

MT Bilimsel

Yer Altı Kaynakları Dergisi | *Journal of Underground Resources*

Derginin Adı
MT Bilimsel

İmtiyaz Sahibi
MAYEB Basın Yayın
İnsan Kaynakları Ltd. Şti.
adına Onur Aydın

Genel Koordinatör
Onur Aydın
onur@mayeb.com.tr

Yazı İşleri Müdürü
Volkan Okyay
volkan@mayeb.com.tr

Yurtdışı İlişkiler
Eray İmgel
eray@mayeb.com.tr

Grafik Tasarım - Uygulama
Simge Ören
simge@mayeb.com.tr

Hukuk Danışmanı
Av. Evrim İnal
evrim@madencilik-turkiye.com

Yayın İdare Merkezi
1042. Cd. (Eski 4. Cd.) 1335. Sk.
(Eski 19. Sk.) Vadi Köşk Apt.
No: 6/8 A. Öveçler ANK.
Tel : +90 (312) 482 18 60
Fax : +90 (312) 482 18 61

info@mtbilimsel.com
www.mtbilimsel.com

Yerel Süreli Yayıncıdır

ISSN 2146-9431

Ulusal Hakemli Dergidir



Yayın Kurulu

Baş Editör:

C. Okay Aksoy (Dokuz Eylül Üni., Maden Müh. Bölümü)
o.aksoy@mtbilimsel.com

Yardımcı Editörler:

Mahmut Yavuz

Eskişehir Osmangazi Üni., Maden Müh. Bölümü

Vehbi Özacar

Dokuz Eylül Üni., Maden Müh. Bölümü

Eren Kömürlü

Karadeniz Teknik Üni., Maden Müh. Bölümü

Madencilik Türkiye Dergisi Temsilcisi

Onur Aydın (Madencilik Türkiye Dergisi)
onur@mtbilimsel.com

Editörler (Alfabetik):

- Ali Sarıışık (Afyon Kocatepe Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Bahtiyar Ünver (Hacettepe Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Christopher Mark (Mine Safety & Health Admin., Coal Mine S. & H.)
- Çağatay Pamukçu (Dokuz Eylül Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Emin Candansayar (Ankara Üni., Jeofizik Müh. Bölümü)
- Erol Kaya (Dokuz Eylül Üni., Maden Müh. Bölümü)
- G. Gülsev Uyar Aldaş (Ankara Üni., Jeofizik Müh. Bölümü)
- Güner Gürtunca (National Institute for Occupational Safety & Health)
- Hakan Başarır (Malatya İnönü Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Işık Yılmaz (Cumhuriyet Üni., Jeoloji Müh. Bölümü)
- İhsan Özkan (Selçuk Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Kadri Dağdelen (Colorado School Of Mines, Dept. of Mining Eng.)
- Kerim Küçük (Dokuz Eylül Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Melih Geniş (Zonguldak Karaelmas Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Melih İphar (Eskişehir Osmangazi Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Mustafa Ayhan (Dicle Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Nuh Bilgin (İstanbul Teknik Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Nuray Demirel (Orta Doğu Teknik Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Pinnaduva Kulatilake (The Univ. of Arizona, Dept. of Min. & Geo. Eng.)
- Raşit Altındağ (Süleyman Demirel Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Reşat Ulusay (Hacettepe Üni., Jeoloji Müh. Bölümü)
- Sair Kahraman (Niğde Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Samuel Frimpong (Missouri Univ. of Science & Tech., Dept. of Min. Eng.)
- Şevket Durucan (Imperial College, Mining And Environmental Eng.)
- Tim Joseph (Univ. of Alberta, School of Mining & Petroleum Eng.)
- Turgay Ertekin (The Pennsylvania State Univ., Petroleum & Nat. Gas Eng.)
- Turgay Onargan (Dokuz Eylül Üni., Maden Müh. Bölümü)

Yıl:7 | Sayı:14 | Temmuz 2018

ISSN: 2146-9431

Year:7 | Number:14 | July 2018

İçindekiler

Gizem Güzel Altınsu, Tolga Bekler, Lúdvík S. Georgsson

Jeotermal Alanların Değerlendirilmesinde Jeofizik Yöntemler.....1

Abdul Vahap Korkmaz

Karadeniz Bölgesi Çimento Hammadde Potansiyelinin Değerlendirilmesi.....17

Diler Katırcıoğlu-Bayel, Öner Yusuf Toraman, Şafak Gökhan Özkan

Baritin Yaş Öğütülmesinde Öğütme Parametrelerinin Etkisi.....31

Hasan Hacıfazlıoğlu, Yeşim Konuk

Ham Manyezit Kekinin Farklı Fırınlarda Kurutulması ve Fırın Performanslarının Etüdü.....45

Makale Gönderim Tarihi: 05.10.2017

Yayına Kabul Tarihi: 27.10.2017

Jeotermal Alanların Değerlendirilmesinde Jeofizik Yöntemler

¹Gizem Güzel ALTINSU¹, Tolga BEKLER^{1*}, Lúdvík S. GEORGSSON²

²Birleşmiş Milletler Üniversitesi, Jeotermal Eğitim Programı, İzlanda

*Sorumlu Yazar: tbekler@comu.edu.tr

Özet

Jeofizik yöntemler, uygulama aşamasında serbest yüzeyden daha derinliklerde termal akışkanların kimyasal ve jeolojik yapısına göre jeotermal kaynakların araştırılmasında üç temel disipline sahiptir. Elektrik öz direnç, termal yöntemler gibi temel disiplinler jeotermal aktiviteden doğrudan etkilenebilen parametrelerin elde edilmesinde etken role sahiptir. Jeofizik yöntemler ile incelemesi yapılan jeotermal alanlar oldukça karmaşık yapısal özelliklere sahiptir. Bu anlamda çoklu jeofizik yöntemlerin problemin çözümüne tümleşik olarak katkısı oldukça önemlidir. Bu çalışmada özellikle popüler olan yöntemlerin uygulama aşamasında tanımları ve sınırları örneklerle sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal, Jeofizik

Abstract

Geophysical methods have three main disciplines in the exploration of geothermal resources in application according to the chemical and geological structure of thermal fluids located at free surface to the deeper parts. Those basic disciplines such as resistivity methods and thermal methods are aimed to investigate the parameters that are directly influenced by the geothermal activity. Geothermal areas examining with geophysical methods are naturally complex geological environments. Integration of multiple approaches provides significant contribution to solving the problem. This study aims to make short descriptions of the most popular geophysical methods and examples about their limits and uses.

Keywords: Geothermal, Geophysics

1. Giriş

Jeotermal güç üretimi yüksek üretim maliyetleri paralelinde artmakla beraber hızlı gelişen bir endüstri haline gelmiştir. Bu yüksek maliyetlerin en büyük nedenlerinden biri yeraltı ortamındaki sınırlı bilgiden dolayı saha çalışmalarındaki geniş ölçüdeki risklerdir (Barbier, 2002, Tester ve ark., 2006). Risklerin en aza indirgenmesinde jeotermal kaynağın varlığı, potansiyeli ve yeraltındaki geometrik sınırlarının görüntülenmesinde yapısal parametre uzayına sahip tekniklerin jeofizik yöntemlerin birlikte analizinden faydalanılmaktadır. Jeotermal kaynakların jeofizik yöntemlere verdiği parametre uzayının farklılığının (anomali) araştırılmasında, hazne kaya akışkan içeriği, ısı yayılım farklılıkları, süreksizlik morfolojisi ve derinliği, bu parametreleri doğrudan etkileyen faktörlerdir. Arama amaçlı bu çalışmaların hedefinde; bir jeotermal kaynağın taslağını çıkarmak (delineate), üretim sahasının taslağını çıkarmak, kuyu açmak için artezyen akiferlerinin ve artezyen akiferlerini kontrol eden yapıların yerini saptamak ve/veya jeotermal sistemin genel özelliklerini saptamaktır. Bu hedeflerin en önemli unsuru da kaynağın verimliliğini doğrudan ilgilendiren parametreler olup bunlar; sıcaklık, gözeneklilik, tuzluluk ve basınç değişimleridir. Bu parametrelerin çoğu anomali verebilecek nitelikleri ile doğrudan yada dolaylı olarak jeofizik ölçümlerin hassas olduğu parametreleri ile ilişkilendirilir ve jeotermal sistem ile ilgili önemli bilgi verirler. Bu parametrelerin başında, sıcaklık, elektriksel iletkenlik, mıknatıslanma, yoğunluk, sismik hız, sismik aktivite, ısı iletkenliği gelmektedir.

Genelde birincil, dolaylı ve yapısal yöntemler arasında bir ayırım yapılır. Birincil yöntemler jeotermal yöntemlerden etkilenen parametreler hakkında bilgi verirken, yapısal yöntemler jeotermal sistemi anlamak için önemli olan jeolojik alanları ve yapıları açığa çıkaran bilgiyi içerir. Birincil yöntemler termal, elektrik özdirenç ve doğal potansiyel uçlaşmaya yönelik yöntemlerini içerirken, yapısal yöntemler manyetik, yerçekimi (gravite) ölçümlerini, aktif sismik ve depremselliğin pasif görüntülemesini içerir. Yüksek ısı üreten kaynaklar ile karşılaştırıldığında düşük ısılı kaynakların araştırılması içinde farklı yöntemler uygulanabilir. Araştırmacıların uyguladığı rutinlerden yola çıkılarak uygulanan yöntemler benzer jeotermal alana rağmen bir ülkeden diğerine farklılık gösterebilir. Ayrıca; farklı yöntemlerin tümleşik analizi modelleme çalışmalarında önemlidir çünkü jeotermal bir sistemi iyi anlayabilmek için gerekli olan bilgiyi genelde tek bir yöntemin bağımsız ve bağımlı parametreleri veremez. Aşağıdaki bölümlerde jeotermal alanların jeofizik araştırmasında kullanılan en önemli yöntemleri kısaca tanımlanmış ve kullanımları üzerine örnekler verilmiştir.

2. Elektrik Yöntemler

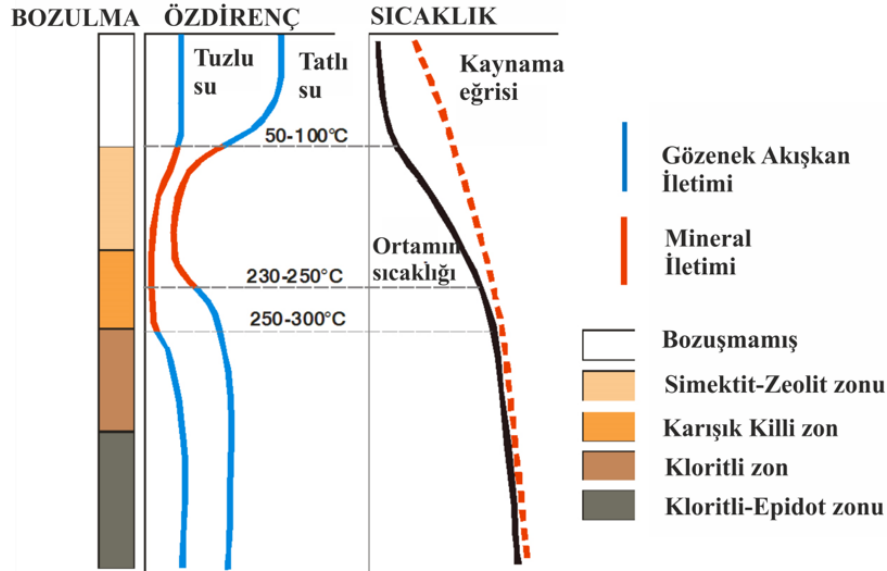
Jeotermal alandaki kayaçların elektrik özdirenç değeri, jeotermal sistemin veya oluşumun özelliklerini yansıtan bir parametredir. Kayaçların elektrik iletkenlikleri jeotermal kaynağın varlığı, uzanımı gibi kuvvetli anomali verebilecek karakteristik özelliklerini belirleyebilmek için oldukça önemlidir. Bu, ayrıca şu olgu ile ilintilidir; kayaçların özdirenci başlıca jeotermal aktivite ile örtüşen parametreler tarafından kontrol edilir. Bu jeotermal aktiviteler;

- Gözeneklilik ve gözenek yapısı ayırımının yapıldığı;
- Sedimanter kayaçlarda olduğu gibi tanecikler arası gözeneklilik,
- Volkanik kayaçların çatlak dokusuna veya soğumasına, gerilmesine bağlı olarak çatlak gözenekliliği,
- Kireçtaşı veya gaz içeriğinin (volkanik magma) çözünmesi ile olan gözeneklilik
- Kayaçların alterasyonu; sıklıkla su kaya etkileşimi ile ilgili olan gözenek duvarlarının sıralanması,
- Gözeneklerdeki akışkanın tuzluluğu,
- Sıcaklık

- Su miktarı örn; doygunluk veya buhar içeriği ve basınç.

Yukarıda sıralanan çatlak (ikincil) gözenekliliği, akışkan değişimi ve tuzluluğu, derecesi jeotermal bir sistemin en temel ve en önemli parametreleridir. Bu, jeotermal bir aramada ve özellikle volkanik bir sahada 'kayaçların özdirenç' parametresinin neden bu kadar önemli olduğunu açıklamaktadır.

Genelde elektrik iletiminin esas olarak birbiriyle bağlantılı ve su dolu gözenekler yoluyla olduğu söylenebilir. Kayaç oluşumu çok genç ise iletim esasen su boyunca olurken, çok iletken özelliklerinden dolayı 50 - 200°C arasında olduğundan, gözenek duvarlarının değişimini belirleyici faktör olabilmektedir. Sudaki akışkan dinamiğinde tekrar mekanizmasını kararlı iletme dayalı taşınmasındaki değişim yerine daha yüksek sıcaklıklarda dirençli alterasyon yer alır. Şekil-1'de alterasyon ve ısı ile su taşıyan kayaçların özdirençinin nasıl değiştiğini özetlemektedir. Düşük özdirençli bir katman içindeki yüksek özdirençli çekirdek yüksek ısı jeotermal sistemler için tipik bir göstergedir ve bu durum yüksek ısılarda şekillenen dirençli alterasyon mineralleri ile ilişkilidir.



Şekil 1. Kayaçların özdirenç, alterasyonu ve sıcaklıkla ilişkilendirilmesi (Árnason ve ark., 2000).

Doğru akım (DC) ölçümleri özdirenç yöntemlerinin bilinen en eski uygulamasıdır, uygulama açısından jeotermal aramalarda kullanılan ve 1950-1980'ler arasındaki rutin yöntemler olarak kabul edilmesine rağmen günümüzde kullanım pratikliği ve model çözümündeki zayıflıklarından dolayı sık uygulanmamaktadır. Ölçüm dizilimi 1 çift akım ve 1 çift potansiyel olmak üzere dört elektrot üzerinden gerçekleştirilir. Ölçüm yerinin morfolojik ve jeolojik şartları yanında hedef derinliği dizilimin konfigürasyonunu etkileyebilmektedir. Bu duruma bağlı olarak dizilimin düşey yönde değişimi (sondaj) veya yatay (profil) olacak şekilde ayarlanması gerekebilmektedir. Düşey elektrik sondajı ve profilleme arasında hedef yapının özdirenç tepkisinin düşeydeki veya yataydaki değişimine bağlı bir ölçüm farklılığı ve buna uygun dizilim dizayn farklılığı söz konusu olabilmektedir. Çok daha yaygın olan düşey elektrik sondajının sabit bir merkezi vardır ve derinlikle özdirenç değişimlerini haritalamak için elektrot mesafelerinin merkezden olan uzaklığı değiştirilerek yer içine verilen akımın oluşturduğu potansiyel farkına bağlı özdirenç değerleri hesaplanır. Profillemede ise elektrot mesafeleri sabitlenir, ve yanal

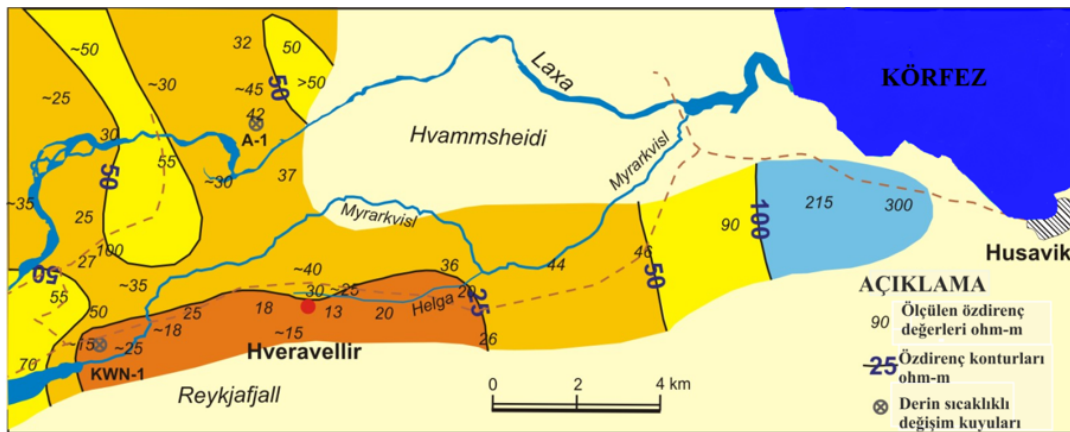
değişimleri haritalamak için tüm profil boyunca hizalanır. Jeotermal aramalarda en yaygın yapılandırmalar;

- En çok kullanılan dizilim türü olan Schlumberger düşey elektrik sondajıdır. Elektrotlar bir sıradadır (hizadadır) ve kurulum merkeze yansıtılır. Potansiyel elektrotlar çifti merkeze yakın tutulurken, akım elektrotları çifti kademeli olarak merkezden uzaklaştırılır.
- Çift kutuplu (dipol) düşey elektrik sondajı ve profillemeye; bu profillemeye birçoğu 1970 ve 1980'lerde oldukça yaygın kullanılmış olan çeşitli dizilimler vardır.
- Yüzeyle yakın düşey çatlakları veya fayları tespit etmek için olan doğrudan profillemeye kullanılır.

DC derinlik ölçümü yapılan yerler için gerekli ekipman iyi bir akım üreticisi, hassas bir potansiyel-voltaj alıcısı, makara üzerinde kablolar, elektrotlar ve bir akım (güç) kaynağıdır. Akım iletimi için pratik ve ekonomik olması açısından akü (12V, 40-60AH) kaynak olarak ölçümlerde tercih edilir.

Yerkürenin tekdüze olmaması ve yön bağımlı olması nedeni ile kayaçlarının elektriksel özellikleri de yatay ve düşey yönde farklılık gösterebilir. Katmanlı yapılar üzerinde elektrik özdirenç ölçmelerinin temel hedefi, serbest yüzeyde ölçülen gerilim farklılıklarına bakmak, serbest yüzeyin altındaki katman sayısını modellemek, dolayısı ile her katmana ait kalınlık ve elektriksel iletkenliklerinin nasıl değiştiğini belirlemektir. Bu yöntemi uygulamak için yerinin elektrik akımı ile uyarılması ve buna tepki olarak kayaç ortamındaki gerilim oluşması ve bunun kuramsal olarak ölçümü gereklidir. Yöntemin uygulanmasında ölçülen iki nokta arasındaki gerilim farklılığıdır. Serbest yüzeyde belirli bir doğrultu boyunca seçilen bir serime ait dizilimin geometrisine uygun örneğin orta noktasına göre dizilim uçlarına doğru açılım yapılır. Her açılım artırımı için akım geçişine derinlikteki ek bir direnç katılımı ile kayaç tepkisi olacağından yüzeyde ölçülen gerilim özdirençin derinlikle olan değişimini yansıtacaktır. Bu yöntemin bu hali bilinen ve en sık kullanılan dizilimi Schlumberger olup genelde en fazla 1-2 km'lik AB/2 (AB, akım elektrot aralığı) elektrod aralığı akım gücüne göre artırılır. Uzak mesafeler için daha uzun kablolar kullanmak pratikte zor olabilir. Dirençli cisimlerin 1 boyutlu yorumlanması basittir ancak çoğunlukla 2 ve 3 boyutlu yorumlanmaları gereklidir ve çok daha karmaşıktır.

Şekil-2'de Schlumberger dilimine dayanarak deniz seviyesinden 500 m altında özdirenç gösteren Husavik (Kuzey İrlanda) bölgesel özdirenç haritası gösterilmektedir. Hveravellir düşük sıcaklık sahası alanı ile ilişkili düşük özdirenç anomalisi belirgin bir şekilde izlenmektedir.

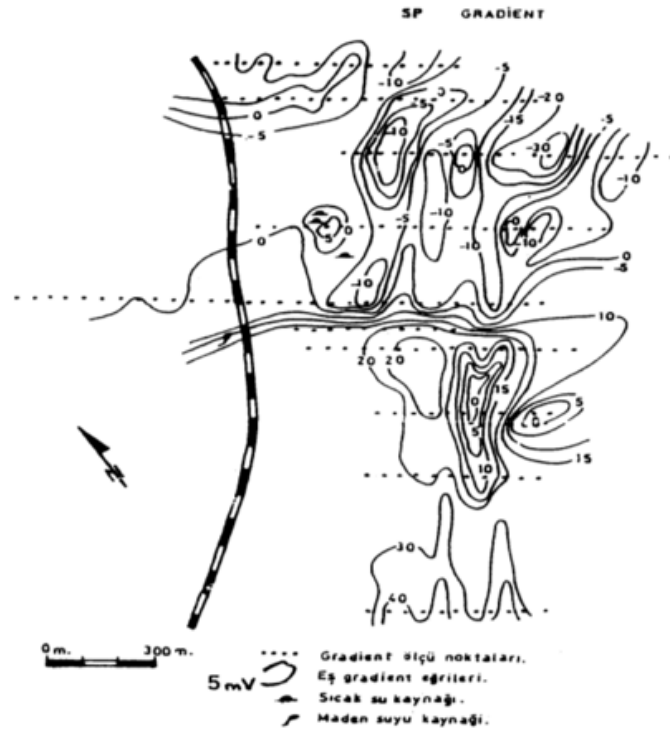


Şekil 2. Hveravellir düşük sıcaklık sahası ile uyumlu düşük rezistivite anomalileri (Georgsson et al., 2005).

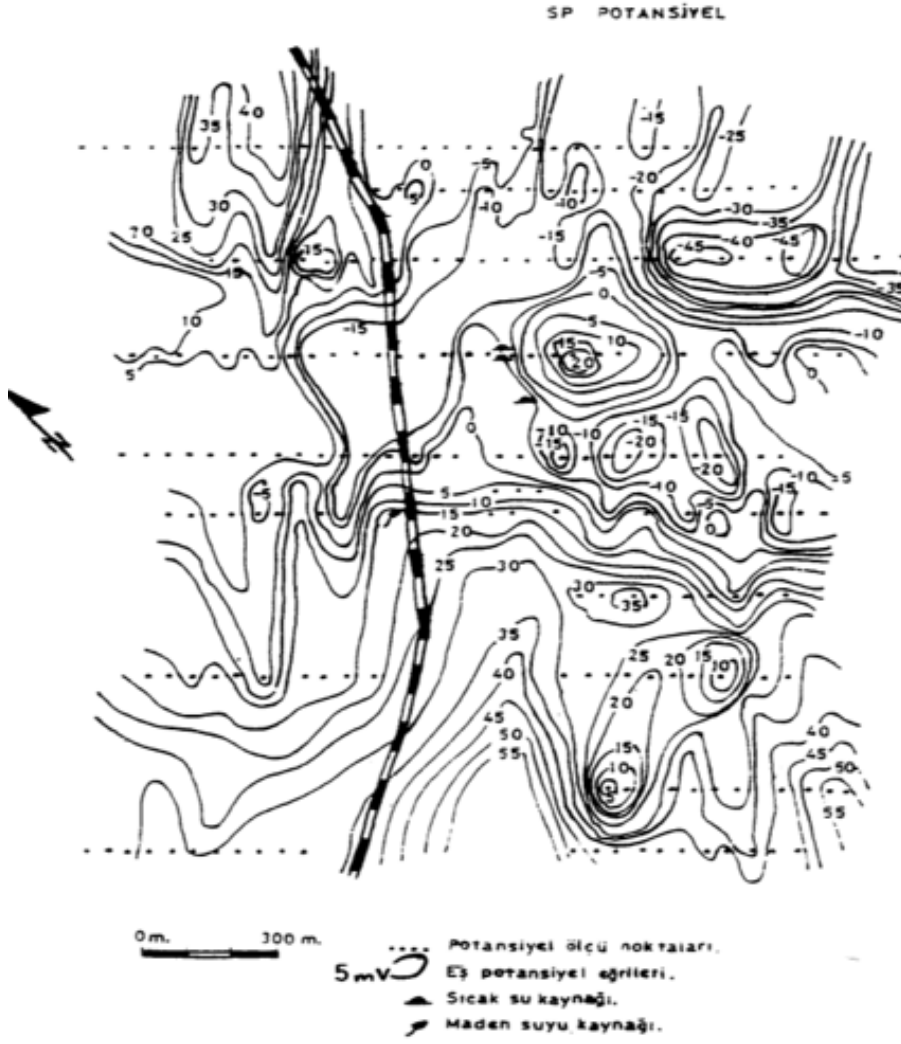
3. SP Ölçümleri:

Doğal potansiyel veya SP (Spontaneous Potential - Self Potential) elektriksel ölçümler, yerkürenin doğal elektrik potansiyelini DC bileşeni ile eşleme amaçlı özel bir yer elektrik oluşum çeşididir. Kapanım şeklinde anlamlı anomaliler jeotermal aktiviteler ile ilişkili olabilmektedir. Anomaliler de sıcaklık farkı; termo-elektrik oluşturma potansiyeli ile ilgili olabilir veya sıcak sıvı ya da soğuk su akışı, fakat aynı zamanda kaya veya gözenek suyu iletken maden veya kimyasal değişimlerini de etkileyebilir. Yöntem güncel olarak jeotermal alanların ortaya çıkarılmasında önemli çıktılara verebilecek niteliklere sahip olmakla beraber ölçülen verinin yorumlanmasının oldukça zor olması nedeni ile kullanımı çok fazla değildir. En önemli uygulamalar jeotermal alan sınırlarının haritalanması ve fay izlerinin belirlenmesine yönelik görüntüleme çalışmalarıdır. Örneğin Japonya'daki bir çalışmada, SP anomalisini veren temel nedenlerden birinin buharlaşma potansiyeli olması nedeni ile sıvı-baskın jeotermal sistemlerin rezervuar görüntülenmesinde bu yöntem kullanımı tercih edilmiştir (Yasukawa ve ark., 2005).

Anadolu'nun tektonik penceresine bakıldığında oldukça aktif fay sistemlerin baskın olduğu görülmektedir. Bu dinamik kuvvetler etkisi altında tektonik çarpışma bölgelerinde genç volkanizma oldukça etkindir ve Alp orojenezi sırasında şiddetli tektonizma geçirmesi, konvektif dinamikler ve buna bağlı olarak yerkabuğunun içine yerleşen magma odakları jeotermal oluşumlarda etkin faktör olmuştur (Şener ve ark., 1986). Ülkemizde de bu tektonik pencere içerisinde birçok jeotermal alanın ortaya modellenmesinde yararlanılan SP yönteminin uygulandığı bir bölgede Uşak-Banaz jeotermal sahasıdır. Gradyent ve potansiyel ölçümleri ile daha güvenilir SP ölçümlerinden beklenen sıcak su çıkışı olduğu yerlerde değerler pozitif olurken soğuma ile derine dönüşlerin olduğu yerlerde ise negatif değerlere ulaşılabilmektedir. Şekil-3 (SP, gradyent haritası) ve şekil-4 (SP, potansiyel haritası) de gösterilen her iki haritada da sıcak su kaynaklarının etrafında belirgin kontür kapanımları dikkati çekmektedir (Türker ve ark., 1991)



Şekil 3. SP gradient haritası, Uşak – Banaz (Türker ve ark., 1991)



Şekil 4. SP potansiyel haritası, Uşak – Banaz (Türker ve ark., 1991)

4. MT Ölçümleri:

Manyetotellürik (MT) veya doğal kaynaklı elektromanyetik güç kaynağı olarak dünyanın doğal elektromanyetik alanını kullanır. Değişken doğal manyetik alanı iletken yeryüzünde elektrik akımları doğurur. Düşük frekanslarla daha derin seviyelere ulaşılacak istenmesi sondaj derinliği ile ilgilidir. Böylece, 0.00001 – 10 Hz frekanslar yüksek frekanslar üst tabaka için, 10 - 1000 Hz düşük frekanslar gibi derin yer kabuğu araştırmaları için kullanılır. Yöntemin alt sınıfları;

- MT: 10-5 - 1 Hz
- Duyulabilir (Audio) MT: 1Hz - 5x10⁴ Hz
- Radyo MT: 10⁴ - 10⁶ Hz
- Kaynağı Kontrollü (Controlled Source) AMT, İnsan-yapısı kaynak kullanarak sinyal sağlama.

Bu yöntemin tercih nedeni,

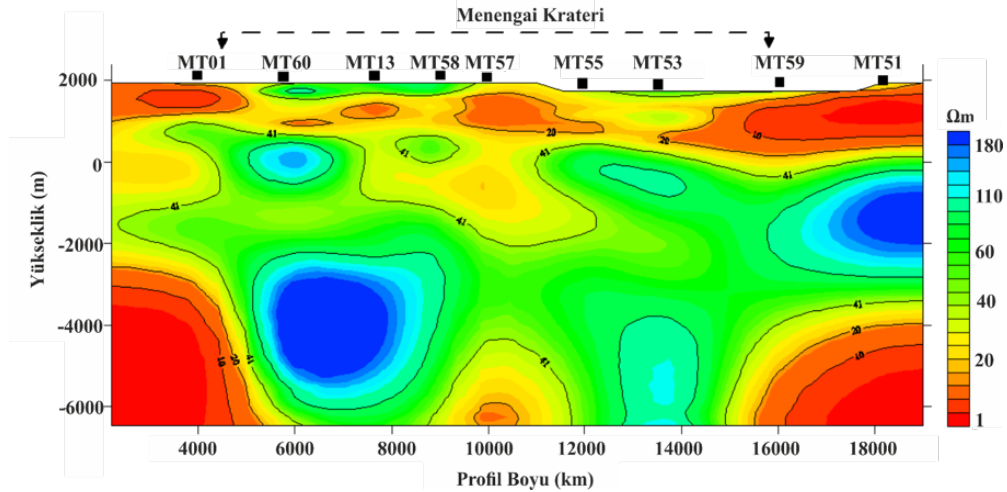
- 1- Derine nüfuz etmesi,
- 2- Sismik yöntemin zayıf kaldığı yerlerde uygulanabilir olmasındandır.

MT' nin amacı: yüzey elektromanyetik empedansından (Z_s) hesaplanan yeraltının (x,y,z) öz direnç dağılımıdır. MT diğer temel elektrik yöntemlerine göre bir avantaj sağlayan derin direnç

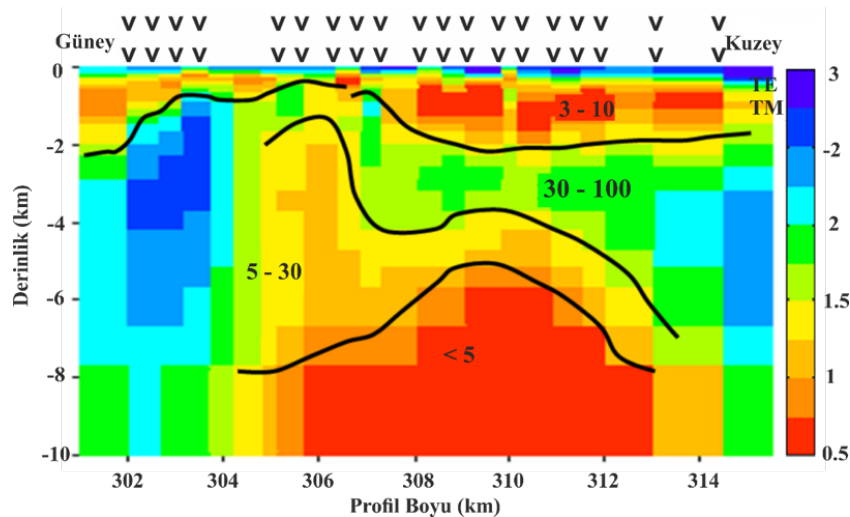
yapıları, tespit etmek için güçlü bir yöntemdir. Ekipmanlar taşınabilir ve veri toplama oldukça basittir. MT ölçümlerine zamanın fonksiyonu olarak manyetik alan bileşeni B ve indüklenen elektrik alan E ölçülür. Ancak MT ölçümleri kültürel gürültülere oldukça duyarlıdır (enerji hatları vb.). Son yıllarda MT ve TEM (Geçici – Transient- Elektromanyetik Yöntem) sıklıkla birlikte kullanılmaktadır. TEM ölçümleri en üst haritalama elde etmek için MT ölçümlerinin yorumlanması ve böylece daha derin bir yüzeyden daha iyi bilgi elde etmek ve derinliğin artırılması amacıyla kullanılan önde gelen yöntemlerden biri olmuştur. Bu şekilde 5-10 km kilometre derinliğe ulaşan jeotermal sistemlerin derin parçalarının direnç dağılımları hakkında güvenilir bilgilere ulaşmak mümkündür.

Şekil 5’da yaklaşık 8 km derinlikteki Kenya’da bulunan Menengai yüksek sıcaklıktaki jeotermal sisteminin MT kesiti gösterilmiştir. Düşük dirençleri, Menengai içerisindeki en üst kilometrelerdeki bir kraterden, daha yüksek dirençler ise daha derin seviyeleri göstermektedir.

Şekil 6’ de Kuzey –İzlanda bulunan yüksek sıcaklıktaki Krafla jeotermal sistemine ait MT kesiti gösterilmiştir. Düşük direnç, yüzey yakın alanları yansıtır, 1-4 km derinliğindeki işletilebilir jeotermal rezervuarı yüksek dirençli alanlardır. Düşük dirençli alanlar ergimiş büyük bir magma kütesini yansıtabilir.



Şekil 5. Yüksek sıcaklıktaki Menengai alanından ve Kenya rift kraterinden alınan MT kesiti (Wameyo, 2005).



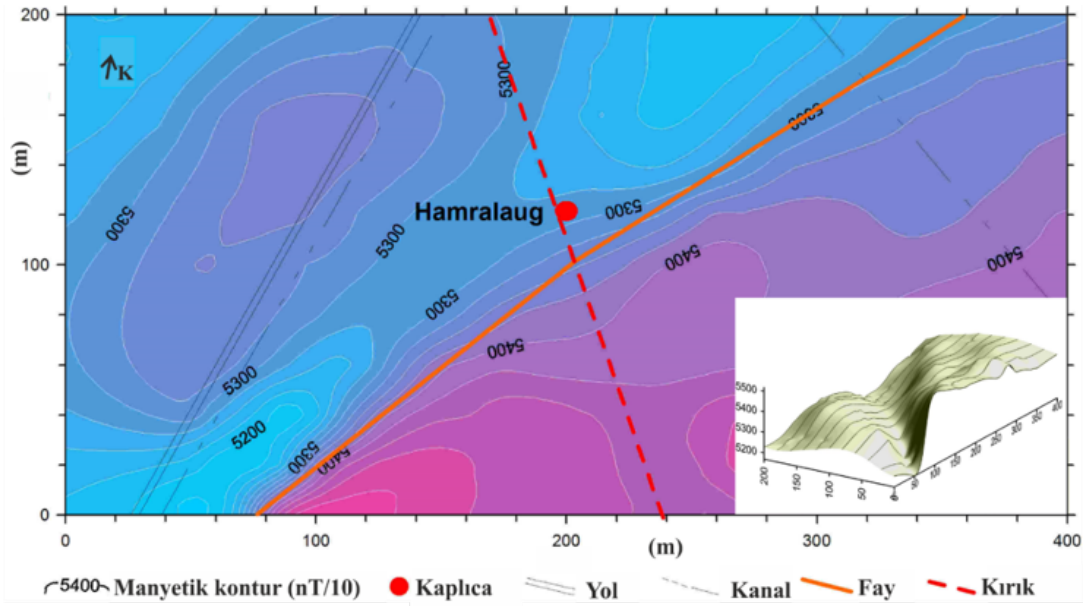
Şekil 6. Kuzey-İzlanda da bulunan yüksek sıcaklıktaki Krafla alanından alınan MT kesiti (Árnason, 2007)

5. Manyetik Yöntemler:

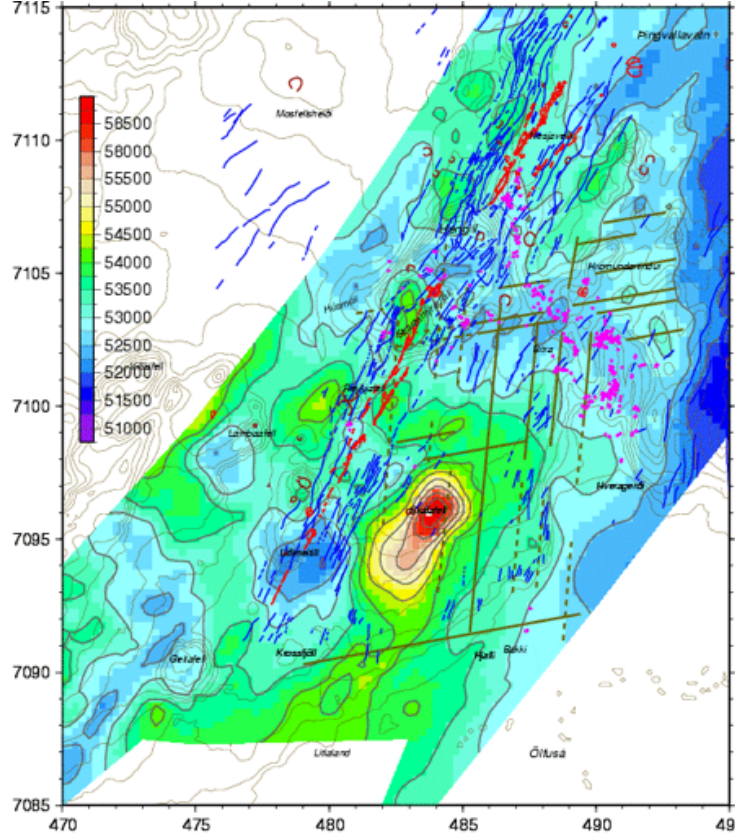
Manyetik yöntem yaygın olarak jeotermal arama ve jeolojik yapıları haritalama, gravite ve sismik kırılma ölçümleri ile birlikte tümleşik olarak kullanılabilir. Kayaçlarda mıknatıslanmanın iki türü vardır:

- İndüklenmiş mıknatıslanma M_i , Dünya'nın manyetik alanıyla aynı yönde olan mıknatıslanma türü
- Kalıcı mıknatıslanma M_p , oluştuğu zamanın özelliklerine bağlı olarak kayacın içindeki baskın mıknatıslanma özelliğidir, genellikle magmatik kayaçlarda baskındır.

Manyetik anomali yerel ya da bölgesel bir bozulma ile mıknatıslanmadaki bir değişiklik nedeniyle oluşur. Etkili mıknatıslanma anomalisi ile kütlelerin şekli, konumu, yaşı, yönü ve büyüklüğü ile karakterize edilebilir. Manyetik alan şiddeti manyetometre ile ölçülür ve manyetik alan şiddeti genellikle γ (gama) veya nT(nanotesla) ile gösterilir. Jeotermal alanlarda, manyetik ölçümler genel olarak gömülü kaynak ve fayları tek tek izleme, bulma ve muhtemel derinliklerini tahmin etmekte kullanılır. Ayrıca indirgenmiş mıknatıslanma alanları termal aktivite nedeniyle bulmakta da bir hedef olabilmektedir. Tali faylar veya çoklu çatlak sistemleri gibi yerel yapılar için ölçümler paralel profiller boyunca bu düzlem üzerinde yapılır (Şekil 7). Ölçümleri eşleme gibi daha büyük anomalileri veya daha derin yapısal unsurları ortaya çıkarmayı amaçlayan çalışmaların niteliği tortul havzalardaki MT profillerinin topoğrafik değişimlerine ve aralığı tercih edilen veri yoğunluğuna dayanır. Bu durumda işlem havadan manyetik ölçümler yoluyla yapılabilmektedir (Şekil 8).



Şekil 7. Batı-İzlanda, Ásgardur jeotermal alanındaki manyetik anomali ve 3 boyutlu yüzey haritası (sol alt) . Ana anomalideki fay için her iki taraftaki kayaçların kendine özgü mıknatıslanma farkı doğacaktır (Ganbat, 2004).



Şekil 8. Hengill bölgesi yüksek sıcaklık alanının manyetik haritası; tektonik hareketler, sıcak su çıkışları, yüksek manyetik şiddeti, buzul çağına ait volkanlar, sıcak noktalar gösterilmiştir (Árnason, 2007).

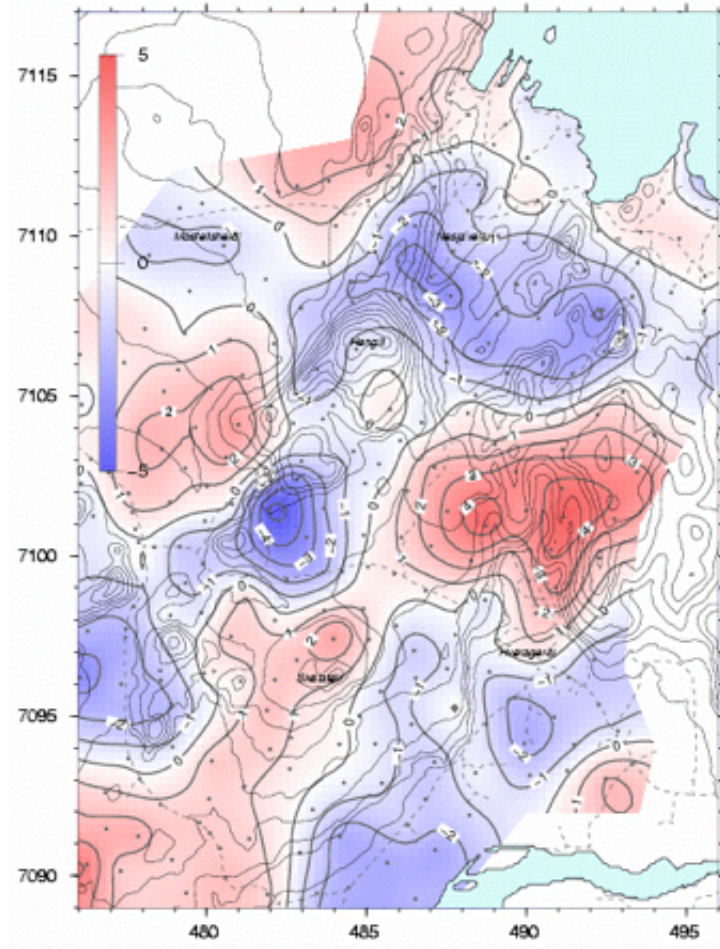
Araştırma yüksekliği için yaklaşık 100m yer üstünde ve 100m aralıklar arasında profil hatları sıklıkla kullanılır buna karşılık topografyanın düşük kotları da etkilenir. Anomalinin doğru yorumlanabilmesinde, kontur veya profil haritalarını ayırt etmek için kullanılan süzgeçler (filtering) oldukça etkilidir.

7. Gravite Ölçümleri:

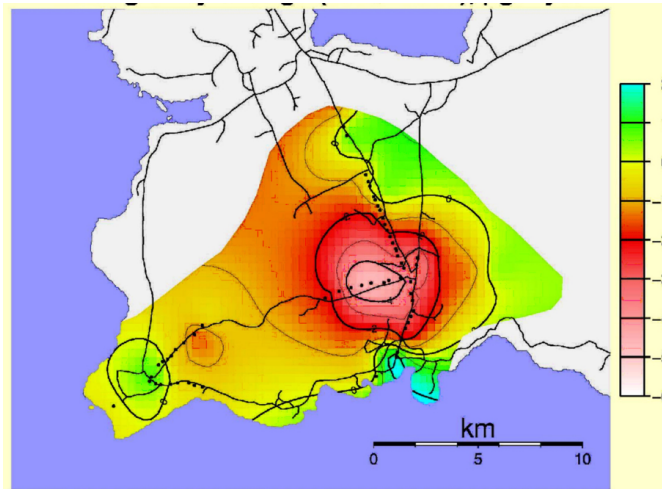
Gravite ölçümleri yeraltındaki yoğunluk farkları ile jeolojik oluşumları tespit etmek için kullanılır. Gravite ölçümlerinde yerçekimi ivmesindeki değişimler ölçülür ve genellikle mgal ya da 10^{-3} cm/s^2 olarak birimlendirilir. Kayaların yoğunluğu, yoğunlukla kaya bileşimi ve gözeneklilik dokusuna bağlıdır ve ayrıca kayaların kısmi doygunluk değerleri de etkileyebilir. Genellikle tortul kayalar kristal kayalara göre yoğunluğu daha azdır. Ham veriye çeşitli faktörlere göre düzeltme uygulanır. Bu düzeltmeler; gelgit etkileri, baza indirgeme, enlem, yükseklik, topografya ve gravimetredeki drift (sapma) düzeltmelerini yapılarak Bouguer anomali haritaları oluşturulur.

Veri işlem aşamaları manyetik yöntemle oldukça benzerdir. Ancak, yerçekimi yöntemi teorik yoğunluk dağılımları sonsuz sayıda verilen bir yerçekimi alanı uygun belirsizlik nedeniyle biraz sınırlıdır. Örnek olarak; Bouguer haritasında en büyük kapanımlar Tepetitán şehrinin kuzeyinde 5-9 mgal arasındadır. Ayrıca KB-GD yönlü jeotermal akışlar saptanmıştır. Rezidüel Bouguer haritasında grabenler arasındaki sınırlar belirlenmiştir. 3 km genişliğindeki kuzeydeki mavi negatif anomali bölgesi çöküntünün en çok olduğu yerdir. Jeotermal aramalardaki uygulamalar: tortul kayalarda ve volkanik kayalarda, termal etkenler yüzünden olası bir ısı kaynağı, fay ve dayk sistemleri ve bozulma (alterasyon) /çimentolama ile oluşan katman

derinlik varyasyonlarının haritalanmasıdır. Şekil 9 Hengill bölgesine ait Bouger anomali haritasını göstermektedir. Jeotermal sistemlerde önemli bir ek uygulama ise kütle ayıklama ve izleme için hassas gravite ölçümü kullanımıdır (Şekil 10).



Şekil 9. Yüksek sıcaklıklı Hengill bölgesi Bouger gravite haritası. Yüksek gravite alanları derin seviyelerdeki sokulum alanlarını göstermektedir (Árnason, 2007).



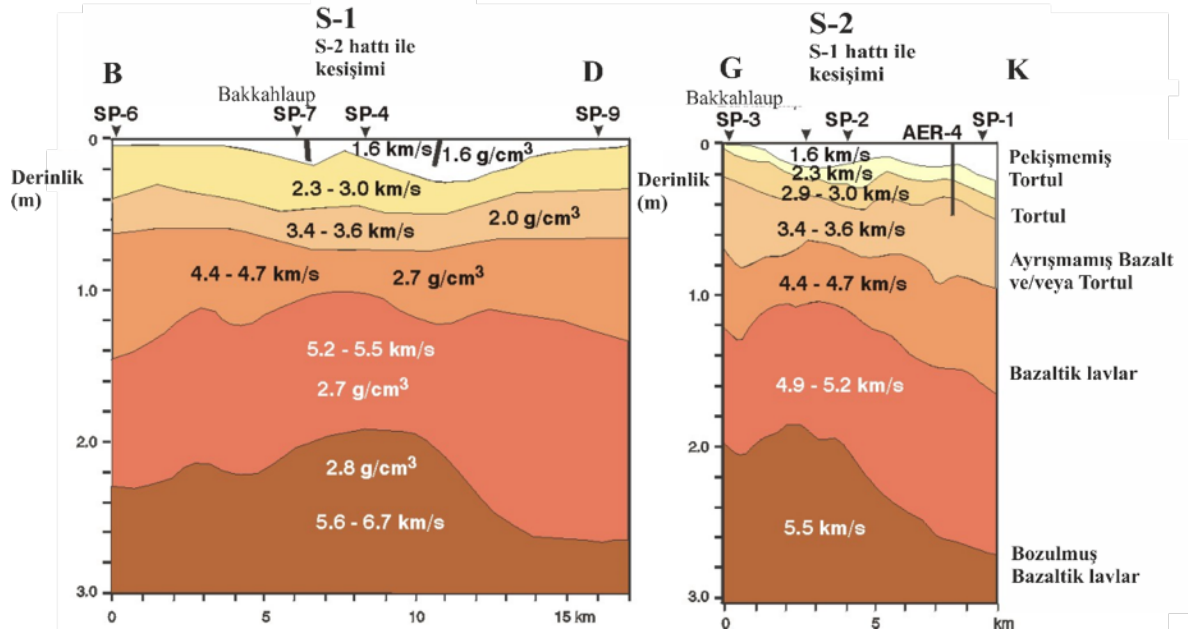
Şekil 10. Svartsengi jeotermal rezervuarındaki üretim sonucunda 1975 den 1999 $\mu\text{gal/yılları}$ arasındaki Reykjanes Peninsula dışında, güneybatı-İzlanda'nın ortalama yerçekimi değişimini (azalmasını) gösteren hassas gravite ölçümlerine ait anomali haritası (Eysteinnsson, 2000).

8. Sismik Yöntemler:

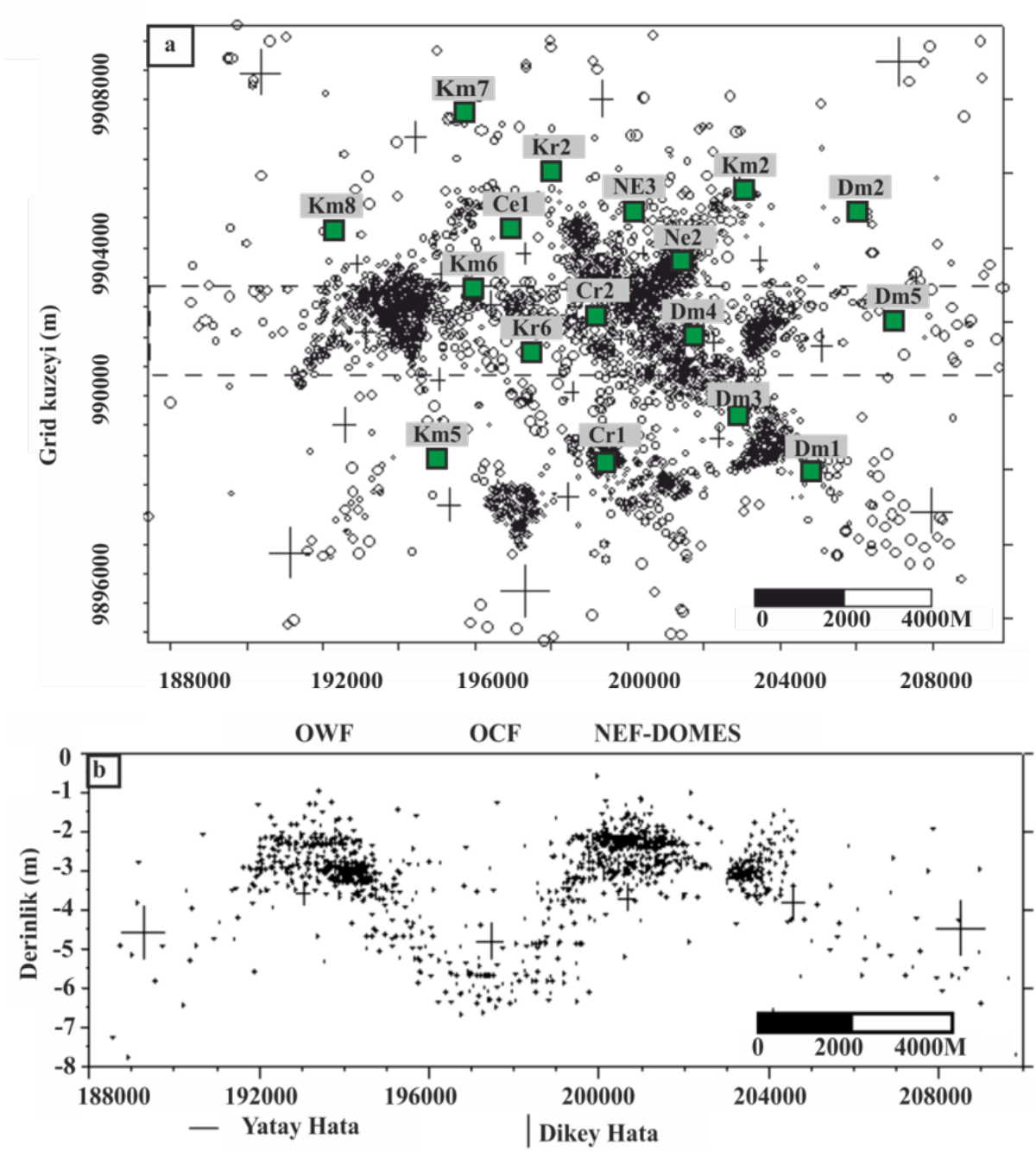
Sismik yöntem, yeryüzünden üretilen ses dalgalarının zayıflamasıyla ses dalgalarının hız dağılımının ölçülmesi prensibine dayanır. Sismik yöntemler yeryüzünde sismik aktiviteyi tespit ve bilgi almak için kullanılır, ses dalgaları, kimyasal patlatmalar veya mekanik elastik dalga üreticileri gibi, jeotermal sistem için etkili olabilecek kaynaklar olarak kullanılır. Sismik yöntemler ile oluşturan elastik dalgalar seyahat ederken farklı hızlara sahip kaya türleri ve/veya oluşumlar arasında elastik dalgalar kırılarak ve yansımaya uğrar. Elastik dalgaların yayılım özelliklerine göre iki türü vardır; P-dalgası veya basınç dalgasında, yayılım doğrultusunda tanecik hareket olurken, S-dalgası veya makaslama dalgasında ise tanecikler hareket yönüne dik doğrultuda hareket ederler. S- dalgası hareketi nedeniyle katılık modülü sıfır olan ortamlara nüfuz etmez.

Sismik ölçümlerde bir ayırım da kırılma ve yansıma ölçümlerinin yöntem fiziksel temeli (Snell ve Fermat ilkeleri) ve çözünürlük yeteneklerine göre yapılır. Aktif ölçümler ile; gözeneklilik, doku, süreksizlik sınırları, içi sıvı dolu bölgeler ve sıcak zon oluşumlarının yoğunluğu hakkında bilgi verir. Başta hidrokarbon olmak üzere jeotermal ve heterojen yapısının görüntülenmesinde kullanılan sismik yansıma donanım ve veri işleme detay ve aşamaları açısından oldukça pahalı olmakla birlikte modelleme çözünürlüğü kalitesi açısından son derece etkindir.

Yüksek sıcaklıklı jeotermal aktivite de ağırlıklı kristalin kayalar karışık yapılar olarak hakim durumdadır ve bu durum genellikle de volkanizma ile ilintilidir. (Şekil 11). Bu yüzden sismik yöntem ile derinlik penetrasyonu ile ilgili bilgiyi elde edebilmek oldukça maliyet gerektirmektedir. Farklı olarak, sismik yöntemlerin hız kontrastları oluşturan ara yüzey tepkilerinin elde edilmesinde etken olması, başta yüksek hızlı birimlerin üzerine örten tortullaşmanın varlığını ortaya çıkarmakta avantajlı olduğu da kaçınılmazdır.



Şekil 11. Kuzeydoğu - İzlanda, Oxarfjordur jeotermal bölgeye ait aktivite; çökelti bir ortamda, kırılma ölçümleri ve gravite ölçümlerine dayalı oluşan katmanlar gösterilmektedir. Yukarı doğru kübelenmesi jeotermal aktiviteden dolayı hızların yükselmesidir (Georgsson ve Fridleifsson, 2000).

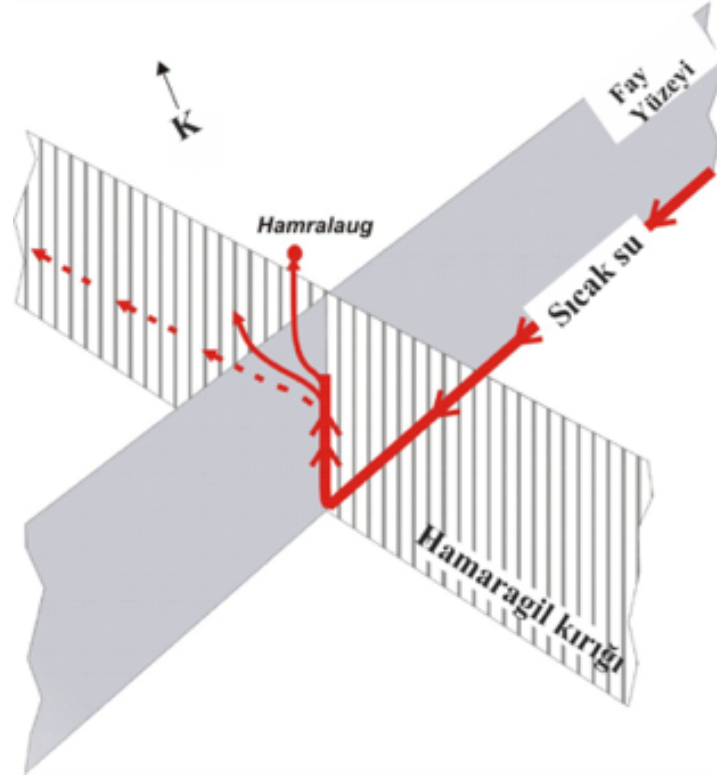


Şekil 12. (a) Kenya'da Olkaria bölgesinde meydana gelen depremlerin episantral dağılımı (b). Alttaki kesitte ana üretim alanları kırılğan/ esnek sınırlar, ısı kaynağı, yüksek ısı ve derinliği gösteren nispeten sıcaklıkların yükselmesi ile ilişkili olduğunu göstermektedir (Simiyu, 2007).

Pasif yöntemler (sismolojik yöntemler) aktif faylar ve geçirgen bölgeler (makaslama zonları) tanımlamak için ya da derinlik göstergesi kaynak olabilir, kırılğan ve yumuşak kabuk arasındaki sınır, bulmak için doğal mikrodeprem aktivitesi kullanılır. Bu ölçülen bölgedeki jeotermal aktivite anlamak için önemli olabilmektedir (şekil 12). Son olarak, S-dalgası fazı ışın yolları geometrisi ve hız dağılımları magma kökenli kısmi ergime zonlarının yerleri tahmin etmek için kullanılabilir. Bu aşamada düşük hızlı bölgeler akışkan kimyası ile uyumlu jeotermal bir alanın varlığını ortaya koymakta sismik tomografi çalışmaları oldukça belirleyicidir.

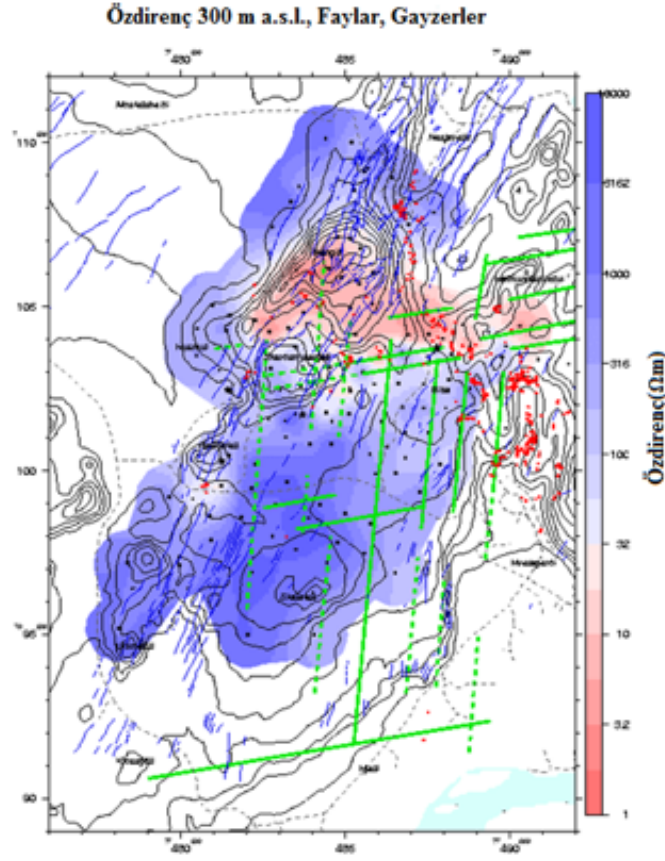
9. Bütünleşik Yöntemler

Jeofizik araştırmalar genellikle yöntemlerin bir kombinasyonuna dayanmaktadır. Bu kombinasyon işlemi jeotermal sistemleri daha iyi modellemek ve yorumlamak için gereklidir. Genel olarak, rutin yöntemler tercih edilmelidir, fakat bunlar yeterli değilse, farklı ve tamamlayıcı yöntemler kullanılabilir ya da doğaçlama yöntemlerin farklı dizilimlerinin de dikkate alınması gerekir. Şekil 13, Şekil 1 'de gösterilen sıcaklık ölçümleri ve Şekil 9'da gösterilen manyetik ölçümlerine dayalı Asgardur jeotermal sisteminin basit bir modeli gösterir. Manyetik ölçümler eşleştirilmiş ve KD-GB uzanımlı fay jeotermal alanın yüksekliklerine doğru su taşıdığını göstermektedir, ancak toprak sıcaklık ölçümleri, kuzeybatı kırığı ile jeotermal alanın kesiştiği noktada yukarı akışı bulunmaktadır.

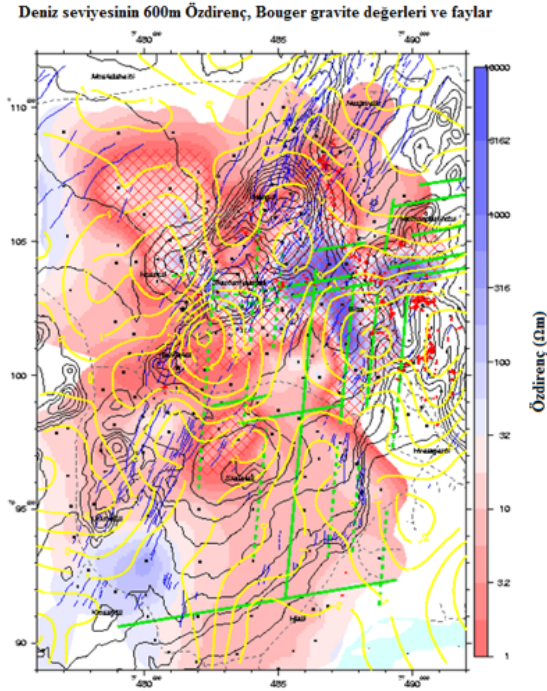


Şekil 13. Toprak sıcaklık ölçümleri ve manyetik ölçüm sonuçlarına göre batı-İzlanda Asgardur düşük sıcaklıklı jeotermal sisteminin basit bir modeli (Ganbat, 2004).

KB-İzlanda Hengill yüksek sıcaklıklı jeotermal alanın, öz direnç lokasyonları ve gravite verisi kombine edilmiştir, aktif faylar ve jeotermal aktivitenin dağılımı hakkında bilgiler şekil 14-15'da ki haritalar ile gösterilmektedir. Haritalar jeotermal sistemin anlaşılması için önemli bilgiler sağlamakla beraber olası yeni üretim alanları ortaya çıkarılmasında etkili olmuştur.



Şekil 14. Özdirenç haritaları, 300 m a.s.l. de ve 600 m b.s.l. de jeotermal aktivite dağılımı ve bir Bouguer gravite haritası ile birlikte aktif faylar üzerinde sismik ölçümler hakkında bilgiler vermektedir. Jeofizik veri bilinen üretim alanları hakkında önemli bilgiler sağlamıştır (Árnason, 2007).



Şekil 15. Özdirenç haritaları, 300 m a.s.l. de ve 600 m b.s.l. de jeotermal aktivite dağılımı ve bir Bouguer gravite haritası ile birlikte aktif faylar üzerinde sismik ölçümler hakkında bilgiler vermektedir. Jeofizik veri bilinen üretim alanları hakkında önemli bilgiler sağlamıştır (Árnason, 2007).

10. Sonuç ve Tartışma

Bir jeotermal sistemde kabuk ve üst kabuk 1-3 km'lik derinlikle sınırlıdır. Jeofizik yöntemlerin seçiminde sadece yöntem parametreleri değil, hedef derinlik ve sondaj seçimi de ön plana çıkacaktır. Araştırmanın amacına uygunluk, yöntem seçimine diğer yöntemler ile olan uyumluluğu ve beraber yorumlanabilir ortak parametrelerin belirlenmesini de gerektirir. Ancak, aynı zamanda doğaçlama ve geleneksel yöntemler gerekli bilgileri sağlayabilecek nitelikte değilse alternatif yöntemleri adapte edebilmek için bilgi ve kapasiteye sahip olmak gerekir. Son olarak jeofizik yöntem sonuçları, jeotermal alanının jeolojisi, jeotermal akışkanların kimyası ve jeotermal sisteminin iyi anlaşılması için bilgilerin bütünleştirilmesi ve varsa uyumluluğu/uyumsuzluğunu ortaya koymak gerekmektedir. Özellikle ekonomik değeri yüksek petrol ve kömür yerine yenilenebilir bir enerji kaynağından sıcak su veya elektrik üretimi aşamalarında yeraltı araştırmalarında jeofizik yöntemlerin uygulanabilirliği sadece bu yöntemlerin model öneri çıktılarını değil, zaman ve ekonomik çıktıların da başarısında kaçınılmaz katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Birleşmiş Millet Üniversitesi bünyesinde jeotermal eğitim programı yöneticisi Lúdvík S. Georgsson tarafından yapılan çalışmanın ağırlıklı olarak derlenmesi sonucu ortaya çıkarılmıştır. Türkiye tarafı yazarları çalışmayı paylaşması ve katkıları sebebi ile Lúdvík S. Georgsson'a içten teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

Barbier, E., 2002. Geothermal energy technology and current status: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3,65.

Árnason, K., Karlsdóttir, R., Eysteinnsson, H., Flóvenz, Ó.G., Gudlaugsson, S.Th., 2000. The resistivity structure of high-temperature geothermal systems in Iceland. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan*, 923-928.

Árnason, K., 2007. Geothermal exploration and development of the Hengill high-temperature field (presentation). In: Georgsson, L.S., Holm, D.H., Simiyu, S.M., and Ofwona, C., *Short course II on surface exploration for geothermal resources. UNU-GTP & KenGen, Naivasha, Kenya, UNU-GTP CD SC-05*, 29 s.

Georgsson, L.S., Saemundsson, K., Hjartarson, H., 2005. Exploration and development of the Hveravellir geothermal field, N-Iceland. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, CD 10s*.

Eysteinnsson, H., 2000. Elevation and gravity changes at geothermal fields on the Reykjanes Peninsula, SW Iceland. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan*, 559-564.

Ganbat, E., 2004. Geothermal investigations at the Ásgardur farm, Reykholtaldalur, W-Iceland. Report 6 in: *Geothermal training in Iceland 2004. UNU-GTP, Iceland*, 83-98.

Georgsson, L.S., Fridleifsson, G.Ó., 2000. The geothermal exploration of the Öxarfjörður high-temperature area, NE-Iceland. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan*, 1157-1162.

Simiyu, S.M., 2007. Application of micro seismic methods to geothermal exploration (sunum). In: Georgsson, L.S., Holm, D.H., Simiyu, S.M., Ofwona, C., Short course II on surface exploration for geothermal resources. UNU-GTP & KenGen, Naivasha, Kenya, UNU-GTP CD SC-05, 55 s.

Şener, Ç., Erdoğan R., Özgüler M. E. 1986. Türkiye'deki Jeotermal Alanların Araştırılmasında Jeofizik Çalışmalar. MTA dergisi, 107, 152-168.

Tester, J.W., Anderson, B.J., Batchelor, A.S., Blackwell, D.D., DiPippo, R., Drake E.M. (editörler), 2006. The Future of Geothermal Energy Impact of Enhanced Geothermal Systems on the United States in the 21st century. Prepared by the Massachusetts Institute of Technology, under Idaho National Laboratory Subcontract No. 63 00019 for the U.S. Department of Energy, Assistant Secretary for Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Geothermal Technologies. 358 s.

Türker, A. E., Keçeli, D.A., Kaya, M.A. Kamacı, Z. 1991. Uşak-Banaz Jeotermal Alanının Jeoelektrik Yöntemlerle Araştırılması, Jeofizik, 5, 59-74.

Wameyo, P., 2005. Magnetotelluric and transient electromagnetic methods in geothermal prospecting, with examples from Menengai, Kenya. Report 21 in: Geothermal training in Iceland 2005. UNU-GTP, Iceland, 409-439.

Yasukawa, K., Ishido, T., Kajiwara, T., 2005. Geothermal reservoir characterization by SP monitoring. Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 8s.

Makale Gönderim Tarihi: 16.11.2017

Yayına Kabul Tarihi: 07.12.2017

Karadeniz Bölgesi Çimento Hammadde Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Evaluation of Cement Raw Material Potential in the Black Sea Region

Abdul Vahap Korkmaz^{1*}

¹*İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Avcılar/İstanbul.*

**Sorumlu Yazar: av.korkmaz06@gmail.com*

Özet

Bir çimento fabrikasının üretimini devam etmesi ve varlığını sürdürebilmesi sahip olduğu ham madde ocaklarına bağlıdır. Çimento yatırımı yapabilmek için maden rezervlerinin ekonomik ömrü süresince yeterli fizibilite çalışması yapmadan büyük bir yatırım yapılamaz. Bu nedenle çimento sektöründe taş ocağı kurmak istenilen bölgedeki maden rezervleri ve kimyasal analiz sonuçları hakkında geniş bir bilgi sahibi olmak zorunludur. Çimento sektöründe 7 milyon ton çimento üretim kapasitesi bulunan Karadeniz Bölgesinde mevcut üretim kapasitelerinin artırılması ve yeni çimento fabrikalarının kurulabilmesi için yeni hammadde sahalarının araştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Karadeniz bölgesi içerisinde kalan Samsun, Amasya, Tokat, Çorum illerini kapsayan geniş bir coğrafik alanda çimento hammaddesi rezerv potansiyeli ve kalite çalışmaları yapılarak, çimento hammaddesi olarak kullanılıp kullanılmayacakları konusunda detaylı incelemeler yapılmıştır. Hammadde araştırmaları sonucunda Karadeniz bölgesinin çimento üretim kapasitesinin mevcut kaynaklarla 2 katına çıkarılabileceği ön görülmüştür. **Anahtar Kelimeler:** Çimento, Kalite, Ham Madde, Karadeniz Bölgesi, Rezerv.

Abstract

The continuation of production of a cement factory and sustaining its existence depends on the raw material quarries. A large investment cannot be made without sufficient feasibility study during the economic life of mine reserves in order to invest in cement. For this reason, it is necessary to have extensive knowledge about mineral reserves and chemical analysis results in the region where you want to establish stone quarries in the cement sector. In the Black Sea Region, which has a cement production capacity of 7 million tons in cement production, it is necessary to investigate new raw material fields in order to increase the existing production capacities and to establish new cement plants. In this study, a wide range of geographical inland cement raw materials including Samsun, Amasya, Tokat and Çorum in the Black Sea region were studied in terms of reserve potential and quality studies and they could not be used as cement raw materials. As a result of the raw material researches it is predicted that the cement production capacity of the Black Sea region can be doubled with the available resources.

Keywords: Black Sea, Cement, Quality, Raw Material, Reserve.

1.Giriş

Çimento, çağımızda kullanılan temel inşaat malzemelerinin en önemlilerinden biridir. Bir çimento fabrikası kurulurken her şeyden önce kullanılacak ham maddelerin temini, temin yeri, temin şekli, temin maliyeti gibi konularda gerekli araştırma ve fizibilite çalışmaları yapılmalıdır. Girdilerden, özellikle ana ham madde girdileri ekonomik açıdan çok daha önemlidir. Zira kullanım oranları fazla olan ana girdiler fabrikaya ne kadar yakın olursa üretim maliyeti düşük olacağından kar marjı da o denli yüksek olacaktır. Ana girdiler kalker ile kil veya bunlar yerine kullanılabilir yine kalker ve kil esaslı maddelerdir. Girdilerin yapısında, klinker kompozisyonunu oluşturacak yeteri kadar Fe_2O_3 yoksa Fe_2O_3 içeren, yine yeteri kadar SiO_2 yoksa SiO_2 içeren ve yeteri kadar Al_2O_3 yoksa Al_2O_3 içeren malzemeler düzeltici olarak kullanılmalıdır. Zira bu çimento hammadde girdilerinden Fe_2O_3 (demir cevheri), Al_2O_3 (boksit cevheri) içerenler pişmeyi kolaylaştırıcı yönde, SiO_2 içerenler (silis kumu) ise pişmeyi zorlaştırıcı yönde etki yaptığından direkt maliyeti etkilemektedir. Çimento üretiminde hangi girdilerin hangi oranlarda kullanılacağı düzeltici maddelerin kullanılıp kullanılmayacağını saptamadan önce aşağıda belirtilen ana öğelerin belirlenmesi gerekir;

- Hangi tip çimento veya çimentoların üretileceği,
- Hangi standart veya standartlara uygun çimento üretileceği,
- Üretilecek klinker veya klinkerlerin kireç doygunluk faktörü (LSF) değerinin ne olacağı ve hedef LSF değerinin belirlenmesi,
- Optimum pişme şartlarının oluşabilmesi için klinkerde bazı modüllerin öngörülmesi (sıvı faz, silikat modülü, alüminyum modülü vb.) gerekir (Korkmaz, 2017).

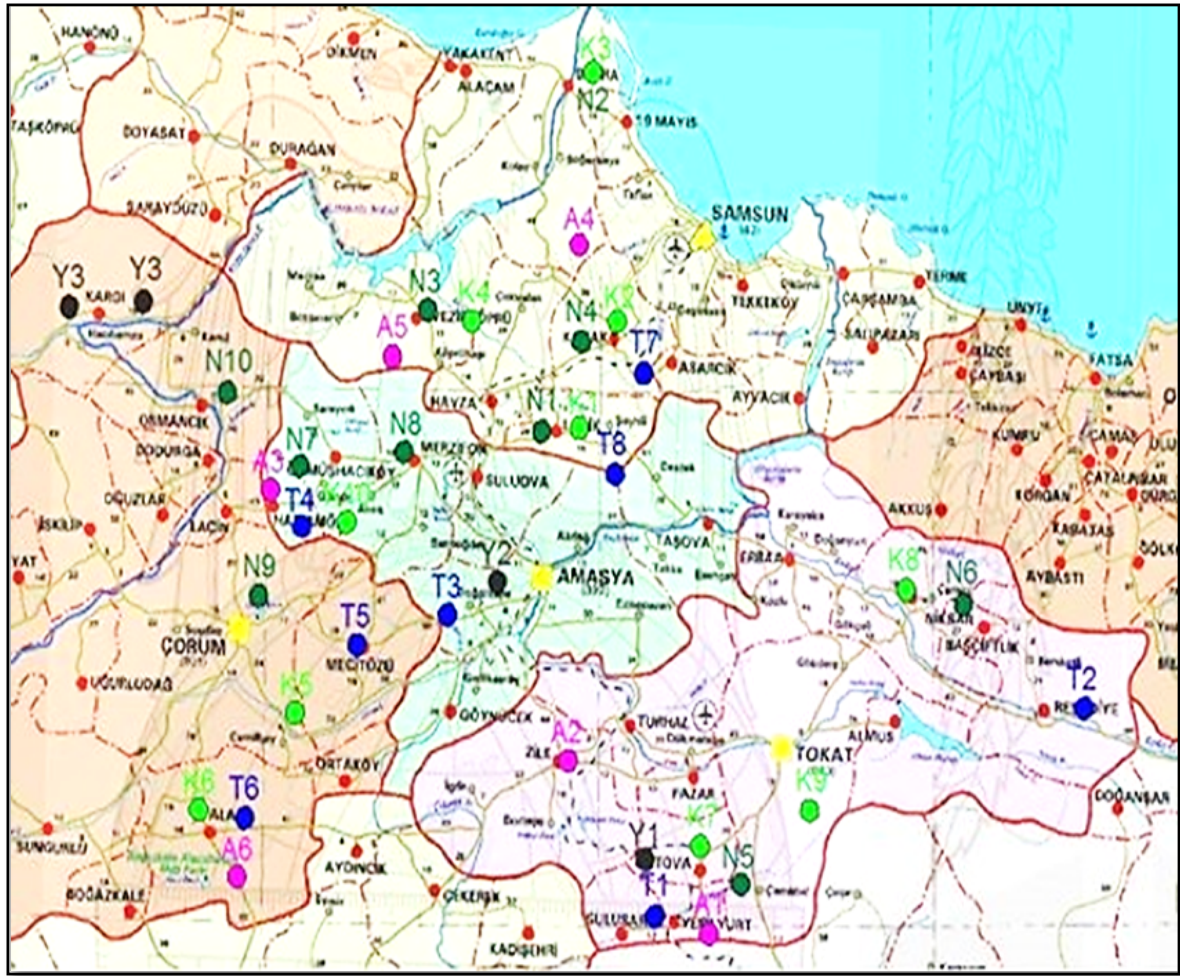
Çimento üretim aşamalarının ilk adımı ham madde ocakları ve prosesleri ile başlar. Teknik olarak, bir çimento üreticisi istenen sonucu elde etmek için farklı bileşimli ham maddeleri harmanlayarak klinker bileşimi üzerinde tamamen denetime sahip olabilir. Bununla birlikte, pratikte, büyük ölçüde klinker bileşimi, farin miktarını oluşturan mevcut ham maddelerin bileşimleriyle belirlenir. Bu nedenle çimento sektöründe taş ocağı yönetimi çok hassas ve sürekli gözetim isteyen bir işdir. Eğer ham madde ocağı planlı bir şekilde işletilemez ya da çabuk tükenirse çimento üretmek imkânsız hale gelebilir. Çimento üretimi için gerekli olan tüm ham madde materyallerini en optimum şekilde kullanmak gerekir (Peray, 1979). Çimento endüstrisi, oranları çok dikkatle ayarlanmış ham maddelerle kimyasal madde karışımından, bunların bünyesini belli bir ölçüde değiştiren işlemlerle üretim yapmayı amaçlar. Çimentonun kalitesini tayin eden ana faktör ham maddelerdir. Ham madde özelliklerindeki değişiklikler çimento kalitesinde de değişmelere yol açmaktadır. Ayrıca ürün kalitesinin tüm üretim sırasında tutarlı olması, bu süre içinde ham madde kalitesinde de değişmelere neden olmaktadır (Korkmaz, 2017). Çimento sanayisi yüksek yatırım sermayesi gerektirdiğinden dolayı sektörde gerekli yatırımın başlatılabilmesi için yüksek rezervli maden yataklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Çimento üretiminde kullanılan maden yataklarının ömürlerinin yanı sıra kimyasal özellikleri, fabrikaya yakınlığı, sökülebilirliği, kırılabilirliği, öğütülebilirliği ve pişebilir nitelikte olması, düşük nem içermeleri ve homojen olmaları üretim maliyetini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bunun yanı sıra alternatif ham maddelerin kullanımı mevcut maden ömürlerini ve maden kalitesini daha da artırılabilir. İkame etme potansiyeli büyük oranda tükenmiş ham maddeler ve gelecekte çimento üzerine konulan yüksek kalite hedeflerinin gerçekleştirilmesi alternatif ham maddelerin ya da endüstriyel yan ürünlerin bulunmasına bağlıdır. Türkiye taş, çimento ve seramik endüstrisinde birincil ve ikincil ham maddeler talebine bağlı olarak, ham madde gereksiniminin 2030 yılına kadar artması beklenmektedir (Şişman, 2005). 2017 yılı itibariyle, Türk Çimento sektöründe 52 entegre, 20 öğütme-paketleme tesisi olmak üzere toplam 72 adet çimento fabrikası bulunmak-

tadır (TÇMB, 2017). Karadeniz bölgesinde toplam 11 adet çimento fabrikası bulunmaktadır. 2017 yılı verilerine göre, Karadeniz bölgesi, ülkemizin çimento üretiminin yaklaşık %15 'lik kısmını karşılamaktadır (Korkmaz, 2017).

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Karadeniz Bölgesi çimento hammaddesi potansiyelinin değerlendirilmesi ve çimento sektörünün kalker, kil, alçıtaşı, tras ve demir ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla Samsun, Çorum, Amasya ve Tokat illerini kapsayan geniş bir bölgede jeolojik çimento hammaddesi çalışmaları yapılmıştır. Çalışma yapılan sahalara ve örnek alınan yerler Şekil 1' de harita düzlemi üzerinde gösterilmiştir. Çimento hammadde potansiyeli bakımından önemli olabileceği düşünülen yerler MTA'nın Jeolojik raporlarından ve sektördeki deneyimli kişiler tarafından saptanmış ve hammadde sahaları yerinde incelenmiş ayrıca yapılan çalışmalar sonucunda tespit edilen yeni sahalarda da jeolojik etütler yapılarak gerekli numuneler alınmış ve çimento deneylerine tabii tutulmuştur. Ayrıca bulunan hammadde sahalalarının potansiyel rezerv tespitleri yapılmıştır. Araştırma yapılan hammadde sahalalarının muhtemel rezerv miktarları MTA ve özel sektöre ait güncel jeolojik raporlardan elde edilmiştir.



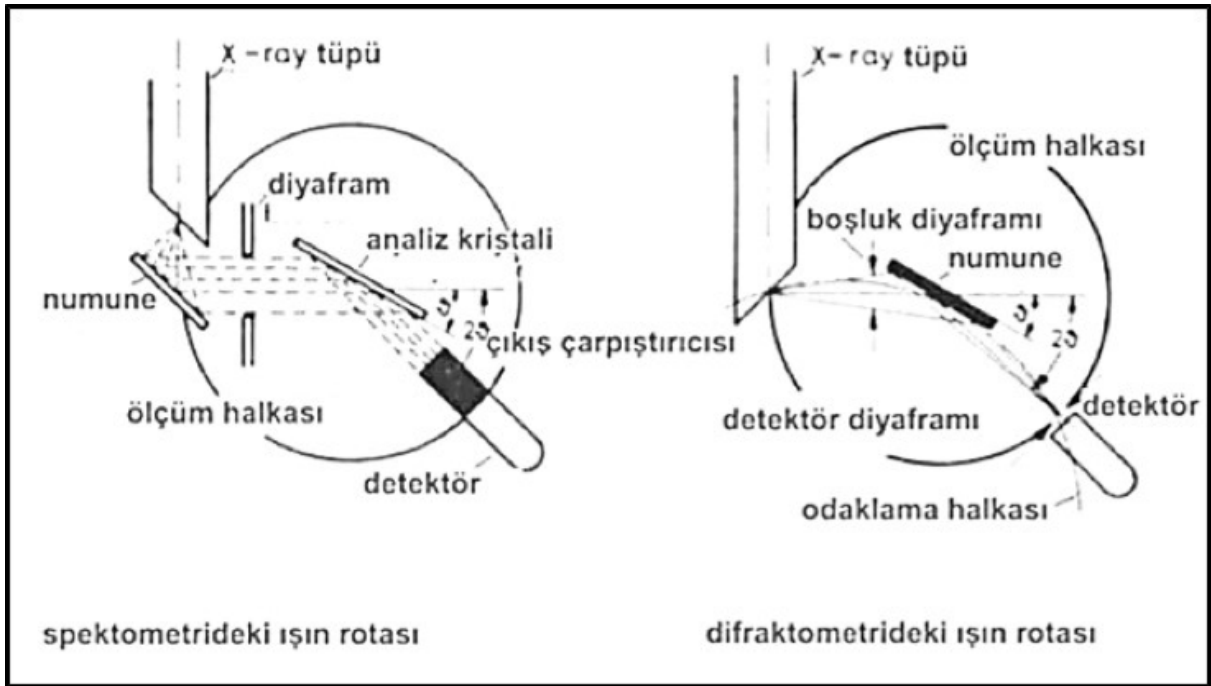
Şekil 1. Ham madde örneklerinin alındığı sahaların harita üzerinde kodlu gösterilişi

2.2. Yöntem

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde; laboratuvar ölçekli çeneli kırıcı, X- ışınları Floresans Spektrometresi, kızdırma kaybi, rutubet tayin, tras aktivite test metotları kullanılmıştır. Ayrıca ham maddelerin kimyasal analiz sonuçlarından yararlanılarak silikat modülleri ve alüminyum modülleri hesaplanmıştır.

2.2.1. X Işınları Floresans Spektrometresi Çalışma Prensibi:

Hammadde etüt çalışmasında hazırlanan örneklerin kimyasal bileşimini belirlemek için analitik bir teknik olan XRF yöntemi kullanılmıştır. Çalışma prensibi basitçe şu şekildedir; bir atomun iç yörüngesindeki elektronlar, X-ışınlarını üst bir enerji seviyesine çekerek bombardıman yoluyla uyarılırlar ama elektronun durumu kararsızdır. Bu kararsız durum daha fazla kalamayıp daha istikrarlı bir şekilde daha düşük yörüngelere gitmek isterler. Bu iniş esnasında her atom ikincil elektronlar spesifik karakteristik X ışını (floresan) yayarlar. Bu ışınlar analizör ile ayrılırlar. Ayrılan ışınlar ölçülerek elde edilen sonuçlar ile aynı anda ölçülen ışık miktarları nicel analizde kullanılan element miktarı ile orantılı şekildedir (Şekil 2) (Kaya, 2010).



Şekil 2: XRF analiz yöntemleri (Kaya, 2010)

2.2.1.1. X Işınları Spektrometresine Örnek Hazırlanması ve Analizi

Hammadde örneklerinin kimyasal analizleri XRF metoduyla tespit edilmiştir. Tartılan 0,6 gram öğütülmüş numune, 0,03 gram lityum iyodür ve 4,6 gram dilyum tetraborat platin kroze içine yerleştirilmiştir. Bir spatula malzeme ile kroze içinde karıştırılarak homojen bir karışım haline getirilmiştir. Eritiş cihazı için hazırlanan kroze içerisindeki homojen malzeme tablet kalıba yerleştirilmiştir. Dört aşamalı çalışan eritiş cihazı ilk 10 dakika ısıtma, 5 dakika eritme, son 5 dakika soğutma ve boşaltma programlarında çalışır. Eritiş cihazında oluşturulan cam tabletler X-ışını floresans spektrometresinde, okutularak kimyasal içerik sonuçları bilgisayarda kayıt altına alınmıştır (TS EN 196-2, 2014).

2.2.2 Kızdırma Kaybı Tayini:

Ağırlığı önceden bilinen (1 ± 0.05 g) bir örneğin çok yüksek sıcaklıkta (975 ± 025 oC) kızdırılması sonunda meydana gelen ağırlık kaybına, “kızdırma kaybı” denilmektedir ve bu değer % olarak ifade edilmektedir (Kaya, 2010). Bu tayinde sırasıyla şu basamaklar izlenmiştir. Sabit tartıma getirilmiş krozeeye, rutubeti alınmış çimento numunesinden 0,0001 hassasiyetle 1,00 g (m_1) alınmıştır. $975^\circ\text{C} \pm 25^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki fırında 15 dakika kızdırılmıştır. Desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur ve tartılmıştır. Yeniden 5 dakika kızdırılarak oda sıcaklığına kadar soğutulup tekrar tartılmıştır. Bu işleme sabit tartıma (m_2) ulaşıncaya kadar devam edilmiştir (TS EN 196-2, 2014).

Hesaplama:

$$\text{Kızdırma kaybı} = \left[\frac{m_1 - m_2}{m_1} \right] \times 1000 \quad \text{Eş. 1}$$

m_1 : Deney numunesi kütlesi (g), m_2 : Kızdırılmış deney numunesinin sabit tartıma geldikten sonraki kütlesi (g)

2.2.3. Rutubet Tayini

25 gram rutubeti tayin edilecek malzeme etüvde 105°C de sabit ağırlığa kadar bekletilir, (b gr) tartılır (Kaya, 2010).

$$\% \text{Rutubet} = \frac{25 - b}{25} \times 100 \quad \text{Eş. 2}$$

2.2.4. Silikat Modülü (SM)

Çimento üretimi için hammadde kalitesini belirleyen en kritik modüllerden biridir. Bu modül, çimentodaki SiO_2 miktarının, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 toplamına bölünmesiyle bulunur.

$$\text{S.M} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} = 1.9 - 3.2 \quad \text{Eş. 3}$$

Her çimento fabrikası optimum silikat modülünü ham madde karakteristiklerine göre, en uygun klinker pişme şartlarına ve çimento üretim standartlarına göre belirlemelidir (Schafer, 1989).

2.2.5. Alüminyum Modülü (Ton Modül)

Alüminyum modülü, çimentoda ihtiyaç duyulan alüminyum oksit bileşeninin demir oksit bileşenine bölünmesi bulunur (Wilcox, 1995).

$$\text{T.M.} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 1.5 - 2.5 \quad \text{Eş. 4}$$

Genellikle yüksek alit içerikli kaliteli bir klinker elde etmek ve en düşük işletme ve üretim maliyetli ürün üretmek amacıyla, alüminyum modülünün 1,4-2,2 civarında olması istenir

2.2.6. Puzolanik aktivite deneyleri ve numunelerin hazırlanışı

Puzolanik aktivite deneyi, TS 25’de doğal puzolanın belirli bir incelikte öğütülüp su ve kalsiyum hidroksitle karıştırılması ile elde edilen harcın basınç dayanımı cinsinden tespit edilen hidrolik özelliği olarak tanımlanmıştır. Aktivite deneyleri için TS 25’e göre hesaplanan

malzeme miktarları ile numuneler hazırlanmış ve hazırlanan numunelere ait kalıpların üstü buharlaşmayı önleyecek şekilde cam plaka ile kapatılmıştır. Numuneler 24 saat $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 'lik oda sıcaklığında bekletildikten sonra kalıplar sökülmeden $(55\pm 2)^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki bir etüv içinde 6 gün daha bekletilmiştir. Numuneler etüvden çıkartılarak oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmış ve TS EN 196-1 (2016)'ya göre basınç dayanımı tayini deneyine tabi tutulmuştur (Korkmaz, 2012).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Kalker Yatakları

Samsun, Amasya, Çorum ve Tokat illerinde yapılan çimento hammaddesi araştırılması sonucunda değişik lokasyonlarda çimento üretimine elverişli kalker birimleri tespit edilmiştir. Kalker rezervleri yaklaşık 1,5 km genişlikte ve 3,5 km uzunluktaki bir alanda seyreltmektedir. Kalker araştırmasının yapıldığı yerler ve numune kodları sırasıyla Tablo 1' de ve kalker numunelerine ait kimyasal analiz sonuçları Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 1. Kalker çalışma sahaları ve rezerv miktarları (MTA, 2018)

Lokasyon	Örnek Alınan Sahalar	Örnek No	Rezerv (mil.ton)
Samsun	Ladik Akpınar Körüklüdere ve Hasanağaç sahaları dolayları	K1	130
	Kavak Bekdemir sahaları, Köseli dolayları	K2	250
	Samsun Bafra İnözü dolayları	K3	108
	Vezir Köprü dolayları	K4	78
Çorum	Hacıpaşa Köyü Mevkii	K5	110
	Alaca dolayları	K6	150
Tokat	Artova Keşlikkaya ve sırtları	K7	168
	Niksar Kümbetli serileri	K8	104
	Gıj Gıj Mevkii	K9	60
Amasya	Hamömözü	K10	30

Tablo 2. Kalker örneklerinin kimyasal analiz sonuçları

İçerik	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
SiO ₂	0,73	0,13	1,76	0,69	0,46	0,36	0,07	1,5	0,68	0,9
Al ₂ O ₃	0,24	0,08	0,68	0,3	0,13	0,16	0,07	0,14	0,16	0,21
Fe ₂ O ₃	0,12	0,06	1,37	0,15	0,02	0,08	0,09	0,26	0,07	0,23
CaO	55,80	57,00	50,88	54,85	56,4	56,14	55,14	52,54	54,76	53,56
MgO	0,43	0,09	0,53	0,33	0,47	0,40	0,46	0,3	0,38	0,36
Na ₂ O	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
K ₂ O	0,04	0,08	0,33	0,03	0,02	0,02	0,00	0,01	0,04	0,02
SO ₃	0,13	0,04	0,04	0,03	0,10	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03
P ₂ O ₅	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0
TiO ₂	0,03	0,04	0,09	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,01	0,03
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
KK	42,35	42,4	44,15	43,48	42,11	42,36	43,87	44,65	43,22	43,88
Toplam	99,9	99,94	99,86	99,91	99,77	99,62	99,78	99,49	99,38	99,24
Nem	0,40	0,40	0,30	0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,20	0,10
SM	2,03	0,93	0,86	1,53	3,07	1,50	0,44	3,75	2,96	2,05
TM	2,00	1,33	0,50	2,00	6,50	2,00	0,78	0,54	2,29	0,91

Yapılan aramalar sonucunda mümkün rezerv hesaplamaları yapılmış ve kalker birimlerinin çimento ana hammadde kaynağı olarak uzun süre çimento üretimine elverişli olduğu görülmüştür. Kireçtaşları koyu gri, gri sarı, bej bazen beyaz renkli 20-50 cm kalınlıkta tabakalı sert kripto kristalin dokulu, bazen taban dokunakları civarı beyaz renkli ve kristalize bazen de beyaz ve gri renklerin ardalanmasından laminalı görünümlü, 1-5 mm kalınlıkta kalsit damarcıklı ve çoğunlukta aralıkları 20-50 cm olan iki yönde eklemlidir. Çimento üretiminde kullanılan kalker yataklarının kimyasal özelliklerinin yanısıra fabrikaya yakınlığı, sökülebilirliği, kırılabilirliği, öğütülebilirliği ve pişebilir niteliklerde olması, düşük nem içermeleri ve homojen olmaları üretim maliyetini etkileyen önemli faktörlerdir. Bu nedenle bu faktörlerin saptanması üretim açısından çok önemlidir.

3.2. Çimento Kili Yatakları

Samsun, Amasya, Tokat ve Çorum illerinde yapılan çimento kili hammaddesi arama çalışmalarında mevcut kilerin rezervlerinin ve kimyasal özelliklerinin çimento üretimi için uygun olduğu tespit edilmiştir. Bazı türlerin içerisinde demir ve alüminyum içeriği bakımından zenginlik içermesi çimento üretiminde demir cevheri ve boksit kullanımını en aza indireceği tahmin edilmektedir. Çimento üretiminde kullanılan kil yataklarının kimyasal özelliklerinin yanı sıra fabrikaya yakınlığı, düşük nem içermeleri ve homojen olmaları üretim açısından çok önemlidir. Çimento kili araştırmasının yapıldığı yerler ve numune kodları sırasıyla Tablo 3' te ve çimento kili örneklerinin kimyasal analiz sonuçları Tablo 4' te gösterilmiştir.

Tablo 3. Çimento kili çalışma sahaları ve rezerv miktarları (MTA, 2018; Şişman, 2005)

Lokasyon	Örnek Alınan Sahalar	Örnek No	Rezerv (mil.ton)
Samsun	Lâdik-Körüklüdere	N1	15
	Bafra	N2	33
	Vezirköprü korkucak	N3	22
	Kavak-Pekdemir	N4	18
Tokat	Bakacaktepe, Geçentepe	N5	26
	Niksar sırtları	N6	11
Amasya	Gümüşhacıköy-Çat Sahası	N7	27
	Merzifon Keçiköy	N8	15
Çorum	Narlı	N9	39
	Osmancık	N10	24

Tablo 4. Çimento kili kimyasal analiz sonuçları

İçerik	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
SiO ₂	50,73	64,35	63,07	54,700	64,13	63,14	62,57	64,06	60,80	59,69
Al ₂ O ₃	16,49	15,44	16,65	13,72	15,26	16,82	16,52	15,22	16,81	16,81
Fe ₂ O ₃	8,07	6,80	6,59	5,09	6,67	6,65	6,58	6,68	7,19	6,47
CaO	5,48	2,24	1,68	8,36	2,12	1,72	1,86	2,16	2,21	1,96
MgO	2,19	2,01	1,63	1,55	1,98	1,64	1,63	1,97	1,79	1,91
Na ₂ O	0,28	0,30	0,34	0,44	0,31	0,34	0,34	0,31	0,24	0,28
K ₂ O	2,06	2,15	2,40	1,86	2,12	2,45	2,43	2,12	2,45	2,47
SO ₃	0,02	0,02	0,01	0,02	0,14	0,01	0,13	0,15	0,03	0,02
P ₂ O ₅	0,08	0,09	0,10	0,09	0,09	0,11	0,11	0,08	0,09	0,10
TiO ₂	0,98	1,02	0,94	0,91	1,00	0,95	0,94	0,99	0,92	0,94
MnO	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,04
KK	13,07	5,11	6,22	13,18	5,86	6,06	6,02	5,51	6,33	8,42
Toplam	99,15	99,59	99,68	99,98	99,74	99,94	99,18	99,31	98,92	98,61
Nem	4,80	5,00	4,30	5,60	4,7	5,50	5,00	4,60	5,20	4,50
SM	2,05	2,89	2,71	2,91	2,92	2,69	2,71	2,93	2,53	2,62
TM	2,04	2,27	2,53	2,70	2,29	2,53	2,51	2,28	2,34	2,52

Kilin oluşum sırasındaki şartlara bağlı olarak çok kısa mesafede yatay ve dikey değişimler göstermesi nedeniyle kullanılmadan önce killerin harmanlanması ve homojenleştirilmesi gerekmektedir. Üretimi yapılan kilin kalitesine bağlı olarak tüvenan olarak kullanıldığı gibi, kullanım amacına göre kilin zenginleştirilmesi, değirmene girmeden yüksek nem içerikli killerin ön kalsine edilmesi gerekmektedir.

3.3. Alçıtaşı Yatakları

Çimento sanayi alanında genellikle alçıtaşı (jips) kullanılmaktadır. Gerek jips gerekse anhidrit hiçbir zaman saf halde bulunmazlar. Bu iki mineralden herbiri yarı dengeli olup biri diğerine

dönüşebilmektedir. Ayrıca alçıtaşı yataklarına oluşum sırasında veya sonradan yabancı maddeler karışmış olabilir. Bunun sonucu olarak alçıtaşı ancak % 85–95 saflıkta bulunmak tadır. Alçıtaşı, çimento sanayiinde tüvenan kalitesi ile kullanılabilir. Jips ya da jips-anhidrit karışımını içeren hammaddeler son öğütme prosesinde % 3–5 oranında klinker ve/veya diğer katkı maddeleriyle birlikte öğütülerek değişik tür çimentolar üretilmektedir. Alçıtaşı gibi sülfat içerikli maddelerin katılması çimentonun donma süresinin ayarlanmasında etkili rol oynamaktadır (Korkmaz, 2012). Karadeniz bölgesinde mevcut alçıtaşı sahaları araştırılmış ve alçıtaşı hammaddesi örnekleri alınmıştır. Tokat ilinde bulunan alçıtaşlarının yumrulu olduğu ve alçıtaşı yumrularının arasının killi olduğu görülmüştür. Ancak killilerinden yıkandıktan sonra kullanılabilmesi tahmin edilmektedir. Daha iyi alçıtaşı yataklarına ulaşmak için Sivas ve Yozgat taraflarına yönelmek gerekmektedir. Sivas-Bedirli alçıtaşı oluşumları yaşlı birimler içindedir. Çimento hammaddesi olarak kullanımları ve rezervleri çimento sanayisi için son derece uygundur. Tokat Zile Amasya taraflarında rastlanılan alçıtaşlarının anhidrit miktarları fazla olup, çimento kullanımı için elverişli olmadığı tespit edilmiştir. Samsun Vezirköprü Körüklü dere alçıtaşı ocakları hem rezerv açısından hem de kalite açısından çimento üretimi için alçıtaşı cevherleşmesi iyi konumdadır. Çorum-Uğurlu dağ arasındaki yaklaşık 12000 hektarlık sırtlar ve tepeler şeklinde izlenen tahmini 150 milyon ton görünür rezerve sahip kaliteli alçı sahaları çok büyük bir ekonomik değer olarak dikkati çekmektedir. Alçıtaşı örneklerinin alındığı yerler ve numune kodları sırasıyla Tablo 5’ de gösterilmiştir

Tablo 5. Alçıtaşı çalışma sahaları ve rezerv miktarları (MTA, 2018; Şişman, 2005)

Lokasyon	Örnek Alınan Sahalar	Örnek No	Rezerv (mil.ton)
Tokat	Tokat Yeşilyurt-Boztepe	A1	15
	Tokat Zile,Aköz	A2	70
Amasya	Amasya-Hamamözü	A3	34
Samsun	Samsun Körüklüdere	A4	54
	Samsun Vezirköprü Akören	A5	60
Çorum	Çorum Alaca ve Uğurludağ	A6	150

Tablo 6. Alçıtaşı kimyasal analiz sonuçları

İçerik	A1	A2	A3	A4	A5	A6
	%	%	%	%	%	%
SO ₃	41,66	42,73	40,08	41,66	43,35	42,63
Kristal Su	19,97	17,90	18,50	19,97	19,95	18,97
Kızdırma Kaybı	21,75	21,71	21,85	21,75	21,30	22,04
Dihidrat Alçı	90,64	85,52	21,85	21,75	21,30	22,04
Anhidrit Alçı	0,82	5,04	1,66	0,82	5,04	0,82
CaCO ₃	6,98	8,66	7,66	6,98	8,66	6,98
Toplam	98,44	99,22	97,61	98,44	99,22	98,44
Tayin Edilemeyen	1,56	0,78	2,71	1,56	0,78	1,56
Toplam	100	100	100	100	100	100
Dihidrattan SO ₃	42,15	39,77	41,06	42,15	39,77	42,15
Rutubet	3,20	3,20	2,80	3,20	3,20	3,20
Çözünmez kalıntı	0,63	1,92	3,15	0,63	1,92	0,63

3.4. Tras Yatakları

Karadeniz bölgesi Samsun, Amasya, Çorum, Tokat illerini kapsayan geniş bir alanda yapılan arazi çalışmaları sonucunda bir çimento fabrikasının ihtiyacı için yeterli olabilecek miktar ve kalitede tras rezervi tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada tras rezerv ve kalite açısından önemli olabilecek yerler tespit edilerek gerekli numuneler alınmış ve kimyasal analizleri yapılmıştır. Alınan örneklerin arazideki yerleri ve alınış şekilleri tras hammaddesi rezervini genel olarak karakterize edecek şekildedir. Tras sahalarından alınan numunelerin analizlerinin incelenmesi ve bu sahaların nakliye kolaylıkları, tras olarak klinkere karıştırma oranları öğütülme kolaylığı gibi özellikler göz önüne alınarak önemli görülen yerlerin kimyasal analizler sonuçları Tablo 7’de verilmiştir. Amasya ve Samsun İllerinden alınan tras numunelerinin kimyasal analiz sonuçlarından tras oluşumunun iyi kalitede olduğu görülmektedir (Tablo 8). Analizlerde kızdırma kaybının yüksek çıkması, numunenin yeteri kadar kurutulmamış olduğunu göstermektedir. CaO ve MgO değerlerine göre kızdırma kaybının % 5 civarında olması gerekir. Hammadde rutubetinin % 10’ dan çok olması, kayanın fazla gözenekli olması nedeniyle yağmurlu mevsimlerde içine fazlaca su almasından kaynaklanmaktadır. Güneşli ve kuru havalarda almış olduğu bu suyu süratli bir şekilde atarak rutubetinin %5 in altına düşürüleceği düşünülmektedir. Tokat ili sınırlarındaki tras sahalarından alınan örneklerdeki tras analiz sonuçlarına bakıldığında reaktif SiO₂ yüzdesi ve puzolanik aktivitesi biraz düşük çıkmıştır. Bundan dolayı yalnız başına tras olarak %10-20 miktarlarında kullanılabilir. Ayrıca puzolanik aktivitesi yüksek olan (>10) tras ile de harmanlama yapılarak kullanılabilir. Tras olarak kullanılması düşünülen bu malzemenin killeşmenin olmadığı taze yerlerden beslenmesi gerekmektedir.

Tablo 7. Tras çalışma sahaları ve rezerv miktarları (MTA, 2018; Şişman, 2005).

Lokasyon	Örnek Alınan Sahalar	Örnek No	Rezerv (mil.ton)
Tokat	Artova bebek deresi, Aktaş	T1	25
	Reşadiye Karataş	T2	70
Amasya	Doğantepe	T3	54
	Hamamözü	T4	50
Çorum	Mecitözü	T5	35
	Alaca	T6	54
Samsun	Kavak Çukurdere	T7	50
	Lâdik Körüklü dere, Ahmet saray	T8	38

Tablo 8. Tras kimyasal analiz sonuçları

İçerik	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
	%	%	%	%	%	%	%	%
SiO ₂	57,78	69,96	54,22	70,55	68,38	66,10	69,23	66,81
Al ₂ O ₃	10,77	12,71	19,32	12,60	12,69	10,92	12,87	13,11
Fe ₂ O ₃	1,67	0,97	8,13	0,83	1,18	0,95	1,25	1,64
CaO	5,82	2,99	7,33	3,44	4,8	11,58	3,19	2,92
MgO	4,01	1,21	2,61	0,80	1,7	1,61	1,16	2,2
Na ₂ O	2,47	0,07	0,42	0,11	0,02	0,13	0,02	0,13
K ₂ O	2,43	1,93	1,57	2,54	3	2,58	2,72	2,87
TiO ₂	0,31	0,03	0,36	0,21	0,19	0,09	0,24	0,06
P ₂ O ₅	0,03	0,02	0,87	0	0,16	0,02	0,15	0,21
K.K.	13,69	9,15	3,96	8,45	7,02	6,01	9,02	9,57
Toplam	98,99	99,31	98,79	99,53	99,14	99,99	99,85	99,30
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	70,22	83,64	81,67	83,98	82,25	77,97	83,35	81,56
Rutubet	5	6,3	4,8	5,2	6,1	4,7	6,3	7,2
Puzolanik aktivite N/mm ²	6,3	7,6	6,4	6,3	10,70	6,50	10,20	9,40
Çözülmez kalıntı	27,64	16,73	17	7,64	22,54	16,74	17,6	20,64
Reaktif SiO ₂	47,28	51,55	51	60,36	49,88	52,28	48,20	51,08

Samsun ili sahalarından alınan tras örneklerinin kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında yüksek reaktif SiO₂ yüzdesi ve puzolanik aktivitesi çimento üretimin için uygun kalitededir. Bundan dolayı yalnız başına klinkerle birlikte tras olarak % 30-40 lara kadar kullanılabilirler. Amasya'dan alınan tras örneklerinin kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında reaktif SiO₂ yüzdesi ve puzolanik aktivitesi biraz düşük çıkmıştır. Ayrıca rutubet değeri de yüksektir. Amasya trasları puzolanik aktivitesi yüksek olan tras (>10) ile de harmanlama yapılarak kullanılabilir. Tras olarak kullanılması düşünülen bu malzemenin killeşmenin olmadığı ve rutubeti düşük taze yerlerden beslenmesi önemlidir. Ayrıca Amasya trasının rutubeti yüksek olduğundan dolayı kullanımında üretim kalite ve performansının artırılması için ekstra bir kurutucu kullanılabilir fakat bu durum çimento fabrikası için ek yatırım maliyeti getirecektir. Çorum ili sahalarından alınan tras örneklerinin kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında reaktif SiO₂ yüzdesi ve puzolanik aktivitesi çimento üretimi için uygundur. Ayrıca rutubet içerikleri (<4%) istenilen değerlerdedir. Bundan dolayı yalnız başına tras olarak % 40 lara kadar kullanılabilirler.

3.5. Demir Cevheri Yatakları

Ülkemizdeki demir cevherinin büyük yüzdesinin tenörü düşük olup yüksek tenörlü bilinen rezervlerin bir kısmı ise demir çelik sektöründe kullanılmaktadır. Ülkemizde demir cevherinin kalitesi sorunlarından dolayı bir kenara itilmiş, işletilmelerine yönelik ciddi bir çalışma yapılmamıştır. Bu yataklarla ilgili başlıca iki sorun cevherin içeriği ve üzerindeki yüksek örtü kalınlığıdır. Ülkemizde demir yatakları ağırlıklı olarak Sivas, Malatya ve Erzincan bölgesinde olmasına rağmen Karadeniz bölgesinde ise Tokat, Amasya ve Çorum illerinde çimento sektörünün ihtiyacını karşılayabilecek rezerv ve kaliteye rastlanmıştır (Demir raporu, 2008). Çimento piyasasında ihtiyaç duyulan çimento türleri giderek artmakta olup, eğer üretilen çimento türüne bağlı olarak kullanılan hammaddeden istenilen hammadde kalite kontrol parametreleri (modüller) sağlanamıyorsa; SiO₂ açığı için kum, Al₂O₃ için boksit, Fe₂O₃ açığı için ise demir cevheri

uygun oranlarda farine ilave edilir. Genellikle çimento üretiminde hazırlanan farinin demir eksikliğine göre %1-5 arasında demir cevheri kullanımı tercih edilmektedir.

Tablo 9. Demir cevheri çalışma sahaları ve rezerv miktarları (MTA, 2018)

Lokasyon	Örnek Alınan Sahalar	Örnek No	Rezerv (mil.ton)
Tokat	Artova-Karadut Sahası	Y1	33000
Amasya	Beldağı	Y2	28000
Çorum	Kargı-Çobanlar	Y3	43000
	Mecitözü	Y3	17000

Tablo 10. Demir Madeni Kimyasal Analiz Sonuçları

İçerik	Y1	Y2	Y3	Y4
	%	%	%	%
SiO ₂	18,2	16,0	20,86	17,80
Al ₂ O ₃	4,80	5,54	4,46	4,74
Fe ₂ O ₃	40,9	56,0	63,46	54,20
CaO	1,60	2,10	1,10	2,10
MgO	2,10	0,72	0,72	0,72
Na ₂ O	0,0	0,02	0,02	0,02
K ₂ O	0,40	0,81	0,81	0,81
SO ₃	0,70	0,60	0,60	0,60
P ₂ O ₅	0,20	0,23	0,23	0,23
TiO ₂	0,30	0,34	0,34	0,34
MnO	1,90	0,48	0,48	0,48
KK	4,60	6,50	6,50	6,50
Toplam	95,20	99,58	99,58	99,58
Nem	4,90	10,90	12,0	10,9

4. SONUÇLAR

Karadeniz bölgesinde çimento fabrikası yatırımları yapılabilmesi ve mevcut çimento üretim kapasitelerinin artırılması için yaklaşık olarak 50 km²'lik bir alanda arazi çalışmaları yapılmıştır. Yapılan detaylı incelemeler neticesinde;

Çimento hammaddeleri özellikle kalker sahaları ülkemizde yaygın olarak bulunmaktadır. Genelde rezerv yönünden herhangi bir sorun bulunmamaktadır. Ancak hammadde kullanım miktarlarının çok yüksek olması, nakliye maliyetlerinin düşük olmasını gerektirdiğinden ana hammadde sahalarının çimento fabrikalarına yakın olması (en çok 5 km) büyük önem taşımaktadır. Ayrıca hammaddelerin kaliteli, kolay kırılabilir, öğütülebilir ve pişebilir özellikte olması, düşük nem içermesi, sahaların ocak işletmeciliğine uygun olması, dekapaj gerektirmemesi, tarım-orman alanları içinde olmaması hammadde maliyetlerinin düşük olmasını sağladığından hammadde etütlerinde esas alınması gereken kriterler olmaktadır.

Tokat, Amasya kalkerleri masif olmasına karşın Çorum ve Samsun kalkerleri kırıklı bir yapı

içermekte ve alterasyona uğramış zonlar fazlaca bulunmaktadır. Altere olmuş yerlerde SiO₂ miktarları yer yer % 10-15' lere kadar yükselmekte ve % 5-8' lere kadar yer yer MgO bu yapı-lara eşlik etmektedir.

Kil oluşumları Tokat, Amasya, Samsun ve Çorum bölgesinde rezerv ve kalite açısından bir çimento fabrikasının istediği özellikleri barındırmaktadır. Tokat Killerinin MgO içeriği yüksek olup, Samsun Killerinde ise alkaliler yüksek görülmüştür. Çimento üretiminde kullanılacak kil yataklarının kimyasal özelliklerinin yanı sıra kurulacak fabrikaya yakınlığı, sökülebilirliği, kırılabilirliği, öğütülebilirliği ve pışebilir nitelikte olması düşük nem içermeleri ve homojen olmaları üretim maliyetini etkileyen en önemli parametrelerdir. Bu nedenle rezerv ve kalitenin yansira bu özelliklerin de saptanması çimento yatırımı açısından büyük önem arz etmektedir.

Tokat ili Güney doğusu sınırlar dahilinde bulunan trasların reaktif silis yüzdesi ve puzolanik aktivitesi düşüktür. Bu nedenle çimento üretim sürecinde klinker maliyetini düşürme adına az miktarlarda katılabilir. Tokat ili Kuzey doğusunda bulunan trasların puzolanik aktiviteleri düşük çıktığından dolayı tras olarak kullanılmaları uygun değildir. Fakat puzolanik aktivitesi yüksek olan bir tras ile harmanlama yapılarak kullanılabilir. Amasya il sınırları dahilinde bulunan özellikle Doğan-tepe trasının puzolanik aktivitesi ve reaktif silisi yüksek olması nedeniyle tek başına çimento üretim sürecinde kullanılmaları uygundur. Samsun sınırları dahilinde bulunan trasların reaktif silis yüzdesi ve puzolanik aktivitesi çimento üretimi için uygun değerlerdedir.

Tokat ve Amasya illerindeki alçıların yumrulu olduğu ve yumrularının arasının killi olduğu görülmüştür. Ancak killerden arandıktan sonra kullanılabilceği düşünülmektedir. Daha kalite-li alçıtaşı bulmak amacıyla Sivas ili Bedirli köyü ve Samsun Vezirköprü civarları taranmış olup bu bölgede rezervi bol, iyi kalitede alçıtaşı oluşumları tespit edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

Demir Raporu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Aralık 2008.

Kaya, G., 2010, Farklı konsantrasyonlarda uçucu kül kullanımının çimento özellikleri üzerine etkileri, Yüksek lisans tezi, Gazi Osman Paşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Korkmaz, A., 2012, Klinker ana komponentlerin öğütme ve çimento dayanımları üzerindeki etkilerinin araştırılması, Yüksek lisans, Cumnuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Korkmaz, A., 2017, Çimento üretiminde kil ham maddesine alternatif olarak metaşistin kullanılabilirliği , Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

MTA, 2018, İl maden potansiyelleri, <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/il-maden-potansiyelleri>, [Erişim tarihi: 4 Temmuz 2018].

Schafer, H. U., 1989, Çimento endüstrisinde ham maddelerin seçimi, TÇMB Bülteni, 14-33.

Şişman, N., 2005, Metakıltaşı, kil taşı, metaşist ve kalker rezerv ve kalite çalışmaları, Karadeniz ve İç Anadolu Bölgesi Çimento ham maddeleri araştırma raporu.

Türk Standartları Enstitüsü 196-1, 2002, Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini, Ankara,

Korkmaz

T.Ç.M.B., Sürdürülebilir Çimento Üretimi, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 2017

Wilcox, S., 1995, From the mists of time, International Cement Review, 73-75.

Makale Gönderim Tarihi: 03.12.2017

Yayına Kabul Tarihi: 24.12.2017

Baritin Yaş Öğütülmesinde Öğütme Parametrelerinin Etkisi

*Effect of Grinding Parameters in Wet Grinding of Barite*Diler KATIRCIOĞLU-BAYEL^{1*}, Öner Yusuf TORAMAN², Şafak Gökhan ÖZKAN³^{1,2}Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye³Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi, Avcılar, İstanbul, Türkiye*Sorumlu yazar: dkatircioglu@ohu.edu.tr

Özet

Mikron altı tane elde edilmesinde yüksek güç yoğunluğu ve daha iyi öğütme verimlerinden dolayı karıştırmalı bilyalı değirmenlerin oldukça etkili olduğu bilinmektedir. Bu değirmenler yüksek ürün inceliği talep edilen boya, kâğıt, plastik ve ilaç gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, barit (BaSO_4 , $d_{50}=2,83 \mu\text{m}$) yaş öğütülmesi üzerine karıştırmalı bilyalı değirmende yüksek yoğunluğa sahip zirkon (ZrO_2) bilya tasarımıyla sistematik bir çalışma gerçekleştirilmiş ve baritin mikron altı boyuta öğütülmesinde, öğütme parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. İncelenen öğütme parametreleri; bilya miktarı (bilya doluluk oranı), pülp yoğunluğu, bilya boyutu ve öğütme süresidir. Deneysel sonuçlar tüketilen enerji (kWh/t), ürün tane boyutu (d_{10} , d_{50}) ve kırılma oranı ilişkisi dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Gerçekleştirilen bir dizi deneysel çalışmalar sonucunda, barit için optimum koşullar, bilya doluluğu %60, pülp yoğunluğu %30, bilya boyutu 1 mm, öğütme süresi 120 dk olarak tespit edilmiştir. Bu şartlarda ortalama tane boyutu (d_{50}) $0,74 \mu\text{m}$ ürün elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Barit, karıştırmalı bilyalı değirmen, mineral dolgu, yaş öğütme

Abstract

The production of submicron particles in stirred ball mills have been known a very efficient method because of its high power density and better grinding efficiency. These mills have been used exteremely in many industries where a high product fineness is in demand such as paints, papers, plastics and pharmaceuticals.

In this study, a systematic study by using high density yttria stabilized zirconia (ZrO_2) grinding media on wet grinding of barite (BaSO_4 , $d_{50}=2.83 \mu\text{m}$) powders to produce submicron particles was performed in a stirred ball mill and the effects of grinding parameters for submicron grinding of barium sulfate were investigated. The effects of grinding parameters such as ball filling ratio, pulp density (%), media size and grinding time were investigated. Experimental results were evaluated based on the product particle size (d_{10} , d_{50}), the energy consumed (kWh/t) and reduction ratio.

As a result of a series of grinding experiments, the optimum conditions for barium sulfate determined were; 60% for ball filling ratio, 30% for pulp density, 1 mm for media size and 120 minu-

tes for grinding time. Under these conditions mean particle size (d_{50}) of $0.74 \mu\text{m}$ was obtained.

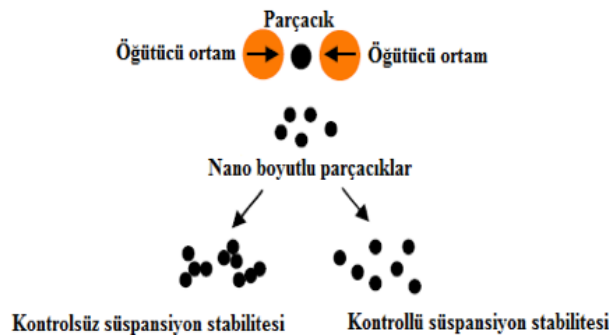
Keywords: Barite, stirred media mill, mineral filler, wet grinding

1. Giriş

Endüstrinin çok çeşitli alanlarında yaygın olarak kullanılan ince ($<100 \mu\text{m}$), çok ince ($<10 \mu\text{m}$) veya süper ince ($<1 \mu\text{m}$) mikron altı boyuttaki ürünlere talep her geçen gün biraz daha artmaktadır. Örneğin; boyalar, pigmentler, kâğıt kaplama maddeleri, yapıştırıcılar, katalizörler, emici maddeler, dolgu maddeleri, baskı mürekkepleri, karbonsuz kopyalama kâğıtları, emülsiyonlar, mikro emülsiyonlar, plastikler gibi birçok alanda mikro ve nano boyuttaki ürünlerin uygulama alanları vardır. Öte yandan, dolgu malzemesi kullanılması, ürünün maliyetini düşürmekte ve kompozit malzemelerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini arttırmaktadır. Mikronize ürünlere göre mikron altı ürünlerin yüzey alanının daha fazla olması, daha homojen bir tane boyut dağılımında olması gibi sebeplerden dolayı mikronize ürünlerin kullanımına göre mikron altı boyutlardaki ürünlerin kullanımı, ürünün istenilen fiziksel özelliğini de arttırmaktadır. Mikron altı tanecikler, hacim oranlarına göre yüksek yüzey alanları ve daha küçük boyutlarından dolayı fizikokimyasal özellikler (homojenlik, çözünürlük, reolojik özellikler, dayanım ve reaktivite gibi) gösterirler. Bu fizikokimyasal özellikler kendilerini oluşturan atom veya moleküllerden farklıdır. Cevherlerde boyut küçültmede tanımlanan üç farklı mekanizma vardır. Bunlardan birincisi, yaygın olarak çarpma etkisiyle ilişkili olarak bilinen doğrudan kırma. İkincisi ise öğütücü ortam arasında kalan tanelerin kesme ve aşındırma etkisidir; bu olay karıştırmalı bilyalı değirmenlerde, bilyalar arasındaki yuvarlanma/kayma hareketine benzer bir mekanizmadır (Rose ve Sullivan, 1958). Çarpma ve yuvarlanma/kayma etkisi karıştırmalı bilyalı değirmenlerin belli bölgelerinde, kesme ve aşındırma etkisinden daha baskındır (Rydin ve ark., 1993).

İnce/ çok ince ve nano tanelerin üretiminde iki tür yaklaşım vardır: i- Bottom-up, ii- Top-down. Aşağıdan yukarıya yaklaşımı olarak tanımlanan Bottom-up yönteminde ince ve nano taneler moleküllerin reaksiyon, yoğunlaşma ve agregasyonu ile üretilen ürünlerdir.

Yukarıdan aşağıya yaklaşımı olarak tanımlanan Top-down yönteminde ince ve çok ince taneler öğütme gibi fiziksel prosesler tarafından üretilmektedir (Şekil 1). Bu çalışma da top-down yaklaşımı ile ilişkilidir. Top-down yaklaşımında yaş ve kuru öğütme gibi iki seçenek vardır. Yaş öğütmenin birçok avantajı vardır. Bunlar; daha az aglomerasyon eğilimi, daha az malzeme kaybı, düşük oksidasyon olma olasılığı, daha az enerji tüketimi, toz probleminin oluşmamasından dolayı toz sorununun ortadan kaldırılması amacı ile kullanılan hava temizleme cihazına ihtiyaç duyulmamasıdır.



Şekil 1. Top- down yaklaşımında katı fazında nano tane sentezi (Sakthivel ve Prasanna Venkatesh, 2012)

Karıştırmalı bilyalı değirmenler sadece düşük enerji sarfiyatı açısından avantajlı olmayıp, düşük aglomerasyon eğilimi, düşük materyal kayıpları, oksidasyon olma ihtimalinin düşüklüğü, yüksek boyut küçültme oranı, malzemenin öğütme ortamı tarafından az kirlenmesi ve toz probleminin olmayışı gibi avantajlardan dolayı yaş öğütme prosesinde en çok tercih edilen değirmenlerdendir.

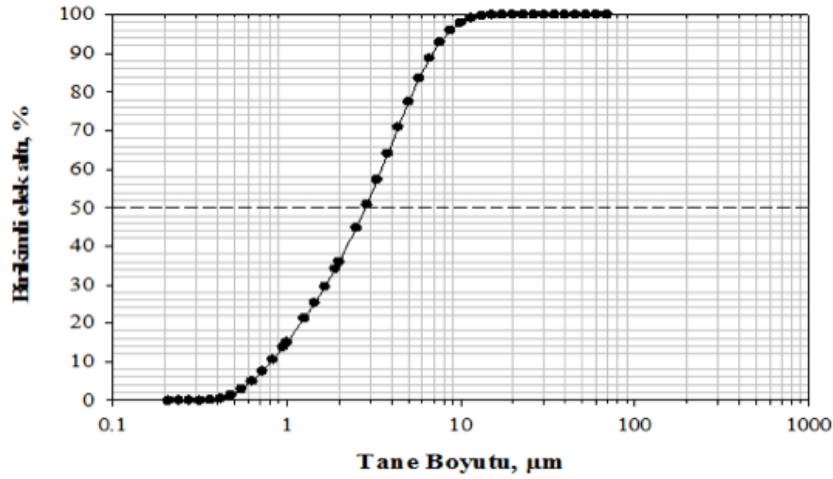
Barit, baryum elementinin en yaygın minerali olan baryum sülfattır ($BaSO_4$). Barit dolgu maddesi olarak boya, kâğıt, plastik ve kauçuk, sürtünme elemanları, cam ve seramik endüstrilerinde hem maliyet azaltıcı hem de fonksiyonel dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Isı ve basınç altında kimyasal değişim göstermemesi, su ve asitlerde çok düşük çözünürlüğü, manyetik özelliğinin bulunmayışı ve uygun maliyeti ile çeşitli endüstrilerde giderek yaygın şekilde kullanımı artmıştır.

Bu çalışmada; endüstriyel bir mineral olan baritin ($BaSO_4$) karıştırmalı bilyalı değirmende yaş öğütülmesi hedeflenip farklı çalışma parametrelerinin etkileri araştırılarak elde edilen ürünlerin tane boyutları kıyaslanmış ve sonuçlardaki farklılıkların sebepleri irdelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Materyal

DeneySEL çalışmalarda Osmaniye bölgesinde faaliyet gösteren Barit Maden Türk A.Ş firması tarafından üretimi yapılan barit örnekleri ($d_{50}=2,83 \mu m$) kullanılmıştır. Örneğin, XRF cihazı ile belirlenen kimyasal özellikleri Tablo 1’de, fiziksel özellikleri Tablo 2’de ve tane boyut dağılımı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Barit örneklerinin tane boyut dağılımı

Tablo 1. DeneySEL çalışmalarda kullanılan barit örneklerinin kimyasal özellikleri (%)

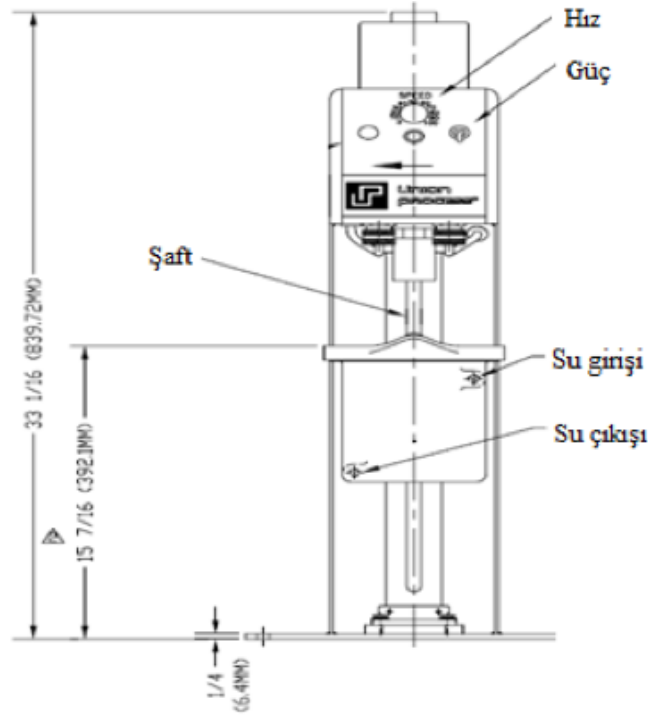
$BaSO_4$	$SrSO_4$	CaO	$CaSO_4$	SiO_2	Fe_2O_3	A.Z (1050 C°)
91	1,75	0,50	0,75	2,50	0,45	3,05

Tablo 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan barit örneklerinin fiziksel özellikleri

Yoğunluk (g/cm ³)	Mohs sertlik	d ₅₀ (μm)	d ₉₀ (μm)	Spesifik yüzey alanı (m ² /g)
4,2	3	2,83	7,14	0,75

2.2 Metot

Bu çalışmada öğütme işlemleri Union Process (U.S.A.) tarafından üretilen Standart-01 model dikey pinli karıştırıcı değirmende gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Deneylerde, 8,04 cm çapında ve 12,3 cm yüksekliğinde seramik hazne kullanılmıştır. Değirmende öğütücü ortamı karıştırmak için dikey bir şaft (Colmonoy kaplı) ve bu şaft üzerine monte edilmiş 4 adet karıştırma kolu vardır. Şaft uzunluğu 26,6 cm, her bir karıştırma kolunun uzunluğu 5,7 cm ve şaftın tank tabanından uzaklığı 0,635 cm'dir. Şaft 0,25 HP gücünde bir motora bağlı olup, şaftın dönme hızı 100-600 d/dk arasında değiştirilebilmektedir. Deneylerde, 1 mm boyutlu yüksek yoğunluklu (6000 kg/m³) ve dayanımı yüksek (kimyasal bileşimi: %93 ZrO₂, %5 Y₂O₃ ve %2 diğerleri) yttria stabilizeli zirkonyum oksit bilyalar kullanılmıştır.



Şekil 3. Karıştırıcı bilyalı değirmenin (Attritör) şematik görünümü

Karıştırılacak miktarda tartımı yapılan kuru malzemeye belirlenen oranda saf su eklenerek 3 dk süre ile 850 d/dk çalışma hızında önce mekanik karıştırıcıda karıştırılarak süspansiyon hazırlanmıştır. Daha sonra, değirmenin sıcaklığı soğutma sistemi kullanılarak 25±1 °C'ye ayarlanmış, dikey şaft tank içine yerleştirildikten sonra karıştırma kolları tamamen kapanacak şekilde önce bilyalar tanka doldurulmuş, ardından da değirmen deneylerde kullanılan hıza (600 d/dk) ulaştığında mekanik karıştırıcıda öğütülmek üzere hazırlanan süspansiyon değirmene eklenerek değirmenin kapağı kapatılmıştır. Karıştırıcı bilyalı değirmende enerji tüketimi Rev 2580 (Rev Ritter GmbH, Deutschland) voltmetre ile gerçekleştirilmiş olup aktif güç kWh cinsinden kaydedilmiştir.

Besleme ve farklı şartlarda gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen ürünlerin tane boyut analizi Lazer Difraktometre yöntemiyle yaş çalışan tane boyutu ölçüm cihazı (Malvern Mastersizer Hydro 2000 MU-Malvern Co., Ltd., UK) ile gerçekleştirilmiştir. Her öğütme deneyi sonunda, ürünler örnek bölme kurallarına göre azaltılmıştır, azaltılan iki ayrı örnek alınıp, her biri ayrı ayrı analize tabi tutulmuştur. Ölçümler sonunda her bir deney için elde edilen analizlerin ortalamaları not alınarak sonuçların değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

Barit örneklerinin yapısal özelliklerini tespit etmek amacıyla SEM analizi gerçekleştirilmiştir. SEM analiz ölçümlerinde, ilk önce örnekler QuorumTechnologies Q150R ES markalı cihaz ile saf altın kaplanarak SEM için yüzey hazırlanmıştır. Kaplama esnasında hücre basıncı 10^{-1} mbar/Pa olarak alınmış, kaplama kalınlığı 5-6 nm seçilmiştir. Kaplama işlemi yaklaşık 120 saniye sürmüştür. Ardından ZEISS EVO LS10 marka ve modelde olan taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile 25 kV enerji kullanılarak yüzey görüntüleri alınmıştır.

Yapılan çalışmada, barit örneklerinin karıştırılmalı bilyalı değirmende mikron altı boyuta öğütülmesi ve öğütme parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. İncelenen öğütme parametreleri; bilya miktarı (bilya doluluk oranı), pülp yoğunluğu, bilya boyutu ve öğütme süresi'dir. Bilya doluluk oranı için diğer parametrelerin orta değerleri sabit tutulmuş, en iyi bilya doluluk oranı tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar enerji tüketimi (kWh/t), ürün boyutu (d_{10} , d_{50}) ve kırılma oranı dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Tablo 3'te barit için öğütmede kullanılan deney koşulları verilmiştir.

Tablo 3. Deneysel çalışmalarda kullanılan barit örneklerinin öğütme koşulları

Parametreler	Bilya Doluluk oranı (%)	Pülp Yoğunluğu (%)	Bilya Boyutu (mm)	Öğütme Süresi (dk)	Hız (d/dk)
Bilya Doluluk Oranı (%)	55 60 65	20	1	120	600
Pülp yoğunluğu (%)	60	15 20 25 30 40	1	120	600
Bilya Boyutu (mm)	60	30	0,2 0,5 1 2 3	120	600
Öğütme Süresi (dk)	60	30	1	60 90 120 180 300	600

Beslenen malzeme ve öğütme sonrasında elde edilen ürünün tane boyut dağılımının ağırlıkça %50 geçtiği boyut değeri tespit edilerek, Eşitlik 1 kullanılarak kırılma oranı belirlenir (Fuertenau ve Abouzeid, 2002).

$$\text{Kırılma oranı} = F_{50} / P_{50} \quad (1)$$

F_{50} : Beslemenin ortalama tane boyutu

P_{50} : Ürünün ortalama tane boyutu

Tüketilen spesifik enerji miktarı hesabı aşağıda gösterildiği gibi şu şekilde hesaplanmış, Eşitlik (2)'de verilmiştir (Patel ve ark., 2014).

$$E_m = (E - E_0) / m_p \quad (2)$$

E_m : Spesifik enerji tüketimi (kWh/t)

E : Öğütme süresi boyunca tüketilen enerji (kWh)

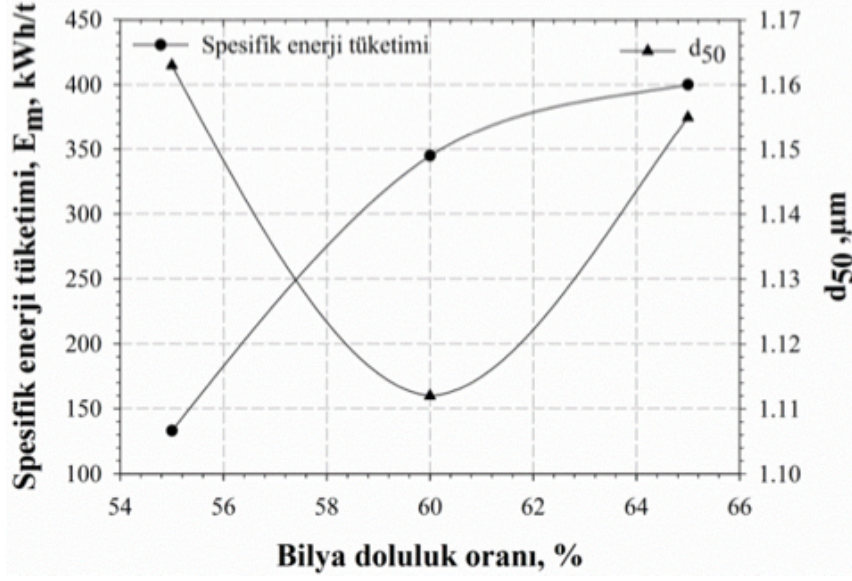
E_0 : Değirmen boş çalışırken tüketilen enerji (kWh)

m_p : Örnek miktarı (t)

3. Bulgular ve Tartışma

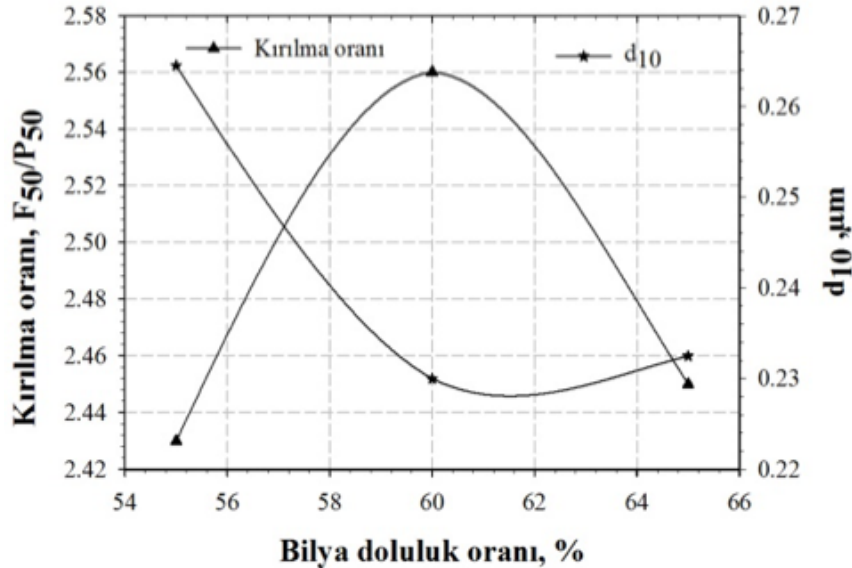
3.1 Bilya Doluluk Oranının Etkisi

Bilya doluluk oranının arttırılması ile tane boyutu azalmaktadır (Celep ve ark., 2008). Fakat bilya doluluk oranının gereğinden fazla olması durumunda ise ortam, pervane ve astar aşınması artacağı için fazla öğütücü ortam kullanımından kaçınılmalıdır. Bilya doluluğunun yaş öğütmede oluşturduğu etkileri incelemek üzere farklı bilya doluluk oranlarında (%55; %60 ve %65) deneyler yapılmıştır. Deneylerde bilya doluluğu arttıkça daha düşük d50 boyutlarına ulaşılırken, belirli bir d50 boyutundan sonra bilya doluluğu arttıkça d50 boyutunun arttığı gözlenmektedir (Şekil 4). Bu artışın ince tanelerin re-aglomerasyon olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı öğütme sürelerinde barit için %60 doluluk oranı en düşük d50 boyutunu vermektedir. Kwade (1999) tarafından yapılan çalışmada bilya şarj oranının artışı ile ortam etkileşiminin arttığı, bireysel öğütme ortamı arasındaki mesafenin azaldığı tespit edilmiştir. Belli bir şarj oranının üzerinde, öğütücü ortamın hareketi için çok küçük bir mesafe kalmasından dolayı, öğütmenin negatif etkiler göstereceği ileri sürülmüştür. Karıştırmalı bilyalı değirmenlerde enerjideki artışın iki sebebi vardır. Bunlardan biri, bilya doluluğu arttıkça enerjinin çoğu bilya yükünü karıştırmak amacıyla harcanmakta olup dolayısıyla kullanılan enerji miktarı artmaktadır. Diğeri ise bilyalar arasındaki sürtünmenin artmasıdır. Bilya doluluk oranının değişmesiyle, bilya tane çarpışma sayısı artmakta, değirmen içinde daha fazla kırılma olayı gerçekleşmekte ve dolayısıyla ürün tane boyutu azalmaktadır (Sivahoman ve Vachot, 1990; Altun ve ark., 2013). Şekil 4 incelendiğinde barit için %55 bilya doluluk oranları yeterli enerji verimliliğini sağlamaktadır. Bir başka deyişle, yüksek bilya doluluk oranlarında (%60) elde edilen tane boyutunu, düşük bilya doluluk oranlarında elde etmek için daha çok enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 4. Barit örnekleri için farklı bilya doluluk oranlarında enerji tüketimi-d50 ilişkisi

Yüksek bilya doluluk oranları ile daha daha fazla kırılma oranları elde edilmektedir (Sabah ve ark., 2013). Şekil 5'de görüldüğü üzere, barit için %60 bilya doluluk oranından sonra kırılma oranı azalmaktadır. Fuerstenau ve Kapur (1994) yaptıkları çalışmada kırılma oranının bilya doluluk oranı ile değiştiğini tespit etmişlerdir. Kırılma oranındaki bu azalışın nedeni artan bilya doluluk oranı ile değirmende biriken ince tanelerin re-aglomerasyonuna neden olarak yastıklanma etkisi yapması sonucu iri malzemelerin kırılmasını engellemesidir. Ayrıca, %55 ve %65 bilya doluluk oranlarında elde edilen ürünlerin d_{10} tane boyutları birbirine yakındır. Bu da değirmende bilya doluluğunun artmasının ince boyutlarda aşırı öğünmeye sebep olmadığını bir göstergesidir.

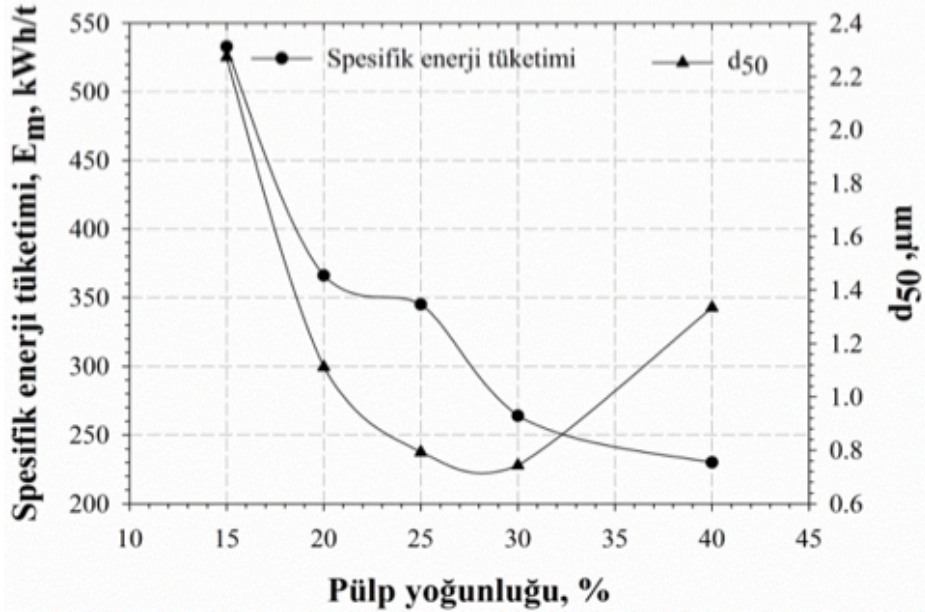


Şekil 5. Barit örnekleri için farklı bilya doluluk oranlarında kırılma oranı-d10 ilişkisi

3.2 Pülp Yoğunluğunun Etkisi

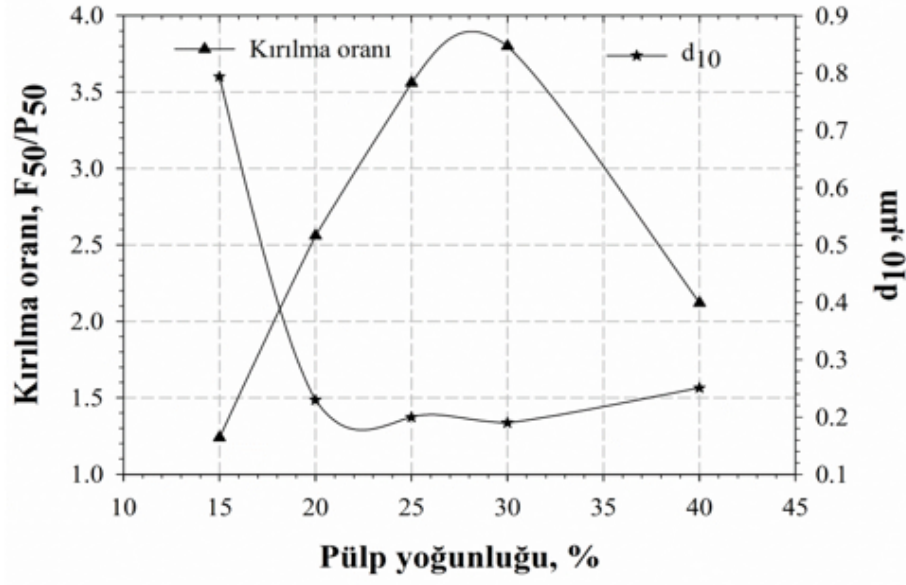
Karıştırmalı bilyalı değirmende pülp yoğunluğu belli bir hacimde ne kadar tane bulunduğunu belirler. Farklı pülp yoğunluklarının spesifik enerji tüketimi-d50 boyutu üzerine etkisi Şekil

6'da verilmiştir. Değirmen içinde katı konsantrasyonunun artışı tanelerin durumunu iki şekilde etkilemesi beklenir. Birincisi taneler yakalanır ve iki bilya arasında kalma olasılığı artar ki bu da daha iyi bir boyut küçültmeyle sonuçlanır. Diğeri ise; katı konsantrasyonundaki artış pülpün viskozitesini artırır ki bu da aglomerasyona neden olur. Şekil 6 incelendiğinde d_{50} boyutunun katı oranı arttıkça azaldığı ancak barit için %30 katı oranından sonra d_{50} boyutunun arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak değirmen içerisindeki malzeme miktarı arttıkça bilya ile tane arasındaki çarpışma sayısının azaldığı düşünülmektedir. Beslenen malzeme miktarı ürün inceliğinin yanı sıra spesifik enerji tüketimini de etkilemektedir. Şekil 6 incelendiğinde, pülp yoğunluğu arttıkça harcanan enerjinin azaldığı gözlenmiştir. Barit için (%15-%40) artışı ile harcanan enerji 533-230 kWh/t'a düştüğü tespit edilmiştir. Değirmen içinde pülp yoğunluğunun artmasıyla enerji tüketimi azalmaktadır (Liu ve ark., 2006; Stenger ve ark., 2005; Zheng ve ark., 1996; Bel Fadhel ve Frances, 2001; He ve Forssberg, 2007; Altun ve ark., 2013; Quattara ve Frances, 2014; Ohenoja ve ark., 2013). Değirmen içinde pülp yoğunluğunun artmasıyla kırılma hareketi azalmakta ve öğütme yavaşlamaktadır. Değirmen içinde pülp yoğunluğunun az olması durumunda ise enerjinin büyük bir kısmı bilyaların çarpışması için harcanmakta ve yapılan öğütme işlemi düşük enerji verimliliği yaratmaktadır. Düşük katı konsantrasyonlarında aynı ürün inceliğini elde etmek için daha fazla spesifik enerji gerekmektedir. Bu ise tanelerin öğütücü ortam tarafından yakalanamamasından kaynaklanmaktadır (Kwade ve ark., 1996).



Şekil 6. Barit örnekleri için farklı pülp yoğunluklarında enerji tüketimi- d_{50} ilişkisi

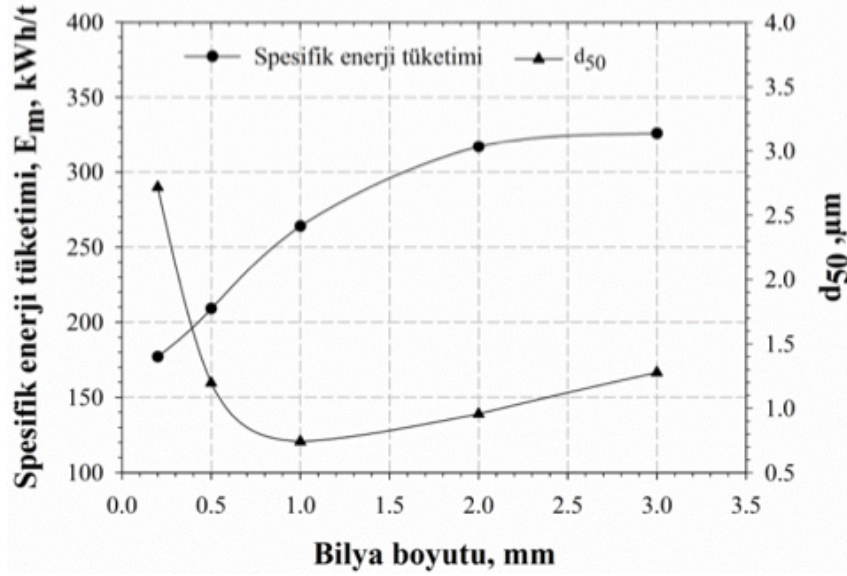
Farklı pülp yoğunluklarının kırılma oranı ve d_{10} boyutu üzerinde yarattığı etkiler Şekil 7'de incelenmiştir. Barit için belirlenen pülp yoğunluklarında elde edilen ürünlerin d_{10} boyutları birbirine yakındır. Bu da değirmende pülp yoğunluğunun artmasının ince boyutlarda aşırı öğünmeye neden olmadığına bir göstergesidir. Barit örnekleri için yüksek pülp yoğunlukları ile daha yüksek kırılma oranları elde edilmiştir (Şekil 7). En iyi kırılma oranı barit için %30 pülp yoğunluğunda elde edilmiştir. Belirlenen pülp yoğunluklarında elde edilen ürünlerin d_{10} boyutları birbirine yakındır. Bu da pülp yoğunluğunun artmasının ince boyutlarda aşırı öğünmeye neden olmadığına bir göstergesidir.



Şekil 7. Barit örnekleri için farklı pülp yoğunluklarında kırılma oranı-d₁₀ ilişkisi

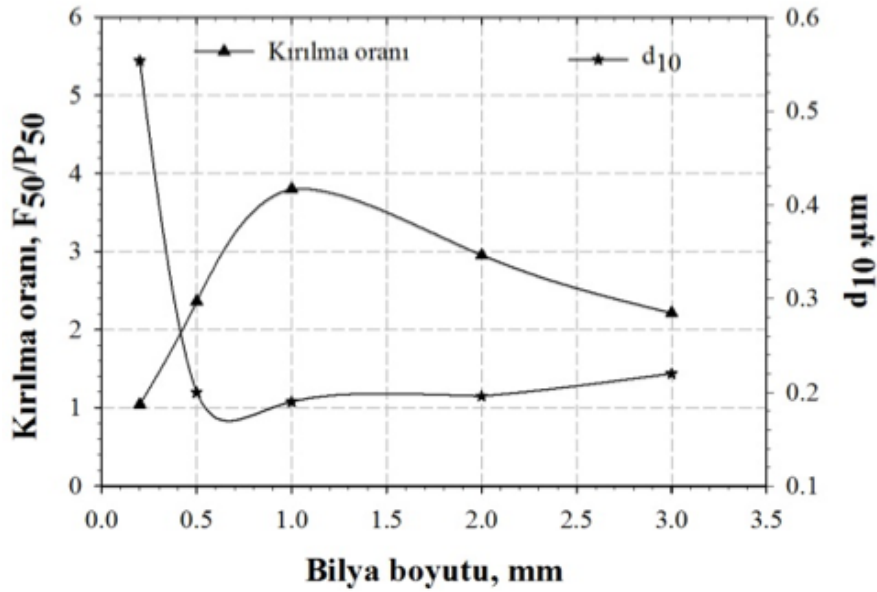
3.3 Bilya Boyutunun Etkisi

Karıştırmalı bilyalı değirmende bilya boyutu öğütme verimini iki şekilde etkilemektedir. Birincisi süspansiyonun akış hızından dolayı enerji tüketimini etkilemektedir. İkincisi ise daha ince boyutlu ürünlerin elde edilmesini sağlamaktadır (Zheng ve ark., 1996; Farber ve ark., 2011). Bilya boyutunun etkisini incelemek üzere barit örnekleri üzerinde farklı boyutta bilyalarla öğütme deneyleri yapılmıştır. Farklı bilya boyutlarının spesifik enerji tüketimi-d₅₀ boyutu üzerine etkisi Şekil 8’de gösterilmiştir. Buna göre, barit örnekleri için 600 d/dk karıştırma hızında, aynı öğütme süresinde ve aynı katı oranında 1 mm boyutlu bilya kullanımı daha düşük d₅₀ boyutları vermektedir. Karıştırmalı bilyalı değirmenlerde bilya boyutu ürün inceliğini önemli ölçüde etkileyen parametrelerdendir. Etkili bir öğütme sağlamak için bilyaların yeterli ölçüde stres yoğunluklarına sahip olmaları gerekmektedir. Stres yoğunluğunu küçük bilyalara sağlayacak etki karıştırma hızının yeterli miktarda artırılmasıyla oluşmaktadır. Düşük karıştırma hızlarında küçük bilyaların oluşturduğu stres yoğunluğu oldukça az olduğu için yapılan öğütme verimsizdir (Wang and Forssberg, 2000). Deneylerde kullanılan 2 ve 3 mm boyutlu bilyaların barit örnekleri üzerine enerjilerini verimli olarak iletebilmesi için 600 d/dk’dan daha düşük karıştırma hızlarında, 0,2 ve 0,5 mm boyutlu bilyaların ise 600 d/dk’dan daha yüksek karıştırma hızlarında çalışılmasının daha verimli olduğu düşünülmektedir.



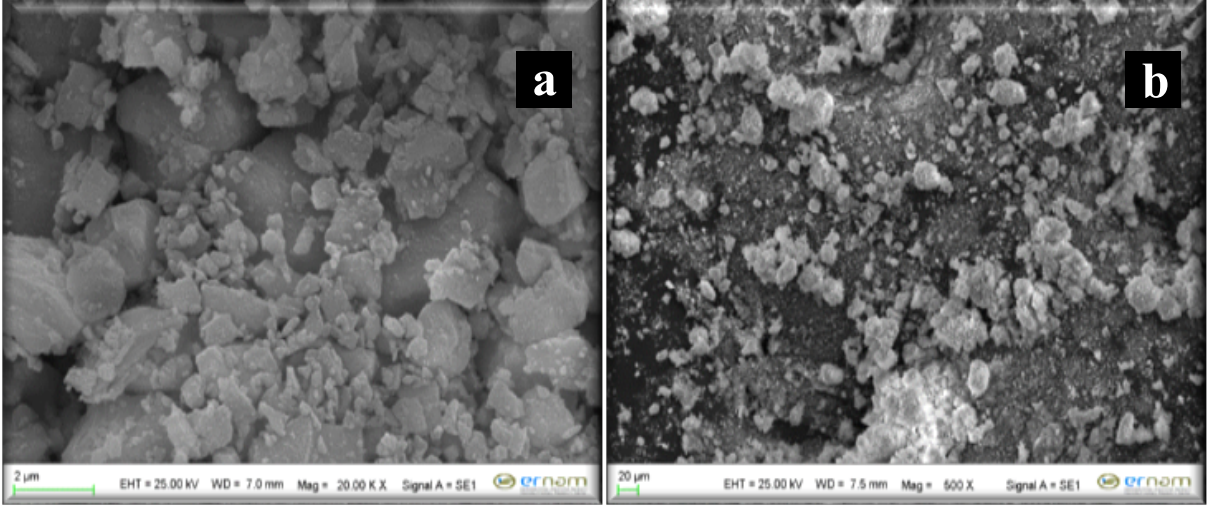
Şekil 8. Barit örnekleri için farklı bilya boyutlarında enerji tüketimi- d_{50} ilişkisi

Öğütücü ortamın boyutu azaldıkça birim hacim başına düşen bilya sayısı artar. Böylece, daha fazla tane bilyalarla temasa geçer ve kırılma oranı artar (Patel ve ark., 2012). Bilya boyutunun kırılma oranı ve d_{10} üzerinde yarattığı etkiler Şekil 9’da incelenmiştir. Buna göre, bilya boyutu arttıkça kırılma oranı artmış, 1 mm bilya boyutundan sonra ise kırılma oranı azalırken, d_{10} tane boyutu artmıştır.



Şekil 9. Barit örnekleri için farklı bilya boyutlarında kırılma oranı- d_{10} ilişkisi

Şekil 10(a)’da verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, dikdörtgen tabanlı dik bir prizmayı andıran görüntüsüyle ortorombik kristal sisteminde yer alan tipik bir barit minerali görülmektedir. Susuz sülfat grubunda bulunan barit mineralinin öğütülmeden önce tane boyutundaki düzensizlikleri de görüntülerde göze çarpmaktadır. Belirlenen optimum şartlarda elde edilen barit örneklerinin tane boyutunda görülen azalma ise Şekil 10(b)’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde görülmektedir.



Şekil 10. Barit mineralinin SEM görüntüleri: (a) herhangi bir işlem görmeden önce ortorombik sistemde kristalleşen tipik bir barit örneği, (b) öğütme sonrası elde edilen eş boyutlu barit örneği

4. Sonuçlar

Karıştırmalı bilyalı değirmende (attritör) baritin mikron altı boyuta öğütülmesinde öğütme parametrelerinin öğütme performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Bilya doluluğunun yaş öğütmede oluşturduğu etkiler incelendiğinde d50 boyutunun azaldığı, enerji kullanımının ise lineer bir şekilde arttığı ve birim hacim başına düşen kırılmanın da arttığı tespit edilmiştir. Ancak, %60 bilya doluluk oranından sonra d50 boyutunun arttığı görülmüştür.
- Değirmen içinde pülp yoğunluğunun artmasıyla kırılma hareketi azalmakta ve öğütme yavaşlamaktadır. Değirmen içinde pülp yoğunluğunun az olması durumunda ise enerjinin büyük bir kısmı bilyaların çarpışması için harcanmakta ve yapılan öğütme işlemi düşük enerji verimliliği yaratmaktadır.
- 1 mm bilya boyutu ile 120 dk öğütme süresinde 264 kWh/t spesifik enerji tüketimi ile ortalama tane boyutu 0,74 µm ürün elde edilebilirken, bu boyutta bir ürün 2 ve 3 mm bilyalar kullanarak daha uzun sürede ve daha fazla enerji tüketimi yaparak elde edilebilir. Elde edilen sonuçlar gösteriyor ki; 2 ve 3 mm bilya boyutuna kıyasen 1 mm bilya boyutu ile daha az enerji tüketimi yaparak daha ince ürünler elde edilebilmektedir.
- Yapılan deneylerde d10 boyutlarının çok fazla değişmediği gözlenmiştir. Bu durum, değirmenin ince boyutlarda aşırı öğünmeye neden olmadığına bir göstergesidir.

Kaynaklar

Altun, O., Benzer, H., Enderle, U., 2013. Effects of operating parameters on the efficiency of dry stirred milling. *Minerals Engineering*. 43–44, 58–66.

Bel Fadhel, H. ve Frances, C., 2001. Wet batch grinding of alumina hydrate in a stirred bead mill. *Powder Technology*. 119 (2–3), 257–268.

Celep, O., Alp, İ., Türk, T., 2008. İnce öğütme teknolojisinde karıştırmalı ortam değirmenleri ve cevher hazırlamadaki uygulamaları. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*. 21.

Farber, Y.B., Durant, B. ve Bedesi, N., 2011. Effect of media size and mechanical properties on milling efficiency and media consumption. *Minerals Engineering*. 24 (3–4), 367–372.

Fuerstenau, D.W. ve Kapur, P.C., 1994. A new approach to assessing the grindability of solids and the energy efficiency of grinding mills. *Minerals and Metallurgical Processing*. 11, 210–216.

Fuerstenau, D.W. ve Abouzeid, A.-Z.M., 2002. The energy efficiency of ball milling in comminution. *International Journal of Mineral Processing*. 67, 161-185.

He, M. ve Forssberg, E., 2007. Influence of slurry rheology on stirred media milling of quartzite. *Int. J. Mineral Processing*. 84, 240-251.

Kwade, A., Blecher, L. ve Schwedes, J., 1996. Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill. Part 2: Stress intensity and its effect on comminution. *Powder Technology*. 86 (1), 69–76.

Kwade, A., 1999. Wet comminution in stirred media mills-research and its practical Application. *Powder Technology*. 105, 14-20.

Liu, Y., Yu, Z., Zhou, S. ve Wu, L., 2006. De-agglomeration and dispersion of nano TiO₂ in an agitator bead mill. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 27, 983-990.

Ohenoja, K., Illikainen, M. ve Niinimäki, J., 2013. Effect of operational parameters and stress energies on the particle size distribution of TiO₂ pigment in stirred media milling. *Powder Technology*. 234, 91–96.

Patel, C.M., Murthy, Z.V.P. ve Chakraborty, M. 2012. Effects of operating parameters on the production of barium sulfate nanoparticles in stirred media mill. *J. Ind. Eng. Chem.* 18 (4), 1450–1457.

Patel, C.M., Chakraborty, M. ve Murthy, Z.V.P., 2014. Enhancement of stirred media mill performance by a new mixed media grinding strategy. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 20 (4), 2111–2118.

Quattara, S. ve Frances, C., 2014. Grinding of calcite suspensions in a stirred media mill: Effect of operational parameters on the product quality and the specific energy. *Powder Technology*. 255, 89-97.

Rose, H.E. ve Sullivan, R.M.E., 1958. A treatise on the internal mechanics of ball, tube and rod mills. Chemical Publishing Company. New York, NY.

Rydin, R.W., Maurice, D. ve Courtney, T.H., 1993. Milling dynamics: Part 1. Attritor dynamics: results of a cinematographic study. *Metall. Trans.* 24A, 175–185.

Sabah, E., Özdemir, O. ve Koltka, S., 2013. Effect of ball mill grinding parameters of hydrated lime fine grinding on consumed energy. *Advanced Powder Technology*. 24, 647-652.

Sakthivel, S. ve Prasanna Venkatesh, R., 2012. Solid state synthesis of nano- mineral particles.

International Journal of Mining Science and Technology. 22, 651-655.

Sivamohan, R. ve Vachot, P., 1990. A comparative study of stirred and vibratory mills for the fine grinding of muscovite, wollastonite and kaolinite. Powder Technology. 61 (2), 119–129.

Stenger, F., Mende, S., Schwedes, J. ve Peukert, W., 2005. Nanomilling in stirred media mills. Chemical Engineering Science. 60 (16), 4557–4565.

Wang, Y. ve Forssberg, E., 2000. Product size distribution in stirred media mills. Minerals Engineering. 13, 4, 459-465.

Zheng, J., Harris, C.C. ve Somasundaran, P., 1996. A study on grinding and energy input in stirred media mills. Powder Technology. 86 (2), 171–178.

Makale Gönderim Tarihi: 11.12.2017

Yayına Kabul Tarihi: 13.01.2018

Ham Manyezit Kekinin Farklı Fırınlarda Kurutulması ve Fırın Performanslarının Etüdü

Raw Magnesite Cake Drying in Different Ovens and Investigation of Oven Performances

Hasan Hacıfazlıoğlu *, Yeşim Konuk

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Müh. Bölümü, Avcılar, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar: hasanh@istanbul.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, yüksek nem içerikli (%46) ve çok ince boyutlu (-38 μ m) ham manyezit numuneleri farklı tipteki fırınlarda kurutulmuş ve bu fırınların kurutma performansları ayrı ayrı ortaya konmuştur. Ayrıca, ürünlerin kalsinasyona uğrayıp-uğramadıklarının tespiti amacıyla yüzey sıcaklıkları bir infrared sıcaklık ölçerle ölçülmüştür. Kurutma deneylerinde, klasik elektrikli (rezistanslı) fırın, kısa dalga kızılötesi ışınli halojen fırın ve mikrodalga fırın kullanılmış ve farklı kurutma sürelerinde (4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 ve 36 dk) deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre en hızlı kurutma yapan fırınlar sırasıyla, mikrodalga, halojen ve elektrikli fırındır. Belli bir nem giderim değeri için en fazla güç tüketen fırın ise klasik elektrikli fırındır. Halojen fırından elde edilen kuru ürünlerin yüzey sıcaklıkları ise diğer fırınlardan elde edilen ürün sıcaklıklarına göre daha yüksek bulunmuştur. En düşük ürün yüzey sıcaklık değerleri ise seçimli ısıtma yapması nedeniyle mikrodalga fırından elde edilmiştir.

Anahtar kelime: Manyezit, mikrodalga kurutma, kızılötesi kurutma, klasik kurutma, halojen kurutma

Abstract

In this study, raw magnesite samples with high moisture contents (46%) and very fine sized (-38 μ m) were dried in different types of ovens and the drying performances of these ovens were determined separately. In addition, surface temperatures are measured with an infrared temperature gauge to determine if the products have undergone calcination. In the drying experiments, a conventional electric (with resistance) oven, a short-wave infrared beam halogen oven and a microwave oven were used and experiments were carried out at different drying times (4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 and 36 min.). According to the test results, the fastest drying ovens are microwave, halogen and electric furnace respectively. The classical electric oven is the most power-consuming oven for a certain moisture removal value. The surface temperatures of the dry products obtained from the halogen furnace were found to be higher than the product temperatures obtained from other furnaces. The lowest product surface temperature values were obtained from the microwave oven due to the selective heating.

Keywords: Magnesite, microwave drying, infrared drying, conventional drying, halogen drying

1. GİRİŞ

Manyezit, kimyasal formülü $MgCO_3$ olan, teorik olarak %52.3 CO_2 ve %47.7 MgO içeren endüstriyel bir mineraldir. Sertliği 3.4-4.5, özgül ağırlığı 2.9-3.1, rengi beyaz, sarı, gri ve kah-verengi arasında değişmektedir. İyi kaliteli manyezitte düşük porozite, yüksek refrakter özellik, yüksek mukavemet, hacimde stabilite ve kimyasal dayanıklılık aranmaktadır (Yıldız, 2014). Ham manyezitler; kozmetik, ısı yalıtımı, cam, seramik, lastik, boya ve gübre sanayisinde kullanılabilir. Ancak genellikle ısı ve kimyasal işleme tabi tutulup, “kostik kalsine”, “sinter” veya “ergitilmiş (fused)” manyezite dönüştürülüp kullanılmaktadır.

Manyezit minerali de dahil olmak üzere, maden ürünlerindeki nem miktarı, başta ürünlerin talebi ve satış fiyatı olmak üzere bu ürünlerin taşınmasını, depolanmasını ve akıcılığını önemli ölçüde etkilemektedir. Çok ince taneli yığın malzemeler %10'dan daha fazla nem içeriyorsa, titreşim etkisi ile çok daha akıcı hale gelebilmekte ve stoklardan akarak kaybolabilmektedir. Yine gemi taşımacılığında yüksek nem oranı, yığın malzemenin sağa sola kaymasına neden olmakta ve taşımacılığı tehlikeli hale sokabilmektedir. Taneli malzemelerde genellikle %4 ile %8 arasındaki nem ideal olup, bu nem içeriklerinde malzeme daha homojen halde kalmaktadır. Daha düşük nem içeriklerinde tozuma gibi çevre problemleri ve toz malzeme kayıpları meydana gelmekte, daha yüksek nemlerde ise yukarıda sayılan problemler oluşmaktadır (İpekoğlu ve Polat, 2014).

Yukarıda anılan nedenlerden ötürü maden ürünlerinin belli bir nem değerinde tutulması gerekir. Mevcut durumda, yığın malzemelerdeki nem temelde iki yöntemle giderilebilir. Bunlardan ilki “susuzlandırma” ikincisi ise “kurutma” yöntemidir. Susuzlandırma mekanik bir işlem olup, santrifuj ve filtre gibi cihazlarla yapılmakta ve nem giderimi yüzey nemi ile sınırlı kalmaktadır. Oysa, kurutma yönteminde termal bir işlem vardır ve bu işlemle malzemenin bünye nemi dahil hemen hemen %100'e kadar nem giderimi sağlanabilmektedir. Endüstriyel tesislerde çok ince boyutlu manyezitlerin susuzlandırılması filtrelerle yapılmakta ve ortalama %40-50 nem içeren ürünlere dönüşmektedir. Daha düşük nem değerleri için döner kurutucular ya da akışkan yataklı kurutucular kullanılmaktadır. Konvansiyonel kurutma işleminin gerçekleştirilebilmesi için kurutulacak malzemeye ısı transferi yapılır. Bu ısı malzemenin içerisindeki suyu buharlaştırarak malzemenin kurummasını sağlar. Termodinamik kanunlarına göre, ısı transferinin yönü yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğrudur ve bu ısı transferi, kondüksiyon (iletim), konveksiyon (taşıma) ve radyasyon (ışınım) yoluyla yapılabilir. Klasik endüstriyel kurutucularda kondüksiyon ve konveksiyonla ısı transferi gerçekleşirken, son yıllarda özellikle düşük enerji tüketimleri nedeniyle mikrodalga, kızılötesi ışın, radyo dalgası gibi radyasyon yoluyla kurutma çalışmalarına da ağırlık verilmiştir (Kowalski ve Rajewska 2009; Aktaş vd., 2013; Riadh, 2015; Hacifazlıoğlu, 2017). Isının radyasyon yolu ile transferinde maddesel bir ortama ihtiyaç duyulmaz. Birbirini gören yüzeyler arasında sıcaklık farkı olduğu sürece radyasyonla ısı aktarımı mümkündür. Örneğin güneş ışınları uzay boşluğunu geçip dünyamızı ısıtırlar veya evlerde kullanılan kızılötesi (infrared) ısıtıcılar nesnelere bu şekilde ısıtır. Radyasyonla ısıtma, ultraviyole, radyo dalgaları, mikrodalga ve kızılötesi ışınım yoluyla gerçekleştirilebilir. Kızılötesi ışınım etraflarındaki havayı ısıtmadan sadece ışık geçirmeyen cisimleri ısıtmaktadır. Kızılötesi ısıtma sanayide boya kurutma, plastik üretimi, tavlama, plastik kaynaklama ve meyve kurutma gibi alanlarda da popüler olmaya başlamıştır. Bu tip uygulamalarda kızılötesi ısıtma yavaş yavaş geleneksel fırın ve ısıtma elemanlarının yerini almaktadır. Malzemenin karakteristiğine uygun kızılötesi frekans seçimi enerji verimliliğini de arttırmaktadır. Temelde 3 tip kızıl ötesi ışın vardır. Bunlar, kısa, uzun ve orta dalga kızılötesi ışınlardır. Aralarındaki temel fark radyasyonun işleme derinliğidir. Uzun dalgalar malzemenin sadece yüzeyini ısıtırken, kısa dalgalar malze-

menin içine kadar işler. Orta dalga kızılötesi ışınlar ise uzun ve kısa dalgaların işleyebildiği derinliğin ortalaması kadar bir derinliğe işleyebilir (Şekil 1). Kurutmada en avantajlı olan kısa dalga kızılötesi ışın olup, hızlı ve ekonomik kurutma yeteneğiyle bilinir (Kowalski ve Rajewsk, 2009; Riadh, 2017).



Şekil 1. Kızılötesi ışınların işleyebilme derinliği

Halojen kurutucular, bir çeşit kızılötesi kurutucular olup, kısa elektromanyetik dalga yaymaktadır. Isıtmayı sağlayan halojen lamba içerisinde, periyodik tablonun 7A grubunda bulunan ksenon, argon ve kripton gibi halojen gazlar bulunur. Halojen lamba yüksek verimli olup, tükettiği elektrik enerjisinin %90'ını kızılötesi ısıtmaya dönüştürür. Lamba içerisinde bulunan gaz ısı etkisi ile uyarılarak ışınması sağlanır. Halojen fırındaki kısa kızılötesi dalgaların havadaki kayıpları daha az olduğu için malzemeleri yüksek oranda ısıtabilmekte ve özellikle gıda maddelerinin pişirilmesi gibi amaçlar için kullanılmaktadır.

Endüstriyel hammaddelerin kurutulmasında, mikrodalga, halojen ve konvansiyonel elektrikli fırınlar çok fazla tercih edilmemekte ve bu fırınlar genellikle küçük kapasitelerde, daha çok gıda sektöründe meyve ve sebzelerin kurutulması için kullanılmaktadır. Mikrodalgaların insan sağlığı üzerine olumsuz etkisi ve madencilik sektöründeki yüksek tonajları karşılayamaması nedeni ile kullanımı kısıtlanmaktadır. Bu durumda, insan sağlığına zararlı etkisi daha az olan ve kapasiteleri kolaylıkla arttırılabilen halojen fırınlar madencilik sektörü için ümit vaat etmektedir. Halojen fırınlarda ısıtma bir çeşit elektromanyetik dalga olan kızılötesi yapılırken, konvansiyonel elektrikli fırınlarda rezistans önce havayı ısıtmakta ve daha sonra sıcak havanın cisimle teması sonucu cisim ısınmaktadır.

Bu çalışmada, en yüksek güç seviyesi 1000 Watt olan kızılötesi ışınımlı bir halojen fırın, konvansiyonel elektrikli fırın (rezistans ısıtmalı) ve güç seviyesi maksimum 700 Watt olan bir mikrodalga fırın kullanılmış ve bu fırında filtre keki ham manyezitler ayrı ayrı kurutulmuştur. Her üç fırının kurutma performansları; kurutma hızı, güç tüketimi ve yüzey sıcaklığı parametreleri ile ayrı ayrı tespit edilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Kurutma deneylerinde kullanılan “filtre keki ham manyezitler ($MgCO_3$)” Ege bölgesinde faaliyet gösteren bir manyezit işletmesinden temin edilmiştir. Yaş yöntemlerle zenginleştirilen manyezit minerali, son aşamada tikinerlere koyulaştırma amacıyla gönderilmekte ve oradan da filtrelere

beslenerek %46 nemli ürünler şeklinde kazanılmaktadır. Bu nem değerindeki ham manyezitin satışı mümkün olmadığı için, nem değerinin %5'lerin altına kadar indirilmesi gerekmektedir. %5 ve altındaki nem değerlerine ulaşmanın tek yolu termal işlem, yani kurutmadır. Ancak, ham manyezit 200 0C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kalsine olmaya başladığı için kurutma işlemi de kontrollü sıcaklıklarda yapılmalıdır. Bu bağlamda deneysel çalışmalarda kurutma sıcaklıkları 100, 150 ve 200 0C olarak belirlenmiş ve her kurutma işleminden sonra ürünlerin yüzey sıcaklıkları TFA marka infrared termometre ile ölçülmüştür. Numuneye uygulanan yaş elek analizi sonucunda, numunenin tamamının 38 mikronluk eleğin altına geçtiği görülmüştür. Kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Kurutma deneyleri 3 farklı ısıtma prensibi ile çalışan fırınlarda yapılmıştır. Her bir fırının maksimum gücü 1000 Watt ile sınırlıdır. Fırınlardan ilki konvansiyonel ısıtmalı rezistanslı elektrikli fırındır. İkinci fırın kızılötesi (infrared) ışın ile ısıtma yapan halojen fırın, üçüncüsü ise mikrodalga enerjisi ile ısıtma yapan mikrodalga fırındır. Bu fırınlarda, 250 gr'lık ham manyezit numuneleri 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 ve 36 dk kurutulduktan sonra tek tek tartılmış ve nem giderim değerleri hesaplanmıştır. Nem giderim değerleri (R_m ; %) aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır. Bu eşitlikte, M_f beslenen manyezitin nemi, M_d herhangi bir t zamanında kurutulmuş olan manyezitin nemidir.

$$R_m(\%) = \frac{[M_f - M_d]}{M_f} * 100 \quad (1)$$

Tablo 1. Manyezit keki kimyasal analizi

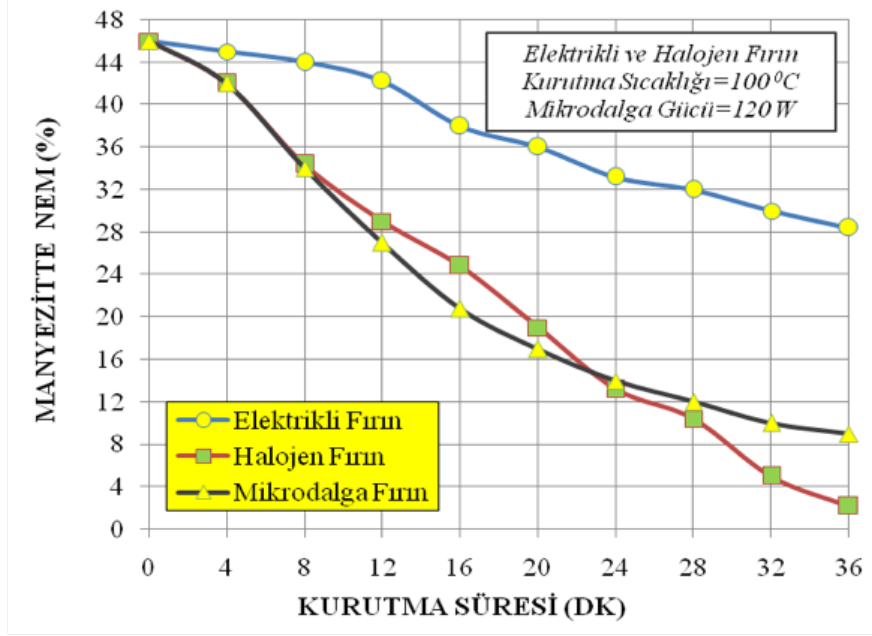
Analiz	İçerik
MgO	%52.0
SiO ₂	%2.3
Fe ₂ O ₃	%0.5
CaO	%1.5
Al ₂ O ₃	%0.2
Ateş Kaybı	%43.5

Fırın sıcaklıkları 100, 150 ve 200 0C olacak şekilde 3 farklı sıcaklık değerinde 250 gr'lık ham manyezit numuneleri ile kurutma deneyleri yapılmıştır. Mikrodalga fırında ise kurutma deneyleri 120, 400 ve 700 Watt güçlerde seçilmiştir. Elektrikli fırındaki rezistans ve halojen fırındaki lamba ile kurutulan ham manyezit arasındaki mesafe 10 cm olarak ayarlanmıştır. Daha yakın mesafelerde manyezit yüzeyinin hızlı ısınması nedeni ile kalsinasyon meydana gelmekte, daha uzak mesafelerde ise kurutma hızı düşmektedir. Son aşamada her üç fırın tipinin kurutma işlemi için harcadığı enerjiler karşılaştırılmıştır. Enerji tüketimlerinin ölçümünde REV marka enerji ölçer kullanılmıştır.

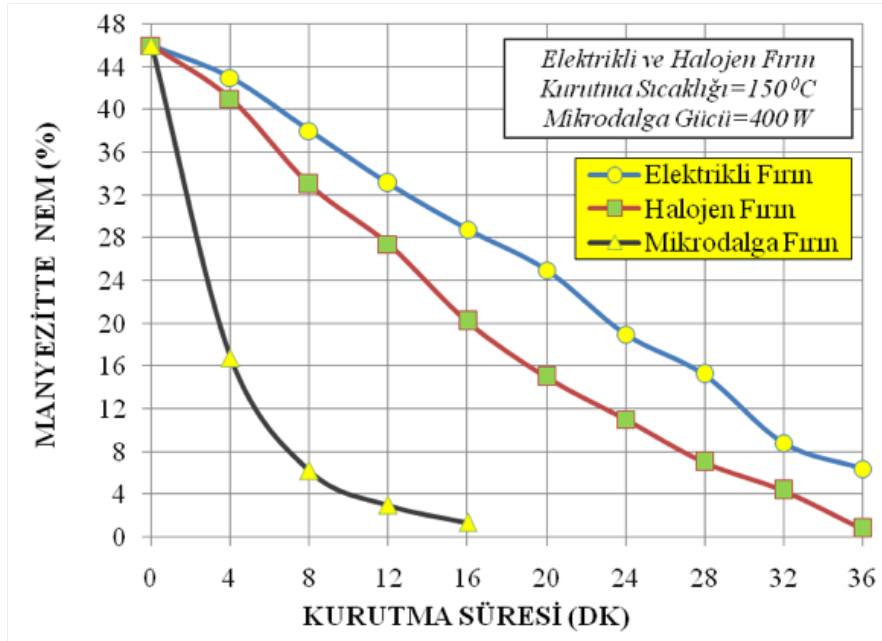
2.1 Elektrikli, Halojen ve Mikrodalga Fırında Kurutma Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Elektrikli ve halojen fırında; 100, 150 ve 200 0C'de ve mikrodalga fırında sırasıyla 120, 400 ve 700 Watt'ta yapılan kurutma deneylerinin sonucunda elde edilen ürünlerin kurutma süresine bağlı olarak nem içerik değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 2, 3 ve 4'de gösterilmiştir. Buna göre en kısa sürede kurutma yapan fırın sırasıyla mikrodalga, halojen ve elektrikli fırındır.

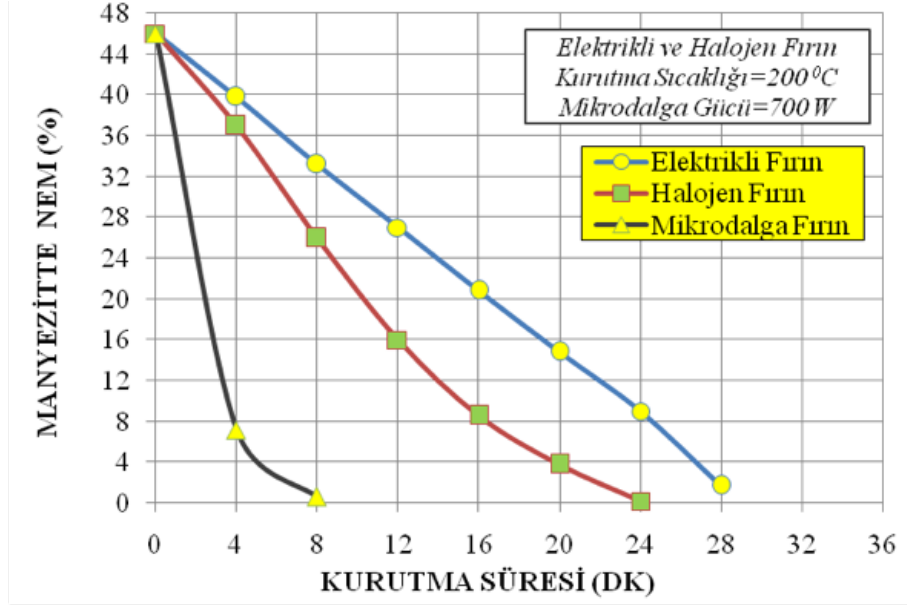
Elektrikli ve Halojen fırın için 200 0C'lik fırın sıcaklığında ve 700 Watt mikrodalga fırın gücünde kurutulan manyezitin neminin hemen hemen tamamı 8.dk'da mikrodalga fırında giderilmişken, 24'üncü dk'da halojen fırında ve 28'in üstündeki dakikalarda ise elektrikli fırında giderilmiştir. 100 0C'lik halojen fırında ve 120 Watt mikrodalga gücünde yapılan kurutma işleminde ise kurutma süreleri yaklaşık olarak benzer bulunmuştur. Her iki fırının kurutma hızı ise 100 0C'lik elektrikli fırına göre daha yüksektir.



Şekil 2. Elektrikli, halojen (100 0C) ve mikrodalga fırında (120 Watt) kurutma sonucu ürün nem içerikleri



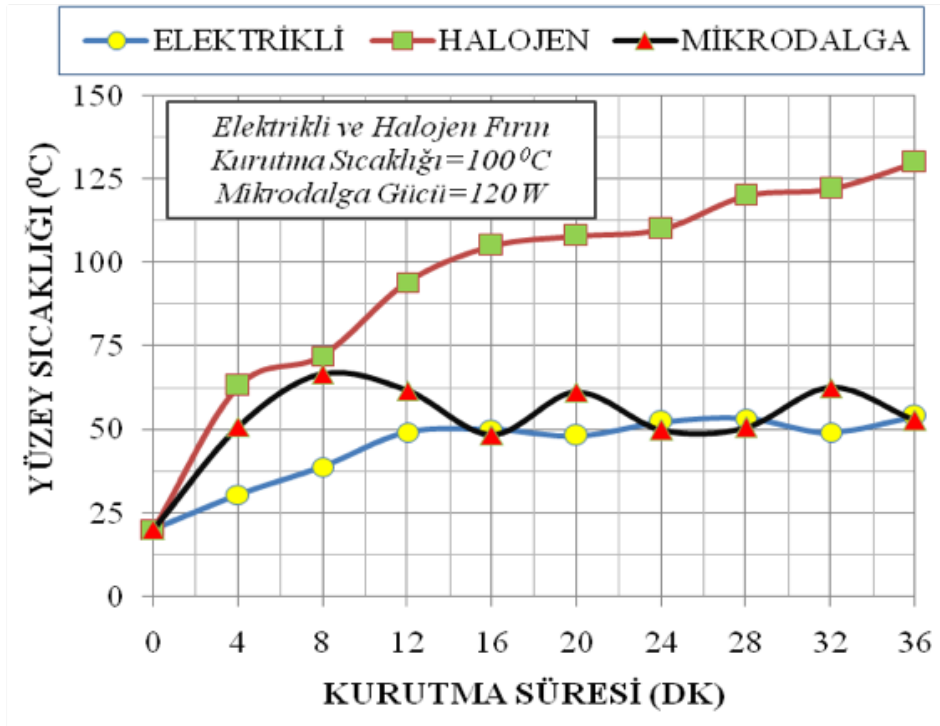
Şekil 3. Elektrikli, halojen (150 0C) ve mikrodalga fırında (400 Watt) kurutma sonucu ürün nem içerikleri



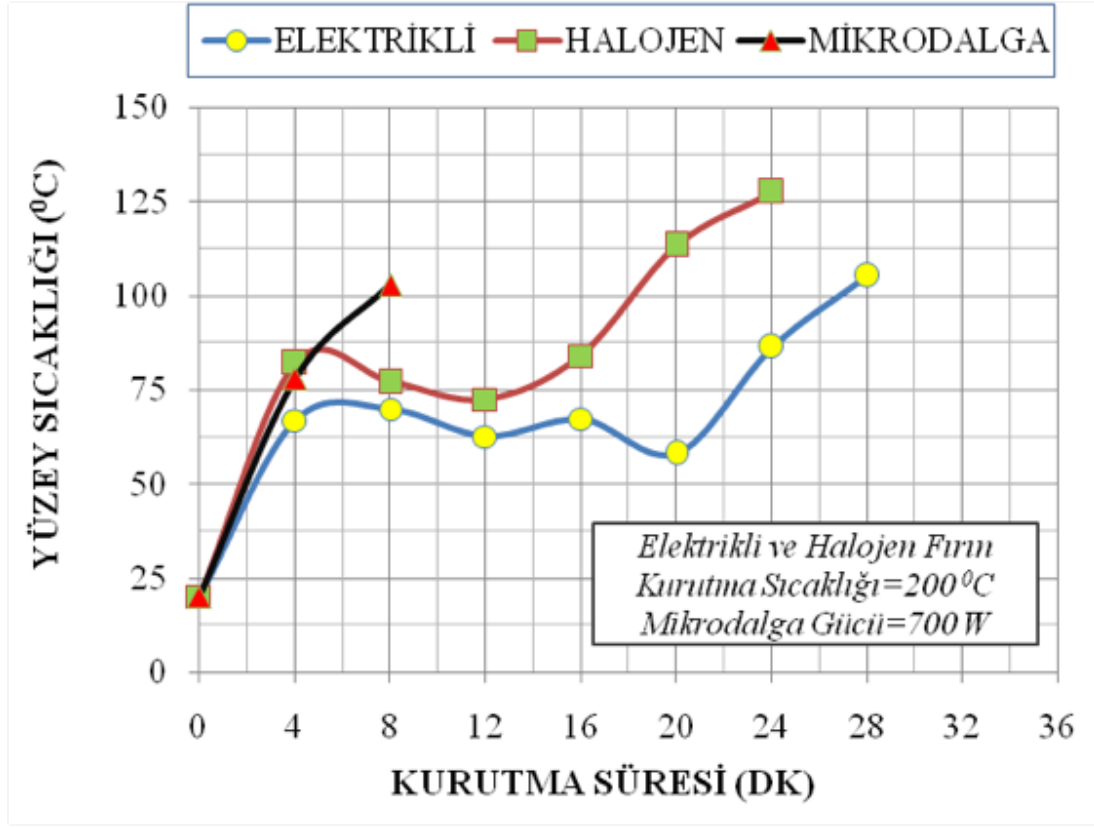
Şekil 4. Elektrikli, halojen (200 °C) ve mikrodalga fırında (700 Watt) kurutma sonucu ürün nem içerikleri

2.2 Kurutulmuş Manyezitlerin Yüzey Sıcaklıklarının Karşılaştırılması

Elektrikli, halojen ve mikrodalga fırında farklı sürelerde kurutulan ham manyezitlerin yüzey sıcaklıkları karşılaştırmalı olarak Şekil 5, 6 ve 7’de verilmiştir. Yüzey sıcaklığının belli bir değerin altında olması manyezitin kalsinasyonunu önlemek açısından büyük önem arz etmektedir. Bu sıcaklık değeri < 200 °C’dir. 200 °C’den yüksek sıcaklıklara maruz kalan kuru manyezitten CO₂ çıkışı meydana gelmekte ve zamanla ağırlık kaybı yaşanmaktadır.

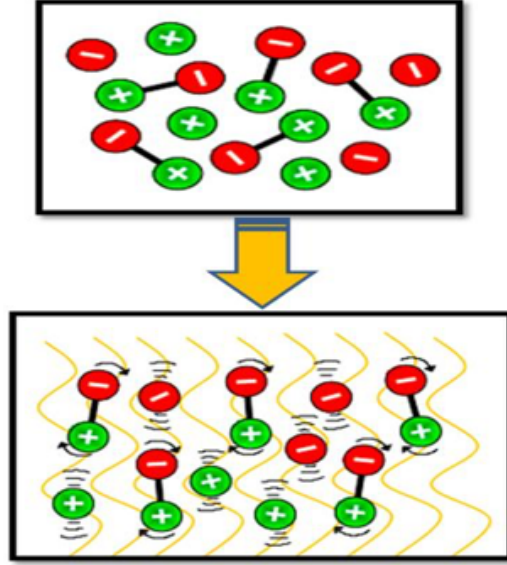


Şekil 5. Manyezitin yüzey sıcaklıkları (Elektrikli ve Halojen fırın için sıcaklık 100 0C ve 120 Watt mikrodalga gücü)



Şekil 6. Manyezitin yüzey sıcaklıkları (Elektrikli ve Halojen fırın için sıcaklık 150 0C ve 400 Watt mikrodalga gücü)

Şekil 5, 6 ve 7'den de görülebileceği gibi, halojen fırından elde edilen kurutulmuş ürünlerin yüzey sıcaklıkları diğer fırınlardan elde edilen ürünlerinkine göre daha yüksektir. Bu bakımdan halojen fırında kurtulan manyezitin elektrikli ve mikrodalga fırına göre daha kısa sürede kalsine olma ihtimali (özellikle ürünün yüzeyinde) bulunmaktadır. Öyle ki, 100°C'lik kurutma işleminde, 36 dk'nın sonunda ürün sıcaklığı halojen fırında 125 °C'nin üstüne çıkmıştır. Elektrikli ve mikrodalga fırında ise aynı süre sonunda ürün sıcaklığı 50 °C civarında kalmıştır. Nem giderim yüzdeleri de dikkate alındığında, genel olarak benzer nem giderim değerleri için ürün sıcaklığı en düşük olan kurutucu tipi mikrodalga fırındır. Öyle ki, Şekil 8'e göre; nemin tamamına yakının giderildiği durumda (mikrodalga, halojen ve elektrikli fırın için sırasıyla 8, 24 ve 28 dk'lık kurutma süresi sonunda), mikrodalga ürünün yüzey sıcaklığı 102.80, halojen fırınının 127.40, elektrikli fırının ise 105.10 bulunmuştur. Bunun muhtemel nedeni, mikrodalga enerjisinin özellikle su moleküllerini hedef alması ve malzemeden ziyade sadece su moleküllerini ısıtmış olmasıdır. Isınan ve buharlaşan su molekülleri daha sonra manyezit minerallerini az da olsa ısıtmıştır. Mikrodalga enerjisinin su moleküllerini titreştirerek ve döndürerek ısıtma mekanizması Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu mekanizmaya göre, mikrodalga ortamındaki polar su moleküllerinde ve sudaki iyonlarda önce dielektrik kayıplar (enerji kaybı) meydana gelmekte ve bu kayıplar daha sonra termal enerjiye dönüşerek suyun ısınmasını sağlamaktadır (Meda vd., 2017).

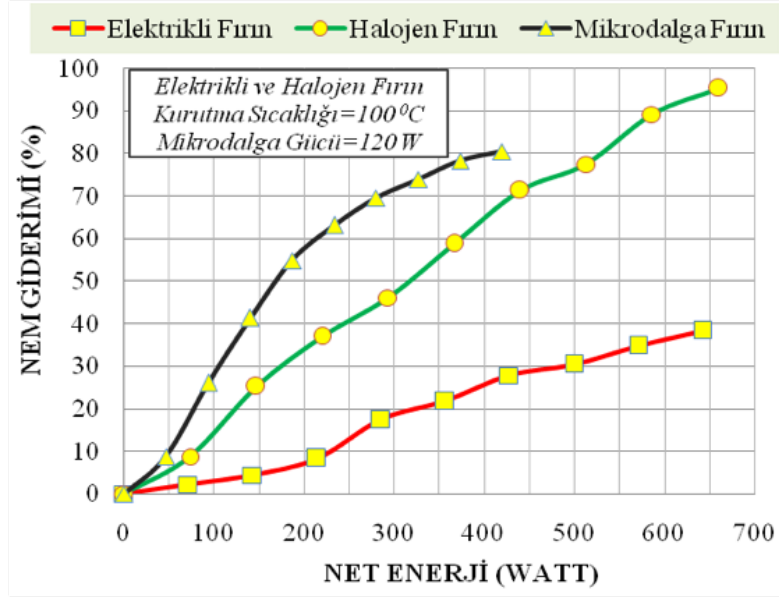


Şekil 8. Su molekülleri ve iyonlar; a) mikrodalgasız ortamda b) mikrodalgalı ortamda

2.3 Kurutma İşleminde Harcanan Enerjilerin Karşılaştırılması

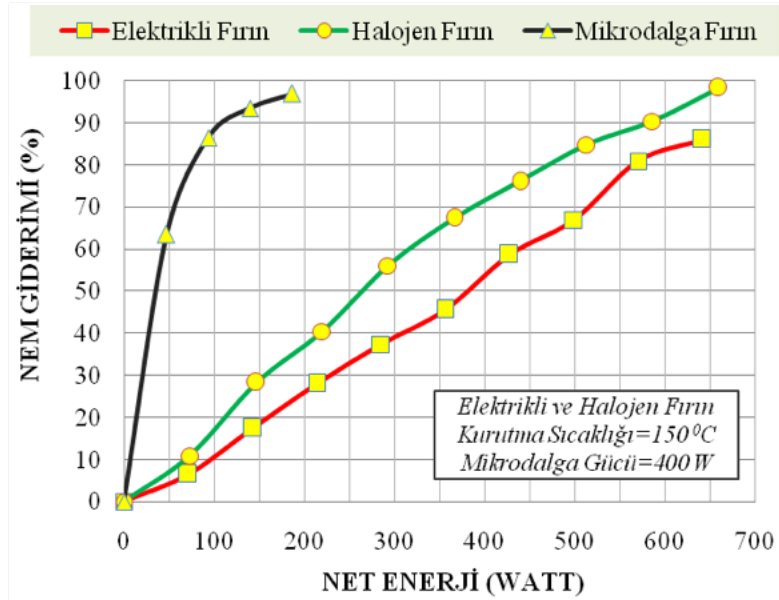
Elektrikli, halojen ve mikrodalga fırında nem giderimi için harcanan enerjinin tespiti amacıyla bir dizi deney yürütülmüştür. Enerji ölçümleri için, her bir fırının fişine ve aynı anda prize monte edilebilen REV marka bir enerji ölçer kullanılmıştır. Farklı kurutma süreleri için fırınların enerji tüketim değerleri hesaplanarak Şekil 9, 10 ve 11’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu sonuçlara göre, manyezitin kurutulmasında en az enerji harcayan fırın tipi mikrodalga fırındır. Halojen fırın tipi de elektrikli fırına göre daha az güç harcamıştır. Şekil 11’e göre, manyezitin neminin tamamının giderilmesi için mikrodalga fırında harcanması gereken net enerji miktarı 100 Watt iken, halojen fırında 450 Watt, elektrikli fırında ise 500 Watt’tır. Şekil 12’de, elektrikli, halojen ve mikrodalga fırında kurutulan manyezit numunelerinin fırın çıkışı görüntüleri gösterilmiştir. Bu ürünlerden de görülebileceği gibi, bazı numuneler mikro ve makro çatlaklı yapıda bazıları ise çatlamadan kalmıştır. Özellikle mikrodalga enerjisinin, içten dışa doğru ısıtma yapması neticesinde iç su buhar basıncı manyezit numunelerinin çatlamasına neden olmuştur. Mikrodalga enerjisi dış yüzeyi ısıtmadan direk malzeme içerisindeki su moleküllerini hedef almakta ve onları titreştirerek önce ısınmasını daha sonra buharlaşarak numuneden uzaklaşmasını sağlamaktadır. Bu durum mikrodalga enerjili kurutmada ürünün çatlaklı yapıda olmasına neden olmaktadır. Literatürdeki pek çok çalışmada, mikrodalga enerjisi malzemeleri çatlatmak için kullanılmakta ve öğütme aşamasında malzemelerin daha kolay ufalanmasını sağlayarak enerji tüketiminin azaltılmasına yardımcı olmaktadır (Sahoo ve Meikap, 2011; Samanlı, 2011; Hacıfazlıoğlu, 2017).

Konvansiyonel elektrikli fırından alınan ürünlerde mikro ve makro çatlaklar gözlemlenmemiştir. Bu kurutma sisteminde, önce hava ısınmakta ve ardından hava ile temas eden numune yüzeyi yavaş yavaş ısınmaya başlamaktadır. Daha sonra termodinamiğin ikinci yasası gereğince ısı numunenin içine doğru yavaş yavaş ilerlemektedir. Bu sayede düzenli bir ısıtma sağlanmakta ve yüzeyde çatlaklar meydana gelmemektedir.

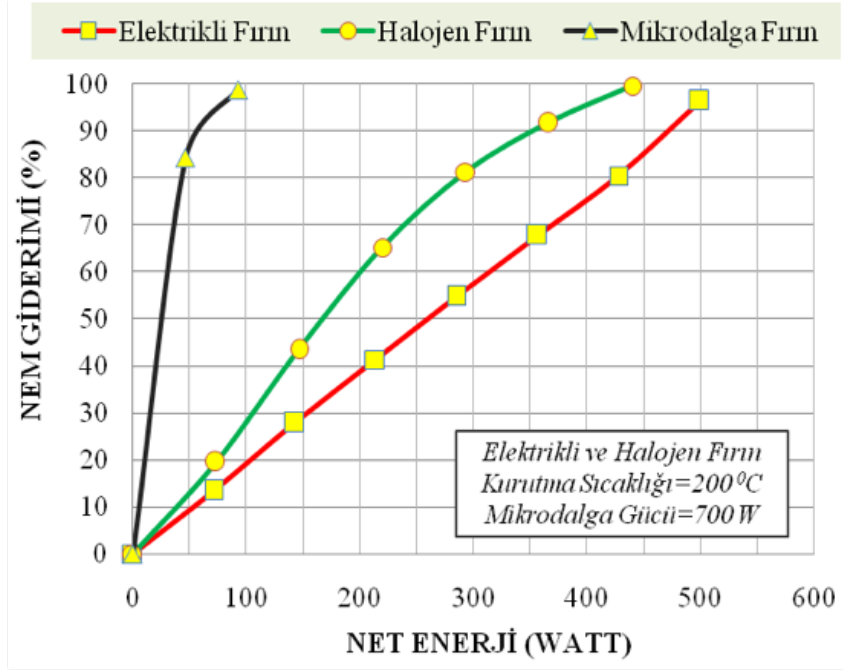


Şekil 9. Elektrikli, halojen ve mikrodalga fırında nem giderim yüzdesine bağlı olarak net enerji tüketimleri (Mikrodalga gücü 120Watt, Elektrikli ve Halojen fırın için sıcaklık 100 °C)

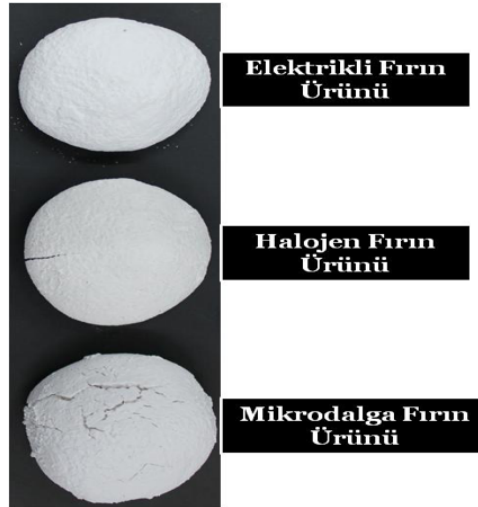
Halojen fırında kızılötesi ışınlar önce numune yüzeyine çarpmakta ve yüzeyi hızla ısıtmaktadır. Isınan yüzeyle birlikte su molekülleri de ısınmakta ve buharlaşarak malzemeyi terk etmektedir. Hızlı yüzey ısınması yüzeyi çatlatabilmektedir. Ayrıca ışınların bir bölümü malzeme içerisine işlemekte, bir bölümü ise yansımaktadır. Dolayısıyla, halojen fırında hem dıştan hem de içten ısıtma söz konusudur. Bu durum iç ve dış buhar basınçlarında bir denge oluşturmakta ve numunede çatlama mikrodalga enerjisine göre daha az görülmektedir.



Şekil 10. Elektrikli, halojen ve mikrodalga fırında nem giderim yüzdesine bağlı olarak net enerji tüketimleri (Mikrodalga gücü 400Watt, Elektrikli ve Halojen fırın için sıcaklık 150 °C)



Şekil 11. Elektrikli, halojen ve mikrodalga fırında nem giderim yüzdesine bağlı olarak net enerji tüketimleri (Mikrodalga gücü 700 Watt, Elektrikli ve Halojen fırın için sıcaklık 200 °C)



Şekil 12. Farklı fırınlarda kurutulmuş olan manyezitlerin fırın çıkışı görüntüleri

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ham manyezitlerin piyasada kendine yer bulabilmesi için belli bir nem değerinde olması gerekir. Bu nem değeri genellikle %5'in altındadır. Ancak bazı kullanım alanlarında ham manyezitlerdeki nem içeriğinin %1'den de düşük olması istenmektedir. Yıkama tesislerinden çıkan ham manyezitlerin nemi tane boyutuna bağlı olarak %20 ile %50 oranlarında nem içerebilmektedir. Manyezitlerin tane boyutları incelidikçe artan toplam yüzey alanları nedeniyle nem tutma kapasiteleri de artmaktadır. Bu çalışmada kullanılan ham manyezit numunesi yıkama tesisi sonrası tikiner alt akımından alınmış olan, -38 mikron tane boyutlu ve %46 nemli bir üründür. Bu manyezit numunesinin neminin hemen hemen tamamının giderimi için klasik elektrikli (rezistanslı) fırında, halojen fırında ve mikrodalga fırında farklı sıcaklıklarda ve farklı kurutma

sürelerinde deneyler yapılmış ve aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

- En hızlı kurutma yapan fırın mikrodalga fırındır. 700 Watt mikrodalga gücünde 8 dk sonunda nem %1'in altına düşmüştür.
- En fazla güç tüketen fırın klasik rezistanslı elektrikli fırındır. Elektrikli fırında manyezitteki nemin %1'in altına düşürülebilmesi için gerekli olan net enerji miktarı 500 Watt'ın üstündedir. Halojen fırında 400-500 Watt arasında, mikrodalga fırında ise 100-450 Watt arasındadır.
- Kurutulmuş ürün yüzey sıcaklığı en yüksek olan fırın tipi halojen fırındır. En düşük yüzey sıcaklıkları ise mikrodalga fırınla elde edilmiştir.
- Mikrodalga fırınların hem enerji tüketimleri hem de kurutma süreleri oldukça kısadır. Ancak, mikrodalgaların insan sağlığı üzerine olumsuz etkileri ve endüstriyel ölçeklerde yüksek kapasiteleri karşılayamaması ve uygulamasının zor olması nedeniyle kullanım alanları kısıtlı kalmıştır. Bu bakımdan, mikrodalgalar endüstriyel ölçekte genellikle daha küçük kapasitelerde gıda hammaddelerinin (meyve, sebze vb.) kurutulması için tercih edilmektedir. Yine bu çalışmanın bir sonucu olarak görülmüştür ki; halojen fırınlar klasik ısıtmalı fırınlara göre daha düşük enerji harcamakta ve daha kısa sürelerde kurutma yapabilmektedir. Bu nedenle halojen fırın, kısa kurutma süresi ve düşük enerji tüketimleri nedeni ile maden ürünlerinin kurutulmasında tavsiye edilebilecek bir kurutucu tipidir. Konvansiyonel elektrikli fırına göre en az %15 daha kısa sürede kurutma yapmakta ve en az %10 daha az enerji harcamaktadır. Ayrıca ilk yatırım maliyetinin düşük olması ve mikrodalga fırınlar gibi insan sağlığını olumsuz etkilememesi diğer avantajlarıdır. Kızılötesi kurutucunun bir diğer avantajı ise çok kısa sürede 500 °C'lik bir lamba sıcaklığına 7-8 saniye gibi çok kısa sürede çıkabilmesidir.

KAYNAKLAR

Aktaş, M., İlbaş, M., Yalçın, A., Şahin, M. 2013. Kızılötesi ışınımlı bir kurutucuda kurutma davranışlarının deneysel incelenmesi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (4), 767-775.

İpekoğlu, Ü., Polat, H., 2014. Susuzlandırma, Cevher Hazırlama El Kitabı, YMGV Yayını, Bölüm 16, 335-370.

Hacıfazlıoğlu, 2017. Comparison of Efficiencies of Microwave and Conventional Electric Ovens in the Drying of Slime-Coal Agglomerates", International Journal of Coal Preparation and Utilization, 37, 169-178.

Karthikeyan, M., Zhonghua, W. , Mujumdar A.S., 2009. Low-Rank Coal Drying Technologies—Current Status and New Developments, Drying Technology, 27, 403–415.

Kowalski S. J. And Rajewska, K. 2009. Convective Drying Enhanced with Microwave and Infrared Radiation, Drying Technology, 27:7-8, 878-887.

Meda, V., Orsat, V., Raghavan, V. 2017. Microwave heating and the dielectric properties of foods, The Microwave Processing of Foods (Second Edition) A volume in Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 23–43.

Riadh, M.H., Siti Anom Binti Ahmad, Mohd Hamiruce Marhaban & Azura Che Soh, 2015. Infrared Heating in Food Drying: An Overview, Drying Technology, 33:3, 322-335.

Samanlı, S., 2011. A comparison of the results obtained from grinding in a stirred media mill lignite coal samples treated with microwave and untreated samples, *Fuel*, 90 (2), 659-664.

Sahoo, B.K., De, S. ve Meikap, B.C., 2011. Improvement of grinding characteristics of indian coal by microwave pre-treatment, *Fuel Processing Technology*, 92 (10), pp.1920-1928.

Yıldız, N. 2014, *Cevher Hazırlama ve Zenginleřtirme*, 2.Cilt, Ertem Basım Ltd. şti. Ankara.