

# Kömür Yıkama Ekipmanlarının Benzetişimi

## Simulation of Coal Washing Equipments

Salih ERSAYIN (\*)

Hakan İÇLİ (\*\*)

### ÖZET

Bu çalışmada kömürün kül ve diğör safsızlıklardan temizlenmesinde kullanılan yöntemlerin benzetişiminin temel oluşturan yaklaşımlar gözden geçirilmektedir.

Flotasyon dışındaki kömür yıkama ekipmanlarının performansı dağılım (Tromp) eğrisi ile tanımlanmaktadır. Bu eğri bütün benzetişim çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. 1970'li yıllarda, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki birçok kömür yıkama tesisinden toplanan verilerden yola çıkılarak, her bir ekipmanı karakterize eden genelleştirilmiş dağılım eğrisi kavramı geliştirilmiştir. Kömür yıkama tesisleri için üretilen ilk benzetişim yazılımlarında bu ampirik yaklaşım kullanılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalar ise, dağılım eğrisi ile işletme parametreleri arasında mekanistik bir ilişki ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır.

Flotasyonun modellenmesinde ise biri yüzdürme-batırma deney sonuçlarından yola çıkan diğeri ise kinetik temele dayanan iki yaklaşım kullanılmaktadır.

### ABSTRACT

In this study, the approaches forming the basis of the simulation of coal washing equipments used in separation of ash and other impurities are reviewed.

Apart from flotation, the performance of coal washing equipments are characterized by the distribution (Tromp) curves. This is the basis of all the simulation studies. The idea of generalized distribution curve characterizing each coal washing equipment was developed by using the extensive data collected from a number of coal washeries throughout the United States. This is the empirical approach used in the first simulation packages for coal washing plants. On the other hand, the studies undertaken in recent years aim at developing a mechanistic relationship between operating parameters and distribution curve.

For the modelling of coal flotation, two basic approaches are used. One of them is based on the data obtained from float and sink analysis, while the other employs the kinetic concept.

(\*) Doç.Dr., Maden Yük. Müh., Hacettepe üniv. Maden Müh. Böl. Beytepe-ANKARA

(\*\*) Aras. Gör., Maden Yük. Müh., Hacettepe üniv. Maden Müh. Böl. Beytepe-ANKARA

## 1. SİRİS

Bilgisayarların son 30 yıllık dönemde hızlı bir gelişme gösterip, endüstrinin her alanında kullanılmaya başlamasından, madencilik faaliyetleri de etkilenmiştir. Bunun sonucu olarak çeşitli maden mühendisliği problemlerinin çözümünde yardımcı olacak yazılımlar geliştirilmiştir. Bu tür yazılım türlerinden biri de kömür yıkama tesislerinin benzetişiminde (simülasyonunda) kullanıma yöneliktir.

Sadece kömür hazırlamaya yönelik olarak geliştirilip literatürde yer alan iki benzetişim paketi bulunmaktadır. Bunlardan biri A.B.D. Enerji Bakanlığı (U.S. Department of Energy) ve Pennsylvania Üniversitesi tarafından geliştirilmiş COPREP (1) ve Exxon Research and Engineering Company tarafından hazırlanan SHSP dır (2). COPREP bu konuda ortaya çıkmış ilk benzetişim paketi olup SHSP bu pakette ve diğer genel cevher hazırlama paketlerinde yer alan modüllerin birleştirilmesinden oluşmuştur. COPREP ilk önceleri büyük (mainframe) bilgisayarlar için dizayn edilmiş, daha sonra mikro bilgisayarların yaygınlaşması üzerine bunlara da uyarlanmış (3) ve COPREP2 olarak adlandırılmıştır.

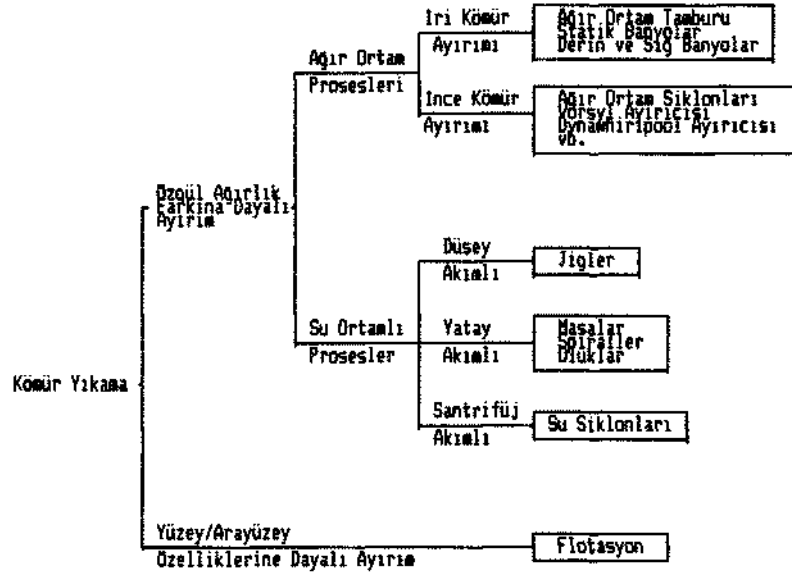
Bunun dışında genel olarak cevher hazırlama işlemleri için hazırlanmış benzetişim paketleri bulunmaktadır. Bunlardan bazıları MODSIM, Utah MODSIM, SPOC, SIMPLANT, JKSimHet, CAMP, GSIM, MINDRES ve USIM-PAC olup, bu paketlerin özellikleri çeşitli çalışmalarda verilmiştir (4,5). Bu paketler içinde sadece kömür hazırlamada kullanılan bazı ekipmanlarla ilgili modüller yer almakla birlikte (6), bir kömür yıkama tesisinde yer alabilecek bütün birim işlemleri içermemektedirler.

Bir kömür yıkama tesisi alışlagelmiş cevher hazırlama tesislerinden biraz daha farklı kırma ekipmanlarının yer aldığı bir boyut küçültme ve eleme devresi, genellikle özgül ağırlık farkı ve flotasyon temeline dayalı yıkama devreleri ve de susuzlandırma devrelerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada sadece yıkama devrelerinde yer alan ekipmanların ve flotasyonun modellenmesinde kullanılan yaklaşımlar incelenmiştir. Kömür hazırlamada kullanılan kırma, eleme ve susuzlandırma işlemlerinin modellenmesinde kullanılan tekniklerinde daha sonraki çalışmalarda ele alınması düşünülmektedir.

Kömür yıkamada kullanılan birim işlemlerin bir sınıflandırılması Şekil 1'de özetlenmiştir.

Şekilde yer alanların dışında, manyetik ayırma, elektrostatik ayırma, havalı masa ve oluklar, yağ aglomerasyonu, vb. gibi bir takım kömür yıkama yöntemleri bulunmakla birlikte yaygın olarak kullanılmadıklarından bunlara yer verilmemiştir. En yaygın olarak kullanılan kömür yıkama yöntemleri, ağır ortam ayırıcıları ve jiglerdir. Bu ikisi arasındaki seçim de büyük ölçüde kömürün kolay yıkanabilir nitelikte olup olmamasına ve

tane boyuna bağlı olarak yapılmaktadır. Kolay yıkanabilirliğin ölçüsü ayırma özgül ağırlığına yakın <kritik) özgül alırlıktaki (genellikle ± 0.1 aralığı olarak seçilir) malzeme miktarı olup, bu miktarın yüksek olması ağır ortamı gerekli kılmaktadır.



Şekil 1. Kömür yıkamada yaygın kullanılan birim işlemlerin sınıflandırılması (7)

Flotasyon yöntemi ise ince kömürlerin temizlenmesinde kullanılmaktadır.

## 2. KÖMÜR YIKAMA EKİPMANLARININ PERFORMANSININ TANIMLANMASI

özgül ağırlık farkına dayalı yıkama ekipmanlarının performansının tanımlanmasında dağılım (Tromp ya da partision) eğrisi,  $f(S)$ , kullanılmaktadır. Dağılım eğrisi beslemenin temiz kömüre giden yüzdesinin özgül ağırlığın ( $S$ ) bir fonksiyonu olarak ifade edilmesidir. Tipik bir dağılım eğrisi Şekil 2'de verilmiştir. Verilen bir besleme malzemesi için, belirli bir dağılım eğrisi ile tanımlanan yıkama ekipmanından elde edilecek kömür yıkama verimi (yield),  $R$ , aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$R = \frac{\int_0^S f(S) \cdot F(S) \cdot dS}{\int_0^S F(S) \cdot dS} \quad [1]$$

Burada

- $F(S)$  :  $S$  özgül ağırlığındaki malzemenin besleme hızı
- $<1$  . Besleme malzemesindeki en yüksek özgül ağırlık değeri olup genellikle 2.2 ile 2.6 arasındadır. Bazen 5.0 kadar yüksek olabilir.

Dağılım eğrisi, tanımlanan bir kömür beslemesi için elde edilecek ürünün kalitesinin ne olacağını belirlemenin yanısıra kömür yıkama ekipmanlarının performansını nitelenmesinde kullanılan hata alanı ve Muhtemel Hata (Ecart Probable) ve imperfeksiyon (I) gibi katsayıların hesaplanmasında da kullanılmaktadır. Dağılım eğrisinde malzemenin %50'sinin temiz kömüre geçtiği noktanın özgül ağırlığı  $S_0$  olarak tanımlanırsa (Şekil 2), Hata Alanı, HA,

$$HA = \int_0^{S_0} [100 - f(S)] dS + \int_{S_0}^{S_1} f(S) \cdot dS \quad C23$$

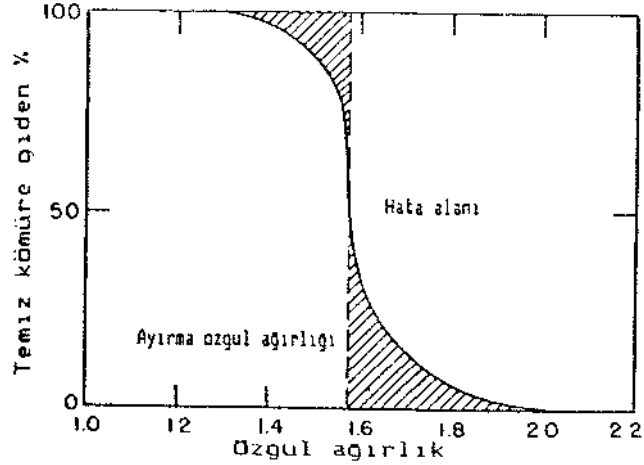
olacaktır, özgül ağırlık temiz kömüre giden yüzdenin bir fonksiyonu olarak  $S = \bar{u}(f)$  şeklinde tanımlanırsa, Muhtemel Hata (EP),

$$EP = 0.5 - C1(25) - \$(75)1 \quad f3]$$

olacaktır. imperfeksiyon ise,

$$I = EP / S_0 \quad C43$$

olmaktadır.



Şekil 2. Tipik bir dağılım eğrisi

### 3. ÖZGÜL AĞIRLIK FARKINA DAYALI ZENSİNLESTİRME YAPAN KÖMÜR YIKAMA EKİPMANLARININ MODELLENMESİ

Bu tür ekipmanların modellenmesinin temelinde ekipman için karakteristik bir dağılım eğrisi tanımlanması yatmaktadır. Dağılım eğrisinin şekli aşağıdaki parametrelerin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır:

-Beslemedeki yakın özgül ağırlıktaki malzeme miktarı

- Beslemenin boyut dağılımı
- Ayırma yoğunluğu,  $S_s$
- Besleme hızı
- Kömürle birlikte yer alan yantaşm oranı
- Tane şekli
- Komur yıkama ünitesinin geometrisi
- Komur yıkama ünitesindeki mekanik koşullar

lyı bir modelin bütün bu parametreleri gozonune alması gerekir. Bununla beraber, bazı parametrelerin tanımlanmasmdaki zorluklar nedeniyle modelleme yaklaşımlarında bir takım kabullere gidilmektedir.

Uygulamada kullanılan yaklaşımlar ıkı temel grupta toplanabilir. Bunlardan birisi ampirik yaklaşım olarak tanımlayabileceğimiz genelleştirilmiş dağılım egrısı kavramına dayandırılmış olan yaklaşımdır. İkincisi ise mekanistik yaklaşım olarak nitelendirilmekte ve tanenin serbest veya engelli çokuş ortamındaki hareket hızlarının ve zenginleştirme ekipmanı boyunca oluşan su hareketinin etkisi gibi birtakım parametreleri gozonune almaktadır.

### 3.i.Genelleştirilmiş Dağılım Egrısı Yaklaşımı

COPREP benzetişim paketinin de temelini teşkil eden bu yaklaşım (1), U.S. Bureau of Mines tarafından A.B.D.'ndeki çeşitli komur yıkama tesislerinden elde edilen verilerden (8,9,10,11) yola çıkılarak elde edilmiştir.

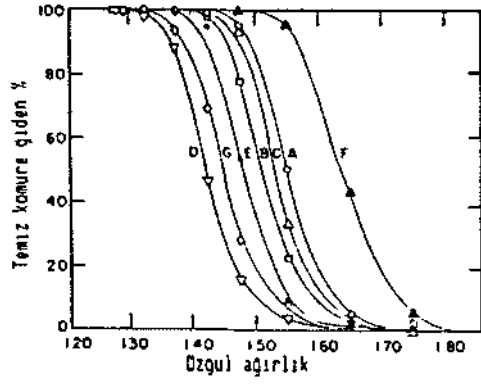
Verilen bir besleme ve verilen bir komur yıkama ekipmanı için değişik ayırma yoğunluğunda elde edilecek bir dizi dağılım egrısı, temiz komurs giden yüzdenin indirgenmiş ozgul ağırlığa (X) karşı grafiği çizilerek tek bir eğriye dönüştürülebilmektedir. İşte bu eğriye genelleştirilmiş dağılım egrısı adı verilmektedir, indirgenmiş ozgul ağırlık (X),

$$X = S / S_s \quad C53$$

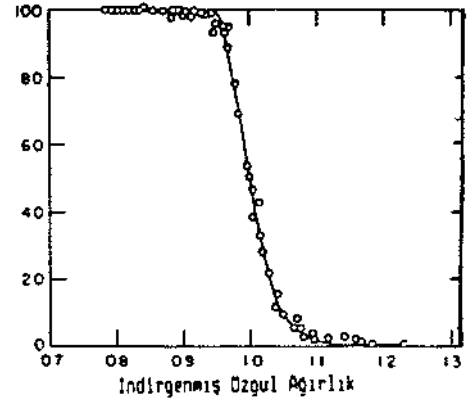
şeklinde tanımlanmaktadır. Bu olgu ağır ortam siklonu kullanan yedi farklı komur yıkama tesisinden elde edilen verilerin (10) sunulduğu Sekil 3 ve bunların genelleştirilmiş eğriye dönüştürüldüğü Sekil 4'de açıkça görülmektedir. Şekil 5, 6, 7 ve 8'de de sırasıyla su siklonu, sallantılı masa, aQır ortam tekneleri ve Baum jıgı için genelleştirilmiş dağılım eğrileri verilmiştir. Benzer çalışmalar ayrıca ağır ortam konileri (12) ve Baum jıgleri, Batac jıgleri ve "Dynawhirlpool"lar (13) için de yapılmıştır. 76mm çaplı Vorsyl ayırıcısı ile yapılan bir çalışmada ise genelleştirilmiş dağılım egrisinin geometrik parametrelerden buyuk ölçude bağımsız olduğu gösterilmiştir (14).

Genelleştirilmiş dağılım egrisinden, belli bir ayırma yoğunluğu için dağılım egrisinin oluşturulmasında işlem tersine çevrilerek indirgenmiş ozgul ağırlık ayırma yoğunluğu ile çarpılmaktadır.

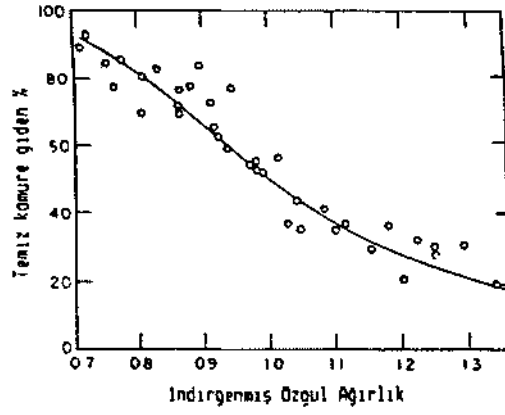
$$S = S_s \cdot X \quad [6]$$



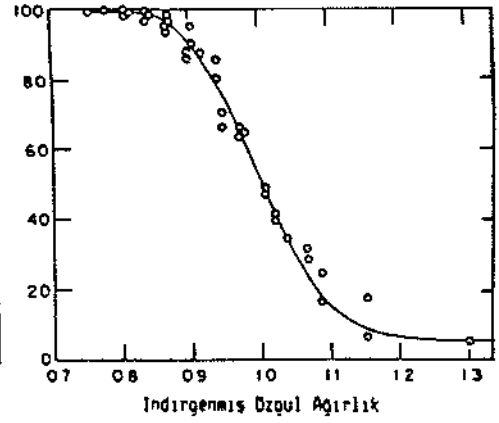
Sekil 3. Cesith tesislerdeki aflır orta» siklonlarından koroozlt besleme için elde edilen dağılı» eğrileri



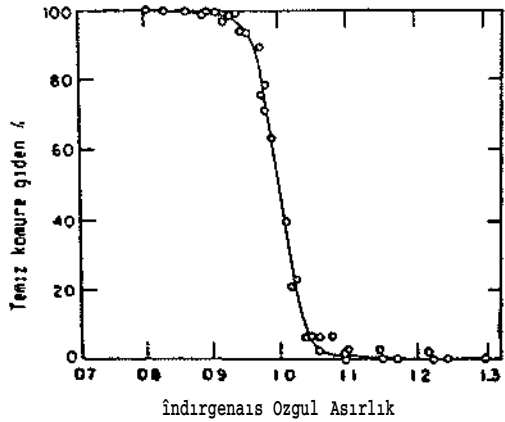
Sekil 4. Cesith tesislerdeki »flır orta« siklonlarından koroozlt besle» için elde edilen genelleştirilmiş dağılı» eğ>Ssı



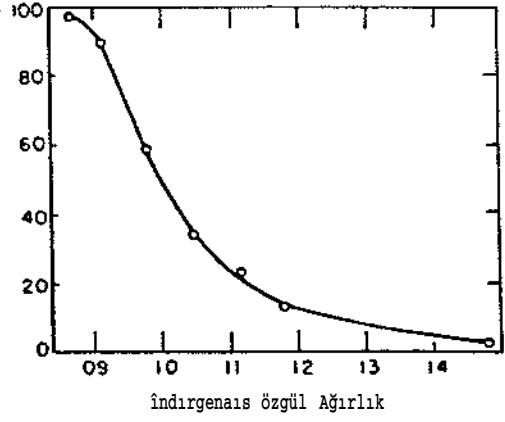
Sekil 5. Su siklonu için genelleştirilmiş darilı»\* eğrisi



Sekil 6. Fallantılı «asa için genelleştirilmiş dağılım eğrisi



Sekil 7. Aflır orta» tekneleri için genelleştirilmiş dağılım eğrisi



Sekil 8. Bau\* jığı için genelleştirilmiş dağılım eğrisi

Böylece bir genelleştirilmiş dağılım eğrisi ile tanımlanmış bulunan konur yıkama ekipmanından verilen bir besleme yoğunluk dağılımı ve verilen bir ayırma yoğunluğu için elde edilecek ürünlerin verim ve özelliklerini (% kul, %S vb.) tahmin etmek mümkün olmaktadır.

Bununla beraber konur yıkama ekipmanından geçirilen malzeme boyut fraksiyonlarına ayrıldığında, herbir boyut fraksiyonunun dağılım eğrisinin farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Bu boyut fraksiyonu bazındaki dağılım eğrileri, elde edilecek ürünü tanımlamada tek bir kompozit dağılım eğrisinden daha iyi sonuç vermektedir. Fakat böyle bir yaklaşımın model içinde yer alabilmesi için herbir fraksiyon için ayrı bir genelleştirilmiş dağılım eğrisi oluşturulması ve herbir boyut içm farklı alacak ayırma özgül ağırlığının kompozit ayırma yoğunluğundan yola çıkılarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu olgu modelde bir özgül ağırlık oranı (r) olarak tanımlanmaktadır.

$$[7] \quad r = (S_s)_1 / (S_s)_c$$

Burada

$(S_s)_x$  : 1 inci boyut fraksiyonu için ayırma özgül ağırlığı

$(S_s)_c$  ; kompozit beslemenin ayırma özgül ağırlığıdır.

Bu durumda 1 inci boyut fraksiyonu için dağılım eğrisi aşağıdaki donuşum yapılarak sağlanmaktadır.

$$S = (S_s)_1 \cdot X \quad [8]$$

6 ve 7 eşitliklerinden de,

$$f = (S_s)_c \cdot r_1 \cdot X \quad [9]$$

elde edilir. Böylece  $r_x$  bilindiğinde 1 inci fraksiyon için dağılım eğrisini elde etmek mümkün olmaktadır.

Fakat tesislerden elde edilen verilerden yola çıkılarak elde edilen  $r_x$  değerlerinin pek sağlıklı olmadığı kabul edilmiştir (15). Bir örnek olarak ağır ortam siklonları için ölçülen  $r_1$  değerlerinin dağılımları Şekil 9'da verilmiştir. Diğer yıkama ekipmanlarında da benzer dağılımların elde edildiği rapor edilmiştir.

Genelleştirilmiş dağılım eğrisi kullanıldığında performans ölçmekte kullanılan hata alanı, Muhtemel Hata ve İmperfeksiyon değerleri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanabilmektedir.

$$HA = S_s \cdot SHA \quad [10]$$

$$EP = S_s \cdot 6PE \quad [11]$$

$$I = S_s \cdot GI \quad [12]$$

Burada, SHA, BPE ve GI genelleştirilmiş dağılım eğrisinin sırasıyla Hata Alanı, Muhtemel Hatası ve İmperfeksiyonunu göstermektedir.

Ayrıca dağılım eğrisinin Weibull fonksiyonu ile tanımlanabileceği de gösterilmiştir (15). Dağılım eğrisinin her zaman 100 ve 0 arasında değişmeyeceğimde gözönüne alarak, fonksiyonu birtakım değişikliklere uğratan

rak, deneysel verilere tatmin edici uyum sağlayan aşağıdaki eşitliği elde etmiştir.

$$f(X) = 100 - Cf_0 + c - \exp\{-(X - X_0)^{3/b}\} > 3 \quad C133$$

Burada

X : indirgenmiş özgül ağırlık  
 f(X) s Beslemenin temiz kömüre giden yüzdesi  
 $X_0, f_0, a, b, c$  s Model sabitleri olup doğrusal olmayan optimizasyon yöntemleri ile hesaplanmaktadır.

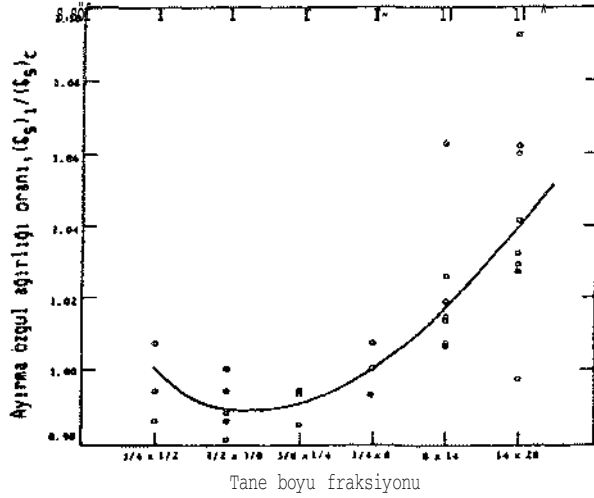
Ayrıca

$f_0 + c < 1$  [C14]  
 olmak zorundadır. Bu durumda fonksiyonun alacağı maksimum değer  $100 - (f_0 + c)$  ve minimum değerde  $100 - f_0$  la sınırlanmış olacaktır.

X = 1 olduğunda  $f_0 = 50$  olmak zorunda olması nedeniyle, sabitlerden birinin diğerlerinin bir fonksiyonu alarak değişmesi gerekmektedir. Bu durumda da

$$X_0 = 1 - fb - \ln Cc / C(0.5 - f_0)^{3/a} \quad [153]$$

olmaktadır.



Sekil 9. Ağır orta» siklonlarında »yırara yoğunluğu oranının tane boyu ile deçiaımı

Daha sonra daha detaylı olarakta değinileceği gibi literatürde, dağılım eğrisi için daha farklı fonksiyonlar kullanılarak daha iyi uyum elde edilebileceği şeklinde görüşler bulunmakla beraber, Eşitlik 13 ile tanımlanmış genelleştirilmiş dağılım eğrisinin model sabitleri yukarıda sözü edilen tesis verilen ve bir doğrusal olmayan optimizasyon tekniği kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değerler boyut fraksiyonu bazında sallantılı masa, ağır ortam tekneleri, ağır ortam siklonu, su siklonu, Baum jigi <15), ağır ortam konisi (12), Batac jigi ve Dynawhirpool için (13) literatürde verilmiştir.



Bu veriler ve verilen bir besleme boyut/ozgul ağırlık dağılımları kullanılarak seçilen bir alet ve ayırma ozgul ağırlığı içm elde edilecek urun kalitesinin ne olacağını tahmin etmek mümkündür. Beslemenin tanımlanmasında kullanılan elek serisinin model parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan elek serisi ile çakışmaması durumunda dönüşümün nasıl yapılacağı literatürde detaylı olarak verilmiştir (U3î.

Goruldugu gibi genelleştirilmiş dağılım egrısı temeline dayalı yaklaşımda ekipmanların işletme koşulları gozonune alınmamakta; buna karşın bu derişmelerin ayırım ozgul ağırlığını değiştireceği savunulmaktadır. Bu konu tartışmaya açık olmakla beraber, sınırlı sayıda parametrenin aeçıştinldiQi bazı çalışmalarda bu ifadenin doğru olabileceği görülmüştür (16,17).

### 3.2.Mekanistik Yaklaşıklar

Bu yaklaşımlar genelleştirilmiş dağılım yaklaşımından farklı olarak, ozgul ağırlık farkından faydalanılarak ayrılacak olan malzemenin ekipman içindeki hareketinin temel fiziksel kurallardan yola çıkılarak tahmin edilmesini ve buna bağlı olarak ta dağılım eğrisinin belirlenmesini amaçlamaktadırlar. Böylece işletme koşullarındaki değişmelerinde model içinde yer alması sağlanmış olacaktır. Günümüzdeki konu ile ilgili modelleme çalışmaları bu alanda yoğunlaşmış görünmektedir. Şimdiye kadar elde edilen sonuçlar bu yaklaşımın uygulamada iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Bu temelden yola çıkılarak spiral zenginleştiricilerde palp davranımı akışkan dinamiği açısından incelenmiştir (IB). Elde edilen bu sonuçların pratiğe uygulanması konusunda çalışmaları devam etmektedir (5). Bunun yanısıra spiraller bir olay-mantık (phenomenological) yaklaşım kullanılarak ta modellenmiştir (19). Bu modelde dağılım eğrisini tanımlamakta kullanılan boyut temeline dayalı bir malzeme transfer fonksiyonu yer almakta, bu fonksiyonun değeri ise spiraldeki delik ve ayarların konumuna, tane ozgul ağırlığı ve boyutuna, spiral çapına ve malzemeye ozgu parametrelere bağlı olmaktadır. Bu model mineral ayırımlarında denenmiştir. Komur yıkamada kullanılan spiraller üzerine yapılan bir çalışmada (20) ise, daha önce elde edilen ampirik yaklaşım (21) terk edilmiş ve ayırım ozgul ağırlığının ( $S_s$ ), olayın fiziksel temellerinden yola çıkılarak (Bagnold teorisi) tahmin edilebilmesi için bir eşitlik geliştirilmiştir. Geliştirilen teorik model hem serbest hem de engelli çökelme koşulları varsayımı için denenmiş ve engelli çökelme koşullarının dana ıyı sonuçlar verdiği olunmuştur. Yine aynı araştırmacılar tarafından yapılan bir başka çalışmada ozgul ağırlık ^arkına gare ayırım yaoan ekipmanların yanısıra spiraller için de terminal hız temeline dayalı bir genelleştirilmiş dağılım egr'sı kavramından yola çıkılarak bir başka model de geliştirilmiştir (22>. Bu moael Bclaf 3,3. t«<sup>5</sup> detaylı olarak anlatılmıştır.

Sallantılı masa için geliştirilmiş model ampirik karakterde olup (23) ayırımı tanımlamakta bir dağılım fonksiyonu kullanmaktadır. Bu defa dağılım fonksiyonu malzemenin özelliklerine ve işletme koşullarına bağlı olarak belirlenmektedir. Bu yaklaşımda dağılım eğrisi uyarlanmış lojistik fonksiyonu şeklinde tanımlanmaktadır (24). Fonksiyonda yer alan katsayılar ile tane boyu ve özgül ağırlık arasındaki ilişkiler de ortaya çıkarılmıştır. Bununla birlikte bu model metalik cevherler için geliştirilmiş olup kömürde denenmemiştir.

Genelleştirilmiş dağılım eğrisine temel teşkil eden çalışmaların dışında bir teorik jig modeli geliştirilmesi konusundaki çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar (25,26,27) bu konudaki araştırmaların devam ettiğini göstermektedir. Jig işletme parametrelerinin jiglerdeki tabakalanmaya olan etkisinin incelendiği bir çalışmada (27) jigleme süresi ve tabakalanma arasındaki ilişki birinci dereceden bir kinetik eşitlik yardımıyla incelenmiştir. Bu çalışmada tabakalanmanın jigleme süresine önemli ölçüde bağlı olduğu, aralarındaki ilişkinin tek bir parametreyle tanımlanabileceği ve tabakalanmaya etki eden bir diğer parametrenin de jig haznesinde suyun davranımının olduğu bulunmuştur.

Ağır ortam ayırıcılarının modellenmesi konusunda yapılan çalışmalar yakın tarihli bir derlemede (28) değerlendirilmiştir. Ağır ortam ayırıcılarının işlem değişkenlerinin de model içinde yer aldığı modellerle benzetişiminin yapılmasında önemli aşamalar kaydedilmiştir. Fakat elde edilen bu ilk modellerin endüstriyel ölçekte denenerek, modellerin çeşitli koşullara uyumluluğunun araştırılması gerekmektedir.

Ağır ortam ayırıcıları ile ilgili çalışmalar iki grupta toplanmaktadır. Ağır ortam tekneleri (statik ayırıcılar) ve ağır ortam siklonları (dinamik ayırıcılar). Ağır ortam siklonlarında ince kömürlerin yıkanmasının modellenmesi ile ilgili olarak yapılan bir çalışmada (29) hidrosiklonlar için geliştirilen dağılım eğrisi modeli (30) kullanılmışlardır. Bu eşitlik üst ve alt akıma kısa devre yapan malzemeler için bir ampirik ifade içermektedir. Tane boyunun etkisi, türbülant koşullarda engelli çökme hareketi temelinden yola çıkılarak normalleştirilmiş ayırma yoğunluğu sapması ile ilişkilendirilerek modele yerleştirilmiştir. Bu yaklaşımda genelleştirilmiş dağılım aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir.

$$f(X) = b_3 + (b_4 - b_3) \frac{\exp(b_2 X) - 1}{\exp(b_2 X) + \exp(b_2) - 2} \quad C163$$

Burada  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  model sabitleri olup  $b_3$  ve  $b_4$  sırasıyla yüzen ve batanda kısa devre yapan malzeme miktarını gösteren parametrelerdir.  $b_2$  sabiti ise ayırımın etkinliğini göstermekte olup boyuta bağlı olarak değişen Muhtemel Hata (EP) ile ilişkilendirilmiştir. Normalleştirilmiş Ayırma Yoğunluğu Sapması (NAYS) ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$NAYS = \frac{\epsilon_s - \epsilon_m}{\epsilon_m} = 0.832 \cdot d_p^{-0.46}$$

C173

Bu eşitlikte  $d_p$  tane boyutunu,  $S_m$  ise aQır ortamın özgül ağırlığını göstermektedir.

ince kömür isleyen ağır ortam siklonları için geliştirilen C163 eşitliği (29), Güney Afrika ve A.B.D.'deki çeşitli tesislerden elde edilen verilerden yola çıkılarak kömür yıkamada kullanılan diğer ağır ortam ayırıcılarına da uyarlanmıştır (6).

Günümüzdeki ağır ortamlarla ilgili modelleme çalışmalarının Avustralya'da JKMRC'de yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Burada ağır ortam siklonlarının mineral ayırımlarında denendiği çalışmada, boyut fraksiyonu bazında çizilen partiyon eğrilerinin ortak bir noktadan (pivot noktası) geçtiği bulunmuş (Şekil 10), bu olgu ve ağır ortam siklonlarında b2 değerinin büyük olacağı düşüncesi gözönüne alınarak Eşitlik 14 aşağıdaki sekle dönüştürülmüştür (28)

$$Y_{i,j} = 1 / (1 + \exp[\ln(Y_p^{-1} - 1) + 1.099(\epsilon_p - \epsilon_{i,j}) / EP_j]) \quad [18]$$

Burada•

$v_{i,j}$  = i boyutlu ve j yoğunluklu malzemenin dağılım katsayısı

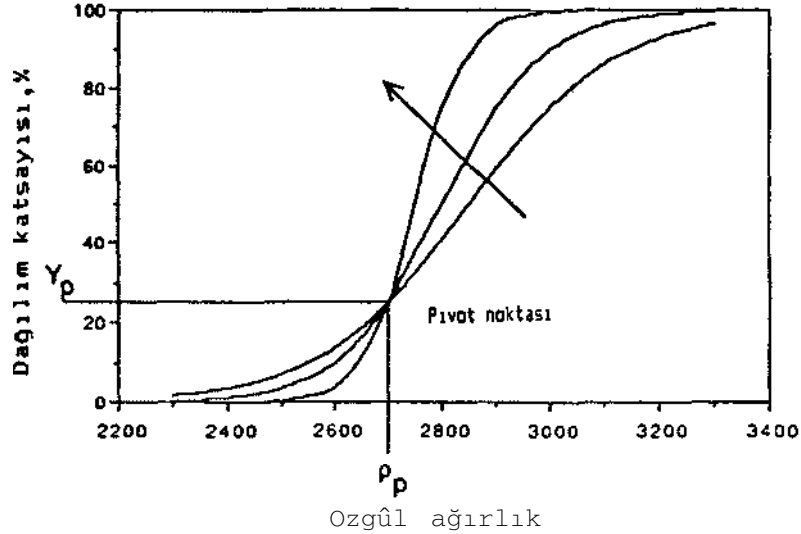
i boyutlu malzemenin özgül ağırlığı

$\epsilon_{i,j}$  - i boyutlu malzemenin EP değeri

Pivot noktasının dağılım katsayısı

\*>D Pivot noktasının özgül ağırlığı

Model parametreleri olan  $EP_j$ ,  $Y_p$  ve  $S_p$  siklon geometrisi, ortamın özgül ağırlığı ve viskozitesi, besleme hızı ve tane boyutu ile ilişkilendirilmiştir.



Sekil 10. «gır orta» siklonlarında elde edilen cesitli tane boyu fraksiyonlarının dağılış eğrileri

Agir ortam tekneleri için JKMRC'de geliştirilen model, tane şekli için düzeltmeleri de içeren bir hidrodinamik algoritmayı kullanarak herbir tane boyu ve özgül ağırlık aralığı için terminal hızın hesaplanması temeline dayandırılmıştır. Demir ve mangan cevherleri üzerinde yapılan çalışmalarda, hesaplanan terminal hız ile dağılım katsayısı arasındaki ilişkinin tane boyuna bağlı olduğu görülmüş ve bu ilişkiyi tanımlamak üzere aşağıdaki eşitlik geliştirilmiştir,

$$Y_t = 100 - C_1 - C_2 (V_{t0} - V_{t1})^2 3^z \quad C193$$

Burada

Y<sup>A</sup> = i boyut/özgül ağırlık aralığı için dağılım katsayısı  
V-t! = hesaplanan terminal hız  
<sup>^</sup>100 = tanelerin %100'ünün batana gittiği terminal hız  
Z = ln(A / d<sub>x</sub><sup>2</sup> + B) *üüj* = tane boyu)  
A, B, V<sub>100</sub> = verilerden yola çıkılarak hesaplanan ve çalışma koşulları ve cevhere <ya da kömüre) özgü parametrelerdir.

Bu model ağır ortam tamburları için geliştirilmiş olup, diğer banyo tipi ayırıcılar içinde uygun olacağı ileri sürülmektedir.

### 3.3. Dağılım Esrilerinin Hode 11 erimesi

Literatürde Dağılım Eğrilerinin matematiksel olarak tanımlanmasında kullanılan çok çeşitli matematiksel fonksiyonlar bulunmaktadır. Bunlardan yaygın kullanım alanı bulan bazılarına metin içinde değinilmiştir. Bu modeller genellikle 4-5 parametre içermektedir. Agir ortam tekneleri gibi ayırımın keskin olduğu ayırıcılarda alt ve üst akıma kısa devre yapan fraksiyonu tanımlamak üzere modelde yer alan bu parametrelerin devre dışı kalmasıyla parametre sayısı ikiye kadar inmektedir.

Altı farklı matematiksel fonksiyonun dağılım eğrilerini tanımlamadaki uygunluğu bir çalışmada incelenmiş olup (31), bunlardan 4 tanesi literatürde yer almış olan Erasmus Modeli (32), Weibull Modeli (15), Normal Integral Modeli ve Meloy Modelidir. Bunlara ilaveten Uyarlanmış Hiperbolik Tanjant ve Uyarlanmış Normal Integral Modelleri de çalışmanın kapsamında yer almıştır. Bir jigden elde edilen veriler üzerinde bu modelleri deneyerek en iyi uyumu Uyarlanmış Normal Integral ve Uyarlanmış Hiperbolik Tanjant Modellerinin verdiğini göstermişlerdir. Bununla birlikte bu modeller uygulamada fazla kullanılmamıştır. Bunun temel nedeni modellerde yer alan parametrelerin fiziksel anlamdan uzak olmalarıdır. Bu olumsuzluğu gidermek için ortaya atılan bir başka model (33), parametreleri fiziksel anlait taşınmasına vs farklı şekillere sahip dağılım eğrilerine uyum göstermesine karşın, yaygın kullanım alanı bulmamıştır.

Daha öncede değinildiği gibi kömür yıkama ekipmanlarını karakterize etmede kullanılan genelleştirilmiş dağılım eğrileri tane boyutuna bağlı olmaktadır. Tane boyu

faktörünü devre dışı bırakacak bir yöntem ortaya atılmış olup (22), buna göre Dağılım (Partisyon) Katsayılarının indirgenmiş özgül ağırlık yerine, indirgenmiş terminal hıza karşılık çizilmesiyle ortaya tane boyundan bağımsız genelleştirilmiş dağılım eğrileri çıkmaktadır. Bu genelleştirilmiş yeni tip dağılım eğrisini tanımlamakta aşağıdaki hata fonksiyonunun (error function) kullanılmasının uygun olacağı gösterilmiştir.

$$Y = 0.5 - 0.5 \operatorname{erf} \left( \frac{V - V_{50}}{V_{50}} \right)^k \quad (22)$$

Burada

Y = Dağılım katsayısı  
erf = hata fonksiyonu  
V<sub>50</sub> = ayırım terminal hızı  
V = terminal hız

R ve k = kömür yıkama ekipmanına özgü parametrelerdir. Bu çalışmada model çoğu tesislerden elde edilmiş kömür yıkama ekipmanı verileri üzerinde denenmiş ve su siklonu, sallantılı masa, spiral, jig ve ağır ortam teknesi için model parametreleri de bulunmuştur. Bu yaklaşım kömür yıkama ekipmanlarının modellenmesinde önemli bir dönüm noktası olma potansiyeli taşımakla birlikte, modelin daha kontrollü laboratuvar vs pilot çaplı deney sonuçlarına uyumunun incelenmesi gerektiğine inanılmaktadır.

### 3.4»Fistasyonun Modeilenmesi

Flotasyonun üzerinde en çok çalışma yapılmış birim işlemlerden biri olmasına karşın, bu konuda kullanışlı ve güvenilir bir model geliştirme çabaları henüz sonuçlanmamıştır. Bu konu ile ilgili olarak literatürde biri ampirik, diğeri ise yarı ampirik olarak nitelendirilen (kinetik) olmak üzere iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan yüzdürme-batırma modeli olarak adlandırılan ampirik yaklaşım hata payı yüksek olmakla birlikte tesis dizayn aşaması gibi flotasyonla ilgili yeterli verinin bulunmadığı durumlarda elde edilecek ürünlerin özelliklerinin kabaca tahmin edilmesine olanak sağlayabilmektedir. Kinetik yaklaşım ise potansiyel olarak daha sağlıklı sonuç verebilecek nitelikte olmakla birlikte, çok detaylı deneysel verilere (tercihen tesis ölçekli) ihtiyaç göstermektedir. Bu tür verilerin bulunduğu durumlarda bile işletme koşullarındaki değişikliklerin benzetişiminin yapılmasında sorunlar çıkabilmektedir.

#### 3.4.1.Yüzdürme-batırma modeli

Bu yaklaşımda yüzdürme-batırma deneyleri sonuçlarından yola çıkılarak, temiz kömürün verimi beslemedeki 1.5 özgül ağırlığın altındaki toplam malzeme miktarı olarak alınmaktadır. Temiz kömürün kül içerişide benzer şekilde, beslemenin 1.6 özgül ağırlığa karşılık gelen eklemeli kül içerişisi olarak alınmaktadır. Temiz kömür ve artık için detaylı sonuçlar beslemeden yukarıdaki yöntemle hesaplanan verim ve kül içerişisini verecek bir dağılım eğrisinin tekrarlı (iterative) hesaplama ile bulunmasından sonra elde edilmektedir (1).

### 3.4.2.Kinetik model

Bir çalışmada detaylı olarak incelenmiş olan (34) kinetik modelde herbir yüzebilir bileşenin veriminin zamana göre değişimi bir hız (rate) sabiti ile tanımlanmaktadır. Laboratuvar ölçekli kesikli (batch) flotasyon için model,

$$C = C_0 - e^{-kt} \quad C213$$

olarak ifade edilmektedir. Burada

C = Yüzebilir malzemenin t zamanda palptaki konsantrasyonu

C<sub>0</sub> = Yüzebilir malzemenin t = 0'daki konsantrasyonu

k = Flotasyon hız sabiti

t = zaman

Tesis gibi sürekli çalışan sistemlerde ise hücrelerin herbirinin büyük ölçüde mükemmel karışimli reaktör gibi davrandığı bulunmuş ve böyle bir sistem için i bileşeni için verim

$$R_j = 1 - (1 + k_i \theta)^{-N} \quad C223$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Bu eşitlikte R verimi, N ise hücre sayısını göstermektedir.  $\theta$  ise hücrede palptın kalış süresini göstermekte olup aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır:

$$\theta = V/v \quad C233$$

burada v artığın hacimsel akış hızı V ise hücrenin hacmidir.

Bu yaklaşım kullanılarak benzetişim yapılmaya çalışıldığında herbir bileşen (temiz kömür, kül, pirit ve bunların boyut fraksiyonları) için flotasyon hız sabitlerinin deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bazen herbir bileşenin tek bir parametre yerine, verilen bir bileşen içinde hızlı ve yavaş yüzen fraksiyonları ve bunların oranlarını gösteren 3 adet parametre ile tanımlanması söz konusu olabilmektedir. Bütün bu parametreler bilindiğinde verilen bir besleme ve flotasyon devresi için ürün özelliklerini tahmin etmek mümkün olmaktadır. Bununla birlikte flotasyon devrelerinin benzetişiminde karşılaşılan bir çok sorun bulunmakta olup, bunlar literatürde özetlenmiştir (5).

### 4.SONUÇ

Bu çalışmada kömür yıkama ekipman ve yöntemlerinin benzetişiminde kullanılan modeller tanıtılmaya çalışılmıştır, özellikle endüstride çalışmakta olan, sınırlı kaynaklara sahip mühendislere konu ile ilgili genel bir bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu konuya ilgi duyan araştırmacılar içinde bu çalışmanın yol gösterici olacağına inanılmaktadır.

### KAYNAKLAR

1. Gottfried, B.S., Luckie, P.T. and Tierny, J.W., Computer Simulation of Coal Preparation Plants, U.S. DOE,

Report No. DOE/PC/30144 - T7, 1982, 285p

2. Carmola, R.E., Hoover, M.R., Kim, J.M. and Kloda, S.J., Computer Simulation of Synthetic Fuels Feed Preparation Circuits, Proceedings of the First Conference on Use of Computers in the Coal Industry, AIME, New York, 1983, ppl77-186

3. Chaves, M.M. and Sottfried, B.S., Microcomputer Simulation of Coal Preparation Plants, Proceedings of the First Conference on Use of Computers in the Coal Industry, AIME, New York, 1983, ppl73-176

4. Sastry, K.V.S. and Adel S.T., A Survey of Computer Simulation Software for Mineral Processing Systems. Control 84 Mineral/Metallurgical Processing, J.A.Herbst (Editor), AIME, New York, 1985, ppl21-130

5. Napier-Munn T.J. and Lynch A.J., The Modeling and Computer Simulation of Mineral Treatment Processes Current Status and Future Trends, Minerals Engineering, Vol.5, No.2, 1992, ppl43-167

6. King, R.P., MODSIM A Modular Method for the Design, Balancing and Simulation of Ore Dressing Plant Flowsheets, Report No. SEN/2/83, Rev. June 1987, University of Witwatersrand, 1987

7. Peng, M.M., Graphic Routine and Digital Simulation: The Aids in Prediction of Coal Preparation Plant Performance and Yield Optimization, Proceedings of the First Conference on Use of Computers in the Coal Industry, AIME, New York, 1983, pplB7-199

8. Deurdbrouck, A.W. and Palowitch, E.R., Performance characteristics of coal-washing equipments Concentrating tables, U.S. Bur. Mines, Rep. Invest. 6239, 1963, 26p.

9. Hudy Jr., J., Performance characteristics of coal-washing equipment; Dense-medium coarse-coal vessels, U.S. Bur. Mines, Rep. Invest. 7154, 1968, 29p.

10. Deurdbrouck, A.W. and Hudy Jr., J., Performance characteristics of coal-washing equipment: Dense-medium cyclones, U.S. Bur. Mines, Rep. Invest. 7673, 1972, 34p.

11. Deurdbrouck, A.W., Performance characteristics of coal-washing equipments Hydrocyclones, U.S. Bur. Mines, Rep. Invest. 7891, 1974, 22p.

12. Gottfried, B.S., Statistical representation of generalized distribution data for float-sink coal-cleaning devices: Sand cones, Int.J.Miner.Process., 8, 1981, pp89-91

13. Fallon. N.E. and Gottfried, B.S., Statistical representation of generalized distribution data for float-sink coal-cleaning devices Baum jigs, Batac Jigs, Dynawhirlpools, Int.J.Miner.Process., 15, 1985, pp231-236

14. Vanangamudi, M., Mitra, J. and Rao, T.C., Analysis of performance of a 76 mm Vorsyl separator, Minerals Engineering, Vol.5, No.1, 1992, pp93-101

15. Gottfried, B.S., A generalization of distribution data for characterizing the performance of float-sink coal cleaning devices, Int.J.Miner.Process., 5, 1978, ppl-20

16. Rao, T.C., Vanangamudi, M., and Sufiyan, S.A., Modelling of dense medium cyclones treating coal, Int. J. Miner. Process., 17, 1986, pp287-301

17. Suresh, N., Vanangamudi, M., and Rao, T.C., Water

- distribution in water - only cyclones , Minerals Engineering, Vol.3, No.5, 1990, pp537-541
18. Holland-Batt, A.B., Spiral Separation: Theory and Simulation, Trans. Inst. Min. Metall., 98, 1989, pp46-60
  19. Tucker, P., Lewis, K.A., Hobba, W.J. and Wells, D., A Mathematical Model of Spiral Concentration as Part of a Generalized Gravity-Process Simulation Model and its Application at Two Cornish Tin Operatins, Prac. XV<sup>th</sup> Int. Miner. Prac. Cong., Cannes, Vol. 111, 1985, pp3-15
  20. Subasinghe, G.K.N.S. and Kelly, E.G., Predicting the Cut Specific Gravity of a Coal Washing Spiral, Minerals Engineering, Vol.5, No.2, 1992, pp193-203
  21. Subasinghe, G.K.N.S. and Kelly, E.G., Model of a Coal Washing Spiral, Coal Preparation, 9, 1991, pp1-11
  22. Kelly, E.G. and Subasinghe, G.K.N.S., Gravity Performance Curves! A Re-examination, Minerals Engineering, Vol.4, No.12, 1991, pp1207-1218
  23. Manser, R.J., Barley, R.W. and Wills, B.A., Development of a Mathematical Model of a Shaking Table Concentrator, Proc. 19<sup>th</sup> APCOM Symp., Pittsburgh, 1986
  24. Manser, E.J., Barley, R.W. and Wills, B.A., The shaking table concentrator - the influence of operating conditions and table parameters on mineral separation - the development of a mathematical model for normal operating conditions, Minerals Engineering, Vol.4, No.3/4, 1991, pp329-346
  25. Olajide, O. and Cho, E.H., Study of the Jigging Process Using a Laboratory-Scale Baum Jig, Minerals and Metallurgical Processing, 1987, pp11-14
  26. Leest, P.A. and Witteveen, H.J., Porosity: A New Angle for Developing a Theoretical Jig Model, Aufbersitug - Technik, 32, No.11, 1991, pp608-615
  27. Rong, R.X. and Lyman, G.J., Modelling Jig Bed Stratification in a Pilot Scale Baum Jig, Minerals Engineering, Vol.4, No.5/6, 1991, pp611-623
  28. Napier-Munn, T.J., Modelling and Simulating Dense Medium Separation Processes - A Progress Report, Minerals Engineering, Vol.4, No. 3/4, 1991, pp329-346
  29. King, R.P., Birtek, N. and Juckes, A.H., Prediction dense medium cyclone performance for beneficiation of fine coal, Proc. XV<sup>th</sup> Int. Min. Proc. Cong., Cannes, 1, 1985, pp258-271
  30. Lynch, A.J., Mineral Crushing and Grinding Circuits - Their Simulation, Optimization, Design and Control, 1977, Elsevier
  31. Reid, K.J., Maixi, Zu and Shenggui, Zhang, Coal-Cleaning Distribution Curve Simulation; Fitting Six Different Models by Microcomputer, Int. J. Miner. Process., 14, 1985, pp291-299
  32. Erasmus, T.C., Predicting the Performance of a Coal Washer with the Aid of a Mathematical Model, Proc 7<sup>th</sup> Int. Coal Preparation Congress, 61, Sydney, 1976
  33. Tamilmani, M. and Kapur, P.C., A Heuristic Model of the Tramp (Distribution) Curve, Int. J. Miner. Process., 18, 1986, pp47-56
  34. Lynch, A.J., Johnson, N.W., Manlapig, E.V. and Thome, C.G., Mineral and Coal Flotation Circuits, 1981, Elsevier