Timani, K.L. 2021. Critical review for utilization of blast furnace slag in geotechnical application, Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns. Lecture Notes in Civil Engineering, 88, Springer, Singapore.

- [20] Cheah, C.B., Tan, E.L., Ramli, M. 2021. Recent advances in slag-based binder and chemical activators derived from industrial by-products – A review, *Construction and Building Materials*, 272.
- [21] Ulugöl, H. 2015. Granüle yüksek fırın cürufunun çimentonun mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
- [22] Hoccoğlu, R. 2018. Fe-Mo-Ti-B-C esaslı sert dolgu alaşımlı örtülü elektrotların üretimi ve özelliklerinin incelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
- [23] Eroğlu, M., 2009. Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: microstructure and hardness, *Surface & Coatings Technology* 203, 2229–2235.
- [24] Kocaman, E., Kılınç, B., Şen, Ş., Şen, U. 2022. In-situ TiB₂ and Fe₂Ti intermetallic assisted hard coatings by Fe-Ti-B based hardfacing electrodes, *Journal of Alloys and Compounds*, 900, 163478,
- [25] Nagentrau, M., Mohd, A.L. Tobi, A., Sambu, M., Jamian, S. 2019. The influence of welding condition on the microstructure of WC hardfacing coating on carbon steel substrate, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 82, 43-57.
- [26] Vaz, C.T., Bracarense, A.Q., Felizardo, I., Pessoa, E.C.P. 2012. Impermeable low hydrogen covered electrodes: weld metal, slag, and fumes, *Evaluation, Journal of Materials Research and Technology*, 1-2, 64-70.
- [27] Singh, R.P., Kumar, S. 2020. Effect of current and chemical composition on the hardness of weld in shielded metal arc welding, *Materials Today: Proceedings*, 26-2, 1888-1891.
- [28] Özdemir, Ö., Özaraç, U. 2015. Demir-çelik metalurjisi (ders notu)
- [29] Baycık, S. 2003. Granüle Yüksek Fırın Cüruflarının Karo Sektöründe Kullanılabilirliğinin Araştırılması , İTÜ , Yüksek Lisans Tezi
- [30] malzemebilimi.net/yüksek fırın, yüksek fırın bölümleri, şarj malzemeleri ve ürünleri
- [31] TCUD. 2015. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği , Demir Çelik Cüruf Raporu
- [32] Anık, S., Tülbentçi, K., Kaluç, E. 1991. Örtülü Elektrot İle Elektrik Ark Kaynağı, Gedik Eğitim Vakfı
- [33] cdn.bartın.edu.tr/demircelikuretimisunu2
- [34] TS EN ISO 2560, Kaynak Sarf Malzemeleri- Alaşımsız ve İnce Taneli Çeliklerin Elle Yapılan Metal Ark Kaynağı İçin Örtülü Elektrotlar- Sınıflandırma
- [35] AWS A5.1/A5.1M, 2012, An American national standard, spesifikation for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding
- [36] BS EN 499:1995 welding consumables- covered electrodes for manual metal arc welding of non alloy and fine grain steels- classification
- [37] DIN 1913-1 1984 Edition, German Institute for Standardisation, Covered electrodes for the joint welding of unalloyed and low alloy steel- classification, designation, technical delivery conditions

ÖZGEÇMİŞ

Serhat KAYA

İŞ GECERİ

İşyeri	İşin Adı
İşyeri	İşin Adı
İşyeri	İşin Adı
İşyeri	İşin Adı
İşyeri	İşin Adı
İşyeri	İşin Adı

TEKNEK BİLİMLER

Yıl	Okul Adı
Yıl	Okul Adı

TEKNEK BİLİMLER

Yıl	Okul Adı
Yıl	Okul Adı
Yıl	Okul Adı

TEKNEK BİLİMLER

Yıl	Okul Adı
-----	----------

AKADEMİK FAALİYETLER

Bildiriler:

- Kaya, S. (2024). Rutil Tipteki Elektrot Örtülerine Nişasta Etkisinin Araştırılması, Uluslararası Bilimsel ve Yenilikçi Çalışmalar Konferansı, Konya