

Bakır Flotasyonu Prosesinde, Köpük Görüntüleri ile % Bakır Tenörü Arasındaki İlişkinin Görüntü Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi

Mehmet TÜRK MENOĞLU^{*1}, Ö. Faruk ÖZGÜVEN², Fatih Ş. ERKUŞ³,
Ayşe ÖZGÜVEN⁴, Z. Funda TÜRK MENOĞLU¹, O. Ozan VAROL¹

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Van

²İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Malatya

³Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Van

⁴Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Van

Geliş tarihi: 04.11.2019

Kabul tarihi: 20.12.2019

Öz

Bu çalışmada, Siirt Madenköy flotasyon tesisinden temin edilen bakır cevherinin laboratuvar ölçekli flotasyonu esnasında elde edilen köpük görüntüleri ile bakır zenginleştirme tenörü arasındaki korelasyon belirlenmiştir. Sadece hava akış hızı; 2 ile 8 l/dk arasında debimetre yardımı ile değiştirilmiş, diğer tüm flotasyon parametreleri tesis ile aynı tutulmuştur. Video kamera kullanılarak elde edilen köpük görüntüleri, MATLAB Havza Dönüşümü (MATLAB Watershed Transform) metoduyla işlenmiş ve hava kabarcıkları tanımlanmıştır. Kabarcık şekil ve büyüklük verileri, köpük görüntülerindeki kabarcık vadi sınırlarının tespiti ve bu sınırlarla görüntünün bölümlenmesi yoluyla elde edilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen 3 farklı flotasyon deney seti verileri kullanılarak flotasyon prosesinin otomasyonunda kullanılabilir görüntü işleme tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemi tasarımı yapılmıştır. Ölçülen ve hesaplanan bakır zenginleştirme tenörü arasındaki korelasyon katsayısı $r = 0,96$ olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Flotasyon, Görüntü işleme, MATLAB, Bulanık mantık, Bakır cevheri

Determination of the Relationship Between Foam Images with % Copper Grade in Copper Flotation Process by Image Analysis Method

Abstract

In this study, the correlation between the grade of copper enrichment and the foam images obtained during laboratory scale flotation of copper ore obtained from Siirt Madenköy flotation plant was determined. Only air flow rate was changed between 2 and 8 l/min with a flowmeter, all other flotation parameters were kept the same with the flotation plant. Foam images captured by a video camera were processed by MATLAB Watershed Transform method and air bubbles were defined. Bubble shape and size data were obtained by detecting and segmenting bubble watershed borders in foam images. In this study, image processing based fuzzy logic inference system that can be used in the automation of flotation process was designed using 3 different flotation experiment data sets. The correlation coefficient between measured and calculated grade of copper enrichment is $r = 0,96$.

Keywords: Flotation, Image processing, MATLAB, Fuzzy logic, Copper ore

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mehmet TÜRK MENOĞLU, mehmetturkmenoglu@yyu.edu.tr

1. GİRİŞ

Flotasyon prosesinde; sıcaklık, karıştırma hızı, kimyasalların miktarı, pH, hava miktarı ve flotasyon makinesindeki sıvı seviyesi gibi bazı konvansiyonel ölçümler mevcuttur. Bu ölçümler çeşitli ölçüm aletleri ile ölçülebilmekte ve kontrol edilebilmektedir. Ancak, flotasyon köpüğü ölçümleri insan gözlemleriyle sınırlıdır. Şu anda işletilen birçok tesiste flotasyon prosesi kontrolü operatörlerin oluşan köpüğü gözlemlemesi yoluyla sağlanmaktadır. Bu tesislerde flotasyon köpüğünün fiziksel ve sayısal metotlarla ölçülmesi ve karakterizasyonu mümkün olmadığından verim kayıpları yaşanmakta ve flotasyon prosesi performansı operatörün deneyimine bağlı kalmaktadır. Ayrıca, flotasyonun başarı oranı kimyasal analiz sonuçları çıkıncaya kadar belirlenememektedir. Bu nedenle, kimyasal analiz sonuçlarına bağımlı olmayan daha hızlı başka kontrol metodlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, bakır cevherinin flotasyon prosesi ile zenginleştirilmesi esnasında, köpük görüntüleri ve bakır zenginleştirme verimleri arasındaki ilişki, bulanık mantık metoduyla tespit edilmiştir.

Dijital görüntü işleme alanında görülen hızlı gelişmeler, operatörler tarafından yapılan gözlemlerin yerini alabilecek düzeye gelmiş; gerçek zamanlı, güvenilir ve tutarlı otomatik görüntü verilerinin kullanımını mümkün hale getirmiştir. Flotasyon köpüğü oluşumunu sağlayan hava kabarcıklarının büyüklüğü ve şekli flotasyon süreci performansı hakkında önemli miktarda veri içermektedir. Görüntü işleme uygulamaları, endüstriyel alanda (Malzeme tane büyüklüğü analizi, gerçek zamanlı güvenlik uygulamaları, iki boyutlu cisimlerden grafik modeller için veri eldesi vb.) bir çok alanda yaygın olarak kullanılan [1] kendini ispatlamış bir kontrol tekniğidir.

Flotasyon prosesinin kontrolü ve optimizasyonu amacıyla kullanılan görüntü işleme teknikleri, fiziksel, statik ve dinamik özellikler olmak üzere başlıca üç temel kategoride sınıflandırılabilir [2]. Bu çalışmada ekonomik ve güvenilir şekilde eldesi mümkün olan köpük büyüklüğü verisi toplanmıştır.

Görüntü analiz sistemlerinin performansı, istatistik teknikleri [3], yapay sinir ağları [4] ve bulanık mantık [5] uygulamalarıyla entegre edilmiş, böylelikle verimi artırılmıştır. Literatürde mineral konsantrasyonlarının ve proses durumunun büyük ölçüde köpüğün rengi ve morfolojik özellikleriyle ilgili olduğu bildirilmiştir [6]. Köpük rengi, köpüğün taşıdığı mineral türü ve konsantrasyonu hakkında bilgi verebilmektedir. Köpüğün prosesdeki durumu özellikle köpük balonları büyüklüğüyle karakterize edilebilmekte ve böylece köpük miktarı, çarpışma ve tutunma verimi tespit edilebilmektedir. Balon büyüklüğü ve ayırma verimi arasındaki ilişkinin araştırıldığı çalışmalar kayda değer sonuçlar vermiştir. Hava balonları büyüklüğü ile ilgili çalışmalar; vadi bölümlenmesi (segmentasyonu) [7-8], doku (tekstür) spektrumu [3] ve Dalgacık dönüşümü (Wavelet transformation) [9] şeklinde sınıflandırılabilir. Bu çalışmada ise, köpük fotoğrafları MATLAB Vadi Dönüşümü (MATLAB Watershed Transform) fonksiyonuyla analiz edilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde çok çeşitli sayıda cevherin farklı kimyasallar kullanılarak flotasyon yöntemiyle zenginleştirilmesinin çalışıldığı birçok çalışma mevcuttur. Ancak, görüntü analiz sisteminin flotasyon ile birlikte kullanıldığı çok az çalışma vardır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda listelenmiştir.

Dijital kamera kullanılarak elde ettikleri köpük görüntüsü ile flotasyon performansı arasındaki ilişkiyi inceleyen Ekmekçi ve Şahin [10] (2006), Küre bakır cevheri üzerinde flotasyon deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde hava hızının, köpürtücü dozajının ve köpük yüksekliğinin flotasyon verimine olan etkisini incelemişlerdir. Hava hızının artmasıyla konsantrasyonun bakır veriminin arttığını ancak tenörünün düştüğünü, kabarcık hızının ve alanının ise arttığını bildirmişlerdir. Köpük yüksekliğinin artmasıyla birlikte bakır veriminin azaldığını ancak tenörünün arttığını, kabarcık hızı azalırken kabarcık alanının arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, köpürtücü miktarı arttırıldığında bakır veriminin arttığını, kabarcık

alanı azalırken, kabarcık hızının arttığını bildirmişlerdir. Yazarlar, kabarcık alanı ile flotasyon performansı arasında saçınımlı bir ilişki olduğunu, bu nedenle görüntü analiz sistemi için bir kontrol parametresi olamayacağını, ancak kabarcık hızıyla flotasyon arasındaki uyumlu ilişki sayesinde flotasyon performansının kontrol edilebileceğini ileri sürmüşlerdir.

Köpük büyüklüğünün flotasyon kontrolünde kullanımında karşılaşılan başlıca sorunlar Aldrich ve arkadaşları [11] tarafından yüzeydeki görünür köpüklerin yüzeyaltı köpükleri temsil edememesi ve kullanılan segmentasyon algoritmalarının büyük köpükleri daha büyük, küçük köpükleri daha küçük boyutlandırdığını bildirmiştir. Bu çalışmada flotasyon işlemi sırasında elde edilen gerçek zamanlı görüntülerdeki köpük büyüklükleri bakır kazanım verimleri ile bulanık mantık kurallarıyla ifade edilerek optimum köpük büyüklüğü tahmininin yapılması sağlanmıştır.

Miskovic [12] yaptığı doktora çalışmasında, pilot ölçekli bir flotasyon devresinde gerçekleştirdiği hidrodinamik ve metalurjik testler ile kabarcık boyutunu belirlemeye çalışmıştır. Ayrıca flotasyon başlığının (rotor) tasarımının kabarcık oluşumu üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deneyler sonucunda, görüntü analiz tekniği ile kabarcık sayısı ve büyüklüğünü modelleyen iki farklı yöntemi karşılaştırmıştır ve havalandırma hızının köpük oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ileri sürmüştür.

Altaş [13], “Sondaj köpükleri özneliklerinin görüntü işleme teknikleri ile çıkarımı ve yapay sinir ağları kullanarak veri analizi” başlıklı yüksek lisans tezinde, köpüklerin görsel özneliklerini görüntü işleme metodlarıyla algılayacak ve YSA kullanılarak veri analizi yapabilecek bir model geliştirmeyi amaçlamıştır. Sınırlarını belirlediği köpüklerin yarıçap, alan, çevre gibi boyut ve biçim özelliklerini çıkarmış, kimyasal veriler ile birleştirerek YSA (Yapay Sinir Ağları) kullanarak veri analizi yapmıştır. Yaptığı incelemeler sonucunda görüntü işleme metodu ile elde edilen köpük verilerinin YSA ile analizinin mümkün olduğunu göstermiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarındaki 1 lt hacimli, havalandırma ve karıştırma ünitesi içeren Denver D12 tipi flotasyon hücresinde, manometre ve debimetre ile hava akımı kontrol edilerek, kesikli flotasyon deneyleriyle gerçekleştirilmiştir.

Köpük görüntülerinin alımı, Logitech C920 marka webcam kullanılarak MATLAB programının gerçek zamanlı görüntü alma ve işleme fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’de flotasyon makinasına teşkil edilen kamera, 25W gücünde ışık kaynağı ve görüntülerin işlendiği bilgisayar görülmektedir. Görüntü işlemede kullanılan en iyi görüntü, köpüğe dik açıyla konumlandırılan kamerayla ve tek bir ışık kaynağı kullanılarak elde edilmiştir. İşlenen görüntülerden elde edilen verilerle oluşturulan model, Matlab 2010 programının ‘fuzzy’ editörüyle oluşturulmuştur.



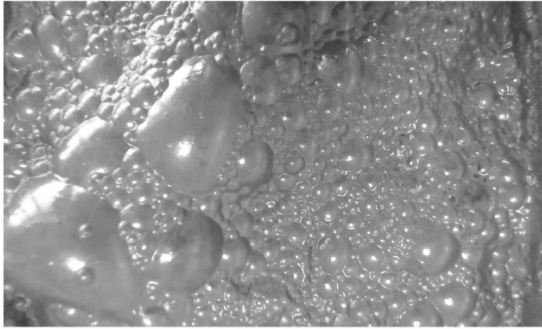
Şekil 1. Çalışmada kullanılan flotasyon makinesi ve kamera sistemi

3.2. Metot

Bakır cevheri laboratuvarında flotasyon prosesi ile zenginleştirilirken; bakır örneklerinin alındığı Siirt Madenköy flotasyon tesisinde kullanılan kimyasallar (Aerophine 3418 A, MIBC, Sodyum Silikat, Ca(OH)₂) ile diğer faktörler (pH, katı-sıvı oranı, cevher boyutu) tesis değerleriyle aynı tutulmuş, sadece kompresöre bağlanan hava

debimetre ile akış hızı; 2-8 l/dk arasında olacak şekilde değiştirilmiştir.

Köpük boyutunun belirlenmesi amacıyla flotasyon işlemi sırasında gerçek zamanlı video görüntülerinden 10 sn aralıklarla görüntü alınarak havza dönüşümü uygulanmıştır. Bu dönüşümde köpük görüntüsünün yoğun olduğu alanlar 'dağ', yoğun olmadığı alanlar 'vadi' olarak tanımlanarak vadiler tespit edilir. Görüntü işleme yönteminin izahı amacıyla alınan bir görüntüye uygulanan işlemler aşağıda sırasıyla anlatılmıştır. Çalışmada kullanılan flotasyon görüntülerinden biri Şekil 2'de verilmiştir.

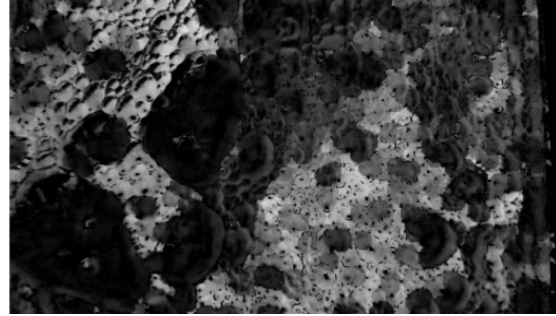


Şekil 2. Çalışmada kullanılan flotasyon görüntüsü

Havza dönüşümü işleminde vadi sayısını minimize etmek için ilgilenilen boyuttaki köpüklerin kontrastları maksimize edilir. Kontrast artırımı için kullanılan yaygın bir yöntem top-hat ve bottom-hat dönüşümlerinin birlikte kullanımınıdır. Şekil 3'de ve Şekil 4'de, orijinal görüntüye *imtophat* ve *imbothat* fonksiyonlarıyla top-hat ve bottom-hat dönüşümleri uygulanmış görüntü sunulmuştur.

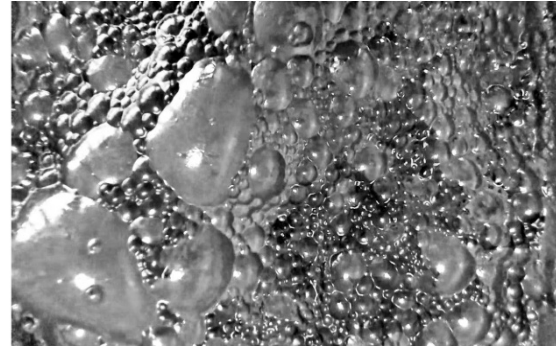


Şekil 3. Flotasyon görüntüsünde top-hat dönüşümü



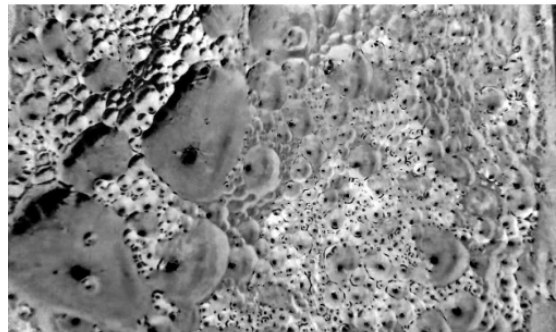
Şekil 4. Görüntüde bottom-hat dönüşümü

Şekil 5'de, elde edilen artırılmış tepe-çukur karşıtlığının hedeflenen yoğunluk vadilerine dönüştürülebilmesi amacıyla *incomplement* fonksiyonu kullanılır.



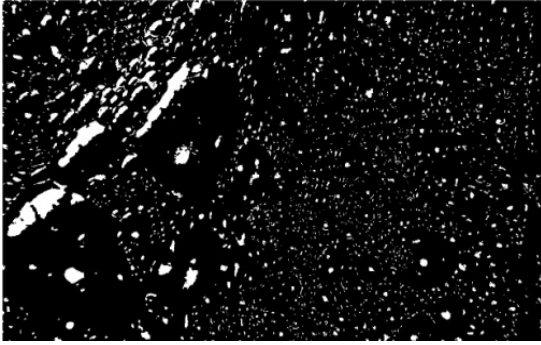
Şekil 5. Artırılmış tepe-çukur karşıtlığı

Şekil 6'da sunulan yoğunluk vadilerinin tümü *imextendedmin* fonksiyonuyla belirli bir eşik altında tespit edilir. Bu fonksiyonun çıktıları, 0 ve 1 kodlanmış piksellerden oluşan ikili görüntü (binary image) şeklindedir.

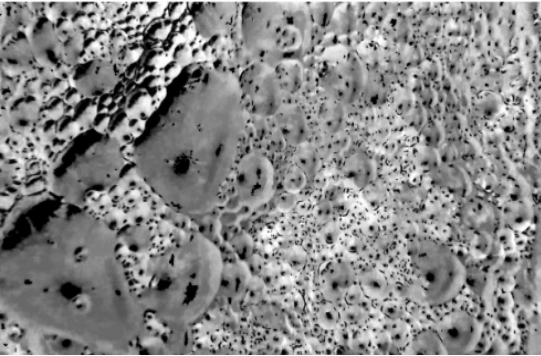


Şekil 6. Yoğunluk vadilerinin oluşturulması

Bu işlemten sonra, *imextendedmin* fonksiyonu görüntüsünde vadilerin büyüklüğü yerine konumu önemlidir. *Imimposemin* fonksiyonu ile görüntüde sadece *imextendedmin* fonksiyonuyla tespit edilen vadilerin bulunması sağlanır. Bu fonksiyonla ayrıca uint8 görüntülerinin ulaşabileceği en derin vadi değeri olan sıfır değerine ulaşması mümkün olur. Minimum değer uygulanan tüm bölgeler havza dönüşümü tarafından tespit edilecektir. Minimum eşiğe genişletilmiş vadiler Şekil 7’de ve minimum değer uygulanmış görüntü Şekil 8’de verilmiştir.

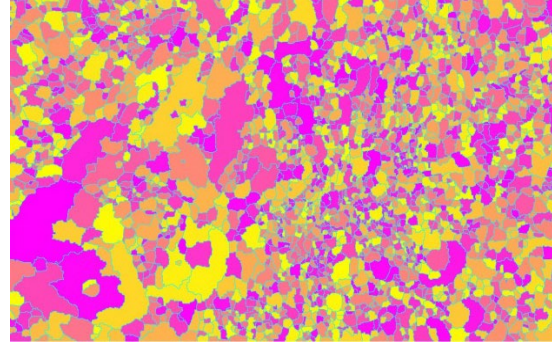


Şekil 7. Minimum eşiğe genişletilmiş vadiler



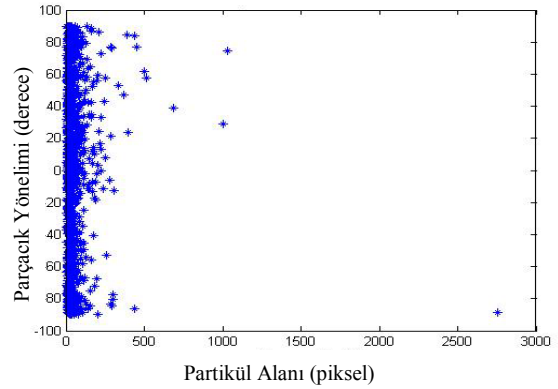
Şekil 8. Minimum değer uygulanmış görüntü

Minimum değer uygulanmış görüntünün havza bölümlenmesi *watershed* fonksiyonuyla sağlanır. Bu fonksiyon, görüntüyü vadi bölgeleriyle ilişkilendirilmiş negatif olmayan sayılar içeren matrise dönüştürür. Havza alanına girmeyen piksellere sıfır piksel değeri verilir. Şekil 9’da etiket matrisi, *label2rgb* fonksiyonu kullanılarak görüntü olarak gösterilmiştir.



Şekil 9. Havza bölümlenmesi

Etiket matrisinin özellikleri *regionprops* fonksiyonuyla çıkarılabilir. Bu fonksiyonla parçacık (köpük) alanları ve yönleri hesaplanır. Şekil 10’da köpük alanı ve yönü verilmiştir.



Şekil 10. Parçacık yöneliminin alanla ilişkisi

Elde edilen “köpük alanı (area)” değerleri, “köpük sayısı” ve flotasyonda hedeflenen büyüklükteki köpüğün oluşturduğu “alan ortalaması” değerleri kullanılarak, bulanık mantık modeli oluşturulmuştur. Şekil 2’deki görüntü için köpük alanı, köpük sayısı ve köpük alanı ortalama değerleri Çizelge 1’de sunulmuştur.

Çizelge 1. Bulanık mantık modelinin oluşturulmasında kullanılan giriş verileri

Toplam köpük alanı	Köpük sayısı	Ortalama köpük alanı
8050 piksel	1850 adet	2810 piksel

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Flotasyon, kaotik doğası ve ölçümlerinde kullanılan teknolojilerin yetersizliği nedenleriyle maden endüstrisinde modellenmesi ve kontrolü zor süreçlerden biridir. Flotasyon tesislerindeki işletme koşulları büyük ölçüde flotasyon köpüğü görünümüyle ilişkilendirilmektedir [11]. Bu çalışmada köpük boyutu tahmin yaklaşımının basit ve güvenilir şekilde uygulanabildiği gösterilmiştir. Çalışmada bakır flotasyonu sürecine uygulanan gerçek zamanlı bir görüntü analiz sistemi sunulmaktadır. Görüntü analiz sisteminde köpük boyutunun verimli bir şekilde tahmini yapılmıştır.

Flotasyon deney koşulları Çizelge 2’de verilmiştir. Hava akış hızı; 2-8 l/dk arasında olacak şekilde ayarlandıktan sonra; elde edilen konsantrelerin ve atıkların bakır tenörleri belirlenmiştir. Flotasyon deneyleri sonucunda elde edilen konsantre ve atıklara ait bakır yüzdeleri Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 2. Flotasyon deney koşulları

Kollektör	Aerophine 3418A	50 g/t
Köpürtücü	MIBC	20 g/t
Bastırıcı	Sodyum Silikat	45 g/t
pH düzenleyici	Sönmüş kireç	8 kg/t
Katı/sıvı oranı	%30	Sabit
pH	11,8 -12	Sabit
Karıştırma hızı	1250 d/d	Sabit
Karıştırma süresi	3 d	Sabit
Köpük alma süresi	3 d	Sabit
Numune boyutu	-75 μ	Sabit

Çizelge 3. Flotasyon deneylerinde elde edilen konsantre ve atıkların bakır yüzdeleri

	Konsantre (% Cu)	Atık (% Cu)
2 l/dk	6,60	0,99
3 l/dk	7,84	0,86
4 l/dk	7,78	0,89
5 l/dk	7,71	0,90
6 l/dk	7,52	0,90
7 l/dk	7,38	0,92
8 l/dk	7,05	0,93

Çalışma süresince 3 defa tekrarlanan ve akış hızının 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 l/d olarak değiştirildiği deney setlerinden online olarak elde edilebilen veri setleri ortalaması flotasyon süresinin birinci, ikinci ve üçüncü dakikaları için Çizelge 4’te sunulmuştur.

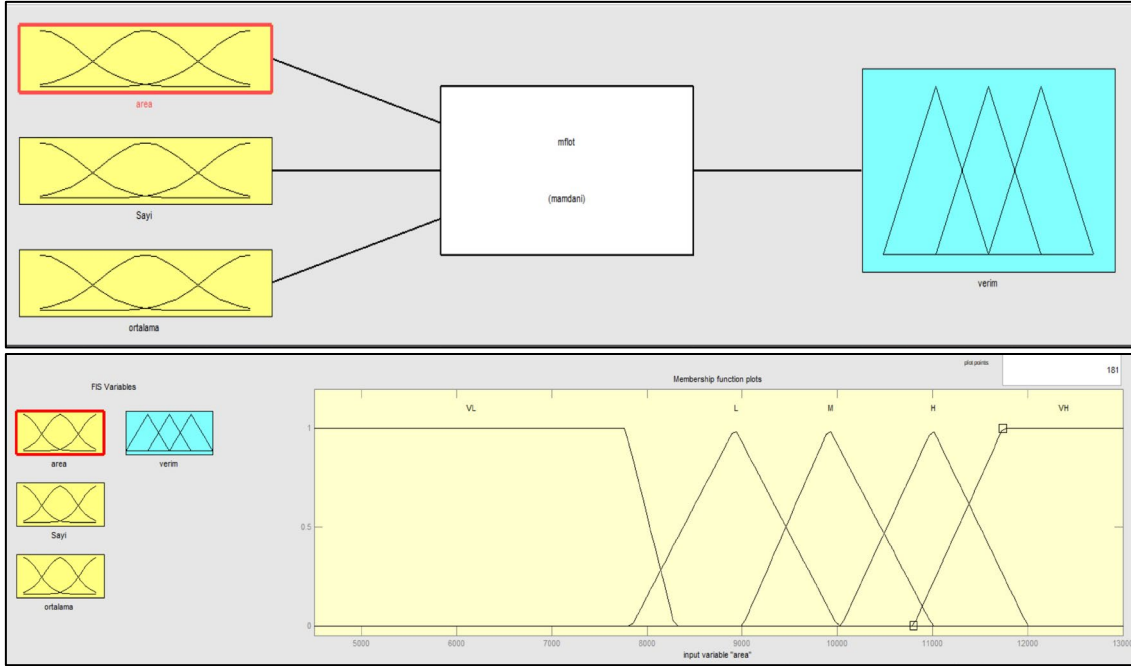
Çizelge 4. Bulanık mantık modelinin oluşturulmasında kullanılan giriş veri setleri

	Toplam köpük alanı (piksel)	Köpük sayısı (adet)	Ortalama köpük alanı (piksel)
S2-1	2693	533	1385
S2-2	8284	247	2238
S2-3	11267	194	2657
S3-1	3915	626	1515
S3-2	15523	276	2797
S3-3	19305	256	2794
S4-1	5563	688	2437
S4-2	13829	250	2531
S4-3	12120	193	2272
S5-1	16666	311	1921
S5-2	3611	395	2425
S5-3	4015	355	2605
S6-1	14342	410	2071
S6-2	2665	434	1474
S6-3	2190	448	1338
S7-1	8819	418	1915
S7-2	2885	515	1291
S7-3	1924	701	1358
S8-1	10996	416	2605
S8-2	6007	605	1824
S8-3	2817	640	1466

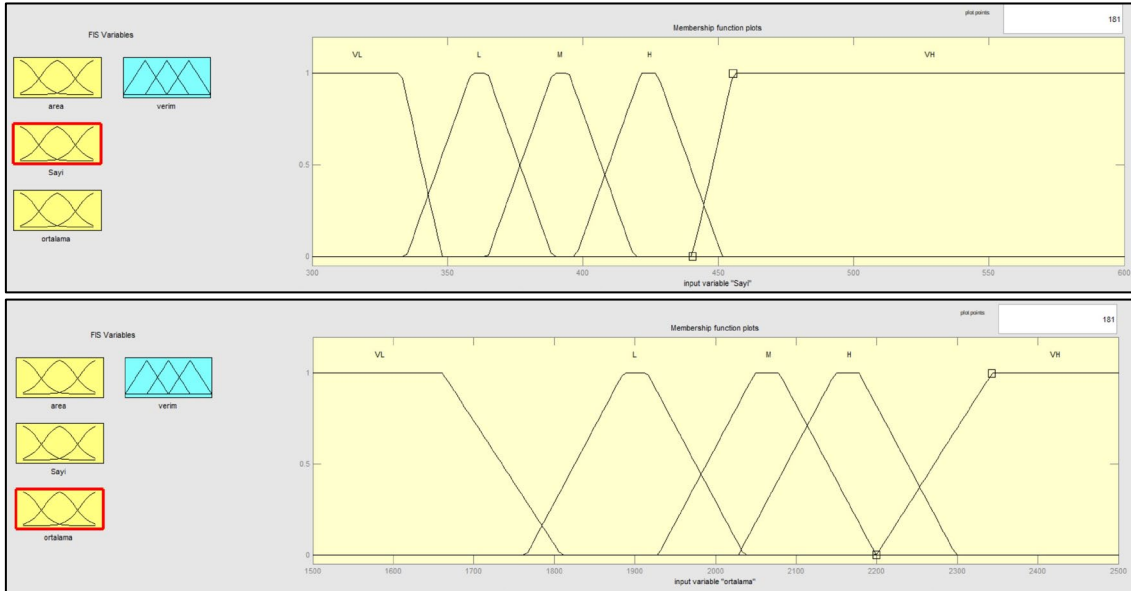
Bulanık sistemlerde genellikle dört temel aşama bulunur. Bunlar; üyelik fonksiyonları (bulanıklaştırma), bulanık kural tabanı, durulaştırma ve bulanık sistem çıktılarıdır. Bulanık çıkarım motoru, bulanık kural tabanındaki tüm bulanık kuralları değerlendirerek giriş verilerini ilgili çıkış verilerine dönüştürür.

Bu çalışmada giriş parametreleri, toplam köpük alanı “area”, köpük sayısı “Sayı” ve ortalama köpük alanı “ortalama” ve çıkış parametresi, % bakır zenginleştirme verimi “verim” parametrelerinden oluşan üyelik fonksiyonları ve

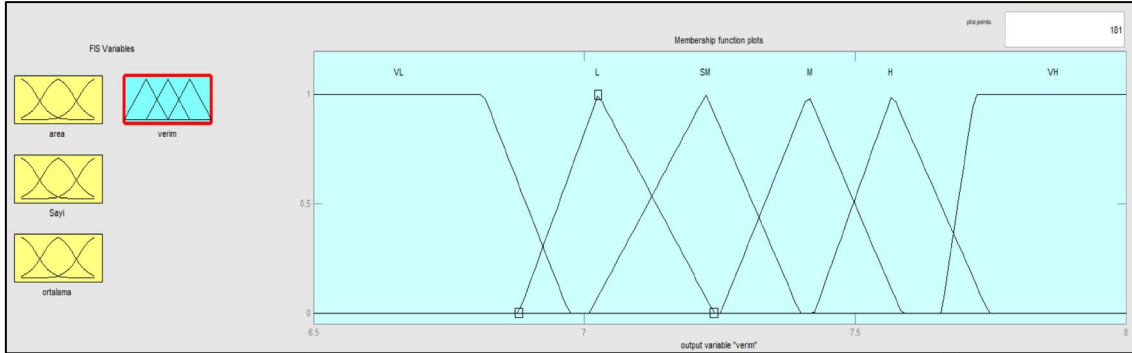
giriş-çıkış ilişkileri tasarımı Şekil 11’de sunulmuştur. Şekil 12 ve 13’de ise en uygun yazılım performansı sağlamak amacıyla giriş ve çıkış değişkenleri için seçilen üçgen ve yamuk fonksiyonları ile tanımlanan üyelik fonksiyonları gösterilmiştir.



Şekil 11. Giriş ve çıkış parametreleri

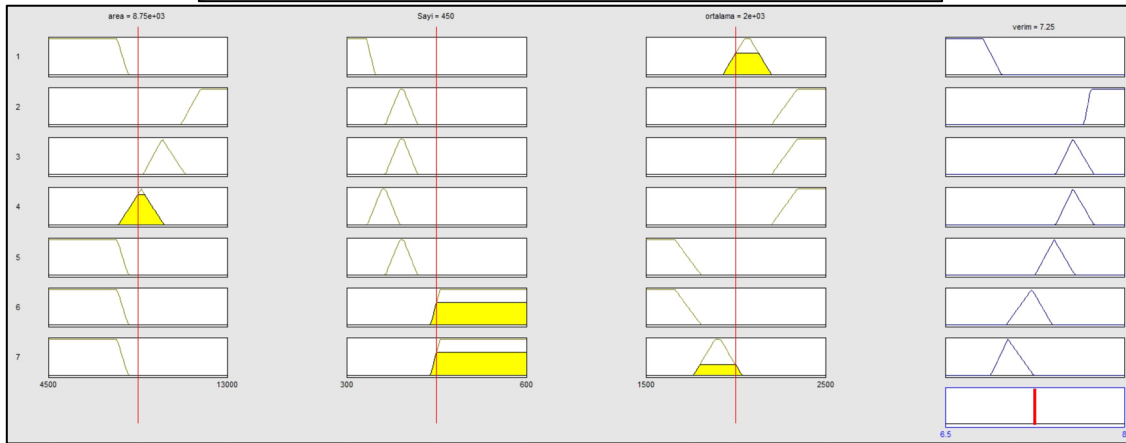


Şekil 12. Giriş parametreleri üyelik fonksiyonları



Şekil 13. Çıkış parametresi üyelik fonksiyonu

1. If (area is VL) and (Sayı is VL) and (ortalama is M) then (verim is VL) (1)
2. If (area is VH) and (Sayı is M) and (ortalama is VH) then (verim is VH) (1)
3. If (area is M) and (Sayı is M) and (ortalama is VH) then (verim is H) (1)
4. If (area is L) and (Sayı is L) and (ortalama is VH) then (verim is H) (1)
5. If (area is VL) and (Sayı is M) and (ortalama is VL) then (verim is M) (1)
6. If (area is VL) and (Sayı is VH) and (ortalama is VL) then (verim is SM) (1)
7. If (area is VL) and (Sayı is VH) and (ortalama is L) then (verim is L) (1)



Şekil 14. Kurallar ve durulaştırma kural ekranı

Durulaştırma basamağında uygulanan kurallar ise Şekil 14'teki kural gösterim ekranında verilmiştir.

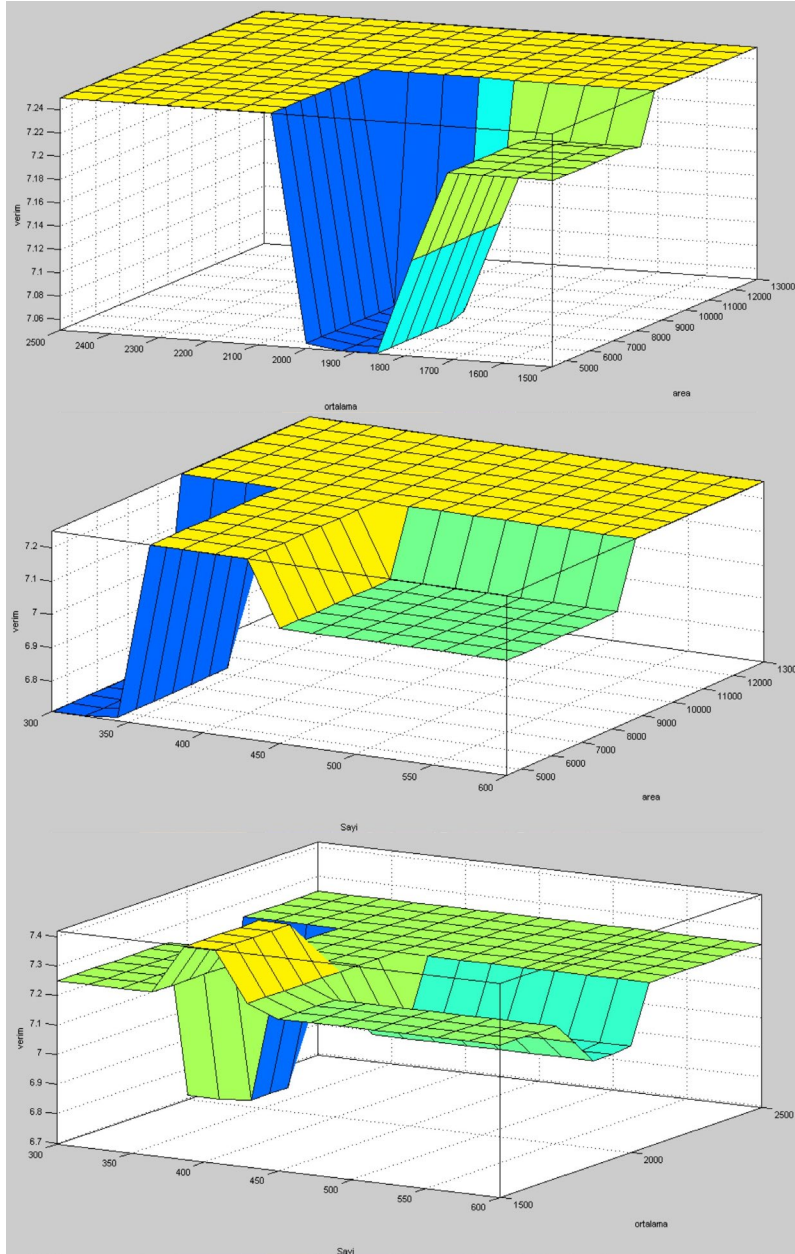
Bulanık kural tabanlı model tasarımı, deneysel veriler kullanılarak "Eğer-İse" kuralları ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bulanık setleri "çok düşük, düşük, küçük orta, orta, yüksek ve çok yüksek" dil terimleri kullanılarak oluşturulmuştur. Bulanık kurallar oluşturulurken giriş ve çıkış verileri arasındaki muhtemel tüm ilişkiler model tasarımında dikkate alınmıştır. Üyelik fonksiyonları tanımlandıktan sonra kural tabanı

oluşturulmuştur. Kural tabanındaki kurallar, "Eğer X= A ve Y= B İse, Z= C'dir" formatında tanımlanmıştır. Bu çalışmada "Eğer alan Çok Yüksek ve Sayı Çok Yüksek ve Ortalama Orta İse; Verim Çok Düşük'tür" gibi farklı dil terimleriyle tanımlanan 7 kural kullanılmıştır. Modelin geçerli kılınması için deneysel giriş verileri kullanarak çıkış parametrelerinin tahmin edilmesi sağlanmıştır.

Şekil 15'te giriş verileriyle verim yüzdesi çıkış verilerinin model yüzey tahminleri verilmiştir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen 3 farklı flotasyon deney seti verileri kullanılarak bulanık mantık çıkarım sistemi ile flotasyon sisteminin görüntü işleme yöntemiyle modellenmesi sağlanmıştır. Flotasyon deneylerinde ölçülen % bakır tenörü

sonuçlarıyla model ile tahmin edilen değerler Çizelge 5’te sunulmuştur. Ölçülen ve hesaplanan % bakır zenginleştirme tenörü arasındaki korelasyon katsayısı $r = 0,96$ hesaplanmıştır.



Şekil 15. Bulanık mantık çıkarım modelinin verim tahminlerinin Ağırlık merkezini bulma, Sayı-area ve Sayı-ortalama parametreleri için yüzey gösterimi

Çizelge 5. Flotasyon deneylerinde ölçülen % bakır tenörleri ve model ile tahmin edilen bakır tenörleri

Hava Debisi	AAS ile ölçülen % bakır tenörü	Bulanık mantık ile tahmin edilen % bakır tenörü
2 l/dk	6,60	6,70
3 l/dk	7,84	7,85
4 l/dk	7,78	7,58
5 l/dk	7,71	7,58
6 l/dk	7,52	7,25
7 l/dk	7,38	7,21
8 l/dk	7,05	7,05

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda listelenmiştir;

- Bakır içeriği %2,97 olan orijinal numune üzerinde gerçekleştirilen kaba flotasyon deneyleri sonucunda, en yüksek tenörde bakır zenginleştirme 3 l/dk hava akış hızında elde edilen konsantrde gerçekleştirilmiştir.

- Kaba flotasyon deneyleri sonucunda elde edilen (3 l/dk hava akış hızı ile elde edilen) konsantrde kalkopirit miktarı artarken atıkta bu miktar azalmıştır. Kimyasal analiz sonuçlarına göre konsantrinin bakır tenörü %7,84 iken bu oran atıkta %0,86 olarak belirlenmiştir.

- 1 l/dk hava akış hızında sağlıklı veriler elde edilememiştir. Hava akış hızı 3 l/dk'dan sonra artırıldığında konsantrdeki bakır tenöründe az da olsa düşüşler meydana gelmiştir.

- Bu çalışmada gerçekleştirilen 3 farklı flotasyon deney seti verileri kullanılarak bulanık mantık çıkarım sistemi ile flotasyon sisteminin görüntü işleme yöntemiyle modellenmesi sağlanmıştır. Flotasyon deneylerinde ölçülen % bakır tenörü sonuçlarıyla model ile tahmin edilen değerler birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Ölçülen ve hesaplanan % bakır zenginleştirme tenörleri

arasındaki korelasyon katsayısı $r = 0,96$ olarak hesaplanmıştır.

- Çalışma sonucunda flotasyon prosesi hava akış hızının optimum seviyede işletimini mümkün kılan görüntü işleme tabanlı bulanık mantık tahmin modeli geliştirilmiştir. Bu modelin flotasyon proseslerinin otomasyonunda kullanılabilecek faydalı bir araç olduğu online veri analizi ve sistem simülasyonu yapılarak gösterilmiştir.

7. TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmayı 2015-MİM-B090 proje numarası ile destekleyen Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine değerli katkılarından dolayı teşekkürlerini sunarlar.

8. KAYNAKLAR

1. Karakoç M., 2012. Görüntü İşleme Teknolojileri ve Uygulamaları. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı Ders Notları, İzmir.
2. Shean B.J., Cilliers, J.J., 2011. A Review of Froth Flotation Control. International Journal of Mineral Processing, 100(3), 57-71.
3. Nguyen K.K., Thornton A.J., 1995. The Application of Texture-based Image Analysis Techniques in Froth Flotation. In: Conference Proceedings DICTA-95. Digital Image Computing: Techniques and Applications, Australian Pattern Recognition Society.
4. Moolman, D.W., Aldrich, C., Van Deventer, J.S.J., Bradshaw, D.J., 1995. The Interpretation of Flotation Froth Surfaces By Using Digital Image Analysis and Neural Networks. Chemical Engineering Science 50(22), 3501-3523.
5. Chuk, O.D., Ciribeni, V., Gutierrez, L.V., 2005. Froth Collapse in Column Flotation: a Prevention Method Using Froth Density Estimation and Fuzzy Expert Systems. Minerals Engineering 18(5), 495-504.
6. Moolman, D.W., Eksteen, J.J., Aldrich, C., van Deventer, J.S.J., 1996. The Significance of

- Flotation Froth Appearance for Machine Vision Control. *International Journal of Mineral Processing* 48(3–4), 135–158.
7. Sadr-kazemi, N., Cilliers, J., 1997. An Image Processing Algorithm for Measurement of Flotation Froth Bubble Size and Shape Distributions. *Minerals Engineering* 10(10), 1075–1083.
 8. Bonifazi, G., Serranti, S., Volpe, F., Zuco, R., 2001. Characterisation of Flotation Froth Colour and Structure by Machine Vision. *Computers & Geosciences* 27(9), 1111-1117.
 9. Liu, J.J., MacGregor, J.F., Duchesne, C., Bartolacci, G., 2005. Flotation Froth Monitoring Using Multiresolutional Multivariate Image Analysis. *Minerals Engineering* 18, 65–76.
 10. Ekmekçi, Z., Şahin, A.N., 2006. Köpük Görüntüsü ve Flotasyon Performansı Arasındaki İlişkinin Görüntü Analiz Sistemi ile İncelenmesi. *Madencilik Dergisi*, 45(2), 27-38.
 11. Aldrich, C., Moolman, D.W., Gouws, F.S., Schmitz, G.P.J., 1997. Machine Learning Strategies for Control of Flotation Plants. *Control Engineering Practice* 5(2), 263–269.
 12. Miskoviç, S., 2011. An Investigation of the Gas Dispersion Properties of Mechanical Flotation Cells: An in-situ Approach. Doctor of Philosophy, Mining and Minerals Engineering, Virginia Polytechnic Institute, State Uni., 183.
 13. Altaş, V.M., 2007. Sondaj Köpükleri Özniteliklerinin Görüntü İşleme Teknikleri ile Çıkarımı ve Yapay Sinir Ağları Kullanarak Veri Analizi. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 109.

