

# *Hidrosihlonlurun Teorisi, Uygulunmm Alanları, Ayrım, Sınırına Etki Eden Fahtör- ler ve Çalışma Prensipleri (\*)*

Yazpn : Dr. Helmut Trawinski (\*\*)

Çeviren : Rahman Turgut Arık (\*\*\*)

Taneciklerin çökelmek suretiyle birbirlerinden ayrılmaları doğada çamurlu sularla beslenen bütün göl, havuz gibi yerlerde olagelmektedir. Dibe çöken tanecikler girişe göre daha koyulaşmış olan bir sediman oluştururlar, geri kalan su ise kaba tanelerinden arınmış olarak akar gider. Madencilikte bu işi gerçekleştiren yapay tekneler «tikîner» ofarak adlandırılırlar. Tikîner içinden geçen su akımının hızı, ince tanelerin çökmesine izin vermeyip üst akımla dışarı atılmasına neden olacak kadar fazlaysa, ince ve kaba tanelerin ayırımı gerçekleşiyor demektir.

Benzer reaksiyonlar dönen süspansiyonlarda da gerçekleşir. Bunlarda çökme hızını arttırarak ayırımı kolaylaştıran merkezkaç kuvvetler de söz konusudur. Hidrosiklonlar bu prensibe göre çalışan aletlerdir. Hidrosiklona teğetsel olarak basınç altında yapılan besleme süspansiyona dönüş hareketini verir. Şekfl — 1, bir hidrosiklonun çalışmasını şematik olarak göstermektedir. Siklona giren süspansiyon, siklonu alt çıkıştan terketmeyi amaçlayarak silindirik ve konik duvarların iç yüzünde birincil girdabı oluşturur. Sonuçta akımın yalnız bir kısmı, kaba parçacıkları ve hatta bütün katıları beraberinde taşıyarak, alt

çıkış olarak siklonu terkeder. Geriye kalan sıvı kısım, kabalardan arınmış olarak veya arta kalan ince tanecikleri beraberinde taşıyarak, yukarıya doğru çıkar ve hidrosiklonun merkezini çevreleyen ikincil girdabı oluşturur ve sonuçta siklonu üst çıkıştan terkeder. İkincil girdabın merkezinde, kabarcıklar halinde içeriye taşınan veya giriş suyu içinde çözünmüş olarak bulunan bütün havanın toplandığı, bir düşük basınç bölgesi oluşur. İkincil girdapta darresei hız daha fazla olduğundan daha yüksek değerlerde merkezkaç kuvvetleri oluşur. Bunun sonucu olarak daha etkili ikincil bir ayırım gerçekleşir. İkincil girdapta ayrılan ince tanecikler radyal olarak çökerek birincil girdaba karışırlar ve birçoğu siklonu alt çıkıştan terkeder, Dolayısıyla, hîdrosiklon içindeki ayırım iki ayrı safha sonucunda gerçekleşir ve nihai ayırım iriliği esas olarak içteki girdabın ivmesi ile belirlenir.

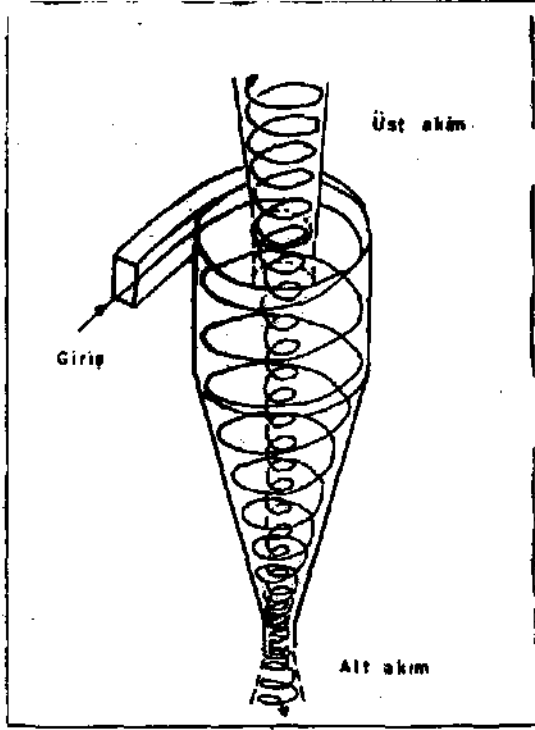
## TEORİK İNCELEMELER

Siklon içindeki akım diyagramı, teğetsel hızda radyal yönde (merkeze doğru) artış yaratan bir potansiyel girdap olarak tanımlanır (Şekil — 2). ideal, sürtünmesi olmayan bir girdap için Helmholtz eşitliği şu şekildedir.

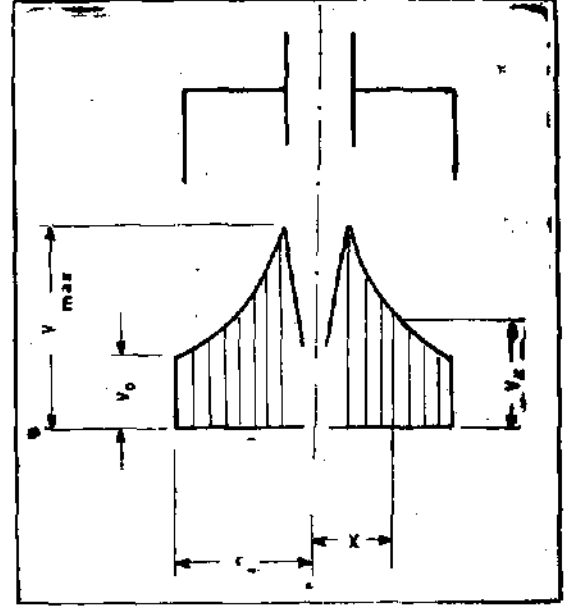
O Engineering and Mining Journal, September 1976, Volume 177, No. : 9 da yayınlanmıştır.

(\*\*) Director, Equipment Construction Div., Amberger Kaolinerwerke GmbH.

(\*\*\*) Maden Yük. Müh., T.D.Ç.İ. Hasaınçelebi Demir Tesisleri Grup Başkanlığı.



Şekil - 1 Hidrosiklon akım diyagramı.



Şekil - 2 Potansiyel girdabın teğetsel hız diyagramı.

$$v \cdot r = \text{sabit} \quad (1 a)$$

$$V_0 \cdot r = V_x \cdot x \quad (1 b)$$

Dolayısıyla merkezden herhangi bir x uzaklığındaki hız;

$$V_x = V_0 \cdot \frac{r}{x} \quad \text{dir.} \quad (2 a)$$

Ayrıca;  $v = r \cdot w$  olduğundan ( $w = \text{açısal hız}$ )  
 $w r^2 = \text{sabit}$  (1 c) olur ve buradan

$$w_x = w_0 \cdot \left(\frac{r}{x}\right)^2 \quad (2 b)$$

eşitliğini elde ederiz.

Tecrübelerden elde edilen bilgilere göre, sürtünme kuvvetleri hesaba katıldığında Heimholte eşitliği

$$v \cdot r^n = \text{sabit}, \text{ şekli alır.} \quad (3 a)$$

Bradley'e göre temiz su için  $n = 0.7$  dir. Krijgsman'da n yi avara i katı içerikli süspansiyonlar için  $n=0.5$  olarak saptamıştır. İkinci kabule göre :

$$v \cdot V = \text{sabit dir.} \quad (3 b)$$

Buna göre :

$$V_x = V_0 \cdot \sqrt{\frac{r}{x}} \quad (4 a)$$

$$\text{ve } w_x = w_0 \cdot \left(\frac{r}{x}\right)^{2/2} \text{ olur.} \quad (4 b)$$

Teğetsel hızdaki veya açısal hızdaki artışa paralel olarak merkezkaç kuvveti de artar. Bu

$$b = r \cdot w^2 \text{ eşiti iğ iy le belirlenir.} \quad (5 a)$$

Örneğin;

$$b_0 = r \cdot w_0^2 \quad (5 b)$$

$$b_x = x \cdot w_x^2 \quad \text{ve} \quad (5 c)$$

5 c de  $w_x$  yerine 4 b deki değerini koyarsak

$$b_x = x \cdot w_0^2 \cdot \left(\frac{r}{x}\right)^3 \quad (6 a) \text{ elde ederiz.}$$

6 a da  $W_0^2$  yerine 5 b değerini koyarsak

$$b_x = b_0 \cdot \left(\frac{r}{x}\right)^2 \quad (6 b) \text{ elde ederiz.}$$

Bu eşitlik açıkça göstermektedir ki; ikin-

cil girdaptaki merkezkaç İvme birincide? kinden İlgiyi yarıçapların ters orantısının karesi kadar fazladır. Dolayısıyla ayırma sınırını ikincil girdap belirlemektedir.

Deney sonuçlarından ayırım sınırını görebilmek için Tromp eğrisini çizmek gerekir. [Şekil — 3)

A diyagramı Rosin - Rammler - Bennet ağı şeklinde bir tane iriliği dağılımını göstermektedir. Kümülatif elek üstü R, tanecik çapı d ye karşı çizilmiştir. Eğer • iki tanecik çapı, x ve x — & , arasındaki fark ise bu çaplara karşılık olan elek üstleri arasında A R farkı;

z)  $R = R_x - R(x - S)$  şeklinde ifade edilir.

AH değerleri üst akımın ve alt akımın tane irilikleri dağılımlarından alınmalıdır. Sırasıyla 'AR' v. A R<sub>0</sub> . Bunlara ek olarak hesaplamalar için kütle kazanımı (K) değerine de gerek vardır. Bu değer iki şekilde elde edilebilir :

1. Aynı anda alınan numunelerden giriş ve alt çıkışın katı miktarlarını ağırlık olarak ölçerek, M<sub>E</sub>, giriş katı miktarı ve M<sub>C</sub> alt çıkış katı miktarı olarak gösterilirse, kütle kazanımı K,

$$K = \frac{M_E}{M_C} \text{ olur} \quad (7)$$

2. Girişin (E, e), üst çıkışın (F, f) ve alt çıkışın (C, c) katı miktarlarından (büyük harfler gram/Mtre, küçük harfler ağırlık yüzdesi değerlerine karşılıktır).

$$K = \frac{E - F}{C - F} \cdot \frac{F}{C} \quad (8 a)$$

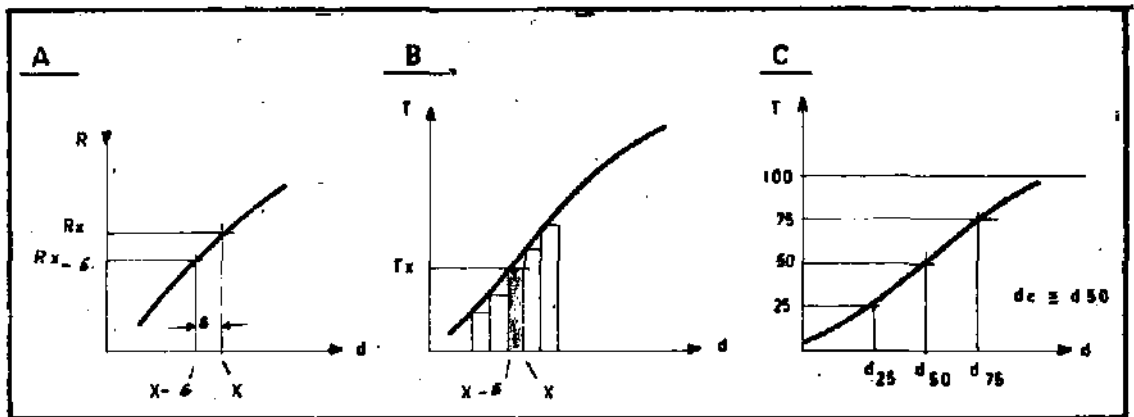
$$\text{veya;} \quad K = \frac{e - f}{c - f} \cdot \frac{s_c - c}{s_c - e} \quad (8 b)$$

olarak hesaplanır. 8 b eşitliğindeki S<sub>c</sub> değeri katıların özgül ağırlığıdır.

Şekil — 3 deki B diagramı bir Tromp eğrisidir. Farklı iki tane iriliği arasında (örneğin x ve x—s) tekabül eden kütle kazanım değerlerinin (T<sub>x</sub>), tane çapı (d) na karşı çizilmesiyle elde edilmiştir. Ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$T = \frac{K \cdot \Delta R_c}{K \cdot \Delta R_c + (1 - K) \cdot \Delta R_f} \quad (9)$$

Sonuçta elde edilen histogram bir eğriye dönüştürülmelidir. Ayırım sınırı, Tromp eğrisinde T nin 0.5 e yani % 50 ye eşit olduğu nokta olarak tanımlanır. Bu noktada taneciklerin üst akımla veya alt akımla gitme şansları aynıdır (Şekil — 3 c) Ayırımın keskinliği T=0.75 ve T=0.25 e karşılık olan tanecik çaplarına, d<sub>75</sub> ve d<sub>25</sub> bağ-



Seldi — 3 Tromp eğrisinin orijini : A) Tane iriliği dağılımı eğrisi (Rosin - Rammler - Bennet ağı) ; B) Kütle kazanım değerkai Tromp eğrisini oluşturur ; C) Ayırım smını ve ayırım hatasını belirleyen Tromp eğrisi değerleri.

lidir. Ayırım hatası (Imperfection) diye tanımlanan  $I$  aşağıdaki formüle hesaplanır.

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2 \cdot d_c} \quad (10)$$

Hidrosiklonlarla ilgili literatürde ayırım sınırının hesabı için çeşitli formüller vardır. Bu formüllerin hemen hemen hepsi Stake's kanunundan faydalanılarak çıkarılmaktadır.

Yercekim etkisindeki bir ortamda çökme hızı :

$$U_{so} = \frac{d^2 (q_s - q_l)}{18 \Omega} \cdot g \text{ dir.} \quad (11)$$

Burada :

- $q_s$  = Katıların yoğunluğu
- $q_l$  = Sıvıların yoğunluğu
- $\beta$  = Sıvının dinamik viskozitesi
- $g$  = Yercekim ivmesi dir.

Merkezkaç kuvvetlerin etkisi altındaki alanlarda, yercekim ivmesi  $g$  nin yerini merkezkaç ivmesi  $b$  almaktadır. Bu nedenle, hidrosiklon içindeki çökme hızı, ivme faktörü ( $z$ ) kadar çoğalmaktadır. Yani

$$U_s = \frac{d^2 \cdot (q_s - q_l)}{18 \Omega} \cdot b = U_{so} \cdot z \quad (12)$$

olmaktadır.

Ayırım sınırına eşit çaplı taneciklerin çökme hızı, o noktadaki sınıfiandırıcı alanının kapasitesini belirler.

$$q_F = \frac{Q}{F} \quad (13)$$

Dolayısı ile  $U_F = q_F$  dir. (14)

Şimdi de  $F$  (ayırım alanı),  $Q$  (akış kapasitesi),  $z$  (ivme faktörü) ve  $d_c$  (ayırım sınırı) ile ilgili aşağıdaki formülleri incelersek : Ayırım sahası  $F$  için;

$$F = \frac{2}{D \cdot 7T} \cdot U \cdot x D^2$$

Burada \* incelik değeri (slenderness), etkili uzunluk  $L_e$  nin siklon çapı  $D$  ye oranı olarak tanımlanır.

İvme faktörü  $z$  için;

$$z = \frac{V^2}{g \cdot r} = 4 \cdot \frac{H}{D} \text{ dir.} \quad (15)$$

Bu eşitlikte  $r=D/2$  ye  $V=V_2 \cdot gH$  dir.  $H$ =basınç yüksekliği (ölçülen değerin bulamaç (slurry) yoğunluğuna bölümü ile elde edilir, metre cinsindedir.)

Akış kapasitesi için (yarı amprik;

$$Q = X \cdot D^2 \cdot V H \quad (16)$$

$X$ =siklon geometrisi (silindirik uzunluk, koni açısı, çıkış ağız çapı gibi) ile ilgili düzeltme faktörü

Son olarak ayırım sınırı için aşağıdaki eşitliği elde ederiz.

$$d_c \sim \sqrt{\frac{\Omega}{g \cdot (q_s - q_l)}} \cdot \sqrt{\frac{X}{\lambda}} \cdot \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{H}} \quad (17)$$

Birinci terim süspansiyonun karakteristik özelliklerini, ikinci terim siklon geometrisini içerir. Üçüncü terim ise, ayırım sınırının siklon çapının kare kökü ile doğru orantılı, basınç düşüşünün dördüncü dereceden kökü ile ters orantılı olduğunu ifade eder. Yukarıdaki ifadeden, en azından teorik olarak, düşük ayırım sınırlarının büyük siklonlarla elde edilebileceği sonucuna varabiliriz, eğer yeteri kadar yüksek basınç uygulanmışsa...Yüksek basınç uygulanması sonucu doğan ekonomik kısıtlamalar (enerji harcaması ve aşınma gibi) büyük öneme haizdir ve pratikte ayırma sınırı çoğunlukla siklonun büyüklüğü ile belirlenir. İnce ayırım şüphesiz küçük siklon gerektirir. Küçük siklonların kapasiteleri düşük olduğundan yüksek kapasite gerekirse bunlardan bir çoğunun paralel olarak bağlanması zorunluluğu doğar.

## HİDROSİKLONLARIN UYGULANMA ALANLARI

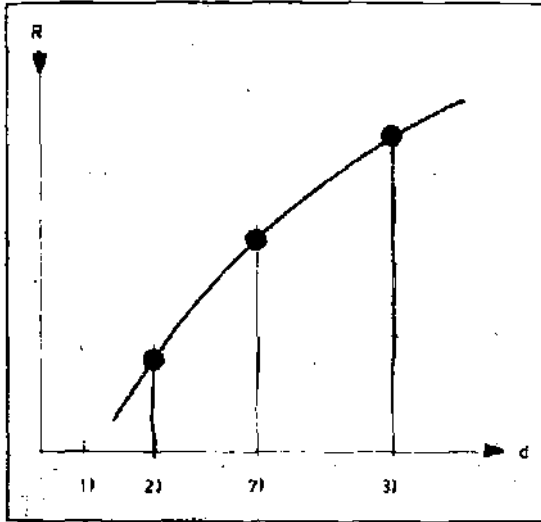
Hidrosiklonların belli başlı 10 çeşit kullanım yeri vardır.

1. Koyulaştırma (thickening): Süspansiyon içindeki suyun çoğunu elimine ederek suyu alınmış katılar oluşturur.

2. İnce tanelerden arındırma (desUming) : Amaç üst akımla birlikte ince tanelerin atılmasıdır. Bu adım arkadan gelecek flotasyon, yağ manyetik ayırma, filtrasyon gibi proseslere girecek ürünlerin daha elverişli hale getirilmesi açısından önemli-

dir. Kimya tesislerinde, bu çeşit siklonlar yaygın olarak kristalizasyon safhasını takiben suyun atılması amacıyla kullanılırlar, bu! arada üst akımla gelen ince kristaller tekrar kristalizasyon devresine gönderilirler. Bundan amaç, ince kristalleri kristal büyümelerini gerçekleştirebilmek için çirdek olarak kullanmaktır.

3. İri tanelerden arındırma (degritting) : Üst akım ürün olarak kazanılır, az miktardaki iri tanelerde alt akımla atılır. İnce tanelerden arındırma ile İri tanelerden arındırma işlemleri arasındaki fark, Şekil — 3A dakine benzer bir tane iriliği dağılımı eğrisi çizilerek Şekil — 4 te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil — 4 Tane İriliği dağılımı siklonun kullanım amacını belirler : 3 noktası iri tanelerden arındırmayı, 7 noktası fraksiyonlara ayırmayı, 2 noktası ince tanelerden arındırmayı temsil etmektedir.

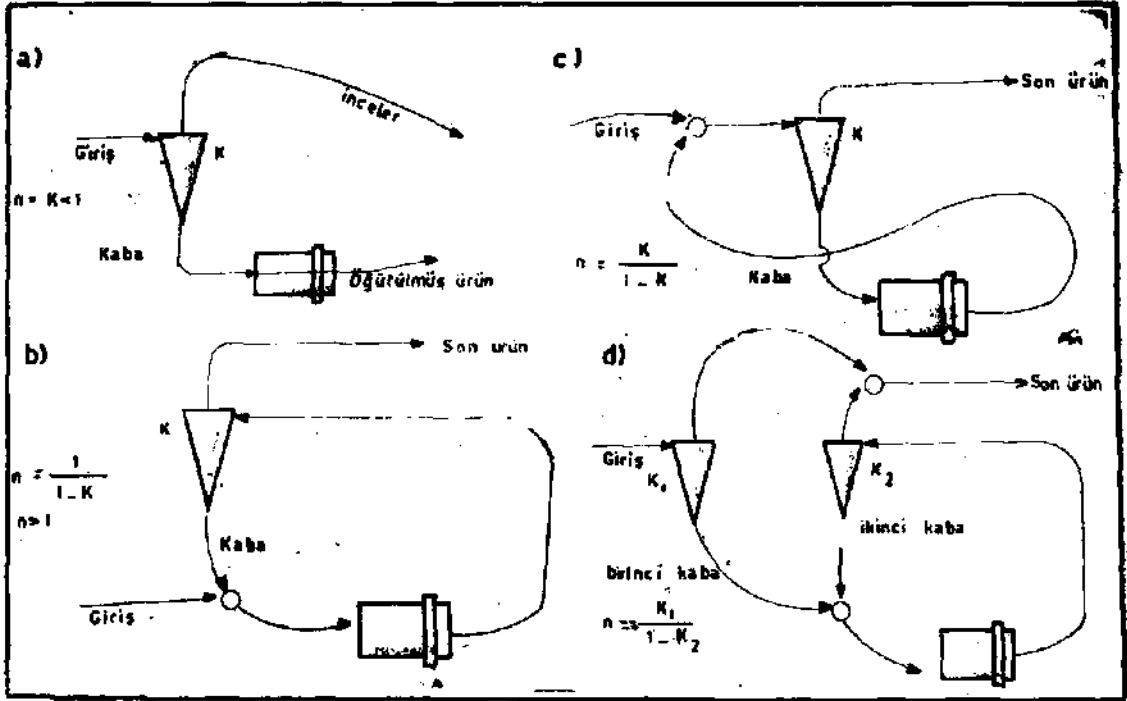
4. Kapalı devre öğütme sistemleri : Bu tür sistemlerde siklonlar yaygın olarak hem ince tanelerin hemde iri tanelerin arındırılması amacıyla kullanılırlar. Şekil — 5 te siklonlarla yaş değirmenlerin beraberce kullanıldığı 4 tip devre gösterilmiştir, «a» şikkında siklon değirmenin önünde yer almıştır. Ve değirmene giren malzeme-deki ince taneleri üst akım olarak ayırır. Alt akım, kaba ürün, değirmende öğütme işlemine tabi tutulur. Bu tür bir devre «açık

devre» olarak adlandırılır, «b» şikkında besleme doğrudan değirmene yapılır. Değirmen çıkışı hidrosiklona girer. Siklon alt çıkışı, iri taneler, ise değirmene tekrar beslenir. Siklon üstü istenilen üründür. Bu tür bir devre «kapalı devre» olarak adlandırılır, «c» şikkı a ve b nin kombinasyonudur. İlk besleme ve değirmen çıkışı aynı siklona girer. Siklon girişteki inceleri ve değirmen çıkışının irilerini ayırır. Siklon üstü istenen üründür, siklon altı ise tekrar değirmene beslenir. Siklonun çift yönlü görevleri yüzünden bu devreler «çift devre» olarak adlandırılır.

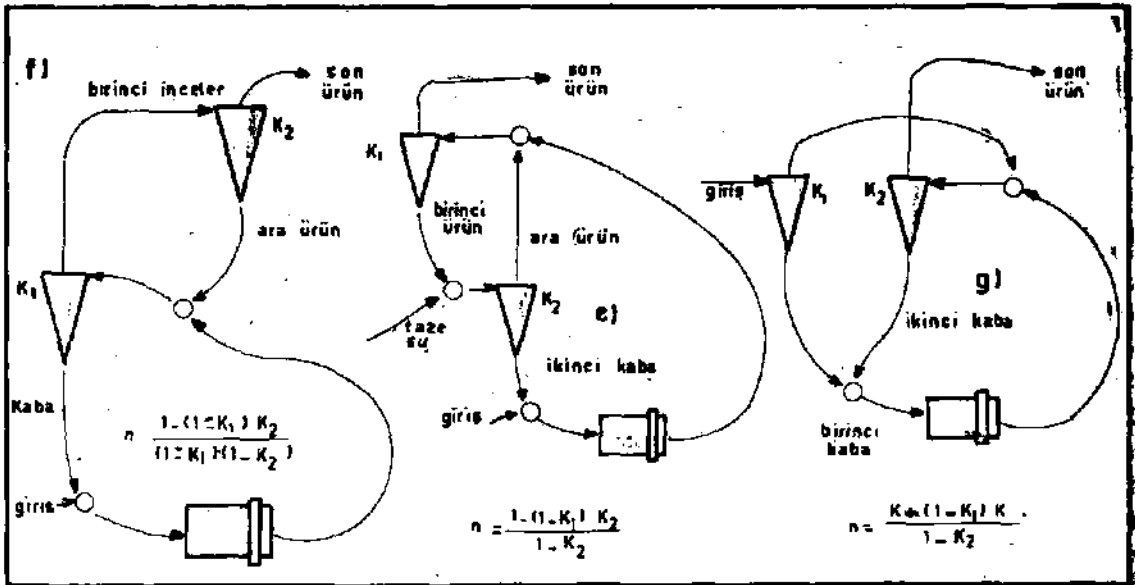
Siklonların çalışmasını optimize etmek için, «d» şikkında olduğu gibi incelerden arındırma ve kabalardan arındırma işlemlerinin, birbirinden bağımsız olarak, büyüklükleri farklı olan ayrı ayrı siklonlarda yapılması gerekir. Her iki siklonun da üst akımları istenen üründür, alt akımları ise değirmene beslenir. Bu sistem «a» ve «b» nin daha mantıklı bir kombinasyonudur ve «geliştirilmiş devre» olarak adlandırılır.

Şekil — 6, Şekil — 5 de gösterilen dört temel devrenin, bazı özel uygulamalarda daha avantajlı olarak kullanılabilen şekillerde düzenlenmiş şekillerini göstermektedir. Değirmen yükünü daha da hafifletmek için, «e» şikkında olduğu gibi bir kapalı devre fki safhalı iriden arındırma işlemi içerecek şekilde değiştirilebilir. Bu devrede birinci siklonun alt çıkışı İkinci siklonda inceden arındırma işlemine tabi tutulur, ikinci siklon alt çıkışı esas girişle karıştırılarak değirmene beslenir. Değirmen çıkışı ile ikinci siklon üst akımı karıştırılarak birinci siklona beslenir. Bu devre ile son ürünün tane iriliği kalitesi değişmediği halde, değirmen girişinin daha az miktarda ince tane içermesi gerçekleştirilmiştir.

Birinci siklon üst akımında gereğinden fazla iri tane bulunursa, bu «f» şikkında olduğu gibi ikinci bir siklonda temizlenebilir. Bu durumda ikinci siklon alt çıkışı çok fazla ince tane taşıdığından tekrar birinci siklona inceden arındırma işlemi için beslenir.



Şekil — 5 Öğütme devrelerinde siklonlar, standard durumlar



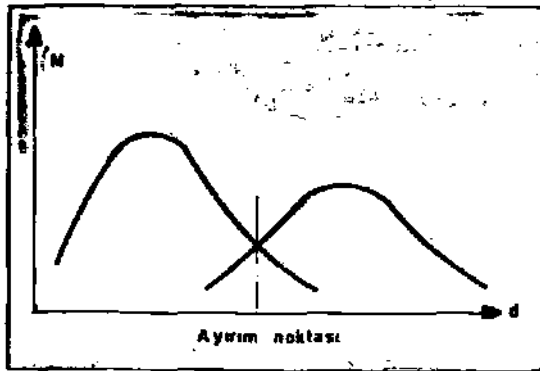
Şekil — 6 Öğütme devrelerinde siklonlar, özel durumlar.

«g» şıkkı, «d» şıkkının değiştirilmiş şeklidir, «d» şıkkındaki birinci siklon üst çıkışı istenilen kalitede değilse «g» şıkkında olduğu gibi ikinci siklonun beslemesi ile karıştırılarak temizleme işlemi yapılır.

Şekil — 5 ve 6 da görülen devridaim faktörü.n istenen tonajda son ürün elde etmek için gerekti giriş miktarı ile değirmene giren tonajı karşılaştırmaya yarar.

5. Seçmeli (selektif) sınıflandırma : Homojen olmayan cevherlerin mineral bileşenlerine ayrılması işlemi, minerallerin farklı olan bazı özellikleri temel alınarak yapılır. Ağır ortam ayırmasında, liglerde, masa ve spirallerde özgül ağırlık ; masa ve spirallerde taneciklerin şekli ; flotasyonda yüzey özellikleri; liçingde çözünebilirlik : manyetik ayırmada manyetik özellikler ayırım kriterleri olarak kullanılırlar. Bazen de minerallerin tane iriliği dağılımları arasındaki fark tamamen mekanik olan bir ayırımı mümkün kılar.

İki mineralin paralel olmayan tane iriliği dağılımları Şekil-7'de görülmektedir. Sol-daki ince kısım kaolinin, sağdaki kaba kısım da kuarsın tane iriliği dağılımını göstermektedir. Kaolin, kuarstan Şekil 7'de açıkça görülen tane iriliği dağılımlarındaki fark temel alınarak temizlenir. Diyag-



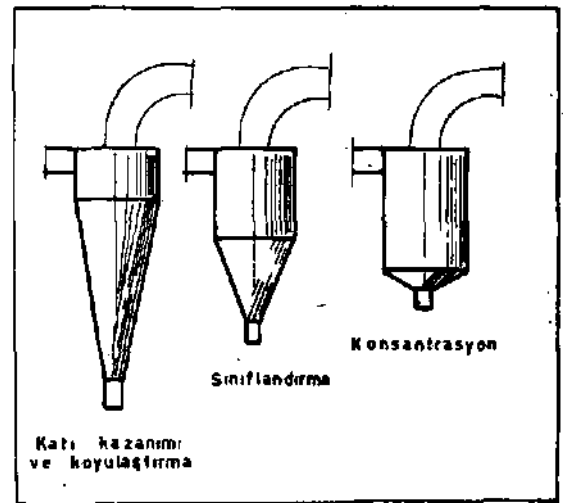
Şekil — 7 Seçmeli sınıflandırmanın çalışma prensibini göstermek için iki mineralin mineral dağılımlarının tane iriliğine karşı çizimi.

ramda ayırım noktası olarak gösterilen irilikte yapılan bir siklon ayırması sonucunda ince kaolin temizlenmiş olarak üst çıkıştan alınır, kaba kuars ta ait çıkış olarak atılır.

6. Katı kazanımı : Yıkama ve sudan arındırmada kullanılan aletlerden çıkan akıntılardan katıların kazanımı ince tanelerdeki kaybın elenmesi açısından önem taşır. Kum spirallerinden, log yıkayıcılardan, vibro eleklerden ve sudan arıtma santrifüjlerinden ince tanelerin kazanılması isteği hidrosiklonlara kullanım alanı doğurur.

7. Fraksiyonlara ayırma (Frantionation) : Değişik proseslerde işlem görecekt iki fraksiyonun ayrılması işlemi hidrosiklonlar ile gerçekleştirilebilir. Bunun en tipik örneği demir cevheri konsantrelerinin sinterlik (kaba) ve peletlik (ince) olarak ayrılmasıdır.

8. Zenginleştirme : Eğer mineral bileşenlerinin özgül ağırlıkları arasında geniş farklılıklar varsa, hidrosiklonlar öğütülmüş ürünlerin mineral bileşenlerinin zenginleştirilmesinde kullanılırlar. Bu bir çeşit gravite ayırımı ve hatta merkezkaç kuvvet ile yapılan bir ayırımdır. Bu çeşit siklonlarda ağır ortam kullanılmaz. Hidrosiklonlar ile zenginleştirmenin tipik örnekleri ; metal sülfidler (pirit ve çinkobiend), me-



Şekil — 5 Siklon şekilleri ve uygulanma amaçları.

tâl oksitler ve kıymetli metallerin (altın, platin, gümüş) gangtan ayrılmasıdır. Bu amaçla kullanılan siklonlar şekil olarak diğerlerinden farklıdır, verimliliği arttırdığından alt kısımları düz ve silindirik kısımları daha uzun yapılmıştır. Şekil-8'-de üç değişik siklon şekli ve bunların tipik kullanım yerleri gösterilmiştir.

9. Sıvı kazanımı : Proses suyu veya sıvısının devreye geri sokulması gerekiyorsa, hidrosiklonlar tatminkar olarak arıdırma da kullanılırlar. Kömür yıkama tesislerinde ve özellikle tikinerler gereğinden fazla beslendiğinde, bu çok önemli bir problemidir. Paralel olarak bağlanmış siklonlar devridaim suyunun bulanıklık seviyesini uygun bir değerde tutmak için kullanılırlar.

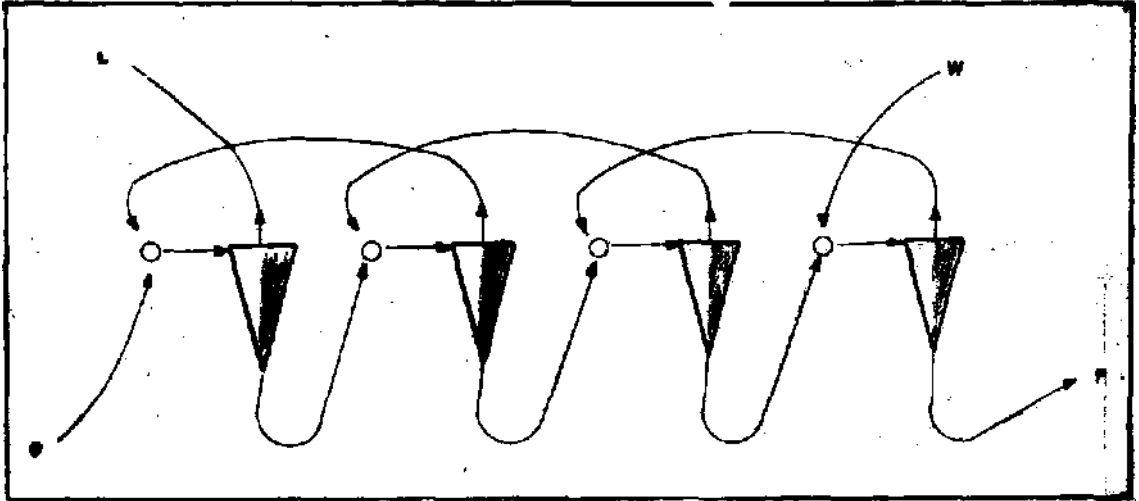
10. Ters akıntı ile yıkama (counter current washing) : Ters akıntı yıkaması ite bir ürün periyodik olarak sulandırma ve koyulaştırma işlemlerine tabi tutulur ve ürün içindeki ince taneciklerin, asitlerin ve diğer yabancı maddelerin atılması gerçekleştirilir. Son siklon girişine taze su eklenmesi bu yıkamanın verimliliğini art-

tırır. Dört safhalı bir ters akıntı ile yıkama Sisteminin akım şeması Şekil — 9 da görülmektedir.

#### AYIRIM SINIRINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER :

Siklon büyüklüğünün saptanması, ya kazanılması istenen katı miktarına ya da istenen tane iriliği ayırımına bağlıdır. Siklon büyüklüğü hiçbir zaman istenen toplam kapasiteye göre saptanmaz. Ayırım noktası siklon büyüklüğüne ek olarak daha birçok değişkenlere bağlı olduğundan, istenilen ayırımın gerçekleştirilebilmesi için bazı pratik testlerin yapılması gerekir.

Belirlenmiş bir siklon için ayırım noktasına etki eden parametreleri tartışmadan önce, yapılabilecek testler tanımlanmalıdır. İnce tane iriliğindeki ayırımlar bütün büyüklüklerdeki siklonlar He denenebilir. Büyüklükleri farklı siklonlar ya paralel olarak veya biri diğerinden sonra gelecek şekilde bağlanırlar ve basınç değerleri ve/veya çıkış ağız çapları değiştirilerek



Şekil — 9 Dört safhalı ters akıntı yıkaması ; F = yabancı maddeleri içeren giriş, P = yıkanmış ürün, L = artık yıkama suyu, W = yıkama suyu



deneyler yapılır. 17 a eşitliği siklon çapının ve basıncın etkisini göstermektedir.

$$d_s \sim \frac{\sqrt{D}}{4\sqrt{H}} \quad (17 a)$$

Diğer bir yaklaşımda:  $d_s$  (üst çıkış çapı) ve  $d_e$  (genel olarak dikdörtgen kesitli olan girişe eşdeğer çap)'yi kullanmakla yapılabilir.

$$\psi = \frac{d_s \cdot d_e}{D^2} \quad (18)$$

17 a eşitliğini vty Üe çarptığımızda aşağıdaki eşitliği elde ederiz ;

$$d_e \sim \sqrt{\frac{d_s}{D} \cdot \frac{d_e}{D} \cdot \frac{\sqrt{D}}{4\sqrt{H}}} = \sqrt{\frac{d_s \cdot d_e}{D}} \quad (17 b)$$

Ayırım sınırını etkileyen çok fazla sayıda diğer faktörler bulunduğundan yukarıdaki eşitlik sayısal hesaplamalar için kullanılmaz, fakat yapılmış olan deneylerin sonuçlarına göre, ileride yapılacak deneylerin hangi yönde olması gerektiği hakkında fikir verir.

Esas problem kaba ayırım sınırlı siklonlar kullanılması gerektiğinde ortaya çıkar. Bunlarla ilgili deneylerin gerçekleştirilmesi için büyük, dolayısı ile kapasitesi yüksek siklonlara gerek vardır. Bu da fazla miktarda numune gerektirir, halbuki genellikle numune miktarları oldukça azdır. Bu yüzden daha ufak siklonlar ile deneylerin yapılması gereği doğar ve istenenden daha düşük ayırım sınırını gerçekleştirir. Siklon çapı değişimleri açısından bu çeşit testlerin limitasyonları çok ciddidir. 17 a eşitliğinde sabit ayırım ( $d_e$ ) için ;

$$\sqrt{D} \sim \sqrt{H} \text{ veya } H \sim D^2 \quad (19)$$

kabul etmemiz gerekir.

Bu, D çapının yarısı kadar çaplı bir siklon ile deney yaptığımızda, uygulanan basınç kaybı H teslsteğinin dörtte biri kadar olmalıdır demektir. Eğer orijinal ünitenin çapı

700 mm ise ve 6 m.'lik sıvı basıncı ile çalışıyorsa, 350 mm çaplı bir test siklonunda uygulanacak basıncın 1,5 m olması gerekir, ki bu hava çekirdeği stabilitesine çok yakın bir değerdir. 175 mm.'lik bir siklon yalnızca 0,4 m.'lik basınç gerektirir ama bu olanaksızdır. Eğer büyük siklonun daha ufak ağızları varsa ( $\alpha=0,05$ ), büyük ağızlı ( $\alpha = 0,12$ ) bir test siklonu kullanılabilir.

Sonuçta  $V^2 \cdot 4 = 1,55$ 'lik bir değiştirme faktörü elde ederiz. Bu, gerçek çaptaki bir siklonun dörtte biri çaplı bir test siklonu için basınç faktörünü 1/16'dan 1/10'a düşürür. Siklonun çalışmasının 0,6 m.'lik sıvı basıncı durumunda kararlı olup olmadığının saptanması gerekir.

Deney siklonlarının kapasiteleri aşağıdaki gibi seçilebilir : 700 mm çaplı siklon için 300 mVsaat, 350 mm. çaplı siklon için 40mVsaat, 175 mm çaplı siklon için ağız büyüklüklerine bağlı olarak 5 -12 mVsaat. 3 inch veya 4 inch çaplı siklonlarla deney yapma olanağı yoktur, fakat bazı araştırma enstitüleri bu hataya düşmektedirler. Bu büyüklükteki siklonlar için basınç 0,1-0,15 m sıvı basıncı (= 0,01-0,015 bar) olacaktır. Hiçbir siklon bu şekilde fonksiyon göstermez.

Özet olarak, tatmin edici bir pilot test ancak endüstriyel çapta kullanılacak siklonun çapının yansı kadar çaplı, basıncının dörtte biri kadar basınçlı ve kapasitesinin sekizde biri kadar kapasiteli bir siklon ile yapılabilir. 1/3'lük bir küçülme (basıncın 1/10'u, kapasitenin yaklaşık 1/30'u) optimum sınır olarak alınabilir, fakat bundan daha ufak siklonlar yanlış sonuçlar doğuracaktır.

Siklon çapına, giriş ve üst çıkış ağızlarının çaplarına ve basınca ek olarak ayırım noktası aşağıdaki faktörlerden de etkilenebilir ;

1. Geometrik faktörler; Koni açısı ve silindir uzunluğu ile belirlenen etkili siklon uzunluğu ( $L_s = VD$ ) gibi Giriş ağızının geometrisi de keza önemlidir.

2. Siklona beslenen karışımın tane iriliği dağılımı,

3. Karışımın vizkositesi ; Girişteki katı miktarı ile belirlenir. Yüksek karışım konsantrasyonları, düşük karışım konsantrasyonlarından daha kaba bir ayırım oluştururlar.

Bu etki çökeltmenin engellenmesi olarak açıklanabilir, çünkü iri tanelerin hareketleri geçmek zorunda oldukları ince tane zonu tarafından engellenir. Bu etki alışkan (fluidized) yataklarda ölçülmüştür. Şekil -10 ayırım mesh'ini arttırmanın pratik sonuçlarını ve yüksek katı içerikli karışımlarla beslemenin kursurlarını göstermektedir.

4. Sıvının vizkositesi,

5. Katılar ile taşıyıcı sıvı arasındaki yoğunluk farkları,

6. Parçacıkların şekilleri ; Çok yassı parçacıklar, örneğin mika, nispeten kaba olsalar bile üst akıma gitme eğilimi gösterirler. Ayrıca aktif yüzeyli ince parçacıklar muhtemelen hidrasyon ile çaplarını arttıracaklar, dolayısı He yoğunlukları azalacak ve yüzme eğilimi göstereceklerdir.

#### HİDROSİKLOKON ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

Hidrosiklonların çalışmalarını alt çıkış şekillerine göre ikiye ayırabiliriz. Yüksek alt çıkış konsantrasyonları ip tipi çıkışla (rope discharge) gerçekleştirilir. Bu tür çıkışta daha önceden alt akım olarak ayrılmış bazı parçacıklar üst akıma karışırlar ve Tromp eğrisinin üst kısmının bozulmasına neden olurlar. (Şekil -11 sol.) Sulandırılmış alt çıkış, şemsiye tipi (umbrella discharge), ise ince tanecikleri de beraberinde taşır ve Tromp eğrisinin ait kısmını bozar (Şekil-11 sağ).

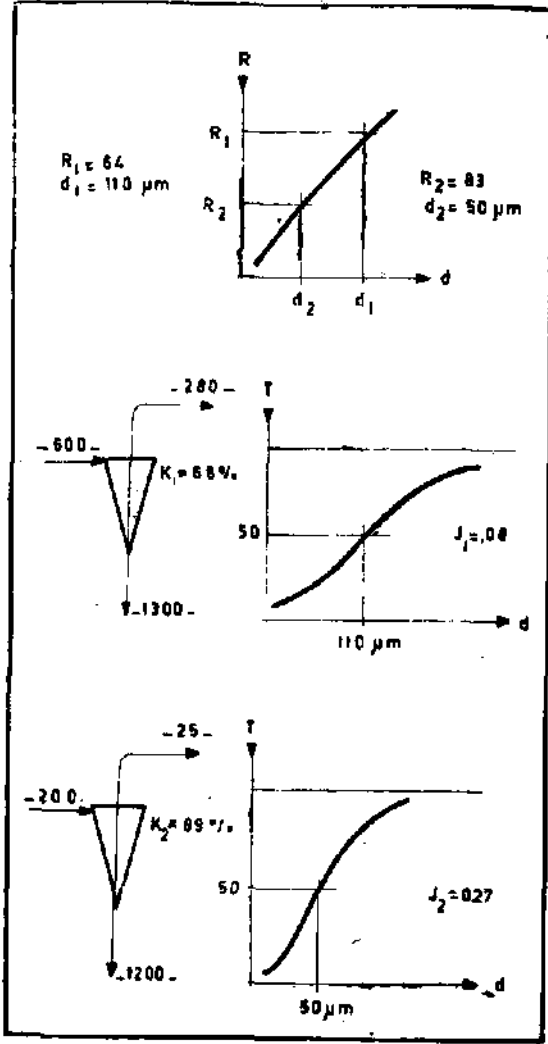
Üst akımın kabalardan iyi bir şekilde arındırılması ve buna paralel olarak alt akımında incelerden arındırılması istenirse İki siklon safhası uygulanır. En iyi sonucu elde etmek için Şekil -12'de olduğu gibi birinci siklon şemsiye çıkışlı, İkinci siklon

ip çıkışlı olmalıdır. Böyle bir sistemde ikinci siklon üst çıkışı birinci siklona beslenir. Başarıyla uygulanmakta olan bu sistemle giriş katı miktarındaki ve tane iriliği dağılımındaki değişmelerin olumsuz etkilerini azaltmak mümkün olmaktadır. Sonuçta Şekil -12 sağda görülen optimum Tromp eğrisi elde edilir. Aynı şekildeki Tromp eğrilerinden ortada olanı siklon alt çıkış ağzının alt çıkışı optimize etmek için ayarlandığı tek safhalı durumu göstermektedir.

Yüksek alt çıkış konsantrasyonları elde etmek için çapları küçültülmüş alt çıkışlar tıkanmaya eğilimlidirler. Tıkanmayı önlemek için, siklona beslenen malzeme-deki en iri tanenin büyüklüğünün siklon alt çıkış çapının dörtte birinden küçük olması (en fazla üçte birinden küçük) olması gerekir.

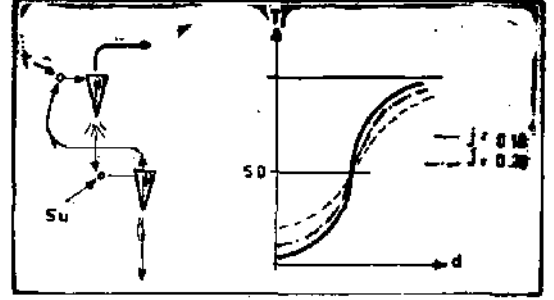
Bir hidrosiklonun optimum çalışması besleme özelliklerinin sabitliğine bağlıdır. Akış hızının değişmemesi özellikle önemlidir. Sabit şartları gerçekleştirebilmek için pompa haznesinin seviyesi daima aynı değerde tutulmalıdır. En önemlisi bu seviyenin havanın pompanın içine emilmesine neden olacak değer altına düşmemesi gerekir. Şekil - 13'te giriş seviyesini düzenlemeye yarayan iki sistem görülmektedir. Soldaki sistemde, pompa haznesindeki fazla su bir çıkış ile devreden çıkartılmaktadır. Basit, fakat yaygın olarak kullanılan bir sistemdir. Daha gelişmiş bir sistem Şekil - 13 sağda görüldüğü gibi siklon üst akımının bir kısmının devreye geri sokulmasıdır. Şekilden de görüleceği gibi bu akım, hazne seviyesi istenilen değere ulaştığında kolayca keşilebilmektedir. İkinci sistem uygulandığında siklonun kapasitesi orijinal giriş F den % 10 veya 15 fazla olacak şekilde seçilmelidir.

Hazne seviyesi kontrollü olan bir pompa bifle çeşitli problemlere sebep olabilir, örneğin dizayn edilenden daha uzun mesafelere karışımın naklinde... Giriş katı miktarındaki dalgalanmalar boru hattında oluşan sürtünme kayıplarında değişmele-

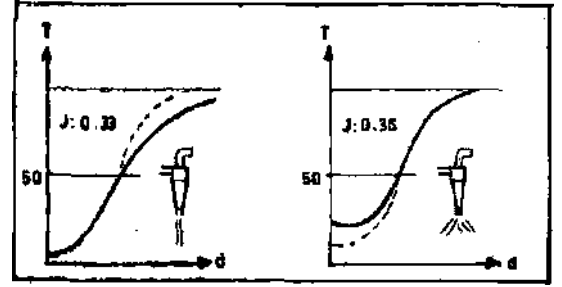


Şekil -- 10 Giriş katı miktarının ayırma iriliğine ve aynı hatasına etkisi ; üstteki diyagram tane iriliği dağılımı eğrisini, alttaki İki diyagram İse (iki farklı Tromp eğrisini göstermektedir.

re dolayısı ile siklop için gerekli olan basıncın sürekli olarak eksilip artmasına sebep olur. Şekil -14 a yanlış bir uygulamayı simgelemektedir, 14 b deki ara pompa ise problemi çözmektedir.  $H_2$  yükseklik farkı siklonun  $\hat{H}_c$  basınç kaybından küçük olmalıdır, mümkünse % 50'si En emin method ise ara pompa yerine tank kullanmaktır (Şekil -14 c). Tankın seviyesi kontrol edilmelidir, eğer tank yeteri kadar yüksekse bu kendiliğinden oluşur. Siklonların optimum çalışmaları ile ilgili

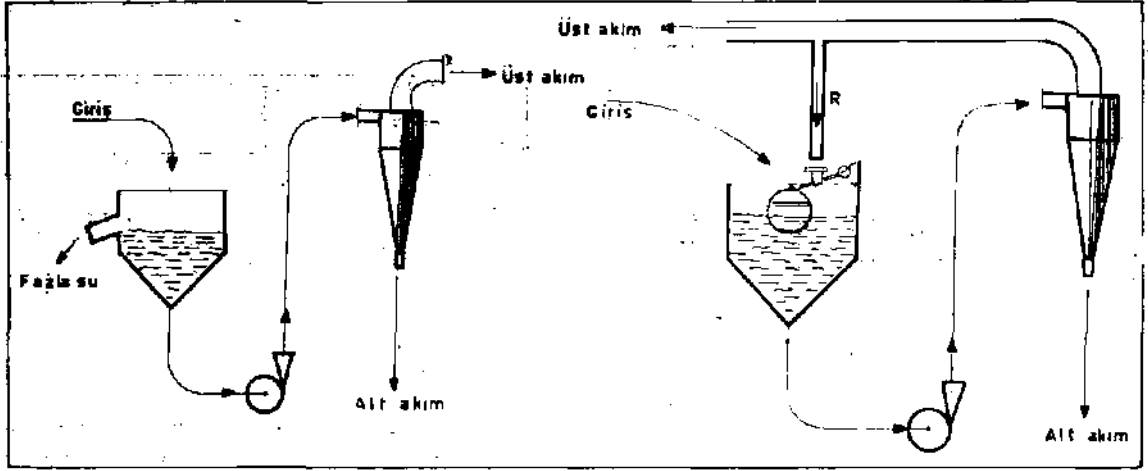


Şekil — 21 Alt çıkış şeklinin Tromp eğrisine etkisi ; solda ip tipi çıkış, sağda semsiye tipi çıkış

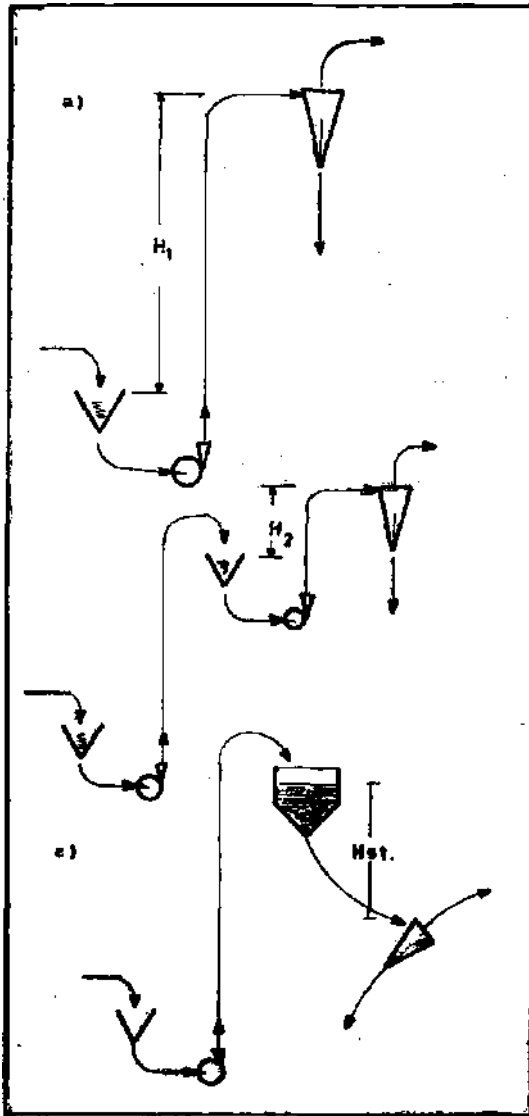


Şekil — 12 Optimum Tromp eğrisini (en düşük bata) elde etmek için uygulanan iki saf lüdi siklon devresi

bazı pratik bilgiler akım şemaları halinde verilebilir. Eğer gerekliyse Şekil -10'da gösterildiği gibi siklon girişinin katı miktarı azaltılabilir. Su eklenmesi basit, fakat pratik olmayan bir yoldur. Çünkü prosesin su yükünü çoğaltır, bu özellikle daha sonraki safhalarda tikiner kullanılacaksa çok önemlidir. Şekil -15'de gösterildiği gibi üst akımın tekrar devreye sokulması genellikle yararlı olur. Şekil ^5 A'da üst akımın besleme tankına direkt olarak verilmesi görülmektedir. Bu sis-



Şekil — 13 Pompa haznesi seviyesinin ayarlanabilme olanakları.



Şekil — 14 Siklon beslenmesinde pompaların ve tankların kullanımı ; a) Kötü bir uygulama, yükseklik farkı çok fazla, b) Ara pompanın kullanılması c) Tank kullanımı ile yerçekiminden faydalanarak yapılan besleme

tem yüksek kütle kazanımı sonucu sulu üst akım oluştuğunda kullanılır. Devridaim faktörü orjinal besleme konsantrasyonuna (C<sub>1</sub>), beklenen üst akım konsantrasyonuna (C<sub>2</sub>) ve istenen maksimum giriş konsantrasyonuna (C<sub>1</sub>) bağlıdır. Orjinal girişe göre devridaim faktörü'n şöyle hesaplanabilir;

$$n = \frac{C - C_1}{C_1 - C_2} \quad (20)$$

Örneğin a şıkkına göre sonuç ;

$$n = \frac{500-305}{305-155} = \frac{195}{150} = 1,3 \text{ olur}$$

Gerçekten de, 26 M, 1,3x20 M'ye eşittir. Akım şemasında M mVsaat'i, Tton/saat'i ve tire işaretleri arasındaki değerler gram/litre olarak konsantrasyonu göstermektedir.

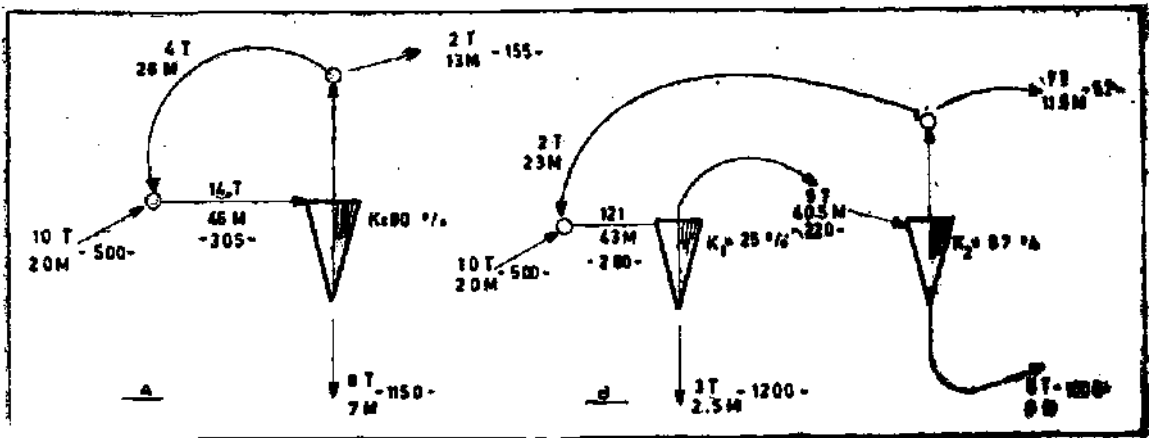
Düşük kütle kazanımı durumunda, ana siklonun üst akımının bir koyulaştırma siklonuna beslenmesi istenen katı içeriği düşük üst akımın elde edilmesini sağlar. Şekil -15 B buna iyi bir örnektir. C<sub>2</sub> koyulaştırma siklonunun üst akımının konsantrasyonu ise, (20) eşitliği bu durumda da geçerlidir.

$$n = \frac{500-280}{280-87} = \frac{220}{193} = 1,14$$

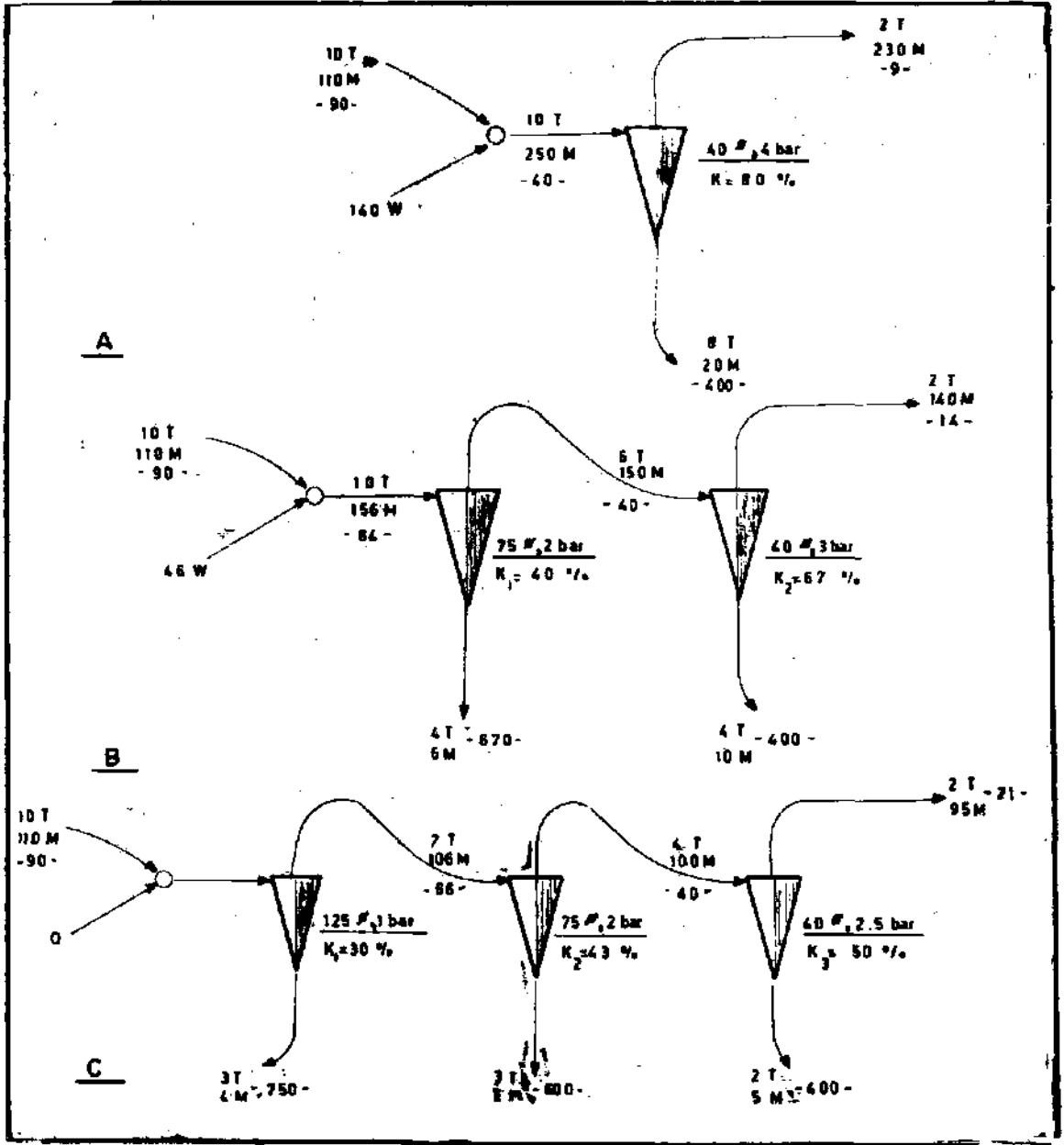
Burada, 23 M, 1,14x20 M ye eşittir.

Ana siklona giren malzemenin katı içeriğini azaltmak için diğer bir uygulamada bir ön koyulaştırma siklonunun (scalping cyclone) devreye eklenmesidir. Şekil -16 kaolinin hidrosiklonlar ile temizlenmesini göstermektedir. İstlenen giriş konsantrasyonu 40 gram/litre'dir. Log yıkayıcıdan gelen karışım 90 gram/litre'lik katı içerebilir. Şekil -16 A şıkkında % 125 su eklenmesi yapılmaktadır. B şıkkında olduğu gibi bir ön koyulaştırma siklonu eklendiğinde kaba fraksiyonun yarısı atılmakta ve su faktörü % 42'ye düşürülmektedir. C şıkkında ise iki ön koyulaştırma siklonunun eklenmesi ile kaba fraksiyonun % 75'i atılmaktadır. Böylece ana siklonun (üçüncü) istenen giriş konsantrasyonu su eklenmesi yapılmadan gerçekleştirilmiş olur.

Kaolin temizleme tesisleri genellikle C şıkkında olduğu gibi çalışır. Su eklenmesi yapılmadan katı içeriğinin düşürülmesi faydasına ek olarak ön koyulaştırma siklonlarının kullanılmasının diğer nedenleri vardır. Bunlardan biri, çok pahalı olan



Şekil - 15 Üst akım devridaimi ile girişin sulandırılması ; A) Tek safhah uygulama (yüksek kütle kazanımı), B) İki safhah uygulama (birinci safhada düşük kütle kazanımı), M= mYsaati, T = ton/saati ve tire işaretleri arasındaki değerler gram/litre'yi göstermektedir.



Şekil — 16 Ön koyulaştırma siklonlarının (scalping cyclones) kullanımı.

ana siklonların sayısının azaltılabilmektedir. Verilen Örnekte azalma faktörü 2,5 tur. Diğer bir nedende şudur ; A şıkında olduğu gibi tek safhalı siklon devresi uygulandığında, siklon çok geniş bir tane iriliği aralığında çalışmakta, iri taneler tabakalaşma yoluyla ince ayırımı engellemekte ve temizleme işlemi iyi yapılamamaktadır. C\* şıkkı iyi bir ayırım için opti-

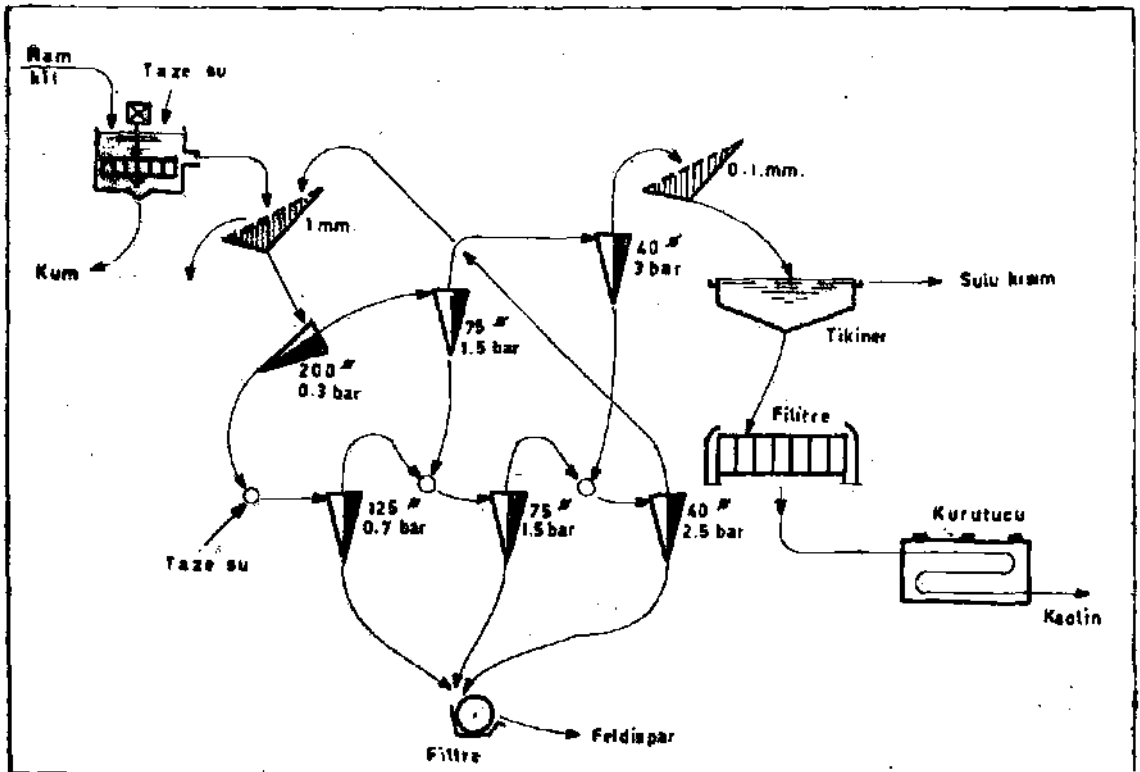
mum koşulları gerçekleştirebilmektedir. Bakım masrafları (aşınma) keza göz önüne alınmalıdır. Birinci safha büyük siklonlar (125 mm çapında) ile kurulduğundan ve düşük basınçlarda (1 bar) çalıştığından düşük merkezkaç kuvvetleri (320 g) oluşturur. Bu yüzden aşınma çok azdır. İkinci safha, 75 mm çaplı siklonlar ve 2 barlık basınçla 1070 g.'lık merkezkaç kuv-

vetlerl oluşturur (15 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır). Bütün kaba parçacıklar (50 mikrondan iri) daha önceden ayrıldığından ikinci safhada da çok az aşınma söz konusudur. Üçüncü ana safha yalnız 25 mikrondan ince parçacıklarla çalışır. Bu yüzden, 40 mm çaplı siklonlar ile 2,5 barlık basınç altında oluşturulan 2500 g'lik övmelerde bile aşınma önemli değildir. Aşınmanın az olması üç safhalı temizleme sisteminin diğer büyük avantajıdır.

Modern bir kaolin temizleme tesisi, üç safhalı temizlemeye ek olarak üç yıkama safhası da içerir, herbiri Şekil - 12'de gösterildiği gibi. Birinci ve ikinci yıkama adımlarının üst akımları, ikinci ve üçüncü temizleme adımlarının alt akımları ile karıştırılmakta ve üçüncü yıkama adımının üst akımı ilk beslemeye devridaim ettirilmektedir (Şekil - 17). Yukarıdaki altı saf-

halı siklon tesisinin girişine bir karıştırıcı sistemi konmaktadır. Bu sistem ham kille-ri dağıtmakta ve 0,5 mm.'den iri kumlan atmaktadır. Karıştırıcıdan sonra gelen elek, maden sahasından gelen tahta parçacıkları, yapraklar gibi yabancı maddeleri ayırır. Nihai üst akım 0,1 mm.'lik emniyet eleğinden (mika elek) geçirilir ve tükine beslenir. Tükine alinan alt ürün filtre edilir ve kurutulur. Ayrıca yıkama safhalarının alt ürünleri olan feldispar konsantreleri flitrelerde sularından arındırılır.

Kaolin temizleme tesislerinde esas görevi hidrosiklonlar yaparlar. Diğer bütün mineral işleme tesislerinde hidrosiklonlar yardımcı ekipmanlardır, fakat ürün kalitesi ve verim açısından optimum sonuçların alınmasında önemli olabilmektedirler.



Şekil - 17 Siklonlar ile kaolinin temizlenmesi.

## KAYNAKLAR :

1. Trawinski, H., «Grouped Hydrocyclones for the Beneficiation of Raw Materials.» INTERCERAM, Vol. 22, 1973, No. 3.
2. Bradley, D., and D.J. Pulling, «Flow Patterns in the Hydraulic Cyclone and their Interpretation in Terms of Performance.» Trans. Inst. Chem. Engrs., Vol. 37, 1959, No. 5. pp. 34-45.
3. Krijgsman, C, «De Toepassing van de Centrifugaalkracht in Moderne Kolenwasserijen.» Woordrachten Koninklijk Instituut van Ingenieurs Nederland, Vol. 1, 1949, No. 5. 691 - 907.
4. Eder, Th., «Probleme der Trennschärfe.» AUFBER. TECHNIK, Vol. 2. 1961, pp. 104-9, 36-48, 313-21, 484-95.
5. Trawinski, H., «A Calculation for Elutriation.» INTERCERAM, Vol. 19, 1970, No. 1, pp. 51-56.
6. Trawinski, H., «Behandlung fester Stoffe in Flüssigkeits - Suspensionen» CHEMIE - INGENIEUR - TECHNIK, Vol 29, 1957, No, 5, pp. 330-32.
7. Trawinski, H., «Näherungssätze zur Berechnung wichtiger Betriebsdaten für Hydrozyklone und Zentrifugen.» CHEM-ING.-TECHN.. Vol. 30, 1958, pp. 85-95.
8. Trawinski, H., «Die Aufbereitung von Kaolin,» Handbuch der Keramik, 1973, Verlag Schmid, Freiburg/Br.
9. Trawinski, H., «Nassklassieren von feinkörnigem Gut, besonders in Mahlkreisläufen,» TECHN. MITT, Vol. 59, 1966, No. 5, pp. 249-57.
10. Trawinski, H., «The Wet Beneficiation of Kaolin (China - Clay),» INTERCERAM, vol. 17, 1968, No. 4, and Vol. 18, 1969. No. 1.
11. Trawinski, H., and F. Donhauser, «Der Hydrozyklon und seine Anwendungen von Apparaten zur mechan. Trennung von Apparaten zur mechan. Trennung fest - flüssiger Mischsysteme,» CHEM. ING.-TECHN., Vol. 32, 1960, No. 9, pp. 576-81.
12. Trawinski, H., «Kombinationsschaltungen von Apparaten zur mechan. Trennung fest - flüssiger Mischsysteme,» CHEM. ING.-TECHN., Vol. 32, 1960, No. 9, pp. 576-81.
13. Bath, M. D., A. J. Duncan, and E. R. Rudolph, «Some Factors Influencing Gold Recovery by Gravity Concentration», «J. SOUTH AFRIC.MIN.MET., Vol. 73, 1973, No. 11. pp. 363-84.
14. Trawinski H., «Die Gegenstrom-Waschung von eingedickten Suspensionen durch Anwendung wiederholter Sedimentation,» VERFAHRENS-TECHNIK, Vol. 8. 1974, No. 1,
15. Trawinski, H., «Allgemeins über die Anwendungen des Hydrozyklons in der Erzaufbereitung,» ERZMETALL, Vol. 7, 1954. No. 12, pp. 537-40.
16. Trawinski H., «Aufstromklassierer,» Beitrag zu Bd. 11 in Ullmanns Enzyklopädie der Techn. Chemie. S70/80, Verlag Chemie, 1972.
17. Trawinski H., «Practical Aspects of the Design and Industrial Application of the Hydrocyclones,» FILTRATION & SEPARATION, Vol. 6, 1969, Jul/Aug., pp. 361 - 67, and Nov/Dec, pp. 651 - 57.
18. Trawinski H., «Generationsgerechte Schaltungen bei der Vielstufenschlämmung mit Stromklassierern, insbesondere in der Kaolin Industrie.» KERAMISCHE ZEITSCHRIFT, Vol. 16, 1964, No. 1, pp. 20-24 and No. 2. pp. 74-77