

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HEKİMHAN – DEVECİ SİDERİT CEVHERİNİN KALSİNASYON SONRASI
PELETLEME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

MEHMET ÇELİKDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2018

Tezin Başlığı : Hekimhan – Deveci Siderit Cevherinin Kalsinasyon Sonrası
Peletleme Özelliklerinin Belirlenmesi

Tezi Hazırlayan : Mehmet ÇELİKDEMİR

Sınav Tarihi : 10.07.2018

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Maden Mühendisliği Anabilim
Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Musa SARIKAYA

İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Tolga DEPCİ

İskenderun Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Deniz TURAN

Fırat Üniversitesi



Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘Hekimhan – Deveci Siderit Cevherinin Kalsinasyon Sonrası Peletleme Özelliklerinin Tespiti’ başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynaklar bölümünde yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mehmet ÇELİKDEMİR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HEKİMHAN – DEVECİ SİDERİT CEVHERİNİN KALSİNASYON SONRASI PELETLEME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet ÇELİKDEMİR

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

xi + 80 sayfa

2018

Danışman: Prof. Dr. Musa SARIKAYA

Bu çalışmada, Malatya–Hekimhan–Deveci siderit cevherinin ısıtma tabi tutulması yoluyla kalsine edildikten sonraki peletleme özelliklerinin tespit edilmesi ve tüvenan cevherden elde edilenlere göre daha yüksek dayanıma sahip peletlerin üretilebilirliği araştırılmıştır.

Siderit numunesinin TGA verilerinden yararlanılarak 450-800 °C aralığındaki sıcaklıklarda ve 5-60 dakika arasında değişen sürelerde kalsinasyon deneyleri yapılmıştır. Sideritin kalsinasyon sonrasında ağırlıklı olarak hematite dönüştüğü XRD ile tespit edilmiştir.

Konvansiyonel yöntem haricinde mikrodalga ısıtma metoduyla, %23 termal yardımcı katkısında yapılan kalsinasyon deneylerinde 3 dakikalık bir ısıtma ile 1100 °C sıcaklığa erişilmiş ve %32,14 ağırlık kaybı olduğu tespit edilmiştir.

Kalsinasyon sonucunda elde edilen çeşitli kalsine sideritler farklı sürelerle öğütülerek öğünebilirliği araştırılmış ve kalsine sideritin ham siderite göre çok daha kolay öğütülebildiği saptanmıştır.

Kalsine edilmiş ve kalsine edilmemiş siderit numunelerine değişen oranlarda bentonit ilave edilerek üretilen ham peletler 1300 °C sıcaklıkta pişirilmiştir. 268 kgf ile en yüksek dayanıma sahip peletin %9 bentonit içeren 90 dakika öğütülmüş kalsine sideritten elde edildiği tespit edilmiştir. Bentonit oranının ürün peletlerde nasıl bir yüzey yapısı ortaya çıkardığı SEM görüntüleri yardımıyla aydınlatılmaya çalışılmıştır.

ANAHTAR KELİMELE: Hekimhan, Deveci, Siderit, Demir cevheri, Kalsinasyon, Mikrodalga, Peletleme

ABSTRACT

Master Thesis

DETERMINATION OF PELLETIZING PROPERTIES AFTER CALCINATION OF HEKİMHAN - DEVECİ SIDERITE ORE

Mehmet ÇELİKDEMİR

Inonu University

Graduate School of Natural and Applied Science Department of Mining Engineering

xi + 80 pages

2018

Supervisor: Professor Dr. Musa SARIKAYA

In this study, the pelletization characteristics after calcination of the MalatyaHekimhan-Deveci siderite ore were investigated and the productivity of pellets with higher strength than that obtained from crude siderite was investigated.

Calcination experiments were carried out at temperatures ranging from 450 to 800°C and for periods ranging from 5 to 60 minutes by using thermogravimetric analysis (TGA) data of the siderite sample. It was detected by XRD that after calcination siderite transformed predominantly to hematite.

Apart from the conventional method, in calcination experiments made with 30% thermal assist (sucrose) additive by microwave heating method, a temperature of 1100 ° C was reached with 3 minutes irradiation and 32.14% weight loss was detected.

Various calcined siderites obtained by calcination were sieved for different durations (1590 minutes) and their grindability was investigated. It was observed that calcined siderite was much easier to grind than raw siderite.

Green ball produced from calcined and uncalcined siderite ore by adding bentonite to various ratios were heated at 1300 °C. It was found that the pellets with the highest strength (268 kgf approximately 2630 N) was obtained with the calcined siderite ore grounded for 90 minutes by addition of 9% bentonite. The surface structure of produced pellets by addition of various ratios bentonite was tried to be clarified by SEM images.

KEYWORDS: Hekimhan, Deveci, Siderite, Iron ore, Calcination, Microwave, Pelletizing

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesi ve bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sürecinde değerli bilgilerini benimle paylaşarak her an desteğini hissettiren danışmanım Sayın Prof. Dr. Musa SARIKAYA'ya teşekkürü bir borç bilir saygılarımı sunarım.

Gerekli laboratuvar ortamını sağlaması ve her aşamadaki yönlendirmelerinden dolayı Sayın Doç. Dr. Tolga DEPCI'ye teşekkür ederim. Cihazların kullanımı ve diğer yardımları için Sayın Ayşegül YÜCEL'e teşekkürlerimi bildiririm.

İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne 2016/120 proje numarası altında yaptığı maddi destekleri için teşekkür ederim. Lisans eğitimim boyunca kendilerinden çok şey öğrendiğim, ufkumu açan İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği'ndeki hocalarıma şükranlarımı sunarım.

Tüm yüksek lisans eğitimim boyunca; sabrı, desteği, sağladığı mükemmel çalışma ortamı ve bana katlandığı için sevgili dostum Ramazan AYDOĞMUŞ'a teşekkür ederim.

“Evladın erdemi babanın onurudur.” sözüyle en büyük dersi veren babama ve anneme başta olmak üzere tüm aile fertlerime desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Ancak yüksek algı ve idraka sahip olan, tarihin ender insanlarından duyabileceğimiz *“Eğer bir gün benim sözlerim bilimle ters düşerse, bilimi seçin.”* diyen feyizli ışığımız Mustafa Kemal ATATÜRK'e sonsuz saygı ve minnetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Çalışmaları.....	4
2. KURAMSAL TEMELLER VE UYGULAMALAR.....	8
2.1. Siderit.....	8
2.1.1. Siderit hakkında genel bilgiler.....	8
2.1.2. Sideritin oluşumu.....	9
2.1.3. Türkiye’deki demir yatakları ve özellikleri.....	10
2.1.4. Hekimhan – Deveci bölgesinin tanıtımı.....	11
2.1.5. Hekimhan – Deveci cevherinin oluşumu.....	12
2.1.6. Hekimhan – Deveci bölgesinin jeolojik yapısı.....	13
2.2. Kalsinasyon.....	15
2.2.1. Kalsinasyonun tanımı ve amacı.....	15
2.2.2. Konvansiyonel ve mikrodalga ısıtma yöntemleri.....	16
2.2.3. Kalsinasyon uygulamaları.....	17
2.3. Peletleme Prosesi.....	18
2.3.1. Peletlemenin tanımı ve amacı.....	18
2.3.2. Peletleme hammaddeleri.....	21
2.3.3. Peletleme işlemi.....	23
2.3.4. Aglomerasyon aşaması.....	24
2.3.5. Isıl işlem aşaması.....	28
2.3.6. Soğutma aşaması.....	33
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
3.1. Materyal.....	35
3.1.1. Deneylerde kullanılan ürünler.....	35
3.1.2. Deneylerde kullanılan kimyasallar.....	36
3.2. Yöntem.....	36
3.2.1. Numunelerin alınması.....	36
3.2.2. Numunelerin hazırlanması.....	37
3.2.3. Eleme işlemi.....	37
3.2.4. Öğütme işlemi.....	38
3.2.5. Kalsinasyon işlemi.....	40
3.2.6. Topaklama işlemi.....	41
3.2.7. Ürün pelet yapım aşaması.....	43
3.2.8. Peletlere uygulanan testler.....	44
3.2.9. XRD ve elementel analiz.....	44
3.2.10. Termogravimetrik analiz.....	45
3.2.11. Taramalı elektron mikroskobu.....	46
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	47

4.1.	Başlangıç Malzemelerinin Karakterizasyonu.....	47
4.2.	Boyut Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	49
4.3.	Öğütme Deneyleri ve Sonuçları.....	50
4.4.	Kalsinasyon Deneylerinin Değerlendirilmesi.....	52
4.5.	Pelet Pişirme İşleminin Değerlendirilmesi.....	59
4.6.	Peletlere Uygulanan Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	60
4.7.	Peletlerin SEM görüntülerinin değerlendirilmesi.....	63
4.8.	Alternatif Pelet Çalışmalarının Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	65
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
6.	KAYNAKLAR.....	68
7.	EKLER.....	73
	ÖZGEÇMİŞ.....	80



SİMGELER VE KISALTMALAR

°C	Derece Santigrat
TGA	Termogravimetrik analiz
XRD	X-ışını difraksiyon toz kırınımı
XRF	X-ışını floresans spektrometresi
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
µm	Mikron (10^{-6} m)
Milimetre	(10^{-3} m)
m	Metre
km	Kilometre (10^3 m)
T	Sıcaklık
dk.	Dakika
g	Gram
kg	Kilogram
kgf	Kilogram kuvvet
N	Newton
kJ/mol	kilojoule/mol
P ₈₀	Beslenen malzemenin %80'inin elek altına geçtiği açıklık
d ₅₀	Beslenen malzemenin %50'sinin elek altına geçtiği açıklık

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Sideritin rombohedral kristal yapısı ve koordinasyon ilişkisi	8
Şekil 2.2.	Kristal şekilli siderit örneği	9
Şekil 2.3.	Hekimhan – Deveci bölgesi yer bulduru haritası	12
Şekil 2.4.	Mikrodalga ve konvansiyonel ısıtma prensipleri arasındaki farkın şematik gösterimi	16
Şekil 2.5.	Hekimhan – Deveci siderit cevherinin kalsine edildiği tesis	17
Şekil 2.6.	Demir cevheri peletleri	18
Şekil 2.7.	Demir cevheri üretimi	19
Şekil 2.8.	Partikül ve bağlayıcı sistemin yenilme türleri	22
Şekil 2.9.	Montmorillonit mineralinin kristal yapısı	23
Şekil 2.10.	Yaş öğütmeli bir peletleme tesisinin şematik gösterimi	24
Şekil 2.11.	Ham pelet	25
Şekil 2.12.	Peletleme tamburu	26
Şekil 2.13.	Peletleme diski	27
Şekil 2.14.	Izgara öncesi rulolu besleyici	28
Şekil 2.15.	Hematit cevheri peletlerinin pişirildiği sıcaklıkları gösteren grafik	29
Şekil 2.16.	Erie tipi dikey pelet fırınının şematik gösterimi	30
Şekil 2.17.	Hareketli ızgaralı pelet fırını	31
Şekil 2.18.	Altan emişli ızgara kesiti	31
Şekil 2.19.	Dört bölmeli ızgara-döner fırın peletleme tesisi	32
Şekil 2.20.	Izgara-döner fırın sistemi kısımlarının kesiti	32
Şekil 2.21.	Hareketli ızgara ve ızgara-döner fırın sistemleriyle üretilen peletlerin basma dayanımı değerlerinin dağılımı	33
Şekil 2.22.	Ham peletin ızgara üzerindeki kesiti	34
Şekil 3.1.	Ham siderite (solda) ve kalsine siderite (sağda) numuneleri	35
Şekil 3.2.	Hekimhan – Deveci stok sahası	36
Şekil 3.3.	Bıçaklı bölücü (riffle splitter)	37
Şekil 3.4.	Elek seti ve vibrasyon cihazı	37
Şekil 3.5.	Laboratuvar tipi bilyalı değirmen	39
Şekil 3.6.	Farklı ebatlarda çelik bilya	39
Şekil 3.7.	Kamara tipi kül fırını	40
Şekil 3.8.	Peletleme diski	41
Şekil 3.9.	Kurumaya bırakılan ham peletler	43
Şekil 3.10.	Isıl işlem öncesi ham peletlerin görünümü	43
Şekil 3.11.	Ürün peletlerin görünümü	44
Şekil 3.12.	X-ışını difraktometresi	45
Şekil 3.13.	Termogravimetrik analizör	45
Şekil 3.14.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	46
Şekil 4.1	Tüvenan siderit toz kırınım deseni	47
Şekil 4.2	Ham siderit cevherinin termogravimetrik analiz grafiği	48
Şekil 4.3	Kalsine siderit toz kırınım deseni	48
Şekil 4.4	Tüvenan siderit cevherinin kümülatif elek altı eğrisi	49
Şekil 4.5	Ham ve kalsine siderit cevherlerinin kümülatif eğrileri	50
Şekil 4.6	Farklı sürelerde öğütme yapılmış olan tüvenan siderit cevherinin elek altı eğrileri	50

Şekil 4.7	Farklı sürelerde öğütme yapılmış olan kalsine sideritin elek altı eğrileri	51
Şekil 4.8	Eşit sürelerde öğütülmüş tüvenan ve kalsine sideritin kümülatif elek altı eğrileri	51
Şekil 4.9	Ham siderit cevherinin 450 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği	53
Şekil 4.10	Tüvenan siderit cevherinin 500 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği	53
Şekil 4.11	Tüvenan siderit cevherinin 550 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği	54
Şekil 4.12	Tüvenan siderit cevherinin 600 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği	54
Şekil 4.13	Tüvenan siderit cevherinin 650 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği	55
Şekil 4.14	Tüvenan siderit cevherinin 700 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği	55
Şekil 4.15	Tüvenan siderit cevherinin 750 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği	56
Şekil 4.16	Tüvenan siderit cevherinin 800 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği	56
Şekil 4.17	Çeşitli sürelerde farklı sıcaklıklarda ısıtılan sideritin ağırlık kaybı ve mikrodalga ile işlenmiş siderit numunelerinin ağırlık kaybı	58
Şekil 4.18	Ham sideritin mikrodalga ve kül fırını kalsine ürünlerinin toz kırınım deseni	58
Şekil 4.19	Ürün peletlerin SEM görüntüsü	59
Şekil 4.20	Ham siderit (90 dakika öğütme) pelet dayanımı grafiği	61
Şekil 4.21	Kalsine siderit (60 dakika öğütme) pelet dayanımı grafiği	61
Şekil 4.22	Kalsine siderit (90 dakika öğütme) pelet dayanımı grafiği	62
Şekil 4.23	Ortalama pelet basma dayanımlarının bentonit içeriğine göre değişimi	63
Şekil 4.24	Kalsine ürün pelet %9 bentonit içeren peletin görünümü	64
Şekil 4.25	Kalsine ürün pelet %10,75 bentonit içeren peletin görünümü	64
Şekil 4.26	Mikrodalga yöntemiyle elde edilen ağırlıkça %23 üre katkılı pelet	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1.	Dünya ham çelik üretiminde ilk 10 ülke	1
Çizelge 1.2.	Ülke ve bölgelerin kişi başına nihai çelik ürünleri tüketim miktarları (kg/kişi)	2
Çizelge 1.3.	Cevher olarak kullanılan bazı demir mineralleri	3
Çizelge 2.1.	Türkiye işletilebilir demir cevheri rezervi	11
Çizelge 2.2.	Dünyadaki ve bölgelerdeki pelet üretimi	20
Çizelge 3.1.	Deneylerde kullanılan elek serisi	38
Çizelge 3.2.	Öğütme parametreleri	40
Çizelge 3.3.	Peletlemede kullanılan hammaddeler ve bentonit içerikleri	42
Çizelge 4.1.	Ham sideritin elementel analizi	47
Çizelge 4.2.	Kül ve mikrodalga ısıtma ile kalsinasyon yöntemlerinin ürünlerine ait manyetik duyarlılık dengesi değerleri	57
Çizelge 4.3.	Pelet çaplarına ve eklenen bentonit oranına göre pelet basma dayanımları	60

1. GİRİŞ

Demir çelik sektörü; demir cevherinin yüksek fırınlarda veya hurdaların ark ocaklarında pirometalurjik süreçler neticesinde ergitilmesiyle elde edilen, slab ve kütüğün değişik işlemlerden geçirilerek istenilen kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip mamuller üreten bir sektördür [1, 2]. Nihai çelik ürünlerinin sayısız çeşidi ve kullanım alanları vardır. Değişen tüketici ihtiyaçları, teknolojiye meydana gelen gelişmeler ve rekabet gibi unsurlar demir çelik sektöründeki ürün çeşitliliğini daha da arttırmaktadır. Ağır sanayi sektörlerinden en önemlisi olan demir çelik sektörü, inşaat, altyapı, otomotiv, beyaz eşya ve makine sanayi gibi pek çok önemli endüstriye hammadde sağlamaktadır. Bu nedenle bir ülkenin sanayileşmesi güçlü bir demir çelik sektörüne ve tüketimine sahip olmasıyla doğrudan ilişkilidir [3]. Çizelge 1.1’de dünya ham çelik üretimini yapan ilk 10 ülke verilmiştir.

Çizelge 1.1 Dünya ham çelik üretiminde ilk 10 ülke (milyon ton) [4]

Sıra	Ülke	2011	2012	2013	2014	2015	2015 (%)
1	Çin	701,9	731,0	822,0	822,8	803,8	49,60
2	Japonya	107,6	107,2	110,6	110,7	105,1	6,48
3	Hindistan	73,4	77,2	81,2	87,2	89,0	5,49
4	ABD	86,3	88,6	88,8	88,1	78,8	4,86
5	Rusya	68,8	70,2	69,0	71,4	70,8	4,36
6	Güney Kore	68,5	69,0	66,0	71,5	69,6	4,29
7	Almanya	44,2	42,6	42,6	42,9	42,6	2,62
8	Brezilya	35,2	34,5	34,1	33,8	33,2	2,04
9	Türkiye	34,1	35,8	34,6	34,0	31,5	1,94
10	Ukrayna	35,3	32,9	32,7	27,1	22,9	1,41
	AB (28 Ülke)	177,7	168,5	166,3	169,3	166,1	10,25
	Dünya	1538,0	1560,1	1650,3	1669,8	1620,4	100

Demir, sanayinin temel hammaddesini oluşturmakta ve ülkelerin kalkınmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ekonomik gelişmişlik göstergeleri kişi başına düşen gayri safi milli hâsılanın yanı sıra kişi başına düşen demir-çelik tüketimi ile de

ölçülmektedir. Çizelge 1.2'deki veriler kişi başına düşen çelik tüketimini göstermektedir.

Çizelge 1.2 Ülke ve bölgelerin kişi başına nihai çelik ürünleri tüketim miktarları (kg/kişi) [4]

Ülkeler / Bölgeler	2011	2012	2013	2014	2015
Güney Kore	1190,1	1135,3	1081,7	1155,0	1155,7
Çek Cumhuriyeti	663,1	639,8	641,5	678,6	723,9
Japonya	546,9	541,1	558,3	574,9	535,7
Almanya	561,3	507,3	517,0	530,1	523,9
Çin	495,4	507,3	562,0	540,6	509,0
Avusturya	527,1	488,1	475,1	480,4	466,2
Türkiye	389,9	404,6	436,9	422,5	464,7
Kanada	456,4	496,3	466,8	492,5	412,5
AB (28 Ülke)	343,0	306,2	311,1	322,0	331,6
Kuzey Amerika	267,4	285,2	276,7	311,1	282,9
Asya	256,4	261,7	282,2	277,8	266,1
Orta Doğu	257,6	250,3	248,8	251,9	244,4
Dünya	221,3	223,3	234,5	234,1	224,4
Güney Amerika	126,4	128,0	132,3	122,8	112,4
Afrika	30,1	32,8	35,4	35,4	35,7

Geçmişte, yüksek fırında aranan özelliklere sahip demir cevheri doğrudan maden ocaklarından yapılan üretimle karşılanabilmekteydi. Ancak sanayide demire olan ihtiyacın giderek artması ve yüksek fırına doğrudan şarj edilebilir nitelikteki cevherin giderek azalması, düşük tenörlü cevherlerin de demir çelik sanayi için önem kazanmasını ve değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır.

Demir çelik sektörünün ana hammaddesi demir cevheridir. Bir madenin cevher olarak değerlendirilebilmesi için işlenmesi ve kullanılmasının ekonomik olması gerekmektedir. Çelik sanayisinde kullanılan demir cevherlerinin harman tenörünün en az %57 Fe olması arzu edilmektedir. Çizelge 1.3'de çeşitli demir cevherleri ve Fe tenörleri verilmiştir.

Çizelge 1.3 Cevher olarak kullanılan bazı demir mineralleri [3]

Mineral Adı	Formülü	Fe Tenörü (%)	Mineral Grubu
Manyetit	Fe ₃ O ₄	71,5	Oksit
Hematit	Fe ₂ O ₃	70,0	Oksit
Limonit	FeO(OH).nH ₂ O	60,0 – 63,0	Hidroksil
Götite	α -Fe ³⁺ O(OH)	60,0 – 63,0	Hidroksil
Siderit	FeCO ₃	48,0	Karbonat
Pirit	FeS ₂	47,0	Sülfür
Kalkopirit	Cu FeS ₂	30,0	Sülfür

Siderit, teknik olarak cevher denebilecek oranda demir tenörüne sahiptirler. Ancak, dünyada bolca bulunan hematit ve manyetit yataklarının varlığı sebebiyle siderit yatakları günümüze kadar pek fazla işletilmemiştir. İşletilen az sayıdaki siderit yatağından üretilen cevher, demir-çelik endüstrisinde hematit ya da manyetitle harmanlamak suretiyle kullanılmıştır. Günümüzde ise gelişen teknolojiler ve ekonomik konjonktür, sideritin cevher olarak değerlendirilmesini mecbur kılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında ülkemizin işletilebilir demir rezervinin %30'unu teşekkül eden Malatya ili Hekimhan ilçesinde yataklanmış olan düşük tenöre sahip siderit cevherinin kalsinasyon öncesi ve kalsinasyon sonrası peletlenebilme ve dayanıklı peletler üretilme potansiyeli araştırılmıştır. Tez konusu olarak bu cevherin seçilmesinin sebebi ise ülkemizin Deveci Sideritlerini tenör düşüklüğünden dolayı sorunlu demir cevherleri kategorisinde değerlendirmesidir. Bu sebeple de hem kalsinasyon ile tenörün yükseltilmesi, hem de dayanımı yüksek peletlerin üretilme potansiyeli bir arada araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında Deveci sideritlerinin kalsinasyon özellikleri incelenmiş olup optimum parametreleri tespit edilmiştir. Sideritin bünyesinden parçalanarak uzaklaştırılan karbonatla demir tenörü yükseltilmeye çalışılmıştır. Kalsine cevherin peletleme özellikleri belirlenmiş ve ham sideritten elde edilenlere göre daha yüksek dayanıma sahip üretilirliği araştırılmıştır. Kalsinasyon sonucunda siderit numunesinde meydana gelen manyetik duyarlılıktaki artış ile zenginleştirme potansiyeli için imkan sunulmuş ve bentonit oranının ürün peletlerde nasıl bir yüzey yapısı ortaya çıkardığı SEM görüntüleri yardımıyla aydınlatılmaya çalışılmıştır.

1.1. Literatür Çalışmaları

Başta siderit olmak üzere çeşitli demir cevherleri üzerine yapılmış olan konvansiyonel ve mikrodalga yöntemleriyle kalsinasyon çalışmaları aşağıda sıralanmıştır.

MTA (1977), Deveci sideritleri üzerine hazırladığı teknoloji etüdünde döner fırında 600 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle yapılan kalsinasyon işlemiyle Fe içeriğinin %58-60 dolaylarına çıkarılabildiğini belirtmiştir [5].

Ertun vd. (1980), -50mm boyutundaki Deveci sideritleri üzerine 700-900 °C arasında değişen sıcaklıklarla ve 30-60 dakika sürelerle yaptıkları kalsinasyon deneylerinde kalsine ürünün %56-57 dolaylarında Fe içerdiğini saptamışlardır [6].

Ateşok vd. (1999), Hekimhan Deveci siderit cevherlerinin kalsinasyonu üzerine yaptığı çalışmada 800 °C'da ve 15 dakikalık kalsinasyon süresinde üretilen ürünlerin Fe tenörünün endüstri için yeterli düzeye geldiğini saptamıştır [7].

Znamenackova vd. (2005), siderit cevheri üzerine yaptığı mikrodalga ısıtma yönteminde 550 °C dolaylarına kadar ısınma sağlamış ve bu değer tane boyutu ile doğru orantılı olduğunu, büyük (-3+1 mm) tane boyutunda elde edilen sıcaklığın küçük (-100+70 µm) tane boyutunda elde edilene göre iki katından daha fazla olduğunu tespit etmiştir [8].

Feshchenko vd. (2006), Bakal (Rusya) sideritleri üzerine yaptıkları kalsinasyon çalışmalarında, -60mm beslenen cevherin kalsinasyon sonrası ürününde Fe içeriğini yaklaşık olarak %48 dolaylarına yükseltmiş ve sideritin metalürjik bir hammadde olarak kullanılabilirliğini göstermişlerdir [9].

Alkaç (2007), çalışmada, deveci siderit cevherlerinin kalsinasyonu ile manyetik özellikte ürünler elde etmiştir. Siderite manyetik özellik kazandırmak için 560 °C sıcaklıkta 45 dakika süreli kalsinasyonun yeterli olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca kalsinasyon işlemini konvansiyonel ısıtmanın yanında mikrodalga yöntemle de

denemiş ancak cevherde herhangi bir ısınma meydana gelmediği için kalsinasyon gerçekleşmemiştir [10].

Olubambi vd (2007), siderit de içeren kompleks sülfür cevherleri üzerinde mikrodalga ısıtma ile çeşitli çalışmalar yapmış ancak 1100 W ısıtma gücü ile maksimum 270 °C sıcaklığa kadar ulaşabilmiştir [11].

Zhunev ve Yur'ev (2010), Bakal (Rusya) siderit cevheri üzerine yaptığı araştırmasında büyüyen cevher boyutunun kalsinasyonu olumlu etkilediğini tespit etmiştir [12].

Feng vd (2011), Wangjiatan sideritleri üzerinde yaptığı çalışmada termal bozunmanın ardından çıkan ürünlerin α -Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃, Fe₃O₄ ve FeO olduğunu tespit etmiştir. Sideritin kavurma sonucunda manyetik duyarlılığının ve Fe içeriğinin arttığını göstermiştir [13].

Akdağ vd. (2010), Deveci sideritlerinin kalsinasyonu ve indirgenmesi üzerine yaptıkları çalışmada tane boyu fraksiyonu, kalsinasyon süresi ve sıcaklığı gibi parametrelerin etkilerini incelemişlerdir. -50 mm fraksiyonu sınırları içerisinde kalmak koşulu ile artan tane boyutuyla birlikte kalsinasyon esnasında ham cevherde meydana gelen ağırlık kaybında artış yaşanmış ve bu da beraberinde daha yüksek Fe içeriğine sahip kalsine ürünlerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur [14].

Omran vd. (2014), Hematitin manyetik özelliklerini geliştirmek amacıyla yaptığı mikrodalga ısıtma yönteminde 100 saniyelik bir ısıtma sonucunda yaklaşık 720 °C düzeyine kadar ısınma sağlamıştır. Ayrıca artan tane boyutuyla birlikte ısınma süresinde kısalma meydana geldiğini gözlemlemiştir [15].

Luo vd. (2016), Sincan (Xinjiang/China) sideritleri üzerinde termal davranışlarını ortaya çıkarmak amacıyla yaptığı çalışmalarda kalsinasyonun en önemli iki parametresinin tane boyutu ve kalsinasyon atmosferi olduğunu ortaya koymuştur [16].

Vusikhis vd. (2016), Bakal (Rusya) siderit cevherlerinin yüksek fırın ve çelik ergitme işlerindeki etkinliğini araştırmış ve sideritin sadece demir ve magnezyum içeren bir hammadde olarak kullanılabileceğini göstermiştir [17].

Matyukhin vd. (2017), siderit cevherinin dikey (şaft) fırınlarda kavrulması üzerine araştırmalar yapmış ve bu tip fırınlarda kavurma veriminin % 47,67 seviyesinden daha yüksek olmadığını ve bunun asıl sebebinin ise ısı dağılımının yükün her yerinde büyük dengesizlikler barındırdığına bağlamıştır [18].

Zhang vd. (2017), ısıtma oranının sideritin piroliz davranışı ve kinetik özelliklerini araştırmak için yaptığı çalışmada 550 °C sıcaklıkta çoğunlukla γ -Fe₂O₃, 800 °C sıcaklıkta ise α -Fe₂O₃ oluştuğunu ve Fe₃O₄ ya da FeO oluşumunun ise ancak CO₂ gibi inert bir atmosferde oluşabileceğini göstermiştir [19].

Siderit cevherleri üzerine yapılmış olan peletleme ve pelet dayanımı çalışmaları aşağıda sıralanmıştır.

Bojarski ve Barszcz (1972), Siderit numunesi ve Ca(OH)₂ (sönmemiş kireç)'den oluşan peletlerin pişirilmesi sırasında meydana gelen değişimleri x-ışını difraktometresi ve mikroanalizör yardımıyla incelemiştir. Sıcaklığın 400 °C seviyesini geçmesiyle birlikte sideritte termal ayrışmanın başladığını ve 600 °C'a kadar bu şekilde devam ettiğini belirtmiştir. Artan sıcaklıkla birlikte 750 °C'a kadar Fe₂O₃ tanelerinde büyümenin meydana geldiğini ve 1000 °C'ın üstünde CaO'nun Fe oksitleri içerisinde çözünerek CF tipi bir ferrit, 1130 °C'dan sonra ise muhtemelen CF₂ tipinde bir ferrit fazı oluşturduğunu ortaya koymuştur [20].

Qian vd. (2009), siderit, limonit ve manyetit karışımı bir cevher harmanının üzerinde yaptıkları çalışmada kavrulmuş cevherden üretilen peletlerin yaklaşık 180 kgf dayanıma sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca aynı çalışma pelet pişirme süresinin de dayanıma olumlu etki yaptığı ortaya konmuştur [21].

Sevinç vd. (1988), kalsine edilmemiş siderit cevheri tozundan pelet üretilebilme olanaklarını araştırmıştır. Özgül yüzey alanının ve nem içeriğinin pelet sağlamlığı üzerine etkilerini ortaya koymuştur. Pişirme sıcaklığının, pişirme süresinin ve soğuma hızının dayanıma olan etkileri de irdelenmiştir. Çalışmada optimum nem miktarı %10, pelet pişirme sıcaklığı 1200 °C ve pişirme süresi ise 80 dakika olarak tespit edilmiştir. -0,5 mm cevher 80 dakika süreyle öğütüldükten sonra 590 cm²/g özgül yüzey alanına erişmiştir. Artan ince tane miktarı ile pelet dayanımında

iyileştiği ortaya konmaktadır. Ancak söz konusu çalışmada pelet diye tanımlanan ürünün aslında 13,5 mm çapında preslenmiş (150 kgf) briketler olduğu anlaşılmaktadır. Bu şartlar altında üretilen briketlerin 250 kgf dayanım değeri olduğu tespit edilmiştir [22].

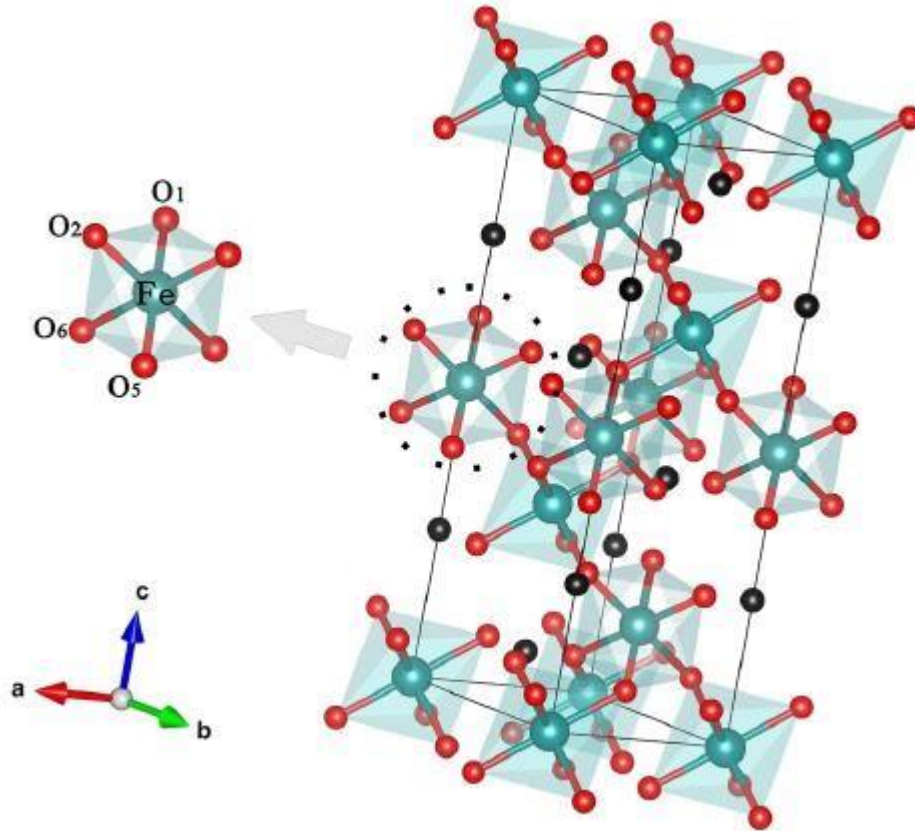


2. KURAMSAL TEMELLER VE UYGULAMALAR

2.1. Siderit

2.1.1. Siderit hakkında genel bilgiler

Siderit minerali ismini Yunancada demir anlamına gelen sideros (σίδηρος) kelimesinden almaktadır. Teknik olarak %48,02 Fe (demir) içeren siderit minerali; trigonal (hexagonal scalenohedral) sistemde kristallenirken çoğunlukla rombohedral kristalli; levhamsı, prizmatik, masif; orta-ince taneli; nadiren böbreğimsi, oolitik kristal alışkanlıklarına sahiptir [23-25]. Şekil 2.1’de sideritin rombohedral kristal yapısı ve koordinasyon ilişkileri verilmiştir.



Şekil 2.1 Sideritin rombohedral kristal yapısı ve koordinasyon ilişkisi [26]

Soluk sarımsı, sarımsı gri, soluk yeşil, gri, kül grisi, sarımsı kahverengi, grimsi kahverengi, siyahımsı kahverengi; nadiren beyaz ya da renksiz; şeffaf-yarı şeffaf

görünürlere sahip olabilen siderit minerallerinin özgül ağırlığı $3,96 \text{ g/cm}^3$ ve mohs sertliği 3,5-4,5 arasındadır [5]. Şekil 2.2’de nadiren büyük kristaller veren siderite bir örnek verilmiştir.

Masif siderit, tabakalı sedimanter yataklarda, özellikle çamurtaşı ve marnlarda, demir içerikli konkresyonlar şeklinde yaygın olarak oluşur. Hidrotermal cevher damarlarında pirit, kalkopirit, galenit gibi minerallerin yanında gang minerali olarak bulunur. Bazaltik volkanik kayalarda, bazen pegmatitlerde ve metamorfik kayalarda da rastlanır [5].



Şekil 2.2 Kristal şekilli siderit örneği [27]

2.1.2. Sideritin oluşumu

Sideritin teşekkülü hakkındaki jenetik görüşler çeşitlidir. Genellikle iki grup altında toplanabilir.

1. Sinjenetik oluşum
2. Epijenetik oluşum

Sinjenetik teoriye göre siderit oluşumu karalardan çökelme havzalarına taşınan ayrışma eriyiklerinin uygun fiziko-kimyasal ortamlarda çökmesi ile açıklanmaktadır [28].

Sinjenetik teorinin diğ er bir yorumunda ise denizlerdeki mevcut Fe Prekambriyum'dan Tersiyer'e kadar geçen zaman zarfında, denizel sirkülasyonla yer yer hareketlenmiş ve yer yer ise tekrar çökelmiştir. Ancak denizaltı volkanik eksalasyonlarla bir miktar FeCl_3 deniz suyuna geçmiş ve CO_2 'li ortamda Fe^{3+} , Fe^{4+} (+ e) 'ye dönüşerek $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ kimyasal bileşiminde eriyik oluşturmuştur. Bu gibi demirli eriyikler sığ ve alkali ortamlarda kolayca FeCO_3 olarak   kelebilirler [29]. Denizlerdeki CO_2 zonunda $\text{Fe}(\text{HCO}_2)_3$ yaygın olarak ve duraylı bir şekilde bulunabilir ve FeCO_3 (Siderit) olarak   kelebilmesi için gerekli fiziko-kimyasal şartların tezahüründen itibaren siderit oolitik karakterde bir çökelme ve yığılma yapar ve  oğ nlukla a- FeOOH bileşimindeki limonite bu teşekk lle katılır [30].

Epijenetik oluşum ise genellikle ana kayacın yerleşmesi ile cevherleşme arasında geçen bir zaman biriminin varlığını kabul etmektedir. Bu şekildeki siderit oluşumunda Fe ihtiva eden hidrotermal eriyikler aşağıdan yukarı doğru yükselerek gelirler ve ana kayacı meydana getiren minerallerdeki Ca^{2+} iyonu ile Fe^{2+} iyonu yer değiştirirler. Böyle bir olayda Hidrotermal Fe-Metazomatozundan bahsedilir [30].

2.1.3. Türkiye'deki demir yatakları ve  zellikleri

Türkiye'de bugüne kadar yaklaşık 900 adet demir cevheri oluşumu saptanmış olup 500 kadarının etüdü yapılmıştır. Günümüzde işletilebilir rezervin yaklaşık 75 milyon ton olduğu bilinmektedir [31]. Her geçen gün bulunan yeni yatakla artan rezerv miktarı aynı zamanda sorunlu cevherlerinde işletime alınmasıyla da değişiklik gösterebilmektedir ( izelde2.1).

Türkiye'de demir cevheri tüketimi yıllık 18,5 milyon ton, hurda demir ihtiyacı ise 17,5 milyon tondur. Cevher ihtiyacının 8 milyon tonu yurt içi kaynaklarından karşılanmaktadır. Özellikle yüksek fırın demir cevheri ihtiyacı sorununun çözülmesi, toplam 307 milyon ton rezerve sahip olan sorunlu demir cevherlerinin zenginleştirilmesi ile ancak mümkün olabilecektir. Ortalama %23 Fe içeren ve toplam 17 yataktan oluşan sorunlu demir cevherlerinin 160 milyon tonu %19 Fe içeriği ile

Hasançelebi ve 48 milyon tonu ise %37 Fe içeriği ile Hekimhan-Deveci yatağında bulunmaktadır [7, 32, 33].

Çizelge 2.1 Türkiye işletilebilir demir cevheri rezervi [33]

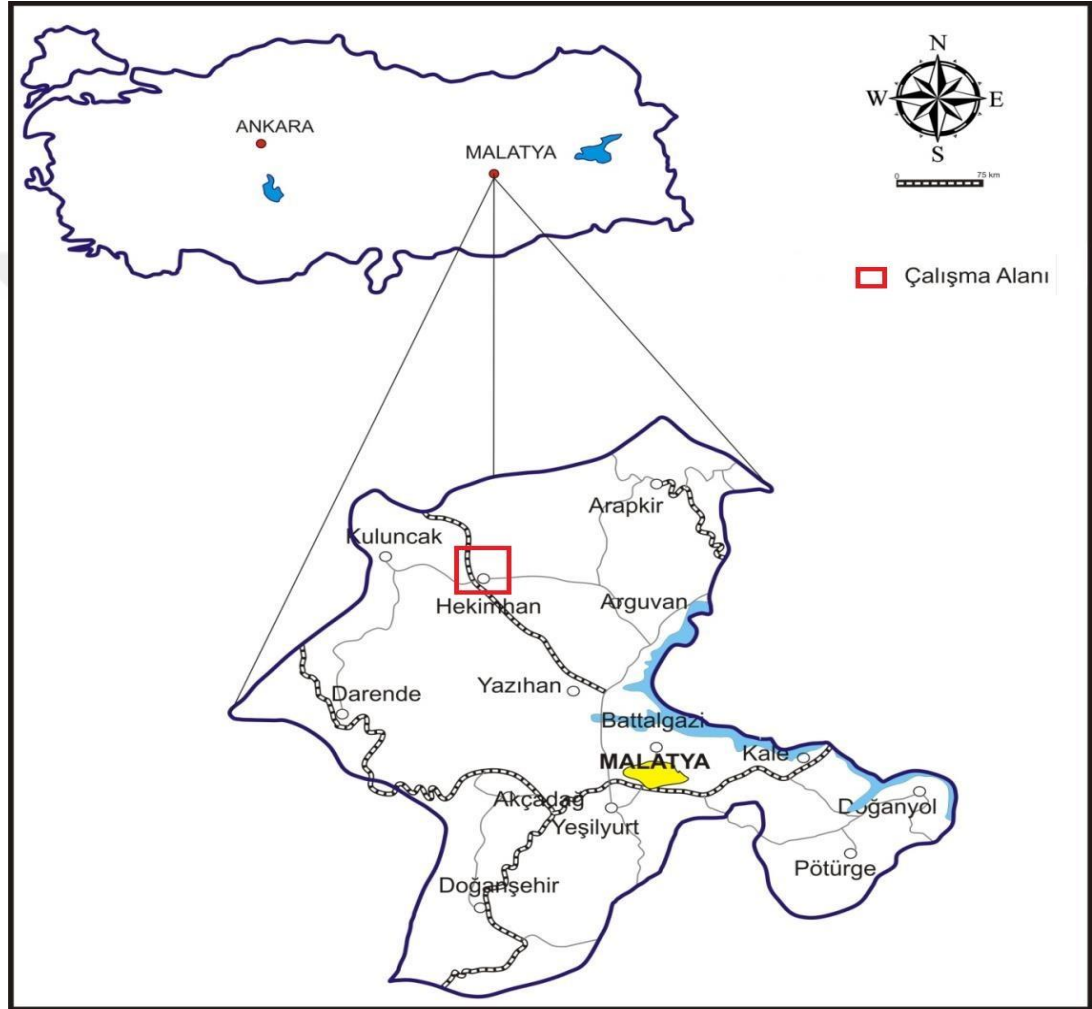
Yatak Adı	İl - İlçe	Rezerv (1000 ton)				Tenör (%)
		Görünür	Muhtemel	Toplam	İşletilebilir	
A Kafa	Sivas-Divriği	41000	-	41000	41000	54
B Kafa	Sivas-Divriği	10000	-	10000	10000	56
Dumluca	Sivas-Divriği	200	-	200	200	57
Purunsur	Sivas-Divriği	100	1800	1900	100	55
Taşlıktepe	Sivas-Divriği	60	300	360	60	62
Otlukilise	Sivas-Divriği	1420	1000	2420	1300	54
Çetinkaya	Sivas-Kangal	3500	-	3500	3000	54
Attepe	Adana-Feke	10000	-	10000	10000	57
Karamadazı	Kayseri-Yahyalı	800	1000	1800	300	51
Kesikköprü	Ankara-Bala	2000	1000	3000	2000	54
Bykeymir	Balıkesir-Havran	3690	5400	9090	340	53
şamlı	Balıkesir-şamlı	684	257	941	543	58
Tacın	Kayseri-Pınarbaşı	70	100	170	70	51
Karaatı	Kayseri-Yahyalı	9480	15000	24480	2500	54
Koruyeri	Kayseri-Yahyalı	7000	-	7000	7000	52
Yenigireği	Adana-Karaisalı	40	100	140	40	57
Elmadağ	Adana	1000	400	1400	1000	53
Ayıgediği	Kayseri-Yahyalı	590	300	890	590	54
Uyuzpınar	Adana-Feke	236	-	236	236	58
Sırzı	Malatya-Hekimhan	275	-	275	275	49
Deveci	Malatya-Hekimhan	48000	-	48000	48000	37
Ekinbaşı	Sivas-Divriği	9700	2300	12000	8000	55
TOPLAM		149845	28957	178802	137540	54

2.1.4. Hekimhan – Deveci bölgesinin tanıtımı

Malatya ve Sivas illeri arasında, Malatya'ya 70, Sivas'a 150 ve Kangal ilçesine 80 km'lik mesafedeki Hekimhan - Deveci bölgesi, denizden 1500 m yükseklikte bir plato çukuru üzerindedir. Kuzeyde, doğu - batı doğrultusunda uzanan Karasker (2079 m), Yamadağ (2693 m) ve atgalı (2722 m) dağları ile hudutlanır. Güneyde ise aynı yönde uzanan Kızılhisar Dağları ile Malatya Ovası'ndan ayrılır. şekil 2.3'de yer

bulduru haritası verilen bölge, Fırat'a birleşmek üzere güneye doğru akan çayların meydana getirdikleri derin vadilerle kuzey - güney doğrultusunda kesilmiştir [30].

Deveci beldesi, Sivas - Malatya karayolunun doğusundan kuş uçuşu 10km uzaklıktadır. Hekimhan ilçesine ise 16 km'lik bir yolla bağlıdır.



Şekil 2.3 Hekimhan – Deveci bölgesi yer bulduru haritası (MTA [34]’dan değiştirilerek alınmıştır)

2.1.5. Hekimhan – Deveci cevherinin oluşumu

Hekimhan civarındaki bölge, son zamanlardaki araştırmalar neticesinde Türkiye'nin bilinen toplam demir cevherinin neredeyse üçte biri rezervine sahip bir metalojenik provens olarak ortaya çıkmış bulunmaktadır [33].

Hekimhan - Deveci bölgesinin jeolojik yapısında çeşitli oluşumlu kayaç üniteleri bulunmaktadır. Üst Yapıdaki Submarin volkanizma faaliyeti ve onu takip eden Nasiyenitik kimyasındaki entermedyer karakterli erüpsiyonlara bağlı olarak gelen, demirce zengin hidrotermal eriyiklerin etkisi ile bu yapı elemanlarından resif kalkerlerinin Deveci bölgesinde metasomatik olarak cevherleştiği tespit edilmiştir [30].

Cevherleşme fliş içinde, bu serinin stratigrafisine uygun olarak hidrotermalsedimanter tipte oluşmuştur. Cevher masif siderittir. Yüzeyde görülen hematit, limonit, götit bileşimli demir oksitler sideritin oksidasyon zonudur [35].

Siderit Yatağı, çalışmaların bugünkü aşamasında, N70°E doğrultusunda ~1400m, güneye eğim yönünde ~300 m devamlılık gösterir. Ancak doğuda Karaköcek yüzeyleşmesine doğru yatak gelişebilir [35].

Kesit yöntemiyle ve iki ayrı şekilde, görünür, muhtemel, (görünür+muhtemel) sınıfından rezerv hesabı yapılmıştır. Yatağın toplam rezervi (görünür+muhtemel); % 37,03 Fe, % 3,70Mn ortalama tenörlü ve 88 milyon tondur [35].

2.1.6. Hekimhan – Deveci bölgesinin jeolojik yapısı

Doğu Toros orojenik kuşağı içerisinde bulunan inceleme alanı çevresinde Mesozoyik süresince karbonat platformunun geliştiği ortamlar egemen olmuştur [36]. Bu platform kuzeyde Neo Tetis'in bir kolu olan İç Toros okyanusu ile güneyde ise neo tetis'in Güney kolu ile sınırlanmıştır. Kampaniyen döneminde her iki okyanusta kuzeye doğru dalma batma başlamıştır. Yitimin herhangi evresinde her iki okyanustan da türeyen afiyolit dilimleri kuzeyden güneye doğru kıtasal birliklerin üzerinde ilerlemiştir [37].

Bölgenin jeolojik yapısını meydana getiren litolojik elemanlar iki grup altına toplanmaktadır:

Muhtemelen Turonien'e atfedilen metamorfik, çok silisli ve bol kalsit damarları ile örülmüş kireçtaşları Deveci bölgesinin en eski sedimanter birimlerini teşkil eder. Bunların üzerine kalınlıkları yer yer 10 – 150 m Arasında değişen Radyolarit - Hornfels serisi gelir. Söz konusu sedimanlar Hekimhan ve Deveci çevresinde büyük yayılım gösteren bazik ve ultrabazik kayalar beraberce alt yapıyı meydana getirirler. Üst yapı ise kampanien'e ait sedimanter kayalarla başlayan ve pliosen'e kadar devam eden çeşitli magmatik, volkanik ve tortul menşeli birimleri kapsamaktadır [30].

Kampanien ile beraber doğu - batı doğrultusundaki bölge sedimentlerin depolandığı bir alan haline gelmiştir ve üst kretase yaşlı tortullar çökmeye başlamıştır. Alt yapı ile açısal diskordans yapan bu kaba klastik istifin kalınlığı 30 – 50 m arasında değişmektedir. Daha sonra çökme havzasının sığ kısımlarında hippuritli kalker resifleri teşekkül etmiştir. Bu resif kalkerlerini 600 m kalınlığındaki fliş fasiyesinde kumtaşı ve marn birimleri takip eder. Üst seviyelerde marn ve plaketti kalkerler artar. Bu durum kısa bir regresyon aralığı ile gözenekli ve kompakt kalker birimleri halinde Eosen içine kadar devam eder [30].

Fliş sedimantasyonu esnasında Deveci madeninin hemen güneyindeki bölge yaygın bir denizaltı volkanizmasının faaliyet alanı olmuştur. Neticede Kampanien – Maestrichtien yaşlı sedimanlar ile deniz dibine gelen volkanik malzeme ardışık ve geçişli istifler teşkil etmişlerdir.

Bol fosilli yer yer gözenekli veya kompakt Eosen kalkerleri, üzerinde regresif olarak jipsli seriler ve Alacalı detritik seri tortulları diskordans duruşludurlar [38].

Orta Eosen'e kadar çok kısa bir aralıkla devam etmiş hakiki denizel sedimantasyondan alacalı detritik fasiyes birimlerine geçiş, özellikle orojenik olaylardaki paroksimal bir değişmeye işaret etmektedir [30].

Bölgedeki en genç kayaları ise son volkanizma mahsulleri andezit ve bazaltların lav ve tüfleri teşkil ederler. Hekimhan - Deveci çevresinde görülen entermedyer karakterdeki siyenitik magmaya ait intrüzif ve ekstrüzif kayalarının yerleşme zamanları çok büyük bir ihtimalle Kretase - Tersiyer arasına isabet etmektedir [30].

2.2. Kalsinasyon

2.2.1. Kalsinasyonun tanımı ve amacı

Kalsinasyon, oksit bileşenleri elde etmek amacıyla sıcaklığın etkisiyle karbonat ve hidratların parçalanmasıdır. Kalsinasyon sadece suyun değil, karbon dioksitin ya da hidratlar, karbonatlar gibi kimyasal bağlı diğer gazların uzaklaştırılmasını da kapsar.

Tüm kalsinasyon reaksiyonları endotermik karakter gösterir. Termodinamik açıdan sabit sıcaklıkta bir karbonatın parçalanması CO_2 kısmi basıncının bir fonksiyonudur. Aşağıdaki denklemde (2.1) metal karbonat bileşikleri için kalsinasyon tepkimesi verilmiştir.



Reaksiyonunun denge sabiti, katı madde aktiviteleri bire eşit olduğundan CO_2 kısmi basıncına eşittir. Dolayısıyla bir karbonat bileşiğinin tam parçalanma sıcaklığı $P^0_{\text{CO}_2}$ basıncının bir atmosfere eşit olduğu sıcaklıktır.

Siderit cevheri için kalsinasyon işlemi FeCO_3 'ün yapısında bağlı bulunan CO_2 'nin uzaklaştırılmasını amaçlamaktadır. Aşağıdaki kısa kimyasal denklemde (2.2-2.3) sideritin atmosfer koşullarında kalsinasyonu sonucunda hematite dönüşümü verilmiştir [39-41].

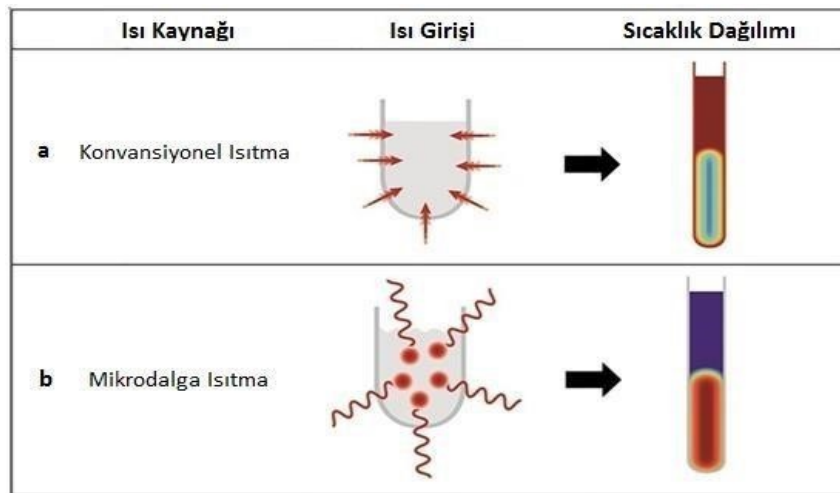


2.2.2. Konvansiyonel ve mikrodalga ısıtma yöntemleri

Geçmişten günümüze kadar, birtakım hammaddelerin ya da malzemelerin ısıtılması ve/veya kavrulması işlemlerinde konvansiyonel ısıtma prensiplerinden yararlanılmıştır. Konvansiyonel ısıtmanın temelde üç mekanizması vardır. Bunlar konveksiyon, kondüksiyon ve yayılımdır. Konvansiyonel ısıtmadaki bu üç ısı transfer mekanizması da malzemeyi dışarıdan içeriye doğru ısıtır. Bu yöntemde, malzemenin içerisine kondüksiyon ile ısı iletimi esnasında büyük zaman ve enerji kayıplarının ortaya çıkmasına sebep olur.

Mikrodalga enerjisi, 300 MHz ile 300 GHz aralığında frekansa sahip iyonize olmamış elektromanyetik ışınım (radyasyon) olup, iletişim alanında yoğun bir uygulamaya sahip olmakla birlikte; endüstriyel, bilimsel, tıbbi (ISM) uygulamalar için ancak belirli frekanslara müsaade edilmektedir [42].

Mikrodalga ile ısıtma, numunenin derinliklerine nüfuz edebilen elektromanyetik enerji formunda olduğu için klasik ısıtmadan farklıdır [27]. Klasik ısıtma sistemleri taşınım (konveksiyon), iletim (kondüksiyon) ve yayılma gibi standart ısı transfer mekanizmasından geçerek numuneyi dışarıdan ısıtırken, mikrodalga ile ısıtma seçimli ve matriksteki bazı fazların diğerlerinden çok daha hızlı ısınabilmesi avantajına da sahiptir [43]. Şekil 2.4’de mikrodalga ve konvansiyonel ısıtma prensipleri arasındaki farklar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Mikrodalga ve konvansiyonel ısıtma prensipleri arasındaki farkın şematik gösterimi [44]

Mikrodalga ısıtma sistemlerinde elektromanyetik enerji doğrudan madde içerisinde ısıya dönüştüğü için mikrodalga ısıtma sistemlerinde ısı, konvansiyonel ısıtma istemlerinin tam tersine maddenin içinden dışına doğru taşınmaktadır. Mikrodalgalar ışık hızında yayılmakta ve kaynağı açılır açılmaz, ısıtılacak kütleye nüfuz ederek derhal enerji dönüşümünü başlatmaktadır. Kaynak kapatıldığında ise ısıtma prosesi derhal durarak uzun ısıtma ve soğutma fazlarına gereksinim duyulmamaktadır [45].

2.2.3. Kalsinasyonun uygulamaları

Siderit cevherinin kalsinasyonu çoğunlukla döner fırınlarda yapılmaktadır. Döner fırına siderit olarak giren cevher; fırını hematit, magnetit, maghemit karışımına dönüşmüş olarak terk eder. Bu karışımdaki minerallerin dağılımı fırının çalışma sıcaklığına ve malzemenin fırında kalma süresine bağlıdır. Düşük sıcaklıklarda öncelikle hematit daha sonra ise magnetit dönüşümü gerçekleşir. Ancak karışım her halükarda ağırlıklı olarak hematitden meydana gelmektedir. Şekil 2.5’de döner fırınlı kalsinasyon tesislerinin bir örneği verilmiştir.



Şekil 2.5 Hekimhan – Deveci siderit cevherinin kalsine edildiği tesis [46]

2.3. Peletleme Prosesi

2.3.1. Peletlemenin tanımı ve amacı

Toz cevherlere çeşitli bağlayıcı maddeler ilave edilerek fiziksel ve ısıtma işlem sonrası belli bir dayanıma sahip, çapı genellikle -20+8 mm arasında değişen Şekil 2.6'daki gibi yuvarlak sert topaklar haline getirilmesi işlemidir [39].



Şekil 2.6 Demir cevheri peletleri [47]

Pelet; yüksek fırında, sünger demir üretiminde, ark ocaklarında ve sünger demir-çelik üretiminde kullanılmaktadır. Bunların dışında krom cevherleri, kurşun cevherleri gibi bazı demir dışı metal cevherlere de uygulanmaktadır [48].

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte demir cevheri aglomerasyonunun üretim olarak büyük bir bölümünü peletleme oluşturmaktadır. 1960'lı yıllardan bu yana peletleme teknolojisi büyük bir hızla gelişmekte ve demir cevheri işleyen tesisler için uygun kalitede şarj malzemesi sağlamaktadır [49].

Demir çelik sektörünün vazgeçilmez ürünleri olan peletler; yüksek demir içeriği, mükemmel dayanım ve iyi metalürjik özellikleri sayesinde gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Günümüzde dikey fırın, hareketli ızgara ve ızgara-döner fırın olmak üzere üç prosesin ara ürünü olan peletler düşük maliyetleri, esnek hammadde

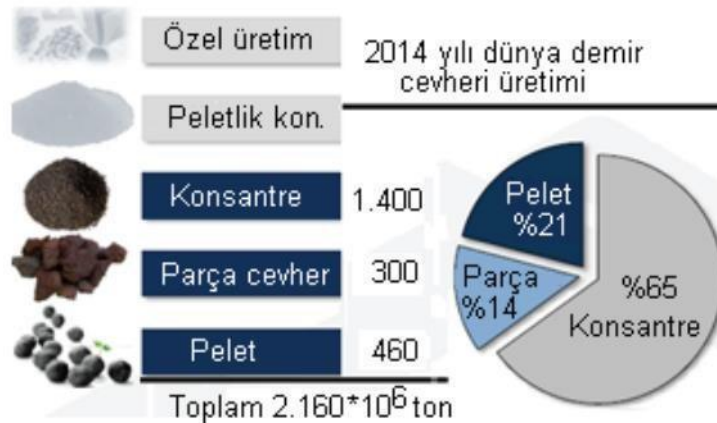
tedariği ve büyük üretim kapasiteleri sayesinde ön plana çıkmış ve birçok ülkede kullanımı genişlemiştir [50, 51].

Demir peletleme işleminin amacı, aglomerasyon ve sertleştirme yoluyla, demir yönünden zengin ince taneli mineralleri pelet olarak tanımlanan yüksek fırın şarj malzemesi haline getirmektir [49]. Küresel şekli, yakın tane boyutu, istenen gözenekliliği ve yüksek mukavemeti sayesinde peletler mükemmel bir yüksek fırın şarj malzemesidir [54]. Peletlerin yüksek fırında kullanılabilmesi için aşağıdaki özellikleri taşımaları gerekir;

1. Düzenli boyut dağılımı
2. Yüksek mekanik mukavemet
3. Yüksek porozite

Peletleme işlemi çoğunlukla zenginleştirilmiş düşük tenörlü demir cevherlerinden yüksek fırın şarj malzemesi elde etmek amacıyla kullanılsa da bazen de çeşitli prosesler neticesinde ufalanmış olan demirce zengin malzemelerin de kullanıma uygun hale getirilmesi amacıyla uygulanabilir. Peletleme işlemi, ham pelet ve ürün pelet üretimi olmak üzere iki sıra işlemden meydana gelir.

Ham pelet, demir cevherinin çeşitli bağlayıcılar ile birlikte karıştırılması ve topaklanması ile elde edilirken ürün pelet ise bunun pişirilmesi yoluyla sertleştirilmesi sonucunda elde edilir. Günümüzde pelet üretimine büyük önem verilmektedir. Dünyada üretilen ham çeliğin %16'sı peletten imal edilmiş olup demir cevherlerinin %21'i pelet yapmak amacı ile kullanılmıştır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Demir cevheri üretimi [52]

Çizelge 2.2’de verildiği gibi 2011 yılında dünyada toplam 480 milyon ton pelet üretilmiştir. Peletlerden imal edilen ham çeliğin toplam çelik üretimi içerisindeki payı ise %16’dır.

Çizelge 2.2 Dünyadaki ve bölgelerdeki pelet üretimi [53]

ÜLKELERİN 2011 YILI DEMİR CEVHERİ PELETLEME KAPASİTELERİ	
	Nominal Kapasite (milyon metrik ton)
Kuzey Amerika	
Kanada	27,5
Meksika	15,0
ABD	57,4
TOPLAM	99,9
Güney Amerika	
Brezilya	56,0
Şili	5,3
Peru	3,5
Venezuela	11,8
TOPLAM	76,6
Avrupa ve Orta Avrasya	
Kazakistan	8,4
Hollanda	4,4
Rusya	31,4
Slovakya	0,4
İsveç	26,0
Türkiye	1,5
Ukrayna	33,5
TOPLAM	105,6
Asya	
Bahreyn	11,0
Çin	135,0
Hindistan	24,0
İran	12,3
Umman	9,0
Japonya	3,0
TOPLAM	194,3
Okyanusya, Avustralya	4,3
GENEL TOPLAM	480,7

2.3.2. Peletleme hammaddeleri

Peletleme işleminde kullanılan hammaddeler kullanım amaçları ve kimyasal bileşimine göre iki ana gruba ayrılırlar. İlk grup, aynı zamanda peletlerin matriksini oluşturan cevherlerdir. İkincisi ise cevheri bir arada tutan ve belirli bir mekanik mukavemet kazandıran bağlayıcılardır. Bağlayıcılarla birlikte metalürjik özellikleri iyileştirmek amacıyla pelet kekine az miktarda bir takım katkı maddeleri de eklenebilir.

Peletlenecek demir cevheri, fiziksel ve kimyasal olarak birkaç özellik birden taşınmalıdır. Ham peletin elde edilmesinde en önemli etkenlerden biri kullanılacak hammaddenin özgül yüzey alanıdır. Özgül yüzey alanının artması hem ham peletin hem de ürün peletin dayanımının daha yüksek olmasını sağlar [23]. Ham pelet eldesinde peletlenecek cevherin %9-9,5 nem içermesi istenir. Düşük ya da yüksek oranlardaki nem, peletlenmeyi olumsuz yönde etkiler [55]. Ancak optimum nem dengesi yine hammaddenin özgül yüzey alanına bağlıdır.

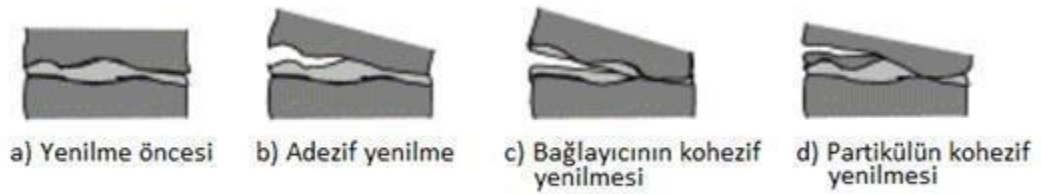
Ham peletlerin hazırlanması, tüm prosesin en önemli ve ilk basamağıdır. Ham peletler ıslak oldukları sürece kılcal kuvvetler [56] ve yüzey gerilimi [57] ile bir arada tutulabilirler. Ancak kuruduklarında bu kuvvetler ortadan kalkar ve peleti bir arada tutmak için bağlayıcı madde kullanımı gerekir. Ayrıca, bağlayıcılar suyun viskozitesini artırarak topakların oluşumu ve büyüme hızının kontrolünde etkili olan nem düzeyinin belirli bir seviyede tutulmasını da sağlar [58]. Eklenecek olan bağlayıcı suyun akışkanlığını azaltıcı nitelikte olmasının yanında nihai üründe ise empüriteye yol açmamalıdır. Ekonomik ve lojistik açıdan ise kolay bulunması ve ucuz olması aranan diğer niteliklerdir.

Bağlayıcıları kimyasal kompozisyonu bakımından organik ve inorganik olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Organik bağlayıcılar çoğunlukla selüloz esaslı olanlar ve organik polimerlerden teşekküldür. Bunlar alümina ve silika içermemeleri sebebiyle peletleme prosesindeki ısısal işlemler esnasında yanarak uzaklaşırlar [59, 60]. İnorganik bağlayıcılar ise killer ve inorganik polimerlerdir.

Bağlama mekanizmaları bakımından bağlayıcılar beş grupta toplanır.

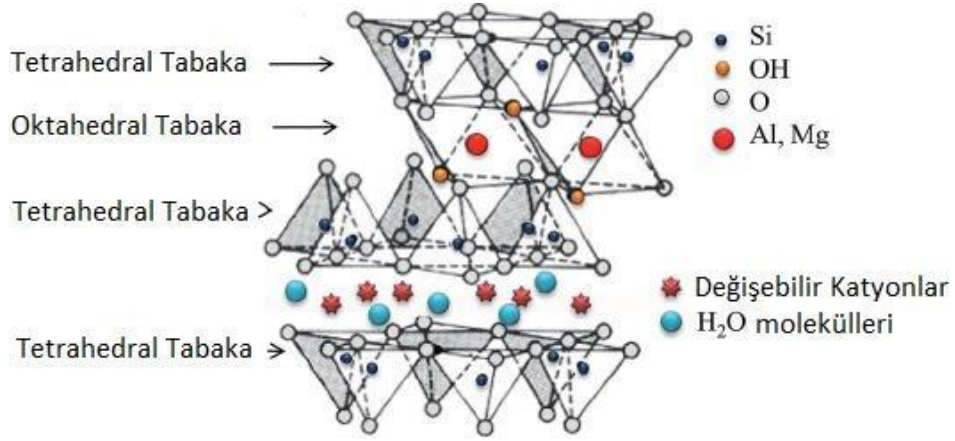
- İnaktif film bağlayıcılar
- Kimyasal film bağlayıcılar
- İnaktif matriks bağlayıcılar
- Kimyasal matriks bağlayıcılar
- Kimyasal reaksiyon bağlayıcılar

Ancak demir peletlemede, gerek ucuz fiyatı gerekse de temin kolaylığı nedeniyle inaktif film bağlayıcılar grubunda yer alan bentonit yaygın olarak kullanılır. Bentonit kılcal, adezyonel ve kohezyonel kuvvetler yardımıyla partiküller üzerinde yapışan bir tabaka oluşturur [56]. Kılcal kuvvetler peletin kuruması ile ortadan kalkar ve sadece adezyon ile kohezyon kuvvetleri etkili olur. Bu kuvvetler ise Van der Waals, elektrostatik, manyetik ve viskoz kuvvetlerin yanı sıra partikül ile bağlayıcı arasındaki hidrojen ve kimyasal bağların bileşkesinden meydana gelir [60]. Şekil 2.8’de peleti meydana getiren partikül-bağlayıcı sistemin yenilme tipleri verilmiştir.



Şekil 2.8 Partikül ve bağlayıcı sistemin yenilme türleri [61]

Bentonit, simektit grubunda yer alan ve üç tabakalı killerden olan çoğunlukla Şekil 2.9’da kristal yapısı verilmiş olan montmorillonit mineralinden $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ meydana gelmektedir. Bentonitler içerisinde şişebilme kapasitesi en yüksek olan Na-bentonitin özgül yüzey alanı $800 \text{ m}^2/\text{g}$ dolaylarındadır. [62, 63].



Şekil 2.9 Montmorillonit mineralinin kristal yapısı [64]

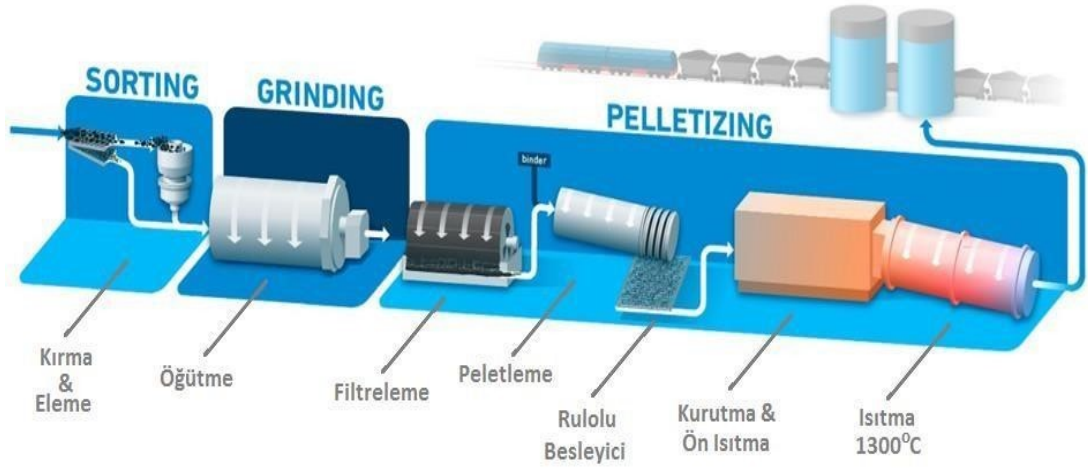
Yüksek fırınlarda peletlerin daha efektif kullanımının sağlanması için bağlayıcının beraberinde olivin, kireç, kireçtaşı, dolomit ve portland çimentosu gibi katkı maddeleri de eklenebilir. Eklenen katkı maddesinin türüne göre peletler asidik ya da bazik olarak tanımlanır. Asidik peletlerde CaO/SiO₂ oranı 0,5'in altındayken, kireçtaşı veya dolomit eklenmiş olan bazik peletlerde bu oran 0,9-1,3 aralığındadır [65].

2.3.3. Peletleme işlemi

Peletleme işlemi aşağıda sıralandığı gibi dört temel aşamada gerçekleşmektedir. Öncelikle çeşitli katkı maddeleri eklenmiş olan cevher homojen bir yapı kazanması için karıştırılır. Bağlayıcıların dağılımı pelet dayanımı açısından büyük önem taşımaktadır. Ardından toplama makinelerine sevk edilen cevher burada pelet haline getirilir. Bu ürüne ham pelet denir. İhtiyaca göre proses burada kesilebilir ya da ürün pelet elde etmek için ısısal işlemler görmek üzere sonraki cihaza aktarılır. Bu işlemin ardından soğutulan pelet artık ürün pelet adını alır [49]. Şekil 2.10'da bir peletleme tesisinin şematik görünümü verilmiş ve peletleme işleminin iki temel aşaması aşağıda sıralanmıştır.

1. Aglomerasyon

2. Isıl işlem



Şekil 2.10 Yaş öğütmeli bir peletleme tesisinin şematik gösterimi (Anonim [66]’den değiştirilerek alınmıştır)

2.3.3.1. Aglomerasyon aşaması

Peletleme prosesinin ilk aşaması aglomerasyon yoluyla ham peletlerin üretimidir. Öğütülmüş cevher ile bağlayıcı maddelerin karıştırılması ise aglomerasyonun ilk aşamasını meydana getirmektedir.

Peletlemede, bant konveyörlü ve kanatlı olmak üzere iki tip karıştırıcı kullanılmaktadır. Bant konveyörlü karıştırıcılarda lastik bant üzerinde aynı yönde dönen iki adet kanatlı tambur mevcuttur. Bant üzerindeki malzeme birinci tambur tarafından diğer tambura fırlatılır, ikinci tambur bu malzemeyi tekrar bant üzerine yönlendirirken karıştırma işlemini gerçekleştirir. Kanatlı karıştırıcılarda silindirik bir gövde içinde eksen boyunca uzanan mil ve mil üzerinde kanatlar vardır. Kanatlar milin dönmesiyle malzemeyi bir taraftan karıştırırken diğer taraftan çıkış ağzı yönünde hareket ettirir [49].

Karıştırılarak homojen hale getirilen pelet kekinden ham pelet olarak adlandırılan ve çapı -20+8mm arası değişen boyutlardaki küresel aglomeratın üretilmesi işlemine toplama denir (Şekil 2.11) [39].



Şekil 2.11 Ham pelet

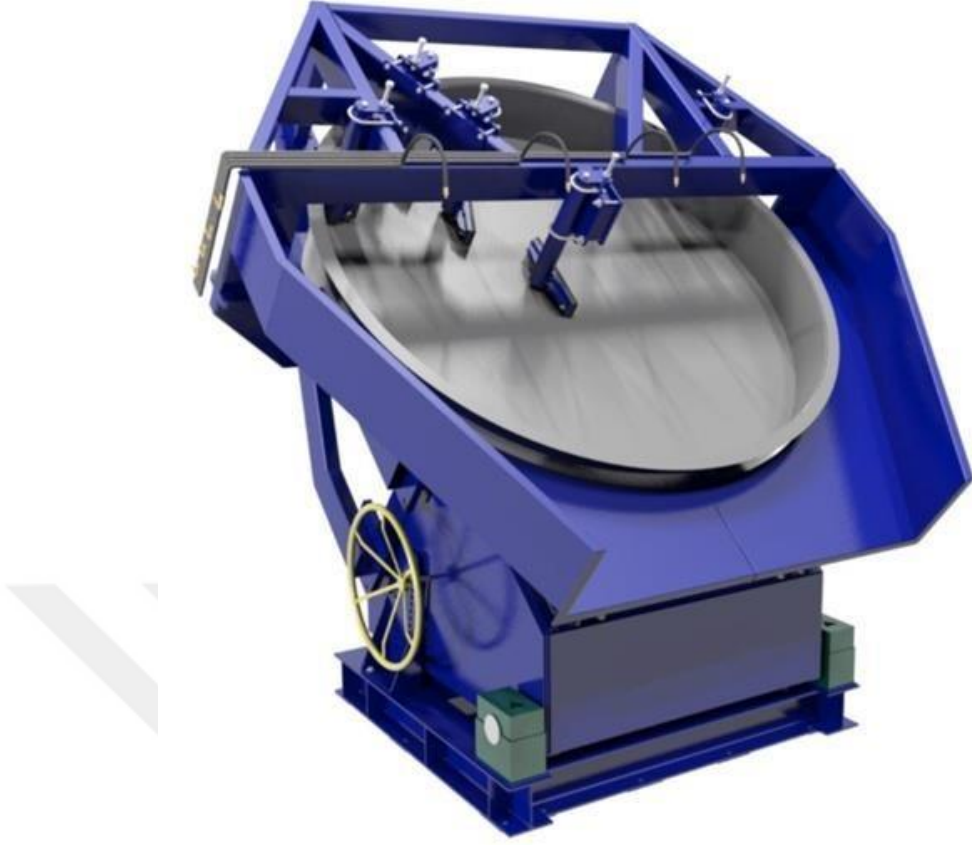
Ham peletin elde edilmesi; toplama tamburları, diskleri ve konileri ile gerçekleştirilir. Toplama tamburları demir cevheri konsantresinde, su ve bağlayıcı karışımından ham pelet üretmek için kullanılan silindirik makinelerdir. Şekil 2.12’de gösterildiği gibi tambur, ham pelet eleği ile sadece uygun ölçüde topakların üretilmesini sağlamak amacı ile çoğunlukla kapalı devre olarak çalışır. Karıştırma işleminden sonra malzeme, kendi eksenini etrafında dönen eğimli bir silindir olan tambura beslenir. Nem içeriğinin uygun olması koşuluyla malzeme alt üst olduğundan, cevher taneleri birbirlerine yapışırlar ve sürekli bir büyüme içerisinde çekirdek peletleri oluştururlar [49]. Tambura yeni beslenen cevher ise bu çekirdek peletin etrafına yapışarak çaplarının büyümesini sağlar.

Mineral partiküllerinin büyümesi tamburun giriş bölümünde oluşmaktadır. Bu bölümden sonra büyümeye uygun olan pelet keki ya da küçük aglomerat kalmaz. Tamburun dönme hareketi, topakları küresel hale getirir ve onları mekanik olarak sıkıştırır. Tambur boyunca uzanan bir bıçak yüzeyde oluşan birikmeyi engellemek için kullanılır [49].



Şekil 2.12 Peletleme tamburu [67]

Topaklama diskleri, Şekil 2.13’de gösterildiği gibi çoğunlukla $45-55^{\circ}$ arasında eğime sahip olup tamburlarından daha geniş çaptadır. Hızları yaklaşık 5-7 devir/dakika’dır. Pelet keki diske beslendiğinde, disk tarafından yukarı taşınır ve belirli bir noktadan geri düşer. Savrulma hareketi partiküllerin bir araya gelerek küçük topaklar oluşturmasını sağlar. Nem, bu küçük topakların dışında birikir ve bu da diğer partiküllerin kendilerine yapışmasını ve topakların büyümesini sağlar. Bu topakların disk tabanına yapışmaları, salınlımlı sıyrıcılar ile önlenir. Bu sıyrıcıların diğer bir görevi de disk yüzeyini pürüzsüz tutarak topakların düzgün bir şekilde yuvarlanmasını sağlamaktır [49].



Şekil 2.13 Peletleme diski [68]

Topaklama konileri, çağımızda yerini topaklama disk ve tamburlarına bırakmış, döner bir mifle desteklenen, tepesi düz, kesik konilerden oluşmaktadır. Üretim kapasitesi düşük olduğundan günümüzde kullanılmamaktadır.

Topaklanmış olan ham peletin sonraki aşama olan ısıt işlemlerine nakledilmesi gerekmektedir. Şekil 2.14’de tek katlı 60’a yakın rulodan oluşmuş eleklerle ısıt işlemler ızgarasına beslenmektedir. Ruloların çapı genellikle 100 mm’den daha küçük, aralarındaki açıklık ise üretilecek peletin alt boyutuna eşittir [55]. Bu nedenle rulolu besleyici aynı zamanda ızgara öncesi eleme işlevini de yerine getirmektedir. Çok küçük ya da kırılmış ham peletler rulolu eleklerin arasından alta geçerek topaklama devrelerine geri gönderilmektedir.



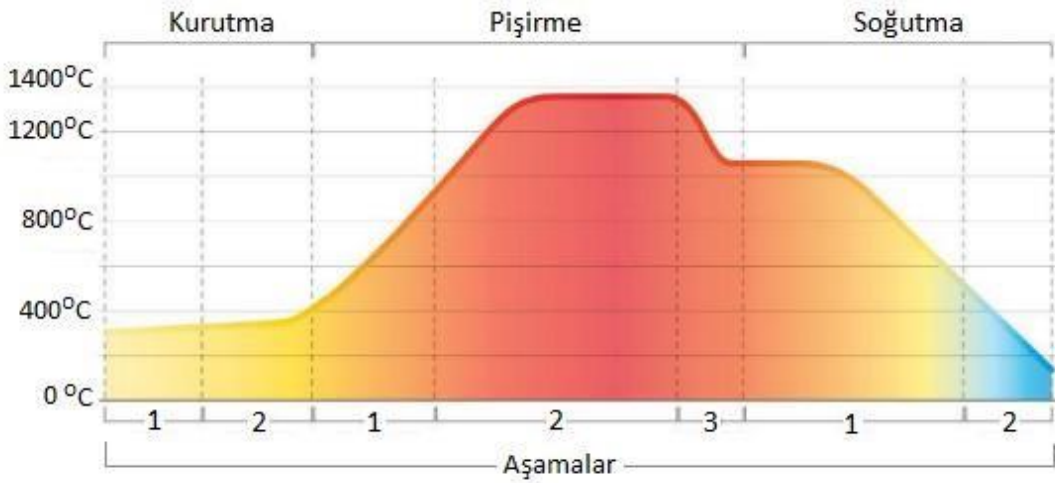
Şekil 2.14 Izgara öncesi rulolu besleyici [69]

2.3.3.2. Isıl işlem aşaması

Peletleme, sinterlemedeki katı–sıvı–katı faz dönüşümü yerine daha düşük sıcaklıkta katı–katı fazda kimyasal dönüşüm ile yapısal sertleştirme işlemidir. Demir cevheri konsantresinin peletlenmesinde yapısal bağ, demir oksitlerin taneseli olarak birbirlerine bağlanması ile oluşmaktadır [55].

Ham peletlerin ısıtılmasında sıcaklık kademeli olarak yükseltilmelidir. Isıl işlem sırasında ham peletin bünyesindeki nem sıcak gazlar yardımıyla buharlaşır. Pelet içerisindeki su çeşitli kombinasyonlarda bulunabileceği için sıcaklık kontrolü son derece önemlidir [58]. Bünyedeki suyun sadece gözenek ve kılcal boşluklarda bulunanları 100 °C sıcaklıkla uzaklaşırken, tuzlar ve hidrat kombinasyonları içerisindeki su, ancak 350 °C dolaylarında buharlaşır. Bu sıcaklığın üzerinde pelet içerisinde su kalmaz ve tamamen kurumuş olur. Sıcaklığın artışıyla birlikte karbonat ve sülfat grubunda parçalanmalar meydana gelmektedir.

Hematit (kalsine siderit) cevherinin peletlenmesinde herhangi bir oksidasyon ile kristal değişimi söz konusu değildir. Pelet, gerekli mukavemetini kristal büyümesi ve tekrar kristalleşme ile kazanmaktadır. 1200 °C'a kadar hematit kendi orijinal kristal yapısını korumaktadır. 1300 °C sıcaklığında ilk yeni kristal bağları oluşmaya başlamakta, 1350 °C'a kadarda tekrar kristalleşme ve kristal büyümeleri gerçekleşmektedir. Dönüşüm ve kristal büyümesi pelete gerekli dayanımı kazandırmaktadır [49]. Şekil 2.15'de hematit cevheri peletlerinin pişirildiği bir fırının işlem aşamaları ve uygulanan sıcaklıkları gösteren bir grafik verilmiştir.



Şekil 2.15 Hematit cevheri peletlerinin pişirildiği sıcaklıkları gösteren grafik (Anonim [70]'den değiştirilerek alınmıştır)

Kullanılan makinelerin tiplerine ve uygulanan ısı işleme göre peletleme sistemleri; dikey fırın, hareketli ızgara, ızgara-döner fırın peletleme sistemleri olarak sınıflandırılmaktadır.

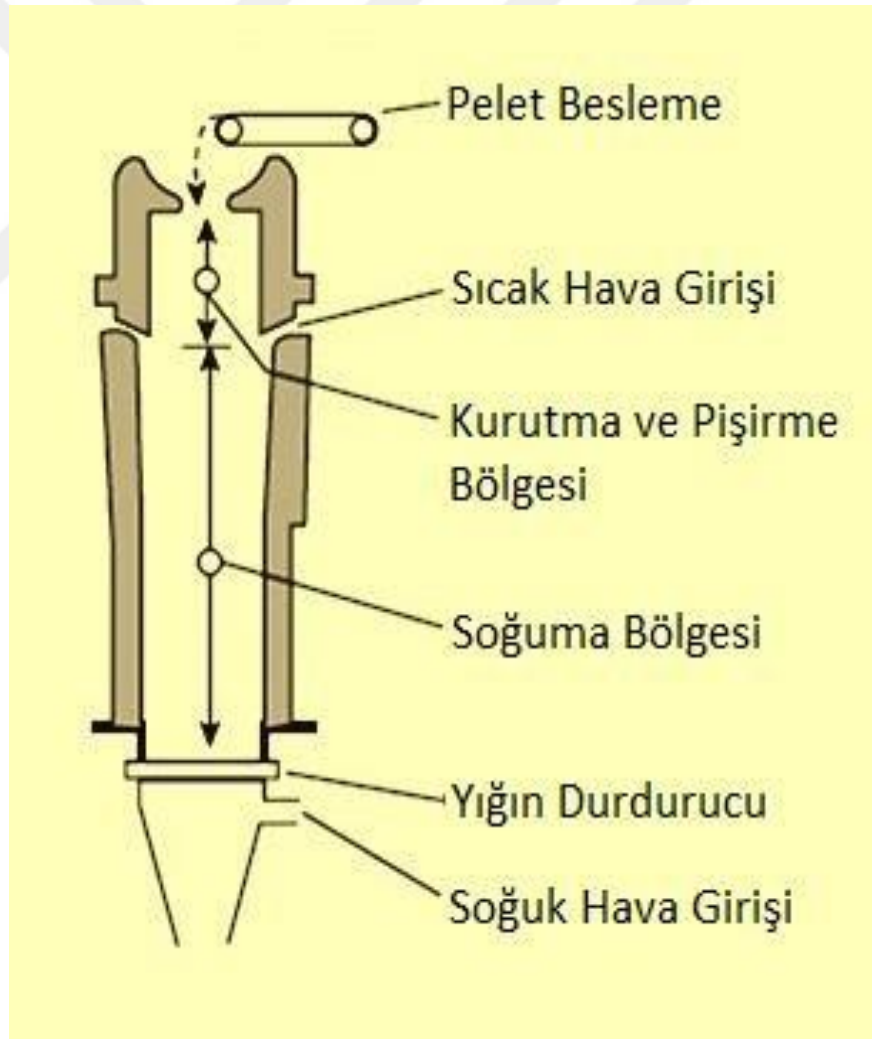
Dikey fırın (Shaft) peletleme yöntemi:

Dikey fırın peletleme sistemi 1930'li yıllarda geliştirilmiştir [55]. Eski teknolojileri ve günlük 1000-2000 ton gibi düşük kapasiteleri sebebiyle günümüzde peletleme işleminde yaygın olarak kullanılmamaktadır [70]. Şekil 2.16'da pelet pişirmede kullanılan Erie tipi bir dikey fırının şematik gösterimi verilmiştir. Bu fırınlarda ham peletler fırının üstünden aşağıya doğru beslenir. Fırının orta

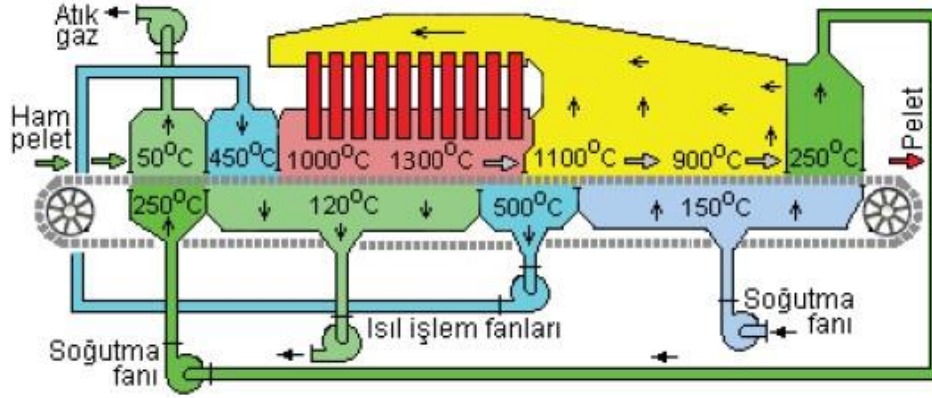
bölmesinden verilen sıcak hava peletleri önce kurutur daha sonra da sertleştirir. Yanma bölgesini geçen peletler aşağıya doğru indikçe soğurlar. Sertleştirme sonucu oluşan ürün peletler fırının en alt kısmında boşaltılır. Ayrıca fırında yapılan bazı değişiklikler ile peletten direkt indirgeme yöntemiyle de demir üretimi yapılabilir.

Hareketli ızgara (traveling / straight grate) peletleme yöntemi:

Fiziksel yapı olarak sinterleme makinesine benzemektedir. Şekil 2.17’de hareketli ızgara pelet fırını verilmiştir. Bu fırınlarda yatay ızgara üzerine beslenen ham pelet önce artan daha sonra da giderek azalan şekilde ısı işleme tabii tutulur. Sıcaklık düzeyine göre; kurutma, ön ısıtma, pişirme ve soğutma olmak üzere dört kısımdan oluşmaktadır [49].

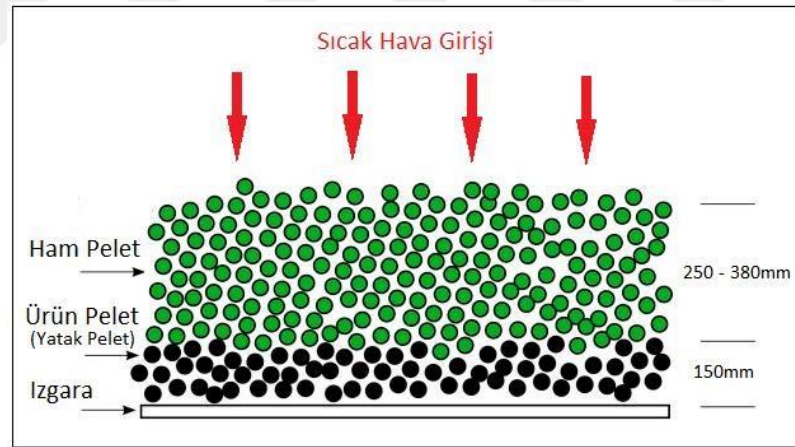


Şekil 2.16 Erie tipi dikey pelet fırınının şematik gösterimi (Anonim [70]’den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.17 Hareketli ızgaralı pelet fırını (Yıldız [55]'dan değiştirilerek alınmıştır)

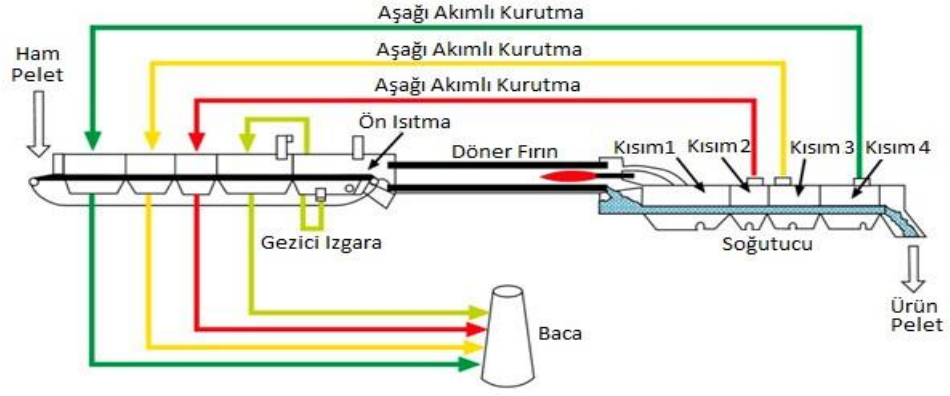
Sistem sürekli dönen döküm paletlerinden meydana gelmiş bir ızgaradır. Izgara paletlerini sıcağından korumak için Şekil 2.18'deki gibi ızgara üzerine ısıtım işleminden geçmiş soğutulmuş peletten oluşan bir yatak serilmekte, ham pelet bu yatağıın üzerine beslenmektedir.



Şekil 2.18 Alttan emişli ızgara kesiti

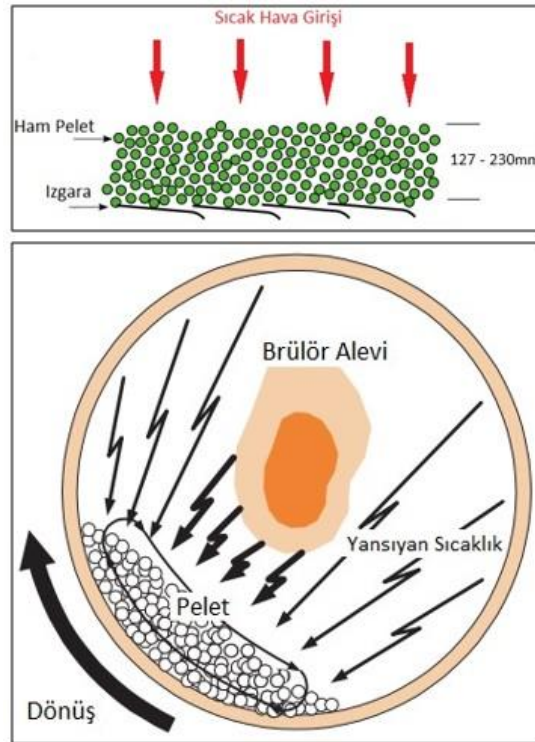
Izgara-döner fırın (grate-kiln) peletleme sistemi

Izgara – döner fırın peletleme sistemi iki ana kısımdan oluşur. İlki peletlerin kurutulduğu ve ön ısıtmanın yapıldığı ızgara bölümü, ikincisi ise peletlerin pişirildiği döner fırın bölümüdür. Günümüzdeki tesislerde kurutmada sıcaklık geçişi 3 ya da 4 kademedeki gerçekleştirilmektedir ve tesiste açığa çıkan ısıının tamamı peletleme sürecinde kullanılmaktadır (Şekil 2.19).



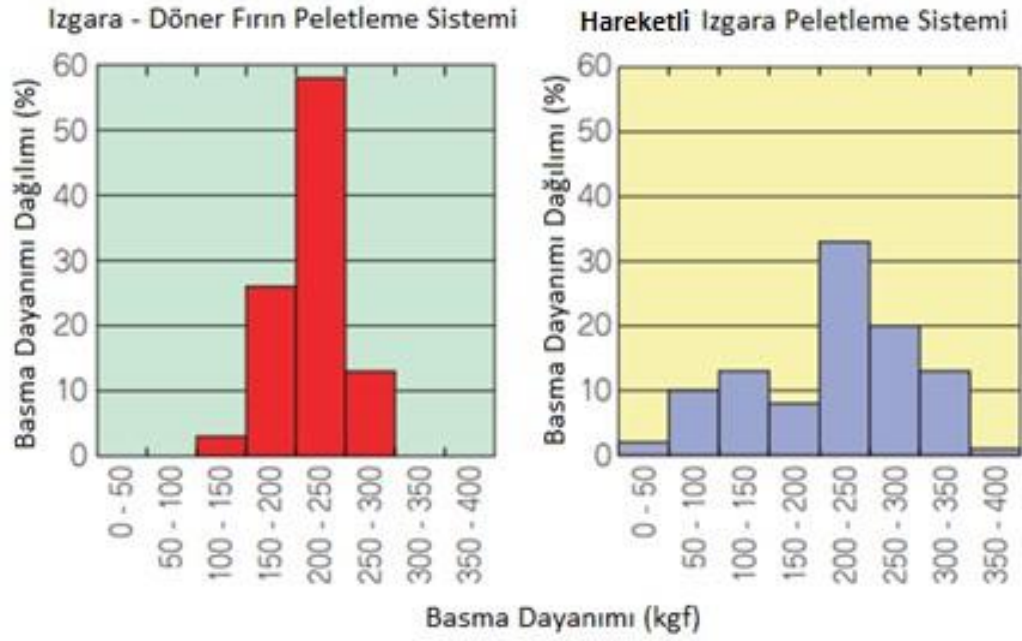
Şekil 2.19 Dört bölmeli ızgara-döner fırın peletleme tesisi

Hareketli ızgara peletleme yönteminde ham pelet yatağı ızgaraya beslendikten sonra soğutuluncaya kadar hareketsiz kalmaktadır. Bu nedenle ızgara kesitinde, kenar ile orta bölgeler ve yatağın üstü ile altı arasında az da olsa ısıl işlem farklılığı gözlenmektedir [55]. Izgara – döner fırın peletleme yönteminde ise döner fırına giren peletler burada fırının dönüş hareketi sebebiyle sürekli olarak karıştırma halinde ilerlemeye mecbur kalmaktadır. Bu da peletler arasında hareketli ızgara sisteminde olduğu gibi sıcaklık farklılıklarının oluşmasına engel olmakta ve daha homojen bir pişme sağlanmaktadır. Şekil 2.20’de ızgara-döner fırın sistemi içerisindeki peletlerin kesiti verilmiştir.



Şekil 2.10 Izgara-döner fırın sistemi kısımlarının kesiti

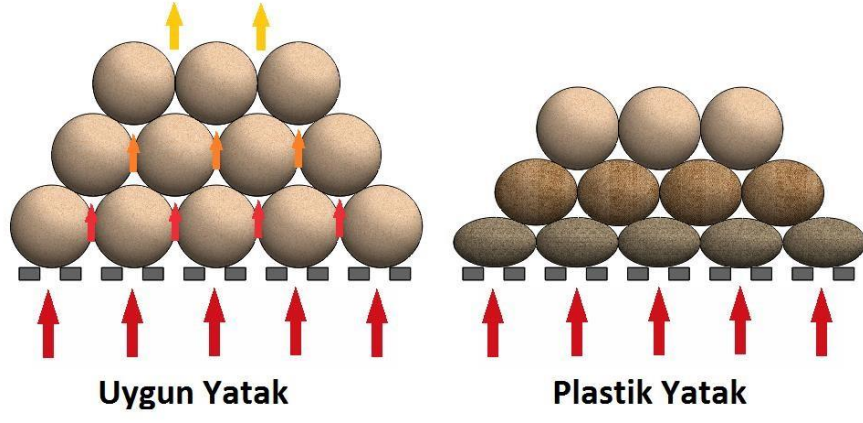
Peletlerin homojen pişmesi aynı zamanda dayanım gücü dağılımının da homojen olmasını sağlamaktadır. Şekil 2.21’de hareketli ızgara ile ızgara-döner fırın kombinasyonlarından üretilmiş olan peletlerin basma dayanımı dağılımları verilmiştir. Bu grafiklerde ızgara-döner fırın sisteminin ürünü olan peletler en az 100 kgf kuvvete dayanıma sahipken ızgara sisteminde ise yeterince ısıtılamayan peletlerden dolayı 100 kgf altı dayanıma sahip peletlerin oranı yaklaşık %12’dir.



Şekil 2.21 Hareketli ızgara ve ızgara-döner fırın sistemleriyle üretilen peletlerin basma dayanımı değerlerinin dağılımı

2.3.3.3. Soğutma aşaması

Izgaralı peletleme sistemlerinde pelet, ızgaranın son bölümünde soğutulmaktadır. Izgara-döner fırın peletleme yönteminde ayrı bir soğutucu kullanılmaktadır. Isıl işlem sonucu oluşan peletin sıcaklığı 1250 – 1300 °C civarındadır. Soğutma işlemi için atmosfer havası Şekil 2.22’deki gibi sıcak pelet yatağının altından fanlarla verilmektedir. Soğutucuda peletlerin sıcaklığı 80 – 110 °C’a düşürülürken pelet yatağından geçerken ısınan yaklaşık 1050 – 1125 °C sıcaklıktaki hava, kurutma ve ön ısıtma bölümlerinde kullanılmaktadır. Bu havanın geri kazanılarak ısıl işlemde kullanılması pelet üretiminde enerji maliyetini %39 oranında düşürmektedir [55, 71].



Şekil 2.22 Ham peletin ızgara üzerindeki kesiti

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Deneylerde kullanılan ürünler

Bu çalışma kapsamında kalsinasyon ve peletleme deneyleri için Malatya İli Hekimhan İlçesi Deveci Mevkii'nden temin edilen siderit cevheri kullanılmış olup sahadan alınan ham siderit cevheri ve kalsine edildikten sonraki hali Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Ham siderite (solda) ve kalsine siderite (sağda) numuneleri

Sideritin peletlenmesi aşamalarında kullanılacak olan bentonit Hekimhan/Malatya'dan temin edilmiştir. Yoğunluğu 2.60 g/cm^3 olup rengi bejdir. Bentonit, volkanik külün yerinde ayrışmasıyla oluşan ve büyük ölçüde montmorillonit mineralinden oluşan, su emip şişebilen, ticari olarak sondaj çamurunda, katalist, boya, plastik dolgu ve aglomerasyon işleminde kullanılan toprağımsı bir maddedir [72].

3.1.2. Deneylerde kullanılan kimyasallar

Deneylerin mikrodalga yöntemiyle kalsinasyonu aşamasında, termal yardımcı madde olarak sakkaroz - $C_{12}H_{22}O_{11}$ (Merck %99,5), peleti konsolide etmek amacıyla da üre - CH_4N_2O (Merck %99,5) kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

3.2.1. Numunelerin alınması

Hekimhan – Deveci bölgesindeki demir ocaklarının Şekil 3.2’de verilmiş olan -20 mm’lik stok sahasından 100 kg siderit numunesi alınmıştır. Örnekleme esnasında alınan numunenin yığını temsil etmesi hususuna özellikle dikkat edilmiştir.



Şekil 3.2 Hekimhan – Deveci stok sahası

3.2.2. Numunelerin hazırlanması

Sahadan alınan siderit cevheri laboratuvarında harmanlandıktan sonra Şekil 3.3’de verilmiş olan bıçaklı bölücü de yaklaşık olarak 8 eşit parçaya bölünerek her biri yaklaşık 12,5 kg olacak şekilde paketlenmiştir.



Şekil 3.3 Bıçaklı bölücü (riffle splitter)

3.2.3. Eleme işlemi

Eleme işlemleri Şekil 3.4’de verilmiş elek seti ve EFL marka MK3 model elek vibrasyon cihazı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.4 Elek seti ve vibrasyon cihazı

Elemede ASTM E11 standardı elekler kullanılmış olup seçilen elek açıklıkları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Deneylerde kullanılan elek serisi

Elek No	Elek Açıklığı Mikron
1	11200
2	11200
3	10000
4	4750
5	3350
6	2360
7	2000
8	1180
9	850
10	600
11	500
12	300
13	212
14	150
15	106
16	75
17	53
18	45
19	38

3.2.4. Öğütme işlemi

Öğütme işlemi; yüksekliği $h=20$ cm, çapı $R=19,5$ cm ve hacmi $V=5970$ cm³ olan Şekil 3.5’deki Denver marka laboratuvar tipi bir bilyalı değirmenin 12 devir/dakika hızla çalıştırılmasıyla yapılmıştır.



Şekil 3.5 Laboratuvar tipi bilyalı değirmen

Değirmene öğütücü ortam olarak Şekil 3.6’da verilen dört farklı ebattaki (20-25-30-40 mm) çelik bilya şarj edilmiştir.



Şekil 3.6 Farklı ebatlarda çelik bilya

Ham ve kalsine siderit numunelerinin her ikisine de farklı sürelerle (15-30-45-60-75-90 dakika) ve Çizelge 3.2’de verilen şartlar altında öğütme işlemi uygulanmıştır.

Çizelge 3.2 Öğütme parametreleri

Bilya Çapı (mm)	Bilya Kütlesi (g)	Şarj Adedi	Gerçek ve Yığın Yoğunluğu (g/cm ³)	Bilya Şarj Oranı (%)	Cevher Besleme Miktarı (g)	Tüvenan Siderit Besleme Oranı (%)	Kalsine Siderit Besleme Oranı (%)
20	32,78	30	7,82 – 4,57	32	3000	20	28
25	64,00	20					
30	110,70	20					
40	262,34	17					

3.2.5. Kalsinasyon işlemi

Kalsinasyon deneyleri konvansiyonel (kül fırını) ve mikrodalga olmak üzere iki farklı yöntem ve cihazla yapılmıştır. Konvansiyonel ısıtma yönteminde Şekil 3.7’de verilen Protherm marka ve PLF 130/10model bir kamara tipi kül fırını kullanılmıştır.



Şekil 3.7.Kamara tipi kül fırını

Kül fırınındaki kalsinasyon deneylerinde büyük (-14+4,35 mm) ve küçük (-300 μ m) olmak üzere iki farklı boyutun, farklı düzeylerdeki sıcaklığın (450-500-550-600-650-700-750-800 $^{\circ}$ C) ve ısıt işlemlerinin (5-10-15-20-30-40-45-50-60 dakika) kalsinasyon verimine etkileri incelenmiştir.

Mikrodalga fırında yapılan kalsinasyon deneylerinde ise mutfak tipi (Güç: 900 W, Frekans: 2,45 GHz) bir mikrodalga fırın kullanılmış olup termal yardımcı olarak üre ve sakkarozdan yararlanılmıştır. Bu deneylerde 1-5 dakika aralığındaki sürelerde mikrodalga ışıması uygulanmıştır.

3.2.6. Topaklama işlemi

Ham peletlerin üretiminin ilk aşaması olan topaklama işleminde Şekil 3.8’de verilmiş olan Ünal Mühendislik marka bir peletleme diski kullanılmıştır. Bu cihazın disk çapı 60 cm olup eğimi ise 50⁰’dir. Söz konusu ham peletlerin üretimi esnasında cihaz 20 devir/dakika hız ile çalıştırılmıştır.



Şekil 3.8 Peletleme diski

Üç farklı pelet hammaddesi içerisinde (90 dakika süreyle öğütülen ham ve kalsine siderit ve 60 dakika süreyle öğütülen kalsine siderit) ağırlıkça %7,50 - 9 - 10,75 oranlarında bentonit eklenerek elde edilen pelet keki karışımları Çizelge 3.3’de verilmiştir. En iyi pelet dayanım sonucunun alındığı %9 bentonit içeren 90 dakika öğütme işlemine tabii tutulmuş olan kalsine siderit numunesi için sonuçları teyit amacıyla ayrıca %8,25 ve %10 düzeyinde bentonit katkılı karışımlar kullanılarak pelet üretilmiştir. Böylelikle aşağıda da sıralandığı gibi toplam 11 farklı karışım ile pelet üretimi yapılmıştır.

Çizelge 3.3 Peletlemede kullanılan hammaddeler ve bentonit içerikleri

Malzemenin Cinsi ve Öğütme Süresi	Bentonit Oranı (%)
Ham Siderit (90 dakika öğütme)	7,50
	9,00
	10,75
Kalsine Siderit (60 dakika öğütme)	7,50
	9,00
	10,75
Kalsine Siderit (90 dakika öğütme)	7,50
	8,25
	9,00
	10,00
	10,75

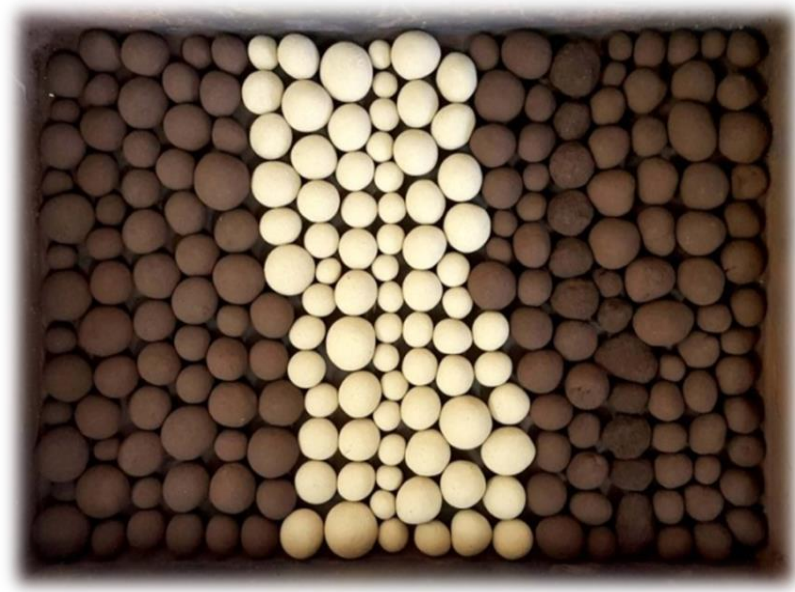
Cevher ve bentonit tartım işlemlerinden sonra elde edilen pelet keki homojen bir dağılım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Pelet diskinde topaklama yapılarak üretilen ham peletler etiketlenerek Şekil 3.9’da görüldüğü gibi oda koşullarında kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 3.9 Kurumaya bırakılan ham peletler

3.2.7. Ürün pelet yapım aşaması

Ürün peletler; ham peletlerin 15 dakika süreyle 1300 °C sıcaklıkta –ki bu düzey hematitin yeniden kristalleşme sıcaklığıdır, ısıtılma tabii tutulması sonucu sertleştirilmesiyle elde edilmiştir. Bu sıcaklığın üzerinde yapılmamasının sebebi ise porozite oranının aşırı derecede düştüğünün bilinmesidir [73]. Kalsine edilmiş ve kalsine edilmemiş sideritten elde edilen ham peletler Şekil 3.10’da gösterildiği gibi çelik bir muhafazanın içerisinde fırınlanmıştır.



Şekil 3.10 Isıl işlem öncesi ham peletlerin görünümü

Peletler hem ısınırken hem de soğurken termal şoktan korunması için fırın 20 °C/dakika hızla oda sıcaklığından 1300 °C'a çıkarılmış ve yaklaşık 6 °C/dakika hızla soğutulmuştur. Fırından çıkan ürün peletlerin görünümü Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11 Ürün peletlerin görünümü

3.2.8. Peletlere uygulanan testler

Elde edilen ürün peletlere ASTM D5731 standardında Utest marka UTR-0580 model bir nokta yükleme cihazı kullanılarak özel platenler yardımıyla basma dayanımı testi yapılmıştır.

3.2.9. XRD ve elementel analiz

Çalışmada kullanılan numunelerin, ara ürünlerin ve nihai ürünlerin faz bileşenlerini ve kristal yapılarını karakterize etmek ve tanımlamak amacıyla XRD (x ışını difraktometresi) kullanılmıştır. Veriler, oda sıcaklığında Cu K α (40 kV, 15 mA, λ : 1.54051 Å) radyasyonlu Şekil 3.12'de verilen Rigaku Miniflex 600 x-ışını difraktometresi kullanılarak toplanmıştır.



Şekil 3.12 X-ışını difraktometresi

Çalışmada kullanılan ve üretilen tüm malzemelerin elementel içeriklerinin tespitinde XRF cihazı (x-ışını floresans spektrometresi) kullanılmıştır. Veriler Benchtop marka x-ışını floresans spektrometresi ile toplanmıştır. XRD ve XRF çalışmaları İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır.

3.2.10. Termogravimetrik analiz

Ham sideritte sıcaklıkla birlikte meydana gelen ağırlık kaybının tespiti İnönü Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü'nde Shimadzu 50 termogravimetrik analizör ile 10 °C/dakika ısınma hızı altında yapılmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Termogravimetrik analizör

3.2.11. Taramalı elektron mikroskobu

Ürün peletlerin yüzeyinin görünümü ve kristal yapısının belirlenmesi amacıyla İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Merkezi'nde (İBTAM) bulunan Şekil 3.14'de verilen LEO (Zeiss) EVO40 elektron mikroskobunda farklı ölçeklerle görüntüleri yakalanmıştır.



Şekil 3.14 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

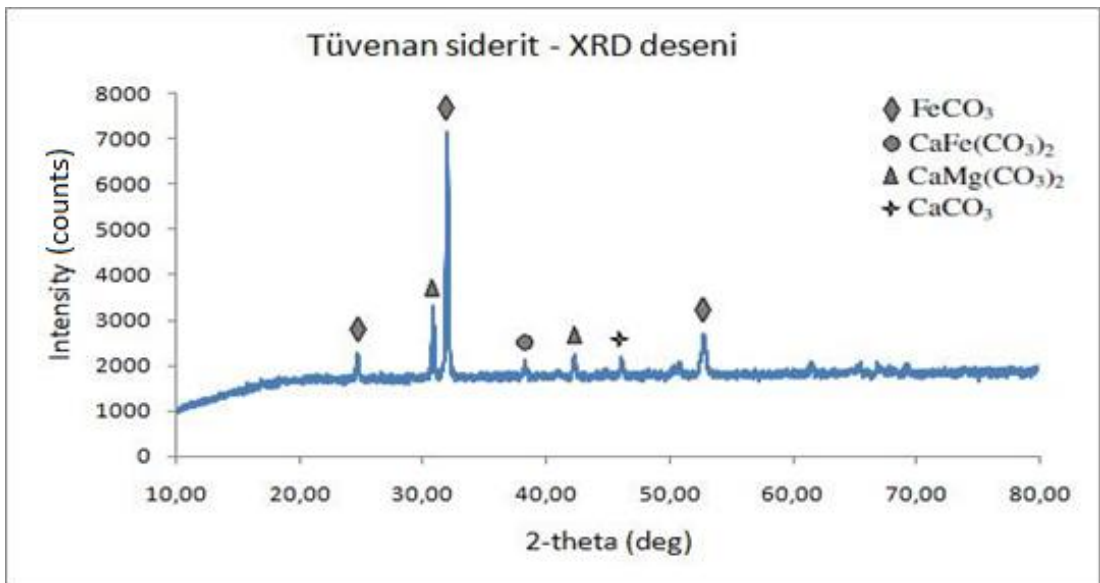
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Başlangıç Malzemelerinin Karakterizasyonu

Tez kapsamında kalsinasyon ve peletleme deneyleri için Malatya İli Hekimhan İlçesi Deveci Mevkii'nden temin edilen siderit cevheri kullanılmıştır. Kalsinasyon öncesi başlangıç maddelerinin, kimyasal yapıları ve kompozisyonları XRF, XRD yöntemleriyle aydınlatılmıştır. Çizelge 4.1'de çalışmada kullanılan ham siderite ait XRF yöntemiyle yapılan elementel analiz sonuçları ve Şekil 4.1'de ise tüvenan siderite ait toz kırınım desenleri verilmiştir.

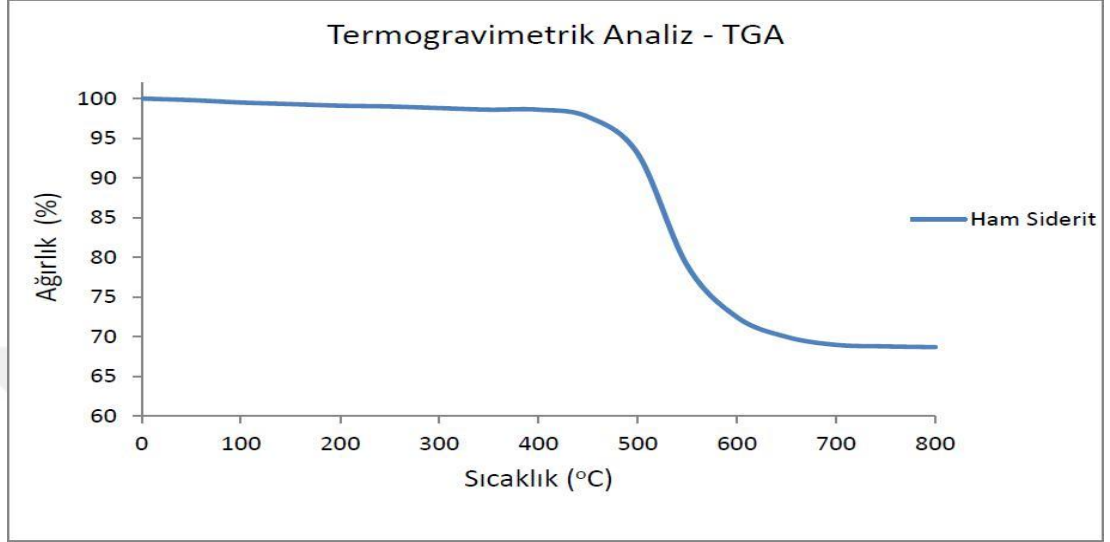
Çizelge 4.1 Ham sideritin kimyasal analizi

Bileşen	Tenör (%)
Fe ₂ O ₃ (Fe %)	53,21 (37,25)
MgO	18,88
Al ₂ O ₃	0,25
SiO ₂	4,42
SO ₃	0,84
K ₂ O	0,81
CaO	9,87
MnO	11,39



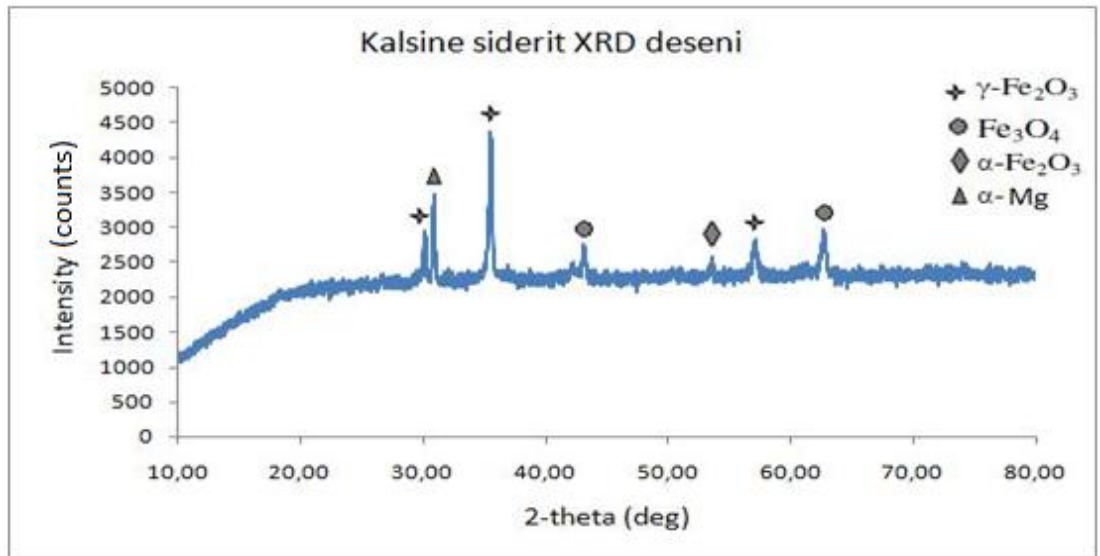
Şekil 4.1 Tüvenan siderit toz kırınım deseni

Ham sideritin sıcaklığa bağlı olarak kütsel değışimleri termogravimetrik (TGA) analiz ile belirlenmiştir. Şekil 4.2’de verilen TGA grafiğı sıcaklığın etkisiyle numunede meydana gelen ağırlık kaybını göstermekte olup siderit cevheri için parçalanarak uzaklaştırılan CO₂ miktarını temsil etmektedir.



Şekil 4.2 Ham siderit cevherinin termogravimetrik analiz grafiğı

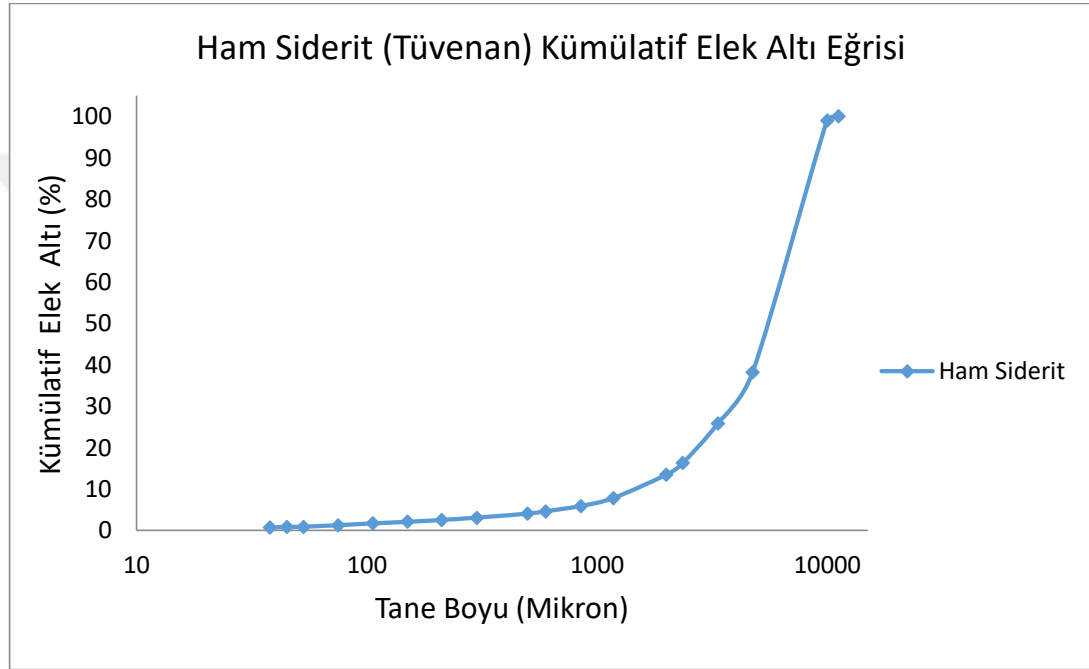
Termogravimetrik analiz grafiğıne göre 700 °C sıcaklıktan sonra kayda değeri bir ağırlık kaybı yaşanmamaktadır. Bu sıcaklık temel alınarak yapılmış olan 15 dakikalık kalsinasyon işlemi ile elde edilen kalsine siderit cevherine ait olan XRD deseni Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3 Kalsine siderit toz kırınım deseni

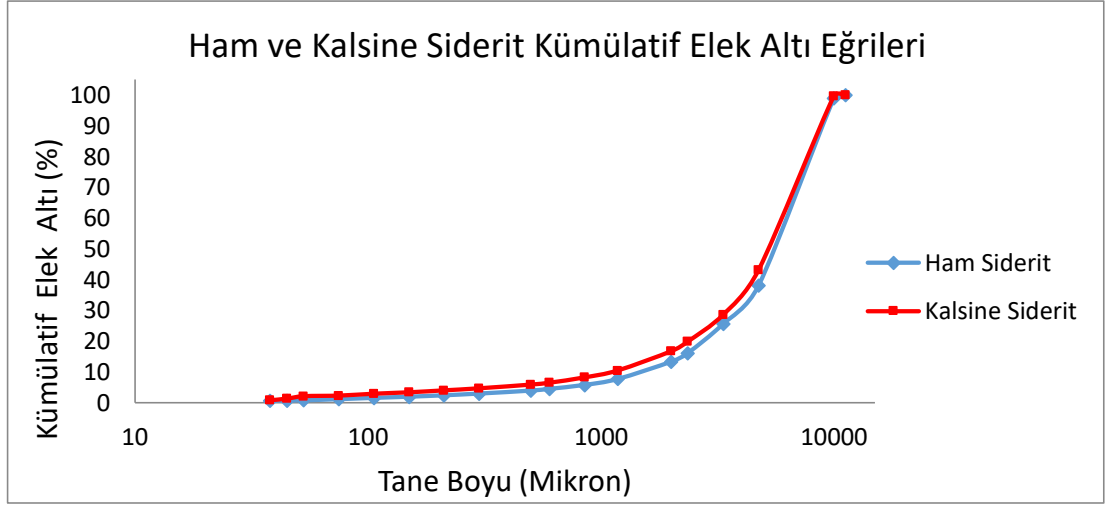
4.2. Boyut Analizlerinin Değerlendirilmesi

Sahadan alınan tüvenan siderit cevherine ait elek analizi Şekil 4.4’ de verilmiştir. Grafik incelendiğinde P₈₀ (Beslenen malzemenin %80’inin elek altına geçtiği elek açıklığı) tane boyutunun 7,9 mm ve d₅₀ (Beslenen malzemenin %50’sinin elek altına geçtiği elek açıklığı) tane boyutunun ise 5,6 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.4 Tüvenan siderit cevherinin kümülatif elek altı eğrisi

Ham siderit herhangi bir boyut küçültme işlemine tabii tutulmadan direkt olarak kalsine edilmiştir. Bu kalsinasyon işlemi esnasında sideritin bünyesinde bulunan CO₂ sıcaklığın etkisiyle uzaklaşırken cevher içerisinde kılcal çatlaklara yol açarak parçalanmalara ve ufalanmalara sebep olmuştur. Bu durum Şekil 4.5’da verilen kümülatif elek altı eğrilerinde açıkça görülmektedir.

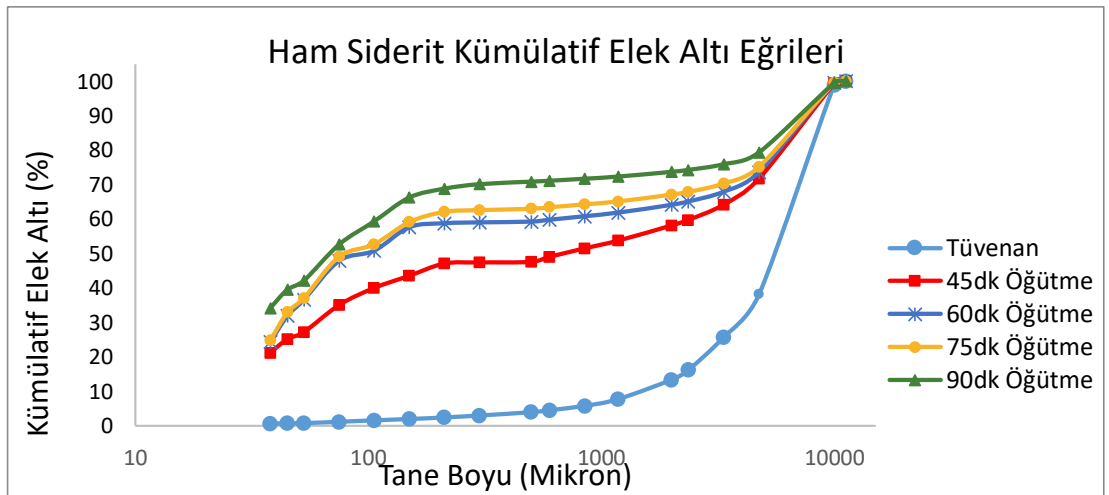


Şekil 4.5 Ham ve kalsine siderit cevherlerinin kümülatif eğrileri

4.3. Öğütme Deneyleri ve Sonuçları

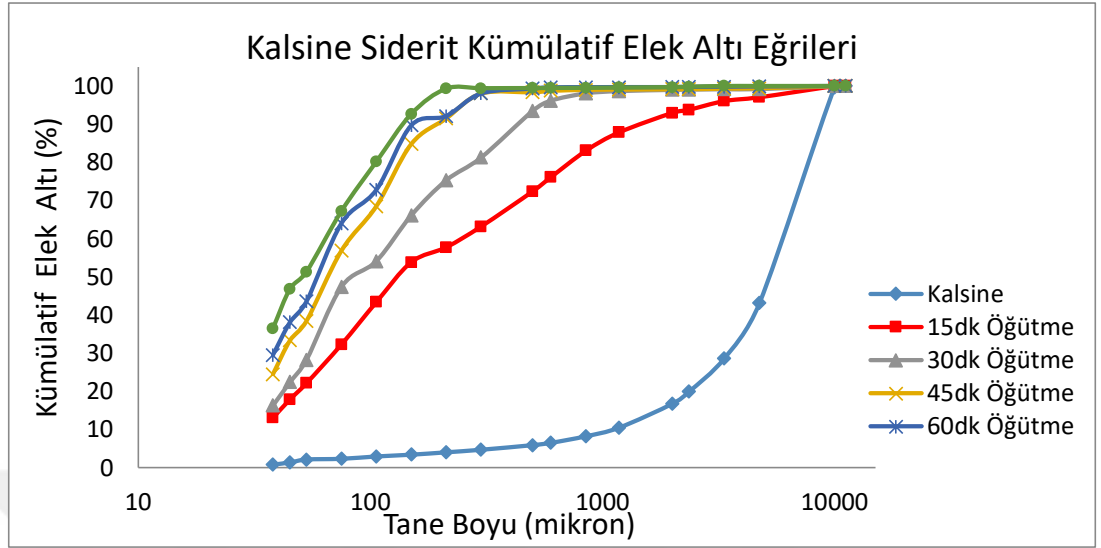
Gerek malzemenin öğünelirliğini incelemek gerekse de peletleme için gerekli olan ince tane fraksiyonlarındaki malzemeyi elde etmek için öğütme işlemi yapılmıştır.

Öğütme işlemleri tüvenan siderite ve kalsine edilmiş siderite uygulanmıştır. Şekil 4.6'da verilen grafik tüvenan siderit cevherine uygulanan öğütme işlemlerinin farklı sürelerdeki (45-60-75-90 dakika) kümülatif elek altı eğrilerini göstermektedir.



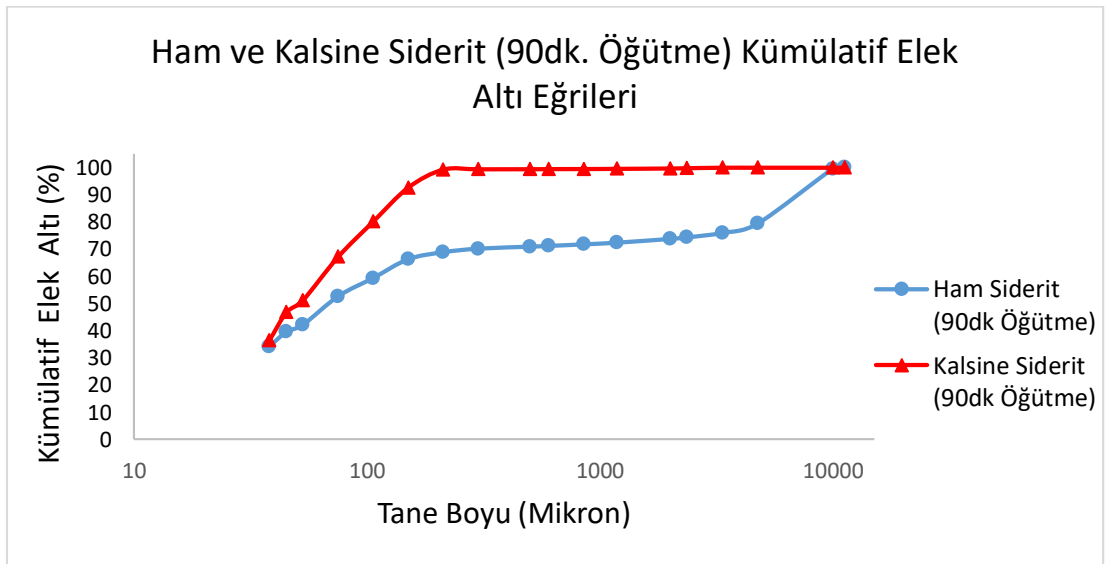
Şekil 4.6 Farklı sürelerde öğütme yapılmış olan tüvenan siderit cevherinin elek altı eğrileri

Tüvenan cevher kalsine edildikten sonra öğütme işlemine tabii tutulmuş ve sonuçlar ise Şekil 4.7’de sunulmuştur.



Şekil 4.7 Farklı sürelerde öğütme yapılmış olan kalsine sideritin elek altı eğrileri

Sideritin kalsinasyonu sonucunda bünyesinde meydana gelen kılcal çatlaklar sayesinde öğünebilirlik açısından avantaj sağlanmıştır. Şekil 4.8’de verilen grafikteki eğriler birbiri ile karşılaştırıldığında kalsine sideritin kalsine olmayana göre oldukça kolay öğütülebildiği gözlemlenebilir.



Şekil 4.8 Eşit sürelerde öğütülmüş tüvenan ve kalsine sideritin kümülatif elek altı eğrileri

Şekil 4.8'den de görülebileceği gibi ham ve kalsine sideritin, her ikisi de 90 dakika öğütüldükten sonraki fraksiyon dağılımı birbirinden oldukça farklıdır.

Grafikte tüvenan cevherin 90 dakika öğütüldükten sonraki durumda d_{50} tane boyutu $66\ \mu\text{m}$ iken kalsine sideritin d_{50} tane boyutu $54\ \mu\text{m}$ 'dir. Bu grafikte dikkat edilecek ve çıkarım yapılacak diğer boyut meselesi ise P_{80} tane boyutudur. Tüvenan siderit için bu değer $4,75\ \text{mm}$ iken kalsine siderit için $0,11\ \text{mm}$ 'dir. Netice itibari ile kalsine sideritin P_{80} tane boyutu ham sideritinkinden 43 kat daha küçüktür.

Böylelikle kalsinasyon işleminin öğütmeye etkisi boyut büyüdükçe artan oranlı olarak devam ettiği sonucuna varılabilir.

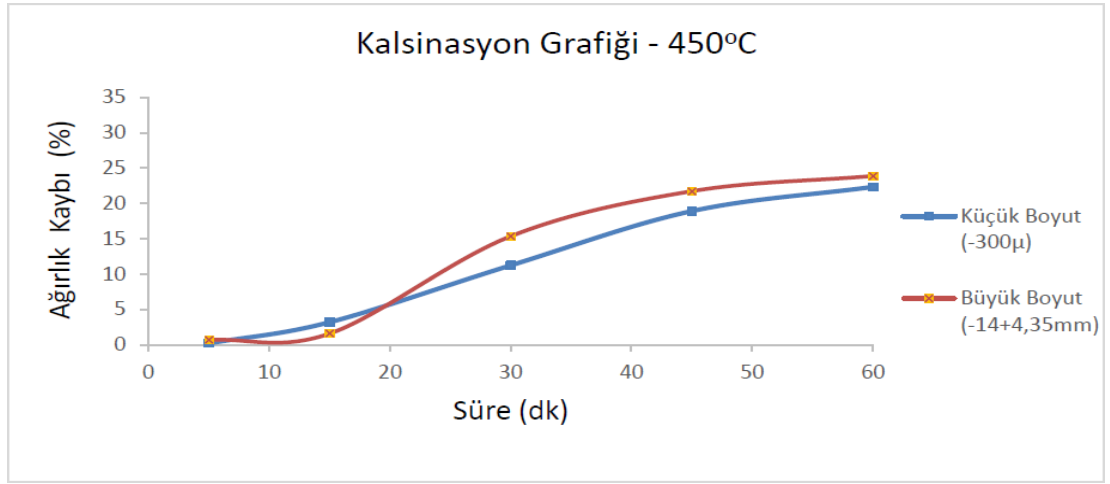
4.4. Kalsinasyon Deneylerinin Değerlendirilmesi

Kalsinasyon deneyleri iki farklı ısıtma yöntemi ile yapılmıştır. Bunlardan ilki kül fırınının kullanıldığı konvansiyonel ısıtma, ikincisi ise mikrodalga yöntemiyle ısıtmadır.

Tüvenan sideritin TGA grafiğinden yararlanılarak konvansiyonel ısıtma ile yapılan kalsinasyon deneylerinin başlangıç sıcaklığı olarak $450\ ^\circ\text{C}$ düzeyi belirlenmiştir. Çünkü bu sıcaklığın altında karbonat bozulması başlamadığı için dikkate değer seviyede bir ağırlık kaybı meydana gelmemektedir. Az miktardaki ağırlık kaybının sebebi ise karbonat bozulması değil bünye neminin uzaklaşmasıdır.

Konvansiyonel ısıtma ile yapılan kalsinasyon deneylerini de kendi içerisinde ikiye ayırmak gerekmektedir. İlki katkısız yapılan deneyler ikincisi ise çeşitli oranlarda üre ve sakkaroz ile katkılanmış olan cevherler üzerinde yapılan deneylerdir. Bu katkıların eklenmesi ile yapılan deneylerde nihai ağırlık kaybının, sinerjik bir etki ile daha fazla olması ya da en azından daha erken olması beklenmiştir. Ancak eklenen sakkaroz ya da üre katkılarının kül fırınında beklenenin aksine herhangi bir avantaj doğuracak etki yapmadığı gözlemlenmiştir.

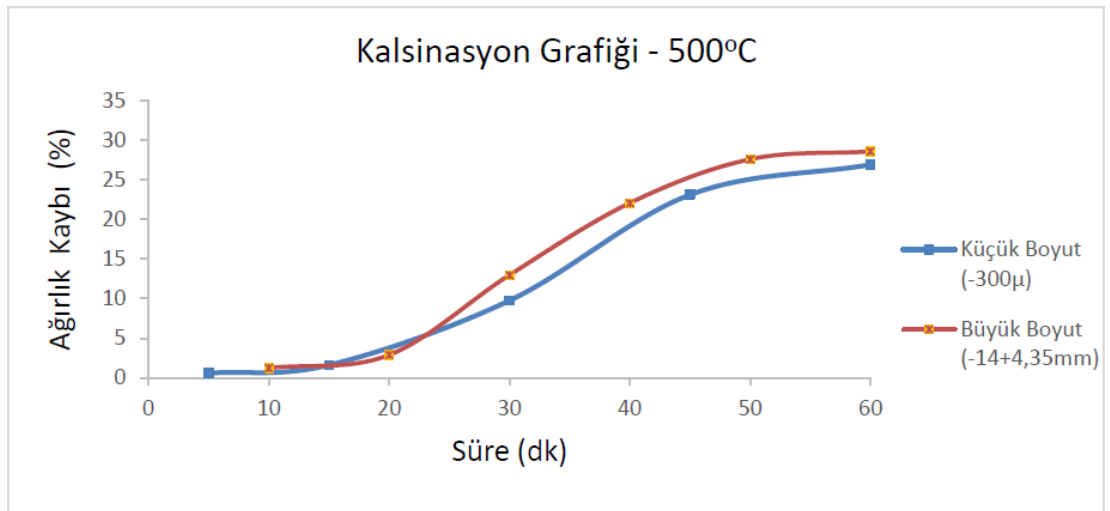
Öncelikle katkısız cevherler üzerine yapılan kalsinasyon işlemlerini en düşük sıcaklık olan Şekil 4.9'daki $450\ ^\circ\text{C}$ ile başlayarak inceleyelim.



Şekil 4.9 Ham siderit cevherinin 450 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği

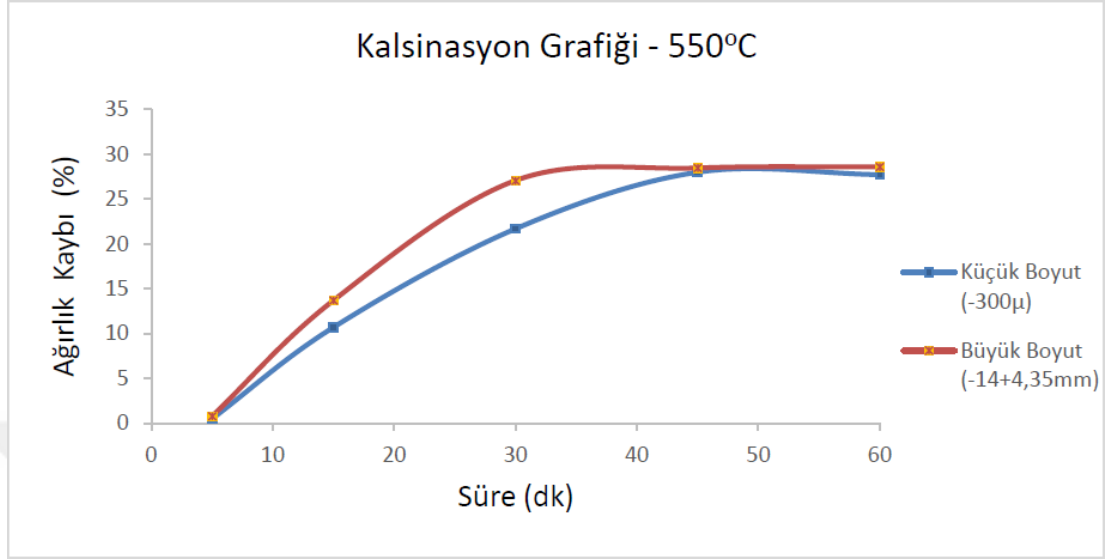
Şekil 4.9'daki grafik incelendiğinde kalsinasyon işlemi 60 dakika süresince yapıldığı halde ağırlık kaybı %23,85'dir. Termogravimetrik analiz sonuçlarına göre ağırlık kaybının yaşanması olağandır. Ancak kaybedilen ağırlık kaybına bakılacak olursa Fe tenörü bakımında istenilen düzeye ulaşamadığı çok açıktır.

Şekil 4.10'deki grafikte siderit cevherinin 500 °C'deki kalsinasyon grafiği verilmiştir. Grafığe göre bir önceki sıcaklık olan 450 °C'da elde edilen %23 dolaylarındaki ağırlık kaybına bu sıcaklıkta 60 dakika yerine yaklaşık 40 dakikada ulaşılmıştır. Elde edilen en yüksek ağırlık kaybı ise %28,56'dır. Ancak daha önce Şekil 4.2'de verilen ham siderit TGA grafiğine göre bu ağırlık kaybı yeterli değildir. Ulaşmayı hedeflediğimiz ağırlık kaybı en az %31 olarak belirlenmiştir.



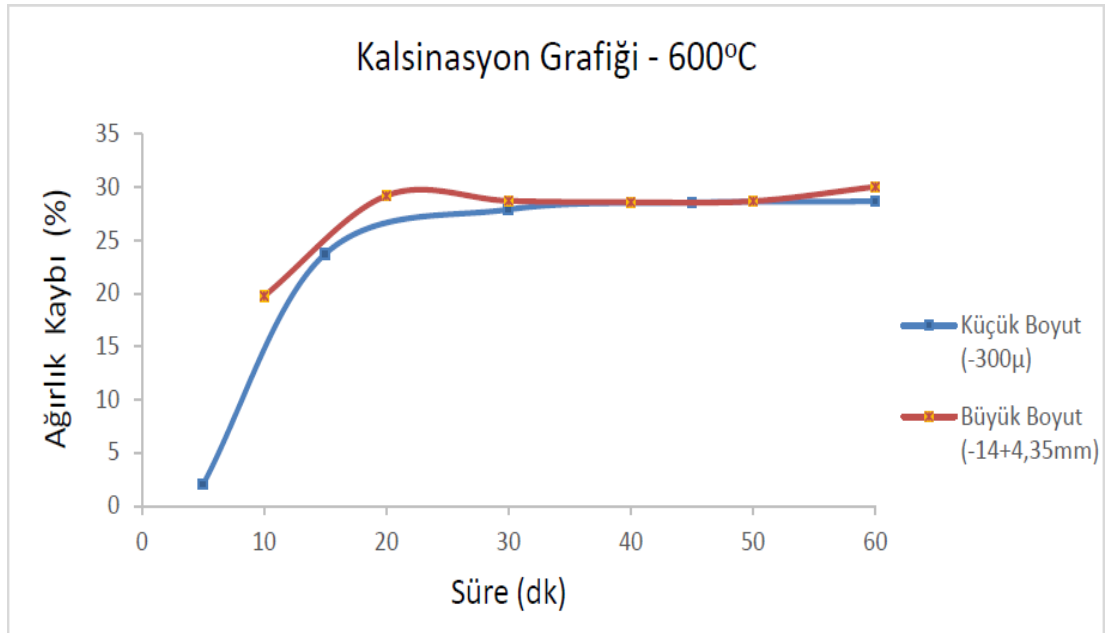
Şekil 4.10 Tüvenan siderit cevherinin 500 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği

Şekil 4.11’de verilen 550 °C sıcaklıkta yapılan kalsinasyon deneylerinde 60 dakika sürede numune ağırlığında %28,59 düzeyinde kayıp meydana gelmiştir.



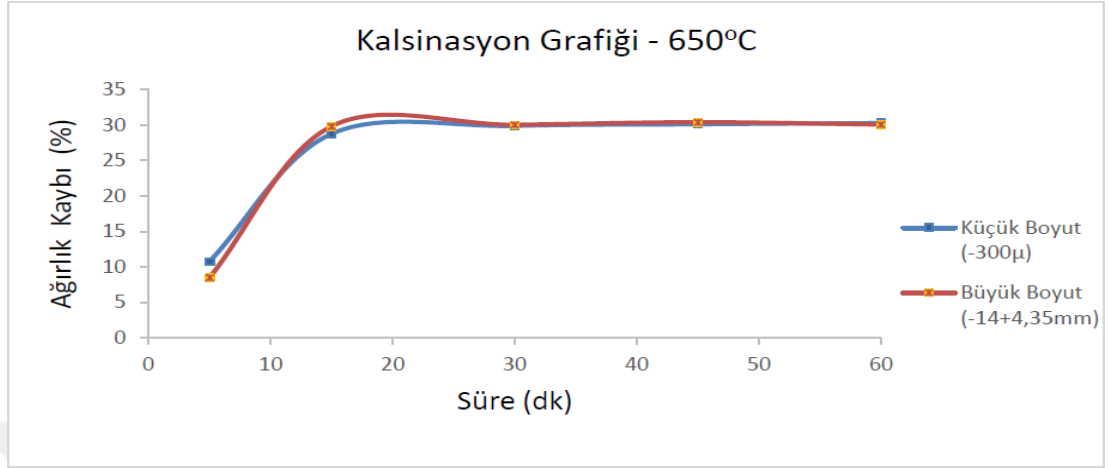
Şekil 4.11 Tüvenan siderit cevherinin 550 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği

Şekil 4.12’de verilen 600 °C sıcaklıkta yapılan kalsinasyon deneylerinde 60 dakika sürede numune ağırlığında %30,04 düzeyinde kayıp meydana gelmiştir.



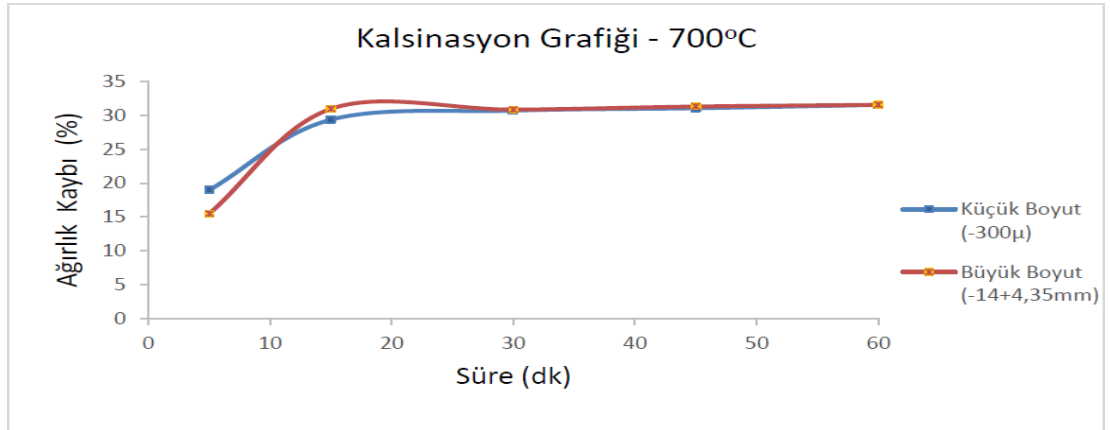
Şekil 4.12 Tüvenan siderit cevherinin 600 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği

Şekil 4.13’de verilen 650 °C sıcaklıkta yapılan kalsinasyon deneylerinde 60 dakika sürede numune ağırlığında %30,07 düzeyinde kayıp meydana gelmiştir.



Şekil 4.13 Tüvenan siderit cevherinin 650 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği

Şekil 4.14’de verilen 700 °C sıcaklıkta yapılan kalsinasyon deneylerinde 60 dakika sürede numune ağırlığında %31,67 düzeyinde kayıp meydana gelmiştir.

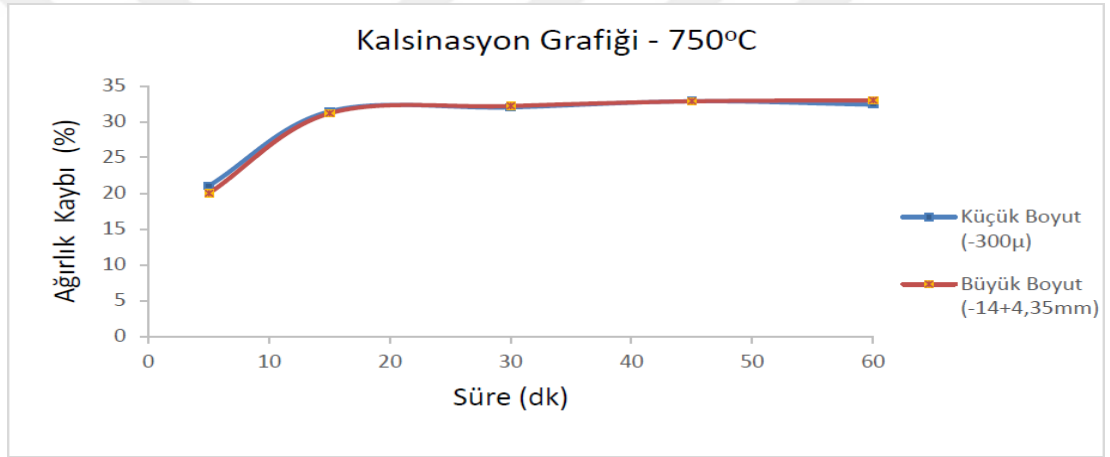


Şekil 4.14 Tüvenan siderit cevherinin 700 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği

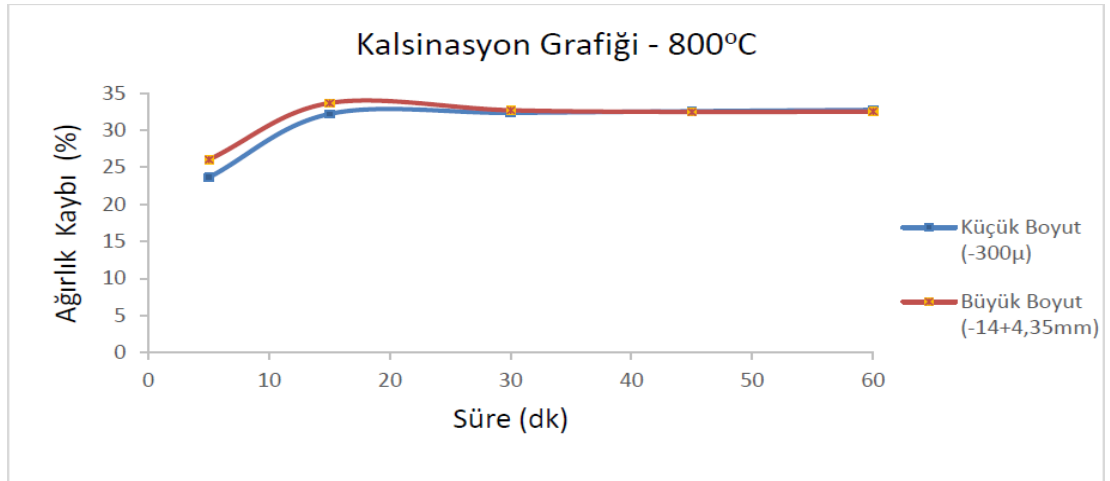
700 °C sıcaklığındaki kalsinasyon işlemini ele aldığımızda; 60 dakikanın sonunda %31,67 düzeyinde ağırlık kaybının yaşanmasının yanında 15 dakikalık kalsinasyonda da %31,01 seviyesindeki ağırlık kaybı dikkat çekmektedir. Bu kayıp yeterli demir zenginleşmesi sağlanabildiği için fazladan yapılacak olan kalsinasyon sürelerinin

ekonomik olmayacağı kanısına varılmıştır. Çünkü ilk 15 dakikadan sonraki 45 dakikalık kalsinasyon işlemine rağmen numunede meydana gelen ağırlık kaybı %0,6 seviyesindedir.

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde referans olarak kabul edilip daha sonraki deneylerde uygulanmak üzere 700 °C sıcaklıkta ve 15 dakika süreyle yapılan kalsinasyon prosesi ağırlık kaybı ve ekonomik bakımdan optimum seviyededir. Ayrıca 700 °C sıcaklıkta 15 dakikadan sonra ve hatta Şekil 4.15 ve 4.16’de verilen daha yüksek sıcaklıklardaki kalsinasyon deneylerinde dahi 15 dakikadan sonra herhangi bir avantaj tespit edilmemiştir.



Şekil 4.15 Tüvenan siderit cevherinin 750 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği



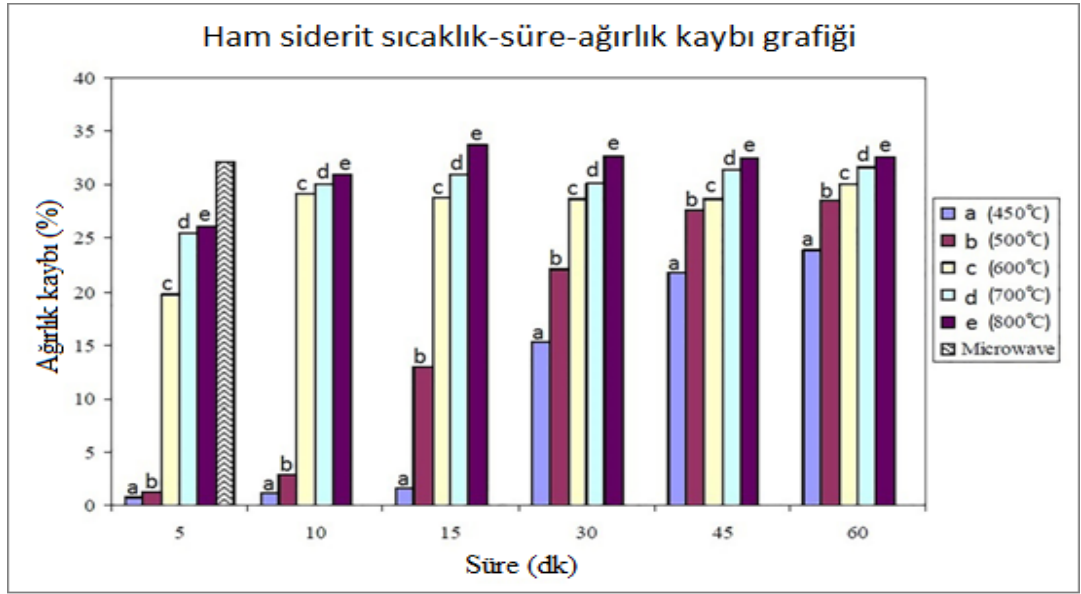
Şekil 4.16 Tüvenan siderit cevherinin 800 °C sıcaklığındaki kalsinasyon grafiği

Mikrodalga ve konvansiyonel kalsinasyon deneylerinde elde edilen ürünlerin manyetik duyarlılık dengeleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Her iki yöntemde de manyetik özelliklerde artış olduğu gözlemlenmiştir. Manyetik duyarlılık dengesindeki kısmi düşüşün haricinde mikrodalga fırının kül fırınına nazaran herhangi bir dezavantajı bulunmamaktadır.

Çizelge 4.2 Konvansiyonel ve mikrodalga ısıtma yöntemlerinin ürünlerine ait manyetik duyarlılık dengesi değerleri

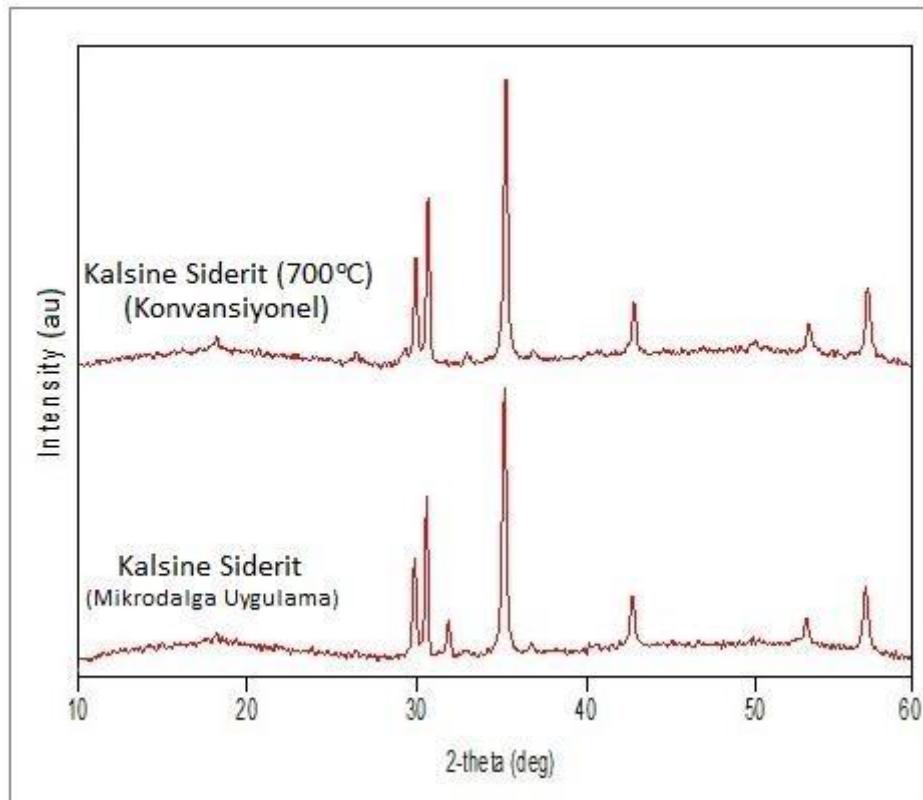
Örnek Numarası	Kalsinasyon Sıcaklığı (°C)	Manyetik Duyarlılık (*10 ⁻⁸ m ³ /kg)
1	450	1708,16
2	500	17690,50
3	600	19780,03
4	700	19530,93
5	1100 - mikrodalga yöntemi	15410,03

Kalsinasyon deneyleri kül fırınının haricinde bir de mikrodalga fırında gerçekleştirilmiştir. Özellikle erişilen sıcaklık düzeyi ve kalsinasyon süresinin kısalığı açısından mikrodalga fırın uygulaması büyük avantajlar sağlamakla beraber gelecek vaat etmektedir. Mikrodalga yöntemiyle kalsinasyonda %32,14 düzeyinde ağırlık kaybı tespit edilmiştir. Mikrodalga fırına (Güç:900 W, Frekans:2,45 GHz) yüklenen ağırlıkça %23 sakkaroz (C₁₂H₂₂O₁₁) içeren siderit cevheri sadece 3 dakikalık bir ısıtılma ile 1100 °C sıcaklığa ulaşmıştır. Şekil 4.17.’de hem kül fırınına hem de mikrodalga fırınına ait kalsinasyon işlemleri sonucundaki ağırlık kaybı süre değişkeni ile verilmiştir.



Şekil 4.17 Çeşitli sürelerde farklı sıcaklıklarda ısıtılan sideritin ağırlık kaybı ve mikrodalga ile işlenmiş siderit numunelerinin ağırlık kaybı

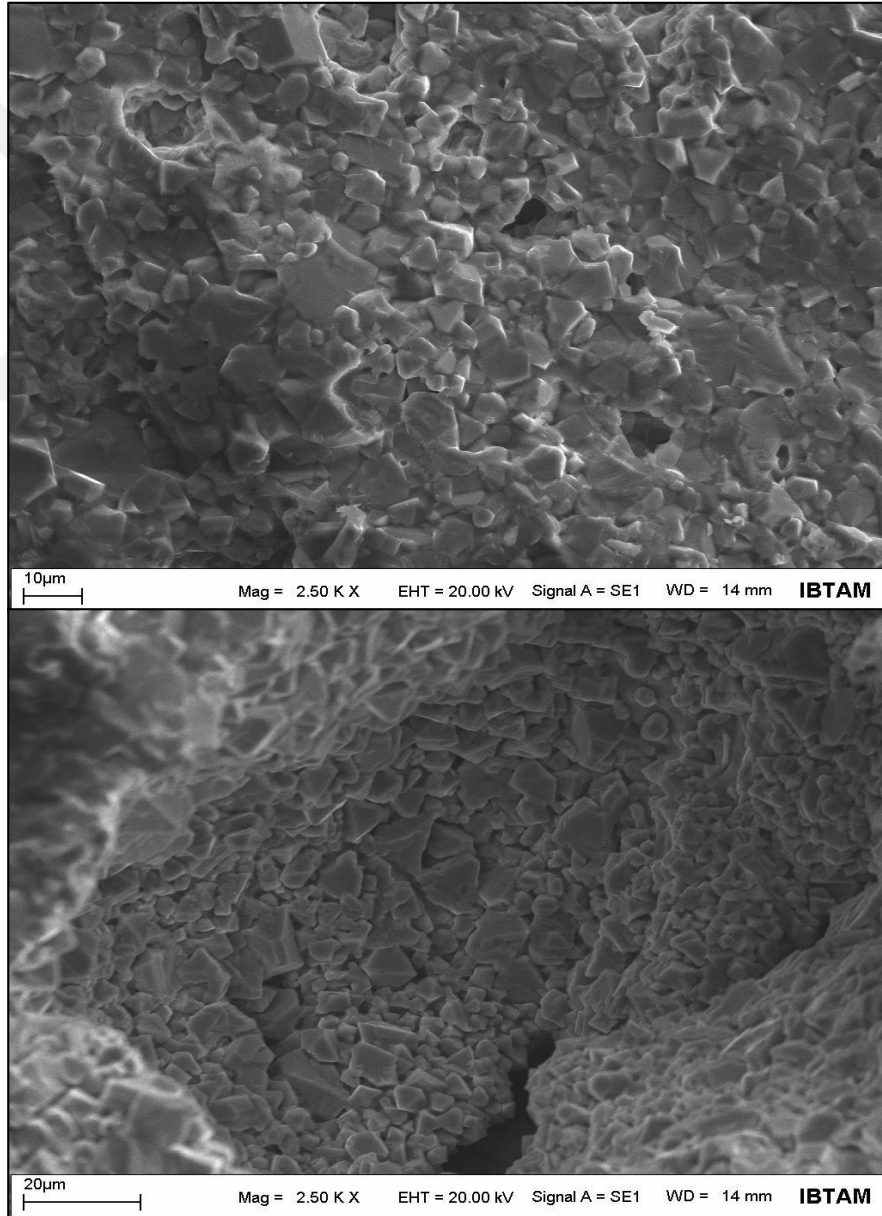
Şekil 4.18'deki konvansiyonel ve mikrodalga yöntemleriyle elde edilen kalsine ürünlerin XRD desenlerindeki benzerlik dikkat çekmektedir.



Şekil 4.18 Ham sideritin mikrodalga ve kül fırını kalsine ürünlerinin XRD deseni

4.5. Pelet Pişirme İşleminin Değerlendirilmesi

Piştirilme sonucunda imal edilen ürün peletlerden; 90 dakika öğütülen ve %9 oranında bentonit içeren ve dayanımı en yüksek olan ürün pelete ait SEM yardımıyla çekilen görüntüler iki farklı ölçekle (10 μ m, 20 μ m) Şekil 4.19’de verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; trigonal kristaller açıkça görülmektedir. Bunlar, yeniden kristalleşen hematit mineralleridir. Böylelikle, SEM görüntüsüne bakarak pelet pişirme işleminin uygun sıcaklıkta yapıldığı söylenebilir.



Şekil 4.19 Ürün peletlerin SEM görüntüsü

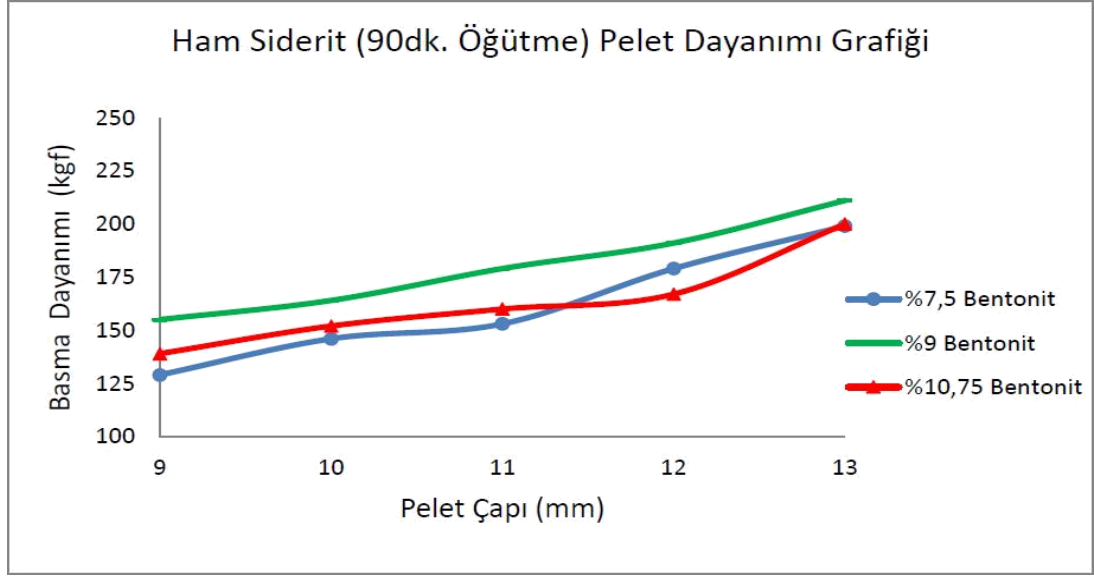
4.6. Peletlere Uygulanan Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Elde edilen ürün peletlere basma dayanımı testi yapılmıştır. Test sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Sonuçlara göre en yüksek basma dayanımına sahip olan peletler kalsine sideritin 90 dakika öğütülerek %9 oranında bentonit ile katkılanan pelet kekinden meydana gelmektedir.

Çizelge 4.3 Pelet çaplarına ve eklenen bentonit oranına göre pelet basma dayanımları

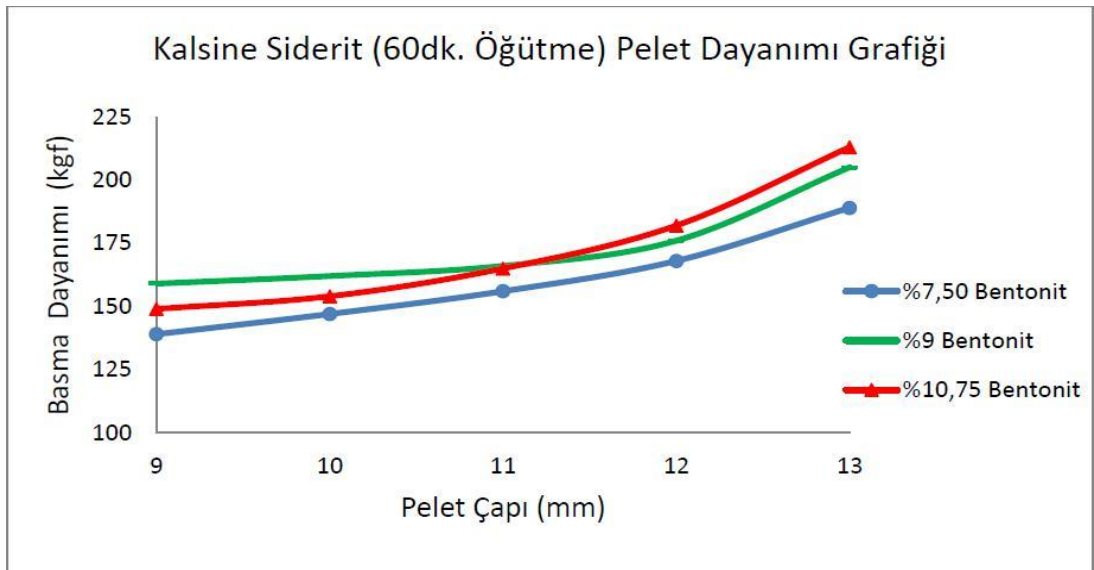
Örnek türü (öğütme süresi)	Bentonit Oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Pelet çapı (mm)					Ort.
			9	10	11	12	13	
			Basma dayanımı (kgf)					
Ham siderit (90dakika)	7,50	4,05	129	146	153	179	199	161,2
	9,00	3,77	155	164	179	191	211	180,0
	10,75	3,52	139	152	160	167	200	163,6
Kalsine siderit (60dakika)	7,50	4,38	139	147	156	168	189	159,8
	9,00	4,28	159	162	166	176	205	173,6
	10,75	4,06	149	154	165	182	213	172,6
Kalsine siderit (90dakika)	7,50	3,86	155	159	164	169	198	169,0
	8,25	3,84	174	190	192	200	207	192,6
	9,00	3,84	199	215	225	232	268	227,8
	10,00	3,81	149	183	205	230	258	205,0
	10,75	3,75	142	144	146	156	171	151,8

Şekil 4.20'de 90 dakika süreyle öğütülmüş olan ham sideritten elde edile peletler üzerinde yapılan basma dayanımı eğrileri verilmiştir. Buna göre maksimum 211 kgf ile en yüksek dayanıma sahip pelet %9 oranında bentonit içeren pelet kekinden meydana gelmektedir.



Şekil 4.20 Ham siderit (90 dakika öğütme) pelet dayanımı grafiği

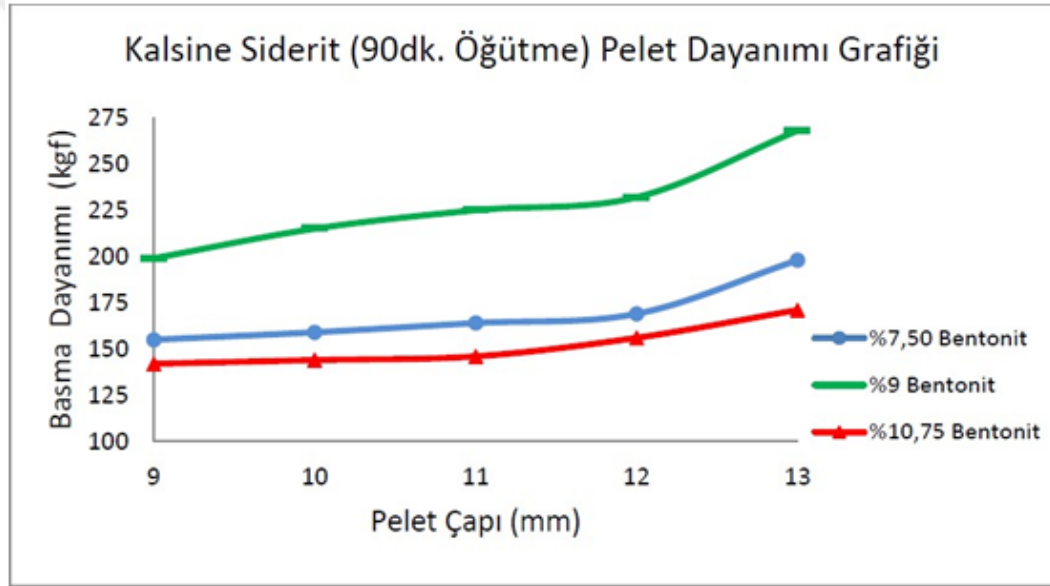
Şekil 4.21’de 60 dakika süreyle öğütülmüş olan kalsine sideritten elde edilen peletler üzerinde yapılan basma dayanımı grafiği verilmiştir. Grafiğe göre maksimum 213 kgf ile en yüksek dayanıma sahip pelet %10,75 oranında bentonit içeren pelet kekinden meydana gelmektedir. Ancak pelet çapının nispeten daha düşük olduğu 9-10 mm çaplarında ise ağırlıkça %9 bentonit içeren peletlerin daha dayanıklı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.21 Kalsine siderit (60 dakika öğütme) pelet dayanımı grafiği

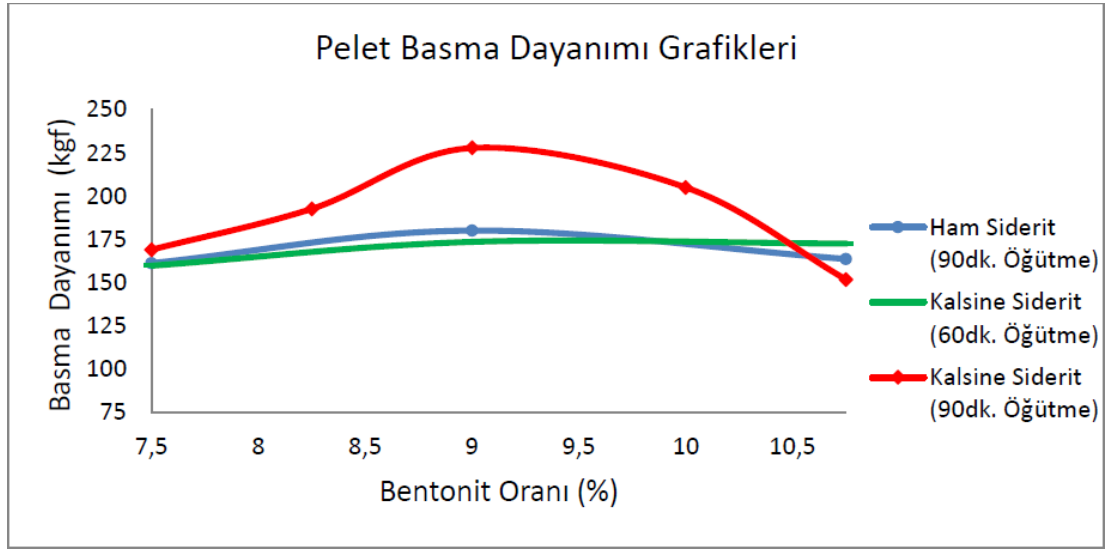
Şekil 4.22’de 90 dakika süreyle öğütülmüş olan kalsine sideritten elde edile peletler üzerinde yapılan basma dayanımının sonuçları verilmiştir. Buna göre maksimum 268 kgf ile en yüksek dayanıma sahip pelet %9 bentonit içeren pelet kekinden meydana gelmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken diğer husus ise bentonit oranının dayanımda daha önceki grafiklere nazaran çok daha etkili olmasıdır.

Ağırlıkça %9 bentonit içeren pelet kekleri genel itibari ile diğerlerine nazaran daha yüksek dayanıma sahip olsa dahi sonuçlar birbirine yakındır. Ancak bu farkın kalsine sideritin 90 dakika öğütülmesi ile elde edilen pelet kekinde bariz bir şekilde açıldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.22 Kalsine siderit (90 dakika öğütme) pelet dayanımı grafiği

Şekil 4.23’de ürün peletlerin ortalama basma dayanımı değerlerinin bentonit oranına göre değişimi verilmiştir. Bu grafiğe göre kalsine siderit cevherinin öğütülme parametrelerinde meydana gelen iyileşmeler hammaddedeki boyut dağılımının daha da küçülmesini ve bu durum da daha dayanıklı peletlerin yapılabilmesini sağlamıştır. Bir hammaddedeki boyut dağılımı ne kadar küçükse ondan elde edilecek peletler de bir o kadar dayanıklı olmaktadır [23].



Şekil 4.23 Ortalama pelet basma dayanımlarının bentonit içeriğine göre değişimi

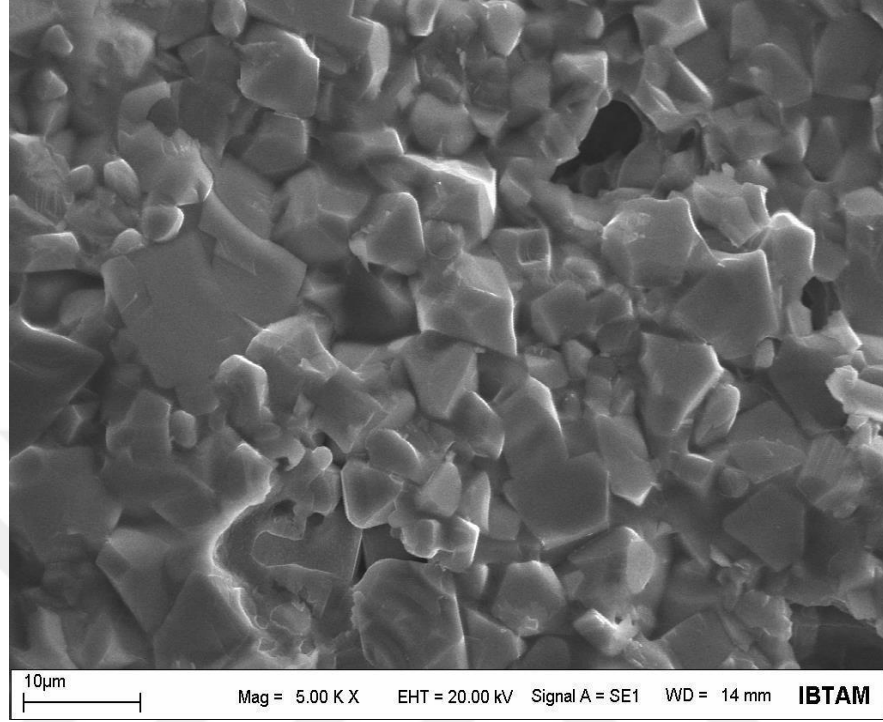
Şekil 4.23’de görüldüğü gibi daha yüksek dayanıma sahip peletler kalsine edilmiş olan cevherden elde edilmiştir.

4.7. Peletlerin SEM görüntülerinin değerlendirilmesi

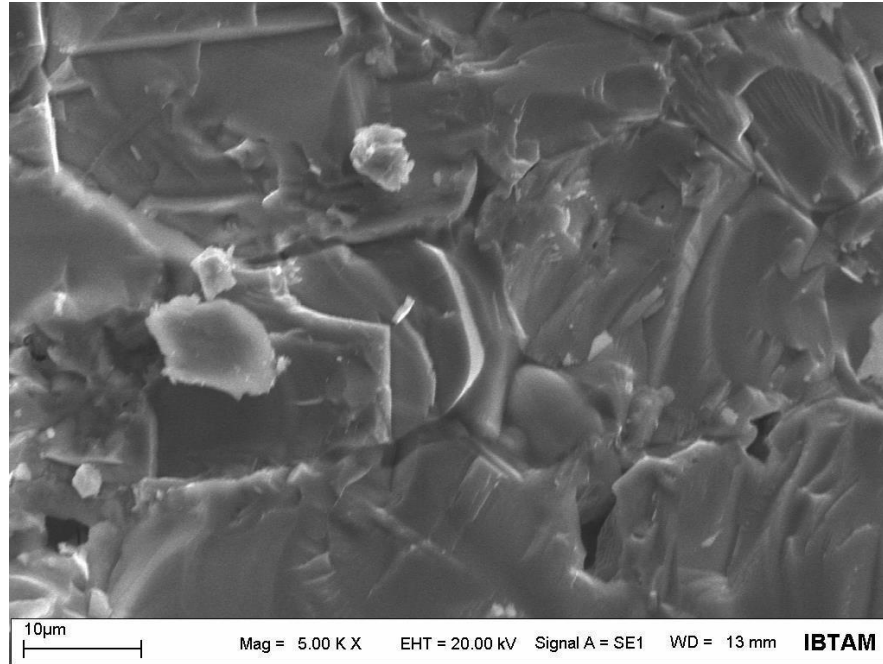
Kalsine sideritin 90 öğütülmesiyle elde edilen cevherden üretilen ürün peletlere ait SEM görüntüleri Şekil 4.24 ve 4.25’de verilmiştir. Şekil 4.24’deki görüntü 268 kgf dayanıma sahip olan pelete aittir. Şekil 4.25 ise 171 kgf dayanımı olan peletin görünümü verilmiştir. İki pelet arasında yaklaşık %36 seviyesine tekabül eden 97 kgf dayanım farkı bulunmaktadır.

Bağlayıcı olarak kullanılan bentonit oranının çok yüksek olması peletin pişirilmesi esnasında oluşan kristallerin tamamının bentonitle kaplanarak daha düz bir yapı meydana getirmesine yol açmaktadır. Pelet pişirildikten sonra soğumaya başladığında genişlemiş halde oluşan kristaller büzülmeye başlar. Birbirlerine Şekil 4.24’deki gibi kısa bağlantılarla dokunan kristaller soğuma esnasında yapıdaki büzölmeleri esneyerek bir oranda tolere ederler. Ancak Şekil 4.25’da verilmiş olan yapıda ise bu durum söz konusu değildir. Soğuma esnasında meydana gelen büzölmeyi aradaki bentonit ile çok sıkı bir şekilde birbirlerine bağlı olan kristaller soğuramaz ve peletin

içerisinde bir stresin birikmesine sebep olur. Peletin bünyede birikmiş olan stres ise dayanımını büyük ölçüde düşürür.



Şekil 4.24 Kalsine ürün pelet %9 bentonit içeren peletin görünümü



Şekil 4.25 Kalsine ürün pelet %10,75 bentonit içeren peletin görünümü

4.8. Alternatif pelet çalışmalarının sonuçlarının değerlendirilmesi

Daha önceki kısımlarda öğütme işleminin hem makine-ekipman hem de enerji maliyetleri açısından hiç de ekonomik olmadığına ve cevher hazırlama-zenginleştirme işlemlerinin mümkün olan en büyük tane boyutunda yapılması gerektiğine değinilmişti. Bu sebeple büyük tane boyutlu malzemelerin pelet yapımı için kullanımının ne derece mümkün olduğunu araştırmak amacıyla 900 W ve 2,45 GHz frekansa sahip bir mikrodalga fırında geleneksel yollarla peletlenemeyecek olan - 150+75 μm boyutlu malzemeye konsolidasyonu sağlaması amacıyla %23 oranında üre eklenerek sadece 5 dakikalık bir mikrodalga ısıması ile elde edilen pelet Şekil 4.26’da verilmiştir.



Şekil 4.26 Mikrodalga yöntemiyle elde edilen ağırlıkça %23 üre katkılı pelet

Bu yöntemle elde edilen peletin porozite oranının oldukça yüksek olması fırında indirgenme açısından fayda sağlayacaktır. Pelet hammaddesi olarak büyük boyutlu malzemenin kullanılabilir olması ise bir diğer avantajdır. Peletlenmesi mümkün olmayan -150+75 μm fraksiyonundaki cevherin söz konusu yöntem ile öğütmeye gerek kalmadan aglomerasyonu mümkün olabilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hekimhan/Deveci bölgesinden alınan ham siderit numunelerine kül fırınında farklı sıcaklık (450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800 °C) ve sürelerde (5, 10, 15, 30, 45, 60 dakika) kalsinasyon işlemleri uygulanmıştır. Hem bu deneyler hem de TGA sonucuna göre en uygun kalsinasyon prosesi 700 °C sıcaklıkta 15 dakika süreyle yapılan işlemin olduğu tespit edilmiştir. Ham siderite (45, 60, 75, 90 dakika) ve 700 °C sıcaklıkta kalsine edilen siderite (15, 30, 45, 60, 90 dakika) öğütme işlemi uygulanmıştır. İki hammadde arasında önemli ölçüde davranış farklılıkları tespit edilmiştir. Kalsinasyon, öğütme işleminin çok daha kolay yapılabilmesini sağlamıştır. Ham sideritin 90 dakika, kalsine sideritin ise 60 ve 90 dakika süreyle öğütmeye tabii tutulmuş olan numunelerinden farklı bentonit oranlarıyla (%7,50 – 8,25 – 9 – 10 – 10,75) katkılanarak ham peletler yapılmıştır. Ham peletler yeniden kristallenme sıcaklığı olan 1300 °C sıcaklıkta pişirilmiştir. SEM görüntüleriyle yeniden kristallenmeler tespit edilerek, işlemin başarılı olduğu teyit edilmiştir. Ürün peletlere basma dayanımı testi yapılmıştır. En yüksek dayanıma sahip olan peletin kalsine sideritin 90 dakika öğütmesiyle elde edilen malzemeden çıktığı belirlenmiştir. Maksimumda 268 kgf dayanıma sahip olan bu pelet ham sideritten yapılan peletten ortalama %28 daha dayanıklıdır. Aşağıda maddeler halinde bu çalışmada elde edilen sonuçlar sıralanmıştır;

- i. Ham siderite uygulanan kalsinasyon işlemi cevherin öğütme davranışlarında büyük farklılıklara yol açmıştır. Kalsine edildikten sonraki cevherin ham siderite nazaran çok daha kolay öğütüldüğü ortaya çıkarılmıştır. Hatta bu iyileşme kalsine sideritin ham siderite göre değirmene hacimce %40 oranında daha fazla beslenmesi durumunda gerçekleşmiştir.
- ii. Konvansiyonel ısıtma yöntemiyle yapılan kalsinasyon işlemi neticesinde meydana gelen %31.01 ağırlık kaybı malzemenin hem tesis içerisinde hem de tesis dışındaki nakliye maliyetlerinde büyük kazanımlar doğuracaktır.
- iii. Siderit cevheri için en uygun kalsinasyon prosesinin 700 °C sıcaklıkta ve 15 dakika süreyle yapılması gerektiği tespit edilmiştir.

- iv. Kalsinasyon işlemi ile sideritteki %37,25 olan Fe tenörü %55,61'e yükseltilmiştir.
- v. Ham siderite mikrodalga ısıma uygulanmış ancak ne sıcaklık artışı ne de ağırlık kaybı tespit edilmemiştir.
- vi. Termal yardımcı olarak %23 sakkaroz eklenen ham sideritin 3 dakikalık ısıma ile 1100 °C sıcaklığa kadar ısıtılması ve tıpkı konvansiyonel yöntemde olduğu gibi kalsinasyon işleminin başarıyla sonuçlandığı XRD desenleri ile de tespit edilmiştir. Ancak manyetik duyarlılık dengesi bakımından mikrodalga ile elde edilen kalsine sideritin konvansiyonel yöntemle nazaran yaklaşık %23 düzeyinde daha düşük değere sahiptir.
- vii. Üç farklı pelet hammaddesi içerisine (90 dakika süreyle öğütülen ham ve kalsine siderit ve 60 dakika süreyle öğütülen kalsine siderit) ağırlıkça %7,50 - %8,25 - %9 - %10 - %10,75 oranlarında bentonit içeren pelet keki karışımlarından imal edilen ürün peletlerde yapılan basma dayanımı testlerinden en yüksek sonucun kalsine edildikten sonra 90 dakika öğütülerek ağırlıkça %9 bentonit ile katkılanan peletler olduğu tespit edilmiştir. Bu pelette en yüksek basma dayanımı 268 kgf olarak belirlenmiştir. Bu pelet diğerlerine nazaran ortalama %28 oranında daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.
- viii. Bilindiği üzere yüksek fırın şarj malzemesi olan peletlerin dayanımları fırınların şarj miktarını belirlemektedir. Yüksek fırınlara malzeme şarjı en alt zondaki peletlerin kırılmayacağı miktarda yapılmaktadır. Elde ettiğimiz daha dayanıklı peletler sayesinde yüksek fırın şarj miktarı (yüksekliği) da artırılabilir. Bu da bir seferde daha fazla ham çeliğin daha az maliyetle üretilmesini sağlayacaktır.
- ix. Hammaddenin daha az öğütülmesi ve pelet keki hazırlamak için çok büyük olan -150+75 µm boyutlu malzemelerin değerlendirilmesi için %23 üre katkısıyla ve mikrodalga ısımasıyla pelet elde edilmiştir. Bu yöntem öğütme maliyetlerinin aşağı çekme açısından umut vadeden bir yöntemdir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Anonim. (2014). *Demir ve demir dışı metaller meclisi sektör raporu*. TOBB, Ankara.
- [2] M. Celikdemir, M. Sarikaya, T. Depci and R. Aydogmus, *Influence of Microwave Heating and Thermal Auxiliary on Decomposition of Siderite*, **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**. 44:5 (2016) 52002-52005.
- [3] Anonim. (2014). *Demir çelik sektör raporu*. T.C. Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı, Hatay.
- [4] Anonymous. (2016). *Steel Statistical Yearbook 2016*. World Steel Association Economics Committee, Belgium.
- [5] Ertun, A., Tulukoğlu ve M., Çavuş, S., (1977). *Deveci (Hekimhan-Malatya) sideritleri teknolojik değerlendirme etüdü*. Rapor no:5861, MTA, Ankara.
- [6] Ertun, A. Özmerih, L., Çavuş, S., and Efes, Z., (1980). *Pilot scale studies on calcination of Deveci siderites*. Rapor no:6782, MTA, Ankara.
- [7] Ateşok, G., Emrulloğlu, F., Gül, A., Perek, T. ve Dinçer, H., (1999). Deveci siderit cevherlerinin değerlendirilmesinde farklı bir yaklaşım (pp:395-402). *Türkiye 16. Madencilik Kongresi*, Maden Mühendisleri Odası, Ankara.
- [8] I. Znamenackova, M. Lovas, A. Mockovciakova, and J. Briancin, *Modification of magnetic properties of siderite ore by microwave energy*, **Separation and Purification Technology**. 43:2 (2005) 169-174.
- [9] S. A. Feshchenko, V. I. Pleshkov, K. N. Saveiko and A. V. Buev, *The use of siderites in blast furnaces operated on unfluxed pellets*, **Metallurgist**. 50:7 (2006) 419-425.
- [10] Dilek Alkaç. *Modification of magnetic properties of siderite by thermal treatment*. Master's thesis, Middle East Technical University, Turkey, 2007.
- [11] P.A.Olubambi, J. H. Potgieter, J. Y. Hwang and S. Ndlovu, *Influence of microwave heating on the processing and dissolution behaviour of low-grade complex sulphide ores*, **Hydrometallurgy**. 89:1-2 (2007) 127-135.
- [12] A. G. Zhunev and B. P. Yur'ev. *Sintering of Bakal siderite ore*, **Steel in Translation**. 40:7 (2010) 629-633.
- [13] Z. Feng, Y. Yu, G. Liu and W. Chen, *Kinetics of the thermal decomposition of Wangjiatan siderite*, **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**. 26:3 (2011) 523-526.
- [14] Akdağ, M., Yersel E., Tufan B. ve Erdoğan N. (2010). Beneficiation of Deveci Siderite Ores by Calcination and Reduction Processes (pp:1-10). *XIIth. International Mineral Processing Symposium*, Hacettepe Üniversitesi, 6-8 Ekim, Nevşehir.
- [15] M. Omran, T. Fabritius, A. M. Elmahdy, N. A. Abdel-Khalek, M. El-Aref and A. E. Elmanawi, *Effect of microwave pre-treatment on the magnetic properties of*

iron ore and its implications on magnetic separation, **Separation and Purification Technology**. 136:1 (2014) 223-232.

- [16] Y. H. Luo, D. Q. Zhu, J. Pan and X. L. Zhou, *Thermal decomposition behaviour and kinetics of Xinjiang siderite ore*, **Mineral Processing and Extractive Metallurgy**. 125:1 (2016) 17-25.
- [17] A. S. Vusikhis, L. I. Leont'ev, D. Z. Kudinov and V. S. Gulyakov, *Metallization of siderite ore in reducing roasting*, **Russian Metallurgy (Metally)**. 2016:1 (2016) 404-408.
- [18] V. I. Matyukhin, V. V. Shatsillo, A. V. Kuznetsov, D. V. Rybakin and A. F. Krokhaev, *Evaluating the thermal efficiency of a shaft furnace for roasting siderite ore*, **Metallurgist**. 61:1-2 (2017) 3-11.
- [19] X. Zhang, Y. Han, Y. Li and Y. Sun, *Effect of heating rate on pyrolysis behavior and kinetic characteristics of siderite*, **Minerals**. 7:11 (2017) 211-223.
- [20] Z. Bojarski and E. Barszcz. *An electron probe microanalyzer investigation on phase reactions during firing of iron ore pellets*, **Crystal Research&Technology**. 7:6 (1972) 673-678.
- [21] L. Qian, Y. Yong-bin and J. Tao, *Study on siderite and limonite pellets preparation technology*, **Mining and Metallurgical Engineering**. 2009:2 (2009).
- [22] Sevinç, N. ve Tosun, Y., (1988). Hekimhan Siderit Demir Cevheri Tozundan Pelet Üretilmesi (pp:302-325). 5. *Metalurji Kongresi*, The Chamber of Metallurgy Engineers, Kasım 21-25, Ankara.
- [23] Anonymous. (2017). <https://www.mindat.org/min-3647.html> (on-line access on 16 Aug 2017)
- [24] Anonymous. (2017). <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/siderit> (on-line access on 17 Aug 2017)
- [25] Anonymous. (2017). <https://en.wikipedia.org/wiki/Siderite> (on-line access on 19 Aug 2017)
- [26] W. Liang, Y. Yin, Z. Li, R. Li, L. Li, Y. He, H. Dong, Z. Li, S. Yan, S. Zhai and H. Li, *Single crystal growth, crystalline structure investigation and high-pressure behavior of impurity-free siderite (FeCO₃)*, **Phys Chem Minerals**. 45:1 (2018) 1-12.
- [27] Anonymous. (2017). http://www.rocksrock.com.au/wp-content/uploads/2017/02/IMG_0008.jpg (on-line access on 9 Oct 2017)
- [28] F. Seitz, *On the theory of diffusion in metals*, **Acta Cryst**. 3:5 (1950) 355-363.
- [29] H. Borchert, *Über faziestypen von marinen eisenerzlagertstätten*, **Ber. Geol. Ges. DDR**. 9:2 (1964) 163-193.
- [30] K. E. İzdar, *Hekimhan – Deveci demir madeni, jönezi ve rezervi*, **Madencilik**. 8:2 (1969) 64-79.

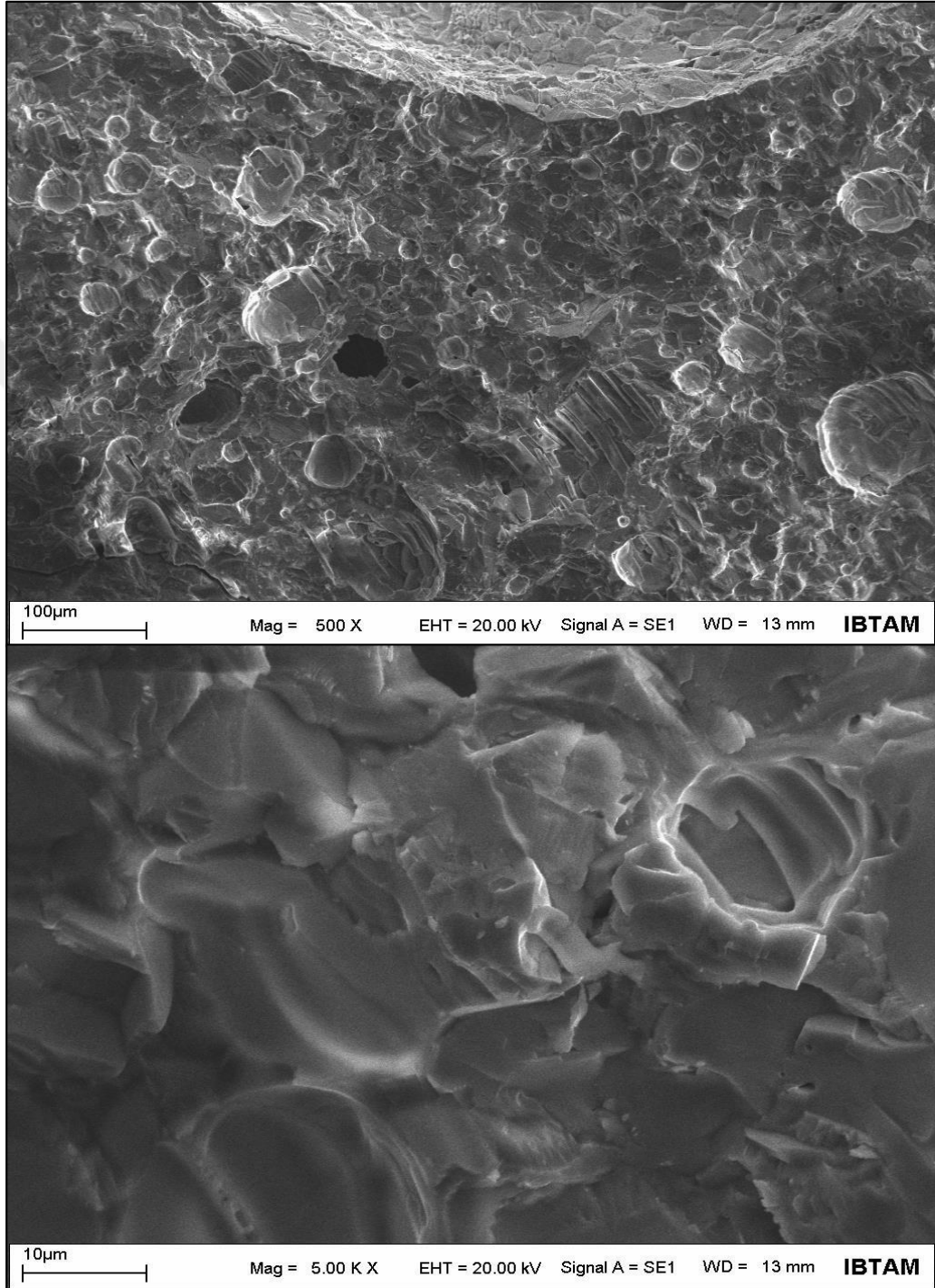
- [31] Anonim. (2015). *Onuncu beş yıllık kalkınma planı madencilik politikaları özel ihtisas komisyon raporu*. DPT, Ankara
- [32] Anonymous. (2018). <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/Demir.pdf> (on-line access on 9 Jun 2018)
- [33] Anonim. (2001). *Sekizinci beş yıllık kalkınma planı madencilik özel ihtisas komisyonu metal madenler alt komisyonu demir çalışma grubu raporu*. DPT, Ankara
- [34] Anonymous. (2018). <http://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/kesfedilen-maden-sahalari> (on-line access on 28 May 2018)
- [35] Kutluay, N. ve Şeşen, N., (1978). *Malatya-Hekimhan-Deveci siderit (demir) yatağı rezerv raporu*. Rapor no:6235, MTA, Ankara.
- [36] A. M. C. Sengör and Y. Yilmaz. *Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach*, **Tectonophysics**. 75:3-4 (1981) 181-241.
- [37] Ö. F. Gurer. *Hekimhan-Hasançelebi yöresinin Üst Kretase stratigrafisi ve havza evrimi*, **Türkiye Jeoloji Bülteni**. 37:2 (1994) 135-148.
- [38] E. Dizdar, *Doğu Hekimhan - Hasançelebi (Doğu Anadolu) bölgesinin jeolojik yapısı, magmatizma ve cevher yatakları*, **MTA Dergisi**. 112:1 (1963).
- [39] Celikdemir, M., Sarikaya, M., Depci, T., Aydogmus, R. and Yucel, A., (2018). Calcination and pelletizing of siderite ore. In: Shatokha, V. (Ed.), *Iron Ores and Iron Oxide Materials*. Intech Open, London.
- [40] X. Zhang, *Effect of heating rate on pyrolysis behavior and kinetic characteristics of siderite*, **Minerals**. 7:11 (2017) 211-223.
- [41] L. Chai and A. Navrotsky. *Enthalpy of formation of siderite and its application in phase equilibrium calculation*, **American Mineralogist**. 79:9-10 (1994) 921-929.
- [42] Ö.Y. Toraman ve T. Depci. *Kömürde mikrodalga ile ön işlem uygulamaları*, **Madencilik**. 46:3 (2007) 43-53.
- [43] D. A. Jones, T. P. Lelyveld, S. D. Mavrofidis, S. W. Kingman and N. J. Miles, *Microwave heating applications in environmental engineering-a review*, **Resources, Conservation & Recycling**. 34:2 (2002) 75-90.
- [44] Anonymous. (2017). <https://wiki.anton-paar.com/en/microwave-assisted-synthesis/> (on-line access on 05 Oct 2017)
- [45] S. W. Kingman and N. A. Rowson. *The effect of microwave radiation on the magnetic properties of minerals*, **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**. 35:3 (2000) 144-150.
- [46] Anonymous. (2017). [http://www.hekimhanmadencilik.com.tr/Album/5/fotograflar#prettyPhoto\[galleri\]/5/](http://www.hekimhanmadencilik.com.tr/Album/5/fotograflar#prettyPhoto[galleri]/5/) (on-line access on 22 Nov 2017)
- [47] Anonymous. (2017). <http://pmai.co.in/pellet-technology/> (on-line access on 21 Apr 2017)

- [48] O. A. Mohamed, M. E. H. Shalabi, N. A. El-Hussiny, M. H. Khedr and F. Mostafa, *The role of normal and activated bentonite on the pelletization of barite iron ore concentrate and the quality of pellets*, **Powder Technology**. 130:1-3 (2003) 277-282
- [49] N. Yıldız, *Demir cevherinin peletlenmesi*, **Madencilik**. 29:1 (1990) 17-32.
- [50] K.W. Ye, *The present state and the forecasting of our country pelletizing industry*, **Sinter. Pelletizing**. 28:1 (2003) 1–4.
- [51] K.W. Ye, *Review of three kinds of pelletizing process*, **Sinter. Pelletizing** 27:1 (2002) 4–7.
- [52] Anonymous. (2018). http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/2a35cd5dbe7937a_ek.pdf
(on-line access on 11 Jun 2018)
- [53] Anonymous. (2013). *2011 Minerals Yearbook*. United State Geological Survey, USA.
- [54] Tupkary, R.H. and Tupkary V. R. (1985). *Introduction to Modern Iron Making*. Khanna Publishers, Delhi, India, 307 p.
- [55] N. Yıldız, *Demir cevherinin peletlenmesi*, **Madencilik Türkiye**. 41:1 (2014) 88-92.
- [56] T. Eisel and S. Kawatra, *A review of binders in iron ore pelletization*, **Miner Process Extr Metal Rev**. 24:1 (2003) 1-90.
- [57] S. L. Moraes, J. R. B. Lima and J. B. F. Neto, *Influence of dispersants on the rheological and colloidal properties of iron ore ultrafine particles and their effect on the pelletizing process—A review*, **Journal of Materials Research and Technology**. 2:4 (2013) 386-391.
- [58] Meyer, K. (1980). *Pelletizing of Iron Ores*. Springer-Verlag, Berlin, Germany etc., 302 p.
- [59] Anonymous. (2018). <https://celluloseethers.akzonobel.com/siteassets/20170904-download-celluloseethers-peridur.pdf> (on-line access on 14 Jun 2018)
- [60] Lotta Casey. *Organic binders for iron ore pelletization*. Master's thesis, Aalto University, Finland, 2016.
- [61] Myers, D. (1990). *Surfaces, interfaces and colloids*. Wiley-Vch, New York, USA etc., 528 p
- [62] Holtz R. D. and Kovacs W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA, 733 p
- [63] Anonymous. (2018). <https://www.mindat.org/min-2821.html> (on-line access on 16 Jun 2018)
- [64] M. Ghadiri, W. Chrzanowski and R. Rohanizadeh, *Biomedical applications of cationic clay minerals*, **RSC Advances**. 5:37 (2015) 29467-29481.
- [65] Geerdes M., Toxopeus H. and Vliet C., (2015). *Modern Blast Furnace Ironmaking: an introduction*. IOS Press BV, Amsterdam, Netherlands, 217 p

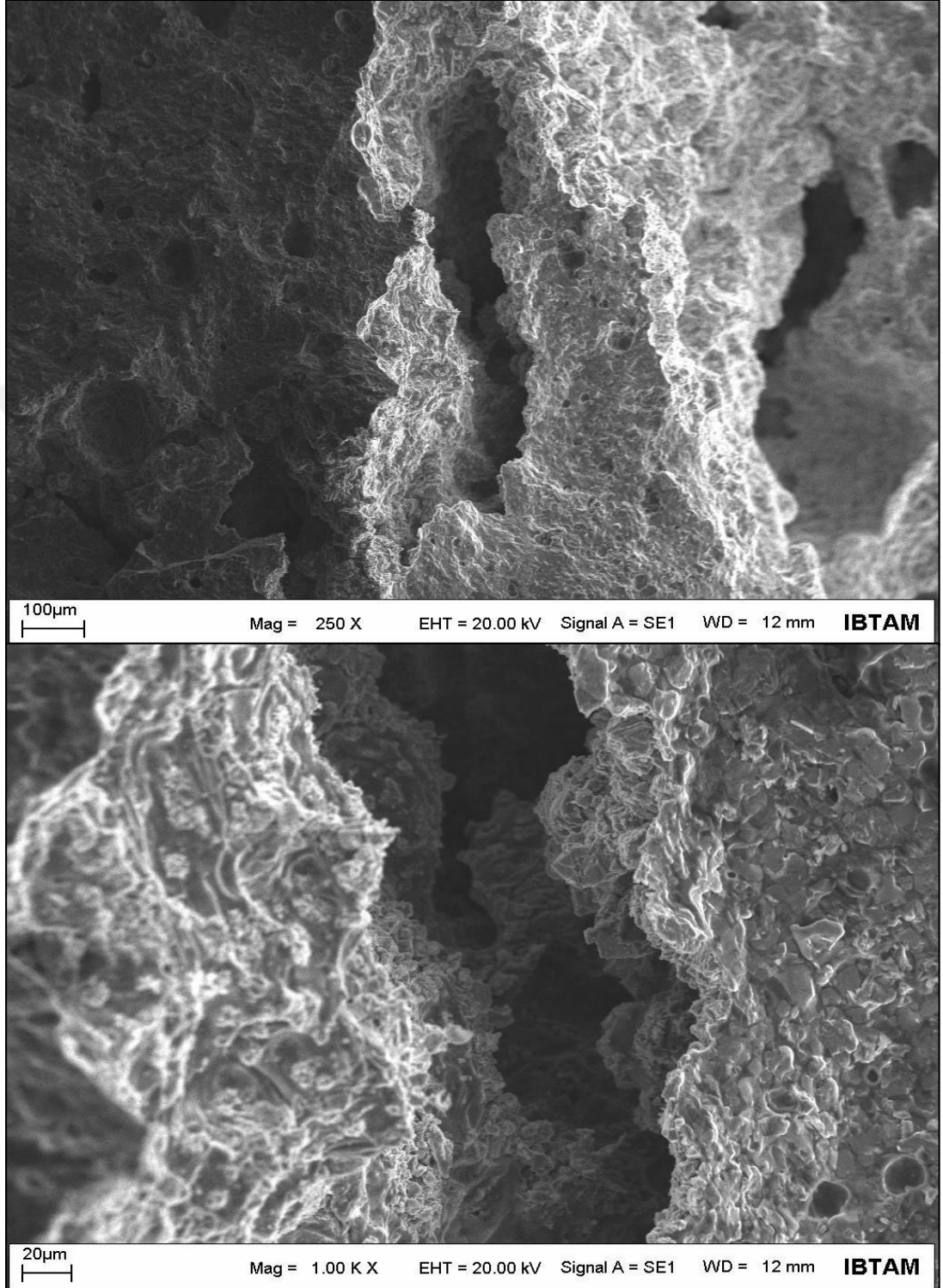
- [66] Anonymous. (2018). <https://www.lkab.com/en/about-lkab/from-mine-to-port/processing/> (on-line access on 10 Feb 2018)
- [67] Anonymous. (2018). <http://www.outotec.com/products/sintering-and-pelletizing/pelletizing-drum/> (on-line access on 01 Apr 2018)
- [68] Anonymous. (2018). <http://feeco.com/disc-pelletizer-360-view/> (on-line access on 01 Apr 2018)
- [69] Anonymous. (2018). <https://www.metso.com/products/iron-ore-pelletizing/roller-screening/> (on-line access on 02 Apr 2018)
- [70] Anonymous. (2018). <https://drive.google.com/file/d/0BzUpwBw3KDA-MG41QmhScy1TNms/view> (on-line access on 21 Apr 2018)
- [71] Anonim. (2001). *Entegre kirlilik önleme ve kontrol (IPPC) – Demir ve çelik üretiminde en iyi teknolojiler referans dökümanı*. Demir Çelik Üreticileri Derneği, Ankara.
- [72] Şengül Coşar. *Demir konsantrelerinin peletlenmesinde bor minerallerinin ve atıklarının kullanımının araştırılması*. Master Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2006.
- [73] S. K. Patel, *Reduction and swelling of fired hematite iron ore pellets by non-coking coal fines for application in sponge ironmaking*, **Mineral Processing & Extractive Metall. Rev.** 34:1 (2013) 249-267.

7. EKLER

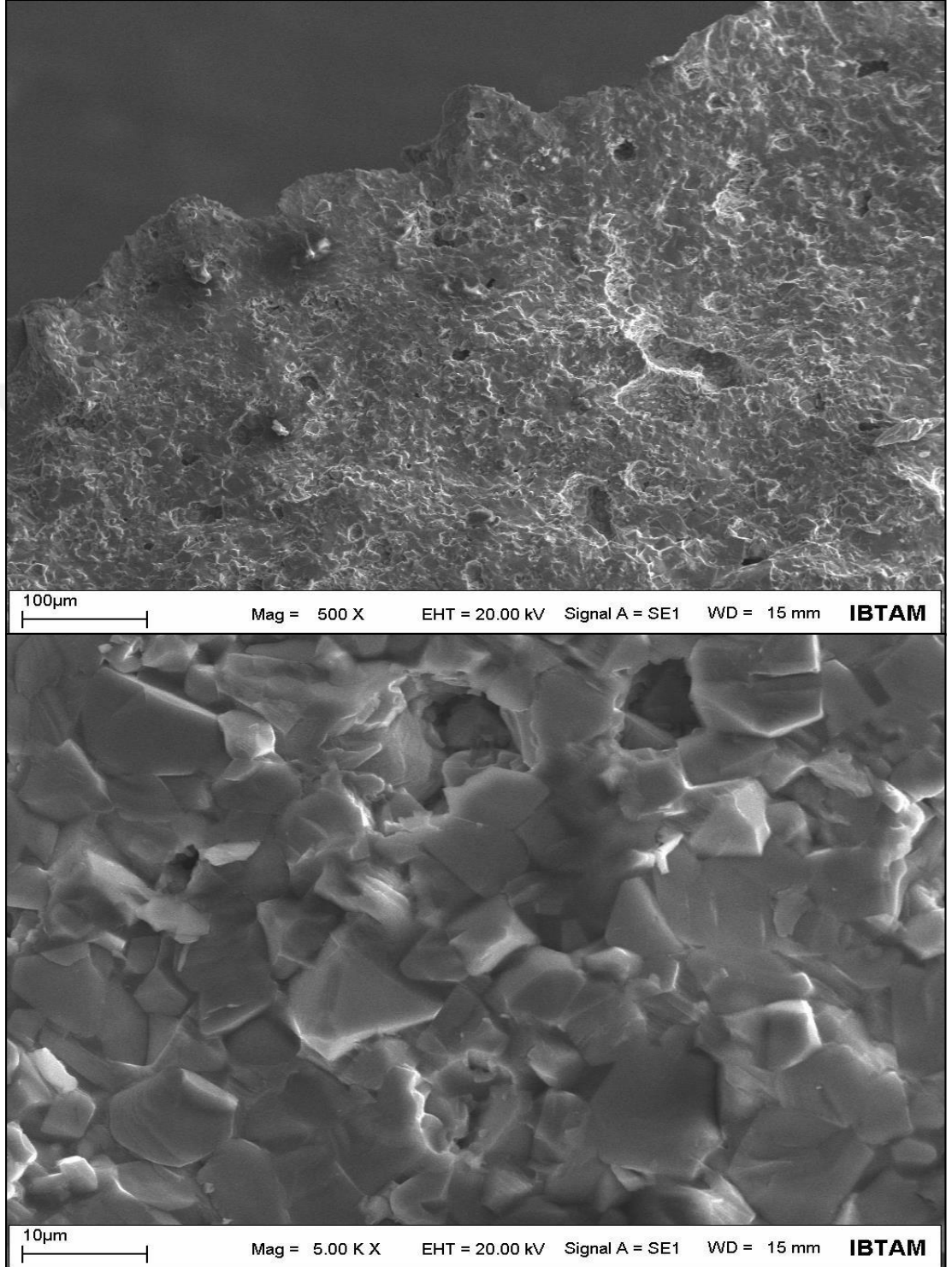
EK 1. Ürün pelet SEM görünümü (Ham Siderit – 90 dakika öğütme - %7,50 bentonit)



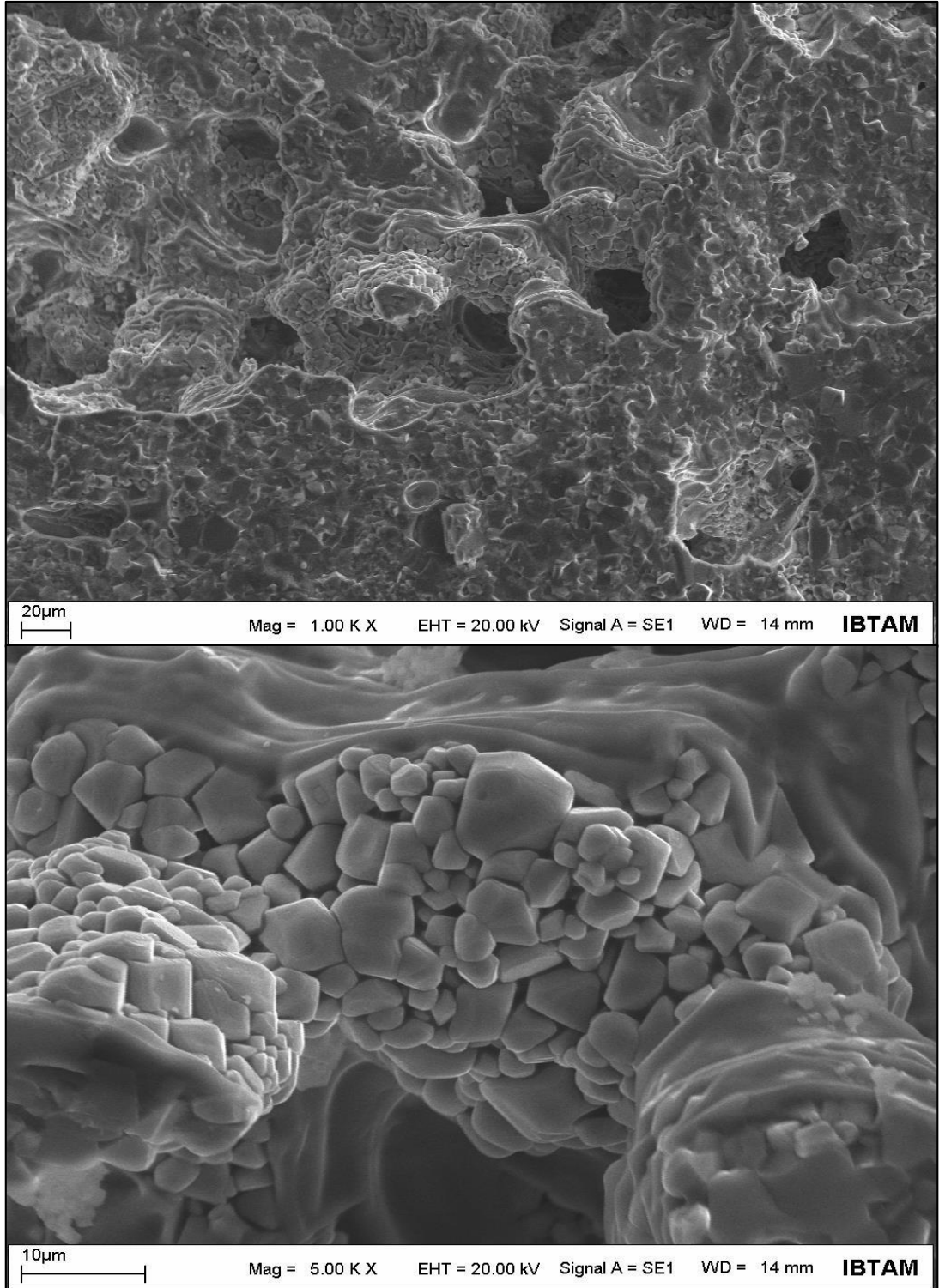
EK 2. Ürün pelet SEM görünümü (Ham Siderit – 90 dakika öğütme - %9 bentonit)



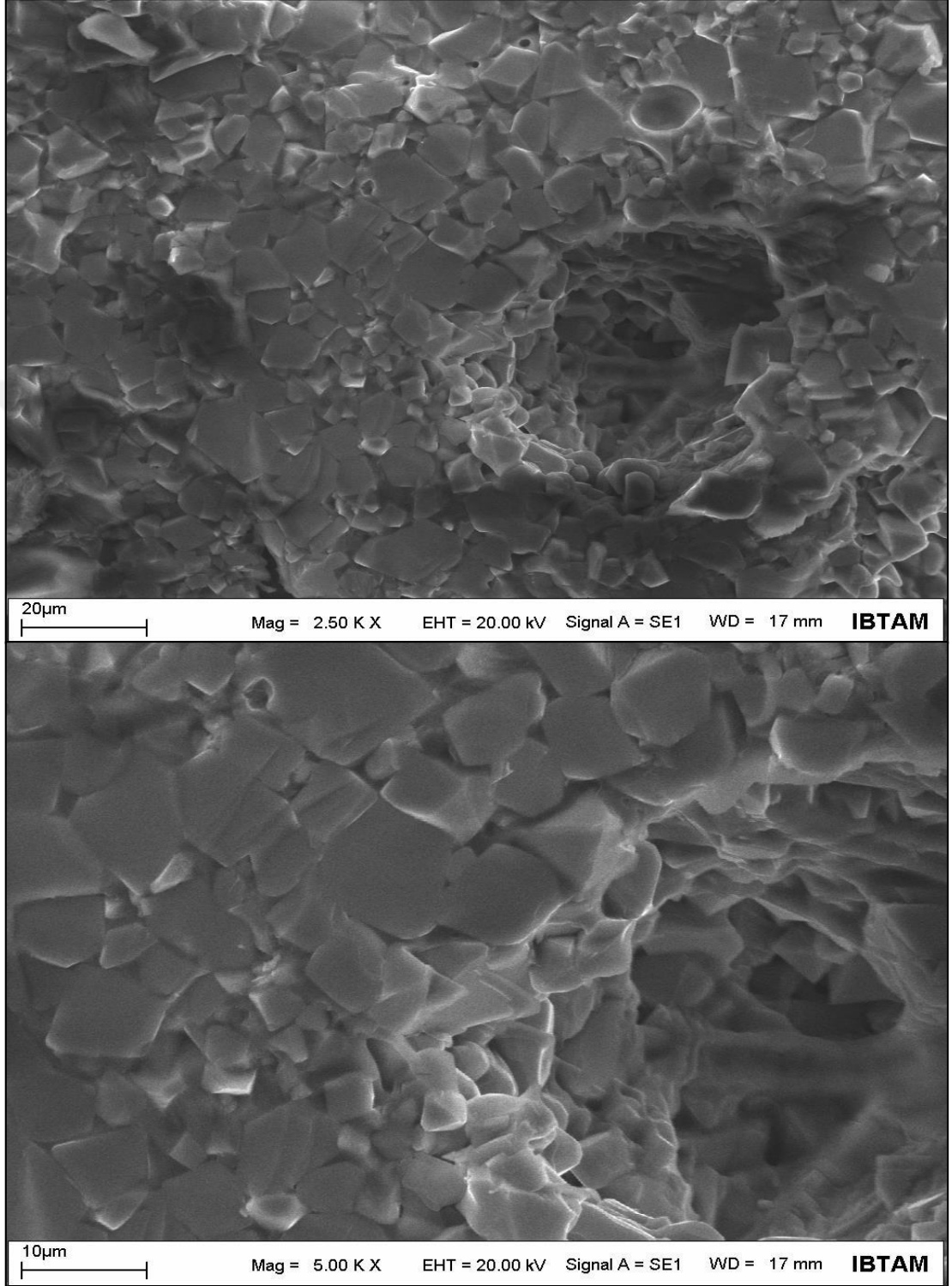
EK 3. Ürün pelet SEM görünümü (Kalsine Siderit – 60 dakika öğütme - %7,50 bentonit)



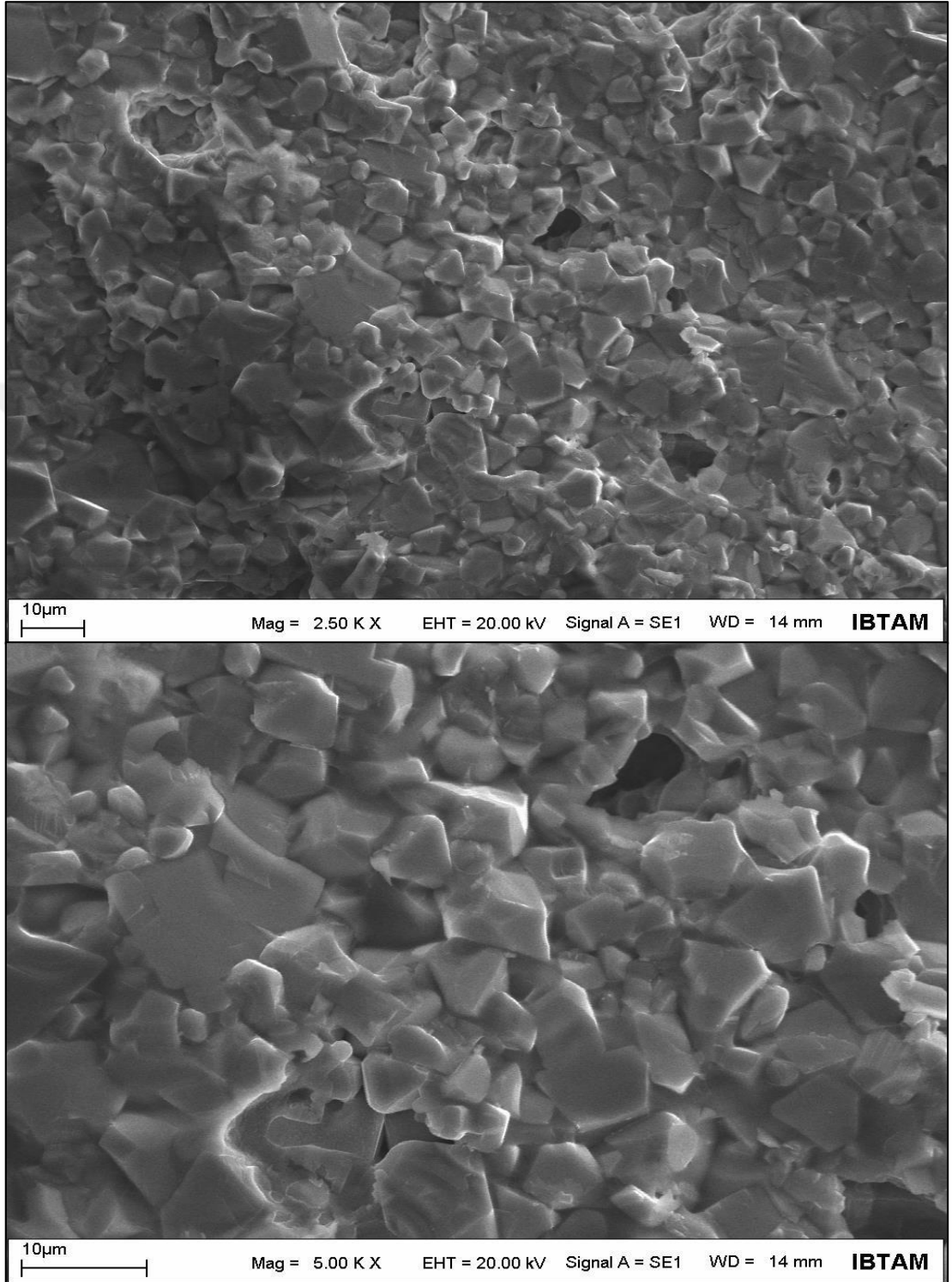
EK 4. Ürün pelet SEM görünümü (Kalsine Siderit -60 dakika öğütme - %10,75 bentonit)



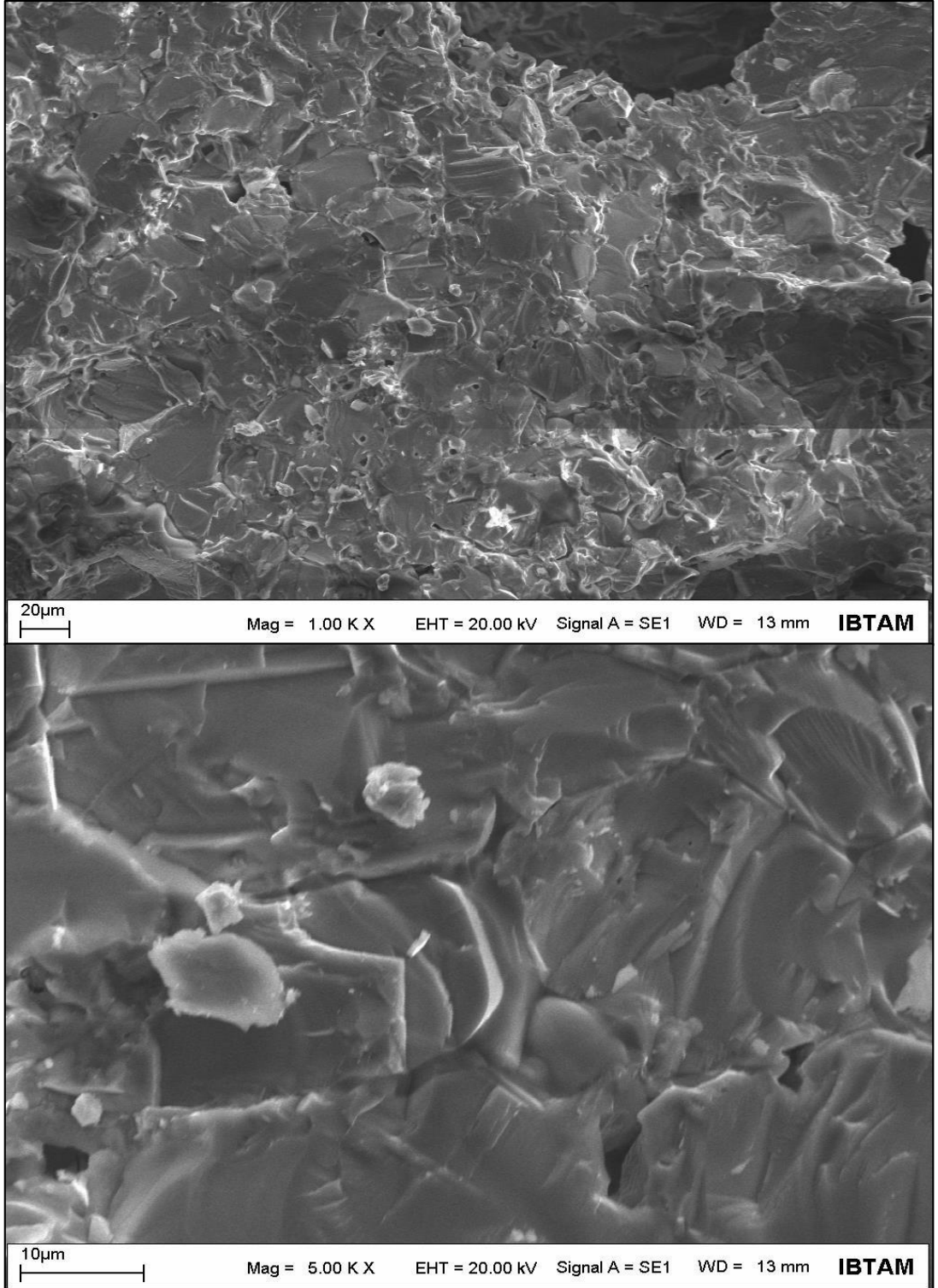
EK 5. Ürün pelet SEM görünümü (Kalsine Siderit -90 dakika öğütme - %7,50 bentonit)



EK 6. Ürün pelet SEM görünümü (Kalsine Siderit -90 dakika öğütme - %9 bentonit)



EK 7. Ürün pelet SEM görünümü (Kalsine Siderit - 90 dakika öğütme - %10,75 bentonit)



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet ÇELİKDEMİR
Doğum Yeri ve Tarihi : Elazığ – 1990
Adres : Merkez / ELAZIĞ
E-Posta : celikdemirmehmet@gmail.com
Lisans : Maden Mühendisliği / İşletme Bölümü

Yayın Listesi

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

1. M. Celikdemir, M. Sarikaya, T. Depci and R. Aydogmus, *Influence of Microwave Heating and Thermal Auxiliary on Decomposition of Siderite*, **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**. 44:5 (2016) 52002-52005.
2. Celikdemir, M., Sarikaya, M., Depci, T., Aydogmus, R. and Yucel, A., (2018). Calcination and pelletizing of siderite ore. In: Shatokha, V. (Ed.), *Iron Ores and Iron Oxide Materials*. Intech Open, London.