

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MULTİ GRAVİTE CİHAZLARININ KROM
CEVHERİ ZENGİNLEŞTİRMESİNDEKİ
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Berkan ER

Ekim, 2011
İZMİR

**MULTİ GRAVİTE CİHAZLARININ KROM
CEVHERİ ZENGİNLEŞTİRMESİNDEKİ
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Maden Mühendisliği Bölümü, Cevher Hazırlama Anabilim Dalı

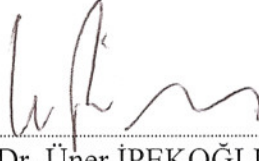
Berkan ER

Ekim, 2011

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

BERKAN ER, tarafından **PROF. DR. ÜNER İPEKOĞLU** yönetiminde hazırlanan **“MULTİ GRAVİTE CİHAZLARININ KROM CEVHERİ ZENGİNLEŞTİRMESİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



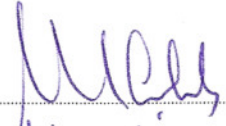
Prof. Dr. Üner İPEKOĞLU

Yönetici



Doç. Dr. Mehmet TANRIVERDİ

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Mustafa Gökale

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tüm çalıőmalarım süresince bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, katkılarını esirgemeyen, her zaman destek veren ve anlayıő gösteren danıőmanım Sayın Prof. Dr. Üner İPEKOĞLU' na teőekkürlerimi sunarım.

Bu alıőma boyunca konu ile ilgili bilgilerini bana aktaran ve laboratuvar çalıőmalarım süresince beni yönlendiren Sayın Doç. Dr. Mehmet TANRIVERDİ' ye ve Sayın Dr. Sezai ŞEN' e teşekkür ederim.

MULTİ GRAVİTE CİHAZLARININ KROM CEVHERİ ZENGİNLEŞTİRMESİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Bu tez çalışmasında, Adana ili, Aladağ ilçesinde bulunan Sivişlitepe ocağından temin edilen kromit cevheri üzerinde multi gravite cihazlarının krom cevheri zenginleştirmesindeki etkilerini araştırmak amacıyla zenginleştirme testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyleerde multi gravite cihazlarından MGS, Knelson ve Falcon konsantratörleri kullanılmıştır.

MGS deneylerinde besleme tane boyutu sabit tutulmuş; tambur dönüş hızı, tambur eğim açısı, yıkama suyu miktarı ve besleme katı oranı değiştirilen parametreler olarak belirlenmiştir. Deneysel tasarımın oluşturulmasında merkezi kompozit deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır.

Knelson ayırıcısı ile sabit besleme tane boyutunda santrifüj kuvvet ve yıkama suyu basıncı değiştirilerek ön testler yapılmış ancak üretilen ürünler nihai kromit konsantrasi olarak yeterli görülmediği için elde edilen kromit konsantreleri, Falcon deneylerinde besleme malı olarak kullanılmıştır.

Knelson santrifüj ayırıcısında üretilen konsantreler, tane serbestleşmesini arttırmak için öğütme işlemine tabi tutulmuş ve Falcon konsantratörü ile farklı rotor dönüş hızlarında ve su basınçlarında bir dizi zenginleştirme deneyleri gerçekleştirilmiş, kromit tenörü değerleri ve konsantr verimleri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Gravite ile zenginleştirme, multi gravite cihazlar, krom cevheri, multi gravite separatör, Knelson konsantratörü, Falcon santrifüj ayırıcısı.

INVESTIGATION OF EFFECTS OF MULTI GRAVITY DEVICES ON THE CHROME ORE BENEFICATION

ABSTRACT

In this study, recovery tests were carried out with the purpose of investigating the effects of MGS, Knelson and Falcon multi gravity concentrators on the beneficiation of chromite using the sample taken from Sivişlitepe/Aladağ, Adana.

Feed particle size has been kept constant; rotational speed, tilt angle, washwater and feed pulp density varied as different parameters during MGS Tests. In the establishment of experimental design, the central composite rotatable design method has been utilized.

Preliminary tests have been performed by changing centrifugal power and washwater pressure using Knelson separator. Since only limited amount of concentration has been attained, concentrates were subjected to further concentration by using Falcon centrifugal separator.

The Knelson concentrates were ground for increasing particle liberation before using in the Falcon tests. A series of tests have been conducted applying different rotational speed and water pressures to find out the effects of Falcon concentration on the chromite grade and recoveries.

Keywords: Gravity concentration, multi gravity devices, chromite ore, Mozley multi gravity separator, Knelson concentrator, Falcon centrifugal separator.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
BÖLÜM BİR-GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
1.2 Kromun Tanımı, Tarihçesi ve Özellikleri	3
1.3 Krom Mineralleri.....	4
1.4 Kromitin Yantaşları.....	6
1.5 Kromun Doğada Bulunuşu.....	7
1.6 Kromit Yatakları ve Oluşum Süreçleri.....	7
1.6.1 Stratiform Masifler ve İlişkili Krom Yatakları (Stratiform Yataklar).....	7
1.6.2 Alpin Tipi Masifler ve İlişkili Krom Yatakları (Podiform Yataklar).....	9
1.6.3 Konsantrik Tip Krom Yatakları.....	11
1.7 Dünya’da ve Türkiye’de Kromit Madenciliği.....	12
1.7.1 Dünya’da Kromit Madenciliği.....	13
1.7.2 Türkiye’de Kromit Yatakları ve Kromit Madenciliği	14
1.8 Ürün Standartları ve Kullanım Alanları	16
1.8.1 Metalurji Sanayinde Kullanım.....	17
1.8.2 Refrakter Sanayinde Kullanım	19
1.8.3 Kimya Sanayinde Kullanım.....	20
1.9 Kromit Zenginleştirme Yöntemleri	22
1.9.1 El ile Ayıklama (Triyaj, Tavuklama) ile Zenginleştirme	24
1.9.2 Özgül Ağırlık Farkına Göre Zenginleştirme.....	25
1.9.3 Manyetik Ayırma ile Zenginleştirme.....	27
1.9.4 Elektrostatik Ayırma ile Zenginleştirme	29
1.9.5 Flotasyon ile Zenginleştirme	29

BÖLÜM İKİ - MULTİ GRAVİTE CİHAZLARI.....	31
2.1 Multi Gravite Separatörü (MGS)	32
2.2 Knelson Konsantratörü.....	38
2.3 Falcon Santrifüj Ayırıcısı	44
BÖLÜM ÜÇ- DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	47
3.1 Deneylerde Kullanılan Malzeme	47
3.2 Kromit Numunesinin Hazırlanması.....	47
3.3 Karakterizasyon Çalışmaları	49
3.3.1 Elek Analizi	49
3.3.2 Kimyasal Analiz	49
3.3.3 Mineralojik Analiz.....	50
3.4 MGS Deneyleri.....	51
3.5 Knelson Deneyleri	55
3.6 Falcon Deneyleri	56
BÖLÜM DÖRT- BULGULAR VE YORUMLAR	58
4.1 MGS Deneyleri Sonuçları	58
4.1.1 Konsantre tenörünün tambur dönüş hızı ve tambur eğim açısına göre cevap yüzeyi	64
4.1.2 Konsantre tenörünün tambur dönüş hızı ve yıkama suyuna göre cevap yüzeyi	65
4.1.3 Konsantre tenörünün tambur eğim açısı ve yıkama suyuna göre cevap yüzeyi	66
4.1.4 % Cr ₂ O ₃ Veriminin, tambur dönüş hızı ve tambur eğim açısına göre cevap yüzeyi	67
4.1.5 % Cr ₂ O ₃ Veriminin, tambur eğim açısı ve % katı oranına göre cevap yüzeyi	68

4.1.6 % Cr ₂ O ₃ Veriminin, tambur dönüş hızı ve % katı oranına göre cevap yüzeyi	69
4.2 Knelson Ön Zenginleştirme ve Falcon Deneylei Sonuçları.....	69
4.2.1 40 Hz (78 G) Deneylei	70
4.2.2 45 Hz (99 G) Deneylei	71
4.2.3 50 Hz (123 G) Deneylei	73
4.2.4 55 Hz (148 G) Deneylei	74
BÖLÜM BEŞ-SONUÇLAR	77
KAYNAKLAR	79

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

İnsanoğlu, ilk çağlardan beri doğal kaynaklardan yararlanma yollarını araştırmıştır. Doğal kaynakların başında gelen cevher yataklarından verimli bir şekilde yararlanmayı başarabilen toplumların uygarlık düzeyinde ileri gittikleri tarihteki sayısız örneklerle bilinmektedir. Yer kabuğunu meydana getiren kayalar, 3500 civarındaki mineralin çeşitli bileşimlerde bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Ancak, minerallerin çoğu nadir olup kayalarda en çok izlenenler 250 kadardır. İçerdiği minerallerden biri veya birkaçı ekonomik değer taşıyan kayaca, cevher adı verilmektedir (Önal, 1980).

Ekonomik değer, yer kabuğundan elde edildiği şekli ile var olmakta veya bazı işlemlerin uygulanmasından sonra kazanılmaktadır. Cevherler, nadiren tek bir mineralden, çoğu zaman ise ekonomik değer taşıyan veya taşımayan, farklı fiziksel ve kimyasal özellikli çok sayıda mineralden oluşurlar (Önal, 1980).

Bir cevherdeki çeşitli mineralleri, endüstrinin gereksinimine en uygun hammadde haline getirmek ve ekonomik değer taşıyanları taşımayanlardan ayırmak için yapılan işlemlerin tümüne, cevher hazırlama adı verilmektedir (Önal, 1980).

Yeraltında ve yerüstünde bulunan cevherler bazen yüksek tenörlü olabilirler; bu gibi cevherler çok basit işlemler uygulanarak çeşitli endüstri dallarına ve metalürjik tesislere doğrudan satılabilirler. Diğer taraftan, birçok yeni bulunan veya bilinen rezervler vardır ki tenörleri bu endüstriyel tesislerin şartlarına uymadığı için henüz ekonomik olarak işletilememektedirler. Ne zaman ki yüksek tenörlü cevherler tükenmeye yüz tutarlar ve ne zaman ki dünya piyasalarının belirli minerallere karşı talepleri çeşitli sebeplerle (harp, ekonomik bloke, yeni sanayiler, vb.) artar, o zaman düşük tenörlü rezervlerin işletilmeleri söz konusu olabilir ve bir cevher zenginleştirme tesisine şiddetle ihtiyaç duyulur. Kısaca, cevher zenginleştirme, topaktan çıkartılan cevherin özellikle gang minerallerinden oluşan "Artık" (tailings) kısmını atarak, genel olarak kıymetli mineralini bir araya toplamak ve yüksek tenörlü

bir "Konsantr" (Concentrate) elde etme tekniği olarak tarif edilebilir (Kıdımın, 2009).

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Krom; demir, alüminyum ve bakır ile birlikte endüstride en çok kullanılan önemli metallerden birisidir. Dünyada ve ülkemizde önemli rezervler bulunmakta ve her yıl büyük miktarlarda krom üretimi gerçekleştirilmektedir. Kromun kullanıldığı başlıca sanayi dalları, metalürji, refrakter ve kimya sanayidir. Ancak, ocaktan çıkartılan krom cevherleri, bu sanayi kollarının istediği ürün özelliklerini çoğu zaman sağlamamaktadır. Dolayısıyla, ocaktan çıkartılan krom cevherlerinin endüstrinin istediği özelliklere getirilmesi, bir başka deyişle satılabilir ürün halini alması ancak etkili zenginleştirme işlemleri ile mümkün olabilmektedir.

Kromit cevherlerinde uygulanan zenginleştirme yöntemleri, kromitin serbestleşme derecesine, cevherin ve yantaşın özelliğine göre belirlenmekte ve bazen de birkaç yöntemin kombinasyonu şeklinde uygulamalar görölmektedir.

Esası değerli mineral ile gang minerallerinin yoğunlukları arasındaki farktan yararlanarak akışkan bir ortam içerisinde (genellikle su) değerli minerali değersiz kısımlardan ayırmak olan gravite yöntemler (sallantılı masalar, jig, oluklar, spiraller, multi gravite yöntemler vs.) günümüzde kromit cevherlerinin zenginleştirmesinde sıkça kullanılmaktadır.

Ancak, triyaj (elle ayıklama) ile birlikte klasik gravite yöntemlerinde tane boyutu sınırlayıcı faktör olmakta, bu yöntemler ancak parça cevherler ve iri boyutlarda serbestleşebilen cevherlerde uygulanabilmektedir. Bu tip cevherlerin ise günümüzde azalması ile birlikte klasik gravite yöntemlerinin uygulama alanları gitgide daralmaktadır.

Son yıllarda gravite yöntemlerinde teknolojinin gelişimine bağlı olarak, yüksek santrifüj etkili ayırıcılar geliştirilmiş ve endüstride gittikçe artan kullanım alanları

bulmuştur. Bu ayırıcılar, akışkan ayırma ortamına yerçekiminin 100-150 katına kadar verilen santrifüj etki sayesinde çok ince mineral taneciklerinin zenginleştirilmesine olanak sağlamıştır. Günümüzde, iri boyutta serbestleşen ve %30'un üzerinde Cr_2O_3 içeren parça cevherlerin azaldığı düşünüldüğünde, kromit cevherlerinde multi gravite yöntemlerin önemi ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada, Adana-Aladağ yöresinden temin edilen kromit cevheri üzerinde multi gravite yöntemlerinden Multi Gravite Ayırıcısı (MGS), Knelson ve Falcon ile bir dizi cevher zenginleştirme deneyleri yapılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

1.2 Kromun Tanımı, Tarihçesi ve Özellikleri

Krom, Yunan dilinde renk anlamına gelen chrome'den alınmış olup sert, parlak ve gümüşü renkte bir metale verilen isimdir. İngilizce ve Türkçede ise, otomobillerin parlak ve paslanmaz çelik aksamına "krom" denilmiştir. Daha sonraları, Türkçede krom sözcüğü, tabiatta oksit halinde bulunan kromite veya krom cevherine verilen bir isim olmuştur (Ağaçayak, 2004).

Kromu 1797'de Fransız kimyacı Louis Nicolas Vauquelin Sibirya'da bulunan bir cevher örneğinin içinde bulmuştur. Ancak Birinci Dünya Savaşına kadar krom fazlaca kullanılan bir metal olmamıştır. 1913'de İngiliz bilim adamı Harry Brearley top namlusu dökümünde kullanılacak çelikler üzerinde araştırma yaparken hurdalığındaki bütün çeliklerin birkaçı dışında paslandığını görmüştür. Birkaç parçayı incelemiş ve içlerinde %14 oranında krom bulunduğunu saptamıştır. Bu buluş bıçak, çatal, kaşık ve başka eşyaların yapımında kullanılan paslanmaz çeliklerin geliştirilmesini olanak kılmıştır (Kıdımın, 2009).

Krom endüstride, Fe, Al ve Cu'dan sonra en çok kullanılan önemli metallere birisidir. Kromun, demirle çeşitli koşullarda oluşturduğu alaşımları, çelik sanayinde ısı ve korozyona dayanıklı çelik olarak geniş kullanım alanına sahiptir. Bunlar arasında, yüksek karbonlu ferrokrom, düşük karbonlu ferrokrom, ferrosilikonkrom gibi alaşımları sayabiliriz. Ayrıca, kromun oksijenle oluşturduğu tuzlar, doğal

koşullardan kolay kolay etkilenmedikleri için, boya sanayinin aranan ürünlerindedir (Çilingir, 1996).

Krom cevherinin endüstrideki kullanım alanlarına göre kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri ile ilgili sınırlamalar söz konusudur. Teknolojik gelişmelere uygun olarak cevherin kimyasal bileşiminden kaynaklanan kullanım sınırlamaları giderek daha esnek hale gelmektedir. Kimyasal cevher olarak tanımlanan yüksek demirli krom cevheri, gelişen teknolojiyle artık metalurji sanayinde de kullanılabilir (DPT, 2001).

Krom, doğada en çok bileşik olarak bulunur. Krom, yer kabuğunun doğal bileşenlerinden olup 200 ppm'lik bir dağılıma sahiptir (Serter, 1998). Tablo 1.1'de kromun fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmektedir (Turgut, 1995).

Tablo 1.1 Kromun fiziksel ve kimyasal özellikleri (Turgut, 1995).

Parametre	Özellik
Sembol	Cr
Atom Numarası	24
Atom Ağırlığı	51,996
Atom Çapı	1,18 Å ⁰
Elastisite Modülü	19000 kg/mm ²
Ergime Noktası	1857 ± 20 °C
Kaynama Noktası	2672 °C
Özgül Ağırlığı	7,18 – 7,20 (20 °C'de)
Özgül Isı	0,108 cal/g

1.3 Krom Mineralleri

Krom, tabiatta genellikle oksit olarak bulunur. Ekonomik olarak kullanılan tek krom minerali kromittir. Tablo 1.2'de başlıca krom mineralleri ve özellikleri verilmektedir (Deniz, 1992).

Tablo 1.2 Başlıca krom mineralleri ve özellikleri (Deniz, 1992).

Mineral Adı	Cr ₂ O ₃ (%)	Kristal Sistemi	Renk	Çizgi Rengi	Sertlik (Mohs)	Yoğunluk (g/cm ³)
Kromit	68	Kübik	Gri- Kahve	Koyu Kahve	5,5	4,1 – 4,9
Uvarovit	30,6	Kübik	Zümrüt Yeşili	-	7,5	3,4 – 3,5
Crocoit	30,1	Monoklinik	Sarı- Kırmızı	Turuncu	2,5 – 3	5,9 – 6,1
Daubrejite	53,1	-	-	-	-	-
Dietzeite	15,3	Monoklinik	Altın sarısı	-	3 – 4	3,7
Phoeni Cochroite	17,5	Ortorombik	Sarı- Kırmızı	Tuğla Kırmızısı	3	5,7
Belitle	17,3	Hexagonal	Sarı- Turuncu	-	2,5	5,5
Kemererit	-	Triklinik	Kırmızı- Pembe	-	2-2,5	2,645

Kromit, (Mg, Fe) O.Cr₂O₃ veya Cr₂(Mg, Fe) O₄ genelde ise; (FeO.Cr₂O₃) formülü ile belirtilen yapıdadır ve %67,6 Cr₂O₃ (veya %46,7 Cr) ayrıca yaklaşık %32 Fe içerir (Çilingir, 1996).

Kromit minerali, spinel grubundan ve 2 ve 3 değerlikli katyonlardan oluşan bir oksittir. Kübik sistemde kristalleşir. Kromit, granüle kompakt kütle ve ender olarak oktahedral kristal halinde bulunur. Dilinim içermez. Siyah ile koyu kahve renklidir ve kahverengi çizgi renkleri ile karakteristiktir. Kromit bileşimine magnezyum geniş ölçüde girmekte ve cevher tenörünün %40 düzeylerine kadar düşmesine neden olmaktadır. Bu cevherlerde Mg, Fe'i ornatmakta, pikotit adını almaktadır. Ayrıca Ti, Mn, Zn, Ni ve Co elementlerine de rastlanır (Ağaçayak, 2004).

Kromit minerali yüksek sertlik gösterir, ısıya dayanıklıdır. Magnezit mineralleri ile ısıya dayanıklı seramikler oluşturur. Bu nedenle kromit, refrakter malzeme yapımında (magnezit-krom tuğlaları, krom-magnezit tuğlaları) ve döküm kumu olarak ayrı bir tüketim özelliğine sahiptir (Çilingir, 1996). Tablo 1.3'de kromitin fiziksel özellikleri verilmektedir (Turgut, 1995).

Tablo 1.3 Kromitin fiziksel özellikleri (Turgut, 1995).

Parametre	Özellik
Özgül Ağırlığı	4,1 – 4,9
Sertliği	5,5
Rengi	Parlak siyah
Çizgi rengi	Kahverengi
Genelde manyetik özellik taşımaz.	

1.4 Kromitin Yantaşları

Farklı konumlarda oluşan kromit cevherleri, oluştukları magmanın eriyiklerine bağımlı olarak peridotleri, olivinleri, plajyoklas, feldspatları ve bunların alterasyon ürünleri serpantinleri, talk şistleri ve magnezitleri yan kayaç olarak bulundurulur (Çilingir, 1996). Kromitteki gang minerallerin oranı %5-25 arasında değişir. Kromit cevherinin sıcaklığa dayanıklılığı, düşük sıcaklıkta (1650 °C) ergiyen yantaşlarının miktarına ve türüne bağlıdır. Saf kromit ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) oksidasyon ve indirgmeden dolayı, genellikle ergimeden bozulur (Gence, 1985). Tablo 1.4’de kromit minerali ile beraber en sık rastlanan yantaşlar verilmektedir (Deniz, 1992).

Tablo 1.4 Kromit minerali ile beraber en sık rastlanan yantaşlar (Deniz, 1992).

Kromit Yantaşları	Kimyasal Formülü	Sertlik (Mohs)	Yoğunluk (g/cm^3)
Serpantin	$3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3 – 4	2,6
Olivin	$2(\text{Mg, Fe})\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	7	3,2 – 4,0
Kloritler	$5(\text{Mg, Fe})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2 – 3	2,6 – 3,3
Feldspatlar	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	6 – 6,5	2,5 – 2,8
Piroksen Diopsit	$\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$	5,5 – 6,5	3,2 – 3,6
Enstatit	$\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	5 – 6	3,2 – 4,0
Bronzit	$(\text{Mg, Fe})\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	5 – 6	3,2 – 4,0

1.5 Kromun Doğada Bulunuşu

Kromit minerali ve krom yatakları kökensel olarak ilişkili oldukları ultrabazik kayalar içinde bulunurlar. Ultrabazik kayanın (dunit, serpantinit) oluşturduğu hamura (gang) gömülü kromit kristalleri krom cevherini oluşturmaktadır. Ultrabazik hamur malzemesi içinde kromit kristallerinin ve/veya tanelerinin bulunuş yoğunluğu, sergiledikleri doku ve yapı özellikleri krom cevherinin masif, saçılmış (dissemine), nodüllü, orbiküler, bantlı, masif bantlı ve dissemine bantlı gibi nitelendirilmelerini sağlar. Mg, Cr, Fe, Al elementleri kromit mineralini oluşturan elementler olmakla birlikte, gang minerallerinden kaynaklanan silis de krom cevheri analizlerinin ayrılmaz bir parçasıdır (DPT, 2001).

1.6 Kromit Yatakları ve Oluşum Süreçleri

Krom yataklarının, tamamı ultramafik kayalarla ilişkili olarak oluşmuş kristallenme ile ayrışım yatakları şeklindedir. Ayrışmış kromit eriyiklerinin yan kayalar içine sokulum şeklinde oluşmuş enjeksiyon tipi yataklarının da bulunduğu bilinmektedir (Gökçe, 1995).

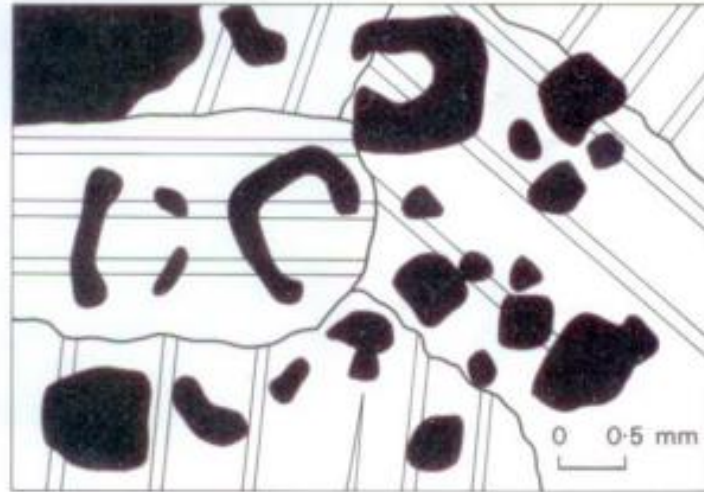
Krom yataklarının ilişkili oldukları ultramafik kayalar; jeolojik konumları, içerdikleri kayaç türleri ve iç yapıları bakımından 3 gruba ayrılmaktadır. Bunlar sırasıyla “stratiform/tabakalı-otijenik masifler, alpin tipi-allojenik masifler ve konsantrik/zonlu-polijenik masifler” şeklinde adlandırılmaktadır. Krom yatakları bu masiflerden hangisi içinde gözleniyorsa ona göre “stratiform/tabakalı tip, alpin/podiform tip veya konsantrik tip” şeklinde tanımlanmaktadır (Gökçe, 1995).

1.6.1 Stratiform Masifler ve İlişkili Krom Yatakları (Stratiform Yataklar)

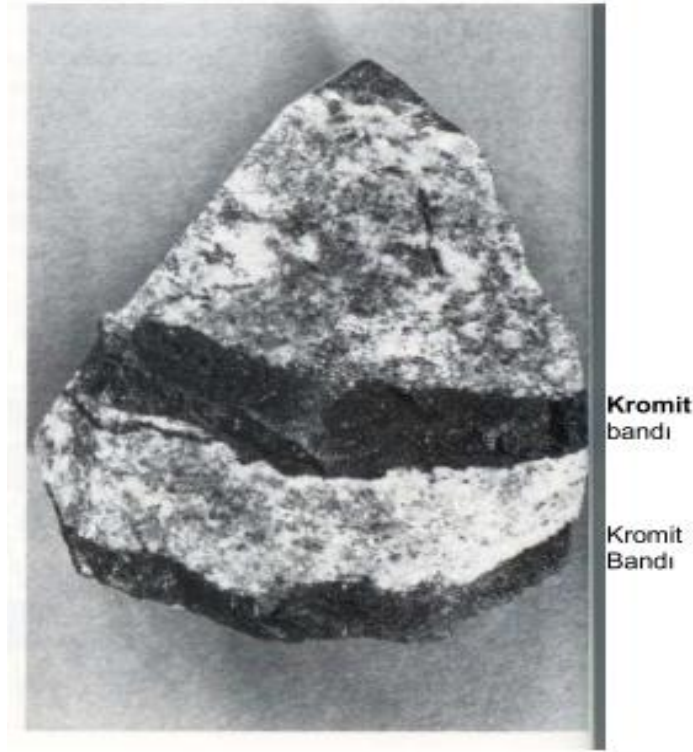
Stratiform masifler kratonik kıtasal plaka içi bölgelerde oluşan derin kırıklar boyunca aniden yükselmiş ve üzerindeki litostatik basıncın kalkması ile önemli ölçüde erimiş manto malzemesinin ayrılaşması ile oluşmuş, tabanda ultramafik kayalardan üst seviyelerde granitoyitlere kadar değişen çeşitli kayaç türlerini içeren,

ortalama gabroik bileşimli, tabakalı iç yapılı, büyük boyutlu Alt Prekambriyen yaşlı masiflerdir. Bu masiflerdeki krom yatakları, özellikle alt seviyelerdeki ultramafik kesimler içinde, kalınlıkları birkaç cm' den 15-20 m' ye kadar değişen, yan kayaçlardaki magmatik bantlaşma düzlemleri ile çok iyi uyum gösteren ve 3-10 km kadar yanal devamlılıkları olabilen bantlar şeklindedirler (Gökçe, 1995).

Bu tip yataklarda, cevherleşme kompakt cevher veya empirenye cevher olarak ortaya çıkar. Çoğu halde de kromit yan kayaçla bantlı yapıda kenetlenmiş durumda ve genelde homojen yapıdadır. Bu tip cevherlerin Cr_2O_3 tenörleri genelde %40'ın altındadır. Demir tenörü yüksek alüminyum tenörü çok düşüktür. Bu cevherlerdeki Cr/Fe oranları 2 civarındadır. Düşük değerli, büyük rezervli krom cevherleridir (Selukwe/Rodezya, Bushweld/Güney Afrika) (Çilingir, 1996). Şekil 1.1'de Güney Afrika/Bushweld kompleksi anortozitler içindeki kromit taneleri, Şekil 1.2'de ise, anortozitler içindeki kromit bantları görülmektedir (Sayılı, 2006).



Şekil 1.1 Güney Afrika/Bushweld kompleksi anortozitler içindeki kromit taneleri (Sayılı, 2006).



Şekil 1.2 Anortozitler içindeki kromit bantları (Sayılı, 2006).

Stratiform tipteki kromit yatakları, dünyada bilinen bütün kromit kaynaklarının %98'ni teşkil eder. Ancak, dünyada üretilen kromitin yarısı podiform yarısı stratiformdur (Zedef, 1995).

1.6.2 Alpin Tipi Masifler ve İlişkili Krom Yatakları (Podiform Yataklar)

Alpin tipi krom yatakları Türkiye' nin de içinde bulunduğu Alp Orojenez Kuşağı boyunca gözlenen ofiyolitik karmaşıklar ve/veya ofiyolitli karışıklar şeklinde tanımlanan birimler içinde gözlenmektedir. Ofiyolitli karmaşıkların tip kesitlerinin okyanus ortası sırt bölgelerinden çıkarılan dikme kesitlerde gözlendiği şekilde oldukları, bu jeoteknik ortamda gelişen magmatik faaliyetler sonucu oluştukları ve yaklaşan plaka sınırlarında okyanusal plakaların kıtasal plakalar üzerine sürüklenmesi sonucu bu günkü konumlarını aldıkları düşünülmektedir (Gökçe, 1995).

Alpin tipi krom yatakları bu kompleksler içinde harzburjit ve dunitlerden oluşan ultramafik tektonit seviyesinde özellikle dunitik bir kılıfla sarılmış olarak büyük mercekler, küçük cepler, torba ve çorap şekilli kütleler, ender olarak ta kalem, boru ve levha şekilli zenginleşmeler şeklinde gözlenmektedir. Bu yataklar yan kayaçla ilişkileri bakımından genellikle uyumlu, yer yer ise yarı uyumlu ve/veya uyumsuz yataklanmalar göstermektedir (Gökçe, 1995).

Alpin tipi krom yataklarında kromit kristalleri genellikle büyük boyutlu olup kristal kümelerinde nodüler, antinodüler ve orbiküler dokular ile magmatik akıntı ve plastik deformasyon izleri olarak tanımlanabilecek foliasyon, lineasyon ve kopma yapı ve dokuları gözlenmektedir (Gökçe, 1995).

Bu tip cevher yataklarında, cevherleşme mercekler şeklinde ve inhomojendir. Cr_2O_3 tenörleri %10-50 arasında değişebilir. Cr/Fe oranlarında da aynı cevherleşme içinde farklılıklar görülür ve bu oran bazen yüksek olsa da, genelde 2,8-3,0 arasındadır. Dolayısıyla bu cevherler, ferrokrom üretimi için değerlendirilir (Guleman/Türkiye). Yan kayaç olarak serpantinler, talk, karbonatik kayaçlar ve dunitler söz konusudur. Çok selektif üretim yapıldığında, iyi kaliteli parça cevher üretilebilir (Çilingir, 1996).

Alpin tip cevherler, Cr/Fe oranlarının stratiform tip cevherlere göre daha yüksek olması nedeniyle 1970' li yıllara kadar metalurji sanayinde rakipsiz olarak kullanılmıştır. Bu yüzden yüzyılın ilk üç çeyreğinde kromit üretimi daha çok alpin tip yataklardan yapılmıştır. Cr_2O_3 içeriği ve Cr/Fe oranı düşük, FeO içeriği yüksek olan stratiform tip yataklardan üretilen cevher ise, 1970' li yıllara kadar genelde kimya sanayinde kullanılmıştır (DPT, 2001).

Ancak Alpin tip yataklarda rezerv belirleme güçlüğü ve uzun vadeli ticari bağlantıların yapılamaması gibi nedenler, stratiform tip yataklara ait krom cevherinin özellikle metalürji sanayinde kullanımına imkan sağlayan teknolojileri geliştirmeyi zorlamış; elde edilen olumlu sonuçlara bağlı olarak da bu tip yataklardan yapılan krom cevheri üretimi giderek artma eğilimi göstermeye başlamıştır (DPT, 2001).

1.6.3 Konsantrik Tip Krom Yatakları

Bunların bugün için ekonomik önemi yoktur. Genellikle Alaska'da görülen bu tip yataklardan üretim yapılmamaktadır. Bununla birlikte ABD' de, bu kromitlerin zenginleştirilmesi testleri ve bunların ekonomikliği konusunda çalışmalar yapıldığı bilinmektedir. Bu tip yataklar genellikle yüksek demirli krom cevheri içerir (DPT, 2001).

Yukarıda anlatılan 3 önemli krom yataklarından başka, sedimenter krom yataklarının (plaser yataklar) varlığından da söz edilebilir.

Doğal koşullarda dayanıklı olan kromit içeren ana kayalar alterasyona uğrayıp kendi yakınlarında veya anakayaçlardan uzaklara taşınmış olarak yataklar oluşturabilirler. Bu tip yataklara az da olsa rastlanmaktadır (Great Dyke Zonu/Güney Afrika, Kempirsaj/Rusya). Bu yataklarda Cr_2O_3 yüzdesi %5-30 arasında ve genellikle %15 civarında olmaktadır. Yan kayaç olarak ana kayaç minerallerine ve onun alterasyon ürünlerine rastlanılmaktadır (Çilingir, 1996).

Plaser krom yatakları, alüvyal kökenli plaserlerden oluşur. Alüvyal kromit plaserleri, rüzgarın etkisi ile birincil kayacın ayrışması sonucu oluşur. Birincil yataklara oranla ticari önemleri daha azdır. Bazı durumlarda 1-2 m³'e varan büyüklükte kromit bloklarına rastlanılmaktadır. Yamaç üzerinde çöküntü alanlarının bulunduğu yerlerde kromit daha fazla derişme şansı bulmuştur. Bu şekilde zenginleşmiş olan yataklar yüksek Cr_2O_3 değerleri verir. Alüvyal plaser krom yataklarına Urallar (Warsow yatakları), Küba, Filipinler, Yeni Kaledonya, Adriatik Denizi ile kıyısı bulunan ülkelerde ve Türkiye'de rastlanılmaktadır (Aykol ve Gültekin, 1992).

Plaserlerde rastlanılan kromit siyah renklidir. İnce levha halinde rengi kahverengiye kaçır. Atmosferik ayrışmaya karşı dayanıklı bir mineraldir. İlmenite benzer şekilde zaman zaman konkoidal yüzeyler gösterir. Sahil kumlarında,

alüvyonlar içinde bulunduğundan daha ince taneli ve yuvarlaklaşmıştır. Kızdırıldığında miknatis özelliği kazanır (Aykol ve Gültekin, 1992).

1.7 Dünya’da ve Türkiye’de Kromit Madenciliği

Krom yatakları, maden yatağının boyutuna ve topografyaya bağlı olarak açık veya yeraltı işletme yöntemleriyle işletilmektedir. Geçmiş yıllarda birçok krom yatağı açık işletme yöntemiyle işletilmişse de günümüzde krom yatakları büyük çoğunlukla yeraltı işletme yöntemleriyle işletilmektedir (DPT,2001).

Dünyanın en büyük iki üreticisi Güney Afrika ve Kazakistan' dır. Güney Afrika Cumhuriyeti' ndeki krom yataklarının büyük bir kısmı yeraltı madencilik yöntemi ile işletilmektedir. Kazakistan'daki yatakların ise çoğunlukla açık işletme yöntemleriyle işletildiği belirtilmektedir. Açık işletme yöntemiyle işletilen bir krom yatağı, örneğin Batı Kef (Guleman, Elazığ) yatağında olduğu gibi açık işletmeyle başlayıp, bilahare yeraltı işletmesine dönüştürülebilmektedir. Daha sonra işletme çalışmaları sırasında ortaya konan maden yatağıyla ilgili yeni verilere dayanılarak yeniden açık işletme yöntemine dönülmesine karar verildiği durumlar da söz konusu olabilmektedir (DPT, 2001).

Krom cevheri, ocak çıkışında çoğu halde elle seçme, elekten geçirme, yıkama yoluyla (gang tabir edilen) silikat minerallerinin cevherin bünyesinden ayıklanması sonucu zenginleştirilebilmektedir. Daha ileri aşamada jigler, spiraller, sallantılı masalar veya manyetik ayırıcılar yöntemleri ile düşük tenörlü cevherin bünyesindeki silikat gangı temizlenerek kromit mineralinin zenginleşmesi sağlanır; diğer bir ifadeyle konsantre kromit elde edilir. Konsantre krom cevheri üretiminde en yaygın uygulama, kromit mineraliyle gangı oluşturan olivin, piroksen ve serpantin mineralleri arasındaki yoğunluk farkı esasına dayalı sallantılı masalar yöntemidir. Manyetik separasyon, flotasyon ve ağır sıvı yöntemleri de bazı işletmelerde kullanılan zenginleştirme yöntemleridir (DPT, 2001).

1.7.1 Dünya’da Kromit Madenciliği

Dünyada ilk krom cevheri üretimi 1797 yılında Ural’da yapılmıştır. Dünya krom cevheri üretimi bazı dalgalanmalara karşın, giderek artan bir gelişme sergilemektedir. Dünya üretimi 1960 yılında 4 432 000 ton, 1970’ de 6 053 000 ton, 1980’ de 10 211 000 ton, 1990’ da 13 641 000 ton, 1995’ de 14 500 000 ton, 1997’ de 12 500 000 ton, 1998’ de 12 600 000 ton’ dur. 1997-1998’ de 1995’ e göre bir miktar düşüş söz konusu ise de bu genel trendi etkilememektedir (DPT, 2001). 1997-2007 yılları arasında ise, %5’in üzerinde artmış ve dünya ekonomisindeki gelişmelerden dolayı bu artış 2002-2007 yılları arasında %12 olmuştur (Tahtakıran, 2008). Tablo 1.5’ de dünya krom üreticisi ülkeler, Tablo 1.6’ da ise, 2008 yılı verileriyle dünya kromit cevheri ve konsantre üretimi verilmektedir.

Tablo 1.5 Dünya krom üreticisi ülkeler (DPT, 2001).

Avrupa	Finlandiya, Yunanistan, Yugoslavya, Slovenya, Makedonya, Hırvatistan
Afrika	Mısır, Madagaskar, Güney Afrika, Sudan, Zimbabve
Asya	Kıbrıs, Hindistan, İran, Japonya, Pakistan, Filipinler, Tayland, Myamar, Umman
Amerika	Arjantin, Brezilya, Kolombiya
Okyanusya	Avustralya, Yeni Kaledonya
Diğer Ülkeler	Arnavutluk, Kazakistan, Rusya, Vietnam, Küba

Tablo 1.6 Dünya kromit cevheri ve konsantre üretimi (Tahtakıran,2008).

	2002	2003	2004	2005	2006	2007
G. Afrika	6 372 739	7 136 666	7 309 575	7 244 112	6 865 279	8 720 330
Kazakistan	2 349 640	2 781 725	3 290 000	3 581 242	3 366 078	3 687 200
Hindistan	2 698 577	2 210 000	2 948 944	3 255 162	3 600 400	3 320 000
Türkiye	313 637	229 294	506 421	858 729	1 059 901	1 678 932
Zimbabve	734 011	666 357	621 269	819 903	712 908	663 593
Brezilya	279 684	510 640	622 755	676 643	604 145	625 627
Finlandiya	566 090	549 040	579 780	571 103	548 713	556 100
Diğer Ülk.	797 024	1 048 441	1 723 707	2 133 815	2 483 747	2 902 527
TOPLAM	14 111 402	15 132 163	17 602 451	19 140 709	19 241 171	22 154 309

1.7.2 Türkiye’de Kromit Yatakları ve Kromit Madenciliği

Krom yataklarının içinde bulunduğu peridotit genel adıyla anılan ultrabazik kayalar Türkiye’de geniş alanlar kaplarlar. Peridotitler, ofiyolit topluluğuna ait kayalar olup Alp orojen kuşağı boyunca yerleşmişlerdir. Alpin tip krom yataklarının sergiledikleri karmaşık yapı ilişkileri, doku özellikleri ve nispeten küçük boyutlu oluşları bunların belirgin özellikleridir. Alpin tip krom yataklarında kromitin Cr_2O_3 tenörü stratiform tiptekilere göre daha geniş bir aralıkta fazla değişiklik göstermemektedir. Türkiye’de krom yatakları belirgin bir dağılım düzeni göstermeksizin ultrabazik kayalar içinde ülke geneline yayılmış durumdadır. Türkiye’de 800 kadar tek veya grup halinde krom yatağı ve krom cevheri zuhuru bilinmektedir (Ağaçayak, 2004). Şekil 1.3’de Türkiye krom yatakları haritası verilmektedir (<http://berkaymadencilik.com.tr>)

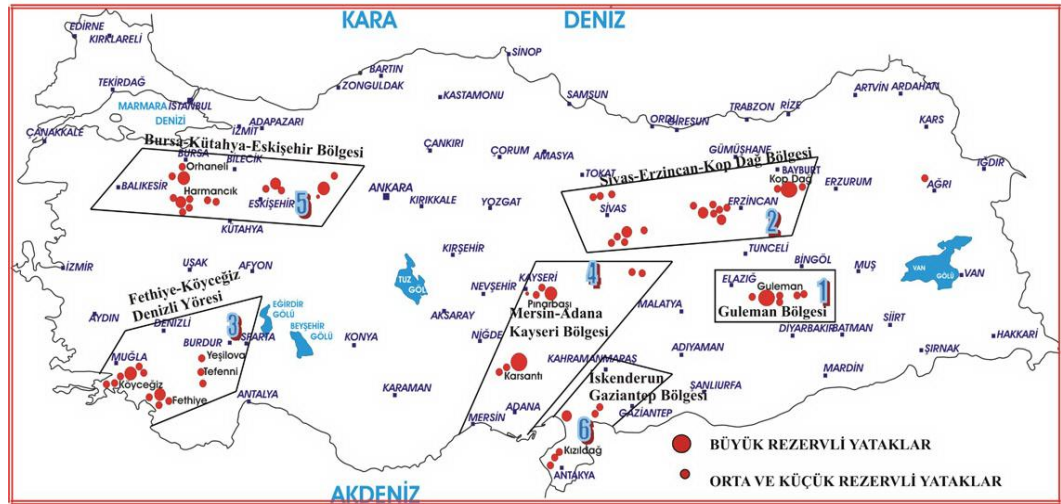
Türkiye’de krom cevherinin ilk kez 1848 yılında Harmancık (Bursa) yöresinde bulunduğu bilinmektedir. Krom cevherinin bulunuşuyla birlikte Türkiye dünya krom pazarlarında önemli bir yere sahip olagelmiştir. Türkiye'nin üretimi bazı yıllar dünya

sıralamasında ilk sırayı almışsa da, genellikle 3.ve 6. sıralar arasındaki yerini devamlı korumuştur (DPT, 2001).

Coğrafi yönden krom yataklarının dağılımını 6 bölgede toplamak mümkündür. Bunlar nispi önem sırasına göre şöyle verilebilir (DPT, 2001):

- 1- Guleman (Elazığ) yöresi,
- 2- Fethiye-Köyceğiz-Denizli yöresi,
- 3- Bursa-Kütahya-Eskişehir yöresi,
- 4- Mersin-Karsantı-Pınarbaşı yöresi,
- 5- Erzincan-Kopdağ yöresi,
- 6- İskenderun-Kahramanmaraş yöresi.

Bu altı bölgenin dışında da dağınık bazı krom yataklarının bulunduğu bilinmektedir.



Şekil 1.3 Türkiye krom yatakları haritası (<http://berkaymadencilik.com.tr>)

1.8 Ürün Standartları ve Kullanım Alanları

Krom cevherleri ticari olarak yalnızca Cr_2O_3 içeriklerine bakılarak sınıflandırılabilir gibi, kimyasal bileşimleri ve fiziksel özellikleri dikkate alınarak da sınıflandırılmaktadır. Sadece Cr_2O_3 içeriklerine bakıldığında; birinci, ikinci ve üçüncü kalite şeklinde sınıflandırılırlar. Buna göre;

Cr_2O_3 içeriği % 40'dan az olanlar (3. kalite),

Cr_2O_3 içeriği % 40-46 arasında olanlar (2. kalite),

Cr_2O_3 içeriği % 46'dan fazla olanlar (1. kalite) (DPT, 2001).

Element içerikleri dikkate alınarak kimyasal bileşimleri ve fiziksel özelliklerine göre metalurji, kimya, refrakter ve döküm endüstrilerinde kullanıma uygun cevherler diye ayrıca sınıflandırılırlar (DPT, 2001).

Krom cevherinin kimyasal bileşimi incelenirken Cr_2O_3 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO ve SiO_2 değerlerinin dikkate alınması gerekir. Öte yandan, oran olarak az bulunmalarına karşın Ca, P ve S içeriklerinin de, krom cevherinin kullanım alanlarını etkileyen elementler olarak ayrıca incelenmesi gerekebilir (DPT, 2001). Krom cevherinin kullanım alanlarına göre istenilen bileşim oranları Tablo 1.7'de verilmektedir (Temur, 1997).

Tablo 1.7 Krom cevherinin kullanım alanlarına göre istenilen bileşim oranları (%) (Temur, 1997).

Cevher Tipi	Cr/Fe	Cr_2O_3	$\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	P	Fe	Cu
Metalurjik	3	46-48	-	0,085	0,04	-
Kimya	1,6	44	-	-	-	-
Refrakter	-	31	58	-	-	1

Dünyada kromitin kullanıldığı sektörler göre tüketim alanları ise şöyle sıralanabilir :

a- Metalurji sanayi : % 50-65 tüketim payı,

b- Refrakter sanayi : % 20-25 tüketim payı,

c- Kimya sanayi : % 15-20 tüketim payı (Çilingir, 1996).

1.8.1 Metalurji Sanayinde Kullanım

Metalurji sanayi, krom cevherinin en fazla kullanıldığı yerdir. Fiziki özellik bakımından cevherin sert, parça cevherler olması tercih edilirse de, konsantre krom tozları da kullanılabilir (Kıdımın, 2009).

Metalurji sanayiinde krom; ferrokrom, ferro-siliko-krom, krom bileşikleri, ekzotermik krom katkıları, diğer krom alaşımları ve krom metali şeklinde tüketilir (DPT, 2001).

Metalurji sanayinde krom cevherinin en önemli kullanım alanı paslanmaz çelik yapımında kullanılan ferrokrom üretimidir. ferrokrom ise paslanmaz çelik metal ve silah sanayinin çok önemli bir maddesidir. Krom; çeliğe sertlik ile kırılma ve darbelere karşı direnç verir, aşınma ve oksitlenmeye karşı koruma sağlar (Kıdımın, 2009).

Üretilen ferrokromdaki krom yüzdesi, istenilen Cr tenörü ve Cr/Fe oranının artmasıyla artar. Bu nedenle kromit konsantrelerinde Cr/Fe oranının mümkün olduğu kadar yüksek olması istenir. Genelde ferrokrom üretiminde 2,8 – 3'den yüksek konsantrelere prim ödenir (Kıdımın, 2009).

Ferrokrom; krom ve demirden meydana gelmiş bir alaşım olup, az miktarda karbon ve silisyum gibi elementler de içermektedir. Teknikte ferrokrom ihtiva ettiği karbon miktarına göre genel olarak 3 grupta toplanır:

%0,02 – 0,5 C	Düşük karbonlu ferrokrom,
%0,50 – 4 C	Orta karbonlu ferrokrom,
%4 – 8 C	Yüksek karbonlu ferrokrom (Kıdımın, 2009).

Krom, çeliğe başlıca yüksek karbonlu ferrokrom şeklinde ilave edilir. ABD' de son 10 yılda toplam ferrokrom tüketimi içinde yüksek karbonlu ferrokrom tüketiminin payı % 71'den % 91 oranına yükselmiştir (DPT, 2001).

Bu kapsamda kromun çeşitli alaşımları mermi, denizaltı, gemi, uçak, top ve silahlarla ilgili destek sistemlerinde kullanılır. Paslanmaz çeliğin dayanıklılığının yanı sıra, kullanıldığı yerlere estetik bir görünüm kazandırması bu malzemenin son yıllarda otobüslerin ve tren vagonlarının, şehir içlerinde otobüs duraklarının yapımında, cadde ve sokak aydınlatma sistemlerinde, binalarda merdiven korkuluklarının yapımında ve deniz içi petrol arama platformlarının yapımında giderek artan oranlarda kullanılmasını sağlamıştır. Kromun süper alaşımları ısıya dayanıklı, yüksek verimli türbin motorlarının yapımında kullanılmaktadır (DPT, 2001).

Krom metali, yüksek performans alaşımlarında, Al, Ti, Cu alaşımlarında, ısıya ve elektriğe dirençli alaşımlarda kullanılmaktadır (DPT, 2001).

Bu sanayide kullanılan kromit konsantrelerinde istenilen özellikler Tablo 1.8'de verilmektedir (Ağaçayak, 2004).

Tablo 1.8 Metalurji sanayinde kullanılan kromit konsantrelerinde istenilen özellikler (Ağaçayak, 2004).

% Cr ₂ O ₃	46-48' den fazla
Cr/Fe oranı	3/1 – 2,8/1'den yüksek
% SiO ₂	5,6 – max 8
% (Al ₂ O ₃ +MgO)	25'den az
% S	0,07' den az
% P	0,07' den az

1.8.2 Refrakter Sanayinde Kullanım

Cr_2O_3 yanında Al_2O_3 miktarı daha fazla olan cevherler refrakter sanayinde tuğla üretiminde kullanılır ve “refrakter” olarak adlandırılır. Refrakter yapımında kullanılan kromitte % Al_2O_3 oranının mümkün olduğu kadar yüksek olması istenir. Al_2O_3 , refrakter malzemenin kimyasal ve mekanik dayanıklılığını artırmaktadır (Ağaçayak, 2004).

Kromit, kimyasal olarak nötr ve ergime noktası yüksek bir mineraldir. Yüksek sıcaklıkta asidik ve bazik ortamda mukavemetlidir. Bu özelliklerden dolayı, izabe fırınlarının iç yüzeylerinin örülmesinde kullanılır. Ateş tuğlası, ateş çimentosu ve ateş toprağı kromitin önemli refrakter ürünlerindedir. Kromlu refrakter, başlıca çelik endüstrisi ile cam ve kağıt endüstrisinde kullanılmaktadır (Ağaçayak, 2004).

Kromun savunma sanayinde kullanılması onu stratejik bir element yapmıştır. Kromun çeşitli alaşımları mermi, denizaltı, gemi, uçak, silahla ilgili destek sistemlerinde kullanılmaktadır. Krom sparge alaşımları, yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerin kullanıldığı randımanı yüksek, askeri amaçlı türbin motorların yapımında, krom kimyasalları paslanmayı geciktirici özellikleriyle uçak ve gemi sanayinde kullanılmaktadır (Kıdıman, 2009).

Kromun refrakter sanayisindeki kullanımında, ABD'deki çelik üretimi teknolojisindeki gelişmeler sonucu, 1980'lerden itibaren bir azalma gözlenmektedir. Örneğin 1980'lerin ortalarında refrakter kromit tüketimi ortalama %17 iken, günümüzde %8 düzeyine düşmüştür. Bu değişimin sebebi ise, ABD çelik üretiminde "Open heart" açık ocak yönteminden AOD (Argon-Oksijen-Dekarburizasyon) yöntemine geçilmesi sonucu, magnezyum-krom refrakterlerinin yerini magnezyum karbon refrakterlerinin almasıdır (Kıdıman, 2009).

Refrakter sanayinde kullanılan kromit konsantrelerinde istenilen özellikler Tablo 1.9'da verilmektedir (Ağaçayak, 2004).

Tablo 1.9 Refrakter sanayinde kullanılan kromit konsantrlerinde istenilen özellikler (Ağaçayak, 2004).

% Cr ₂ O ₃	En az 30
Cr/Fe oranı	3/1'den az
% SiO ₂	5'den az
% (Al ₂ O ₃ + Cr ₂ O ₃)	En az 60
% Al ₂ O ₃	En az 20
% FeO	15'den az
% CaO	2'den az

1.8.3 Kimya Sanayinde Kullanım

Kimyasal kromit konsantrlerinin ince taneli ve yüksek Cr₂O₃ tenörlü olması, Al₂O₃ ve SiO₂ tenörlerinin çok az olması istenir (Kıdımın, 2009).

Çoğu krom kimyasalları, kimyasal kalitedeki krom cevherinden doğrudan elde edilen sodyum bikromattan üretilir. Sodyum bikromat, kromik anhidrit ve krom oksit en yaygın kullanılan krom kimyasallarıdır. Ticari olarak üretilen diğer tali bileşikler, kurşun kromat, bazik krom sülfat, sodyum kromat, potasyum bikromat, potasyum çinko kromat ve amonyum bikromattır (Kıdımın, 2009).

Krom kimyasalları paslanmayı önleyici özellikleri nedeniyle uçak ve gemi sanayinde yaygın olarak; kimya endüstrisinde de sodyum bikromat, kromik asit ve boya hammaddesi yapımında kullanılmaktadır (Kıdımın, 2009).

Sanayileşmiş ülkelerde krom kimyasalları tüketiminde artış olan başlıca alan ağaç malzemeleri çürümesini önleyici maddeler imalidir. ABD'de çevresel kısıtlamalar bu alanda geleneksel maddelerin kullanımını sınırlandırmaktadır. ABD'de 1980'lerin sonlarında ağaç çürüme önleyicileri imalinde krom kimyasalları tüketimindeki yıllık artış hızı %10 olmuştur (Kıdımın, 2009).

Piyasadaki krom bileşikleri:

- Sodyum kromat
- Potasyum kromat
- Kromik asit
- Amonyum kromat
- Amonyum bikromat
- Baryum kromat
- Kurşun kromat
- Kalsiyum kromat
- Demir kromat
- Bazik krom sülfat'tır (Kıdımın, 2009).

Krom kimyasalları, deri tabaklama, çeşitli renkte pigment elde edilmesinde, organik maddelerin oksidasyonunda, korozyon önlemlerinde, yağların, mumların ve sabunların ağartılmasında, tekstil maddelerinin boyanmasında, kibrit endüstrisinde, yangın malzemesi imalinde, fotoğrafçılıkta, analitik ayıraçlarda, emaye ve seramik endüstrisinde yaygın olarak kullanılır (Kıdımın, 2009).

Bu sanayide kullanılan kromit konsantrelerinde istenilen özellikler Tablo 1.10'da verilmektedir (Ağaçayak, 2004).

Tablo 1.10 Kimya sanayinde kullanılan kromit konsantrelerinde istenilen özellikler (Ağaçayak, 2004).

% Cr ₂ O ₃	44 – 48'den fazla
Cr/Fe oranı	2/1'den az
% SiO ₂	5'den az
% MgO	15'den az
% Al ₂ O ₃	15'den az
% FeO	5'den az
% CaO	1,5'dan az

1.9 Kromit Zenginleştirme Yöntemleri

Kromit birlikte bulunduğu gang minerallerine oranla yoğunluğu yüksek bir mineraldir. Serbestleşme tane boyutu olarak sağladığı sürece, en uygun zenginleştirme yöntemi gravite ayırmasıdır. Cevher iri boyutta serbestleşiyorsa ağır ortam veya jig ile ayırma yapılabilir. Sallantılı masa ile zenginleştirme daha ince boyutlarda serbestleşme sağlandığında tercih edilmektedir. Kromit ile gang mineralleri arasındaki manyetik duyarlılık az olduğundan, önceleri olumlu sonuçlar alınmayan manyetik zenginleştirme, geliştirilen yeni manyetik ayırıcılarla, bazı tesislerde kullanılır olmuştur (Kıdıman, 2009).

Ancak, ince tane boyutlarında serbestleşen ve gravite veya diğer yöntemlerle ayrılması ekonomik olmayan cevherlerde, flotasyon ile zenginleştirme yapılmaktadır. Yağ asitleri, sülfonatlar ve amin tipi toplayıcılarla kromit yüzdürülmesi mümkündür. Toplayıcı reaktif yağ asidi olduğunda, gang minerallerinin bastırılması için sodyum silikat veya kalgon ilavesi yapılır. Asit ortamda kromit yüzdürülmesi için kalsiyum tuzu ile kromit canlandırılır ve sülfat ve sülfonatlarla yüzdürülür (Kıdıman, 2009).

Kromit, asit ve bazlara karşı dayanıklı bir mineraldir. Kimyasal yöntemler açısından değişik uygulamalar söz konusudur. Asit ve alkali liçi, ergitme yöntemi kromitin zenginleştirilmesinde kullanılan kimyasal yöntemlerdir (Kıdıman, 2009).

Kromit cevherlerinin zenginleştirilmesinde uygulanacak zenginleştirme yöntemini ve yöntem kombinasyonlarını;

- 1- Cevherin serbestleşme tane iriliği,
- 2- Cevherden üretilebilecek konsantredeki Al_2O_3 , SiO_2 , FeO ve Cr_2O_3 tenörleri, Cr/Fe faktörü (Cevher kullanım kalitesi),
- 3- Gang mineralleri ile kromit mineralinin arasındaki fiziksel, fizikokimyasal özellik farkları (yoğunluk, manyetik özellik, renk) belirler (Çilingir, 1996).

Kromit başlıca üç yöntem kullanılarak zenginleştirilmektedir. Bunlar;

- Özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme,
- Manyetik ayırma ile zenginleştirme,
- Flotasyon ile zenginleştirme'dir (Kıdımın, 2009).

Bu zamana kadar uygulama alanı bulabilen kromit zenginleştirme yöntemleri Tablo 1.11'de verilmektedir. Kromit cevherinin serbestleşme derecesine, cevher karakterine, gang minerallerinin cinsine bağlı olarak bu yöntemlerin biri ve birkaçının kombinasyonunu kullanmak mümkündür (Kıdımın, 2009).

Tablo 1.11 Uygulama alanı bulabilen kromit zenginleştirme yöntemleri sınıflandırması (Kıdımın, 2009).

1. El ile ayıklama	
2. Özgül ağırlık farkına göre gravite ile zenginleştirme	<ol style="list-style-type: none"> 1. Oluklar 2. Ağır ortam ayırması 3. Humprey spiralleri 4. Dyna – Whirpool 5. Jig 6. Sallantılı masa 7. Multi Gravite Ayırıcısı (MGS)
3. Manyetik ayırma ile zenginleştirme	
4. Elektrostatik ayırma ile zenginleştirme	
5. Flotasyon ile zenginleştirme	<ol style="list-style-type: none"> 1. Klasik flotasyon 2. Kolon flotasyonu 3. Ultra flotasyon 4. Yüksek sıcaklık flotasyonu 5. Jet flotasyonu 6. Yağ flotasyonu 7. Aglomerasyon yolu 8. Elektro flotasyonu

Tablo 1.11 (devamı)

6. Kimyasal yöntemlerle zenginleştirme	<ol style="list-style-type: none"> 1. Asit liçi 2. Bazik liç 3. Seçimli gazlı indirgeme yöntemi 4. Katı hal indirgeme yöntemi 5. Ergitme yöntemi
--	---

1.9.1 El ile Ayıklama (Triyaj, Tavuklama) ile Zenginleştirme

Minerallerin renk, parlaklık, fluoresans, radyoaktivite, özgül ağırlık ve genel görünüm farklılıklarından yararlanılarak elle seçilerek birbirinden ayrılmasına el ile ayıklama ile zenginleştirme denilmektedir (Önal, 1980).

Ayıklama veya yabancı literatürden Türkçeye geçmiş deyimiyile Triyaj, madenciliğin ilk uygulamalarındandır. Elle ayıklama günümüze kadar devam etmiş ve bugün de elle ayıklama yerine modern otomatik ayıklayıcılarla uygulamalar devam etmektedir (Yiğit, 1994)

Triyaj ile zenginleştirmede kromitin; renk, parlaklık, özgül ağırlık gibi özelliklerinin gang minerallerinden farklı olmasından yararlanır. Kromitin gang minerallerinden iri boyutlarda serbest kalması ile gerçekleşebilir ve bazen tek başına bir zenginleştirme işlemi olarak bazen de zenginleştirme işlemi öncesinde bir işlem olarak uygulanır (Gence, 1985).

Bilhassa metalurjik ve refrakter kalitedeki kromit konsantrelerinin parça cevher veya iri taneli olması istenir. Bu iri taneli konsantreler ve parça cevher en aranan ürünler olduğu için, cevherin serbestleşme tane iriliği parça cevher üretimine ve kalitesi metalurjik veya refrakter konsantre üretimine uygun ise, mutlaka tavuklama işlemi uygulanır. Yalnız, işçiliğin çok pahalı olduğu yörelerde iri taneli cevherlere tavuklama uygulanmaz. Bu durumda iri taneli parça cevher üretebilen teknolojik yöntemler seçilir. Ayrıca, tavuklama işleminde konsantreye alınan metal verimi düşük olmaktadır. Bu nedenle kısmen iri taneli cevherlerde triyaj, iyi kalite parça

cevher üretmek için bir ön işlem olarak uygulanır. Daha sonra triyaj artığı diğer teknolojik yöntemlerle değerlendirilir (Çilingir, 1996).

Ülkemizdeki birçok kromit işletmesinde, işletmeler küçük üretim kapasitesinde olduklarından ve cevherlerin de parça cevher üretimine uygun olmasından, yalnızca triyaj işlemi yapılmaktadır. 25 mm'lik eleklerden geçirilen cevherin +25 mm'lik kısmı tavuklamaya tabi tutulur. Bu tarz yapılan zenginleştirmede triyaj atıklarında fazlaca kromit kaldığından bu atıkların ileride zenginleştirilmek üzere düzgün olarak stoklanması gerekir. İşlemden sonra triyaj artığı diğer teknolojik yöntemlerle birlikte değerlendirilir (Kıdıman, 2009).

1.9.2 Özgül Ağırlık Farkına Göre Zenginleştirme (Gravite ile Zenginleştirme)

Mineral tanelerinin, aralarındaki özgül ağırlık farklılığının neden olduğu, akışkan ortamlardaki hareket farklılığına dayanılarak, birbirlerinden ayrılması ile gerçekleştirilen zenginleştirmeye özgül ağırlık farkı ile zenginleştirme veya gravite zenginleştirme adı verilir (Önal, 1980)

Bu yöntemde; kromit ile gang mineralleri arasındaki özgül ağırlık farklılığının neden olduğu, akışkan ortamdaki hareket farklılığına dayanılarak birbirinden ayrılması ile zenginleştirme gerçekleştirilir (Ağaçayak, 2004).

İçerisinde yan kayaç olarak yüksek oranda peridotit kayaç parçaları ve özellikle olivin (yoğunluğu 3,5–4 g/cm³) içeren cevherin yoğunluğuna göre zenginleştirilmeleri mümkün olmaktadır. Ancak cevherdeki olivin oranı az ise özgül ağırlık farkına göre üretilen konsantre, manyetik ayırıcı ile temizlenerek daha yüksek Cr₂O₃ tenörlü nihai konsantre üretilir. Olivin mineralinin olmadığı durumlarda kromit ve gang mineralleri arasındaki yoğunluk farkı oldukça fazla olduğundan manyetik zenginleştirme yöntemleriyle zenginleştirme yapılır. Gravite ile zenginleştirmenin verimi konsantrasyon kriterine bağlıdır (Kurşun, 1993).

Katı tanelerinin akışkan ortam içerisindeki hareketlerinin incelenmesi ile ilgili çalışmalar sonucunda, Taggart tarafından zenginleştirme kriteri olarak tanımlanan bir değer ortaya çıkartılmıştır. Zenginleştirme (konsantrasyon) kriterinin değeri, özgül ağırlık farkı ile zenginleştirmenin hangi boyutlarda ve hangi yöntemle uygulanabileceği hakkında genel bir fikir vermektedir (Ergin, Cöcen, ve Semerkant, 1998). Buna göre;

$$k = (\rho_A - \rho) / (\rho_H - \rho)$$

k = konsantrasyon kriteri

ρ_A = Ağır mineralin özgül ağırlığı

ρ_H = Hafif mineralin özgül ağırlığı

ρ = Akışkan ortamın özgül ağırlığı

$k > 2,5$ ise; ayırma çok küçük boyutlara kadar kolayca uygulanabilir. Serbestleşme boyutuna bağlı olarak bütün gravite yöntemleri kullanılabilir.

$2.5 > k > 1.75$ ise; ayırma yine kolaydır. Ancak 0,1 mm'ye kadar uygulanabilir. Serbestleşme boyutuna bağlı olarak bütün gravite yöntemleri kullanılabilir.

$1.75 > k > 1.50$ ise; ayırma güçleşir, alt uygulama boyutu 1 mm'dir. Ağır ortam ve jig kullanılabilir.

$1.5 > k > 1.25$ ise; ayırma oldukça güçtür. Ancak, çakıl büyüklüğündeki tanelere uygulanabilir. Ağır ortam ve jig kullanılabilir.

$k < 1.25$ ise; ekonomik bir ayırma mümkün değildir. Ancak akışkanın özgül ağırlığı arttırılarak ayırma yapılabilir (Taggart, 1951).

Kromit zenginleştirmesinde en yaygın zenginleştirme yöntemi, yoğunluğa göre zenginleştirme yöntemlerinden sallantılı masalarda zenginleştirme, jiglerde zenginleştirme ve Humprey spirallerinde zenginleştirmedir (2,5-3 cm ile 0,2 mm arasında serbestleşebilen cevherlere uygulanır) (Çilingir, 1996).

Cevher, iri tanelerde (30-5 mm) yeterli miktarda serbestleşiyorsa; önce jiglerde işlenerek iyi kaliteli parça cevher üretimi yapılır ve jig artıkları öğütülerek sallantılı masalardan geçirilir (Çilingir, 1996).

Cevherin serbestleşmesi 3 mm'den ince tane iriliklerinde oluyorsa tümü sallantılı masalarla işlenir. Cevherin yeterli bir kısmı 6-0,3 mm arasında serbestleşiyorsa; cevherin 6-0,3 mm tane sınıfı Humprey spirallerinde -0,3 mm tane sınıfı ve öğütülen Humprey spirali orta ürünleri sallantılı masalarda işlenebilir. Bu üç zenginleştirme makinalarından hangilerinin uygun olabileceği her tesis için diğer faktörler de göz önüne alınarak iyice kararlaştırılmalıdır (Çilingir, 1996).

İnce kromit artıklarında (-0,1 mm), jet flotasyonu, kolon flotasyonu, yüksek alan şiddetli yağ manyetik ayırıcılar ve MGS (Multi Gravity Separator) gibi yeni teknolojiler kullanılmaktadır. MGS ile ince ve çok ince tane boyutlarına ve artıklara kadar kromit kazanımı sağlanabilmektedir (Samanlı, 1998).

1.9.3 Manyetik Ayırma ile Zenginleştirme

Farklı manyetik duyarlıdaki bireysel mineral tanelerinin, uygun bir manyetik alan içinde, başlıcası manyetik kuvvet olmak üzere, çeşitli kuvvetlerin (yerçekimi, sürtünme, merkezkaç vs) bileşik etkilerine dayanılarak, birbirinden ayrılması yoluyla gerçekleştirilen zenginleştirmeye manyetik ayırma ile zenginleştirme denilmektedir (Önal, 1980).

Farklı manyetik duyarlılığa sahip olan kromit ve gang mineralleri (olivin, serpantin vs.) uygun bir manyetik alan içinde başlıcası manyetik kuvvet olmak üzere

çeşitli kuvvetlerin bileşik etkilerine dayanılarak birbirinden ayrılması yoluyla manyetik ayırma ile zenginleştirme gerçekleştirilir. Genelde kromitin manyetik alan şiddeti 1.0 – 1.6 Tesla arasındadır. Ancak kromitin manyetit içermesi durumunda manyetik duyarlılık artmaktadır. Manyetitin gang minerallerine bağlı olması durumunda ise gangın manyetik duyarlılığı artarak uygulanan alan şiddeti düşmekte ve kromitin gang mineralinden ayrılması güçleşmektedir (Kıdımın, 2009).

Kromit cevherlerinin manyetik alanda zenginleştirilmesine aşağıdaki iki oluşum neden olabilir. Bunlar;

a- Cevherin çok ince tanelerde serbestleşmesi (-0,200 mm),

b- Gang minerallerinden olivinin ağırlıklı olarak fazla bulunması ve olivinin kromite yakın yoğunluk göstermesinden dolayı gravimetrik olarak zenginleştirilememesidir (Çilingir, 1996).

Kromitlerin manyetik duyarlılığı $3.000 - 7.500 \times 10^6$ ve manyetik özgül duyarlılığı $650 - 2.000 \times 10^6 \text{ g/cm}^3$ civarında değişmektedir. Bu nedenle yapısal durumuna göre kromitler 6.000 – 15.000 Gauss şiddetindeki manyetik alanlarda çekilebilirler. Cevherin ince taneli öğütülmesi gerektiğinden yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcılar tercih edilirler. Cevher (-0,2 mm'den) iri taneli olarak serbestleşiyorsa; duruma göre kuru manyetik ayırma uygun olabilir (Kıdımın, 2009).

Cevher, sallantılı masalarda zenginleştirilebiliyorsa, elde edilen konsantredeki olivin minerali de konsantre tenörünü düşürüyorsa, bu konsantreyi temizlemek için yaş manyetik seperatörler kullanılır. Eğer, gravite zenginleştirilmesi sonucunda artıktaki kromit %'si fazla ise artık, optimal iriliğe öğütülüp yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcılarla zenginleştirilerek metal randımanı yükseltilebilmektedir (Ağaçayak, 2004).

Manyetik ayırmada, verimin yüksek olabilmesi için, malzemenin birbirine yakın boyutlarda sınıflandırılmış olması gerekir. Ayrıca, kuru manyetik ayırma

uygulanıyorsa rutubetsiz olması istenir. Manyetik ayırma yöntemi tek başına veya diğer yöntemlerle birlikte 3-0,1 mm arasındaki tanelere uygulanır (Ağaçayak, 2004).

1.9.4 Elektrostatik Ayırma ile Zenginleştirme

Minerallerin iletkenlik farkına dayanan ve mineral tanelerinin kuru olarak zenginleştirilmesi için uygulanan yöntem, elektrostatik zenginleştirme adı verilmektedir. Esas olarak, elektrostatik kuvvetlere dayanan bu yöntemde, minerallerin, yüksek gerilim altında, statik bir elektrik yükü kazanıp bu yükü bir süre kaybetmeme yeteneğinden yararlanılmaktadır. Uygun şekilde etki altında bulundurulmuş mineraller, elektron kazanarak veya kaybederek, elektrikle yüklendiklerinden, topraklanmış veya elektrik yüklü başka maddeler tarafından itilir, çekilir veya yüksüz (nötr) hale getirilebilir (Önal, 1980).

Elektrostatik yöntemle zenginleştirilen kromit cevherlerinde Cr_2O_3 içeriği yüksek ancak kazanma verimi düşük ürünler elde edilmektedir. Metal kazanma veriminin düşük olmasının nedenlerinden biri, çok ince tanelerin, nispeten iri tanelerin yüzeylerini kaplamaları ve bu tanelerin yüksek alan içindeki dayanımlarını ters yönde etkilemeleridir. Diğer bir neden ise, fazla miktarda serpantin minerali içeren cevherlerde serpantin elektrik alanı içinde iletken gibi davranması sonucu, ayırma verimini ters yönde etkilemesinden ileri gelmektedir (Kurşun, 1993).

1.9.5 Flotasyon ile Zenginleştirme

Minerallerin fiziko-kimyasal yüzey özellik farklılıklarından yararlanılarak bazı minerallerin su içinde yüzdürülmesi bazılarının da bastırılması ile gerçekleştirilen zenginleştirme işlemi flotasyon olarak isimlendirilir (Yıldız, 2007).

Kromit zenginleştirmesinde flotasyon uygulaması, çok ince tanede serbestleşen cevherlerin ve gravite zenginleştirmesinden geçmiş fazla kromit içeren artıkların değerlendirilmesinde söz konusudur (Çilingir, 1996).

Flotasyon yöntemi ile gangı oluşturan olivin, serpantin gibi minerallerin kromitten ayrılması amaçlanmaktadır. Bu işlem kromiti yüzdürmek, gangı bastırmak şeklinde olabileceği gibi kromiti bastırıp gangı yüzdürmek şeklinde de olabilir. Kromiti bastırmak için dextrin kullanılır (Kıdımın, 2009).

Kromit cevherlerinde gang mineralleri olarak bulunan serpantinler pH= 3-12'de, olivinler pH= 5-7'de, kromit ise pH= 2-5'de anyonik kollektörlerle yüzebilmektedir. (Ağaçayak, 2004).

Kromit, yağ asitleri ile yüzdürülebilir. Bu flotasyonda, gangı bastırmak için, sodyum silikat, kalgon gibi maddeler, kromitin flotasyonunu kolaylaştırmak için ise selülöz tipi organik kolloidler kullanılır. Sülfat ve sülfonatlarla asit ortamda flotasyonu mümkündür. Bir kalsiyum tuzu ile canlandırıldıktan sonra, yüksek pH'ta sülfat ve sülfonatlarla da yüzdürülebilir. Bütün oksitlerin flotasyonunda olduğu gibi, kromit flotasyonunda da en önemli faktör, gang minerallerinden selektif ayırmanın temin edilebilmesidir. İri tane büyüklüğünde gravite usulleri ile kolayca zenginleştirilmesi mümkün olduğundan, sadece ince şlamdaki kromitin kazanılmasında flotasyon usulü tatbik edilir. Yugoslavya'da fabrika ölçüsünde kromit flotasyonu yapılmaktadır (Atak, 1990).

Gang şlamı, kromit yüzdürmesini güçleştirdiğinden, önce mekanik yöntemlerle uzaklaştırıldıktan sonra flotasyonla kromit yüzdürülür. Kromit, hidrokarbon zincirindeki karbon adedi 12'den fazla olan, yağ asidi olarak adlandırılan karboksilatlarla veya yağ asitlerinin alkali metal tuzları olan sabunlarla pH= 7-8'de yüzdürülebileceği gibi, karbon zincirinde 12'den fazla karbon içeren sülfat veya sülfonatlarla pH= 3-5'te yüzdürülmektedir. Bu anyonik kollektörlerle yüzdürme işleminde kromit iki değerli demir ve kurşun iyonlarının tuzlarıyla canlandırılabilir. Ayrıca katyonik kollektörlerle (aminlerle) pH= 12'de serpantinleri yüzdürülen kromit cevherinden pH= 3'de yine amin toplayıcılarla kromit yüzdürülerek konsantre alınabilmektedir (Ağaçayak, 2004).

BÖLÜM İKİ

MULTİ GRAVİTE CİHAZLARI

İnce ve ultra ince boyutlu tanelerin klasik gravite yöntemleriyle zenginleştirilmesi çok sorunlu ve genellikle düşük verimli olmaktadır. Ayrıca, şlam ve artıktaki büyük oranlarda kayıplar verilmektedir. Buna karşın, günümüzde ekonomik zorlamalar düşük tenörlü ve çok küçük tane boyutlarında serbestleşebilen cevherlerin büyük tonajlarda çalışılmasını zorunlu kılmaktadır (Aslan, 1996).

Son yıllarda ince veya çok ince taneli ağır minerallerin kazanımında santrifüj kuvvetin uygulanması etkin bir teknoloji getirmiştir. Tane üzerine etkiyen santrifüj kuvvet gravite kuvvetin 50 katıdır. Uygulanan santrifüj kuvvetin şiddeti arttıkça kazanılacak tanelerin boyutu daha ince olmaktadır. Knelson ve Falcon gibi santrifüjli ayırıcılar yeni teknolojiler olarak gravite ayırıcıları arasında yerlerini almışlardır. Bunlar <30 µm boyutunda çok ince tanelerin zenginleştirilmesinde etkindirler (Celep ve diğer., 2006).

Son bir asır boyunca santrifüj uygulamaları üzerinde araştırmalar yapılmıştır. İlk önemli santrifüj uygulaması; Dr. Gustaf De Laval tarafından günümüzden 100 sene önce gerçekleştirilen kaolin kilinin susuzlandırılmasıdır. Bunun ardından ise, santrifüj uygulamaları susuzlandırma (Strom, 1980), berraklaştırma (Keith, 1961), filtrasyon (Kiesewetter, 1984), klasifikasyon (Scheffler ve Zahr, 1980), çözücü ekstraksiyon (Rydberg, 1979) ve ince taneli altın kazanımı (Knelson, 1992) ile ilgili olarak devam etmiştir (Jazdarehee, 1993).

Santrifüj, çoklu bileşenli bir sistemin santrifüj kuvvet kullanılarak ayrıştırılması işlemidir. Diğer bir deyişle, bir akışkan içerisinde katıları aralarındaki özgül ağırlık farklılığından istifade ederek ayırma işlemidir. Teorik olarak katı tanecikler, kendilerini akışkan boyunca radyal olarak hareket ettiren bir santrifüj kuvvete tabi tutulurken, ağır tanecikler dönen silindirin çeperine, dışarıya doğru; daha hafif tanecikler ise dönme eksenine, silindirin iç kısmına doğru hareket ederler (Jazdarehee, 1993).

Taneciklerin çökelme hızını arttırmak için santrifüj kuvvetin kullanımı ince boyutlu tanelerde, özellikle altının kazanımında MGS, knelson konsantratörü ve falcon santrifüj cihazında yıllardır başarılı bir şekilde uygulama alanı bulmaktadır (Jazdarehee, 1993). Santrifüj ayırıcısında oluşturulan santrifüj kuvvet (F_c) şu şekilde ifade edilmektedir (Magumbe, 2002):

$$F_c = \left(\frac{\pi}{6} \right) \left(\rho_p - \rho_l \right) r \cdot w^2$$

Burada:

F_c : Santrifüj kuvvet, $g \cdot cm \cdot s^{-2}$,

r : Tanenin dönme ekseninden bulunduğu yer arasındaki yer değiştirme mesafesi, cm,

d_p : Tanenin çapı, cm,

ρ_s : Tanenin yoğunluğu, $gr \cdot cm^3$,

ρ_l : Ortamın yoğunluğu, $gr \cdot cm^3$,

w : Tanenin açısal hızı, $radyan \cdot sn^{-1}$, i

ifade etmektedir.

2.1 Multi Gravite Separatörü (MGS)

İngiliz Teknoloji Grubu desteğinde Richart Mozley tarafından ince ve çok ince boyutlu minerallerin ayrılması amacıyla geliştirilmiş ve endüstriyel ölçekte kullanımı gerçekleştirilen bir gravite ayırıcısı olan multi gravite cihazı, sallantılı masa düzeninin bir tambur şekline dönüştürülerek kullanılması prensibi ile tanımlanabilir. Bu tamburun belirli hızla döndürülmesiyle mineral tanelerine karşı etkin olan yerçekimi kuvvetinden daha büyük bir merkezkaç kuvvetinin etkisi altında tanelerin tambur yüzeyinde yan katı bir tabaka oluşturması ve yardımcı üniteler aracılığı ile zenginleştirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Adana'nın Aladağ bölgesinde Pınar

Madencilik A.Ş.'de MGS ile krom zenginleştirme çalışmaları yapılmaktadır (Kıdıman, 2009).

MGS, dört yıllık bir süreç içerisinde geliştirilmiş, bu süreçte değişik parametrelerin incelendiği beş prototip makine yapılmıştır. Bu prototiplerde;

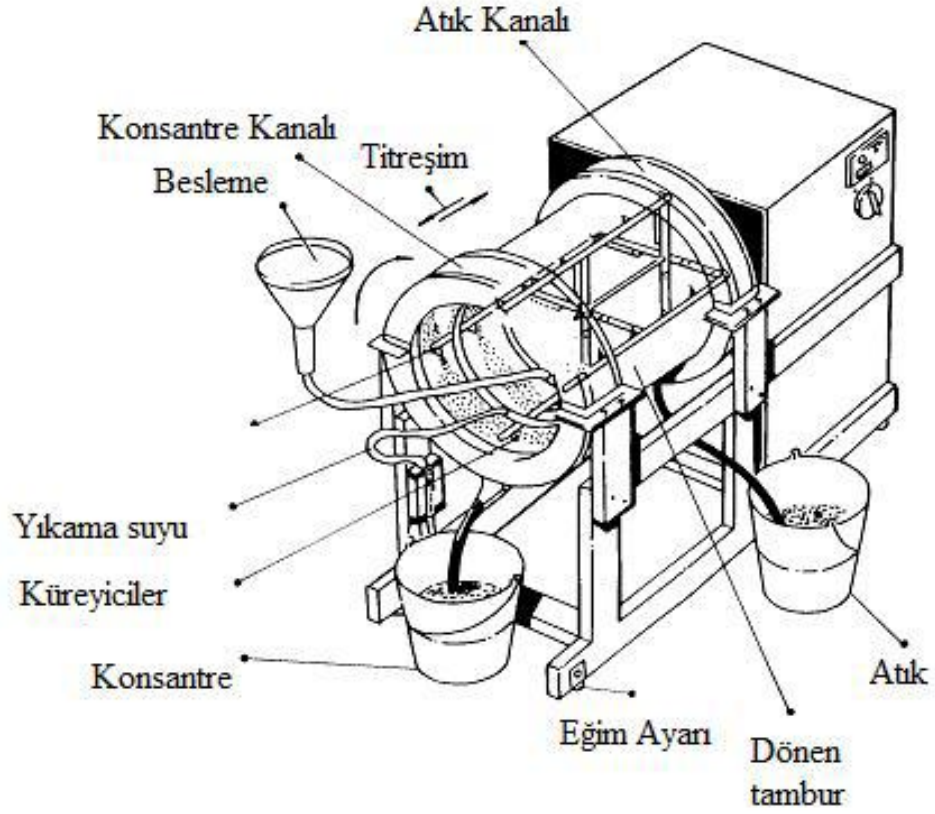
- Dikey, yatay, silindirik ve gittikçe daralan konik gövdeler,
- Kesikli ve sürekli işlem,
- Dairesel ve aksel titreşim, asimetrik hareket,
- Küreyici dizaynı, yıkama suyu gibi parametreler denenmiştir.

Bu çalışmaların büyük bir bölümünde kalay cevheri kullanılmıştır. Ancak, buna ilave olarak altın, platin gibi nadir metaller, barit ve anatas gibi endüstriyel mineraller, sülfürlü ve oksitli cevherler ile kil, feldspat ve kömür gibi düşük özgül ağırlıklı mineraller ile de denemeler yapılmıştır (Kurşun, 2003).

Multi Gravite Ayırıcıları, günümüzde pilot ölçekli ve endüstriyel ölçekli olabilmektedir.

Laboratuvar/Pilot ölçekli MGS ünitesi; bir yanı açık uçlu 0,6 m uzunluğunda, 0,5 m çapında tambur şeklinde bir gövdeye sahiptir. Tambur, iç yüzeyi üzerinde 6-24 g değerinde yerçekim kuvvetine eşdeğer bir merkezkaç kuvveti oluşacak şekilde 150-300 devir/dk hızla saat yönünde dönmektedir. Aynı anda aksel doğrultuda 4-6 cm.s frekansla, 12-25 mm arasında değişen sinuzidal bir titreşim hareketi de tambur hareketi üzerine eklenmiştir. Tambur hareketini sağlayan konsantrik şaft tarafından tahrik edilen, tamburla aynı yönde, tambura göre biraz daha hızlı dönen ve üzerinde küreyiciler bulunan bir ünite bulunmaktadır. Çalışma sırasında küreyiciler, katı taneleri tamburun dar, açık diş ağzına doğru hareket ettirecek şekilde dizayn edilmiştir. MGS ünitesi, %20-50 katı oranında 0,2 t/s kapasite ile çalışabilmektedir (Kurşun, 2003). Şekil 2.1'de laboratuvar tipi MGS ünitesi şematik gösterimi verilmektedir (Chan ve diğer., çev.,1994).

Endüstriyel ölçekli MGS ünitesi; pilot modelin büyük ölçekte dizayn edilmiş bir versiyonudur. Farkı, tek tambur yerine iki tamburun kullanılmasıdır. Tamburların herbiri 0,9 m uzunluk 1,2 m çapta, tek bir krank mille titreşimi sağlayacak şekilde sırt sırta yerleştirilmiştir. Çalışma sırasında serbest titreşimden dolayı ortaya çıkabilecek stabilite sorunları, tamburların hareketlerinin birbirini dengede tutması nedeni ile minimize edilmiştir. Endüstriyel MGS ünitesinin kapasitesi ise 4 ton/saat olmaktadır (Kurşun, 2003). Şekil 2.2’de endüstriyel ölçekli bir MGS cihazı verilmektedir (Kıdıman, 2009).



Şekil 2.1 Laboratuvar tipi MGS ünitesi şematik gösterimi (Chan ve diğer., çev.,1994).



Şekil 2.2 Mozley Multi Gravite Ayırıcı (Kıdıman, 2009)

Uygun katı oranında hazırlanan pülp, belirli basınçla hareketli tamburun orta noktasından iç yüzeye beslenir. Bir anlamda besleme sırasında oluşacak türbülans etkisi azaltılmaktadır. Yıkama suyu ise, tamburun üst çıkış ucuna yakın bir noktadan verilir. Ağır veya yüksek özgül ağırlıklı mineraller, akışkan tabaka içinde dibe çökmekte, tambur yüzeyine tutunmakta ve merkezkaç kuvvetinin etkisiyle adeta yarı katı bir tabaka oluşturmaktadır. Bu tabakanın hemen üzerinde küçük özgül ağırlıklı ve çok ince tanelerin oluşturduğu bir ara tabaka oluşmaktadır. Akışkan tabakanın üst yüzeyleri ise büyük oranda katı taneler içermeyen su tabakası formundadır (Aslan, 1996).

Gövdeye verilen titreşim hareketi ile; akışkan tabaka içindeki tanelere ek bir ayırma kuvveti uygulanmış olmaktadır. Özel olarak dizayn edilmiş olan küreyiciler tambur yüzeyinde hareket ederken taneciklerden oluşan tabakayı küremekte, böylece dereceli tabakalaşmaya olanak sağlamaktadır (Aslan, 1996).

Tamburun iç yüzeylerine tutunarak hareket eden yüksek yoğunluklu taneler küreyiciler tarafından yukarı doğru taşınarak üst çıkıştan, hafif yoğunluklu taneler ise, yıkama suyu etkisiyle alt çıkıştan alınmaktadır (Aslan, 1996).

MGS'nin tasarım özelliklerini ise şu şekilde sıralayabiliriz:

Tambur: Paslanmaz çelikten oluşan silindirik gövde bir ucu kapatılmış ve iç yüzeyi poliüretan ile astarlanmıştır. Astar açık dış uca doğru daralarak konik bir yapı oluşturur. Aşınmaya karşı daha dayanımlı olan poliüretan kaplama, aynı zamanda tamamen pürüzsüz bir yüzey sağlamaktadır. (Chan ve diğer., çev.,1994).

Küreyiciler (skrayper): MGS'yi klasik gravite ayırması yapan ünitelerden ayıran önemli unsurlardan birisi küreyicilerdir. Tambur içinde; tambur eksenine paralel ve birbirleri ile 90° açılı olacak şekilde yerleştirilmiş 4 adet küreyici kolu bulunmaktadır. Bu kolların herbiri üzerinde ise eşit aralıklarla yerleştirilmiş 65 cm uzunluğunda 8-9 adet küreyici bulunmaktadır. Tambur eksenine 60°lik açı yapacak şekilde konumlandırılan küreyiciler tambur yüzeyine "hemen hemen" temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Küreyici yüzeyleri de tambur astarı gibi poliüretan ile kaplanmıştır. Küreyicilerin bağlı olduğu kol tamburdan %2.5 oranında daha hızlı dönmektedir. Küreyiciler tambur yüzeyinde hareket ederken, pülp tabakasının içinden geçer, böylece taneleri tamburun açık üst ucuna doğru küreyerek taşımaktadır. Bu küreme işleminde her bir küreyici mineral tanelerini 35 mm meyil yukarı hareket ettirir. Tamburun üst çıkış ağzına yakın bir noktadan verilen yıkama suyu ise tabakayı yıkayarak hafif mineralleri alt çıkışa doğru taşımaktadır. Sözü edilen küreyici kollar uygun ölçülerde endüstriyel ölçekli ünite de bulunmaktadır. (Chan ve diğer., çev.,1994).

Hareket Mekanizması: Cihazlarda hareket mekanizması mümkün olduğunca basit tutulmuştur. Elektronik ve mikro-prosesörlerden kaçınılmıştır. Pilot ölçekli MGS ünitesinde 0.5 kW'lık 2 adet elektrik motoru kullanılmıştır. Bu motorlardan birisi basit bir eksantrik ile titreşim hareketini, diğeri ise dişli-zincir sistemi ile tambur ve küreyicinin dönüşünü sağlamaktadır. Endüstriyel ölçekli MGS ünitesinde, 2,2 kW'lık bir motorla iki tamburun titreşim hareketi, 2 adet 1,1 kW'lık motorla ise tamburların ve küreyicilerin dönüşü sağlanmaktadır (Chan ve diğer., çev.,1994).

İşletme Değişkenleri: MGS ünitesinde; tambur dönüş hızı, titreşim büyüklüğü, yıkama suyu miktarı, tambur eğim açısı, besleme miktarı ve hızı, pülp katı oranı önemli işletme parametreleri olmaktadır (Chan ve diğer., çev.,1994).

Tambur Dönüş Hızı: Tambur dönüş hızı, ayırma işlemini iki yönden etkiler. İlk olarak, pülp akışını aksel doğrultuda tamburun alt çıkış ucuna doğru hızlandırır, ikinci olarak da tanelerin atalet kütlelerini arttırarak tambur yüzeyine yapışmasını ve adeta katı yüzey oluşmasını sağlar (Chan ve diğer., çev.,1994).

300 dev/dk hızla dönen tambur içindeki bir taneye etkiyen merkezkaç kuvveti 24 g kadar arttırılmakta, buna karşın tane büyüklüğü 5 kez küçültülmüş olmaktadır. Başka bir deyişle; MGS ünitesinde diğer klasik gravite ayırması yapan ünitelere göre 5 kez daha küçük boyutlu tanelerin ayrılması mümkün olmaktadır. Tamburun dönüş hızının arttırılması ile (diğer parametreler sabit) ağır mineral miktarı artarken, tenör düşmektedir. Mineraller arasındaki yoğunluk farkı büyük olduğunda düşük, yoğunluk farkı küçük olduğunda ise yüksek "G" kuvvetinde ayırma uygun olmaktadır (Chan ve diğer., çev.,1994).

Titreşim Yoğunluğu: Tambur çalışması sırasında titreşim frekansı 3-6 dev/sn, titreşim genliği ise 3,8 - 12,5 cm arasında değiştirilebilmektedir. Titreşim sinuzoidal dalga formunda aksel doğrultusunda olmaktadır. Titreşim hareketi sonucu olarak; ayırma sırasında taneler üzerine ek kesme (koparma) kuvveti uygulanmış olmaktadır. Titreşim yoğunluğunun arttırılması (diğer parametreler sabit) halinde ise verim düşerken, mineral içerikleri yükselmektedir (Chan ve diğer., çev.,1994).

Yıkama Suyu Miktarı: Yıkama suyu tamburun üst çıkış ağzına yakın bir noktadan verilmektedir. Yıkama suyu miktarı ve akış hızı ayırmayı önemli ölçüde etkilemektedir. Yıkama suyu miktarı aynı zamanda pülp yoğunluğuna da bağlı olmaktadır (Chan ve diğer., çev.,1994).

Tambur Eğim Açısı: Tambur ekseni ile yatay arasındaki eğim açısı, malzemenin özelliğine bağlı olarak 0-5 arasında değişmektedir. İnce boyutlu ve düşük yoğunluklu

mineraller için küçük; iri boyutlu ve yüksek yoğunluklu mineraller için ise büyük eğim açılarında çalışılmalıdır (Chan ve diğer., çev.,1994).

Pülp Yoğunluğu, Besleme Hızı: Beslenecek malzemenin pülp yoğunluğu %10-50 arasında değişmektedir. Daha yüksek yoğunluklarda ise yıkama suyu miktarları ile pülp yoğunluğu ayarlanabilmektedir. Ayırma kapasitesi tambur çapı ile bağlantılıdır. Pilot ölçekli MGS ünitesinde 0,2 t/s; endüstriyel ölçekli iki tamburlu (twins drum) MGS ünitesinde ise 2 t/s kapasiteye ulaşılmaktadır. Aynı miktardaki malzemenin klasik sallantılı masada ayrılması için MGS' nin yüzeyinden 6 kat fazla bir ayırma yüzeyine sahip olması gerekmektedir (Chan ve diğer., çev.,1994).

2.2 Knelson Konsantratörü

Knelson konsantratörü, Byron Knelson tarafından 1988 yılında Kanada' da patenti alınmış, dünyada damar tipi ve alüvyal altın üretiminde uygulama alanına sahip yüksek hızlı santrifüj seperatördür. Basit yapısı, yüksek kapasite, geniş tane boyutu aralığında çalışabilmesi ve çok yüksek zenginleştirme oranlarında ayırım yapabilmesi en büyük avantajlarını oluşturmaktadır (Celep ve diğer., 2006).

Knelson konsantratörlerde bir santrifuj alan kuvveti içinde engelli çökme klasifikasyonu geçerli olmaktadır. Yüksek dönüş hızlarında çalışan cihazda yer çekimi ivmesinin 50-60 katı civarında yer çekimi kuvveti üretilebilmektedir. Çanak kısmı, bir dış duvar ve sadece su jetlerinin geçişine izin veren bir geçirgen iç duvardan oluşmaktadır. Dönüş eksenini bu duvar arasına su geçişine izin verecek şekilde içi boş olarak dizayn edilmiştir. Bu duvarın iç yüzeyine altın taneciklerinin toplanması için yiv şeklinde oyuklar açılmıştır (Şen, Çiçek, Tanrıverdi, Akar, ve İpekoğlu, 2008).

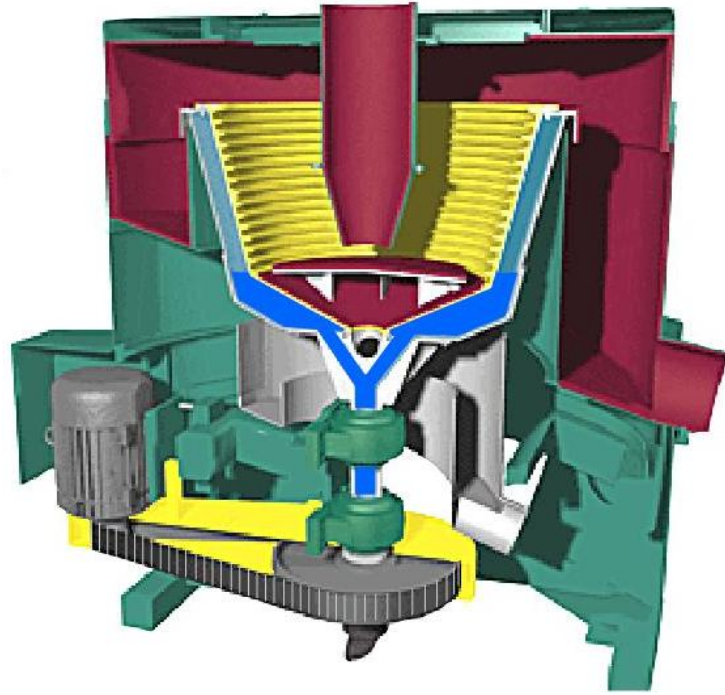
Knelson konsantratör, dönme işlemini gerçekleştiren üniteyle birlikte, yüksek hızda dönen bir yataktan oluşur. Üstten beslenen pülpten santrifüj kuvvetinin etkisiyle ağır taneler konsantre olarak yatağın oluklarına takılır. Gang mineralleri ise atık olarak pülpün üst akışıyla birlikte atılır. Besleme, standart model Knelson konsantratörün haznesi içine düşey bir tüp vasıtasıyla yapılmaktadır. Besleme %0-

70 pülöp yoğunluğunda yapılabilir. Konsantratör haznesinin dibinde beslemeyi dağıtacak olan bir pervane mevcuttur (Knelson ve Jones, 1993). Knelson konsantratörünün ana operasyon değişkenleri; yıkama suyu hızı, besleme pülöp yoğunluğu ve alıkonma süresidir. Knelson ayırıcısı altın cevherleri için ön zenginleştirici olarak dizayn edilmistir ve yerçekimi ivmesinin ortalama 60 katı kadar bir santrifüj kuvvet oluşturabilmektedir (Huang, 1996).

Knelson konsantratörler, konsantrenin otomatik ve elle boşaltma esasına göre; kesikli (Semi continuous / SC) ve sürekli (Continuous) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Boşaltma şekline göre manuel boşaltma, merkezi boşaltma (CD) ve değişken boşaltma modelleri olarak sınıflandırılmaktadır (Celep, 2005).

Standart Knelson konsantratörü, kesikli çalışan bir santrifüj konsantratörüdür. Konsantre alınırken beslemenin kesilmesi gerekmektedir. Bu işlem 10-15 dakika sürmektedir. Knelson konsantratörü, sabit hızda çalıştığı için operasyon prosedürü oldukça basittir. Sadece bir hareketli kısma sahip olduğu için bakımı kolaydır. Elle boşaltmalı Knelson konsantratörü özellikle çok düşük tenörlü yüksek yoğunluklu tanelerin kazanımı için uygundur. Konsantrenin elle boşaltılması 2 saat ya da daha fazla periyotlarla yapılmaktadır (Celep, 2005).

Kesikli çalışan Knelson konsantratörler, endüstride en çok kullanılan santrifüj separatör türüdür. Laboratuvar çaptan 150 t/s katı kapasitesine kadar çok çeşitli kapasitelerde çalışabilen tipleri mevcuttur. Bu tip cihazlarda, katı-sıvı karışımı pülöp cihaza beslenir. Pülöp koni dibine ulaştığında santrifüj kuvvet etkisiyle koni duvarına doğru savrulur. Konik çanak içerisine verilen pülöp içerisindeki katı taneler oyukları doldurur. Santrifüj kuvvet tersi yönünde oyuklar içerisinden verilen suyun etkisi ile katı taneler oyuklar içerisinde bir akışkan yatak oluşturur. Ağır katı taneler oyuk diplerine yerleşir. Hafif mineraller akışkan yatak dışında kalarak su tarafından sürüklenip cihazı terkeder. Belirli bir çalışma süresi sonunda cihaza yeni malzeme ilavesi durdurulur ve konik çanak dibinde birikmiş olan ağır taneler cihaz dışarısına alınır (Şen ve diğer., 2008). Şekil 2.3'te kesikli çalışan Knelson konsantratörü gösterilmiştir (Knelson, 2011).



Şekil 2.3 Kesikli çalışan knelson konsantratörü (Knelson, 2011)

Kesikli çalışan Knelson konsantratörler; Extended Duty (XD), Centre Discharge (CD) ve Manual Discharge (MD) olmak üzere 3 ayrı tipte imal edilmektedir. Bunlardan KC-XD, zor şartlarda çalışmak üzere dizayn edilmiştir. Özellikle sert kayaç öğütme devrelerinde kullanılır. KC-XD70 (300-1000 t/s), KC-XD48 (200-400 t/s), KC-XD40 (125-250 t/s), KC-XD30 (75-150 t/s) ve KC-XD20 (15-80 t/s) modelleri üretilmektedir (Şen ve diğer., 2008). Şekil 2.4'te KC-XD model Knelson konsantratörü gösterilmiştir (Knelson, 2011).

KC-CD tipi Knelson konsantratörler, XD tiplerin üretimine kadar endüstride en fazla kullanılan santrifüj separator tipi merkezi boşaltmalı Knelson konsantratördür. KC-CD Knelson konsantratörlerinin şu anda özellikle alüvyal cevher yataklarının işletilmesinde kullanımları oldukça yaygındır. Maliyetleri XD tiplere göre daha düşüktür, daha küçük çaplı projelerde kolaylıkla kullanılabilir. Metalurjik performans olarak XD tipleri ile aynıdır. KC-CD30 (75-150 t/s), KC-CD20 (15-80 t/s), KC-CD12 (6-20 t/s) ve KC-CD10 (0,9-8 t/s) modelleri mevcuttur (Şen ve diğer.,

2008). Şekil 2.5'te KC-CD model Knelson konsantratörü gösterilmiştir (Knelson, 2011).



Şekil 2.4 KC-XD tipi Knelson konsantratörü (Knelson, 2011)



Şekil 2.5 KC-CD tipi Knelson konsantratörü (Knelson, 2011)

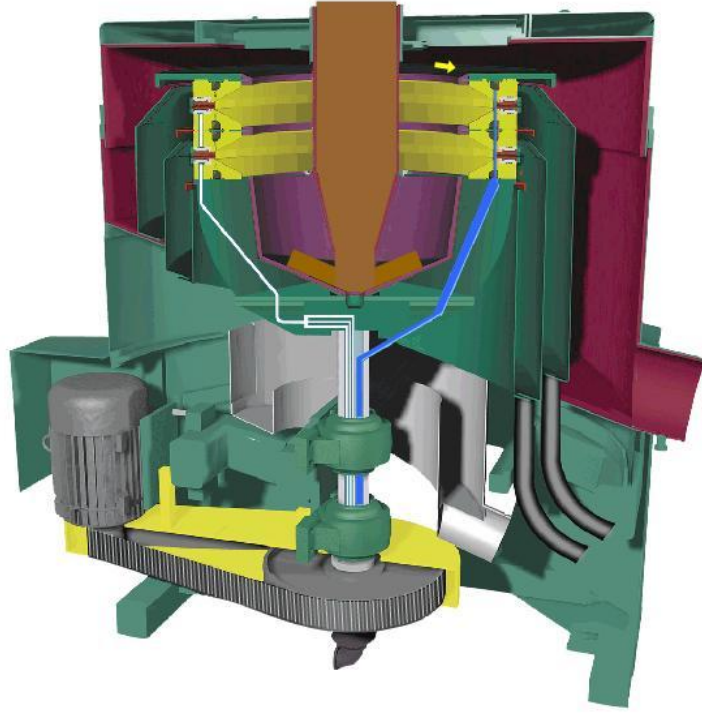
KC-MD tipi Knelson konsantratörler ise laboratuvar çaplı olup KC-MD3 (0-100 lb/s), KC-MD4,5 (0-605 lb/s) ve KC-MD7,5 (0-1500 lb/s) modellerinde üretilmektedir (Şen ve diğer., 2008). Şekil 2.6’da KC-MD tipi Knelson konsantratörü gösterilmiştir (Knelson, 2011).



Şekil 2.6 KC-MD tipi Knelson konsantratörü (Knelson, 2011)

Sürekli çalışabilen Knelson konsantratörler, yoğunluğa göre zenginleştirilmeye uygun ancak yüksek ağır mineral içerikli cevherin zenginleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu tip cevherlerle çalışma durumunda elde edilecek ağır mineral konsantrelerinin cihazdan alınması kesikli çalışan cihazlarda problem yarattığı için sürekli çalışan konsantratörlerin geliştirilmesi zorunluluğu doğmuştur. Bu tip konsantratörler özellikle baz metallerin ve endüstriyel hammaddelerin ön konsantrasyonunda başarı ile kullanılabilir. Sürekli çalışabilen knelson konsantratörlerin kesikli çalışan tiplere göre avantajı; konsantrenin cihazdan uzaklaştırılmasının kesiksiz olarak gerçekleştirilebilmesidir. Eğer cevher içerisinde kazanılması hedeflenen mineralin miktarı katı olarak %0,5’ i aşıyor ise bu tip konsantratörlerin kullanılması daha uygun olmaktadır (Şen ve diğer., 2008).

Sürekli çalışabilen konsantratörlere katı-sıvı karışımı olarak beslenen pülp, koni dibine ulaştığında santrifüj kuvvet etkisiyle koni duvarına doğru savrulur. Konik çanak içerisine verilen pülp içerisindeki katı taneler oyukları doldurur. Santrifüj kuvvet tersi yönünde oyuklar içerisinden verilen suyun etkisi ile katı taneler oyuklar içerisinde bir akışkan yatak oluşturur. Oyuklar içerisine yerleştirilmiş olan valfler kontrollü olarak açılıp kapanarak oyuk diplerine yerleşmiş olan ağır minerallerin koni dışına alınmasını sağlar. Konik çanağı terkeden ağır mineraller, ağır mineral tahliye kanalından cihazı terkeder. Hafif mineraller ise, akışkan yatak dışında kalarak su tarafından sürüklenip cihazı terkeder (Şen ve diğer., 2008). Şekil 2.7’de sürekli çalışabilen Knelson konsantratörü gösterilmiştir (Knelson, 2011).



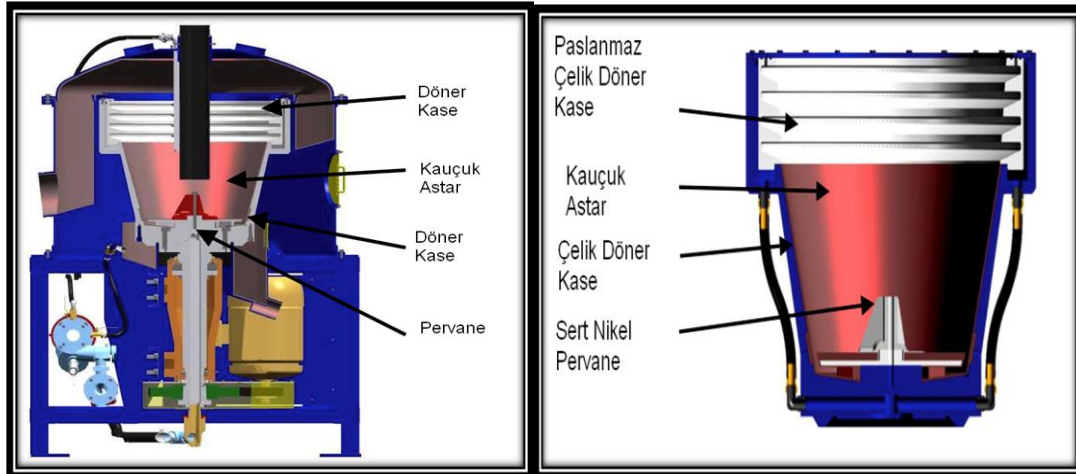
Şekil 2.7 Sürekli çalışabilen Knelson konsantratörü (Knelson, 2011).

Sürekli çalışabilen Knelson konsantratörler; CVD64, CVD42, CVD32, CVD20 ve CVD6 modellerinde üretilmekte, her bir modelin kapasitesi değişken olmaktadır (Knelson, 2011).

2.3 Falcon Santrifüj Ayırıcısı

Falcon konsantratörü, Knelson konsantratörlerine benzer şekilde, yüksek santrifüj kuvveti oluşturabilen geliştirilmiş gravite separatörüdür. Malzeme beslemesi, dönen iç konik içerisine yapılır ve iç konik içerisindeki pervane aracılığıyla ivmelendirilerek koniğin çeperi boyunca hareket eder. Hareket eden koniğin üst kısmı bir alıkonma zonu olarak işlem görürken dip kısmı hareket zonu sağlamak için belli bir açıda eğimlidir. Daha güçlü santrifüj kuvvetler hareket zonundaki tanenin tabakalaşmasını ve çökmesini engelleyecek şekilde etki yapar. Hafif taneler düşük özgül ağırlıkları ya da küçük boyutlarından dolayı koniğin dışına doğru hareket eder. Ağır taneler ise konsantrasyon (alıkonma) zonunda kalarak yıkama suyuyla birlikte yıkanarak temiz konsantre üretilir (Celep, 2005).

Falcon zenginleştiricisinin içerisi düz ve santrifüj haznesi konik şeklindedir. Bu haznenin içerisindeki ince tanecikler yüksek santrifüj kuvveti sayesinde yığılır ve tabakalanır. İç konik alt kısmında, malzeme dönen bir rotorla karşılaşır ve pervane rotorun duvarlarına doğru beslenen malzemeyi fırlatır. Rotor hafif bir açıyla eğimlendirilmiştir, bu sayede geliştirilmiş gravite çekim alanı iki kuvvet bileşenine ayrılmaktadır. Duvara dik olan güçlü bileşen, engelli çökme işlemi ve beslemenin tabakalanması için gerekli olan güçlü g kuvvetini sağlayan konsantrasyon gravite alanıdır. Eğimli rotor yüzeyine paralel olan zayıf sürüklenme bileşeni, tabakalanmış olan katıları rotorun üst kısmına doğru itmektedir. Dönüş eksenine paralel hale gelmesi için rotor yüzeyindeki eğim açısı rotorun üst kısmına yakın bölgede değişmektedir. Sonuç olarak, taneleri üste doğru sürükleyen zayıf gravite kuvvet bileşeni yok olmaktadır. Yatağın dış kısmındaki hafif parçacıklar rotorun taşma ağzından yukarıya doğru hareket ederler. Konik yüzeyine yakın bölgedeki ağır parçacıklar ne hıza sahiptirler ne de su filmi tabakasının yardımıyla bu bölgeyi aşabilirler ve bu yüzden yüzeyde birikirler. (Celep, 2005). Şekil 2.8’de Falcon konsantratörünün kesit görünümü verilmiştir (Falcon,2011).



Şekil 2.8 Falcon konsantratörünün kesit görünümü (Falcon, 2011).

Falcon konsantratörünün Falcon C (sürekli), Falcon SB (kesikli) ve Falcon UF (Kesikli ve çok ince taneli cevherler) olmak üzere 3 modeli bulunmaktadır.

Falcon C tipi konsantratörler, 300 G'e kadar santrifüj kuvvet üretebilen, 10 mikron boyutuna kadar olan taneciklerin kazanılabildiği, 100 t/s'e kadar çıkabilen kapasiteye sahip sürekli çalışan konsantratörlerdir. SB model cihazlarla kıyaslandığında, daha yüksek konsantrasyonun istendiği gravite ile zenginleştirme uygulamalarında kullanılır. Kalay, tantal, tungsten, krom, kobalt, demir ve oksidize olmuş ince kömürler ile diğer birçok minerallerin zenginleştirilmesinde uygulama alanı bulmaktadır. Ayrıca, spiraller gibi ağır ortam ayırıcılarıyla kazanılamayacak kadar ince mineral tanelerinin zenginleştirilmesi amacıyla da kullanılmaktadır (Falcon, 2011).

Falcon SB tipi konsantratörlere çalışmaları sırasında devamlı olarak besleme yapılabildiği fakat yalnızca periodik olarak hazne yıkama esnasında konsantrasyon üretilmediği için bu tip konsantratörler yarı kesikli cihazlar olarak bilinir. Cihazın çalışma süresi, uygulama alanına göre 5 dakikadan birkaç saate kadar değişik sürelerde olabilmektedir (Falcon, 2011).

Bu konsantratörler yerçekiminin 50 katından 200 katına kadar santrifüj kuvvet üretebilmektedir. Falcon SB konsantratörünün kullanım alanı bulunduğu uygulamaların

başında bir öğütme devresine entegre olacak şekilde altın, gümüş, platin gibi değerli metallerin kazanımı gelmektedir. Bu cihazlar, öğütme devrelerinden başka, plaser ve alüvyal yataklardan altın kazanımı için de uygun olmaktadır. Bu konsantratörler ile zenginleştirme işlemleri sonucunda, çok düşük tenörlü cevherlerden (ppm mertebesinde) yüksek tenörlü konsantreler üretebilmek mümkündür (Falcon, 2011).

Falcon UF tipi konsantratörler, günümüzde ultra ince mineral tanelerinin ekonomik olarak kazanımı hedefine uygun olarak 600 G' e kadar santrifüj kuvvet üretebilen ve 3 mikron boyutunda mineral tanelerinin zenginleştirilebildiği cihazlardır. Bu konsantratörlerin başlıca kullanım alanı, tesislerde şlam olarak atılan ultra ince mineral tanelerinin geri kazanımıdır. Bu cihazlar, 100 mikron altı ve düşük katı oranlarında yapılan beslemelerde en iyi sonucu vermektedir (Falcon, 2011).

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Deneyleerde Kullanılan Malzeme

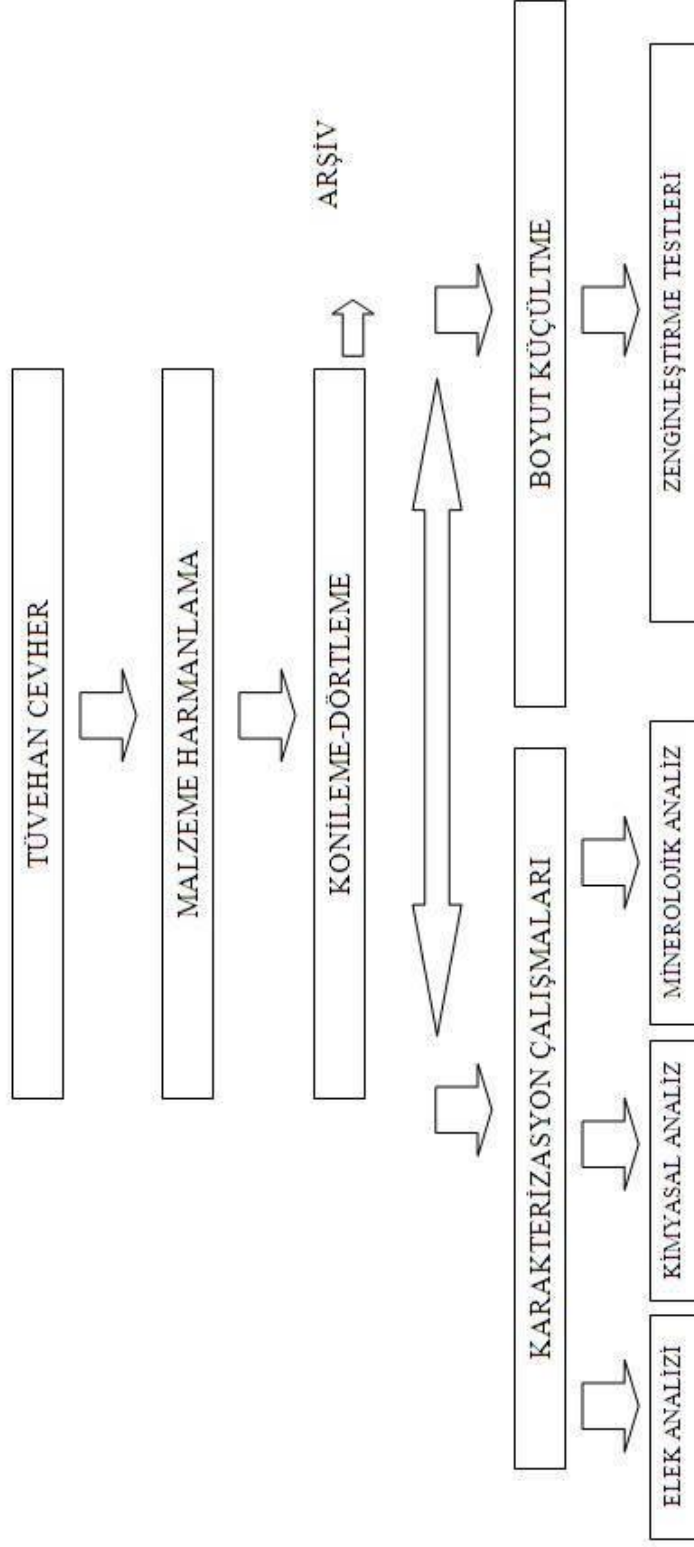
Deneysel çalışmada kullanılan kromit cevheri, Dedeman Madencilik A.Ş.' e ait Adana – Aladağ yöresinde bulunan İR-927 ruhsat no'lu Sivişlitepe ocağından temin edilmiştir. Ocaktan patlatma sonrası stok sahasına nakledilen tüvenan cevherin kırıcılarda boyut küçültülmesi sonrası alınan numunedir.

Bölgenin genel jeolojisi Triyas-Jura-Kratese yaşlı ofiyolit yapı içerisinde dunit, harzburjit ve piroksenit kayaçlarıdır. Sahadaki krom, bantlı ve disemine yapıdadır. Dunit kontaklarında manyezit oluşumu yoğun ve serpantin alterasyonu bulunmaktadır.

3.2 Kromit Numunesinin Hazırlanması

Ocaktan alınan yaklaşık 150 kg'lık kromit numunesi deneysel çalışmalar için Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarına getirilmiş ve numune hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Malzeme harmanlandıktan sonra, elek analizleri ve arşiv numuneleri için konileme-dörtleme yöntemiyle yeterli miktarda numune alınmış, kalan malzeme ise çeneli kırıcı ile 1 mm' nin altına indirilmiştir. Daha sonra, çubuklu değirmen ile kontrollü öğütme gerçekleştirilmiş olup numuneler, bölücü kullanılarak deneyleerde kullanılmak üzere torbalanmıştır.

Deneysel çalışma akım şeması Şekil 3.1' de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Deneysel çalışma akım şeması

3.3 Karakterizasyon Çalışmaları

3.3.1 Elek Analizi

Deneylerde kullanılan numunelerin tane irilik dağılımının belirlenmesi için, 500, 180, 150, 106, 75, 53 ve 38 mikron elek açıklıklı elekler ile yapılan elek analizleri sonucunda saptanan deney numunelerinin tane irilik dağılımı tablo 3.1’ de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Deney numunelerinin tane irilik dağılımı

Boyut (mikron)	% Ağırlık	Σ EA %
-500+180	14,67	100,00
-180+150	15,79	85,33
-150+106	15,80	69,54
-106+75	14,96	53,74
-75+53	13,50	38,78
-53+38	4,77	25,28
- 38	20,51	20,51
Toplam	100,00	

3.3.2 Kimyasal Analiz

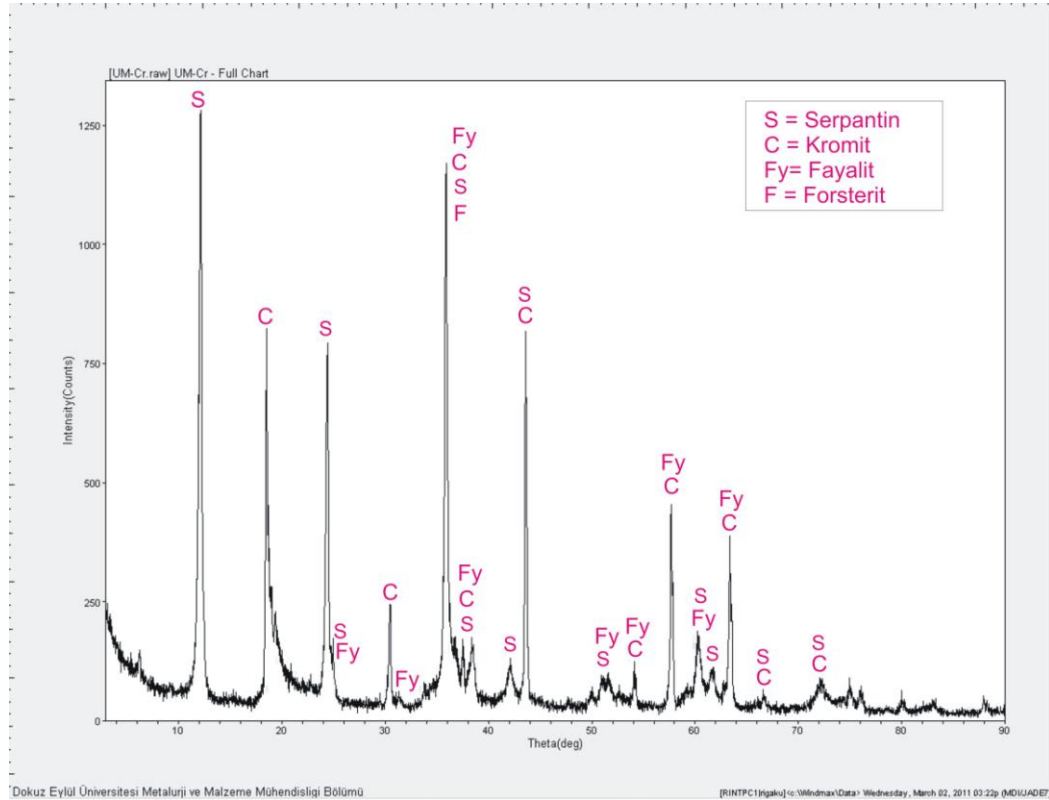
Numune hazırlama işlemleri sırasında kimyasal analiz için alınan numune üzerinde malzemenin içindeki element miktarlarını belirlemek için, 9 Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Kimya Laboratuvarında, Analytik jena marka NovAA 300 model atomik absorpsiyon spektrofotometresi kullanılarak gerçekleştirilen kimyasal analiz sonucunda elde edilen malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 3.2’de gösterilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi, cevher, oldukça yüksek miktarda magnezyum içermektedir.

Tablo 3.2 Cevherin kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim	Miktar (%)
Cr ₂ O ₃	18,62
Fe ₂ O ₃	11,10
Al ₂ O ₃	4,42
MgO	38,89

3.3.3 Mineralojik Analiz

Cevherin mineral bileşiminin saptanması amacıyla, numune hazırlama işlemleri sırasında alınan tüvenan cevher numunesi ile, 9 Eylül Üniversitesi Metalurji-Malzeme Mühendisliği Bölümünde Rigaku D/Max-2200 cihazı ve Cu X-ışını tüpü kullanılarak yapılan XRD analizi sonucunda numuneye ait tüvenan cevher XRD analizi grafiği Şekil 3.1' de verilmektedir. Buna göre, cevherin ana minerallerinin serpantin ve kromit olduğu, bunların yanısıra cevherde az miktarda fayalit ve eser miktarda forsterit bulunduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.1 Tüvenan cevher XRD analizi grafiği

3.4 MGS Deneyleri

MGS testleri, Mozley C900 model laboratuvar/pilot ölçekli cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Numune hazırlama işlemlerinin ardından MGS testlerinde kullanılmak üzere homojen olarak bölünen numuneler ile 28 ayrı test gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2 Laboratuvar/pilot ölçekli MGS (C900)

Tablo 3.3 C900 tipi MGS cihazının teknik özellikleri

Motor Gücü (kW)	0,37 kW - 0,55
Boyutlar (mm)	162×71×109
Kapasite (kg/s)	200
Tambur dönme hızı (dev/dk)	100 - 280
Tambur Eğim açısı (°)	0 – 9
Tambur salınım frekansı (sn ⁻¹)	4/ 4,8/ 5,7
Tambur salınım genliği (mm)	10 /15/ 20
Yıkama suyu miktarı (l/dk)	0 - 10

Yapılan deneylerde besleme tane boyutu sabit tutulmuş; tambur dönüş hızı, tambur eğim açısı, yıkama suyu miktarı ve besleme katı oranı değiştirilen parametreler olarak belirlenmiştir. Deneysel tasarımın oluşturulmasında merkezi kompozit deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır.

Merkezi kompozit tasarım, üç seviyeli faktörel deneye ihtiyaç duymaksızın bir bağımlı değişken için ikinci dereceden model oluşturmak amacıyla kullanılan, cevap yüzey yöntemi için kullanışlı bir deneysel tasarımdır. Tasarlanan deneyin gerçekleştirilmesinin ardından sonuçların elde edilmesi için lineer regresyondan faydalanılır. Tasarım yapılırken çoğunlukla kodlanmış değişkenler kullanılır (Vikipedi, 2011).

Merkezi kompozit dizayn, full faktöriyel veya fraksiyonel faktöriyel ve star dizaynın kombinasyonu şeklindedir. Deney sayısı aşağıdaki eşitlik kullanılarak belirlenir:

$$\text{Deney sayısı} = 2k + 2k + 1$$

k: faktör sayısı

2k, full faktöriyel ya da fraksiyonel faktöriyel dizayndaki deney sayısını, 2 k star dizayn deney sayısını ve 1 orta seviyedeki deney sayısını belirtmektedir (Kincl, ve ark. 2005).

Merkezi kompozit dizayn yöntemiyle:

- Faktörlerin etkisi incelenebilir,
- Faktörler arasındaki etkileşim incelenebilir,
- Tekrarlanan deneyler ile deneysel hatanın olup olmadığının anlaşılabilir,
- Her bir faktörün parabolik etkileri inceleyebilir ve optimum koşullar bulunur (Kincl, ve ark. 2005).

Merkezi kompozit dizaynda, deneysel hataların saptanabilmesi için, orta seviyede 5 tekrar deneyi yapılır ve 3 faktör için deney sayısı 15' den 20' ye; 4 faktör için 25' den 30' a çıkmaktadır. Deneysel dizayn tablosu oluşturulurken kodlanmış değerler kullanılır; 2k' daki seviyeler (-1) ve (+1), 2 k' dakiler $\pm \alpha$ ve 1' deki seviye (0) olarak alınır. Genellikle incelenilen faktör değerleri arasındaki fark eşittir. Bu sebepten orta değer ile en yakın değer arasındaki fark, aralık boyutu olarak da düşünülebilir. Faktör değerlerinden star seviye değerleri elde edilir ve merkezi kompozit dizayn tablosu oluşturulur (Kincl, ve ark. 2005).

Merkezi kompozit dizayn yönteminde her bir deney için değiştirilecek parametrelerin tespitinde matematiksel matris oluşturulur. Değişkenler ve çalışma aralığındaki değerlerin kodlanması ile bir matris oluşturulur. Matrisin oluşturulmasından sonra bilgisayar yardımı ile; verilen matrisin türevi alınır (X') ve matrisin türevi ile kendisi çarpılır ($X * X'$). Daha sonra, ($X * X'$) matrissinin tersi alınır $(X * X')^{-1}$ (Kincl, ve ark. 2005).

Denemeler sonunda elde edilen yanıt değerleri ile $(X * X')^{-1} * X'$ çarpılması sonucu bulunan değerler b değerleri olarak kodlanır [$b = (X * X')^{-1} * X' * y$]. b değerlerinin belirlenmesinden sonra aşağıdaki denklem oluşturulur (Kincl, ve ark. 2005):

$$y = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3$$

Düzenlenen denklemin X_1, X_2, X_3 ' e göre türevleri alınır ve yeni denklemler elde edilir, bu denklemler sıfıra eşitlenerek çözüldüğünde X_1, X_2, X_3 ' ün kod değerleri bulunur. Elde edilen kodların gerçek değerlere dönüştürülmesiyle seçilen faktörlerin optimum koşulları belirlenmiş olur (Kincl, ve ark. 2005).

Buna göre, belirlenen parametrelerden;

Tambur dönüş hızı (dev/dk) : x_1 ,

Tambur eğim açısı (°) : x_2 ,

Yıkama suyu miktarı (l/dk) : x_3 ,

Besleme katı oranı (%) : x_4

olarak alınmıştır.

Kodlanmış değerler ile gerçek değerler arasındaki ilişki Tablo 3.4'e göre elde edilmiştir (Obeng ve diğer, 2005).

Tablo 3.4 Kodlanmış değerler ile gerçek değerler arasındaki ilişki (Obeng ve diğer, 2005).

KOD	Değişkenin Alacağı Değerler
$-\beta$	x_{\min}
-1	$[(x_{\max} + x_{\min})/ 2] - [(x_{\max} - x_{\min})/ 2\alpha]$
0	$(x_{\max} + x_{\min})/ 2$
+1	$[(x_{\max} + x_{\min})/ 2] + [(x_{\max} - x_{\min})/ 2\alpha]$
$+\beta$	x_{\max}

x_{\max} : Maksimum değerler

x_{\min} : Minimum değerler

$$\alpha = 2^{k/4} \text{ (k: değişken sayısı)}$$

Seçilen deney parametreleri için belirlenen minimum ve maksimum değerler Tablo 3.5'de gösterilmiştir. Buna göre; tambur dönüş hızı (150- 163- 175- 188- 200) dev/dak, tambur eğim açısı (1- 2- 3- 4- 5), yıkama suyu miktarı (1- 2- 3- 4- 5) lt/dak ve besleme katı oranı (20-25- 30- 35- 40) % aralığında seçilmiştir.

Tablo 3.5 Seçilen deney parametreleri için belirlenen minimum ve maksimum değerler

Tambur hızı (dev/dk)	Eğim (°)	Yıkama Suyu (l/dk)	Katı oranı (%)
X_{min} 150	X_{min} 1	X_{min} 1	X_{min} 20
X_{max} 200	X_{max} 5	X_{max} 5	X_{max} 40
α 2	α 2	α 2	α 2

3.5 Knelson Deneyleri

Knelson konsantratörü deneyleri, KC-MD3 model laboratuvar tipi cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Numune hazırlama işlemlerinin ardından homojen olarak bölünen deney numuneleri kullanılarak Knelson ayırıcısı ile yapılan ön denemelerde santrifüj kuvvet parametreleri 60 ve 90 G, yıkama suyu basıncı parametreleri ise 2 ve 4 PSI olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.3 Knelson MD3 model santrifüj ayırıcı

Tablo 3.6 KC-MD3 model laboratuar tipi Knelson cihazının teknik özellikleri

Motor Gücü (HP)	1/6
Kapasite (kg/s)	0 - 45
Pülp katı oranı (%)	0 - 75
Maksimum besleme boyutu (mm)	1,7
G kuvveti (g)	40 - 120

Knelson konsantratörü ile gerçekleştirilen ön denemelerin sonucunda elde edilen konsantreler Cr_2O_3 ürün standartları bakımından oldukça düşük tenörlü olduklarından sonuçlara bu çalışmada yer verilmemiş ve Knelson konsantratöründen elde edilen konsantreler Falcon santrifüj ayırıcısı deneylerinde kullanılmıştır.

3.6 Falcon Deneyleri

Falcon konsantratörü deneyleri, L40-VFD laboratuar tipi ayırıcı ile gerçekleştirilmiştir. Deney numunesi olarak Knelson KC-MD3 model cihazdan elde edilen konsantre ürünleri kullanılmıştır. Knelson konsantratöründe üretilen 15 kg kadar kromit konsantresi, riffle bölücü ile homojen şekilde 250'er g'lık numuneler olarak bölünmüş ve bunlardan 16 tanesi Falcon deneylerinde kullanılmak üzere poşetlenmiştir.



Şekil 3.4 Falcon L40-VFD model santrifüj ayırıcı

Tablo 3.7 Falcon L40-VFD laboratuvar tipi ayırıcının teknik özellikleri

Motor Gücü (HP)	0,5
Kapasite (t/s)	0 – 0,25
Pülp katı oranı (%)	0 - 70
Maksimum besleme boyutu (mm)	1,0
G kuvveti (g)	50 - 200

BÖLÜM DÖRT
BULGULAR VE YORUMLAR

4.1 MGS Deneyleri Sonuçları

Tablo 4.1’ de merkezi kompozit tasarım yöntemine uygun olarak yapılan 28 adet testin sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.1 Merkezi kompozit tasarımına uygun yapılan deneylerin sonuçları

Kodlanan Değişikler					Gerçek Değerler				Gözlenen Değerler	
Test no	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	dev/dak.	Eğim(°)	Y.Suyu (lt/dak.)	% Katı Oranı	Tenör %Cr ₂ O ₃	Verim (%)
1	-1	-1	-1	-1	163	2	2	25	39,70	91.37
2	1	-1	-1	-1	188	2	2	25	37,76	94.02
3	-1	1	-1	-1	163	4	2	25	42,98	84.28
4	1	1	-1	-1	188	4	2	25	43,01	92.88
5	-1	-1	-1	1	163	2	2	35	32,81	96.64
6	1	-1	-1	1	188	2	2	35	29,07	95.29
7	-1	1	-1	1	163	4	2	35	33,68	92.42
8	1	1	-1	1	188	4	2	35	36,80	94.66
9	-1	-1	2	-1	163	2	5	25	37,95	88.83
10	1	-1	2	-1	188	2	5	25	37,56	94.85
11	-1	1	2	-1	163	4	5	25	44,77	82.17
12	1	1	2	-1	188	4	5	25	41,47	90.65
13	-1	-1	2	1	163	2	5	35	29,91	92.85
14	1	-1	2	1	188	2	5	35	35,06	93.18

Tablo 4.1 (devamı)

15	-1	1	2	1	163	4	5	35	42,42	84,43
16	1	1	2	1	188	4	5	35	38,39	93,52
17	0	0	-1	0	175	3	2	30	38,83	91,76
18	0	0	1	0	175	3	4	30	39,41	91,39
19	0	-2	1	0	175	1	4	30	38,24	93,90
20	0	0	2	0	175	3	5	30	37,19	90,12
21	0	2	1	0	175	5	4	30	46,75	86,82
22	2	0	1	2	200	3	4	40	32,77	95,16
23	0	2	0	0	175	5	3	30	44,10	85,32
24	0	2	0	0	175	5	3	30	42,86	86,83
25	0	2	0	0	175	5	3	30	43,45	86,07
26	0	2	0	0	175	5	3	30	44,20	85,43
27	0	2	0	0	175	5	3	30	45,61	83,09
28	0	2	0	0	175	5	3	30	44,03	85,58

Cevap yüzey yöntemi ve merkezi kompozit tasarımı ile elde edilen sonuçların, STATISTICA 8 yazılımında çoklu regresyonu alınarak yapılan çalışmanın doğruluğu hakkında bilgiler sağlanmıştır.

Bağımlı Değişken: % Cr₂O₃ TENÖR

Multiple R: 0,90271577

F = 25,31358

R² = 0,81489576

Deney Sayısı: 28 p = 0 ,00000

p < 0,0000

Bağımlı Değişken: % Cr₂O₃ VERİM

Multiple R: 0,89538179

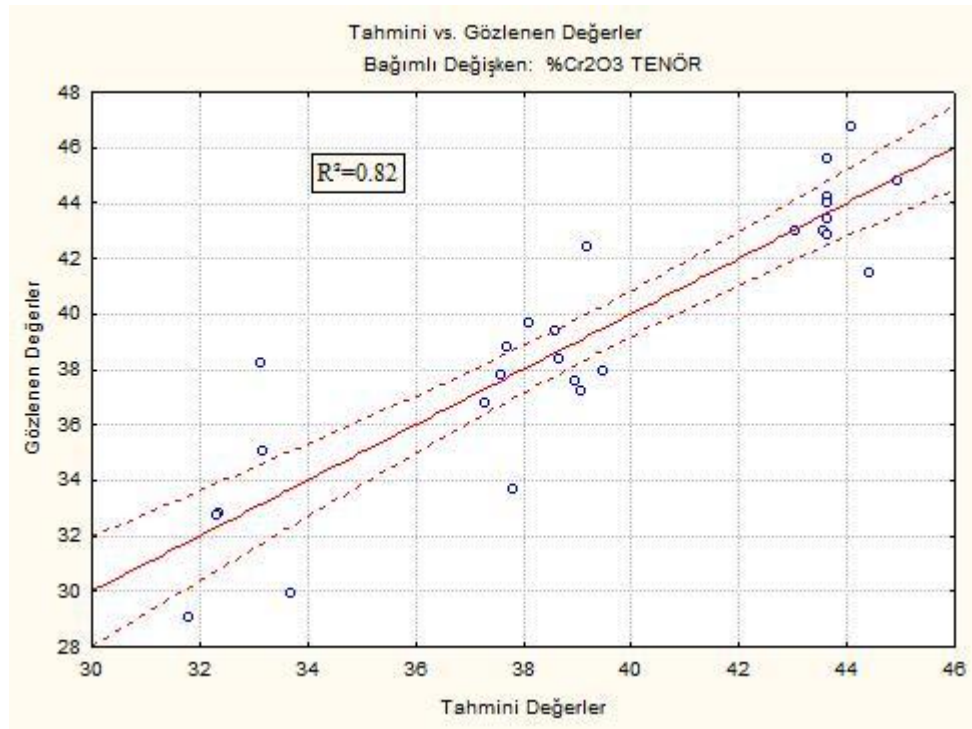
F = 23,24772

R² = 0,80170855

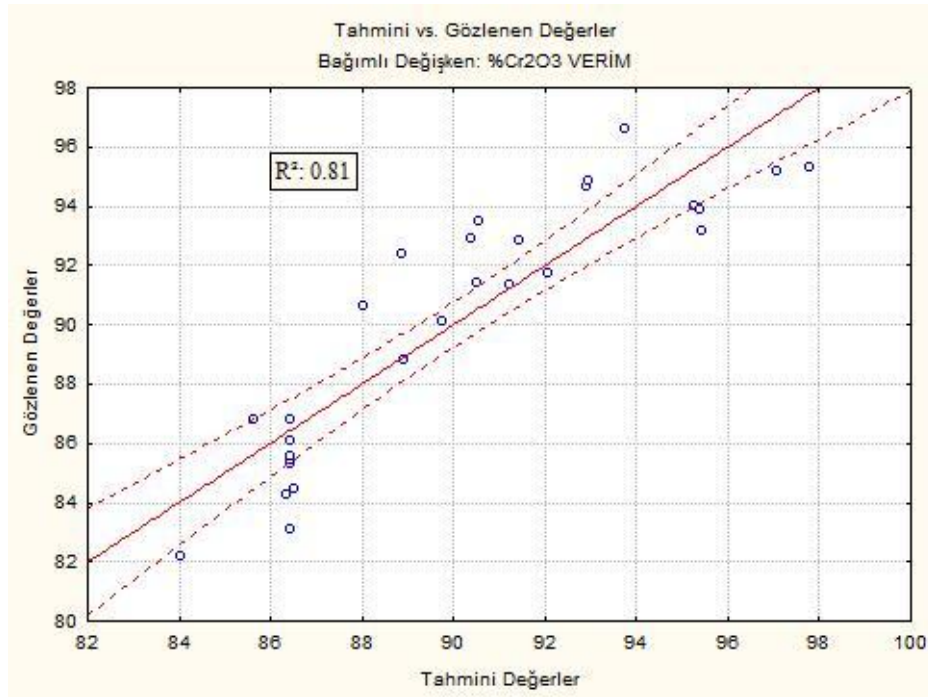
Deney Sayısı: 28 p = 0 ,000000

p < 0,0000

Çoklu regresyon (multiple regression) analizi sonucunda STATISTICA 8 yazılımıyla toplam dönüşüm modeli için hesaplanan P değeri (P value) 0,0001' den küçük bulunmuştur. P değerleri 0,01' den küçük olduğundan elde edilen model denklemi % 99 önem seviyesi şartını sağlamaktadır. Sağlanması istenen önem seviyesi % 95 olduğundan model denkleminde herhangi bir değişikliğe gidilmesine gerek olmadığına karar verilmiştir. Ayrıca gözlenen ve tahmin edilen değerler arasındaki doğruluk katsayısının (R^2 : % 82 Tenör % Cr_2O_3 ve R^2 : % 81 Verim % Cr_2O_3) yüksek çıkması, yapılan çalışmanın anlamlı olduğunu göstermiştir. Şekil 4.1' de % Cr_2O_3 tenör bağımlı değişkenine göre tahmini ve gözlenen değerlerin ilişkisi, Şekil 4.2' de ise % Cr_2O_3 verim bağımlı değişkenine göre tahmini ve gözlenen değerlerin ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.1 % Cr_2O_3 tenör bağımlı değişkenine göre tahmini ve gözlenen değerlerin ilişkisi



Şekil 4.2 %Cr₂O₃ verim bağımlı değişkenine göre tahmini ve gözlenen değerlerin ilişkisi

Tablo 4.2 Her bir parametre için tahmini ve gözlenen değerler

Test no	Tambur Dönüş Hızı (dev/dk)	Eğim (°)	Yıkama Suyu (lt/dak)	% Katı Oranı	Tenör %Cr ₂ O ₃		Verim %Cr ₂ O ₃	
					Gözlenen Değerler	Tahmini Değerler	Gözlenen Değerler	Tahmini Değerler
1	163	2	2	25	39,70	38,11	91,37	91,24
2	188	2	2	25	37,76	37,58	94,02	95,28
3	163	4	2	25	42,98	43,58	84,28	86,36
4	188	4	2	25	43,01	43,05	92,88	90,39
5	163	2	2	35	32,81	32,34	96,64	93,76
6	188	2	2	35	29,07	31,81	95,29	97,79

7	163	4	2	35	33,68	37,81	92,42	88,88	
8	188	4	2	35	36,80	37,29	94,66	92,91	
9	163	2	5	25	37,95	39,47	88,83	88,90	
10	188	2	5	25	37,56	38,94	94,85	92,93	
11	163	4	5	25	44,77	44,94	82,17	84,02	
12	188	4	5	25	41,47	44,42	90,65	88,05	
13	163	2	5	35	29,91	33,70	92,85	91,42	
14	188	2	5	35	35,06	33,17	93,18	95,45	
15	163	4	5	35	42,42	39,17	84,43	86,53	
16	188	4	5	35	38,39	38,65	93,52	90,57	
17	175	3	2	30	38,83	37,70	91,76	92,08	
18	175	3	4	30	39,41	38,60	91,39	90,51	
19	175	1	4	30	38,24	33,13	93,90	95,39	
20	175	3	5	30	37,19	39,06	90,12	89,73	
21	175	5	4	30	46,75	44,08	86,82	85,63	
22	200	3	4	40	32,77	32,31	95,16	97,06	
23	175	5	3	30	44,10	43,62	85,32	86,41	
24	175	5	3	30	42,86	43,62	86,83	86,41	
25	175	5	3	30	43,45	43,62	86,07	86,41	
26	175	5	3	30	44,20	43,62	85,43	86,41	
27	175	5	3	30	45,61	43,62	83,09	86,41	
28	175	5	3	30	44,03	43,62	85,58	86,41	
					Min	29,07	31,81	82,17	84,02
					Max	46,75	44,94	96,64	97,79

Yapılan deneysel çalışmaların modelleme yapılabilecek sağlıklı bulgular vermesinden dolayı cevap yüzey grafiklerin oluşumunu sağlayacak fonksiyonları belirlemek için, MATLAB 7.0 programında yeniden regresyon analizi yapılmış ve ikinci dereceden polinom (Quadratic) modelinin β katsayıları elde edilmiştir.

Buna göre MATLAB 7.0 programından elde edilen konsantre tenör- verim model denklemleri aşağıdaki gibidir:

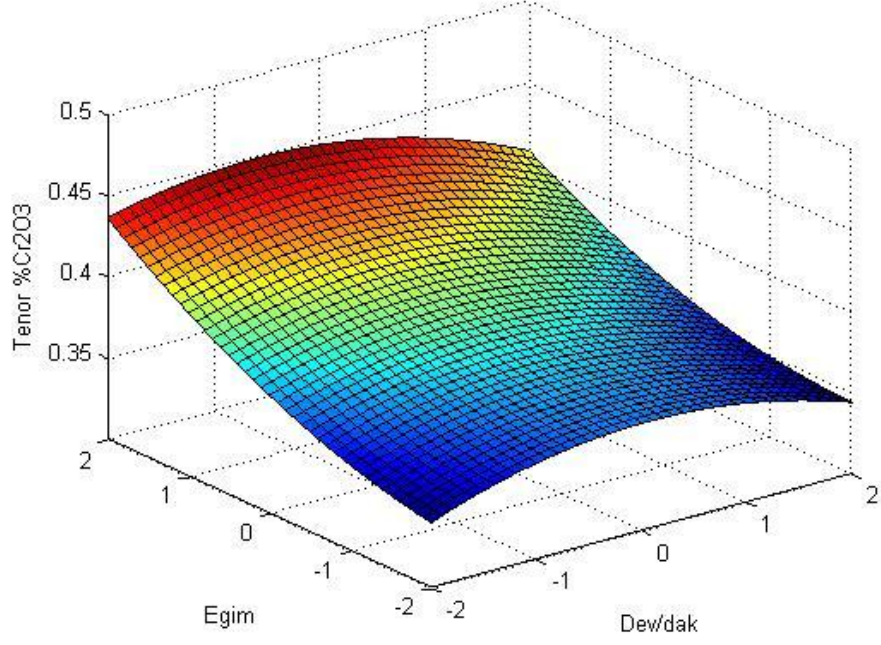
%Cr₂O₃ tenörü model denklemi:

$$Y_1 = 39,03 - 0,31X_1 + 1,99X_2 + 1,10X_3 - 3,25X_4 - 0,61X_1^2 + 0,38X_2^2 - 0,66X_3^2 + 0X_4^2 - 0,20X_1X_2 - 0X_1X_3 + 0,39X_1X_4 + 0,44X_2X_3 + 0,32X_2X_4 + 0,63X_3X_4$$

% Verim model denklemi:

$$Y_2 = 91,75 + 1,99X_1 - 12,06X_2 - 0,85X_3 + 31,66X_4 + 0,23X_1^2 - 0,45X_2^2 + 0,09X_3^2 + 0X_4^2 + 1,30X_1X_2 + 0,49X_1X_3 - 1,02X_1X_4 - 0,13X_2X_3 + 0,38X_2X_4 - 0,38X_3X_4$$

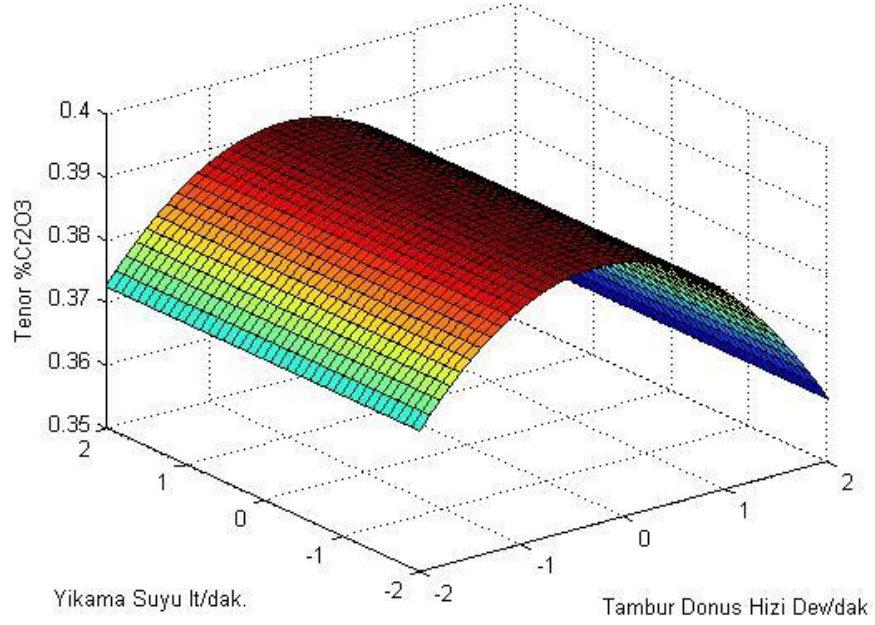
4.1.1 Konsantre tenörünün tambur dönüş hızı ve tambur eğim açısına göre cevap yüzeyi



Şekil 4.3 Konsantre tenörünün, tambur dönüş hızı ve tambur eğim açısına göre cevap yüzeyi

Şekilden görüldüğü gibi, tambur dönüş hızının düşük tutulması ve eğim açısının arttırılmasıyla daha yüksek tenörlü konsantre elde edilebilmektedir.

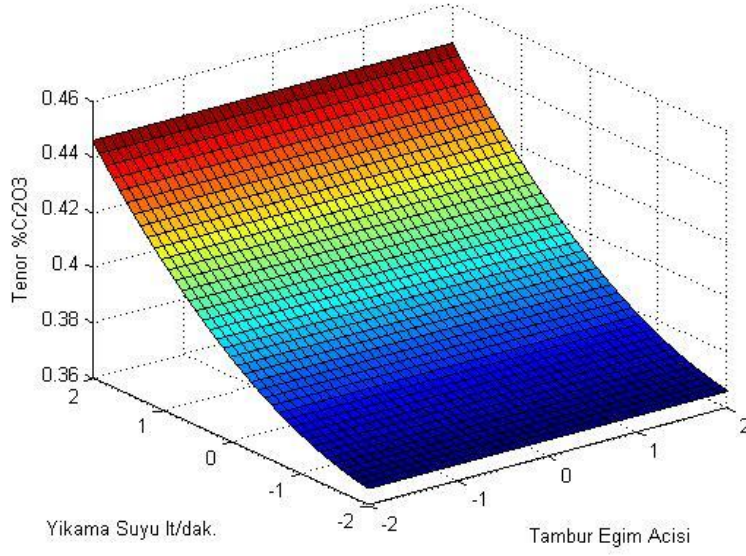
4.1.2 Konsantre tenörünün tambur dönüş hızı ve yıkama suyuna göre cevap yüzeyi



Şekil 4.4 Konsantre tenörünün, tambur dönüş hızı ve yıkama suyuna göre cevap yüzeyi

Üç boyutlu bağıntının genel formu bir önceki grafikte benzerdir. Örnek olarak, daha yüksek konsantre tenörü için, orta seviyede devir sayısı yeterli olurken akış hızının az veya çok olması konsantre tenöründe bir değişikliğe neden olmamaktadır.

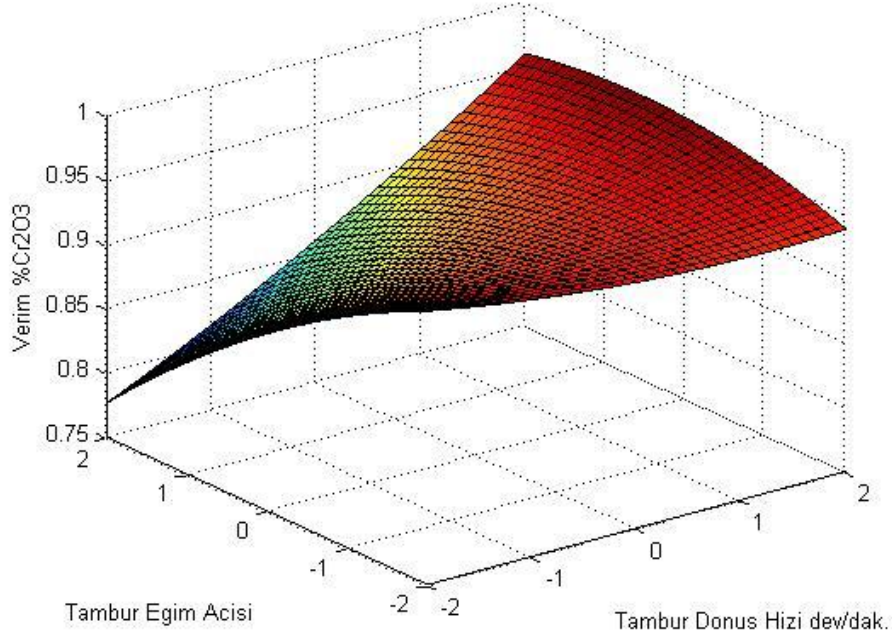
4.1.3 Konsantre tenörünün tambur eğim açısı ve yıkama suyuna göre cevap yüzeyi



Şekil 4.5 Konsantre tenörünün, tambur eğim açısı ve yıkama suyuna göre cevap yüzeyi

Şekilden görüldüğü gibi, daha yüksek konsantre tenörü için, eğimin etkisinden bahsedilmezken yıkama suyunun artırılmasıyla konsantre tenörü yükselmektedir.

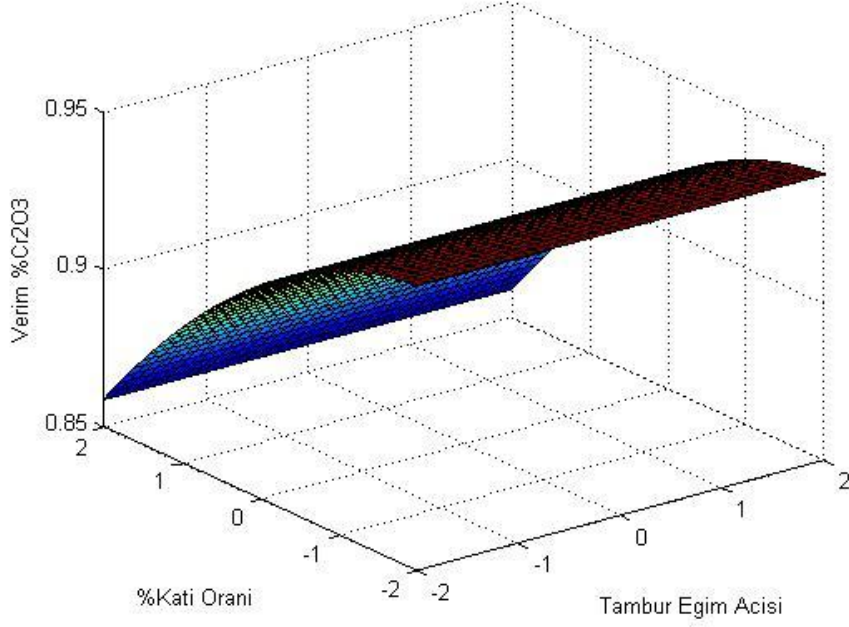
4.1.4 % Cr_2O_3 Veriminin, tambur dönüş hızı ve tambur eğim açısına göre cevap yüzeyi



Şekil 4. 6 % Cr_2O_3 Veriminin, tambur dönüş hızı ve tambur eğim açısına göre cevap yüzeyi

Şekil yorumlandığında, tambur devir sayısındaki artışla birlikte verimin sabit olarak arttığı söylenebilir. Diğer yandan, tambur eğiminin düşük değerlerde tutulduğunda verim değerinin oldukça arttığı sonucu çıkarılabilir.

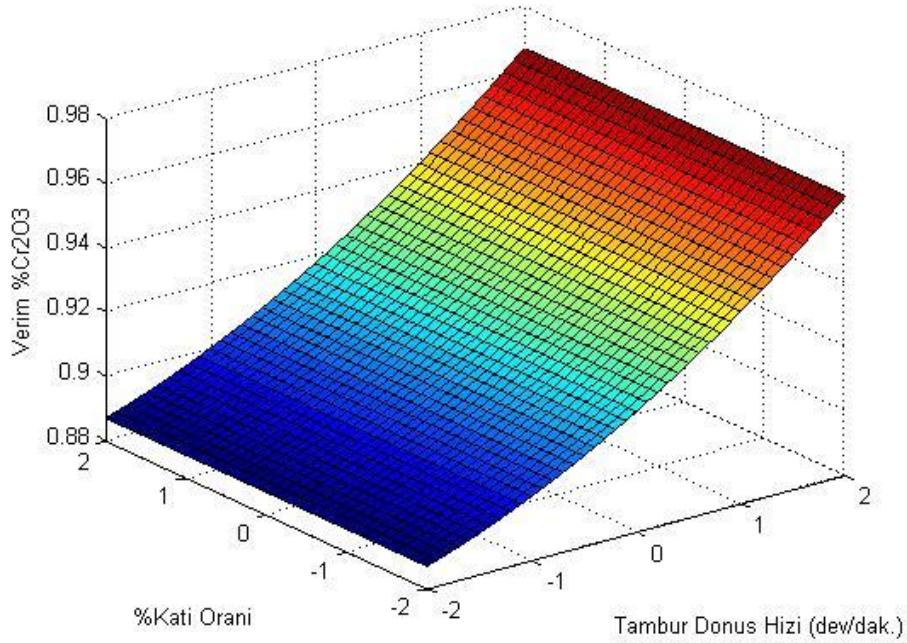
4.1.5 % Cr_2O_3 Veriminin, tambur eğim açısı ve % katı oranına göre cevap yüzeyi



Şekil 4. 7 % Cr_2O_3 Veriminin, tambur eğim açısı ve % katı oranına göre cevap yüzeyi

Şekilden görüldüğü gibi, verim eğim açısından çok % katı oranına bağlıdır. % katı oranının azaltılmasıyla verim değeri artmaktadır.

4.1.6 % Cr_2O_3 Veriminin, tambur dönüş hızı ve % katı oranına göre cevap yüzeyi



Şekil 4. 8 % Cr_2O_3 Veriminin, tambur dönüş hızı ve % katı oranına göre cevap yüzeyi

Şekil yorumlandığında, devir sayısının artmasıyla verim değerinin de arttığı anlaşılmaktadır.

4.2 Knelson Ön Zenginleştirme ve Falcon Deneyleri Sonuçları

Knelson konsantratörü ile ön zenginleştirme sonucu üretilen 15 kg kadar kromit konsantresi %100'ü 150 mikron altına öğütüldükten sonra Falcon konsantratörü ile toplam 16 adet test gerçekleştirilmiştir. Cevherin 150 mikron tane boyutu altına öğütülmesindeki amaç, daha ileri serbestleşme derecesini yakalamaktır. Deney parametreleri; su basıncı (4 psi 6 psi, 8 psi, 10 psi) ve rotor dönüş hızı 40 Hz (78 G), 45 Hz (99 G), 50 Hz (123 G), 55 Hz (148 G) olarak belirlenmiştir.

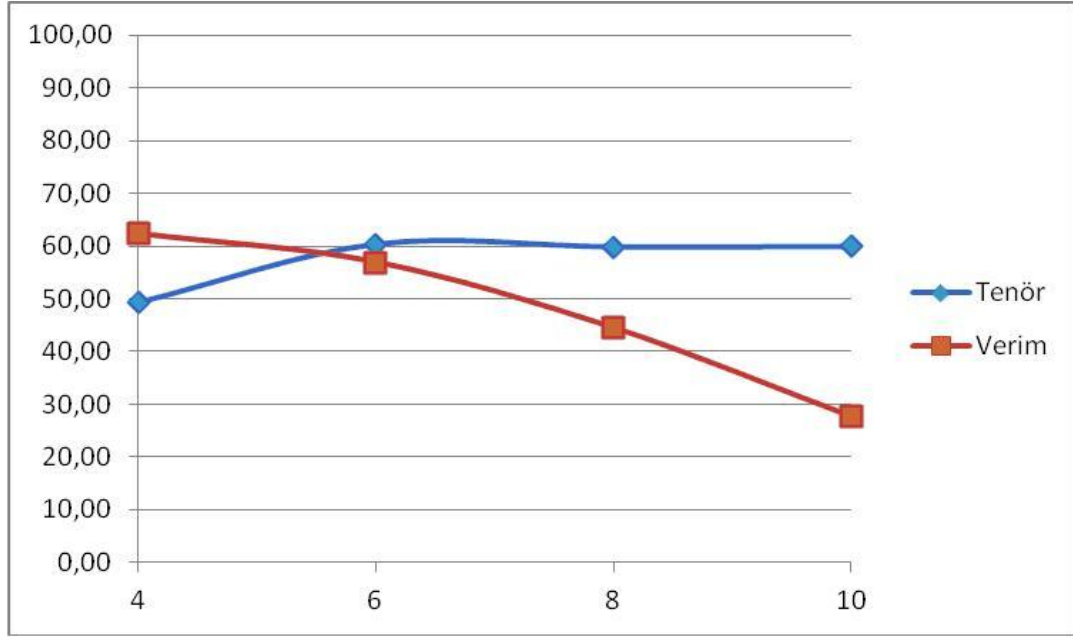
4.2.1 40 Hz (78 G) Deneyleri

Rotor dönüş hızı (78 G) ve tane boyutu (-150 mikron) sabit tutularak farklı su basınçlarında (4 psi, 6 psi, 8 psi, 10 psi) numuneler Falcon konsantratörü ile ayrı ayrı zenginleştirme işlemine tabi tutulmuştur.

Deney sonuçları Tablo 4.3’de ve deney sonuçlarına göre hazırlanan tenör-verim grafiği ise Şekil 4.9’da gösterilmektedir.

Tablo 4.3 78 G deney sonuçları

Su Basıncı (psi)	Ürünler	% Ağ.	%Cr ₂ O ₃	% Verim
4	Kons.	34,38	49,25	62,35
	Artık	65,62	15,58	37,65
	Toplam	100,00	29,25	100,00
6	Kons.	32,03	60,34	56,93
	Artık	67,97	21,51	43,07
	Toplam	100,00	29,25	100,00
8	Kons.	24,74	59,82	44,50
	Artık	75,26	24,53	55,50
	Toplam	100,00	29,25	100,00
10	Kons.	14,33	59,88	27,66
	Artık	85,67	26,19	72,34
	Toplam	100,00	29,25	100,00



Şekil 4.9 78 G tenör-verim ilişkisi

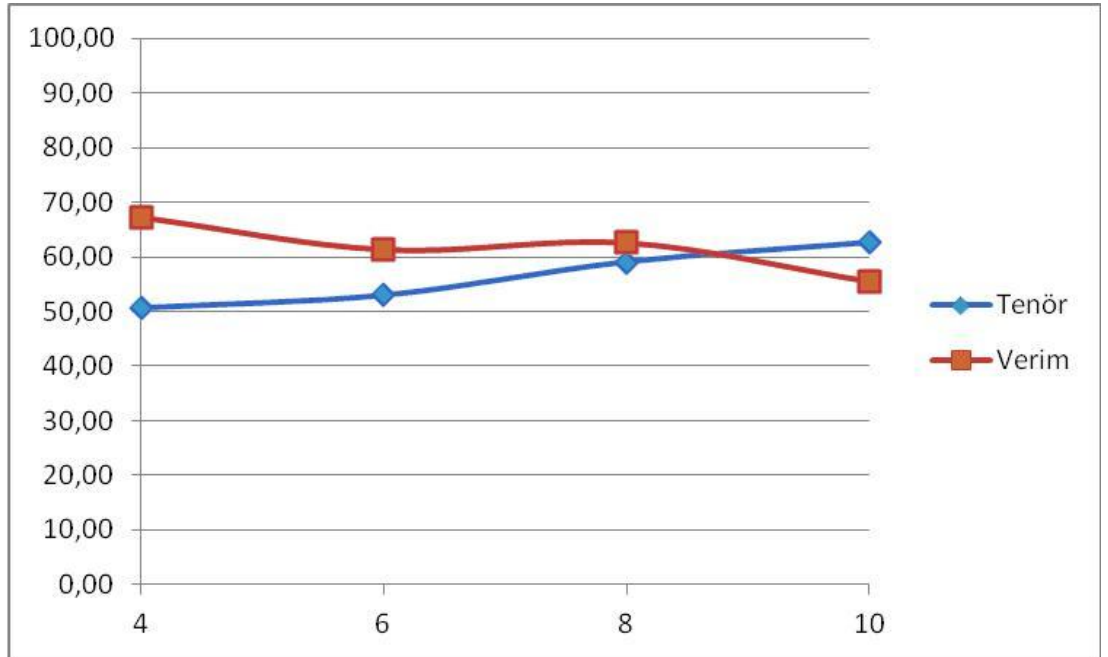
Deney sonuçları incelendiğinde; tenörün 4 PSI su basıncında %49,25'ten 6 PSI su basıncında %60,34'e çıktığı görülmektedir. Ancak, 10 PSI su basıncına kadar ise sabit bir seyir izlemiştir. Verim ise, 4 PSI su basıncında %62,35 iken 10 PSI su basıncında %27,66'a düşmüştür. Verim değerindeki bu düşüş, su basıncının artmasıyla malzemenin Falcon konsantratörünün haznesinde kalma süresinin azalması ve seperasyon işlemine daha az süreyle maruz kalması ile açıklanabilir. Ayrıca, su basıncı 6 PSI değerinden 10 PSI değerine doğru arttırıldıkça tenör değeri hemen hemen aynı kalmış fakat daha az miktarda konsantre kazanımı gerçekleşmiştir.

4.2.2 45 Hz (99 G) Deneyleri

Rotor dönüş hızı 99 G ve tane boyutu -150 mikron olarak belirlenerek hazırlanan numuneler ile Falcon konsantratöründe sırasıyla 4, 6, 8 ve 10 PSI su basınçlarında gerçekleştirilen testlerin sonuçları Tablo 4.4'de, tenör-verim grafiği ise Şekil 4.10'da gösterilmektedir.

Tablo 4.4 99 G deney sonuçları

Su Basıncı (psi)	Ürünler	% Ağ.	%Cr ₂ O ₃	% Verim
4	Kons.	41,51	50,59	67,15
	Artık	58,49	17,56	32,85
	Toplam	100,00	29,25	100,00
6	Kons.	36,89	52,93	61,30
	Artık	63,11	19,54	38,70
	Toplam	100,00	29,25	100,00
8	Kons.	34,20	59,01	62,54
	Artık	65,80	18,37	37,46
	Toplam	100,00	29,25	100,00
10	Kons.	28,10	62,57	55,54
	Artık	71,90	19,58	44,46
	Toplam	100,00	29,25	100,00



Şekil 4.10 99 G tenör-verim ilişkisi

Deney sonuçları yorumlandığında; su basıncının 4 PSI değerinden 10 PSI değerine doğru artmasıyla birlikte, tenörün %50,59' dan %62,57'e doğru artan bir

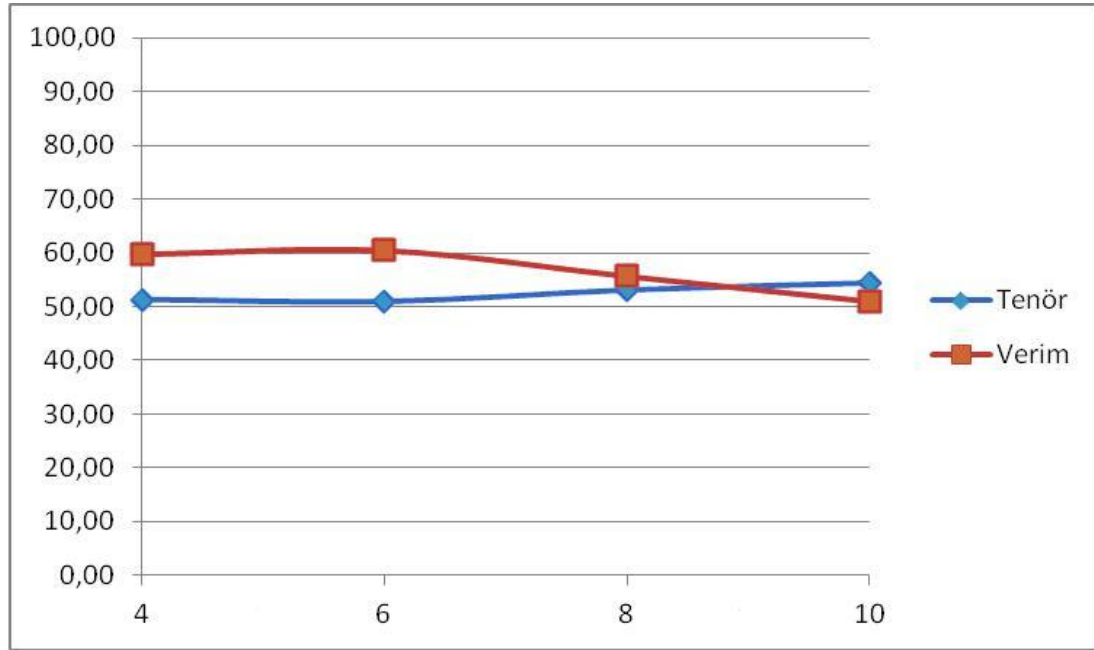
seyir izlediği söylenebilir. Diğer yandan verimin ise, 4 PSI su basıncında %67,15 olduğu ancak 10 PSI su basıncında ise %55,54' e düştüğü görülmektedir. Buna göre; su basıncının artmasıyla birlikte yüksek tenörlü fakat görece düşük verimli bir konsantre elde edilebilmektedir.

4.2.3 50 Hz (123 G) Deneyleri

Bu grup deneylerde, rotor dönüş hızı 123 G olarak seçilmiş ve -150 mikron boyutundaki malzeme sırasıyla 4, 6, 8 ve 10 PSI su basıncında ayrı ayrı Falcon konsantratörüne beslenmiştir. Deney sonuçları Tablo 4.5'de, tenör-verim grafiği ise Şekil 4.11'de gösterilmektedir.

Tablo 4.5 123 G deney sonuçları

Su Basıncı (psi)	Ürünler	% Ağ.	%Cr ₂ O ₃	% Verim
4	Kons.	36,71	51,31	59,77
	Artık	63,29	20,03	40,23
	Toplam	100,00	29,25	100,00
6	Kons.	38,36	50,93	60,45
	Artık	61,64	20,73	39,55
	Toplam	100,00	29,25	100,00
8	Kons.	36,54	53,06	55,64
	Artık	63,46	24,36	44,36
	Toplam	100,00	29,25	100,00
10	Kons.	29,89	54,35	50,93
	Artık	70,11	22,32	49,07
	Toplam	100,00	29,25	100,00



Şekil 4.11 123 G tenör-verim ilişkisi

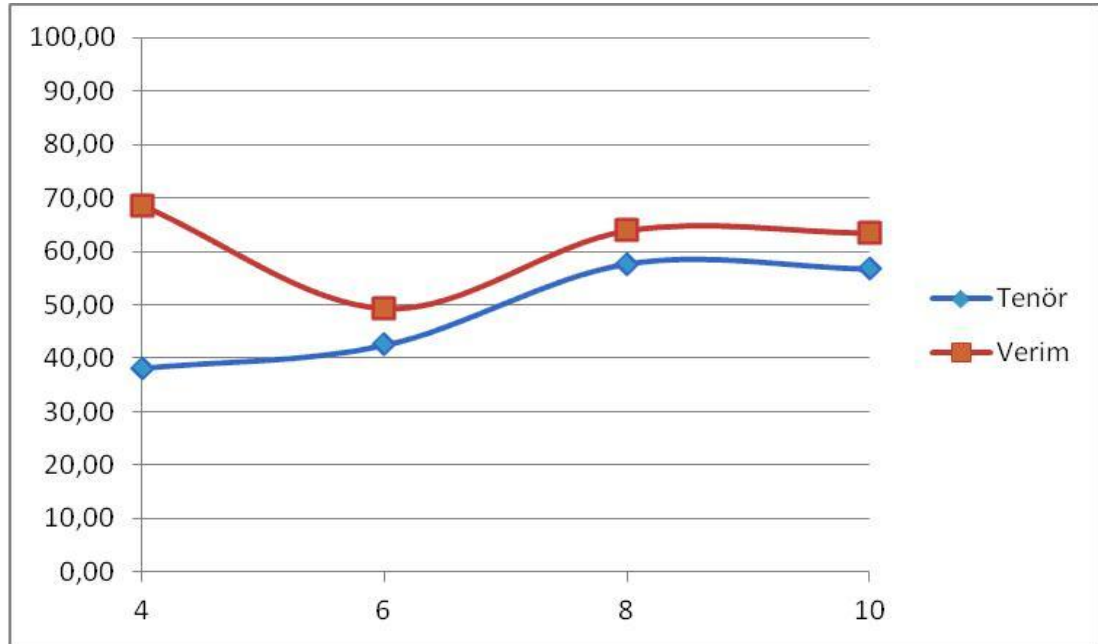
Deney sonuçları irdelendiğinde; artan su basıncı ile birlikte tenör değerlerinde 4 PSI su basıncında %51,31' den 10 PSI su basıncında %54,35' e yükseliş fakat verim değerlerinde %59,77' den %50,93' e düşüş gözlemlenmektedir. Ayrıca, artan su basıncı ile birlikte daha yüksek tenörlü fakat daha az miktarda konsantre elde edilebilmiştir.

4.2.4 55 Hz (148 G) Deneyleri

Rotor dönüş hızı (148 G) ve besleme tane boyutu (-150 mikron) sabit tutularak 2, 4, 6 ve 8 PSI su basınçlarında yapılan deneylerin sonuçları Tablo 4.6' da ve tenör-verim grafiği Şekil 4.12' de gösterilmektedir.

Tablo 4.6 148 G deney sonuçları

Su Basıncı (psi)	Ürünler	% Ağ.	%Cr ₂ O ₃	% Verim
4	Kons.	52,61	38,22	68,66
	Artık	47,39	19,37	31,34
	Toplam	100,00	29,25	100,00
6	Kons.	37,06	42,52	49,40
	Artık	62,94	25,64	50,60
	Toplam	100,00	29,25	100,00
8	Kons.	37,33	57,73	63,95
	Artık	62,67	19,38	36,05
	Toplam	100,00	29,25	100,00
10	Kons.	35,55	56,75	63,49
	Artık	64,45	18,00	36,51
	Toplam	100,00	29,25	100,00



Şekil 4.12 148 G tenör-verim ilişkisi

Deney sonuçlarına dayanılarak, su basıncının 4 PSI' dan 6 PSI' ya çıkartıldığında kromit tenörünün %38,22' den %42,52' e çıktığı; buna karşın verim değerinin %68,66'dan %49,40'a gerilediği söylenebilir. 6 PSI su basıncından 10 PSI su basıncına çıkıldığında ise, yüksek tenör ve verim değerlerine ulaşıldığı gözlenmektedir. 10 PSI su basıncı ile yapılan deneyde kromit tenörü %56,75' e, verim ise %63,49' a ulaşmıştır.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, Adana ili, Aladağ ilçesinde bulunan Sivişlitepe Ocağından temin edilen % 18,62 Cr₂O₃ tenörlü kromit cevheri kullanılarak numune hazırlama işlemlerinin ardından multi gravite cihazlarından Multi Gravite Ayırıcısı (MGS), Knelson ve Falcon ile bir dizi cevher zenginleştirme deneyleri yapılmıştır.

MGS deneylerinde, değiştirilebilir parametrelerden tambur dönüş hızı, tambur eğim açısı, yıkama suyu miktarı ve % katı oranının MGS üzerindeki etkileri merkezi kompozit deney tasarımına göre planlanmış deneylerle incelenmiştir. Değiştirilebilir parametrelerden tambur dönüş hızı; 150- 163- 175- 188- 200 dev/dk, tambur eğim açısı; 1- 2- 3- 4- 5°, yıkama suyu miktarı; 1- 2- 3- 4- 5 lt/dk ve % katı oranı; 20- 25- 30- 35- 40 % aralığında seçilmiştir. Toplam 28 adet deney yapılmış ve deneysel verilerin çoklu regresyon analizleri, STATISTICA 8 ve matematiksel software modeli MATLAB 7.0 kullanılarak yapılmış, konsantre tenörü ve verimi üzerine matematiksel model denklemleri türetilmiştir. Bu model denklemlerden cevap yüzey ağı grafikleri türetilerek deney parametrelerinin etkinliği hakkında bilgiler elde edilmiştir. Model denklemlerinden tahmini değerler ile gözlenmiş deney sonuçları arasında iyi uzlaşma (yakınlık) görülmüştür. R² doğruluk katsayısı % Cr₂O₃ tenörü için % 82, % Cr₂O₃ verimi için % 81 olarak belirlenmiştir.

MGS deney sonuçlarına göre, tambur devir sayısının konsantre tenörü ve verimi üzerinde mühim etkisi varken, tambur eğiminin yüksek tutulması konsantre tenörünü olumlu yönde etkilemektedir. Daha yüksek konsantre verimi için, % katı oranı düşük seviyelerde tutulmalıdır. Yıkama suyu miktarının etkisinin önemsiz olduğu görülmüştür. Serbestleşme tane boyutu klasik gravite yöntemleri için çok ince olan krom cevherlerinin, serbestleşme boyutuna indirilerek MGS' de yüksek tenör ve randımanla kazanımı mümkün olabilecektir.

Knelson konsantratörü ile 60-90 G santrifüj kuvvet uygulanarak 2-4 PSI yıkama suyu basınçlarında ön denemeler yapılmış ancak elde edilen ürünlerin % Cr_2O_3 ürün standartlarından uzak olmasından dolayı konsantreler Falcon deneyleri için besleme malı olarak değerlendirilmiştir. Buna göre, Knelson santrifüj ayırıcısıyla üretilen 15 kg kadar kromit konsantresi %100' ü 150 mikron altına öğütülmüş ve Falcon konsantratörü ile toplam 16 adet deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan numunelerin ortalama Cr_2O_3 tenörü % 29,25' tir. Falcon konsantratörü ile gerçekleştirilen deneylerde değiştirilebilir parametrelerden rotor dönüş hızı, 78- 99- 123- 148 G; su basıncı ise, 4- 6- 8- 10 PSI olarak seçilmiştir.

Falcon deney sonuçlarına göre; artan su basıncı değerleriyle birlikte kromit tenörünün de arttığı ancak konsantre veriminin 40 Hz (78 G), 45 Hz (99 G) ve 50 Hz (123 G) dönüş hızlarında genel olarak düştüğü görülmüştür. 55 Hz (148 G) ile yapılan deneylerde ise artan su basıncı değerleriyle birlikte konsantre verimi de artış göstermiştir. Buna göre; 55 Hz-8 PSI ile gerçekleştirilen deney sonucunda Cr_2O_3 tenörü % 57, 73 ve konsantre verimi % 63,95 olarak; 55 Hz-10 PSI ile gerçekleştirilen deney sonucunda ise Cr_2O_3 tenörü % 56,75 ve konsantre verimi % 63,49 olarak gerçekleşmiştir. 55 Hz dönüş hızında su basıncının artırılarak yapılacak deneyler ile daha yüksek Cr_2O_3 tenörlerine olmasa da; daha yüksek konsantre verimlerine ulaşılabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ağaçayak, T. (2004). *Topraktepe (Yeşildağ-Beyşehir-Konya) kromitlerinin zenginleştirme yöntemlerinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Aslan, N. (1996). *Değişik hammaddelerin multi gravite separatörü ile zenginleştirme parametrelerinin araştırılması*, Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- Atak, S. (1990). *Flotasyon*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Vakfı
- Aykol, A. ve Gültekin, A. H. (1992). *Plaser yataklar*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Vakfı
- Celep, O. (2005). *Mastra ve Kaletaş (Gümüşhane) cevherlerinden altın kazanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Celep, O., Alp, İ., Deveci, H., Vıçıl, M. ve Yılmaz, T. (2006). Knelson santrifüj gravite ayırıcısıyla Mastra (Gümüşhane) cevherinden altın kazanımı. *Yerbilimleri Dergisi*, 19 (2), 175-182.
- Chan, B.S.K., Mozley, R.H, Childs, G.J.C., çev., Yüce, A.E, (1994). Multi gravite ayırıcı. *Madencilik*, 33 (1), 33-41.
- Çilingir, Y. (1996). *Metalik cevherler ve zenginleştirme yöntemleri* (2.Baskı). İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi.
- Deniz, V. (1992). *Burdur-Yeşilova yöresi kromitlerinin zenginleştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir
- DPT. (2001). Metal Madenler (Krom). 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı, *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Metal Madenler Alt Komisyonu Krom Çalışma Grubu Raporu*, DPT: 2626- ÖİK: 637, Ankara.

- Ergin, Z., Cöcen, İ. ve Semerkant, O. (1998). *Cevher zenginleştirme laboratuvar ders notları* (3. baskı). İzmir: D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi.
- Falcon, (2011). *Falcon concentrator*. 21 Ağustos 2011, <http://www.seprosystems.com/mining-equipment/gravity-concentrators.html>
- Gence, N. (1985). *Elazığ-Kefdağı kromitlerinin zenginleştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Gökçe, A. (1995). *Maden yatakları*. Sivas: Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları.
- Huang, L. (1996). *Upgrading of gold gravity concentrates: A study of the knelson concentrator*, Doktora Tezi, McGill Üniversitesi, Kanada.
- Jazdarehee, M. (1993). *Concentration of very fine particles by centrifuge*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Kıdıman, F. B. (2009). *Düşük tenörlü krom cevherlerinin zenginleştirilmesinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Kincl, M., Turk, S., & Vreecer F. (2005). Application of experimental design methodology in development and optimization of drug release method. *International Journal of Pharmaceutics*, 291, 39-49.
- Knelson, (2011). *Knelson concentrator*. 20 Ağustos 2011, <http://www.knelsongravitysolutions.com/page348.htm>
- Knelson, B, Jones, R. (1993). A new generation of Knelson concentrators a totally secure system goes on line. *Symposium on Environmental Aspects of Minerals Engineering*, 25-27.
- Kurşun, H. (1993). *Karanlıkdere düşük tenörlü kromit cevherinin optimum zenginleştirme koşullarının araştırılması çalışmaları*, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.

- Kurşun, İ. (2003). *Karadeniz bölgesi sahil kumlarının titanyum açısından değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Magumbe, L. (2002). *Process design for gold recovery from the Chester deposit*, Yüksek Lisans Tezi, Laurentian Üniversitesi, Kanada.
- Obeng, D. P., Morrell, S., & Napier-Munn, T. J. (2005). Application of central composite rotatable design to modeling the effect of some operating variables on the performance of the three-product cyclone. *International Journal of Mineral Processing*, 76, 181-192.
- Önal, G. (1980). *Cevher hazırlamada flotasyon dışındaki zenginleştirme yöntemleri*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversite Matbaası.
- Samanlı, S. (1998). *Kromit tesis artıklarının değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Sayılı, İ. S. (2006). *Maden jeolojisi ders notu*. Ankara.
- Serter, N. (1998). *Pozantı-Karsantı (Aladağ) yöresi düşük tenörlü kromitlerinin zenginleştirilme problemleri*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Şen, S., Çiçek, T., Tanrıverdi, M., Akar, G. ve İpekoğlu, A. (2008). Bergama-Ovacık cevherinden altın kazanımında Knelson santrifüj separatörün kullanımı, *Geosound Yerbilimleri Dergisi*, 53, 431-442.
- Taggart, A.F. (1951). *Elements of ore dressing*. New York: John Wiley and Sons.
- Tahtakıran, E. (17 Kasım 2008). *Krom cevheri, ferrokrom ve paslanmaz çelikle ilgili istatistiksel bilgiler ve yorumlar*. 16 Ağustos 2011, http://www.maden.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=3334&tipi=23&sube=0
- Temur, S. (1997). *Metalik maden yatakları*. Konya: Selçuk Üniversitesi Basımevi.

Turgut, B. (1995). *Düşük tenörlü Karaburhan kromitlerinin zenginleştirilebilirliğinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

Yıldız, N. (2007). *Cevher hazırlama*. Ankara: Ertem Basım Yayın Dağıtım Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.

Yiğit, E. (1994). Boyuta göre sınıflama ve ayıklama ile zenginleştirme. G. Önal ve G. Ateşok, (Ed.), *Cevher hazırlama el kitabı* içinde (131-146). İstanbul: Vitrin Yayınları.

Zedef, V. (1995). *Maden yatakları ders notları*, Selçuk Üniversitesi, Konya.