

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

79226

DİVRİĞİ PELETLERİNİN KATI
REDÜKLEYİCİLERLE ÖN REDÜKSİYONU VE ÖN
REDÜKLENMİŞ DEMİRİN ERGİTME ŞARTLARININ
OPTİMİZASYONU

Met.Yük.Müh. Muhlis Nezihi SARIDEDE

F.B.E. Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Programında
Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 21 Eylül 1998

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU (YTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Okan ADDEMİR (İTÜ)

Prof. Dr. Süheyla AYDIN (İTÜ)

İSTANBUL, 1998

79226

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ.....	ii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	v
ÖNSÖZ.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. SÜNGER DEMİRİN (DRI) ÖZELLİKLERİ.....	8
2.1 Sünger Demirin Tanımı.....	8
2.2 Sünger Demirin Yapısı.....	8
2.3 Sünger Demirin Üstünlükleri.....	9
3. DEMİR OKSİTLERİN REDÜKSİYONUNUN TERMODİNAMİĞİ..	12
3.1 Demir-Oksijen Sistemi.....	12
3.2 Demir Oksitlerin Redüksiyonunun Termodinamik Yönü.....	15
4. DEMİR OKSİTLERİN REDÜKSİYONUNUN KİNETİĞİ.....	19
4.1 Redüksiyonun Mekanizması.....	19
4.2 Redüksiyonun Hızı.....	20
5. DÜNYADA SÜNGER DEMİR ÜRETİMİNİN DURUMU.....	23
6. SÜNGER DEMİR ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	26
6.1 Midrex Yöntemi.....	27
6.2 HYL Yöntemi.....	30
6.3 SL/RN Yöntemi.....	32
6.4 FASTMET Prosesi.....	36
7. DOĞRU AKIMLI ELEKTRİK ARK FIRINLARI (DC-E.A.F.).....	39
7.1 Doğru Akımlı Elektrik Ark Fırınlarının (DC-E.A.F.) Yapısı.....	40
7.1.1 Güç ünitesi.....	40
7.1.2 Elektrod.....	41
7.1.3 Taban yapısı.....	42

7.1.3.1	Çelik çubuk elektrod.....	42
7.1.3.2	Pin (iğne) elektrod.....	43
7.1.3.3	Fin (palet) elektrod.....	44
7.1.3.4	İletken refrakterler.....	44
7.2	DC Elektrik Ark Fırınlarının Üstünlükleri.....	46
7.2.1	Elektrod sarfiyatı.....	46
7.2.2	Enerji sarfiyatı.....	47
7.2.3	Isı dağılımı.....	48
7.2.4	Refrakter sarfiyatı.....	48
7.2.5	Metalurjik kontrol (Karıştırma).....	49
7.2.6	Bakım.....	49
7.2.7	Titreşim kontrolü.....	50
7.3	DC-E.A.F. 'da Ark Sapması.....	50
7.4	DC-E.A.F. 'da DRI Kullanılarak Yassı Mamul Üretimi.....	51
8.	ELEKTRİK ARK FIRININDA DRI KULLANILARAK ÇELİK ÜRETİMİ.....	53
8.1	Fırına Beslenebilecek DRI Türleri.....	54
8.2	DRI'nın E.A.F. 'na Şarjı.....	55
8.2.1	Sepet şarj sistemi.....	55
8.2.2	Sürekli şarj sistemi.....	57
8.2.3	DC-E.A.F. 'da elektrod yoluyla şarj sistemi.....	60
8.3	Ergitme ve Köpüklü Curuf Oluşumu.....	61
8.3.1	Ergitme seyri.....	61
8.3.2	Köpüklü curuf ve faydaları.....	64
8.4	DRI'nın Fırın Çalışma Şartlarına Etkisi.....	65
8.4.1	Elektrik tüketimi.....	67
8.4.2	Dökümden döküme süre.....	68
8.4.3	Refrakter astarı.....	69
8.4.4	Elektrodlar.....	69
8.4.5	Oksijen.....	70
8.4.6	Kireç.....	70
8.4.7	Curuf.....	70
8.5	DRI'nın Çelik Kalitesine Etkisi.....	72
8.5.1	Artık içeriği.....	72
8.5.2	Azot.....	74
8.6	DRI'nın Çeliğin Fiziksel Özelliklerine Etkisi.....	74
9.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	77
9.1	Hammadde Özellikleri.....	77
9.1.1	Demir oksidin seçimi.....	77
9.1.2	Kömürün seçimi.....	79
9.1.3	İlaveler.....	81
9.2	Kullanılan Cihazlar.....	82

9.2.1	Döner Fırın.....	82
9.2.2	DC Elektrik Ark Fırını.....	84
9.3	Deneylerin Yapılışı.....	88
9.3.1	Döner fırında sünger demir üretimi deneyleri.....	88
9.3.2	DC-E.A.F. 'da hurda ve sünger demirden çelik üretimi deneyleri.....	89
10.	SONUÇLAR.....	91
10.1	Direkt Redüksiyon Deney Sonuçları.....	91
10.1.1	Sürenin etkisi.....	91
10.1.2	Sıcaklığın etkisi.....	96
10.1.3	C ₄ /Fe oranının etkisi.....	98
10.1.4	Basma dayanımının değişimi.....	98
10.1.5	Metalografik inceleme.....	100
10.2	DC-E.A.F. ile Çelik Üretimi Deney Sonuçları.....	106
10.2.1	Optimum ergitme parametrelerinin tespiti.....	106
10.2.2	Sünger demir kullanımının çelik kalitesine etkisi.....	109
11.	TARTIŞMA.....	113
11.1	Direkt Redüksiyon Deney Sonuçlarının Tartışılması.....	113
11.1.1	Sıcaklığın etkisi.....	113
11.1.2	Sürenin etkisi.....	114
11.1.3	C ₄ /Fe oranının etkisi.....	115
11.1.4	Redüksiyon kinetiği ve aktivasyon enerjisinin hesaplanması.....	117
11.1.5	Optimum deney şartlarının tespiti.....	120
11.2	DC-E.A.F. 'da Çelik Üretimi Deney Sonuçlarının Tartışılması.....	123
12.	GENEL SONUÇLAR.....	128
	KAYNAKLAR	132
	EKLER	
Ek 1		138
Ek 2		139
	ÖZGEÇMİŞ	140

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	Proseslere göre dünya çelik üretimi..... 3
Şekil 1.2	Türkiye'nin 1997 yılı Ocak-Ekim dönemi ham çelik üretimi..... 4
Şekil 1.3	Türkiye'deki toplam çelik üretimi, E.A.F.'nın payı, hurda ithalatı ve yerli hurda arzı..... 6
Şekil 3.1	Demir-Oksijen sistemi..... 12
Şekil 3.2	Wüstitin (100) düzleminde demir iyonu boşlukları ve demir iyonlarının taşınması..... 13
Şekil 3.3	Demir, wüstit, manyetit ve hematitin termodinamik olarak kararlı olduğu bölgeler..... 14
Şekil 3.4	Boudouard eğrisi..... 16
Şekil 3.5	Chaudron eğrileri..... 17
Şekil 3.6	Bauer-Glaessner diyagramı..... 17
Şekil 4.1	Demir cevherlerinde redüksiyon mekanizması..... 20
Şekil 4.2	Topokimyasal redüksiyon modeli..... 20
Şekil 5.1	Yıllara göre dünya sünger demir üretimi..... 23
Şekil 5.2	Dünya sünger demir üretiminin 1997 yılında, proseslere göre dağılımı 25
Şekil 6.1	Midrex yönteminin çalışma prensibi ve gerçekleşen temel reaksiyonlar..... 28
Şekil 6.2	200t/gün kapasiteli işletmede HYL I prosesinin akım şeması..... 31
Şekil 6.3	HYL III Prosesinin çalışma şeması..... 32
Şekil 6.4	Bir döner fırın kesiti..... 33
Şekil 6.5	Redüksiyon bölgesindeki işlemler..... 33
Şekil 6.6	Bir döner fırında (110m. uzunluğunda) sıcaklık profili, kükürt içeriğinin ve redüksiyon derecesinin değişimi..... 34
Şekil 6.7	Griffith Mine'daki SL/RN direkt redüksiyon tesisinin akış şeması..... 35
Şekil 6.8	Fastmet prosesinin çalışma şeması..... 37
Şekil 6.9	Fastmet prosesinde pelet redüksiyonu..... 38
Şekil 7.1	Elektrik Ark Fırınları güç sistemleri..... 40
Şekil 7.2	AC ve DC akımlı fırınlarda akım, sıcaklık ve gerilim dağılımları..... 41
Şekil 7.3	Çelik çubuk taban elektrod dizaynı..... 43
Şekil 7.4	Pin (iğne) tip elektrodlar; a)İletken refrakterlerle b)İletken olmayan refrakterlerle..... 43
Şekil 7.5	Palet tip elektrodlar..... 44
Şekil 7.6	İletken taban yapısı..... 45
Şekil 7.7	Birleştirilmiş DR-E.A.F. işlemleri ile Hylsa'da yassı ürün üretimi..... 51
Şekil 8.1	Birleştirilmiş DR-E.A.F. tesisinde sıcak DRI'nın ergitme ünitesine taşınması..... 55
Şekil 8.2	Şarj sepetlerinin tipik düzenleri..... 57
Şekil 8.3	DRI besleme hızının banyo sıcaklığına etkisi..... 58
Şekil 8.4	E.A.F.'na sürekli besleme yapan Midrex sıcak şarj sistemi..... 59
Şekil 8.5	Elektrod yoluyla sürekli şarj yapılan DC fırının kesiti..... 60
Şekil 8.6	%70 DRI + %30 hurda ile E.A.F.'da çelikiyapım seyri..... 62
Şekil 8.7	100 tonluk (75 MVA) bir E.A.F.'da DRI ergitme işlemi..... 63

Şekil 8.8	DRI kullanan bir E.A.F.'da ergitme işleminde malzeme akışı.....	64
Şekil 8.9	Şarjdaki HBI yüzdesine bağlı olarak ürün yüzdesinin değişimi.....	66
Şekil 8.10	Şarjdaki HBI yüzdesine bağlı olarak güç tüketimi.....	68
Şekil 8.11	Şarjdaki HBI yüzdesine bağlı olarak dökümden döküme sürenin değişimi.....	69
Şekil 8.12	Ergitme sırasında curuf kompozisyonunun değişimi.....	71
Şekil 8.13	Orta C'lu çelik üretiminde kullanılan HBI yüzdesine göre iz element içeriği.....	73
Şekil 9.1	Dizayn edilen laboratuvar tipi döner fırın.....	83
Şekil 9.2	Dizayn edilen laboratuvar tipi doğru akım elektrik ark fırını.....	85
Şekil 10.1	Sabit sıcaklık ve 0,4 C _F /Fe oranında metalizasyonun süreye bağlı değişimi.....	94
Şekil 10.2	Sabit sıcaklık ve 0,5 C _F /Fe oranında metalizasyonun süreye bağlı değişimi.....	94
Şekil 10.3	1000°C ve 0,4 C _F /Fe oranında metalik demir ve toplam demirin süreye bağlı olarak değişimi.....	95
Şekil 10.4	1000°C ve 0,5 C _F /Fe oranında metalik demir ve toplam demirin süreye bağlı olarak değişimi.....	95
Şekil 10.5	Farklı redüksiyon süreleri için sıcaklığa bağlı olarak metalizasyonun değişimi (C _F /Fe=0,4 için).....	97
Şekil 10.6	Farklı redüksiyon süreleri için sıcaklığa bağlı olarak metalizasyonun değişimi (C _F /Fe=0,5 için).....	97
Şekil 10.7	Sabit redüksiyon süresinde (30dk.), farklı sıcaklıklar için C _F /Fe oranının metalizasyon üzerine etkisi.....	99
Şekil 10.8	Sabit redüksiyon süresinde (60dk.), farklı sıcaklıklar için C _F /Fe oranının metalizasyon üzerine etkisi.....	99
Şekil 10.9	Redüklenmiş pelet numunelerinin makro ve mikroyapı görüntüleri. (Deney şartları : 850°C, 30dk., 0,4 C _F /Fe, Metalizasyon : % 27,17)....	101
Şekil 10.10	Redüklenmiş pelet numunelerinin makro ve mikroyapı görüntüleri. (Deney şartları : 950°C, 30dk., 0,5 C _F /Fe, Metalizasyon : % 72,54)....	102
Şekil 10.11	Redüklenmiş pelet numunelerinin makro ve mikroyapı görüntüleri. (Deney şartları : 950°C, 60dk., 0,5 C _F /Fe, Metalizasyon : % 88,18)....	103
Şekil 10.12	Redüklenmiş pelet numunelerinin makro ve mikroyapı görüntüleri. (Deney şartları : 1000°C, 60dk., 0,5 C _F /Fe, Metalizasyon : % 95,32)...	104
Şekil 10.13	Redüklenmiş pelet numunelerinin makro ve mikroyapı görüntüleri. (Deney şartları : 1050°C, 60dk., 0,5 C _F /Fe, Metalizasyon : % 96,93)...	105
Şekil 10.14	Elektrod çapının akım ve ergitme süresine etkileri.....	106
Şekil 10.15	Ergitmede gerilim-akım-güç arasındaki ilişki.....	108
Şekil 10.16	Şarjdaki sünger demir oranına bağlı olarak ergimiş metaldeki iz elementlerin yüzdelерinin değişimi.....	110
Şekil 10.17	Şarja ilave edilen sünger demir oranına bağlı olarak elde edilen curufta element yüzdelерinin değişimi.....	112
Şekil 11.1	850°C redüksiyon sıcaklığında C _F /Fe oranının süreye bağlı olarak metalizasyon yüzdesine etkisi.....	116
Şekil 11.2	1000°C redüksiyon sıcaklığında C _F /Fe oranının süreye bağlı olarak metalizasyon yüzdesine etkisi.....	116

Şekil 11.3	Farklı sıcaklıklar için $[1 - (1 - R)^{1/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi....	118
Şekil 11.4	$[1 - (1 - R)^{1/3}] = k.t$ formülüne göre redüksiyon hızı ile sıcaklık ilişkisi ve aktivasyon enerjisinin bölgelere göre değişimi.....	118
Şekil 11.5	Şarjdaki sünger demir oranına bağlı olarak, ergitme işlemi sonrasında elementlerin (curuf)/[metal] dağılımlarının değişimi.....	126
Şekil 11.6	Şarjdaki sünger demir oranına bağlı olarak, ergitme işlemi sonrasında elementlerin (curuf)/[metal] dağılımlarının değişimi.....	126
Resim 9.1	Redüksiyon deneylerinde kullanılan döner fırın.....	84
Resim 9.2	DC-E.A.F.'da çelik üretimi.....	87
Resim 9.3	DC-E.A.F.'da üretilen sıvı çeliğin görüntüsü.....	90



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Dünya ham çelik üretimi.....	2
Çizelge 1.2 Türkiye ham çelik üretimi.....	5
Çizelge 1.3 Ark ocaklı tesislerde 1 ton mamul çelik üretiminin maliyet içi girdi dağılımı.....	6
Çizelge 2.1 Sünger demirin metalurjik ve teknolojik özellikleri.....	9
Çizelge 2.2 Farklı yöntemlerle üretilen sünger demirlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	10
Çizelge 5.1 Ülkelere ve yöntemlere göre dünya sünger demir üretimi.....	24
Çizelge 6.1 Sünger demir üretim yöntemlerinin fırın prosesine göre sınıflandırılması.....	26
Çizelge 6.2 Sünger demir üretim yöntemlerinin redükleyici elemana göre sınıflandırılması.....	27
Çizelge 7.1 AC ve DC elektrodların özellikleri.....	42
Çizelge 7.2 Hylsa yassı ürün üretiminde yeni ergitme karakteristikleri.....	52
Çizelge 8.1 Hurda ve DRI'daki ortalama artık seviyeleri.....	53
Çizelge 8.2 Demir cevheri ve curuf analizleriyle ilişkili olarak curuf miktarı, kireç ilavesi ve demir ergitme kayıplarının değişimi.....	71
Çizelge 8.3 Sidbec-Dosco ürünlerinde tipik artık ve N ₂ içerikleri.....	72
Çizelge 8.4 Kısmen deokside edilmiş çeliklerin mekanik özellikleri.....	75
Çizelge 8.5 DRI'nın çeliğin mekanik özelliklerine etkisi.....	75
Çizelge 9.1 Sünger demir üretiminde kullanılabilecek demir cevheri ve peletinden beklenen özellikler.....	78
Çizelge 9.2 Deneylerde kullanılan Divriği peletinin kimyasal analizi.....	79
Çizelge 9.3 Deneylerde kullanılan Soma linyit kömürünün kısa analizi.....	81
Çizelge 9.4 Deneylerde kullanılan Soma linyit kömürü külünün kimyasal analizi	81
Çizelge 9.5 Trafo-redresörün teknik özellikleri.....	86
Çizelge 9.6 Grafit potaların ölçüleri.....	86
Çizelge 10.1 Direkt redüksiyon deney sonuçları.....	92
Çizelge 10.2 DC-E.A.F.'da ergitme sırasında gerilim ve akımın değişimi ile arkın durumu.....	107
Çizelge 10.3 %100 hurda ve %100 sünger demir kullanılarak yapılan ergitmelerde parametrelerin değişimi.....	109
Çizelge 10.4 Farklı oranlarda sünger demir kullanılarak yapılan ergitme sonunda çelik bileşiminin değişimi.....	110
Çizelge 10.5 Sünger demirin element içeriği ve farklı oranlarda hurda/sünger demir şarjlarının ergitilmesi sonucu oluşan curufların kimyasal bileşimleri.....	111
Çizelge 11.1 Sünger demirin C ve S yüzdelerinin sıcaklık ve süreye bağlı değişimi.....	114
Çizelge 11.2 Demir cevherinin redüksiyonu ile ilgili farklı çalışmalarda elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri ve çalışma şartları.....	119
Çizelge 11.3 Sünger demirden beklenen bileşim özellikleri ve optimum redüksiyon şartlarında elde edilen değerlerin karşılaştırılması.....	121

Çizelge 11.4	Farklı çalışmalarda elde edilen metalizasyon dereceleri ve optimum şartların karşılaştırılması.....	123
--------------	---	-----



ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, ülke kaynakları kullanılarak sünger demir üretimi ve E.A.F.'da kullanımını incelenmektedir. Tez çalışmasında ihtiyaç duyduğumuz maddi destek, Devlet Planlama Teşkilatı (DPT)'na sunulan ve kabul gören benzer isimli bir proje çerçevesinde karşılanmıştır.

Gerek mesleki yaşamımda ve gerekse bu tezin hazırlanmasında her zaman yardım ve ilgisini esirgemeyen ve her konuda bilgi ve tecrübesinden istifade ettiğim sayın hocam Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU'na teşekkür ederim.

Tezimin deneysel kısımları hazırlanırken deney teçhizatlarının kurulmasında ve işletilmesinde çok değerli yardımlarını gördüğüm sayın hocam Doç.Dr. Ahmet Ekerim'e teşekkürü bir borç bilirim.

Kimyasal analizlerin yapılmasında ve kimyasal malzeme temininde yardımcı olan Uzman Menekşe Akın'a ve Teknisyen Şevki Şahin'e, mikroyapı fotoğraflarının çekimini gerçekleştiren Prof.Dr. Nişan Sönmez ve Uzman Aygül Kılıç'a teşekkürlerimi sunarım.

Elektrik Ark Fırınının kurulması aşamasında işletme imkanlarını sunan ve deneylerin gerçekleştirilmesinde büyük emeği geçen Elektrik Yük. Müh. Saadettin GÖKÇE'ye minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Bölüm imkanlarının kullanılmasında her zaman kolaylıklar gösteren ve çalışmalarımı yakından ilgilenen Bölüm Başkanımız sayın Prof.Dr. Müzeyyen Marşoğlu ve tüm Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma teşekkür etmekten mutluluk duyarım.

Herşeyden önemlisi tez çalışmalarımında ve tüm yaşantım boyunca her zaman bana sabırla destek olan ve zorlukları göğüsleyen aileme ayrıca teşekkür ederim.

ÖZET

Demir-çelik sanayiinde özellikle ülkemizde yaşanan hurda sorunu gözönüne alınarak yapılan bu çalışmada, yerli hammadde kaynaklarımız kullanılarak sünger demir (direkt redüklenmiş demir-DRI) üretimi ve Elektrik Ark Fırını'nda kullanımının gerçekleştirilmesi ve etkili parametrelerin incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun için laboratuvar tipi bir döner fırın ve doğru akımlı Elektrik Ark Fırını (DC-E.A.F.) dizayn edilmiş ve yapımı gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar, 2 kısımdan oluşmaktadır:

Birinci kısımda, dizayn edilen laboratuvar tipi döner fırında Divriği peletleri Soma linyit kömürü kullanılarak redüklenmiştir. Redüksiyon işlemlerinde, 15, 30, 45, 60, 75, 90 dakikalık süreler, 700 - 850 - 950 - 1000 - 1050°C'lık sıcaklıklar ve 0,4 - 0,5 C₄/Fe oranları değişkenler olarak kullanılmıştır.

Redüksiyon deneyleri sonunda sıcaklık, süre ve C₄/Fe oranının arttırılmasıyla metalizasyon derecesinin arttığı bulunmuştur. Redüksiyonun topokimyasal modele uygun olarak ilerlemesi sonucu, belli bir süreden sonra metalizasyondaki artış yavaşlamış ve sabit kalmıştır. Yapılan kinetik incelemelerde, redüksiyonun başlangıçta kimyasal reaksiyon ile belli bir süre sonra ise difüzyon mekanizmasıyla kontrol edildiği görülmüştür.

Deneyler sonunda, 0,5 C₄/Fe oranı, 1000°C sıcaklık ve 60dk. süre optimum şartlar olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda elde edilen sünger demirin metalizasyon derecesi %95,32'dir.

İkinci kısımda sünger demirin E.A.F.'da kullanımı laboratuvar boyutlu kurulan DC-E.A.F.'da incelenmiştir. Ergitme işlemi ve iyi bir ark oluşumu için uygun elektrod ve pota boyutları ile gerekli gerilim ve akım değerleri (37,5V - 240A) belirlenmiştir. Daha sonra hurda ve sünger demir farklı oranlarda karıştırılarak ergitilmiştir. Şarj içindeki sünger demir oranının artmasına bağlı olarak üretilen çelik içindeki iz elementlerin oranları düşmüştür. Buna paralel olarak, elementlerin curuf/metal dağılım oranları artmıştır. Hiçbir katkı malzemesi kullanılmaması sonucu oluşan asit karakterli curufta demir miktarı yüksek çıkmış ve sıvı metalden kükürt giderimi yeterince sağlanamamıştır.

ABSTRACT

In the iron and steel industry specially in Turkey, by considering the scarcity of scrap, in this study production of sponge iron (direct reduced iron – DRI) by using the national raw material sources and usage of DRI in Electric Arc Furnace and inspection of effective parameters have been aimed. For this aim, laboratory type rotary kiln and direct current Electric Arc Furnace were designed and constructed.

Applied experimental studies contains two parts:

In the first part, Divriği pellets is reduced by using Soma lignite in designed laboratory type rotary kiln. In the reduction experiments, the variables are used as the times of 15, 30, 45, 60, 75, 90 in minutes, the temperature of 700 - 850 - 950 - 1000 - 1050°C and the ratio of C_r/Fe (0,4-0,5).

At the end of the reduction experiments, it was revealed that by raising the temperature, time and C_r/Fe ratio, the metallization degree increase. The result of the reduction progressed according to topochemical model, the increase in the metallization was slowed down and fixed. In respect of the kinetic investigation, at the beginning the reduction is controlled by chemical reaction and after a period of time by diffusion mechanism.

At the end of the experiments, 0,5 of the C_r/Fe ratio, 1000°C temperature and 60 minutes were determined as optimum conditions under which the degree of metalization of manufactured sponge iron is 95,32%.

In the second part, the usage of sponge iron in the E.A.F. was examined by means of a laboratory scale DC-E.A.F. Favorable electrode and ladle dimension and proper degree of voltage and current (37,5V - 240A) was determined for suitable smelting and arc formation. Then scrap and sponge iron was smelted by mixing them in different ratio. The residual element content of produced steel decrease by increasing sponge iron content in charge. The parallel aspect of it, slag/metal distribution ratio increase with increasing sponge iron content. The result of any flux material was not used, in formed acid slag the iron content was high and desulfurization of liquid metal was not accomplished.

1. GİRİŞ

Son on yıldaki teknolojik değişimler, bu dönem ekonomik koşullarındaki değişiklikleri yansıtmaktadır. Satılan her ton çelikle birlikte artan rekabet, çelik üreticilerini, bu yarışta kalabilmek için ürün fiyatlarını düşürmeye ve toplam kaliteyi geliştirmeye zorlamaktadır. Fiyat indirimine verilen önem, büyük teknik ilerlemelerle beraber optimizasyon çağına da yol açmıştır. 1970'lerdeki petrol krizi demir-çelik endüstrisindeki enerji fiyatlarını değiştirmiş ve düşük maliyetli ve kömüre dayalı enerjiye olan ilgi yeniden etkili hale gelmiştir. Acil finans problemlerini çözmek için yerel çelik endüstrisi demir-çelik üretiminde dünya lideri ülkelerin teknolojilerini adapte etmektedirler (Pearce ve Cameron, 1985).

1950-1970 döneminde demir-çelik sektöründe, çok yoğun bilimsel araştırmaların yapılması (özellikle üretim teknolojisine dönük olarak) 1970'li yıllardan sonra önemli yapısal değişimlere katkıda bulunmuştur. Bu teknolojik gelişmelerin en önemli iki tanesi; konverter tekniği ve elektrik ark fırınları ile verimliliklerdir. 1950 yılında dünya çelik üretimi 190 Mt civarındaydı. Bu 190 Mt çelik üretiminin %80'i Yüksek Fırın - Siemens Martin yöntemiyle, %10'u Yüksek Fırın - Thomas Konverter yöntemiyle, %10'u da E.A.F.'ı ile üretilmekteydi. 1970'te 700 Mt'a ulaşan sıvı çelik üretiminde E.A.F.'nın payı %20'ye çıkmıştır. 1990 yılı itibariyle dünya ham çelik üretimi 770 Mt olarak gerçekleşmiş, 1994'te bu rakam 702 Mt'na düşmüştür. 2000 yılı için tahmin edilen rakam ise 785 Mt'dur. 1995 yılı itibariyle ham çelik üretiminin %56'sı LD konverterlerinde, %31'i E.A.F.'da, geri kalanı ise Y.F.-Siemens Martin yöntemiyle gerçekleştirilmiştir (Demir-Çelik Paneli, 1995). Çizelge 1.1'de 1996 yılı itibariyle dünya çelik üretimi verilmektedir.

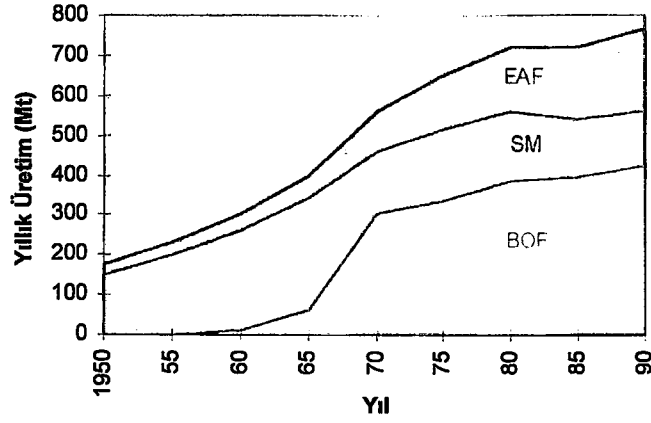
E.A.F.'daki bu gelişme (Şekil 1.1) daha düşük yatırım maliyeti (entegre tesisin 1/3'i), fırın yapısı ve işletmesindeki gelişmeler, alaşımlı çeliklere olan ihtiyacın artması, daha az işgücü gereksinimi, daha az iş yoğunluğu ve çevre etkisinin bir sonucudur. Hurda kullanımı ve elektriğin ucuza temini bu gelişmeye çok büyük katkı sağlamıştır (Bray, 1954; Faccione vd., 1993).

Çizelge 1.1 Dünya ham çelik üretimi (Erdemir, 1996).

(1.000 ton)

Ülkeler	Kasım	Ocak-Kasım		Değişim %
	1996	1996	1995	
Avusturya	405	4.090	4.622	-11,5
Belçika	972	9.915	10.837	-8,5
Danimarka	65	662	603	9,8
Finlandiya	312	2.993	2.878	4,0
Fransa	1.591	16.174	17.007	-4,9
Almanya	3.657	36.499	39.241	-7,0
Yunanistan	90	808	861	-6,2
İrlanda	25	309	292	5,8
İtalya	1.991	22.663	25.741	-12,0
Lüksemburg	209	2.299	2.411	-4,6
Hollanda	532	5.778	5.903	-2,1
Portekiz	70	781	762	2,5
İspanya	1.080	11.579	12.853	-9,9
İsveç	470	4.469	4.481	-0,3
İngiltere	1.623	16.641	16.473	1,0
Avrupa Birliği (15)	13.092	135.659	144.965	-6,4
Hırvatistan	5	46	42	9,5
Makedonya	2	25	33	-24,2
Norveç	49	488	461	5,9
Slovenya	19	290	380	-23,7
Türkiye	1.100	12.031	11.742	2,5
F. Yugoslavya Cumhuriyeti	93	611	168	263,7
Diğer Batı Avrupa	1.268	13.491	12.826	5,2
Batı Avrupa	14.360	149.150	157.791	-5,5
Bulgaristan	190	2.202	2.511	-12,3
Çek Cumhuriyeti	510	5.866	6.684	-12,2
Macaristan	150	1.703	1.696	0,4
Polonya	820	9.653	10.941	-11,8
Romanya	520	5.536	6.132	-9,7
Slovak Cumhuriyeti	230	3.004	3.770	-20,3
Doğu Avrupa	2.420	27.964	31.734	-11,9
Beyaz Rusya	50	747	674	10,8
Kazakistan	240	2.825	2.704	4,5
Rusya	3.848	44.688	47.065	-5,1
Ukrayna	1.650	20.061	20.422	-1,8
Özbekistan	29	418	312	34,0
Bağımsız Devletler Topluluğu	5.817	68.739	71.177	-3,4
Eski S.S.C.B.	5.879	69.463	71.867	-3,3
Kanada	1.300	13.373	13.268	0,8
El Salvador & Guatemala	4	38	26	48,2
Küba	20	201	182	10,4
Meksika	1.110	12.039	11.055	8,9
Trinidad & Tobago	55	614	669	-8,2
Dominik Cumhuriyeti	6	33	-	-
A.B.D.	7.510	86.365	85.728	0,7
Kuzey Amerika	10.005	112.664	110.928	1,6
Arjantin	345	3.743	3.315	12,9
Brezilya	2.195	23.056	23.052	0,0
Şili	105	1.068	928	15,1
Kolombiya	60	624	686	-9,0
Peru	50	538	472	14,0
Venezüela	280	3.430	3.276	4,7
Diğer Güney Amerika Ülkeleri	11	116	151	-23,2
Güney Amerika	3.045	32.673	31.880	2,2
İran	507	4.894	4.381	11,7
Katar	53	561	550	2,0
Suudi Arabistan	219	2.454	2.230	10,0
Orta Doğu	779	7.909	7.161	10,4
Cezayir	65	551	720	-23,5
Mısır	220	2.499	2.396	4,3
Lübya	44	848	823	3,0
Güney Afrika	658	7.345	7.762	-5,4
Tunus	17	169	183	-7,7
Zimbabve	20	199	193	3,1
Afrika	1.024	11.612	12.077	-3,9
Çin Halk Cumhuriyeti	8.280	90.173	86.260	4,5
Hindistan	1.870	19.960	19.077	4,6
Japonya	8.627	90.380	93.307	-3,1
Güney Kore	3.228	35.534	33.472	6,2
Tayvan	1.100	11.578	10.629	8,9
Asya	23.105	247.628	242.746	2,0
Avustralya	642	7.667	7.747	-1,0
Yeni Zelanda	70	745	779	-4,4
Okyanusya	712	8.411	8.526	-1,3
DÜNYA TOPLAMI (*)	61.329	667.372	674.710	-1,1

(*) Yukarıdaki 67 ülke, 1995 yılı dünya toplamının % 98'sini üretmişlerdir.



Şekil 1.1 Proseslere göre dünya çelik üretimi (Facone vd., 1993).

E.A.F.'nın çok büyük avantajları yanında (elde edilen ısıнын yüksekliği, yüksek kaliteli çelik üretme imkanı, ergitme hızının yüksekliği, ısı verimliliğinin yüksekliği vb.) yüksek fırın teknolojisindeki bir takım sınırlamalar ve zorluklarda E.A.F.'nın gelişiminde etkili olmuştur. Yüksek fırında kok kullanma zorunluluğu ve koklaşabilir kömür rezervlerinin gün geçtikçe azalması, yüksek yatırım maliyetleri, bu sınırlamalara örnek olarak verilebilir.

E.A.F.'daki bu gelişmelerin yanında birincil şarj malzemesi olan hurda temini ve kullanımında yıllar geçtikçe problemler ortaya çıkmaya başlamıştır. Hurdaların özellikle 1970'li yıllardan sonra kimyasal bileşimlerinde önemli değişimler meydana gelmiş ve bu olumsuz değişimler sürmektedir (Demir-Çelik Paneli, 1995).

Son 30 yılda mini demir-çelik tesislerinin piyasadaki yüksek kaliteli çelik üretimindeki paylarının artması ve daha özel ürünlere, (özel kalite çubuklar, dikişsiz boru, hatta yassı ürünler gibi) yönelmeleri hurda kirlenmesini çok önemli bir problem haline getirmiştir (Price, 1987; Faccone vd., 1993).

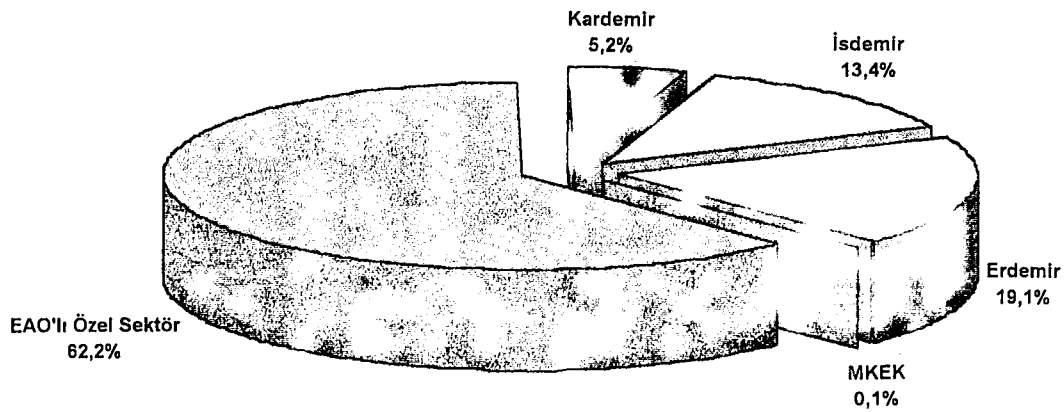
2000'li yıllara doğru E.A.F.'daki gelişmeler dikkate alınarak yapılan tahminlere göre dünya hurda gereksinimi 780 milyon ton'u bulacaktır. Oysa, dünyadaki hurdanın sadece 30-40 milyon tonu ticari hurdadır. Geri kalanını tamamen yerli sanayii ortaya çıkarmaktadır (Demir-Çelik Paneli, 1995).

Türkiye gibi hurda konusunda dışa bağımlı ülkeler için bu sorunların yanında en önemli problem hurda fiyatlarındaki dalgalanmalar ve dünya hurda borsasının oluşmuş olmasıdır. Hurda, ekonomistlerin tarif ettiği ticari mal tanımına tamamen uymakta ve diğer ticari mallar gibi özel kalite ve boyutlarda sınıflandırılarak ticareti yapılmaktadır (Anderson, 1987).

E.A.F.'daki hurda problemine çare olması düşünülen ve 1970'deki enerji krizinin de zorlamasıyla yeni şarj malzemesi üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Sünger demir ya da ön redüklenmiş demir (DRI) diye tanımlanan bu hammadde doğalgaz kullanımı ve doğalgazdan redükleyici gaz üretim tekniklerinin gelişmesi ile daha fazla gelişme ve üretilme imkanı bulmuştur. 1997 yılı itibariyle sünger demir üretimi 36,18 milyon tondur (Facone vd., 1993; Demir-Çelik Paneli, 1995; Midrex, 1997).

Mini-Mills of the Future (1996) konferansında Garvey'in açıklamalarına göre, direkt redüklenmiş demir ya da sıcak briketlenmiş demir karbit gibi maddelerin kullanımı yerleşene kadar hurda fiyatlarındaki artışlar ve dalgalanmalar durulmayacaktır.

Türkiye'deki Demir-Çelik sektörüne bakacak olursak; Türk Demir-Çelik sektöründe üretim yapısı dünyadakine benzer bir gelişim göstermiş ve yıllar geçtikçe çelik üretiminde E.A.F.'nın payı artmıştır. Bu artış dünyadaki gelişmeden daha hızlı olmuş ve plansız büyüme sonucu bugün çelik üretiminde (Şekil 1.2 ve Çizelge 1.2) hakim teknoloji haline gelmiştir (Kartay, 1995; DÇÜ, 1997).

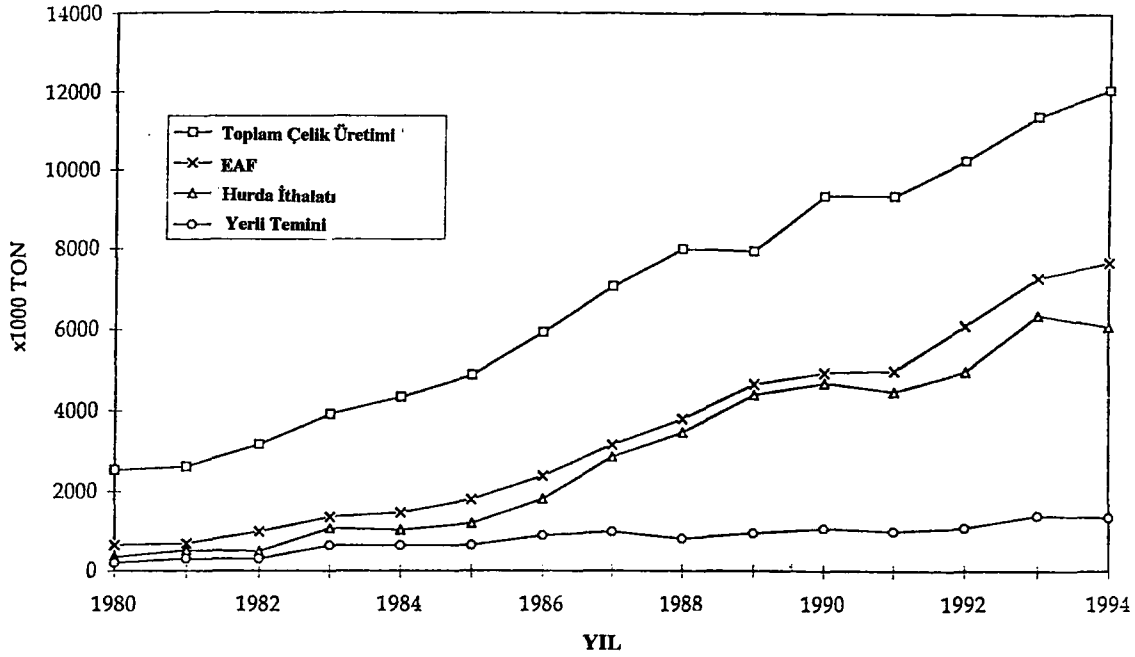


Şekil 1.2 Türkiye'nin 1997 yılı Ocak-Ekim dönemi ham çelik üretimi (DÇÜ, 1997).

Çizelge 1.2 Türkiye ham çelik üretimi (Erdemir, 1996).

Tesi		1996 Yılı												1996	1995	Değişim
Adı ve Yeri	Kapasite	Ocak	Şubat	Mayıs	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	1996	1995	Değişim	10 Aylık	10 Aylık	%
ERDEMİR	2.800.000	174.046	199.659	224.846	178.809	208.257	213.307	211.860			2.013.364	1.816.094	10,9			
İSDEMİR	2.200.000	140.955	146.671	173.017	167.759	159.114	135.872	158.774			1.571.874	1.350.848	18,4			
KARDEMİR	700.000	57.267	58.987	63.311	59.698	59.745	52.059	63.421			590.132	558.720	5,6			
Entegre Tesisler Toplamı	6.700.000	372.268	405.297	481.174	406.266	427.116	401.238	434.155			4.175.370	3.725.662	12,1			
ÇUKUROVA	2.050.000	20.277	28.025	36.651	40.494	43.403	43.000	45.074			378.619	990.719	-62,0			
İÇDAŞ	1.800.000	49.650	52.600	62.300	60.000	64.000	73.150	31.650			582.900	573.819	1,8			
ÇOLAKOĞLU	1.400.000	115.772	95.990	120.807	118.419	120.889	113.782	122.487			1.148.334	1.059.338	8,4			
HABAŞ	1.200.000	92.282	80.527	84.180	84.319	80.076	75.104	47.382			790.834	755.116	4,7			
EKİNCİLER	1.000.000	56.626	51.758	57.268	60.365	63.540	61.331	63.006			601.746	579.402	3,9			
KROMAN	935.000	45.000	40.500	46.000	49.293	47.989	51.742	52.000			464.994	387.595	20,0			
EGE METAL	840.000	27.800	39.400	47.750	44.686	40.992	47.460	55.077			444.171	354.854	25,2			
METAŞ	750.000	13.188	13.188	29.546	22.750	20.994	20.380	22.048			191.876	264.369	-27,4			
İZMİR DEMİR ÇELİK	735.000	58.473	48.458	62.210	58.958	58.233	48.086	63.244			567.637	508.907	11,5			
YAZICI D.Ç.	722.000	46.099	46.092	45.872	50.322	42.663	47.080	50.502			463.289	411.308	12,8			
ÇEBİTAŞ	720.000	31.100	13.100	20.300	35.600	34.400	34.300	39.100			313.800	195.406	60,6			
DİLER ÇELİK	651.000	30.734	23.055	28.501	29.943	30.400	30.805	32.759			298.066	301.034	-1,0			
SİVAS DEMİR ÇELİK	450.000	18.674	4.755	16.413	16.631	16.470	21.345	23.807			165.866	243.954	-32,0			
ASIL ÇELİK	250.000	24.531	18.438	10.657	12.715	15.944	18.189	17.759			158.040	204.116	-22,6			
TUBER (ORPAŞ)	240.000	13.134	9.655	2.972	10.549	11.380					71.468	98.026	-27,1			
ÇEMTAŞ	172.000	10.372	8.391	10.342	9.906	10.374	10.568	11.403			99.731	84.022	18,7			
VE-CA D.Ç. (AYPAŞ)	110.000											71.678				
MKEKÇELİKİSAN	60.000	1.999	1.705	2.416	1.891	1.310	1.682	1.747			16.459	14.195	15,9			
İST.METALURJİ	40.000															
Ark Ocakları Toplamı (*)	14.125.000	655.711	573.637	669.966	707.567	697.466	698.014	679.045			6.755.950	7.097.858	-4,8			
Toplam Ham Çelik Üretimi	19.825.000	1.027.979	978.934	1.074.926	1.058.734	1.124.582	1.099.252	1.113.200			10.931.920	10.823.620	1,0			

Ham Çelik : Kullandıkları İmge + Sürrekli Döküm Çıkışı Yen Mamuller + Dökümhaneye Gelen Sıvı Çelik
 (*) Ark Ocakları tesislerin 1996 yılı kapasitelerinin tesbitinde, Demir-Çelik Üreticileri Derneğinin 6.5.1996 tarihli raporu esas alınmıştır.



Şekil 1.3 Türkiye'deki toplam çelik üretimi, E.A.F.'nin payı, hurda ithalatı ve yerli hurda arzı (Aydın, 1996).

Bu gelişme, Türkiye'nin hurda ihtiyacını büyük oranlara getirmiştir. Şekil 1.3'te de görüldüğü gibi, E.A.F.'nin en önemli hammaddesi olan hurdanın %83,6'sı ithal edilmek zorundadır. Bu kadar yaygınlaşan E.A.F. teknolojisinin en büyük maliyet kalemini oluşturan hurdanın (Çizelge 1.3) ithal edilmesi ve pahalı elektrikle üretim yapılması, Türk çelik sektörünün dünya piyasasında rekabet edebilme şansını çok azaltmaktadır (Kartay, 1995; Aydın, 1996).

Çizelge 1.3 Ark ocaklı tesislerde 1 ton mamul çelik üretiminin maliyet içi girdi dağılımı (Kartay, 1995).

	% Pay
Hurda	63,89
Yardımcı Madde + İşletme Malzemesi	10,49
İşçilik	5,53
Enerji	13,97
Amortisman	1,63
Diğer	4,49
Sınai Maliyet	100,0
Genel Giderler	22,35
Ticari Maliyet	122,35

Bu hammadde probleminin çözümünde, dünyada artık oturmuş bir üretim yapısına sahip olan sünger demir (ya da direkt redüklenmiş demir - DRI) dikkate alınmalıdır. Tamamen yerli hammadde kaynakları kullanılarak üretilebilecek olan bu hammadde (DRI) sayesinde hem yeterince mevcut olan ve değerlendirilmeyen hammadde kaynaklarımız harekete geçirilecek, hem de E.A.F.'nın büyük problemi ve sonu belirsiz olan ithal hurda kullanımı büyük oranda azalacaktır.

Bu çalışmada, ülkemizin ihtiyaçları göz önüne alınarak yerli cevher ve kömür kaynaklarımızın değerlendirilerek, sünger demir (Direkt Redüklenmiş Demir-DRI ya da Ön Redüklenmiş Demir) üretiminin gerçekleştirilmesi ve üretilen sünger demirin E.A.F.'da kullanılabilirliği incelenmiştir.



2. SÜNGER DEMİRİN (DRI) ÖZELLİKLERİ

2.1 Sünger Demirin Tanımı

Sünger demir, toz, parça ya da pelet halindeki demir cevherinin gaz ya da katı redükleyici kullanılarak ergime sıcaklığının altında (950-1100°C'da) redüklenmesi sonucu elde edilen ürünün adıdır.

Elde edilen bu ürün, yüksek oranda metalik demir içermesinin yanında, indirgenmemiş demir oksitler ile bir miktar karbon ve cevherden gelen gang bileşenlerini taşımaktadır.

Redüklenen cevher, süngerimsi bir görüntüye sahip olduğu için "sünger demir" adı verilmiştir. Bu ürünün bir başka adı ise, "direkt redüklenmiş demir"dır. Buradaki direkt redüklenme tabiri, demir oksidin karbon ile reaksiyonunu ifade eden terimle karıştırılmamalıdır. Sünger demir üretimiyle yüksek fırın kademesi pas geçildiği için bu tabir kullanılmaktadır (Rosenqvist, 1983).

2.2 Sünger Demirin Yapısı

Sünger demirin taşıdığı özellikler büyük oranda kullanılan hammadde özellikleri ve üretim yöntemiyle belirlenmektedir. Çok az miktarda istenmeyen kirletici elemanları taşıyan sünger demirde genellikle toplam demir içeriği %85'in üzerindedir ve %2,5'a kadar karbon taşımaktadır. Kalan kısım ise redüklenmeyen demir oksitler ile gangdır.

Cevherin taşıdığı gang, redüksiyon sonunda demirden ayrılmayacağı için özellikle E.A.F.'na beslenecek sünger demir üretiminde kullanılacak cevherin, demir içeriği yüksek ve gang miktarı düşük olmalıdır (Plöckinger ve Etterich, 1985; Ottmar ve Siegers, 1985).

Sünger demirin görünür yoğunluğu $\leq 4 \text{ g/cm}^3$ kadardır, ancak briket haline getirildiğinde yoğunluğu artmaktadır (Plöckinger ve Etterich, 1985).

Çizelge 2.1 Sünger demirin metalurjik ve teknolojik özellikleri (Pantke ve Queens, 1976).

Özellikler	Etki Yolları	Sonuçlar
<i>Metalurjik</i>		
Redüksiyon derecesi	Fırındaki işlemler	Ergime sırasındaki reaksiyonlarla C ve O ₂ ayarlanarak uygun hale getirilir.
P miktarı	Cevher seçimi	P, oksidik olarak kalır, curuf içinde nispeten düşük miktarda olur.
S miktarı	Redüksiyon elemanı	Gaz redüksiyonu sırasında desülfürizasyon gerekli değildir.
Gang türü	Cevher seçimi, hazırlama, peletleme sırasında katkı elemanları	Curuf miktarı, Ürünün kullanılabilirlik kalitesi
İz elementler	Cevher seçimi	Çok düşük miktarlardadır, ıskarta oranını etkilemezler.
<i>Teknolojik</i>		
Dökme mal	-	Birim zamandaki şarj miktarının iyileşmesi. Sürekli şarj olanağı.
Elek altı miktarı	Cevher seçimi, eleme, sıcak briketleme.	Toz oluşumu, depolama ve taşıma sorunları.
Düşük ısı iletkenlik. Düşük yoğunluk	Sıcak briketleme (Bağlayıcı eleman yok ise)	Ergitme prosesinde soğuma. Depolama ve taşıma sorunları.
Yüksek porozite ve yeniden oksitlenme eğilimi	Redüksiyon sıcaklığı, sıcak briketleme.	Depolama ve taşıma sorunları, ufalanma eğilimi.

Sünger demirin metalurjik ve teknolojik özellikleri ile bunları etkileyen faktörler ve alınan sonuçlar Çizelge 2.1’de görülmektedir (Pantke ve Queens, 1976). Farklı yöntemlere göre üretilmiş olan sünger demirin özellikleri ise Çizelge 2.2’de verilmiştir (Aydın, 1990; HYL III, 1996; Midrex, 1997).

2.3 Sünger Demirin Üstünlükleri

Mini çelik tesisleri, hurdanın kullanılabilirliği ve kalitesi üzerine kurulmuştur ve hurdanın dalgalanan fiyatı ve sağlanabilirliğinden etkilenir. Hurda içindeki kirleticiler de belli çelik kalitelerinin üretimini sınırlar.

Çizelge 2.2 Farklı yöntemlerle üretilen sünger demirlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

	Midrex	HYL III	SL/RN
Toplam demir (Fe _T)	90-94	91-93	93,2
Metalik demir (Fe ⁰)	83-89	83-88	86,7
Metalizasyon	92-95	92-95	93
C	1,0-2,5	1,5-4,0	0,01
P	0,005-0,09	0,02-0,05	-
S	0,001-0,03	0,002-0,019	0,02
SiO ₂		1,5-2,5	
Al ₂ O ₃		0,4-1,5	
CaO	2,8-6,0	0,3-1,8	4,7
MgO		0,5-1,8	
MnO		0,06-0,15	
Ni, Cu, Cr, Mo, Sn	Eser	Eser	-
Yığın yoğunluğu (ton/m ³)	1,6-1,9	1,6-1,9	-
Görünür yoğunluk (ton/m ³)	3,4-3,6	2,8-3,5	-

Mini çelik fabrikalarının yanına kurulan işletmeler, çelik yapımında doğrudan kullanılan yüksek oranda metalleşmiş demir malzemenin kararlı üretimini sağlayabilirler. Elde edilen sünger demir (DRI) birtakım üstün özelliklere sahiptir:

1. Hurda dışında, metalleşmiş demir malzeme (DRI) geniş ölçüde temin, kalite veya fiyat dalgalanmalarına maruz kalmaz.
2. Hurda ve sünger demirin karışımı veya tamamen sünger demir kullanımıyla daha yüksek ergitme hızlarına ulaşılması sonucu işletme verimliliği artar ve sonuç ürün daha iyi kontrol edilir.
3. Üniform fiziksel ve kimyasal özellikler, şarj işleminin sonunda ısı ve kimyasal şarjların güvenilir tahminine ve bu da ergitme periyodu sırasında C, S ve P kontrolüne imkan sağlar. Böylece rafinasyon periyodunda da kısalma sağlanır.

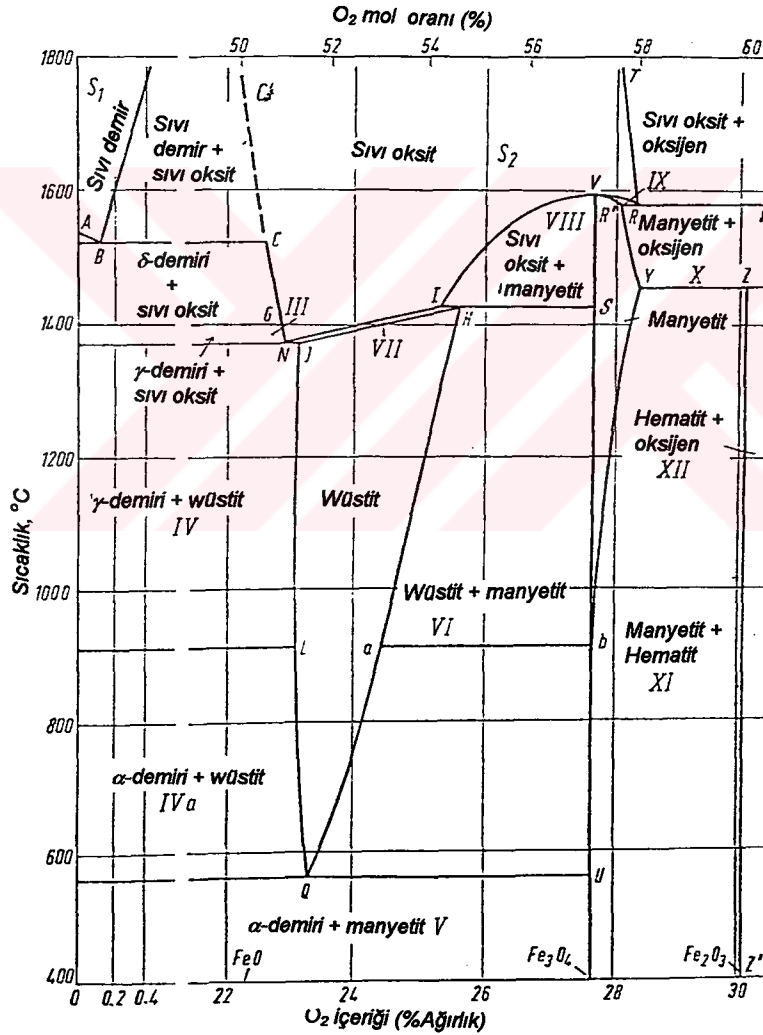
4. Tap to tap süresindeki azalma, verimliliği önemli ölçüde artırır ve sıvı çelik fiyatını düşürür.
5. Sünger demirin saflığı, çok düşük seviyede kirleticiler bulunması gereken yüksek kaliteli çeliğin üretimini mümkün kılar.
6. Hurda ile karıştırılarak kullanıldığında ticari olarak kaliteli çeliklerin en ekonomik şekilde üretilmesinde düşük kaliteli hurda kullanımını sağlar.
7. Sünger demirin kararlı birim fiyatı ve sürekli şarjı, E.A.F.'nın verimliliğini artırarak çelik yapım maliyetini büyük oranda iyileştirir (Midrex, 74).



3. DEMİR OKSİTLERİN REDÜKSİYONUNUN TERMODİNAMİĞİ

3.1 Demir-Oksijen Sistemi

Demir-oksijen sisteminde 400-1400°C arasında oluşan termodinamik olarak kararlı fazlar Şekil 3.1'de verilmiştir. Katı α ve γ -Fe'inde oksijenin çözünürlüğü çok küçüktür (ağırlık olarak %0,01 O_2 'den küçüktür). Ergimiş demir ise çok büyük oksijen çözme kabiliyetine sahiptir (Bogdandy ve Engell, 1971; <http://www.met.kth.se/tc/pd/element/Fe-O.html>, 1998).

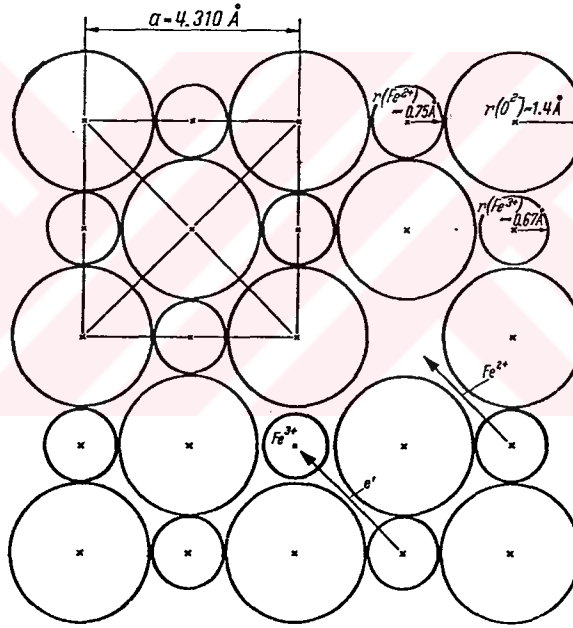


Şekil 3.1 Demir-Oksijen sistemi (Oeters, 1989).

Demir oksijenle 3 tane kararlı, katı bileşik oluşturur: $Fe_{1-y}O$, Fe_3O_4 ve Fe_2O_3 .

Wüstit (Fe_{1-y}O), %23,1-25,6 arasında O_2 içerebilir. Hiçbir zaman $\text{Fe}/\text{O} = 1$ olan stokiometrik bileşime ulaşamaz (bu da %22,3 O_2 demektir). Çünkü kübik kafes sisteminde kristalleşen wüstitte oksijen alt kafesi tamamen dolu olmasına rağmen demir alt kafesinde bazı kafes noktaları boştur. Fe_{1-y}O formülündeki y , elverişli demir kafesi noktalarının sayısına göre, boş demir iyonu kafes noktalarının oranını temsil eder.

Demir iyonu boşlukları, metal iyonlarının kafes boyunca hareketine imkan sağlarlar: Bir demir iyonu komşusu olan boş kafes noktasına atlayabilir ve böylece bir kafes aralığı ilerler, bu durumda demir iyonu boşluğu karşı yönde bir kafes aralığı kadar taşınmış olur. Şekil 3.2'de bu durum görülmektedir (Bogdandy ve Engell, 1971).



Şekil 3.2 Wüstitin (100) düzleminde demir iyonu boşlukları ve demir iyonlarının taşınması (Bogdandy ve Engell, 1971).

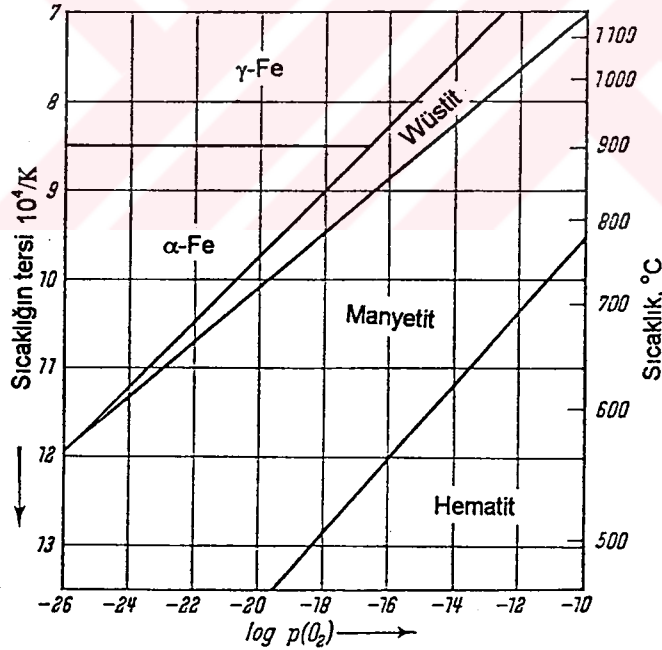
Wüstitin kompozisyonu, demirin aktivitesi veya gaz fazdaki O_2 'nin kısmi basıncıyla değişir. Wüstitin yoğunluğu artan boşluk içeriği ile 5,728 g/cm³'ten 5,613 g/cm³'e düşer. 570°C'ta $\text{Fe}/\text{Fe}_{1-y}\text{O}$ ve $\text{Fe}_{1-y}\text{O}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ denge eğrileri kesişir, bu nedenle 570°C'nin altında wüstit, demir ve manyetite ayrışır (Bogdandy ve Engell, 1971).

Manyetit, kübik kafes tipinde spinel yapıda kristalleşir. Kafeste O_2 kübik sıkı paket yapısı oluşturur ve spinelin birim hücresinde 24 metal iyonu ve 32 O_2 iyonu vardır. İdeal dizilmiş kafeste metal iyonları 8 tetraedr ve 16 oktaedr yapıdaki boşluğu doldurmuş durumdadır (Bogdandy ve Engell, 1971; Şeşen, 1986).

Manyetitin oksitlenmesiyle iki farklı hematit (Fe_2O_3) bileşimi elde edilir. Bunlardan biri $\gamma-Fe_2O_3$ 'tir ve kafes yapısı manyetite benzer. $\gamma-Fe_2O_3$, $400^\circ C$ 'nin üzerindeki oksitlenme sıcaklıklarında $\alpha-Fe_2O_3$ 'e dönüşür. O_2 iyonlarının düzeni FeO , Fe_3O_4 ve $\gamma-Fe_2O_3$ 'te birbirine çok benzerdir.

$\alpha-Fe_2O_3$ romboedrik yapıdadır ve hematitin redüksiyonunda, redüksiyon ürünleri daha büyük gözenekli olur (Bogdandy ve Engell, 1971).

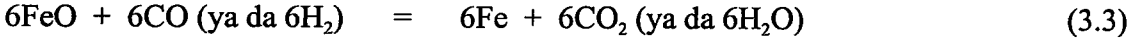
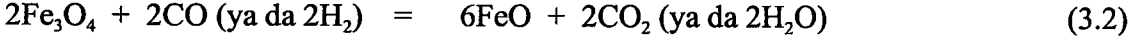
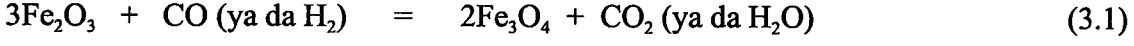
Demir oksitlerin termodinamik olarak kararlı olduğu bölgeler Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



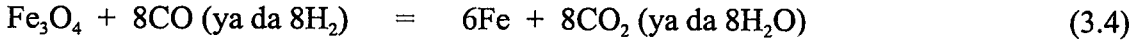
Şekil 3.3 Demir, wüstit, manyetit ve hematitin termodinamik olarak kararlı olduğu bölgeler (Bogdandy ve Engell, 1971).

3.2 Demir Oksitlerin Redüksiyonunun Termodinamik Yönü

Demir oksitlerin hematitten itibaren bir CO-CO₂ karışımı ya da H₂-H₂O karışımında redüklenmesi, 570°C'nin üzerinde 3 kademede gerçekleşir:



570°C'nin altındaki sıcaklıklarda (3.4)'e göre manyetit doğrudan demire redüklenebilir:



Yukarıdaki herbir reaksiyonda demir atomları aynı sayıda tutularak, gaz ile reaksiyona giren oksijenin nisbi miktarları gösterilmiştir (Coudurier vd., 1978).

Redüksiyon işleminde gerekli olan redükleyici gaz aşağıdaki iki reaksiyona göre üretilir:



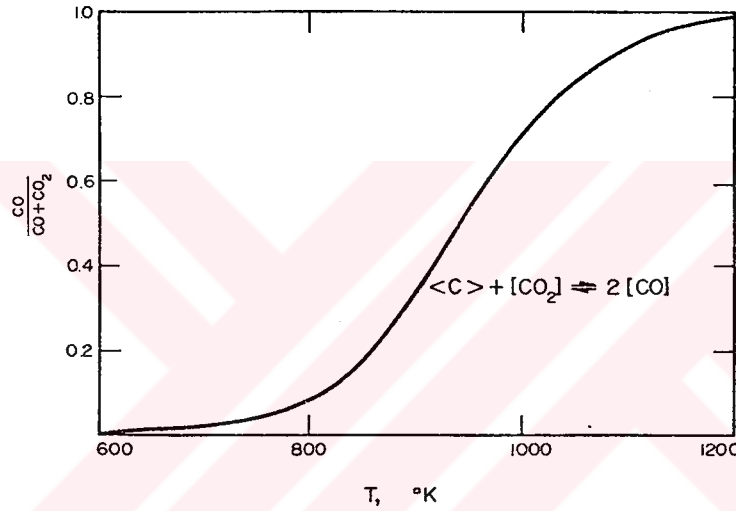
(3.6) reaksiyonu Boudouard reaksiyonu olarak bilinir ve denge sabiti;

$$K_p = \frac{P_{\text{CO}}^2}{P_{\text{CO}_2} \times a_c} \text{ şeklindedir. } a_c = 1 \text{ alındığında kısmi basınçlar cinsinden } K_p = \frac{P_{\text{CO}}^2}{P_{\text{CO}_2}}$$

olacaktır. Denge durumunda C ile dengede olan CO ve CO₂'in kısmi basınçları verilen bir sıcaklık ve toplam basınçta hesaplanabilir. Şekil 3.4'de sıcaklığa bağlı olarak, katı C ve CO+CO₂ bulunan bir ortamda CO'in kısmi basıncının değişimini gösteren Boudouard eğrisi görülmektedir. Burada toplam basınç 1 atm.'dir. Toplam basıncın değişmesi durumunda eğri aşağı ya da yukarı yönde kayacaktır (Coudurier vd., 1978; Mookherjee vd., 1986; Dikeç ve Aydın, 1991).

Şekil 3.4'den görüleceği gibi 675K'e yakın sıcaklıklarda CO'nin kısmi basıncı sıfıra yakınken, 1175K'nin üstünde pratik olarak 1 atm.'dir (Coudurier vd., 1978).

Verilen bir sıcaklık için CO-CO₂ karışımındaki CO'nin kısmi basıncı Boudouard eğrisinde gösterilen değerden farklıysa sistem dengeye ulaşana dek reaksiyon olacaktır. Boudouard eğrisinin altında kalan alandaki bir gaz karışımı fazla CO₂ taşımaktadır ve reaksiyon CO₂ ve C'nun harcanması yönünde olacaktır. Eğrinin üstünde kalan bölgedeki bir gaz karışımı ise dengeye ulaşana kadar C birikmesi yönünde reaksiyon yapacaktır (Coudurier vd., 1978).

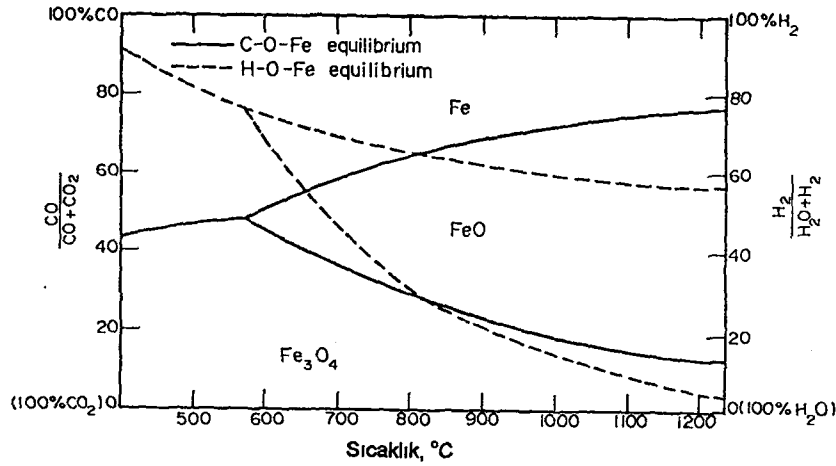


Şekil 3.4 Boudouard eğrisi (Coudurier vd., 1978).

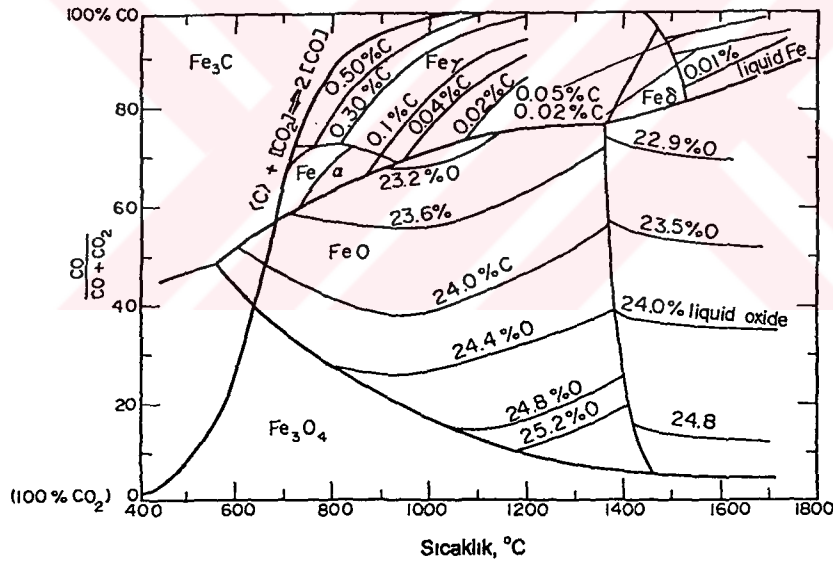
Demir oksitlerin redüksiyon reaksiyonlarında (3.1; 3.2; 3.3) sistemin değişken sayısı ikidir. Toplam basınç ve sıcaklık sabit tutulursa, gazların kısmi basınçları belirlenebilir. Aşağıdaki iki eşitliğin çözümüyle, verilen bir basınçta sıcaklığın bir fonksiyonu olarak her bir reaksiyondaki iki yoğun fazla dengede olan redükleyici gazın kısmi basınç eğrileri çizilebilir.

$$\Delta G^\circ = -RT \ln \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} \quad (3.7)$$

$$P_{CO} + P_{CO_2} = P \quad (3.8)$$



Şekil 3.5 Chaudron eğrileri (----- C-O-Fe dengesi , ----- H-O-Fe dengesi) (Coudurier vd., 1978).



Şekil 3.6 Bauer-Glaessner diyagramı. CO ve CO₂ ortamında wüstitin oksidasyonu ve demirin karbürleşme derecesi ile birlikte C-O-Fe dengesi (Coudurier vd., 1978).

Şekil 3.5’de gösterilen Chaudron eğrileri ve 3.6’da gösterilen Bauer-Glaessner diyagramı sıcaklığın bir fonksiyonu olarak demir ve oksitleriyle dengede olan gazların kısmi basınçlarını vermektedir. Bu eğrilerden görüleceği üzere 820°C’a kadar CO, H₂’den daha etkili bir redükleyicidir, daha yüksek sıcaklıklarda ise tersi durum söz konusudur. Çünkü

demir oksitleri redüklemek için 820°C'dan düşük sıcaklıklarda, gereken H_2 kısmi basıncı CO'den daha büyüktür (Coudurier vd., 1978).

(3.7) dengesinde denge sabiti; $K_p = \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ 'tir. Demir oksitlerin CO ile redüksiyonunun gerçekleşme şartı, redükleyici gazdaki $\frac{CO_2}{CO}$ oranının denge sabitinde gösterilen değerden küçük olmasıdır. Bu durumda redüksiyon reaksiyonu sağa doğru ilerleyecektir.

CO, redükleyici olmasının yanında aynı zamanda karbürleyici bir elemandır. CO-CO₂ karışımı, Boudouard eğrisi ile wüstit-demir dengesini gösteren eğri arasında kalan alanda bir bileşime sahip olduğunda C'nun bir kısmı demir içinde çözünecektir (Coudurier vd., 1978; Rosenqvist, 1983).

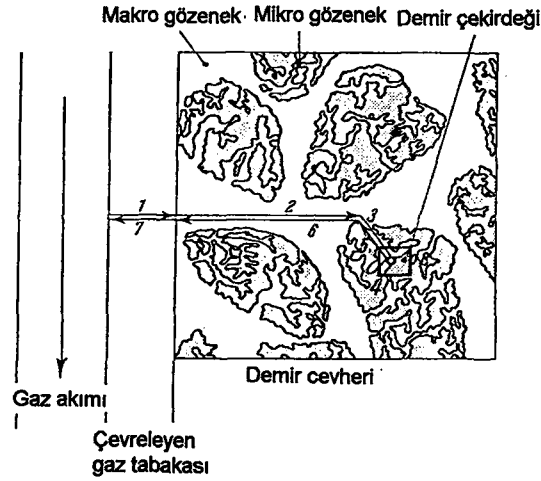
4. DEMİR OKSİTLERİN REDÜKSİYONUNUN KİNETİĞİ

4.1 Redüksiyonun Mekanizması

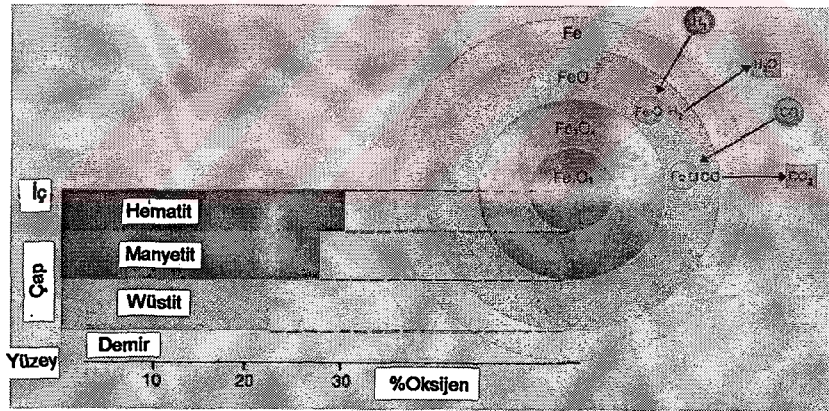
Demir oksitlerin redüksiyonu bir seri yardımcı proseslerin gerçekleşmesiyle oluşur. Bu prosesler şu şekilde gerçekleşir:

1. Redükleyici gaz cevher parçaları arasındaki makro boşluklardan akar ve cevher parçalarını çevreleyen bir sınır tabakası oluşturur.
2. Redüksiyon gazının taşınmasıyla sınır tabakası boyunca oksit ve gaz faz arasında madde değişimi olur.
3. Redüksiyonun ilerlemesiyle redükleyici gaz, cevher parçasının ya da cevher parçası üzerindeki reaksiyon ürünlerinin makro ya da mikro gözeneklerinden difüze olur.
4. Oksit ve gaz faz arasındaki arayüzeyde kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyon şu kademeleri kapsar:
 - a) Redükleyici gazın adsorbsiyonu,
 - b) Oksit kafesinden oksijenin ayrılması,
 - c) Reaksiyon ürünlerinin (manyetit, wüstit veya demir) çekirdek oluşumu ve gelişmesi,
 - d) Reaksiyon ürünü gazların ayrılması.
5. Arayüzeyden ürünler difüze olur.
6. Redükleyici gazın akışı yönünde ürünler uzaklaşır (Themelis ve Gauvin, 1963; Bogdandy ve Engell, 1971; Alcock, 1976; Rosenqvist, 1983; Mookherjee vd., 1986). Bu bir seri işlemin şematik ifadesi Şekil 4.1’de görülmektedir.

Demir oksitlerin redüksiyonunda reaksiyon arayüzeyi belirgin olarak görülür. Redüksiyon ilerledikçe arayüzey dış yüzeyden merkeze doğru ilerler ve redüklenmiş ve redüklenmemiş kısımlar arasında belirgin bir sınır oluşur. Bu belirginlik H_2 ile redüksiyonda daha fazladır. CO ile redüksiyonda iç indirgenmenin fazlalığı nedeniyle arayüzey sınırları daha zor tespit edilir. Bu şekildeki redüksiyon işlemi “Büzülen çekirdek” veya “Topokimyasal model” olarak tanımlanır (Şekil 4.2) (Midrex, 1974; Türkdogan, 1980; Rosenqvist, 1983).



Şekil 4.1 Demir cevherlerinde redüksiyon mekanizması (1.Sınır tabakasından CO'nin difüzyonu, 2.Cevherdeki makro gözeneklerden CO'nin difüzyonu, 3.Reaksiyon bölgesine mikro gözenekler yoluyla CO'nin difüzyonu, 4.Faz sınırı reaksiyonu, 5.Mikrogözenekler yoluyla CO₂'in difüzyonu, 6.Makro gözenekler yoluyla CO₂'in difüzyonu, 7.Sınır tabakasından CO₂'in difüzyonu. Demir çekirdeğine Fe²⁺ ve 2e⁻un taşınması.) (Bogdandy ve Engell, 1971).



Şekil 4.2 Topokimyasal redüksiyon modeli (Midrex, 1974).

4.2 Redüksiyonun Hızı

Genellikle yukarıda bahsedilen kademelerden birinin hız sabiti diğerlerinden önemli miktarda küçüktür ve bu kademe reaksiyon hızını kontrol eder. Demir oksitlerin redüksiyonunun kinetiğinde birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda redüksiyonun hızı, arayüzeydeki reaksiyonlarla ya da gazın redüksiyon ürünü tabakadan

difüzyonuyla kontrol edilmektedir (Themelis ve Gauvin, 1963; Türkdoğan, 1980; Rosenqvist, 1983).

5-15 mm. çaplı hematit parçacıklarının başlangıç redüksiyon hızının açıklanması oldukça komplekstir. Redüksiyon sırasında cevher çevresinde oluşan gaz filmi sınır tabakasından konveksiyon yoluyla kütle transferinin, hızı sınırlamadığını kabul edersek, redüksiyonun başlangıç hızı kısmen gaz difüzyonu kısmen de yüzeye yakın gözenek ağzlarındaki kimyasal reaksiyon ile kontrol edilir (Türkdoğan, 1980).

Redüksiyonun ilerlemesiyle (küresel parçacıklar için) Şekil 4.2’de görüldüğü gibi hematit iç kısım etrafında gözenekli manyetit, wüstit ve demir tabakaları oluşur. Dış kısımda oluşan demir tabakasının kalınlığı 1-1,5 mm.’ye ulaştığında redüksiyonun hızı bu gözenekli demir tabakasından gazın difüzyonuyla kontrol edilir (Türkdoğan, 1980).

Küresel parçacıklar için redüksiyonun hızı, redüksiyon arayüzey reaksiyonu ile kontrol edildiğinde şu şekilde olmaktadır (Themelis ve Gauvin, 1963; McKewan, 1965; Seth ve Ross; RaO, 1971; Paul ve Mukherjee, 1992):

$$r_o \cdot d_o \cdot [1 - (1 - R)^{1/3}] = k \cdot t \quad (\text{Jander Eşitliği}) \quad (4.1)$$

Redüksiyonun hızı, redüksiyon gaz difüzyonu ile kontrol edildiğinde aşağıdaki eşitliğe göredir (Seth ve Ross, 19..; RaO, 1971; Mookherjee vd., 1986; Ekanem ve Walker, 1989; Paul ve Mukherjee, 1992):

$$r_o^2 \cdot d_o \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{R}{3} - \frac{(1 - R)^{2/3}}{2} \right] = k \cdot t \quad (\text{Ginstling-Brounstein Eşitliği}) \quad (4.2)$$

r_o = Kürenin (peletin) başlangıç çapı,

d_o = Peletin başlangıç yoğunluğu,

R = Redüksiyon oranı,

k = Hız sabiti,

t = Redüksiyon süresi.

Buradaki hız sabiti k , d_0 'ın birimine bağlıdır. $d_0 = \text{g/cm}^3$ olursa, k , birim zamanda cm^2 reaksiyon yüzeyi başına reaksiyona giren malzemenin gram olarak ağırlığı olur.

Redüksiyon hızının sıcaklığa bağlı değişimi Arrhenius eşitliğine göre belirlenmektedir (Mackowiak, 1966; Rosenqvist, 1983; Ajersch, 1987; Steinfeld vd., 1995):

$$k = k_0 \cdot e^{-E/RT} \quad (4.3)$$

k : Hız sabiti,

k_0 : Frekans faktörü,

E : Aktivasyon enerjisi,

R : Gaz sabiti,

T : Sıcaklık.

Karbonla gerçekleştirilen redüksiyon işlemlerinde dikkate alınması gereken önemli bir nokta da kömürün gazlaşma işlemidir. Bazı araştırmacılara göre ise (Türkdoğan, 1980; Mookherjee vd., 1986; Ajersch, 1987) aslında redüksiyon hızını kontrol eden kademe kömürün gazlaşmasıdır.

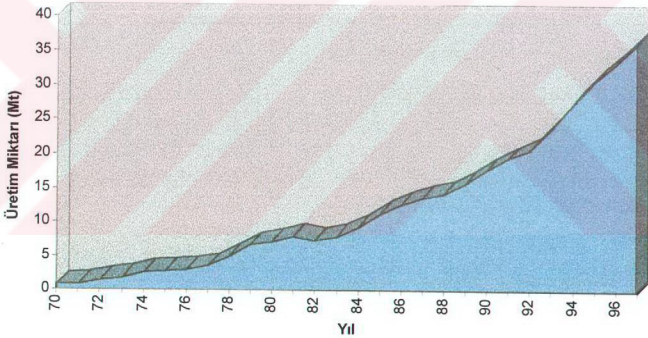
Mookherjee vd.'nin (1986) bildirdiğine göre, Seaton vd. demir oksitlerin karbon ile redüksiyonunda toplam redüksiyonun Boudouard reaksiyonu tarafından kimyasal olarak kontrol edildiğini belirtmektedirler.

5. DÜNYA'DA SÜNGER DEMİR ÜRETİMİNİN DURUMU

Sünger demir üretimi, 100 yıldan fazla bir süredir dünya demir-çelik üretiminin gündeminde olan bir konudur. İlk sünger demir tesisi 1873 yılında İngiltere'de kurulmuş, dört yıllık bir çalışmadan sonra üretim maliyetinin yüksek olmasından ötürü kapatılmıştır.

Daha sonraki yıllarda konu ile ilgili çalışmalar devam etmiş ve pek çok sünger demir üretim prosesi geliştirilmiştir. Ancak bunların çok az bir kısmı ticari olarak ayakta kalabilmiş ve günümüz sünger demir üretiminde pazar payı bulabilmiştir (Narçın ve Aydın, 1991).

Şekil 5.1'de dünya sünger demir üretiminin yıllara göre değişimi görülmektedir. Üretimin yıllara göre değişiminde kararlı bir artış olduğu görülmektedir.



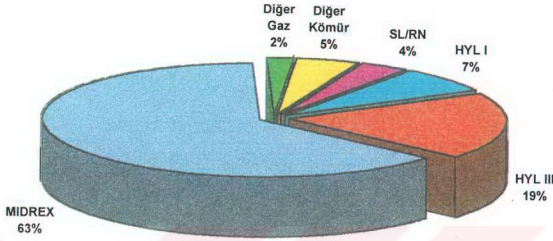
Şekil 5.1 Yıllara göre dünya sünger demir üretimi (Mt) (Midrex, 1997).

Dünya sünger demir üretiminin ülkelere ve yöntemlere göre dağılımı Çizelge 5.1'de verilmiştir. Bu çizelgeden de görüldüğü üzere, sünger demir üretiminin önemli bir kısmı demir cevheri, doğalgaz ve kömür yataklarının yoğun şekilde bulunduğu bölgelerde gerçekleştirilmektedir.

Çizelge 5.1 Ülkelere ve yöntemlere göre dünya sünger demir üretimi (Midrex, 1997).

Ülkelere Göre Dünya DRI Üretimi (Mt)																								Ülkelere Göre Dünya DRI Üretimi (Mt)																							
ADI	'70-'75	'76	'77	'78	'79	'80	'81	'82	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99																						
Latin America																																															
ARGENTINA	-	0.03	0.29	0.40	0.85	0.78	0.83	0.89	0.95	0.91	0.99	0.93	1.04	1.07	1.17	1.03	0.91	0.98	1.16	1.27	1.33	1.42	1.50	1.50	1.50																						
BRAZIL	0.38	0.25	0.33	0.31	0.26	0.27	0.23	0.23	0.25	0.26	0.29	0.29	0.35	0.40	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47																						
PERU	5.19	1.24	1.51	1.84	1.69	1.86	1.94	1.71	1.76	1.67	1.61	1.39	1.56	1.68	1.81	1.98	2.14	2.44	2.73	3.24	3.70	4.34	5.30	5.30																							
CHILE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
TRINIDAD & TOBAGO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
VENEZUELA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
Middle East/N. Africa																																															
EGYPT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
IRAQ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
LIBYA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
QATAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
SAUDI ARABIA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
Asia/Oceania																																															
INDIA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
CHINA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
INDONESIA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
JAPAN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
MALESIYA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
NEW ZEALAND	0.35	0.10	0.10	0.12	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17	0.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
North America																																															
CANADA	0.94	0.30	0.36	0.65	0.92	0.89	0.96	0.50	0.54	0.50	0.74	0.69	0.73	0.77	0.71	0.73	0.56	0.63	0.74	0.77	1.01	1.42	1.39	1.39																							
US	2.25	0.56	0.57	0.54	0.79	0.62	0.54	0.07	-	0.12	0.14	0.16	0.21	0.29	0.29	0.39	0.41	0.39	0.44	0.48	0.46	0.45	0.51	0.51																							
Former USSR/Eastern Europe																																															
RUSSIA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
Africa																																															
ANGOLA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
SOUTH AFRICA																																															
AFRICA	0.16	0.09	-	0.08	0.11	0.12	0.12	0.10	0.08	0.27	0.22	0.11	0.14	0.14	0.13	0.11	0.12	0.05	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02																							
Western Europe																																															
GERMANY	1.29	0.41	0.16	0.35	0.51	0.45	0.48	0.32	0.07	0.10	0.10	0.17	0.20	0.27	0.35	0.31	0.26	0.17	0.18	0.28	0.41	0.37	0.47	0.47																							
ITALY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
SWEDEN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
DUNYA TOPLAMI	10.56	3.02	3.52	5.00	6.64	7.14	7.92	7.28	7.90	9.34	11.17	12.53	13.52	14.09	15.63	17.68	19.32	20.51	23.65	27.37	30.67	33.25	36.18	36.18																							
Proseslere Göre Dünya DRI Üretimi (Mt)																								Proseslere Göre Dünya DRI Üretimi (Mt)																							
ADI	'70-'75	'76	'77	'78	'79	'80	'81	'82	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99																						
ACCAR	0.03	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	0.01	0.05	0.05	0.09	0.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
ARCON	0.26	0.17	0.10	0.12	0.21	0.21	0.24	0.07	0.05	0.08	0.08	0.07	0.08	0.13	0.17	0.16	0.17	0.26	0.29	0.30	0.27	0.27	0.24	0.24																							
COOL	0.16	0.09	-	0.08	0.11	0.12	0.12	0.10	0.05	0.08	0.07	0.08	0.09	0.09	0.09	0.15	0.16	0.14	0.18	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19																							
DKC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
FOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
GHAEM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
HYLLI	5.52	1.48	1.77	2.15	2.27	2.49	2.71	2.71	2.98	3.08	3.26	3.51	3.16	3.00	3.13	3.69	3.72	3.38	3.40	3.04	2.39	2.81	2.58	2.58																							
IRON CARBIDE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
JINDAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
KORUMETOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
MIDREX	3.62	0.95	1.36	2.12	3.65	3.68	4.06	3.69	3.91	4.86	5.91	6.75	8.14	8.87	9.56	10.73	11.96	13.26	15.91	17.83	19.86	21.00	22.97	22.97																							
NSC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
OSIL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
PLASMARE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
PRACET	0.25	0.07	0.10	0.23	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
SIL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
SURIN	0.42	0.19	0.14	0.14	0.18	0.23	0.26	0.27	0.25	0.45	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.15	0.01	0.002	-	0.02	0.11	0.06	0.06																							
TISCO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																						
DUNYA TOPLAMI	10.56	3.02	3.52	5.00	6.64	7.14	7.92	7.28	7.90	9.34	11.17	12.53	13.52	14.09	15.63	17.68	19.32	20.51	23.65	27.37	30.67	33.25	36.18	36.18																							

Temelde kullanılan redükleyici madde cinsine göre sınıflandırılan sünger demir üretim yöntemlerinde, pazar payı açısından gaz redükleyici kullanan yöntemlerin üstünlüğü sözkonusudur ve bu durum Şekil 5.2 'de görülmektedir (Narçın ve Aydın, 1991; Midrex, 1997).



Şekil 5.2 Dünya sünger demir üretiminin 1997 yılında, proseslere göre dağılımı (Midrex, 1997).

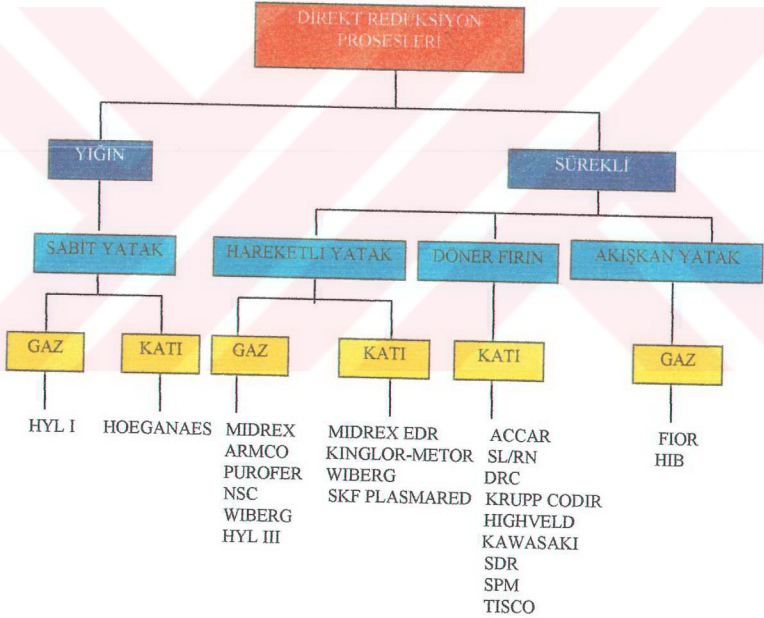
6. SÜNGER DEMİR ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Sünger demir üretim yöntemlerini farklı şekillerde gruplamak mümkündür:

- Üretim sırasında kullanılan temel fırın prosesine göre,
- Kullanılan redükleyici elemana göre.

Belirtilen şekillerde sınıflandırılmış sünger demir üretim metodları Çizelge 6.1 ve 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Sünger demir üretim yöntemlerinin fırın prosesine göre sınıflandırılması (Pearce ve Cameron, 1985).



Gaz redükleyici kullanılan yöntemlerde fırın haricinde bir dönüştürücü içinde doğal gaz, petrol ya da kömürden dönüştürülerek elde edilen redükleyici gazlarla işlem

gerçekleştirilir. Cevherdeki demir oksitler, bu redükleyici gazlarla reaksiyona girerek redüklenirler (HYL, 1979; Midrex, 1974; Şeşen, 1990; Midrex, 1997).

Çizelge 6.2 Sünger demir üretim yöntemlerinin redükleyici elemana göre sınıflandırılması (Şeşen, 1990; Narçın ve Aydın, 1991).

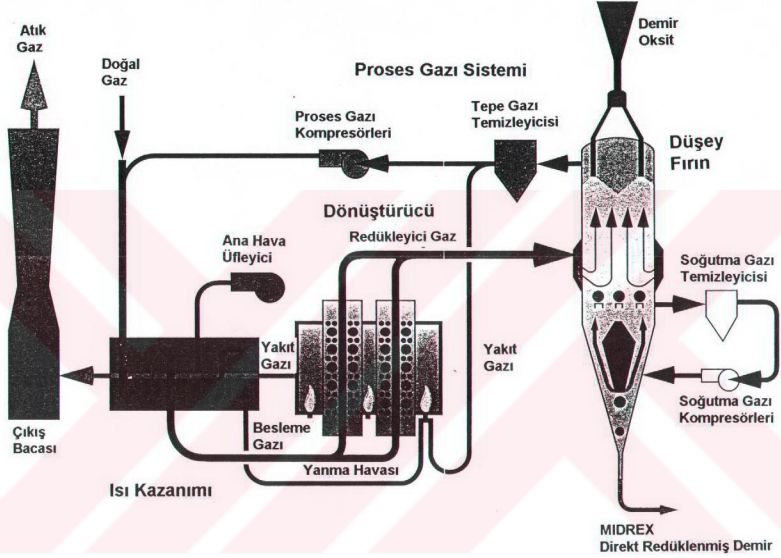
Yakıt	İndirgeme Fırını	Cevherin Cinsi	Yöntem
Gaz	Sabit Yatak	Pelet ve parça cevher	HYL I
	Hareketli Yatak	Pelet ve parça cevher	HYL III Midrex Accar
	Akışkan Yatak	Toz cevher	Fior
Kömür	Döner Fırın	Pelet ve parça cevher	SL/RN Codir DRC Diğer
	Döner Hazneli Fırın	Pelet	Fastmet

Redükleyici madde olarak katı yakıtlar kullanıldığında daha çok kok tozu, ucuz kömürler veya linyit tercih edilir. Her durumda ana redükleyici eleman karbondur. Genellikle fırın içinde katı karbonun oksitlenerek CO oluşturması ve bu CO'nun demir oksitleri redüklemesiyle işlem gerçekleştirilir. Katı redükleyici kullanıldığında kömürün içerdiği S'nin etkisini ortadan kaldırmak için bir miktar desülfürizasyon maddesi ilave edilir (Davis vd., 1982; Rosenqvist, 1983).

6.1 Midrex Yöntemi

Midrex direkt redüksiyon prosesi "Surface Combustion" firması tarafından geliştirilmiştir. Bu firma 1940'ların sonunda oksit peletlerin şaft fırınına tamamlamıştır. 1950'lerde Ohio'da başlayan şaft fırını ve gaz dönüşümü kullanılarak demir cevherinin direkt redüksiyonu çalışmaları, 1960'larda "Midrex Division" ın Portland'da ticari boyuttaki işletmeyi başarıyla çalıştırmasıyla sürmüştür. Bugün dünya sünger demir üretiminin %63'lük kısmı Midrex İşletmeleri tarafından gerçekleştirilmektedir (Midrex, 95).

Proses, şaft fırını ve gaz üretimi teknolojilerini ekonomik ve sürekli bir direkt redüksiyon sisteminde bir araya getirmektedir. Sistemde kullanılan gaz redükleyiciler doğal gaz veya diğer yakıtların dönüşümünden sağlanmaktadır. Prosesin akım şeması ve temel reaksiyonlar Şekil 6.1'de görülmektedir. Oksit peletler ve parça cevherler hammadde olarak kullanılmaktadır.

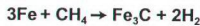
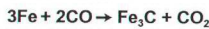


Prosesin Kimyası

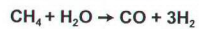
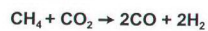
Redüksiyon



Karbürizasyon



Dönüşüm



Şekil 6.1 Midrex yönteminin çalışma prensibi ve gerçekleşen temel reaksiyonlar (Midrex, 1997).

Direkt redüksiyon fırını orta basınç altında çalışır. Redükleyici ve soğutucu gazlar fırın sistemine, alt ve üst kısma yerleştirilen dinamik gaz contalarıyla taşınırlar. Sadece yanmayan inert gaz atmosfere bırakılır.

Direkt redüksiyon fırını iki bölgeye ayrılır; redüksiyon bölgesi ve soğutma bölgesi. Üst kısım ya da redüksiyon bölgesinde aşağı inen ham malzeme ilk olarak işlem sıcaklığına ısıtılır daha sonra metalleşir ve karbürleşir. Redükleyici gazlar şaft fırınına kontrollü sıcaklık ve analizde fırının çevresinde bulunan çok sayıdaki aralıklardan girer. Bu gazlar, yük boyunca tam olarak dağılır ve oksijeni almak için demir oksitlerle reaksiyona girerler.

Reaksiyon bölgesinde harcanan redükleyici gaz ya da tepe gazı aşağı inen ham malzemeyi ön ısıtır ve fırını nisbeten düşük sıcaklıkta terkeder. Bu tepe gazı daha sonra bir temizleyicide soğutulur ve yıkanır. Burada su buharı yoğunlaşır ve parçacıklar alınır. Temizlenen tepe gazının büyük kısmı daha sonra doğal gazla karıştırılır ve yeni redükleyici gaz üretmek için dönüştürücüye verilir. Tepe gazındaki oksijen taşıyıcılar, hava ya da buhar ilavesi olmaksızın dönüşüm için yeterli oksitleyici ortamı sağlarlar. Kalan tepe gazı doğal gazla karıştırılır ve dönüştürücüyü ısıtmak için yakıt olarak kullanılır (Midrex, 1974).

Hassas kontrol ve karıştırma sistemi redükleyici gazın üniform kompozisyonunu korur. Midrex Prosesi ile tepe gazının ısı değeri korunur ve 1 ton ürün başına yakıt tüketimi diğer ticari proseslere göre daha azdır.

Fırının daha alt kısmında ya da soğutma bölgesinde aşağı inen sıcak metalleşmiş malzeme, diğer geri dolaşimli kapalı gaz sistemi ile soğutulur ve DRI'nın C içeriği artar, fırından ayrılan soğutucu gaz bir temizleyicide soğutulur, yıkanır ve kontrollü gaz kompozisyonuyla soğutma bölgesine yeniden verilir. Metalleşmiş ürünün boşaltma sıcaklığı 30-50°C kadardır. Sıcak briketleme yapılacaksa soğutucu gaz devresi iptal edilir ve sıcak DRI şaft fırınından alınır (Midrex, 1996).

Redükleyici gaz, doğal gaz ve şaft fırınından geri dönen gazın (yani tepe gazı) karışımından üretilir. Bu karışım kimyasal olarak %90-92 H_2 ve CO 'e dönüştürülür. Dönüştürücü fırın, refrakter astarlı ve gaz sızdırmazlıdır, ayrıca katalizörle doldurulmuş alaşimli tüpler içermektedir. Dönüşüm, gaz karışımının katalizör tüplerinden yukarı doğru

geçmesiyle meydana gelir. Sıcak redükleyici gaz doğrudan şaft fırınında kullanılır (Midrex, 1995).

Midrex prosesinden elde edilen ürünün metalizasyon derecesi %95'tir. Ürünün karbon içeriği 1,0-2,5 arasında, sıcak briketlenmiş demirde (HBI)* %0,8-1,2 arasındadır ve metalizasyondan bağımsız olarak ayarlanabilir.

Proses çeşitli ürün seçeneklerine sahiptir. Bunlar; soğuk DRI ve HBI, soğuk DRI ve sıcak DRI, sıcak DRI ve HBI.

6.2 HYL Yöntemi

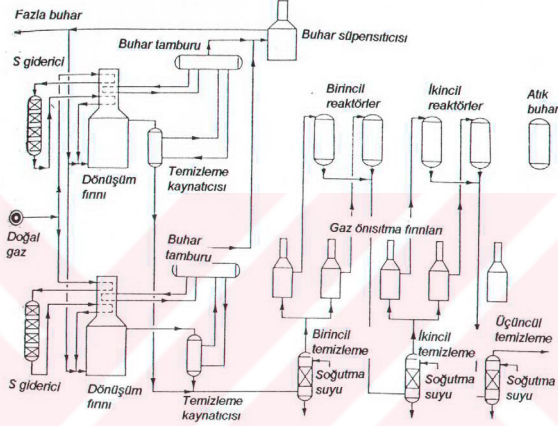
1950'lerdeki başlangıcından itibaren gaza dayalı HYL teknolojisinin gelişimi Hylsa fabrikasının acil ihtiyaç temeline dayanmaktaydı. Bu acil ihtiyaç; yassı mamüller üreten mini demir-çelik tesisindeki elektrik ark ocağını besleyebilecek ve ekonomik olarak elde edilip kullanılabilecek demirli hammaddeydi.

HYL I prosesinin gelişimindeki ilk düşünce, redükleyici gaz temini için Meksika'da bol bulunan ve ucuz olan enerji kaynağı doğal gazı kullanmaktır. Doğal gazın redükleyici gaza dönüşüm prosesi, su buharı kullanılarak gerçekleştirildi. Redüksiyon sürecinde katı-gaz temasını sağlayan kısım ise sabit yataklı reaktör olarak seçilmiştir (Morales, 1996b).

Böylece HYL I prosesi (Şekil 6.2), doğal gaz dönüştürücüsü, 4 adet sabit yataklı reaktör ve yardımcı sistemlerden (gaz ısıtıcılar, kompresörler, su sistemleri, elektrik tesisatı vb.) oluşturuldu (Morales, 1996b).

*HBI, pelet ve parça DRI'nin yüksek basınç altında 650°C'den yüksek sıcaklıkta sıkıştırılmasıyla üretilir. Bu sıkıştırma büyük boşlukları kapatır, yoğunluğu artırır ve redüklenmiş malzemenin iç yüzey alanını azaltır. Sonuç olarak HBI, pelet formundaki DRI'dan %75 daha az su çeker. Yoğunlaştırılmış HBI, aynı zamanda daha az toz üretir. (Tennies ve Kopfle, 1990).

1967’de enerji tüketimini azaltmak ve HYL işletmelerindeki verimliliği artırmak amacıyla paralel iki araştırma programı başlatıldı. İlk projede, orjinal 4 sabit yatak kavramı korunarak, yüksek sıcaklık gaz ısıtıcıları, redükleyici gazın redüksiyon prosesine dönmesi ve fabrika boyutlarının optimizasyonu üzerinde duruldu. Bu program 1979’da uygulandı ve HYL II prosesi olarak adlandırıldı (Morales, 1996b).

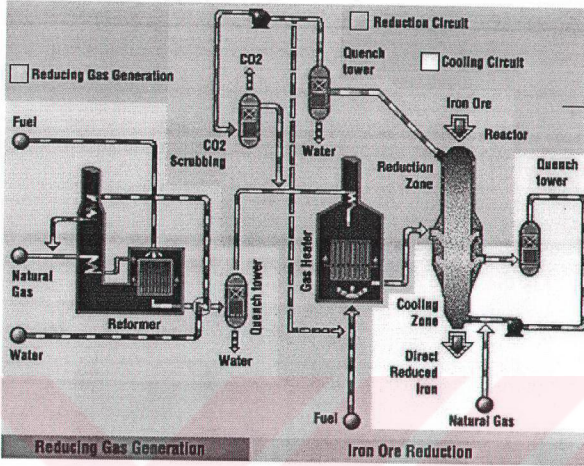


Şekil 6.2 200t/gün kapasiteli işletmede HYL I prosenin akım şeması (Bogdandy ve Engell, 1971).

İkinci proje, redüksiyon aşamasını hareketli yataklı reaktörde gerçekleştirme temeline dayalıydı ve bu yeni teknoloji HYL III prosesi olarak isimlendirildi (Morales, 1996b).

1975’den itibaren uygulamaya konulan ve yeni teknolojilerle zenginleştirilerek 1980’den itibaren iyice olgunlaşan HYL III Prosesinde (Şekil 6.3), doğal gaz dönüştürücüsünden elde edilen redükleyici gaz, sudan arındırıldıktan ve ısıtıldıktan (920°C) sonra hareketli yataklı reaktöre verilmektedir.

Ters akış prensibine göre çalışan hareketli yataklı reaktörde, redüksiyon kulesinin üst kısmından verilen pelet, parça cevher veya her ikisinin karışımı, sıcak redükleyici gazların yukarı doğru hareketiyle reaktörün üst kısmında redüklenirler.



Şekil 6.3 HYL III Prosesinin çalışma şeması (www.hylsamex.com.mx/hyl/ihylprocs.html).

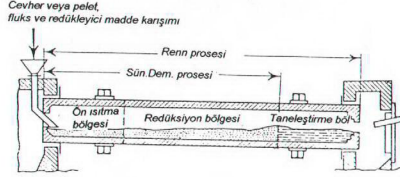
Reaktörün konik kısmında aşağıya inen yük (harman), koninin alt kısmından giren gaz tarafından (CH_4) soğutulur ve karbürize edilir. Ürün (DRI) otomatik olarak reaktörün dip kısmından alınır. Burada 3 tür ürün almak söz konusudur; soğuk DRI, sıcak DRI (700°C) ve HBI (Morales, 1996b; HYL III, 1996).

6.3 SL / RN Yöntemi

SL/RN (Stelco-Lurgi, Republic Steel, National Lead) direkt redüksiyon prosesinde özel dizayn edilmiş döner fırın kullanılmaktadır. Şarj malzemeleri olan cevher ve kömür, belli oranlarda karıştırılarak döner fırına yüklenirler. Şarjın kurutulması ve ön ısıtılmasından sonra redüksiyon sıcaklığında cevher içindeki demir oksitler CO vasıtasıyla redüklenirler. Kömürün fırın içinde dönüşümüyle kesintisiz olarak CO sağlanmaktadır.

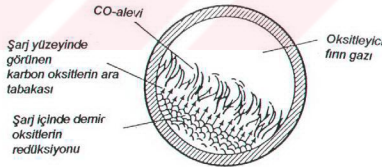
Proses için gereken sıcaklık, fırın boyunca yerleştirilmiş üfleçlerle fırın içine verilen doğal gaz, kok fırını gazı, fuel-oil veya kömür tozunun şarj üzerinde yakılması ve önceden belirlenen oranlarda verilen yanma havası ile sağlanır ve kontrol edilir (İmer, 1984).

Düşük sıcaklıklarda dönme hareketiyle ısı transferi hızlanır. Yüksek sıcaklıklarda ısı transferinde radyasyon etkisi esas olur ve dönme hareketinin etkisi azalır. Redüksiyon bölgesinde iki farklı gaz atmosferi vardır: Şarjın üstünde yakıtlı ısıtıcılardan çıkan oksitleyici gaz ve şarjın içine doğru kuvvetli bir redükleyici CO atmosferi (Şekil 4.5).



Şekil 6.4 Bir döner fırın kesiti (Bogdandy ve Engell, 1971).

Döner fırında şarjın ilk geçtiği kısım "ön ısıtma bölgesi" olarak davranır (Şekil 6.4). Şarj yeterince ısıtıldığında (redüksiyon bölgesinde) demir oksidin redüksiyonu başlar. 1000-1100°C arasındaki sıcaklıklarda cevher katı durumda sünger demir haline redüklenir. Döner fırından alındıktan sonra sünger demir eğimli döner bir soğutucuda istenilen sıcaklığa kalan kömürle birlikte soğutulur. Bunun nedeni yeniden oksitlenmeden kaçınmaktır (İmer, 1984).

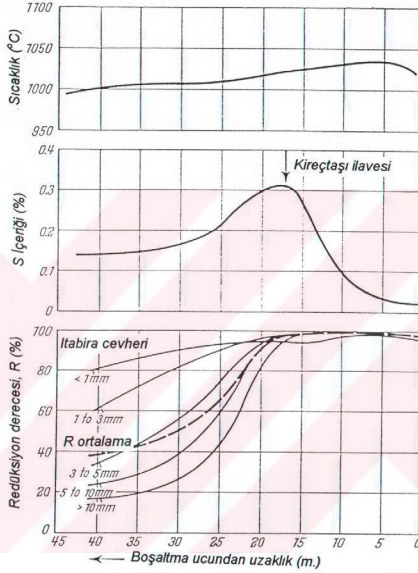


Şekil 6.5 Redüksiyon bölgesindeki işlemler (Bogdandy ve Engell, 1971).

DRI'in manyetik olmayan fırın artıklarından ayrılması eleme yoluyla yapılır. Daha küçük parçalar manyetik ayırma sisteminde ayrılır. Özel durumlarda, sıcak döner fırın ürününün (DRI + artık karbon) ergitme ünitesine direkt şarjı da mümkündür.

Yakıttaki kükürdü almak ve sünger demirin sülfürizasyonunu önlemek için kireç, kireçtaşı ve dolomit gibi bazik maddeler de döner fırına ilave edilir (Şekil 6.6).

Normalde, sıcak döner fırın gazları şarj malzemeleriyle ters yönde hareket ederler ve fırını, şarjı besleme ucundan terk ederler. Toz ayırıcıdan geçtikten sonra yakılır ve temizlenirler.

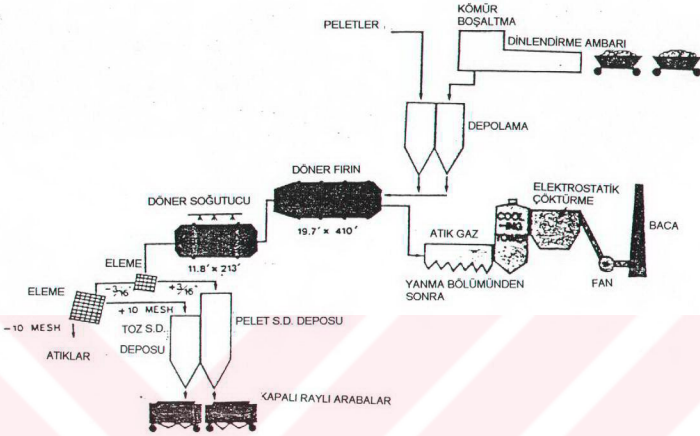


Şekil 6.6 Bir döner fırında (110m. uzunluğunda) sıcaklık profili, kükürt içeriğinin ve redüksiyon derecesinin değişimi (Bogdandy ve Engell, 1971).

Ham (pişirilmemiş) peletler de döner fırınlarda başarıyla redüklenmiştir (Bogdandy ve Engell, 1971).

Griffith Mine'da kurulu olan döner fırının özellikleri şunlardır: Fırın uzunluğu 125 m., iç çapı 7 m.'dir. %3'lük eğime sahip olan fırın, iki değişken hıza sahip olan doğru akımlı motorla döndürülür. Maksimum hız 1,0 d/d., çalışma hızı 0,4 d/d.'dır. İç kısım, 23 cm.'lik Clipper super duty (%42-45 Al_2O_3) ve yüksek alüminalı Kruzite D (%72 Al_2O_3) refrakter

ile astarlanmıştır. Bu fırınla çalışan tesisin akış şeması Şekil 4.7'de verilmiştir (Wilson, 1979).



Şekil 6.7 Griffith Mine'daki SL/RN direkt redüksiyon tesisinin akış şeması (Wilson, 1979).

SL/RN Prosesinin belirgin özellikleri şunlardır:

- Proses enerjisi olarak %100 oranında koklaşmayan kömürün kullanılması, petrol ya da gaz gerektirmemesi .
- Yüksek metalizasyon derecesi ve şarj malzemelerinde en kısa ön ısıtma süresi sağlayan yatakalıtı hava enjeksiyonu ile yüksek özgül çıktı miktarı.
- Fırından çıkan malzemeyi sıcak olarak ergitme ünitesine besleme imkanı.
- Özel dizayn edilmiş hava tüpleri, yatak altı hava enjeksiyonu ve hızlı sıcaklık kaydetme imkanları ile emniyetli proses ve sıcaklık kontrolü. Yüksek işletme olanakları.
- Çeşitli atık gaz temizleme sistemlerine uyum ve atık ısıyı geri kazanma imkanı. Atık ısı geri kazanımı ile toplam enerjinin %30-50 kadarı buhar veya elektrik gücü üretiminde kullanılabilir (İmer, 1984).

6.4 FASTMET Prosesi

Fastmet Prosesi, “Midrex Direct Reduction Corporation” tarafından geliştirilmiştir. Bu proseste demir oksit tozları, redükleyici olarak toz kömür ya da katı C taşıyan diğer maddeler kullanılarak (kompozit pelet formunda) metalik demire dönüştürülür. Ürün direkt redüklenmiş demirdir (ya pelet ya da briket formunda) ve E.A.F, yüksek fırın ya da diğer çelik yapım faaliyetlerinde kullanılabilir. Fastmet, temiz çelik üretimi için gereken düşük artık içeren demir talebine ideal bir yaklaşımdır (Macauley, 1996).

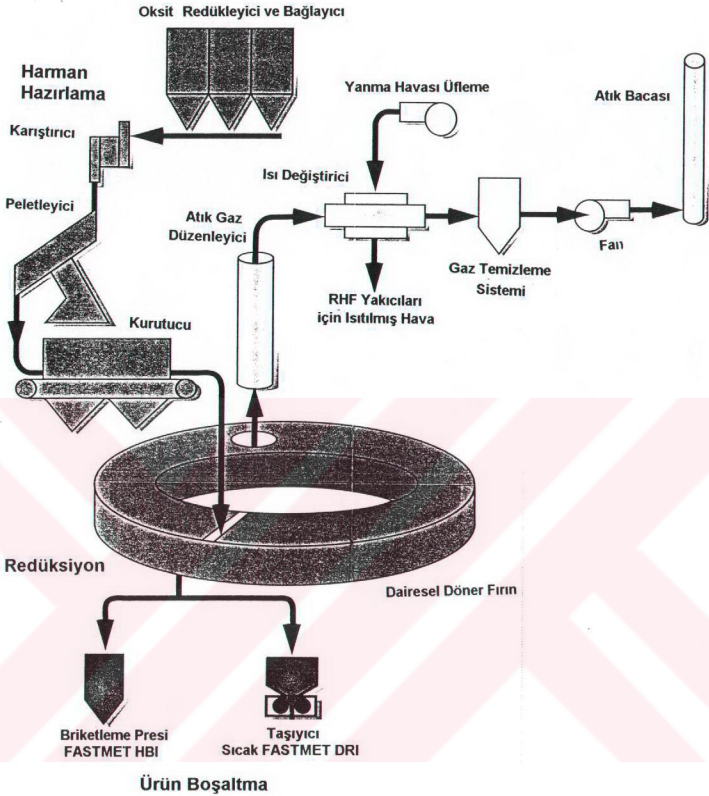
Hammaddelerin hazırlanmasında demir cevheri konsantresi, toz redükleyici (kömür, kok ya da odun kömürü) ve bağlayıcı birlikte karıştırılır ve peletlenir. Daha sonra peletler nemlerinin alınması için yaklaşık 120°C’de kurutulurlar ve bir-iki pelet derinliğinde bir tabaka halinde döner hazneli fırına (RHF) beslenirler (Şekil 6.8).

RHF döndükçe, pelletler 1250-1350°C’ye ısıtılırlar (gaz, petrol ya da kömür yakan yakıcılar kullanılarak) ve demir cevheri metalik demire redüklenir. Peletlerin fırın içinde kalma süresi 6-10dk. kadardır.

Fastmet ürünü DRI, döner hazneli fırından yaklaşık 1000°C’de sürekli olarak boşaltılır. Ürün refrakter astarlı taşıyıcılarla sıcak şarj için yakındaki ergitme bölümüne ya da Fastmet HBI üretmek için briketlemeye taşınabilir (Griscom, 1997).

Çıkan gaz ilk önce içindeki yanıcıları bertaraf etmek için yakılır ve RHF yakıcısına gelen yanma havasını ön ısıtmak için ısı değiştiricisine gönderilir. Sonra konvansiyonel gaz temizleme sisteminden geçirilerek, bir bacadan dışarı verilir.

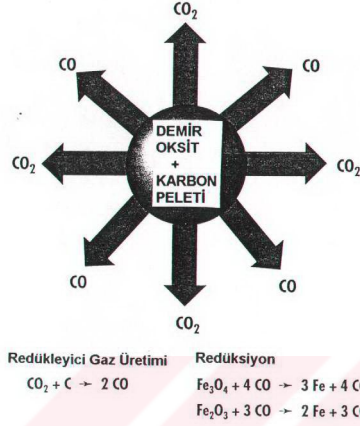
Şekil 6.9’da da görüldüğü gibi, Fastmet prosesinde redükleyici gaz üretimi ve redüksiyon peletlerin içinde oluşur. Peletler ısıtıldıklarında redükleyicideki karbon, CO’e dönüşür ve demir oksidi (Fe_3O_4 ya da Fe_2O_3) metalik demire (Fe) redükler. Demir oksit ve karbonun çok iyi teması ve yüksek redüksiyon sıcaklığı, redüksiyon hızının yüksek olmasını sonuç vermektedir (The Fastmet Process, 1997).



Şekil 6.8 Fastmet prosesinin çalışma şeması (The Fastmet Process, 1997).

Prosesin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

1. Göstergelere göre Fastmet endüstrilemiş ülkeler dahil dünya çapında kurulu bir çok demir yapım prosesi içinde en düşük maliyete sahip olanlardan biri olacaktır.
2. Üretim maliyetleri, dünyanın bir çok bölgesinde rekabet fiyatlarıyla bulunabilen toz demir cevheri, kömür, kok ya da odun kömürü kullanılarak en aza indirilmektedir.



Şekil 6.9 Fastmet prosesinde pelet redüksiyonu (The Fastmet Process, 1997).

3. Hızlı redüksiyon, proses ayarlamasının çabuk ve çalıştırmanın kolay yapılmasına imkan sağlar. Bu işlem esnekliği, operatörlere ürün kalitesini sıkı kontrol etme ve üretim planındaki değişiklikleri karşılama imkanı sağlar.

4. Fastmet, tek bir döner hazneli fırında yılda 150000-450000 ton DRI'nın ekonomik üretimini sağlar. Proseste, kanıtlanmış, karmaşık olmayan teçhizat kullanıldığından yatırım maliyeti düşüktür.

5. Fastmet tesisi yerel ve ulusal çevre standartlarını karşılayacak şekilde dizayn edilebilir. Çıkan gaz klasik gaz temizleme sisteminde işlenir. Geri dönüşümle sıvı ve katı azaltılır (The Fastmet Process, 1997; Midrex, 1997).

Midrex ve onun ana şirketi Kobe Steel Ltd. Japonya'da deneme ölçekli bir tesis inşa etmiş ve çalıştırmıştır. İlk ticari tesisin kurulmasına (Mississippi nehri kenarında - Louisiana) çok yaklaşılmıştır (Griscom, 1997).

7. DOĞRU AKIMLI ELEKTRİK ARK FIRINLARI (DC-E.A.F.)

Modern DC fırınların ortaya çıkışı bir çok paralel teknolojinin gelişmesiyle birlikte olmuştur. Bunlar:

- Modern, yüksek verimli AC elektrik ark fırını. Bu fırınların dizayn özelliklerinin çoğu DC fırınlarında kullanılmıştır.
- Yarı iletken teknoloji. Etkili ve güvenilir yüksek güçlü DC dönüştürücülerin (redresör) kullanılabilirliği.
- Refrakterler. Karbon içeren elektrik iletkenli refrakter malzemelerin kullanılabilirliği (Stenkvist, 1992).

E.A.F.'da güç tristörleri teknolojisi DC ark ocaklarının gelişmesine yol açmıştır. Yüzyılın başından itibaren ark ocağı tasarımcıları doğru akım işletmesinin elektriksel değerler ve elektrod sarfiyatı açısından avantajlı olduğunu görmüşlerdir. Ancak alternatif akımın doğru akıma çevrilmesindeki zorluklardan dolayı bu gelişme gecikmeye uğramıştır. 1970-80'li yıllarda güç tristörleri teknolojisinde kaydedilen ilerlemeler DC ark ocaklarındaki gelişmeye yol açmıştır (Oral, 1993).

DC akımla çalışma isteği, güç sağlama ünitesinin daha az olarak istendiği özellikle gelişen ülkelerde yükselen bir trend yakalamıştır. En önemli avantajı, düşük elektrod tüketimidir. Dezavantajı ise elektrik mühendisliğini kapsayan toplam kurmanın yüksek yatırım maliyetidir.

DC ark ocakları dış görünüş itibarı ile AC ocaklarına benzerler. Aralarındaki en önemli fark DC ocaklarda yalnız bir adet elektrod bulunmasıdır. Bu dizayna alternatif olarak iki ya da üç elektrodlu DC ocakları da vardır (Yorucu, 1990).

DC ark fırınlarının dizaynları arasındaki fark taban elektrodu (anot) ndadır ve teknik sorun olarak ark sapması görülmektedir. Birleşilen başka bir sorun ise DC fırın dizaynının ölçüsüdür. Bugün maksimum döküm ağırlığı olan 140 ton yaygın olarak kullanılan tek tepe elektrodunun boyutu ile sınırlıdır. Daha fazla tepe elektrodu daha büyük güç girdi

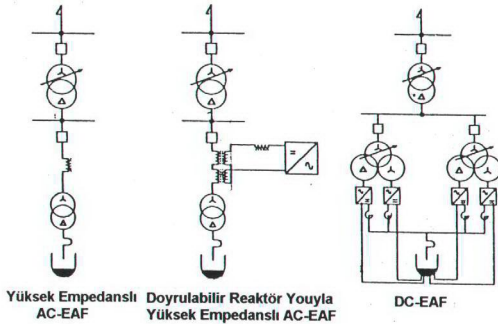
potansiyeli (akım yoğunluğunu artırmadan) sağlar, ayrıca ark pozisyonunu kararlı kılar (Steel Times Int.,1995).

7.1 Doğru Akımlı Elektrik Ark Fırınlarının (DC-E.A.F.) Yapısı

7.1.1 Güç ünitesi

AC ve DC ocakların elektrik donanımları arasındaki en büyük fark, trafo ile ocak arasında yeralan doğrultucu devreleri ile reaktör bobinleridir. Doğrultucu olarak diyotlar kullanıldığında sistem daha ucuza malolmaktadır ancak DC akımın avantajlarından tam olarak yararlanılamamaktadır. Tristörlerin doğrultucu devrelerinde kullanılması halinde sistem daha pahalıya malolmakta ancak ocağa verilen gücün kontrolü ve optimizasyonu daha kolay olmaktadır (Yorucu, 1990). AC ve DC ark ocaklarında kullanılan güç sistemlerinin şematik gösterilişi Şekil 7.1'de verilmektedir (Bergman, 1993).

AC ocaklarda ve diyotlu DC ocaklarda elektrodun ark mesafesi ark gerilimine bağlıdır. Ark gerilimi ise trafodaki gerilim kademeleri yardımı ile kontrol edilir. İzabe sırasında ark mesafesini kısaltmak (refrakterleri korumak için) ark geriliminin düşürülmesi ile mümkündür. Ancak bu durumda ark akımı dolayısıyla ocağa verilen güç te düşmektedir. Tristörlü DC ocaklarda ise tetikleme açısının kontrolü sayesinde ark gerilimi ile ark akımı birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilmektedir.



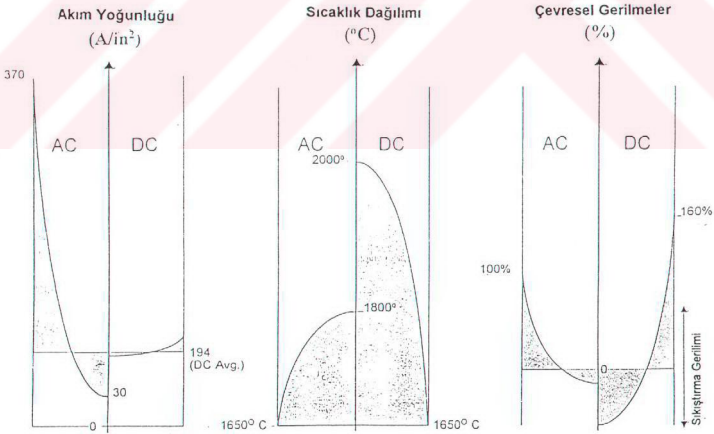
Şekil 7.1 Elektrik Ark Fırınları güç sistemleri (Bergman, 1993).

Ayrıca, tristör devresinin kontrolü ile akım tamamen de kesilebilir. Böylece akım kesileceği zaman ana şalterin kapatılmasına gerek kalmaz. Bu da ana şalterdeki yıpranmayı azaltır. Tristörlü doğrultucu kullanılması halinde trafoda fazla sayıda gerilim kademelerine de ihtiyaç kalmamaktadır (Yorucu,1990).

DC ocaklarda ark, AC ocaklara göre sürekli olduğundan kompenzasyon gereksinimi çok yüksek değildir. Şebekenin güçlü olması halinde hiç kompenzasyon kullanmamakta mümkün olabilmektedir (Yorucu, 1990).

7.1.2 Elektrod

Elektrodun öz direnci çok önemli bir parametredir. AC fırınlarda elektrodun merkezinde düşük akım yoğunluğundan dolayı, öz direncin artmasıyla yüzey etkisi (deri etkisi) dezavantajı vardır (Oral, 1993). DC akımın avantajı akım yoğunluğunun elektrodun tüm geçiş bölgesinde hemen hemen eşit olmasıdır (Şekil 7.2).



Şekil 7.2 AC ve DC akımlı fırınlarda akım, sıcaklık ve gerilim dağılımları (Lefrank vd.,1995).

DC ark fırını gücü ve boyutunun artmasıyla grafit elektrodun çapı 800 mm.'ye, akım yüklemesi değeri 150 kA'e çıkmaktadır. Teorik ve pratik araştırmalara göre, daha büyük elektrot çapında fiziksel özellikleri daha fazla artırmak gerekir (Oral, 1993).

Deri etkisinin bir sonucu olarak elektrod direnci R, AC fırınlarda DC'lerden daha fazladır. Örneğin 280 cm. uzunluk ve 71 cm. çapta bir elektrod kullanıldığında ($20 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{inch}$ özgül grafit direncine sahip) 60Hz AC şartları altında elektrod $53 \mu\Omega$ dirence sahipken DC şartlarında sadece $36 \mu\Omega$ elektrod direnci söz konusudur. Çizelge 7.1'de AC ve DC elektrodların özellikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir (Lefrank vd.,1995).

Çizelge 7.1 AC ve DC elektrodların özellikleri (Lefrank vd.,1995).

Ortalama Özellikler	Elektrod		Nipel	
	AC	DC	AC	DC
Ortalama yoğunluk (g/cm^3)	1,71	1,73	1,76	1,78
Özgül elektrod direnci ($\Omega \text{in} \times 10^{-5}$) II	20,5	18,5	13,4	12,6
Özgül elektrod direnci ($\Omega \text{in} \times 10^{-5}$) $\perp$	33,1	30,3	27,5	26,8
Young modülü ($\text{psi} \times 10^6$) II	1,35	1,51	2,65	2,54
Young modülü ($\text{psi} \times 10^6$) $\perp$	0,7	0,75	0,96	0,94
Termal genleşme katsayısı ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$) II	0,6	0,5	0,32	0,2
Termal genleşme katsayısı ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$) $\perp$	1,4	1,6	1,84	1,7
Isıl İletkenlik ($\text{W}/^\circ\text{Km}$) II	230	250	315	320
Isıl İletkenlik ($\text{W}/^\circ\text{Km}$) $\perp$	150	175	175	200

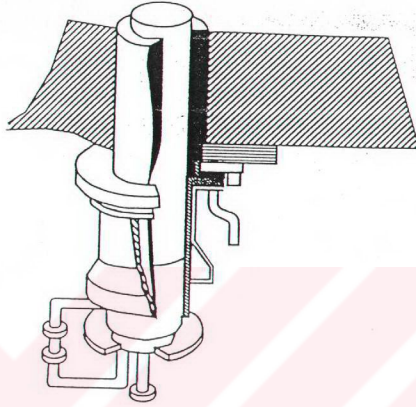
7.1.3 Taban yapısı

7.1.3.1 Çelik çubuk elektrod

Bir ya da daha fazla çelik çubuk fırın tabanından girer ve DC akımla temas eder. Çelik çubukların sayısı fırının gücüne bağlıdır (Şekil 7.3).

Yeni dizayn edilen taban elektrodu üst kısım (düşük C'lu çelikten billet) ve alt kısımdan (su soğutmalı bakır billet) oluşmaktadır. Çubuğun üst kısmı ergiyikle temastadır ve bu yüzden belli bir seviyeye kadar ergir. Çubuklar, taban refrakteri içine gömülüdür ve dıştaki

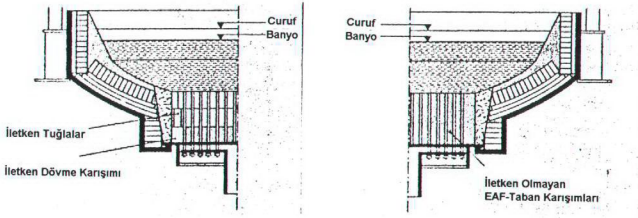
kısmı su ile soğutulur. Fırın içinde çubuklar bazik refrakter tuğlalarla çevrilidir. Fırın haznesinin kalanı emniyet tuğla astarı ile donatılmıştır ve çalışma astarı olarak MgO dövme malzemesi kullanılır (Stickler vd.,1994; Pavlicevic vd., 1996).



Şekil 7.3 Çelik çubuk taban elektrod dizaynı (Miller ve Goujet, 1992).

7.1.3.2 Pin (iğne) elektrod

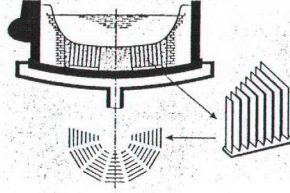
İğne tip taban elektrodu fırının merkezine yerleştirilir ve çelik çubuk tipinde olduğu gibi belli bir sayıdaki ısıtmadan sonra yerleştirilmelidir. Çünkü tamir imkanı yoktur. Bu iğnelerin dış uçları hava soğutmalı bir plaka üzerine bağlanır bu da soğutmalı tüplere (doğrultucu için) bağlıdır (Stickler vd., 1994).



Şekil 7.4 Pin (iğne) tip elektrodlar; a) İletken refrakterlerle b) İletken olmayan refrakterlerle (Stickler vd.,1994).

7.1.3.3 Fin (palet) elektrod

İnce mekanik paletler, fırın tabanından DC akımı iletmek için kullanılır (Şekil 7.5).



Şekil 7.5 Palet tip elektrodlar (Stickler vd.,1994).

7.1.3.4 İletken refrakterler

Hazne yoluyla DC akımı iletmek için elektrik iletkenli refrakter malzemeler kullanılır. Bu uygulama için refrakterden beklenen özellikler şunlardır (Stickler vd., 1994):

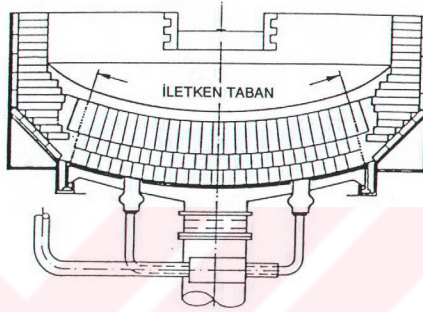
- Isıl iletkenlik mümkün olduğu kadar düşük olmalı.
- Elektrik direnci mümkün olduğu kadar düşük olmalı ($< 5,1-4 \Omega.m$).
- Refrakter uzun ömürlü olmalı (> 1000 ısıtma).

Bu hedefler MgO-C ürünler kullanılarak karşılanabilmektedir. İletken taban hattı 3 tabakadan oluşur. Bunlar; iki tabaka halinde MgO-C tuğlalar ve en üstte soğuk ya da sıcak tamirle yenilenebilen MgO-C dövme karışımıdır (Şekil 7.6).

Elektrik iletkenli fırın tabanı DC fırın teknolojisinin kalbidir. Bu kısım, doğrultucunun (+) kutbuna bağlanır ve fırının elektriksel olarak aktif bir kısmını oluşturur. Fırının topraklanan dış kısmından elektriksel olarak yalıtılır. Taban yalıtımının uygun işleyişi ve dayanıklılığı fırının performansı için zorunludur.

Taban, Şekil 7.6'da görüldüğü gibi, yatay dairesel bir flanşa sahiptir. Bu kısım, fırın dış kısmına kaynaklanmış dairesel bir kanalla desteklenir. Taban flanşı taban içine doğru

uzanır ve eşit aralıklardaki tuğlalarla desteklenir. Kanal, destek tuğlaları ve flanş aralarındaki boşluklar refrakter dövme malzemesi ile doldurulur. Hem tuğla hem de dövme elemanı iletken olmayan malzemelerdir. Astarın en düşük noktasından itibaren iyice yükselen çevresel yerleştirme, tabanı metal sızmasıyla oluşabilecek kısa devrelerden korur.



Şekil 7.6 İletken taban yapısı (Stenkvist, 1992).

Küresel tabanın kendisi klasik yüksek sıcaklık çeliğinden yapılır. Tabanın iç kısmı geniş, dilimli, dairesel bakır plaka ile kaplıdır ve bu da doğrudan tabana civata ile bağlıdır. 4 adet elektrik bağlantısı için bakır terminal tabandaki açıklıklardan aşağıya doğru uzanır. Bükülebilir bağlayıcılar, bu terminalleri fırın altındaki (+) kutup tüplerine bağlarlar (Stenkvist, 1992).

Elektrik iletkenli magnezit-grafit refrakter tuğlalar, bakır plaka üzerine normal tuğla yerleştirme teknikleri kullanılarak yerleştirilir. Düzensizlikler grafit pasta ile giderilir. Bu astarların toplam kalınlığı yaklaşık 900 mm.'dir ve klasik fırın astarından daha kalındır. Çünkü grafit içeren tuğlalar daha yüksek ısı iletkenliğine sahiptir.

Fırın tabanı boyunca ısı akışı yaklaşık 15 kW/m^2 'dir. Isı, güçlü hava soğutmasıyla giderilir. En üstteki tuğla tabakası, normal fırın tabanlarına benzer şekilde ihtiyaç oldukça tamir edilir. Isıtmalar arasında sıcak tamir ve fırın durdurulmasını gerektiren soğuk dövme yapılır. Her iki durumda da, elektrik iletkenliği için karbon ilaveli magnezit elemanlar

kullanılır. Soğuk dövme her 4. hafta duraklamasında yapılır. Tuğlaların yeniden yerleştirilmesi 1500-2000 ısıtmada bir yapılır. Fırının yan duvarlarının astar ömrü 1200-1500 ısıtma arasındadır. Özgül tuğla tüketimi 0,4 kg/t çelik kadardır (Stenkvis, 1992; Stickler vd., 1994).

Bu taban dizaynı şu avantajlara sahiptir:

- Bilinen tuğla yerleştirme ve tamiri yöntemlerinin uygulanması.
- Ön işlenmiş tuğlalar kullanıldığından kararlı (uygun) kalite özelliği.
- Emniyet. Bu tip tabanla yapılan işlem tecrübelerinde, sürpriz bir hata ortaya çıkmamıştır.
- Geniş elektriksel temas alanı, yani düşük akım yükü (10 kA/m^2 'nin altında) (Stenkvis, 1992).

C ve MgO'in karşılıklı birbirini korumasının sonucu olarak MgO-C ürünler yüksek kararlılığa sahiptir. C bağlayıcı matrix çok yüksek sıcaklıklara kadar çok kararlıdır (Stickler vd., 1994)

7.2 DC Elektrik Ark Fırınlarmının Üstünlükleri

7.2.1 Elektrod sarfiyatı

DC ark fırınının en önemli avantajı, elektrod sarfiyatında çok önemli düşüş olmasıdır.

Aynı boyutta ve güçte AC fırını ile karşılaştırıldığında DC fırında grafit elektrod tasarrufu %50 kadar olmaktadır. Tecrübeler bu tasarrufu doğrulamaktadır (Stenkvis, 1992).

DC şartlarında elektrod tüketimindeki azalmanın en önemli nedeni yan duvar oksidasyonunun azalmasıdır. DC fırında $\leq 71 \text{ cm}$. çaplı elektrod ve 100 kA 'in altında faz akımları kullanılarak yapılan işlemler için bu geçerli olmaktadır. Bu güç seviyesinin üstünde eğilim tersine döner. Çünkü elektrod yan duvarlarındaki dökülme ve uç tüketimi elektrod çapının ve akım yükünün artmasıyla artar. Bu durumda yüksek güçlü DC fırınlarda tüketim AC fırınlardakinden fazla olur (Lefrank vd.,1995).

Uç süblimasyonu, yan duvar oksidasyonu, tepe sütununun kırılması, uç kayıpları ve uç dökülmeleri, 5 ana elektrod tüketim şeklidir (Lefrank vd.,1995; Bergman, 1993).

Elektrod tüketimi esas olarak çelik yapımındaki işlem şartlarına bağlıdır. Akım seviyesi, güç verme zamanı, oksitlenen elektrod yüzey alanı ve saatteki üretim miktarı elektrod tüketimini etkileyen parametrelerdir. 7.1 ve 7.2 no'lu eşitlikler iki sürekli elektrod tüketim prosesinin miktarını hesaplamak için kullanılır (Lefrank vd.,1995).

$$C_{\text{kenar oksidasyonu}} = R_O \times \frac{A \times t_{\text{döküm}}}{P} \quad (\text{lbs/ton}) \quad (7.1)$$

$$C_{\text{uç süblimasyonu}} = R_S \times \frac{I^2 \times t_{\text{güç sür.}}}{0,454 \times P} \quad (\text{lbs/ton}) \quad (7.2)$$

R_O = Ortalama oksitlenme hızı (lbs/ft².saat)

A = Oksitlenen elektrod yüzey alanı (ft²)

$t_{\text{döküm}}$ = Dökümden döküme süre (saat)

P = Verimlilik (ton/ısı)

R_S = Ortalama süblimasyon hızı (kg/kA².saat)

I = Faz başına akım (kA)

$t_{\text{güç sür.}}$ = Güç verme süresi (saat)

P = Verimlilik (ton/ısı)

7.2.2 Enerji sarfiyatı

DC ark fırınlarında elektrik gücündeki kazanç %15 kadardır. Bu miktar elektrod tasarrufu kadar yüksek olmasa da, elektrik enerjisinin maliyetinden dolayı DC fırını işletme ekonomisinde önemli bir yer teşkil eder. Bu tasarruf şöyle elde edilir:

- Tek elektrod, başlangıçta daha az elektrik kaybı (elektrod güç kaybı) demektir. Bu durumda tek su soğutmalı elektrod bileziği ve tek su soğutmalı taban salmastrası gerekir.

- Banyodaki karıştırma ve fırındaki düzgün ısı dağılımı nedeniyle arkta şarj daha verimli ısı transferi olur.
- Tavanda tek elektrod boşluğu ile fırın daha iyi sızdırmazdır.
- Doğru akımla, indüktif güç kayıpları önlenir.
- Daha yüksek voltajla DC fırına güç transfer edilir. Sonuçta tüplerdeki güç kayıpları azaltılır (Stenkvis, 1992).

7.2.3 Isı dağılımı

DC ergitmesinde uzun ark, fırına merkezi olarak yerleştirilmiş tek elektrodla sağlanır. Ayrıca DC arkı dikey ve aşağı doğrudur. Sonuçta AC fırınında mümkün olandan daha üniform ısıtma DC fırınında bulunur (Stenkvis, 1992).

7.2.4 Refrakter sarfiyatı

DC fırında simetrik ergitme şekli uygulanmaktadır. Böylece yan panellerin ömrü, AC fırınlarınkinden en az iki kat yüksektir. İndüktif ısıtma ve banyo karışımı sırasındaki etkisinden dolayı, DC fırını ocak refrakteri, AC fırını ile karşılaştırıldığında termal şok ve korozyon açısından daha fazla saldırıya uğramaktadır (Oral, 1993).

Kimyasal korozyon, termomekanik dökülme ve ergimiş çeliğin akışıyla oluşan aşınmaya çevre tuğlaları maruz kalırlar. Çevre tuğlalarda termal şokun sebep olduğu çatlaklar çok azdır. Bunlar daha çok oksidasyon ve erozyona maruz kalmaktadırlar (Pavlicevic vd., 1996). DC fırınının tabanında MgO-C ürünlerin temel aşınma faktörleri aşağıdaki gibidir:

- Mekanik: Hurda çarpması.
- Termomekanik: Isı erozyonu.
- Isıl: Döküm sıcaklığı 1700°C, muhtemel bölgesel aşırı ısınma.
- Termokimyasal: Curuf saldırısı, oksidasyon.

Grafit içerikli taban malzemeleri, klasik taban astarlarından daha pahalıdır. Bu da taban maliyetinin DC fırında daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte curuf seviyesinde daha düşük gerilim ve daha düşük aşınma bir kazançtır (Stenkvis, 1992).

7.2.5 Metalurjik kontrol (Karıştırma)

DC prosesinde karıştırma elektromanyetik kuvvetler ve gaz enjeksiyonuyla yapılır. Karıştırma banyoyu hem termal hem de kimyasal olarak homojenize eder. Sonucunda da kimyasal reaksiyonlar hızlanır, denge değerlerine daha fazla yaklaşılır ve daha düşük çözünmüş O_2 ve curufta daha az FeO içeriği sağlanır (Pavlicevic vd., 1996).

DC fırınının güç sistemi, DC devresine bağlı fırın ve redresörler arasında bir veya iki indüktans bobini içerir. Bunların görevi DC devresinde yeterli iletkenliği sağlamaktır. Yeni DC fırınlarda iletken bobinler doğrudan fırının altına yerleştirilir. Bobinden gelen manyetik alan ergiyik içine sızar. Ergiyikte DC akımı ile etkileşir. Bu da ergiyikte karışmayı ortaya çıkarır. Bu karışım döner hareket şeklindedir. Bunun yararları; daha etkili ark oluşması ve ergiyikte daha iyi ısı transferidir. Sonuçta:

- Etkili ergitme,
- Daha az güç sarfıyatı,
- Astarla daha az ısı gerilimleri olur (Oral, 1993).

Arktan geniş iletken tabana akım dağılımı ile birlikte ergiyik boyunca akım geçişinden doğan elektromanyetik kuvvetler de ergiyiğin karışmasını sağlar.

Karıştırmanın faydaları ise şunlardır: Ergitme işlemi daha iyi kontrol edilir, numuneler daha güvenlidir ve döküm sıcaklığı küçük toleranslarla ayarlanabilir (Stenkvis, 1992).

7.2.6 Bakım

- Tek elektrod hareketiyle fırında daha az mekanik eleman aşınır ve bozulur.

- Hidrolik sistem daha basittir.
- Elektrodların önünde sıcak bölgelerin yoğunluğu nedeniyle duvar panelleri daha uzun servis ömrüne sahiptir.
- DC fırınlarda birleştirilmiş kablolar yoktur ve güç dalgalanmaları kontrol edilir.
- DC fırınlarda güç kabloları hareket etmez ve daha uzun servis ömrüne sahiptir (Stenkvis, 1992).

7.2.7 Titreşim kontrolü

AC fırınlarında güç dalgaları besleme hattında hasarlara neden olur. Bu olay, “flikler” olarak bilinir. Ortak bağlantı noktasında kısa devre kapasitesi fırın transformatör gücünün en az 80 katı olmalıdır. DC fırınlarda bu dalgalar daha iyi kontrol edilebilir ve kısa devre kapasitesinin fırın transformatör gücünün 40 katı olması yeterlidir (Stenkvis, 1992).

7.3 DC-E.A.F.’da Ark Sapması

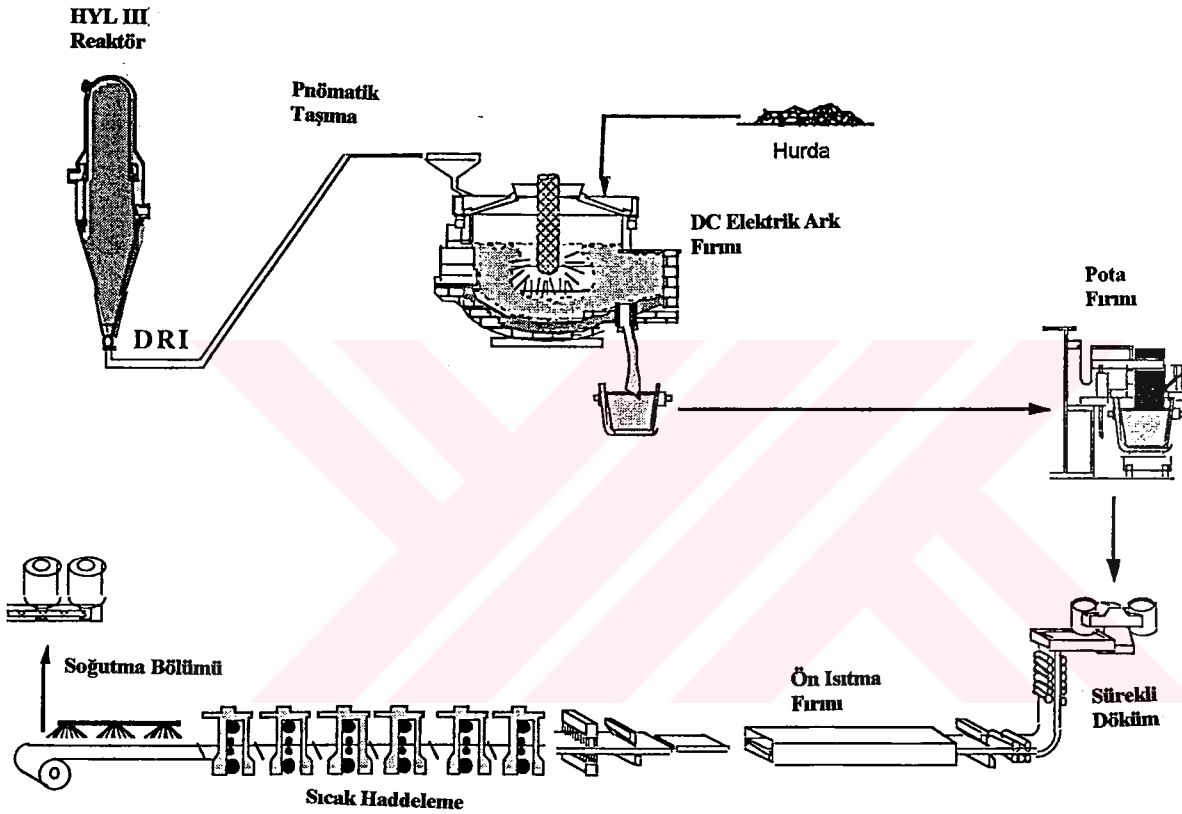
Refrakter içine gömülmüş çoklu çelik anodlardan oluşan taban elektrodu dizaynında dinamik ark sapmasının kontrolü bir derece sağlanabilir. Tek taban elektrodunda veya iletken refrakter tabanda dinamik kontrol imkanı azalır ve statik kontrol gerekebilir. ABB firması bu sorunu, sapmayı azaltan manyetik alan paternlerini (busbars) fırın altına yerleştirerek çözmüştür. Fırının dış alt kısmının inşasında belli bölgelere manyetik olmayan (paslanmaz çelik) plakaların yerleştirilmesi de sapmanın statik kontrolünü sağlayabilir.

İşletmecilerin bulgularına göre, tepe elektrodu pozisyonunun birkaç milimetre hareketi bile ark sapmasında önemli azalmaları sonuç vermektedir.

Sapmalar, verimsiz ergitme ve soğuk bölgelere sebep olmaktadır. Fırın duvarlarına hatta tavana doğru ark oluşumu su soğutma panellerinin zarar görmesine (bu da sızma tehlikesi demektir) sebep olur. Ark kararlılığını manyetik alan yanında plazma özellikleri de etkilemektedir (Steel Times Int., 1995).

7.4 DC-E.A.F.'da DRI Kullanılarak Yassı Mamül Üretimi

İnce slab döküm için yeni teknolojilerin geliştirilmesi, ayrıca verimli ergitme ve yüksek verimli E.A.F.'nın kullanımı ile yassı ürünlerin E.A.F.'da üretiminde yeni bir dönem başlamıştır. Bu yeni teknolojiler ve DRI'nın daha fazla kullanımı ile düşük fiyatlı ve yüksek kaliteli ürünlerin üretimi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 7.7 Birleştirilmiş DR-E.A.F. işlemleri ile Hylsa'da yassı ürün üretimi (Morales,1996a).

Hylsa'nın Meksika'da kurduğu yeni mini demir-çelik tesisi, direkt redüksiyon, ergitme, rafinasyon, döküm ve haddelene kısımlarından oluşmaktadır (Şekil 7.7). Bu yeni ergitme tesisinin karakteristik özellikleri de Çizelge 7.2'de verilmektedir (Morales,1996a).

Yeni ergitme sisteminde tepede hurda ön ısıtma şaftına sahip bir OBT DC-E.A.F. ve DRI'nın sürekli besleme ünitesi vardır. Başlangıçta DRI'nın fırın tavanından soğuk olarak

ve %45 oranında şarj edilmesi planlanmıştı ancak yakında DRI, sıcak olarak şarj edilecektir.

Ürünün, %30 sıcak ve %70 soğuk haddelenmiş şekilde olacağı düşünülmüştür. Bu ürünlerin hizmet edeceği ticari alanlar şunlardır: Derin çekme ve ekstra derin çekme kalitelerini içeren yapı, otomotiv, servis merkezleri ve uygulamaları (Morales,1996a).

Çizelge 7.2 Hylsa yassı ürün üretiminde yeni ergitme karakteristikleri (Morales,1996a).

	Birim	Değer
Şarjda DRI oranı	%	45,0
Hurda ön ısıtma sıcaklığı	°C	750-900
Ortalama tap to tap süresi	dk.	63,0
Isıtma/crew/işlem günü	No.	22,2
Verimlilik	ton/saat	124,6
Direkt çalışma oranı	%	91,8
Metalik şarjda demir oranı	%	95,0
Elektrik enerjisi	kWh / ton sıvı çelik	442,0
Oksijen	Nm ³ / ton sıvı çelik	30,0
Doğal gaz	Nm ³ / ton sıvı çelik	13
Kok+grafit enjeksiyonu	kg / ton sıvı çelik	11,0
Özgül elektrod tüketimi	gr / kWh	3,6
Toplam refrakter tüketimi	kg / ton sıvı çelik	4,8
Isıtma/sequence	No.	6,0

8. ELEKTRİK ARK FIRININDA DRI KULLANILARAK ÇELİK ÜRETİMİ

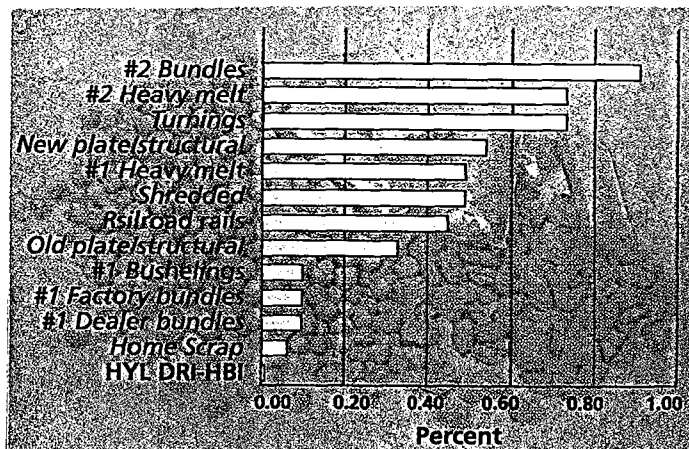
Direkt redüksiyon tesisi ile E.A.F.'da çelik yapımı tesisinin başarılı şekilde birlikte çalışması çeşitli işletmelerde (Oregon Steel, Georgetown Steel, Hamburger Stahlwerke, Sidbec-Dosco gibi) kanıtlanmıştır (Midrex, 1974).

Dünya hurda endüstrisindeki gelişme eğilimlerinin gösterdiğine göre hurdanın kimyasal kalitesi bozulmaktadır. Bir çok çelik üreticisine göre No.1 hurdası 10 yıl önce No.2 hurda sayılıyordu. Amerika ve Kanada'daki çelik üreticileri, hurdanın artık ve iz element içeriklerinin önemli oranda arttığına inanmaktadırlar. Hurda kalitesinin düşmesiyle ilgili bu endişe çelik özellikleri daraltıldığında ortaya çıkmıştır (Facone vd., 1993).

DRI bütün dünyada çelik üreticilerine yüksek kaliteli ürün piyasasına girme imkanı vermiştir. Demirli şarj içinde DRI'nın bulunması hurda piyasasının belirsizliklerinin önüne geçer ve ürünlerdeki isteklere bağlı olarak şarj kompozisyonunu değiştirmede esneklik sağlar (Anderson, 1987; Faccone vd., 1993).

Bir çok çelik yapımcısının tecrübelerine göre DRI, üniform fiziksel ve metalurjik karakterleri nedeniyle hurda ile yarışabilir durumdadır. Hatta hurda fiyatı daha düşük olsa bile DRI, avantajları nedeniyle tercih edilebilir (Facone vd., 1993).

Çizelge 8.1 Hurda ve DRI'daki ortalama artık seviyeleri (HYL III, 1996).



Hurda ile karşılaştırıldığında DRI'nın en büyük teknik avantajı, kararlı ve düşük artık madde içeriğidir. Yüksek mukavemetli, düşük alaşımlı (HSLA) ve galvanizli çeliğin kullanımının artması, ticari hurda içerisindeki metalik artık seviyesinin yükselmesine katkıda bulunmaktadır. Cu, Cr, Ni, Mo, Sn, ve Mn'dan oluşan bu elementler çelik yapımcıları için problem ortaya çıkarmaktadır. Çünkü bunlar çelik yapımında ekonomik olarak uzaklaştırılmazlar. Özellikle kıyılmış hurda yüksek seviyede artıklar içerebilir. Farklı tip hurdaların ve DRI'nın artık içerikleri Çizelge 8.1'de verilmiştir (Facone vd., 1993, HYLIII, 1996).

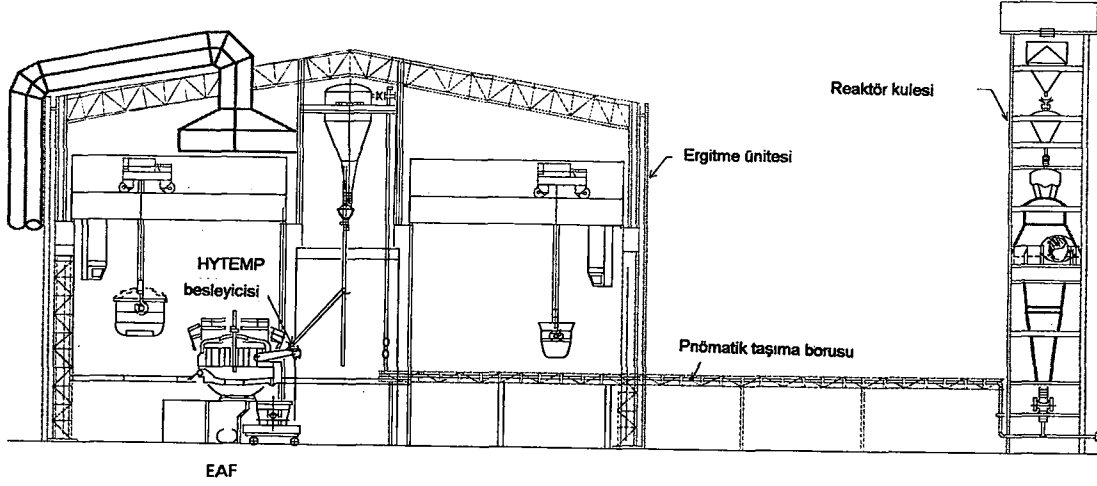
DRI fırında, yüksek kaliteli çeliklerin üretimi için yararlı olan köpüklü curuf oluşumuna yardımcı olur. Köpüklü curuf, DRI içindeki artık demir oksitler ile karbonun reaksiyonu ile ortaya çıkan gazın bir sonucudur (Facone vd., 1993). Ayrıca DRI'nın C miktarının ayarlanabilir olması çelik yapımcısına ilave esneklik imkanı sağlamaktadır (Midrex, 1974).

E.A.F.'rı için üretilecek DRI'nın ham malzemelerinin seçiminde en çok dikkat edilecek nokta gang içeriğidir. Gang içeriğinin artması güç tüketimini, curuf miktarını ve curuf alma süresini arttırmaktadır.

8.1 Fırına Beslenebilecek DRI Türleri

DRI'nın reaksiyon tesisinden ürün olarak çıkışı iki şekilde olmaktadır; pelet veya parça halinde (DRI) ya da sıcak briketlenmiş (HBI) halde.

DRI'nın E.A.F.'na beslenecek türlerinin seçimi, DRI üretiminin E.A.F. ile bir kombinasyon oluşturup oluşturmadığı ile de ilgilidir. Eğer DRI üretimi, E.A.F. tesisinin hemen yanında yapılıyorsa burada üretilen ürün (DRI) soğutulduktan veya HBI haline getirildikten sonra fırına yüklenebileceği gibi sıcak olarak da fırına verilebilir. 750°C'nin üstündeki bir sıcaklıkta redüksiyon ünitesinden alınan DRI, pnömatik taşıma sistemi ile doğrudan E.A.F.'daki metalik banyoya beslenebilir (Agarwal vd., 1991; HYL III, 1996).



Şekil 8.1 Birleştirilmiş DR-E.A.F. tesisinde sıcak DRI'nın ergitme ünitesine taşınması (HYL III, 1996).

Ancak DRI ihtiyacı ithalat yoluyla karşılanıyorsa ya da DRI fırında düşük oranlarda ve sepet şarj sistemiyle kullanılıyorsa aşağıda belirtilen avantajlarından dolayı HBI kullanımı tercih edilir:

- HBI 'nın yoğunluğu DRI'nın yoğunluğundan yaklaşık iki kat fazla olduğundan stoklama ve taşıma işlemlerinde fazla yer işgal etmez (Yığın yoğunluğu 2,4-2,8 t/m³).
- HBI'nın yüzey alanı kütle hacminden daha düşük olduğundan reoksidasyona karşı direnci daha fazladır.
- Yüksek yoğunluğundan ötürü doygunluktan sonra HBI'nın suya karşı hassasiyeti azalır.
- Isıl ve elektrik iletkenliği iyidir. (Hurda ve pik demir kadar hızlı ergiyebilir).
- Mükemmel taşıma ve depolama kabiliyetine sahiptir (Datlı ve Çöplü, 1991; Kopfle ve Verdier, 1991).

8.2 DRI'nın E.A.F.'na Şarjı

8.2.1 Sepet şarj sistemi

DRI/hurda besleme oranları 30/70'den 90/10'a kadar değişmektedir ve şarj ya sürekli ya da sepet yığını yoluyla yapılır. Tipik şarj metodu, alttan açılan sepet içine bütün hurdanın

yerleştirilmesinden ibarettir. Eğer hurda şarjı, toplam şarjın %20'sini oluşturuyorsa kalan kısım sepete DRI olarak ilave edilir. Bu durumda DRI hurdanın üzerine yüklenir, böylece şarj sırasında DRI fırının merkezine doğru toplanır.

Tecrübeler göstermiştir ki, özellikle yoğun DRI, fırın duvarlarına yakın yerleştiğinde ısıtmanın sonunda bile yeniden oksitlenmeye ve fırın duvarlarında salkım (küme) oluşturmaya eğilimlidir. Bu, yüksek demir kayıplarını, işlemde gecikmeyi ve refrakter malzemede gereksiz zararlı sonuçları getirebilir (Jellinghaus ve Ropke, 1988).

DRI'nın ocağa şarj edilmesinin kolay yollarından biri de, hurdayı kısmen ergiterek ocak içerisinde sıvı bir havuz oluşturmak ve ayrı bir sepetle DRI'yı, bu havuz içerisine boşaltmaktır. Bu sistemin avantajı, DRI'nın ocak duvarına yapışmasının önlenmesidir.

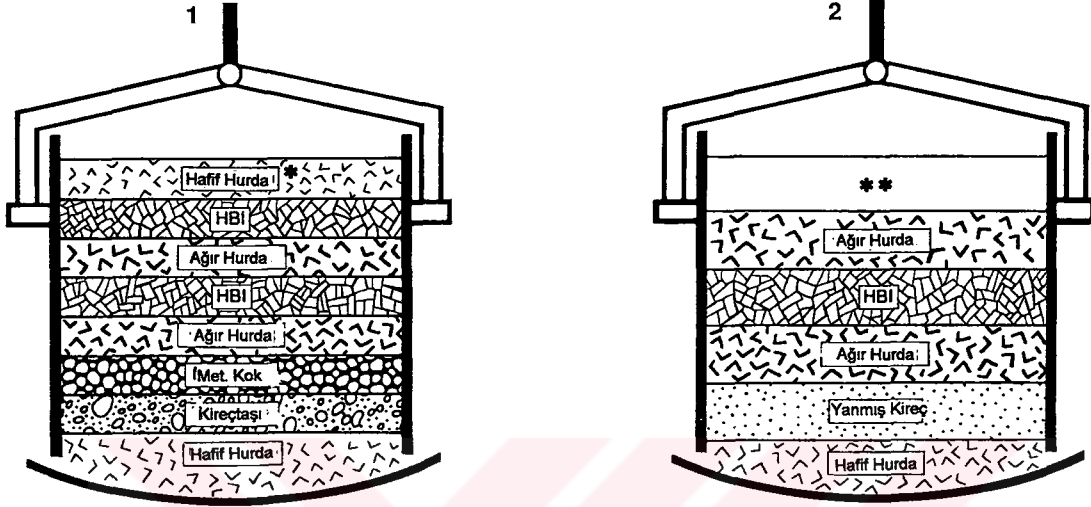
Sepet şarj sisteminde DRI kullanımının amacı, şarjı yoğunlaştırmak ve istenmeyen elementler (S, P, Cu, Sn)'in düzeyini kontrol etmektir.

Düşük yoğunlukta hurda kullanılan çelikhanelerde şarj sayısı 4'ün üzerine çıkmaktadır. DRI bu durumlarda boşlukları doldurmak ve şarjı sıkıştırmak suretiyle, şarjın yoğunlaştırılmasını sağlar. Hafif hurdanın mevcut olması durumunda %20-30 DRI kullanılarak şarj sayısı düşürülebilir. Bu da üretim artışına neden olur (Datlı ve Çöplü, 1991).

HBI'nın şarjında ve taşınmasında hurda için kullanılan teçhizatlardan yararlanılabilir. HBI %10-40'tan fazla kullanılıyorsa sürekli besleme tercih edilmelidir. Bununla birlikte HBI, hurda sepetinde şarj yığınının bir parçası olarak ta kullanılabilir (Kopfle ve Verdier, 1991).

National Steel Corporation (NSC), HBI ve hurdayı iki adet yüksek güçlü, 45t'luk E.A.F.'na sepet şarjı yoluyla ve her ısıtmada iki sepet şeklinde yüklemektedir (%100 hurda kullanıldığında 3 sepet gerekir). Düşük ve orta dereceli C çelikleri için şarjda %25-30 HBI oranı optimum bulunmuştur.

Sepet içinde HBI-hurda yerleştirme düzeni şu şekildedir; hafif hurda en alt ve en üste yerleştirilirken, HBI boşlukları doldurmak için ağır hurda arasına dağıtılır. HBI, sepetin orta bölümünde yoğunlaşır böylece şarjdan sonra fırının dip kısmına yakın yerleşme imkanına sahip olur. HBI'nın büyük kısmı tercihen ilk sepetle verilir.



* Boşluğa bağlı olarak HBI'da kullanılabilir.

** İhtiyaç halinde şarjın üstüne HBI ilave edilebilir.

Şekil 8.2 Şarj sepetlerinin tipik düzenleri (Cola vd., 1988).

Curuflaştırıcı malzeme, HBI ve hurdanın şarj sepetindeki tipik düzenleri Şekil 8.2'de görülmektedir. Alınan sonuçlar göstermiştir ki, bu düzenlemeler ile verimlilik çok artmaktadır. Verimlilikteki artış toplam fırın kullanım süresindeki tasarruftan kaynaklanmaktadır (bir şarj ortadan kalkmaktadır) (Cola vd., 1988).

8.2.2 Sürekli şarj sistemi

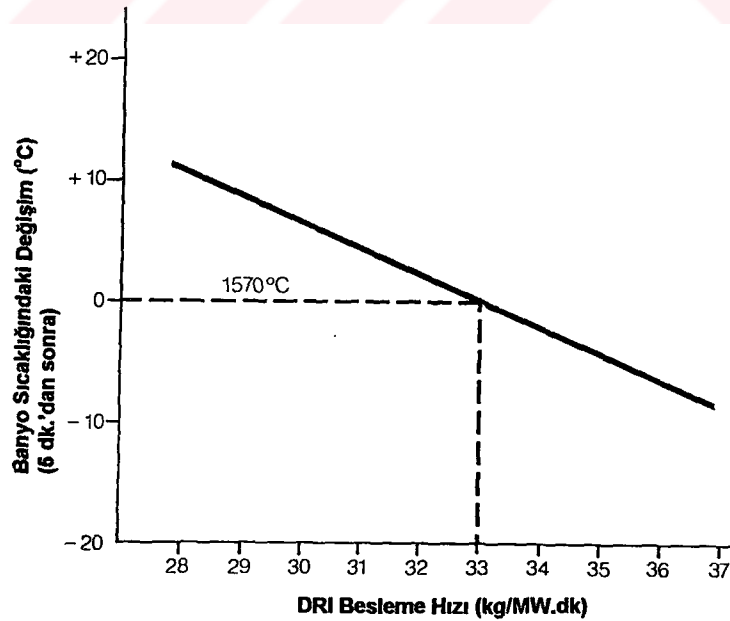
Sünger demirin (DRI) serbest düşme özelliğinden faydalanılarak geliştirilen bu sistemde DRI, ark ocağı kapağı üzerinde, gaz toplama deliğinin uzağında, elektrodlerden ikisinin arasına yerleştirilen delikten elektrod uçgeni arasına verilir (Datlı ve Çöplü, 1991).

DRI şarjın %30'dan fazlasını oluşturuyorsa bu besleme metodu idealdir. Sürekli beslemenin faydaları şunlardır:

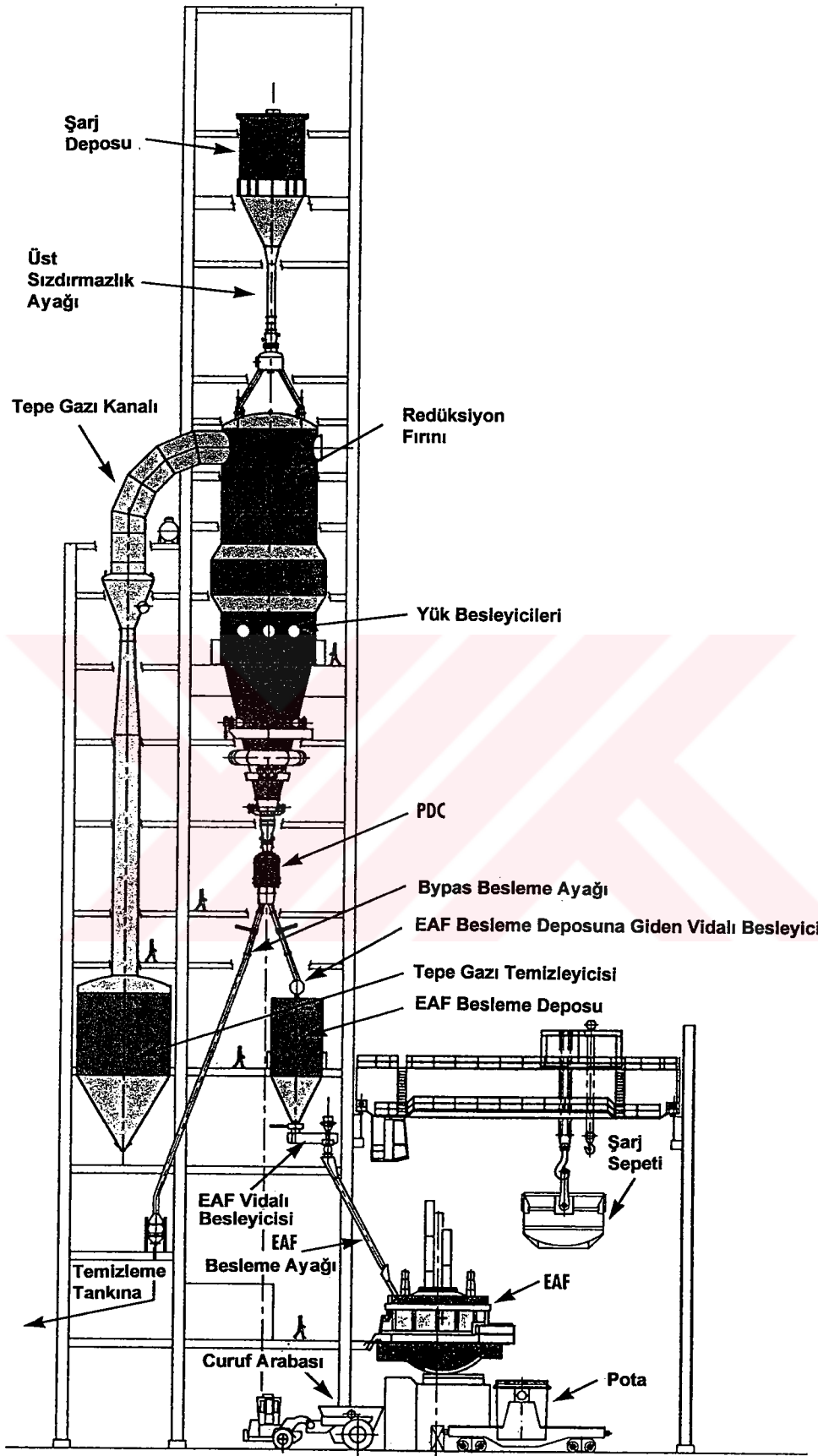
- Daha az güç kesimi süresi (daha az geri beslemeler ve vinç gecikmeleri).
- Daha yüksek güç girdisi (daha yüksek voltajla çalışma ve daha düşük elektriksel kayıplar).
- Sıvı çeliğin N_2 içeriğinin etkili kontrolü (köpüklü curuf nedeniyle).
- Gelişmiş banyo ısı transferi (köpüklü curuf nedeniyle).
- Daha hızlı metalurjik reaksiyonlar (gelişmiş curuf-metal karışması nedeniyle).
- Ergitme ve rafinasyonun birleştirilmesi (tahmin edilebilir bileşim nedeniyle).
- Artan verimlilik (daha az geri besleme ve daha az rafinasyon süresi).
- Azalan elektrod tüketimi (daha az kırılma ve daha az oksidasyon süresi) (Facone vd., 1993).

Bu sistemde, elektrodlar ocak içerisine girip orta kısımda sıvı çelik havuzu oluşturduktan sonra DRI beslemesi yapılır. DRI'nın besleme hızı; çekilen güç, DRI'nın bileşimi, banyo sıcaklığı ve fırın ısı kayıplarına bağlıdır (Datlı ve Çöplü, 1991).

Optimum performans, 32-34 kg/dk.'lık DRI besleme hızında başarılmıştır. Bu besleme hızı çelik banyosunu sabit bir sıcaklıkta tutar. Besleme çok yavaş olduğunda banyo sıcaklığı artacak, yüksek besleme hızlarında ise banyoda donma riski olacaktır (Şekil 8.3).



Şekil 8.3 DRI besleme hızının banyo sıcaklığına etkisi (Jellinghaus ve Ropke, 1988).



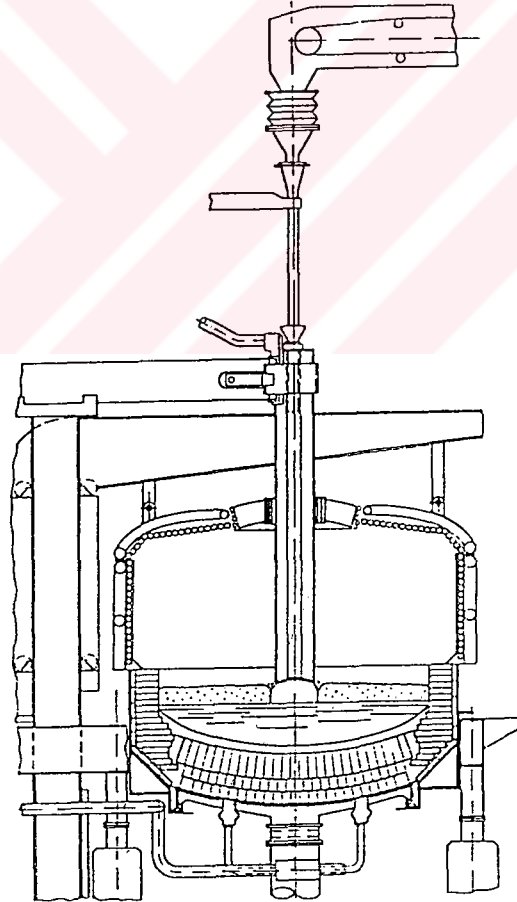
Şekil 8.4 E.A.F.'na sürekli besleme yapan Midrex sıcak şarj sistemi (Whitten, 1998).

Besleme hızı çok yüksek olduğunda curuf sıcaklığı azalır ve DRI nüfuz edemez, curuf üzerinde “iceberg” şeklinde bir oluşum görülür. DRI konisi beyaz sıcak olacak fakat düşük ısı iletkenliği nedeniyle ergimeyecektir (Jellinghaus ve Ropke, 1988).

Georgetown Steel Corp.’da sürekli besleme sistemiyle şarj işlemi şu şekildedir:

- İlk hurda sepetinin şarjı (gerekliyorsa).
- Ergitme.
- İkinci hurda sepetinin şarjı (gerekliyorsa).
- DRI’nın hemen sürekli beslenmesine başlanması (Facone vd., 1993).

8.2.3 DC-E.A.F.’da elektrod yoluyla şarj sistemi



Şekil 8.5 Elektrod yoluyla sürekli şarj yapılan DC fırının kesiti (Stenkvis, 1992).

DC-E.A.F.'da DRI'nın ergitilmesi sürekli şarj ve hurdanın sepet şarjının kombinasyonuyla yapılır. Eğer DRI briket halindeyse tavanda elektrodun yanındaki şarj deliğinden verilmelidir ve fırına eriyiğin döner karıştırmasını sağlamak için karıştırma bobini takılmalıdır. Bu sayede briketler arkın içine doğru dönerek gireceklerdir. Bu karıştırma hareketi sayesinde bir taneden fazla şarj deliğine gerek yoktur.

İnce parça ve küçük peletler şeklindeki DRI'nın ergitilmesi için ise, içi boş grafit elektrodlar yoluyla şarj yapılabilir. Bu işlemde şarj doğrudan arkın içine düşürülür. Bu nedenle arktan şarj malzemesine doğru enerji transferi çok yüksek verimlidir.

Buna ilave olarak ark hareketi şarjı, curufdan geçmeden doğrudan banyoya iletir. Şekil 8.5'te elektrod yoluyla sürekli şarj metoduna uygun DC fırınının kesiti görülmektedir (Stenkvis, 1992).

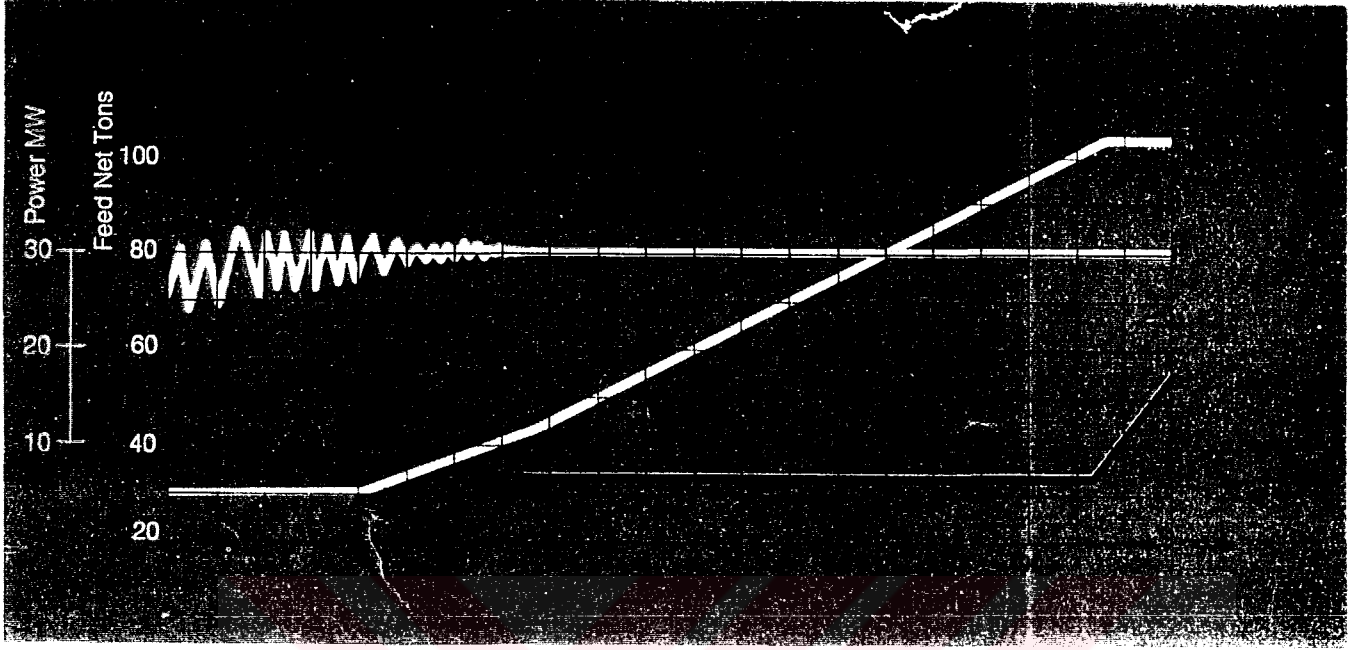
8.3 Ergitme ve Köpüklü Curuf Oluşumu

8.3.1 Ergitme seyri

DRI ile çelikiyapım seyri Şekil 8.6'da görülmektedir. Buradaki veriler, %70 DRI + %30 hurda kullanan, maksimum 33 MW sürekli güç girdisi sağlanan, 85 ton'luk bir E.A.F.'dan %0,25 C içeren çelik üretimi için alınmıştır. DRI'nın metalizasyon derecesi %94 ve C içeriği %1'dir.

İşlem; ergime için başlangıçta hurdanın şarjı, sıvı çelik havuzu oluşur oluşmaz pelet beslemesine başlanması ve döküme hazır olana kadar sürekli besleme şeklindedir. Hurdanın %30'u fırına yüklendikten kısa bir süre sonra elektrodlar indirilir ve güç verilir. Başlangıçta güç dalgalanması şiddetlidir. Hurda kısmen ergidikten sonra DRI'nın beslenmesine başlanır. Besleme hızı, maximum besleme hızının yarısından daha az olmalıdır (10-15 kg/dk.). Mümkün olduğu kadar erken yavaş hıza geçilir (DRI'yi arkın altına çabucak yerleştirmek için). Böylece maximum ark girdisi (fırın duvarına minimum radyasyonla) korunmuş olur. Yığının sıcaklığı bir optimuma (normalde 1570°C) ulaşır

ulaşmaz DRI'nın besleme hızı maksimuma çıkarılır; bu durumda hız 1100 kg/dk. veya 33 kg/dk/MW'dır. Gerekli kireç fırın içine sürekli enjekte edilir (Midrex, 1974).



Şekil 8.6 %70 DRI + %30 hurda ile E.A.F.'da çelikiyapım seyri (Midrex, 1974).

Güç girdisi de kararlı hale getirilir. Çünkü bütün ergime sıcak metal ve curuf arayüzeyinde meydana gelir. DRI'nın ergitilmesi sırasında yoğun karıştırma hareketi (curufa gömülmüş ark ile) banyoda üniform kimyayı ve sıcaklığı sonuç verir.

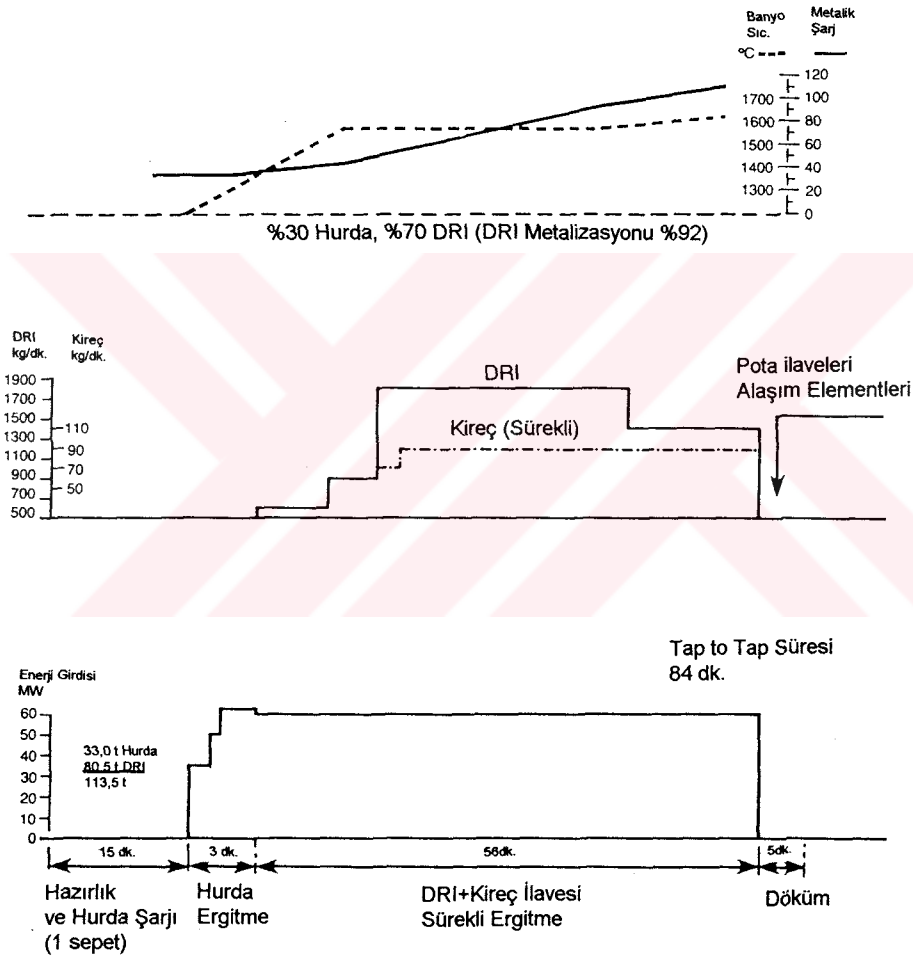
Yığın sıcaklığını arttırmak ve rafinasyon süresini hızlandırmak için döküm öncesi besleme hızı azaltılır. Son kimyasal kontrol yapılır. Curuf alımı, curuftaki demir kaybını azaltmak, için mümkün olduğunca geciktirilir (Midrex, 1974).

Ergime için gerekli olan ısı transferinin büyük kısmı ergimiş banyodan DRI içine doğru ısının kondüksiyonuyla olur. Buna rağmen ergitmenin ilk devrelerinde gaz konveksiyonu ve ark radyasyonunun da bir miktar katkısı vardır (Kopfle ve Verdier, 1991).

DRI'nın ~ %80'ni fırına beslendikten sonra bir numune alınır. Bu şekilde döküm öncesi istenen karbonsuzlaşmayı sağlamak için daha fazla O₂ gerekip gerekmediğine karar verilir.

Curufun küçük bir kısmı bir sonraki ısıtmanın ilk aşamalarında reaktif bir curuf oluşumuna yardım etmek için fırında bırakılır. Sıvı metal dökümden sonra rafinasyon için pota fırınına gönderilir.

Ergitme işleminin başka bir örneği 100 t'luk bir E.A.F. için Şekil 8.7'de verilmiştir. Burada görüldüğü gibi, 75 MVA transformatörlü böyle bir fırın için tap to tap süresi 84 dk. kadardır (70/30 DRI/hurda besleme oranı kullanıldığında) (Jellinghaus ve Ropke, 1988).



Şekil 8.7 100 tonluk (75 MVA) bir E.A.F.'da DRI ergitme işlemi (Jellinghaus ve Ropke, 1988).

%100 DRI kullanılarak çelik yapımı biraz farklı bir teknikle başarılmıştır. E.A.F.'da sıvı bir havuz bırakıldığında ve DRI baştan itibaren sürekli şarj edildiğinde iyi sonuçlar alınmıştır. Başlangıç şarjında kuru peletler üzerinde arkın oluşturulmasında bir zorluk

Uygun curuf oluşma koşullarında, curuf-metal ara yüzeyindeki yoğun gaz oluşumu curufu köpürterek curuf yoğunluğunun düşmesine ve curuf derinliğinin artmasına neden olur. Yoğunluk 3,3 gr/cm³'den 1,0 gr/cm³'ün altına düşer. Bu şiddetli karbon kaynaması ve yoğun köpüklü curufun ark ocağına getireceği faydalar şunlardır:

- Düşük elektrik tüketimi. Ergitme daha yüksek voltaj kullanılarak daha uzun arkla yapılır.
- Daha hızlı ergitme. Düşük yoğunluklu curuf, curuf-metal arayüzeyine hızlı DRI girişine imkan verir ve köpürme ısı transferini artırır.
- Azalan elektrod tüketimi. Fırın atmosferi CO'ce zengin olduğundan elektrod oksidasyonu azalır.
- Daha uzun refrakter ömrü. Fırın, ciddi refrakter aşınması olmadan tam güçte çalıştırılabilir. Çünkü ark radyasyonu, köpüklü curuf tarafından absorbe edilir.
- Yüksek çelik kalitesi. Curuf-metal arayüzeyinde CO çıkışı N₂ ve H₂'i banyodan süpürür. Örneğin, %70 DRI + %30 hurda ile potadaki N₂ seviyesi Bazık Oksijen Konverteri'ndeki seviyelerle karşılaştırılabilir hale gelir. Ayrıca daha iyi curuf-metal karışımı, S ve P'un uzaklaştırılmasına imkan sağlar.
- Hızlı ergitme süresi. DRI fırına beslendiğinde curuf-metal arayüzeyine çabucak ve kolayca girer ve daha yüksek voltaj kullanılarak uzun ark ile çalışılabilir (Jellinghaus ve Ropke, 1988; Datlı ve Çöplü, 1991; Faccone vd., 1993).

Düşük metalizasyona sahip sünger demir kullanımında bazı önlemler alınması gerekmektedir. Çünkü, bu durumda CO oluşumu çok fazla olup aşırı curuf sıçramalarına sebep olabilir. Örneğin, %85 metalizasyona sahip bir sünger demir, %92 metalizasyona sahip sünger demirin iki katı kadar gaz oluşumuna neden olur (Datlı ve Çöplü, 1991).

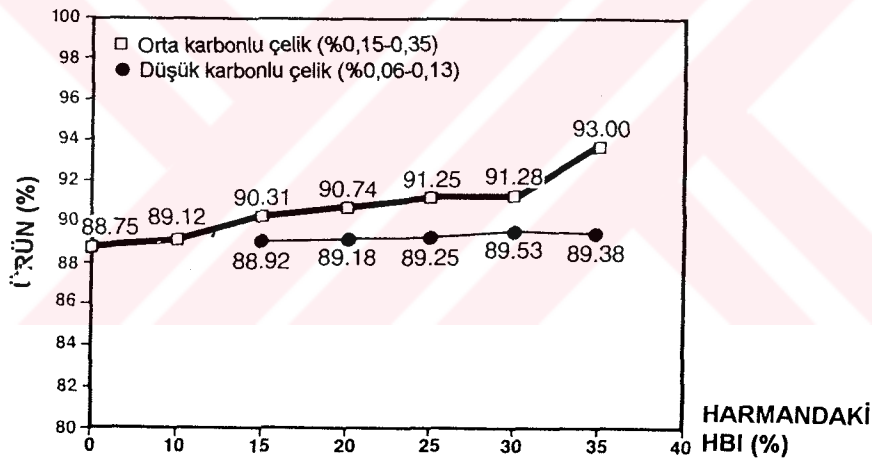
8.4 DRI'nın Fırın Çalışma Şartlarına Etkisi

Hurda ergitmedeki güç programı HBI için de kullanılabilir. Şarjın başlangıcında HBI'nın bulunması ergimeye yardımcı olur, arkı kararlı kılar ve fırın tabanını korur. Hurda ergitmesinde tipik olarak gözlenen büyük voltaj dalgalanmaları azalır ve güç girdisi

sabittir. HBI, ya konvansiyonel olarak ya da köpüklü curuf işlemiyle ergitilebilir ve istenildiği kadar tam güç uygulanmasına imkan sağlar (Kopfle ve Verdier, 1991).

Çelikte istenen özelliklerin toleransları sıkılaştırıldıkça kullanılan DRI yüzdesi artmaktadır. E.A.F.'da DRI/HBI kullanımının sağladığı önemli avantajlar şunlardır:

- Gelişmiş ürün (Şekil 8.9).
- Azalan güç tüketimi (Şekil 8.10).
- Azalan tap to tap zamanı (Şekil 8.11).
- Daha az elektrod kırılması.
- Çelikte düşük seviyelerde artık elementler (Şekil 8.13).
- Minimum ürün kalitesizliği, sapması ve reddi.
- Ürünlerin metalurjik sağlamlığı (Cola vd., 1988).



Şekil 8.9 Şarjdaki HBI yüzdesine bağlı olarak ürün yüzdesinin değişimi (Cola vd., 1988).

%70 DRI (%92 metalizasyon) + %30 hurda ile çalışıldığında, metalizasyon derecesindeki her %1'lik azalmayla ton çelik başına elektrik fırınındaki güç tüketimi yaklaşık 10-15 kWh artmaktadır. Daha yüksek metalizasyonla, ürün demir ve refrakter ömrü artarken elektrod tüketimi, tap to tap zamanı ve curuf hacmi azalır. Bu nedenle en yüksek metalizasyon derecesi istenir (Midrex, 1974).

8.4.1 Elektrik tüketimi

DRI kullanılarak çelik üretiminde tüketilen elektrik enerjisi hurda ile üretimdekinden kısmen farklıdır. Bunun sebebi; metalik demirin kısmi oksidasyonu ve hurda ile giren Si, Mn, Al vb. gibi alaşım elementlerinin ve impüritelerin oksidasyonu nedeniyle ortaya çıkan reaksiyon ısısının olmamasıdır.

DRI ile işlemde sadece demiri ergitme ve aşırı ısıtma için değil, aynı zamanda indirgenmemiş demir oksit ve gang için de ısı sağlamak gerekmektedir. Buna ilave olarak DRI içindeki curufa geçmeyen artık (indirgenmemiş) demirin redüksiyonu için de ısıya ihtiyaç vardır (Ottmar ve Siegers, 1985).

Ergitmede güç tüketimi (%70 DRI kullanıldığında; %91,5 Fe içeren, %92 metalizasyona sahip) 620-630 kWh/t seviyelerindedir. Bu miktar %100 hurda ile yapılan ergitmelerden %30 daha fazladır (Jellinghaus ve Ropke, 1988).

Bir çok pratik çalışma sonuçları göstermiştir ki, DRI'yı ergitmek için teorik olarak gereken güç tüketimi aşağıdaki formüle göre hesaplanabilir;

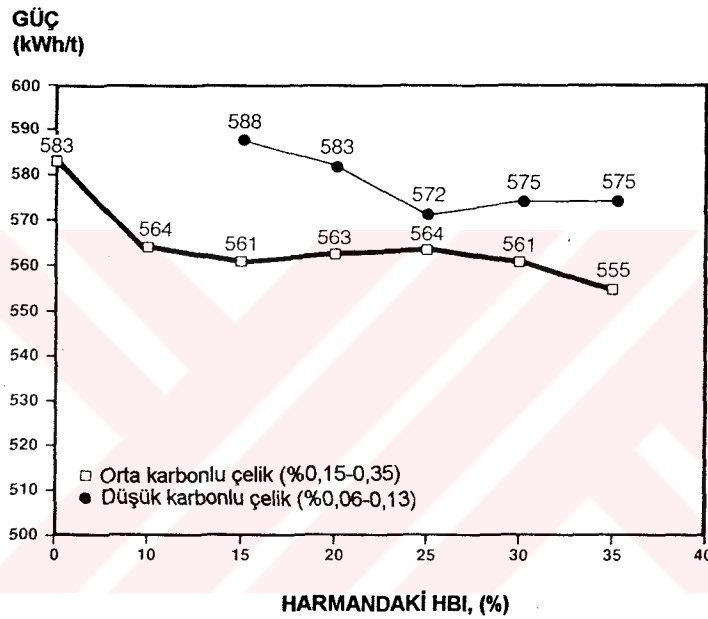
$$\Sigma \text{kWh} / t = 396 \text{ kWh} / t \text{ sıvı çelik, (1600°C'de)} + 13 \text{ kWh} (\% \text{ redüklenmiş FeO}) + 7,5 \text{ kWh} (\% \text{ curuf, baziklik yaklaşık 1,5-2})$$

Hesaplanan bu elektrik tüketimine işlem süresi nedeniyle olan termal kayıplar, fırındaki termal yük ve elektrik kayıpları ilave edilmelidir.

Ergitmede güç tüketimi hurdaya göre fazla olmasına karşın, özellikle HBI kullanımı son hurda sepetini ortadan kaldırdığından elektrik enerjisi tüketiminde azalma görülebilir (Şekil 8.10). Çünkü son sepetle birlikte oluşan zaman kaybı ve ısı kayıpları ortadan kalkmaktadır (Kopfle ve Verdier, 1991).

Sıcak (650°C) DRI kullanımında güç tüketimi daha farklıdır. Sıcak DRI'nın %70 oranında ark fırınına beslenmesiyle güç tüketimi 112 kWh/t azalmakta, tap to tap zamanı ve elektrod tüketimi de düşmektedir (Yanez, 1993).

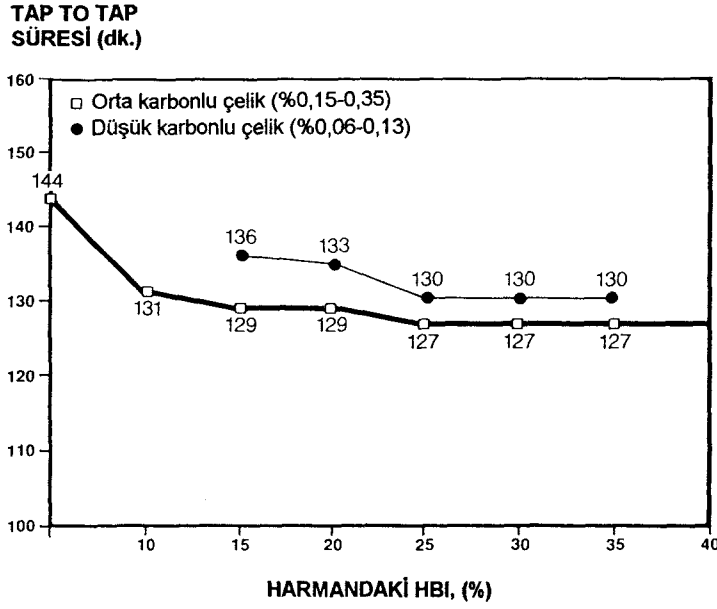
DRI ile işlemde termal verimlilik %85-95'tir. Bu değer, hurda ergitmeli işlemde daha yüksektir (hurda ergitmede sağlanan en iyi termal verimlilik %80'dir). DRI için bu iyi değer, uzayan C-O₂ reaksiyonundan ve köpüklü curufun arkı perdeleyerek direkt ısı kayıplarını azaltmasından kaynaklanmaktadır (Ottmar ve Siegers, 1985).



Şekil 8.10 Şarjdaki HBI yüzdesine bağlı olarak güç tüketimi (Cola vd., 1988).

8.4.2 Dökümden döküme süre

Özellikle HBI kullanılarak fırına şarj sayısının 3'ten 2'ye indirilmesiyle tap to tap süresi %5-10 azaltılır (Şekil 8.11). Bunun sebebi, sepet şarjı başına tonajın artmasıdır. Çünkü HBI 2,6-2,7 t/m³ yığın yoğunluğuna sahiptir. Bu da %100 hurda yoğunluğundan daha büyüktür (Cola vd., 1988).



Şekil 8.11 Şarjdaki HBI yüzdesine bağlı olarak dökümden döküme sürenin değişimi (Cola vd., 1988).

8.4.3 Refrakter astarı

Hurda işleminin tersine sünger demirin (DRI) sürekli şarjı, işlemin büyük kısmının sıvı bir banyo ile meydana gelmesini gerektirir ki daha yüksek fırın sıcaklığının anlamı budur. İnce toz sünger demirin kimyasal nüfuzu (özellikle çatı astarı içine doğru) refrakter astarın aşınmasını artırır. Ancak bugün astar aşınma problemi, duvarlarda ve çatıda su soğutma elemanlarının kullanımıyla çözülmüştür. Diğer yandan farklı şarj teknikleri kullanılarak ve şarj oranları değiştirilerek kısmi iyileştirmeler yapılmıştır (Ottmar ve Siegers, 1985).

8.4.4 Elektrodlar

Yüksek şarj oranlarında sünger demirin kullanılması, güç açısından hurda ile karşılaştırıldığında daha az elektrod akım yoğunluğu gerektirir, çünkü enerji verilmesi daha düzgündür. Bu yüzden elektrod uçları çok yavaş aşınacaktır. Elektrod kırılmaları da sünger demir kullanıldığında daha az olmaktadır (Ottmar ve Siegers, 1985).

HBI kullanıldığında sepet şarjı sayısı azaldığından elektrodlar daha az mekanik zarara uğramakta ve daha az atmosfere maruz kalmaktadırlar. Bu yüzden elektrod tüketimi azalır (Cola vd., 1988).

Elektrod tüketimi (%70-90 DRI kullanıldığında) 3,3-3,6 kg/t. arasındadır (Jellinghaus ve Ropke, 1988).

8.4.5 Oksijen

DRI, ergiyikte hareket oluşturmak için gerekli iki elementi de (O_2 ve C) içerdiğinden işlem esnasında fazladan O_2 vermeye ihtiyaç yoktur. Bununla birlikte 3 önemli DRI üretim prosesi önceden belirlenen aralıklarda O_2 ve C içeriğiyle çalışırlar ve ekonomik sınırlamalar yüzünden bu aralıklar içinden seçim yaparlar. Böylece farklı bileşimlerdeki DRI'lar farklı işlem tekniklerini gerektirirler.

C miktarı stokiometrik orandan fazla olursa hurda ile olan üretimden daha fazla oksijen gerekir. Oksijen miktarı stokiometrik orandan fazla olursa karbon taşıyan bir malzeme ilavesi gerekir (Ottmar ve Siegers, 1985).

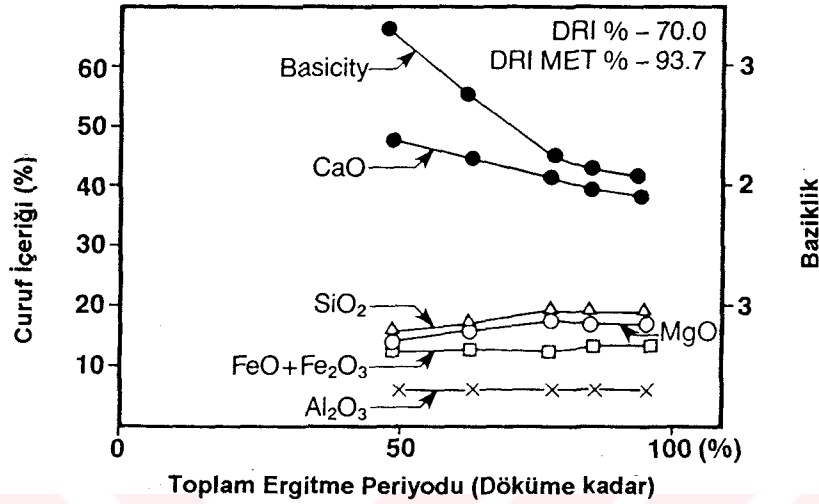
8.4.6 Kireç

Kireç ilavesi; silika miktarı, sünger demirin P ve S miktarı (potada desülfürizasyon işlemiyle alınacak kısmın dışındaki) ile belirlenir (Ottmar ve Siegers, 1985).

8.4.7 Curuf

Temel olarak SiO_2 , Al_2O_3 , MgO ve CaO'den oluşan DRI gangının kompozisyonu, curuf hacmini de etkiler. DRI'nın gang içeriği, toplamın %2-25'i arasında değişir. Bu yüzden gerekli baziklikle, ortaya çıkan curuf miktarı ham çeliğin %5-%50'si arasında değişir. Yüksek miktardaki asit gang fırında bazik bir curuf oluşturmak için ilave kireç gerektirir. Bu da curuf hacmini artırır. Çok fazla curuf miktarı, yüksek kireç tüketimi, yüksek demir

kayıpları ve yüksek enerji tüketimini beraberinde getirir ve bu da belli tip DRI'ların kullanımını sınırlar (Ottmar ve Siegers, 1985). Uygun ham malzeme seçildiğinde curuf hacmi, hurda ile çalışmadaki seviyede korunabilir (Midrex, 1974).



Şekil 8.12 Ergitme sırasında curuf kompozisyonunun değişimi (Jellinghaus ve Ropke, 1988).

Çizelge 8.2 Demir cevheri ve curuf analizleriyle ilişkili olarak curuf miktarı, kireç ilavesi ve demir ergitme kayıplarının değişimi (Cevherin kızdırma kaybı %1 olarak alınmıştır. Cevherdeki Fe, Fe₂O₃ halindedir) (Ottmar ve Siegers, 1985).

Cevherdeki Fe (%)	66	67	68	68,5	69
Cevherdeki gang (%)	4,6	3,2	1,8	1,05	0,33
ES gang (%) (%100 asit)	7,0	4,8	2,6	1,53	0,48
Ergimiş curuf miktarı (%)					
*B = 1	18,9	13,0	7,0	4,1	1,3
B = 2	23,6	16,2	8,8	5,2	1,6
B = 3	33,1	22,7	12,3	7,2	2,3
Kireç miktarı (%)					
B = 1	7,0	4,8	2,6	1,5	0,48
B = 2	10,5	7,2	3,9	2,3	0,72
B = 3	17,5	12,0	6,5	3,8	1,20
Demir ergitme kaybı (%)					
B = 1	3,8	2,6	1,4	0,83	0,26
B = 2	4,7	3,2	1,8	1,03	0,32
B = 3	6,6	4,5	2,5	1,45	0,45

*B = Bazıklık Oranı.

Üretilen curufun miktarı DRI'nın gang içeriğine bağlı olarak 120-160 kg/t. kadardır. Ergitme sırasında curufun kimyasal bileşiminin değişimi Şekil 8.12'de görülmektedir (Jellinghaus ve Ropke, 1988).

DRI ile çalışan bir çok işletmede curuf bazıklığındeki hedef yaklaşık 1,5-2'dir (Plökinger ve Etterich, 1985).

8.5 DRI'nın Çelik Kalitesine Etkisi

8.5.1 Artık içeriği

Sidbec-Dosco işletmelerinde elde edilen ürünlerde tipik artık miktarları Çizelge 8.3'te gösterilmektedir (Facone vd., 1993). Şekil 8.13'de ise orta C'lu çelik üretiminde elde edilen iz elementlerin yüzdelерinin, şarja ilave edilen HBI yüzdesine göre değişimi görülmektedir.

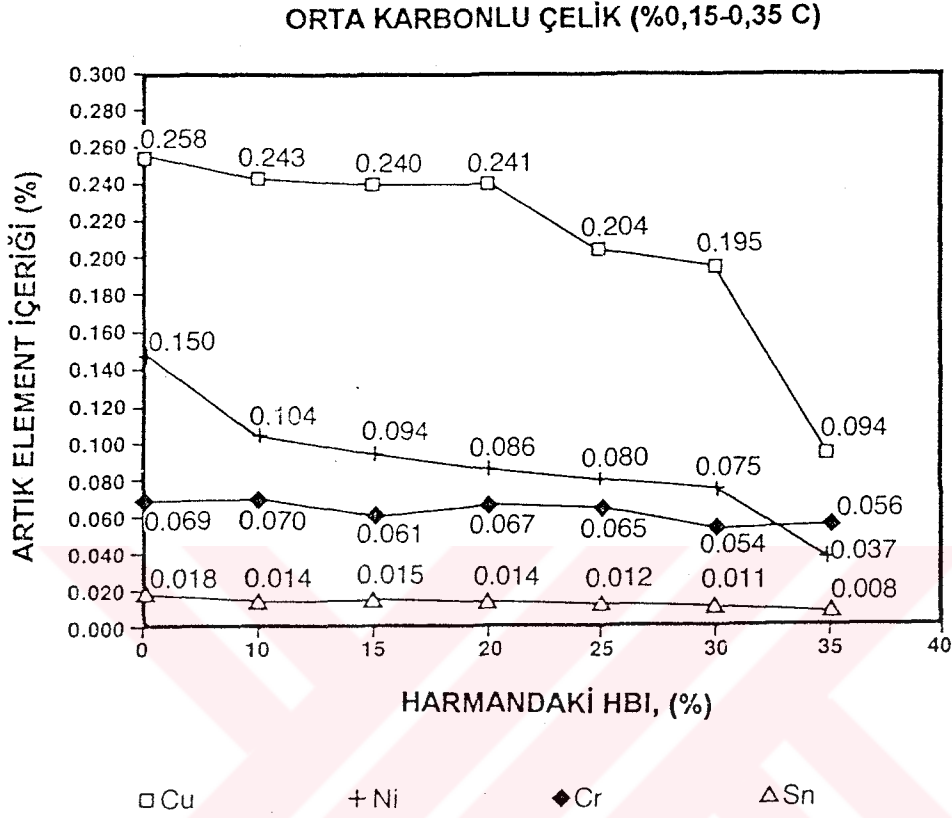
DRI ile yapılan ergitmede, ergitme sonrası C tahmin edilebilir ve çelik bileşimi için gerekli ilaveler tam olarak hesaplanabilir (Cola vd., 1988).

Çizelge 8.3 Sidbec-Dosco ürünlerinde tipik artık ve N₂ içerikleri (Facone vd., 1993).

	Bileşim			
	Cu (%)	Ni (%)	Cr (%)	N ₂ (ppm)
%100 hurda	0,20	0,07	0,08	70
%60 DRI, %40 hurda	0,10	0,05	0,05	50
%100 DRI	0,02	0,02	0,02	20
BOF çeliği	0,03	0,02	0,02	25

HSLA gibi çelik türleri üretiminde düşük kükürt yüzdesi gerekli koşuldur. Sünger demirde kükürt yüzdesi 0,01'den daha düşüktür. %100 DRI kullanımıyla üretilebilecek HSLA çeliğinin maksimum kükürt yüzdesi 0,01'dir. Bu düşük kükürt seviyesinde, bir miktar CaSi

ilavesiyle iyi bir kalıntı biçim denetimi yapılabilir. Ancak Zr ve Ti gibi elementlerin ilavesi yapılmamalıdır.



Şekil 8.13 Orta C'lu çelik üretiminde kullanılan HBI yüzdesine göre artık element içeriği (Cola vd., 1988).

Basit haddeleme pratiğinin gerektirdiği HSLA ve düşük karbonlu çeliklerde, ark ocağı ve pota ocağında ilave bir işlem gerektirmeden %60-70 DRI kullanımı kükürt içeriğinin %0,020'nin altında olmasını sağlar.

DRI'nın fosfor içeriği demir cevherine bağlıdır. DRI üretim proseslerinde kullanılan cevherlerin çoğunluğu %0,03-0,04 fosfor içermektedir. Fosfor DRI içinde direkt indirgeme prosesiyle giderilemeyen P_2O_5 şeklinde bulunur. DRI kullanımında iyi bir köpüklü curuf pratiği ve erken curuf alma ile üretilen çeliğin fosforunu azaltılabilir (Datlı ve Çöplü, 1991).

8.5.2 Azot

Ergiğin N_2 içeriği DRI ilavesiyle düşürülebilir. E.A.F.'da N_2 'un uzaklaşmasını ve kaynamayı sağlayan CO, sürekli şarj sisteminde kararlı bir şekilde üretilir fakat bu etki, HBI sepet şarjı şeklinde yüklendiğinde kısa bir zamanda etkili olur. Buna rağmen sepet şarjı halinde bile N_2 içeriği hurdaya göre daha düşüktür (Kopfle ve Verdier, 1991).

Fırında bulunan çeliğin N_2 içeriği %0,0064'ten %0,0025'e sürekli şarj ve oksidasyonla düşürülür. N_2 'taki düşüş şiddetli dekarbürizasyon reaksiyonuna da (yani oluşan CO baloncuklarının karıştırma etkisine) katkıda bulunabilir (Ottmar ve Siegers, 1985).

8.6 DRI'nın Çeliğin Fiziksel Özelliklerine Etkisi

%100 DRI ve %100 hurda kullanımıyla kısmen deokside edilmiş çeliklerde elde edilen mekanik özellikler Çizelge 8.4'te verilmiştir. Artık element ve N_2 seviyelerinin karbon çeliğinin sıcak band akma gerilmesi üzerine büyük etkisi vardır. %100 hurda ile karşılaştırıldığında %100 DRI kullanımı ile akma mukavemeti %15 azalır ve çekme kalitesinde levha üretmeye imkan tanıyan deformasyon yaşanmasında önemli miktarda azalma sağlar.

Kısmen deokside edilmiş çelikler için (95ppm N_2 içerir) gerilme gerinimi sadece bir hafta yaşlandırmadan sonra oluşur. Halbuki 25ppm N_2 ile yaşlanma gerilmeleri 6 ay sonra oluşur. Böylece %100 hurda ile yapılan ısıtmalar için gerilme geriniminin olmadığı garantisi verilemez (Facone vd., 1988).

İstenen limitler içinde iz elementler kontrol edilerek, çelik ürünlerin düşük kaliteli veya reddedilmesine sebep olan sapma ihtimali minimuma iner.

Sınırlı S, P ve iz elementleri ve sürekli banyoyu karıştırma etkisi nedeniyle sıvı çelik içinde asılı bulunan metalik olmayan elemanlar uzaklaştırılır. Bu da çelik kütüklere metalurjik dayanıklılık sağlar (Cola vd., 1988).

Çizelge 8.4 Kısmen deokside edilmiş çeliklerin mekanik özellikleri (Facone vd., 1993).

Özellik	Şarj şekli	
	%100 hurda	%100 DRI
Akma mukavemeti (Mpa)		
Temper haddelenmiş	241	203
1 ay yaşlandırılmış	282	217
Çekme mukavemeti (Mpa)		
Temper haddelenmiş	351	323
1 ay yaşlandırılmış	358	325
Uzama (%)		
Temper haddelenmiş	34	39
1 ay yaşlandırılmış	25	36
Deformasyon sertleşmesi sabiti		
Temper haddelenmiş	0,21	0,23
1 ay yaşlandırılmış	0,17	0,21

DRI kullanımı akma dayancını bir miktar azaltmaktadır. Akma dayancındaki bu düşme, katıfki ve azot değerklerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 8.5 DRI'nın çeliğın mekanik özelliklerine etkisi (Facone vd., 1992).

Uzama	↑
Yorulma dayancı	↑
Tokluk	↑
Sıcak şekillendirilebilirlik	↑
Soğuk şekillendirilebilirlik	↑
Isıl İşlemlenebilirlik	↑
Kaynaklanabilirlik	↑
Yönlölük	↑
Akma dayancı	↓
Çekme dayancı	↓

Yüzey altı alüminyum oksitleri yüzey kalitesinin kötü olmasına neden olur. Alüminyum ilavesi ile deoksidasyonun kontrolü gelişigüzel yüzey altı alüminyum oksitlerin oluşmasını

engellemek açısından gereklidir. DRI banyo içerisindeki serbest oksijeni en alt düzeye indirdiği için malzemedeki iyi bir yüzey kalitesinin elde edilmesine sebep olur (Datlı ve Çöplü, 1991). Çizelge 8.5'te DRI'nın çeliğin mekanik özelliklerine olan etkisi verilmektedir.



9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

9.1 Hammadde Özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanılacak hammaddelerin özellikleri belirlenirken direkt redüksiyon prosesiyle üretilecek sünger demirin özellikleri ve bu özellikleri sağlayabilecek yerli hammadde kaynaklarımız dikkate alınmıştır. Üretilecek sünger demirin özellikleri büyük oranda seçilen hammadde özelliklerine bağlıdır. Hammaddeler ve sünger demir ile ilgili kriterler ve tercih edilen hammadde türleri aşağıda verilmektedir.

9.1.1 Demir oksidin seçimi

Farklı direkt redüksiyon proseslerinde en çok kullanılan demir oksit hammaddeleri olan pelet ve parça cevherler içinde peletler, kontrollü metal dereceleri, kontrollü boyut ve şekilleri, dayanım ve redüklenebilirlik özellikleriyle tercih edilirler (Greenwalt ve Stephenson,1977).

Direkt redüksiyon prosesine beslenen pelet için gereken kimyasal ve fiziksel karakteristikler, sadece direkt redüksiyon prosesini değil, aynı zamanda daha sonraki kullanımı da etkilemektedir (Greenwalt ve Stephenson, 1977). Bütün direkt redüksiyon proseslerinde geçerli olan demir oksit peletlerle ilgili ana kriterler aşağıda sıralanmıştır (Mueller ve Struve, 1977):

1. Taşımaya ve aşınmaya karşı dayanıklılık.
2. Boyut aralığının dar olması.
3. Yüksek demir içeriği ve mümkün olan en düşük asit gang miktarı (özellikle sünger demir doğrudan çelik yapımında kullanılacaksa).
4. Minimum S ve P içeriği.
5. Yüksek redüklenebilirlik.
6. Redüksiyon sırasında kararlılık (Şişme ve redüksiyon sırasında dağılma az olmalı).
7. Redükleyici atmosferde yüksek yapışma sıcaklığı.

Bu verilen kriterlerin sayısal ifadesi aşağıda Çizelge 9.1'de görülmektedir (English ve Frans, 1977; Midrex, 1997).

Çizelge 9.1 Sünger demir üretiminde kullanılabilecek demir cevheri ve peletinden beklenen özellikler.

	Pelet (Midrex, 1997)	Pelet (English ve Frans, 1977)	Parça cevher (Midrex, 1997)
<i>Kimyasal Özellikler</i>			
%Fe	min. 67	min. 68	min. 67
%(SiO ₂ +Al ₂ O ₃)	max. 3	2,7	max. 3
%S	max.0,008	0,01	max. 0,008
%P	max 0,03		max. 0,03
%TiO ₂	max. 0,15	0,1	max. 0,15
<i>Fiziksel Özellikler</i>			
Nominal boyut	6×16 mm	-	10×35 mm
% 9×16mm	min. 95	min. 95	-
Basma mukavemeti	250 kg	182 kg	-
<i>Tumble test</i>			
% + 6,73 mm	min.95	min. 95	min. 90
% - 28 mesh	max.4	-	max . 7

Ülkemizin en önemli ve en büyük rezerve sahip demir cevheri yatağı Sivas/Divriği yöresinde bulunmaktadır. Toplam tahmini rezerv 91 Mt'dur. Buradan çıkarılan cevherlerden peletlenecek olanlar, manyetik ayırma yoluyla zenginleştirilmekte ve ortalama %65-70 Fe içeren konsantre elde edilmektedir. Peletleme işlemiyle pelet haline getirilen bu zengin cevher, daha önce yapılmış olan çalışmalarda da kanıtlandığı üzere (İmer, 1984; Yıldırım ve Sevinç, 1990; Narçın, 1990) direkt redüksiyon işlemi için ideal bir malzemedir. Divriği tesislerinde yılda 2 Mt konsantre sinter fabrikaları için, 1,3 Mt pelet ve 0,5 Mt parça cevher üretilmektedir (İmer, 1984).

Direkt redüksiyon işlemlerinde kullanılacak olan Sivas/Divriği peletlerinin kimyasal analizi Çizelge 9.2’de verilmiştir. Belli bir boyut dağılımının sağlanması için peletler elekten geçirilmiş ve ideal boyuta yakın olan -12,3 + 9,5 mm aralığı deneylerde kullanılmıştır.

Çizelge 9.2 Deneylerde kullanılan Divriği peletinin kimyasal analizi.

<i>Bileşen</i>	<i>% Miktar</i>
Fe	66,70
SiO ₂	3,08
Al ₂ O ₃	1,78
S	eser
Mn	0,041
CaO	0,82
Cu	0,009
MgO	0,89
K ₂ O	0,06
Na ₂ O	0,03
Fe ₃ O ₄	3,20

9.1.2 Kömürün seçimi

Katı redükleyici kullanarak üretim yapan direkt redüksiyon proseslerinin gelişmesinde en önemli etken, hem redükleyici hem de yakıt olarak düşük kaliteli kömürlerin kullanılabilirliği olmuştur. Bu sayede pahalı ve uzun işlemleri gerektiren kok yapımı ortadan kalkmakta, ayrıca gittikçe azalan koklaşabilir kömür rezervleri yerine çok daha bol bulunan linyit rezervleri tüketilmiş olmaktadır.

Sünger demir üretiminde kullanılacak kömürde aranan en önemli kriterler; reaktivite, uçucu madde, kükürt ve kül içeriği ile külün yumuşama sıcaklığıdır (Yıldırım ve Sevinç, 1990).

Döner Fırın Prosesi, kullanılan kömürler açısından büyük esnekliğe sahiptir. Herhangi bir tipteki koklaşmayan kömürler (linyitten bitümlü kömürlere ve antrasit'e kadar) aşağıdaki şartları gerçekleştirmek kaydıyla herhangi bir sınırlama olmadan kullanılabilirler:

- Yaklaşık 1,0'in altında şişme indeksi.
- Yaklaşık %25-30'un altında kül içeriği ve yüksek kül ergime noktası.
- Yaklaşık %1,5'un altında S içeriği.
- Yaklaşık %25'in altında nem içeriği (İmer, 1984).

Fosilleşmeye uğrayan en yeni kömürler olan linyitlerin damıtılmasıyla iyi cins kok elde edilemez. Linyit kömürleri bileşimlerin de hümkik asit taşır ve çıkarıldıkları anda rutubetleri çoktur (Civaoğlu, 1963).

Deneylerde kullanılan Soma linyiti "kara linyit" türündendir. Bunların bileşimlerinde daima S bulunur ve ısı enerji 5000-6500 cal/kg. kadardır (Civaoğlu, 1963).

Soma linyitleri Türkiye'nin en büyük linyit rezervini oluşturmaktadır. Toplam tahmini rezerv 400 milyon tondur (İmer, 1983).

Ayrıca Lurgi'de, Türkiye kömürlerinin döner fırında sünger demir üretimi için kullanılabilirliği üzerine yapılan araştırmalarda (1984), Soma kömürünün diğer kömürlere nazaran herhangi bir teknik ya da metalurjik sınırlama olmaksızın yüksek kaliteli sünger demir üretiminde kullanılabileceği bulunmuştur.

Direkt redüksiyon deneylerinde kullanılan Soma linyit kömürünün yapılan kısa analizleri ve külünün kimyasal bileşimi Çizelge 9.3 ve Çizelge 9.4'te verilmiştir.

Kömür, döner fırın redüksiyonunun sanayi uygulamasında 0-10 mm. aralığında beslenmektedir. Kömür tozunun hava sirkülasyonuna engel olmaması için deneylerde -6 +1 mm. boyut aralığı seçilmiştir.

Çizelge 9.3 Deneylerde kullanılan Soma linyit kömürünün kısa analizi.

<i>Bileşen</i>	<i>% Miktar</i>
Sabit karbon (C_p)	44,31
Uçucu madde	39,78
Kül	15,89
Nem	8,68
Toplam S	0,975

Çizelge 9.4 Deneylerde kullanılan Soma linyit kömürü külünün kimyasal analizi.

<i>Bileşen</i>	<i>% Miktar</i>
SiO_2	31,49
Al_2O_3	12,03
CaO	21,50
MgO	2,33
Fe	6,01

9.1.3 İlaveler

Kömürün S seviyesine bağlı olarak, üretilen sünger demirde %0,02'in altında S seviyesi sağlayabilmek için kireçtaşı, dolomit gibi ilavelerin fırına şarjı tavsiye edilir ve genellikle de bu ilaveler yapılır. Optimum S giderimi için bu ilaveler fırına 1-3 mm boyutunda verilir (İmer, 1984). İlavelerin fırına beslenme bölgesi, S seviyesinin çok yükseldiği ve besleme ağzından itibaren fırın boyunun %60-70'nin geçildiği bölgedir (Bogdandy ve Engell, 1971; İmer, 1984). Ayrıca kireçtaşı, dolomit gibi bazik ilavelerin S giderimi yanında redüksiyon

üzerine de etkileri söz konusudur ve bu konu bir çok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Carlsson vd., 1977; Cribbes ve Kestner, 1977; Soeki vd., 1977; Şeşen, 1986; Nutter vd., 1990).

Bu çalışmada, gerek redüksiyon sonrasında gerekse ergitme sonrasında, bileşik dağılımı ile birlikte S dağılımını da görebilmek için herhangi bir ilave malzeme kullanılmamıştır.

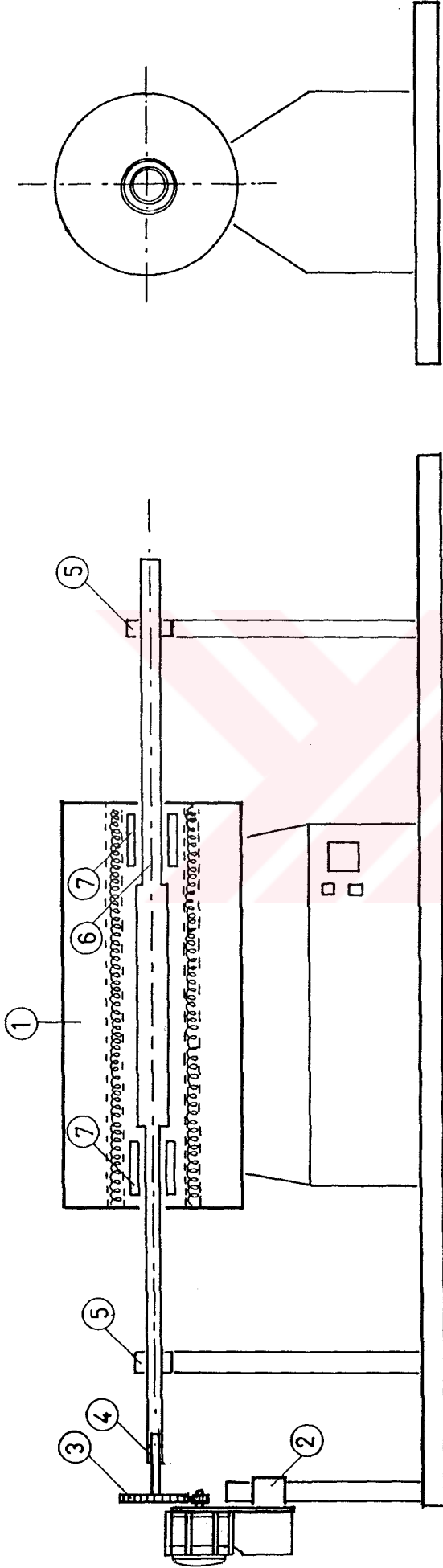
9.2 Kullanılan Cihazlar

9.2.1 Döner Fırın

Direkt redüksiyon işlemi için kullanılan döner fırının ölçekli çizimi Şekil 9.1’de görülmektedir. Fırının dönen kısmını oluşturan ve şarj malzemelerinin yüklenecek dönme hareketinin yaptırıldığı döner fırın tüpü, paslanmaz çelik boruların kaynakla birleştirilmesiyle yapılmıştır. Reaksiyonların gerçekleştiği orta kısmın uzunluğu 40 cm., dış çapı 5,0 cm., et kalınlığı ise 0,2 cm.’dir. Reaksiyonların gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan ısı, paslanmaz çelik tüpe elektrik dirençli bir fırın tarafından verilmektedir. Bu fırın Lenton marka bir tüp fırın olup, maksimum 1200°C’ye kadar ısıtma yapabilmektedir. Isıtma için gerekli olan fırın haricindeki konstrüksiyon ve dizayn, Y.T.Ü., Metalurji Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır. Resim 9.1’de redüksiyon deneylerinin gerçekleştirildiği döner fırın düzeneği görülmektedir.

Fırına dönme hareketi veren motorun dönme hızı 3 kademe olarak (7 d/dk., 10 d/dk., 14 d/dk.) ayarlanabilmektedir. Redüksiyon sırasında sıcaklık ölçümü iki şekilde gerçekleştirilmiştir: Birinci sıcaklık, fırının dirençlerindeki ısıyı ölçen termokupllarla fırının göstergelerinden okunmuş, ikinci sıcaklık ise fırın boşaltma ucundan dönen tüpün içine uzatılan Pt-Pt Rh termokupl ile tüp içinden ölçülmüştür.

Fırın içi ile çelik tüpün içi arasında belli bir sıcaklık farkının mevcut olduğu görülmüş ve deneylerde bu fark giderilecek şekilde sıcaklık ayarlaması yapılmıştır.



Şekil 9.1 Dizayn edilen laboratuvar tipi döner fırın.

1. Fırın
2. DC akımlı, 3 devirli motor
3. Dişli mekanizması

4. Bağlantı kısmı
5. Bilyalı yatak
6. Paslanmaz çelik boru
7. Yataklama



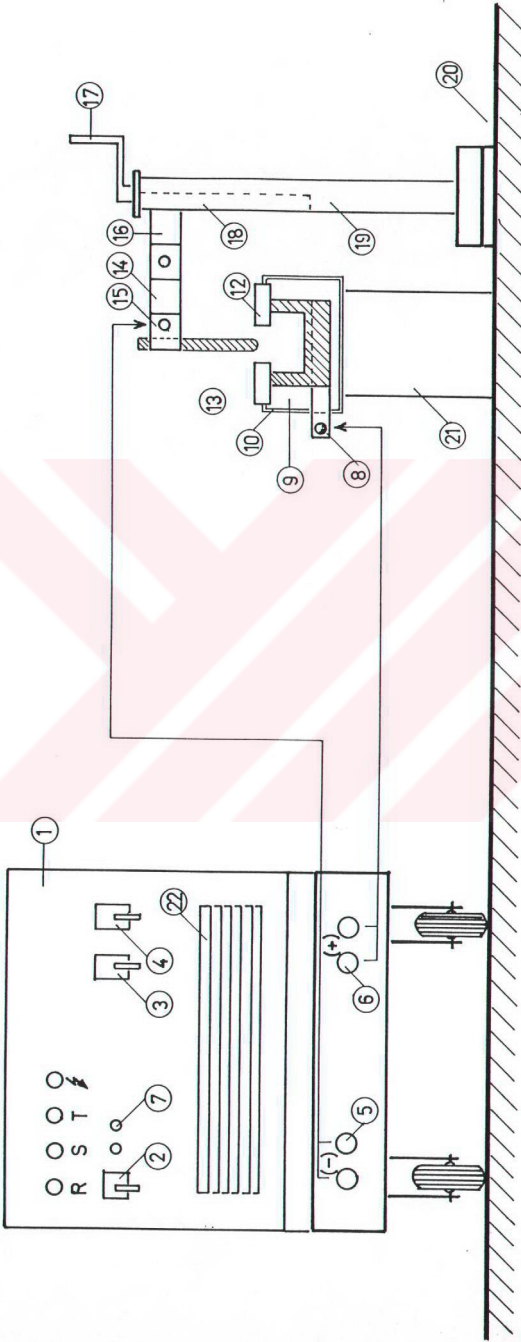
Resim 9.1 Redüksiyon deneylerinde kullanılan döner fırın.

9.2.2 DC Elektrik Ark Fırını

Şekil 9.2’de de görüldüğü gibi DC-E.A.F.’nin güç kaynağı olarak (trafo-redresör) bir doğru akım kaynak makinası kullanılmıştır. OERLIKON SG 150 markalı doğru akım kaynak makinası 78 kVA gücündedir.

Cihazın voltaj değerleri 3 kademe kaba ve 10 kademe ince ayar olmak üzere ayarlanabilmektedir. Trafo-redresör hakkındaki ayrıntılı bilgi Çizelge 9.5’de verilmiştir.

DC-E.A.F.’nin pota kısmı, 2 adet farklı çap ve boyda olmak üzere 90t.’luk bir E.A.F.’nin elektrodundan işletilmiş olduğundan tamamı grafitir ve alt kısımlarına (+) kutbun bağlanacağı bakır bilezik geçirilmiştir. Bakır bilezik de dahil grafit potaların çevresi Al_2O_3 esaslı dökülebilir refrakter malzeme ile kaplanmıştır. En dış kısım ise çelik saç ile çevrilmiştir. Grafit potaların ölçüleri Çizelge 9.6’da verilmiştir.



Şekil 9.2 Dizayn edilen laboratuvar tipi doğru akım elektrik ark fırını.

- | | | |
|--------------------------|--------------------------------------|--|
| 1. DC Kaynak makinası | 8. Potayı dipten saran bakır bilezik | 15. Bakır bilezik |
| 2. Açma kapama şalteri | 9. Refrakter | 16. İndirme mekanizması bağlantı kısmı |
| 3. Kaba ayar (3 kademe) | 10. Çelik kılıf | 17. İndirme mekanizması kolu |
| 4. İnce ayar (10 kademe) | 11. Grafit pota | 18. İndirme mekanizması vida kısmı |
| 5. (-) kutup bağlantısı | 12. Refrakter kapak | 19. İndirme mekanizması |
| 6. (+) kutup bağlantısı | 13. Grafit elektrod | 20. Yalıtkan taban |
| 7. Sigortalar | 14. Bakır bağlantı parçası | 21. Destek tabanı |

Çizelge 9.5 Trafo-redresörün teknik özellikleri.

Şebeke Bağlantısı (Primer)		
Şebeke Bağlantısı		3 Faz, 380 V, 50 Hz
Şebeke Gerilimi (V)		380
Sürekli Güç (%100 D.K.O.)* (kVA)		78
Sürekli Akım (%100 D.K.O.) (A)		120
Şebeke Kablosu (mm ²)		4×25
Kaba Gerilim Ayarı (kademe)		3
Hassas Gerilim Ayarı (kademe)		10
Kaynak Kapasitesi (Sekonder)		
Sürekli Kaynak Akımı (%100 D.K.O.) (A)		1500
Gerilim Ayar Sahası (boşta) (V)		23-53
En Büyük Boşta Çalışma Gerilimi (V)		53
Kaynak Kablosu (mm ²)		3/120
Diğer Özellikler		
Soğutma Şekli		Hava soğutmalı
Boyutlar (en,derinlik,yükseklik) (mm)		705×900×1050
Ağırlık (komple) (kg)		360

*D.K.O.=Devrede kalma oranı

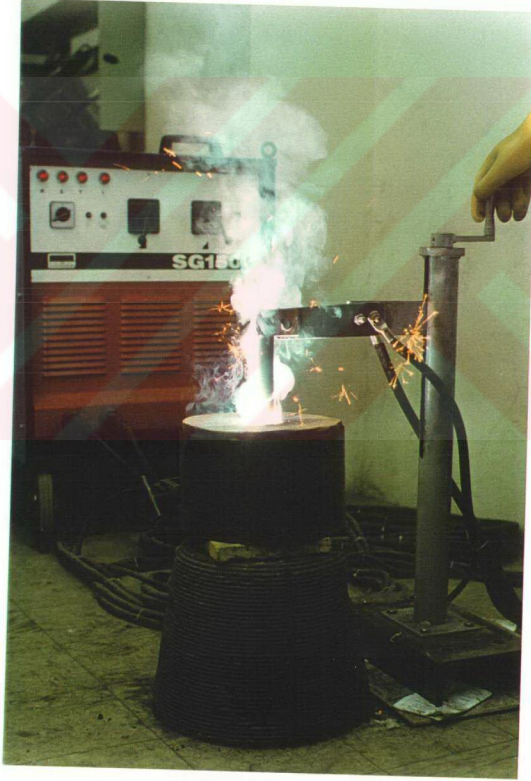
Çizelge 9.6 Grafit potaların ölçüleri.

	<i>İç çap (cm.)</i>	<i>Dış çap (cm.)</i>	<i>İç yükseklik (cm.)</i>	<i>Refrakter kalınlığı (cm.)</i>
1. Pota	14	19	6,5	4
2. Pota	11	20	6,5	4,5

Elektrodlar da pota ile aynı şekilde kullanım dışı grafit elektrodlerden farklı çaplarda (2,5 cm. ve 4,5 cm.) işletilmiştir. Elektrodun üst kısmına, (-) kutba bağlantı yapabilmek için bakır bilezik geçirilmiştir. Bu bakır bileziğe hem (-) kutup kabloları hem de elektrod indirme mekanizmasına bağlanan bir bakır plaka tesbit edilmiştir. Elektrod indirme

mekanizması elle kumanda edilmekte ve ergiyen metale ve arkın durumuna göre ayarlanmaktadır.

DC-E.A.F.'nın kapağı dökülebilir refrakter malzemeden yapılmış, orta kısmı elektrod çapına göre delinmiştir. Gerekliğinde açılıp kapanması manuel olarak yapılmaktadır. DC-E.A.F.'nın dizayn ve konstrüksiyonu da Y.T.Ü., Metalurji Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır. Deneyler sırasında çekilen DC-E.A.F.'nın fotoğrafı Resim 9.2'de görülmektedir.



Resim 9.2 DC-E.A.F.'da çelik üretimi.

9.3 Deneylerin Yapılışı

9.3.1 Döner fırında sünger demir üretimi deneyleri

Redüksiyon deneylerinin gerçekleştirildiği bu bölümde, Divriği peletleri, döner fırında Soma linyit kömürü kullanılarak redüklenmiştir. Deneylerde peletlerin ve kömürün fırına yüklenmesi ve numune alınması periyodik olarak yapılmıştır.

Fırın ısıtılmaya başlandıktan sonra peletler fırına, deney sıcaklığının yarısına gelindiğinde yüklenmiştir. Böylece istenilen sıcaklığa ulaşana kadar peletlerde homojen ısı dağılımı sağlanmıştır. Deney sıcaklığına ulaşıldığında kömür fırına verilmiş, kısa bir süre beklendikten sonra deney süresi başlatılmıştır. Redüksiyon deneylerinde 5 farklı sıcaklık kademesi (700 - 850 - 950 - 1000 - 1050°C), 6 farklı redüksiyon süresi (15 - 30 - 45 - 60 - 75 - 90 dk.) ve 2 farklı C/Fe oranı (0,4 - 0,5) kullanılmıştır.

Redüksiyon süresinin başlangıcından itibaren, her 15dk.'da bir numune alınmış ve bu numuneler desikatörde soğumaya bırakılmıştır. Redüksiyon işlemi bittikten sonra fırın ısıtıcıları kapatılmış ve fırın içindeki tüp dönme halinde soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan redüklenmiş peletlerden bir kısmı kimyasal analiz, bir kısmı metalografik inceleme, bir kısmı da basma mukavemetlerinin ölçümü için ayrılarak saklanmıştır.

Kimyasal analizle, redüklenmiş pelet içindeki metalik demir ve toplam demir yüzdeleri tespit edilmiştir. Bu yüzde oranlardan hareketle ön redüklenmiş demirin (sünger demirin) metalizasyon derecesinin deneylerdeki değişkenlere göre değişimi incelenmiştir.

Metalografik incelemede, redüklenmiş pelet numuneleri kaba zımparadan geçirildikten sonra bakalite alınarak, sırasıyla 180-240-320-400-600-800 no.'lu zımparalarla peletlerin yarısına gelene kadar zımparalanmıştır. Parlatma işlemi ise 6µm boyutlu elmas pasta kullanılarak yapılmış ve numunelerin makro ve mikro ölçekli fotoğrafları çekilmiştir. Fotoğrafların çekiminde Leica marka Image Analyser cihazı kullanılmıştır.

Ön redüklenmiş pelet numunelerinin basma mukavemetlerinin ölçümü ise çok amaçlı basma cihazında 500 kg. yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

9.3.2 DC-E.A.F'da hurda ve sünger demirden çelik üretimi deneyleri

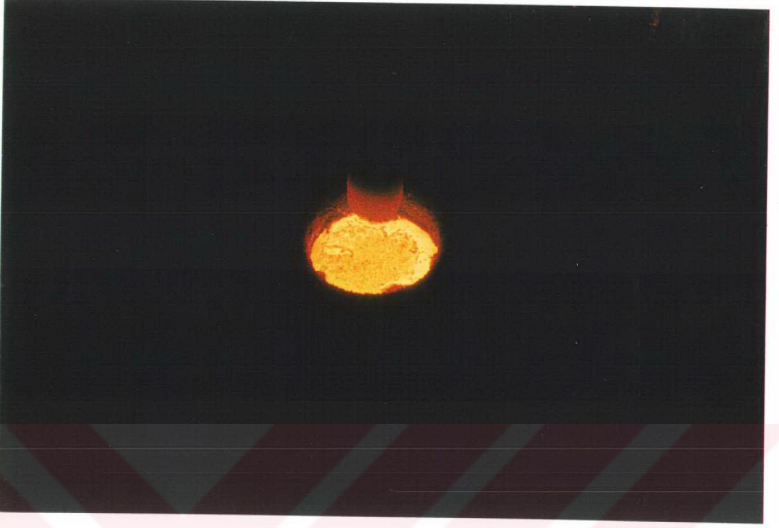
Bu bölümdeki deneylerde, DC-E.A.F'da çelik üretiminde sünger demir kullanımının fiziksel ve kimyasal etkilerini görebilmek, üretim şartlarını ve ürün özelliklerini karşılaştırmak açısından hem hurda hem de sünger demir ergitme şartları incelenmiştir.

Bu noktadan hareketle, öncelikle etli parça halindeki hurda ile çalışarak kararlı bir ark oluşturabilmek ve ergitme rejimini belirleyebilmek için gerekli gerilim ve akım değerleri tesbit edilmiştir. Bu deneylerden elde edilen verilere göre, daha sonra yapılacak deneylerde kullanılabilecek gerilim ve akım aralıkları belirlenmiştir. Ayrıca iki farklı çapta pota (11 cm. ve 14 cm.) ve elektrod (2,5 cm. ve 4,5 cm.) kullanılarak uygun pota ve elektrod boyutları da tespit edilmiştir.

Hurda kullanılarak yapılan ergitme deneyleri sırasında, hurdanın fırına yüklenmesi iki şarj halinde olmuştur; birinci şarj yüklendikten sonra elektrod indirilerek ergitmeye başlanılmış, birinci şarj tamamen ergitildikten ve fırında sıvı metal banyosu oluşturulduktan sonra elektrod kaldırılarak ikinci şarj fırına yüklenmiştir. Toplam şarj ağırlıkları 1-1,5 kg. arasında değişmektedir.

Farklı oranlarda hurda ve sünger demirin karıştırılarak kullanıldığı ergitme deneylerinde ise, yüklenecek hurdanın tamamı fırına verilip ergitilmesi tamamlandıktan sonra, sünger demir sürekli besleme şeklinde fırına verilmiştir.

Hurda ve sünger demir kullanılarak yapılan çelik üretimi deneylerinde gerilim, akım, ergitme süresi, elektrod çapı, sünger demir besleme oranı gibi parametrelerin fırın çalışma şartları ve ürün çelik üzerine olan etkileri incelenmiştir. Ergitme deneyleri sırasında üretilen sıvı çeliğin bir görüntüsü Resim 9.3'te görülmektedir.



Resim 9.3 DC-E.A.F.'da üretilen sıvı çeliğin görüntüsü.

10. SONUÇLAR

10.1 Direkt Redüksiyon Deney Sonuçları

Redüksiyon deneylerinde sıcaklık, süre ve C_F/Fe oranı değişkenlerinin, ön redüklenmiş demirin metalik demir, toplam demir değerleri ile metalizasyon derecesi üzerine etkileri incelenmiş ve sonuçlar Çizelge 10.1 ve Şekil 10.1 - Şekil 10.8 arasındaki grafiklerde gösterilmiştir. Kimyasal analiz sonuçlarından hareketle metalizasyon yüzdesi formül (10.1)'e göre hesaplanmıştır (Ottmar, 1977).

$$\% \text{ Metalizasyon} = \frac{\text{Redüklenmiş numunedeki metalik demir yüzdesi}}{\text{Redüklenmiş numunedeki toplam demir yüzdesi}} \times 100 \quad (10.1)$$

Deneylerde elde edilen ön redüklenmiş demirdeki metalik demir ve toplam demir analizlerinin ayrıntısı Ek 1 ve Ek 2'de verilmiştir. Metalizasyon derecesinin kullanılan parametrelere göre değişiminden elde edilen sonuçlar aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

10.1.1 Sürenin etkisi

Sabit bir sıcaklık ve C_F/Fe oranında, redüksiyon süresinin metalizasyon derecesine etkisi Şekil 10.1 ve Şekil 10.2'de görülmektedir. Metalik demir ve toplam demir yüzdelерinin redüksiyon süresi ile değişimleri ise Şekil 10.3 ve 10.4'te verilmiştir.

0,4 ve 0,5 C_F/Fe oranlarında artan süre ve sıcaklıkla birlikte metalizasyon derecesinin de arttığı ve bu artışın 950°C, 1000°C ve 1050°C'ta belli bir süre sonra yavaşladığı görülmüştür. Her iki C_F/Fe oranında 700 ve 850°C'ta deney süresi sonuna kadar sürekli bir artış görülmektedir. 1000°C ve 1050°C'lık deney sıcaklıklarında 0,5 C_F/Fe oranı kullanıldığında 60dk.'dan sonra %metalizasyon değerleri birbirine çok yakın olmakta ve bu durum işlem sonuna kadar da devam etmektedir.

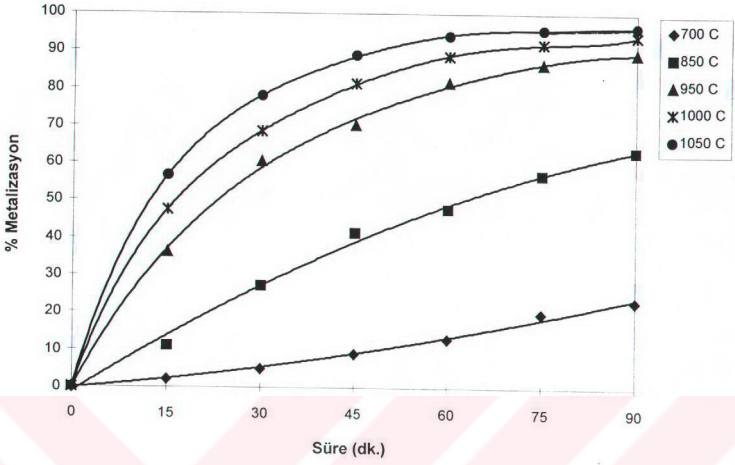
Çizelge 10.1 Direkt redüksiyon deney sonuçları.

Deney No.	C _r /Fe	Sıcaklık (°C)	Zaman (Dakika)	%Fe° (Ağ.)	%Fe _T (Ağ.)	% M	Basma Dayanımı (kg/pelet)
1A	0,4	700	15	1,09	49,17	2,21	15
1B	0,4	700	30	2,66	52,38	5,07	10
1C	0,4	700	45	5,04	55,52	9,07	13
1D	0,4	700	60	7,37	56,44	13,05	16
1E	0,4	700	75	11,56	58,46	19,77	20
1F	0,4	700	90	14,04	60,71	23,12	21
2A	0,4	850	15	7,44	66,38	11,20	19
2B	0,4	850	30	19,12	70,37	27,17	20
2C	0,4	850	45	31,26	75,52	41,39	18
2D	0,4	850	60	36,55	76,43	47,82	24
2E	0,4	850	75	45,27	79,61	56,86	23
2F	0,4	850	90	51,89	81,79	63,44	26
3A	0,4	950	15	26,49	73,31	36,13	23
3B	0,4	950	30	48,15	79,55	60,52	27
3C	0,4	950	45	58,38	83,07	70,27	29
3D	0,4	950	60	69,9	85,79	81,47	30
3E	0,4	950	75	78,64	90,81	86,59	33
3F	0,4	950	90	81,63	91,46	89,25	40
4A	0,4	1000	15	38,24	80,33	47,6	28
4B	0,4	1000	30	57,46	83,87	68,51	27
4C	0,4	1000	45	69,43	85,46	81,24	30
4D	0,4	1000	60	79,54	89,74	88,63	34
4E	0,4	1000	75	82,88	90,22	91,86	41
4F	0,4	1000	90	87,05	92,57	94,03	46
5A	0,4	1050	15	45,48	80,2	56,70	45
5B	0,4	1050	30	65,46	84,03	77,9	48
5C	0,4	1050	45	80,88	91,08	88,8	55
5D	0,4	1050	60	87,28	92,81	94,04	61
5E	0,4	1050	75	89,53	93,5	95,75	60
5F	0,4	1050	90	90,30	93,59	96,48	62
6A	0,5	700	15	2,88	54,12	5,32	18
6B	0,5	700	30	4,60	56,69	8,11	22
6C	0,5	700	45	7,94	60,37	13,15	27
6D	0,5	700	60	11,64	61,16	19,03	25

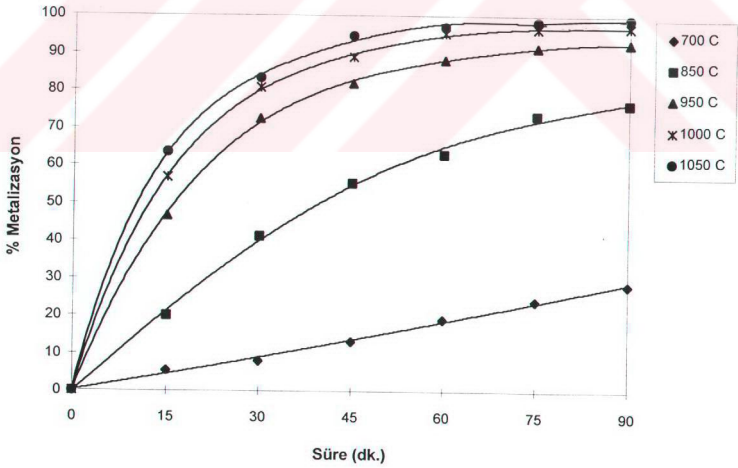
Çizelge 10.1'in devamı

6E	0,5	700	75	15,63	64,84	24,1	25
6F	0,5	700	90	18,71	66,09	28,31	28
7A	0,5	850	15	14,2	70,8	20,05	28
7B	0,5	850	30	30,48	74,12	41,12	30
7C	0,5	850	45	42,7	77,35	55,2	31
7D	0,5	850	60	51,21	81,26	63,02	37
7E	0,5	850	75	61,29	83,49	73,4	40
7F	0,5	850	90	64,73	84,57	76,54	45
8A	0,5	950	15	37,42	80,3	46,6	30
8B	0,5	950	30	60,25	83,05	72,54	29
8C	0,5	950	45	70,15	85,59	81,96	39
8D	0,5	950	60	78,66	89,20	88,18	45
8E	0,5	950	75	82,77	90,33	91,63	46
8F	0,5	950	90	84,41	91,11	92,64	47
9A	0,5	1000	15	45,06	79,43	56,73	33
9B	0,5	1000	30	68,70	85,12	80,71	36
9C	0,5	1000	45	81,25	91,39	88,9	37
9D	0,5	1000	60	89,33	93,71	95,32	43
9E	0,5	1000	75	90,43	93,79	96,41	47
9F	0,5	1000	90	91,13	93,92	97,03	51
10A	0,5	1050	15	52,37	82,45	63,51	50
10B	0,5	1050	30	72,25	86,73	83,3	53
10C	0,5	1050	45	87,60	92,65	94,55	52
10D	0,5	1050	60	91,27	94,16	96,93	57
10E	0,5	1050	75	92,84	94,44	98,3	63
10F	0,5	1050	90	93,84	94,81	98,97	65

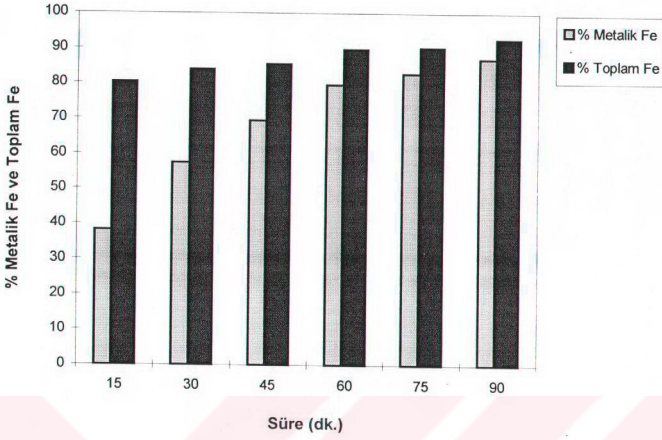
Gerek 0,4 C_r/Fe, gerekse 0,5 C_r/Fe oranlarıyla çalışıldığında başlangıçta (ilk 15dk.'da) metalizasyon dereceleri hızla yükselmiş ve zamanla daha yüksek miktarlara ulaşmıştır. Nispeten düşük sıcaklıklarda, başlangıçta %metalizasyon değerleri yüksek sıcaklıklara göre daha az olmuş ve redüksiyon süresinin ilerlemesiyle birlikte bu fark aynı seviyede olmasa da korunmuş, hatta 700°C için daha da artmıştır. Ayrıca bu şekiller incelendiğinde, 0,4 ve 0,5 C_r/Fe oranlarında özellikle 950°C, 1000°C ve 1050°C'lık deney sıcaklıklarında birbirine çok benzeyen eğri karakterlerinin elde edildiği görülmektedir.



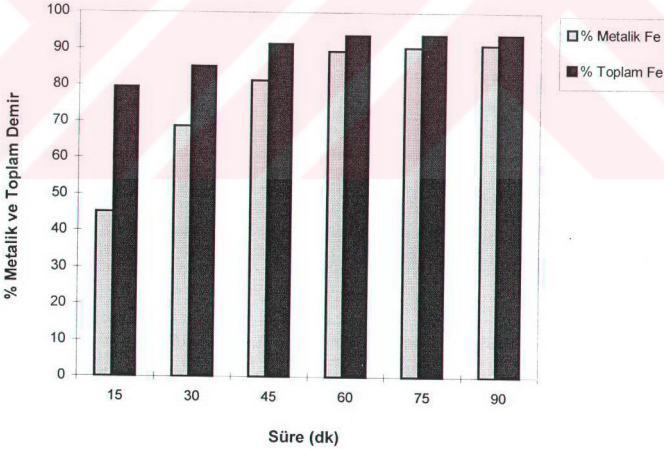
Şekil 10.1 Sabit sıcaklık ve 0,4 C_F/Fe oranında metalizasyonun süreye bağlı değişimi.



Şekil 10.2 Sabit sıcaklık ve 0,5 C_F/Fe oranında metalizasyonun süreye bağlı değişimi.



Şekil 10.3 1000°C ve 0,4 C_r/Fe oranında metalik demir ve toplam demirin süreye bağlı olarak değişimi.



Şekil 10.4 1000°C ve 0,5 C_r/Fe oranında metalik demir ve toplam demirin süreye bağlı olarak değişimi.

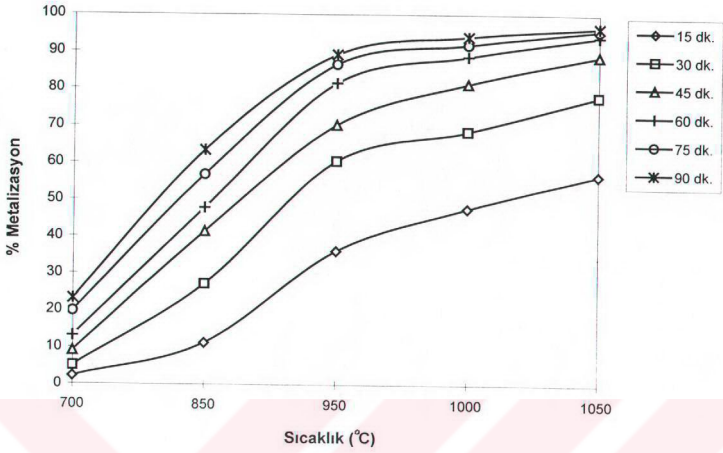
$C_r/Fe = 0,4$ için en yüksek metalizasyon, %96,48 ile 1050°C ve 90dk.'da, $C_r/Fe = 0,5$ için en yüksek metalizasyon ise %98,97 ile 1050°C ve 90dk.'da elde edilmiştir. Bu şartlarda elde edilen metalik demir ve toplam demir değerleri ise şu şekildedir: 0,4 C_r/Fe oranında %96,48 metalizasyon yüzdesinde; metalik demir %90,30 toplam demir %93,59 iken, 0,5 C_r/Fe oranında %98,97'lik metalizasyon yüzdesinde; metalik demir %93,84, toplam demir %94,81'dir.

10.1.2 Sıcaklığın etkisi

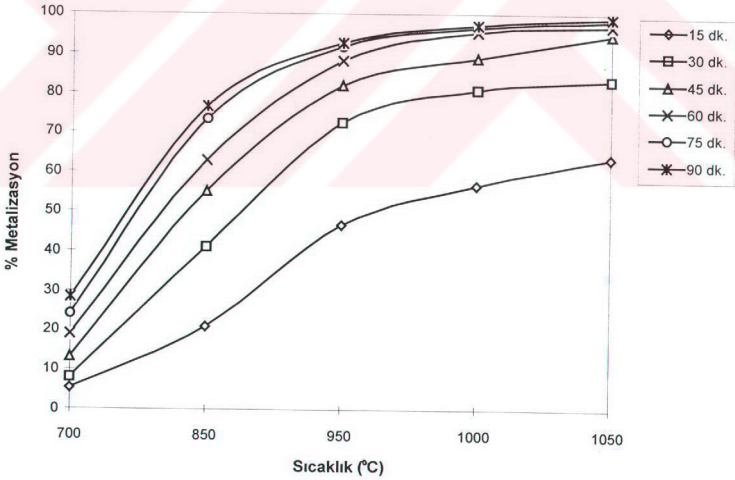
Sıcaklığın metalizasyon derecesine etkisi, sabit süre ve sabit C_r/Fe oranında çizilen grafiklerle Şekil 10.5 ve Şekil 10.6'da verilmektedir. Deney süresi ve C_r/Fe oranı sabit tutulduğunda, artan sıcaklıkla birlikte metalizasyon derecesinin de arttığı görülmektedir. Sıcaklığın etkisi her redüksiyon süresinde kendini göstermektedir. Grafiklerden belirlenen genel eğilime göre, sıcaklık 850°C'dan 950°C'a yükseldiği durumda metalizasyondaki artış, sıcaklık 1000°C'dan 1050°C'a yükseltildiği durumdan daha fazladır. Yani sıcaklık artışının metalizasyon derecesi üzerine etkisi, düşük redüksiyon sıcaklıklarında, yüksek redüksiyon sıcaklıklarından daha fazla olmaktadır.

Bu grafiklerden elde edilen bir başka önemli veri; sıcaklık 750°C'tan 850°C'a ve 850°C'tan 950°C'a yükseltildiğinde başlangıçta (ilk 15dk.'da) sıcaklığın etkisi daha az iken, redüksiyon sonuna doğru bu etki artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ise (1000°C ve 1050°C) bu durumun tersine olarak redüksiyon sonuna doğru sıcaklığın etkisi giderek azalmaktadır. 0,5 C_r/Fe oranıyla redüksiyon gerçekleştirildiğinde 950°C'ta da bu etki görülmektedir.

Şekil 10.5 ve 10.6'da sürenin etkisi daha net bir şekilde görülmektedir. 0,4 C_r/Fe oranı için 1000°C ve 1050°C deney sıcaklıklarında peletlerin 60dk., 75dk. ve 90dk. süre ile redüklenmeleri arasında büyük farklılıklar yoktur, metalizasyon dereceleri birbirine yakındır. Benzer bir durum 0,5 C_r/Fe oranı için 950°C, 1000°C ve 1050°C sıcaklıklarında, 60dk., 75dk. ve 90dk.'lık redüksiyon süreleri için de geçerlidir. Burada 1050°C'da 75dk. ve 90dk.'lık sürelerde elde edilen metalizasyon değerleri birbirine çok yakındır (%98,3 ve %98,97).



Şekil 10.5 Farklı redüksiyon süreleri için sıcaklığa bağlı olarak metalizasyonun değişimi ($C_Fe=0,4$ için).



Şekil 10.6 Farklı redüksiyon süreleri için sıcaklığa bağlı olarak metalizasyonun değişimi ($C_Fe=0,5$ için).

10.1.3 C_r / Fe oranının etkisi

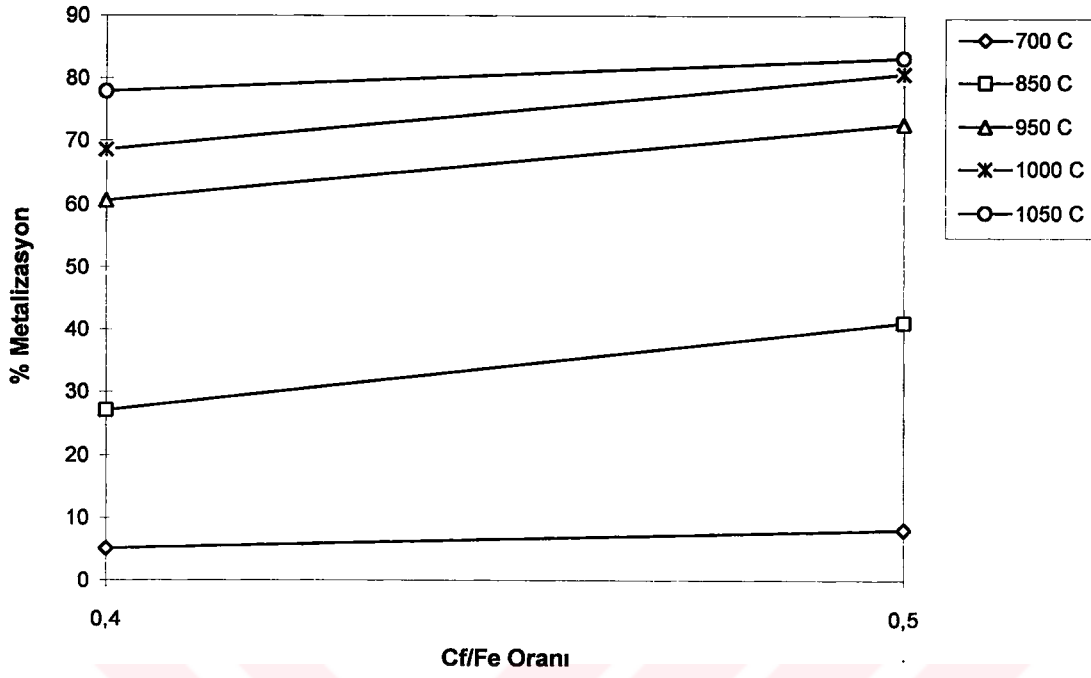
Deneylerde kullanılan C_r/Fe oranları, teorik C_r/Fe oranı ve daha önce yapılmış çalışmalarda (Coşkun, 1981; İmer, 1984; Narçın, 1990; Yıldırım ve Sevinç, 1990) elde edilen optimum değerler göz önüne alınarak belirlenmiştir.

Bu duruma göre, seçilen 0,4 ve 0,5 C_r/Fe oranları kullanılarak yapılan deneylerden alınan sonuçlara göre sabit bir süre için (30dk. ve 60dk.) çizilen Şekil 10.7 ve 10.8'deki grafiklerde, 0,5 C_r/Fe oranı için her sıcaklık kademesinde metalizasyon yüzdesinin 0,4 C_r/Fe oranına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Redüksiyon için kullanılan kömür miktarının artırılması olumlu bir etki yapmış ve her deney sıcaklığında metalizasyon derecesini yükseltmiştir. C_r/Fe oranı ve dolayısıyla kömür miktarının artırılmasının getirdiği bu olumlu etki 850°C ve 950°C'da daha fazla görülmektedir. 1000°C ve 1050°C'da C_r/Fe oranını arttırmak suretiyle elde edilen metalizasyon artışı 850°C ve 950°C'da elde edilenden daha azdır.

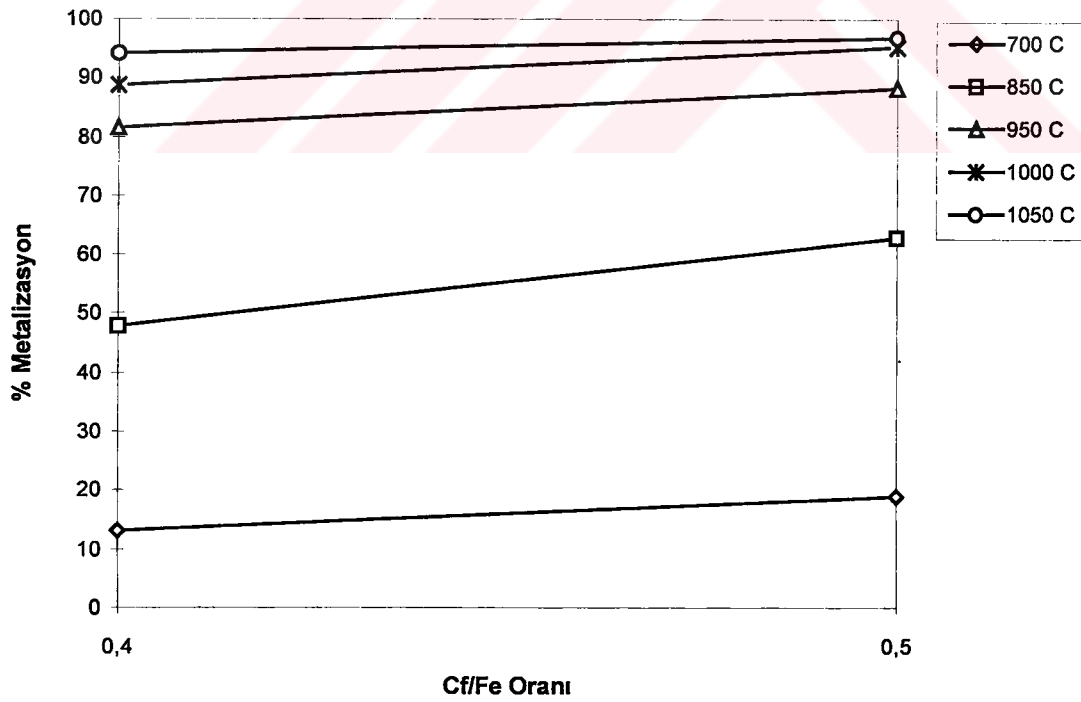
Ayrıca Şekil 10.7 ve 10.8 ile birlikte Şekil 10.1 ve 10.2 de dikkate alınarak C_r/Fe oranının etkisi incelendiğinde şu tespitler de yapılabilir: 0,4 C_r/Fe oranı kullanıldığında metalizasyon derecesinin süreye bağlı olarak artışı, 0,5 C_r/Fe oranına göre daha yavaş olmakta ve metalizasyon derecesindeki artışın yavaşlaması daha uzun sürmektedir. 1000°C'lık redüksiyon sıcaklığı gözönüne alındığında, 0,4 C_r/Fe oranı için 90. dakikada redüksiyon henüz bitmişken, 0,5 C_r/Fe oranında 60. dakikada redüksiyon hemen hemen sona ermiş durumdadır.

10.1.4 Basma dayanımının değişimi

Farklı sıcaklık ve farklı süreler kullanılarak yapılan redüksiyon deneylerinden elde edilen sünger demir numunelerinin basma dayanımlarının incelenmesi sonucu, metalizasyon derecesi ile basma dayanımı arasında ve sıcaklık, süre ve C_r/Fe oranı ile basma dayanımı arasında çok belirgin bir ilişki bulunamamıştır. Ancak kabaca şunlar ifade edilebilir: Her sıcaklık kademesinde deney süresinin artması basma mukavemetini arttırmıştır.



Şekil 10.7 Sabit redüksiyon süresinde (30dk.), farklı sıcaklıklar için C_f/Fe oranının metalizasyon üzerine etkisi.



Şekil 10.8 Sabit redüksiyon süresinde (60dk.), farklı sıcaklıklar için C_f/Fe oranının metalizasyon üzerine etkisi.

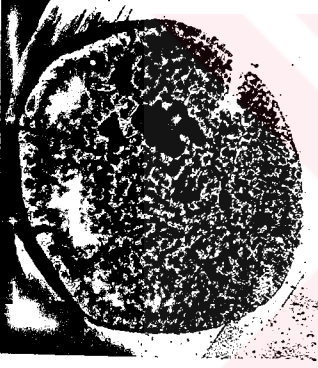
Özellikle bu durum 1050°C'ta daha fazla kendini belli etmektedir. Basma dayanımı değeri 18-65 kg./pelet aralığında değişmektedir. En yüksek basma dayanımı değeri (65 kg./pelet) 1050°C'de, 90dk.'lık deney süresinde ve C₇/Fe oranı 0,5 olduğu durumda elde edilmiştir.

10.1.5 Metalografik inceleme

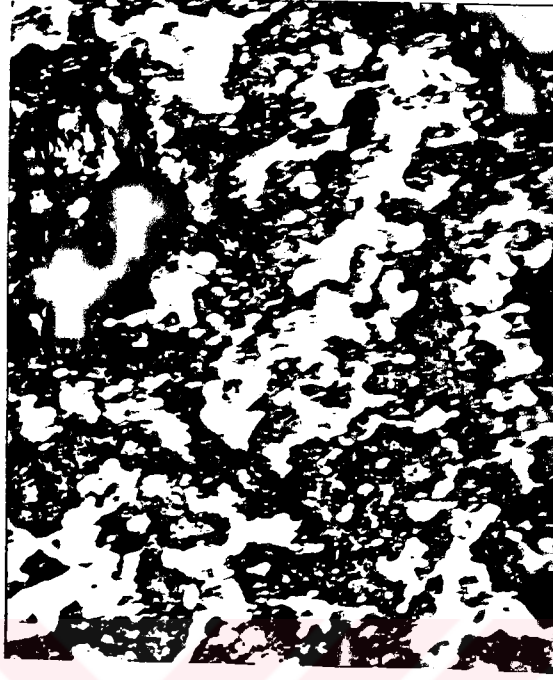
Redüksiyon sırasında pelet numunelerinde meydana gelen yapısal değişimi tesbit etmek amacıyla farklı süre ve sıcaklıklarda redüklenen numunelerin makro ve mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

Şekil 10.9 ve Şekil 10.13 arasında görülen fotoğraflarda peletlerin dış kısmından içe doğru makroyapı ve mikroyapı değişimlerini izlemek mümkündür. Bu şekillerden görüleceği üzere, artan sıcaklık ve süre ile dolayısıyla artan metalizasyon derecesi ile redüklenen ve redüklenmeyen bölgeler arasındaki sınır tabakası iç kısma doğru ilerlemekte ve yüksek sıcaklıkta bu sınır tabakası kaybolarak, yapı büyük oranda metalik demir içermektedir. Makro fotoğraflardan anlaşıldığına göre, redüklenen ve redüklenmeyen kısımları ayıran arayüzey çok belirgin değildir. Bu da çok fazla iç indirgeme olduğunun bir göstergesidir. Türkdogan'a (1980) göre, bu durum CO ile redüklenmenin doğal bir sonucudur. H₂ ile redüksiyonda daha keskin arayüzey sınırları elde edilmektedir.

Redüksiyon süresinin ve sıcaklığının artmasına bağlı olarak metalik demirden oluşan kabuk kısmın kalınlığı giderek artmaktadır. Redüksiyonun sıcaklık ve süreye bağlı olarak böyle bir seyir izlemesi, redüklenmenin topokimyasal prosesle ilerlediğini göstermektedir.



a) Merkezdeki mikroyapı görüntüsü (200X).

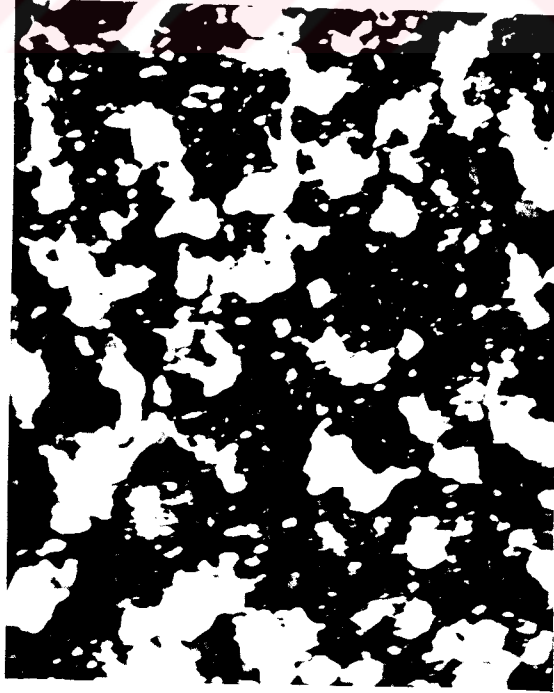
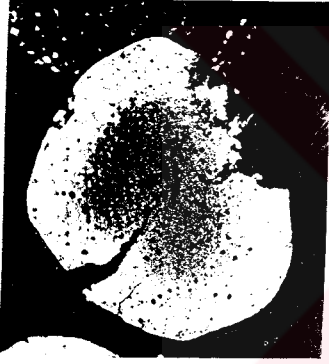


b) Kenar bölgedeki mikroyapı görüntüsü (200X).

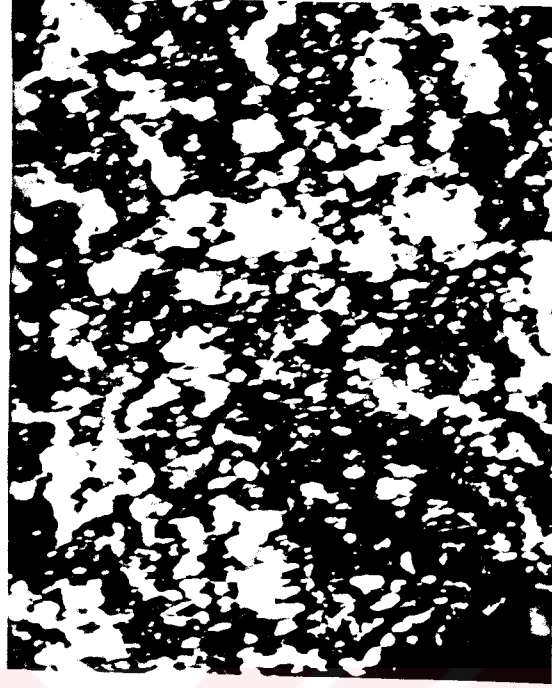
Şekil 10.9 Redüklenmiş pelet numunelerinin makro ve mikroyapı görüntüleri.

Deney şartları : 850°C, 30dk., 0,4 C_T/Fe, Metalizasyon : % 27,17.

Mikroyapıda; Beyaz : Metalik demir, Gri : Manyetit-Wüstit, Açık gri : Wüstit, Siyah : Curuf ve gözenek.



a) Merkezdeki mikroyapı görüntüsü (200X).

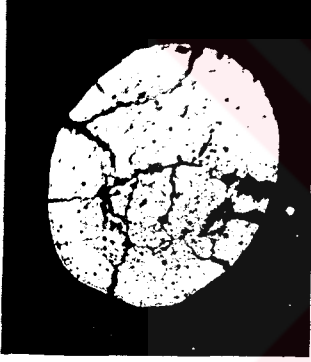


b) Kenar bölgedeki mikroyapı görüntüsü (200X).

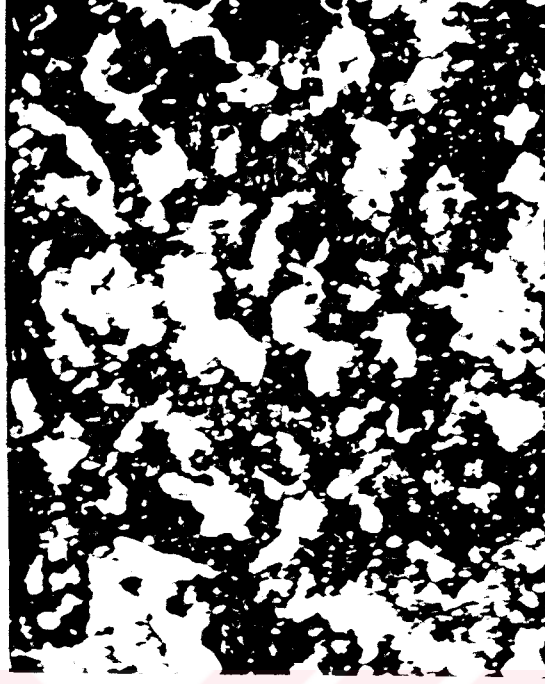
Şekil 10.10 Redüklenmiş pelet numunelerinin makro ve mikroyapı görüntüleri.

Deney şartları : 950°C, 30dk., 0,5 C/Fe, Metalizasyon : % 72,54.

Mikroyapıda; Beyaz : Metalik demir, Gri : Manyetit-Wüstit, Açık gri : Wüstit, Siyah : Curuf ve gözenek.



a) Merkezdeki mikroyapı görüntüsü (200X).

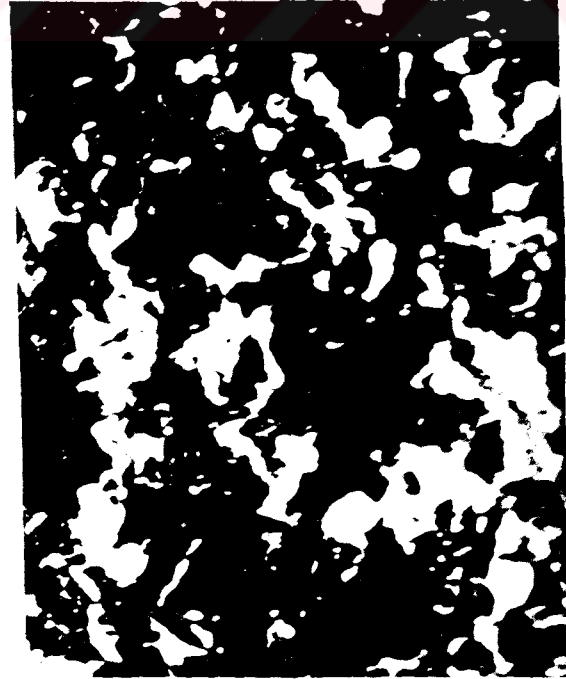


b) Kenar bölgedeki mikroyapı görüntüsü (200X).

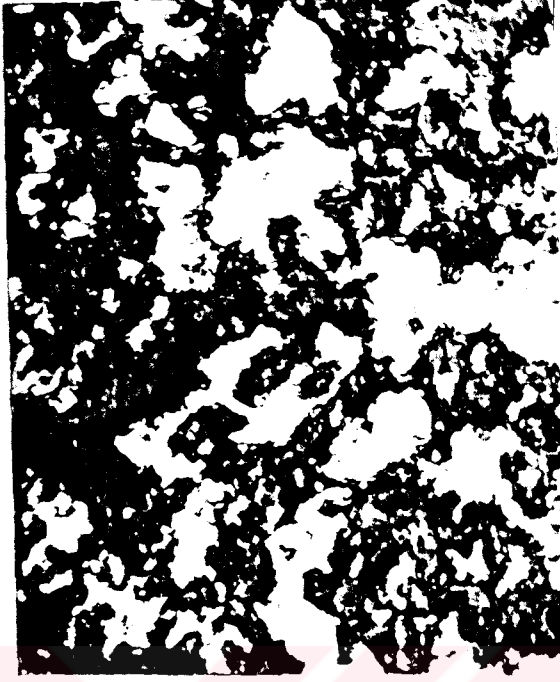
Şekil 10.11 Redüklenmiş pelet numunelerinin makro ve mikroyapı görüntüleri.

Deney şartları : 950°C, 60dk., 0,5 C₇/Fe, Metalizasyon : % 88,18.

Mikroyapıda; Beyaz : Metalik demir, Gri : Manyetit-Wüstit, Açık gri : Wüstit, Siyah : Curuf ve gözenek.



a) Merkezdeki mikroyapı görüntüsü (200X).

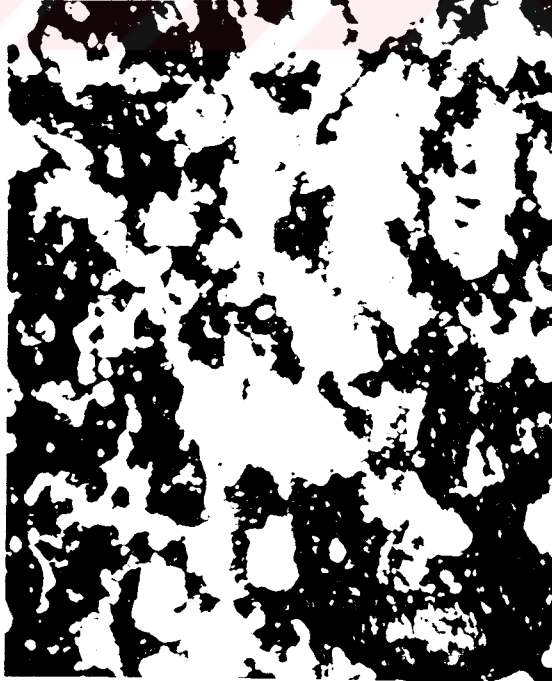
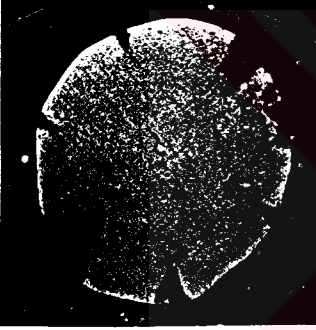


b) Kenar bölgedeki mikroyapı görüntüsü (200X).

Şekil 10.12 Redüklenmiş pelet numunelerinin makro ve mikroyapı görüntüleri.

Deney şartları : 1000°C, 60dk., 0,5 C/Fe, Metalizasyon : % 95,32.

Mikroyapıda; Beyaz : Metalik demir, Gri : Manyetit-Wüstite, Açık gri : Wüstite, Siyah : Curuf ve gözenek.



a) Merkezdeki mikroyapı görüntüsü (200X).



b) Kenar bölgedeki mikroyapı görüntüsü (200X).

Şekil 10.13 Redüklenmiş pelet numunelerinin makro ve mikroyapı görüntüleri.

Deney şartları : 1050°C, 60dk., 0,5 C_r/Fe, Metalizasyon : % 96,93.

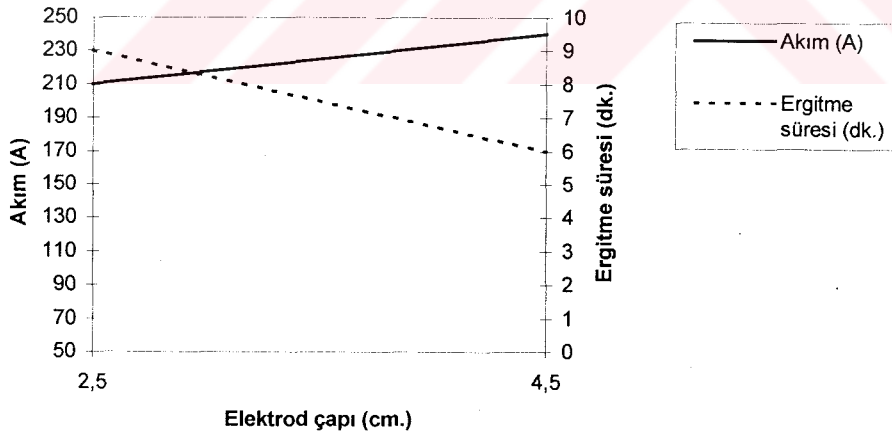
Mikroyapıda; Beyaz : Metalik demir, Gri : Manyetit-Wüstit, Açık gri : Wüstit, Siyah : Curuf ve gözenek.

10.2 DC-E.A.F. ile Çelik Üretimi Deney Sonuçları

10.2.1 Optimum ergitme parametrelerinin tespiti

Güç ünitesi olarak doğru akımlı kaynak makinasının, pota olarak ise grafitin kullanıldığı laboratuvar tipi DC-E.A.F.'da çelik üretimi deneylerine, optimum gerilim ve akım değerlerini tesbit etmek amacıyla hurda kullanılarak başlanmıştır. Deneylerde iki farklı çapta pota ve elektrod kullanılması sonucunda, akım değerlerinin elektrod çapına bağlı değişimi bulunmuş ve Şekil 10.14'teki grafikte gösterilmiştir.

Bu şekilden de görüldüğü üzere, artan elektrod çapı ile birlikte çekilen akım değeri de artmış, buna bağlı olarak ta ergitme süresi azalmıştır. Bu olumlu etki nedeniyle ergitme deneylerinde 4,5 cm. çaplı elektrod kullanımı tercih edilmiştir. Pota çapının değiştirilmesinin etkisi sadece yüklenen malzeme miktarında ve buna bağlı olarak ergitme süresinde görülmüştür. Döner fırından elde edilen sünger demir miktarıyla uyumlu olması açısından, 11 cm. iç çapa sahip pota kullanımı uygun bulunmuştur.



Şekil 10.14 Elektrod çapının akım ve ergitme süresine etkileri.

Ergitme deneylerinde uygulanacak en uygun gerilim ve akım değerlerinin tespiti amacıyla karışık etli hurda kullanılarak ve cihazın gerilim ayar kademeleri dikkate alınarak yapılan deneyler sonucunda Çizelge 10.2'deki gerilim-akım değerleri ve gözlem sonuçları elde

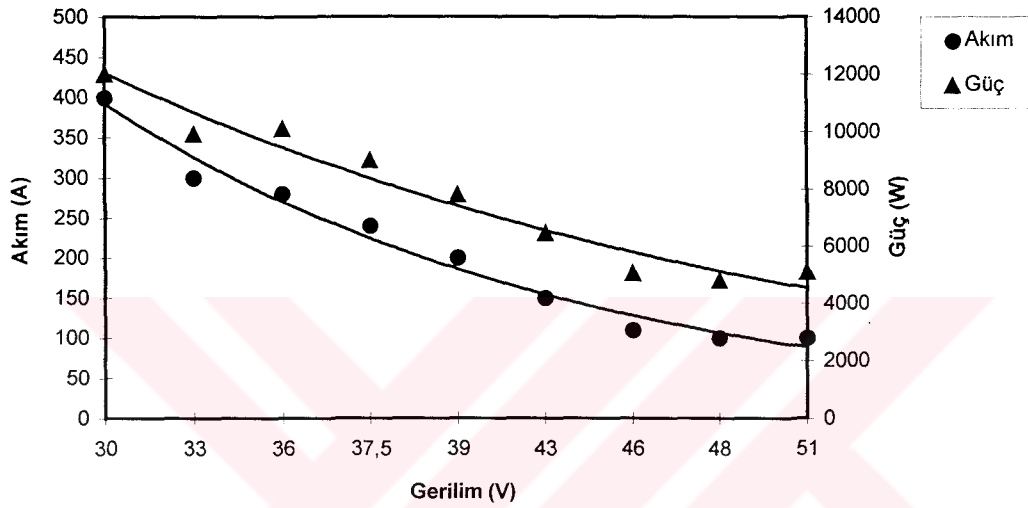
edilmiştir. Çizelge 10.2'deki verilere ve gözlem sonuçlarına ve çizilen gerilim-akım-güç grafiğine göre (Şekil 10.15); cihazın gerilim kademe ayarı yardımı ile gerilim arttırıldıkça çekilen akım miktarında düşüş olduğu, buna karşılık ark oluşumunun kolaylaştığı anlaşılmaktadır. Bunların yanında, gerilimin artmasıyla birlikte ark boyu uzamakta ve ark sürekliliği sağlanmaktadır. Düşük gerilim değerlerinde (30V'a kadar) ark oluşumu görülmemesine ya da çok zayıf ark oluşmasına karşılık, belli bir değerden sonra (>46V) ark oluşumu patlamalar nedeniyle zorlaşmaktadır.

Çizelge 10.2 DC-E.A.F.'da ergitme sırasında gerilim ve akımın değişimi ile arkın durumu.

Kademe	Boşta Gerilim (V)	Çalışma Sırasında		Ark Durumu
		Gerilim (V)	Akım (A)	
2.1	25	23	-	Ark oluşumu yok
2.3	27	24	-	Ark oluşumu yok
2.6	29	26	-	Süreksiz ve çok zayıf ark
2.8	31,5	27	-	Süreksiz ve çok zayıf ark
3.1	34,5	30	400	Süreksiz ve zayıf ark
3.2	36	33	300	Kısa süreli ve kısa boylu ark
3.3	37,5	36	280	Sürekli ve kısa boylu ark
3.4	40,5	37,5	240	Sürekli ark ve ark boyu normal
3.5	43,5	39	200	Sürekli ark ve ark boyu normal
3.6	46	43	150	Sürekli ark ve ark boyu uzun
3.7	49	46	110	Sürekli ark ve ark boyu uzun. Ark oluşumunda ve kısa devrelerde patlamalar.
3.8	51	48	100	Sürekli ark ve ark boyu uzun. Ark oluşumunda ve kısa devrelerde güçlü patlamalar.
3.9	54	51	100	Sürekli ark ve ark boyu uzun. Ark oluşumunda ve kısa devrelerde güçlü patlamalar.

Elde edilen gerilim-akım değerlerine göre çizilen grafikte (Şekil 10.15), gerilim ve akımın ters orantılı olarak değişimi, ayrıca gerilimin artmasıyla birlikte güçte meydana gelen düşüşte görülmektedir.

Bu sonuçlar ve deney sırasındaki gözlemlerden hareketle, verimli bir ergitme için en uygun gerilim ve akım değerleri aralıkları, cihazın 3.3-3.6 kademeleri arasında elde edilen 36-42V'a karşılık 280-150A arasındaki değerlerdir. Bu aralıklar içinde en iyi sonuç veren değerler ise; cihazın 3.4 kademesinde elde edilen 37,5V ve 240A'lık ölçülerdir. Bu kademedede elde edilen gerilim ve akım değerleriyle yapılan ergitmede ark oluşumu kolay olmakta ve ark kararlılığı sağlanmaktadır. Ark boyu da ergitme için yeterlidir.



Şekil 10.15 Ergitmede gerilim-akım-güç arasındaki ilişki (elektrod çapı = 4,5 cm.).

Optimum gerilim ve akım değerlerini belirlemek için yapılan bu deneylerden sonra, çeşitli ergitme parametreleri %100 hurda ve %100 sünger demir kullanılarak tespit edilmiştir. Ergitme deneylerinde daha sonra Bölüm 11.1.5'te açıklanan nedenlerle %95,32'lik metalizasyon derecesine sahip, 1000°C'ta, 60dk.'da, 0,5 C_r/Fe oranı kullanılarak yapılan redüksiyon sonucu elde edilen ürün sünger demir kullanılmıştır. Herhangi bir katkı malzemesi ilave edilmeksizin yapılan ergitme deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 10.3'te görülmektedir.

Çizelge 10.4'e göre, çelik üretiminde aynı miktar hurda ve sünger demir ergitilmesinde, sünger demir kullanımında harcanan güç fazla olmasına rağmen ergitme süresindeki düşüş, daha az enerji tüketimi sonucunu vermektedir.

Çizelge 10.3 %100 hurda ve %100 sünger demir kullanılarak yapılan ergitmelerde parametrelerin değişimi.

Parametreler	%100 Hurda	%100 Sünger Demir
<i>Miktar</i>	750 gr.	750 gr.
<i>Harcanan güç</i>	12,6 kW	15 kW
<i>Ergitme süresi</i>	5 dk.	4,5 dk.
<i>Harcanan enerji</i>	0,415 kWh	0,3375 kWh
<i>Gaz çıkışı</i>	Az	Çok Fazla
<i>Köpüklü curuf</i>	Yok	Var
<i>Curuf miktarı</i>	Çok az	Fazla
<i>Ark kesintisi</i>	5 defa	2 defa
<i>Ark gürültüsü</i>	Fazla	Az

Sünger demir ile yapılan ergitmede curuf miktarı fazla olmasına rağmen elde edilen köpüklü curufun Bölüm 8.3.1.'de belirtilen faydalarının birçoğu görülmüştür. Bunun en açık şekilde görüleni, arkın köpüklü curuf içine gömülmesiyle ark ısısının muhafaza edilmesidir. Ayrıca ergitmede sünger demir kullanılması sonucu ark kesintisi ve ark gürültüsü de çok azalmaktadır.

Bunların yanında ergitme sırasında arkın sadece tabandan değil zaman zaman pota kenarlarından da oluştuğu görülmüştür. Ayrıca hurda ergitmesinde ark, pota içinde katı hurdayı tercih edecek tarzda dolaşmaktadır.

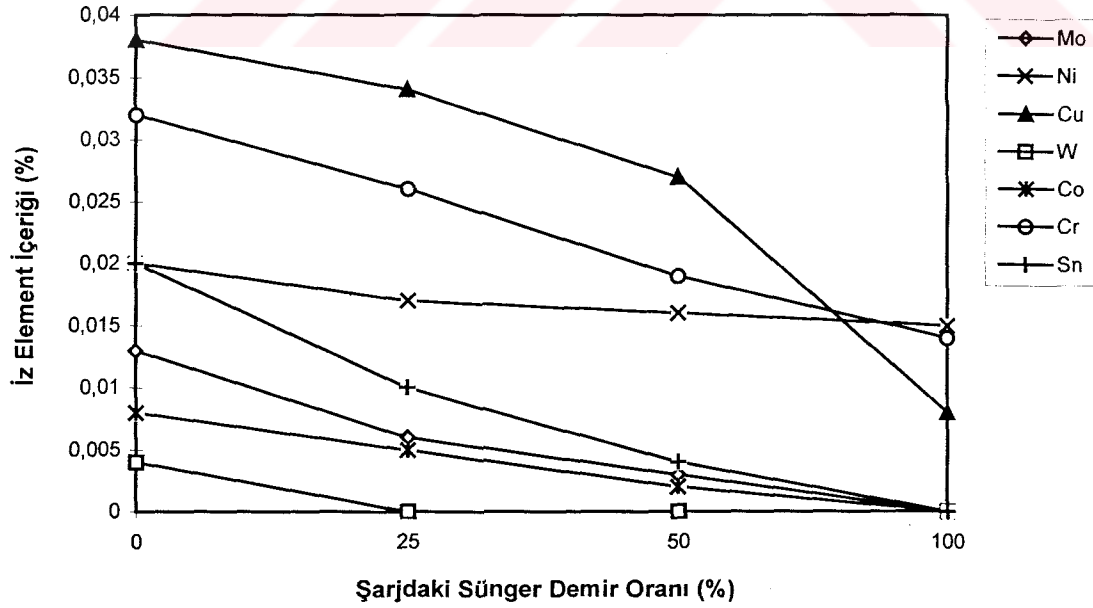
10.2.2 Sünger demir kullanımının çelik kalitesine etkisi

DC-E.A.F.'da sünger demir kullanımının çeliğin kimyasal özelliklerini ne şekilde etkilediğini ortaya koymak amacıyla farklı oranlarda hurda/sünger demir şarjları kullanılarak ergitme deneyleri yapılmıştır. Üretilen çeliğin kimyasal analizi sonucu elde edilen element yüzdelere göre, çelik üretiminde sünger demir kullanım oranının artması özellikle istenmeyen elementler açısından büyük yararlar sağlamaktadır. Cu, Sn, Co, Ni, Mo, Cr, W gibi elementler, şarj içindeki sünger demir kullanım oranının artmasıyla birlikte

üretileen çelikte az ya da çok düşüşler göstermişlerdir. Bu deneylerde elde edilen sonuçlar Çizelge 10.4 ve Şekil 10.16'da verilmektedir.

Çizelge 10.4 Farklı oranlarda sünger demir kullanılarak yapılan ergitme sonunda çelik bileşiminin değişimi.

Kimyasal Bileşim	%100 Hurda ergitilmesinde	%75 Hurda + %25 Sünger Demir ergitilmesinde	%50 Hurda + %50 Sünger Demir ergitilmesinde	%100 Sünger Demir ergitilmesinde
<i>Fe</i>	97,21	98,33	98,85	99,62
<i>Si</i>	0,957	0,271	0,106	0,046
<i>Mn</i>	0,451	0,239	0,150	0,048
<i>P</i>	0,012	0,0	0,0	0,0
<i>S</i>	0,002	0,008	0,017	0,006
<i>Cr</i>	0,032	0,026	0,019	0,014
<i>Mo</i>	0,013	0,006	0,003	0,0
<i>Ni</i>	0,02	0,017	0,016	0,015
<i>Cu</i>	0,038	0,034	0,027	0,008
<i>W</i>	0,004	0,0	0,0	0,0
<i>Al</i>	0,0	0,0	0,035	0,086
<i>Co</i>	0,008	0,005	0,002	0,0
<i>Sn</i>	0,02	0,01	0,004	0,0



Şekil 10.16 Şarjdaki sünger demir oranına bağılı olarak ergimiş metaldeki iz elementlerin yüzdelereinin değişimi.

Örneğin Cu metali %100 hurda kullanımında ergimiş metal içinde %0,038 oranında bulunurken, %25 sünger demir ilavesinde bu oran %0,034'e, %50 sünger demir ilavesinde %0,027'ye düşmektedir. Aynı şekilde sünger demir kullanımının artmasıyla diğer iz elementlerinde de düşüşler görülmektedir. Bunların yanında sünger demir kullanım oranı %25'ten %50'ye çıkarıldığında ergimiş metal içinde bulunan S miktarı artmaktadır.

Çizelge 10.4 ve Şekil 10.16'da verilen hurda/sünger demir oranları değiştirilerek üretimi yapılan çeliğin bileşiminin yanında, bu üretim sırasında elde edilen curuf fazlarının bileşimleri de tespit edilmiş ve sonuçlar Çizelge 10.5 ve Şekil 10.17'de gösterilmiştir.

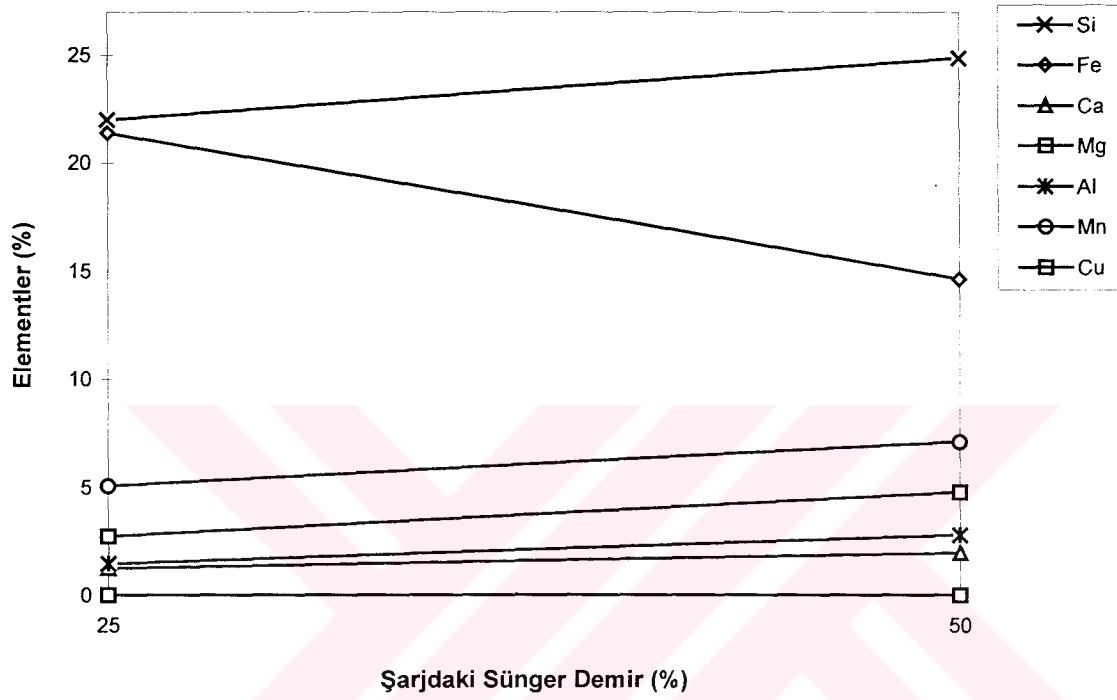
Çizelge 10.5 Sünger demirin element içeriği ve farklı oranlarda hurda/sünger demir şarjlarının ergitilmesi sonucu oluşan curufların kimyasal bileşimleri.

	Sünger Demirdeki Elementler (%)	%75 Hurda + %25 S.D. ergitilmesiyle oluşan curufun bileşimi (%)	%50 Hurda + %50 S.D. ergitilmesiyle oluşan curufun bileşimi (%)
<i>Si</i>	1,078	22,0	24,87
<i>Fe</i>	4,38*	21,40	14,65
<i>Ca</i>	0,016	1,278	1,99
<i>Mg</i>	0,66	2,736	4,782
<i>Al</i>	0,47	1,48	2,8
<i>Mn</i>	0,056	5,08	7,12
<i>Cu</i>	0,028	0,037	0,036
<i>S</i>	0,0171	0,0037	0,0003

* Artık FeO'teki Fe ya da (Toplam Fe - Metalik Fe)

Çizelge 10.5'e göre, sünger demirde metalik demir dışındaki bileşikler içinde en yüksek yüzdeye sahip olanları SiO₂ ve artık FeO olarak ortaya çıkmıştır. Diğer bileşiklerin oranları nispeten daha düşüktür. SiO₂'in ve FeO'in yüksek oranları ergitme sonrası elde edilen metal ve curuf analizlerine şu şekilde yansımaktadır: Sünger demirde bulunan SiO₂ ve FeO büyük oranda curuf fazına geçmişler ve asidik asidik yapıda bir curuf oluşmasına sebep olmuşlardır. Şarj içine sünger demir ilavesinin arttırılması, ergitme sonucu elde edilen

curuf içinde SiO_2 oranının artmasına, buna karşılık FeO oranının düşmesine neden olmuştur. Diğer bileşenlerden Ca, Mg, Al ve Mn, SiO_2 'e paralel olarak artmış, Cu da ise çok fazla bir değişiklik olmamıştır. Bunların yanında şarj içinde sünger demir yüzdesinin artmasıyla birlikte curufta bulunan S miktarında çok fazla düşüş görülmüştür.



Şekil 10.17 Şarja ilave edilen sünger demir oranına bağlı olarak elde edilen curufta element yüzdelерinin değişimi.

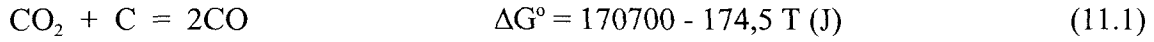
Curufta bulunan elementlerin, şarja ilave edilen sünger demir oranına bağlı olarak değişiminin grafiksel ifadesi Şekil 10.17'de verilmiştir. Bu grafiklerde elementlerin değişim oranları daha açık olarak görülmektedir.

11. TARTIŞMA

11.1 Direkt Redüksiyon Deney Sonuçlarının Tartışılması

11.1.1 Sıcaklığın etkisi

Bölüm 10.1.2’de belirtildiği ve Şekil 10.5 ve 10.6’da görüldüğü üzere, sıcaklığın artması metalizasyon derecesini arttırmıştır. Sıcaklık artışının getirdiği bu olumlu etki büyük oranda kömürün karboksireaktivitesi de denilen Boudouard reaksiyonunun sıcaklıkla değişiminden kaynaklanmaktadır.



reaksiyonunun sıcaklığa göre değişiminden Boudouard’ın tespit ettiği sonuçlara göre; sıcaklık ne kadar yüksek olursa (11.1) denkleminde göre oluşumu endotermik olan CO, o kadar fazla oranda meydana gelir. Ayrıca sıcaklık ve basınç ne kadar yüksek ise denge durumuna o kadar çabuk ulaşılır, yani dengeye ulaştıran reaksiyonların hızları sıcaklık ve basınç ile artmaktadır (Civaoglu, 1963). Boudouard dengesini gösteren Şekil 3.4’de de bu durum görülmektedir.

Bu bilgiler ışığında, sıcaklığın artması, oluşan CO miktarını arttırmakta, fırın atmosferi CO’ce zenginleşmekte, bu ise demir oksitlerin daha fazla redüksiyonunu sağlamaktadır.

Ayrıca sıcaklığın artmasıyla redüksiyon reaksiyonları da hızlanmaktadır. Daha yüksek sıcaklık daha fazla gaz hareketliliğine yol açarak katı ve gazın temasını arttıracak, katı içinde gaz difüzyonunun daha hızlı olmasına yol açacaktır.

Arrhenius’un çarpışma teorisine göre, sistemde bulunan aktif moleküller reaksiyonu gerçekleştirebilmek için gerekli minimum aktivasyon enerjisine sahip moleküllerdir ve sıcaklık arttıkça bu moleküllerin sayısı da artmaktadır. Bu sayede redüksiyon derecesi de yükselmektedir (Mackowiak, 1966).

Bu durumu en iyi yansıtan gösterge, sünger demirin C miktarının sıcaklığa bağlı değişimidir. Bu amaçla yapılan analiz sonuçları Çizelge 11.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 11.1 Sünger demirin C ve S yüzdelерinin sıcaklık ve süreye bağlı değişimi.

<i>Deney no.</i>	<i>Sıcaklık (°C)</i>	<i>Süre (dk.)</i>	<i>C/Fe</i>	<i>% C</i>	<i>% S</i>
1	950	60	0,5	0,210	0,0145
2	1000	60	0,5	0,248	0,0171
3	1000	90	0,5	0,371	0,0210

Çizelge 11.1’de görüldüğü üzere sıcaklık ve sürenin artmasıyla birlikte sünger demirin C içeriği de artmaktadır. Bu da yukarıda belirtilen açıklamayı doğrulamaktadır.

11.1.2 Sürenin etkisi

Boudouard reaksiyonunun gelişimi sıcaklığın yanında temas süresine de bağlıdır (Rosenqvist, 1983). Katı C ve CO₂’in temas süresi arttıkça oluşan CO miktarı da artacaktır. Bu nedenle sürenin uzaması, CO miktarını dolayısıyla demir oksitlerin CO ile redüksiyonunu arttıracak bu da Şekil 10.1 ve 10.2’de ortaya çıkan durum gibi, metalizasyon derecesinin yükselmesine sebep olacaktır.

Redüksiyon işleminde reaksiyon hızının difüzyonla kontrol edildiği kademelerde, difüzyonun istenilen seviyelerde yürüyebilmesi için süreye ihtiyaç vardır. Reaksiyon süresinin uzaması daha fazla difüzyona imkan tanır ve sonuçta redüksiyonu arttıran bir etki ortaya çıkarır.

Redüksiyon süresinin metalizasyon yüzdesi ile değişimi reaksiyonun sona erdiği süreyi göstermesi açısından da önemlidir. Şekil 10.1 ve 10.2’ye göre 0,4 C_f/Fe oranında 1000°C’da 90dk.’da ve 1050°C’da 60dk.’da, 0,5 C_f/Fe oranında ise 1000 ve 1050°C’da 60dk.’da redüksiyonun hemen hemen bittiği söylenebilir.

11.1.3 C_r/Fe Oranının etkisi

Redüksiyon işlemi için gereken teorik C miktarı hesaplanırken genellikle (11.2)'de ifade edilen toplam reaksiyon göz önüne alınır.

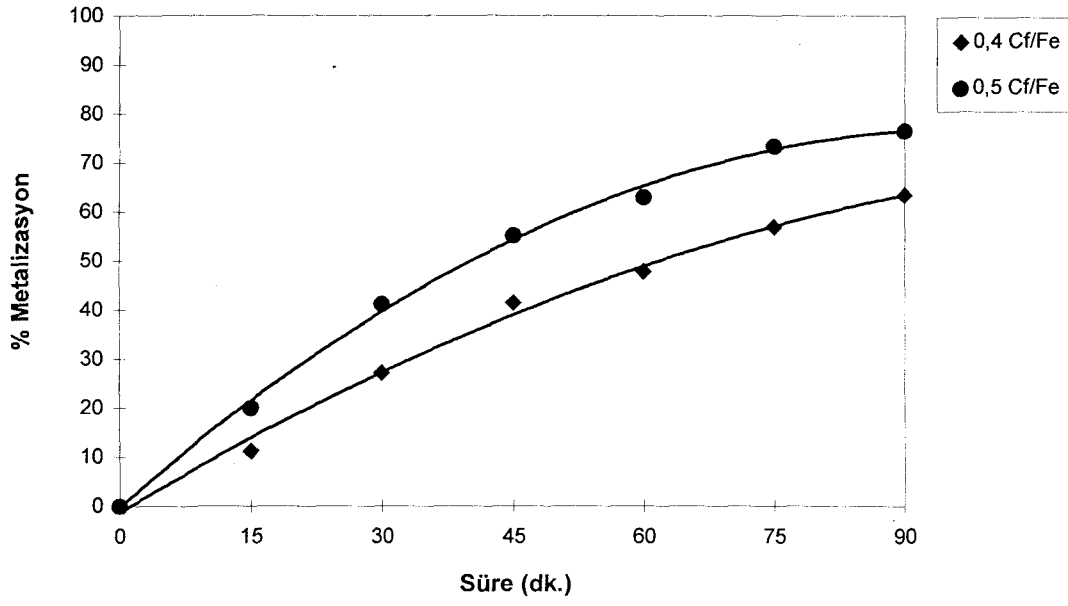


Bu reaksiyona göre, Fe₂O₃'ün redüklenebilmesi için gerekli C/Fe oranı 0,32'dir. Uygulamalarda redükleyici atmosferin en iyi şekilde sağlanması ve korunması ve oluşabilecek kayıpların karşılanması amacıyla gereken teorik miktardan daha fazla kömür kullanılır.

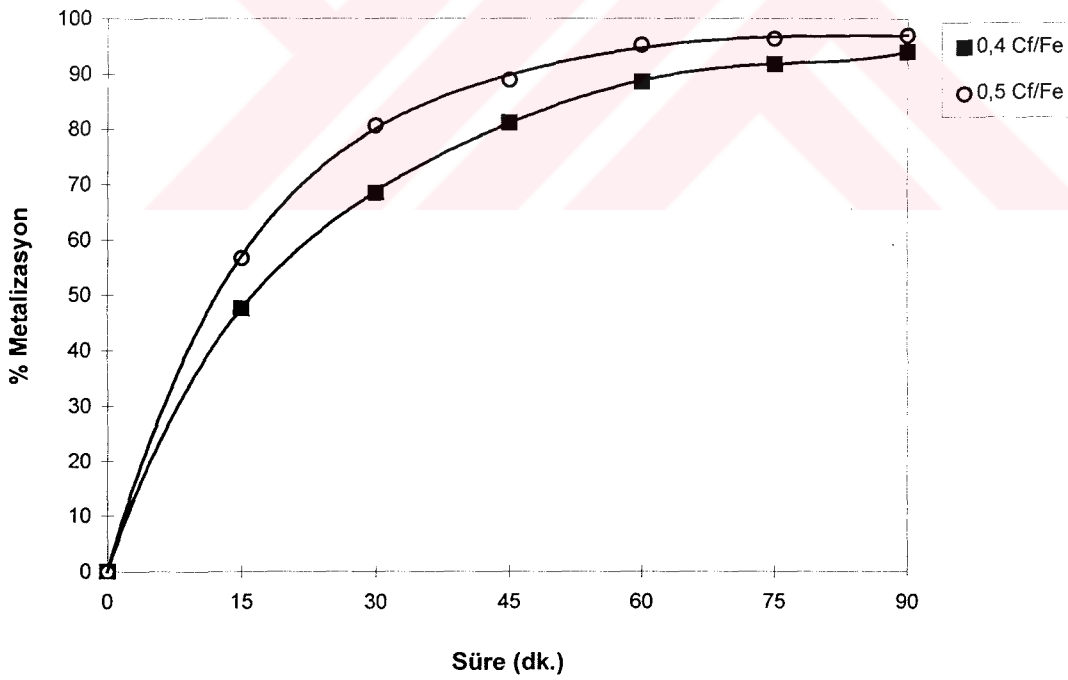
Redüksiyon deneylerinde kullanılan C_r/Fe oranının teorik miktardan fazla kullanılması reaksiyonları hızlandırdığı gibi metalizasyonunda yüksek oranlarda gerçekleşmesini sağlamıştır. Çünkü C_r/Fe oranının arttırılması, hem C'nun oksitlenmesiyle hem de Boudouard reaksiyonu ile oluşan CO'nin miktarında artışa sebep olmaktadır. Bunun sonucunda da redüksiyon yüzdesi artmaktadır. Ancak kömürün çok fazla kullanılması, üretilen sünger demirdeki C miktarını arzu edilen değerin üzerine çıkaracağından, belirlenecek optimum miktarlarda çalışılması gerekir.

Şekil 11.1'e göre 850°C'da C_r/Fe oranının arttırılması metalizasyon derecesini yükseltmiş ve bu etki deney süresinin uzamasıyla daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 11.2'de 1000°C'ta C_r/Fe oranının arttırılmasının metalizasyona etkisi görülmektedir. Bu görülen etki 850°C'ta görülen kadar kuvvetli değildir.

Bu şekillerden anlaşıldığına göre, nispeten düşük sıcaklıklarda C_r/Fe oranının metalizasyon derecesine etkisi yüksek sıcaklıklardan daha fazla olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda metalizasyonu etkileyen sıcaklık parametresi, C_r/Fe oranından daha fazla etkili olmaktadır. Bunun sonucunda düşük sıcaklıklarda C_r/Fe oranının arttırılması metalizasyonu daha fazla etkilerken yüksek sıcaklıklarda bu etki çok fazla görülmemektedir.



Şekil 11.1 850°C redüksiyon sıcaklığında C_f/Fe oranının süreye bağlı olarak metalizasyon yüzdesine etkisi.



Şekil 11.2 1000°C redüksiyon sıcaklığında C_f/Fe oranının süreye bağlı olarak metalizasyon yüzdesine etkisi.

11.1.4 Redüksiyon kinetiği ve aktivasyon enerjisinin hesaplanması

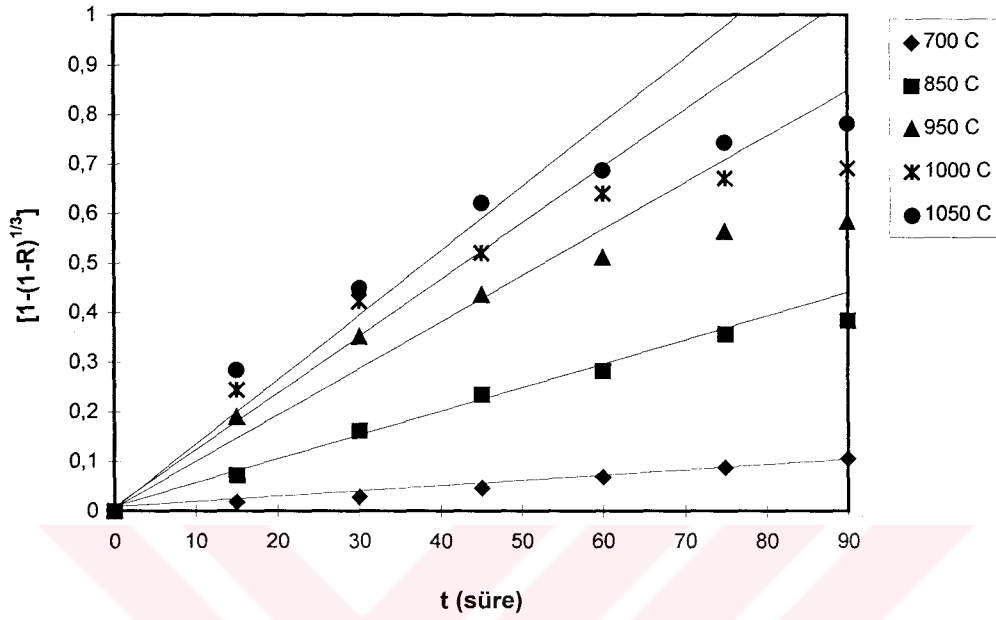
Redüksiyon işleminin kinetik yönünün incelenmesi amacıyla, Bölüm 10.1.1’de verilen Şekil 10.2’den hareketle (0,5 C_r/Fe oranı kullanılan deneyler için) yapılan hesaplamalar sonucu çizilen kinetik eğrileri Şekil 11.3 ve Şekil 11.4’te görülmektedir. Bu şekillerin çiziminde $[1 - (1 - R)^{1/3}] = k.t$ (kimyasal kontrollü reaksiyon için hız eşitliği) bağıntısından yararlanılmıştır. Şekil 10.2’deki verilere göre, önce $[1 - (1 - R)^{1/3}] - t$ arasındaki ilişkiyi gösteren noktalar elde edilmiş ve bu noktalardan doğrular geçirilmiştir (Şekil 11.3). Daha sonra bu doğruların eğimlerinden hareketle hız sabitinin $1/T$ ’ye bağlı değişimi 700-1050°C sıcaklık aralığında gösterilmiştir (Şekil 11.4).

Şekil 11.4’te elde edilen eğrinin eğimlerinden ve (4.3) no.’lu formülle verilen Arrhenius eşitliğinden hareketle aktivasyon enerjileri bulunmuştur (Mackowiak, 1966; Steinfeld vd., 1995).

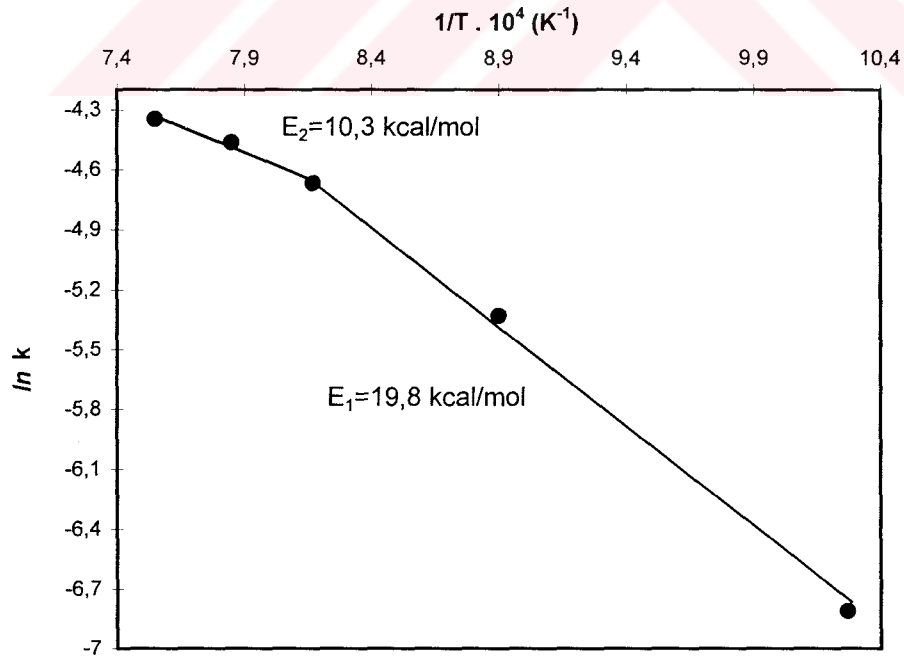
Şekil 11.4’te kimyasal kontrollü reaksiyon için verilen eşitliğe göre hesaplanan hız sabitinin, sıcaklığın tersi ile ($1/T$) değişimini gösteren eğrinin eğiminde belli bir sıcaklıktan sonra sapma görülmektedir. Böylece eğride iki farklı eğime sahip bölge ortaya çıkmaktadır. Bu durum, redüksiyonun ilerlemesiyle işlemin farklı mekanizmalarla kontrol edildiğini göstermektedir. 700-950°C sıcaklıkları arasındaki bölgede redüksiyon kimyasal reaksiyonla kontrol edilirken, 950°C’in üzerinde difüzyon, redüksiyonu kontrol eden mekanizma olmaktadır. Şekil 11.3’te elde edilen noktaların değişiminden de bu durum görülebilmektedir. 700 ve 850°C için bulunan noktalardan geçirilen doğrular, bu noktaların karakteristiğini yansıtırken, yüksek sıcaklıklar için çizilen doğrular, verilerin noktalardan oldukça fazla sapmalar göstermektedirler.

700-950°C sıcaklıkları arasında (nispeten düşük sıcaklıklarda) kimyasal reaksiyonlar Bölüm 11.1.1’de de açıklandığı üzere yavaş ilerlemekte, bu da redüksiyonun gelişmesini engellemekte ve redüksiyon hızı kimyasal reaksiyonlar tarafından kontrol edilmektedir. Sıcaklığın yükselmesiyle birlikte (950-1050°C arasında) kimyasal reaksiyonların hızlanmasının yanında, gaz hareketliliği artmakta ve reaksiyon ortamı redükleyici gazca

zenginleşmektedir. Ancak peletlerin topokimyasal redüksiyonunun bir sonucu olarak, pelet dış kısmında oluşan ve redüksiyonun ilerlemesiyle kalınlığı giderek artan metalik demir fazı, gaz difüzyonunu sınırlamaktadır.



Şekil 11.3 Farklı sıcaklıklar için $[1 - (1 - R)^{1/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi.



Şekil 11.4 $[1 - (1 - R)^{1/3}] = k.t$ formülüne göre redüksiyon hızı ile sıcaklık ilişkisi ve aktivasyon enerjisinin bölgelere göre değişimi.

Gaz difüzyonunun kimyasal reaksiyondan daha yavaş geliştiği bu bölgede, redüksiyonun hızı büyük oranda difüzyon mekanizması ile kontrol edilmektedir. Katı redükleyici kullanılan redüksiyon işlemleri için yüksek sıcaklıklara doğru reaksiyonun difüzyonla kontrole doğru gitmesi beklenen bir durumdur.

Şekil 11.3 ve Şekil 11.4'teki grafiklere benzer bulgular, diğer bazı çalışmalarda da (Şeşen, 1986; Ajersch, 1987) elde edilmiştir.

Redüksiyon hızının kontrolünde, farklı olayların etkili olduğu bölgelerdeki verilerin değerlendirilmesiyle, her bir bölge için belirlenen aktivasyon enerjisi değerleri Şekil 11.4'teki grafik üzerinde gösterilmiştir. Buna göre, redüksiyonun kimyasal reaksiyonla kontrol edildiği düşük sıcaklık bölgesinde aktivasyon enerjisi değeri 19,8 kcal/mol olurken, difüzyonun redüksiyonu kontrol ettiği bölgede aktivasyon enerjisi değeri 10,3 kcal/mol olmaktadır. Bu durum, düşük sıcaklıklarda atomların aktif hale gelebilmek için aşmaları gereken eşik enerjisi değerinin içinde aktivasyon enerjisinin payının yüksek olduğunu göstermektedir.

Çizelge 11.2 Demir cevherinin redüksiyonu ile ilgili farklı çalışmalarda elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri ve çalışma şartları.

Çalışma	Aktivasyon enerjisi (kcal.)	Sıcaklık ve redüksiyon oranı	Redükleyici türü	Kabul edilen mekanizma
<i>Türkdoğan</i>	15	-	H ₂	Difüzyon
<i>Mookherjee</i>	30-35	-	CO	Difüzyon
<i>Seaton vd.</i>	57	<1273K	CO	-
	30	>1273K	CO	-
<i>RaO</i>	72	-	-	-
<i>Freuhan</i>	70-80	-	-	-
<i>Srinivasan ve Lahiri</i>	99,7	%20 redüksiyon	-	-
	13,4	%80 redüksiyon	-	-
<i>Themelis ve Gauvin</i>	2,6-30	-	-	-
<i>Bu çalışma</i>	19,8	700-950°C	CO	Kimyasal reak.
	10,3	950-1050°C	CO	Difüzyon

Sıcaklığın artmasıyla birlikte aktivasyon enerjisi değeri düşmektedir. Bunun anlamı, reaksiyonlar için gerekli enerji içinde serbest enerjinin değeri artmakta ve aktivasyon enerjisi payı azalmaktadır.

Bu hesaplanan aktivasyon enerjisi değerlerinin farklı çalışmalarda ortaya çıkan değerlerle karşılaştırılması Çizelge 11.2’de verilmiştir. Bu çizelgeden görüleceği üzere, demir cevherinin redüksiyonu için çok farklı aktivasyon enerjisi değerleri bulunmuştur. Bu farklılıkların nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

- Kullanılan cevher ya da oksidin tipinin farklı olması.
- Çevre gaz kompozisyonunun farklılığı.
- Partiküllerin boyutu.
- Kullanılan karbonun reaktivitesi.

11.1.5 Optimum deney şartlarının tespiti

Redüksiyon deneyleri sonunda elde edilen sıcaklık, süre, C_r/Fe oranı - Metalizasyon ilişkilerini gösteren grafiklere bakıldığında sıcaklık, süre ve kömür miktarındaki artışın metalizasyon üzerinde olumlu etki yaptığı görülmektedir. Üretilen sünger demirden beklenen karakteristik özellikler (metalizasyon derecesi, metalik demir ve toplam demir miktarı, diğer bileşenlerin oranları, C ve S yüzdesi) gözönüne alındığında, %95,32’lik metalizasyon derecesinin sağlandığı 0,5 C_r/Fe oranında 1000°C’ta ve 60dk.’lık sürede gerçekleştirilen redüksiyon optimum deney şartları olarak belirlenmiştir. Sıcaklık ve sürenin daha fazla artırılması metalizasyon derecesini de arttırmaktadır, ancak pratikte yapılan çalışmalar ve sanayi uygulamaları gözönüne alındığında yüksek sıcaklık ve uzun sürenin maliyet artışını da beraberinde getirdiği unutulmamalıdır. Seçilen bu optimum şartlarda elde edilen metalizasyon derecesi sünger demirde beklenen değerden daha yüksektir. C_r/Fe oranı 0,4 olduğunda 1000°C’da metalik demir, toplam demir ve metalizasyon derecesi 0,5 C_r/Fe oranına göre daha düşük seviyelerde kalmaktadır (%88,63). Ergitme işlemi sırasında metalizasyon derecesindeki artışın ergitme verimini

olumlu yönde etkilediği dikkate alınırsa $C_r/Fe = 0,5$ oranının seçilmesinin daha iyi olacağı anlaşılabacaktır.

Ayrıca bu optimum şartlarda elde edilen sünger demirin C içeriği %0,248, S içeriği ise %0,0171 olmaktadır. Çizelge 2.2’de verilen ve sünger demirde bulunması gereken C ve S oranlarına göre, S yüzdesi istenilen seviyede olmasına karşın C yüzdesi, katı redükleyici kullanılan yöntemlerden beklenenden yüksek çıkmıştır. Diğer bileşenler açısından Çizelge 2.2’ye göre sünger demirde $SiO_2 + CaO + Al_2O_3 + MgO + MnO = \max. \%2,8-6,0$ seviyesinde olmalıdır. Belirlenen optimum şartlarda elde edilen sünger demirde bu bileşenlerin toplam oranları %4,4 kadardır. Bu değer ise istenilen seviyeler arasında kalmaktadır. SL/RN yönteminde beklenen seviyeden ise daha düşüktür. Optimum deney şartlarında elde edilen değerlerin sünger demirden istenen değerlerle karşılaştırmalı olarak verildiği Çizelge 11.3’te, seçilen optimum şartların uygunluğu açıkça görülmektedir.

Çizelge 11.3 Sünger demirden beklenen bileşim özellikleri ve optimum redüksiyon şartlarında elde edilen değerlerin karşılaştırılması.

	İstenilen*		Elde edilen
	Gaz redükleyici kullanan yöntemler	Katı redükleyici kullanan yöntemler	
% Metalizasyon	92-95	93	95,32
Fe°	83-89	87	89,33
Fe _T	90-94	93	93,71
C	1,0-4,0	0,01	0,248
S	0,001-0,03	0,02	0,0171
SiO ₂ +CaO+Al ₂ O ₃ +MgO+MnO	2,8-6,0	4,7	4,4

* Çizelge 2.2’de ayrıntısı verilmiştir.

Belirlenen bu optimum şartlar, daha önce farklı çalışmalarla ortaya çıkarılan deney sonuçları ile karşılaştırıldığında şu tespitler ortaya çıkmıştır:

Bu çalışmaya, kullanılan malzemeler ve deney prosedürü açısından en yakın olan çalışma Narçın (1990) tarafından yapılan redüksiyon deneyleridir. Narçın'ın (1990) yaptığı çalışmada, Divriği peletleri bir döner fırında Tunçbilek linyit kömürü kullanılarak redüklenmiştir. Bizim elde ettiğimiz redüksiyon deneyi sonuçları bu çalışmaya göre birtakım farklılıklar arz etmektedir. Narçın'ın (1990) çalışmasında elde ettiği optimum deney şartları; 1000°C sıcaklık, 90 dk. redüksiyon süresi ve 0,4 C_f/Fe oranıdır. Bu şartlardaki metalizasyon değeri %94'tür.

Elde edilen bu optimum şartlar arasındaki farklılık kullanılan malzemelerden kaynaklanmaktadır. Narçın'ın (1990) çalışmasında redükleyici olarak Tunçbilek linyit kömürü kullanılmıştır. Bu kömürün C_f değeri, bizim çalışmamızda kullandığımız Soma linyitinin C_f değerinden daha düşüktür. Uçucu madde ve kül içeriği ise Soma kömüründekinden daha yüksektir. Ayrıca kullanılan deney teçhizatındaki farklılarda optimum şartların belirlenmesinde farklılıklar ortaya çıkarmıştır. 1000°C'ta 60 dk.'da ve 0,5 C_f/Fe oranında Narçın'ın (1990) ulaştığı metalizasyon derecesi %86,83 iken, bu çalışmada elde edilen metalizasyon derecesi %95,32'dir.

Yıldırım ve Sevinç'in (1990) yaptığı çalışmada, bizim çalışmamızda olduğu gibi Divriği peletleri Soma kömürü kullanılarak bir döner fırında redüklenmiştir. Deneylerde peletler fırına oda sıcaklığında, kömür ise 400°C'ta yüklenmiştir. Deney sıcaklığına ulaşıldığı an deney süresi başlangıcı kabul edilmiştir. Redüksiyon deneyleri sonucu optimum şartlara 950°C'ta 1 saatlik redüksiyon süresinde ve 0,5 C_f/Fe oranında ulaşılmıştır.

Yıldırım ve Sevinç'in (1990) çalışmasında izlenen deney prosedürü, bizim çalışmamızdan ve Narçın'ın (1990) çalışmasından farklıdır. Yıldırım ve Sevinç (1990), redüksiyonu izotermal olmayan şartlarda gerçekleştirmişlerdir. Bizim çalışmamızda ise deneyler izotermal şartlarda yapılmıştır, yani pelet fırına başlangıçta verilmiş, deney sıcaklığına ulaşıldığında ise kömür yüklenerek redüksiyon süresi başlatılmıştır. Yıldırım ve Sevinç (1990), uyguladıkları izotermal olmayan şartlar nedeniyle hemen hemen aynı redüksiyon derecesine bizim yaptığımız çalışmadan daha düşük sıcaklıkta ulaşmışlardır. Farklı

çalışmalarda birbirine çok yakın redüksiyon derecelerinin elde edildiği deney şartları Çizelge 11.4'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Bu farklılıklara rağmen, Yıldırım ve Sevinç'in (1990) ve Narçın'ın (1990) çalışmalarında görülen ve bizim de elde ettiğimiz sıcaklık-süre- C_f/Fe oranı ve metalizasyon ilişkisi birbirine çok uygundur.

Coşkuner'in (1981) yaptığı çalışmada, redüksiyon için hammadde olarak nispeten düşük oranda demir içeren (%55 Fe) pirit külleri ve Seyitömer linyit kömürü kullanılmıştır. Gerek demir oranının ve gerekse kömürdeki C_f oranının düşük olması (%35 C_f), redüksiyon sonunda düşük redüksiyon dereceli pelet üretimine imkan tanımıştır.

Çizelge 11.4 Farklı çalışmalarda elde edilen metalizasyon dereceleri ve optimum şartların karşılaştırılması.

Çalışmalar	% Metalizasyon	Sıcaklık (°C)	Süre (dk.)	C_f/Fe
Coşkuner (1981)	-	950	30	0,5
Yıldırım ve Sevinç (1990)	%83,37	950	30	0,5
Narçın (1990)	%36,05	950	30	0,5
Bu çalışma (1998)	%72,55	950	30	0,5
Optimum şartlar				
Coşkuner (1981)	%91	950	60	0,8
Yıldırım ve Sevinç (1990)	%95,44	950	60	0,5
Narçın (1990)	%94	1000	90	0,4
Bu çalışma (1998)	%95,32	1000	60	0,5

11.2 DC-E.A.F.'da Çelik Üretimi Deney Sonuçlarının Tartışılması

DC-E.A.F.'da hurda ve sünger demir kullanılarak yapılan ergitme deneylerinden alınan sonuçlara göre (Şekil 10.15), akım ve gerilim ters orantılı olarak değişmektedir. Düşük

gerilim değerlerinde ark oluşmamasının ya da çok zayıf olmasının nedeni, (-) kutuba bağlı elektrodun ucu ile (+) kutuba bağlı pota tabanı arasında yeterli potansiyel farkı oluşmamasıdır. Gerilim arttırıldıkça yeterli potansiyel farkı oluşturulmakta, yüksek gerilimlerde ise kutuplar arasında oluşan potansiyel farkının çok yüksek olması ark oluşumunu zorlaştırmaktadır.

Gerilimin artmasıyla güçte meydana gelen düşüş, (11.1) ve (11.2) formülüne göre akımda meydana gelen düşüşten kaynaklanmaktadır.

$$P = U \cdot I \quad \text{ya da} \quad (11.1)$$

$$P = R \cdot I^2 \quad (11.2)$$

P: Güç (W), U: Gerilim (V), I: Akım (A), R: Direnç (Ω)

Ergitme işleminde farklı çapta elektrodların kullanılması çekilen akımı değiştirmekte, bu da gücü ve ergitme süresini etkilemektedir. Daha büyük çaplı elektrod kullanımında kesit alanı büyüdüğünden direnç düşmekte, bu ise çekilebilecek akım miktarını arttırmaktadır. (11.3) ve (11.4) formüllerinde de bu durum açıkça görülmektedir. Akım miktarının artmasıyla birlikte çekilen güç te artmakta, bu ise ergitme süresini düşürmektedir.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (11.3)$$

$$I = U/R \quad (11.4)$$

R: Direnç (Ω), I: Akım (A), U: Gerilim (V), ρ : Özdirenç ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$),

l: İletkenin boyu (m), A: İletkenin kesit alanı (mm^2)

%100 Sünger demir kullanılarak yapılan ergitmede hurdaya göre daha düşük enerji tüketiminin sağlanması büyük oranda ergitme süresindeki azalmadan kaynaklanmaktadır. Bu sonuç ise Kopfle ve Verdier'in (1991) belirttiği durumu yansıtmaktadır. Ergitmede %100 sünger demir ile çalışılması sonucu meydana gelen gaz çıkışı, sünger demirde bulunan redüklenmemiş demir oksitlerin C ile meydana getirdiği redüksiyon

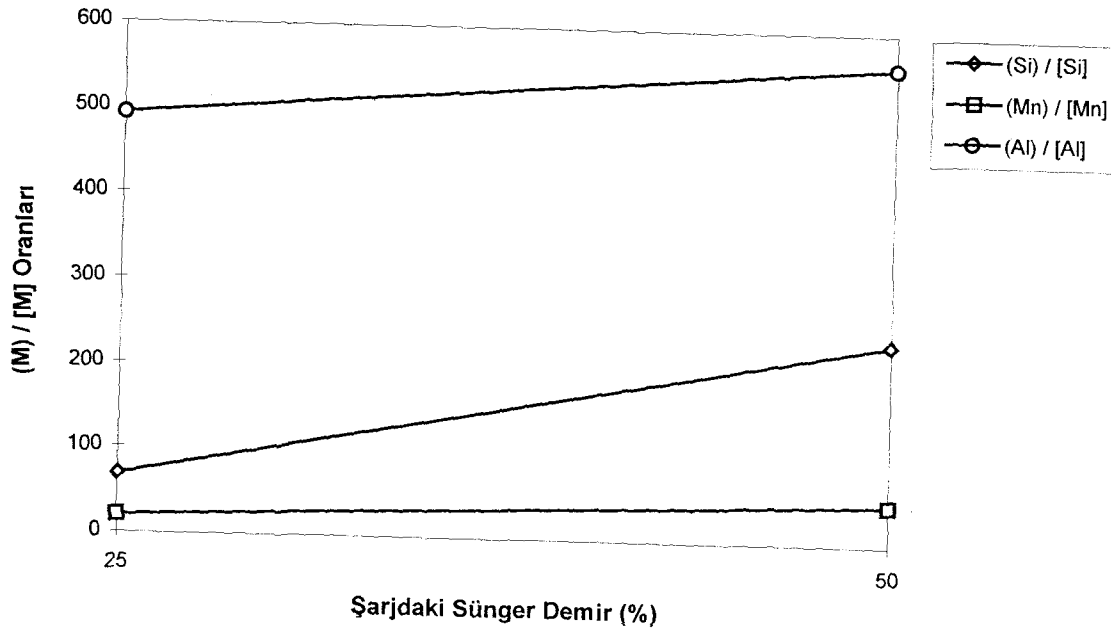
reaksiyonlarının bir sonucudur. Bu reaksiyonlar ve gaz çıkışı aynı zamanda köpüklü curuf oluşumunu sağlamakta böylece rafinasyona katkıda bulunmaktadır. Sıvı çelik banyosunda oluşan karışma hareketi de oluşan reaksiyonlar ve çıkan gazların bir sonucudur. Bu sayede banyo homojenizasyonu da sağlanmaktadır.

Sünger demir kullanımı ile ark kesintisinin ve ark gürültüsünün azalması yine köpüklü curufun ortaya çıkardığı etkilerdir. Arkın köpüklü curuf içine gömülmesi sonucu ark kesintileri ve ark gürültüsü azalmaktadır. Bu sonuçlar literatürde verilen köpüklü curuf etkilerine (Jellinghaus ve Ropke, 1988; Datlı ve Çöplü, 1991; Faccone vd., 1993) uygun bulunmuştur. Bunların yanında yapılan gözlemlere göre ark sapmaları ve yan duvarlardan ark oluşumu ortadan kalkmaktadır. Curuf hacminin fazlalığı, sünger demirin taşıdığı ve cevherden gelmiş olan oksit bileşiklerinin sonucudur.

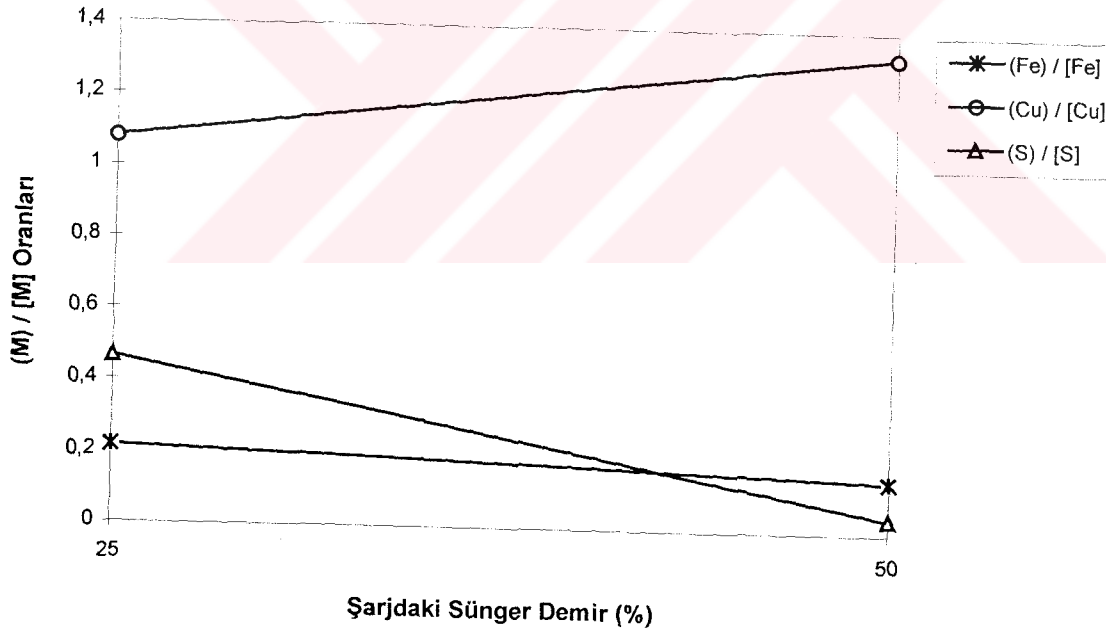
Ergitmede sünger demir kullanımı sonucu elde edilen sıvı metalde istenmeyen elementlerin çok düşük seviyelere inmesi, sünger demirin bu elementleri içermemesi ya da çok az miktarlarda içermesi nedeniyledir. Hurdada bulunan alaşım elementleri ve iz elementler, sünger demirde büyük oranda yoktur. Bu da daha temiz çelik üretimini sağlamaktadır. İz elementler açısından elde edilen bu sonuçlar, Şekil 8.10'da verilen literatür sonuçları (Cola vd., 1988) ve diğer çalışmalarla (Faccone vd., 1993; HYL III, 1996) uyum içindedir. Ergitme sırasında şarj içine bazik katkı malzemesi ilave edilerek curuf oluşturulması muhtemelen bu elementlerin çelik içindeki miktarlarını büyük oranda azaltacaktır.

Şekil 10.16'daki sıvı metal analizleri ile Şekil 10.17'deki curuf analizlerinin birlikte değerlendirilmesi sonucu, Şekil 11.5 ve Şekil 11.6'daki grafiklerde elementlerin curuf/metal dağılım oranları belirlenmiştir.

Bu şekillere göre, şarjın içinde sünger demir yüzde oranı arttıkça curufa geçen Si, Mn, Al ve Fe oranları da artmakta, buna karşılık Cu ve S oranları düşmektedir. Redüksiyon sonrası sünger demir bünyesinde bulunan ve curuf oluşturması beklenen Si, Mn, Al gibi elementler, büyük oranda curufa geçmişlerdir. Kullanılan sünger demir yüzdesi arttıkça, bu elementlerin curufa geçen oranları da artmıştır.



Şekil 11.5 Şarjdaki sünger demir oranına bağlı olarak, ergitme işlemi sonrasında elementlerin (curuf)/[metal] dağılımlarının değişimi.



Şekil 11.6 Şarjdaki sünger demir oranına bağlı olarak, ergitme işlemi sonrasında elementlerin (curuf)/[metal] dağılımlarının değişimi.

Ayrıca sünger demirde bulunan artık FeO'te büyük oranda curufa geçmiştir. Ergitme sırasında köpüklü curufun birçok faydaları görülmesine rağmen, yeterli miktarda

oluşturulamamış olması ve E.A.F.'da yeterli redükleyici atmosfer sağlanamaması rafinasyonu engellemiştir. Bunun sonucu olarak FeO'lerin curufa geçmesinin yanında bir miktar metalik demirinde oksitlendiği anlaşılmaktadır. Ergitme sırasında curuf yapıcı olarak herhangi bir katkı malzemesinin kullanılmamış olması da elementlerin curuf/metal dağılımlarını etkilemiştir.

E.A.F.'nda ergitme işleminin endüstriyel uygulamalarında bazik curuf oluşturularak ergitme yapılmakta, iyi bir curuf yapısıyla verimli ergitme sağlanmaktadır. Bu çalışmada ise herhangi bir bazik katkı malzemesi kullanılmaması curufun asidik karakterde oluşmasına neden olmuştur. Bunun sonucu olarak curufta yeterli S kapasitesi elde edilememiştir. Çünkü curufa geçen S miktarı büyük oranda curufun baziklik derecesine bağlıdır. Curufun baziklik derecesi arttıkça, S kapasitesi de artmaktadır (Rosenqvist, 1983). Asidik curuf karakteri nedeniyle yaptığımız ergitmelerde curufta bulunan S oranları çok düşük seviyelerde kalmıştır. Şarj içinde sünger demir oranının arttırılmasıyla işleme giren S miktarı da artmakta, ancak bu S daha çok metal fazı içinde kalmaktadır.

Ergitme işlemi sırasında arkın sadece tabandan değil pota kenarlarından da oluşması büyük oranda, bütün potanın iletken grafit olmasının bir sonucudur. Arkın katı hurdayı tercih edecek tarzda dolaşması ise katı durumdaki hurdanın direncinin ergiyik metalden daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

12. GENEL SONUÇLAR

Divriği peletlerinin Soma kömürü kullanılarak döner fırında redüklenmesi ve redüklenmiş ürün sünger demirin DC-E.A.F.'da farklı oranlarda hurda ile birlikte ergitilmesi deneylerinin gerçekleştirildiği bu çalışmada, elde edilen sonuçlar ve bunların yorumlanmasıyla aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır:

- 1) Divriği peletlerinin redüksiyonu deneylerinde değişken parametre olan sıcaklık, metalizasyon derecesini çok fazla etkilemektedir. Bu etki, sıcaklık artışıyla birlikte metalizasyonun da artması şeklindedir. Sıcaklık parametresinin etkisi, düşük redüksiyon sıcaklıklarında yüksek redüksiyon sıcaklıklarından daha fazla olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda metalizasyon yüzdeleri birbirine çok yakın çıkmaktadır. 0,5 Cf/Fe oranında, 1000°C'ta, 60 dk.'da % metalizasyon = %95,32 iken, aynı şartlarda 1050°C'ta %96,93 olmaktadır.
- 2) Sıcaklık 850°C'tan 950°C'a yükseltildiğinde metalizasyonda, diğer sıcaklık artış kademelerine göre daha fazla yükselme olmaktadır.
- 3) Redüksiyon süresinin metalizasyon derecesine etkisi, sıcaklık kadar önemli bir parametredir. Süre ve metalizasyon derecesi arasında parabolik bir ilişki vardır. Sürenin artmasıyla birlikte metalizasyon derecesi de artmakta, belli bir sürenin sonunda yavaşlayarak sabit kalmaktadır. Metalizasyon derecesinin sabit kaldığı süre, metalizasyonun bittiği zamanı göstermektedir. Deneylerin başlangıç kademelerinde (15-30 dk.) sürenin metalizasyona etkisi, hızlı metalizasyon artışıyla kendini göstermektedir.
- 4) Döner fırında katı redükleyici kullanılarak yapılan redüksiyon deneylerinde bir başka önemli parametre, C_f/Fe oranıdır. C_f/Fe oranı ile metalizasyon derecesi arasında lineer bir ilişki söz konusudur. Nispeten düşük redüksiyon sıcaklıklarında C_f/Fe oranının metalizasyona etkisi, yüksek redüksiyon sıcaklıklarından daha fazladır.

- 5) Redüksiyon deneylerinde kullanılan 0,4 ve 0,5 Cf/Fe oranlarıyla elde edilen metalizasyon yüzdelerine göre, teorik miktarın üzerinde kömür kullanılması daha düşük sıcaklık ve daha kısa redüksiyon süresi kullanılmasına imkan sağlamaktadır.
- 6) En yüksek metalizasyon derecesine (%98,97), deneylerde kullanılan en yüksek sıcaklık (1050°C), en uzun süre (90 dk.) ve en fazla Cf/Fe oranında (0,5) ulaşılmıştır.
- 7) Redüklenmiş pelet numunelerinin metalografik incelenmesi sonucu, redüksiyon işleminin topokimyasal modele göre yürüdüğü anlaşılmaktadır. Redüksiyonun başlangıcında oluşan metalik dış kabukla redüklenmeyen iç kısım arasındaki arayüzey, redüksiyonun ilerlemesiyle iç kısma doğru ilerlemektedir.
- 8) Metalografik incelemelerden elde edilen bir başka sonuç ise, arayüzeyin keskin bir sınıra sahip olmadığı ve iç indirgenmenin çok fazla olduğudur.
- 9) Döner fırında üretilen sünger demirin C ve S miktarı, redüksiyon sıcaklığı ve süresindeki artışa paralel olarak artmaktadır. Üretilen sünger demirde arzu edilen oranda C ve S miktarı, 1000°C sıcaklık ve 60 dk.'lık sürede elde edilmiştir. Sıcaklık ve sürenin daha fazla artırılması durumunda, C ve S oranları sünger demirde arzu edilen sınır değerlerin üzerine çıkmaktadır.
- 10) Redüksiyon deneylerinden elde edilen sıcaklık, süre, C_f/Fe oranı ve metalizasyon derecesi ilişkisine, metalik demir ve toplam demir yüzdelerine, C ve S oranlarına göre; 1000°C sıcaklık, 60 dk. süre ve 0,5 C_f/Fe oranı optimum şartlar olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda elde edilen metalizasyon derecesi %95,32, C oranı %0,248, S oranı ise %0,0171'dir.
- 11) Redüksiyon süresi ve metalizasyon derecesi arasındaki ilişkiden hareketle hesaplanan hız sabiti ve bunun sıcaklıkla olan ilişkisine göre, redüksiyon boyunca hız, iki farklı mekanizma tarafından kontrol edilmektedir. Başlangıçta kimyasal reaksiyon hızı kontrol

eden mekanizma olurken, redüksiyonun ilerlemesiyle difüzyon hız kontrolünde daha etkili hale gelmektedir.

- 12) Redüksiyon hızı ve sıcaklık ilişkisinden belirlenen aktivasyon enerjisi değerlerine göre, kimyasal kontrollü redüksiyon bölgelerinde aktivasyon enerjisi 19,8 kcal/mol olurken, difüzyon kontrollü bölgede daha düşüktür (10,3 kcal/mol).
- 13) Diğer çalışmalarda elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri, kullanılan farklı çalışma şartları ve farklı malzemeler nedeniyle değişiklikler arz etmektedir.
- 14) Divriği peletlerinin döner fırında Soma kömürü ile redüksiyonu sonucu elde edilen ürün sünger demirin DC-E.A.F.'da ergitilmesi deneylerindeki bulgulara göre, elektrod çapının artırılması çekilen akım miktarını arttırmakta ve ergitme süresini kısaltmaktadır.
- 15) Ergitme deneylerinde gerilim ve akımın ters orantılı olarak değiştiği bulunmuştur. Akım-gerilim-güç ilişkisine bağlı olarak gerilimin artması akımın düşmesine, bu ise gücün azalmasına neden olmaktadır.
- 16) Düşük gerilimlerde (<30V) ark çok zayıf oluşmakta, yüksek gerilimlerde ise (>46V) ark oluşumu zorlaşmaktadır. DC-E.A.F.'da ergitme deneylerinde belirlenen optimum şartlar; 4,5 cm. elektrod çapı, 37,5V gerilim ve 240A akım şeklindedir.
- 17) %100 sünger demir kullanılarak yapılan ergitmelerde, %100 hurda kullanımına göre ergitmede harcanan güç fazla olmasına rağmen ergitme süresinin kısa olması harcanan enerjinin daha az olmasını sağlamaktadır.
- 18) Ergitme işleminde sünger demir kullanımı köpüklü curuf oluşumunu sağlamakta, bunun sonucunda ise, ark sapması, ark kesintisi ve ark gürültüsü azalmaktadır.

- 19) DC-E.A.F.'ı şarjı içinde sünger demir oranının artırılması, üretilen çelik içindeki iz elementlerin miktarını azaltmaktadır. Örneğin çelik içinde Sn miktarı, %100 hurda ile yapılan ergitmede %0,02 iken, %50 hurda + %50 sünger demir kullanıldığında %0,004 olmaktadır.
- 20) Curuf analizleriyle belirlenen Si, Ca, Mg, Al, Mn ve Cu bileşenlerinin ergitme sonrası curuftaki oranları, kullanılan sünger demir yüzdesi arttıkça artmaktadır. Buna karşın curufta Fe ve S oranları sünger demir yüzdesindeki artışa bağlı olarak düşmektedir.
- 21) Ergitme işlemi sonunda elde edilen metal ve curuf analizleriyle bu fazlardaki element dağılımı verilerine göre, şarj içinde sünger demir kullanım oranı arttıkça Si, Mn, Al, Cu gibi elementlerin curuf/metal dağılım oranları artmakta, Fe ve S dağılım oranları ise düşmektedir. %25 sünger kullanıldığında $(S)/[S] = 0,465$ iken, %50 sünger demir kullanımında bu oran 0,042 olmaktadır.

KAYNAKLAR

Agarwal, J.C., Loreth, M.J. ve Kopfle, J.T., (1991), "Thin Section Casting and the Need for DRI/HBI", Direct From Midrex, 16 (4) : 3-5.

Ajersch, F., (1987), "Chemical and Physical Characteristics Affecting The Reduction Kinetics of Iron Oxide Pellets with Solid Carbon", Canadian Metallurgical Quarterly, 26 (2): 137-144.

Alcock, C.B., (1976), Principles of Pyrometallurgy, Academic Press, London.

Anderson, D.F., (1987), "Scrap as a Commodity", Ironmaking and Steelmaking, 14 (3) : 130-135.

Aydın, S., (1990), "Dünya Sünger Demir Üretiminin Bugünkü Durumu", Metalurji Dergisi, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, (67-68) : 41-45.

Aydın, S., Taptık, Y. ve Arslan C., (1996), "Scrap, Recycling and Steel Production: A General Perspective and Turkey's Standpoint", Ironmaking and Steelmaking, 23 (3) : 242-246.

Bergman, K., (1993), "Twin Electrode DC Powered EAF Among The Latest Improvements in DANIELI Electric Arc Furnace Technology", DANIELI Centro Met AB, Sweden.

Bogdandy, L.V. ve Engell, H.J., (1971), The Reduction of Iron Ores, Springer-Verlag, Berlin.

Bray, J.L., (1954), Ferrous Process Metallurgy, John Wiley and Sons Inc., USA.

Carlsson, V., Ilmoni, P.A. ve Bjorkvall, B., (1977), "The Effect of Alkali on Acid and Basic Pellets", 784-802, Agglomeration 77, Sastry, K.V.S. (Derl.), Proceedings of the 2nd International Symposium on Agglomeration, 6-10 March 1977, Atlanta.

Civaoğlu, İ., (1963), Yanma Kimyası ve Tabii Katı Yakacaklar, Berksoy Matbaası, 1, İstanbul.

Cola, R.M., Lopez, R.O. ve Monsada, F.A., (1988), "Productivity and Quality Improvements Using HBI", Direct From Midrex, 13 (3) : 6-9.

Coşkun, S., (1981), "Sünger Demir Üretim Teknolojisinin Geliştirilmesi-Ön Değerlendirme Raporu", TÜBİTAK, Malzeme Araştırma Ünitesi, Proje No: 03-5201-7803, Kocaeli.

Coudurier, L., Hopkins, D.W. ve Wilkomirsky, I., (1978), Fundamentals of Metallurgical Processes, Pergamon Press, London.

Cribbes, J.D. ve Kestner, D.W., (1977), "Some Factors Influencing Iron Ore Fired Pellet Quality", 272-285, Agglomeration 77, Sastry, K.V.S. (Derl.), Proceedings of the 2nd International Symposium on Agglomeration, 6-10 March 1977, Atlanta.

Datlı, R. ve Çöplü, Ç., (1991), Ekinciler Demir-Çelik Tesislerinde Sünger Demir Kullanımı Ön Fizibilite Raporu, Çelikhane Md., Ekinciler Demir-Çelik İşl. A.Ş., İskenderun.

Davis, C.G., McFarlin, J.F. ve Pratt, H.R., (1982), "Direct Reduction Technology and Economics", Ironmaking and Steelmaking, 9 (3) : 93- 129.

Demir-Çelik Paneli, (1995), Panelistler: Kartay, H., Telseren, A., Dikeç, F., Sezgin A., Türkdoğan, E.T., Metalurji Dergisi, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, (96) : 47-73.

Demir-Çelik Üreticileri Derneği (DÇÜ), (1997), Ocak-Nisan Dönemi Demir-Çelik Raporu

Dikeç, F. ve Aydın, S., (1991), "Çözümlü Metalurji Termodinamiği Problemleri", İ.T.Ü., Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.

Ekanem, E.B. ve Walker, R.D., (1989), "Stepwise Reduction of Itakpe Iron Ore Compacts to Magnetite, Wüstite and Iron", Ironmaking and Steelmaking, 16 (5) : 320-324.

English, A. ve Frans, R.D., (1977), "Developments in Pelletizing", 3-22, Agglomeration 77, Sastry, K.V.S. (Derl.), Proceedings of the 2nd International Symposium on Agglomeration, 6-10 March 1977, Atlanta.

Erdemir, (1996), Demir-Çelik Sektör Haberleri, Erdemir Endüstri Mühendisliği Sektör İzleme Birimi, 34 (4) : 26-28.

Faccone, D.M., Kopfle, J.T. ve Verdier, R.H., (1992), "The Route to High Quality Steelmaking", Direct From Midrex, 17, (3) : 3-6.

Faccone, D.M., Kopfle, J.T. ve Verdier, R.H., (1993), "Midrex Direct Reduction Technology-The Direct Route to Clean Steel", Iron and Steel Engineer, April 1993 : 77-81.

Garvey, R.A., (1996), "Mini-Mill Boundary Blurs", Mini-Mills of the Future Conference, Midrex Direct Reduction Corp., 21-22 Nov. 1996, USA.

Greenwalt, R.B. ve Stephenson, J.G., (1977), "The Role of Agglomeration in Direct Reduction Processes", 765-783, Agglomeration 77, Sastry, K.V.S. (Derl.), Proceedings of the 2nd International Symposium on Agglomeration, 6-10 March 1977, Atlanta.

Griscom, F.N., (1997), "Expanding the Frontiers of Ironmaking", Direct From Midrex, 22 (3) : 3-5.

<http://www.hylsamex.com.mx/hyl/ihylprocs.html>

<http://www.met.kth.se/tc/pd/element/Fe-O.html>

HYL - DRI The New Commodity, (1979), HYL-The Iron and Steel Technology Company of Grupo Industrial Alfa, Mexico.

HYL III, (1996), Proven Innovative Solutions, The Iron and Steel Technology and Services Division of Hylsa, Mexico.

İmer, S., (1983), "Report of The Preliminary Results of Tests on Turkish Iron Ores and Lignites to Establish Suitability for Production of Sponge Iron According to The Rotary Kiln Method", United Nations Industrial Development Organization, Ankara.

İmer, S., (1984), "Report of The Prefeasibility Study of The Coal-Based Direct Reduction Using Turkish Lignites as Only Energy Source and Turkish Iron Ores to Establish Suitability for Production of Sponge Iron According to The Rotary Kiln Method", United Nations Industrial Development Organization, Ankara.

Jellinghaus, M. ve Ropke, W.D., (1988), "DR/EAF Steelmaking a Furnacemaker's View", Direct From Midrex, 13 (3) : 3-5.

Kartay, H., (1995), "Türk Demir Çelik Sektörünün Düny-Bugünü", 8. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 6-9 Haziran 1995, İstanbul.

Kopfle, J.T. ve Verdier, R.H., (1991), "Benefits of HBI in The EAF Melt Shop", Direct From Midrex, 16 (4) : 6-9.

Lefrank, P.A., Jones, W.J. ve Wetter, R.G., (1995), "Recent Status of Ac and DC Electrode Application", The Future of Flat Rolled Steel Production, AISE Seminar, 11-14 June 1995, Chicago.

Macauley, D., (1996), "Options Increase for non-BF Ironmaking", Steel Times International, Nov. 1996 : 20-24.

Mackowiak, J., (1966), "Physical Chemistry for Metallurgists", George Allen and Unwin Ltd., London.

McKewan, W.M., (1965), "Kinetics of Reduction of Iron Ores", 141-155, Steelmaking: The Chipman Conference, Elliott, J.F. (Derl.), Proceedings of the Conference on the Physical Chemistry and Technology of Steelmaking, 4-7 June 1965, Massachusetts.

Midrex Direct Reduction Process, (1974), A Giant Step in Steelmaking, Midrex Corporation, North Carolina, U.S.A.

Midrex Direct Reduction Process, (1995), Midrex Corporation, North Carolina, U.S.A.

Midrex, (1997), World Direct Reduction Statistics, Midrex Direct Reduction Corporation, North Carolina, U.S.A.

Midrex, (1997), Look Into Direct Reduction, Midrex Direct Reduction Corporation, North Carolina, U.S.A.

Miller, J.O. ve Goujet, P., (1992), "DC Furnace Water-Cooled Bottom Electrode Design", Iron and Steel Engineer, July 1992 : 17-20.

Mookherjee, S., Ray, H.S. ve Mukherjee, A., (1986), "Isothermal Reduction of Iron Ore Fines Surrounded by Coal or Char Fines", Ironmaking and Steelmaking, 13 (5) : 229-235.
Morales, R.G., (1996a), HYL III: Versatile Direct Reduction Technology in Operation, HYL Technology Division of Hylsa, Mexico.

Morales, R.G., (1996b), Direct Reduction Solutions from HYL, HYL Technology Division of Hylsa, Mexico.

Mueller, B. ve Struve, G.V., (1977), "Design of Pelletizing Plants for Blast Furnaces and Direct Reduction Processes Incorporating In Plant Fines", 25-45, Agglomeration 77, Sastry, K.V.S. (Derl.), Proceedings of the 2nd International Symposium on Agglomeration, 6-10 March 1977, Atlanta.

Narçın, N., (1990), Döner Fırında Katı Redükleyici Kullanılarak Sünger Demir Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Üretim Ana Bilim Dalı, İstanbul.

Narçın, N. ve Aydın, S., (1991), "Sünger Demir ve Elektrik Ark Fırınlarında Kullanımı", Metalurji Dergisi, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, (77) : 28-31.

Nutter, S.M. ve Li, K., (1990), "The Effect of Composition and Structure on Fluxed Pellet Reduction Kinetics", Transactions of the ISS, April 1990 : 65-76.

Oeters, F., (1989), Metallurgy of Steelmaking, Stahl & Eisen, Berlin, Germany.

Oral, A., (1993), E.A.F.'da Doğru Akımın Kullanılması, Bitirme Tezi, YTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Ottmar, H., Schenck, H. ve Dahl, W., (1977), "Technical and Economic Effects of the Substitution of Scrap by Sponge Iron in the Arc Furnace", Stahl und Eisen, 97 (15) : 731-741.

Ottmar, H. ve Siegers, U., (1985), "Electric Furnace Steel Production-Technology and Metallurgy for Sponge Iron Charges", John Wiley and Sons Ltd., Great Britain.

Pantke, H.D. ve Queens, C., (1976), "Demands on The Quality of Sponge Iron for Steelmaking", Stahl und Eisen, 96 (14) : 652-657.

Paul, S. ve Mukherjee, S., (1992), "Non-isothermal and Isothermal Reduction Kinetics of Iron Ore Agglomerates", *Ironmaking and Steelmaking*, 19 (3) : 190- 192.

Pavlicevic, M., Gensini, G., Negra, A.D. ve Cecco, C.D., (1996), "Getting More From the DC-EAF", *Steel Times International*, July 1996 : 17-18.

Pearce, F.J. ve Cameron, I.A., (1985), "Advances in Ferrous Extractive Metallurgy", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 24 (1) : 1-14.

Plöckinger, E. ve Etterich, O., (1985), "Electric Furnace Steel Production-Sponge Iron", John Wiley and Sons Ltd., Great Britain.

Price, D.J., (1987), "Scrap Management and Economics at BSC Scunthorpe Works", *Ironmaking and Steelmaking*, 14 (3) : 136-138.

RaO, Y.K., (1971), "The Kinetics of Reduction of Hematite by Carbon", *Metallurgical Transactions*, (2) : 1439-1447.

Rosenqvist, T., (1983), *Principles of Extractive Metallurgy*, McGraw-Hill Book Co., Singapore.

Saeki, O., Taguchi, K., Nishida, I., Fujita, I., Onoda, M. ve Tuchiya, O., (1977), "Blast Furnace Performance Using Dolomite Fluxed Pellets at Kakogawa Works", 803-815, *Agglomeration 77*, Sastry, K.V.S. (Derl.), *Proceedings of the 2nd International Symposium on Agglomeration*, 6-10 March 1977, Atlanta.

Seth, B.B.L. ve Ross, H.U., "Application of a Generalized Rate Equation to the Gaseous Reduction of Iron Oxide", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 5 (4) : 315-323.

Steel Times International, (1995), "On the DC Learning Curve in Turkey", Nov. 1995 : 29-30.

Stenkvis, S.E., (1992), "DC Arc Furnace Technology - Present and Future", *Iron and Steel Engineer*, July 1992 : 33-36.

Stickler, H., Stenkvis, S.E. ve Siegl, W., (1994), "DC Arc Furnace Bottoms-The Way to Superior Service", *Steel World*, 2-7.

Steinfeld, A., Frei, A. ve Kuhn, P., (1995), "Thermoanalysis of the Combined Fe_3O_4 -Reduction and CH_4 -Reforming Processes", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 26B, June 1995 : 509-515.

Şeşen, K., (1986), *Avnik Demir Cevherlerinden Hazırlanan Peletlerin İndirgenme Davranışlarına CaO , Na_2O ve K_2O 'in Etkisi*, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Şeşen, K., (1990), “Doğal Gazın Etkili Kullanım Alanı: Sünger Demir Üretimi”, Doğal Gaz Dergisi, Tanıtım A.Ş., (9) : 34-39.

The Fastmet Process, (1997), Process Details and Chemistry, Midrex Direct Reduction Corporation, North Carolina, U.S.A.

Themelis, N.J. ve Gauvin, W.H., (1963), “A Generalized Rate Equation for the Reduction of Iron Oxides”, Trans. of the Metallurgical Society of AIME, 227 : 290-300.

Türkdoğan, E.T., (1980), Physical Chemistry of High Temperature Technology, Academic Press, U.S.A.

Whitten, G., (1998), “Hot Transport - Midrex Style”, Direct From Midrex, 23 (3) : 3-5.

Wilson, K., (1979), “The SL/RN Process at The Griffith Mine”, Canadian Metallurgical Quarterly, 18 : 105-109.

Yanez, D., (1993), “DRI as Arc Furnace Feed”, Ironmaking and Steelmaking, 20 (1) : 12.

Yıldırım, M.C. ve Sevinç, N., (1990), “Bir Döner Fırında Soma Kömürü ile Divriği Peletinin Doğrudan İndirgenmesi”, 6. Metalurji Kongre ve Sergisi, 31Ekim-4Kasım 1990, Ankara.

Yorucu, H., (1990), “Doğru Akım (DC) Ark Ocakları”, 6. Metalurji Kongre ve Sergisi, 31Ekim-4Kasım 1990, Ankara.

Ek 1 Metalik Demir (Fe⁰) Analizi

1. 0,25-0,3 gr numune 4 sıfır hassasiyetle tartılır (numune kuru ve öğütölmüş olmalıdır).
2. Numune + 20 ml çözelti (%10'luk CuSO₄ + sülfat asidi) hazırlanır.
3. Karışım 15 dk kaynatılır.
4. Beyaz bant filtre kağıdından süzölür.
5. Süzölen çözelti 100 ml'ye su ile seyreltilir.
6. 15 ml 1:1 sülfat asidi ile karıştırılır.
7. Çözeltideki Cu semente olana kadar karışıma Al folyo ilave edilir.
8. Çözelti renksiz hale gelene kadar kaynatılır.
9. Soğutulup siyah bant filtre kağıdından süzölür.
10. 300 ml'ye su ile tamamlanır.
11. 0,1 N KMnO₄ ile titrasyon yapılır ve aşğıdaki formöle göre metalik demir yüzdesi belirlenir.

$$\%Fe^0 = \frac{S \times F \times 0,005585 \times 100}{M}$$

S: Seviye (Harcanan KMnO₄ seviyesi cc. olarak).

F: Faktör (KMnO₄ hazırlanırken belirlenir).

M: Numunenin ilk tartılan ağırlığı.

Ek 2 Toplam Demir (Fe_T) Analizi

Hazırlanacak çözeltiler:

Kıral suyu : HCl / HNO₃ (Nitrat asidi) = 3/1 oranında

SnCl₂ : 0,64 gr SnCl₂ (toz) + 2,4 ml HCl (Bu karışım ısıtılıp, 10 ml su ile tamamlanır)

HgCl₂ : %5'lik (5gr. HgCl₂ 100 ml'ye tamamlanır)

MnSO₄ : 65 gr. MnSO₄, 300-400cc. suda çözülür. 200 ml H₃PO₄ ve 130 ml H₂SO₄ ilave edilerek 1lt'ye su ile tamamlanır.

0,2 - 0,25 gr. Numune 4 sıfır hassasiyetle tartılır.

1. 100 cc. Kral suyunda numune ısıtılarak çözülür (Tamamen çözünmezse 100 cc. artırılabilir).
2. 250'lik jojeye beyaz bant filtre kağıdından süzülür.
3. 250 cc'ye su ile tamamlanır.
4. 500'lük erlen kullanılarak 50 ml'lik çözelti çekilir.
5. Çözeltiye 5 cc. HCl ilave edilerek kaynatılır.
6. Kaynadığı anda alınır ve üzerine SnCl₂ ilavesi yapılır (1 ml'lik pipetle). Renk değişimi olduğunda (sarı → renksiz) işlem durdurulur.
7. Çözelti soğutulur.
8. Soğuyan çözeltiye HgCl₂'den 5cc. ilave edilir, 0,5 - 1dk çalkalanır.
9. 25 ml MnSO₄ ilave edilir.
10. 150 ml saf su ilave edilir.
11. 0,1 N KMnO₄ ile titrasyon yapılır ve aşağıdaki formüle göre toplam demir yüzdesi belirlenir.

$$\%Fe_T = \frac{S \times F \times 0,005585 \times 100}{M \times 50 / 250}$$

S: Seviye (Harcanan KMnO₄ seviyesi cc. olarak).

F: Faktör (KMnO₄ hazırlanırken belirlenir).

M: Numunenin ilk tartılan ağırlığı.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	07.05.1970	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1981 - 1987	Boyabat Lisesi
Lisans	1987 - 1991	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1991 - 1994	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Müh. Anabilim Dalı, Üretim Programı
Doktora	1994 - 1998	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Müh. Anabilim Dalı, Üretim Programı
Çalıştığı kurum(lar)	1992 - Devam ediyor	YTÜ Metalurji Müh. Böl. Araştırma Görevlisi

