

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YERLİ DEMİR CEVHERLERİNİN SÜNGER DEMİR ÜRETİMİNE
UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji Müh. Ali Erçin ERSUNDU

Anabilim Dalı: İLERİ TEKNOLOJİLER

Programı: MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YERLİ DEMİR CEVHERLERİNİN SÜNGER DEMİR
ÜRETİMİNE UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Metalurji Müh. Ali Erçin ERSUNDU
(521051001)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih: 11 Haziran 2007

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Süheyla AYDIN (İ.T.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Onuralp YÜCEL (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin yönetimini üstlenen, çalışmalarında bana yol gösteren, her zaman bir anne şefkatiyle bana destek veren ve çalışmalarımın tamamlanmasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Süheyla AYDIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca hem temel hem de pratik uygulamalardaki bilgi desteğiyle bana yardımcı olan değerli hocam Prof. Dr. Onuralp YÜCEL'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında bilgi birikimlerini benimle paylaşan, deneysel çalışmalarım süresince her konuda bana yardımcı olan değerli ağabeylerim Dr. Müh. C. Fahir ARISOY'a ve Dr. Müh. Nuri SOLAK'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım sırasında tüm kimyasal analizlerin yapılmasında çok değerli katkılarını esirgemeyen Kim. Müh. İnci KOL'a yardımlarından ve göstermiş olduğu sonsuz anlayıştan dolayı teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Deneylerimin yapılışı sırasında bana yardımcı olan Met. Müh. Umut SÖYLER'e, Met. Müh. Uğur CEYLAN'a, Met. Müh. Alp ERSÖZ'e ve tüm diğer arkadaşlarıma bana vermiş oldukları desteklerden ötürü teşekkür ederim.

Bugüne kadar her türlü maddi ve manevi fedakârlıktan kaçınmayarak bana destek olan anne ve babama bana hep doğru yolu gösterdikleri ve beni bugünlere kadar getirdikleri için teşekkür ederim.

HAZİRAN 2007

Ali Erçin ERSUNDU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. DÜNYA VE TÜRKİYE DEMİR - ÇELİK ÜRETİMİ	4
2.1 Dünya Demir - Çelik Üretimi	4
2.2 Türkiye Demir - Çelik Üretimi	6
3. SÜNGER DEMİR ÜRETİM TEKNOLOJİSİ	12
3.1 Sünger Demir Üretimine Giriş	12
3.2 Sünger Demir Üretim Yöntemleri	15
3.2.1 Gaz redükleyici kullanılan yöntemler	15
3.2.1.1 Midrex yöntemi	16
3.2.1.2 HyL-III yöntemi	17
3.2.2 Katı redükleyici kullanılan yöntemler	19
3.2.2.1 SL/RN yöntemi	19
3.2.2.2 FASTMET yöntemi	22
3.2.2.3 ITmk3 yöntemi	23
3.3 Dünya Sünger Demir Üretimi	25
3.4 Sünger Demirin Elektrik Ark Fırınlarında Kullanımı	30
4. SÜNGER DEMİR ÜRETİMİNDE KULLANILAN HAMMADDELERİN İNCELENMESİ	33
4.1 Redükleyicilere Göre Hammadde Kaynakları	33
4.1.1 Katı redükleyici kullanılan prosesler için kömür rezervleri	33
4.1.1.1 Türkiye’de linyit üretimi ve tüketimi	37
4.1.1.2 Türkiye linyit rezervlerinin kalitesi	39
4.1.1.3 Sünger demir üretimine uygun kömürün özellikleri	40
4.1.2 Gaz redükleyici kullanan prosesler için doğalgaz rezervleri	41
4.2 Sünger Demir Üretimi İçin Demir Cevherlerinin İncelenmesi	44
4.2.1 Dünya demir cevheri rezervleri ve üretim miktarları	44
4.2.2 Türkiye demir cevheri rezervleri	46
4.2.2.1 İşletilebilir demir cevheri rezervleri	47
4.2.2.2 Sorunlu demir cevheri rezervleri	48
4.2.3 Türkiye’de demir cevheri üretimi	50
4.2.4 Sünger demir üretimine uygun demir cevheri özellikleri	50

5. DEMİR OKSİTLERİN REDÜKSİYON PRENSİBİ	52
5.1 Redüksiyonun Termodinamik Yönü	52
5.2 Redüksiyonun Kinetik Yönü	54
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ	57
6.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler	57
6.1.1 Demir Cevheri	57
6.1.2 Kömür	58
6.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar	59
6.2.1 Döner fırın	59
6.2.2 Laboratuvar tipi yüksek sıcaklık fırını	60
6.2.3 Diğer cihazlar	60
6.3 Deneylerin Yapılışı	61
6.3.1 Döner fırın deneyleri	61
6.3.2 Yüksek sıcaklık fırını deneyleri	62
6.4 Deney Sonuçları	64
6.4.1 Sivas Divriği B Kafa demir cevheri	65
6.4.1.1 Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için redüksiyon sıcaklığının ve süresinin metalizasyona etkisi	65
6.4.1.2 Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için C_{fix}/Fe_{top} oranının metalizasyona etkisi	67
6.4.2 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri	69
6.4.2.1 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için redüksiyon sıcaklığının ve süresinin metalizasyona etkisi	69
6.4.2.2 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için C_{fix}/Fe_{top} oranının metalizasyona etkisi	71
6.4.3 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri	73
6.4.3.1 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri için redüksiyon sıcaklığının ve süresinin metalizasyona etkisi	73
6.4.3.2 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için C_{fix}/Fe_{top} oranının metalizasyona etkisi	75
6.4.4 Yerli cevherlerin sünger demir üretimine uygunluklarının karşılaştırılması	78
6.4.5 Ürünün mikroyapı incelemesi	79
6.4.6 Redüksiyon kinetiği ve aktivasyon enerjisinin hesaplanması	81
6.4.6.1 Sivas Divriği B Kafa demir cevheri ile yapılan deneylerin kinetik incelenmesi	81
6.4.6.2 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri ile yapılan deneylerin kinetik incelenmesi	84
6.4.6.3 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri ile yapılan deneylerin kinetik incelenmesi	86
7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	90
KAYNAKLAR	93
EKLER	96
ÖZGEÇMİŞ	103

KISALTMALAR

DRI	: Direkt Redüklenmiş Demir (Direct Reduced Iron)
EAF	: Elektrik Ark Fırını
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
HBI	: Sıcak Briketlenmiş Demir (Hot Briquetted Iron)
LNG	: Sıvılaştırılmış Doğalgaz (Liquified Natural Gas)
Mt	: Milyon ton
Mtep	: Milyon ton eşdeğer petrol
MTA	: Maden Tetkik Arama
OPEC	: Petrol ihraç eden ülkeler örgütü (Organization of the petroleum exporting countries)
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri
RHF	: Döner Hazneli Fırın (Rotary Heart Furnace)
SL/RN	: Stelco – Lurgi/ Republic Steel – National Lead

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Ülkelere göre dünya ham çelik üretim sıralaması	5
Tablo 2.2 Türkiye'nin ülkelere göre hurda ithalatı	11
Tablo 3.1 Sünger demir üretim yöntemleri	15
Tablo 3.2 Midrex yöntemi ile üretilen sünger demirin özellikleri	17
Tablo 3.3 HyL ürünlerinin kimyasal özellikleri	19
Tablo 3.4 SL/RN yönteminde elde edilen sünger demir bileşimi	21
Tablo 3.5 FASTMET yönteminde elde edilen sünger demir bileşimi.	23
Tablo 3.6 FASTMELT yöntemiyle elde edilen sıvı demirin özellikleri	23
Tablo 3.7 ITmk3 yöntemiyle elde edilen demir taneciklerinin bileşimi.	25
Tablo 3.8 Ülkelere göre dünya sünger demir üretimi sıralaması.	28
Tablo 3.9 Proseslere göre dünya sünger demir üretimi.	30
Tablo 4.1 Genel kömür sınıflandırması	35
Tablo 4.2 2005 yılı itibariyle dünya kömür rezervi ve Türkiye'nin payı	36
Tablo 4.3 Bölgeler itibariyle kömür üretimleri ve Türkiye'nin üretimi	37
Tablo 4.4 Türkiye'de linyit rezervlerinin bölgesel dağılımı ve ortalama kimyasal özellikleri	40
Tablo 4.5 Sünger demir üretimi için uygun kömür özellikleri	41
Tablo 4.6 Dünya doğalgaz rezervleri	42
Tablo 4.7 Türkiye doğalgaz potansiyeli	43
Tablo 4.8 Dünya demir cevheri rezervleri.....	45
Tablo 4.9 Dünya demir cevheri üretimi	46
Tablo 4.10 Türkiye işletilebilir demir cevheri rezervleri	47
Tablo 4.11 Türkiye sorunlu demir yatakları	49
Tablo 4.12 Sünger demir üretimi için gerekli demir cevheri özellikleri	51
Tablo 6.1 Deneylerde kullanılan parça cevherlerin ortalama bileşimi	58
Tablo 6.2 Deneylerde kullanılan linyit kömürünün kimyasal bileşimi	58
Tablo 6.3 Döner fırın redüksiyon deneyleri	61
Tablo 6.4 Redüksiyon deneyleri programı	62
Tablo 6.5 Redüksiyon deneyleri ve deney şartları.	64
Tablo 6.6 Difüzyon kontrollü model için aktivasyon enerjisi değerleri	88
Tablo A.1 Deneysel çalışmalardan elde edilen numunelerin kimyasal analizleri... ..	97

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Yıllara göre dünya çelik üretimi	4
Şekil 2.2 : Türkiye çelik üretim haritası	7
Şekil 2.3 : Türkiye'nin toplam ve proses bazında ham çelik üretim değişimi	7
Şekil 2.4 : Yöntemlere göre ham çelik üretim kapasitesi.....	8
Şekil 2.5 : Yöntemlere göre ham çelik üretimi	8
Şekil 2.6 : Ürünlere göre ham çelik üretim kapasitesi	9
Şekil 2.7 : Ürünlere göre ham çelik üretimi	9
Şekil 2.8 : Ham çelik üretiminin ürünlere göre değişimi	10
Şekil 3.1 : Midrex proses akım şeması	16
Şekil 3.2 : HyL-III prosesi akım şeması	18
Şekil 3.3 : SL/RN prosesi akım şeması	20
Şekil 3.4 : Döner fırın reaksiyonları.....	21
Şekil 3.5 : FASTMET prosesi akım şeması	22
Şekil 3.6 : ITmk3 prosesi akım şeması	24
Şekil 3.7 : Yıllara göre dünya sünger demir üretimi	26
Şekil 3.8 : 2006 proseslere göre dünya sünger demir üretimi	27
Şekil 3.9 : Bölgelere göre 2006 yılı sünger demir üretimi	28
Şekil 3.10 : Proseslere göre 2006 yılı dünya sünger demir kapasite kullanımı.	29
Şekil 3.11 : Sünger demir oranının artırılmasıyla çeliğin iz elementleri içeriğinin değişimi	31
Şekil 4.1 : Dünya fosil kaynaklarının tahmini tükeniş süresi.....	34
Şekil 4.2 : 2005 yılı kanıtlanmış dünya kömür rezervleri	35
Şekil 4.3 : Türkiye linyit üretimi	38
Şekil 4.4 : Türkiye linyit tüketimi	38
Şekil 4.5 : Türkiye linyit rezervlerinin kalitesi	39
Şekil 4.6 : Türkiye doğalgaz boru hattı sistemi	44
Şekil 5.1 : Bauer-Glaessner diyagramı ve Boudouard eğrileri	53
Şekil 6.1 : Yarı pilot deney düzeneği şematik diyagramı 1-Gaz kolektörü, 2- Dönme dişlileri, 3- Seramik reaksiyon tüpü, 4- Şarj malzemesi, 5- PtRh10/Pt termoçifti, 6- SiC dirençler	59
Şekil 6.2 : Laboratuvar tipi yüksek sıcaklık fırını.....	60
Şekil 6.3 : Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için sabit C_{fix}/Fe_{top} oranında (=0,40) artan sıcaklıkla birlikte metalizasyonun değişimi.	65
Şekil 6.4 : Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için sabit C_{fix}/Fe_{top} oranında (=0,45) artan sıcaklıkla birlikte metalizasyonun değişimi.	66
Şekil 6.5 : Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için sabit C_{fix}/Fe_{top} oranında (=0,50) artan sıcaklıkla birlikte metalizasyonun değişimi.	66
Şekil 6.6 : Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için sabit sıcaklıkta ($T= 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$), C_{fix}/Fe_{top} oranlarına bağlı olarak metalizasyonun değişimi.....	67

Şekil 6.7	: Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için sabit sıcaklıkta ($T= 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranlarına bağlı olarak metalizasyonun değişimi.....	68
Şekil 6.8	: Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için sabit sıcaklıkta ($T= 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranlarına bağlı olarak metalizasyonun değişimi.....	68
Şekil 6.9	: Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için sabit sıcaklıkta ($T= 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranlarına bağlı olarak metalizasyonun değişimi.....	69
Şekil 6.10	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için sabit $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranında ($=0,40$) artan sıcaklıkla birlikte metalizasyonun değişimi	70
Şekil 6.11	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için sabit $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranında ($=0,50$) artan sıcaklıkla birlikte metalizasyonun değişimi.	71
Şekil 6.12	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için sabit sıcaklıkta ($T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranlarına bağlı metalizasyonun değişimi	72
Şekil 6.13	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için sabit sıcaklıkta ($T=1150\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranlarına bağlı metalizasyonun değişimi	72
Şekil 6.14	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için sabit sıcaklıkta ($T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranlarına bağlı metalizasyonun değişimi	73
Şekil 6.15	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri için sabit $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranında ($=0,40$) artan sıcaklıkla birlikte metalizasyonun değişimi.	74
Şekil 6.16	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri için sabit $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranında ($=0,50$) artan sıcaklıkla birlikte metalizasyonun değişimi.	75
Şekil 6.17	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri için sabit sıcaklıkta ($T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranlarına bağlı metalizasyonun değişimi	76
Şekil 6.18	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri için sabit sıcaklıkta ($T=1150\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranlarına bağlı metalizasyonun değişimi	76
Şekil 6.19	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri için sabit sıcaklıkta ($T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranlarına bağlı metalizasyonun değişimi	77
Şekil 6.20	: Sabit sıcaklıkta artan süreye bağlı olarak metalizasyonda meydana gelen değişim (1250°C ve $0,40\text{ } C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranı).	80
Şekil 6.21	: Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için $0,40$ oranında farklı sıcaklıklar için $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi	82
Şekil 6.22	: Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için $0,50$ oranında farklı sıcaklıklar için $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi	82
Şekil 6.23	: Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için $0,40$ oranında redüksiyon hız sabiti ile sıcaklık ilişkisi.	83
Şekil 6.24	: Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için $0,50$ oranında redüksiyon hız sabiti ile sıcaklık ilişkisi.	83
Şekil 6.25	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için $0,40$ oranında farklı sıcaklıklar için $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi.	84
Şekil 6.26	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için $0,50$ oranında farklı sıcaklıklar için $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi.	84
Şekil 6.27	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için $0,40$ oranında redüksiyon hız sabiti ile sıcaklık ilişkisi.	85
Şekil 6.28	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için $0,50$ oranında redüksiyon hız sabiti ile sıcaklık ilişkisi.	85
Şekil 6.29	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri için $0,40$ oranında farklı sıcaklıklar için $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi.	86
Şekil 6.30	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri için $0,50$ oranında farklı sıcaklıklar için $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi.	86
Şekil 6.31	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri için $0,40$ oranında redüksiyon hız sabiti ile sıcaklık ilişkisi.	87

Şekil 6.32	: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri için 0,50 oranında redüksiyon hız sabiti ile sıcaklık ilişkisi.	87
Şekil B.1	: 0,40 oranında farklı sıcaklıklar için $[1-(1-R)^{1/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi (Sivas Divriği B Kafa demir cevheri).....	100
Şekil B.2	: 0,50 oranında farklı sıcaklıklar için $[1-(1-R)^{1/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi (Sivas Divriği B Kafa demir cevheri).....	100
Şekil B.3	: 0,40 oranında farklı sıcaklıklar için $[1-(1-R)^{1/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi (Malatya-Hekimhan-Hasançelebi I demir cevheri).	101
Şekil B.4	: 0,50 oranında farklı sıcaklıklar için $[1-(1-R)^{1/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi (Malatya-Hekimhan-Hasançelebi I demir cevheri).	101
Şekil B.5	: 0,40 oranında farklı sıcaklıklar için $[1-(1-R)^{1/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi (Malatya-Hekimhan-Hasançelebi II demir cevheri).....	102
Şekil B.6	: 0,50 oranında farklı sıcaklıklar için $[1-(1-R)^{1/3}]$ teriminin süreye bağlı değişimi (Malatya-Hekimhan-Hasançelebi II demir cevheri).....	102

SEMBOL LİSTESİ

ΔG°	: Standart Serbest Enerji Değişimi
P	: Basınç
T	: Sıcaklık
a	: Aktivite
R	: Evrensel Gaz Sabiti
t	: Süre
K_p	: Denge Sabiti
k	: Hız Sabiti
k_o	: Frekans Faktörü
E	: Aktivasyon Enerjisi

YERLİ DEMİR CEVHERLERİNİN SÜNGER DEMİR ÜRETİMİNE UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Sünger demir, demir oksitli cevher veya peletlerin katı veya gaz redükleyici kullanarak ergime olmaksızın metalik demire redüklenmesi sonucu elde edilen üründür. Bu ürün yüksek metalizasyon derecesine sahip, belirli oranlarda oksit gang içeren, gözenekli yapıda olup, kararlı bir bileşime sahip olması ve bünyesinde iz elementlerini az bulundurması nedeni ile kaliteli hurdanın yerine alternatif hammadde olarak elektrik ark fırınlarında ve ayrıca bazik oksijen fırınlarında şarj malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Ülkemizde çelik üretiminin % 71'i elektrik ark fırınları ile gerçekleştirilmektedir. Ülkemiz yurt içi hurda kaynakları yetersiz olduğundan, elektrik ark ocaklı çelik kuruluşlarımız için gerekli olan hurda büyük oranda ithalat yolu ile karşılanmaktadır. Bu nedenle özellikle yerli kaynaklarımızın kullanıldığı sünger demir üretimi ülkemiz için büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, farklı tenörlere sahip yerli demir cevherlerinin linyit kömürü ile redüklenerek sünger demir üretimine uygunluğunun saptanması amacıyla; C_{fix}/Fe_{top} oranı, sıcaklık ve zaman çalışma parametreleri olarak seçilmiş ve bu parametrelerin metalizasyona olan etkileri incelenmiştir.

Redüksiyon deneyleri, laboratuvar tipi yüksek sıcaklık fırınında gerçekleştirilmiştir. Belirli sıcaklık ve C_{fix}/Fe_{top} oranında, değişik zaman aralıkları için yapılan deneylerde fırından alınan numuneler kimyasal analize tabi tutulmuştur. Kimyasal analizler sonucu numunelerin metalik ve toplam demir miktarlarından yararlanarak, metalizasyon oranları hesaplanmıştır. Çalışma parametrelerinin metalizasyon oranına etkileri, gerçekleştirilen deney şartları için, metalizasyon değişim eğrileri yapılarak saptanmış ve ülkemiz cevherlerinin sünger demir üretimine uygunluğu incelenmiştir.

Sivas Divriği B Kafa yüksek tenörlü hematit demir cevheri ile gerçekleştirilen redüksiyon deneyleri sonucu % 88 metalizasyon değerleri elde edilmesine karşın parça cevherlerin heterojen yapılarından ötürü yüksek metalizasyon oranlarının elde edildiği optimum bir koşul bulunamamıştır. Uygun koşullarda yapılacak çalışmalarla yüksek tenörlü demir cevherlerin sünger demir üretiminde kullanılabilecekleri saptanmıştır. Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) - (II) orta ve düşük tenörlü manyetit demir cevherleriyle yapılan deneyler sonucu metalizasyon oranları % 65–70 mertebelerinde bulunmuştur. Elde edilen bu metalizasyon değerleri endüstriyel uygulamalar için düşük seviyelerde kalmıştır. Bu cevherlerle yapılan çalışmalarda yüksek metalizasyon değerlerine ulaşılamamasının nedeni, gang içeriği yüksek olan cevherlerle gerçekleştirilen deneylerde yüksek sıcaklıklarda oluşan ve redüksiyonu zor olan demir - silikat esaslı bir cürufun (fayalitik cüruf) oluşması olarak

düşünülmektedir. Oluşan fayalitik cüruf sonucu redüksiyon yavaşlamış, metalizasyon oranları orta ve düşük tenörlü cevherlerle yapılan çalışmalarda düşük seviyelerde kalmıştır. Ayrıca bu cevherle yapılan çalışmalarda, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneyler sırasında artan süre ile birlikte kısmi ergime meydana geldiği belirlenmiştir. Kısmi ergimenin bir sonucu olarak, metalik demir ile cüruf ayrımı tam olarak gerçekleştirilememiş ve grafit pota tabanında yapışma problemi ortaya çıkmıştır.

THE SUITABILITY INVESTIGATION OF DOMESTIC IRON ORES FOR SPONGE IRON PRODUCTION

SUMMARY

Sponge iron is produced, below the melting point of the iron, by the reduction of iron oxide containing ores or pellets to the metallic iron. The reducing agents can be solid or gas. The characteristic properties of sponge iron are high metallization degree, porous structure, certain amounts of oxide gangue in the structure, stability in composition and very low impurity content. Because of these suitable properties, sponge iron is alternatively used instead of scrap in electric arc furnaces and basic oxygen furnaces.

In terms of production processes 71 % of the total steel production of Türkiye is realized by electric arc furnaces. Turkish steel producers are the main scrap consumers due to the insufficient domestic resources. Sponge iron production by using domestic resources is vital for Turkish iron and steel industry.

In the present work, three different domestic iron ores reduced with lignite coal to investigate their suitability for sponge iron production. In the experimental studies different operation parameters were selected being $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{tot}}$ ratio, temperature and time, respectively to determine their effects on metallization.

A laboratory scale high temperature furnace was used to carry out the reduction experiments. In order to observe the effects of reduction time on the metallization of sponge iron, the experiments done for different time periods at a fixed temperature and $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{tot}}$ ratio. The samples were chemically analyzed and their metallic and total iron contents were determined. Accordingly, the metallization degrees were calculated. The effects of operation parameters were either determined by drawing the variations of the metallization of the samples depending on the parameters or shown by taking microstructural photographs of the samples, reduced in different conditions.

88 % metallization degree was calculated in reduction experiments realized by using Sivas Divriği B Head hematite lump ore. Due to the heterogeneous structure of the lump ores an optimum condition for high metallization couldn't be obtained. Consequently, Sivas Divriği B Head lump ores can be used for sponge iron production.

65-70 % metallization degrees were realized for Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) and (II) magnetite lump ores. Those values are not suitable for industrial applications. The reason for low metallization degrees can be given as; high gangue content of the lump ore and the formation of non reducible iron silicate slag (fayalite). The formation of fayalite type slag reduces the reduction rate for Malatya-

Hekimhan-Hasançelebi (I) and (II) magnetite lump ores. Furthermore, at elevated temperatures partial melting has been observed and sticking problem appeared at the bottom of the crucible for Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) and (II) magnetite lump ores.

1. GİRİŞ

Günümüz demir – çelik teknolojisine bakıldığında çelik üretiminde genel olarak iki farklı yol izlendiği görülmektedir. Bunlar doğal hammaddelerden başlayarak son ürünlere kadar giden entegre demir çelik üretim tesislerinde, demir cevheri ve kok kömürü ile çelik üretimi veya elektrik ark fırınlı sistemlerde hurdanın (veya sünger demir / sıcak briketlenmiş demir gibi hurda benzeri malzemenin) ergitilmesi ile son ürünlere kadar giden mini çelik olarak adlandırılan yöntemlerdir. Üretilen çelik; uzun çelik ürünleri (yuvarlak inşaat demirleri, hafif, orta ve ağır profiller vb.), yassı çelik ürünleri (sıcak haddelenmiş yassı çelik, levha, soğuk haddelenmiş yassı çelik, kalay kaplı yassı çelik, galvanizli yassı çelik vb.), vasıflı çelik ürünleri (makine takım çelikleri, paslanmaz çelik vb.) olarak üç ana başlık altında sınıflandırılmakta ve kullanım alanı bulmaktadır.

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. 1950 yılında çelik üretimi 200 milyon ton olup bu üretimin % 90’ı entegre tesislerde, % 10’u ise EAF ile üretilmekteydi [1]. Elektrik ark fırınları ile çelik üretimi 1980 yılında dünya çelik üretiminin % 22’sini oluştururken, günümüzde dünyada sıvı çeliğin % 65’i entegre tesislerde, % 32’si ise elektrik ark fırınlarında üretilmektedir [2]. Ülkemiz çelik üretiminde elektrik ark fırınlarının payı ise %71’dir. EAF’deki bu gelişme daha düşük yatırım maliyeti (entegre tesisin 1/3’ü), 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 [3].

EAF’deki bu gelişmelerin sonucunda hurda temini ve kullanımında yıllar geçtikçe problemler ortaya çıkmaya başlamıştır. Hurdaların özellikle 1970’li yıllardan sonra kimyasal bileşimlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir ve bu olumsuz değişimler günümüzde de devam etmektedir [3]. Ülkemizde yurt içi kaynakları

yetersiz olduğundan, elektrik ark ocaklı çelik kuruluşlarımız bugün dünya hurda piyasasının en önemli müşterilerinin başında gelmektedir. Türkiye'de üretilen toplam ham çelik için yüksek miktarlarda çelik hurdasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Sünger demir, demir cevherlerinin katı veya gaz redükleyici kullanımı ile ergime meydana gelmeden metalik demire redüklenmesinden oluşan bir üründür. Sünger demir üretimine ve elektrik ark fırınlarında kullanımına olan talep incelendiğinde, talebin kararsız bir değişim gösterdiği anlaşılmaktadır [4]. Bunda, sünger demirin yerine ikame edilebildiği hurda fiyatlarındaki büyük artış ve düşüşler önemli rol oynamıştır [5].

Hurda fiyatlarındaki ve sünger demire olan talepteki değişimlerin sebepleri aşağıda açıklanmaktadır [6, 7].

Demir çelik tesislerinde, kontinü döküm ve kontinü haddeleme gibi yeni yöntemlerin kullanılmasıyla, tesis içerisinde geri dönen hurda miktarlarında önemli ölçüde bir düşüş kaydedilmiştir.

Dünya hurda ticaretini elinde bulunduran ülkelerde hurdaya dayalı çelik üretim kapasitelerinin artmasıyla, önemli miktarda çelik hurdası bu ülkelerde kullanılmaktadır.

Kaliteli çeliğe olan talebin giderek artmasına paralel olarak, daha kaliteli ve yüksek mukavemetli çeliklerin üretilmesi sonucunda, hurda geri dönüş süreleri uzamıştır.

Doğal hammaddeye dayalı demir çelik tesislerinin kapasite, yatırım, yer ve çevre sorunları, ulaşım, işletmeye alma zamanı gibi sorunlarla karşı karşıya kalmaları neticesinde, EAF yöntemi ile çelik üretim kapasiteleri önemli oranda artmıştır.

Bunlara bağlı olarak, hurda gereksinimi yüksek olan ileri demir çelik üreticisi ülkeler, denizaşırı ülkelerde özellikle, demir cevheri kaynaklarına ve bilhassa, doğalgaz veya kömür kaynaklarına sahip olan yörelerde sünger demir üretim tesisi yatırımlarına önem vermekte ve gelecekteki ihtiyaçlarını da bu kaynaklardan sağlamayı planlamaktadırlar.

Ülkemizde mevcut demir cevheri ve linyit kömürü yatakları kullanılarak, sünger demir üretiminin gerçekleştirilmesi mümkündür. Kurulacak bir sünger demir tesisi,

elik retim fırınlarına kaliteli şarj maddeleri sunacaktır. Bunun yanı sıra, son zamanlarda hurda fiyatlarının önemli ölçüde artması ve temin edilmesinin güçleşmesi, sünger demir üretimini giderek artan bir ihtiyaç haline getirmektedir.

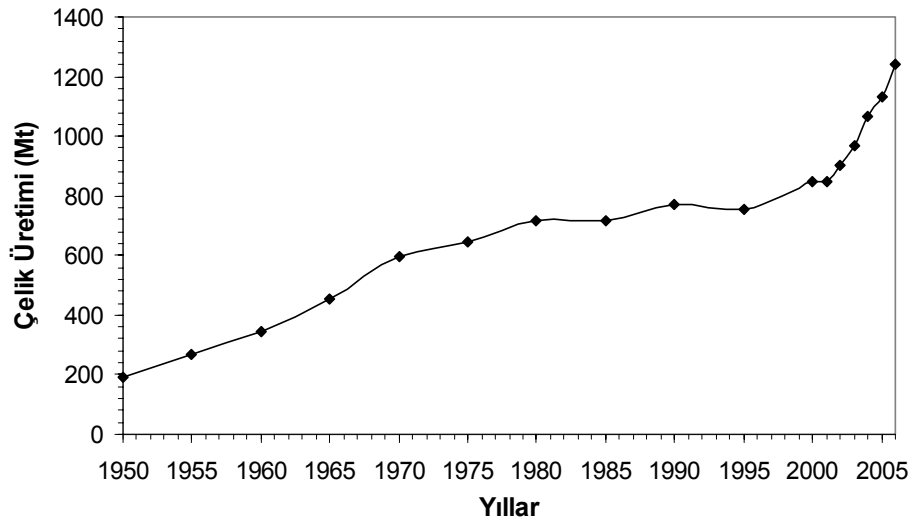
Bu çalışmada, ülkemiz demir cevherleri ve kömür kaynakları kullanılarak demir elik endüstrimize yeni hammaddeler sağlanmasına yönelik araştırmalar yapılmıştır. Bu amaçla üç farklı tenöre sahip yerli demir cevherleri (Sivas-Divriği B Kafa yüksek tenörlü, Malatya-Hekimhan-Hasançelebi orta ve düşük tenörlü demir cevherleri) ve Soma-Kısrakdere yöresi linyit kömürü kullanılmıştır. Laboratuar tipi bir yüksek sıcaklık fırınında redüksiyon deneyleri gerçekleştirilerek; sıcaklık, süre ve C_{fix}/Fe_{top} oranı gibi parametrelerin metalizasyona olan etkileri incelenerek bu cevherlerin sünger demir üretimine uygunlukları araştırılmıştır.

2. DÜNYA VE TÜRKİYE DEMİR - ÇELİK ÜRETİMİ

Bir demir (Fe) karbon (C) alaşımı olan çelik dünyada en çok ve yaygın olarak kullanılan bir malzeme olarak ülkelerin kalkınmalarında önemli rol oynamaktadır. Gün geçtikçe çeliğe olan talep artmakta ve buna paralel olarak da çelik üretim sektörü kapasitesini hızla büyütmektedir. Demir-çelik sektörü incelendiğinde sıvı ham çelik üretiminin, demir cevherinden veya hurdadan geri dönüşüm olmak üzere iki şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir. İlk yöntem entegre tesislerde gerçekleştirilen çelik üretimi olup bu yöntemle primer hammaddeler olan demir cevheri ve kok kömürü kullanılarak sıvı ham çelik üretimi yapılmaktadır. İkinci yöntem ise elektrik ark ocaklarında hurda kullanılarak sıvı ham çeliğin üretildiği çelik üretim yöntemidir.

2.1 Dünya Demir - Çelik Üretimi

Dünya çelik üretimi, Çin Halk Cumhuriyeti'nin öncülüğünde, 2000 yılından sonra hızlı bir yükseliş sürecine girmiştir. Şekil 2.1'de yıllara göre dünya çelik üretiminin artışı görülmektedir.



Şekil 2.1: Yıllara Göre Dünya Çelik Üretimi [2].

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi 1950 yılında 189 milyon ton olan dünya ham çelik üretimi, 2006 yılında 1.239 milyar ton olarak gerçekleştirilmiştir.

2000 yılında 847 milyon ton seviyesinde bulunan dünya ham çelik üretimi, 2006 yılında % 46,2 oranında artışla, 1.239 milyar ton seviyesine yükselmiştir. Aynı dönemde Çin Halk Cumhuriyeti’nin üretimi ise, % 229 oranında artışla, 127 milyon ton seviyesinden, 418,8 milyon ton seviyesine ulaşmıştır. Başka bir ifade ile son 6 yıl içerisinde, dünya çelik üretimindeki yaklaşık 400 milyon ton civarındaki artışın % 74,5 civarındaki bir bölümü, Çin’deki artıştan kaynaklanmıştır. Çin Halk Cumhuriyeti hariç tutulduğunda, son 6 yıl içerisinde, dünya ham çelik üretimindeki toplam artışın yalnızca, % 13,9 seviyesinde kaldığı görülmektedir. Diğer bölgelerdeki ölçülü artışlara karşılık, Çin’in üretimini son derece yüksek oranlarda arttırması, Çin’in dünya ham çelik üretimi içerisindeki payını % 15 seviyesinden, % 33,8 seviyesine yükseltmesi sonucunu doğurmuştur. Aynı dönemde, Türkiye’nin üretimi ise, % 63 oranında artışla, 14,3 milyon tondan, 23,3 milyon ton seviyesine yükselmiş ve Türkiye, Çin hariç dünya ham çelik üretimindeki artışın, 10 misli daha iyi bir performans sergilemiştir [8].

Tablo 2.1’de 2005 – 2006 dünya çelik üretiminde üst sırada bulunan ülkeler ve Türkiye’nin durumu gösterilmektedir.

Tablo 2.1: Dünya Ham Çelik Üretim Sıralaması [2].

Ülke	2006		2005
	Sıralama	Miktar (Mt)	Miktar (Mt)
Çin Halk Cum.	1	418,8	353,4
Japonya	2	116,2	112,5
ABD	3	98,5	94,9
Rusya	4	70,6	66,1
Güney Kore	5	48,4	47,8
Almanya	6	47,2	44,5
Hindistan	7	44,0	40,9
Ukrayna	8	40,8	38,6
İtalya	9	31,6	29,3
Brezilya	10	30,9	31,6
Türkiye	11	23,3	21,0
Tayvan	12	20,1	18,9
Fransa	13	19,9	19,5
İspanya	14	18,3	17,8
Meksika	15	16,3	16,2

Tablo 2.1’de de görüldüğü gibi Çin Halk Cumhuriyeti dünya çelik üretiminde önemli bir konumda olup sektördeki tüm gelişmeler Çin Halk Cumhuriyeti’nin çelik ihtiyacına bağlı olarak değişmektedir. Uzun yıllardır talebin çok üzerinde bir kapasiteye sahip olan dünya çelik sektörü birkaç yıldan bu yana Çin’in büyük etkisi ile inanılmaz bir değişim içine girmiştir. Dünya demir - çelik üretimi yöntemlere göre incelendiğinde üretimin daha çok yüksek fırın - konverter yöntemiyle entegre tesislerde gerçekleştirildiği görülmektedir. 2005 yılında üretilen toplam çeliğin % 65’i entegre tesislerde, % 32’si ise EAF’li tesislerde gerçekleştirilmiştir [2].

2.2 Türkiye Demir - Çelik Üretimi

Altyapısı 1930’lu yıllarda atılan Türk demir çelik sektörü, Türk ekonomisinin gelişmesinde ve endüstrileşmesinde önemli bir rol üstlenmiştir. Demir çelik üretimi ilk defa 1928 yılında, savunma sanayisinin çelik ihtiyacını karşılamak amacıyla, şu anda MKEK olarak bilinen tesiste, Kırıkkale’de başlamıştır.

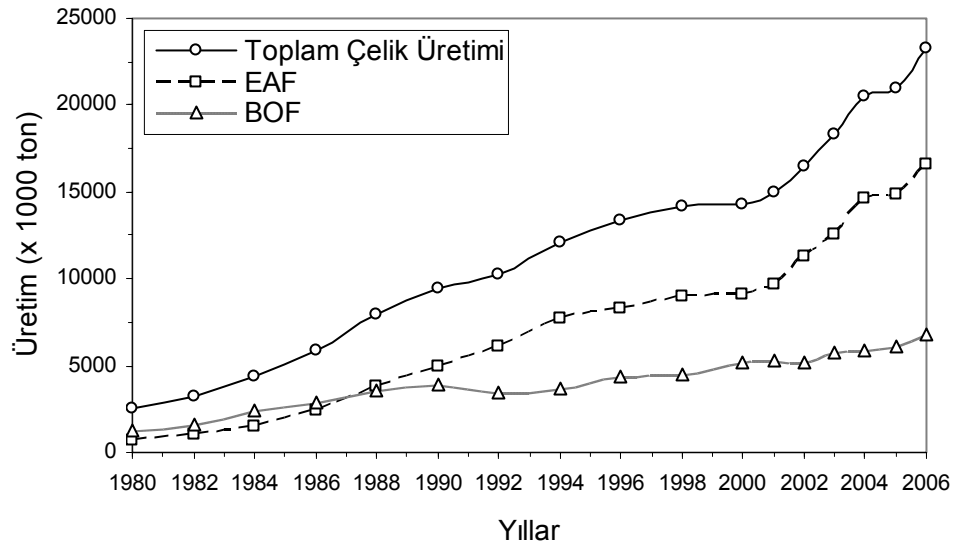
Türkiye’nin ilk entegre demir çelik tesisi olan Karabük Demir Çelik Fabrikaları (Kardemir), 1937 yılında işletmeye açılmıştır. Türkiye’nin yassı ürün talebini karşılamak için, ikinci entegre tesisi olan Ereğli Demir Çelik Fabrikaları (Erdemir), 1965 yılında üretime başlamıştır. 1977 yılında, uzun ürün ve yarı mamul talebini karşılayabilmek amacıyla, Türkiye’nin üçüncü entegre tesisi, İskenderun Demir Çelik Fabrikaları (İsdemir) işletmeye açılmıştır.

Türk demir çelik sektörü 2006 yılında, her birinin yıllık kapasitesi 1.000.000 ton ile 3.000.000 ton arasında değişen üç adet entegre tesis ve kapasiteleri 60.000 ton ile 2.000.000 ton arasında değişen 18 adet elektrik ark ocaklı tesiste gerçekleştirdiği, 23,3 milyon ton ham çelik üretimi ile, Dünya çelik üretiminde 11. Avrupa’da ise 3. sırada yer almıştır. Şekil 2.2’de Türkiye çelik üretim tesisleri ve yerleri gösterilmektedir [9].



Şekil 2.2: Türkiye Çelik Üretim Haritası [9].

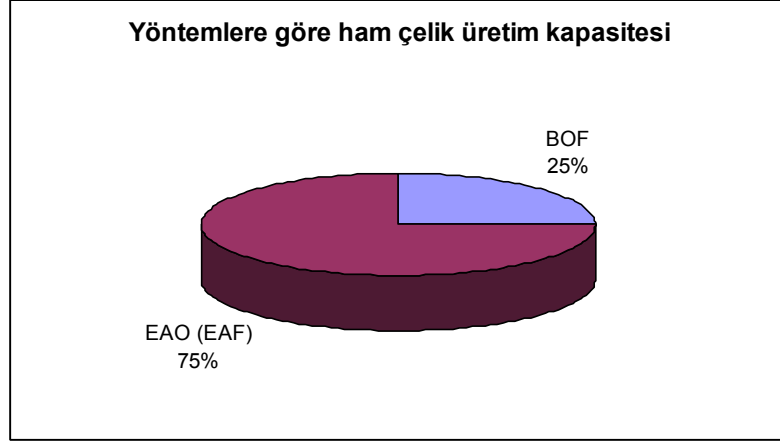
Şekil 2.3’de ülkemiz toplam çelik üretiminin yıllara göre değişimi yöntemler için verilmektedir.



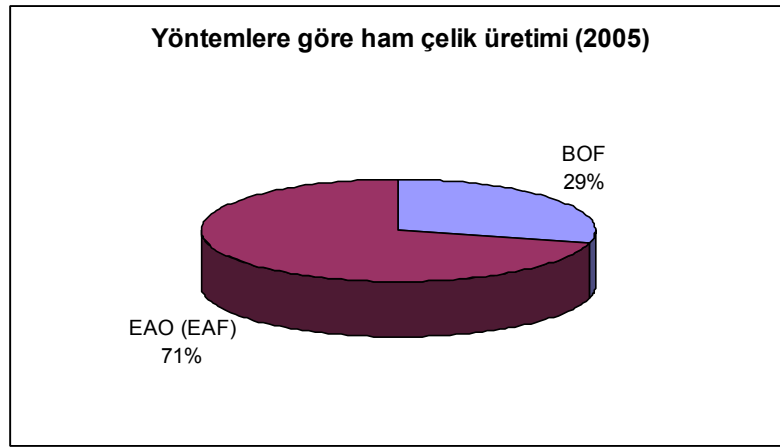
Şekil 2.3: Türkiye’nin Toplam ve Proses Bazında Ham Çelik Üretim Değişimi [9, 10].

Şekil 2.3’den görüldüğü gibi entegre tesislerin toplam üretimdeki payı 1990 yılından itibaren düşüş gösterirken, elektrik ark fırını ile çalışan tesislerin toplam üretimdeki payı hızlı bir şekilde artmıştır.

2005 yılı verilerine göre, 24,7 milyon tonluk ülke ham çelik üretim kapasitesinin % 25'ine tekabül eden 6,3 milyon tonu entegre tesislere, % 75'ine tekabül eden 18,4 milyon tonu ise 18 adet elektrik ark ocaklı tesise aittir (Şekil 2.4). Üretim yöntemi açısından, 2005 yılında toplam üretimin % 71'i elektrik ark ocaklı tesisler tarafından, geriye kalan % 29'u ise entegre tesisler tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.4: Yöntemlere Göre Ham Çelik Üretim Kapasitesi [9].

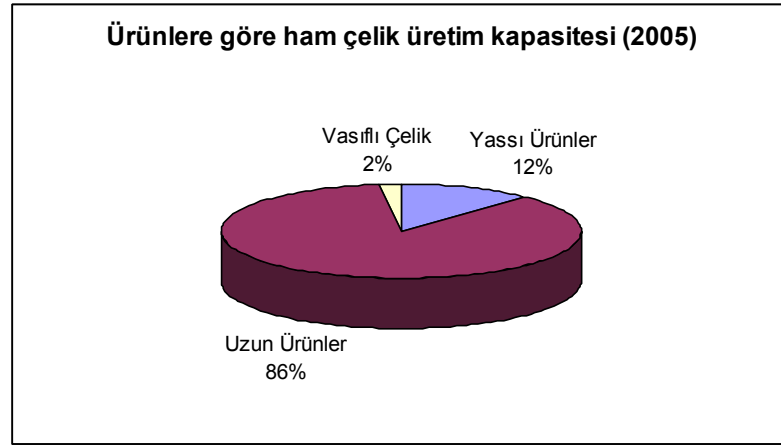


Şekil 2.5: Yöntemlere Göre Ham Çelik Üretimi [9].

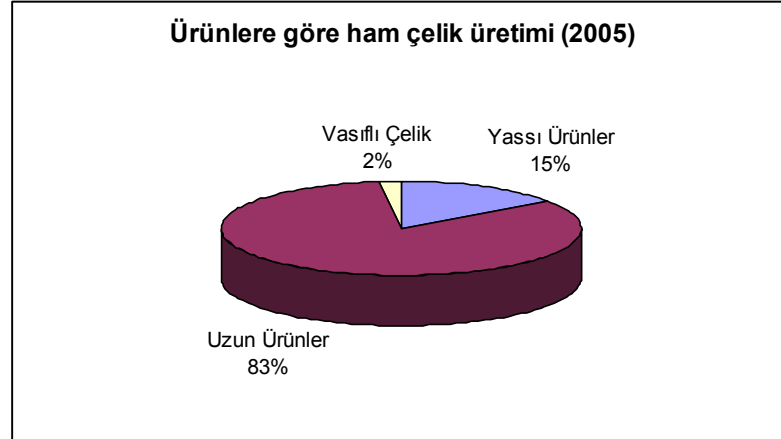
Başlıca çelik ürünlerini, uzun çelik ürünleri (yuvarlak inşaat demirleri, hafif, orta ve ağır profiller vb), yassı çelik ürünleri (sıcak haddelenmiş yassı çelik, levha, soğuk haddelenmiş yassı çelik, kalay kaplı yassı çelik teneke, galvanizli yassı çelik vb), vasıflı çelik ürünleri (makine takım çelikleri, paslanmaz çelik vb) olarak üç ana başlık altında toplamak mümkündür.

Ülkemizde ürünlere göre ham çelik kapasitesi ve üretimi Şekil 2.6 ile Şekil 2.7’de gösterilmektedir.

Ülke ham çelik üretim kapasitesinin, 21,2 milyon tonluk bölümü (% 86) uzun ürün üretimine, 3 milyon tonluk bölümü (% 12) yassı ürün üretimine, geriye kalan 492.000 tonluk bölümü ise (% 2) vasıflı çeliğe yöneliktir. Yine aynı dönemde, ham çelik üretiminin, % 83’ü uzun ürünlere, % 15’i yassı ürünlere ve % 2’si ise vasıflı çeliğe yönelik yapılmıştır.

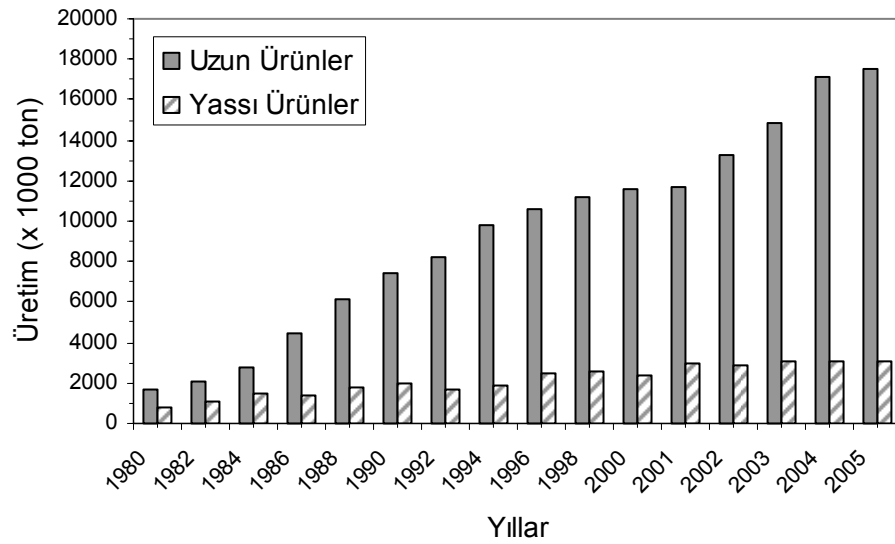


Şekil 2.6: Ürünlere Göre Ham Çelik Üretim Kapasitesi [9].



Şekil 2.7: Ürünlere Göre Ham Çelik Üretimi [9].

Şekil 2.8’de ülkemiz ham çelik üretiminin ürünlere göre değişimi 1980 – 2005 yılları için gösterilmektedir.



Şekil 2.8: Ham Çelik Üretiminin Ürünlere Göre Değişimi [9, 10].

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi 1980 yılında toplam çelik üretiminin % 35’i yassı ürün iken bu tarihten sonra kurulan elektrik ark fırınlı tesislerin uzun ürün üretmeye yönelik olması nedeni ile bu rakam günümüzde % 15’e düşmüştür.

2002 yılından itibaren, Çin’in ham çelik üretimini hızlı bir şekilde arttırmaya başlaması, dünyanın en büyük cevher ve kömür üreticisi konumunda bulunmasına rağmen, global piyasalardan yüksek miktarlarda hammadde çekmeye başlamasına ve girdi fiyatlarında arz sıkıntısı yaşanmasına yol açmıştır. Artan hammadde talebine paralel olarak, 2003 yılının Haziran ayında 110 \$/ton seviyelerinde bulunan hurda fiyatları, 2004 yılının Şubat ayında 270 \$/ton seviyesine, 2004 yılının sonlarına doğru ise, 300 \$/ton seviyelerine kadar yükselmiştir. Yüksek talep seviyesinin devam etmesi nedeniyle, hurda fiyatlarındaki artışın, 2007 yılı sonuna kadar devam edeceği tahmin edilmektedir.

En büyük hurda dış alımı yapan ülkeler incelendiğinde bunların özellikle gelişmekte olan ülkeler olduğu görülmekte ve bu ülkelerin başını en büyük hurda ithalatçısı konumunda bulunan Türkiye çekmektedir. Hurda kaynaklarından dönen hurda, sürekli dökümün payının artışına bağlı olarak azalma göstermektedir. Aynı azalma özellikle imalat endüstrilerinin gelişmiş olduğu ülkelerde işlem hurdaları içinde geçerlidir. Buna karşın dünya çapındaki ekonomik gelişmelere bağlı olarak toplam hurda miktarının gelecekte artış göstereceği açıktır. Bu noktada da kullanım ömrü ön plana çıkmakta ve bu konuda sağlıklı tahmin yapılması önem kazanmaktadır [11].

Türkiye açısından konunun önemi ise, günümüzde ve gelecekte çelik üretiminin büyük oranda hurdaya dayalı olarak gerçekleştirilecek olması ve günümüzde gerekli hurdanın büyük oranlarda ithalat yolu ile karşılanmasından açıkça görülmektedir. Tablo 2.2’de Türkiye’nin ülkelere göre hurda ithalatı görülmektedir.

Tablo 2.2: Türkiye’nin Ülkelere Göre Hurda İthalatı [9].

	2003		2004		2005*	
	ton	1000\$	ton	1000\$	ton	1000\$
AB (25)	5,408,572	766,020	3,258,093	733,704	3,464,178	805,020
ABD	780,287	112,344	572,173	144,555	1,369,829	324,779
Rusya	2,052,196	295,848	3,660,087	851,312	3,968,573	952,064
Ukrayna	1,063,168	147,533	1,322,849	315,661	674,246	161,393
Gürcistan	1,123,608	165,402	760,758	178,648	576,847	134,553
Romanya	1,596,824	236,694	1,508,321	366,240	1,201,349	288,460
Diğerleri	932,830	131,935	1,810,267	423,628	1,905,668	441,485
TOPLAM	12,957,485	1,855,776	12,892,548	3,013,748	13,160,690	3,107,754

* Geçici Rakamlar

Tablo 2.2’de görüldüğü gibi Türkiye hurda konusunda dışa bağımlı bir ülke konumunda olup başlıca Avrupa Birliği Ülkeleri, Rusya ve ABD’den büyük miktarlarda hurda ithalatı gerçekleştirmektedir.

Çelik üretiminin yarısından çoğunu hurda üzerinden gerçekleştiren ülkemiz açısından satın alınan hurdanın, nereden ve hangi fiyatla satın alınacağını yanı sıra son çelik kalitesini yakından etkilemesi nedeniyle, hurda kalitesinin de çok önemli ve üzerinde durulması gerekli bir konu olduğu açıkça ortaya çıkmaktadır. Uzun vadede çelik üretimindeki artışı mini çelik tesisleri ile gerçekleştirmek durumunda olan ülkemiz açısından dış alım hurdaya olan bağımlılığın hurdanın yerine alternatif olarak kullanılabilecek sünger demir üretim tesislerinin teşvik edilmesi ile azaltılması gerekmektedir [11].

3. SÜNGER DEMİR ÜRETİM TEKNOLOJİSİ

Çelik üretiminde oluşan darboğazlar yeni proseslerin ve gelişmelerin ortaya çıkmasına neden olan en önemli etkidir. Yüksek fırınlarda kullanılamayan cevherler ve koklaşamayan kömürleri değerlendirmek amacıyla günümüze kadar çok sayıda proje geliştirilmiştir. Bu projeler arasında üzerinde en çok çalışılan teknoloji; Doğrudan İndirgenmiş Demir cevheri (Direct Reduced Iron - DRI) teknolojisidir. Geleneksel entegre Demir - Çelik tesislerinin uzun kuruluş süresi ve büyük yatırım gerektirmesi, kok üretimine elverişli kömürlerin miktarı ve kalitesinin azalması ayrıca fiyatlarının yükselmesi, hurda kalitesinin gittikçe düşmesi; buna karşılık hurda fiyatlarında görülen artış, yeterli miktarda hurda bulamama sorunu, kaliteli çeliğe olan ihtiyaç sonucu yüksek mukavemetli çeliklerin üretilmesiyle beraber hurda geri dönüş süresinin uzaması, sünger demir ürününün kara ve deniz ulaşımı ile kolay ve zarar görmeden taşınabilmesi, ürünün peletler halinde olması gibi etkenlerle sünger demir üretimi günümüzde önem kazanmaya devam etmektedir.

3.1 Sünger Demir Üretimine Giriş

Demir oksitli cevher ve peletlerin, redükleyici gaz veya katı yakıt yardımı ile bir reaktör, döner fırın veya şaft fırınında 1000 °C civarında ergime olmaksızın metalik demire redüklenmesi sonucunda elde edilen ürüne sünger demir denilmektedir [12].

Demir cevherinin direkt redüksiyon ile redüklenmesi fikri, cevherdeki oksijenin (H_2+CO) ile gireceği reaksiyonla açığa çıkarılmasının başarılmasıyla çelik üreticilerinin ve araştırmacılarının zihinlerinde yer almaya başlamıştır [12].

İlk sünger demir üretim tesisi, 1873 yılında İngiltere’de kurulmuş, dört yıllık bir çalışmadan sonra üretim maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı kapatılmıştır [13].

Bu konuda ilk endüstriyel patent 1896'da Henry Jones tarafından alınmıştır. Jones damıtma haznelerinden oluşan bir fırında demir cevherini kömürle karıştırarak

dışarıdan sıcak gazla ısıtmak suretiyle redüklemiş ve zenginleşen cevheri hava ile soğutarak dışarı almıştır [13].

Jones'dan sonra bu konuyla ilgili 15 – 20 adet çeşitli patentler alınmıştır. Ancak bu konuda ilk endüstriyel uygulamalar 1960'dan sonra başlamış ve 1970'lerden sonra önemli gelişmeler kaydetmiştir [13].

Demir oksit cevherler veya peletler, 800 – 1050 °C arasındaki sıcaklıklarda gaz veya katı redükleyiciler kullanılarak, bir reaktör, şaft fırını veya döner fırında redüklenerek sünger demir elde edilir.

Demir oksitlerin, H_2/H_2O veya CO/CO_2 gaz karışımları ile redüksiyon reaksiyonlarının aşağıda verilen şekilde gerçekleştiği öngörülmektedir [12].



} Redüksiyon

Reaksiyon (3.1; 3.2) sonucu açığa çıkan serbest demir, prosesin soğuma aşamasında ortamda mevcut olan karbon ve karbonlu bileşikler ile reaksiyona girerek karbonlanmakta ve böylece Fe_3C (demir karbür) oluşmaktadır.



} Karbür oluşumu

Bu reaksiyonlar (3.3; 3.4) neticesinde ortaya çıkan Fe- Fe_3C karışımıyla demir oksit karışımından meydana gelen ürüne, direkt redüklenmiş demir (DRI) veya sünger demir adı verilmektedir [12]. Bu proses sonucu elde edilen ürün olan sünger demir, dünyada büyük oranda EAF yöntemi ile çelik üretiminde hurdanın yerine ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı dünyada sünger demire olan talep, bu ürünün elektrik ark fırınlarında, bazik oksijen fırınlarında, dökümhanelerde ve pota metalurjisi gibi birçok alanda kullanılabileceğinin anlaşılmasından sonra artmıştır.

Sünger demirin sahip olduğu başlıca özellikler şu şekilde sıralanabilir;

- Poröz bir yapıya sahiptir.
- Yoğunluğu beslenen oksidin yoğunluğundan daha düşük, özgül yüzeyi ise daha fazladır.
- Yoğunluğu $1,5 - 4 \text{ g/cm}^3$, izafi yoğunluğu $1,5 - 1,9 \text{ t/m}^3$ tür.
- Özgül yüzey alanı $0,4 - 0,5 \text{ m}^2/\text{g}$ dır.
- Dağılma mukavemeti $50 - 110 \text{ kg/cm}^2$ dir.
- Metalizasyon derecesi kullanılan yöntemle bağı olarak % 85 – 95 arasındadır.
- Kararlı bir bileşime sahiptir.
- Hurdadan kaynaklanan iz elementlerini yapıda bulundurmaz. Daha temiz çelik elde edilmesine olanak sağlar.
- Yüksek yığın ağırlığı vardır ve kolay depolanır.
- Kolay taşınım özelliğine sahiptir [12].

Direkt redüklenmiş demirin başlıca kullanım alanları şu şekilde sıralanabilir;

- EAF yöntemi ile yüksek kalitede ürünler elde etmek için kullanılan düşük iz elementi içeren bir şarj malzemesidir.
- Hurda sıkıntısı olduğu zaman elektrik ark fırınında metalik şarj kaynağı olarak doğrudan kullanabilme imkânı sağlar.
- Gerektiğinde bazik oksijen fırınına soğutucu amaçlı olarak ilave edilebilir.
- Kok fabrikası ya da yüksek fırınların bakımı sırasında diğer yüksek fırınlarda üretimi arttırmak amacıyla kısa süreli yüksek fırına şarj edilebilir.
- Uzun dönemde yüksek fırının üretimini arttırmak ve kok tüketimini azaltmak amacıyla şarj yapılabilir [14].

3.2 Sünger Demir Üretim Yöntemleri

Sünger demir üretim yöntemleri kullanılan redükleyici türüne göre iki ana gruba ayrılır;

1. Gaz redükleyici kullanılan yöntemler
2. Katı redükleyici kullanılan yöntemler

Dünyada mevcut sünger demir üretim yöntemleri ve bu yöntemlerde kullanılan fırın, redükleyici ve cevher türü Tablo 3.1’de özetlenmektedir.

Tablo 3.1: Sünger Demir Üretim Yöntemleri [15].

Fırın Türü	Redüktan	Cevher Türü	Yöntem
Düşey Fırın	Gaz	Pelet ve Parça Cevher	HYL - III, Midrex
Akışkan Yatak			Fior
Döner Fırın	Kömür	Pelet ve Parça Cevher	SL/RN, CODIR, DRC
Döner Hazneli Fırın	Kömür	Parça Cevher ve Atık	FASTMET/FASTMELT

Sünger demir üretim yöntemleri gaz ve katı redükleyici yöntemler olarak iki ana grupta incelenerek, prosesler sırasıyla açıklanacaktır.

3.2.1 Gaz redükleyici kullanılan yöntemler

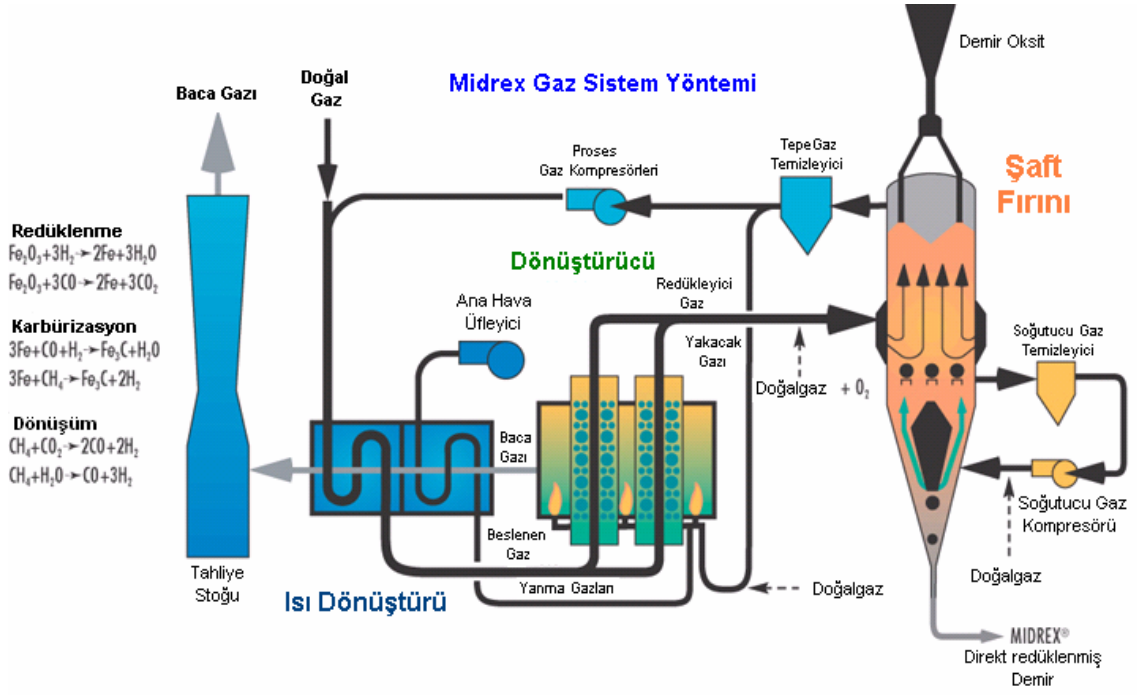
Redükleyici olarak, gaz esaslı maddelerin kullanıldığı yöntemlerdir. Dünya sünger demir üretiminin yaklaşık % 80’inde bu yöntem kullanılmaktadır. Yöntemin kolay kontrol edilmesi, proseslerin verimli gerçekleşmesi ve oluşan ürünün yüksek kalitede (Karbon oranı % 1–3 ve düşük kükürt % 0,005) olmasından dolayı gaz esaslı yöntemler daha çok tercih edilmektedir. Gaz redükleyici kullanılan yöntemler arasında en yaygın olanları şunlardır;

1. Midrex
2. HyL-III

3.2.1.1 Midrex yöntemi

Ticari açıdan en başarılı gaz redükleyici kullanılan yöntemdir. 1986 yılında sünger demir üretiminin % 54'üne, 1988 yılında % 64'üne, 2003 yılında % 64,6'sına ve 2006 yılında ise % 59,7'sine sahip olmuştur [16].

Bu yöntemin başarısı, temelde teknik tasarımının iyi olması ve düşük enerji tüketimine bağlıdır. Şekil 3.1' de Midrex prosesinin akım şeması görülmektedir.



Şekil 3.1: Midrex Proses Akım Şeması [17].

Fırının tepe bölgesinden fırına şarj edilen malzeme sırasıyla ön ısıtma, redüksiyon ve soğutma bölgelerinden geçer. Redüksiyon gazı % 95 hidrojen ve karbon monoksit gazları içerir. Bu gaz 760 °C – 927 °C sıcaklığına ısıtılır ve fırının alt bölgesinde bulunan redükleme bölgesinin altından fırına verilir. Fırının tepe bölgesinden kısmen harcanmış redükleyici gaz (yaklaşık % 70 H₂ + CO) çıkar ve tekrar sıkıştırılır, daha sonra doğalgaz ile zenginleştirilerek 400 °C sıcaklığına ısıtılır, buradan da dönüştürücüye gönderilir. Dönüştürücü gaz karışımını tekrar % 95 H₂ + CO içeren gaza dönüştürerek fırın için redüksiyon gazını oluştur. Soğuma bölgesinden soğutucu gazlar ters akım ile DRI' ya verilerek soğuma sağlanır. Soğuma bölgesinin tepesinden soğutucu gazlar alınır ve geri dönüşüme gönderilir.

Sonuç olarak Midrex prosesinde redüklenme olayı ters akım prensibine göre tasarlanmış düşey şaft fırını kullanılarak yapılmaktadır. Fırının üstünden şarj edilen demir oksitli malzeme aşağı inerken yukarı doğru çıkan H_2 ve CO içeren gazlarla fırının üst bölgesinde ısıtılır ve aşağı iniş sırasında redüklenir. İndirgenmiş sıcak ürün fırının alt bölgesindeki soğutma sistemine alınır [18].

Midrex yönteminde kullanılan parça cevher ve peletlerin gang oranının mümkün olduğunca düşük olması istenmektedir. Ayrıca iyi redüklenabilirlik, termal etkilerle parçalanmaya karşı iyi bir direnç ve yeterince yüksek bir yumuşama sıcaklığı aranan diğer özelliklerdir [12].

Midrex yöntemi kullanılarak elde edilen sünger demirin karakteristik özellikleri ise Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Midrex Yöntemi ile Üretilen Sünger Demirin Özellikleri [17].

	DRI	HBI
Toplam Fe (%)	90 – 94	90 – 94
Metalik Fe (%)	83 – 89	83 – 89
Metalizasyon (%)	93 – 96	93 – 96
Karbon (%)	1,0 – 3,5	0,5 – 5,2
P* (%)	0,005 – 0,09	0,005 – 0,09
S* (%)	0,001 – 0,03	0,001 – 0,03
Gang* (%)	2,8 – 6,0	2,8 – 6,0
Mn, Cu, Ni, Cr, Mo, Sn,	Eser	Eser
Görünür yoğunluk (g/m^3)	3,4 – 3,6	5,0 – 5,5
Yoğunluk (kg/m^3)	1600 – 1900	2400 – 2800

* Demir cevherine bağlı olarak değerler değişir.

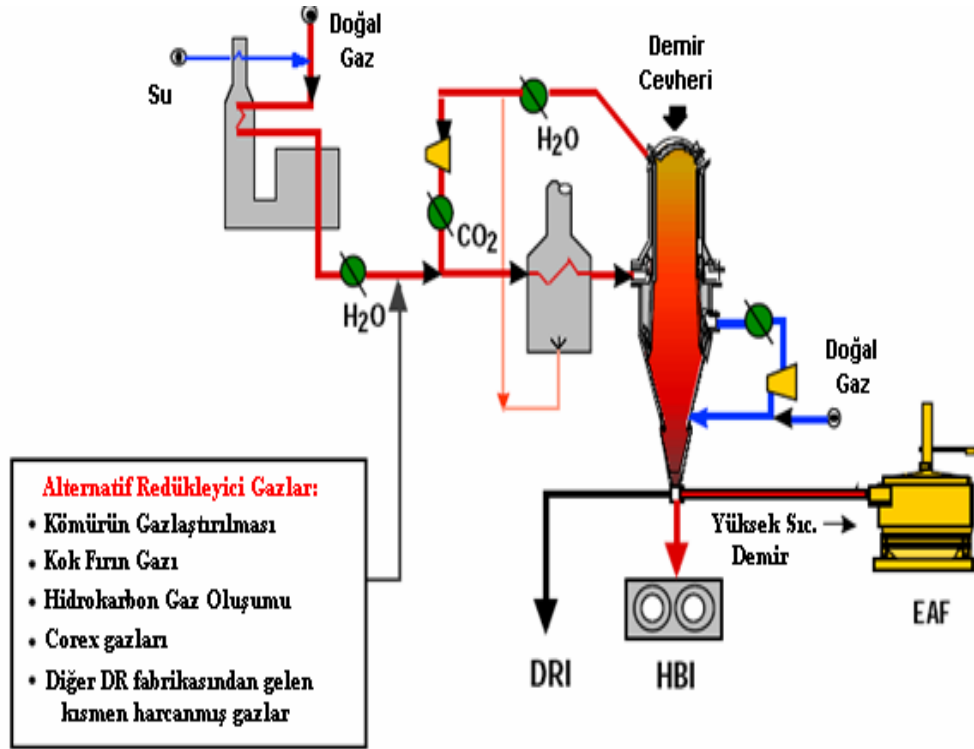
3.2.1.2 HyL–III yöntemi

HyL–III yöntemi; yüksek basınç altında çalışan, gaz prensipli, devamlı olarak katı gaz hareketi olan bir reaktörde sünger demir üretim yöntemidir. HyL–III iki ana bölümden meydana gelmektedir;

1. Dönüştürücü: Doğalgazın redükleyici gaza dönüştürüldüğü yer.

2. Reaktör: Redüksiyon işlemlerinin gerçekleştirildiği yer.

Yönteme ait bir akım şeması Şekil 3.2’ de görülmektedir.



Şekil 3.2: HyL–III Prosesi Akım Şeması [19].

Redükleyici gazın elde edilmesi doğalgaz veya hidrokarbonların ayrıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Kullanılan redükleyici gazın hidrokarbonca zengin, reaksiyon hızının yüksek olması istenir [12].

Demir cevherleri, reaktöre bir taşınım vasıtası ile şarj edilmektedir. Bu sistemde, demir cevherleri, atmosferik basınçta reaktörü dolduruncaya kadar şarja devam edilir. Demir cevherleri, yüksek basınçta redüklendikten ve soğutulduktan sonra, reaktörün alt kısmından dışarı alınır [12].

HyL Ürünlerinin Kimyasal Özellikleri Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3: HyL Ürünlerinin Kimyasal Özellikleri [19].

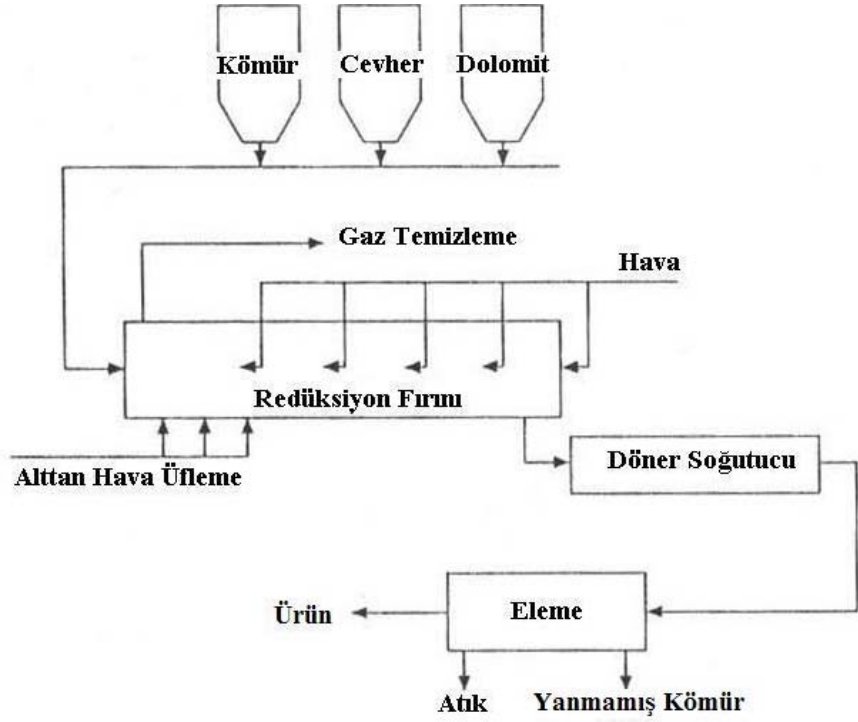
Kimyasal Özellikler	DRI	HBI
Toplam Fe	% 91 – 93	% 91 – 93
Metalik Fe	% 83 – 88	% 83 – 88
Metalizasyon	% 92 – 95	% 92 – 95
C	% 1,5 - >4,0	% 1,2 – 2,2
P	% 0,02 – 0,05	% 0,02 – 0,05
S	% 0,002 – 0,019	% 0,002 – 0,019
Gang	% 2,8 – 7,5	% 2,8 – 7,5
Cu, Ni, Cr, Mo, Sn, Pb, Zn	Eser	Eser

3.2.2 Katı redükleyici kullanılan yöntemler

Katı redükleyici kullanılan yöntemler, redükleyici olarak katı esaslı maddelerin kullanıldığı yöntemlerdir. Dünya sünger demir üretiminde, gaz redükleyici kullanılan yöntemlere oranla, katı redükleyici yöntemlerin kullanımı daha azdır. 2006 yılı verilerine göre 59,79 milyon tonluk dünya sünger demir üretiminin, 11,7 milyon tonluk kısmı yani toplam üretimin % 19,7'si katı redükleyici kullanılan yöntemlerle gerçekleştirilmiştir [16]. Katı redükleyici kullanılan ve döner fırında sünger demir üreten yöntemlerden en önemlisi SL/RN (Stelco – Lurgi/ Republic Steel – National Lead) yöntemidir. Diğer bir yöntem son 10 yıl içerisinde gelişme kaydeden FASTMET yöntemidir. ITmk3 yöntemi ise döner hazneli fırın kullanan bir yöntem olup son yıllarda ön plana çıkmaktadır.

3.2.2.1 SL/RN yöntemi

SL/RN yöntemi, iki ayrı firma grubu tarafından geliştirilmiştir. Bu gruplar; Steel Company of Canada (S) ve Lurgi GmbH (L) grubu ile Republic Steel Corp. (R) ve National Lead Company (N)'dir. Bu proses reaktör olarak döner fırın ve redükleyici madde olarak da katı yakıt kullanmaktadır. Şekil 3.3'de SL/RN yöntemi ile sünger demir üretim prosesinin akım şeması verilmiştir.



Şekil 3.3: SL/RN Prosesi Akım Şeması [20].

Demir oksitli cevher, kömür karışımı ve dolomit yükleme ucundan fırına şarj edilir. Şarj edilen hammaddeler ilk aşamada bir ön ısıtma işlemine tabi tutularak kurutulur. Ön ısıtma sırasında, fırın içerisine üflenene hava ile kömürdeki uçucu maddelerin yanmaya başlaması sonucu işlem süresi kısalır. Şarjın kurutulup redüksiyon sıcaklığına ulaşması sağlandığında demir oksitler, karbon monoksit gazı ile redüklenir [14].

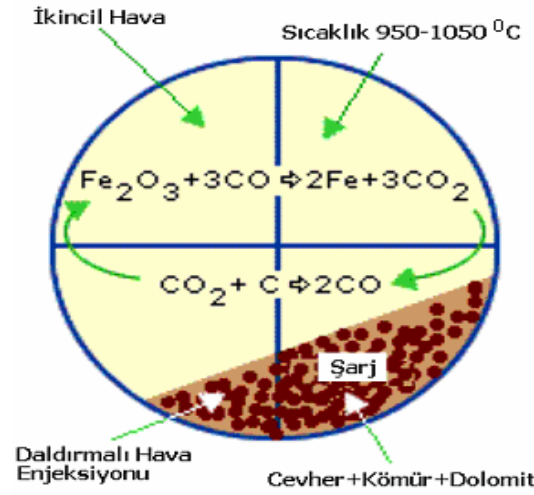
Redüksiyonun gerçekleşmesi için gerekli olan karbon monoksit Boudouard reaksiyonu sonucu elde edilir [14].



Bu reaksiyon sonucu açığa çıkan karbon monoksit (CO), demir oksitlerle reaksiyona girerek, redüklenme işlemini gerçekleştirir [14].



Döner fırın içinde gerçekleşen reaksiyonlar Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Döner Fırın Reaksiyonları [14].

Böylece, cevher 950 – 1050 °C sıcaklıklarında katı durumda sünger demire redüklenmektedir. Döner fırında elde edilen sıcak sünger demirin oksitlenmesini önlemek amacıyla ürün soğutucuya alınıp yanmamış kömür ile beraber döner soğutucuda soğutulur. Son olarak sünger demir manyetik seperasyon yöntemi ile yanmamış kömürden ayrılır [14].

SL/RN yönteminde elde edilen sünger demirin bileşimi Tablo 3.4’de verilmiştir.

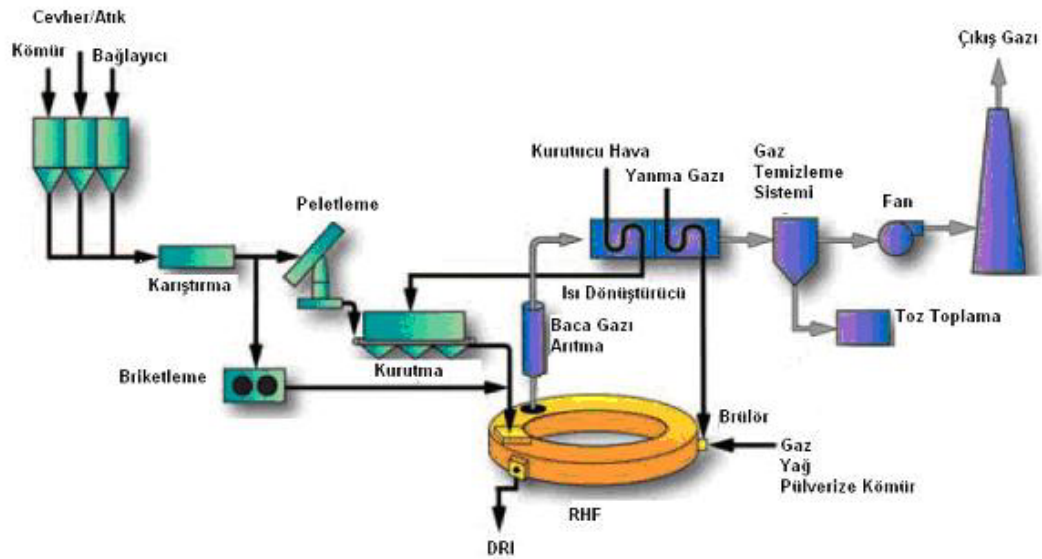
Tablo 3.4: SL/RN Yönteminde Elde Edilen Sünger Demir Bileşimi [14].

Bileşim	Yüzde (%)
Fe (Toplam)	90–93
Fe (Metalik)	85–88
Metalizasyon	92–95
Kükürt	0,03 maks.
Fosfor	0,05 maks.
Karbon	0,10 maks.
Gang içeriği	(6–8)

SL/RN yönteminde kullanılan hammaddeler incelendiğinde demirli malzeme olarak pelet veya parça cevher, redükleyici olarak ise linyit ve koklaşmayan kömür kullanılabildiği görülmektedir [21].

3.2.2.2 FASTMET yöntemi

FASTMET yöntemi, Kobe Çelik Limited Şirketi tarafından geliştirilmiştir. Esas olarak çelik fabrikalarından açığa çıkan atıkları değerlendirmek amacıyla ortaya çıkmıştır. Bu proses reaktör olarak döner hazneli fırın (RHF) ve redükleyici olarak katı yakıt kullanmaktadır. Şekil 3.5’de katı redükleyici kullanılarak sünger demir üretim prosesinin akış şeması verilmiştir.



Şekil 3.5: FASTMET Prosesi Akım Şeması [22].

FASTMET prosesinde demir cevheri veya demir atıkları, redükleyici ve bağlayıcı malzeme ile karıştırıldıktan sonra peletlenebilir veya briketlenebilir. Peletleme işleminden geçen şarj malzemeleri 160 – 180°C’de kurutulurken, briketleme işlemine tabi tutulan şarj malzemeleri kurutulmadan döner hazneli fırına şarj edilir. Döner hazneli fırın 1250 – 1350°C’ ye kadar ısıtılır. Şarj malzemesinin fırın içerisinde kalma süresi 6 – 10 dakika arasındadır. Bu süre zarfında % 85 – 95 demir oksit, metalik demire redüklenir [17].

Döner hazneli fırında elde edilen sıcak sünger demirin oksitlenmesini önlemek amacıyla ürün soğutucu tanklara alınıp soğutulabilir, briketlenebilir veya sıvı ham demir üretimi için özel olarak tasarlanmış fırına şarj edilebilir [17].

FASTMET yönteminde elde edilen sünger demirin bileşimi Tablo 3.5’de verilmektedir.

Tablo 3.5: FASTMET Yönteminde Elde Edilen Sünger Demir Bileşimi [23].

Bileşim	Yüzde (%)
Toplam Demir	75,8
Metalik Demir	69,7
Metalizasyon	91,9
Karbon	3,1
Çinko	0,06

FASTMET prosesinde kullanılan hammaddeler incelendiğinde demirli malzeme olarak yüksek fırın tozu, bazik oksijen fırını tozu, EAF tozu gibi demirli artıkların; redükleyici olarak ise atıklarla beraber gelen karbon, kömür, odun kömürü ve kok kullanılabildiği görülmektedir.

FASTMET ile aynı döner hazneli fırını kullanan diğer bir proses ise FASTMELT prosesidir. Bu proseste döner hazneli fırına bir ergitme fırını eklenerek yüksek fırından elde edilen sıvı demire benzer yüksek kalitede bir sıvı demir ürün olarak elde edilmektedir. Kullanılan hammaddeler FASTMET prosesinde kullanılan hammaddelerle benzerlik göstermektedir. FASTMELT yöntemi ile elde edilen ürünün genel özellikleri Tablo 3.6’da gösterilmektedir.

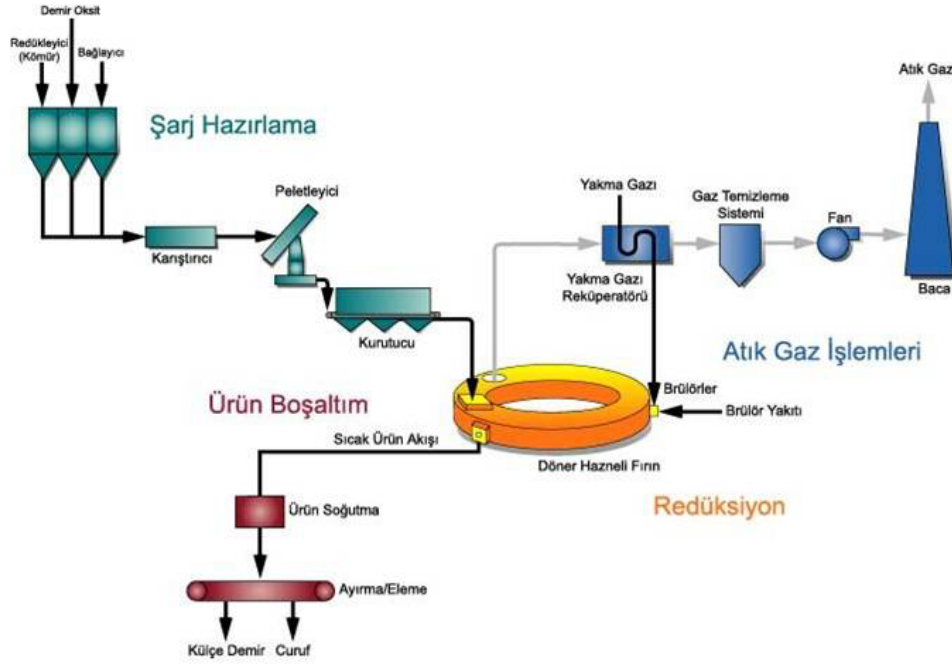
Tablo 3.6: FASTMELT Yöntemi ile Elde Edilen Sıvı Demirin Özellikleri [17].

Bileşim	Yüzde (%)
C	3,0 – 4,5
Si	0,3 – 0,5
Mn	0,2 – 1,0
S ve P	< 0,05
T (°C)	1550

3.2.2.3 ITmk3 yöntemi

ITmk3 yöntemi, Midrex tarafından geliştirilen bir proses olup, döner hazneli bir fırın (RHF) üzerine bina edilmiştir. Fırında demir cevheri, kömür ve bağlayıcılardan oluşan kuru ham peletler sıcak metalik demir taneleri (iron nugget) üretmek için redüklenirler. Elde edilen metalik demir taneleri fiziksel ve kimyasal açıdan yüksek

fırından elde edilen pik demirle benzerlik göstermektedir. Proses yüksek sıcaklıkta ve atmosferik basınçta çalışır. Şekil 3.6’da ITmk3 prosesinin akış şeması verilmiştir.



Şekil 3.6: ITmk3 Prosesi Akım Şeması [17].

Proseste kullanılacak demirli hammadde konusunda proses oldukça esnekler. Cevher tipinde herhangi bir sınırlama yoktur; ince ham cevherler (manyetit ve hematit) veya demirli atıklar (demirli baca tozları, skal ve çamurlar) peletlenerek kullanılabilirler. ITmk3, kullanılan karbonlu redükleyici açısından da oldukça esnekler. Çok çeşitli özellikte kömürler kullanılabilir. İstenen özellikler ise düşük kül ve kükürt içeriğidir. Proseste kömür, kok ve petrol koku (% 10 kül, en az % 50 sabit karbon içeren) kullanılabilir. Ayrıca yüksek fırın tozu ve katı, sıvı ya da gaz redükleyicilerin diğer formları rahatlıkla kullanılabilir. Bağlayıcı olarak bentonit (ağırlıkça % 1 – 2) kullanılır. Peletlerin şaft fırınlarındaki kadar mukavemetli olması gerekmez [17]. ITmk3 yönteminde elde edilen demir taneciklerinin bileşimi Tablo 3.7’de verilmektedir.

ITmk3 Prosesi hem düşük tenörlü cevherleri, hem konsantreleri, hem de demirli atıkları değerlendirerek sünger demirden daha kullanışlı bir ürün olan demir taneleri haline dönüştürebilmektedir.

Tablo 3.7: ITmk3 Yöntemiyle Elde Edilen Demir Taneciklerinin Bileşimi [17]

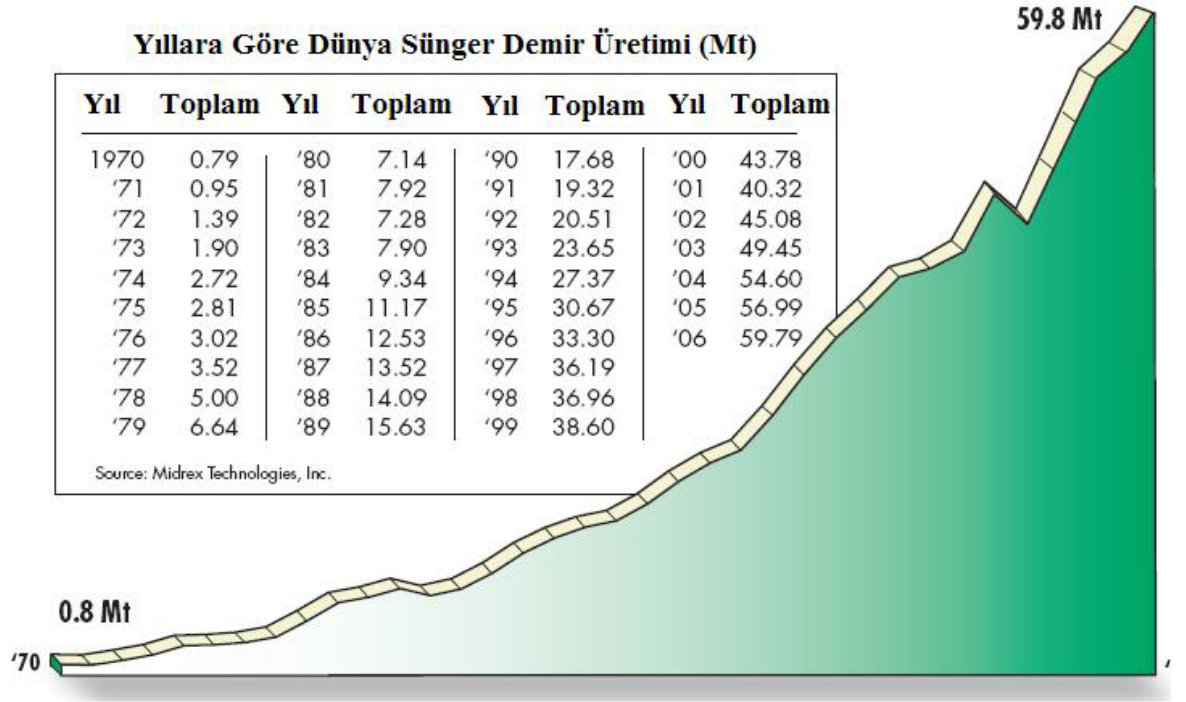
Demir tanelerinin kimyasal bileşimi (%Ağ.)						
Met. Fe	FeO	C	Si	Mn	P	S
96 – 97	0	2,5 – 3,5	Kömür özelliğine bağlı	Kömür özelliğine bağlı	Kömür özelliğine bağlı	0,05

ITmk3 prosesinin konvansiyonel demir üretim teknolojilerine göre başlıca avantajları;

- Redüksiyon ve cüruf ayırımı bir kademede oluşur.
- Çok yüksek sıcaklıklara ihtiyaç olmaz.
- Daha az redükleme süresine ihtiyaç duyulur.
- Proses yapısı karmaşık değildir.
- Düşük yatırım ve düşük üretim maliyeti gerektirir.
- Refraktere FeO saldırısı yoktur.
- Cüruf metalden temiz bir şekilde ayrılır, bu nedenle ürün gang içermez.
- İnce cevher ve düşük kaliteli cevherler kullanılabilir.
- Geniş bir aralıkta katı redükleyici kullanılabilir.

3.3 Dünya Sünger Demir Üretimi

Dünya sünger demir üretimi ve kurulu kapasitesinin 1970 – 2006 yılları arasındaki gelişimi Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



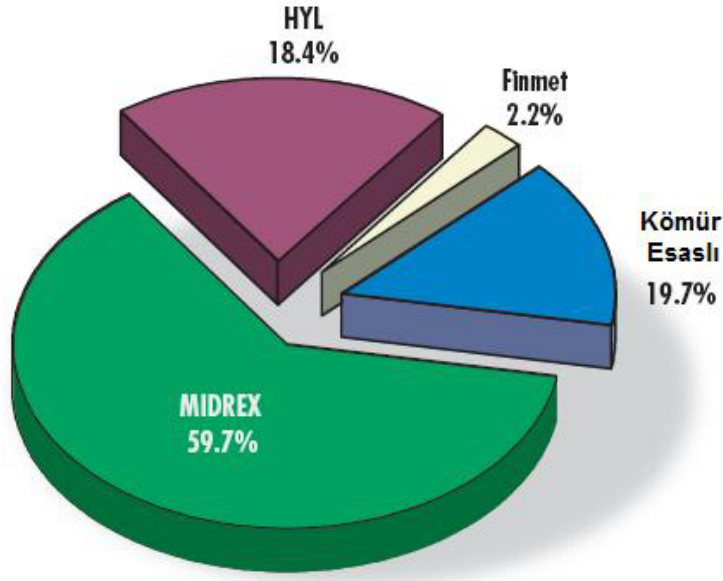
Şekil 3.7: Yıllara Göre Dünya Sünger Demir Üretimi [16].

Şekil 3.7’de görüldüğü gibi dünya sünger demir üretimi yıllara göre kararlı bir artış göstermektedir. 1993 yılında 23,65 milyon ton olan sünger demir üretimi 2000’li yıllara gelindiğinde iki katına çıkarak 50 milyon tonluk rakamlara ulaşmıştır.

Dünyada toplam sünger demir üretimi, 2006 yılında 59,79 milyon tona ulaşmış, 2003’ten bu yana 10 milyon tona varan bir artış kaydedilmiştir. En büyük gaz redükleyici sistem olan Midrex üretimin % 59,7’sini oluştururken, katı redükleyici prosesler % 19,7’lik oranı ile ikinci sırada, HyL prosesleri ise % 18,4 payla üçüncü sırada yer almaktadır. Geri kalan % 2,2’lik oran ise Finmet ve diğer gaz redükleyici kullanan proseslere aittir.

2006 yılı itibari ile sünger demir üretiminin proseslere göre dağılımı Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

Proseslere Göre 2006 DRI Üretimi



**Toplam Dünya
Üretimi
59,8 Mt**

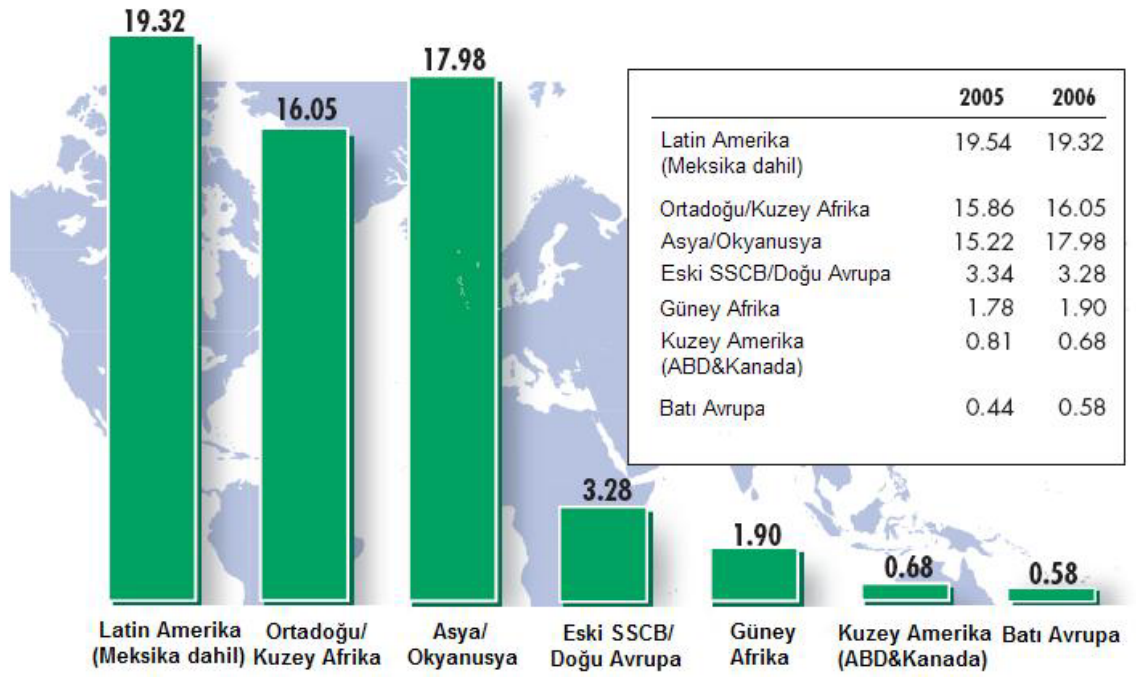
	2005	2006
MIDREX	61.3%	59.7%
HYL	19.5	18.4
Finmet	2.3	2.2
Kömür esaslı	16.5	19.7
Diğer Gaz Y.	0.4	0.0

Şekil 3.8: 2006 Proseslere Göre Dünya Sünger Demir Üretimi [16].

Katı redükleyici proses kullanılarak üretilen sünger demirin % 75'i Hindistan'da, % 16'sı Güney Afrika'da, geri kalanı da Brezilya, Mısır ve İran gibi ülkelerde üretilmektedir. Hindistan sünger demir üretiminde başı çekerken, gün geçtikçe geliştirdiği üretim miktarlarının en önemli sebeplerinden biri zengin kömür ve demir cevheri rezervlerine sahip olmasıdır. Bu nedenle Hindistan katı redükleyici proses tercihiyle kendi linyit ve demir cevheri rezervlerini kullanarak sünger demir üretimi gerçekleştirmektedir.

Hindistan'ın sünger demir üretimi 2001 yılında 5,6 milyon tonun altındayken son beş yıl içinde büyük bir artışla 14,74 milyon tona ulaşmıştır. Latin Amerika ülkelerinden Venezüella, Meksika sünger demir üretiminde başı çeken diğer ülkelerdir. Bu tip ülkelerde doğalgaz rezervlerinin fazlalığı göze çarpmaktadır. Bu nedenle redükleyici olarak doğalgaz kullanan proseslerle sünger demir üretiminde bu ülkelerin ilk sıraları aldıkları görülmektedir [14].

Dünya sünger demir üretiminin bölgelere göre dağılımı Şekil 3.9'da verilmiştir.



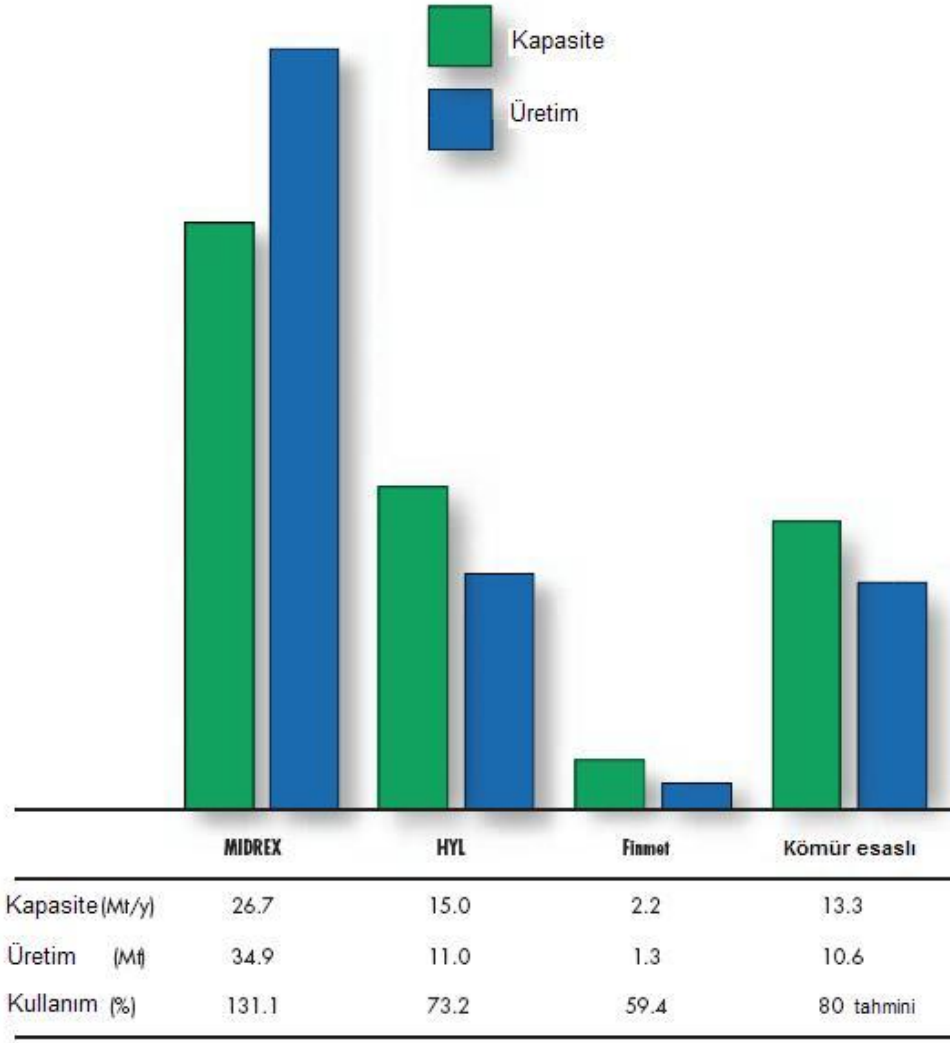
Şekil 3.9: Bölgelere Göre 2006 Yılı Sünger Demir Üretimi (Mt) [16].

Şekil 3.9’da dünya sünger demir üretiminin özellikle bol ve ucuz enerji kaynağına sahip olan bölgelerde yoğunlaştığı görülmektedir. Latin Amerika ülkeleri zengin doğalgaz kaynaklarına sahip olduğu için sünger demir üretim kapasitesi diğer bölgelere kıyasla çok daha fazladır. Tablo 3.8’de dünya sünger demir üretiminin ülkeler bazında sıralaması verilmiştir.

Tablo 3.8: Ülkelere Göre Dünya Sünger Demir Üretimi Sıralaması (Mt) [16]

Ülke	2006		2005
	Sıralama	Miktar (Mt)	Miktar (Mt)
Hindistan	1	14,74	12,04
Venezüella	2	8,61	8,95
İran	3	6,85	6,85
Meksika	4	6,17	5,98
Suudi Arabistan	5	3,58	3,63
Rusya	6	3,28	3,34
Mısır	7	3,10	2,90
Trinidad ve Tobago	8	2,08	2,25
Arjantin	9	1,95	1,83
Güney Afrika	10	1,75	1,78

Şekil 3.10’da başlıca sünger demir üretim yöntemlerinin kapasite ve üretim değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Proseslere Göre 2006 Yılı Dünya Sünger Demir Kapasite Kullanımı [16].

Şekilde görüldüğü gibi Midrex yöntemi kapasitesinin üzerinde üretim gerçekleştirmekte olup bu yöntemi takiben Hyl prosesi ve kömür esaslı prosesler kapasitelerine yakın üretim gerçekleştirmektedirler.

Tablo 3.9’da dünya DRI üretimi proseslere göre gösterilmiştir.

Tablo 3.9: Proseslere Göre Dünya Sünger Demir Üretimi (Mt) [16].

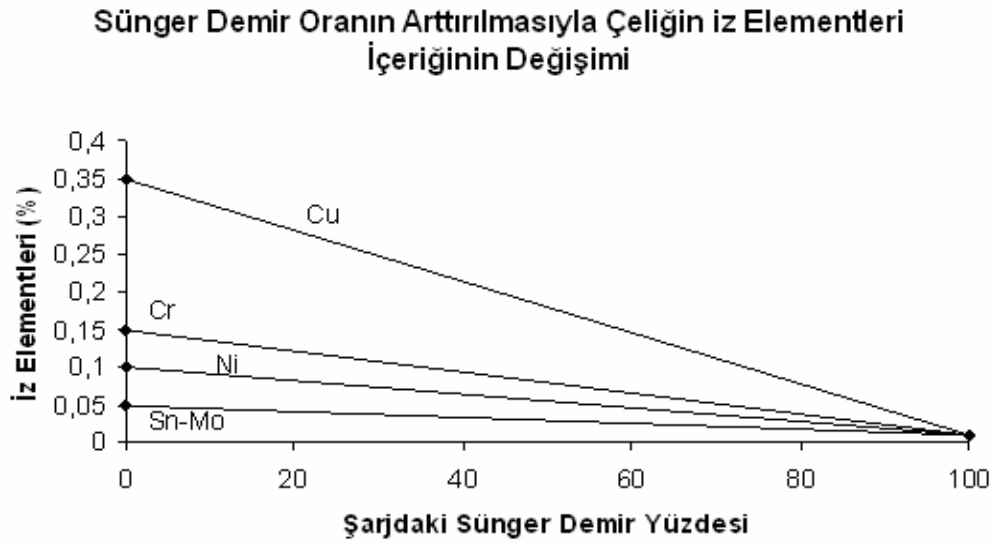
İSİM	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
MIDREX	30,12	26,99	30,11	32,06	35,01	34,96	35,71
HYL-III	9,39	8,04	8,88	9,72	11,34	11,12	11,00
Diğer Şaft Fırın/Retort Prosesleri	0,15	0,14	0,04	0,04	0,04	0,00	0,00
Finmet/FIOR	0,96	1,80	1,63	2,57	1,60	1,32	1,31
Diğer Akışkan Yatak Prosesleri	0,00	0,13	0,00	0,00	0,02	0,20	0,00
SL/RN ve diğer döner fırın, kömür esaslı prosesler	3,14	3,18	4,43	5,04	6,41	9,17	11,53
Döner hazneli fırın, kömür esaslı prosesler	0,05	0,02	0,00	0,02	0,18	0,22	0,24
Dünya Toplamı	43,81	40,30	45,09	49,45	54,60	56,99	59,79

Tablo 3.9’da görüldüğü gibi dünya sünger demir üretiminin çok büyük bir kısmı gaz redükleyici kullanılan yöntemler tarafından gerçekleştirilir. Günümüzde sünger demir üretiminde kullanılan yöntemler; ACCAR, ARMCO, CIRCORED, CODIR, DAV, DRC, FINMET, FIOR, GHAEM, HYL III, IRON CARBIDE, IRON DYNAMICS, JINDAL, KINGLOR-METOR, MIDREX, NSC, OSIL, PLASMARED, PUROFER, SIIL, SL/RN, TISCO olup bu yöntemlerin başında ise Midrex, HyL-III ve SL/RN yöntemleri gelmektedir. Katı redükleyici kullanılan yöntemlerin en önemlisi SL/RN yöntemidir. 2005 yılından 2006 yılına gelindiğinde dünya sünger demir üretiminde meydana gelen artışın temel nedeninin katı redükleyici kullanılan yöntemlerle gerçekleştirilen üretimdeki artıştan kaynaklandığı görülmektedir.

3.4 Sünger Demirin Elektrik Ark Fırınlarında Kullanımı

Sünger demir, elektrik ark fırınına hammadde olabilecek ve hurdaya ikame edilebilecek bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Hurda fiyatlarındaki dalgalanmalar ve temininin güç hale gelmesi ile sünger demir üretimi cazip hale gelmektedir. İz elementleri olarak tabir edilen ve rafinasyon yolu ile çelikten giderilemeyen Cu, Sn, Ni, Cr, Mo elementleri sünger demirde çok düşük seviyelerdedir. Hurda malzemelerde ise bu elementler daha yüksek oranlarda

bulunur. Sünger demirin elektrik ark fırınında kullanılmasıyla daha temiz çelik ve yassı ürün üretilmektedir. Çelik kalitesinin artması, iz elementlerinin sınırlandırılması ile mümkündür. Örneğin, hurda kullanılarak elde edilen çelikteki iz elementleri miktarı otomotiv sacı üretmeye izin vermemektedir. Otomobil sacı üretebilmek için iz elementi içeriğinin en fazla % 0,08 olması istenir ancak hiçbir hurda kalitesi ile bu orana inilememektedir. Sünger demir kullanımıyla (% 0,02 iz elementi) bu değere inmek mümkündür [24]. Şekil 3.11’de sünger demir oranının artırılması ile çeliğin iz elementleri içeriğinin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.11: Sünger Demir Oranının Arttırılmasıyla Çeliğin İz Elementleri İçeriğinin Değişimi [24].

Sünger demirin elektrik ark fırınlarında kullanımı sırasında metalizasyon derecesi, gang içeriği, karbon içeriği ve kükürt miktarı büyük öneme sahiptir. Özellikle metalizasyon derecesi ve karbon oranının mümkün olduğu kadar yüksek, gang ve kükürt içeriğinin olabildiğince düşük olması istenir [24].

Sünger demirin elektrik ark fırınlarında kullanımı hurdaya karşı olan üstünlüklerinden ötürü üzerinde yoğun araştırmalar yapılan bir konudur. Literatürde yapılan çalışmalarla, sünger demirin fırına besleme hızı ile sıvı ham metal sıcaklığındaki değişim ve sünger demirin elektrik ark fırınında ergitme pratiği değerlendirilerek sünger demirin sağladığı avantajlar belirlenmiştir [24].

Ülkemizde çelik üretiminin % 71'i ark ocaklı tesislerde % 29'u ise entegre tesislerde gerçekleştirilmektedir. Ark ocaklı tesislerin ihtiyacı olan hurdanın temini büyük ölçüde ithalat yolu ile sağlanmaktadır. Gelecekte ülkemizin çelik arzının artacağını göz önünde bulundurursak artan hurda talebini karşılamak oldukça zor olacaktır. Uzun vadede düşünüldüğünde hurda konusunda karşılaşılabilecek darboğazda ve olası fiyat artışlarında ülkemiz çelik üreticilerinin de olumsuz yönde etkileneceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun sonucunda, hurda yerine ikame edilebilecek yeni kaynaklar ve özellikle sünger demir kullanımı uygun olacaktır [24].

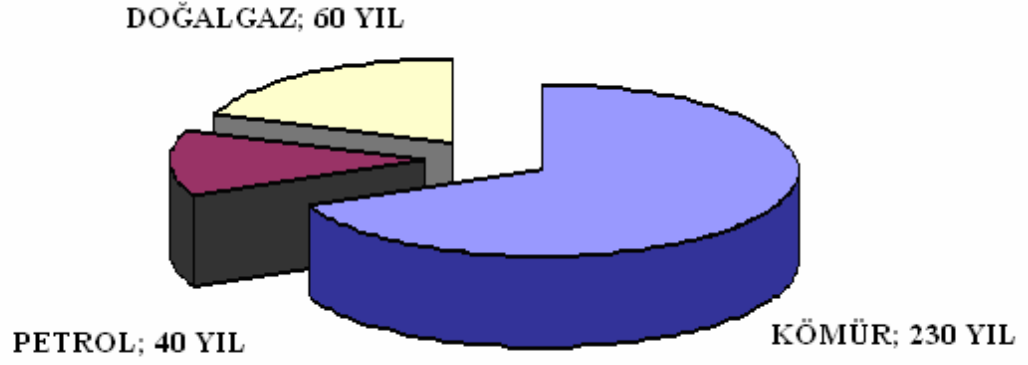
4. SÜNGER DEMİR ÜRETİMİNDE KULLANILAN HAMMADDELERİN İNCELENMESİ

4.1 Redükleyicilere Göre Hammadde Kaynakları

Sünger demir üretiminde katı ve gaz redükleyicilere göre fırına beslenecek redüktan malzeme değişmektedir. Katı redükleyici olarak kömür, gaz redükleyici olarak da doğalgaz kullanılmaktadır. Aşağıda dünya ve ülkemiz kömür ve doğalgaz rezervleri incelenmiş, demir cevherlerinin durumu hakkında bilgi verilmiştir.

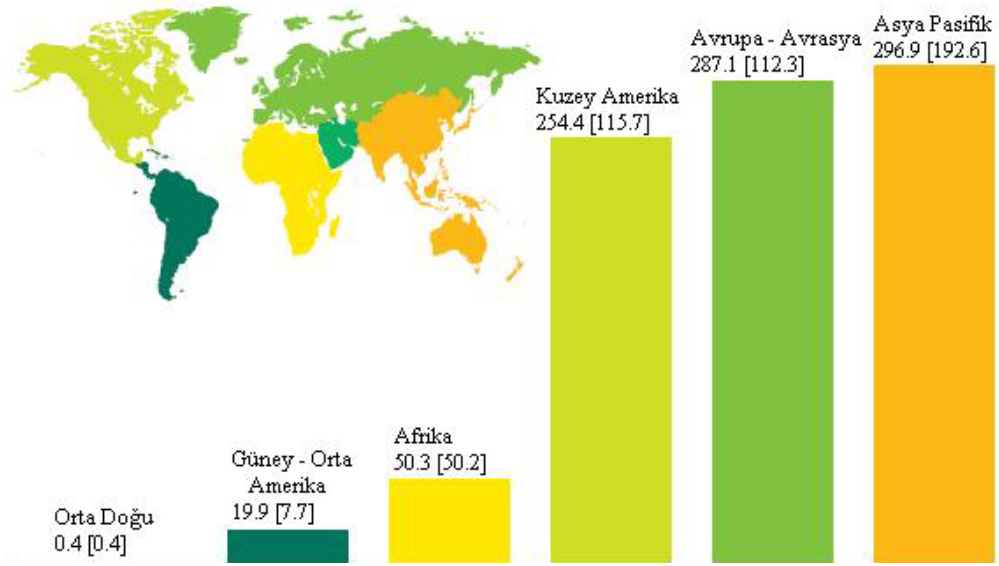
4.1.1 Katı redükleyici kullanılan prosesler için kömür rezervleri

Fosil yakıtlar (petrol, doğalgaz, kömür) sadece enerji hammaddesi değil; aynı zamanda birçok sanayinin (demir-çelik, alüminyum, plastik, boya, vs gibi) ana girdilerinin üretildiği hammaddelerdir. Fosil enerji kaynaklarından olan kömür; dünya üzerinde yaygın olarak bulunması, üretilmesi ve görünür rezervlerinin şu anki üretim seviyeleri temel alındığında, ömürlerinin diğer fosil yakıtlardan uzun oluşu, fiyat istikrarı, taşıma kolaylığı, depolama imkânlarının rahatlığı, kullanımının kolaylığı yönünden emniyetli ve güvenilir olması, kullanıcıya arzının diğer yakıtlara göre ucuzluğu ve sürekliliği, gibi özellikleri ile vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır. Mevcut madencilik teknolojisi ile kömür üretimi 2005 yılında dünyada toplam 2887,2 milyon ton petrol eşdeğeri olarak gerçekleştirilmiştir [25]. Dünya fosil yakıtlarının tahmini tükeniş süreleri Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Dünya Fosil Kaynaklarının Tahmini Tükeniş Süresi [26].

Bugünkü seviyeleri ile dünya petrol rezervlerinin 40 yıl, doğalgaz rezervlerinin 60 yıl ve kömür rezervlerinin 230 yılda tükeneceği tahmin edilmektedir. Linyit rezervlerinin ise tahmini tükeniş süresi 156 yıldır. Bu karşılaştırma, sadece günümüz teknolojileri kullanılarak ekonomik olarak işletilebilecek linyit rezervlerini kapsamaktadır. Teknolojik gelişmeler ile şu an ekonomik olarak işletilemeyen rezervlerin işletilebileceği ve mevcut rezervlerin arama faaliyetleri sonucu daha da artabileceği düşünüldüğünde kömür çok daha uzun süre tüketime sunulabilecektir. Dünyada hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde, elektrik enerjisi ve çelik üretimindeki vazgeçilmez konumu ile kömür, sürdürülebilir kalkınma planlarında ve enerji planlamalarında önemli bir yer almaktadır. Bugün gelişmiş ülkelerin enerji üretiminin temelinde doğalgaz veya petrol değil kömür bulunmaktadır [27]. Şekil 4.2’de dünya kömür rezervlerinin bölgelere göre dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.2: 2005 Yılı Kanıtlanmış Dünya Kömür Rezervleri (milyar ton) (antrasit ve bitümlü kömür değerleri) [25].

Kömür rezervleri diğer fosil yakıtlar gibi (petrol ve doğalgaz) dünyanın sadece belli bölgelerinde yoğunlaşmış değil, her tarafına yayılmış durumdadır ve 70’den fazla ülkede üretilmektedir.

Katı redükleyici kullanarak sünger demir üretim prosesinin en büyük avantajı düşük kaliteli kömürlerin redükleme aracı ve enerji kaynağı olarak kullanılabilmesidir. Linyit, genel olarak yüksek uçucu madde miktarına ve nem içeriğine sahip olup karbon içeriği düşüktür. Tablo 4.1’de görüldüğü gibi linyit, kahverengi kömürler grubunda yer alıp kalorifik gücü 4.165 Kcal/kg’ın altındadır.

Tablo 4.1: Genel Kömür Sınıflandırması [28].

A. TAŞ KÖMÜRÜ (SERT KÖMÜRLER)	B. KAHVERENGİ KÖMÜRLER
1. KOKLAŞABİLİR KÖMÜRLER (Yüksek fırınlarda kullanıma uygun kok üretimine izin veren kalitede)	1. ALT BİTÜMLÜ KÖMÜRLER (4.165–5.700 Kcal/kg arasında kalorifik değerde olup topaklaşma özelliği göstermez)
2. KOKLAŞMAYAN KÖMÜRLER a – Bitümlü Kömürler b - Antrasit	2. LİNYİT (4.165 Kcal/kg’ ın altında kalorifik değerde olup topaklaşma özelliği göstermez)

Dünya kömür rezervlerinin bölgeler ve kömür türleri itibariyle dağılımları ve Türkiye'nin durumu 2005 yılı değerleriyle Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablo 4.2'den görüleceği gibi 909.064 milyon ton olan dünya kömür rezervinin % 55,66'sı antrasit ve bitümlü kömürler, % 47,34'ü linyit ve alt bitümlü kömürlere aittir.

Tablo 4.2: 2005 Yılı İtibariyle Dünya Kömür Rezervi ve Türkiye'nin Payı (Milyon Ton) [25].

Bölgeler/Ülkeler	Antrasit ve Bitümlü	Alt bitümlü ve Linyit	Toplam	Toplamdaki Pay (%)
Kuzey Amerika	115.669	138.763	254.432	28
Güney ve Orta Amerika	7.701	12.192	19.893	2,2
Afrika ve Orta Doğu	50.581	174	50.755	5,6
Avrupa ve Avrasya	112.256	174.839	287.095	31,6
Türkiye	1.340	8.220	9.560	1
Asya Pasifik	192.564	104.325	296.889	32,6
Toplam	478.771	430.293	909.064	100

Ülkemizde fosil kaynaklar içinde en büyük rezerve sahip olan kaynak kömürdür. Ülkemizdeki taşkömürü ve linyit rezervleri toplamı 9,56 milyar tondur. Kömür rezervimiz içindeki en büyük pay ise 8,22 milyar ton ile linyite aittir.

2001 – 2005 yılları için bölgeler ve ülkeler bazında kömür (antrasit, bitümlü, alt-bitümlü ve linyit gibi ticari katı yakıtlar toplamı) üretimleri Mtep (Milyon Ton Eşdeğer Petrol) olarak Tablo 4.3'de verilmektedir.

Ülkemizin Dünya toplam kömür üretimi içindeki payı 12,8 Mtep üretim miktarı ile % 0,4'tür. 2004 yılı ile kıyaslandığında 2005 yılında ülkemiz toplam kömür üretimi % 21,5 oranında artış göstermiştir (Tablo 4.3).

Tablo 4.3: Bölgeler İtibariyle Kömür Üretimleri ve Türkiye'nin Üretimi (Mtep) [25]

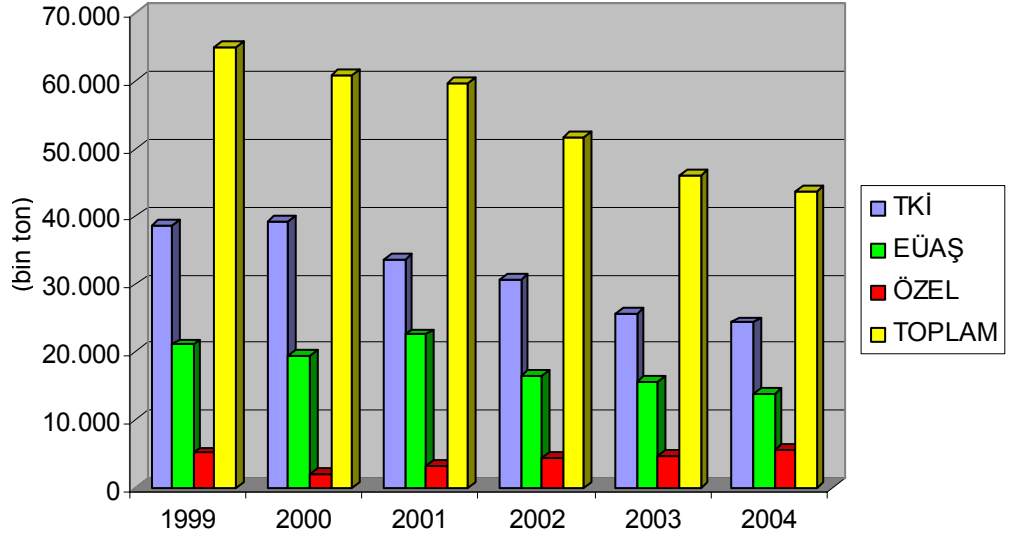
Bölgeler/Ülkeler	2001	2002	2003	2004	2005	2004//2005 Değişim (%)	Top. Pay (%)
Kuzey Amerika	630,3	605,7	586,0	607,4	615,3	1,6	21,4
Güney ve Orta Amerika	36,8	33,9	39,7	43,0	47,3	10,1	1,6
Avrupa ve Avrasya	437,3	422,2	434,6	435,2	436,2	0,5	15,1
Türkiye	14,2	11,5	10,5	10,5	12,8	21,5	0,4
Orta Doğu	0,5	0,4	0,6	0,6	0,6	0,3	-
Afrika	130,0	128,0	137,0	140,6	142,8	1,9	4,9
Asya Pasifik	1134,8	1189,9	1345,6	1524,2	1644,9	8,2	57
Toplam	2369,8	2380,0	2543,6	2751,0	2887,2	5,2	100

4.1.1.1 Türkiye’de linyit üretimi ve tüketimi

Türkiye’de bilinen linyit yataklarının çoğunluğu 1970 – 1990 yılları arasında gerçekleştirilen geniş kapsamlı arama faaliyetleri sonucunda bulunmuştur. Bu dönemden sonra günümüze kadar yeterli rezerv geliştirme çalışması yapılamamıştır.

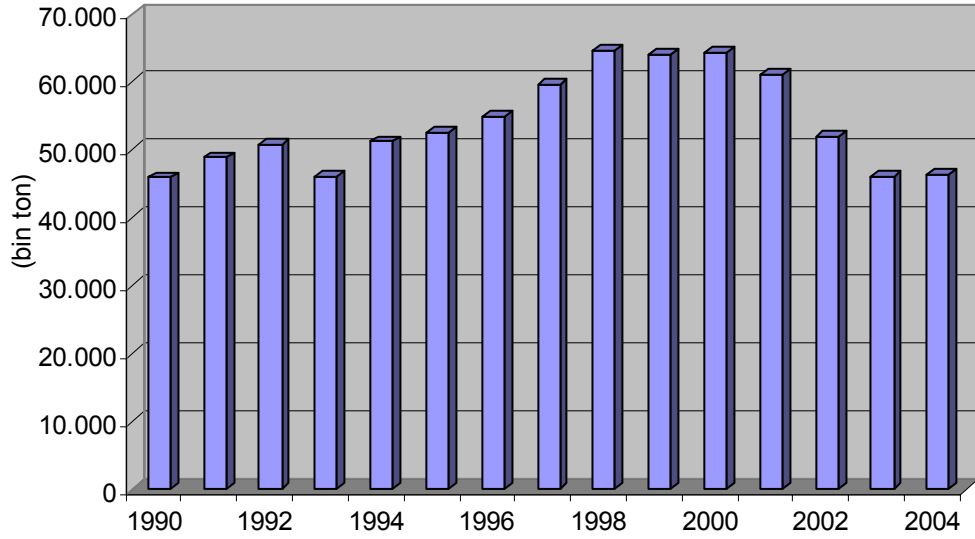
Ülkemiz, çok sınırlı doğalgaz ve petrol rezervine karşın, linyit rezervi bakımından zengindir. Linyit rezervleri ülke geneline yayılmıştır. Hemen hemen bütün coğrafi bölgelerde ve 37 ilde linyit rezervlerine rastlanılmaktadır.

Ülkemizde linyit sektöründe faaliyet gösteren kuruluşların başında Kamu Kuruluşları olan Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ) ve Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) gelmektedir. 2005 yılı itibariyle 8,22 milyar ton olan linyit rezervlerinin yaklaşık % 29’u TKİ, % 45’i EÜAŞ ve % 26’sı ise özel sektör elindedir. Üretimin yaklaşık % 90’lık kısmı bu kamu kuruluşları tarafından gerçekleştirilmektedir. Kamu kuruluşlarının yanı sıra teshin ve sanayi amaçlı linyit üretimi gerçekleştiren veya kamu kuruluşlarına bağlı olarak faaliyette bulunan birçok özel sektör kuruluşu da sektörde yer almaktadır. Yıllar itibariyle Türkiye linyit üretim miktarları satılabilir bazda Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3: Türkiye Linyit Üretimi [29].

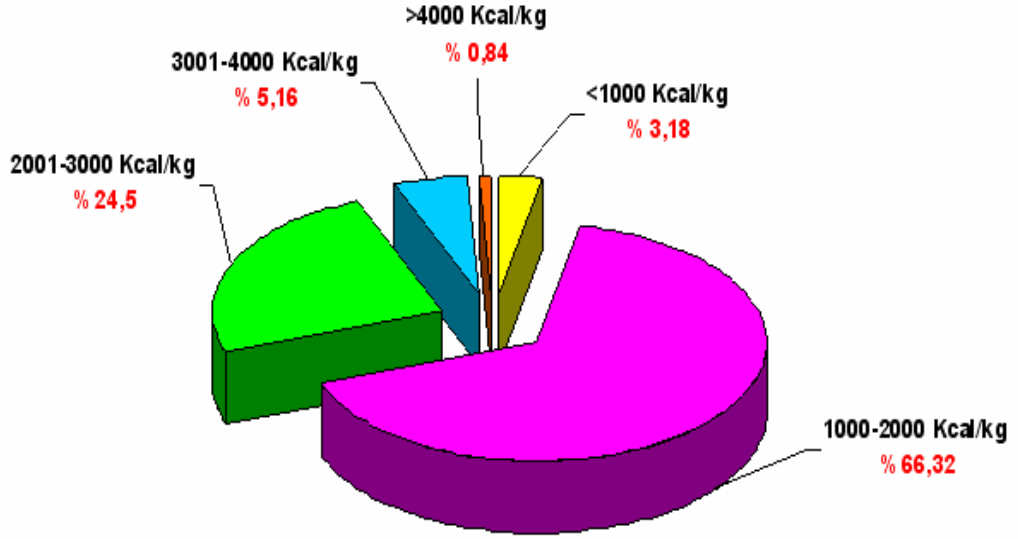
TKİ tarafından üretilen linyit kömürünün büyük kısmı ve EÜAŞ tarafından üretilen kömürlerin tamamı termik santrallerde tüketilmektedir. 1990 – 2004 yılları arası Türkiye Linyit Tüketimi Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4: Türkiye Linyit Tüketimi [29].

4.1.1.2 Türkiye linyit rezervlerinin kalitesi

Genel olarak, ülkemiz linyitlerinin kalitesi düşüktür. Kabaca bir değerlendirme yapıldığında, rezervlerimizin % 70'i 2000 Kcal/kg'nin, % 94'ü 3000 Kcal/kg'nin altında ısı değerine sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Isıl değeri 4000 Kcal/kg'nin üzerindeki rezervlerin oranı ise % 0,84 oranındadır. Şekil 4.5'de Türkiye linyit rezervlerinin ısı değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.5: Türkiye Linyit Rezervlerinin Kalitesi [26].

Türkiye linyit rezervi damar kalınlığı ortalaması 6,8 metredir. Beklendiği gibi nem içeriğinin artmasıyla ısı değeri azalmaktadır. Örneğin nem içeriğinin % 20'den % 30'a çıkması durumunda ısı değerinde yaklaşık 800 Kcal/kg'lık bir düşme kaydedilmektedir. Nem içeriğine, kül ve kükürt miktarına, ısı değerine bağlı olarak ülkemizde üretilen kömür satış fiyatı ortalama 50 – 120 YTL arasında değişmektedir.

Ülkemizin mevcut linyit oluşumlarından;

- 47 adedi 1–10 milyon ton,
- 20 adedi 10–20 milyon ton,
- 42 adedi 20–100 milyon ton,
- 9 adedi 100–250 milyon ton,
- 4 adedi 250 milyon ton ve
- 1 adedi 3 milyar ton rezerve sahiptir.

Türkiye linyitlerinin bölgesel dağılımı Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4: Türkiye’de Linyit Rezervlerinin Bölgesel Dağılımı ve Ortalama Kimyasal Özellikleri [29].

Bölgeler	Rezerv (10 ⁹ Ton)	Nem (%)	Kükürt (%)	Kül (%)	Isıl Değer (Kcal/Kg)
Kuzey-Batı Anadolu Bölgesi	1,8	20	1,7	20	3.500
Güney-Orta Anadolu Bölgesi	3,7	50	2,0	20	1.200
İç Anadolu Bölgesi	1,4	30	3,2	25	3.000
Güney Batı Anadolu Bölgesi	0,9	30	2,0	20	2.500
Trakya Bölgesi	0,35	30	3,0	20	2.500
Doğu Anadolu Bölgesi	0,15	20	1,2	20	3.000
Toplam	8,3	36,5	2,1	21	2.240

Tablo 4.4’de linyit rezervi açısından en zengin bölgenin Güney-Orta Anadolu olduğu görülmektedir. En yüksek ısıl değere sahip linyitler ise Kuzey-Batı Anadolu’da bulunmaktadır. Tablo 4.4’de görüldüğü gibi toplam rezerv içindeki payları dikkate alındığında, linyitlerimizin kül ve kükürt içerikleri yüksek olup, düşük ısıl değere sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle düşük ısıl değere sahip kömürler işlem öncesi zenginleştirme işlemine tabi tutularak ısıl değerleri yükseltilmektedir.

4.1.1.3 Sünger demir üretimine uygun kömürün özellikleri

Sabit karbon, kül içeriği, kükürt, uçucu madde vb. gibi kimyasal özelliklerinin yanı sıra kömür kalitesinin belirlenmesindeki önemli özellikler kömür reaktivitesi ve kül yumuşama sıcaklığıdır. Kömür reaktivitesinin yüksek olması daha düşük sıcaklıklarda çalışma olanağı sağlar ve fırının verimini artırır [14].

Kömürdeki kül miktarının düşük olması istenmektedir. Genellikle kül miktarı % 25 değerini geçmemelidir. Kül fırında yer kaplayan, ancak reaksiyona katkıda bulunmayan bir malzemedir. Kül içeriğinin yüksek olması fırın çalışma haznesini azaltmakta ve sünger demirde istenmeyen safsızlıkların oluşmasına yol açabilmektedir. Bununla birlikte külün yumuşama sıcaklığı kül miktarından daha önemli bir faktördür. Kül ergime sıcaklığının yüksek olması istenmektedir. Bu şekilde fırında yapışmanın önüne geçilebilmektedir [14].

Ayrıca kullanılan kömürün kükürt oranı düşük olmalıdır. Bu nedenle, dolomit veya kireçtaşı sünger demir üretim prosesinde kükürt giderici olarak kullanılmaktadır.

Dolomit ile kükürt aşağıda belirtilen reaksiyonlar sonucunda sistemden uzaklaştırılmaktadır [14].

- $\text{MgO}_{(\text{katı})} + \text{SO}_{2(\text{gaz})} + \frac{1}{2} \text{O}_{2(\text{gaz})} \rightarrow \text{MgSO}_{4(\text{katı})}$
- $\text{CaO}_{(\text{katı})} + \text{SO}_{2(\text{gaz})} + \frac{1}{2} \text{O}_{2(\text{gaz})} \rightarrow \text{CaSO}_{4(\text{katı})}$

Beslemedeki dolomit veya kireçtaşı miktarının arttırılmasıyla sistemden daha fazla kükürdün uzaklaştırılabileceği ve böylece % 2,0 – 2,5 değerlerine kadar kükürt içeren kömürlerin herhangi bir soruna yol açmadan proseste kullanılabileceği düşünülmektedir [14].

Sünger demir üretimine uygun kömür özellikleri Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5: Sünger Demir Üretimi için Uygun Kömür Özellikleri [14].

Kimyasal Özellikler (Kuru Bazda)	
Kül (%)	22 ± 2
Uçucu Madde (%)	32 ± 2
Sabit Karbon	Min. 40
Kükürt	Maks. 1,0
Fiziksel Özellikler	
Nem	Maks. 8
Tane Boyutu (mm)	0 – 20
Kalorifik değer (Kcal/kg)	Min. 5200
Kül yumuşama sıcaklığı (°C)	1200

4.1.2 Gaz redükleyici kullanan prosesler için doğalgaz rezervleri

Fosil yakıtlar grubundan hidrokarbon esaslı doğalgaz, yeraltında gözenekli kayaların boşluklarına sıkışmış olarak ya da petrol yataklarının üzerinde gaz halinde büyük hacimler şeklinde bulunur. Doğalgaz; % 95 metan (CH_4), az miktarda da etan (C_2H_6), propan (C_3H_8), bütan (C_4H_{10}) ve karbondioksitten oluşan renksiz, kokusuz ve havadan hafif bir gazdır. Karışımın içinde % 95 ya da daha yüksek oranda bulunan metan gazının özelliği kimyasal yapısı en basit ve karbon içeriği en düşük olan hidrokarbon gazı olmasıdır. Metan molekülü 1 karbon ve 4 hidrojen atomundan oluşur. Kimyasal yapısının basit olması nedeniyle yanma işlemi kolaydır ve tam yanma gerçekleşir. Dolayısıyla; duman, is, kurum ve kül oluşturmaz. Yanması en kolay ayarlanabilen ve yanma verimliliği en yüksek olan yakıttır. Bu özelliği kullanım kolaylığı ve ekonomisi sağlar [30].

Kalorifik değeri yani 1 m³ gazın yanması sonucu çıkan ısı 8,400 ile 10,600 Kcal arasında değişmektedir. 1 m³ doğalgazın uygun koşullarda yanması için 10 m³ havaya gerek vardır.

Günümüzde enerji tüketiminin % 24'ü doğalgazla karşılanmaktadır. Dünyada bilinen doğalgaz rezervlerinin yaklaşık 60 yıllık ömrü olduğu tahmin edilmektedir. Dünya doğalgaz potansiyelinin dağılımında toplam olarak, OPEC ülkeleri en büyük hisseye sahip görünmektedirler. Tablo 4.6'da dünya toplam doğalgaz rezervi ve zengin rezervlere sahip başlıca ülkeler gösterilmektedir.

Tablo 4.6: Dünya Doğalgaz Rezervleri [31]

Ülke	Rezervler (Trilyon m ³)	Dünya Toplamındaki Payı
Rusya	47,544	27,8
İran	26,602	15,6
Katar	25,753	15,1
Suudi Arabistan	6,65	3,9
Birleşik Arap Emirlikleri	5,99	3,5
Amerika	5,35	3,1
Nijerya	4,98	2,9
Cezayir	4,56	2,7
Venezüella	4,27	2,5
Irak	3,11	1,8
Dünyanın geri kalanı	36,123	21,1
Dünya	170,932	100,0

En zengin doğalgaz kaynaklarına sahip bölgeler; Ortadoğu ve Avrupa – Avrasya bölgeleridir. Hâlihazırda ispatlanmış doğalgaz rezervleri toplamı 170,932 trilyon m³ civarında olup bu rezervlerin yarısından fazlasını Rusya, İran ve Katar elinde bulundurmaktadır.

Ülkemizde doğalgaz yok denecek kadar az olduğundan, bu durum tümüyle dışa bağımlı bir sektör meydana getirmektedir. Türkiye'de ispatlanmış toplam doğalgaz kaynakları 30 milyar m³ civarındadır. Bu potansiyelin kabaca % 70'i yani 20 milyar m³'ü üretilebilir görünmektedir. Ancak, ülkemizde jeolojik ve jeofizik araştırmalarının ve özellikle sondaj edilerek araştırılmış bölgelerinin tarihinin yeni olduğu düşünülürse henüz keşfedilememiş muhtemel rezervlerin önümüzdeki gelecekte yukarıda verilen potansiyel değere ilavesi pekâlâ mümkündür. Tablo

4.7’de ülkemizin ispatlanmış ve muhtemel doğalgaz kaynakları ile ilgili bazı değerler verilmiştir.

Tablo 4.7: Türkiye Doğalgaz Potansiyeli [32].

Bölge	İspatlanmış Rezerv 10^9 m^3	Muhtemel Rezerv 10^9 m^3
Trakya; Hamitabat	50,0	90,0
Tuz Gölü Havzası	-	25,0 – 45,0
Adana – İskenderun	-	45,0 – 85,0
Güneydoğu Anadolu	15,0 (*)	115,0 – 140,0
Orta ve Batı Akdeniz Sahilleri	-	100,0 – 150,0
Kumrular, Umurca	5,0	15,0
Doğu Karadeniz	-	30,0 – 60,0

(*) Bu potansiyelin $14 \times 10^9 m^3$ ’ü, yanıcı olmayan gazlardır.

Tablo 4.7’den ülkemizin 300 – 400 milyar m^3 civarında bir doğalgaz potansiyeline sahip olabileceğini görmekteyiz. Bugün, gelişmiş bir Avrupa ülkesinin ortalama yıllık gaz tüketimi olan 15 milyar m^3 ’lük bir tüketimi, en az 20 yıl süre ile besleyebilecek bu potansiyelin, Türkiye gelecek ekonomisi için ne derece önemli olduğu açıktır.

Türkiye’de doğalgaz çok az miktarda üretilmekte olduğundan ithalatı da hızla artmaktadır. Türkiye doğalgazı esas olarak Rusya ve İran’dan boru hatlarıyla, Cezayir ve Nijerya’dan sıvılaştırılmış (LNG) olarak deniz yoluyla satın almaktadır. Ayrıca Azerbaycan ve Türkmenistan ile doğalgaz temini için anlaşmalar yapmıştır (Şekil 4.6).

Ekonomik büyüme ve sınırlı doğal kaynaklar, ülkemizin enerji ithali gerekliliğini arttırmaktadır. Türkiye stratejik konumu gereği Ortadoğu ve Hazar Denizi doğalgaz üretim alanları ile Avrupa tüketim pazarı arasında köprüdür [30].



Şekil 4.6: Türkiye Doğalgaz Boru Hattı Sistemi [33].

4.2 Sünger Demir Üretimi İçin Demir Cevherlerinin İncelenmesi

Demir çelik sektörünün ana hammaddesi demir cevheridir. Bir madenin cevher olarak değerlendirilebilmesi için işletilmesi ve kullanılmasının ekonomik olması gerekmektedir. Çelik sanayisinde kullanılan demir cevherlerinin harman tenörünün en az % 57 Fe olması arzu edilmektedir. Geçmişte, yüksek fırında aranan özelliklere sahip demir cevheri doğrudan maden ocaklarında yapılan üretimle karşılanmıştır. Ancak sanayide demire olan gereksinimin hızla artması ve yüksek fırına doğrudan yüklenebilir özellikteki cevherin giderek azalması, düşük tenörlü cevherlerin de değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. Demir cevherleri doğada; Manyetit (Fe_3O_4), Hematit (Fe_2O_3), Limonit ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Götit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Siderit (FeCO_3) ve Pirit (FeS_2) mineralleri şeklinde bulunmaktadır.

4.2.1 Dünya demir cevheri rezervleri ve üretim miktarları

Dünyadaki tüvenan demir cevheri rezervleri yaklaşık 160 milyar ton, baz rezervler toplamı ise 370 milyar tondur. Metal demir içeriği olarak toplam dünya rezervi 80 milyar ton dolayındadır. Bu rezervlerin büyük bir bölümü Avustralya, Brezilya, Kanada, Hindistan, ABD, Güney Afrika, Ukrayna, İsveç, Çin ve Rusya'da

bulunmaktadır. Dünyadaki önemli demir cevheri rezervleri Tablo 4.8’de verilmektedir.

Tablo 4.8: Dünya Demir Cevheri Rezervleri (milyon ton) [34].

Ülkeler	Tüvenan Cevher		Demir İçeriği	
	Rezerv	Baz Rezerv	Rezerv	Baz Rezerv
ABD	6,900	15,000	2,100	4,600
Avustralya	15,000	40,000	8,900	25,000
Brezilya	23,000	61,000	16,000	41,000
Kanada	1,700	3,900	1,100	2,500
Çin	21,000	46,000	7,000	15,000
Hindistan	6,600	9,800	4,200	6,200
İran	1,800	2,500	1,000	1,500
Kazakistan	8,300	19,000	3,300	7,400
Moritanya	700	1,500	400	1,000
Meksika	700	1,500	400	900
Rusya	25,000	56,000	14,000	31,000
Güney Afrika	1,000	2,300	650	1,500
İsveç	3,500	7,800	2,200	5,000
Ukrayna	30,000	68,000	9,000	20,000
Venezuela	4,000	6,000	2,400	3,600
Diğer Ülkeler	11,000	30,000	6,200	17,000
TOPLAM	160,000	370,000	79,000	180,000

Dünyada 50 kadar ülkede demir cevheri üretilmektedir. Çin, Avustralya, Brezilya, Rusya, Ukrayna ve Hindistan dünya demir cevheri üretiminin yaklaşık % 70’ini gerçekleştirmektedir. Tablo 4.9’da dünya demir cevheri üretim değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.9: Dünya Demir Cevheri Üretimi (bin ton) [2].

Ülkeler	2001	2002	2003	2004	2005
İsveç	19,486	20,281	21,498	22,272	23,256
Rusya	83,046	84,347	91,368	96,978	96,828
Ukrayna	54,679	58,897	62,496	65,542	68,541
Kanada	27,930	30,902	33,322	28,596	30,125
ABD	45,780	51,500	48,479	54,700	54,300
Brezilya	210,000	225,100	245,600	270,522	292,400
Venezuela	19,030	20,890	19,195	20,021	21,179
Moritanya	10,300	9,600	10,100	10,719	10,700
Güney Afrika	34,760	36,484	38,086	39,274	39,500
Çin	217,010	232,619	262,719	335,589	420,493
Hindistan	79,210	86,400	99,100	120,600	145,500
Avustralya	181,140	187,210	211,997	234,697	257,525
Türkiye	4,300	4,002	3,695	3,857	3,820
Dünya Toplamı	932,046	986,392	1,074,223	1,184,237	1,315,819

4.2.2 Türkiye demir cevheri rezervleri

Türkiye Cumhuriyetinin ilk dönemlerinde demir cevheri üretimi, Karabük Demir ve Çelik Fabrikasının kurulması ile başlamıştır. Divriği Demir Yatakları M.T.A. Enstitüsü tarafından 1937 yılında bulunmuş ve 1938 yılından itibaren üretime geçilmiştir. Bu tarihten sonra demir cevheri üretimi demir ve çelik tesislerinin gereksinimine paralel olarak artmış, günümüze kadar bu tesislerin hammadde gereksinimlerinin önemli bir bölümünü karşılamıştır. Türkiye’de üretilen demir cevheri Karabük, İskenderun ve Ereğli’de kurulmuş üç entegre demir cevheri tesisinde kullanılmaktadır.

Türkiye’de bugüne değin yaklaşık 900 adet demir oluşumu saptanmış, bunlardan ekonomik olabileceği düşünülen 500 kadarının etüdü yapılmıştır. Ülkemizde entegre demir-çelik fabrikalarında kullanılabilecek özellikteki demir cevheri rezervleri; Sivas-Erzincan-Malatya, Kayseri-Adana, Kırşehir-Kırıkkale-Ankara ve Balıkesir bölgelerinde yer almaktadır.

Demir yataklarımız genelde küçük ve orta boy yataklar kapsamı içine girebilir. Bu yatakların % 88’i çok küçük, % 11’i küçük ve ancak % 1’i orta büyüklükteki yataklar sınıfına girmektedir. Orta büyüklükteki yataklar, Divriği A ve B kafa, Hekimhan-Hasançelebi ve Deveci ile Sakarya-Çamdağ demir yataklarıdır. Yapılan çalışmalar

sonrası belirlenen demir cevheri rezervleri demir-çelik fabrikalarının kullanımları esas alınarak başlıca iki grupta toplanmıştır.

- İşletilebilir demir cevheri rezervleri
- Sorunlu demir cevheri rezervleri

4.2.2.1 İşletilebilir demir cevheri rezervleri

Yüksek fırınları besleyecek doğrudan şarja uygun demir cevheri rezervimiz 132.100.000 tondur. İşletilen veya işletilebilir nitelikteki 23 adet demir yatağının tenör ve rezerv oranlarına ait bilgiler Tablo 4.10’da verilmektedir.

Tablo 4.10: Türkiye İşletilebilir Demir Cevheri Rezervleri [35].

Yatak Adı	Tenör (%Fe)	Rezerv (Bin Ton)
Sivas-Divriği-A Kafa	54	36 500
Sivas-Divriği-B Kafa	56	8 000
Sivas-Divriği-Ekinbaşı	55	12 000
Sivas-Divriği-Purunsur	55	100
Sivas-Divriği-Taşlıtepe	62	60
Gürün-Otlukilise	54	800
Kangal-Çetinkaya-Pınargözü	54	1300
Malatya-Hekimhan-Deveci	38	46 000
Malatya-Hekimhan-Şırzı	49	275
Kayseri-Yahyalı-Karamadaşı	51	300
Kayseri-Yahyalı-Karaçatı Kayseri-Yahyalı-Karamağara Kayseri-Yahyalı-Kızıl+Menteş	54	9500
Kayseri-Yahyalı-Ayıgediği	54	590
Pınarbaşı-Tacin	51	70
Adana-Feke-Koruyeri	51	8500
Adana-Feke-Attepe	57	4500
Adana-Elmadağ	53	1000
Adana-Feke-Uyuzpınar	58	235
Adana-Karaisalı-Yenigireği	57	40
Ankara-Bala-Kesikköprü	54	1800
Balıkesir-Havran-Büyükeymir	53	340
Balıkesir-Şamlı	58	190
TOPLAM	-	132.100

4.2.2.2 Sorunlu demir cevheri rezervleri

Düşük tenörlü ve/veya yüksek zararlı bileşen içeren cevherlere sahip 50 kadar sorunlu yatağımız vardır. Bugünkü bilgilere göre bu yataklarda % 15 – 50 Fe arasında değişen tenörlerde toplam 1,3 milyar ton kaynağın varlığı bilinmektedir. Bu yataklardan bazıları, zengin ya da uygun nitelikte cevher içeren bölümlerinde seçimli madencilik yapılarak veya başka yataklardan elde edilen cevherlerle harmanlanmak suretiyle zararlı bileşen içerikleri uygun oranlara düşürülerek, bazı dönemlerde kısmen işletilmiştir. Büyük çoğunluğunun zararlı bileşenlerinden arıtılması için uygun zenginleştirme yöntemleri geliştirilmeden işletilmeleri mümkün değildir. Tablo 4.11’de sorunlu demir yataklarının tenör ve rezerv oranlarına ait bilgiler verilmektedir.

Ülkemizde silis, kükürt, bakır, karbonat, alumina, titan, fosfor, arsenik içeren ve sektörde maliyeti, kaliteyi ve üretimi doğrudan etkileyen sorunlu demir cevheri yataklarımız mevcuttur. Demir tenörleri % 20 – 54 arasında olan bu yataklar Malatya-Sivas-Erzincan-Bingöl, Kayseri- Kahramanmaraş, Balıkesir-Aydın, Ankara-Kırşehir bölgelerinde yer almaktadır. Bu sorunlu yataklardan Fe içeriği % 39, Mn içeriği % 4 olan Malatya - Hekimhan siderit cevherinden yılda 500 – 600.000 ton üretilerek özellikle İsdemir’de % 20 oranlarında sinter harmanında kullanılmaktadır [36].

Sorunlu yataklarımız içerisinde % 19 Fe ortalama tenörlü 685 milyon ton rezervi ile dikkati çeken Hasançelebi Demir Yatağı’nın öncelikle teknolojik sorunlarının çözülerek işletilmesine yönelik adımların atılması önerilmektedir. Türkiye’nin uzun dönemde demir ihtiyacının yurt içinden karşılanması konusunda alınacak tedbirlerin başında Hasançelebi Yatağı’nın işletilmesi gelmektedir [35].

Hasançelebi Demir Yatağı’nın yanı sıra, günümüzde işletilmeyen ve toplamda önemli rezervlere sahip Bizmişen, Avnik, Pınargözü gibi sorunlu yataklarımızın da işletilmesi konusunda adımlar atılmalıdır. Adı geçen yataklarda, sorunlu (düşük tenör veya empürite) cevherler dışında toplam 20 milyon ton dolayında direkt şarjlık işletilebilir tenörlerde rezerv varlığı bilinmektedir. Öncelikli olarak yüksek tenörlü düşük empüriteli cevherlerden başlanarak bu yataklarımızın işletilmesi, gerek ülke

kaynaklarının değerlendirilmesi gerekse, bulunduğu bölgelerde yaratacağı istihdam açısından büyük önem arz etmektedir [35].

Tablo 4.11: Türkiye Sorunlu Demir Yatakları [35].

Yatak Adı	Tenör (% Fe)	Rezerv(Bin Ton)	Açıklama
1 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi	19	685 000	TiO ₂ , düşük tenör
1 Malatya-Hekimhan-Karakuz*	41,08	17 500	SiO ₂ , Al ₂ O ₃
1 Sivas-Gürün-Otlukilise*	31,76	34 000	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , düşük tenör
1 Sivas-Kangal-Çetinkaya*	54	500	Düşük tenör
2 Sivas-Divriği-Dişbudak	41,41	300	SiO ₂ , düşük tenör
2 Sivas-Divriği-Kızıldağ	28,50	240	SiO ₂ , S düşük tenör
2 Sivas-Divriği-Çaltı-Kurudere	50	120	S
2 Sivas-Divriği-Yellice	19	125 000	Düşük tenör
1 Erzincan-Kemaliye-Bizmişen*	53	21 500	S,düşük tenör
1 Kayseri-Pınarbaşı-Uzunpınar	50	1500	SiO ₂
1 Kayseri-Yahyalı-Karamadazi*	51	500	Düşük tenör
1 Ankara-Bala-Kesikköprü	44,52	1800	SiO ₂ , S
1 Balıkesir-Havran-B.Eymir*	53	3350	As
1 Balıkesir-Ayvalık-Ayazment*	52	5600	Cu
2 Çanakkale-Merkez-Kuşçayırı	35	430	SiO ₂ , Al ₂ O ₃
1 Bingöl-Genç-Avnik	43,65	40 000	P ₂ O ₅
Bitlis-Meşesirtı-Öküzyatağı	15,60	3100	P ₂ O ₅
2 Adıyaman-Çelikhan-Pınarbaşı-Bulam	28,56	31 000	P ₂ O ₅
1 Sakarya-Karasu-Çamdağ 1	18,38	79 000	CaCO ₃ , düşük tenör
1 Sakarya-Karasu-Çamdağ 2	31,76	34 000	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , düşük tenör
2 K.Maraş-Elbistan-Nergele	52	4000	As
2 K.Maraş-Elbistan-Çakçak Dere	40	1200	SiO ₂
2 Gaziantep-İslahiye-Korudağ	30	80 000	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ düşük tenör
2 Gaziantep-İslahiye-Cabbarıdağı	30	10 000	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ düşük tenör
1 K.Maraş- Göksun-Beritdağı	52	150	Dekapaj
2 Hatay-İskenderun-Payas	35	68 000	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ düşük tenör
2 Hatay-Kırıkhan-Kastal	33,76	6000	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , TiO ₂ düşük tenör
2 Yozgat-Sarıkaya-Uzunkaya	14,20	6600	Düşük tenör, dekapaj
2 Yozgat-Sarıkaya- Atkayası	22	380	Düşük tenör, dekapaj
2 Yozgat-Sarıkaya-Karabacak	30	4500	Düşük tenör, dekapaj
2 Yozgat-Sorgun-Yılanpınar	20	30 000	Düşük tenör, dekapaj
2 Yozgat-Sorgun-Battallar	20	13 000	Düşük tenör, dekapaj
2 Yozgat-Sorgun-İnüstü	20	42 000	Düşük tenör, dekapaj
1 Aydın-Söke-Çavdar	42	12 000	Düşük tenör
2 Afyon-Çay-Sultandere	50,40	465	Dekapaj
2 İzmir-Torbalı-Hortuna	45,80	2000	As
2 Kütahya-Emet-Küreci	42	660	SiO ₂
2 Kütahya-Emet-Çatak	50	1900	S
2 Kütahya-Emet-Karaağıl	48,80	2000	PbS, Zn
2 Kütahya-Simav-Göncek	40	140	Dekapaj
2 Kütahya-Simav-Kalkan	50	500	S, SiO ₂
2 Eskişehir-Sivrihisar-Karaçam	45	2150	Ni, As
İçel-Gülpınar-Örendüzü	35	11 000	Düşük tenör, dekapaj
TOPLAM		1 383 085	

(1) Sorunlu cevherler

(2) Potansiyel cevherler

* Zaman zaman da olsa işletilen sorunlu yataklar

4.2.3 Türkiye’de demir cevheri üretimi

1985 yılında Türkiye’nin ilk demir cevheri zenginleştirme, 1986 yılında da Pelet tesisi devreye alınmıştır. Bu tesislerde 1985 yılından bu yana yaklaşık % 55 – 56 Fe tenörlü manyetit demir cevheri zenginleştirilerek, sinter tesisleri için % 63 Fe tenörlü sinterlik konsantre, yüksek fırınlar içinde de % 67 Fe tenörlü pelet üretilmektedir.

Günümüzde, entegre demir-çelik fabrikalarında kullanılabilir ve ortalama demir tenörü % 55 civarında olan yataklardan devlet ve özel sektör tarafından yılda yaklaşık 5 milyon ton üretim gerçekleştirilmektedir. Demir cevheri üretimimizin yaklaşık 2 milyon tonu Divriği-Hekimhan A.Ş.’nin sahip olduğu tesislerinde zenginleştirilmekte, bu tesislerden yılda yaklaşık 1 milyon ton civarında pelet, 700.000 ton sinterlik konsantre ve ayrıca C plaseri ve B kafa tozlarından da 300.000 ton sinterlik konsantre üretilmektedir [36].

Türkiye’de, 2005 yılında 3.820.000 ton demir cevheri üretilmiştir. Ülkemizde üç demir-çelik fabrikasının yıllık 10 – 13 milyon ton dolayındaki demir ihtiyacının yaklaşık 4 – 4,5 milyon tonluk kısmı yurtiçi kaynaklardan sağlanmakta, geri kalan kısmı için yılda yaklaşık 150 – 200 milyon dolar döviz ödenerek ithalatla karşılanmaktadır. Madencilik sektörüne ait dış ticaret rakamları göz önüne alındığında, demir cevheri ithalatı taş kömüründen sonra ikinci sırada yer almaktadır. Bilinen yurt içi demir cevheri kaynakları kalite ve miktar açısından yetersizdir, nakliye ve maliyet problemleri vardır. Ekonomik olarak işletilebilir demir rezervlerimiz, ülkemiz cevher talebini ancak 10 – 15 yıl karşılayabilecek düzeydedir.

4.2.4 Sünger demir üretimine uygun demir cevheri özellikleri

Demir cevheri (parça cevher veya pelet) döner fırında redüklenme davranışı, tane boyutu dağılımı ve kimyasal kompozisyon açısından bazı kriterleri sağlamalıdır. Döner fırında redüklenecek demir oksidin seçiminde aşağıda maddeler halinde verilen kriterler göz önüne alınmalıdır.

1. Yüksek indirgenebilirlik.
2. İndirgenme esnasında düşük parçalanma.
3. İndirgenme esnasında topaklanma olmaması.

4. Minimum gang içeriği.

5. Düşük S ve P içeriği

6. Yüksek Fe içeriği [14].

Demir şarjı, yüksek demir içeriği (% 68'in üzeri, hematit cevherleri için % 67 tercih edilmekte) ve düşük gang içeriğine sahip olmalıdır. Ayrıca demir şarjının kükürt ve fosfor içerikleri de düşük olmalıdır [14].

Standart koşullarda metalleşme için gerekli zaman olarak belirlenen cevherin redüklenebilirlik özelliği doğrudan döner fırının kapasitesini belirlemektedir. Demir cevherinin sahip olması gereken özellikleri Tablo 4.12'de verilmiştir.

Tablo 4.12: Sünger Demir Üretimi İçin Gerekli Demir Cevheri Özellikleri [14].

Kimyasal Özellikler	
Toplam Fe (%)	65 – 67
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ (%)	Maks. 5,0
S (%)	Maks. 0,03
P (%)	Maks. 0,06
Sn, Cu, Cr (toplam) (%)	Maks. 0,02
CaO+MgO (%)	Maks. 2,0
Fiziksel Özellikler	
Tane boyu (mm)	5 – 20

5. DEMİR OKSİTLERİN REDÜKSİYON PRENSİBİ

Karbonlu malzemelerle demir oksitlerin redüksiyonu sıvı ham demir veya sünger demir üreten tesislerin yanında, konu üzerinde deneysel çalışmalar yapan araştırmacıların da ilgilendiği önemli bir konudur. Yapılan çalışmalarda, redüksiyon olayı, termodinamik ve kinetik yönleri ile incelenmiş; belirli çalışma parametreleri göz önünde bulundurularak, bu parametrelerin demir oksitlerin redüksiyonunu ne yönde etkiledikleri araştırılmıştır [37, 38].

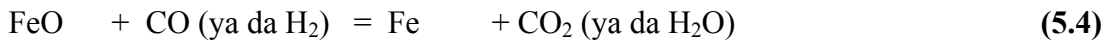
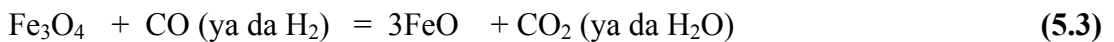
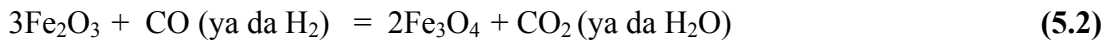
Temelde, demir oksitlerin metalik demire redüklenmesi demir-oksijen-karbon (veya hidrojen) termodinamik dengesinin redüklenme koşuluna doğru bozularak hammaddelerin içerdiği oksijenin indirgeyicilerle uzaklaştırılması ile gerçekleşmektedir. Bu koşulda, demir oksitler, seri reaksiyonlar neticesinde metalik demire redüklenirler [39].

5.1 Redüksiyonun Termodinamik Yönü

Demir oksitlerin bir CO/CO₂ veya H₂/H₂O gaz karışımı ile redüklenmesi için temel termodinamik şart, gaz fazındaki oksijen kısmi basıncının, demir oksitlerin oksijen kısmi basıncından düşük olmasıdır;

$$P_{O_2} (Fe_xO_y) > P_{O_2} (CO/CO_2 \text{ veya } H_2/H_2O) \quad (5.1)$$

Demir oksitlerin hematitten itibaren CO/CO₂ ya da H₂/H₂O gaz karışımıyla demire redüksiyonu üç kademedede gerçekleşir. Bu reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;

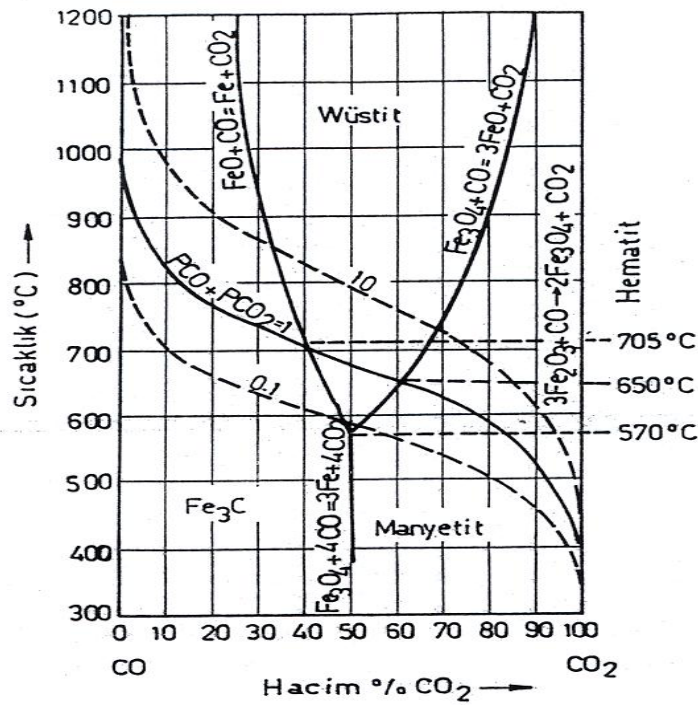


Redüksiyon işleminde gerekli olan redükleyici gaz aşağıdaki iki reaksiyona göre üretilir;



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

$K_p = P^2_{CO} / P_{CO_2} \times a_C$ şeklindedir ve $a_C = 1$ alındığında kısmi basınçlar cinsinden $K_p = P^2_{CO} / P_{CO_2}$ olacaktır. Denge durumunda C ile dengede olan CO ve CO₂' in kısmi basınçları verilen bir sıcaklık ve toplam basınçta hesaplanabilir. Şekil 5.1'de gösterilen Bauer-Glaessner diyagramı sıcaklığın bir fonksiyonu olarak demir ve oksitleriyle dengede olan gazların kısmi basınçlarını vermektedir.



Şekil 5.1: Bauer-Glaessner Diyagramı ve Boudouard Eğrileri [40].

Şekil 5.1'e göre $P_{CO} + P_{CO_2} = 1$ atm toplam basıncında demir oksitlerin metalik demire redüksiyonu ancak 705°C'nin üzerinde mümkün olmaktadır. 705°C'nin altında demir oksitler metalik demire redüklenememekte ancak hematit manyetit haline dönüştürülebilmektedir. Ayrıca bu şartlarda Boudouard reaksiyonu C açığa çıkacak yönde gelişmektedir (kurumlaşma CO azalır, CO₂ artar). Aynı şekilde, 650

ile 705°C arasında manyetit-wüstit dönüşümünü gerçekleştirmek de mümkündür. 650°C'nin altında ise, hematitin manyetite redüklenmesi bu gaz basıncında gerçekleştirilebilmektedir. $P_{CO} + P_{CO_2}$ toplam basıncı yükseldikçe, karbonun demir oksitleri redükleme kabiliyeti azalır, aynı gaz bileşiminin sağlanması için sıcaklığın yükseltilmesi gereklidir [40].

Demir oksitlerin redüksiyon reaksiyonlarında (5.2; 5.3; 5.4) 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.

$$\Delta G^0 = -RT \ln P_{CO_2}/P_{CO} \quad (5.7)$$

$$P_{CO} + P_{CO_2} = P_T \quad (5.8)$$

5.2 Redüksiyonun Kinetik Yönü

Reaksiyonlar bir veya birden fazla faz arasında gerçekleşmelerine göre sırasıyla homojen ve heterojen reaksiyonlar olarak adlandırılırlar. Demir oksitlerin redüksiyonu, koşullara göre değişiklik gösterebilen, arka arkaya beraber oluşan birçok karmaşık veya kısmi olaylar içeren heterojen bir prosestir. Heterojen reaksiyonlar birden fazla faz arasında gerçekleşen reaksiyonlardır ve reaktanlar arasında bir ara yüzey varlığı ile karakterize edilirler. Örneğin bir katı-gaz reaksiyonunda ara yüzey katının gaz ile temastaki dış yüzeyidir. Bu durumda bütün heterojen reaksiyonlar ara yüzeylerine bağlı olarak beş grupta toplanabilir; Katı-Gaz, Katı-Sıvı, Katı-Katı, Gaz-Sıvı, Sıvı-Sıvı. Heterojen reaksiyonların birden fazla faz arasında gerçekleşmesi aşağıdaki şekilde olmaktadır [41, 42]:

1. İndirgeyici gazın reaksiyon ara yüzeyine yayınması.
2. Ara yüzey reaksiyonları.
 - a) İndirgeyici gazın reaksiyon ara yüzeyine (veya por yüzeyine) adsorblanması.
 - b) İndirgeyici gazla parçacık arasındaki kimyasal reaksiyon.
 - c) Reaksiyon sonucu oluşan reaksiyon ürünlerinin desorbsiyonu.
3. Reaksiyon sonucu oluşan reaksiyon ürünlerinin arayüzeyden yayınması [43].

Genellikle yukarıda belirtilen adımlardan birinin hız sabiti diğerlerine göre oldukça düşük olur. Bu durumda bu adım hızı kontrol eden adımdır ve bu adımın hızı da toplam reaksiyon hızını belirler. Heterojen reaksiyonlar, en yavaş adıma bağlı olarak; yayınma (difüzyon) kontrollü, kimyasal reaksiyon kontrollü veya bu iki adımın hız sabitlerinin eşit olması durumunda ise karışık kontrollü olarak gelişir.

Difüzyon katsayısının ve reaksiyon hız sabitinin sıcaklığa olan bağımlılıklarındaki farklılık nedeni ile difüzyon kontrollü prosesler; kimyasal reaksiyon kontrollü proseslere göre sıcaklığa daha az bağımlıdırlar. Difüzyon katsayısının sıcaklığa bağımlılığı lineerken, kimyasal reaksiyonlarda hız sabitinin sıcaklığa bağımlılığı ekspanansiyeldir. Sadece katı katı reaksiyonlarda difüzyon katsayısı sıcaklıkla ekspanansiyel olarak değişir ve bu tip reaksiyonlar yüksek aktivasyon enerjisine sahip reaksiyonlar olarak bilinir.

Heterojen reaksiyonlarda ara yüzey alanı, reaksiyona giren maddelerin bir fazdan diğerine taşınmasında taşınan madde miktarı ara yüzey alanına bağlı olduğu için son derece önemlidir. Katı madde ile gerçekleştirilen reaksiyonlarda küçük taneli katılar büyük yüzey alanına sahip olduklarından büyük tanelilerden daha hızlı reaksiyon verirler [40, 41, 42, 43].

Sıvı veya gaz ile reaksiyona giren katı maddenin geometrik şekli, ilgili süreçlerin hızını belirlemede önemli rol oynar. Katı madde disk veya plaka biçimli ise, yüzey alanının süreç boyunca sabit kaldığı varsayılır. Çünkü disk ve plakada reaksiyonun, yüzeyden derine yüzey alanı korunarak ilerlediği düşünülür. Fakat eğer katı madde küre veya pelet biçimli ise, reaksiyon kürenin dış yüzeyinden içeriye doğru ilerlerken, yeni reaksiyon yüzeyinin oluşturduğu çap küçüleceğinden, yüzey alanı süreç boyunca devamlı değişir ve bu nedenle de reaksiyon hızı değişir (azalır). Bu değişme göz önüne alınarak, reaksiyon sürecinin hızını tahmin etmek mümkün olabilir.

Katılarla gerçekleşen reaksiyonlarda oluşan reaksiyon ürününün gözenekli veya gözeneksiz oluşumuna bağlı olarak reaksiyonun kinetiği de farklı olacaktır. Küresel şekilli katı maddelerle gerçekleştirilen reaksiyonlarda reaksiyon ara yüzeyi oldukça belirgindir. Reaksiyonun ilerlemesi ile reaksiyon ara yüzeyi parçanın dış yüzeyinden merkezine doğru ilerler ve reaksiyona girmiş ve girmemiş kısım arasında kesin bir sınır oluşur.

Reaksiyon ürünleri, demir oksitlerin katı veya gaz redükleyici ile reaksiyonunda olduğu gibi, orijinal katı madde ile reaksiyona giren gazlar arasında bir tabaka oluşturuyorsa reaksiyonun ilerleyebilmesi için moleküllerin bu tabakadan difüzyonla taşınması gerekir. Difüzyon ürün tabakasının yapısına bağlı olarak, kristal latisinde katı difüzyonla veya reaksiyon ürünlerindeki porlarda gaz difüzyonu ile gerçekleşir.

Reaksiyon kontrol mekanizmasına göre hız eşitlikleri yazılırsa; [40, 41]

1. Sınırlı kalınlıkta poröz bir reaksiyon ürünü tabakasına sahip bir üründe belirli sıcaklıkların altında genelde kimyasal reaksiyon hız belirleyici adımdır. Bu durumda R-t ilişkisi aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$[1-(1-R)^{1/3} = kt] \quad (5.9)$$

Reaksiyonun kimyasal kontrollü olması durumunda $[1-(1-R)^{1/3}]$ -t değişimi lineerdir ve eğimden hız sabiti hesaplanır.

2. Yoğun bir reaksiyon ürünü tabakasının meydana gelmesi durumunda difüzyon yavaştır, ara yüzey reaksiyonu ise dengeye ulaşmıştır. Bu durumda reaksiyon hızını kontrol eden adımın difüzyon olması beklenir. Bu durumda R-t ilişkisi aşağıdaki bağıntı ile verilir;

a. Jander eşitliği:

$$[1-(1-R)^{1/3}]^2 = kt \quad (5.10)$$

b. Crank ve Ginstling – Brounshtein eşitliği:

$$[1-2/3R-(1-R)^{2/3} = kt] \quad (5.11)$$

Yayınma kontrollü bir reaksiyonda (5.10; 5.11) eşitliklerin sol tarafındaki değerlerin zamana göre çizilen grafiği lineer çıkacaktır ve eğim hız sabitine eşittir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ

Bu tez çalışmasında ülkemizin iki farklı yöresinden temin edilen üç farklı tenöre sahip yerli demir cevherleri (Sivas-Divriği B Kafa yüksek tenörlü, Malatya-Hekimhan-Hasançelebi orta ve düşük tenörlü demir cevherleri) ve redükleyici olarak Soma-Kısrakdere linyit kömürü kullanılarak redüksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen redüksiyon deneylerinde, C_{fix}/Fe_{top} oranı, sıcaklık ve zaman olmak üzere, üç farklı parametrenin metalizasyona olan etkileri incelenerek bu cevherlerin sünger demir üretimine uygunlukları araştırılmıştır.

6.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Redüksiyon deneylerinin gerçekleştirilmesinde, demir cevherleri ve linyit kömürü kullanılmıştır. 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. Bu malzemelere ait temel özellikler, aşağıda sırasıyla anlatılmıştır.

6.1.1 Demir cevheri

Deneysel çalışmalarda, ülkemizin iki farklı yöresinden elde edilen, üç farklı tenöre sahip demir cevherleri kullanılmıştır. Sırasıyla deneyler Sivas – Divriği B Kafa yüksek tenörlü hematit demir cevheri, Malatya – Hekimhan – Hasançelebi orta ve düşük tenörlü manyetit demir cevherleri ile gerçekleştirilmiştir.

Sünger demir üretiminde parça cevher kullanımı, atıl durumda bulunan yerli cevher yataklarımızın değerlendirilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Şaft fırınlarının yanı sıra, özellikle döner fırında parça cevher kullanımı oldukça yaygındır. Fırına beslenen parça cevher kimyasal bileşim, boyut dağılımı ve redükleyici şartlardaki davranışları açısından belirli özellikleri taşımalıdır. Demir içeriği yüksek olmalı, S ve

P ise düşük olmalıdır. Redükleyici şartlarda şişme ve sonradan ufalanma özellikle dikkate alınmalıdır.

Deneylerde kullanılan demir cevherlerinin parça boyutu 10 – 20 mm. arasında seçilmiştir. Demir cevherlerinin kimyasal bileşimi, Tablo 6.1’de verilmektedir.

Tablo 6.1: Deneylerde Kullanılan Parça Cevherlerin Ortalama Bileşimi.

Madde	Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri	Malatya- Hekimhan- Hasançelebi (I)	Malatya- Hekimhan- Hasançelebi (II)
	Ağırlık, (%)	Ağırlık, (%)	Ağırlık, (%)
Fe	64,18	28,92	17,9
S	0,25	0,015	0,006
SiO ₂	4,09	28,80	41,52
CaO	1,021	0,699	2,056
MgO	0,712	4,691	1,939
Al ₂ O ₃	0,717	6,025	3,437
Na ₂ O	0,037	1,172	1,132
K ₂ O	0,228	3,849	1,71
Mn	0,17	0,049	0,06
TiO ₂	-	0,767	0,417

6.1.2 Kömür

Farklı tipte linyit kömürleri kullanılarak demir oksit peletlerin redüksiyonu ile sünger demir üretimi konusunda bölümümüz laboratuvarlarında yapılan çalışmalarda en iyi metalizasyon oranları Soma-Kısrakdere linyit kömürü kullanılarak elde edilmiştir [6]. Deneysel çalışmalarda bu nedenle redükleyici olarak, Soma-Kısrakdere linyit kömürü kullanılmıştır. Bu kömürün kimyasal bileşimi Tablo 6.2’de verilmektedir.

Tablo 6.2: Deneylerde Kullanılan Linyit Kömürünün Kimyasal Bileşimi.

Madde	Soma-Kısrakdere
	Orijinal Kömürde* (%)
Nem	17,25
Kül	13,41
Uçucu Madde	52,45
Sabit Karbon	34,10
Toplam Kükürt	1,03

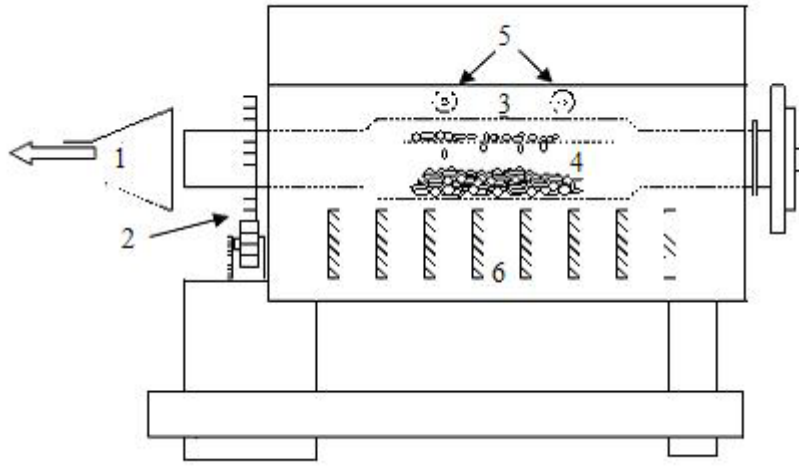
* Olduğu halde analiz.

Ocaktan 18 – 50 mm. boyutlarında gönderilen kömürler, laboratuvar tipi kırıcılar kullanılarak, deneylerde kullanılacak boyut aralığına (-9 + 2,36 mm.) indirilmiştir.

6.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

6.2.1 Döner fırın

Redüksiyon deneyleri ilk olarak, elektrik enerjisi ile ısıtılan laboratuvar tipi döner fırında gerçekleştirilmiştir. Döner fırının şematik görünüşü, Şekil 6.1’de verilmektedir.



Şekil 6.1: Yarı Pilot Deney Düzeneği Şematik Diyagramı 1-Gaz Kolektörü, 2- Dönme Dişlileri, 3- Seramik Reaksiyon Tüpü, 4- Şarj Malzemesi, 5- PtRh10/Pt Termocuğu, 6- SiC Dirençler

Şekil 6.1’de görüldüğü gibi fırın, ısıtma odasının tabanına yerleştirilmiş olan SiC esaslı ısıtma elemanları ile ısıtılmaktadır. Redüksiyon işlemleri, malzemelerin sabit bir sıcaklık zonunda bulunmalarına imkân verecek şekilde dizayn edilmiş bir seramik tüpte gerçekleştirilmiştir. Seramik tüp, bir elektrik motorundan hareket alan dişli-zincir sistemi ile döndürülmektedir. Tüpün dönme hızı, 0 – 10 d.dak⁻¹ arasında değiştirilebilmektedir. Seramik tüp yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemeden imal edilmiş olup, 1300 °C’ye kadar çalışmaya olanak sağlamaktadır.

6.2.2 Laboratuvar tipi yüksek sıcaklık fırını

Redüksiyon deneyleri, laboratuvar tipi döner fırında meydana gelen yapışma problemi nedeniyle elektrik enerjisi ile ısıtılan Carbolite marka laboratuvar tipi yüksek sıcaklık fırınında (Şekil 6.2) silika bağlı grafit potalar içerisinde yapılmıştır. Fırının maksimum çalışma sıcaklığı 1600 °C'dir. Isıtma elemanları fırın içerisinde her iki yana eşit şekilde yerleştirilerek termal verimlilik sağlanmıştır. Silisyum karbür ısıtma elemanları mekanik darbelere ve kimyasal ataklara karşı yüksek direnç göstermekte ve uzun servis ömrü sağlamaktadır. Yukarı doğru açılır kapak sıcak kapak yalıtımını kullanıcıdan uzak tutmaktadır.



Şekil 6.2: Laboratuvar Tipi Yüksek Sıcaklık Fırını.

6.2.3 Diğer cihazlar

Deneyisel çalışmalarda kullanılan linyit kömürünün istenilen boyutlara indirilmesi amacıyla, Karl Koll marka çeneli, konik ve merdaneli kırıcılar kullanılmıştır.

Karbon ve kükürt içeriklerinin analizinde ELTRA CS 800 marka karbon - kükürt analiz cihazı kullanılmıştır.

Mikroyapı analizleri, Olympus GX71 metalurjik optik mikroskop ve Olympus C-7070 görüntüleme sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

6.3 Deneylerin Yapılışı

6.3.1 Döner fırın deneyleri

Sivas Divriği B Kafa yüksek tenörlü demir cevheri kullanılarak döner fırında gerçekleştirilen redüksiyon deneyleri yüksek sıcaklığa (1300 °C) dayanıklı bir seramik tüp içerisinde farklı sıcaklık ve C_{fix}/Fe_{top} oranları için gerçekleştirilmiştir (Tablo 6.3).

Oksit halindeki mevcut demirin tamamının redüklenmesi için gereken teorik karbon miktarları hematit cevheri için bulunarak, 1 kg parça cevher için gereken redükleyici miktarları hesaplanmıştır. Döner fırında Sivas Divriği B Kafa demir cevheri (hematit) ile gerçekleştirilen deneylerde sitokiyometrik miktarın 1,25 ($C_{fix}/Fe_{top}=0,40$) ve 1,40 ($C_{fix}/Fe_{top}=0,45$) katı karbon kullanılmıştır.

Tablo 6.3: Döner Fırın Redüksiyon Deneyleri

T (°C)	C_{fix}/Fe_{top}	t (dakika)	Metalizasyon (%)
1000	0,40	60	2,43
1000	0,40	120	5,54
1100	0,40	60	35,53
1100	0,40	120	34,82
1200	0,40	60	41,71
1200	0,40	120	49,28
1100	0,45	60	35,97
1100	0,45	120	31,56

Tablo 6.3’de görüldüğü gibi 0,40 C_{fix}/Fe_{top} oranında 1000 °C’de gerçekleştirilen deneyler sonucunda metalizasyon oranları çok düşük seviyelerde kalmıştır. Yüksek metalizasyon değerleri elde etmek amacıyla sıcaklık arttırıldığında 0,40 C_{fix}/Fe_{top} oranında 1100 °C’de gerçekleştirilen deneyler sonucu metalizasyon oranının % 35 seviyelerine ulaştığı görülmüştür. 1100 °C’de sitokiyometrik oranın 1,40 katı karbon kullanarak 0,45 C_{fix}/Fe_{top} oranı için gerçekleştirilen deneyler sonucu karbon miktarının arttırılmasının metalizasyon üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüş, metalizasyonda meydana gelen artışın sıcaklıktan kaynaklandığı anlaşılmıştır. Bu amaçla 0,40 C_{fix}/Fe_{top} oranında 1200 °C’de gerçekleştirilen deneyler sonucunda 60 dakika sonunda metalizasyon oranı % 41,71, 120 dakika sonunda ise % 49,28 olarak elde edilmiştir. Bu metalizasyon değerleri sünger demir için oldukça düşüktür.

Sıcaklığın arttırılarak metalizasyon oranının arttırılması düşünülmüştür. Ancak 1200 °C’de yapılan deneyler sonucunda seramik tüpte meydana gelen yapışma problemi nedeniyle deneyler daha sonra döner fırın yerine laboratuvar tipi yüksek sıcaklık fırınında gerçekleştirilmiştir.

6.3.2 Yüksek sıcaklık fırını deneyleri

Laboratuvar tipi yüksek sıcaklık fırınında gerçekleştirilen redüksiyon deneyleri için farklı tenörlere sahip demir cevherleri, farklı miktarda kömür ile karıştırılarak silika bağlı grafit potalar içerisine konulmuş ve fırına şarj edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda zamana bağlı olarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda fırından alınan numuneler oksitlenmeyi önlemek amacıyla desikatörlere alınmış ve sonrasında kimyasal analize verilmiştir.

Deneylerde kullanılan Sivas Divriği B Kafa demir cevheri hematit, Malatya-Hekimhan-Hasançelebi demir cevherleri ise manyetit formundadır. Buradan hareketle redüksiyon deneyleri için gerekli olan şarj miktarları hematit ve manyetit cevherlerinin karbonla direkt redüksiyon reaksiyonları gereğince hesaplanmıştır. Sitokiyometrik C miktarlarını hesaplamak amacıyla kullanılan direkt redüksiyon reaksiyonları (6.1 – 6.2) aşağıda verilmiştir.



Bu reaksiyonlar gereğince 1 kg parça cevherin redüksiyonu için şarj edilecek kömür miktarları her üç cevher için tablo 6.4’de verilmektedir.

Tablo 6.4: Redüksiyon Deneyleri Programı

1 kg parça cevher için şarj edilen kömür miktarı (g)			$C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$
Sivas Divriği B Kafa	Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I)	Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II)	
944,06	432,64	262,45	0,50
845,88	-	-	0,45
755,25	339,19	209,96	0,40

Tablo 6.4’de görüldüğü gibi, 1 kg parça cevher başına (sabit) kullanılacak redükleyici miktarlarını hesaplamak amacıyla oksit halindeki mevcut demirin tamamının redüklenmesi için gereken teorik karbon miktarları hematit ve manyetit cevherleri için bulunmuştur. Sivas Divriği B Kafa demir cevheri (hematit) ile gerçekleştirilecek deneyler için bu miktarın 1,25, 1,40 ve 1,60 katı, Malatya-Hekimhan-Hasançelebi demir cevherleri (manyetit) ile gerçekleştirilecek deneyler için ise bu miktarın 1,40 ve 1,80 katı fazla karbon miktarları hesaplanmıştır.

C_{fix}/Fe_{top} oranı, sistemde mevcut demirin tamamının redüklenmesi için gerekli karbon miktarının toplam demir miktarına oranı şeklinde ifade edilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda, C_{fix}/Fe_{top} oranı; pelet, parça cevher ve konsantreler için 0,42 ve hadde tufalı için de 0,38 olarak hesaplanmaktadır. Tablo 6.4 incelendiğinde, deneylerde kullanılan karbon miktarının, bu değerlerden daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun amacı düşük tenörlü cevherlerle sitokiyometrik oranda karbon kullanarak gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen düşük metalizasyon değerleri nedeniyle redüksiyon için gerekli karbon miktarının daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

Redüksiyon deneyleri; Sivas Divriği B Kafa demir cevheri ile çalışırken 1100, 1150, 1200 ve 1250 °C, Malatya-Hekimhan-Hasançelebi demir cevherleri ile çalışırken 1100, 1150, 1200 °C sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.5’de yapılan redüksiyon deneyleri ve deney şartları yer almaktadır. Ek Tablo A.1’de ise tüm redüksiyon deneyleri kimyasal analiz sonuçlarıyla beraber verilmektedir.

Zamanın metalizasyona etkisinin incelenmesi amacıyla deneyler farklı zaman aralıkları için tekrarlanmıştır. Hazırlanan demir cevheri - kömür karışımı silika bağlı grafit pota içerisine konulduktan sonra yüksek sıcaklık fırınına, çalışma sıcaklığında şarj edilmiştir. Şarjın yapılmasıyla birlikte redüksiyon süresi başlatılmıştır. Redüksiyon sonrası fırından alınan numuneler, yüksek sıcaklıktaki silika bağlı grafit pota içerisinden oda sıcaklığındaki başka bir potaya boşaltılarak desikatöre alınmış ve oksidasyona izin vermeyecek şekilde soğutulmuştur. Redüklenmiş numuneler, daha sonra kimyasal analize tabi tutularak, metalik ve toplam demir oranları bulunmuştur. Bulunan metalik ve toplam demir değerlerinden yararlanarak, metalizasyon değerleri, aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Metalizasyon} = (\text{Metalik demir} / \text{Toplam demir}) \times 100$$

Metalizasyon, yüzde olarak redüksiyon verimin bir ifadesi olup, mevcut toplam demirin ne kadarının redüklendiğinin ölçüsüdür.

Tablo 6.5: Yüksek Sıcaklık Fırını Redüksiyon Deneyleri ve Deney Şartları.

Deney No	Parça Cevher Cinsi	Sıcaklık (°C)	C _{fix} /Fe _{top}	Süre, dak.
1	Sivas Divriği B Kafa	1100	0,40	15,30,45,60,120
2		1150		
3		1200		
4		1250		
5		1100	0,45	
6		1150		
7		1200		
8		1250		
9		1100	0,50	
10		1150		
11		1200		
12		1250		
13	Malatya–Hekimhan-Hasançelebi (I)	1100	0,40	
14		1150		
15		1200		
16		1100	0,50	
17		1150		
18		1200		
19	Malatya–Hekimhan-Hasançelebi (II)	1100	0,40	
20		1150		
21		1200		
22		1100	0,50	
23		1150		
24		1200		

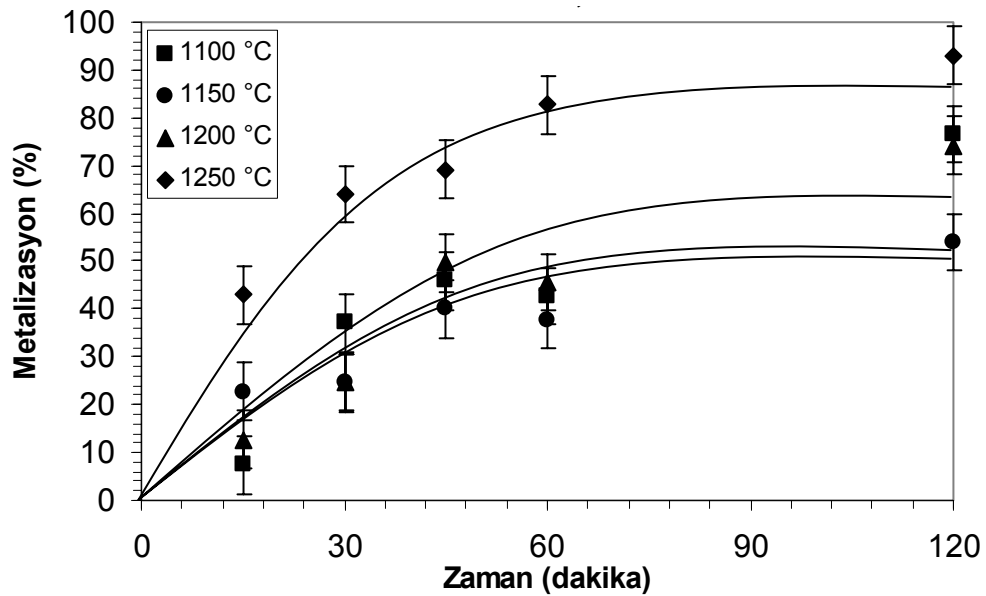
6.4 Deney Sonuçları

Deneyssel çalışmalarda parametre olarak seçilen $C_{\text{fix}}/Fe_{\text{top}}$ oranı, sıcaklık ve zamanın metalizasyona olan etkileri her bir demir cevheri ile gerçekleştirilen redüksiyon deneyleri için ayrı başlıklar halinde incelenmiştir. Bu parametrelerin metalizasyon üzerindeki etkileri, mikroyapı incelemeleriyle de saptanmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

6.4.1 Sivas Divriği B Kafa demir cevheri

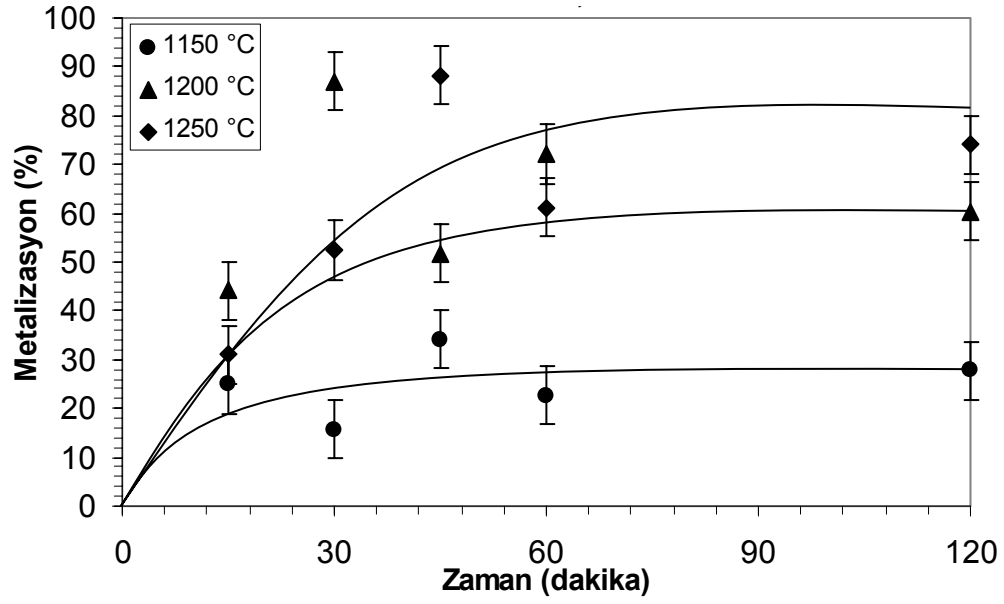
6.4.1.1 Sivas Divriği B Kafa demir cevher için redüksiyon sıcaklığının ve süresinin metalizasyona etkisi

Sivas Divriği B Kafa yüksek tenörlü demir cevherini kullanarak yapılan deneysel çalışmalar 1100, 1150, 1200 ve 1250°C olmak üzere, dört farklı sıcaklıkta, 15, 30, 45, 60 ve 120 dakika zaman aralıkları için gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve zamanın metalizasyona olan etkileri, Şekil 6.3, 6.4 ve 6.5’de, sırasıyla 0,40, 0,45 ve 0,50 C_{fix}/Fe_{top} oranları için verilmiştir.



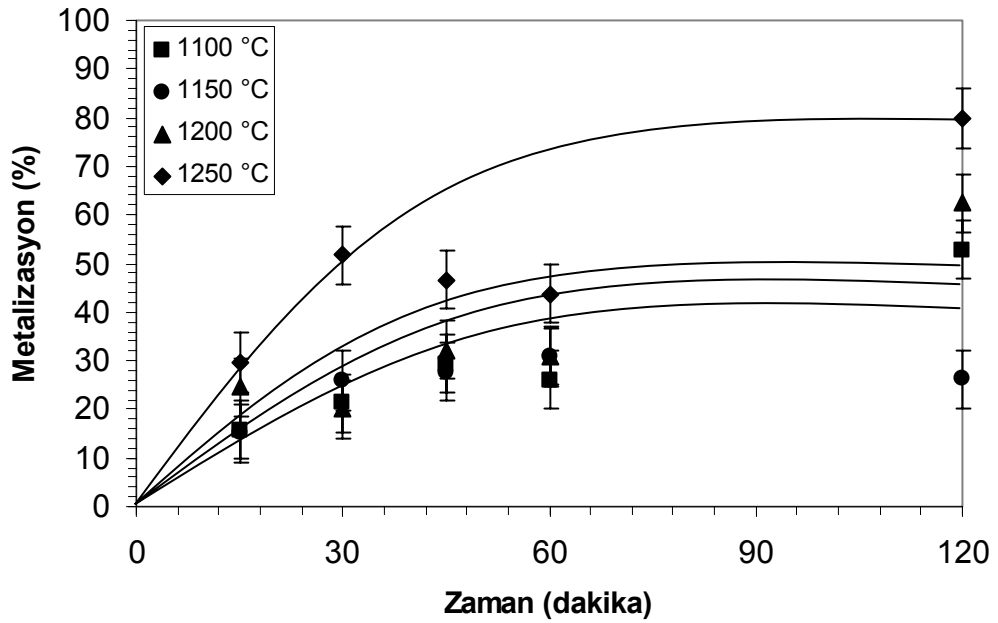
Şekil 6.3: Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri için Sabit C_{fix}/Fe_{top} Oranında (=0,40) Artan Sıcaklıkla Birlikte Metalizasyonun Değişimi

C_{fix}/Fe_{top} oranı 0,40 olduğunda 1100 ve 1150°C’deki metalizasyon değerleri birbirine çok yakın olup artan sıcaklıkla birlikte 1200 ve 1250°C sıcaklıklarında metalizasyonun da arttığı görülmektedir. Örneğin C_{fix}/Fe_{top} oranının 0,40 olduğu şartlarda 120 dakika sonunda metalizasyon değerleri 1100 ve 1150°C için yaklaşık % 50 iken, sıcaklığın 1200°C’ye artmasıyla metalizasyon % 65’e, 1250°C’ye artmasıyla ise % 88 mertebelerine ulaşmıştır.



Şekil 6.4: Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri için Sabit C_{fix}/Fe_{top} Oranında ($=0,45$) Artan Sıcaklıkla Birlikte Metalizasyonun Değişimi.

C_{fix} / Fe_{top} oranının 0,45 olduğu durumda artan sıcaklıkla beraber metalizasyonun da arttığı görülmektedir. 120 dakika sonunda 1150, 1200 ve 1250°C sıcaklıklardaki metalizasyon değerleri sırasıyla; % 27, % 60 ve % 82 olarak gerçekleşmiştir.

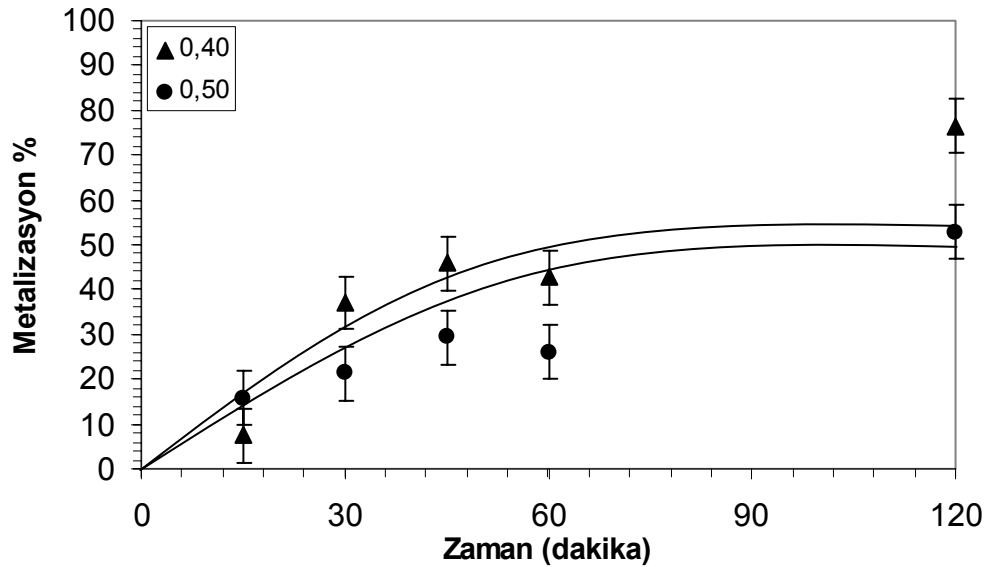


Şekil 6.5: Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri için Sabit C_{fix}/Fe_{top} Oranında ($=0,50$) Artan Sıcaklıkla Birlikte Metalizasyonun Değişimi

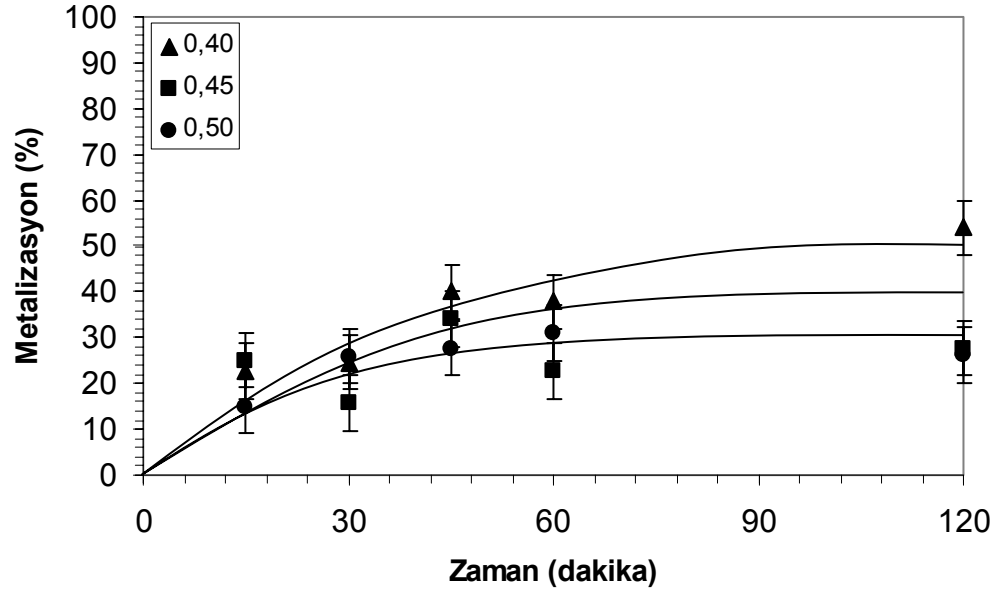
C_{fix}/Fe_{top} oranı 0,50 olduğunda ise 1100, 1150 ve 1200°C'deki metalizasyon değerleri birbirine çok yakın olup artan sıcaklıkla birlikte 1250°C'de metalizasyonun da arttığı görülmektedir. C_{fix}/Fe_{top} oranının 0,50 olduğu şartlarda 120 dakika sonunda metalizasyon değerleri 1100, 1150 ve 1200°C için % 40 ile 50 arasında değişirken, sıcaklığın 1250°C'ye artmasıyla metalizasyon % 80 seviyelerine çıkmaktadır. Çizilen metalizasyon eğrilerinden görüldüğü gibi artan süre ile birlikte metalizasyon her bir sıcaklık için bir maksimum değere ulaştıktan sonra sabit kalmıştır.

6.4.1.2 Sivas Divriği B Kafa demir cevheri için C_{fix}/Fe_{top} oranının metalizasyona etkisi

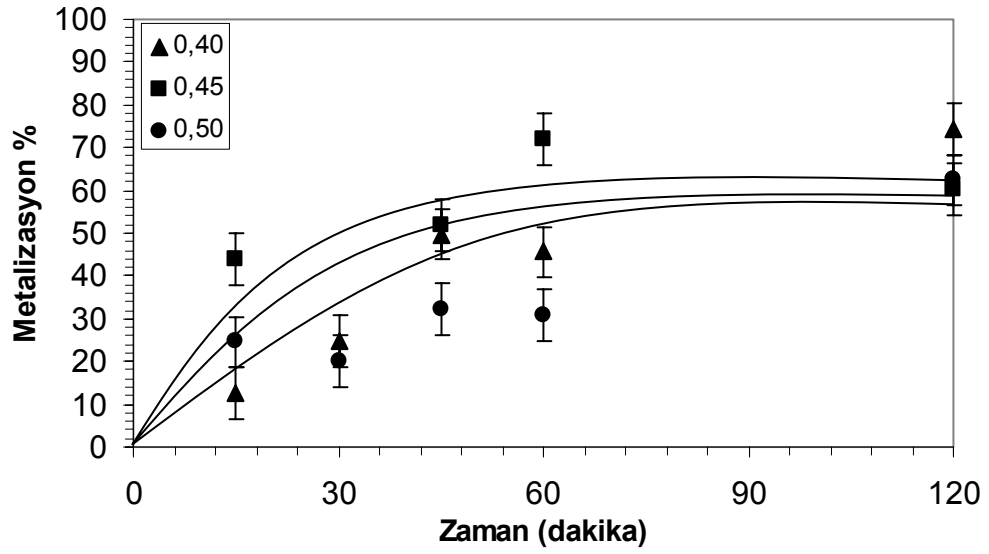
Sivas Divriği B Kafa yüksek tenörlü demir cevheri kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda, 0,40, 0,45 ve 0,50 C_{fix}/Fe_{top} oranlarına göre hesaplanan miktarlarda kömür kullanılmış ve kömür tüketim oranlarının değişiminin metalizasyona olan etkileri incelenmiştir. Her üç tüketim oranı için çizilen, metalizasyon redüksiyon süresi eğrileri, Şekil 6.6, 6.7, 6.8 ve 6.9'da, dört farklı sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmalar için verilmiştir.



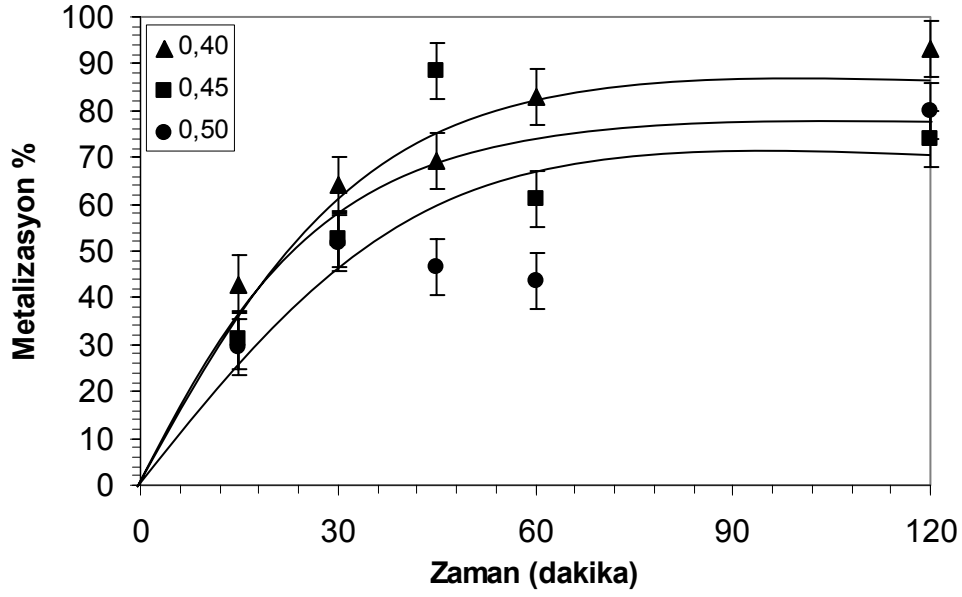
Şekil 6.6: Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri için Sabit Sıcaklıkta ($T= 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$), C_{fix}/Fe_{top} Oranlarına Bağlı Olarak Metalizasyonun Değişimi.



Şekil 6.7: Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri için Sabit Sıcaklıkta ($T=1150\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ Oranlarına Bağlı Olarak Metalizasyonun Değişimi.



Şekil 6.8: Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri için Sabit Sıcaklıkta ($T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ Oranlarına Bağlı Olarak Metalizasyonun Değişimi.



Şekil 6.9: Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri için Sabit Sıcaklıkta ($T= 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ Oranlarına Bağlı Olarak Metalizasyonun Değişimi.

Şekil 6.6, 6.7, 6.8 ve 6.9'da görüldüğü gibi, $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranının artmasıyla beraber metalizasyonda önemli bir değişim olmamaktadır. Artan $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranı metalizasyonda büyük bir artışa yol açmamış, metalizasyon değerleri artan kömür oranına rağmen birbirlerine oldukça yakın bir aralıkta seyretmiştir. Örneğin; 120 dakika sonunda $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ deney sıcaklığında 0,40, 0,45 ve 0,50 $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranı için metalizasyon değerleri % 60 – 65 aralığında değişmiştir.

Sivas Divriği B Kafa yüksek tenörlü demir cevheri kullanılarak yapılan deneylerde, artan $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranı ile elde edilen metalizasyon değerlerinin hata sınırları içerisinde birbirlerine çok yakın değerlerde salınım gösterdiği görülmektedir. Karbon miktarının arttırılmasının metalizasyona önemli bir etkisinin olmadığı görülmekte, metalizasyonda meydana gelen artışın temel nedeninin sıcaklıkta meydana gelen artıştan kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

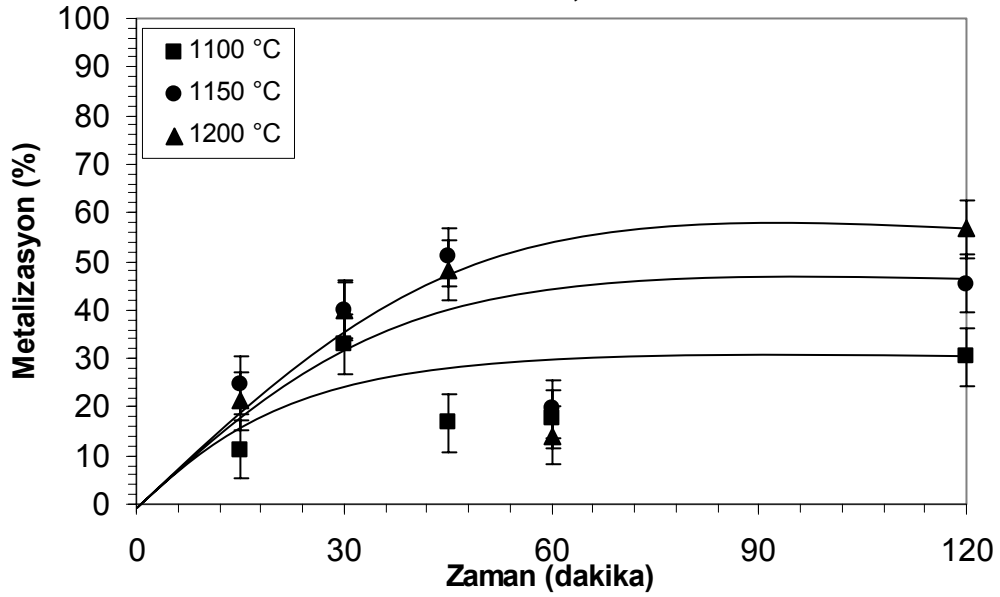
6.4.2 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri

6.4.2.1 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için redüksiyon sıcaklığının ve süresinin metalizasyona etkisi

Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) orta tenörlü demir cevherini kullanarak yapılan deneysel çalışmalar 1100 , 1150 ve $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmak üzere, üç farklı sıcaklıkta, 15, 30,

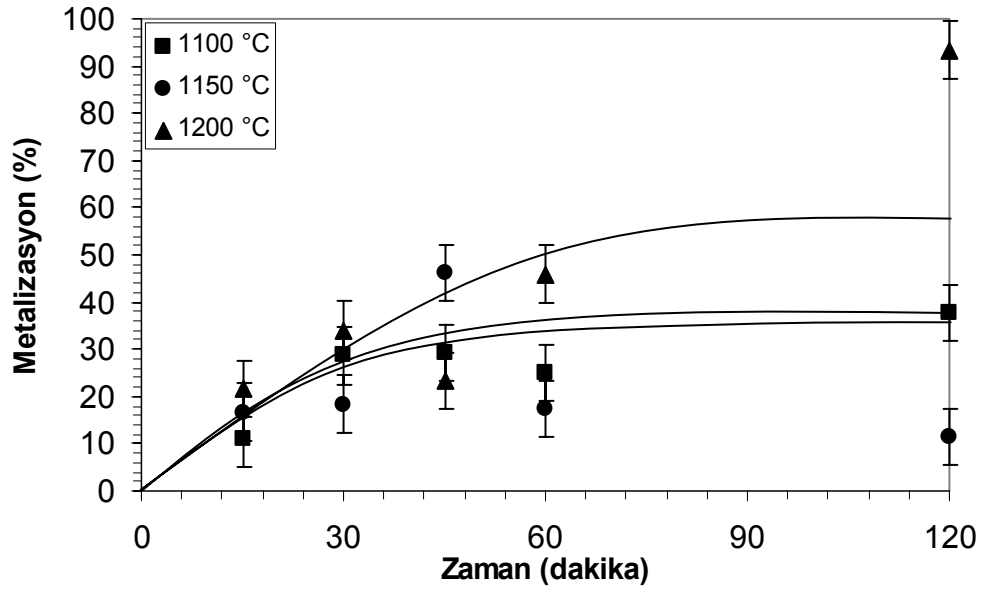
45, 60 ve 120 dakika zaman aralıkları için gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve zamanın metalizasyona olan etkileri, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de, sırasıyla 0,40 ve 0,50 C_{fix}/Fe_{top} oranları için verilmiştir.

Şekil 6.10’da görüldüğü üzere C_{fix}/Fe_{top} oranı 0,40 olduğunda artan sıcaklıkla beraber metalizasyon artmıştır. Örneğin C_{fix}/Fe_{top} oranının 0,40 olduğu şartlarda 120 dakika sonunda 1100, 1150 ve 1200°C sıcaklıklardaki metalizasyon değerleri sırasıyla; % 30, % 45 ve % 56 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 6.10: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) Demir Cevheri için Sabit C_{fix}/Fe_{top} Oranında (=0,40) Artan Sıcaklıkla Birlikte Metalizasyonun Değişimi.

C_{fix}/Fe_{top} oranının 0,50 olduğu durumda sıcaklığın 1100°C’den 1150°C’ye artmasıyla metalizasyonda belirgin bir artış gözlenmezken, sıcaklığın 1200°C’ye çıkmasıyla metalizasyonda önemli bir artış görülmüştür. Metalizasyon değerleri Şekil 6.11’de görüldüğü üzere 120 dakika sonunda 1100 ve 1150°C sıcaklıkları için yaklaşık % 45 civarında olup artan sıcaklıkla beraber 1200°C’de % 70 mertebelerine ulaşmıştır.

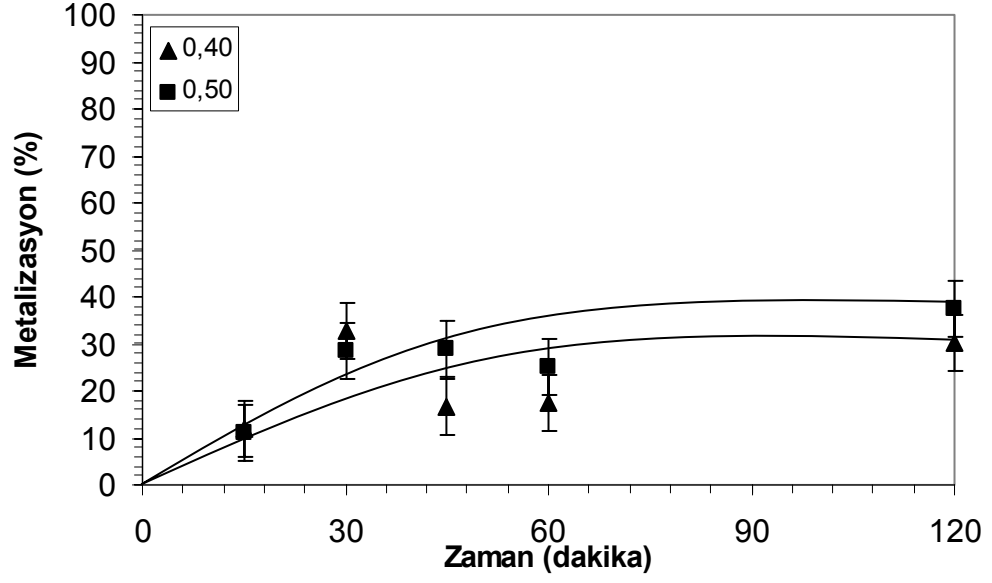


Şekil 6.11: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) Demir Cevheri için Sabit C_{fix}/Fe_{top} Oranında (=0,50) Artan Sıcaklıkla Birlikte Metalizasyonun Değişimi.

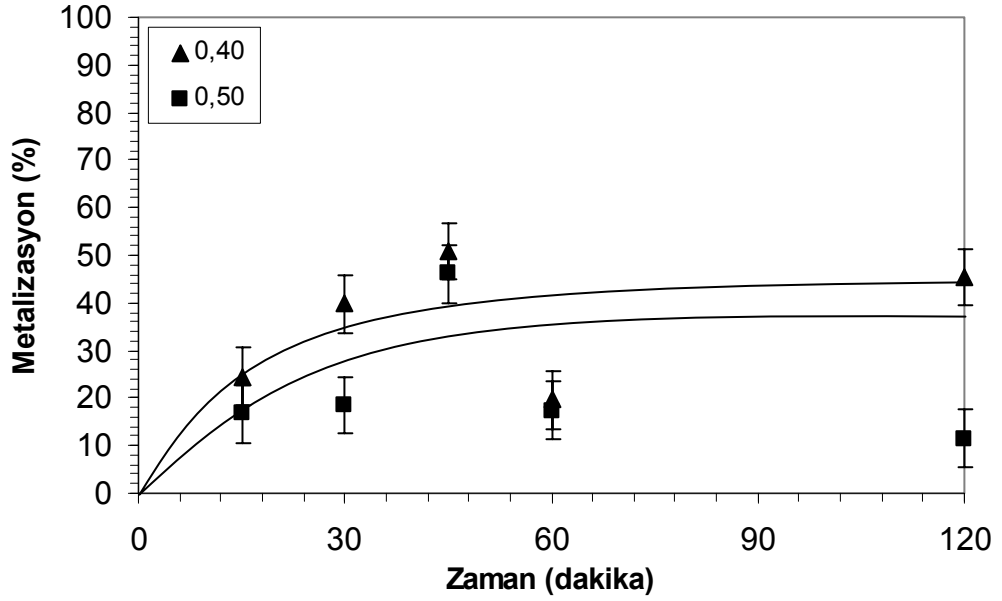
Çizilen metalizasyon eğrilerinden görüldüğü gibi artan süre ile birlikte metalizasyon her bir sıcaklık için bir maksimum değere ulaştıktan sonra sabit kalmıştır.

6.4.2.2 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri için C_{fix}/Fe_{top} oranının metalizasyona etkisi

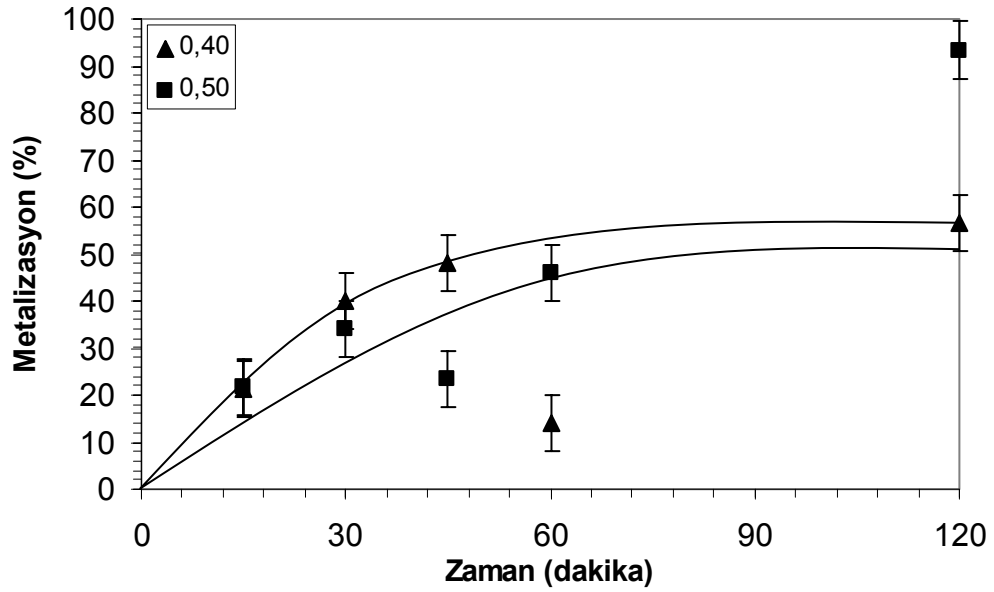
Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) orta tenörlü demir cevherini kullanarak yapılan deneysel çalışmalarda, 0,40 ve 0,50 C_{fix}/Fe_{top} oranlarına göre hesaplanan miktarlarda kömür kullanılmış ve kömür tüketim oranlarının değişiminin metalizasyona etkileri incelenmiştir. Her iki tüketim oranı için çizilen, metalizasyon redüksiyon süresi eğrileri, Şekil 6.12, 6.13 ve 6.14’de, farklı sıcaklıklar için verilmiştir.



Şekil 6.12: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) Demir Cevheri için Sabit Sıcaklıkta ($T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ Oranlarına Bağlı Olarak Metalizasyonun Değişimi.



Şekil 6.13: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) Demir Cevheri için Sabit Sıcaklıkta ($T=1150\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ Oranlarına Bağlı Olarak Metalizasyonun Değişimi.



Şekil 6.14: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) Demir Cevheri için Sabit Sıcaklıkta ($T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ Oranlarına Bağlı Olarak Metalizasyonun Değişimi.

Her üç şekilden görüldüğü gibi, $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranının artmasıyla beraber metalizasyonda büyük artışlar olmamaktadır. Artan $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranı metalizasyonda önemli bir değişmeye yol açmamış değerler birbirlerine oldukça yakın bir aralıkta seyretmiştir. Örneğin; 120. dakikada $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ deney sıcaklığında 0,40 oranında % 30 metalizasyon elde edilirken, 0,50 oranında bu değer % 35'dir. Bununla birlikte sıcaklığın artmasıyla beraber metalizasyon derecesinin arttığı görülmektedir.

Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) orta tenörlü demir cevheri ile yapılan deneylerde, karbon miktarının arttırılmasının metalizasyona önemli bir etkisinin olmadığı görülmekte, metalizasyonda meydana gelen artışın temel nedeninin sıcaklıkta meydana gelen artıştan kaynaklandığı görülmektedir.

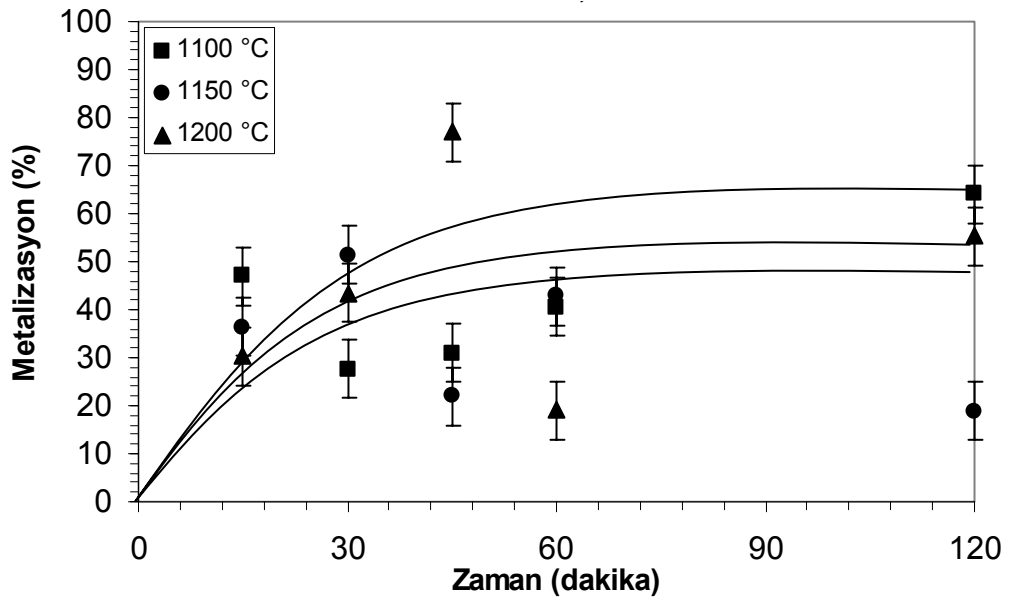
6.4.3 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri

6.4.3.1 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri için redüksiyon sıcaklığının ve süresinin metalizasyona etkisi

Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) düşük tenörlü demir cevheri kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar 1100 , 1150 ve $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmak üzere, üç farklı sıcaklıkta, 15, 30, 45, 60 ve 120 dakika zaman aralıkları için gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve

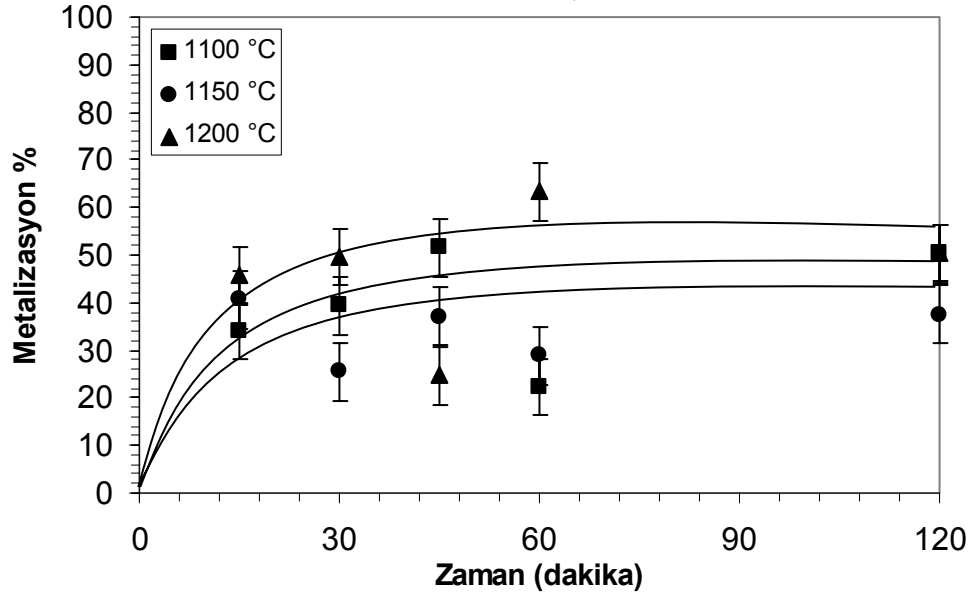
zamanın metalizasyona olan etkileri, Şekil 6.15 ve 6.16'da, sırasıyla 0,40 ve 0,50 C_{fix}/Fe_{top} oranları için verilmiştir.

Şekil 6.15'de görüldüğü üzere C_{fix}/Fe_{top} oranı 0,40 olduğunda sıcaklığın 1100°C'den 1150°C'ye artmasıyla metalizasyonda önemli bir değişme olmazken sıcaklığın 1200°C'ye artmasıyla beraber metalizasyonda az miktarda artış gözlenmiştir. Örneğin C_{fix}/Fe_{top} oranının 0,40 olduğu şartlarda 120 dakika sonunda metalizasyon 1100 ve 1150°C için yaklaşık % 50 iken 1200°C'de metalizasyonun % 65 mertebelerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 6.15: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) Demir Cevheri için Sabit C_{fix}/Fe_{top} Oranında (=0,40) Artan Sıcaklıkla Birlikte Metalizasyonun Değişimi.

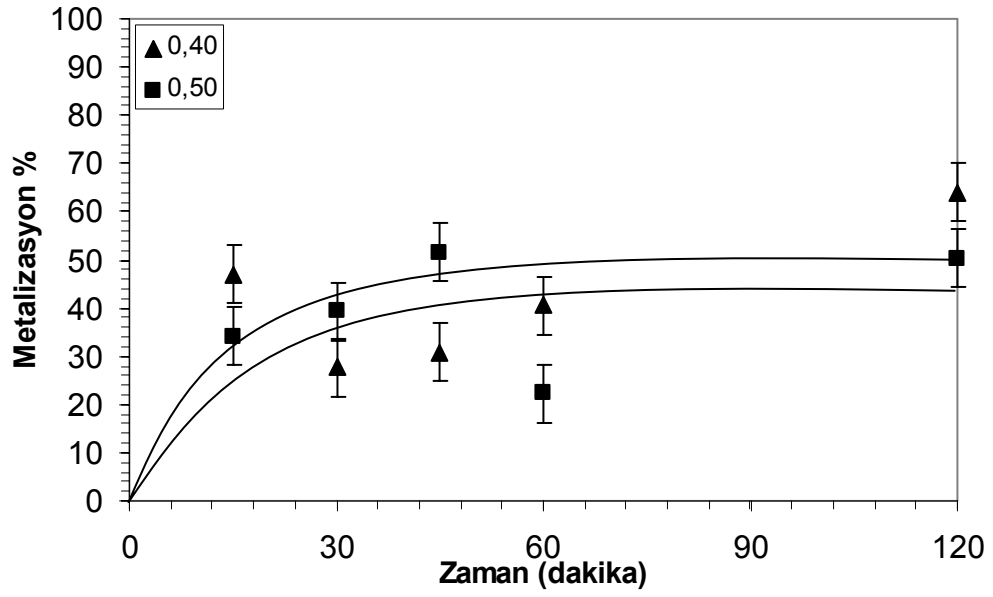
C_{fix}/Fe_{top} oranının 0,50 olduğu durumda 0,40 oranına benzer şekilde sıcaklıktaki artışın metalizasyona büyük bir etkisi olmamıştır. Metalizasyon değerleri Şekil 6.16'da görüldüğü üzere 120 dakika sonunda her üç sıcaklık içinde % 40–50 aralığında seyretmiştir. Çizilen metalizasyon eğrilerinden görüldüğü gibi artan süre ile birlikte metalizasyon her bir sıcaklık için bir maksimum değere ulaştıktan sonra sabit kalmıştır.



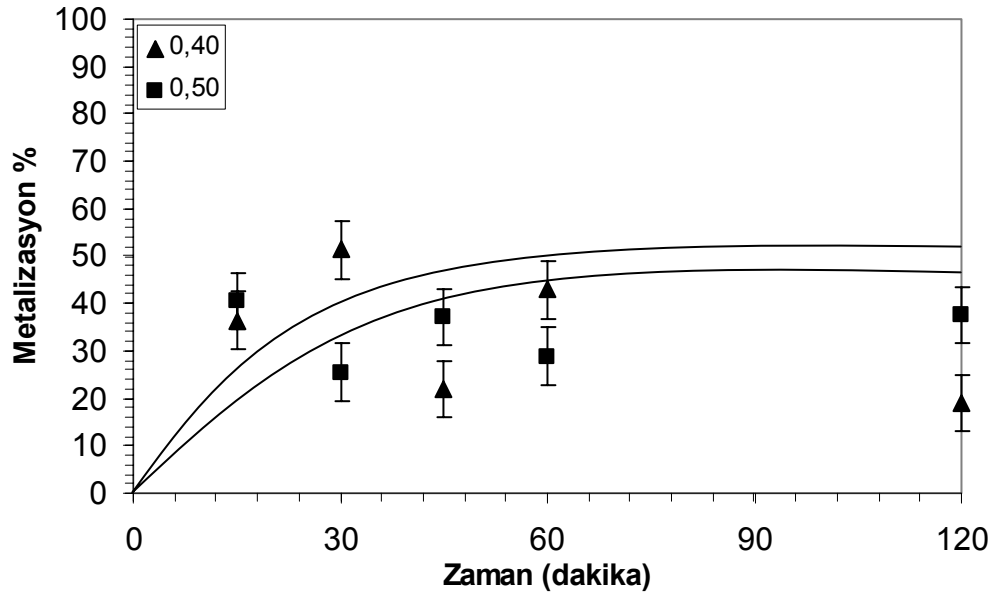
Şekil 6.16: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) Demir Cevheri için Sabit C_{fix}/Fe_{top} Oranında (=0,50) Artan Sıcaklıkla Birlikte Metalizasyonun Değişimi.

6.4.3.2 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri için C_{fix}/Fe_{top} oranının metalizasyona etkisi

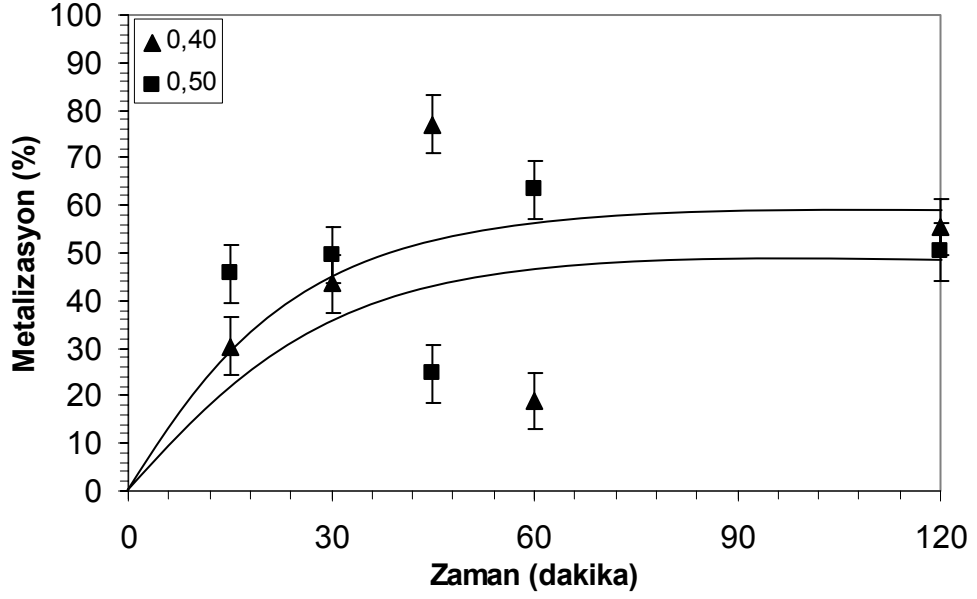
Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) düşük tenörlü demir cevherini kullanarak yapılan deneysel çalışmalarda, 0,40 ve 0,50 C_{fix}/Fe_{top} oranlarına göre hesaplanan miktarlarda kömür kullanılmış ve kömür tüketim oranlarının değişiminin metalizasyona etkileri incelenmiştir. Her iki tüketim oranı için çizilen, metalizasyon redüksiyon süresi eğrileri, Şekil 6.17, 6.18 ve 6.19’da, farklı sıcaklıklar için verilmiştir.



Şekil 6.17: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) Demir Cevheri için Sabit Sıcaklıkta ($T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ Oranlarına Bağlı Olarak Metalizasyonun Değişimi.



Şekil 6.18: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) Demir Cevheri için Sabit Sıcaklıkta ($T=1150\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ Oranlarına Bağlı Olarak Metalizasyonun Değişimi.



Şekil 6.19: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) Demir Cevheri için Sabit Sıcaklıkta ($T=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ Oranlarına Bağlı Olarak Metalizasyonun Değişimi.

Her üç şekilde de, $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranının artmasıyla beraber metalizasyonda büyük artışlar meydana gelmediği görülmektedir. 1100 ve 1150°C 'de artan $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranı ile metalizasyonda önemli bir değişim meydana gelmemiş değerler birbirlerine oldukça yakın bir aralıkta seyretmiştir. 1200°C 'de gerçekleştirilen deneylerde ise $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranının $0,40$ 'dan $0,50$ 'ye artmasıyla beraber metalizasyon yaklaşık % 10 'luk bir artış meydana gelmiştir.

Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) - (II) orta ve düşük tenörlü demir cevherleri ile yapılan deneylerde, sıcaklık ve karbon miktarının artırılmasının metalizasyonda önemli bir artış meydana getirmediği görülmektedir. Yüksek metalizasyon değerlerinin elde edilememesinin temel nedeni, gang içeriği yüksek olan düşük tenörlü cevherlerle gerçekleştirilen deneylerde yüksek sıcaklıklarda oluşan ve redüksiyonu zor olan demir-silikat esaslı cürufun (fayalitik cüruf) oluşması olarak düşünülmektedir [46]. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneylerde artan süre ile birlikte kısmi ergime meydana gelmiştir. Metalik demir ile cüruf ayrımı tam olarak gerçekleştirilememiş ve grafit pota tabanında yapışma problemi ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, gerek yüksek gang içeriği gerekse düşük demir tenörü nedeniyle Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) - (II) cevherleriyle yapılan çalışmalarda metalizasyon oranları düşük seviyelerde kalmış artan karbon oranı ve sıcaklığın metalizasyon üzerine önemli bir etkisi olmamıştır.

6.4.4 Yerli cevherlerin sünger demir üretimine uygunluklarının karşılaştırılması

Ülkemizde demir cevherlerinden pelet üretmek amacıyla kurulmuş bir tesis bulunmaktadır (Sivas Divriği Peletleme Fabrikası). Geniş rezervlere sahip yüksek tenörlü cevherlerin peletleme tesislerinde herhangi bir işleme tabi tutulmadan direk demir - çelik sanayisinde hammadde olarak kullanımının uygunluğunu saptamak ve sorunlu demir cevherlerini değerlendirmek amacıyla üç farklı tenöre sahip demir cevheriyle gerçekleştirilen redüksiyon deneyleri sonucunda farklı cevher tipleri için aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

Sivas Divriği B Kafa yüksek tenörlü demir cevheri ile yapılan çalışmalarda artan sıcaklıkla beraber metalizasyon derecelerinin de arttığı saptanmıştır. Yüksek tenörlü demir cevheri kullanarak yapılan redüksiyon deneyleri sonucu metalizasyon oranları % 90 mertebelerine ulaşmış ancak parça cevherlerin heterojen yapılarından dolayı yüksek metalizasyon değerlerinin elde edildiği optimum bir koşul belirlenememiştir. Sivas Divriği B Kafa demir cevheri ile gerçekleştirilen deneylerde C_{fix}/Fe_{top} oranının artması metalizasyonda önemli bir değişime neden olmamıştır. Sitokiyometrik oranın 1,25 katı olan 0,40 C_{fix}/Fe_{top} oranının 0,45 ve 0,50 oranlarına arttırılması sonucu metalizasyonda büyük bir farklılık gözlenmemiştir. Metalizasyonda meydana gelen artış temel olarak sıcaklıkta meydana gelen artıştan kaynaklanmıştır.

Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) orta tenörlü demir cevheri ile yapılan redüksiyon deneylerinde benzer şekilde artan sıcaklıkla beraber metalizasyonun da arttığı görülmüştür. Artan sıcaklıkla birlikte metalizasyon oranları % 60 mertebelerine ulaşmış ancak bu değer endüstriyel uygulamalar için oldukça düşük seviyelerde kalmıştır. Artan C_{fix}/Fe_{top} oranının metalizasyon üzerinde önemli bir değişiklik meydana getirmediği gözlemlenmiştir. 0,40 C_{fix}/Fe_{top} oranının 0,50 oranına arttırılması sonucu metalizasyonda önemli artışlar meydana gelmemiştir.

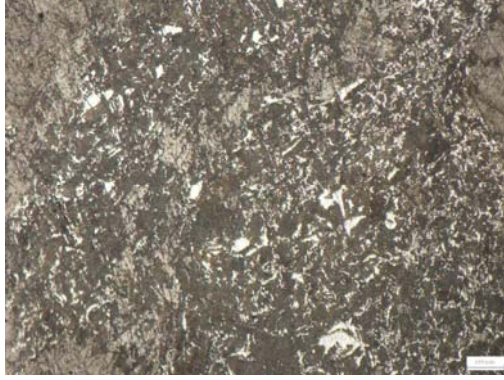
Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) düşük tenörlü demir cevheri ile gerçekleştirilen redüksiyon deneylerinde sıcaklıkta meydana gelen artışın metalizasyonu arttırdığı belirlenmiştir. Artan sıcaklıkla beraber metalizasyon oranları % 65 seviyelerine ulaşmıştır. C_{fix}/Fe_{top} oranının metalizasyon üzerinde önemli bir etkisi olmadığı, artan

karbon oranına karşın metalizasyonda meydana gelen ufak değışimler sonucu anlaşılmıştır.

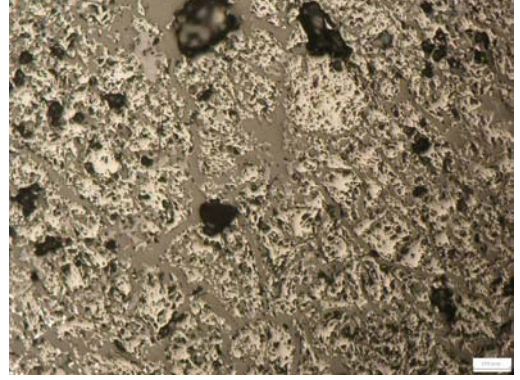
Her üç cevher tipi için de artan sıcaklığa bağılı olarak metalizasyonun arttığı görülmektedir. Artan C_{fix}/Fe_{top} oranının ise metalizasyon üzerinde önemli bir etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Sivas Divriğı B Kafa yüksek tenörlü hematit demir cevheri ile gerçekleştirilen redüksiyon deneyleri sonucu yüksek metalizasyon değeri elde edilmiş ancak bu değeri için optimum bir koşul bulunamamıştır. Yüksek tenörlü cevherlerle uygun koşullarda yapılacak çalışmalar sonucunda bu cevherlerin herhangi bir konsantrasyon işlemine tabi tutulmadan sünger demir üretiminde kullanılabilmeleri mümkün gözükmektedir. Genel olarak manyetit esaslı cevherlerin redüksiyonu hematit esaslı cevherlere göre daha zor gerçekleşmektedir [19]. Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) - (II) orta ve düşük tenörlü manyetit demir cevherleriyle yapılan deneyler sonucu metalizasyon oranları % 60–65 mertebelerinde bulunmuştur. Elde edilen bu metalizasyon değeri endüstriyel uygulamalar için düşük seviyelerde kalmıştır. Bu cevherlerle yapılan çalışmalarda yüksek metalizasyon değeri ulaşılamamasının nedeni, gang içeriğı yüksek olan cevherlerle gerçekleştirilen deneylerde yüksek sıcaklıklarda oluşan ve redüksiyonu zor olan demir-silikat esaslı bir cürufun (fayalitik cüruf) oluşması olarak düşünülmektedir. Oluşan fayalitik cüruf sonucu redüksiyon yavaşlamış, metalizasyon oranları orta ve düşük tenörlü cevherlerle yapılan çalışmalarda düşük seviyelerde kalmıştır. Ayrıca bu cevherle yapılan çalışmalarda, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneyler sırasında artan süre ile birlikte kısmi ergime meydana geldiğı belirlenmiştir. Kısmi ergimenin bir sonucu olarak, metalik demir ile cüruf ayrımı tam olarak gerçekleştirilememiş ve grafit pota tabanında yapışma problemi ortaya çıkmıştır.

6.4.5 Ürünün mikroyapı incelemesi

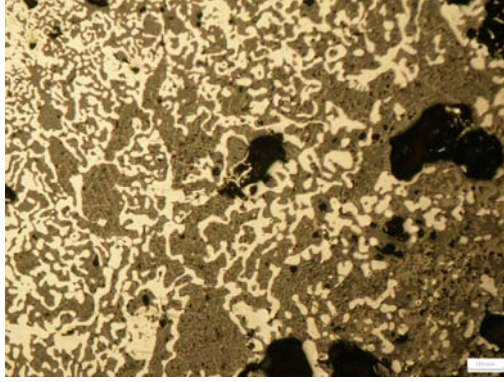
Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen sünger demiri karakterize etmek amacıyla yapılan mikroyapı incelemelerinde, Sivas Divriğı B Kafa yüksek tenörlü demir cevherinin kullanıldığı deney şartı seçilmiştir. 0,40 C_{fix}/Fe_{top} oranı ve 1250°C sıcaklığında yapılan deneyler sonucu elde edilen numunelere x100 büyütmede mikroyapı incelemesi uygulanmıştır. Şekil 6.20’de sabit sıcaklıkta artan süreye bağılı olarak metalizasyondaki değışim gösterilmektedir.



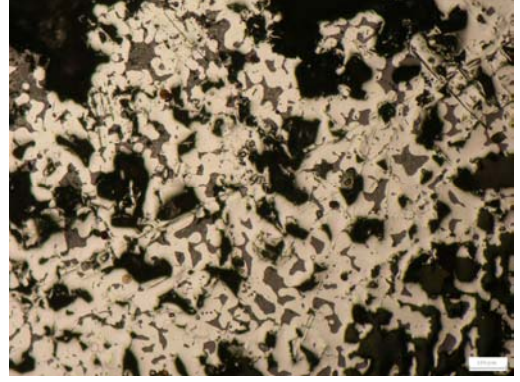
(a)



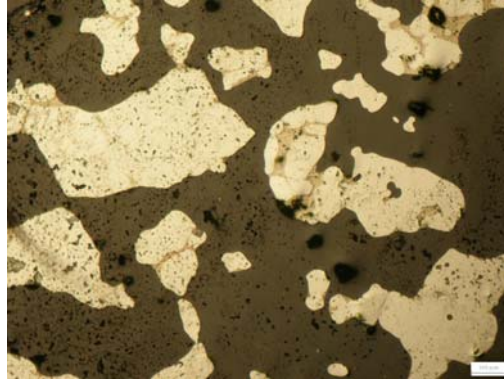
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 6.20: Sabit Sıcaklıkta Artan süreye Bağlı Olarak Metalizasyonda Meydana Gelen Değişim (1250°C ve 0,40 C_{fix}/Fe_{top} oranı): (a) Orjinal hematit yapısı; (b) 15 dakika ve % 42,94 metalizasyon; (c) 30 dakika ve % 63,95 metalizasyon; (d) 60 dakika ve % 82,75 metalizasyon; (e) 120 dakika ve % 92,98 metalizasyon. (Ölçek 100 mikronu göstermektedir.)

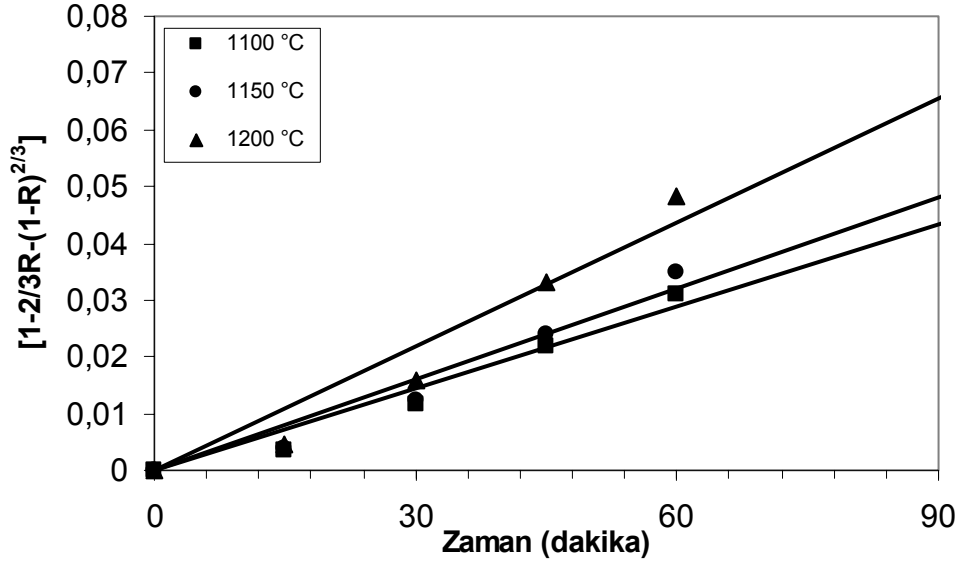
Şekil 6.20'den görüldüğü gibi 1250°C sabit sıcaklık ve 0,40 C_{fix}/Fe_{top} oranında gerçekleştirilen deneyler sonucunda artan süreye bağlı olarak metalizasyonda meydana gelen artışı izlemek mümkündür. Heterojen bir yapıya sahip olan orjinal hematit yapısında (a) artan süreye bağlı olarak redüksiyonun ilerlemesi sonucu açık renkli metalik bölgelerin oluşumu (b) görülmektedir. Oluşan metalik kısım zamana bağlı olarak büyümekte (c – d) ve 120 dakika sonunda metalik kısım, büyük taneler halinde cüruftan ayrılmaktadır. Mikroyapı incelemelerinde görüldüğü üzere artan süre ile redüksiyonun ilerlediği ve metalik demir fazın cüruftan ayrılarak yapıya hakim olduğu görülmektedir.

6.4.6 Redüksiyon kinetiği ve aktivasyon enerjisinin hesaplanması

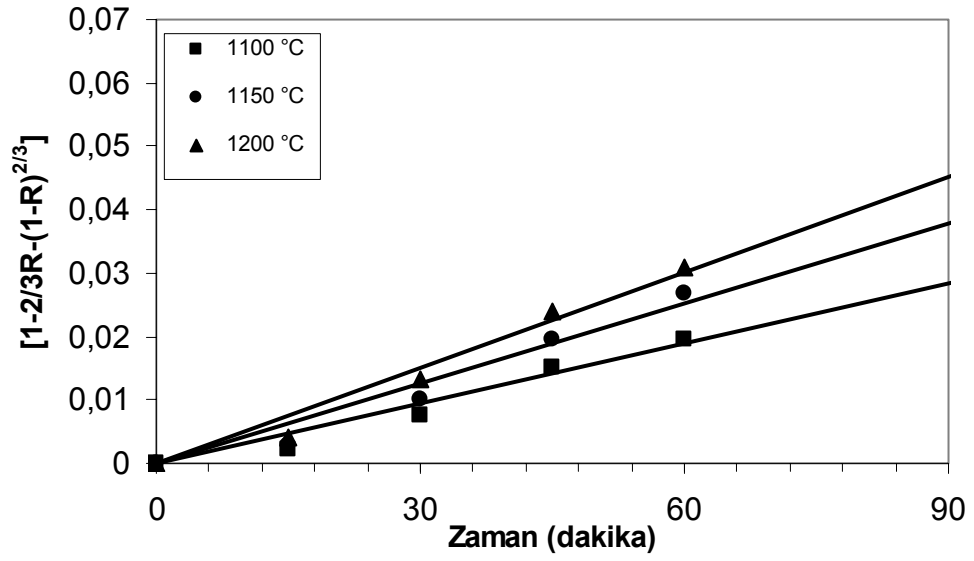
Redüksiyon reaksiyonunu kontrol eden mekanizmanın saptanması amacıyla demir cevherlerinin redüksiyonu için literatürde yaygın olarak kullanılan kimyasal reaksiyon kontrollü model ve difüzyon kontrollü modelleri (Ginstling-Brounsthein) esas alınarak $[1-(1-R)^{1/3}]$ ve $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ bağıntılarından yararlanılmıştır. Bu bağıntılar kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda zamana bağlı olarak çizilen eğrilerden incelenen reaksiyonların difüzyon kontrollü modele uygun olduğu saptanmıştır. Redüksiyon deneylerinde kullanılan üç demir cevheri için yapılan kinetik incelemeler aşağıda verilmiştir.

6.4.6.1 Sivas Divriği B Kafa demir cevheri ile yapılan deneylerin kinetik incelenmesi

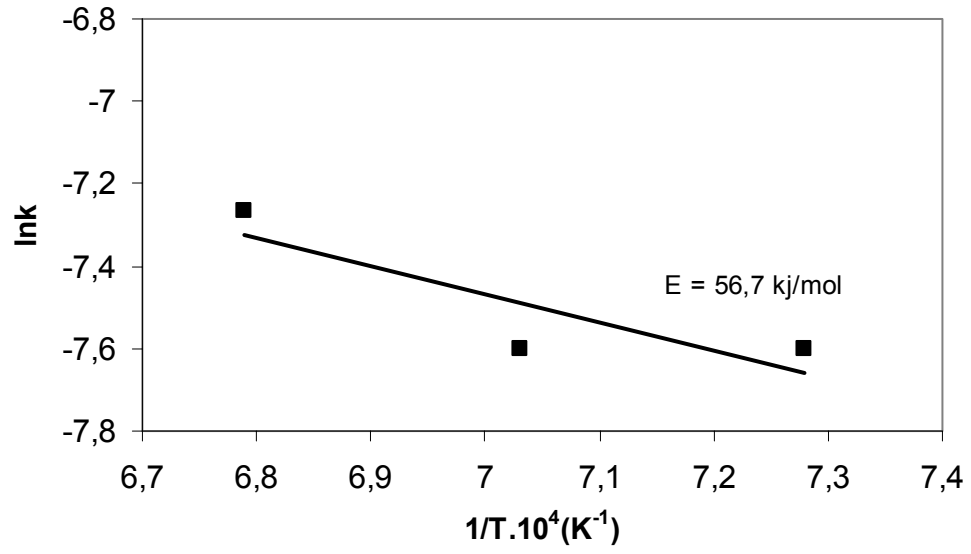
Sonuçlar $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}] - t$ ilişkisini gösterecek şekilde Sivas Divriği B Kafa demir cevheri ve C_{fix}/Fe_{top} oranı 0,40 için Şekil 6.21, C_{fix}/Fe_{top} oranı 0,50 için ise Şekil 6.22'de verilmiştir. Çizilen doğruların eğiminden yararlanılarak reaksiyon hız sabitleri hesaplanmıştır (Şekil 6.23, 6.24).



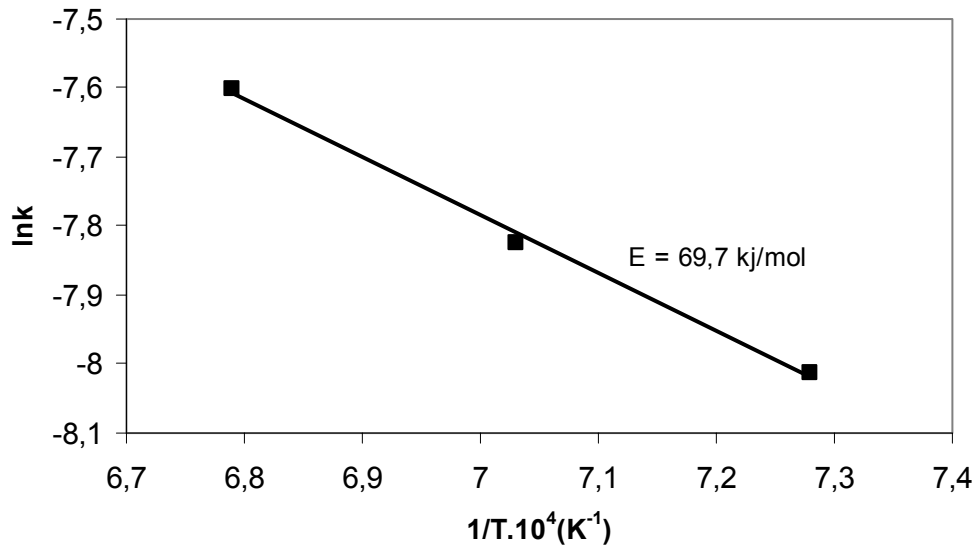
Şekil 6.21: Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri için 0,40 Oranında Farklı Sıcaklıklar için $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ Teriminin Süreye Bağlı Değişimi.



Şekil 6.22: Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri için 0,50 Oranında Farklı Sıcaklıklar için $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ Teriminin Süreye Bağlı Değişimi.



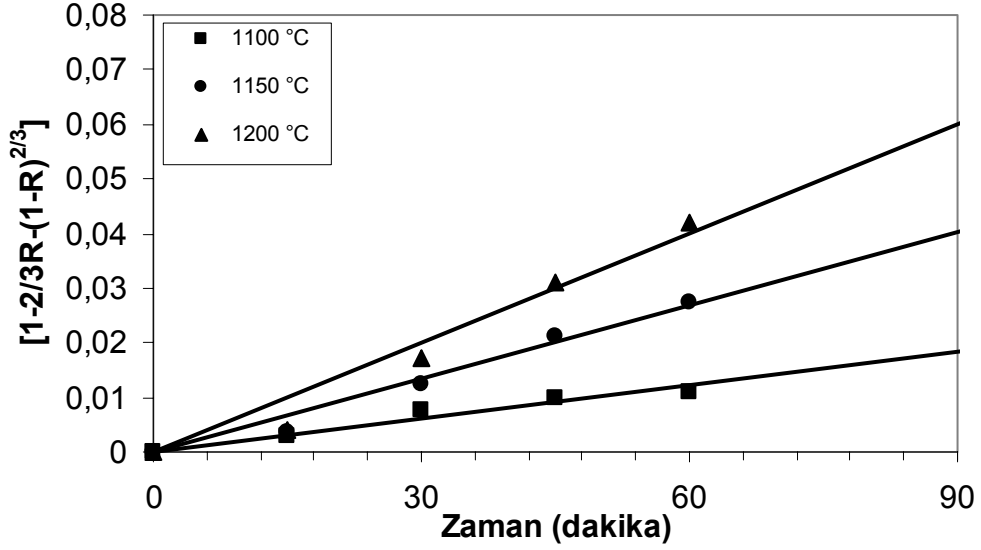
Şekil 6.23: Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri için 0,40 Oranında Redüksiyon Hız Sabiti ile Sıcaklık İlişkisi.



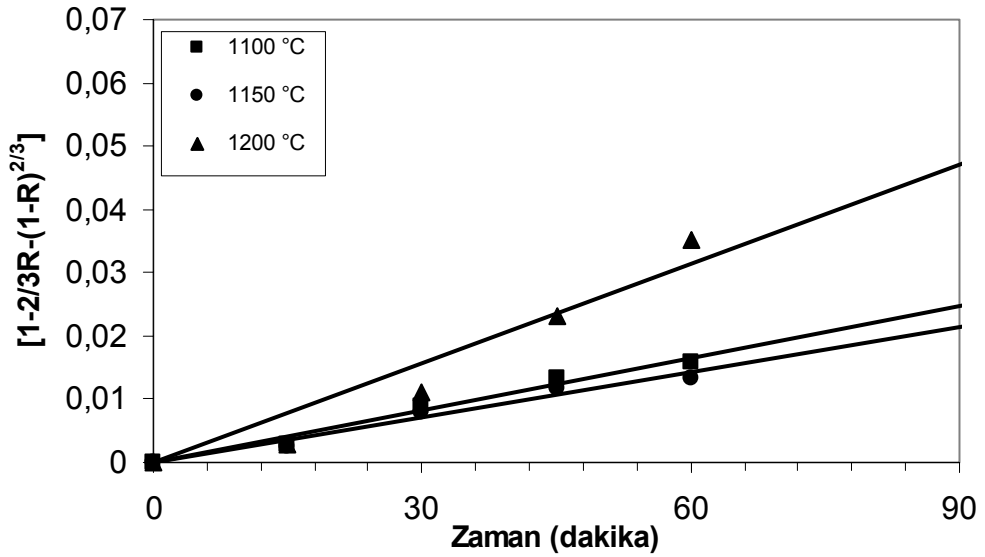
Şekil 6.24: Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri için 0,50 Oranında Redüksiyon Hız Sabiti ile Sıcaklık İlişkisi.

6.4.6.2 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri ile yapılan deneylerin kinetik incelenmesi

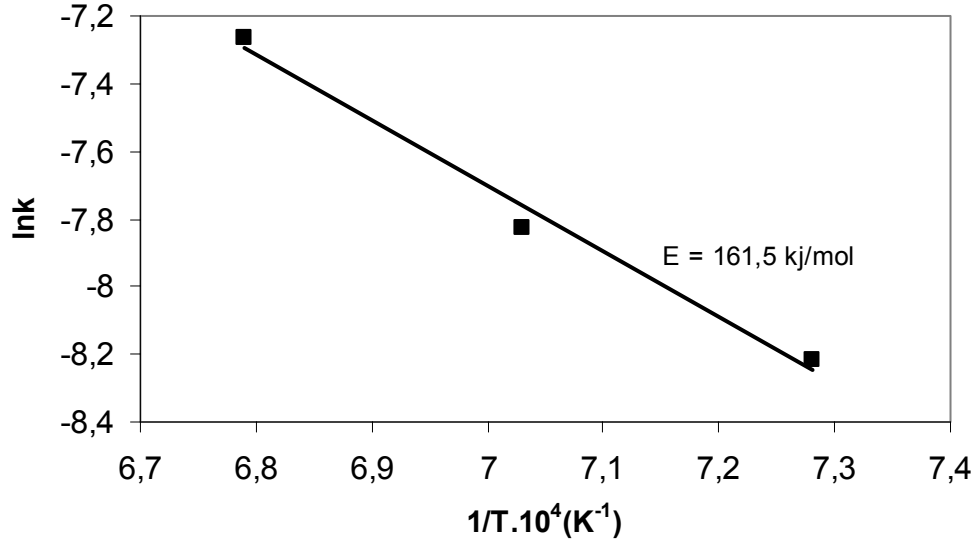
Sonuçlar $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ ilişkisini gösterecek şekilde Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri ve C_{fix}/Fe_{top} oranı 0,40 için şekil 6.25, C_{fix}/Fe_{top} oranı 0,50 için şekil 6.26’da verilmiştir. Çizilen doğruların eğiminden yararlanarak reaksiyon hız sabitleri hesaplanmıştır (6.27, 6.28).



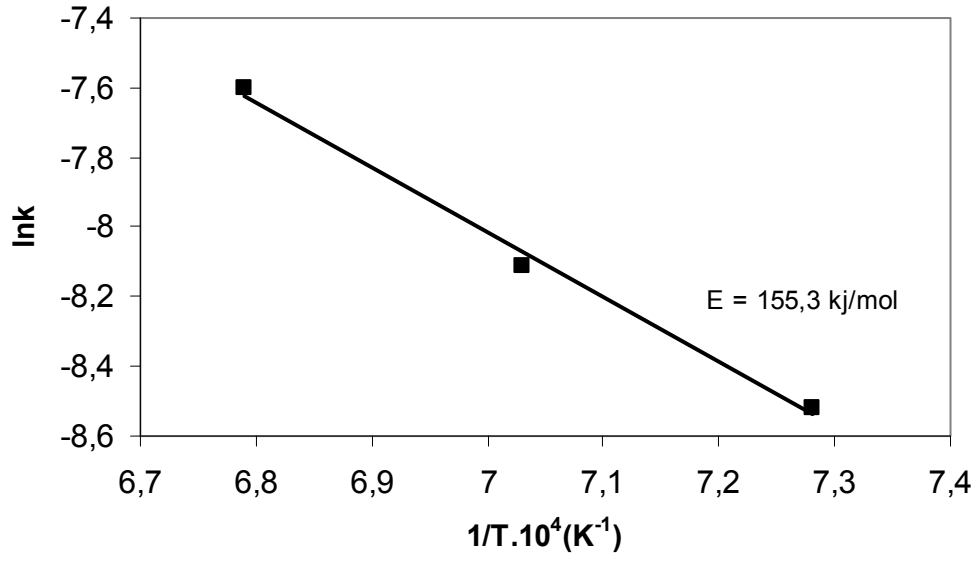
Şekil 6.25: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) Demir Cevheri için 0,40 Oranında Farklı Sıcaklıklar için $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ Teriminin Süreye Bağlı Değişimi.



Şekil 6.26: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) Demir Cevheri için 0,50 Oranında Farklı Sıcaklıklar için $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ Teriminin Süreye Bağlı Değişimi.



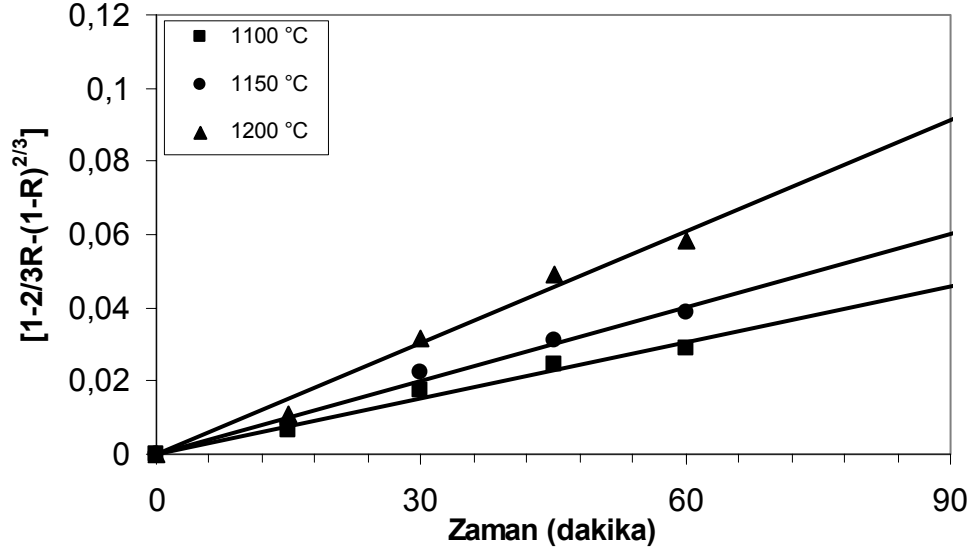
Şekil 6.27: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) Demir Cevheri için 0,40 Oranında Redüksiyon Hız Sabiti ile Sıcaklık İlişkisi.



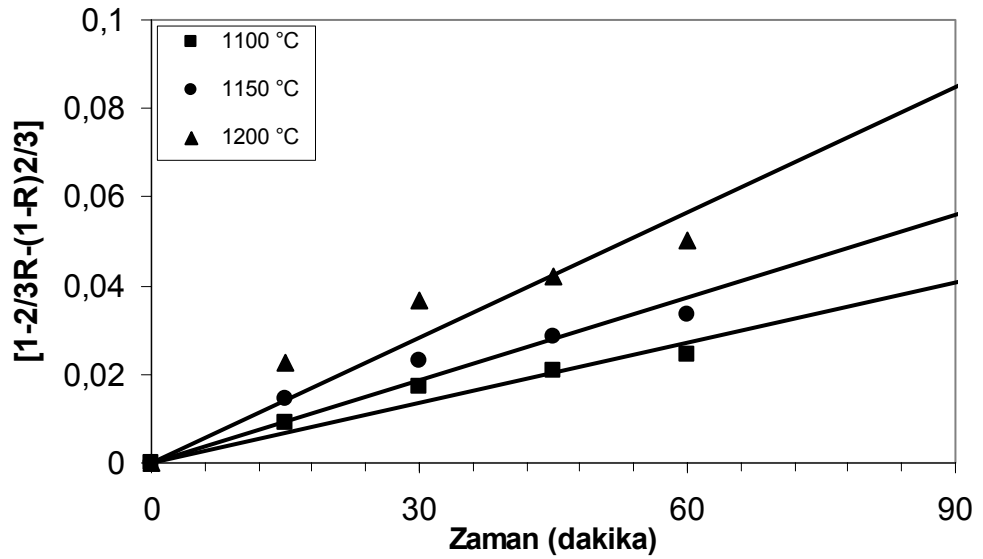
Şekil 6.28: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) Demir Cevheri için 0,50 Oranında Redüksiyon Hız Sabiti ile Sıcaklık İlişkisi.

6.4.6.3 Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri ile yapılan deneylerin kinetik incelenmesi

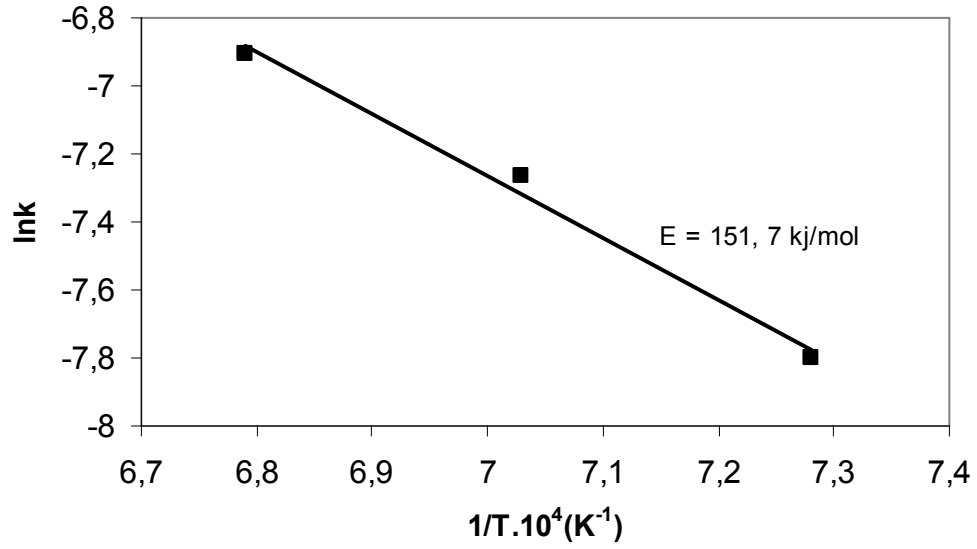
Sonuçlar $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ ilişkisini gösterecek şekilde Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri ve C_{fix}/Fe_{top} oranı 0,40 için Şekil 6.29, C_{fix}/Fe_{top} oranı 0,50 için Şekil 6.30’da verilmiştir. Çizilen doğruların eğiminden yararlanarak reaksiyon hız sabiti hesaplanmıştır (6,31, 6.32).



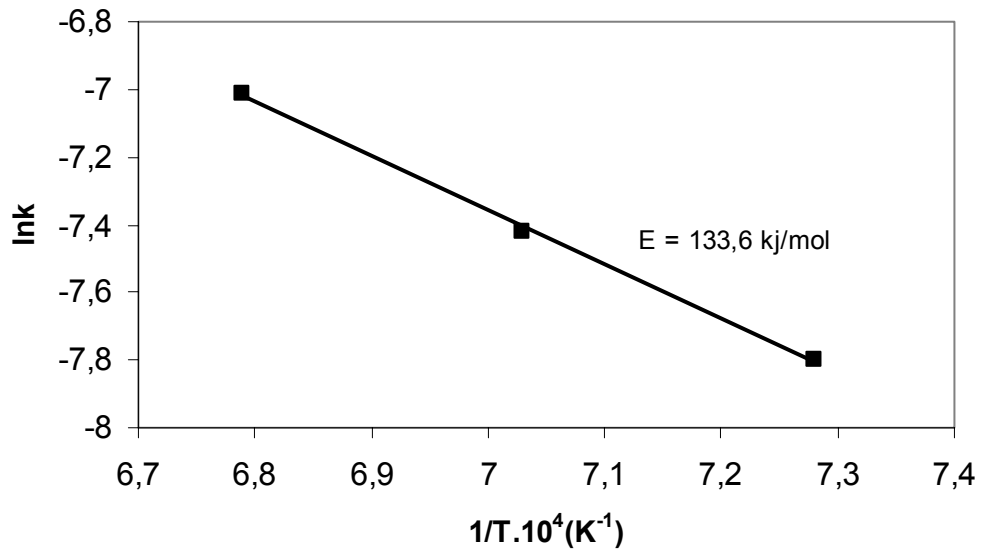
Şekil 6.29: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) Demir Cevheri için 0,40 Oranında Farklı Sıcaklıklar için $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ Teriminin Süreye Bağlı Değişimi.



Şekil 6.30: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) Demir Cevheri için 0,50 Oranında Farklı Sıcaklıklar için $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}]$ Teriminin Süreye Bağlı Değişimi.



Şekil 6.31: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) Demir Cevheri için 0,40 Oranında Redüksiyon Hız Sabiti ile Sıcaklık İlişkisi.



Şekil 6.32: Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) Demir Cevheri için 0,50 Oranında Redüksiyon Hız Sabiti ile Sıcaklık İlişkisi.

$\ln k - 1/T$ grafiklerinin eğimlerinden ve 7.1 no.lu formülle verilen Arrhenius eşitliğinden yararlanarak aktivasyon enerjileri üç cevher için de farklı C_{fix}/Fe_{top} oranları için hesaplanmıştır.

$$k=k_0.e^{-E/RT} \quad (7.1)$$

Tablo 6.6’da kullanılan farklı cevher türleri için hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri verilmiştir.

Tablo 6.6: Difüzyon Kontrollü Model İçin Aktivasyon Enerjisi Değerleri.

C_{fix}/Fe_{top}	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)		
	Sivas Divriği B Kafa	Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I)	Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II)
0,40	56,7	161,5	151,7
0,50	69,7	155,3	133,6

Yüksek sıcaklıkta kimyasal reaksiyon hızı, difüzyon hızına göre çok daha yüksek olacağından yavaş gerçekleşen adım olan difüzyon sistemi kontrol eden mekanizma olması beklenir. Sivas Divriği B Kafa yüksek tenörlü hematit cevheri ile yapılan kinetik çalışmalarda aktivasyon enerjisi değerleri 60 – 70 kJ/mol aralığında bulunmuştur. Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) – (II) orta ve düşük tenörlü demir cevherleriyle yapılan çalışmalarda ise bu cevherlerin redüksiyonu için gerekli aktivasyon enerji değerleri 130 – 160 kJ/mol mertebelerinde bulunmuştur. Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) – (II) orta ve düşük tenörlü manyetit cevherlerinin redüksiyonu için daha yüksek aktivasyon enerji değerleri elde edilmesinin nedeninin; manyetit esaslı cevherlerin redüksiyonunun hematit esaslı cevherlere göre daha zor gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [18]. Ayrıca gang içeriği yüksek olan bu cevherlerle gerçekleştirilen deneylerde yüksek sıcaklıklarda oluşan ve redüksiyonu zor olan demir-silikat esaslı cürufun (fayalitik cüruf) oluşması sonucu redüksiyon yavaşlamış, redüksiyonun gerçekleşebilmesi için gerekli aktivasyon enerjisi değerleri yüksek tenörlü cevherlere oranla daha yüksek bulunmuştur. Her üç cevher tipi için de artan C_{fix}/Fe_{top} oranının aktivasyon enerjileri üzerinde önemli bir değişim meydana getirmediği görülmektedir.

Literatürde hadde tufalinin karbon ile redüksiyonu için 900 – 1050 °C aralığında gerçekleştirilen çalışmalarda redüksiyon kinetiğinin Ginstling-Brounshtein modeline uygun olduğu saptanmış ve redüksiyon için gerekli aktivasyon enerjisi 147 kJ/mol olarak hesaplanmıştır [45]. Demir cevherlerinin izotermal şartlar altında karbon ile redüksiyonu üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda ise 850 – 1050 °C çalışma aralığı

seçilmiş ve redüksiyon reaksiyonunun Ginstling-Brounshtein modeline uyduğu saptanmıştır. Bu çalışmalarda aktivasyon enerjisi değerleri 168–176 kJ/mol aralığında tespit edilmiştir [46]. Yerli demir cevherlerinin Soma-Kısrakdere linyit kömürü kullanılarak redüksiyon deneyleri sonucu zamana bağlı olarak çizilen eğrilerden incelenen reaksiyonların difüzyon kontrollü modele uygun olduğu saptanmıştır. Elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri genel olarak difüzyon kontrollü modeller için beklenen değerlerden yüksek olmasına karşın literatürde yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Soma-Kısrakdere linyit kömürü kullanılarak, ülkemizin iki farklı bölgesinden elde edilen üç farklı tenöre sahip Sivas Divriği B Kafa, Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) ve (II) demir cevherlerinin redüksiyonunda $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranı, sıcaklık ve zaman olarak belirlenen parametrelerin, metalizasyona olan etkileri incelenerek bu cevherlerin sünger demir üretimine uygunluğunun araştırılması amacıyla yapılan deneylerin sonuçlarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

1. Döner fırında, Sivas Divriği B kafa demir cevheri ile 1000 – 1200 °C aralığında 0,40 ve 0,45 $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranlarında gerçekleştirilen redüksiyon deneyleri sonucu en yüksek metalizasyon oranı % 49,28 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu metalizasyon değeri endüstriyel uygulamalar için çok düşük seviyelerde kalmıştır. 1200 °C’de gerçekleştirilen deneyler sonucu seramik tüpte yapışma problemi meydana gelmiş ve deneyler daha sonra laboratuvar tipi yüksek sıcaklık fırınında gerçekleştirilmiştir.

2. Sivas Divriği B kafa demir cevheri ile yapılan redüksiyon deneyleri sonucunda, $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranının 0,40 olduğu durumda 1100 ve 1150 °C’deki metalizasyon değerleri birbirine çok yakın olup artan sıcaklıkla birlikte 1200 ve 1250 °C sıcaklıklarında metalizasyonun arttığı görülmüştür. $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranının 0,45 olduğu durumda sıcaklığın 1150 °C’den 1250 °C’ye arttırılması metalizasyon verimini arttırmıştır. $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranı 0,50 olduğunda ise 1100, 1150 ve 1200 °C’deki metalizasyon değerleri birbirine oldukça yakın olup sıcaklığın 1250 °C’ye arttırılmasıyla metalizasyonun da arttığı görülmüştür.

3. Sivas Divriği B kafa demir cevheri ile yapılan redüksiyon deneyleri sonucunda, $C_{\text{fix}}/\text{Fe}_{\text{top}}$ oranının arttırılmasının metalizasyona önemli bir etkisinin olmadığı anlaşılmış, metalizasyonda meydana gelen artışın temel nedeninin sıcaklıkta meydana gelen artıştan kaynaklandığı görülmüştür.

4. Sivas Divriği B kafa demir cevheri ile yapılan redüksiyon deneylerinden elde edilen C_{fix}/Fe_{top} , sıcaklık, süre ve metalizasyon oranına göre; 1250 °C sıcaklık, 120 dakika ve 0,40 C_{fix}/Fe_{top} oranında metalizasyon endüstriyel koşullara en yakın değer olan % 88 olarak gerçekleşmiştir.

5. Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri ile yapılan redüksiyon deneyleri sonucunda, C_{fix}/Fe_{top} oranının 0,40 olduğu şartlarda sıcaklığın 1100 °C'den 1200 °C'ye arttırılması metalizasyon verimini arttırmıştır. C_{fix}/Fe_{top} oranının 0,50 olduğu şartlarda ise sıcaklığın 1100 °C'den 1150 °C'ye artmasıyla metalizasyonda belirgin bir artış gözlenmezken, sıcaklığın 1200 °C'ye çıkmasıyla metalizasyonda önemli bir artış kaydedilmiştir.

6. Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri ile yapılan deneylerde, C_{fix}/Fe_{top} oranının 0,40'dan 0,50'ye arttırılmasının metalizasyona önemli bir etkisinin olmadığı anlaşılmış, metalizasyonda meydana gelen artışın temel nedeninin sıcaklıkta meydana gelen artıştan kaynaklandığı görülmüştür.

7. Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri ile yapılan redüksiyon deneylerinden elde edilen C_{fix}/Fe_{top} , sıcaklık, süre ve metalizasyon oranına göre; 1200 °C sıcaklık, 120 dakika ve 0,40 C_{fix}/Fe_{top} oranında en yüksek metalizasyon oranı (% 58) saptanmıştır. Bu değer endüstriyel uygulamalar için çok düşük seviyelerde kalmıştır.

8. Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri ile yapılan redüksiyon deneyleri sonucunda, C_{fix}/Fe_{top} oranının 0,40 ve 0,50 olduğu şartlarda sıcaklığın 1100 °C'den 1200 °C'ye arttırılması metalizasyon verimini düşük miktarda arttırmıştır.

9. Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri ile yapılan redüksiyon deneylerinden elde edilen C_{fix}/Fe_{top} , sıcaklık, süre ve metalizasyon oranına göre; 1200 °C sıcaklık, 120 dakika ve 0,40 C_{fix}/Fe_{top} oranında en yüksek metalizasyon oranı (% 65) bulunmuştur. Bu değer endüstriyel uygulamalar için çok düşük seviyelerde kalmıştır.

10. Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) ve (II) demir cevherleri ile yapılan redüksiyon deneyleri sonucunda, sıcaklık ve C_{fix}/Fe_{top} oranının arttırılmasının metalizasyonda önemli bir artış meydana getirmediği görülmüştür. Yüksek

metalizasyon değerlerinin elde edilememesinin temel nedeni, gang içeriği yüksek olan düşük tenörlü cevherlerle gerçekleştirilen deneylerde yüksek sıcaklıklarda oluşan ve redüksiyonu zor olan demir-silikat cürufunun (fayalitik cüruf) oluşması olarak düşünülmektedir.

11. Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) ve (II) demir cevherleri ile yapılan redüksiyon deneyleri sonucunda, yüksek sıcaklıklarda artan süre ile birlikte kısmi ergime meydana gelmiştir. Metalik demir, cüruf ayrımı tam olarak gerçekleşememiş ve grafit pota tabanında yapışma problemi ortaya çıkmıştır.

12. Parça cevherlerin heterojen yapısından dolayı zamana bağlı olarak gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen metalizasyon değerleri orta ve düşük tenörlü cevherlerle yapılan deneylerde düzgün bir dağılım seyretmemiştir. Metalizasyon değerlerinde artan süreyle birlikte sapmalar gözlenmiştir.

13. Üç farklı tenöre sahip demir cevherleri ile gerçekleştirilen redüksiyon deney sonuçlarına göre; sistemin $[1-2/3R-(1-R)^{2/3}] - t$ ilişkisine uygun olarak difüzyon kontrollü olduğu saptanmıştır.

14. Sivas Divriği B kafa demir cevheri ile yapılan kinetik çalışmada redüksiyon hızından hareketle hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri 0,40 oranı için 56,7 kJ/mol, 0,50 oranı için 69,7 kJ/mol olarak bulunmuştur. Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (I) demir cevheri kullanılarak yapılan çalışmada C_{fix}/Fe_{top} oranı 0,40 için hesaplanan aktivasyon enerjisi değeri 161,5 kJ/mol olurken bu değer 0,50 oranı için 155,3 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Malatya-Hekimhan-Hasançelebi (II) demir cevheri ile yapılan çalışmada ise C_{fix}/Fe_{top} oranı 0,40 için aktivasyon enerjisi 151,7 kJ/mol iken bu değer 0,50 oranı için 133,6 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.

15. Heterojen yapıları, yüksek gang içerikleri ve düşük tenörleri nedeniyle redüksiyon deneyleri sonucunda yüksek metalizasyon değerleri elde edilemeyen, geniş rezervlere sahip Malatya-Hekimhan-Hasançelebi demir cevherlerini değerlendirmek amacıyla soğuk bağlı pelet yöntemiyle metalik demir tanecikleri (iron nugget) üretimine uygunluklarının değerlendirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Dikeç, F., Sezgin, A. ve Türkdoğan, E.T.**, 1995. Demir çelik paneli, *Metallurji Dergisi*, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 47-43.
- [2] <http://www.worldsteel.org>, 2007.
- [3] **Ersundu, A.E., Ceylan, U., Koç, B., Eryürek, S. ve Aydın, G.**, 2005. Türkiye Koşullarına Uygun Sünger Demir Üretimi, *Lisans Bitirme Ödevi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Nurse, M.**, DRI returns to favour, *Metal Bulletin Monthly*, 69-75.
- [5] **Brown, J.W., Reddy, R. L. and Salom, P.J.**, 1988. The future of direct reduced iron in the industrialized world, *Metallurgical Plant and Technology*, 10-21.
- [6] **Geçim, M.K.**, 2006. Demir Oksit Peletlerden Linyit Kömürü Kullanılarak Sünger Demir Üretim Koşullarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Rose, F. and Walden, H.**, 1988. Midrex and SL/RN direct reduction, *Proven Alternatives for Steelmaking*, New Delhi, 1-4.
- [8] **D.İ.E.**, 2007. Dokuzuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı Ana Metal Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Demir Çelik Sanayi Alt Komisyon Raporu, Ankara.
- [9] **Demir Çelik Üreticileri Derneği**, 2006. 2005 Yılı Raporu.
- [10] **Aydın, S., Taptık, Y. And Arslan, C.**, 1996. Scrap Recycling and Steel Production – A General Perspective and Türkiye's Standpoint, *Ironmaking and Steelmaking*, **23**, 242-246.
- [11] **Hargreaves, B.**, 2005. A DRI renaissance, *Metal Bulletin Monthly*, 24-26.
- [12] **Narçin, N.**, 1990. Döner Fırında Katı Redükleyici Kullanılarak Sünger Demir Üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] **Miller, J.R.**, 1972. Direct reduction of iron comes of age in the '70s, *Engineering and Mining Journal*, a McGraw-Hill Publication, London, 68-76.
- [14] **Erdemir**, 2004. Yerli Cevherlerin Kullanımının Geliştirilmesi Entegre Projesine Yönelik Hindistan'a Yapılan İnceleme Gezisi Raporu, Kdz. Ereğli, Zonguldak.

- [15] **Aydın, S.**, 1990. Dünya sünger demir üretiminin bugünkü durumu, *Metalurji Dergisi*, **67-68**, 41-46.
- [16] **Midrex Technologies Inc.**, 2007, 2006 World Direct Reduction Statics.
- [17] <http://www.midrex.com>, 2007.
- [18] **The Making, Shaping and Treating of Steel 10th Edition**, 1985. Association of Iron and Steel Engineers.
- [19] <http://www.hylsamex.com/hyl>, 2007.
- [20] **Çizmecioğlu, Z.**, 2005. Demir Çelik Üretiminde Yeni Teknolojiler, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [21] <http://www.tatasponge.com/Operations/Technology.htm>, 2007.
- [22] **Hoffman, G.**, 2000, Waste Recycling with Fasmelt and Fastmelt, *Direct From Midrex*.
- [23] **McClelland, J.M, E. and Jr.P**, 2006. Fastmet: Proven Process for Steel Mill Waste Recovery, North Carolina, USA.
- [24] **Narçin, N. ve Aydın, S.**, 1991. Sünger demir ve elektrik ark fırınlarında kullanımı, *Metalurji Dergisi*, **77**, 28-32.
- [25] **BP**, 2006, Statistical Review of World Energy.
- [26] <http://www.tki.gov.tr/index.html>, 2007.
- [27] <http://www.maden.org.tr>, 2007.
- [28] **OECD/IEA**, 1983. Coal Information Report, Paris, France.
- [29] **D.İ.E.**, 2006. Dokuzuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Linyit ve Taş Kömürü Çalışma Grubu Raporu, Ankara.
- [30] <http://www.dogalgazbilgisi.com>, 2007.
- [31] **Energy Information Administration**, 2006. International energy Outlook 2005.
- [32] <http://www.epgltd.com>, 2007.
- [33] **İGDAŞ**, 2006. 2005 Yılı Faaliyet Raporu.
- [34] **U.S. Geological Survey**, 2007, Mineral Commodity Summaries.
- [35] <http://www.jmo.org.tr>, 2007.
- [36] **D.İ.E.**, 2001. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Metal Madenler Alt Komisyonu Demir Çalışma Grubu Raporu, Ankara.

- [37] **Wright, J.K., Bowling, K.McG. and Morrison, A.L.**, 1981. Reduction of hematite pellets with carbonized coal in a static bed, *Transactions of ISIJ*, **21**, 149-155.
- [38] **Chinje, U.F. and Jeffes, J.H.E.**, 1989. Effects of chemical composition of iron oxides on their rates of reduction, *Ironmaking and Steelmaking*, **16**, 90-95.
- [39] **Şeşen, M.K.**, 1986. Avnik Demir Cevherlerinden Hazırlanan Peletlerin İndirgenme Davranışlarına CaO, Na₂O ve K₂O in Etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [40] **Habashi, F.**, 1999. Kinetics of Metallurgical Processes, *Metallurgie Extractive Québec*, Sainte-Foy, Québec.
- [41] **Aydin, S.**, 1994. Metalurji Kinetiği, *Ders Notu*, 47-48.
- [42] **Şeşen, M.K.**, 1998. Metalurjik Süreçlerin Kinetiği, *Ders Notu*, İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [43] **Ray, H.S.**, 1993. Kinetics of Metallurgical Reactions, Oxford, New Delhi.
- [44] **Roodsari, M. F. and Conochie, D.**, 2005. Melting Behavior of Coal Ore Composites, *John Floyd International Symposium*, Australia.
- [45] **Rahman, M., Haque, R. and Haque, M. M.**, 1995. Kinetics of reduction of millscale by coal: effect of process variables, *Ironmaking and Steelmaking*, **22**, 166-170.
- [46] **Mookherjee, S., Ray, H. S. and Mukherjee, A.**, 1986. Isothermal reduction of iron ore fines surrounded by coal or char fines, *Ironmaking and Steelmaking*, **13**, 229-235.

EKLER

Tablo A.1: Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Numunelerin Kimyasal Analizleri.

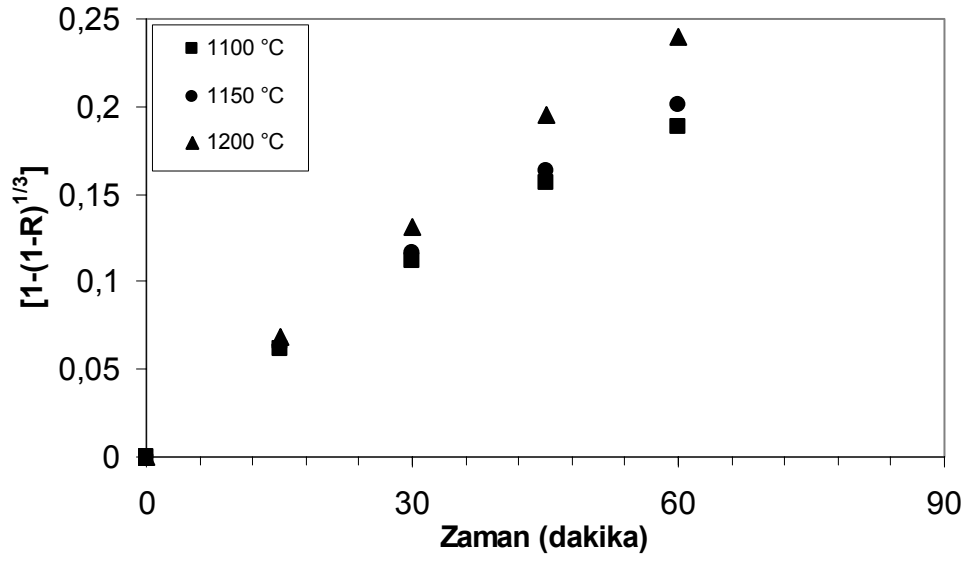
Deney şartları			Ürün analizi		
Deney No	T (°C)	t (dakika)	%Fe _{metalik}	%Fe _{toplam}	% Metalizasyon
1.1	1100	15	4,87	65,97	7,38
1.2	1100	30	25,23	68,12	37,03
1.3	1100	45	33,71	73,40	45,93
1.4	1100	60	27,97	65,60	42,64
1.5	1100	120	54,50	71,20	76,55
2.1	1150	15	12,51	54,91	22,78
2.2	1150	30	18,11	73,60	24,60
2.3	1150	45	22,37	55,95	39,98
2.4	1150	60	26,33	69,68	37,78
2.5	1150	120	40,49	74,92	54,04
3.1	1200	15	8,51	67,17	12,67
3.2	1200	30	15,62	63,41	24,64
3.3	1200	45	35,72	71,84	49,72
3.4	1200	60	29,14	63,95	45,57
3.5	1200	120	48,08	64,79	74,21
4.1	1250	15	31,01	72,22	42,94
4.2	1250	30	49,60	77,56	63,95
4.3	1250	45	50,70	73,35	69,12
4.4	1250	60	64,81	78,32	82,75
4.5	1250	120	58,33	62,73	92,98
5.1	1100	15	18,91	70,76	26,72
5.2	1100	30	50,59	51,18	98,84
5.3	1100	45	62,37	75,07	83,08
5.4	1100	60	46,71	78,48	59,51
5.5	1100	120	65,67	79,65	82,44
6.1	1150	15	18,55	74,16	25,01
6.2	1150	30	10,59	67,36	15,72
6.3	1150	45	25,61	74,97	34,16
6.4	1150	60	17,17	75,62	22,70
6.5	1150	120	20,86	75,35	27,68
7.1	1200	15	28,67	65,05	44,07
7.2	1200	30	69,68	80,09	87,00
7.3	1200	45	36,50	70,45	51,81
7.4	1200	60	60,09	83,35	72,09
7.5	1200	120	47,60	78,92	60,31
8.1	1250	15	21,70	70,00	31,00
8.2	1250	30	38,61	73,54	52,50
8.3	1250	45	62,68	70,99	88,29
8.4	1250	60	40,48	66,17	61,17
8.5	1250	120	52,63	71,13	73,99

Tablo A.1: Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Numunelerin Kimyasal Analizleri.

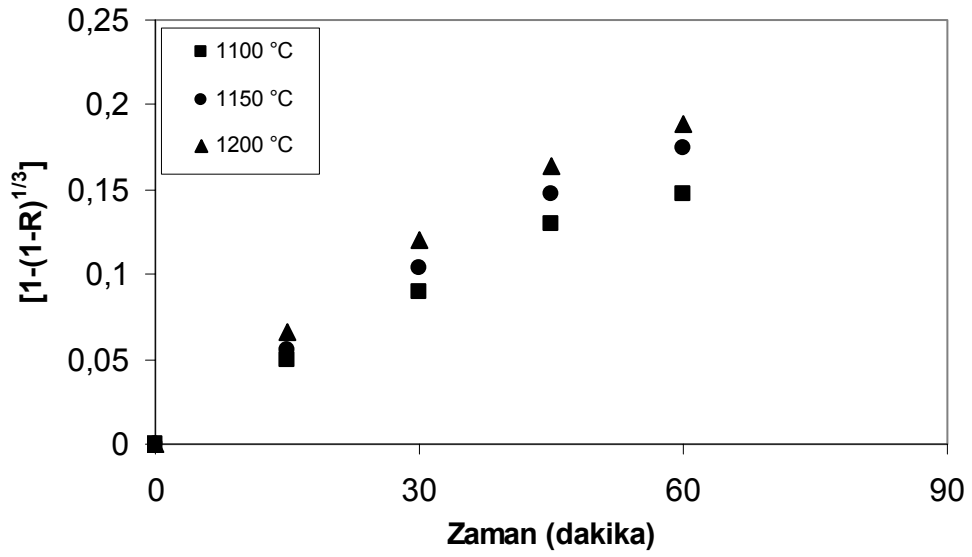
Deney şartları			Ürün analizi		
Deney No	T (°C)	t (dakika)	%Fe _{metalik}	%Fe _{toplam}	% Metalizasyon
9.1	1100	15	10,23	64,78	15,79
9.2	1100	30	15,92	74,67	21,32
9.3	1100	45	22,77	77,81	29,26
9.4	1100	60	19,21	73,93	25,98
9.5	1100	120	38,19	72,35	52,78
10.1	1150	15	10,99	73,08	15,04
10.2	1150	30	20,78	80,06	25,95
10.3	1150	45	16,15	58,41	27,65
10.4	1150	60	22,54	72,73	30,99
10.5	1150	120	19,91	75,78	26,27
11.1	1200	15	13,54	55,16	24,54
11.2	1200	30	14,37	71,64	20,05
11.3	1200	45	23,67	73,45	32,22
11.4	1200	60	25,38	82,37	30,81
11.5	1200	120	44,31	70,95	62,45
12.1	1250	15	21,19	71,42	29,66
12.2	1250	30	38,29	74,04	51,71
12.3	1250	45	35,47	75,98	46,68
12.4	1250	60	32,53	74,45	43,69
12.5	1250	120	55,09	69,01	79,82
13.1	1100	15	6,61	55,09	11,99
13.2	1100	30	6,92	21,02	32,92
13.3	1100	45	7,87	47,05	16,72
13.4	1100	60	6,19	35,38	17,49
13.5	1100	120	8,45	27,82	30,37
14.1	1150	15	12,11	49,44	24,49
14.2	1150	30	11,88	29,89	39,74
14.3	1150	45	15,75	30,98	50,84
14.4	1150	60	11,91	60,90	19,55
14.5	1150	120	10,52	23,20	45,34
15.1	1200	15	6,78	31,87	21,27
15.2	1200	30	7,24	18,10	40,00
15.3	1200	45	13,40	27,83	48,15
15.4	1200	60	7,81	55,05	14,18
15.5	1200	120	15,02	26,47	56,74
16.1	1100	15	6,20	55,45	11,18
16.2	1100	30	11,94	41,65	28,66
16.3	1100	45	11,76	40,40	29,10
16.4	1100	60	9,38	37,37	25,10
16.5	1100	120	12,19	32,41	37,61

Tablo A.1: Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Numunelerin Kimyasal Analizleri.

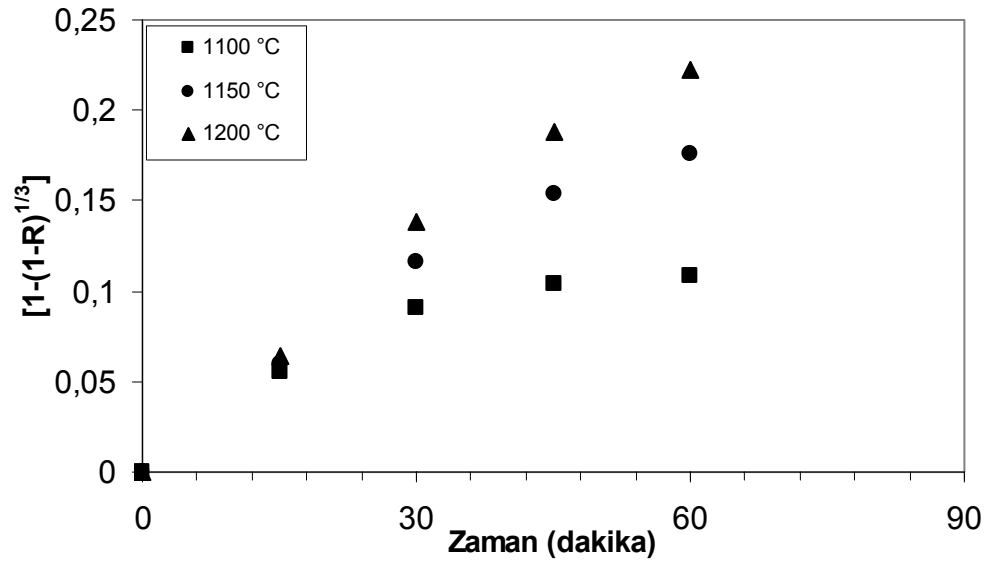
Deney şartları			Ürün analizi		
Deney No	T (°C)	t (dakika)	%Fe _{metalik}	%Fe _{toplam}	% Metalizasyon
17.1	1150	15	6,66	39,90	16,69
17.2	1150	30	10,56	57,37	18,40
17.3	1150	45	10,84	23,52	46,08
17.4	1150	60	10,60	60,80	17,43
17.5	1150	120	6,96	60,40	11,52
18.1	1200	15	8,19	38,00	21,55
18.2	1200	30	10,29	30,19	34,08
18.3	1200	45	8,84	37,97	23,28
18.4	1200	60	16,40	35,68	45,96
18.5	1200	120	20,59	22,05	93,37
19.1	1100	15	7,85	16,71	46,97
19.2	1100	30	9,01	32,58	27,65
19.3	1100	45	8,60	27,82	30,91
19.4	1100	60	8,22	20,25	40,59
19.5	1100	120	6,81	10,64	64,00
20.1	1150	15	9,31	25,54	36,45
20.2	1150	30	6,69	13,03	51,34
20.3	1150	45	5,97	27,19	21,95
20.4	1150	60	7,49	17,47	42,87
20.5	1150	120	6,06	32,00	18,93
21.1	1200	15	8,34	27,47	30,36
21.2	1200	30	6,41	14,73	43,51
21.3	1200	45	9,19	11,93	77,03
21.4	1200	60	9,46	49,78	19,00
21.5	1200	120	8,50	15,35	55,37
22.1	1100	15	6,82	19,99	34,11
22.2	1100	30	7,22	18,37	39,30
22.3	1100	45	6,49	12,60	51,50
22.4	1100	60	7,71	34,47	22,36
22.5	1100	120	6,60	13,10	50,38
23.1	1150	15	4,00	9,86	40,56
23.2	1150	30	4,56	17,89	25,49
23.3	1150	45	5,49	14,77	37,17
23.4	1150	60	5,47	20,36	28,86
23.5	1150	120	4,56	12,14	37,56
24.1	1200	15	7,32	16,05	45,60
24.2	1200	30	11,62	23,42	49,61
24.3	1200	45	7,81	31,64	24,68
24.4	1200	60	8,36	13,21	63,28
24.5	1200	120	10,94	21,78	50,23



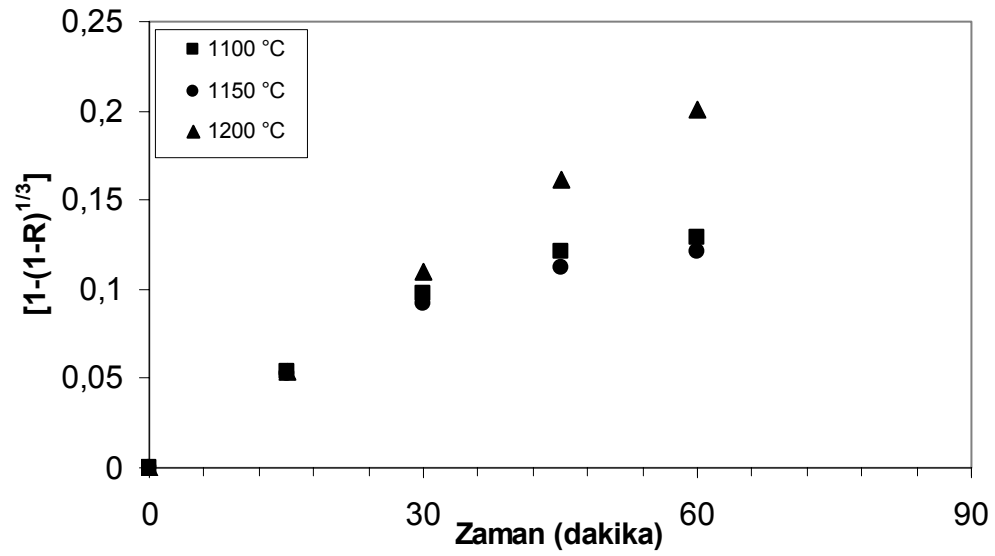
Şekil B.1: 0,40 Oranında Farklı Sıcaklıklar için $[1-(1-R)^{1/3}]$ Teriminin Süreye Bağlı Değişimi (Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri).



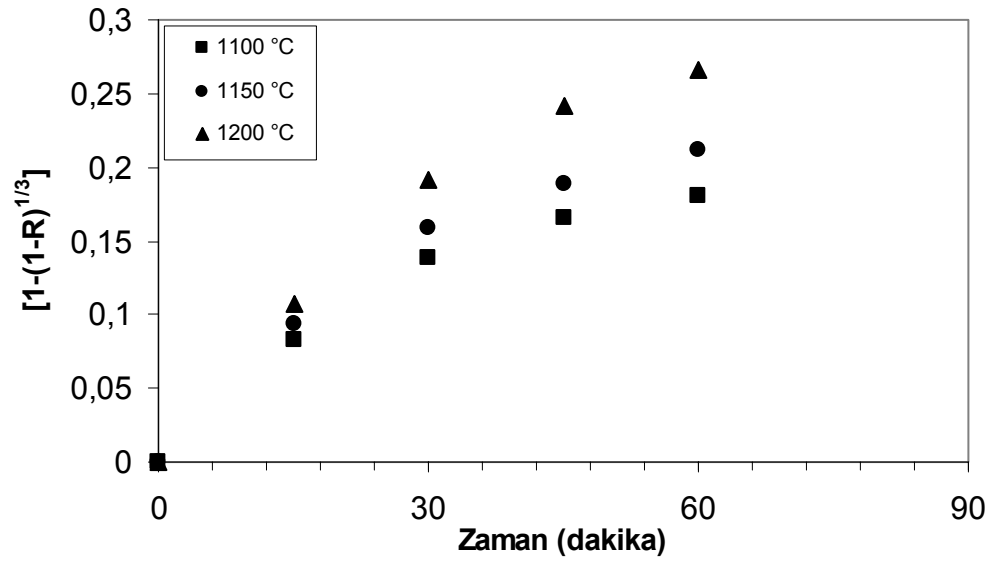
Şekil B.2: 0,50 Oranında Farklı Sıcaklıklar için $[1-(1-R)^{1/3}]$ Teriminin Süreye Bağlı Değişimi (Sivas Divriği B Kafa Demir Cevheri).



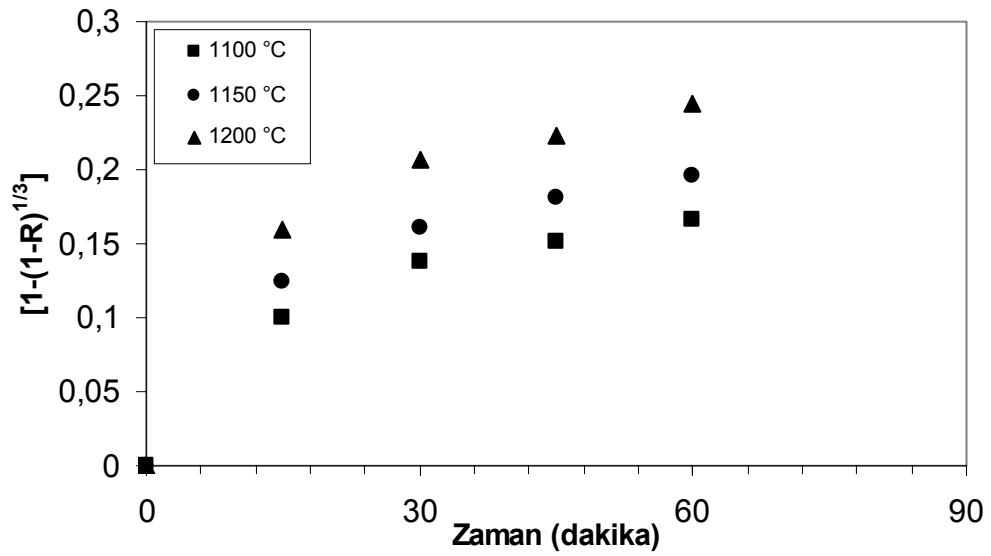
Şekil B.3: 0,40 Oranında Farklı Sıcaklıklar için $[1-(1-R)^{1/3}]$ Teriminin Süreye Bağlı Değişimi (Malatya-Hekimhan-Hasançelebi I Demir Cevheri).



Şekil B.4: 0,50 Oranında Farklı Sıcaklıklar için $[1-(1-R)^{1/3}]$ Teriminin Süreye Bağlı Değişimi (Malatya-Hekimhan-Hasançelebi I Demir Cevheri).



Şekil B.5: 0,40 Oranında Farklı Sıcaklıklar için $[1-(1-R)^{1/3}]$ Teriminin Süreye Bağlı Değişimi (Malatya-Hekimhan-Hasançelebi II Demir Cevheri).



Şekil B.6: 0,50 Oranında Farklı Sıcaklıklar için $[1-(1-R)^{1/3}]$ Teriminin Süreye Bağlı Değişimi (Malatya-Hekimhan-Hasançelebi II Demir Cevheri).

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında İstanbul’da doğmuştur. 2000 yılında Eskişehir Anadolu Lisesi’nden mezun olmuştur. 2005 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde lisans eğitimini tamamlamış, aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde İleri Teknolojiler Malzeme Bilimi ve Mühendisliği programında yüksek lisans eğitime başlamıştır. 2005 yılından beri İTÜ Üretim Metalurjisi Anabilim Dalı’nda araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.