



SIKIŞTIRILMIŞ YATAK TESTİNDE TANE BOYUNA BAĞIMLI KIRILMA MODELİNİN UYGULANABİLİRLİĞİ

Deniz ALTUN^{1,*} , A. Hakan BENZER² 

^{1,2} Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara, Türkiye

ÖZET

Manyetit, platin ve fosforit cevherlerinin basınç altında kırılma karakteristiği sıkıştırılmış yatak testi ile incelenmiştir. Bu amaçla, piston pres test aleti kullanılmıştır. Testler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak enerji ve tane boyunun kırılma üzerine etkisi incelenmiştir. Literatürde yaygın olarak kullanılan ürün inceliğini ifade eden t_{10} değeri ile E_{cs} (Özgül Ufalama Enerjisi) arasında ilişki kurulmuştur. Sonrasında ürün inceliği ile tane boyutu ilişkisi incelenmiş ve test sonucunda elde edilen verilerin tane boyuna bağımlı kırılma modeline uyumu değerlendirilmiştir. Çalışma sonunda, tane boyuna bağımlı kırılma modelinin tane boyundan bağımsız kırılma modeline göre verilere daha iyi uyum sağladığı ve malzemelerin basınç altında kırılma davranımının belirlenmesinde de kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yatak kırma, Kırılma modeli, Piston

THE APPLICABILITY OF SIZE-DEPENDENT BREAKAGE MODEL IN COMPRESSED BED TEST

ABSTRACT

Breakage characteristics of magnetite, platinum and phosphorite ores were investigated via compressed bed breakage tests. With this aim, piston-die test equipment was used. Effects of specific comminution energy (E_{cs}) and particle size on breakage was analysed by using obtained data from the breakage tests. The relationship between E_{cs} (Specific Comminution Energy) and t_{10} value, which is commonly used in literature, was established. Then, the product fineness and particle size relationship were analysed, and the compatibility of the data obtained from the tests, with size dependent breakage model was evaluated. It was concluded that the size-dependent breakage model better fitted to the data than the size-independent model and this model could be used to determine the breakage behaviour under compression force.

Keywords: Bed breakage, Breakage model, Piston

1. GİRİŞ

Bir boyut küçültme ekipmanının performansı operasyonel koşullar ile birlikte besleme malzemesinin kırılma özelliklerine de bağlı olarak değişmektedir. Buna bağlı olarak ekipman ve devrelerin optimizasyon, modelleme ve simülasyon çalışmalarının güvenilirliği, malzemenin kırılma davranımı karakterizasyonunun doğru bir şekilde tanımlanması ile ilişkili olmaktadır. Kırılma karakterizasyonu, belirli besleme boyundaki malzemeye uygulanan enerji sonrasında oluşan ürünün boyut dağılımını bir başka deyişle kırılma dağılım fonksiyonunu belirlemeyi amaçlamaktadır. Literatürde kırılma dağılım fonksiyonu ile ilgili temel olarak iki görüş yer almaktadır. Bunlardan ilki, malzemenin kırılma karakteristiğinin tane boyundan bağımsız olduğunu kabul etmektedir [1-13]. İkinci görüş ise her bir tane boyu aralığı için farklı kırılma dağılım fonksiyonu tanımlamaktadır. Bu çalışma tane boyunun kırılma davranımı üzerine olan etkilerini inceleyen çalışmalara dayanmaktadır. Bazı araştırmacılar tane boyu etkisini de içeren kırılma modelleri geliştirmişlerdir [14-26].

Boyut küçültme ekipmanlarının modelleme çalışmalarında önemli bir yer tutan kırılma karakterizasyon verilerini elde edebilmek amacıyla bu ekipmanların kırma mekanizmasına uygun olarak birçok test yöntemi geliştirilmiştir. Bu testler malzemelerin kırılma dağılım özelliklerini ve kırılma ve enerjiye bağlı bir sertlik parametresi belirlemek için kullanılmaktadırlar. Darbe ile kırmanın boyut küçültme ekipmanlarında en temel kırma mekanizması olduğu belirtilmiştir [14]. Bu nedenle, malzemelerin kırılma davranımlarının incelenmesinde büyük bir oranda tek tane darbe testleri yürütülmüştür. Fakat, 1980'lerin başlarında yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerin kullanılmaya başlamasıyla, malzemelerin basınç altında

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: deksi@hacettepe.edu.tr

Geliş / Received: 14.03.2019 Kabul / Accepted: 26.11.2019 doi: 10.28948/ngumuh.539870

D. Altun, A.H. Benzer

kırılma davranımlarının incelenmesi ihtiyaç duyulmuştur. Piston pres kullanarak sınırlı yatak kırılma testleri, farklı malzemelerin basınç altında kırılma davranımlarını karakterize etmek ve elde edilen verilerin yüksek basınçlı merdaneli değirmen [27-29], kırıcı [30] ve dik valsli değirmen [31] modellenmesi için kullanılmıştır.

Bu çalışmada, farklı malzemelerin basınç altında kırılma davranımlarının, darbe yatak kırma test verilerini kullanılarak geliştirilen tane-boyuna bağımlı kırılma modeline uyumunun incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, üç farklı cevher piston pres test aleti ile sıkıştırılmış yatak testine tabi tutulmuşlardır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Yatak Kırma Test Düzenegi

Çalışma kapsamında, cevherlerin kırılma karakterizasyon çalışmaları Piston test aleti ile yürütülmüştür (Şekil 1). Test aletinin teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Kırılan malzeme boyutuna bağlı olarak iki farklı çapa sahip silindir kullanılabilir. Bu çalışmada sunulan tüm testlerde 100 mm çapa sahip silindir kullanılmıştır.

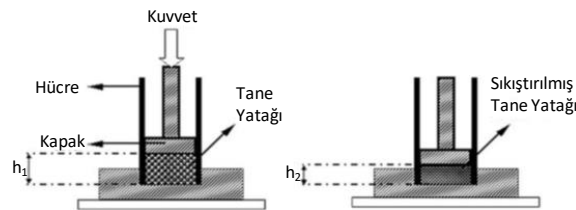


Şekil 1. Piston pres test düzenegi

Tablo 1. Piston pres test aletinin teknik özellikleri

Maks. yükleme kapasitesi	2000 kN
LVDT ölçme aletinin hassasiyeti	2,5 kN/sn
Silindirik kalıbın çapı	100 and 170 mm
Silindirik kalıbın boyu	200 mm

Test aletinde malzeme yatağındaki yer değiştirmeyi ölçebilmek için bilgisayara bağlı bir birim deformasyon ölçer (LVDT) bulunmaktadır. Kırma testleri sırasında, uygulanan kuvvet ve malzeme yatağının yer değiştirme verileri kaydedilmektedir. Basınç ile yatak kırma testi şematik bir biçimde Şekil 2'de gösterilmektedir. Tane yatağı h_1 yatak yüksekliğinden h_2 yatak yüksekliğine sıkıştırıldığında, yapılan iş yer değiştirmenin bir fonksiyonu olarak Eşitlik 1'de tanımlanmaktadır.



Şekil 2. Tane yatağı sıkıştırılmasının temsili gösterimi

$$W = \int_{h_1}^{h_2} f(h)dh$$

(1)

SIKIŞTIRILMIŞ YATAK TESTİNDE TANE BOYUNA BAĞIMLI KIRILMA MODELİNİN UYGULANABİLİRLİĞİ

Burada,

dh : Diferansiyel yer değiştirme,

$f(h)$: Yer değiştirmenin bir fonksiyonu olarak kuvvet

Testler sırasında harcanan enerji kuvvet-yer değiştirme verilerinin grafiksel olarak ifade edilmesi ile hesaplanmaktadır. Eğri altında kalan bölgenin alanı hesaplanarak harcanan enerji elde edilmektedir.

2.2. Laboratuvar Çalışmaları

Testlerde kırılma davranımlarını incelemek amacıyla manyetit, platin ve fosforit olmak üzere üç farklı cevher sağlanmıştır. Öncelikli olarak, tüm cevherler üç farklı dar tane boyu fraksiyonlarına kuru eleme yöntemi ile ayrılmış, her bir tane boyu fraksiyonunda temsili numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan dar numuneler farklı basınç kuvvetleri altında kırılmışlardır. Test koşulları Tablo 2’de verilmektedir.

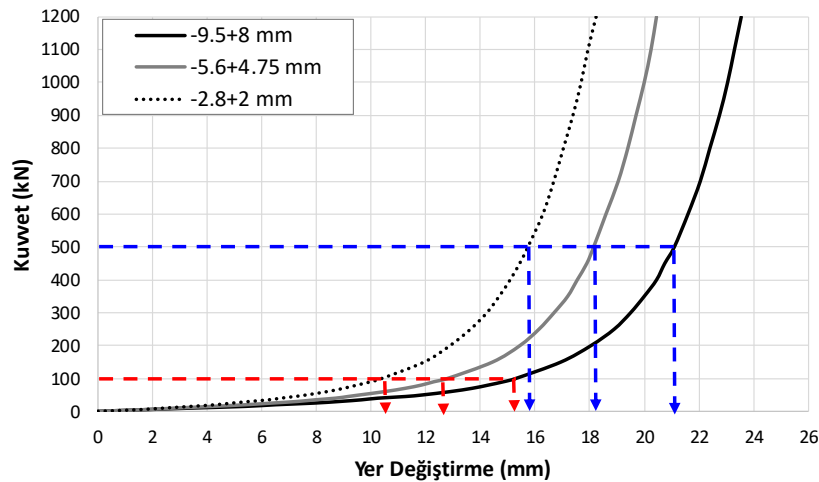
Tablo 2. Test koşulları

Tane Boyu Fraksiyonu (mm)	Kuvvet (kN)		
	100	500	1200
-9,5+8	X	X	X
-5,6+4,75	X	X	X
-2,8+2	X	X	X

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kırma Enerjisinin Hesaplanması

Yürütülen kırma testleri sırasında kaydedilen kuvvet-yer değiştirme verileri manyetit cevheri için grafiksel olarak Şekil 3’te gösterilmektedir. Verilen yer değiştirme- kuvvet grafiklerinde tane boyunun kırılma üzerindeki etkisi gözlemlenmektedir. Uygulama kuvvetinin aynı olduğu durumda, en az yer-değiştirme en ince test besleme tane boyu olan -2,8+2 mm fraksiyonunda ölçülmüştür. Tane boyu incelidikçe kırılmaya karşı direncin artması nedeniyle yer-değiştirme miktarı da azalmaktadır.



Şekil 3. Kuvvet- yer değiştirme ilişkisi (Manyetit cevheri)

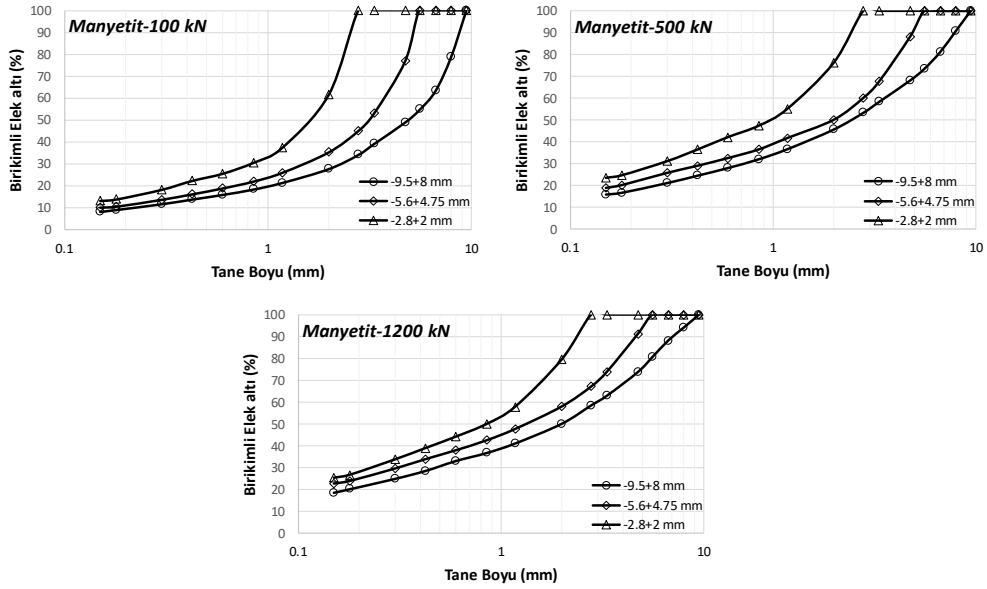
Kuvvet-yer değiştirme verileri ve test için kullanılan cevherin ağırlığı kullanılarak test enerjileri hesaplanmıştır. Hesaplanan kırma enerji (E_{CS}) değerleri her bir test için Tablo 3’te verilmektedir.

Tablo 3. Hesaplanan Ecs değerleri

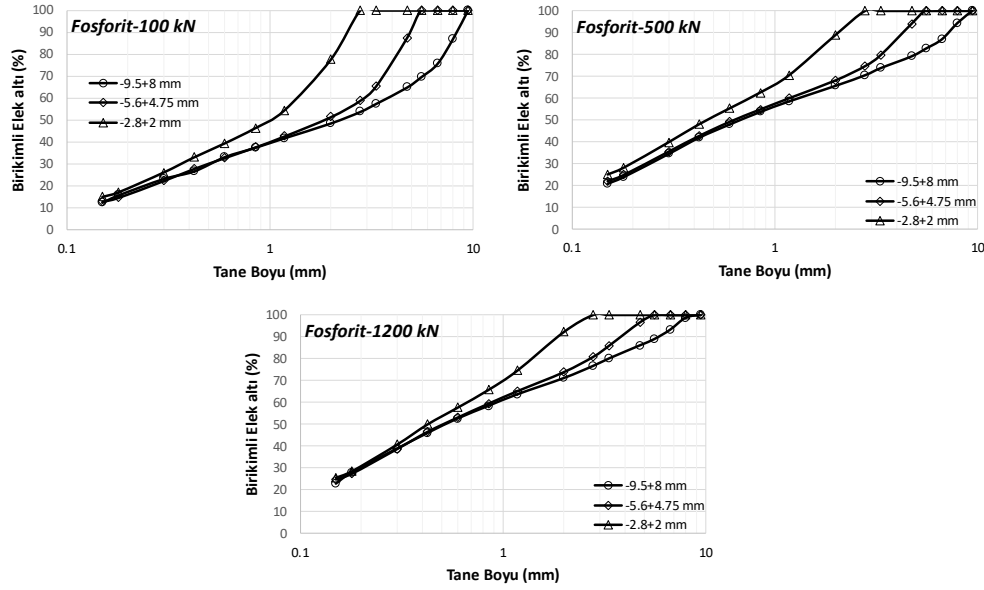
	Tane Fraksiyonu (mm)	Boy	Ecs (kWsa/t)		
			100 kN	500 kN	1200 kN
Manyetit	-9,5+8		0,168	0,663	1,410
	-5,6+4,75		0,170	0,731	1,384
	-2,8+2		0,141	0,634	1,442
Platin	-9,5+8		0,198	1,077	2,009
	-6,7+5,6		0,263	1,084	1,947
	-2,8+2		0,230	1,070	2,083
Fosforit	-9,5+8		0,231	0,971	2,147
	-6,7+5,6		0,242	0,940	2,173
	-2,8+2		0,237	1,019	2,191

3.2. Ürün Tane Boyu Dağılımları

Kırma testleri sonucunda elde edilen ürünlerin boyut dağılımları en üst boydan başlanarak 150 μm 'ye kadar elek analizi ile belirlenmiştir. Manyetit, platin ve fosforit cevherleri farklı enerji seviyelerinden kırılmış ürünlerin tane boyu dağılımları Şekil 4-Şekil 6'da gösterilmektedir.

**Şekil 5.** Platin ürün tane boyu dağılımları

SIKIŞTIRILMIŞ YATAK TESTİNDE TANE BOYUNA BAĞIMLI KIRILMA MODELİNİN UYGULANABİLİRLİĞİ



Şekil 6. Fosforit ürün tane boyu dağılımları

3.3. Kırılma Modeli

Çalışmanın bu bölümünde, tane boyuna bağımlı ve bağımsız olmak üzere iki kırılma modelinin test edilmesi amaçlanmıştır. Enerjiye bağımlı tane boyundan bağımsız kırılma modeli [32] Eşitlik 2’de, tane boyuna bağımlı model [26] ise Eşiklik 3’te verilmektedir. Verilen modellerde incelik göstergesi olarak t_{10} parametresi kullanılmaktadır. t_{10} değeri ürün tane boyu fraksiyonunun geometrik ortalamasının $1/10$ ’undan geçen malzeme miktarını ifade etmektedir. Malzeme kırılma davranımı, kırılma modeli kullanılarak t_{10} , E_{CS} (özellik ufalama enerjisi) ve tane boyuna bağımlı olarak karşılaştırılabilmektedir. A ve C model parametreleri kırılmanın doygunluk noktasındaki t_{10} değerini, b ve d ise sırasıyla $E_{CS} - t_{10}$, $E_{CS}X - t_{10}$ eğrilerinin eğimini ifade etmektedir. Model parametrelerinin çarpımı malzeme direncini belirten malzeme sertliği ya da malzeme indisi olarak adlandırılmaktadır.

$$t_{10} = A(1 - e^{-bE_{CS}}) \quad (2)$$

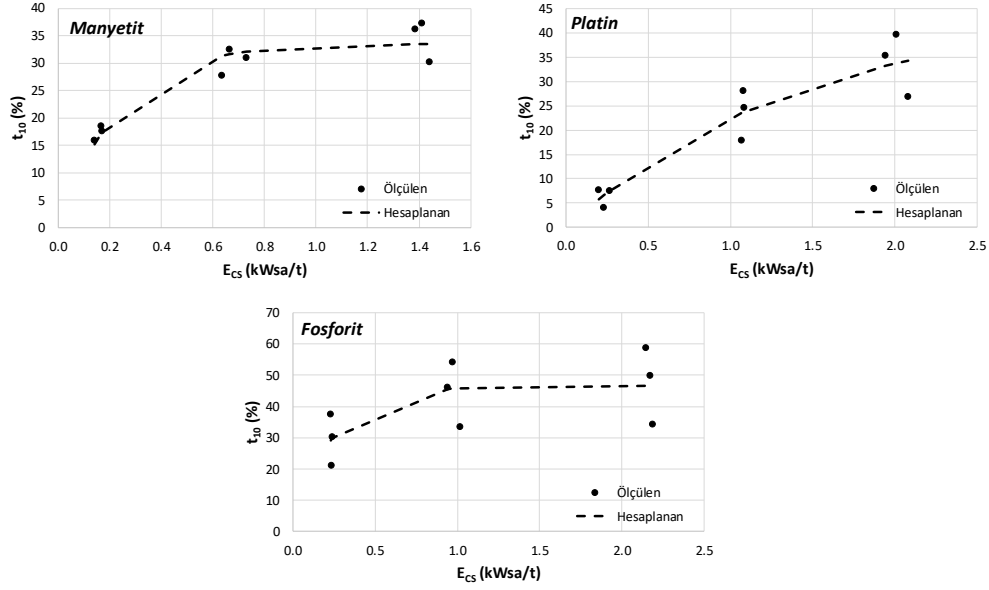
$$t_{10} = C(1 - e^{-dE_{CS}X}) \quad (3)$$

Burada,

A, b, C ve d: Kırılma model parametreleri

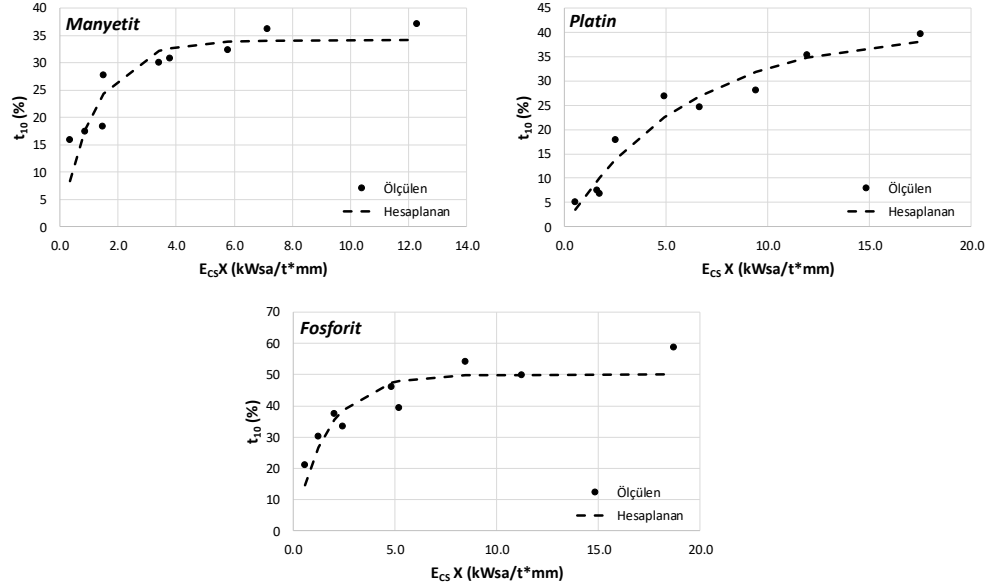
Çalışmanın amacı doğrultusunda, testlerden elde edilen ürün tane boyu dağılımlarından t_{10} incelik indisi hesaplanmış ardından bu değerler tane boyu ve E_{CS} verileri ile birlikte Eşitlik 2 ve Eşitlik 3’te verilen modelde kullanılmışlardır. Test edilen cevherler için $E_{CS} - t_{10}$ ilişkisi Şekil 7’de gösterilmektedir. Uygulanan enerji artışı ile ürün inceliği arttığı görülmektedir. Manyetit yatak kırılma test verilerinin bu modele uyumu yüksek olsa da diğer cevherler için aynı uyum söz konusu olmamaktadır. Özellikle fosforit cevherinde tane boyunun etkisi görülmekte fakat modele yansıtılmadığı için modele uyumunu düşürmektedir.

D. Altun, A.H. Benzer



Şekil 7. Ecs - t10 ilişkisi

$E_{CS} - t_{10}$ ilişkisinin incelenmesinin ardından aynı veri seti tane boyuna bağımlı kırılma modeline (Eşitlik 3) uygulanmıştır. Test edilen cevherlerin bu model ile uyumu Şekil 8'de verilmektedir. Enerji ve tane boyu arttıkça ürün inceliği (t_{10}) artış göstermektedir. Tane boyu etkisinin modele yansıtılmasının da veri-model uyumunu arttırdığı gözlemlenmektedir.



Şekil 8. Ecs X- t10 ilişkisi

Test verileri kullanılarak hesaplanmış olan kırılma model parametreleri ile ölçülen ve hesaplanan verilerin korelasyon değerleri Tablo 4'te verilmektedir. Tane boyundan bağımsız kırılma modelinin uyum aralığının fosforit cevheri dışında kullanılabilir ölçüde olduğu görülmektedir. Piston test verilerinin tane boyu etkisinin yansıtıldığı modele uyumu her cevher için yüksek değerdedir. Malzemelerin basınç altında kırılma davranımının tane boyuna bağımlı model ile güvenilir bir şekilde incelenebileceği ve basınç altında kırılma karşı dirençlerinin standart olarak kullanılan modele benzer olarak C ve d parametresinin çarpımı ile ifade edilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu sayede farklı malzemeler kırılma karakteristiklerine göre karşılaştırılabileceklerdir.

SIKIŞTIRILMIŞ YATAK TESTİNDE TANE BOYUNA BAĞIMLI KIRILMA MODELİNİN UYGULANABİLİRLİĞİ

Tablo 4. Hesaplanan model parametreleri ve korelasyon bilgileri

			Manyetit	Platin	Fosforit
Tane boyutuna bağımlı kırılma modeli	A		34,10	44,70	49,98
	b		0,84	0,70	0,62
	R2		0,87	0,93	0,66
Tane boyutundan bağımsız kırılma modeli	C		33,54	40,39	49,98
	d		4,28	0,17	0,62
	R2		0,95	0,97	0,90

4. SONUÇLAR

Manyetit, platin ve fosforit cevherlerinin basınç altında kırılma davranımları piston-pres test aleti ile başarılı bir şekilde incelenmiştir. Tane boyunun kırılma inceliği üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Manyetit ve platin cevherlerin enerji (E_c) ve incelik (t_{10}) arasındaki ilişki literatürde verilen kırılma modeline [32] uyum sağladığı saptanmıştır. Fosforit cevheri ise belirtilen modele uyumunun düşük olduğu belirlenmiştir. Tane boyutuna bağımlı kırılma modelinin [26] ise tüm cevherler ile yüksek R2 değerleriyle uyumlu olduğu anlaşılmıştır. Tane boyutuna bağımlı kırılma modelinin sıkıştırılmış yatak testlerinin sonuçlarının değerlendirilmesinde başarılı bir şekilde kullanılabilirliği saptanmıştır. Bu model ile belirlenen “malzeme kırılma indisi” ve kırılma dağılım fonksiyonlarının basınçlı ekipmanların modelleme ve simülasyon çalışmalarında malzeme etkisini daha iyi yansıtacağı, daha güvenilir ve gerçekçi sonuçlar elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Elde edilen malzeme kırılma indisinin basınçlı kırılma ve öğütme ekipmanlarının enerji tüketimlerinin tahmininde kullanılabilirliği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] B. Epstein, “Logarithmico-Normal Distribution in Breakage of Solids”, Industrial and Engineering Chemistry, vol.40, no.12, pp. 2289-2291, 1948.
- [2] S. R. Broadbent, T. G. Callcott, “A Matrix of Processes Involving Particle Assemblies”, Phil. Trans. R. Soc. Lond., Ser., A, vol. 249, no.960, pp. 99-123, 1956.
- [3] R. P. Gardner, L. G. Austin, “A Chemical Engineering Treatment of Batch Grinding”, In: H.Rumpf and D. Behrens (Editors), Proceedings, 1st European Symp. Zerkleinern. Verlag Chemie, Weinheim, 1962, pp. 217-247.
- [4] D. F. Kelsall, K. J. Reid, “The Derivation of a Mathematical Model for Breakage in a Small Continuous Wet Ball mill”, Proc. A.I. Ch. E./I.Chem.E. Joint Meeting, London, June, Section 4. pp.14-20, 1965.
- [5] L. G. Austin, R. R. Klimpel, A. N. Beattie, “Solution of Equations of Grinding”, Second European Symposium on Comminution, Amsterdam, 1966, pp. 281-312.
- [6] J. A. Herbst, D. W. Fuerstenau, “Scale-Up Procedure for Continuous Grinding Mill Design Using Population Balance Models”, International Journal of Mineral Processing, vol.7, no.1, pp. 1-31, 1980.
- [7] P. S. B. Stewart, C. J. Restarick, “A Comparison of Mechanism of Breakage in Full Scale and Laboratory Scale Grinding Mills”, Proc. Australas. Inst. Min. Metall., no.239, pp.81-92, 1971.
- [8] K. Schoenert, “Role of Fracture Physics in Understanding Comminution Phenomena”, Transactions of Society of Mining Engineers AIME, vol.252, pp.21-26, 1972.
- [9] P. Fruhwein, “Algorithm for Estimating the Process Parameters of Continuous Grinding”, Zerkleinern Dechema Monographien, vol.79, pp.505-518, 1976.
- [10] W. J. Whiten, “Ball Mill Simulation Using Small Calculators”, Proc. Australas. Inst. Min, Metall., vol.258, pp.47-53, 1976.
- [11] A. J. Lynch, “Mineral Crushing and Grinding Circuits, Their Simulation, Optimization, Design and Control”, Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Co., 1977.
- [12] S. R. Krogh, “Determination of Crushing and Grinding Characteristics Based on Testing of Single Particles”, Transactions AIME/SME, vol.266, pp.1957-1962, 1978.
- [13] A. Kavetsky W. J. Whiten, S. S. Narayanan, “Studies on the Scale-up of Ball Mills”, Mill Operations Conference, Sept. Australas. Inst.Min.Metall., pp.113-121, 1982.
- [14] K. Schoenert, “Advances in Comminution Fundamentals and Impacts on Technology”, Aufbereit.-tech., vol.32, pp.487-494, 1991.
- [15] D. Krajcinovic, Damage Mechanics, Elsevier, Oxford, UK, 1996.

D. Altun, A.H. Benzer

- [16] L. M. Tavares, R. P. King, “Single-particle Fracture Under Impact Loading”, *International Journal of Mineral Processing*, vol.54, no.1, pp.1-28, 1998.
- [17] R. G. Fandrich, J. M. F Clout, F. S. Bourgeois, “The CSIRO Hopkinson Bar Facility for Large Diameter Particle Breakage”, *Minerals Engineering*, vol.11, no.9, pp.803-890, 1998.
- [18] S. Yashima, Y. Kanda, S. Sano, “Relationships between Particle Size and Fracture Energy or Impact Velocity Required to Fracture as Estimated from Single Particle Crushing”, *Powder Technology*, vol.51, no.3, pp.277-282, 1987.
- [19] G. Unland, P. Sczelina, “Coarse Crushing of Brittle Rocks by Compression”, *International Journal of Mineral Processing*, vol.7, no.10, pp.209-217, 2004.
- [20] O. G. Pauw, M. S. Maré, “The Determination of Optimum Impact-Breakage Routes for an Ore”, *Powder Technology*, vol.54, no.1, pp.3-13, 1988.
- [21] M. E. Gao, K. S. E. Forssberg, “Simulation of Batch Grinding of Iron Ore”, *Trans. Inst. Min. Metall.*, vol.99, pp.142-146, 1990.
- [22] G. A. Banini, “An Integrated Description of Rock Breakage in Comminution Machines”, PhD Thesis, University of Queensland (JKMRC), Australia, 2000.
- [23] L. Vogel, W. Peukert, “Breakage Behaviour of Different Materials-Construction of a Mastercurve for the Breakage Probability”, *Powder Technology*, vol.129, no.1-3, pp.101-110, 2003.
- [24] L. Vogel, W. Peukert, “Determination of Material Properties Relevant to Grinding by Practicable Labscale Milling Tests”, *International Journal of Mineral Processing*, vol.74, no.10, pp.329-338, 2004.
- [25] F. Shi, T. Kojovic, “Validation of A Model for Impact Breakage Incorporating Particle Size Effect”, *International Journal of Mineral Processing*, vol.82, no.3, pp.156-163, 2007.
- [26] D. Eksi, H. Benzer, A. Sargin, O. Genc, “A new method for determination of fine particle breakage”, *Minerals Engineering*, vol.24, no:3-4, pp.216-220, 2011.
- [27] J. Liu, K. Schönert, “Modelling of interparticle breakage”. *Int. J. Miner. Process*, vol.44-45, pp.101-105, 1996.
- [28] R. Hawkins, A Piston and Die Test to Predict Laboratory-Scale HPGR Performance, Master Thesis. JKMRC, University of Queensland, 2007.
- [29] H. Dundar, H. Benzer, N. A. Aydogan, “Application of population balance model to HPGR crushing”, *Minerals Engineering*, vol.50-51, pp.114-120, 2013.
- [30] G. Asbjornsson, E. Hulthen, M. Evertsson, “Modelling and simulation of dynamic crushing plant behavior with MATLAB/Simulink”, *Minerals Engineering*, vol.43-44, pp.112-120, 2013.
- [31] D. Altun, Mathematical modelling of vertical roller mills, PhD Thesis, Hacettepe University, Turkey, 2017.
- [32] S. S. Narayanan, “Single particle breakage tests: A review of principles and applications to comminution modelling”, *Bull Proc. Australas. Inst. Min. Metal*, vol.291, pp.49-58, 1986.

