

KALEM UÇLU KESKİLERLE KAYAÇ KESMEDE AYRIK ELEMANLAR YÖNTEMİYLE SPESİFİK ENERJİNİN KESTİRİMİ

Prediction of Specific Energy of Rock Cutting with Conical Bits By Discrete Element Method

Geliş (received) 30 Mart (March) 2011; Kabul (accepted) 26 Mayıs (May) 2011

Okan SU (*)

ÖZET

Kazı makinalarının performansının ve harcadığı enerjinin önceden tahmin edilmesinin kazı çalışmalarında önemli bir yeri vardır. Bu amaçla laboratuvar kesme deneylerinden belirlenen spesifik enerji değerlerinden yararlanılır. Buna karşın sayısal analiz yöntemlerinden biri olan ayırık elemanlar yöntemi ile de bilgisayar ortamında spesifik enerji kestirim modelleri geliştirilmektedir. Bu alanda kullanılan en yaygın programlardan bir tanesi üç boyutlu modelleme yapabilen PFC^{3D} (Particle Flow Code in 3 Dimensions) dir.

Bu çalışma kapsamında; daha önce İTÜ laboratuvarında yürütülen birtakım kesme deneyleri PFC^{3D}'de modellenmiştir. Keski üzerinde etkili olan kesme kuvvetleri ve kazılan pasa hacmine bağlı olarak spesifik enerji değerleri hesaplanmış ve laboratuvar sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Modelleme sonucu özellikle yüksek kesme derinliğinde (9 mm) hesaplanan spesifik enerji değerlerinin gerçek değerlere yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Çalışma sonucunda, laboratuvar ve sayısal modelleme çalışmaları arasında yüksek korelasyon katsayısına sahip doğrusal ilişkiler belirlenmiş ve tüm sonuçlar istatistiksel olarak regresyon analizleriyle de desteklenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Spesifik Enerji, Kesme Kuvveti, Sayısal Analiz, PFC^{3D}

ABSTRACT

Prediction of performance and consumed energy of excavation machines has an important role on excavation processes. For this purpose, the specific energy values, which are determined by laboratory cutting tests, are utilized. Accordingly, specific energy prediction models have been being developed in computer environment by discrete elements method which is one of the numerical analysis methods. One of the most common programs used in this field is PFC^{3D} (Particle Flow Code in 3 Dimensions) which is able to model in three dimensions.

In the scope of this study, laboratory rock cutting tests performed in the laboratories of Istanbul Technical University was modeled in PFC^{3D}. Depending on the cutting forces acting on the pick and excavated volume of the rock, the specific energy values were calculated and compared with laboratory results. It was observed that specific energy values calculated, particularly for higher cutting depth (9mm) is close to practical values. At the end of the study, linear relationships having high correlation coefficients were determined between laboratory and modeling studies and the entire results were statistically supported with regression analysis.

Keywords: Specific Energy, Cutting Force, Numerical Analysis, PFC^{3D}

(*) Arş. Gör. Dr., Karaelmas Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Müh. Böl., ZONGULDAK, okansu@karaelmas.edu.tr

1. GİRİŞ

Mekanize olarak açılacak birtünelde veya galeride en büyük yatırımı kazı makinaları oluşturur. Bu makinaların yeraltı çalışma koşullarına uygun olarak seçilmesi performanslarının önceden belirlenmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu amaçla kayacın mekanik özelliklerinin yanı sıra kazılabilirlik ölçütlerinin bilinmesi gerekir. Günümüzde kazılabilirliğin belirlenmesi için tayin edilmiş belirli bir deney yöntemi yoktur. Ancak, kayacın dayanım, aşındırıcılık, delinebilirlik, kırılabilirlik özelliklerine göre bir ön tahmin yapılabilmektedir. Bunun yanı sıra laboratuvarında yürütülen bağımlı ve bağımsız kesme deneyleri de kazılabilirliğin belirlenmesinde oldukça verimli ve etkili deneylerdir. Bu deneylerde, keskinin hareketi sırasında ölçülen ortalama kesme kuvveti (FC) ve deney sonrası belirlenen pasa hacmine (Q) göre spesifik enerji hesaplanır (Eşitlik 1). Spesifik enerji birim hacimde makine tarafından harcanan enerji olarak tanımlanır ve bu değerlerin bilinmesi kayacın kazılabilirliğinin yanı sıra makina seçimi ve tasarımı hakkında da çok gerçekçi sonuçlar verir. Bu nedenle spesifik enerjinin önceden tahmin edilmesi mekanize kazıda oldukça önemli bir rol oynamaktadır.

$$SE = \frac{FC}{Q} \quad (1)$$

Tam boyutlu doğrusal kazı seti deneyi kullanılarak yapılan kayaç kesme deneylerinden spesifik enerji değerleri gerçeğe oldukça yakın değerlerle bulunmaktadır (Balçı ve Bilgin, 2005). Madencilikte ve yer bilimleriyle uğraşılacak tüm mühendislik dallarında sayısal yöntemlerden yararlanılarak yapılan modelleme çalışmalarıyla veya birtakım paket programlarla laboratuvarında yapılan deneysel çalışmalar desteklenmektedir. Bu tarz çalışmalar günümüzde de oldukça yaygınlaşmış ve verimli bir şekilde uygulanmaktadır. Sayısal yöntemlerle yapılan çözümlenmelerde hem zamandan hem de işçilikten tasarruf edilir. Oldukça karmaşık problemler çözümlenebilir. Ancak, kullanılacak programların ilk yatırım maliyetleri fazla olabilir.

Sayısal yöntemler sürekli, süreksiz veya her iki yöntemin karışımı olan (hibrid) yöntemler olmak üzere üç gruba ayrılır (Jing, 2003). Kayaçların anizotropik yapısı, eklem, çatlak ve faylar içermesi nedeniyle süreksiz yöntemlerden ayırık elemanlar yönteminin kullanılması çoğu zaman büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu sayede

kayaçtaki çatlaklar ve bu çatlakların ilerlemesi gözlemlenebilmektedir. Bu alanda kullanılan en iyi programlardan bir tanesi PFC^{3D} (Particle Flow Code in 3 Dimensions) dir.

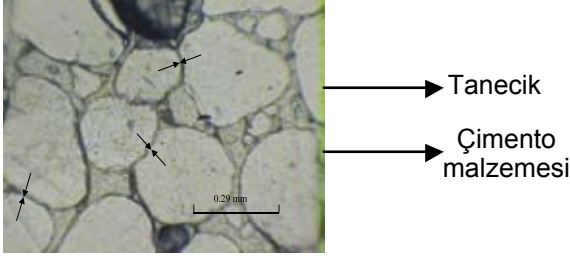
Bu çalışmada spesifik enerjiyi önceden tahmin etmek üzere PFC^{3D} programı kullanılarak kayaç kesme deneyinin ayırık elemanlar yöntemiyle sayısal modellemesi yapılmıştır. Modelleme sonucunda belirlenen kesme kuvvetleri ve açığa çıkan pasa miktarına göre keski tarafından harcanan spesifik enerji hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ile daha önce laboratuvarında yürütülen deneysel çalışmalar arasındaki ilişkiler araştırılmış ve ortaya çıkan bulgular istatistiksel analizlerle desteklenmiştir.

2. AYRIK ELEMANLAR YÖNTEMİ

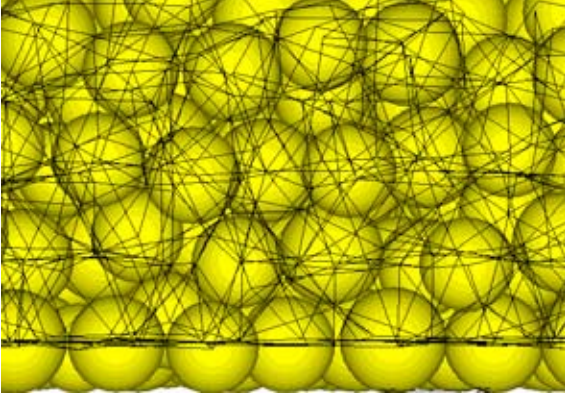
Ayrık elemanlar yöntemi farklı geometrik şekilli masif kütleler veya dairesel şekilli taneciklerden yararlanarak modelleme yapmayı sağlayan bir sayısal çözümlenme yöntemidir. Bu yöntemi ilk olarak Cundall (1971) kaya mekaniği ile ilgili problemlerin çözümlenmesi için ileri sürmüştü ve daha sonra Cundall ve Strack (1979) tarafından zemin mekaniğinde de uygulanmaya başlanmıştır.

PFC^{3D} küresel tanecikler arasındaki etkileşimden yararlanarak ayırık elemanlar yöntemiyle üç boyutlu ortamda modelleme yapmaya olanak sağlar. Tanecikler; fiziksel özellikleri ve porozite oranına göre bir araya gelerek yapay bir numune oluştururlar. Temas noktalarında birbirlerine bağlanırlar. PFC^{3D}'de temas (kontak) ve paralel bağ olmak üzere iki çeşit bağ türü vardır. Temas bağ gözle görülmeyecek kadar küçük bir noktada rol oynar. Buna karşın, paralel bağ tanecikler arasında dairesel kesitli sınırlı bir alanda rol oynamaktadır. Bu bağlar iki taneciği bir arada tutmayı sağlayan bir çeşit çimento (yapışkan) gibi düşünülebilir. Tanecikler arasındaki bağın dayanımı yenildiği zaman numunenin de yenildiği varsayılır (Itasca, 2006; Su ve Akçın 2009). Şekil 1'de bir kaya malzemesinden alınmış ince kesit üzerinde tanecik ve bu tanecikleri birbirine bağlayan çimento malzemesi gösterilmiştir. Şekil 2'de de PFC^{3D}'de hazırlanmış bir numune kesiti verilmiştir.

Ayrık elemanlar yönteminde; her bir taneciğin merkezinin koordinatına bağlı olarak Eşitlik 2 ve 3'te verilen Newton'un hareket kanunlarına ve taneciklerin Euler açılarına göre problemler çözümlenir (Pöschel ve Schwager, 2004).



Şekil 1. Kaya malzemesi ince kesiti.



Şekil 2. PFC^{3D}'de hazırlanmış bir örnek kesiti.

$$\frac{\partial^2 \vec{r}_i}{\partial t^2} = \frac{1}{m_i} \vec{F}_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \vec{\varphi}_j, \vec{\omega}_j) \quad (i=1, \dots, N) \quad (2)$$

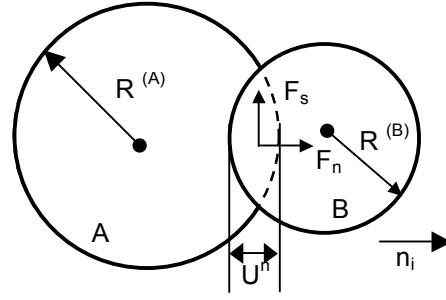
$$\frac{\partial^2 \vec{\varphi}_i}{\partial t^2} = \frac{1}{J_i} \vec{M}_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \vec{\varphi}_j, \vec{\omega}_j) \quad (j=1, \dots, N) \quad (3)$$

Burada \vec{F}_i ve \vec{M}_i kütlesi m olan i taneciği üzerinde rol oynayan kuvvet ve torku, J_i atalet momentini gösterir ve bu bileşenler taneciklerin konumu (\vec{r}_j), açılal yönelimi ($\vec{\varphi}_j$) ve hızlarının ($\vec{v}_j, \vec{\omega}_j$) fonksiyonlarıyla açıklanır.

Tanecikler Şekil 3'te gösterildiği gibi birbirleri üzerine binebilirler veya aralarındaki bağ yenilmesiyle birbirlerinden ayrılabilirler. Taneciklerin birbirleri üzerine binme mesafesi Eşitlik 4'ten bulunur.

$$U^n = R^{(A)} + R^{(B)} - d \quad (4)$$

Burada U^n ; taneciklerin üst üste binme mesafesi (m), $R^{(A)}$; A taneciğinin yarıçapı (m), $R^{(B)}$; B taneciğinin yarıçapı, d ; taneciklerin merkezleri arasındaki mesafe (m) dir.



Şekil 3. Tanecikler arasındaki kuvvet-yer değiştirme etkileşimi (Hazzard vd, 2000; Potyondy ve Cundall, 2004).

Modelleme sırasındaki dinamik harekette oluşan mekanik etkileşimden yararlanarak çözümlenebilir. Bu etkileşime bağlı olarak taneciklerin birbirleri ile temas ettiği noktada kuvvet ve momentler oluşur ve çözümlene taneciklerin yer değiştirme mesafelerine göre kuvvet-yer değiştirme kanunlarıyla açıklanır (Itasca, 2006). Buna göre doğrusal elastik bir malzemenin davranışının modellenmesinde oluşan temas kuvvetleri Eşitlik 5'ten belirlenir.

$$F = F_n + F_s \quad (5)$$

Burada F_n ; normal kuvvet (N), F_s ; kayma kuvvetini (N) gösterir. Bu kuvvetler taneciklerin katılıklarına ve yer değişimlerine bağlı olarak Eşitlik 6 ve 7'den hesaplanır.

$$F_n = K_n U^n n_i \quad (6)$$

$$F_s = -K_s \Delta U_s \quad (7)$$

Burada K_n ; normal temas katılığı (N/m), K_s ; kayma temas katılığı (N/m), U_s ; kayma yönündeki yer değiştirmedeki fark (m), n_i ; birim vektördür.

Temas kuvvetlerinin oluşmasına neden olan normal ve kayma yönündeki katılık değerleri Eşitlik 8 ve 9'da verilen her bir taneciğin katılığında belirlenir. PFC^{3D}'de; taneciğin normal katılığı kayacın makro özelliklerinden Young modülüne bağlı olup Eşitlik 10'dan hesaplanır. Bunun yanı sıra, kayma katılığı Poisson değerine bağlı olup, taneciğin normal katılığının kayma katılığına (k_n/k_s) oranı ile ilişkilidir. Buna göre taneciğin kayma katılık değeri Eşitlik 11'den hesaplanır (Itasca, 2006).

$$K_n = \frac{k_n^{(A)} k_n^{(B)}}{k_n^{(A)} + k_n^{(B)}} \quad (8)$$

$$K_s = \frac{k_s^{(A)} k_s^{(B)}}{k_s^{(A)} + k_s^{(B)}} \quad (9)$$

$$k_n = 4 E_c R \quad (10)$$

$$k_s = \frac{k_n}{\left(\frac{k_n}{k_s} \right)} \quad (11)$$

Burada k_n ; taneciğin normal katılığı (N/m), k_s ; taneciğin kayma katılığı (N/m), E_c ; taneciklerin Young modülü (N/m²), R; ortalama tanecik boyutu (m) dur.

3. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda (ZTH) kömür çevre kayaçlarının kazılabilirliği ile ilgili bugüne kadar birçok çalışma yapılmış ve geniş bir veri tabanı oluşmuştur. Bu bağlamda havzada yürütülmüş en önemli kazılabilirlik çalışmaları Kel (2003) tarafından ortaya konmuştur. Kel (2003); 57°'lik hücum (dalma) açılı keski tutucu ve Sandvik S35/80H marka kalem ucu tipi keski ile bağımsız kesme deneyleri yürütmüştür. Kullanılan keskinin uç açısı 80°, temizleme açısı 17° ve kesme açısı -7°'dir. Bu parametrelere bağlı olarak 3, 6 ve 9 mm kesme derinliklerinde yürütülen bağımsız kesme deneylerinin sonuçları Çizelge 1'de sunulmuştur.

Ayrıca, kayaçların dayanım ve deformasyon özellikleri tespit edilmiştir (Çizelge 2). Gerçek (2007) ZTH'daki kömür çevre kayaçlarının Poisson oranlarının belirlenmesine yönelik kapsamlı bir çalışma yapmış ve bu çalışmaya göre deneylerde kullanılan tüm kayaçların yaklaşık Poisson oranı değerleri bulunmuştur. Dolayısıyla kayaçların dokusal özelliklerinden yararlanarak tüm bu örneklerin tahmini Poisson oranı değerleri tespit edilmiştir. Wang ve Tonon (2009)'da belirtildiği üzere PFC^{3D}'de Poisson oranı sadece K_s/K_n oranıyla ilişkili olup yapay örneğin diğer mikro özelliklerine etkisi yoktur.

Çizelge 1. Bağımsız Kesme Deneyi Sonuçları (Kel, 2003; Akçın vd, 2005)

Kayaç	d	FN	FC	Q	SE
Kumtaşı-1	3	4,4	3,9	0,023	47,2
	6	6,7	6,7	0,091	20,0
	9	8,0	8,8	0,205	11,8
Kumtaşı-2	3	6,1	4,1	0,021	54,9
	6	10,8	8,2	0,045	50,1
	9	19,3	16,9	0,178	26,0
Kumtaşı-3	3	2,3	1,8	0,024	20,5
	6	3,8	3,8	0,088	11,8
	9	5,9	6,6	0,321	6,10
Kireçtaşı	3	7,6	4,0	0,036	31,7
	6	12,5	7,5	0,143	19,2
	9	20,4	11,6	0,197	17,4

d; kesme derinliği (mm), FN; ortalama normal kuvvet (kN), FC; ortalama kesme kuvveti (kN), Q; birim mesafedeki kazı hacmi (m³/km), SE; spesifik enerji (kWh/m³)'dir.

Çizelge 2. Kayaçların Mekanik Özellikleri (Kel, 2003, Akçın vd, 2005)

Kayaç tipi	σ_c	E	v *
Kumtaşı-1	113,6	17,0	0,20
Kumtaşı-2	173,7	28,0	0,29
Kumtaşı-3	87,4	33,3	0,25
Kireçtaşı	121	57,0	0,20

* Gerçek'ten (2007) alınmıştır.

σ_c ; Tek eksenli basınç dayanımı (MPa), E; Young modülü (GPa), v; Poisson oranı'dır.

4. KAYAÇ KESME DENEYİNİN SAYISAL MODELLEMESİ

4.1 Numune Hazırlama

Numune hazırlama sırasında göz önüne alınması gereken en önemli faktörler; tanecik yarıçapı, kesme derinliği (d) ve kesme mesafesidir. Kesme mesafesinin her deneyde sabit olacağı varsayıldığında, numunenin oluşturulacağı taneciklerin yarıçapı tamamen kesme derinliğine bağlı kalacaktır. Kesme derinliklerinin 3, 6 ve 9 mm gibi düşük değerler olması nedeniyle keski ile etkileşim halindeki taneciklerin de yarıçaplarının küçük olması gerekmektedir. PFC^{3D}'de küçük yarıçaplı taneciklerden oluşan bir kaya bloğunun hazırlanması oldukça zordur. Bunun en temel nedeni tanecik yarıçapı küçüldükçe tanecik sayısının artmasıdır. Böylece düşük yarıçaplı

taneciklerle hazırlanan numunenin bilgisayarda işgal ettiği dosya boyutu da artacaktır. İleri teknoloji ürünlerinin pahalı ve mevcut olanakların kısıtlı olması nedeniyle de optimum tanecik sayısı ile en verimli modellemeyi yapabilmek üzere “boyutlandırılmış taneciklerden oluşan” bir numune hazırlama tekniği uygulanmıştır. Buna göre taneciklerin boyutları örnek üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru kademe kademe artırılarak hazırlanmaktadır. Bu sayede daha büyük bir örnek daha az tanecikle elde edilmektedir.

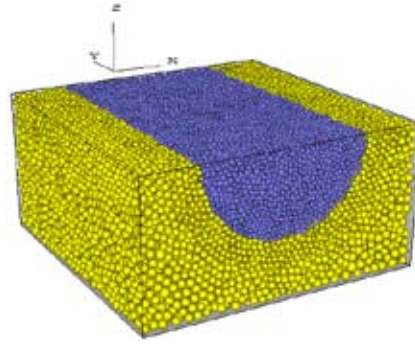
Numuneler hazırlanırken her kesme derinliği için aynı modelleme ve kesme koşullarını sağlayabilmek için üç ayrı numune kullanılmıştır. Buna göre 3 mm kesme derinliğinde 30x30x15 mm, 6 mm kesme derinliğinde 56x30x28 mm ve 9 mm kesme derinliğinde 82x30x41 mm ebatlarında blok örnekler modellenmiştir (Su, 2010). Tüm örneklerde en büyük tanecik boyutunun en küçük tanecik boyutuna oranı 1,2 seçilmiştir. Buna göre tanecikler üst yüzeyden alt yüzeye doğru dört aşamada 1,2 kat artırılarak oluşturulmuştur. Kesme derinliklerine bağlı olarak değişen tanecik yarıçapları ve tanecik sayıları Çizelge 3’te verilmiştir. Tüm kesme derinliklerinde aynı yöntemle örnekler hazırlanmış ve numunelerdeki toplam tanecik sayıları da hemen hemen eş tutulmuştur.

Çizelge 3. Numunelerde Kullanılan Taneciklerin Boyut Aralıkları (Su, 2010)

d	r	n
3 mm	0,25 – 0,30	28.480
	0,30 – 0,36	12.819
	0,36 – 0,43	9.538
	0,43 – 0,52	4.189
6 mm	0,40 – 0,48	27.813
	0,48 – 0,58	10.183
	0,58 – 0,69	7.330
9 mm	0,69 – 0,83	3.563
	0,55 – 0,66	24.072
	0,66 – 0,79	8.159
	0,79 – 0,95	5.805
	0,95 – 1,14	2.939

d; kesme derinliği (mm), r; tanecik yarıçapı (mm), n; tanecik sayısı (adet) dir.

3 mm kesme derinliği için hazırlanan bir örnek Şekil 4’te gösterilmiştir. Bu şekilde keski orta bölgedeki yarı silindirik hat boyunca aktif olarak kazı yapılmaktadır.



Şekil 4. d=3 mm için hazırlanmış yapay bir örnek.

Modellerde kullanılan yapay numuneler PFC^{3D}’de hazırlanırken hem temas hem de paralel bağlar kullanılmıştır. Ancak, kesme sırasında meydana gelen kırıntı (chip) oluşumunun açık bir şekilde gözlemlenebilmesi paralel bağ oranının yüzdesi temas bağına göre daha yüksek alınmıştır.

4.2 Örneklerin Mikro Özelliklerinin Kalibre Edilmesi

PFC^{3D}’de hazırlanmış yapay bir numune ile laboratuvaradaki deneylerde kullanılan örneklerin aynı mekanik özellikleri sergilemesi gerekir. Bu amaçla PFC^{3D}’de hazırlanan kayacın mikro özellikleri kalibre edilir. Bu özellikler temas bağı numune için tanecikler arası temas modülü (E_c), tanecik normal katılığının kayma katılığına oranı (k_n/k_s), tanecikler arası sürtünme katsayısı (μ), bağ normal dayanımı (σ_c) ve bağ kayma dayanımından (τ_c) oluşur. Bununla birlikte; paralel bağı numune için ilaveten bağ yarıçapını ayarlayan katsayı ($\bar{\lambda}$), paralel bağ modülü (\bar{E}_c), bağ normal katılığının kayma katılığına oranı (\bar{k}_n/\bar{k}_s) gibi mikro özellikler kalibre edilir.

Kayacın mikro özelliklerini kalibre etmek üzere PFC^{3D}’de tek eksenli basınç dayanımı deneyi modellenmiştir. Modellemede alt ve üst yükleme başlıklarının sabit bir hızla hareket ettirilmesi sırasında eksenel ve yatay yöndeki birim şekil değiştirme değerlerinin eksenel gerilmeyle olan değişim grafikleri çizilmiştir. Böylece fiziksel ve yapay numunelerin Young modülü (E), Poisson oranı (ν) ve en tepe yenilme nokta değerleri (σ_c) eşleştirilmiştir.

Tek eksenli basınç dayanımı deneylerinde prizmatik örnekler kullanıldı. Modellemede öncelikle keskinin aktif olarak kazı yaptığı zondaki tanecikler (d=3 mm için 0,25-0,30 mm yarıçaplı tanecikler, d=6 mm için 0,40-0,48 mm yarıçaplı tanecikler, d=9 mm için 0,55-0,66 mm yarıçaplı tanecikler) kalibre edildi. Daha sonra örnek boyutları değiştirilmeksizin diğer bölgedeki taneciklerin boyutlarına göre tek eksenli basınç dayanımı deneyi tekrar modellendi. Sonuçta

kayacın tüm bölgelerinde mekanik özelliklerin hemen hemen aynı kaldığı görüldü. Çizelge 4'te keskinin etkileşim halinde olduğu bölgedeki (orta kısımdaki yarı silindirik kısım) tanecik boyut aralıklarına göre kalibrasyon sonrası tek eksenli basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bu sonuçlardan görüleceği üzere; modelleme için hazırlanan örneklerle laboratuvarında kullanılan örnekler aynı mekanik davranışı sergilemektedir.

Çizelge 4. Kalibrasyon Sonrası Kayaçların Mekanik Özellikleri (Su, 2010; Su ve Akçın, 2011)

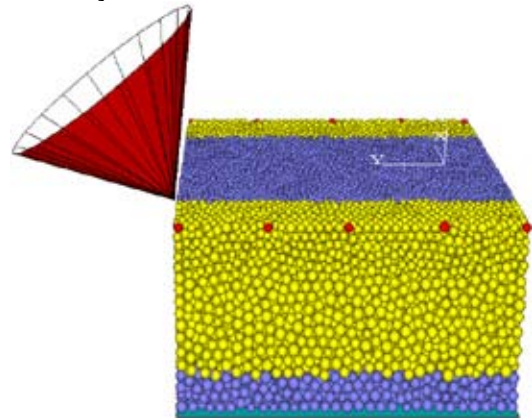
Özellik	Lab.	d = 3 mm			d = 6 mm			d = 9 mm		
		$r_{\text{tane}} = 0,25-0,30$ mm			$r_{\text{tane}} = 0,40-0,48$ mm			$r_{\text{tane}} = 0,55-0,66$ mm		
Kumtaşı-1										
σ_c (MPa)	113,6	114,7			112,5			113,6		
E (GPa)	17,0	17,04			17,08			17,11		
v	0,20	0,21			0,20			0,21		
Kumtaşı-2										
σ_c (MPa)	173,7	172,7			173,6			173,4		
E (GPa)	28,0	27,8			28,0			27,9		
v	0,29	0,29			0,29			0,29		
Kumtaşı-3										
σ_c (MPa)	87,4	89,5			87,0			87,8		
E (GPa)	33,3	33,7			33,2			33,4		
v	0,25	0,25			0,24			0,25		
Kireçtaşı										
σ_c (MPa)	121	122,2			121,2			121,3		
E (GPa)	57,0	57,5			57,2			56,7		
v	0,20	0,20			0,20			0,20		

4.3 Spesifik Enerjinin Tahmin Edilmesi

Bir kazı makinasının tarafından birim miktar kayaç kazısı için harcanan enerji olan spesifik enerjini tahmin etmek üzere PFC^{3D}'de bağımsız kesme deneyleri modellenmiştir. Bu amaçla boyutlandırılmış taneciklerden oluşan numune üzerinde kalem ucu tipi bir keski laboratuvarında uygulanan kesme parametrelerine bağlı olarak uygun şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 5). Modelleme çalışmaları 0,3 m/s kesme hızında ve 20 mm kesme mesafesinde yürütülmüştür. Örneğin kazı sırasında statik dengesinin korunması için kesme hızı olabildiğince düşük seçilmeli ve bu nedenle de modelleme çalışmalarında 0,3 m/s değeri kullanılmıştır.

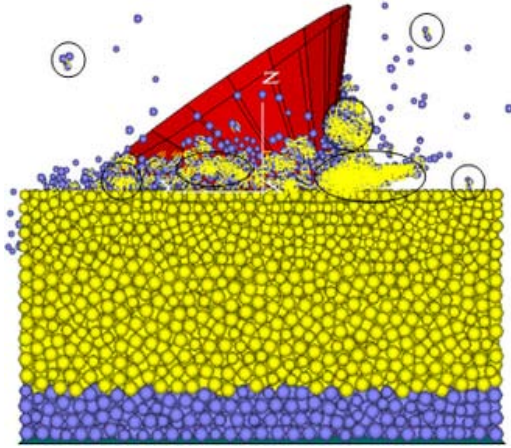
Keskinin kayaç ile aktif olarak etkileşim halinde olduğu tüm süreçte keski üzerinde etkili olan kesme kuvvetleri kayıt edilmiş ve daha sonra ortalamaları alınarak ortalama kesme kuvvetleri belirlenmiştir. Ancak keskinin kayaca

batmasıyla oluşan ilk kırıntı ve keski kesme işlemini tamamladığı anda oluşan son kırıntının oluşturduğu kuvvet değerleri kenar etkisi (side effect) altında kaldığı için hesaplama dahil edilmemiştir.



Şekil 5. d=3 mm'de kesme deneyinin modellenmesi öncesi keskinin kayaç üzerindeki genel görünümü (Su, 2010).

Spesifik enerjinin hesaplanabilmesi amacıyla modelleme çalışmaları tamamlandıktan sonra keskinin kazdığı kanaldaki ve keskinin etrafında toplanan tüm taneciklerin ve kırıntıların (chip) hacmi belirlenmiştir. Bu kırıntılar Şekil 6'da daireler içerisinde gösterilmiştir. Modelleme çalışmaları sonrasında Eşitlik 1'den yararlanılarak spesifik enerji değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 6. d=3 mm'de keski etrafında oluşan kırıntılar.

Kesme deneyinin sayısal modellenmesinden sonra belirlenen ortalama kesme kuvvetleri, açığa çıkan pasa miktarı ve hesaplanan spesifik enerji değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

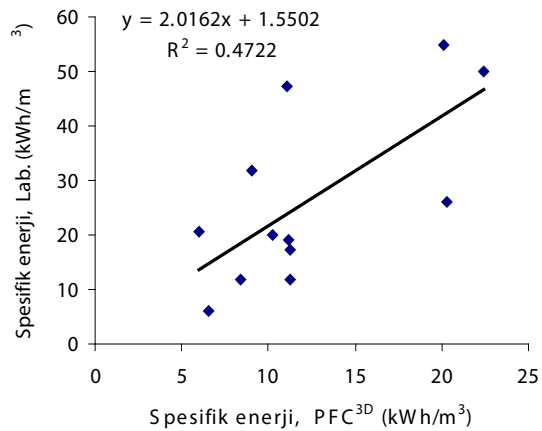
Çizelge 5. Modelleme Çalışmaları Sonucu Elde Edilen Sonuçlar (Su, 2010)

Kayaç tipi	d	FN	FC	Q	SE
Kumtaşı-1	3	0,24	0,37	0,009	11,10
	6	1,19	1,34	0,036	10,27
	9	1,84	3,18	0,079	11,22
Kumtaşı-2	3	0,48	0,58	0,008	20,13
	6	2,05	2,48	0,031	22,42
	9	3,46	5,41	0,073	20,28
Kumtaşı-3	3	0,14	0,19	0,009	6,00
	6	0,69	0,92	0,030	8,38
	9	1,10	2,17	0,091	6,58
Kireçtaşı	3	0,20	0,26	0,008	9,08
	6	0,74	1,21	0,030	11,14
	9	1,81	2,80	0,069	11,25

d; kesme derinliği (mm), FN; ortalama normal kuvvet (kN), FC; ortalama kesme kuvveti (kN), Q; birim mesafedeki kazı hacmi (m³/km), SE; spesifik enerji (kWh/m³)'dir.

5. SAYISAL MODELLEME SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE YORUMLANMASI

Sayısal modelleme çalışmaları sonrasında PFC^{3D}'de elde edilen sonuçlar incelendiğinde kesme derinliklerine bağlı olmaksızın spesifik enerji değerlerinin çok fazla değişmediği ortaya çıkmıştır. Buna göre Şekil 7'de gösterildiği üzere laboratuvar ve sayısal modelleme sonuçları arasında R=0,69 olan doğrusal bir ilişki belirlenmiştir.

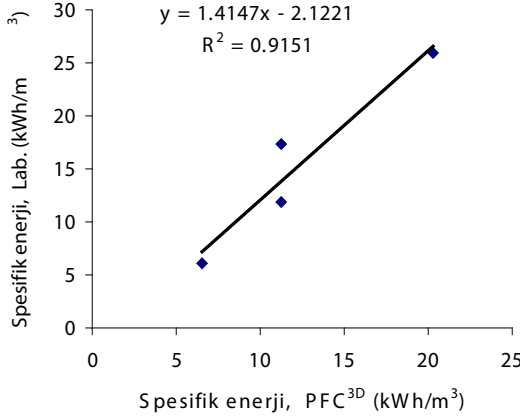


Şekil 7. Laboratuvar ve sayısal modelleme çalışmaları arasında spesifik enerji açısından elde edilen ilişki (Su, 2010).

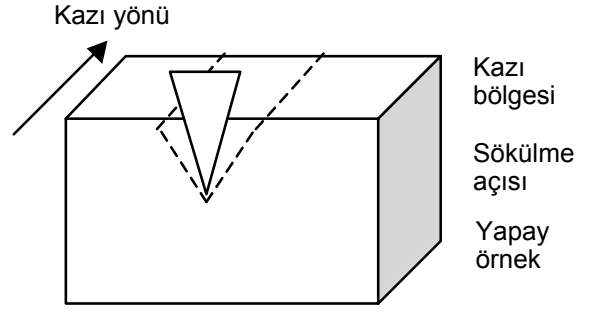
Buna karşın modelleme çalışmaları sonrasında yüksek kesme derinliğinde (9 mm) hesaplanan spesifik enerji değerlerinin gerçeğe yakın olduğu görülmüştür. Bu bağlamda Şekil 8'de verildiği üzere 9 mm kesme derinliğinde; PFC^{3D} ve laboratuvar çalışmaları arasında R=0,96 gibi oldukça yüksek korelasyon katsayısına sahip doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Bunun en temel nedeni Şekil 9'da gösterilen sökülme açısının pasa hacminin hesaplanmasında sergilediği etkiden dolayıdır.

Kazı mekaniğinde sökülme açısı, kayadaki birincil çatlakların oluşmasında ve optimum keskinler arası mesafenin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Kalem uçlu keskinin kayaca batmasıyla birlikte oluşturduğu bu açı; düşük kesme derinliklerinde az, yüksek kesme derinliklerinde ise fazladır. Açıda meydana gelen bu değişim PFC^{3D}'deki modelleme sırasında açığa çıkan pasa hacminin belirlenmesinde bir takım sapmalara neden olmuştur. Yüksek kesme

derinliğinde (9 mm) sökülme açısı da yüksek olduğu için keskinin arkasında kalan kanaldaki taneciklerin hacmi tam olarak belirlenmiş, düşük kesme derinliklerinde ise belirlenememiştir. Pasa miktarındaki bu sapmalar dolayısıyla spesifik enerji değerlerine de yansımıştır.



Şekil 8. 9 mm kesme derinliğinde spesifik enerjiye bağlı olarak laboratuvar ve sayısal modelleme çalışmaları arasındaki ilişki (Su, 2010).



Şekil 9. Sökülme açısına bağlı olarak kazı yapılan bölge.

Sayısal modelleme çalışmaları tamamlandıktan sonra belirlenen doğrusal ilişkilerin güvenilirliğini ve bağımlı-bağımsız değişkenlerinin anlamlı olup olmadıklarını ortaya koymak için istatistiksel analizler yapılmıştır. Bu bağlamda Şekil 7-8'de sunulan doğrusal ilişkilerin güvenilirlikleri F (ANOVA) testi ve bu ilişkilerdeki katsayıların anlamlılıkları da t testine göre incelenmiştir. Buna göre %5 hata payıyla (ya da %95 güvenilirlikte) elde edilen sonuçlar Çizelge 6-7'de verilmiştir.

Çizelge 6. Sayısal Modelleme ve Laboratuvar Çalışmalardan Elde Edilen Spesifik Enerji Değerlerinin F (ANOVA) Testi Sonuçları (Su, 2010)

SE (PFC ^{3D}) – SE (Lab.) (tüm kesme derinlikleri)					
	Kareler toplamı	df	F değeri	P değeri	Sonuç
Regresyon	1360,672	1	8,945	0,014	Anlamlı
Fark	1521,177	10			
Toplam	2881,849	11			

SE (PFC ^{3D}) - SE (Lab.) (d= 9 mm)					
	Kareler toplamı	df	F değeri	P değeri	Sonuç
Regresyon	197,470	1	21,561	0,043	Anlamlı
Fark	18,318	2			
Toplam	215,787	3			

Bağımlı değişkenler : SE (Lab.), Bağımsız değişkenler : SE (PFC^{3D})

Çizelge 6'da verilen F testi sonuçlarında hesaplanan P değerlerine göre laboratuvar ve PFC^{3D}'den belirlenen spesifik enerji eşitliklerinin istatistiksel açıdan anlamlı olduğu ortaya

konmuştur. Bu bağlamda elde edilen bağıntılar Eşitlik 12 ve 13'te verilmektedir.

Çizelge 7. Sayısal Modelleme ve aboratuvar Çalışmalardan Elde Edilen Spesifik Enerji Değerlerinin t Testinden Belirlenen Sonuçları (Su, 2010)

Model	Katsayılar	Standart hata	t değeri	P değeri	Katsayıların % 95 güvenilirlikteki sınırları	
					Alt sınır	Üst sınır
SE (PFC ^{3D})-SE (Lab.)	1,550	9,037	0,172	0,867	-18,585	21,686
(tüm kesme derinlikleri)	2,016	0,674	2,991	0,014	0,514	3,518
SE (PFC ^{3D})-SE (Lab.)	-2,122	4,051	-0,524	0,653	-19,551	15,307
(d= 9 mm)	1,415	0,305	4,643	0,043	0,104	2,726

$$SE_{Lab} = 1,5502 + 2,0162 * SE_{PFC^{3D}} \quad (12)$$

$$SE_{Lab} = -2,1221 + 1,4147 * SE_{PFC^{3D}} \quad (13)$$

Yukarıdaki bağıntılarda belirlenen katsayıların alt ve üst güvenilirlilik sınırları da Çizelge 7'de sunulmuştur. Buna göre P değeri % 5'ten küçük olan katsayıların güvenilirlilik sınırlarının birbirine daha yakın olduğu belirlenmiştir.

6. SONUÇLAR

Kayacın kazılabilirliği, kazı makinasının net kazı hızı, harcayacağı enerjinin önceden kestirimi amacıyla çeşitli ampirik bağıntılar ve laboratuvar deneyleri başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Bunun yanında, gelişen teknoloji ile birlikte endüstride kullanılan paket programların yanı sıra sayısal modelleme yöntemleri de kısmen kullanılmaktadır. Ayrık elemanlar yöntemi bu tekniklerden bir tanesidir. Bu yöntemle laboratuvarda yürütülen birtakım deneyler hem kısa zamanda hem de ucuz maliyetle sonuçları tahmin edilebilir.

Bu çalışmada bire-bir ölçekli kesme setlerinde yürütülen kesme deneylerinden belirlenen spesifik enerji değerleri PFC^{3D} programı kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmış, laboratuvar ve modelleme çalışmalarının sonuçları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Buna göre en yüksek spesifik enerji değerleri hem laboratuvar ve hem de PFC^{3D}'de kumtaşı-2 kayacından elde edilmiştir. PFC^{3D}'de her kayaç için spesifik enerji değerlerinin genellikle değişmediği ve laboratuvar sonuçlarından farklı çıktığı görülmüştür. Düşük kesme derinliklerinde

PFC^{3D}'de sökülme açısının etkisi tam olarak gözlenemediği için açığa çıkan pasa miktarları sağlıklı olarak tespit edilmemiştir. Bu yüzden sadece yüksek kesme derinliğinde belirlenen spesifik enerji değerleri laboratuvar sonuçlarına oldukça yakın çıkmıştır. Bu bağlamda laboratuvar ve modelleme çalışmaları arasındaki ilişki katsayısı R=0,69 olmasına karşın, 9 mm kesme derinliğinde hesaplanan spesifik enerji değerleri ile modelleme çalışmaları arasındaki ilişki katsayısının R=0,96 olduğu belirlenmiştir. Regresyon analizlerine göre bu ilişkilerden elde edilen bağıntıların güvenilir ve bu bağıntılardaki katsayıların da anlamlı olduğu ortaya konmuştur.

Ayrık elemanlar yöntemiyle spesifik enerji değerlerinin belirlenmesinde 9 mm ve üzeri kesme derinliklerinde gerçeğe çok yakın sonuçlar vermesinden dolayı sayısal modelleme çalışmalarının yüksek kesme derinliklerinde uygulanmasının daha anlamlı ve faydalı olacağı sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Yazar, deneysel çalışma verilerinin kullanılmasına olanak sağlayan Dr.Kebire Kel'e (MTA) ve sayısal modelleme çalışmalarında fikir alışverişleriyle verdiği destekten dolayı Dr. Lothar te Kamp (Itasca Consultants GmbH) ve Dr. Marco Camusso'ya (Itasca Consultants GmbH) teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Akçın, N.A., Bilgin, N. ve Kel, K., 2005; "Zonguldak

Havzası'nda Galeri Açma Makinası Kullanımının Araştırılması", Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı Bildiriler Kitabı, 177-183.

Balcı, C. ve Bilgin, N., 2005; "Mekanize Kazı Makinalarının Seçiminde Küçük ve Tam Boyutlu Kazı Deneylelerinin Karşılaştırılması", ITÜ dergisi, **4(3)**, 76-86.

Cundall, P.A., 1971; "A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock System", Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics, **1**, 2-8.

Cundall, P.A. ve Strack, O.D.L., 1979; "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies", Geotechnique, **29(1)**, 47-65.

Gerçek, H., 2007; "Poisson's Ratio Values for Rocks", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, **44(1)**, 1-13.

Hazzard, J.F., Young, R.P. ve Maxwell, S.C., 2000; "Micromechanical Modeling of Cracking and Failure in Brittle Rocks", Journal of Geophysical Research, **105(B7)**, 16683-16697.

Itasca, 2006; "PFC3D Particle Flow Code in 3 Dimension Users Guide", Minneapolis, Minnesota.

Jing, L., 2003; "A Review of Techniques, Advances and Outstanding Issues in Numerical Modelling for Rock Mechanics and Rock Engineering", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, **40(3)**, 283-353.

Kel, K., 2003; "Zonguldak Havzası Kömür Çevre Kayaçlarının Kazılabilirliğinin İncelenmesi", Doktora Tezi, ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 181, Yayınlanmamış.

Köseoğlu, M. ve Yamak, R., 2004; "Uygulamalı İstatistik" 2. basım, Celepler Matbaacılık, Trabzon, 341.

Potyondy, D.O. ve Cundall, P.A., 2004; "A Bonded Particle Model for Rock", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, **41(8)**, 1329-1364.

Pöschel, T. ve Schwager, T., 2004; "Computational Granular Dynamics Models and Algorithms",

Springer, 322.

Su, O. ve Akçın, N.A., 2009; "Kumtaşı Örneğinin Sayısal Modelleme Çalışmaları Öncesi Mikro Özelliklerinin PFC3D'de Kalibre Edilmesi", Türkiye 21. Uluslararası Madencilik Kongresi Bildiriler Kitabı, 243-251.

Su, O., 2010; "Kalem Uçlu Keskilerle Kayaç Kesme Mekanizmasının Üç Boyutlu Sayısal Modellenmesi", Doktora Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, 207, Yayınlanmamış.

Su, O. ve Akcin N.A., 2011; "Numerical Simulation of Rock Cutting Using the Discrete Element Method", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, **48(3)**, 434-442.

Wang, Y., ve Tonon, F., 2009; "Modeling Lac Du Bonnet Granite Using a Discrete Element Model", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, **46(7)**, 1124-1135.