

# ÜRETİM METALURJİSİNDE MİKRODALGA UYGULAMALARI

■ Kübra ÖNOL Yıldız Teknik Üniversitesi

## Microwave Applications in Extractive Metallurgy

### Özet

Malzeme proseslerinde mikrodalga enerji kullanımı malzemelerin çok hızlı ısınmasının sonucu olarak sayısız avantajları olan oldukça yeni bir gelişmedir. Mikrodalga enerji; ısıtma, kurutma, liç işlemi, kavurma, ergitme, oksitli minerallerin karbotermik redüksiyonu ve atık yönetimi gibi metalurjik proseslerde potansiyele sahiptir. Bu çalışmada mikrodalga ile ısıtmanın prensipleri incelenmiş ve ekstraktif metalurjide mikrodalga kullanımı ile ilgili bazı uygulamalar sunulmuştur.

**Anahtar Sözcükler:** Mikrodalga Isıtma, Ekstraktif Metalurji

### Abstract

The use of microwave energy in materials processing is a rather new development presenting numerous advantages, which result from the rapid heating the materials. Microwave energy has potential in metallurgical processes such as heating, drying, leaching, roasting, smelting, carbotermic reduction of oxide minerals and waste management. In this study the principles of microwave heating are investigated and some applications on the using of microwave in extractive metallurgy are presented.

**Keywords:** Microwave Heating, Extractive Metallurgy

### 1. Giriş

Mikrodalga enerjisi, 300 MHz ile 300 GHz aralığında frekansa sahip iyonize olmamış elektromanyetik radyasyondur. Mikrodalgalar, molekül ya da iyonların hareketlenmesine yol açar. Yansıtılabilir, iletilebilir, absorblanabilir ve absorbladığı malzeme içerisinde ısı üretimine yol açar (1).

Mikrodalga'nın başlangıçta gıda, kimya ve kağıt sanayisine yönelik araştırma ve uygulamaları söz konusuken daha

sonraları cevher hazırlama ve metalurji sanayinde de kullanılması önerilmeye başlanmıştır.

Mikrodalga ile ısıtma, numunenin derinliklerine nüfuz edebilen elektromanyetik enerji formunda olduğu için klasik ısıtmadan farklıdır. Klasik ısıtma sistemleri taşınım (konveksiyon), iletim (kondüksiyon) ve yayılma gibi standart ısı transfer mekanizmasından geçerek numuneyi dışarıdan ısıtırken, mikrodalga ile ısıtma seçimli ve matristeki bazı fazların diğerlerinden çok daha hızlı ısınabilmesi avantajına sahiptir. Bu avantajlar ise mikrodalga enerjinin cevher/kömür hazırlama ve ekstraktif metalurji endüstrisinde kullanımını teşvik etmektedir (2,3).

Malzeme proseslerinde mikrodalga kullanımındaki ana problem ölçümlerin tekrarlanabilirliğinin zorluğudur. Sonuçlar birçok faktörden etkilenebilir. Örneğin nem içeriği, proses süresince dielektrik özelliklerdeki değişiklikler, sıcaklık ölçümleriyle elektromanyetik girişim, numune boyutu ve geometrisi, fırın boşluğunda numunenin yerleşimi gibi. Buna rağmen avantajlarının çokluğu mikrodalga enerjinin geleneksel endüstriyel uygulamaların yerine geçmesini sağlayabilir. Geçtiğimiz yıllarda metalurjik proseslerde mikrodalga kullanımı ile ilgili kapsamlı araştırmalar yapılmıştır (3).

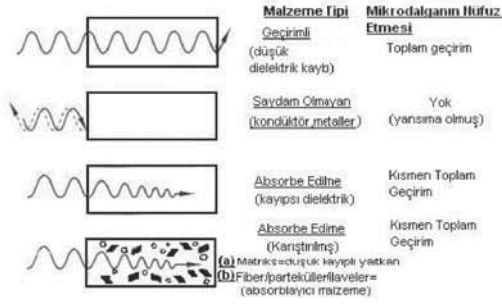
Bu çalışmada; mikrodalga ile ısıtmanın temel prensipleri detaylı bir şekilde ele alınmış ve geleneksel ısıtma ile karşılaştırılarak üretim metalurjisindeki uygulamaları üzerinde durulmuştur.

## 2. Mikrodalga ısıtmanın prensibi

### 2.1. Mikrodalga Prensipleri

Mikrodalgalar iyonik parçacıkların göçü veya dipolar parçacıkların rotasyonu ile moleküler harekete neden olurlar. İyonik iletim uygulanan elektromanyetik alandaki çözünen veya titreşen iyonların göç etmesini, dipol rotasyon ise polarize olmuş moleküllerin bir düzene (hizaya) sokulmasını ifade etmektedir (2,4).

Metaller saydam olmadıkları için mikrodalgalar yüzeyden yansıma yaparlar. Bu nedenle metalleri mikrodalga ile ısıtamayız. Genelde metaller yüksek iletkenliğe sahiptir ve iyi yansıtıcılardır. Dielektrik özelliğe sahip olan seramik malzemelerden mikrodalgalar geçirirli olarak geçer. Bu nedenle seramikler yalıtıcıdır ve mikrodalga fırında malzemenin ısıtılmasını desteklemek için kullanılırlar.



Şekil 1. Malzemelerin mikrodalga ile etkileşimi (4).

Bir malzemeyi mikrodalga ile ısıtma işlemi büyük oranda malzemenin tüketme (dissipation) faktörüne (dielektrik kayıp tanjantı,  $\tan\delta$ ) bağlıdır. Belirli bir frekans ve sıcaklıkta elektromanyetik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülme yeteneği olan bu faktör, malzemenin dielektrik kayıp veya "kayıp" faktörünün ( $\epsilon''$ ) dielektrik sabitine ( $\epsilon'$ ) oranı ( $\tan\delta = \epsilon'' / \epsilon'$ ) olarak ifade edilir.

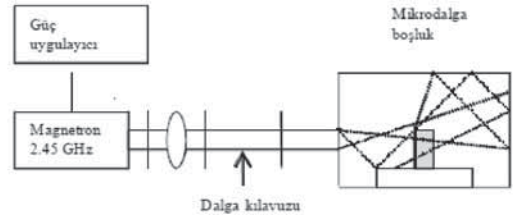
"Relatif geçirgenlik" olarak da tanımlanan dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), mikrodalga enerjisinin malzeme içerisinden geçmesi esnasında bu enerjinin malzeme tarafından tutulabilme/ alıkoyma yeteneğinin bir ölçüsüdür. Bu büyüklük, enerjinin ne kadarının malzeme tarafından adsorplanıp ısıya dönüştüğünü ve ne kadarının hava-malzeme ara yüzeyinde yansıdığını göstermektedir.

Dielektrik (kayıp) faktörü ( $\epsilon''$ ) ise malzemenin enerjiji tüketmesinin bir ölçüsüdür. Diğer bir deyişle, "kayıp" faktörü, giren mikrodalga enerjisinin malzeme içinde ısı olarak tükenmesiyle kayıp miktarını vermektedir. Kayıp kelimesi malzemeye nüfuz edip ısı olarak dağılan kayıp mikrodalga enerjiji göstermek amacıyla kullanılmaktadır ve malzemenin, gelen enerjinin ne kadarını ısıya çevirebildiğinin bir göstergesidir. Bu nedenle, yüksek "kayıp" faktörlü bir malzeme mikrodalga enerji ile kolayca ısıtılabilir.

Mikrodalga ısıtma sistemi dört temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar;

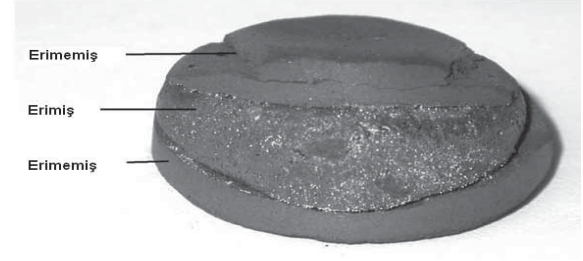
- 1- Güç uygulayıcı,
- 2-Güç kaynağı, mikrodalga üreten (elektrik enerjisini mikrodalgaya dönüştüren) vakum tüpü, magnetron
- 3- Jeneratörden gelen mikrodalgaları aplikatöre ileten, dalga-rehberi
- 4- Hedef malzemenin ısıtılmasını sağlayan rezonans boşluk, (örneğin fırın)

Mikrodalga ısıtma sisteminin basit gösterimi ise Şekil 2'te verilmiştir



Şekil 2. Mikrodalga ile ısıtmanın şematik gösterimi (2).

Mikrodalga radyasyon malzemenin içine nüfuz eder ve orada ısıya dönüşür. Bu yüzden malzemenin dışı içinden daha soğuktur. Şekil 1 redükleyici olarak karbon içeren bir ferronikel silikat laterit cevherinin mikrodalga işlem sonrası resmi göstermektedir. Mikrodalga enerjisinin bu ters sıcaklık gradyanı önemli iç erimeye sebep olmuş, fakat briketin üst ve alt kısmı bozulmadan kalmıştır (5).



Şekil 3. Mikrodalga işlem görmüş ferronikel silikat laterit cevheri briketinin resmi. İç erimeler görülmektedir (5).

## 2.2. Mikrodalga Isıtmanın Avantajları ve Dezavantajları

### Avantajları

#### Enerji Penetrasyonu

- MD enerjisini madde yüzeyine bırakmaz, frekansına ve geliş açısına göre madde içinde belli bir işleme derinliği vardır.
- MD malzemeleri içten ısıtmaya başladığından yüzeyde yanma oluşmaz.
- Cisimlerin iç bölgelerinde istenilen nokta hedeflenerek ısıtma yapılabilir.

#### Enerji Absorbsiyonunda Seçicilik

- Malzemeler mikrodalgayı yansıtıcı, absorblayıcı ve geçirici olarak sınıflandırılabilir. Mikrodalga ısıtılarda polar ve küçük moleküllu solventler MD enerjisini fazla emerler. Malzemeler kuruyunca veya polarite özellikleri azalınca MD absorblama seçicilikleri azalabilir.

### Isıtma Prosesi Çok Hızlıdır

- Isıtma hızı 30.000°C/s'den 1°C/asır' a kadar ayarlanabilir.
- Malzeme cinsi, ısınma ısısı, dielektrik özellikleri, geometrisi, ısı kayıp mekanizması ve MD ısıtıcının özellikleri gibi parametrelerden ısıtma hızı etkilenir. Örneğin ısıtma gücü 2 kat artınca hız da 2 kat artar

### Malzemenin tümünde homojen ısıtma yapılabilir

- Konvansiyonel ısıtmalarda olduğu gibi malzeme içinde büyük ısı değişimi oluşmaz, ısıtma istenilen bölgeye ve geometriye göre ayarlanabilir.
- Enerji dönüşüm verimi yüksektir.
- Doğrudan doğruya hedeflenen malzeme ısıtılabilir.
- Heterojen malzemelerde bazı bileşenler ısıtılıp, bazıları ısıtılmayabilir.
- Fırının duvarları, taşıyıcı bantlar ve içindeki havanın ısıtılmasına gerek yoktur.
- Fırının kendisi ısınmadığından, ayrıca soğutma ekipmanlarına ve izolasyona gerek yoktur.
- Isıtma hızla kontrol altına alınabilmektedir ve daha hızlı proses kontrolü sağlar.
- Isıtmanın başlaması ve kesilmesi çok hızlıdır.
- Cihazların kapladıkları alan ve hacim çok küçüktür.
- Mevcut tesislere kolaylıkla adapte edilebilir ve montajı kolaydır.
- Ürün kalitesini artırır ve kabuklaşmayı önler.
- Ürünün orijinal kokusu ve lezzetini muhafaza eder.
- Proseste daha az atık ürün oluşur.

### Sıcaklığa Bağlı Pek Çok Kimyasal Reaksiyonu Başlatabilir

- Kataliz olarak kullanımı (Hot Spots) olabilir.
- Organik sentezlerde, polimerizasyonda, plastiklerde solvent gidermede, emülsiyon bozmada, ilaç sanayinde kullanılabilir.

### Dezavantajları

- MD ısıtma ile bazı ürünler zarar görebilir (derin ısı uygun dağıtılmazsa).
- Ani ısıtma sonucu oluşan basınçla üründe patlama, kabarma ve dağılmalar olabilir.

- Giriş voltajındaki değişimler cihazda ve üründe problem yaratabilir.
- Kurutma işleminde %50'den fazla su içeren sistemler için uygun değildir.
- Sabit yatırımları yüksektir.
- Gıda ve kurutma sanayi dışındaki uygulaması yaygınlaşmamıştır (6).

## 3. Metalurji ve mikrodalga uygulamaları

### 3.1. Cevher Hazırlama

20.yüzyılın başından itibaren minerallerin ön ısıtılmasının faydalı sonuçları biliniyordu. Minerallerin aşınma direnci termal ön işleme önemli ölçüde düşmesine rağmen işlem genel olarak ekonomik değildi.1991'de demir cevheri numunelerinin termal ön işleminde mikrodalga kullanımı incelenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki mikrodalga radyasyon demir cevherlerinin çalışma indeksini %10-24 arasında düşürmüştür ve değirmen de daha az aşınmıştır. Öğütülebilirlikte artış ve geriye dönen cevher miktarında azalma görülmüştür.

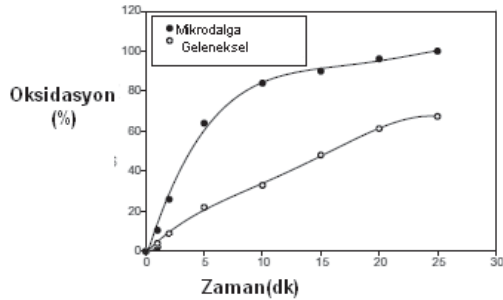
2001 yılında Vorster ve diğerleri tarafından mikrodalga enerjinin bakır ve bakır çinko sülfid cevheri üzerinde etkisini çalışmıştır. Çalışmaların sonucunda 90 dk mikrodalgaya maruz kalan bakır cevherindeki çalışma indeksindeki düşüş %70, bakır çinko sülfid cevherinde ise %50 olmuştur. Mikrodalga enerjinin cevher öğütmedeki faydaları farklı fazların seçici ısınmasının sonucudur. Bu durum işlenmiş mineralde termomekanik strese neden olur. Mikrodalga radyasyon kullanarak termal yardımcı öğütme mikrodalga emici minerallerde (metaloksitler, karbon, sülfid cevherleri vs.) ve bir geçirgen gang içeren minerallerde(silikatlar, karbonatlar, sülfatlar ve bazı oksitler) daha etkilidir.(3)

Günümüzde altın cevher üretim tesislerinin büyük bir bölümü aktive edilmiş karbon kullanmaktadır. Genellikle bu harcanan karbon yüksek sıcaklıklarda (600-750°C) döner fırınlarda ısıtılmasını takiben bir mineral asit ile yıkanarak yeniden kazanılmaktadır. Mikrodalga ısıtma

Bileşik	Isıtma zamanı (dk)	Max.Sıcaklık (°C)	Bileşik	Isıtma zamanı (dk)	Max.Sıcaklık (°C)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24	1900	CuS	5	600
C	0,2	1000	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6	1000
CaO	40	200	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,5	500
CuO	4	800	FeS	6	800

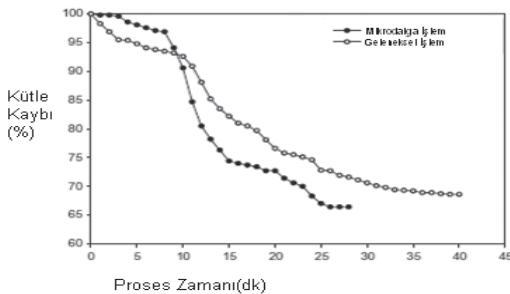
**Tablo 1.** Bazı oksit ve sülfür bileşiklerinin mikrodalga ısıtılması ile ısıtma zamanına bağlı elde edilen en yüksek sıcaklık değerleri (6)

ile yüksek sıcaklıklarda (>1000°C) bu karbonun kolayca ısıtılacağı belirtilmiştir. 850 W mikrodalga güç seviyesinde ve 2,45 GHz mikrodalga frekansında yapılan rejenerasyon çalışmalarında endüstriyel normlarda aktive edilmiş karbon elde edilmiş ve mikrodalga ısıtma ile karbon geri kazanımının uygunluğu doğrulanmıştır. Sonradan yapılan pilot ölçekli karbon geri kazanımı testleri konvansiyonel geri kazanım proseslerinden daha iyi olduğunu göstermiştir. Günümüzde Kanada’ da bu teknoloji pazarlanmaktadır(3,6).

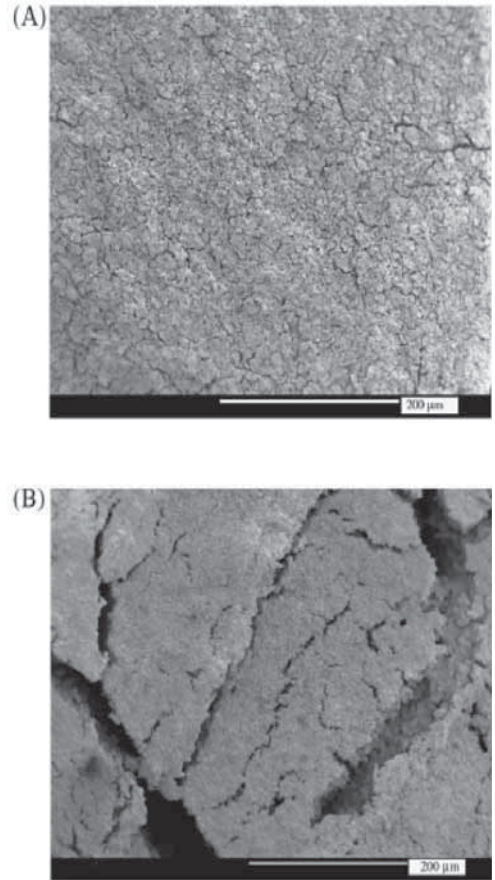


**Şekil 4.** Atık aktifleşmiş karbonun zamana bağlı oksidasyon oranı (7)

Geleneksel mangan oksit içeren cevherler tükenmektedir ve bu yüzden mangan karbonat cevherleri mangan oksit kaynağı olarak giderek önem kazanmaktadır. Bu bağlamda bu cevherlerin kalsinasyonu ve aglomerasyonu için mikrodalga enerji uygulamaları incelenmiştir. Kalsine mükemmel bir mikrodalga emicidir ve beslemeye çok az ilavesiyle mikrodalga bağlantı özellikleri gelişir. Şekil 5'te cevherin 1200°C geleneksel fırında ve bir mikrodalga sistemde ayrışma oranları verilmiştir. Geleneksel fırın zaten 1200°C'ye önceden ısıtıldığı için ilk 10 dk'da mikrodalga ısıtmadan daha yüksek ayrışma oranı vermiştir. Ancak daha sonra mikrodalga kalsinasyon oranı gelenekselin çok üzerinde artmıştır. 27 dk sonunda mikrodalga numune %33,6 kütle kaybı ile kalsine edilmiş ve sinterlenmiştir. Geleneksel fırında ısıtılan numunenin tam kalsinasyonu ise 38 dk sonra olmuş fakat aglomerasyon olmamıştır. Kütle kaybı ise % 31,4'tür. Bu yüzden mikrodalga kalsinasyon ve sinterleme geleneksel prosesden çok daha hızlıdır.



**Şekil 5.** Mangan Karbonat cevherlerinin proses zamanına bağlı olarak kütle kaybı(8)



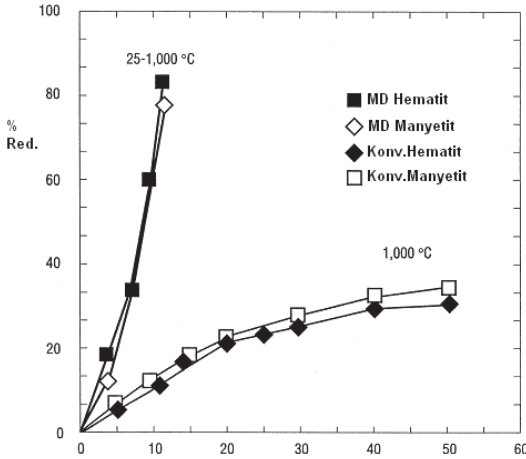
**Şekil 6.** Mangan karbonat cevherinin SEM görüntüleri: (A) geleneksel fırında kalsine edilmiş ve (B) mikrodalga kalsine edilmiş(8).

Kalsinelerin morfoojik özelliklerindeki farklılıklar da Şekil 6'da gözükmemektedir. Geleneksel kalsine edilmiş numunede bazı çatlaklar görülüyor. Ancak mikrodalga işleminde bu çatlaklar daha belirgindir. Mikrodalga ısıtmada karbon dioksit oluşumu çok daha hızlıdır ve bu yüksek iç basınç ile çatlakların artmasıyla sonuçlanır(8).

### 3.2. Pirometalurji

Kömür ve kok halinde karbonun ve ağır metal oksitlerin büyük çoğunluğu mikrodalga ısıtmaya cevap vermektedir. Bu nedenle metal oksitlerin mikrodalga destekli karbotermik redüksiyonu mümkündür. Eğer metal oksit düşük kayba sahipse, yani mikrodalga enerjisine karşı zayıf ise o zaman ilave edilen karbon mikrodalga ısıtmanın rolünü hızlandırır. Çeşitli araştırmacılar karbonla (kömür ya da kok olarak) karıştırılmış demir oksitlerin (hematit ya da manyetit) metalik demire redüklenebildiğini belirtmişlerdir. Konvansiyonel ve mikrodalga redüksiyonu kıyaslamak için Standish ve diğerleri hematit cevheri, kok ve kireç tozu karışım numunelerine redüksiyon testleri uygulamışlardır. Bir karışım numunesi geleneksel

elektrikli fırında 1000°C'de ve diğeri 2450 MHz ve 1.3 kW gücünde mikrodalga fırında ısıtılmışlardır. Numune içine konan bir termokupl ile numune sıcaklığı ölçülmüş ve sıcaklık 1000°C'ye ulaştığında deney sonlandırılmıştır. Şekil 7 sonuçları göstermektedir. Mikrodalga ısıtma oranı geleneksel ısıtma oranından çok yüksektir. Bazı faz değişiklikleri gözlemlendi ve bu yüksek ısıtma oranına neden olmuş olabilir. Sermaye ve işletme maliyetleri için rasyonel varsayımlar göz önüne alınarak mikrodalga redüksiyon prosesinin geleneksel işleme göre % 15'ten % 50' ye tasarruf sağlayabildiği sonucuna varılmıştır.(1)



Şekil 7. Mikrodalga ve geleneksel karbotermik redüksiyonun karşılaştırılması(1)

Pirometalurjik teknikler refrakter altın cevherlerden alınan serbest altın parçacıklarına geniş ölçüde uygulanmaktadır. Birçok araştırmacı altın ekstraksiyonunda ön işlem olarak ya da geleneksel proses tekniklerinde mikrodalga enerji uygulamalarını incelemiştir. Haque (1987) çalışmasında 2mm'den küçük parçacıklar için mikrodalga enerjisinin konsantrasyonunda çok etkili olduğunu göstermiştir. Mikrodalga işlemin geleneksel kalsinasyona göre avantajı çok düşük kavurma sıcaklığı (500°C) ve yüksek altın ekstraksiyon verimidir(%98).

Mikrodalga enerji kömür desülfürizasyonunda elementel sülfür ya da pirit şeklinde sülfür gidererek kullanılabilir. Birçok çalışma göstermiştir ki 2,45 GHz'de pirit kömürden çok hızlı ısınır ve bu ısınma piritin manyetik duyarlılığını artırarak manyetik ayırma ile ayrılma oranlarını geliştiriyor.

Butcher, Rowson ve Lovas bakır cevherlerinden kalkopirit ve tetrahedritin mikrodalga enerji kullanarak manyetik ayırmanın artırılmasını çalışmışlardır. Mikrodalga ısıtma sülfürlerin faz değişimine neden olur ve termik çözülme nedeniyle manyetik özelliklerinde değişiklik meydana gelir. Çalışma sonucunda  $CuFeS_2$ 'nin kendisinden 100 kat fazla manyetik duyarlılık gösteren manyetite ( $Fe_2O_3$ ) ayrışması çok hızlıdır. Geleneksel ısıtmada aynı çözünürlük için gerekli süre çok daha fazladır. Mikrodalga

işlem süresinde 20'den 30 dk'ya artış tane büyüklüğüne bağlı olarak manyetik duyarlılığı 300'den %980'e çıkarır. Aynı sonuçlar tetrahedrit için de elde edilmiştir. Manyetik faz olan kuprospinel  $CuFe_2O_4$ 'ün birkaç dakika içinde oluşmuştur. Tetrahedritin mikrodalga yardımıyla dekompozisyonu sonucu uçucu maddeler (Hg,Sb ve As) açığa çıkar. Fakat bu olumsuzluk aktif kömür varlığıyla azaltılabilir.  $CuFeS_2$  ve tetrahedritin büyük bölümünün az bir enerji tüketimiyle hızla dekompozisyonu mikrodalga kullanımının tek avantajı değildir. Oluşan fazların manyetik özelliklerindeki artış onların bakır cevherinden daha kolay ayrılmasını sağlar ve böylelikle gerekli enerji düşer.

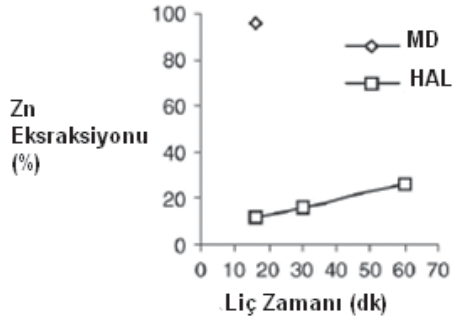
Çelik üretim fırınları metalik toz üretmektedir. Galvanizlenmiş çelik hurdası kullanan elektrik ark fırınları, suda liç edilebilir kurşun, kadmiyum, krom ve çinko içeren toz üretmektedir. Bu tür toz, zehirli olarak sınıflandırılmakta ve bertaraf edilmeden önce işleme tabi tutulması gerekmektedir. Bu konuda 1994 yılında yapılan bir çalışmada, toz halindeki karbonla karıştırılmış tipik bir elektrik ark fırını tozunu çeşitli zaman dilimlerinde ısıtmak için mikrodalga enerjisini (900 W, 2450 MHz) seçmişlerdir. %90'dan fazla çinko, ZnO olarak buharlaştırılmış, reaksiyon potasının tepesine yerleştirilmiş bir alümina levha üzerine yoğunlaştırılmış ve toplanmıştır. Laboratuvar skalasındaki test sonuçları göstermiştir ki, çinko giderimi hızlı ve selektif olmuştur. Demirce zengin atık ise demir-çelik üretim fırınına geri dönüştürülebilir durumdadır (1).

### 3.3. Hidrometalurji

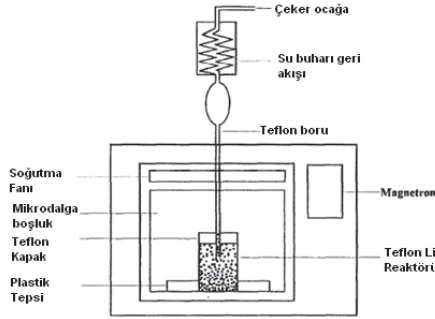
Mikrodalga liç kazanılan metal verimini arttırmak ve proses zamanını düşürmek için özellikle çevreye duyarlı proses gerekliliğinin artmasıyla araştırılmıştır. Düşük proses zamanı, doğrudan ve seçici ısıtma ve daha kontrol edilebilir ısıtma prosesi olması nedeniyle mikrodalgaya yönelenmiştir.

Liç işleminde katı ve sıvı arasındaki büyük sıcaklık farkı reaksiyon ara yüzeyinden kütle transferine yardımcı olur. Katı partiküller farklı ısınma oranlarına sahip birden fazla faz içerdiğinde çatlaklar başlar ve bu ara yüzey alanını artırır(9).

Sülfür konsantrasyonlarından Zn ekstraksiyonu için mikrodalga enerji kullanımı incelenmiştir. Şekilde sıcak asit liçi ve mikrodalga yardımıyla liç karşılaştırılmıştır. Açıkça görülmektedir ki 16 dk mikrodalga yardımıyla liç ile Zn kazanımı 1 saat asit liçinden çok daha etkilidir. Mikrodalga fırınlar çok güçlü olduğu için karıştırma gerekmez. Yüksek verim ve hızlı liç gibi avantajlar yanında geleneksel liçin aksine mikrodalga metotta daha az kostik çözelti kullanılır.



Şekil 8. Mikrodalga liç ile sıcak asit liçi (HAL) karşılaştırması (10)



Şekil 9. Mikrodalga liç sisteminin şematik diyagramı (11)

Kuslu ve Bayramoğlu tarafından laboratuvar ölçekli çalışmada pirit çözünürlüğü üzerine radyasyon etkisi çalışılmıştır. Çalışmalarında Türkiye'deki bir bakır endüstrisinden alınan %46,35 Fe, %47,52 S ve %2,4 SiO<sub>2</sub> içeren pirit içeriği %88,9 olan numuneler kullanılmıştır. Kullanılan liç çözeltisi 0,5'ten 2N'ye değişen ferik sülfat çözeltileridir. Çalışmalar 50 ve 80°C sıcaklık aralığında yapılmış ve görülmüştür ki mikrodalga kullanımı pirit çözünürlük oranını arttırmıştır. Bu çalışmada mikrodalga radyasyonun asidik ferik sülfat çözeltisinde pirit çözünürlüğü reaksiyon mekanizmasını etkilemediği bulunmuştur. Bununla birlikte mikrodalga kullanıldığında aktivasyon enerjisi 18,72 kJ/mol ve bu neredeyse geleneksel ısıtmada kullanılan aktivasyon enerjisinin yansıdır (3).

Diğer bir çalışmada bakır sülfür konsantrasyonunun mikrodalga destekli asidik ferik klorür liçi çalışılmıştır. Bu konsantrasyon temel bakır mineralleri kalkosit (Cu<sub>2</sub>S) ve kalkopirit (CuFeS<sub>2</sub>). Liç çamuru direk olarak çeşitli zaman dilimleri için mikrodalga ile ısıtılmış ve 40-45 dakikalık mikrodalga ısıtması sonucu %99'luk bakır kazanımına ulaşılmıştır. Oysa geleneksel ısıtmada aynı ekstraksiyon mertebesine ulaşmak için 2 saatlik ısıtma işleminin gerekli olduğu belirtilmiştir (12).

Oksidan olarak nitrik asit çözeltisi kullanan geleneksel hidrometalurjik yöntemleri geliştirmek için refrakter altın cevherinin ön işleminde mikrodalga uygulaması çalışılmıştır. Huang ve Rowson (2002) çalışmalarında bir nitrik asit ortamında pirit ve markanzit çözünürlüğünü

çalışmışlardır. Sonuçlara göre yüksek konsantrasyonlu HNO<sub>3</sub> (4M) kullanıldığında mikrodalga enerji çözünürlük süresini yalnızca 10 dk'ya düşürmüştür. Aynı şartlarda %93 pirit ve markanzitin neredeyse tamamı çözülmüştür. Buna rağmen elektrik enerjisi ile ısıtma vasat çözünürlük oranları verir (%5-20).

#### 4. Sonuçlar

Birçok metalurjik proses üzerinde laboratuvar ölçekli mikrodalga ısıtma uygulamaları göstermiştir ki mikrodalgaların çok kısa proses zamanında yüksek verim, enerji tüketiminde azalma gibi çeşitli faydaları var. Bununla beraber, elektrik enerjisinden mikrodalga üretimi boyunca büyük enerji kayıpları ortaya çıkıyor ve toplam enerji oluşumu elektrik enerjisi üretimi için kullanılan yakıtın enerji içeriğinden %30 düşüktür. Bundan dolayı geleneksel ısıtmanın mikrodalgayla ikame edilmesi ancak mikrodalganın avantajları elektrikle ısıtmanın verimliliğini karşılayacak şekilde olursa ekonomik olarak uygulanabilir. Özellikle çok kısa sürelerde yüksek güç çıktılar veren mikrodalga jeneratörlerin geliştirilmesi ve çok hızlı (0,1 sn. gibi) ısıtmaya elverişli yüksek elektrik alan gerilimi oluşturacak rezonans boşluk sistemlerin tasarımı ile birlikte ekonomik enerji girdilerinin oluşturulması sonucunda bu teknolojinin metalurji sektöründe uygulama alanı bulması söz konusu olabilecektir.

#### Kaynaklar

- (1) Haque, K.E., 1999; "Microwave Energy for Mineral Treatment Processes-a Brief Review", International Journal of Mineral Processing, 57, 1-24.
- (2) Toraman O., Depçi T., 2007, "Kömürde Mikrodalga ile Önileşim Uygulamaları" Madencilik, Cilt 46, Sayı 3, Sayfa 43-53, Eylül
- (3) Panias D., Krestou A., 2004, "Use of Microwave energy in Metallurgy", AMIREG, pp 215-220
- (4) Kutbay I., Kuşkonmaz N., 2004, "Mikrodalga Isıtmanın Seramik Üretiminde Kullanımı", Metalurji, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Yayın Organı, sayı:137, sayfa: 52-56
- (5) Pickles, C.A., 2009, "Microwaves in Extractive Metallurgy: Part 1 - Review of fundamentals." Miner. Eng. (2009), doi:10.1016/j.mineng.2009.02.015
- (6) Eskibalı M.F., 2007, "Cevher Hazırlama ve Zenginleştirmede Mikrodalga Enerjisinin Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi
- (7) R.K. Amankwah, C.A. Pickles, W.-T. Yen, 2004, "Gold recovery by microwave augmented ashing of waste activated carbon", Miner. Eng. (2009), doi:10.1016/j.mineng.2004.08.015
- (8) Pickles, C.A., 2009, "Microwaves in extractive metallurgy: Part 2 - A review of applications" Miner. Eng. (2009), doi:10.1016/j.mineng.2009.02.014
- (9) Kingman S.W., Al-Harash M., 2003, "Microwave assisted leaching - a review" Hydrometallurgy (2004), doi:10.1016/j.hydromet.2003.10.006
- (10) K. Hari Krishnan, D.B. Mohanty, K.D. Sharma, (2007) "The effect of microwave irradiations on the leaching of zinc from bulk sulphide concentrates produced from Rampura-Aguha tailings", doi:10.1016/j.hydromet.2007.08.007
- (11) D.K. XIA, Pickles, C.A, 1999, "Microwave caustic leaching of electric arc furnace dust", Minerals Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 79-94,2000
- (12) Yıldız K. and Alp A., "Using of Microwave in Metallurgical Processes", Metalurji TMMOB, Vol.24, No.125, 1300-4824,1999