



Hematite particles' radiative properties within the ultraviolet-visible spectrum and thermal properties at low temperatures

Agah Aygahoğlu¹, Nimeti Döner^{2*}, Ali Rıza Pargan¹

¹Mechanical Engineering Department, Kutahya Dumlupınar University, Kutahya, 43270, Turkey

²Mechanical Engineering Department, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

Highlights:

- Debris aged iron microparticles
- Hematite absorption measurements
- Thermal conductivity measurements

Keywords:

- Iron oxides
- Hematite
- Absorption
- Radiative
- Thermal conductivity

Article Info:

Research Article
Received: 20.02.2020
Accepted: 18.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.691904

Correspondence:

Author: Nimeti Döner
e-mail:
nimetidoner@gazi.edu.tr
phone: +90 312 582 3424

Graphical/Tabular Abstract

The radiative properties within the UV and the visible wavelength range and the thermal properties at low temperatures of hematite (α -Fe₂O₃) samples were investigated. The two samples, which have different chemical properties, are referred to as Case 1 and Case 2 and were separated according to particle sizes by sieve analysis. The absorbance-wavelength change and the thermal conductivity-temperature change of the samples of the smallest, medium and the largest particle sizes were analysed. The coating on particles due to the aging effect was examined using scanning electron microscopy (SEM) images. In our study, the thermal properties of waste iron particles, which differ from those featured in previous studies in the literature in terms of particle size and content, were analysed by both absorption and thermal conductivity measurements. The absorption effects of the oxidation area on the particles were calculated, and the thermal conductivity properties were examined. In terms of the radiative properties, whereas the absorption values of the small diameter samples (32 and 56 μ m) are close to each other, the absorption values of the large diameter samples (250 μ m) are approximately 1.5 times higher than the others. The thermal conductivity properties were measured with two different devices. The Hot Disk TPS2500S (Thermal Constant Analyzer-TCA) device was used to measure the k_e conductivity, the specific heat and thermal diffusion coefficients of the particles. The P.A. Hilton experimental set-up was used to thermal conductivity measurements in low-temperature ranges (30–50 °C). Our experimental studies revealed that the thermal conductivity of the hematite samples underwent high order polynomial changes, and this change is linear in the small temperature range. In addition, the thermal conductivity values differ significantly according to the Mn, P, Si, Al, Cr and Cu components. If these components are present in large amounts, the thermal conductivity coefficient takes high values. The absorbance property effects of particle size are more pronounced than those of thermal conductivity.

Table A. The experimental results of the thermal properties of the hematite particles at room temperature

		Case 1			Case 2		
		k_e (W/mK)	C_p (MJ/m ³ K)	α (mm ² /s)	k_e (W/mK)	C_p (MJ/m ³ K)	α (mm ² /s)
Particle size (μ m)	37	0.054	0.5448	0.1138	0.056	0.4090	0.1388
	56	0.046	0.1628	0.2816	0.054	0.4253	0.1270
	125	0.052	0.2854	0.1883	0.063	0.6081	0.1078

Purpose: The aim of this study is to investigate the radiative properties within the visible spectrum and thermal properties at room temperature of aged hematite particles based on particle size.

Theory and Methods:

The absorbance-wavelength change and the thermal conductivity-temperature change of the hematite samples of the smallest, medium and the largest particle sizes were measured.

Results:

Radiative and thermal properties of debris hematite particles increase as the particle size increases. However, the radiative property decreases with increasing wavelength, and the thermal conductivity property decreases with increasing temperature.

Conclusion:

The absorption effect of particle size is more evident than that of thermal conductivity.



Hematit parçacıkların kısa ve görünür dalga boyundaki ışıınım ve düşük sıcaklıklardaki ısı özellikleri

Agah Aygahoğlu¹, Nimeti Döner^{2*}, Ali Rıza Pargan¹

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 43270 Kütahya, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Atık yaşlanmış demir mikro parçacıklar
- Hematit soğurma ölçümleri
- Isıl iletkenlik ölçümleri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 20.02.2020
Kabul: 18.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.691904

Anahtar Kelimeler:

Demir oksitler,
hematit,
soğurma,
ışıınım,
ısı iletkenlik

ÖZET

Bu çalışmada 900-1100°C sıcaklıklarda basınçlı alın kaynak (flash butt welding) işlemi sonucunda oluşan ve sistem dışına atılan demir tozlarının, kısa ve görünür dalga boyu aralığındaki ışıınım özellikleri ve düşük sıcaklıklardaki ısı iletkenliği incelenmiştir. Hematit yapısında olan atık demir tozları elek analizi ile parçacık büyüklüklerine göre ayrıştırılmıştır. Parçacık büyüklüğü en küçük, orta ve en büyük olan çeşitli büyüklüklerdeki numunelerin soğurma (absorbans)-dalga boyu değişimi ve ısı iletkenlik-sıcaklık değişimi incelenmiştir. Hematit (α -Fe₂O₃) parçacıklarının, yaşlanma sürecinde oluşan oksidasyon bölgeleri SEM görüntüleri ile tespit edilmiştir. Parçacıkların içeriği ve büyüklüğü ile oksitlenme etkisi, numunelerin ışıınım özelliklerinin dalga boyu ile değişiminde ve ısı iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişiminde etkili olduğu görülmüştür. Atık hematit parçacıklarının ışıınım ve ısı iletim özellikleri parçacık büyüklüğü arttıkça artmaktadır. Ancak ışıınım özelliği artan dalga boyu ile ısı iletim özelliği de artan sıcaklıkla azalmaktadır.

Hematite particles' radiative properties within the ultraviolet-visible spectrum and thermal properties at low temperatures

H I G H L I G H T S

- Debris aged iron micro particles
- Hematite absorption measurements
- Thermal conductivity measurements

Article Info

Research Article
Received: 20.02.2020
Accepted: 18.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.691904

Keywords:

Iron oxides,
hematite,
absorption,
radiative,
thermal conductivity

ABSTRACT

The radiative in the UV and visible spectra and the conductivity properties at low temperatures of hematite (α -Fe₂O₃) samples of different particle size distributions and compositions obtained by the pressure welding procedure within temperatures of 900-1100°C were investigated. In this study, the two samples which have different chemical properties were called as Case 1 and Case 2. Debris iron oxides samples, which are in the morphology of hematite, were separated according to particle sizes by sieve analysis. The absorbance-wavelength change and the thermal conductivity-temperature change of the samples of, the smallest, medium and largest of which the particle size were analysed. The coating on particles due to the aging effect was examined using scanning electron microscopy (SEM) images. It has been concluded that the content and size of the particles and the oxidation effect are effective in the variation of the radiation properties of the samples with the wavelength and the temperature of the thermal conductivity coefficient. Radiative and thermal transfer properties of debris hematite particles increase as the particle size increases. However, the radiative property decreases with increasing wavelength and the thermal conductivity property decreases with increasing temperature.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: agah.aygahoglu@dpu.edu.tr, nimetidoner@gazi.edu.tr, alipargan@gmail.com /

Tel: +90 312 582 3424

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstride en çok kullanılan metal oksitler arasında bulunan demir oksitler, hematit (α -Fe₂O₃), manyetit (Fe₃O₄), maghemit (γ -Fe₂O₃) ve goethite (α -FeOOH) olarak sınıflandırılır. Demir tozlarının, ısıtma işlemleri ile değişen ısıtma ve yapısal özellikleri ve *n*-tipi yarı iletken özellikleri çeşitli araştırmalar ile tespit edilmiştir [1-3]. Ayrıca, demir oksitlerin heterojen reaksiyonlara katıldıkları ve soğurma özellikleri nedeniyle, ısıtma dengesini etkiledikleri de tespit edilmiştir [4]. Çeşitli uygulama alanlarına sahip demir oksitler, gaz sensörlerinde, fotoelektrokimyasal hücrelerde fotoanod malzemesi olarak, yüksek yoğunluklu kaplama işleminde parlak ve korozyon önleyici madde olarak kullanılmaktadır [5].

Demir tozlarının ısıtma özellikleri ile ilgili, geçen yarım yüzyılda yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda ısıtma özelliklerini inceleyenler, az sayıda olmaları sebebiyle, özellikle bahsedilecektir. Hsu ve Matijević büyüklükleri 0,1-0,51 μ m olan küresel hematit parçacıklarının, görünür dalga boyu aralığı 380-700 nm'deki ısıtma özelliklerini deneysel olarak incelemişler ve Mie Teorisi sonuçları ile karşılaştırmışlardır [6]. Yazarlar bu çalışmaları sonucunda, hematit parçacıklarının yok olma (soğurma ve saçılmanın toplamı) özelliğinin parçacık çapı arttıkça arttığını, hem deneysel hem de hesaplama sonuçları ile tespit etmişlerdir.

Hematitin (α - ve γ -) yapısal özelliklerinin soğurma özelliğine etkileri Cherepy vd., [7] ile Lu vd., [8] tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmalarda, mikron seviyesinin altındaki büyüklüklere sahip hematit parçacıklarının metal ve oksijen etkileşimi incelenmiştir. Bedidi ve Cervelle, 400-700 nm dalga boyu aralığında, hava ve su ortamında çapları 0,010-0,50 μ m olan hematit parçacıklarının saçılma ve soğurma özelliklerini çalıştılar [9]. Buna göre; ısıtma özellikleri parçacık büyüklüğü ve dalga boyundan etkilenmektedir. Muñoz vd., hematit ve rutil parçacıklarının optik özelliklerini deneysel ve sayısal yöntemlerle analiz ettiler [10]. Çalışmalarında, 632,8 nm dalga boyunda yansıtma indeksinin ($m = n + ki$) saçılma özelliklerine etkilerini, *n* ve *k* 'nin farklı değerleri için ayrıntılı incelediler. Bu değerlendirme ile, yansıtma indeksinin saçılma özelliklerine parçacık şeklinden daha fazla etkilediği tespit edilmiştir. Hematit veya goethite gibi demir oksitlerin 0,47, 0,55 ve 0,66 μ m gibi görünür dalga boylarındaki optik özellikleri, Meland ve çalışma arkadaşları tarafından araştırılmıştır [11]. Saçılma etkileri Mie ve T-Matrix yöntemleri ile hesaplanmış ve parçacık şeklinin hematitin saçılma özelliklerini etkilemediği ancak goethite için belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Chakrabarty ve Chatterjee, farklı çözücülerin (örn., Etanol amin, etilen diamin, etilen glikol, asetik asit, etanol ve asetaldehid) hematit parçacıklarının yapısı üzerine etkilerini araştırmışlar ve ısıtma soğurma özelliğinin farklı dalga boylarında bazı yapısal geçişlerden dolayı oluştuğunu tespit etmişlerdir [12]. Chen ve diğerleri, hematit parçacıklarının şekil ve zamana bağlı büyüme

etkilerini araştırdılar [13]. Bunun için farklı çözeltilerde (etanol, saf su, sodyum asetat ilaveli çözeltiler) hematit nanoparçacıklarının organik ya da inorganik olan bazı anyonlarının, büyüme oluşumuna yapısal etkilerini araştırdılar. XRD, SEM ve geçirgenlik-yansıtma ölçümleri sonucunda, demir ve/veya molekül iyonlarının yüzey enerjilerinden dolayı düzensel büyümeye yatkın olduklarını tespit ettiler. Ayrıca, farklı miktarlardaki (0,3; 0,7; 1,2; 2,5 mL) saf su içinde büyüme işlemine tabi tutulan hematit nano yapıların 200-1000 nm dalga boyu aralığındaki yansıtma (reflectance) özelliklerini tespit ettiler. Buna göre, hematitin nanodüzensel yapıdan nanoküresel yapıya doğru değiştiği ve yansıtma özelliğinin 200-600 nm dalga boyu aralığında her yapısal durum için küçük değerler aldığı görülmüştür. Goethite, hematit ve maghemit gibi farklı yapısal karakteristiklere sahip, 0,1 μ m boyutundaki demir oksit parçacıkları, endüstriyel bir proseste yeniden kullanılmak üzere, yapısal ve ısıtma özellikleri bakımından Legodi ve De Waal tarafından analiz edildi [14]. Nano yapıdaki hematitlerin sentezi, karakterizasyonu ve fotoelektrokimyasal özellikleri Wheeler vd. tarafından araştırıldı [15]. Parçacık büyüklüğü 10 nm, 47 nm ve 65 nm olan farklı hematit örneklerinin soğurma ve yansıtma özellikleri, 250-900 nm dalga boyu aralığında He vd. [16] tarafından yapısal geçişlerine göre incelenmiştir.

Paslanmaz çelik ve hematit malzemelerin hava ve su gibi ortamlardaki oksitlenme durumlarını, Degueldre vd. [17] deneysel olarak analiz ettiler. Yazarlar, hematit üzerindeki oksitli tabaka kalınlığı arttıkça, ısıtma özelliklerinin 0,2-0,6 μ m dalga boyu aralığında belirgin bir değişime sahip olduğunu ve 0,6 μ m'den büyük dalga boylarında lineer bir artış olduğunu gösterdiler. Çelik üzerindeki demir oksitli film tabakalarının ısıtma özellikleri, sıcaklık, ortam ve yaşlanma süresi bakımından Goosens vd. [18] tarafından da incelendi. Çeliğin 250°C ve oksijenli bir ortamda, ısıtma sonucu oluşan oksitli bölgeleri ölçülerek analiz edildi. Bu çalışmada Goosens vd. [18], çelik üzerinde hematit ve magnetitin oluştuğunu tespit ettiler ve yansıtma indeksin *n* ve *k* değerlerinin dalga boyuna göre değişimini ölçtüler. Yansıtma indeks değerlerinden *n*'in görünür dalga boyu aralığında 2,5-3 değerlerinde olduğu, *k*'nin 1,5-2,5 aralığında olduğu ve *k* değerinin 2,5'dan 1,5'e hızlı düştüğü görülmektedir. Ayrıca, yazarlar çalışmalarında çelik üzerindeki hematit tabakanın kalınlığının yaşlanma süresi ile azaldığı, magnetit tabaka kalınlığının arttığını tespit ettiler. Farklı kalınlıklardaki (172-367 ve 553 nm) hematit film yüzeylerinin UV ve görünür dalga boyu aralığındaki soğurma ölçümleri Chen ve Tu [19] tarafından çalışıldı. Chen ve Tu [19]'nun yapmış olduğu yaşlanmaya bağlı soğurma ölçüm sonuçlarına göre, 600°C'de 14 / 6 oranlı Ar / O₂ ortamında bozulmaya bırakılan hematit film kaplı yüzeylerin ısıtma soğurma özelliklerinin görünür dalga boyu aralığında yükselişte olduğu görüldü.

Diğer önemli bir özellik olan ısıtma iletkenlik, enerji depolama sistemlerinde etkili bir ısıtma verimliliği sağlamak için önemli bir parametredir. Isıtma enerji depolama sistemlerinin

yüklenme ve boşaltma durumlarında yüksek ısı iletkenlik ve bakım durumlarında düşük ısı iletkenlik özelliklerine sahip olunması gibi farklı çalışma koşullarının sağlanması istenir. Isıl iletkenlik konusunda Akiyama vd. tarafından yapılan kapsamlı çalışmada, ısı işlem öncesi ve sonrası demir oksitlerin ısı iletkenlikleri, ısı yayım katsayıları, gözeneklilik durumları ve ısı dirençleri gibi farklı özellikler araştırılmıştır [20]. Bu çalışmada, demir oksitler yanmış-yanmamış, sinterlenmiş ve magnetik özelliği indirgenmiş durumlar için oda sıcaklığından 1273 K sıcaklığa kadar deneysel olarak incelenmiştir. Isıl iletkenliğin sıcaklığın bir fonksiyonu olduğu, gözeneklilik durumlarının ısı işlem sonuçlarında %20 den %62'e kadar değiştiği, demirin öz ısı iletkenliğinin malzemenin yoğun öz ısı iletkenliğinden daha küçük olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Isıl iletkenlik ile ilgili deneysel çalışmalara dayanarak tanımlanmış çeşitli formüller mevcuttur. Bu formüller ve aralarındaki farklar Akiyama vd. [20]'nin makalesinde ayrıntılı açıklanmaktadır.

Çalışmamızda, literatürdeki önceki çalışmalardan parçacık ve içerik bakımından farklı olan, atık demir tozlarının ısı özellikleri hem soğurma hem de ısı iletkenlik ölçümleri yapılarak analiz edilmiştir. Kimyasal içeriklerine göre, iki tip olan numuneler parçacık büyüklüklerine göre ayrıştırılmıştır. Parçacık büyüklük dağılımına göre 32 µm, 56 µm ve 250 µm büyüklüğündeki numunelerin soğurma ve 37 µm, 56 µm ve 125 µm büyüklüğündeki numunelerin ısı iletkenlik özellikleri ölçülmüştür. Daha önceki yayımlarımızda [21] her iki numunenin aynı çap büyüklükleri için, UV-görünür dalga boyu aralığındaki soğurma ölçümleri yapılmış ve bir numerik yöntemle hesaplanan ışınım etkenlik katsayıları, dalga boyu ve açısal değişim açısından incelenmiş ve numerik sonuçların doğruluğu gösterilmiştir. Bu çalışmada, önceki çalışmamızdan farklı büyüklüklerdeki parçacıkların soğurma ölçümleri yapılmış, oksidasyon bölgesinin soğurma etkileri hesaplanmış ve ısı iletim özelliği üzerine yoğunlaşmıştır. Sonuç olarak, hematit parçacıkların büyüklük ve içeriklerine göre, ışınım ve ısı iletim özelliklerinin değişimini açıklayan ilk Türkçe çalışma olarak hazırlanmıştır.

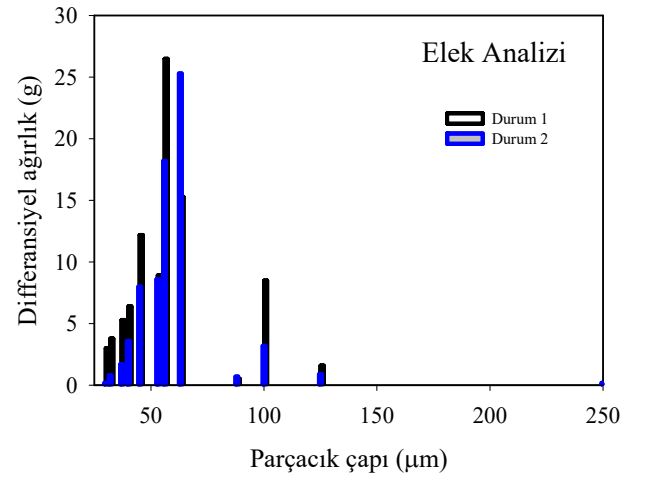
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

2.1. Numunelerin Karakteristik Özellikleri (Characteristic properties of the samples)

Çalışmada kullanılan numuneler düşük ve orta mukavemetli çeliklerdir. Kaynak işlemi öncesindeki kimyasal içeriklerine göre Durum 1 ve Durum 2 olarak isimlendirilmiştir [21] ve bu içerikler Tablo 1'de verilmektedir. Durum 1 numunesinin karbon, mangan, fosfor, krom bileşenleri bakımından hemen

hemen iki kat; silisyum, alüminyum, bakır ve nikel bileşenleri bakımından diğer numuneye göre yaklaşık bir buçuk kat daha fazla olduğu görülmüştür. Özellikle, çelik üretiminde silisyum tane boyutunu küçültmek için kullanılmaktadır ve silisyum miktarı arttıkça çeliğin parçacık büyüklüğü de azalmaktadır. Dolayısıyla, Durum 1 parçacıklarının Durum 2 parçacıklarına göre daha küçük çapta olmaları da silisyum miktarından kaynaklanmaktadır. Kaynak işleminden sonra her iki numunenin XRD yapısal özellikleri incelendiğinde birbirlerine benzer olup, hematit kristal yapısında oldukları görülmüştür.

Elek analizi farklı büyüklükteki parçacıkların bulunduğu malzemelerin tane büyüklüğü dağılımını belirlemek için yapılır. Boyut dağılımı parçacıkların büyüklük ve miktarıyla bağlantılıdır. Bu çalışmada elek analizi için Endecotts firmasının OCTAGON 200 cihazı kullanılmıştır [22]. Durum 1 ve Durum 2 numunelerinin elek analizi sonuçları Şekil 1'de verilmektedir. Elek analizinde, ölçülen çaplara göre standart sapma 63 µm'dir.



Şekil 1. Numunelerin elek analizi sonuçları
(the results of sieve analysis of the samples).

2.2. SEM analizleri (SEM Analysis)

Durum 1 ve Durum 2 numunelerinin yapısal durumları, FEI Nova Nano SEM 650 cihazı ile çekilen SEM görüntüleri ile incelenmiştir. Şekil 2'deki gibi SEM görüntülerinden hematit parçacıklarının küresel oldukları ve oksitlenme bölgelerinin oluştuğu görülmektedir. Kullanılan çeliklerin, endüstriyel işlemdeki ergime sıcaklıkları 900-1150 °C aralığındadır. Endüstriyel işlemdeki elektrik akımı ve süresi, Durum 1 ve Durum 2 numuneleri için sırasıyla 641 A-17 s ve 1256 A-26 s'dir. Hematit parçacıklarının atmosferik

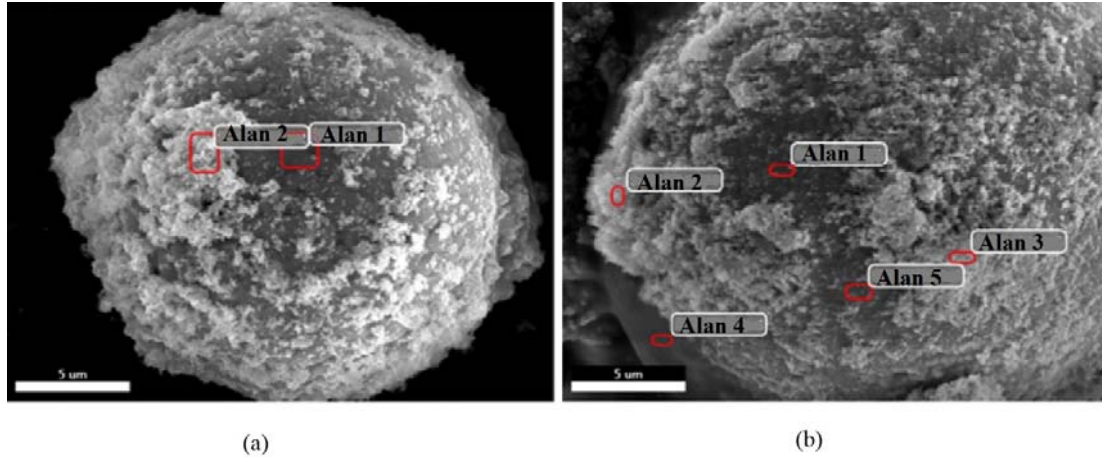
Tablo 1. Numunelerin kimyasal özellikleri (chemical contents of the samples).

İçerik (%)	C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	Ceq	Fe
Durum 1	0,173	0,931	0,024	0,005	0,075	0,049	0,031	0,032	0,040	0,003	0,341	98,299
Durum 2	0,083	0,454	0,012	0,004	0,051	0,040	0,023	0,017	0,035	0,004	0,168	99,109

ortamda yaşlanma nedeniyle oluşan oksitlenme bölgelerinin özellikleri, parçacıkların kimyasal bileşenlerine ve kaynak işleminin akım ve işlem süresine göre değişmektedir. Aşağıda Şekil 2’de her iki numunenin 32 µm çaplı parçacıklarının SEM görüntüleri ve seçilen noktalarındaki EDX içerik analizleri sırasıyla, Tablo 2 ve Tablo 3’de verilmiştir [22]. Şekil 3a’da Durum 1 numunesinin Çap 100 µm ve (b)’de Durum 2 numunesinin Çap 32 µm’deki oksitlenme bölgelerinin yakın çekim görüntüleri sunulmuştur. Şekil 3 c’de ise Durum 2 numunesinde bir parçacık üzerindeki oksitlenme bölgesinin kalınlık ölçümü görülmektedir. Şekil 3a ve Şekil 3b’deki görüntüler,

parçacıkların oksitlenme bölgelerinde nano boyutlarda metal parçacıkların olduğunu göstermektedir. SEM EDX analizleri ile, parçacık üzerindeki bu oksitlenme bölgelerinde genel olarak karbon, manganez ve silisyum oksit ve nano ölçekte diğer metal parçacıklar bulunduğu tespit edilmiştir.

Bu görüntülere ek olarak, içerik analizlerinden bazı önemli bulgulara ulaşılmıştır. Öncelikle, yaşlanma sürecinde oksitlenme sonucu oluşan bölgelerde karbon, manganez, silisyum ve oksijenin yüzde değerlerinin, parçacıkların kendi malzeme bileşenlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. He vd. tarafından yapılan araştırmada, hematit nano



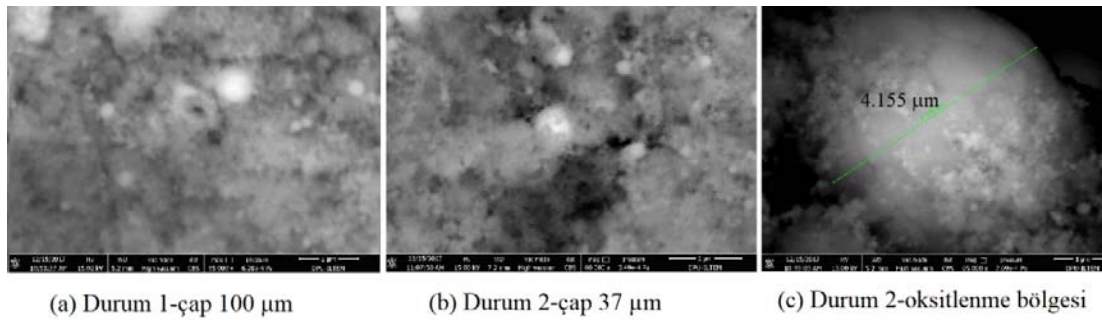
Şekil 2. (a) Durum 1 ve (b) Durum 2 numunelerinin çap 32 µm için SEM görüntüleri (images of SEM of samples of 32 µm (a) Case 1 and (b) Case 2).

Tablo 2. Durum 1 numunesi-çap 32 µm SEM görüntüsü içerik analizi (Content analysis of the Case 1-size 32 µm sample from the SEM images).

İçerik (%)	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Co
Alan 1	3,80	29,17	0,34	0,1	0,15	0,24	66,19	0,04
Alan 2	22,24	28,79	2,33	0,29	0,25	1,35	44,79	0,04

Tablo 3. Durum 2 numunesi-çap 32 µm SEM görüntüsü içerik analizi (Content analysis of the Case 2-size 32 µm sample from the SEM images).

İçerik (%)	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Co
Alan 1	5,69	43,30	0,34	0,0	0,39	2,07	48,15	0,05
Alan 2	27,89	32,56	0,21	0,50	0,42	7,33	30,18	0,92
Alan 3	24,75	33,07	0,0	0,49	0,81	11,01	29,86	0,0
Alan 4	83,54	14,50	0,01	0,07	0,28	0,48	1,10	0,06
Alan 5	6,97	50,28	0,13	0,0	0,82	4,63	37,16	0,0



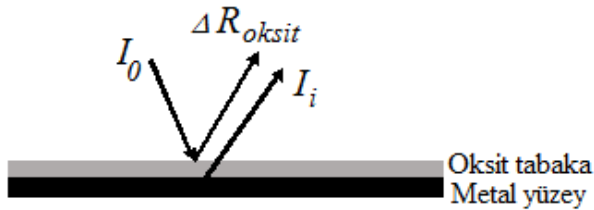
Şekil 3. Farklı çaplardaki numunelerin oksitlenme bölge görüntüleri (Images of the oxidation layers of the different size samples).

parçacıklarının soğurmasının SiO_2 tozlarının boyutlarıyla değiştiği ve soğurmanın azalmasının parçacık boyutunun küçülmesine bağlı olduğu belirlenmiştir [15]. Ayrıca, Lu vd., parçacık boyutlarının küçülmesiyle hematit yüzeyinin çok oksidasyona uğradığı ve kafes hacminin arttığına tespit etmişlerdir [7].

2.3. Işınım özellikleri (Radiative properties)

Işınım özelliklerinden biri olan soğurma özelliği, yüzey yada malzeme tarafından absorbe edilen ışınım miktarı olarak tanımlanır ve malzemenin yapısal özelliklerine bağlıdır. Soğurma özelliği, $[A = \ln(I_\lambda / I_{\lambda+d\lambda})]$ formülü ile ifade edilir [23]. Burada I_λ gelen ışınım ve $I_{\lambda+d\lambda}$ numuneden geçen ışınım şiddetini göstermektedir. Alt indislerdeki λ ve $(\lambda + d\lambda)$ gösterimi, dalga boyu aralıklarındaki soğurma özelliğinin değişimi için kullanılmıştır. Numunelerin 250-800 nm dalga boyu aralığındaki soğurma değerleri, Perkin Elmer Lambda 750 spectrophotometer cihazında, oda sıcaklığında ve parçacık ile etanolün ultrasonic tip karıştırıcı ile karıştırılarak hazırlanan çözeltisinde ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar üç kez tekrarlanarak, sonuçların doğruluğu teyit edilmiştir.

Parçacıklar veya yüzeyler üzerindeki oksitlenme bölgelerinin ışınım özelliklerine etkilerini hesaplamak üzere bir kaç çalışma yapılmış ve denklemler tanımlanmıştır. Şekil 4'de görülen metal yüzey üzerindeki oksitli tabaka ile ışınım soğurulması durumu, Eş. 1'de verilen uyarlanmış Beer yasası ile ifade edilir. Burada, ΔR metal numunenin dalga boyuna bağlı ışınım yansıtmasını (boyutsuz), d oksitli tabakanın kalınlığını (nm) ve $\mu(\lambda)$ istenilen dalga boyundaki oksitlenmiş tabakanın soğurma katsayısını (nm^{-1}) göstermektedir.



Şekil 4. Oksidasyon bölgesinin ve metal yüzeyin ışınım yansıtması (reflection of oxidation layer and metallic surface).

$$\Delta R_{\text{oksit}} = \frac{I_i}{I_0} = e^{-2\mu(\lambda)d} \quad (1)$$

2.4. Isıl iletkenlik (Thermal conductivity)

Bir maddenin ısı iletebilme kabiliyeti olarak tanımlanan ısı iletkenlik, Fourier ısı iletim kanunu kullanılarak sürekli rejim şartlarındaki deneyler ile belirlenen, sıcaklıkla değişebilen bir özelliktir. Katılarda ısı iletkenlik $k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p$ şeklinde yazılır. Burada ρ yoğunluk (kg/m^3), α ısı yayılım katsayısı (m^2/s) ve C_p sabit basınçtaki ısı kapasitedir. Ayrıca katıların ısı iletkenliği k_e ve k_l şeklindeki iki bileşenden

oluşmaktadır ($k = k_e + k_l$). Burada k_e , serbest elektronların hareketi ile oluşan ısı iletkenliği ve k_l ise moleküller arası boşluklardaki (latice) titreşim dalgalarının oluşturduğu ısı iletkenliği ifade etmektedir. Literatürde katıların ısı iletkenliği için tanımlanmış dokuz model bulunmaktadır. Bunlar parçacıkların yapısal özelliklerini, içindeki gaz miktarını ve sıcaklık ile k_e ve k_l değişimini dikkate alırken, üç modelde ışınlama ısı transferini dikkate alarak ısı iletkenliği modellemektedir. Genel olarak deneysel çalışmalardan, katılardaki gözeneklilik artışının, ısı iletkenliği azalttığı tespit edilmiştir. Magnetit ve hematit üzerine çalışmalar yapan Molgaard ve Smeltzer [24], içeriğindeki Mg, Ni, Si, Cu < %0,001 ve Al, Cr, Mn, T < %0,001-0,01 olan hematit numuneler ile 340-675 K sıcaklık aralığında yaptıkları deneysel çalışmalarda ısı iletim katsayısının değişimi için $k(T) = 0.0839 - 6.63 \times 10^{-5} T$ bağıntısını elde etmişlerdir. Burada sıcaklık birimi Kelvin [K], ısı iletkenlik birimi için W/deg.cm olarak değerlendirilmiştir. Metallerin ısı iletkenliği üzerine kapsamlı bir çalışma yapan Abu-Eishah [25], farklı sıcaklıklar ve farklı metalik malzemeler (alüminyum, kadmiyum, kobalt, bakır, altın, demir, lityum, magnezyum, nikel, gümüş, sodyum, titanyum vs.) için ısı iletkenliğin sıcaklıkla değişim fonksiyonlarını elde etmeye çalışmıştır. En küçük kareler metodunu kullanarak yapılan n . inci dereceden polinom modeli Eş. 2 ve çok değişkenli lineer olmayan model Eş. 3 ile verilmiştir.

$$k(T) = B_0 + B_1T + B_2T^2 + \dots + B_nT^n \quad (2)$$

$$k(T) = aT^b e^{cT} e^{c/T} \quad (3)$$

Eş. 2 deki $B_0, B_1, B_2, \dots, B_n$ polinom katsayılarını ve Eş. 3 deki a, b, c ile d sabitleri de metallerle göre değişen katsayıları göstermektedir. Eş. 3 ile yapılan yaklaşımın doğruluk katsayısı $R^2=0,97$ 'dir. Yaklaşımındaki a sabiti termofiziksel özellikleri temsil ettiğinden, negatif bir sayı olmamalıdır. Demir için 100 K ile 1183 K arasındaki 23 veri kullanılarak, sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı için oluşturulan yaklaşım fonksiyonunun katsayıları $a = 2,8993$, $b = 0,59552$, $c = -0,001783$ ve $d = 129,5933$ bulunmuştur. Aynı yaklaşım fonksiyonu, 35 K ile 1183 K arasındaki 26 veri kullanılarak yapıldığında, katsayıları $a = 9,27386$, $b = 0,391312$, $c = -0,001514$ ve $d = 107,3843$ bulunmuştur. Buradaki sonuçların doğruluk katsayısı $R^2=0,9978$ 'dir. Abu-Eishah [25] yaptığı çalışmada, 49 metalin 28'in de çok değişkenli lineer olmayan yaklaşımın iyi sonuç verdiğini, incelenen 21 metal (berilyum, bor, demir, silisyum, sodyum vs.) için polinom yaklaşımının daha iyi sonuç verdiğini tespit etmiştir.

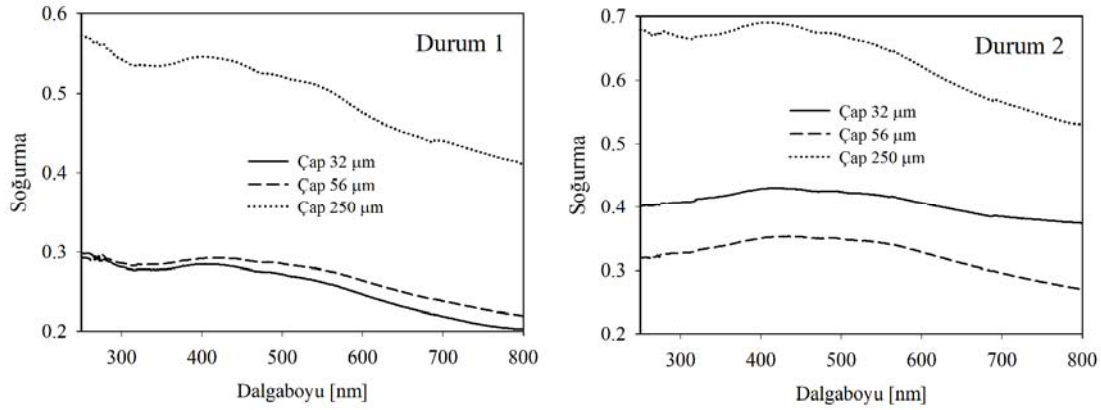
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Soğurma özelliği, parçacıkların şekline bağlı olup, büyüklük parametresindeki ($x = \pi D/\lambda$) D parçacık çapı ve/veya yansıtma indeksinin sanal kısmındaki (k) değerinin yüksek

değerler almasıyla artar [26, 27]. Hematit parçacıklarının farklı yansıtma indeks değerleri için soğurma özelliği, discrete dipole approximation (DDA) yaklaşımı ile önceki çalışmamızda [21] incelenmişti. Bu çalışma ile yansıtma indeksi $m=3,12+ i0,82$ olduğunda, soğurma özelliği literatürde tanımlı diğer yansıtma indeks değerleriyle hesaplanan soğurma değerlerinden yüksek olduğu görüldü. Durum 1 ve Durum 2 numunelerinin soğurma özelliklerinin $250 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$ dalga boyu aralığındaki değişimi Şekil 5’de verilmektedir. Işınm özelliklerinde, küçük çaplı numunelerin soğurma değeri birbirlerine yakın değerlerde iken, büyük çaplı numunelerin soğurma değerleri diğerlerinin yaklaşık 1,5 kat büyük olduğu Şekil 5’den görülmektedir. Dalga boyundaki artış ile soğurma özelliğindeki azalma her iki numune için söz konusudur. Buradaki sonuçlarımız, Hsu ve Matijević [6]’in parçacık büyüklüğünün soğurma özelliğini etkilediği sonucunu teyit etmektedir. Soğurma değerlerinin dalga boyu ile değişiminde; Durum 2 numunelerinin sonuçları, Durum 1 numunelerinkinden belirgin olarak farklı trendler göstermektedir. Bu durum, hematit parçacıkları ve oksitlenme bölgelerinin metal içerik değerlerinin farklılığından kaynaklanmaktadır. Parçacık büyüklüğünden (D) kaynaklanan artışın yanında, oksitlenme bölgesinin soğurma özelliğine etkisi Eş. 1 ile değerlendirilmiştir. Parçacıklar üzerindeki oksitlenmiş bölge uniform kalınlıkta olmadığından, ölçümde görülen $\sim 4,2 \mu\text{m}$ lik kalınlık kullanılarak tüm çaplar için hesaplama yapıldığında; Durum 1’in 32, 56 ve 250 μm lik numunelerinin oksitlenme bölgelerinin ortalama soğurma değerleri 0,0352, 0,0372 ve

0,0824 olarak bulunur. Durum 2’de 32, 56 ve 250 μm lik numunelerin oksitlenme bölgelerinin ortalama soğurma değerleri 0,062, 0,047 ve 0,1203 olarak elde edilmektedir. Buna göre, Durum 2 numunelerinin oksitlenme bölgelerinin soğurma değerleri Durum 1 numunelerinkinden büyüktür. Bu sonuçlar, oksitlenme bölgelerinin ışım üzerine etkilerini inceleyen Chen ve Tu [19]’nun sonuçları ile uyumludur.

Isıl iletkenlik özellikleri iki ayrı cihaz ile ölçülerek değerlendirilmiştir. Önce Hot Disk TPS2500S (Thermal Constant Analyser-TCA) cihazı ile ortam sıcaklığı 24°C olan laboratuvar şartlarında yapılmış ve bir kaç kere tekrarlanarak doğruluğu teyit edilmiştir. Hot Disk TPS2500S cihazı 25°C ile 180°C sıcaklıkları arasında çalışan, hassasiyeti yüksek ve hızlı ölçüm yapabilen bir cihazdır. Metal plakaların k_e ölçümlerinde, slap modül için 5501F1 model Kapton yalıtkanlı gri sensör, parçacıklı (toz) numunelerin ölçümlerinde, isotropik modül için 5465F1 model Kapton yalıtkanlı gri sensör kullanılmıştır. Parçacıklı numunelerin k_e iletkenliği, özgül ısı ve ısıl yayılım katsayısı gibi özellik ölçüm sonuçları Tablo 4’de verilmiştir. Burada, ısıl özelliklerin parçacık büyüklüklerine göre değiştiği görülmektedir. Isıl işlem öncesindeki demir numunelerin ısıl özellikleri ise ($25\text{-}150^\circ\text{C}$) sıcaklık aralığında ölçülerek Tablo 5’de sunulmuştur. Tablo 5’den görüldüğü üzere, demir numunelerin ısı iletim katsayıları, sıcaklık arttıkça artmıştır. Durum 1 numunesinde sıcaklık artışıyla ısı iletim katsayısındaki artış $\sim\%5$ ve Durum 2 numunesindeki artış $\%7,7$ olmuştur. Durum 2’nin ısı iletim katsayıları, Durum 1



Şekil 5. Durum 1 ve Durum 2 numunelerinin UV-görünür (250-800 nm) dalga boyu aralığında ölçülen soğurma değerleri (The experimental absorption results of Case 1 and Case 2 in the range of the UV-visible wavelength spectrum).

Tablo 4. Hematit parçacıkların oda sıcaklığındaki ısıl özelliklerinin ölçüm sonuçları (The experimental results of thermal properties of the hematite particles at room temperature).

	Durum 1			Durum 2		
	k_e (W/mK)	C_p (MJ/m ³ K)	α (mm ² /s)	k_e (W/mK)	C_p (MJ/m ³ K)	α (mm ² /s)
Parçacık büyüklüğü (μm)	37	0,054	0,5448	0,1138	0,056	0,4090
	56	0,046	0,1628	0,2816	0,054	0,4253
	125	0,052	0,2854	0,1883	0,063	0,6081

numunesinin incelenen sıcaklık aralığındaki ısı iletim katsayılarından %17 ile %19,7 kadar daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Durum 1 ve Durum 2 parçacıklı numunelerin ısı iletimlikleri, başka bir cihaz ile P.A. Hilton marka deney seti kullanılarak, aynı ısı güçlerinde ve düşük sıcaklık aralıklarında (30-50°C) yapılmıştır. Klasik ve en bilinen ölçüm tekniği kullanılan ve maksimum 120°C sıcaklığa çıkabilen deney düzeneğinde, ekstenel yöndeki ısı geçişi U tipi termokupullar ile ölçülmektedir. Pirinç malzemeden yapılmış numune kabı 2,3 cm çapında ve 1,5 mm derinliğinde olup, ağırlığı 14,520 gr'dır. Her numunenin ölçümü aynı laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiş ve üç kez tekrarlanmıştır. Bu deney düzeneği ile ölçülen ısı iletim katsayısı değerleri Şekil 6'da grafik olarak verilmektedir. Ölçüm sonuçlarının hassasiyeti $\pm\%8$ 'dir. Ölçüm cihazının numune kabına doldurulan hematit parçacıkların ısı iletim katsayısı Fourier Yasasına göre hesaplanmıştır. Durum 1'in orta ve büyük ölçekli parçacıklara sahip numuneleri 25-50°C sıcaklık aralığında, yaklaşık ısı iletim katsayısına sahip oldukları Şekil 6'dan görülmektedir. 32 μm 'lik Durum 1 numunesinin ısı iletim katsayısı, diğer büyüklükteki numunelerden biraz daha küçüktür. Durum 2 numunelerinin ısı iletim katsayıları aynı sıcaklık aralığında benzer bir değişim trendi göstermektedir.

Hematit numunelerin ısı iletim katsayılarının değerlendirilmesinde, literatürdeki iki deneysel çalışma sonuçlarının burada tekrar yorumlanması uygun olacaktır. Bunlardan biri, Akiyama vd. [20] ortalama parçacık çapı 1 μm olan hematit (%99,9 saflıkta) malzemelerden yapılmış ve %0,1'den daha küçük gözenekli disk şeklinde preslenmiş

numuneler ile yaptıkları ısı iletimlik ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesidir. Deneysel sonuçlara polinom şeklinde bir yaklaşım uygulandığında ($R^2 = 0,9959$), aşağıdaki Eş. 4 elde edilmektedir.

$$k(T) = -2 \times 10^{-8} \cdot T^3 + 6 \times 10^{-5} \cdot T^2 - 0,0675 \cdot T + 32,115 \quad (4)$$

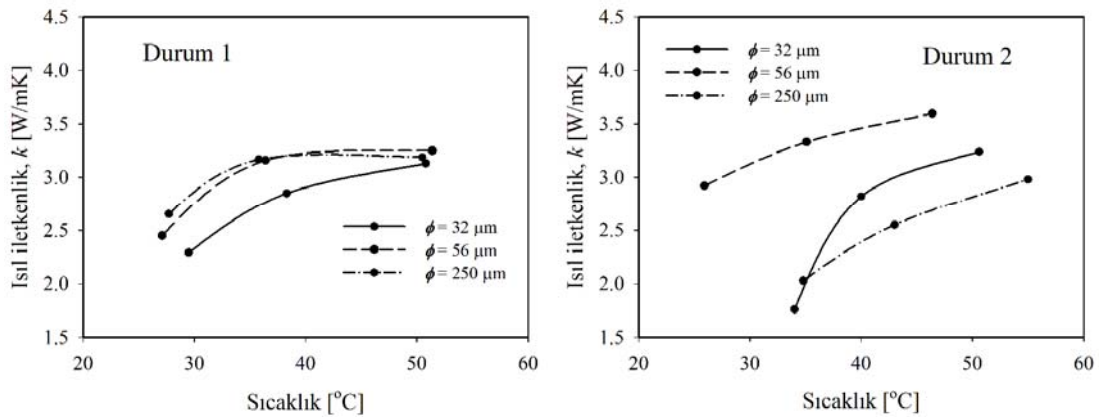
Diğer çalışma olarak, Molgaard ve Smeltzer [23]'in deneysel çalışmalara dayanan lineer yaklaşım ifadesi yukarıda bahsedilmiştir. Bu çalışmada 1,18 mm ile 510 ve 537 μm 'lik hematit numunelerin ısı iletimlikleri termokupullar ile $\pm\%2$ lik hassasiyetle ölçülmüştür. 1,18 mm'lik numunelerin ısı iletimliklerinin 0,065 W/deg.cm değerinden, 240 K lik sıcaklık değişimi sonucunda, hızlı düşüşle 0,045 W/deg.cm değerine azaldığı görülmektedir. Aynı çalışmada, 510 μm lik hematit numunelerin $\sim 0,056$ W/deg.cm değerinden, aynı sıcaklık değişimi sonucunda, $\sim 0,042$ W/deg.cm değerine düştüğü görülmüştür.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta, Akiyama vd. [20]'nin çalışmasındaki parçacıklar, incelediğimiz 37 μm , 56 μm ve 125 μm büyüklükteki parçacıklardan çok küçüktür. Dolayısıyla ölçüm sonuçlarını direkt karşılaştırmak yerine, ısı iletimliğin sıcaklıkla değişimi incelendiğinde, her iki hematit numunelerin artan sıcaklıkla benzer bir değişim trendine sahip oldukları sonucuna ulaşılmaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklıktaki kaynak işleminden sonra, oksitlenmiş hematit parçacıklarının ısı iletim katsayısı ölçüldüğünde, Akiyama vd. [20]'nin 1400 K'de ölçülen ısı iletim katsayısı 5 W/mK'den daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmamızda kullanılan hematit numunelerin içerik analizleri, bahsedilen literatür çalışmalarından farklı olup,

Tablo 5. Isıl işlem öncesindeki demir plaka numunelerin farklı sıcaklıklarda ölçülen ısı özellikleri
(The experimental results of thermal properties of the iron samples before heat process)

Sıcaklık (°C)	Durum 1			Durum 2		
	k (W/mK)	C_p (MJ/m ³ K)	α (mm ² /s)	k (W/mK)	C_p (MJ/m ³ K)	α (mm ² /s)
26	20,6	3,55	5,657	24,83	3,61	6,876
100	21,36	3,78	5,647	26,58	3,85	6,912
150	21,68	3,94	5,503	26,90	4,00	6,720



Şekil 6. Durum 1 ve Durum 2 parçacıklı numunelerinin düşük sıcaklıklarda ölçülen ısı iletimlik değerleri
(The experimental results of the Case 1 and Case 2 samples at low temperatures).

yüksek oranlarda Mn, P, Si, Al, Cr ve Cu bileşenlere sahiptir. İncelenen parçacık büyüklükleri Akiyama vd. [20] çalışmalarındaki hematit parçacıklarından oldukça büyük, Molgaard ve Smeltzer [24]'in çalışmalarından oldukça küçüktür. Ancak, ortak elde edilen sonuç, hematit numunelerin ısı iletkenliğinin yüksek mertebeden polinomial değiştiği, küçük sıcaklık aralığında bu değişimin lineer olduğu. İçeriğindeki Mn, P, Si, Al, Cr ve Cu bileşenlere göre, ısı iletkenlik değeri belirgin farklılık göstermektedir. Bu bileşenler yüksek ise, ısı iletim katsayısı yüksek değerler almaktadır. Bir diğer önemli sonuç, daha önceki deneysel çalışmalarda genellikle ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi bir polinom ile tanımlanmaktadır. Çalışmamız ile, sıcaklığın yanında, parçacık çapları arasındaki farklılıkların ısı iletkenlik özelliklerine etkilerinin gösterilmesidir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yüksek sıcaklıktaki ısı işlem sonucu oluşan hematit parçacıkların çaplara göre ayrıştırılması yapılmıştır. İçeriklerindeki elementlerin farklılıklarından dolayı Durum 1 ve Durum 2 olarak sınıflandırılmıştır. Numunelerin görünür dalga boyu aralığındaki soğurma özelliği ve oda sıcaklıklarındaki ısı iletkenlik özellikleri incelenmiştir. Parçacık boyutlarının etkisi, ısı iletkenlikten daha ziyade soğurma özelliğinde daha belirgindir. Büyük çaplı parçacıklara sahip numunelerin hem soğurma hem ısı iletkenlik özellikleri diğer küçük çaplı parçacık değerlerinden daha yüksektir. Durum 2 numunesinin soğurma ve ısı iletkenlik değerleri, Durum 1 numunesinin değerlerinden yüksektir. Burada Durum 2 numunesinin oksitlenmiş tabakasındaki Si, Mn, Al, Cr içeriklerinin Durum 1 numunesine göre daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Query M.R., Optical constants of minerals and other materials from the millimeter to the ultraviolet, CRDEC-CR88009, US Army Chemical Research, Development and Engineering Center, Aberdeen Proving Ground, MD, 331, 1987.
2. Sokolik IN, Toon OB, Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol, *J. Geophys. Res.*, 104 D8 9423-44, 1999.
3. Kaynar M.B., Toprak A., Özcan Ş., Saturation magnetization change with structure in CoFe₂O₄ nanostructures prepared from metallic iron and cobalt by wet grinding method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 1101-1108, 2019.
4. Shi Z., Bonneville S., Krom M.D., Carslaw K.S., Jickells T.D., Baker A.R., Benning L.G., Iron dissolution kinetics of mineral dust at low pH during simulated atmospheric processing, *Atmos. Chem. Phys.* 11, 995-1007, 2011.
5. Zboril R., Mashlan M., Petridis D., Iron(III) Oxides from Thermal Processes Synthesis, Structural and Magnetic Properties, Mossbauer Spectroscopy Characterization, and Applications, *American Chem. Mater.*, 14 (3), 969-982, 2002.
6. Hsu WP., Matijević E., Optical properties of monodispersed hematite hydrosols, *Applied Optics* 24 (11) 1623-1630, 1985.
7. Cherepy NJ., Liston DB., Lovejoy JA., Deng H., Zhang JZ., Ultrafast studies of photoexcited electron dynamics in γ - and α -Fe₂O₃ semiconductor nanoparticles, *J. Phys. Chem. B*, 102, 770, 1998.
8. Lu L., Li L., Wang X., Li G., Understanding of the finite size effects on lattice vibrations and electronic transitions of nano α -Fe₂O₃, *J. Phys. Chem. B*, 109, 17151-17156, 2005.
9. Bedidi A., Cervelle B., Light scattering by spherical particles with hematite and goethite like optical properties: effect of water impregnation, *J Geophys Res-Sol Ea*, 98 B7, 11941-11952, 1993.
10. Muñoz O., Volten H., Hovenier J.W., Min M., Shkuratov Y.G., Jalava J.P., van der Zande W.J., Waters L.B.F.M., Experimental and Computational study of light scattering by irregular particles with extreme refractive indices: hematite and rutile, *Astronomy & Astrophysics*, 446, 525-535, 2006.
11. Meland B., Kleiber P.D., Grassian V.H., Young M.A., Visible light scattering study at 470, 550 and 660 nm of components of mineral dust aerosol: Hematite and Goethite, *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 112, 1108-1118, 2011.
12. Chakrabarty S., Catterjee K., Oriented growth of α -Fe₂O₃ nanocrystals with different morphology and their optical behavior, *Journal of Crystal Growth*, 381, 107-113, 2013.
13. Chen L., Yang X., Chen J., Liu J., Wu H., Zhan H., Liang C., Wu M., Continuous shape- and spectroscopy—tuning of hematite nanocrystals, *Inorg Chem*, 49, 8411-8420, 2010.
14. Legodi MA, De Waal D., The preparation of magnetite, goethite, hematite and maghemite of pigment quality from mill scale iron waste, *Dyes and Pigments*, 74, 161-168, 2007.
15. Wheeler D.A, Wang G., Ling Y., Li Y, Zhang Z., Nanostructured hematite: synthesis, characterization, charge carrier dynamics, and photoelectrochemical properties, *Energy Environ. Sci.*, 5, 6682, 2012.
16. He YP., Miao YM., Li CR., Wang SQ., Cao L., Xie SS., Yang GZ., Zou BS., Burda C., Size and structure effect on optical transitions of iron oxide nanocrystals, *Phys. Rev. B*, 71, 125411, 2005.
17. Degueldre C., Fuks L., Schenker E., Pre-oxidation of stainless steel: a study by diffuse reflection spectroscopy, *Applied Surface Science*, 134, 254-262, 1998.
18. Goossens V., Wielant J., Van Gils S., Finsy R., Terryn H., Optical properties of thin iron oxide films on steel, *Surf. Interface Anal.* 38, 489-493, 2006.

19. Chen YH, Tu KJ, Thickness dependent on Photocatalytic activity of hematite thin films, *Int J Photoenergy*, Article ID 980595, 2012.
20. Akiyama T., Ohta H., Takahashi R., Waseda Y., Yagi J., Measurement and modelling of thermal conductivity for Dense Iron Oxide and Porous Iron Ore Agglomerates in stepwise Reduction, *ISIJ International*, 32 (7), 829-837, 1992.
21. Doner N., Pargan AR., Aygahoglu A., Liu F., Sen F., Radiative properties of hematite particles in the UV-visible Spectrum, *International Journal of Thermal Sciences*, 139, 79-87, 2019.
22. Pargan A.R., Kaynak sonrası oluşan gaz içindeki partiküllerin Işınım Özelliklerinin İncelenmesi, Master of Science Thesis, Kütahya Dumlupınar University, Science Institution, Kütahya, 2018.
23. Howell J.R., Siegel R., Mengüç M.P., *Thermal Radiation Heat Transfer Fifth Edition*, CRC Press, Taylor & Francis Group New York, 2010.
24. Molgaard J., Smeltzer W.W., Thermal conductivity of Magnetite and Hematite, *Journal of Applied Physics*, 42 (9), 3644-3647, 1971.
25. Abu-Eishah, S.I. 2001. Correlations for the thermal conductivity of metals as a function of temperature, *International Journal of Thermophysics*, 22 (6), 1855-1868, 2001.
26. Kahnert M., Nousiainen T., Mauno P., On the impact of non-sphericity and small-scale surface roughness on the optical properties of hematite aerosols, *Goethite, J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 112, 1815-1824, 2011.
27. Rother T., Schmith K., Wauer J., Shcherbakov V, Gayet J-F, Light scattering on Chebyshev particles of higher order, *Appl Opt.*, 45, 6030-7, 2006.