

## SİLİS KUMUNUN ZENGİNLEŞTİRİLMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER VE FLOTASYON İLE MANYETİK AYIRMA YÖNTEMLERİNİN DEMİR GİDERİMİ BAKIMINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

*Methods Used in the Beneficiation of Silica Sand and Comparison of Flotation and Magnetic Separation in Terms of Iron Removal*

Hasan HACİFAZLIOĞLU (\*)

### ÖZET

Silis kumu, ana bileşen olarak başlıca kuvarstan ( $\text{SiO}_2$ ) ve az miktarda kil, demir oksit ve kireçten oluşur. Genellikle cam kumu üretiminde kullanılan silis kumunun kil ve demir içeriğinin belli bir değerin altında olması istenir. Bu bakımdan silis kumundan demirli bileşiklerin ve diğer safsızlıkların giderilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada, silis kumunun zenginleştirilmesi için kullanılabilecek alternatif yöntemler sunulmuş ve endüstriyel uygulamalarından bahsedilmiştir. Ayrıca, deneysel çalışmalarda Çatalca yöresi silis kumları flotasyon ve manyetik ayırma yöntemleri ile ayrı ayrı zenginleştirilmiş ve her iki yöntemin verimlilikleri analiz edilmiştir. Deney sonuçlarından, manyetik ayırmanın flotasyona alternatif olarak kullanılabileceği görülmüştür. Manyetik ayırıcı, silis kumundaki demir içeriğini %0.41'den %0.06'a düşürmüşken, flotasyon yöntemi demir içeriğini %0.08'e düşürmüştür. Bu bağlamda, silis kumunun saflaştırılmasında hem literatür hem de deney verileri dikkate alındığında alternatif yöntemlerin uygulanabileceği açıkça ortaya konmuştur. Özellikle çevresel hassasiyetlerin artmasıyla birlikte kimyasal kullanımını gerektiren proseslerin (liç ve flotasyon gibi) kısıtlanması alternatif zenginleştirme yöntemlerinin önemini daha da arttırmaktadır.

**Anahtar Sözcükler:** Silis kumu, kuvars, zenginleştirme, demir giderimi, flotasyon, manyetik ayırma

### ABSTRACT

Silica sand consists of mainly quartz ( $\text{SiO}_2$ ) as the main constituent and low amount of clay, iron oxide and lime. Clay and iron content of the silica sand which is generally used in glass sand production is desired to be under a certain value. In this respect, there are various methods to remove iron compounds and other impurities from silica sand. This study presents alternative methods for silica sand beneficiation and explains industrial applications. In addition, silica sand of Çatalca locality was individually beneficiated using flotation and magnetic separation methods and the efficiency of two methods were analyzed. Experiment results revealed that magnetic separation could be used as an alternative to flotation. Magnetic separation reduced iron content of silica sand from 0.41% to 0.06 while flotation method reduced iron content to 0.08%. In this respect, based on literature data and experimental data on silica sand purification, the applicability of alternative methods was indicated. Particularly, the processes which require the use of chemicals due to increased environmental sensitivity (such as leaching and flotation) increase the importance of alternative beneficiation methods.

**Keywords:** Silica sand, quartz, beneficiation, iron removal, flotation, magnetic separation

(\*) Yrd. Doç. Dr., İstanbul Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., Avcılar-İSTANBUL, hasanh@istanbul.edu.tr

## 1.GİRİŞ

Silis kumu ya da bir diğer adıyla kuvars kumunun ana elementi olan silisyum (Si), yeryüzünde en çok bulunan elementlerden biridir. Diyamanyetik (manyetik olmayan) özelliğe sahip olan bu elementin atom numarası 14, yoğunluğu 2.33 gr/cm<sup>3</sup>'dür. Silisyum doğada silikat asidi veya tuzları halinde bulunmaktadır. Silisyum oksit doğada kum formunda, kuvarsit veya kuvars (SiO<sub>2</sub>) şeklinde bulunabilmektedir. Silis kumu ya da kuvars minerali yalnızca HF asidi ile çözünür.

Camın ana maddesi olan silis kumu, kuvarşça zengin magmatik, metamorfik kayaçların ayrışması sonucu oluşan 2 mm'den küçük kuvars tanecikleridir. Renksiz veya açık beyaz renklidir ve demir oksit içeriyorsa, renkleri pembeden kızıla veya kahverengine kadar değişir. Silis kumunda az miktarda bulunan ve istenmeyen safsızlıkları (imprüteleri) oluşturan maddeler kil, silt, feldispat, karbonatlı bileşikler, demir ve titanyum oksitlerdir. Bu bakımdan silis kumları çoğu zaman kullanım amacına göre; gerek fiziksel gerekse kimyasal açıdan istenen özelliklere getirilebilmeleri için çeşitli cevher hazırlama işlemlerine tabi tutulurlar. Silis kumları içeriğindeki safsızlıklara ve tane boyutuna bağlı olarak; cam, çimento, deterjan, plastik, seramik, elektronik, boya, döküm ve metalürji sanayilerinde kullanılabilir. Örneğin; Türkiye'de cam sanayisinde kullanılan silis kumlarında Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği üretilen camın kalitesine bağlı olarak %0.01 ile %0.10 arasında değişmekte iken, döküm sanayisinde Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı %0.6'ya kadar çıkabilmektedir (DPT,2001).

Silis kumunun endüstriyel olarak farklı sektörlerdeki kullanımını ve pazarını belirleyen en önemli kısıtlayıcı faktör demir ve titan içeriğidir. Bu bakımdan düz cam ve züccaciye sanayisinde hammadde olarak kullanılan silis kumları düşük oranlarda demir ve titan gibi safsızlıklar içerebilir. Silis kumundaki demir içeriği belirli bir miktardan fazla olduğu zaman cam üretim sırasında Fe<sup>++</sup> iyonları cama mavimsi, Fe<sup>+++</sup> iyonları ise sarımsı yeşil renk vermektedir (Tülümen, 1985; Bayat vd.,2004). Cam üretiminde beyazlık indeksi değeri bir sınıflama faktörü olup kullanılan kuvars hammaddesinin demir içeriği beyazlık indeksi değerini belirleyen en önemli parametredir (Styriakova vd., 2003). Saflaştırılmış kuvars geniş uygulama alanına sahiptir. Düşük demir içeriğine sahip olan kuvarslar (<350 ppm Fe)

genel olarak cam üretimi için uygundur (Banza vd., 2006). Fakat optik ve özel cam uygulamaları ve elektronik sanayisinde kullanılan kuvarsların demir içeriği 10 ppm'in altında, fiber optik uygulamalarında ise 1 ppm (%0.0001)'in altında olmalıdır (Akçıl vd.,2007).

Silis kumları içerisinde safsızlık olarak bulunan kil ve demirli bileşikler uzaklaştırmak için çok çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden bir bölümü fiziksel ayırma esasına dayanırken diğer bir bölümü fizikokimyasal, kimyasal ve biyolojik yöntemlere dayanmaktadır. Literatürde bilenen en önemli fiziksel zenginleştirme yöntemleri *dağıtma ve sınıflandırma, gravite esaslı ayırma, manyetik ve elektrostatik ayırma* yöntemleridir. *Köpük flotasyonu* fizikokimyasal bir yöntem olup, çeşitli toplayıcı ve köpürtücü reaktifler ile fiziksel olarak ayırım gerçekleştirilmektedir. *Kimyasal yöntemlerde*, organik ve inorganik asitler kullanılarak liç (özütme) yapılmakta ve demirli bileşikler çözeltiye alınarak ayırım gerçekleştirilmektedir. *Biyolojik yöntemlerde* ise bazı bakteri ve mantar türü (*Aspergillus niger*) mikroorganizmalar kullanılmakta ve bu canlıların oluşturduğu organik asitlerle demirli bileşikler ya da ağır mineraller çözeltiye alınmaktadır. Bu makale kapsamında, alternatif silis kumu zenginleştirme/saflaştırma yöntemleri tanıtılacak ve silis kumunun zenginleştirilmesi için manyetik ayırma ve flotasyon yöntemlerinin demir giderimi bakımından verimlilikleri karşılaştırılacaktır.

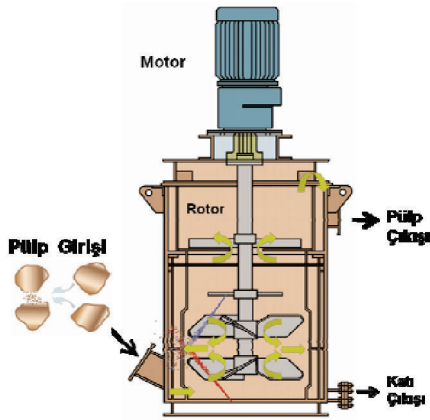
## 2. SİLİS KUMU ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Ocaklardan üretilen tüvenan silis kumlarının zenginleştirilmesinde uygulanacak yöntemin seçiminden önce, gerek cevherin gerekse cevherdeki safsızlıkların fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin iyi saptanması gerekir. Cevherdeki mineral türlerine göre uygun bir yöntem seçilerek silis kumları verimli bir şekilde zenginleştirilebilmektedir. Tüvenan cevher özelliklerine bağlı olarak uygulanabilecek zenginleştirme yöntemleri aşağıda özetlenmiştir.

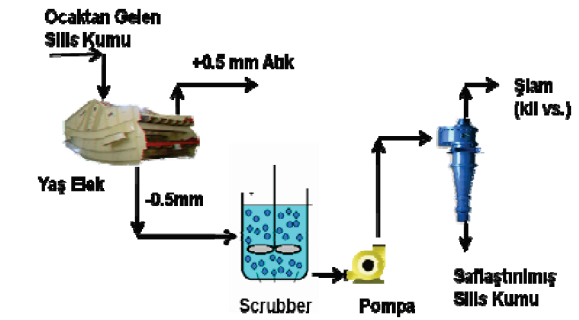
### 2.1 Dağıtma ve Boyuta Göre Sınıflandırma ile Zenginleştirme (Şlam Uzaklaştırma)

Silis kumunun yüksek miktarda kil, mil ve silt içermesi durumunda ince boyutlu malzemenin (şlamı oluşturan karışımın) mineral yüzeyinden

serbest hale getirilmesi (dağıtma) ve ardından sınıflandırma ile kumdan uzaklaştırılması fiziksel bir zenginleştirme yöntemidir. Pek çok uygulamada “şlam” diye tabir edilen çok ince boyutlu (~20 µm) malzemenin uzaklaştırılması ile silis kumunda bir dereceye kadar iyileşme sağlanabilmektedir. Özellikle kirlenici olarak killerin (alümina silikatların) bulunduğu ve demirli bileşiklerin çok az olduğu cevherlerin zenginleştirilmesinde bu yöntem yüksek kaliteli silis kumu eldesi için yeterli olmaktadır. Bu yöntemde dağıtma işlemi, Scrubber denen yüksek devirli (>1500 dev./dk) karıştırıcı tanklarla (*attrition tank*) yapılmaktadır. Scrubber (Şekil 1) metalden yapılmış bir tank ve içerisine dik inen rotora bağlı pervaneli karıştırıcıdan oluşur. Pervane mili bir elektrik motoru ile yüksek devirde tahrik edilir. Bu esnada kum taneleri birbirlerine sürtünerek üzerlerine yapışmış olan kilin dağılmasını ve silis üzerindeki demir oksit tabakasının kırılmasını sağlar. Daha sonra dağılmış katı içerikli pülp, tankın üst taşarından alınarak bir sınıflandırma aygıtına (hidrosiklon, spiral klasifikatör, elek vs.) gönderilir. Sınıflandırma aygıtında silis kumundan şlam (çok ince boyutlu kil ve demir oksitler) uzaklaştırılarak zenginleştirme işlemi tamamlanmış olur. Böyle bir silis zenginleştirme yönteminin akım şeması



pülpün vizkozitesi çok yükseleceği için karıştırıcı pülpü/taneleri yeterince hareketlendiremeyecek ve dolayısıyla tanecik-tanecik teması yine azalacak ve dağıtma işlemi verimsiz olacaktır. Ayrıca, yüksek katı oranlarında daha büyük motorların kullanılacağı da göz önüne alınırsa katı oranının optimum değerinde seçilmesi gerek enerji gerekse dağıtma verimliliği açısından önemlidir. Optimum koşullarda 2.60 m<sup>3</sup> hacimli (2x1.5x1.5m) bir Scrubber'da 37 kW gücünde bir motor yeterli olmaktadır (Outotec,2011).



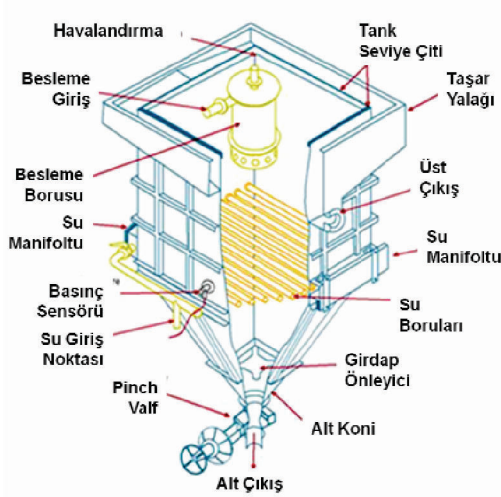
Şekil 2. Silis kumunun dağıtma ve sınıflandırma ile zenginleştirilmesine ait akım şeması.

Silis kumundaki kil dağıtıldıktan sonra, Şekil 2'den de görülebileceği gibi bir santrifuj pompa ile belli bir basınçta (1-1.5 bar) hidrosiklona beslenmektedir. Bu aşamada bir pompanın kullanılması tesisin enerji maliyetini arttırmakta ve hidrosiklondaki yüksek çalışma basınçları apekslerin hızlı aşınmasına neden olmaktadır. Silis kumunun yüksek derecede abrasif olması nedeniyle tesislerde genellikle pompalar ve hidrosiklonlarda erken aşınma problemleri meydana gelmektedir. Silis zenginleştirme tesislerinde ortalama 3-4 ayda bir pompa fanları ve birkaç ayda bir hidrosiklon apeksleri değiştirilmektedir. Bu nedenle, son zamanlarda tesislerde aşınmayı önleyici tedbirler alınmış; lastik, kauçuk, poliüretan ve seramik kaplı pompa ve hidrosiklonlar tercih edilir duruma gelmiştir. Yine de günümüzde aşınmaya dayanıklı pompa ve hidrosiklon ünitesi yerini hidrolik sınıflandırıcı (hidrosizer) ve yüksek frekanslı katlı eleklerle bırakma eğilimindedir. Silis kumu üretim tesislerinde boyutlandırma ve zenginleştirme amacıyla kullanılan ileri teknoloji bir hidrolik sınıflandırıcı Floatex DS Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu sınıflandırıcıda, besleme üst kısımdan pompa ile teğetsel olarak yapılırken altta bulunan ince borulardan su verilmektedir. Burada verilen su belli bir basınçta ve belli bir

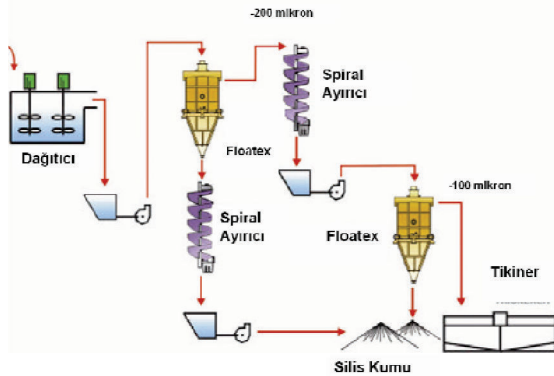
Şekil 2'de verilmiştir.

Etkili bir zenginleştirme işleminde scrubber'lara beslenen pülpün katı içeriği en az %72 en fazla %75 olmalıdır. %72'in altındaki katı oranlarında silis kumları arasındaki uzaklık artacağı için daha az tanecik-tanecik teması gerçekleşecek ve bu durumda tanecikler arasındaki sürtünme kuvveti azalacağı için dağıtma işlemi verimsiz olacaktır. Benzer şekilde, %75'in üzerindeki katı oranlarında

debide olmalı ve hassas ayarlanmalıdır. Suyun kaldırma kuvvetinin etkisi ile tane boyutu küçük ve hafif olan mineraller üstten taşarken yoğunluğu ve tane boyutu büyük olan mineraller alt akımdan alınmaktadır. Ayırma işlemi, beslenen pülp, verilen su, su basıncı ve alt akımdan alınan katı miktarı ile kontrol edilmektedir. Floatex sınıflandırıcılar 0.2-18m<sup>3</sup> hacimli olarak üretilmekte ve 75-800 mikron aralığındaki taneleri sınıflandırabilmektedir. Tek hücrenin kapasitesi saatte 300 tona kadar çıkabilmektedir (Yıldız, 2007). Floatex ayırıcısı günümüzde silis kumu-mika ayırımında ve şlam uzaklaştırma işlemlerinde hidrosiklonlara alternatif olarak kullanılabilir (Venkatraman vd., 2000). Floatex ayırıcısının sınıflandırma ve şlam uzaklaştırma uygulaması Şekil 4'de verilmiştir.

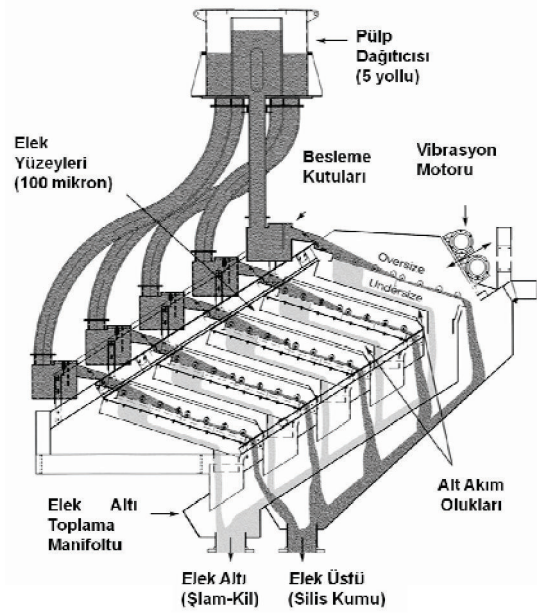


Şekil 3. Hidrolik sınıflandırıcı, Floatex DS.



Şekil 4. Floatex ile sınıflandırma ve şlam uzaklaştırma

Hidrosiklonlara alternatif olarak kullanılabilir bir diğer yeni teknoloji şlam uzaklaştırma cihazı çok katlı yüksek frekanslı titreşimli eleklerdir. Şekil 5'de ticari adı *Derrick Stack Sizer* olan ve kil-kuvars kumu ayırımında kullanılan ileri teknoloji bir elek gösterilmiştir. Elek, çok düşük genlik (2-10mm) ve yüksek bir titreşim frekansı (>1500 rpm) çalışmaktadır. Besleme manifold sistemi ile 5 farklı noktadan yapıldığı için kapasiteleri saatte 250 tona kadar çıkabilmektedir. Elek yüzeyleri aşınmaya dayanıklı poliüretan malzemeden imal edilmekte olup 20 meşe (75 mikron) kadar efektif yaş eleme yaparak silis kumlarından kili uzaklaştırabilmektedir (Clark, 2007).



Şekil 5. Çoklu beslemeli yüksek frekanslı titreşimli elek, Derrick Stack-Sizer.

## 2.2 Gravite Yöntemleri ile Zenginleştirme

Gravite (yoğunluk farkı) ile zenginleştirme yönteminde mineraller arasındaki özgül ağırlık farklılığından faydalanılır. Tam serbestleşmenin sağlanması koşulu ile, özgül ağırlık farklılığına dayalı olan bu yöntemde öncelikle konsantrasyon kriteri dikkate alınır. Daha sonra kullanılan gravite ayırıcısının türüne bağlı olarak belli bir yoğunluk farklılığının olması istenir. Bu farklılığın büyüklük değeri ayırma cihazının tipine göre değişiklik göstermektedir. Örneğin, sallantılı masalara beslenen kuvars kumu ile gang mineralleri arasında en az 1.0 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluk farklılığı olması gerekirken, spiral ayırıcılardaki



yoğunluk farklılığı 0.5 gr/cm<sup>3</sup> aralığına kadar düşebilmektedir. Kuvars kumu ve içerisinde bulunabilecek muhtemel gang mineralleri yoğunlukları ile birlikte Çizelge 1'de verilmiştir (Yıldız, 2007; Outotec, 2011). Çizelge 1'deki yoğunluk değerlerine göre, kuvars kumlarından spiral ve sallantılı masalarla pek çok mineralin giderilebileceği açıkça görülmektedir.

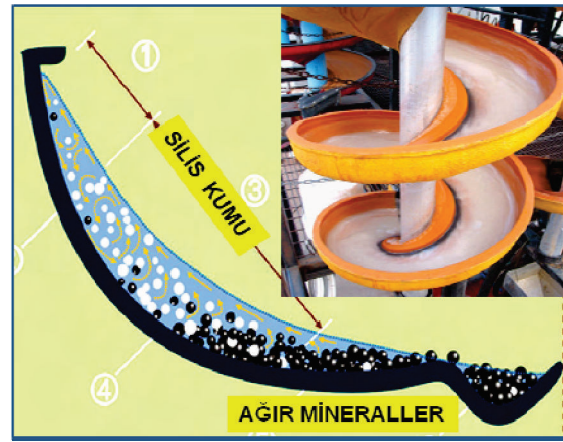
Önceleri kuvars kumlarının zenginleştirilmesinde en yaygın olarak kullanılan yöntem sallantılı masalardı. Ancak gerek kapasite düşüklüğü, gerek kapladığı alan ve gerekse ayırma hassasiyetinin düşüklüğü nedeniyle günümüzde masaların kullanımı oldukça azaltılmıştır. Ayrıca sallantılı masalar belirli bir tane boyutu fraksiyonu için etkin ayırım yapabilmektedir. Örneğin tane boyutunun —48+150 mesh (-300+106 µm) arasında ve ağır mineral ile hafif mineralin yoğunluk farkının en az 1.75 g/cm<sup>3</sup> olması gerekmektedir. 150 mesh tane boyutunun altındaki silis kumunu zenginleştirmek için şlam masaları kullanılabilir ise de, verim açısından pek tatmin edici olmamaktadır (Köse ve Türel, 1986). Al-Maghrabi (2004) tarafından yapılan bir çalışmada, düşük kaliteli Arabistan silis kumlarından hematit minerali Wilfley sallantılı masası ile %0.60'dan %0.30'a kadar düşürülmüştür.

Çizelge 1. Kuvars kumundaki çeşitli kirlenici gang mineralleri ve özgül ağırlıkları.

Mineral	Kimyasal Yapı	Özgül Ağırlık gr/cm <sup>3</sup>
Kuvars	SiO <sub>2</sub>	2.65
İlmenit	FeTiO <sub>2</sub>	4.70
Magnetit	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5.20
Hematit	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.26
Anduluzit	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .SiO <sub>2</sub>	3.20
Sillimanit	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .SiO <sub>2</sub>	3.20
Muskovit	(H,K)AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	2.80

Günümüzde sallantılı masaların yerini daha yüksek kapasiteli ve daha düşük yoğunluk farklarında (~0.5 gr/cm<sup>3</sup>) bile etkin ayırma yapabilen spiral ayırıcılar almıştır. Outokumpu tarafından geliştirilen Carpc Model LC3700 spiral ayırıcısı ile silis kumlarından demirli gang mineralleri yüksek verimlilikle ayrılabilir (Şekil 6). Endüstriyel ölçekte uygulanan tek kademeli bir spiral ile Meksika silis kumlarındaki Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği %0.10'dan %0.055'e düşürülmüştür (Hearn and Sadowski, 2011). Başka bir çalışmada ise spiral ayırıcı tek kademede Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğini %0.066'ya, daha

sonra temizleme kademesinin uygulanması durumunda %0.049'a kadar düşürmüştür. Aynı çalışmada silis kumunun kurutulup manyetik ayırıcıdan geçirilmesi durumunda ise Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği %0.032'ye düşmüştür (Outotec, 2011). Diğer taraftan, spiral ayırıcı kullanılarak kuvars ile yakın yoğunluklu refrakter ağır minerallerin (kromit vb) ve mika minerallerinin bulunduğu silis kumlarından gang mineralleri büyük ölçüde giderilebilmektedir. Besleme mika içeriği %23.2 olan silis kumundan tek kademeli kaba zenginleştirme ile mika %11.5'e düşürülmüştür. Birinci ve ikinci temizleme kademelerinin uygulanması ile mika içeriği sırasıyla %11.5 ve %9.5'e düşmüştür (Hearn and Sadowski, 2011).



Şekil 6. Silis kumu zenginleştirilmesinde kullanılan bir spiral ayırıcı ve ayırma prensibi.

### 2.3 Manyetik Ayırma ile Zenginleştirme

Genellikle yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcılar ile silis kumunda sıkça rastlanan ve renk vericiler olarak adlandırılan demir içerikli mineraller, sahip oldukları manyetik duyarlılıktan dolayı silis kumu içerisinden kolaylıkla giderilebilmektedir. Çizelge 2'de silis kumu içerisinde bulunan muhtemel mineraller ve bu minerallerin manyetik özellikleri verilmiştir. Manyetik ayırma cihazında, manyetik duyarlılığa sahip olan serbest mineraller tambura (ruloya) yapışırken, manyetik duyarlılığı olmayan silis kumları tamburu terk ederek ayırma işlemi gerçekleştirilmiş olur. Yüksek alan şiddetli yağ manyetik ayırıcılar elektromıknatıslı olup, yüksek voltajlarda çalışmakta ve önemli ölçüde güç sarfiyatına neden olmaktadır. Bu yüzden son yıllarda enerji sarfiyatının düşürülmesi amacıyla REMS (*rare-earth magnetic separator*) tipi doğal mıknatıslı kuru manyetik ayırıcılar geliştirilmiştir. Nadir toprak elementlerinden imal edilmiş bu

manyetik ayırıcılar ile özellikle zayıf manyetik özelliğe sahip demir cevherleri ve endüstriyel hammaddelerde bulunan manyetik safsızlıklar giderilebilmektedir. En yaygın kullanılan REMS tipi manyetik ayırıcılar Bateman firmasının *Permroll* manyetik ayırıcısı ve Outokumpu'nun *Inprosys* ayırıcısıdır. Bu manyetik ayırıcıların alan şiddeti 21000 Gauss'a kadar çıkabilmekte ve 50-0.075 mm arasındaki tane boyutlarında etkin ayırma yapabilmektedir. 75 mikronun altındaki tanelerde ise yaş manyetik ayırma uygulanmalıdır. Aksi takdirde ince taneler statik elektriklenme yoluyla iri tanelere, ruloya ve bant konveyöre yapışmakta, ayırmanın verimi ve sürekliliği olumsuz etkilenmektedir. REMS türü kuru manyetik ayırıcı ile yapılan bir çalışmada, silis kumu içerisindeki demir %0.089'dan 0.039'a düşürülmüştür (Arvidson, 1999; Bateman, 2011; Outotec, 2011). Al-Maghrabi (2004) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise düşük kaliteli Arabistan silis kumlarından  $Fe_2O_3$  içeriği yüksek alan şiddetli kuru manyetik ayırıcı ile %0.40'dan %0.10'a kadar düşürülmüştür.

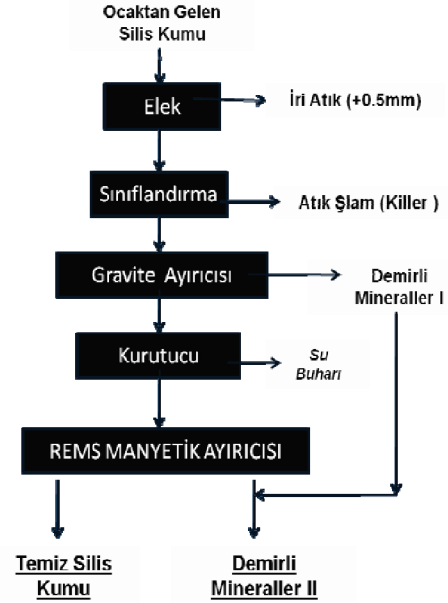
Çizelge 2. Silis kumundaki çeşitli gang mineralleri ve bu minerallerin manyetik özellikleri.

Mineral	Kimyasal Yapı	Manyetik Özellik
Kuars	$SiO_2$	Yok
İlmenit	$FeTiO_2$	Yüksek
Magnetit	$Fe_3O_4$	Çok Yüksek
Hematit	$Fe_2O_3$	Yüksek
Anduluzit	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	Yok
Sillimanit	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	Yok
Muskovit	$(H,K)AlSi_3O_8$	Yok

Manyetik ayırma işleminde; flotasyon reaktifinin kullanılmaması ya da liç işlemindeki gibi çeşitli kimyasalların sisteme girmemesi hem çevresel etkileri bakımından hem de üretim maliyeti açısından işletmecilere önemli avantajlar sunmaktadır. Günümüzde, kimyasal madde gerektiren yöntemler yerini kimyasal madde gerektirmeyen fiziksel ayırma yöntemlerine bırakma eğilimindedir. Silis kumlarının zenginleştirilmesinde son yıllarda yaygın olarak önerilen bir devre tertibi Şekil 7'da gösterilmiştir. Buna göre, bir sınıflandırıcı ile şlamı (killeri) uzaklaştırılan silis kumları genellikle bir spiral ayırıcıya beslenmekte ve buradan kaba bir konsantre alınmaktadır. Bu konsantre önce termal kurutmaya maruz bırakılmakta ve daha sonra yüksek alan şiddetli kuru manyetik

ayırıcıya beslenerek nihai konsantre (temiz silis kumu) elde edilmektedir. Burada, daha önceleri gravite ayırması yerine flotasyon yönteminin kullanıldığı uygulamalarda mevcuttur.

Şekil 7. Silis kumlarının zenginleştirilmesinde son yıllarda önerilen modern bir devre tertibi.



## 2.4 Elektrostatik Ayırma ile Zenginleştirme

Elektrostatik ayırma ile zenginleştirme silis kumu içerisindeki çeşitli minerallerin iletkenlik (reversibilite) özellikleri ve voltaj farklarına dayanılarak yapılan bir ayırma işlemidir. Yöntem tek başına uygulanabildiği gibi diğer yöntemlerle kombineli bir şekilde uygulanabilmektedir. Silis kumu içerisindeki çeşitli mineraller ve bunların elektrostatik özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Silis kumundaki çeşitli gang mineralleri ve bu minerallerin elektrostatik özellikleri.

Mineral	Kimyasal Yapı	Elektrostatik Özellik
Kuars	$SiO_2$	Yok
İlmenit	$FeTiO_2$	Yüksek
Magnetit	$Fe_3O_4$	Çok Yüksek
Hematit	$Fe_2O_3$	Çok Yüksek
Anduluzit	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	Az
Sillimanit	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	Yok
Muskovit	$(H,K)AlSi_3O_8$	Yok

Elektrostatik ayırmanın endüstriyel ölçekte uygulanması, cevheri beslemeden önce

kurutma, ısıtma, tozdan arındırma ve boyuta göre sınıflandırma gibi ön işlemlere gerek duyulması ve bu işlemlerin zor ve maliyetli olması nedeniyle genellikle tercih edilmemektedir. Ancak son yıllarda geliştirilen Carpco T-Start elektrostatik ayırıcısı (Şekil 8) kuvars-feldispat ayırımı için umut vericidir. Yapılan bir çalışmada, kuvars içeriği %48.7'den %82.4'e çıkarılmıştır. Başka bir deyişle, besleme içerisindeki feldispat %51.4'den %17.6'ya düşürülmüştür. Bilindiği gibi kuvars ve feldispat çok zayıf iletken minerallerdir. Elektrostatik ayırıcıya girmeden önce yüklenmeleri, dolayısıyla çeşitli işlemlere tabi tutulmaları gerekmektedir. Burada uygulanan yöntem, kuvars-feldispat karışımının öncelikle sıcak (100-120°C) bir mikser/karıştırıcı içerisinde karıştırılarak HF buharı ile muamele edilmesidir. Bu yolla HF buharı ile feldispattan kuvars mineraline elektron transferi olur. Bu durumda feldispat pozitif, kuvars minerali ise negatif yüklenir. Yüklü tanelerin elektrostatik ayırıcıya girmesi ile feldispat negatif elektroda, kuvars ise pozitif elektroda giderek ayırım gerçekleştirilir. Diğer taraftan feldispat minerallerinin HF ile aktive edilmesi durumunda silis kumundaki  $Fe_2O_3$  oranının da azaldığı belirtilmektedir (Okur, 1985; Güncelik, 2006; Outotec, 2011).



Şekil 8. Carpco T-Start model elektrostatik ayırıcısı.

## 2.5 Köpük Flotasyonu ile Zenginleştirme

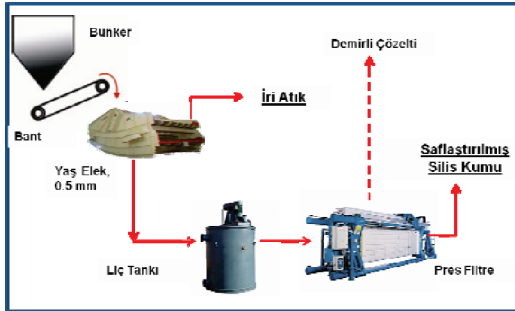
Günümüzde silis kumunun zenginleştirilmesinde flotasyon yöntemi önemli bir yer tutmaktadır. Çünkü silis kumlarında yaygın olarak bulunan demiroksit, kil ve ağır mineralleri (zirkon, turmalin vb) yıkama ve gravimetrik yollarla temizlemek her zaman mümkün olmamaktadır. Bunun en önemli nedeni tane serbestleşme boyutunun çok ince boyutlarda olmasıdır. Silis kumunun zenginleştirilmesinde uygulanan flotasyon yöntemi genellikle ters (reverse)

flotasyon şeklinde olmaktadır. Başka bir deyişle, yüzdürülen mineraller az miktarda olan demirli bileşikler iken, fazla miktarda olan kuvars bastırılmaktadır. Bu amaçla kuvars kumu içindeki safsızlıkları yüzdürmek için çeşitli toplayıcılar kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan toplayıcılar sırasıyla; yağ asitleri, sabunlar, sülfonatlar ve amin tipi toplayıcılardır. Bu reaktifler ortalama 500-1500 gr/t dozajlarında kullanılmaktadır. Aminler kullanıldığı zaman, kuvarsla benzer flotasyon özellikleri göstermeleri nedeniyle, ayırım ancak çok hassas pH kontrolü ile gerçekleştirilebilir (Segrove,1956). Sülfonatlar, düşük pH'larda (2.5-3) hidroflorik asitle birlikte pH kontrolü sağlamada ve kuvarsin bastırılmasında etkin olmaktadır (Köse ve Türel, 1986). Kuvars kumlarındaki safsızlıklar genellikle oksitler veya limonit, siderit ve ortoklas gibi karbonatlı demir minerallerinden oluşmaktadır. Silis flotasyonunda en önemli husus, demirli mineraller yüzerken silisin canlanmasının (yüzmesinin) engellenmesidir. Özellikle demir içeren minerallerin bulunduğu ortamda, hafif asidik veya bazik ortamda hidroliz olmuş demir iyonları silis yüzeyine adsorplanarak, silis yüzeyinin artı yüklü olmasına neden olurlar. Bu nedenle, silis kumundan safsızlıkları gidermek için asidik ortamda (pH ~2-3) alkil sülfonat ve benzeri gibi toplayıcılarla ters flotasyon gerçekleştirilir (Çilek, 2006). Silis kumunun zenginleştirilmesinde önceleri iki farklı pH'da ve iki farklı kademedeki flotasyon yapılmaktaydı. Önce bazik ortamda (pH ~7-8) sodyum oleat kullanılarak, daha sonra asidik ortamda (pH ~2.5-3) gerçekleştirilen flotasyon işlemleri ile demirli mineraller giderilmekteydi. Günümüzde ise sadece asidik ortamda (pH ~2.5-3) Cytec firmasının R-801 ve R-825 ticari isimli sülfonat türü toplayıcıları ile ya da daha ucuz yerli üretim bir toplayıcı olan HA-110 ve HA-150 adındaki petrolümlü sülfonat türü reaktiflerle silis kumlarından demirli bileşikler etkili bir şekilde giderilebilmektedir (Bayat ve Akarsu, 2002).

Ülkemizdeki bazı silis zenginleştirme tesislerinde çevresel baskılardan dolayı kimyasal reaktif kullanımı kısıtlanmıştır. Bu yüzden zorunlu olarak doğal pH'da flotasyon çalışmaları yürütülmektedir. Bu durumda, düşük demir giderimi ve köpüğe yüksek oranda silis kaçağı olsa da işleme devam edilmektedir. Ülkemizde amin tipi (Armac-T) veya sülfonat türü toplayıcılarla, doğal pH ortamlarında silis kumundan demirli bileşiklerin giderildiği pek çok uygulama mevcuttur.

## 2.6. Kimyasal Zenginleştirme Yöntemleri

Silis kumlarının zenginleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan flotasyon ve manyetik ayırma gibi fiziksel saflaştırma yöntemleri, sadece fiziksel olarak bağlanmış safsızlıkları uzaklaştırmak için uygun olup, kimyasal bağlarla bağlanmış ve mineral kafesi içinde yer alan yeterince serbestleşmemiş safsızlıkların giderilmesinde etkili değildir. Bu nedenle, fiziksel yöntemlerin etkin olmadığı durumlarda ve/veya yüksek saflıkta kuvars üretmek için liç gibi çeşitli asit ve alkali çözeltilerinin kullanıldığı kimyasal yöntemler uygulanmaktadır (Loritsch ve James, 1991; Akçıl vd., 2007). Kimyasal zenginleştirme yönteminde, silis kumu sulu bir ortamda uygun bir çözücü kimyasal ile muamele edilmekte ve demirli bileşikler çözeltilmektedir. Daha sonra çözeltinin filtre edilmesi ile saf silis kumu elde edilmektedir. Basit bir liç devresinin akım şeması Şekil 9'da verilmiştir. Bazı liç uygulamalarında ise filtre öncesinde ağır metaller aktif karbon ile adsorpsiyon yapılmakta ve daha sonra sınıflandırılarak temiz silis konsantreleri elde edilmektedir (Banza vd., 2006).



Şekil 9. Liç işlemi genel akım şeması.

Silis kumunun liçinde çözücü kimyasal olarak organik ve inorganik asitler kullanılabilir. En yaygın kullanılan organik asitler oksalik ( $(\text{COOH})_2$ ), sitrik ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ), askorbik asit ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ ) ve inorganik asitler hidroflorik (HF), hidroklorik (HCl), sülfürik ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ve perklorik ( $\text{HClO}_4$ ) asittir. İnorganik asitlerin en önemli avantajı organik asitlere kıyasla düşük maliyetli olmalarıdır (Taxiarchou vd., 1997). Ancak, sülfürik ve hidroklorik asit gibi inorganik asitler, ürünün  $\text{SO}_4^{2-}$  ve  $\text{Cl}^-$  iyonları ile kirlenmesine neden olmakta ve bu durum liç işlemi sonrası ürünün iyi yıkanmasını gerektirmektedir. Bu yüzden birçok neden organik asit kullanımını daha uygun kılmaktadır. Öyle ki; organik asitlerle (özellikle

oksalik ve sitrik asit ile) demir çözünme hızı ve verimi, inorganik asitlerle karşılaştırıldığında önemli derecede daha yüksektir. Organik asitler çözünen demir ile kompleks oluşturmak suretiyle demirin çökmesini engeller (çözünürlüğünü artırır) ve geniş bir pH aralığında liç işleminin gerçekleştirilmesine olanak sağlar. Oksalik asit, diğer organik asitlerle karşılaştırıldığında, yüksek asit etkinliği, iyi bir kompleks oluşturma özelliğine sahip olması ve iyi bir indirgeyici reaktif olması nedeniyle endüstriyel minerallerin temizlenmesinde potansiyel bir liç reaktifidir. Ayrıca, oksalik asit diğer endüstriyel işlemlerden yan ürün olarak ucuza elde edilebilir. Ancak bu reaktif, bünyesinde kalker içeren silis kumları için uygun değildir. Çünkü okzalit tüketimini, kalsiyum okzalit oluşumu nedeniyle çok artırır. Kuvars kumunun zenginleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden birisi de sülfürik asitle liçtir. Bu yöntemde,  $100^\circ\text{C}$  civarına kadar ısıtılarak silis kumundaki demir içeriği,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 'a dönüştürülür. Daha sonra yıkama ile  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  ortamdan uzaklaştırılır (Köse ve Türel, 1986; Akçıl vd., 2007). Diğer taraftan, son yıllarda bazı araştırmacılar liç işlemi ile silis kumundan demirin giderilmesinde ultrasonik dalgaların kuvars yüzeyini temizlemesi sonucu verimi artırdığını belirtmişlerdir (Du et al., 2011).

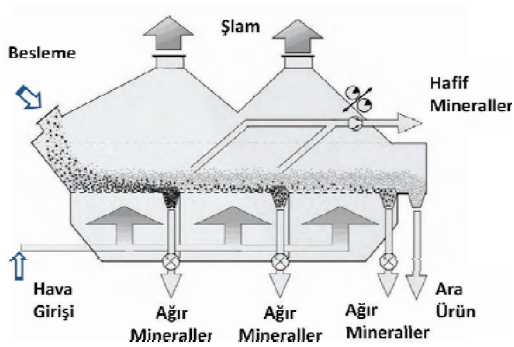
Bir diğer kimyasal zenginleştirme yöntemi "klorlama"dır. Klorlama 1930'lu yıllarda geliştirilmiş olup, bu yöntemde kuvars kumları döner fırınlarda yaklaşık  $800^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtmaya tabi tutulmaktadır. İşlem esnasında kumların parçalanmasıyla CO gibi gazlar ortaya çıkmakta ve bu esnada klor gazı geçirilerek demirler demir klorür olarak uçurulmaktadır. Bu yöntem uygulanarak %0.11  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içeren kuvars kumundaki demiroksit içeriği %0.009'a düşürülmüştür. Bu yöntem alternatif olarak da amonyaklı klorlama yöntemi geliştirilmiştir. 1940 yılında yapılan bir uygulama ile kuvars kumları bir reaksiyon odasında yaklaşık  $500^\circ\text{C}$ 'ye ısıtıldıktan sonra amonyum klorürle muameleye tabi tutulur. Amonyum klorür  $300^\circ\text{C}$ 'de parçalanmaya başlar ve ortaya çıkan klorürün  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'le reaksiyona girmesi sonucu  $\text{FeCl}_2$ 'ler buhar halinde ortamdan uzaklaştırılır (Köse ve Türel, 1986).

## 2.7. Kuru Zenginleştirme Yöntemleri

Ürün olarak silis kumu %10'un altındaki nem içerikleri ile satışa sunulmaktadır. Dolayısıyla, yaş yöntemle saflaştırma sonrasında silis



kumunun belli bir nem içeriğine kadar önce susuzlandırılması daha sonra kurutulması gerekmektedir. Kurutma tesislerde ek bir maliyet unsuru olup, bu işlemin sistemden kaldırılması ve dolayısıyla silis kumunun kuru saflaştırılması pek çok yönden avantaj sunmaktadır. Bu bakımdan silis kumunun saflaştırılması için geliştirilmiş bazı kuru zenginleştirme yöntemleri vardır. Bunlar; “kuru manyetik ayırma”, “akışkan yataklı ayırma (Akaflow Separator)” ve “elektrostatik ayırma” yöntemleridir. Kuru manyetik ayırıcılar genellikle yüksek alan şiddetli (>10000 Gauss) ya da REMS tipi manyetik ayırıcılar olup, silis kumu içerisindeki manyetik özelliğe sahip mineralleri giderebilmektedir. Bazı işletmelerde, flotasyon konsantresinden nihai saflıkta ürün eldesi için flotasyon işlemi sonrasında da kullanılabilir. Ancak burada flotasyon konsantresinin manyetik separatore beslenmeden önce kurutulması gerekmektedir. Kuru zenginleştirme teknolojisindeki son yıllarda geliştirilmiş olan bir diğer alternatif cihaz *Akaflow* separatörüdür. Bu cihazda minerallerin ayrımı titreşimli bir masa üzerinde basınçlı hava ile sağlanır. Şekil 10'da çalışma prensibi gösterilen *Akaflow* separatörü 3 mm'den daha küçük boyutlu ince tanelerin zenginleştirilmesi için geliştirilmiştir. Bu cihaz, mineraller arasındaki yoğunluk farkının 0.3 gr/cm<sup>3</sup>'den daha az olması durumunda bile etkili bir ayırma gerçekleştirebilmektedir. Özellikle ince taneli feldispat ve kuvarstan kasiterit gibi ağır minerallerin gideriminde endüstriyel ölçekte uygulamaları mevcuttur. Diğer taraftan, kömür, kalay, ilmenit, barit gibi minerallerin zenginleştirilmesinde ve sahil kumlarından demir, titan gibi ağır minerallerin giderilmesi için kullanılabilir. Kapasiteleri 120 cm'lik masa genişliği için saatte 5 ile 25 ton arasında değişmektedir (Anonymous, 2009).



Şekil 10. Akaflow kuru zenginleştirme cihazı.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmanın deneysel kısmında İstanbul-Çatalca bölgesinden temin edilen silis kumlarından demirli bileşiklerin giderilmesine yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Deneysel çalışmalar, köpük flotasyonu ve manyetik ayırma yöntemlerinden faydalanılmış ve her iki yöntemin verimlilikleri demir giderimi için karşılaştırılmıştır.

#### 3.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda kullanılan silis kumu numunesi İstanbul-Çatalca bölgesinde faaliyet gösteren Trakya Bölgesi Silis İşletmeleri Ltd. Şti'den alınmıştır. Söz konusu tesiste, ocaktan üretilen cevher önce 0.5 mm'lik yaş bir elekten boyutlandırılmakta ve elek altına geçen malzeme scrubber'lara gönderilmektedir. Elek üstünde kalan malzeme iri atığı oluşturmaktadır. Scrubber'da kili ve çamuru dağıtılan malzeme, şlam atma ve boyutlandırma amacıyla 9 inçlik hidrosiklonlara beslenmektedir. Hidrosiklonun üst akımı şlam olarak atılmakta iken alt akım flotasyon hücrelerine (Ahşap Forrester Selülüne) gönderilmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan numune, söz konusu tesiste flotasyon beslemesi olan, kili uzaklaştırılmış (şlamı atılmış) malzemedir. Bu numunenin yaş elek analizi sonuçları Çizelge 4'de, XRF spektrometresi ile yapılan kimyasal analiz sonuçları ise Çizelge 5'de verilmiştir. Diğer taraftan yapılan mikroskobik incelemeler sonucunda, kuvarsin diğer minerallerden %80 oranında tane serbestlik derecesine 400 mikronun altında ulaştığı ve başlıca renk verici minerallerinin hematit, ilmenit, manyetit ve rutil minerallerinden oluştuğu görülmüştür. Analiz sonuçlarına göre numunenin %85'i yaklaşık 0.355 mm'nin altında ve %95.45 SiO<sub>2</sub> içeriğine sahiptir. Renk verici bileşikler olan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiO<sub>2</sub> ise sırası ile %0.41 ve %0.22 oranlarında silis kumu numunesi içerisinde genelde serbest halde bulunmaktadır.

Çizelge 4. Numunenin yaş elek analizi sonuçları.

Tane Boyutu (Mikron)	Miktar (%)	Küm. Elekaltı (%)
-500+425	2.60	100.00
-425+355	12.80	97.40
-355+250	33.50	84.60
250+125	28.20	51.10
-125+75	17.50	22.90
-75	5.40	5.40

Çizelge 5. Numunenin kimyasal analiz sonuçları.

Bileşen (--)	İçerik (%)
SiO <sub>2</sub>	95.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.46
TiO <sub>2</sub>	0.22
CaO	0.01
MgO	0.04
Na <sub>2</sub> O	0.02
K <sub>2</sub> O	0.43
K.K.	0.84

### 3.2. Yöntem

Deneyisel çalışmalarda, klasik karıştırmalı flotasyon makinası ve yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcı kullanılmıştır. Her iki cihazla farklı sürelerde ayrı ayrı deneyler yürütülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçların karşılaştırılmasında demir (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) giderim verimleri ve konsantre ağırlık kayıpları dikkate alınmıştır. Demir giderim verimi (DGV) ve konsantre ağırlık kayıpları (KAK) aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmıştır:

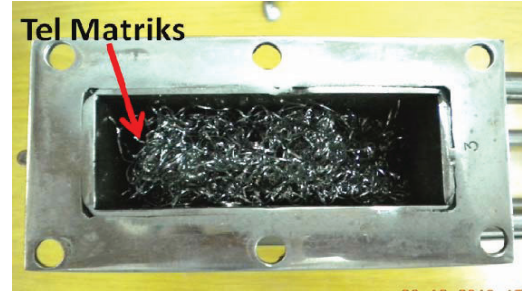
$$DGV (\%) = (K_i - K_s / K_i) * 100$$

$$KAK (\%) = M_b - M_k$$

K<sub>i</sub> ve K<sub>s</sub> beslenen ve elde edilen silis kumu içerisindeki Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüzde konsantrasyonunu gösterirken, M<sub>b</sub> ve M<sub>k</sub> sırasıyla beslenen ve elde edilen silis kumu miktarlarını (%) göstermektedir.

Flotasyon deneyleri, 3lt hacimli Denver marka D12 model laboratuvar tipi flotasyon makinasında yapılmıştır. Demirli bileşiklerin yüzdürülmesi için Cynamid firmasının üretmiş olduğu R801 ve R825 adlı sülfonat türü toplayıcılarından sırasıyla 350 ve 550 gr/ton mertebesinde kullanılmıştır. Ayrıca demir oksit yüzeylerini temizlemek, silikatların yüzmesini önlemek ve pH değerinin ayarı için sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) kullanılmıştır. Deneyler musluk suyu ile 24°C'lik oda sıcaklığı koşullarında ve pH ~3.0 değerinde yapılmıştır. Katı oranı %30 (900 gr) ve kıvamlandırma süresi 10 dakika seçilmiştir. Sırasıyla 60, 120, 180 ve 240 saniye süresince demir içerikli köpük alınmış ve hücrenin dibine kalan kalan silis kumu filtre edilip kurutulduktan sonra Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği bakımından analiz edilmiştir. Manyetik ayırma deneyleri maksimum manyetik alan şiddeti 19000 Gauss olan Boxmag Rapid LWHL tipi yüksek alan

şiddetli yaş manyetik ayırıcısı ile yapılmıştır. Bu manyetik ayırıcıda iki sabit bobin kutbu arasında hareket ettirebilen metal ızgara tipi bir matriks bulunmaktadır. Pülp matriks içerisinde geçerken, matriks tarafından demirli bileşikler tutulmaktadır. Yapılan ön denemelerde, besleme boyutunun oldukça ince olması (d<sub>80</sub>~0.35 mm) ve ızgara matriks arasındaki boşluğun büyük olması (~3 mm) nedeni ile pülp akışı çok hızlı olmuştur. Bu durumda, demirli bileşikler matriks tarafından verimli bir şekilde yakalanamamıştır. Bu yüzden ızgara matriksin etrafı Şekil 11'de görüldüğü gibi tel matriksle çevrilmiş ve tanelerin matriks içerisinde kalma süresi artırılmıştır. Daha sonra, besleme hızı 15 gr/sn olacak şekilde, %30 katı oranında deneyler yürütülmüştür. Flotasyon deneylerinde olduğu gibi, 60 saniyelik süre sonunda, manyetik ayırıcıdan toplam 900 gr malzeme geçirilmiştir. Elde edilen konsantre silis kumu daha sonra tekrar manyetik ayırıcıdan (+60 sn) geçirilmiştir. Elde edilen ürün 120 saniyelik ürün olarak isimlendirilmiştir. Benzer şekilde, ürün 2 kademe daha temizlenerek, sırasıyla 180 ve 240'saniyelik ürünler elde edilmiştir. Böyle bir yöntem izlenmesinin sebebi, flotasyon ve manyetik ayırma sonuçlarının benzer kapasitelerde ve benzer süre sonunda elde edilen ürünlerin karşılıklı olarak karşılaştırılabilmesine imkân sağlamasıdır.



Şekil 11. Yaş manyetik ayırıcıda kullanılan tel matriksin görüntüsü.

### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

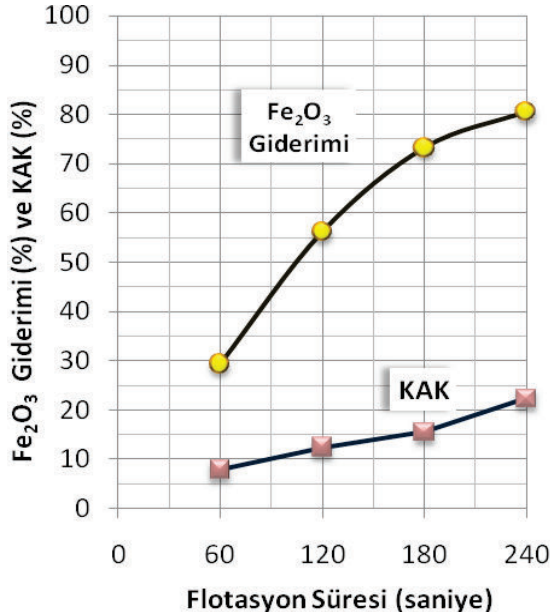
Farklı sürelerde (60, 120, 180 ve 240 sn) yapılan flotasyon deneyleri sonucunda elde edilen temiz silis kumlarına (konsantrelere) ait analiz sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir. Demir giderim verimi ve zamana bağlı konsantre ağırlık kayıpları (KAK) ise Şekil 12'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre, flotasyonun ilk 60 saniyesinde demirin %29.27'si yüzdürülerek, %0.29 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren bir

konsantre elde edilmiştir. Flotasyon süresinin arttırılmasıyla,  $Fe_2O_3$  içeriği %0.41'den %0.08'e kadar 240 saniyenin sonunda düşürülmüştür.

Çizelge 6. Farklı flotasyon sürelerinde elde edilen konsantrenin ağırlığı ve demir içeriği.

Flotasyon Süresi (saniye)	Konsantre Ağırlığı (%)	Konsantre $Fe_2O_3$ içeriği (%)
60	92.20	0.29
120	87.60	0.18
180	84.50	0.11
240	77.70	0.08

Şekil 12'den görülebileceği gibi, flotasyon süresi arttıkça hem  $Fe_2O_3$  giderimi artmakta hem de konsantrenin ağırlık kaybı artmaktadır. Başka bir deyişle, flotasyon süresinin artmasıyla birlikte silislerde yüzmeye başlamıştır. Öyle ki, 60 saniyelik flotasyon süresi sonunda konsantre ağırlığı %92.20 iken, 240 saniyenin sonunda elde edilen konsantrenin ağırlığı %77.70'e düşmüştür. R801 ve R825 toplayıcıları uzun flotasyon sürelerinde silisinde zamanla köpük ürününe geçmesine neden olmuştur. Ayrıca,  $Fe_2O_3$  giderimi 180'inci saniyeye kadar lineer olarak artmışken, daha uzun flotasyon sürelerinde bu artış azalma eğilimine girmiştir.



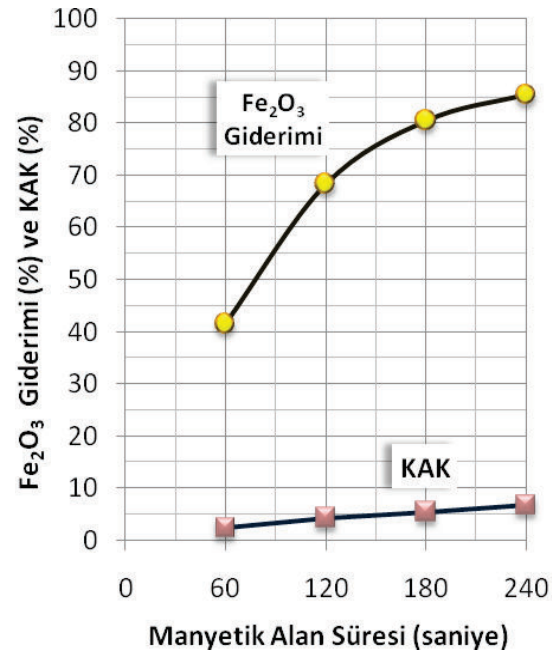
Şekil 12. Flotasyon süresine bağlı olarak  $Fe_2O_3$  giderimi ve konsantre ağırlık kaybının değişimi.

Manyetik ayırma deneylerinde, %30 katı oranına sahip ve 900 gr ağırlığındaki silis kumu numunesi

60 saniyede manyetik ayırıcı matriksinden geçirilmiştir (Besleme hızı: 15 gr/sn). Elde edilen konsantre tekrar manyetik ayırıcıdan geçirilerek tanelerin toplam manyetik alanda kalma süresi 120 saniye olmuştur. Üçüncü ve dördüncü temizleme kademeleri sonucunda 180 ve 240 saniyelik konsantreler elde edilmiştir. Bu konsantrelere ait analiz sonuçları Çizelge 7'de verilmiştir. Demir giderim verimi ve zamana bağlı konsantre ağırlık kayıpları (KAK) ise Şekil 13'de gösterilmiştir.

Çizelge 7. Manyetik alandan geçme süresine (temizleme kademelerine) bağlı olarak elde edilen konsantrenin ağırlığı ve demir içeriği.

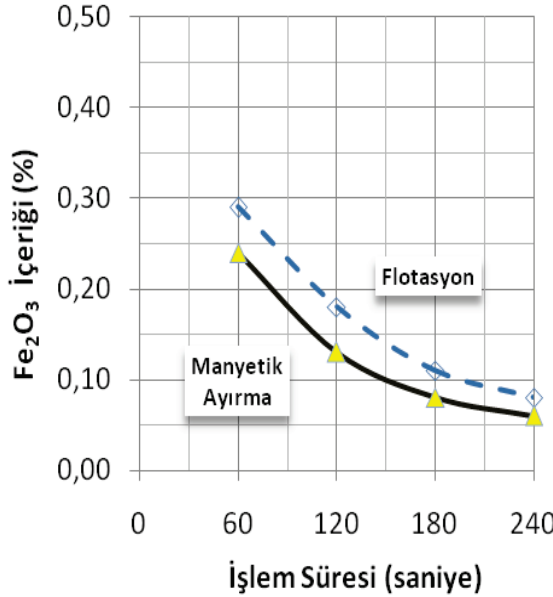
Manyetik Alanda Kalma Süresi (saniye)	Konsantre Ağırlığı (%)	Konsantre $Fe_2O_3$ içeriği (%)
60	97.60	0.24
120	95.70	0.13
180	94.50	0.08
240	93.20	0.06



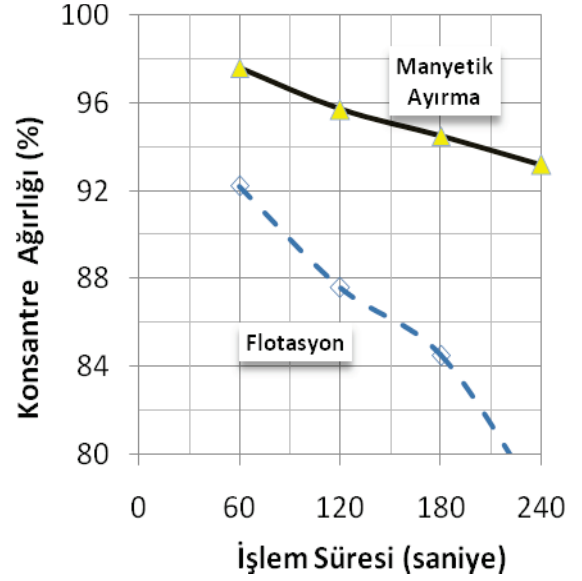
Şekil 13. Manyetik alandan geçme süresine bağlı olarak  $Fe_2O_3$  giderimi ve konsantre ağırlık kaybının değişimi.

Çizelge 7 ve Şekil 13'den görülebileceği gibi, pülpün manyetik ayırıcıdan 1 kez geçirilmesi (60 sn) sonucunda demirin %41.46'si matriks tarafından tutulmuş ve %0.24  $Fe_2O_3$  içeren bir konsantre elde edilmiştir. Manyetik ayırıcıda 3 kademe temizleme uygulanması durumunda

ise (toplam 240 sn),  $Fe_2O_3$  içeriği %0.41'den %0.06'ya düşmüştür. Diğer taraftan manyetik ayırıcıda temizleme kademelerinin artırılması ile konsantre ağırlık kayıplarının meydana geldiği görülmektedir. Öyle ki, 60, 120, 180 ve 240 saniyelik manyetik alan uygulamaları sonucunda elde edilen konsantrelerin ağırlıkları sırasıyla %97.60, %95.70, %94.50 ve %93.20 bulunmuş ve konsantre ağırlık kayıpları ise sırasıyla %2.40, %4.30, %5.50 ve %6.80 olarak hesaplanmıştır. Ancak konsantredeki bu kayıplar, flotasyonda olduğu kadar yüksek değildir. Flotasyonda, silisin zamanla yüzmesi söz konusu iken, manyetik ayırıcıda sadece temizleme kademelerinin artırılmasıyla silis minerallerinin matris arasına demirli bileşiklerle birlikte sıkışma problemi bulunmaktadır. 240 saniye sonunda flotasyon ürününden elde edilen konsantrenin ağırlığı %77.70 iken, manyetik ayırıcıda %93.20'dir. Şekil 14 ve 15'de flotasyon ve manyetik ayırıcı ile farklı sürelerde elde edilen konsantrelerin  $Fe_2O_3$  içerikleri ve konsantre ağırlıkları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Buna göre, manyetik ayırıcı hem  $Fe_2O_3$  giderimi bakımından hem de konsantre ağırlığı yönünden daha iyi sonuç vermiştir. Manyetik ayırıcıda  $Fe_2O_3$  giderimi I.temizleme kademesi sonuna kadar (120 saniye) lineer olarak artmışken, daha sonrasında artış azalmaya başlamıştır.



Şekil 14. Flotasyon ve manyetik ayırıcıda süreye bağlı olarak silis kumu konsantresindeki  $Fe_2O_3$  içeriği.



Şekil 15. Flotasyon ve manyetik ayırıcıda süreye bağlı olarak silis kumu konsantresinin ağırlığının değişimi.

Çizelge 8'de manyetik ayırıcıdan elde edilen nihai ürünün tam kimyasal analiz sonuçları verilmiştir. Çizelge 8'deki sonuçlara göre;  $SiO_2$  içeriği %95.45'den %98.30'a yükselmiş,  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  içeriği sırasıyla %2.46 ve %0.22'den %0.45 ve %0.10'a düşmüştür. Konsantrenin  $Fe_2O_3$  içeriği ise %0.06'dır. Bu sonuçlara göre; elde edilen silis kumu döküm, seramik, boya ve cam sanayisinde kullanılabilir derecede saftır.

Çizelge 8. Besleme ve manyetik ayırıcı konsantresinin kimyasal analiz sonuçları.

Bileşen (--)	Besleme İçerik (%)	Konsantre İçerik (%)
$SiO_2$	95.45	98.30
$Fe_2O_3$	0.41	0.06
$Al_2O_3$	2.46	0.45
$TiO_2$	0.22	0.10
$CaO$	0.01	0.01
$MgO$	0.04	0.01
$Na_2O$	0.02	0.01
$K_2O$	0.43	0.14

## SONUÇLAR

Literatür verilerine göre, silis kumlarının zenginleştirilmesi için çok çeşitli yöntemlerin kullanılabilirliği görülmektedir. Son yıllarda, kimyasal yöntemler ve flotasyon gibi fizikokimyasal yöntemlerin işletme maliyetlerinin yükselmesi, kimyasal tüketimi ve bu konudaki



çevresel hassasiyetlerin artması ile birlikte bu tip tesislerde kısıtlamaya gidilmiş ve bu durum yeni alternatif yöntemlerin geliştirilmesine ön ayak olmuştur. Günümüzde kimyasal yöntemlere yalnızca çok yüksek saflıkta özel tip cam üretimi (optik veya elektronik cam) söz konusu olduğunda başvurulmaktadır. Düz cam, züccaciye, seramik ve diğer sanayi kollarında tüketilen silis kumlarının üretiminde ise genellikle garavite ayırması yeterli olmakta ve manyetik ayırma gibi kimyasal gerektirmeyen yöntemlere de zaman zaman başvurulmaktadır. Bu bakımdan, bu çalışmanın bir bölümünde kimyasal gerektiren ve kimyasal gerektirmeyen 2 farklı yöntemle silis kumları zenginleştirilmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda yüksek alan şiddetli yaşı manyetik ayırıcı ile yüksek kaliteli ve düşük demir içerikli silis kumu konsantrasyonlarının üretilebileceği görülmüştür. Öyle ki, manyetik ayırıcıdan klasik flotasyon işlemine göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Manyetik ayırma ve flotasyon yöntemleri ile sırasıyla demirin %85.37'si ve %80.49'u giderilmiştir. Bu bağlamda, dünyadaki teknolojik gelişmelerden uzak kalmamalı ve alternatif yöntemlerle silis kumlarının zenginleştirilebilirliğine yönelik araştırmalar yapılmalıdır.

## TEŞEKKÜR

Yazar, 10856 No'lu Proje desteğinden dolayı İstanbul Üniversitesi BAP Birimine ve katkılarından dolayı Trakya Bölgesi Silis İşletmeleri Ltd. Şti. Genel Müdürü Sayın Tamer Cengiz'e teşekkürü bir borç bilir.

## KAYNAKLAR

Al-Maghrabi M. N. H., 2004; "Improvement of Low-Grade Silica Sand Deposits In Jeddah Area", Engineering Science, **15**, 2, 113-128.

Anonymous, A., 2009; "Malachite's tin mining plants boosted by results of dry processing test work, Asx Announcement, Malachite Resources Limited, Australia.

Akçıl, A., Tuncuk, A. ve Deveci, H. 2007; "Kuvarsın Saflaştırılmasında Kullanılan Kimyasal Yöntemlerin İncelenmesi", Madencilik, **46**, 4, 3-10.

Arvidson, B.R., 1999; "Advances in rare-earth magnetic drum separators for heavy mineral sands processing", Heavy Minerals, Johannesburg, South African Institute of Mining and Metallurgy, pp.121-124.

Banza, A.N., Quindt, J. and Gock, E., 2006; "Improvement of the Quartz Sand Processing at Hohenbocka", International Journal of Mineral Processing, **79**, 76-82.

Bateman, 2011; Industrial Minerals, [http://www.bateman.co.za/com\\_industrial\\_minerals.php](http://www.bateman.co.za/com_industrial_minerals.php)

Bayat, O., Arslan, V., Vapur, H. and Uçurum, M. 2004; "Kuvars Kumu Kirleticilerinin Oksalik Asit Liçi ile Uzaklaştırılması, 5 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 13-14 Mayıs 2004, Izmir, Türkiye.

Bayat, O. and Akarsu, H. 2002; "Evaluation of new collectors for silica/glass sand and statical analysis of plant trials, Technical Note, Minerals Engineering, **15**, 293-296.

Clark, B. H., 2007; "The Derrick Stack Sizer™: Revolutionary Advancements in Wet Screening Technology, Proceedings of the 39th Annual Canadian Mineral Processors Conference, January 23 to 25, Ottawa, Ontario, Canada. s.413-428.

Çilek, C.E., 2006; "Mineral Flotasyonu", Süleyman Demirel Üniversitesi yayın No:59, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Isparta. S.158.

Du, F., Li, J., Li, X. and Zhang, Z., 2011; "Improvement of iron removal from silica sand using ultrasound-assisted oxalic acid", Ultrasonics Sonochemistry, **18**, 389-393.

DPT., 2001; "Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu", Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, Toprak Sanayii Hammaddeleri III (Kuvars kumu, Kuvarsit, Kuvars) Çalışma Grubu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara.

Günçelik, S., 2006; "K Feldispat ile Na Feldispatın Flotasyonla Seçimli Ayrımında Çok Değerlikli İyonların Etki Mekanizmasının Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.

Hearn, S. and Sadowski, J., 2011; "Avances in the application of spiral concentrators for production of glass sand", Outotec Technology, Technical Papers,s.1-9.

Köse, M. ve Türeli, T.K. 1986., "Cam Üretiminde Kullanılan Kuvars Kumlarında Aranan Özellikler-Zenginleştirme Yöntemleri Ve Yozgat Sarıkaya Kuvarsitlerinin Bu Açıdan İncelenmesi", Madencilik, **25**, 4, 21-28.

Loritsch, K.B. and James, R.D. 1991; "Purified Quartz and Process for Purifying Quartz", United States Patent, Patent Number : 4,983,370.

Okur, E., 1985; "Simav - Dagardı Feldspatlarının Elektostatik Ayırma ile Zenginleştirilmesi, Anadolu Üniveristesi Mühendislik Fakültesi Dergisi Cilt II, Sayı 2, Eskisehir, s. 61-68

Outotec, 2011; Ore Beneficiation Brochures, [http://www.outotec.com/pages/Page\\_\\_\\_\\_38117.aspx?epslanguage=EN](http://www.outotec.com/pages/Page____38117.aspx?epslanguage=EN)

Segrove, H.D., 1956; "The production of Sands for Making Colourless Glasses", Jnl.Soc. Glass'Tech.XL., s. 363-375, 1956.

Styriakova, I., Styriak, I., Kraus, I., Hradil, D., Grygar T. and Bezdicka, P., 2003; "Biodestruction and Deferritization of Quartz Sands by Bacillus Species", Minerals Engineering, **16**, 709-713.

Tülümen, E., 1985; "Anadolu Cam sanayi AŞ. Hammaddeleri" T.Ş.C.F. A.Ş. Araştırma Müdürlüğü Raporu No: 178, İstanbul.

Taxiarchou, M., Panias, D., Douni, I., Paspaliaris, I. ve Kontopoulos, A., 1997; "Dissolution of Hematite in Acidic Oxalate Solutions", Hydrometallurgy, **44**, 287-299.

Venkatraman, P., Kow, W.S. Sadowski J. and Anthraper, A. 2000; "Application of floatex/ spiral circuit in processsing silica sand", SME Annual Meeting Salt Lake City, Utah – February 28-March 1, 2000. SME Preprint No. 00-162.

Yıldız, N. 2007; "Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme", Ertem basım yayın, ISBN.978-975-96779-2-3. s.690.