

SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE ÇEKME KEPÇELİ YERKAZARIN KEPÇESİ ÜZERİNDEKİ GERİLMELERİN İNCELENMESİ

Stress Distribution Investigation on a Dragline Bucket Using Finite Element Analysis

Geliş (received) 25 Mayıs (May) 2011; Kabul (accepted) 24 Haziran (June) 2011

Nuray DEMİREL(*)
Onur GÖLBAŞI(**)

ÖZET

Çekme kepçeli yerkazaların üretkenlikleri kepçenin kaya birimiyle etkileşimi ile doğrudan ilintilidir. Bu etkileşim sırasında kaya biriminin gösterdiği dirence bağlı olarak kepçede yüksek gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmelerin kayaç özelliklerine göre değişimini gözlemlemek ve gerilmelerin yoğun olduğu kepçe bileşenlerini tespit etmek, kepçenin daha etkin bir şekilde yer ile etkileşiminin sağlanması ve bakım-onarım maliyetlerinin azaltılması için oldukça önemlidir. Bu çalışmanın amacı çekme kepçeli yerkazanın kepçesinde oluşan gerilme dağılımının incelenmesi, bu gerilmelerin farklı kaya birimi özellikleri için gösterdiği değişimin gözlenmesi ve kepçe üzerinde gerilmelerin en yoğun olduğu noktaların tespit edilmesidir. Bu çalışmada hedeflere ulaşmak için izlenen yol sırasıyla: (i) çekme kepçeli yerkazar kepçesinin üç boyutlu katı modelinin oluşturulması, (ii) kepçe-kaya birimi etkileşim ve kuvvet modelinin geliştirilmesi, (iii) sonlu elemanlar analizi kullanarak kepçe üzerinde oluşan gerilmelerin ve şekil değişikliklerinin incelenmesi, (iv) gerilme ve kaya birimi özellikleri arasında hassasiyet analizi ve (v) sonuçların değerlendirilmesidir. Çalışma sonuçları en yoğun gerilmelerin çekme halatının kepçe ile birleştiği bağlantı noktaları ve kepçenin dişlerinde oluştuğunu ve zeminin sıklığı arttıkça şekil değişikliklerinin arttığını göstermiştir. Ayrıca hassasiyet analizi, kepçe üzerindeki gerilmelerin en fazla hassasiyet gösterdiği kaya birimi özelliğinin içsel sürtünme açısı olduğunu ve en az hassasiyet gösterdiği kaya birimi özelliğinin de yoğunluk olduğunu göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: Çekme Kepçeli Yerkazar Kepçesi, Halat-Zincir Mekanizması, Gerilme Benzetimi, Bilgisayar Destekli Çizim, Sonlu Elemanlar Analizi

ABSTRACT

Dragline productivity is closely related to effective bucket-formation interaction. During this interaction substantial stresses and deformations may occur on the bucket and its components due to the external forces and heavy loads. Monitoring the distribution of these stresses and deformations and determining critical components of bucket are important for achieving optimized bucket-formation interaction and for minimizing maintenance costs and maximizing dragline productivity. Main objectives of the study presented in this paper are to investigate the stress distribution on the dragline bucket, to monitor the changes in the stress distribution for different formation characteristics, and to determine the critical points where the highest stresses occur. The research methodology followed entails: (i) developing 3D solid model of the dragline bucket, (ii) developing bucket-formation interaction model, (iii) investigating stress and deformations distributions on the dragline bucket, (iv) performing sensitivity analysis to determine the most influencing formation property on the stress distribution, and (v) assessing the results. The results showed that the dragline overloading conditions occurred on bottom edge of the bucket teeth and drag hitch parts. Moreover, sensitivity analysis showed that stress values on the bucket elements were the most sensitive to the changes in internal friction angle and the least sensitive to the changes in density.

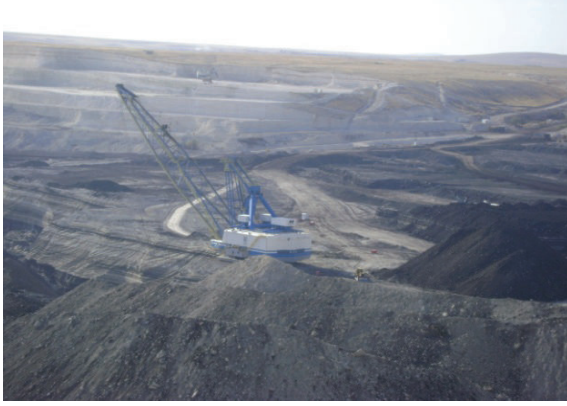
Keywords: Dragline Bucket, Rigging Mechanism, Stress Simulation, Computer Aided Design (CAD), Finite Element Analysis (FEA)

(*) Yrd. Doç. Dr., Orta Doğu Teknik Üniv., Müh. Fak. Maden Müh. Böl., ANKARA ndemirel@metu.edu.tr

(**) Araş. Gör., Orta Doğu Teknik Üniv., Müh. Fak. Maden Müh. Böl., ANKARA

1. GİRİŞ

Çekme-kepçeli yerkazalar açık ocak kömür madenlerinde örtükazı işleminde sıklıkla kullanılan, yüksek yatırım maliyeti gerektiren büyük kapasiteli makinalardır (Şekil 1). Yatırım maliyeti 100 milyon ABD doları bulan çekme-kepçeli yerkazaların performansının yani üretkenliğinin ve verimliliğinin azami düzeyde olması maden işletmeciliğinin başarısı ve karlılığı açısından çok büyük önem taşımaktadır.



Şekil 1. Marion 8050 model çekme kepçeli yerkazar.

Günümüzde kepçe kapasitesi yaklaşık 31 ila 110 m³ arasında, yaşları bir ila 31 arasında değişen Avustralya'da 68 adet, Güney Afrika'da 25 adet, Kanada'da 22 adet, Hindistan'da 17 adet, ve Brezilya, Colombia, Meksika, İngiltere, Zambia, Zimbabve'de toplam sekiz adet çekme-kepçeli yerkazar faaliyet göstermektedir (Sharrock vd, 1995; Gilewicz, 2000). Ülkemizde ise Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) bünyesindeki müesseselerde sekiz adet, özel sektörde bir adet olmak üzere çekme kepçeli yerkazar sayısı dokuzdur (Parlak, 1985).

Çekme kepçeli yerkazalar doğru kullanıldıklarında ve en uygun operasyon şartları sağlandığında üretkenlik açısından diğer yer kazalarla kıyaslandığında oldukça avantajlıdır. Kepçe kapasitesi 110 m³'ü geçen, dökme yarıçapı 100 m'yi bulan bu yerkazalar ortalama 60 saniyede yaklaşık 100 tonluk malzemeyi 100 m uzağa başka bir nakliye birimi kullanmadan dökülebilmektedirler (Demirel, 2006). Bu döngü sırasında kazı performansını ve makinanın uzun dönemde etkili kullanım oranını etkileyen en önemli faktörler kepçenin kaya birimi ile etkileşimi ve bu etkileşim sırasında kepçe üzerinde meydana gelen gerilmelerdir. Kepçe

üzerinde oluşan yüksek gerilmeler ve buna bağlı olarak oluşan şekil değişikliklerinin izlenmediği ya da gerekli önlemlerin alınmadığı durumlarda kepçenin dolayısıyla da çekme kepçeli yerkazarın uzun süre çalışmamasına, bu da üretkenliğin azalmasına ve bakım-onarım maliyetlerinin artmasına kısaca madenin ekonomik karlılığının düşmesine neden olmaktadır. Bu bağlamda kepçe üzerinde oluşan gerilmelerin incelenmesi ve kepçe üzerinde en yüksek gerilmeye maruz kalan kritik noktaların tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Çekme kepçeli yerkazar üretkenliği ve kepçe verimi konusunda pekçok araştırma yapılmıştır. O'Brien ve Lumley (1997) kepçe üretkenliğini araştırmış ve kepçeyi hareket ettiren zincir halat mekanizmasının değişmesinin kepçe verimliliğine etkisini incelemiştir. Cleary (1998) iki farklı çekme kepçeli yerkazar kepçesinin dolma verimliliklerini ayırık elemanlar yöntemi ile incelemiş ve kepçe içerisindeki malzeme parçalarının kinetik enerjilerinin yıpranmaya etkilerini analiz etmiştir. Çekme kepçeli yerkazarın kepçesinin dolum süreci ve bu süreçte ortaya çıkan kullanılmayan zaman Townson vd (2001) tarafından sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiş ve çalışma sonunda kepçe için en uygun yük miktarını belirleyecek bir model geliştirilmiştir. Ancak bu çalışmada kepçe üzerindeki gerilme dağılımı ve en kritik noktalar tespit edilmemiştir. Çekme kepçeli yerkazarın ön elemanlarından büm üzerinde oluşan gerilme ve şekil değişikliği dağılımları Demirel (2006) tarafından sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Bu çalışmada kepçedeki ağırlıktan dolayı buma etki eden kuvvetler analize dahil edilmiş ancak kepçe üzerinde oluşan gerilmeler incelenmemiştir. Coetsee vd. (2007) ayırık elemanlar yöntemi kullanarak bir ekskavatörün kepçesindeki yükün dağılımını ve kepçenin dişlerinin yer ile etkileşimini analiz etmişlerdir. Bu çalışmada en yüksek gerilmelerin kepçenin dişlerinde oluştuğu gözlemlenmiştir.

Bu makalenin konusu olan çalışmada çekme kepçeli yerkazar kepçesi üzerinde oluşan gerilme ve şekil değişikliği dağılımı farklı kaya birimi özellikleri için sonlu elemanlar analizi ile incelenmiş ve kepçenin en yoğun gerilme altında kalan kritik noktaları tespit edilmiştir. Ayrıca kepçe üzerindeki gerilme ve şekil değişikliklerinin en fazla hangi kaya birimi özelliğine hassasiyet gösterdiğini belirlemek için de duyarlılık analizi yapılmıştır.

Çözüm algoritması olarak doğrusal statik yaklaşım seçilmiştir. Bu algoritmada, kepçe elemanlarında oluşan şekil değişikliklerinin uygulanan kuvvetlerle doğrusal ilişkili olduğu ve yapının elastik mükemmel plastik (EPP) olduğu varsayılmıştır.”

Sonlu elemanlar yöntemi başlıca üç aşamadan oluşmaktadır (Becker, 2004): (i) ön işlem ya da analiz edilecek cismin üç boyutlu (3B) katı modelinin oluşturulması, (ii) analiz edilecek yapının küçük bileşenlere ayrılması ve şekil fonksiyonunun tanımlanması, (iii) sınır değerlerinin tanımlanması. Çözüm algoritması, oluşturulan modelin uygun bir numerik çözüm tekniği kullanılarak çözülmesi ile tamamlanır

2. ÇEKME-KEPÇELİ YERKAZARLARDA KEPÇE-KAYA BİRİMİ ETKİLEŞİMİNİN ÜRETKENLİĞE ETKİSİ

Çekme kepçeli yerkazarlarda kepçenin (Şekil 2) kaya birimi ile etkileşimi, kepçenin doluluk oranı, dolma süresi, üretkenliği etkileyen başlıca faktörlerdendir. Bu etkileşim sırasında kepçenin dişlerinde oluşan kuvvet ve buna bağlı olarak oluşan gerilmeler kepçede ciddi hasarlara ve yerkazarın servis dışı kalmasına dolayısıyla da yüksek mali kayıplara neden olmaktadır.



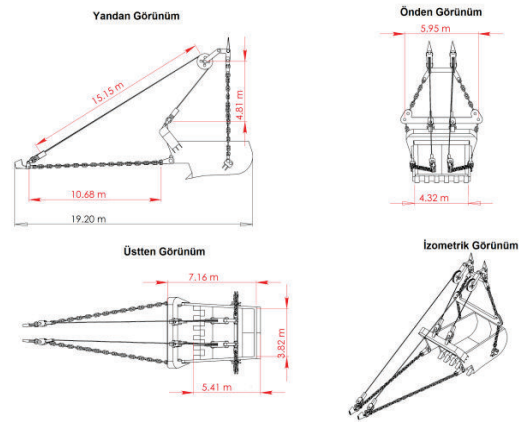
Şekil 2. Çekme kepçeli yerkazar kepçesi.

Kepçe ucundaki dişlerin yere saplanması ve kepçenin ortalama kazı koşullarında 1,5-2,0 kepçe boyu mesafede sürüklenmesi yoluyla dolar. Bu süreçte yerin kopmaya karşı dişlere uyguladığı kuvvet, kepçenin dolma süresi, dişlerdeki aşınma-yıpranma ve üretkenlik açısından büyük rol oynar. Özdoğan (2003)

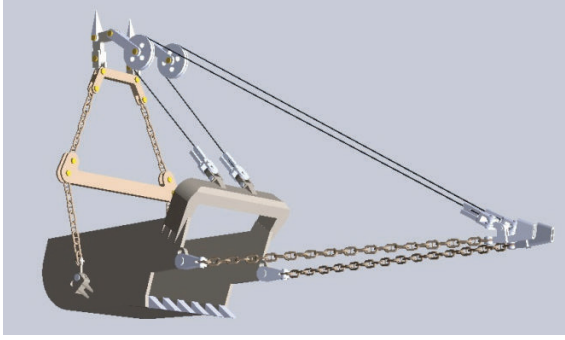
çekme-kepçe yerkazarlarda kepçe saplanması kuvveti ile kepçe saplanması açısı, kepçe ağırlığı, kazı basamağı eğim açısı gibi etkenler arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Yazar kepçe saplanması kuvvetinin kepçenin saplanma açısı yani kepçe tabanın yatay düzlemle yaptığı açı ile arttığı bu açı 90° iken azami düzeye çıktığını ispatlamıştır (Özdoğan, 2003). Kepçenin dişlerine yansıyan kuvvet ise kepçenin pozisyonu ve çekme halatının yatayla yaptığı açı ile yakından ilişkilidir.

3. KEPÇENİN ÜÇ BOYUTLU KATI MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Kepçenin üç boyutlu (3B) katı modeli bilgisayar destekli çizim programı Solidworks (Solidworks Co., 2009) kullanılarak oluşturulmuştur. Kepçeyi oluşturan parçalar arka duvar, taban, yan duvar, kemer, çekme halatı bağlantı noktası ve kaldırma halatı bağlantı noktası olmak üzere başlıca altı gruba ayrılmıştır. Kepçeyi oluşturan her bir parçanın boyutu, boyut bilgileri üretici firmalar tarafından gizli tutulan bilgiler arasında olduğundan, arazi ölçümleri ve fotogrametrik yöntemlerle hesaplanmıştır. Duvarlar boyut, eğim ve ana gövde içindeki oryantasyonu bakımından birbirinden farklılık göstermektedir. Yan duvarlar dışa doğru eğimli iken eğimli arka duvar içbükey şekilde kepçeye bağlanmıştır. Kepçeyi çekmeye ve kaldırmaya yarayan halat ve zincir mekanizması yan duvarlara ve kazı işlemini gerçekleştiren dişler de bağlantı noktaları vasıtasıyla taban kısma bağlanmıştır. Şekil 3 ve 4 kepçe ve halat-zincir mekanizmasının sırasıyla farklı açılardan ve 3B görüntüsünü sunmaktadırlar.



Şekil 3. Kepçe ve zincir halat mekanizmasının model görüntüleri.



Şekil 4. Kepçe ve zincir halat mekanizmasının 3B katı modeli.

3B katı modeli oluşturulan kepçenin kaya birimi ile etkileşimi dişler aracılığı ile sağlanmaktadır. Bu nedenle dişlerin modellenmesi ve zemin tarafından etki eden kuvvetlerin tahmini kepçe üzerindeki gerilme dağılımının tahmini için oldukça önemlidir. Bu çalışmada dişlerin modellenmesi sırasında kullanılan boyut özellikleri ve ilgili değerler Çizelge 1’de verilmiştir. Çizelge 1’den de anlaşılacağı gibi modellenen kepçede her bir diş arasındaki mesafe 44,5 cm olup toplam 6 adet diş bulunmaktadır.

Kepçenin 3B katı modelinin oluşturulmasından sonraki aşama, sonlu elemanlar analizinde bir girdi değeri olan sınır koşullarının belirlenmesi ve kepçeye etki eden kuvvetlerin hesaplanmasıdır.

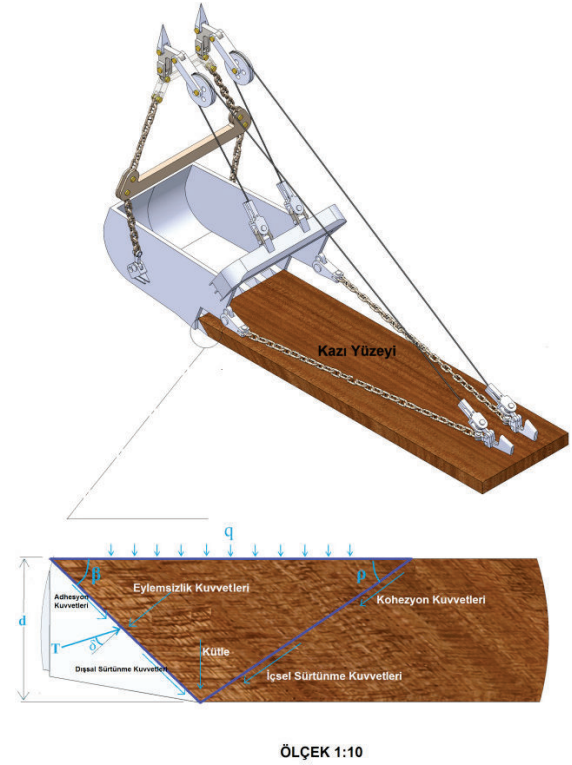
Çizelge 1. Kepçe Dişlerinin Boyutları

Dişler ile ilgili özellikler	Değer
Diş sayısı	6 adet
Dişler arası mesafe	445 mm
Genişlik	349 mm
Uzunluk	744 mm
Yatay uzunluk	545 mm
Düşey uzunluk	421 mm

Sonlu elemanlar analizinin yapılması için katı modelin oluşturulmasından sonra üç boyutlu ağ modelinin oluşturulması için katı eleman biçiminin tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, kepçenin eğimli yüzeylerinde 3B elemanlar yaratma konusundaki esnekliğinden dolayı C3D4 diye adlandırılan, dört düğümlü tetrahedral elemanlar kullanılmıştır.

4. KEPÇEYE ETKİ EDEN KUVVETLER VE SINIR KOŞULLARININ BELİRLENMESİ

Sonlu elemanlar analizinde çözüm algoritması çalışmadan önceki son aşama olan sınır değerlerinin atanması, elde edilecek sonuçların hassasiyeti ve doğruluğu açısından son derece önemlidir. Sınır değerleri analiz edilecek cismin sınır noktaları ve bu noktalarda uygulanan kuvvetlerin değer ve yön olarak belirlenmesi ile bulunur. Çekme kepçeli yer kazarın kepçesine etki eden kuvvetlerin ve sınır değerlerinin atanması için kaya birimi özelliklerinin ve kaya birimi tarafından kepçenin dişlerine uygulanacak kuvvetlerin tahmin edilmesi gerekir. Dişlere etki eden kuvvetlerin hesaplanmasında kullanılan kazı geometrisi ve kepçe-kaya birimi etkileşimi Şekil 5 ve 6’da görülmektedir.



Şekil 5. Kepçenin dişlerine etki eden kuvvetler ve dişlerin yer ile etkileşimi.

Bu çalışmada çekme kepçeli yer kazarların genellikle çalıştırıldığı zemin özellikleri dikkate alınarak çok sıkı, sıkı ve gevşek olmak üzere üç ana farklı kaya birimi için bilgisayar benzetimleri yapılmıştır. Dişlere uygulanan yüklerin hesaplanmasında kullanılan bu üç kaya birimine ait malzeme özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Kazı makinası ile yer arasındaki bağıntı birçok araştırmacı tarafından farklı yaklaşımlar kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışmada kesme kuvveti McKyes (1985) tarafından geliştirilen iki boyutlu modelin modifiye edilmiş hali kullanılarak hesaplanmıştır.

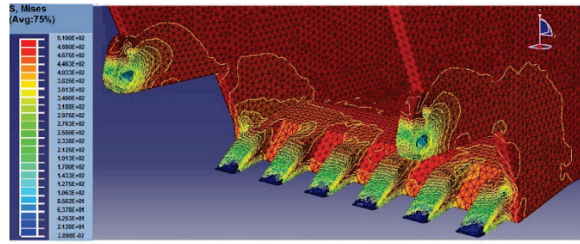
$$T = w(\gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c) \quad (1)$$

Bağıntı 1'de T kesme kuvveti, w kesme genişliği (m), γ kaya biriminin yoğunluğu (t/m^3), g yerçekimi ivmesi (m/sn^2), d kazının derinliği (m), c zeminin kohezyon mukavemeti, N_γ ağırlık faktörü ve N_c kohezyon faktörüdür.

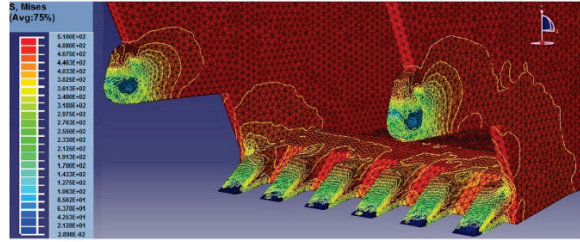
Hesaplamlarda dişlere etki eden kesme kuvveti Bağıntı 1 kullanılarak, kesilen malzemenin ağırlığına ve kaya biriminin kohezyonuna bağlı olarak tahmin edilmiştir. Kaya birimi ve dişler arasındaki etkileşimden doğan sürtünme kuvveti, yapışma ve kaya birimi içerisindeki eylemsizlikten kaynaklı kuvvetler hesaba katılmamıştır.

5. KEPÇE ÜZERİNDE OLUŞAN GERİLME DAĞILIMININ SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE İNCELENMESİ

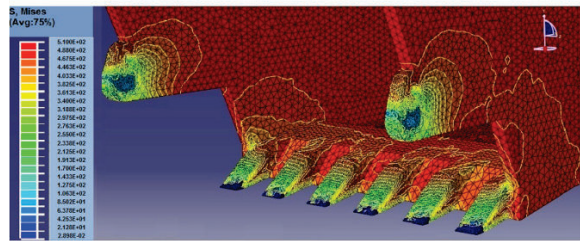
Kepçenin dişlerine etki eden direnç kuvvetinin ve kepçe üzerindeki kuvvetlerin hesaplanmasından sonra sınır koşulları belirlenmiş ve kepçenin 3B katı modeli için sonlu elemanlar analizi Abaqus 6.9-2 programı (Simulia, 2010) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kepçe üzerindeki gerilme ve şekil değişikliği dağılımı analiz edilmiş ve kepçenin en fazla gerilmeye maruz kalan kritik noktaları tespit edilmiştir (Şekil 6).



(a) Çok Sıkıştırılmış Zemin için Gerilim Dağılımları



(b) Sıkıştırılmış Zemin için Gerilim Dağılımları



(c) Gevşek Zemin için Gerilim Dağılımları

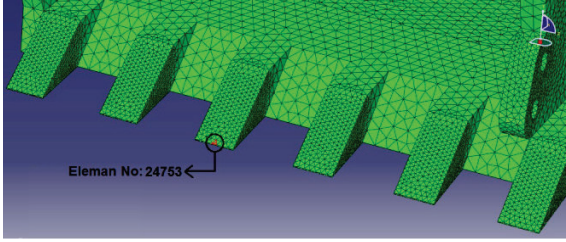
Şekil 6. Kepçe ve dişleri üzerindeki Von Mises gerilme dağılımı: (a) çok sıkı zemin, (b) sıkı zemin, (c) gevşek zemin.

Şekil 6'da görülen gerilme dağılımı çok sıkı, sıkı ve gevşek malzeme için ayrı ayrı yapılmıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi gerilmelerin en yoğun olduğu yerler kepçenin dişlerinin uç kısımları ile çekme halatının kepçeye bağlandığı bağlantı noktaları olmuştur.

Çizelge 2. Kaya Birimi Özellikleri (Mouazen ve Nemenyi, 1999)

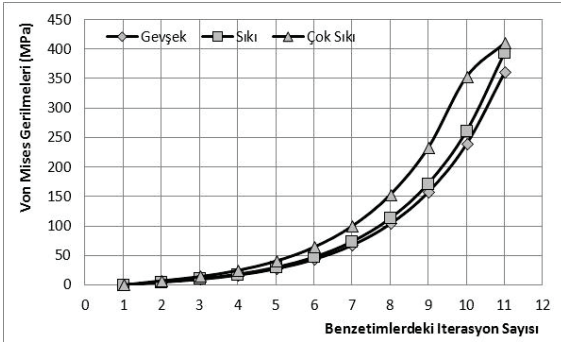
Zemin Malzeme Özellikleri	Birim	Çok Sıkı	Sıkı	Gevşek
Yığın Yoğunluğu	kg/m ³	1840	1731	1610
Kohezyon	kPa	20.4	15.5	15.3
İçsel Sürtünme Açısı	Derece	34.0	31.8	30.3
Poisson Oranı		0.385	0.359	0.339
Elastiklik Katsayısı	kPa	11356	8067	4939
<i>Zemin-Diş Özellikleri</i>				
Zemin-Metal Sürtünme Açısı	Derece	25.0	23.0	22.0
Zemin-Diş Yapışım	kPa	0.0	0.0	0.0

Benzetim sonuçlarına göre kepçe üzerindeki gerilme dağılımları kazı yapılan zemin özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Kepçe dişlerine ait bir eleman üzerindeki gerilme dağılımlarına bakılarak çok sıkı, sıkı ve gevşek zeminde kepçenin karşılaştığı direnç kıyaslanmıştır. Kepçe dişlerine ait seçilen bileşen Şekil 7'de gösterilmiştir.



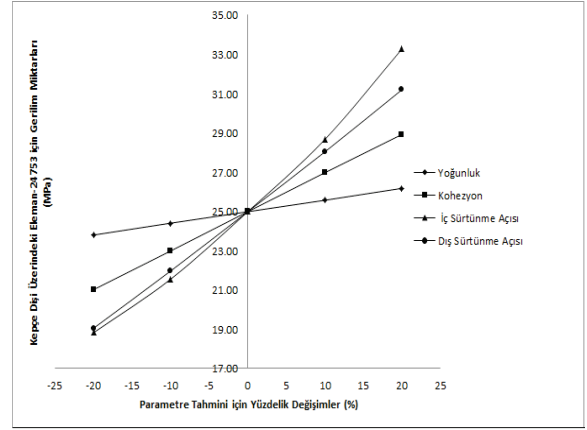
Şekil 7. 24753 no'lu kepçe bileşeni.

Şekil 8, aynı nokta üzerindeki farklı zemin özelliklerinde gerçekleşen gerilme dağılımını göstermektedir. Şekil 8'de görüldüğü gibi kepçe çok sıkı zeminde daha fazla gerilmeye ve şekil değişikliğine maruz kalmakta buna karşılık gevşek zeminde en az gerilme ve şekil değişikliğine maruz kalmaktadır. Örneğin, aynı elemanda 11. iterasyonda çok sıkı zeminde 410,00 MPa sıkı zeminde 393,25 MPa'ı, gevşek zeminde 359,69 MPa değerinde gerilme tespit edilmiştir.



Şekil 8. Kepçe dişi üzerindeki bir eleman üzerinde çok sıkı, sıkı ve gevşek zeminlerde Von Mises gerilme dağılımlarının kıyaslaması.

Ayrıca zemin özelliklerinden kepçe üzerindeki gerilim dağılımını en fazla etkileyen ya da bir diğer deyişle gerilim değerinin en duyarlı olduğu zemin özelliği duyarlılık analizi yoluyla belirlenmiştir. Şekil 9 duyarlılık analizi sonucu elde edilen grafiği göstermektedir.



Şekil 9. Duyarlılık analizi grafiği.

Bu analiz sonucunda kepçe üzerindeki gerilmelerin en fazla duyarlılık gösterdiği zemin özelliğinin içsel sürtünme açısı olduğu belirlenmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çekme kepçeli bir yer kazarın kepçesi üzerindeki gerilme dağılımlarını tahmin etmek için sonlu elemanlar yöntemi başarıyla uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar kepçenin farklı kaya birimi koşullarında nasıl bir şekil değişikliğine uğradığını, bu yüklemelere dayanıp dayanamayacağını tespit etmemizde ve en kritik gerilme bölgelerini belirlememizde önemli bulgular sağlamaktadır. Bu çalışmanın sonuçları en kritik gerilme bölgesinin kepçeye çekme halatlarının bağlandığı kepçenin yan duvarlarındaki bağlantı noktaları ve kepçenin dişleri olduğunu göstermiştir. Gerilme dağılımı analizi sonuçlarına göre kepçenin dişleri için kullanılacak malzemenin akma dayanımının 510 MPa, çekme halatının kepçeye bağlandığı noktalarda kullanılacak malzemenin akma dayanımının ise 410 MPa'dan büyük olması gerekmektedir. Çok sıkı kaya biriminde bu değerlerden sonra kırılma meydana gelmiştir. Çalışma sonuçları kepçenin servis ömrünün daha uzun olması için malzeme seçimi konusunda önemli bulgular ortaya çıkarmıştır.

Yapılan duyarlılık analizi sonuçları kepçe üzerindeki gerilmeleri en fazla etkileyen malzeme özelliğinin içsel sürtünme açısı olduğunu göstermiştir. Malzemenin yoğunluğu ise gerilme ve şekil değişikliklerini en az etkileyen

malzeme özelliği olarak belirlenmiştir. Kohezyon ise gerilme değerlerini içsel sürtünme açısı ve sürtünme açısından daha az yoğunluktan daha fazla etkileyen bir malzeme özelliği olarak belirlenmiştir. Bu sonuca göre çekme kepçeli yerkazanın örtükazı işlemi yapacağı kaya birimi için optimum bir içsel sürtünme açısına sahip olması, kepçe üzerinde kepçenin üretildiği malzemenin akma dayanımından daha fazla gerilmelere neden olacak kadar yüksek içsel sürtünme açısına sahip olan kaya birimlerinde de gevşetme işleminin etkin bir biçimde yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde yapılacak çalışmalar örtükazı işlemi yapılacak kaya biriminin özelliklerine bağlı olarak kepçe üzerindeki gerilmeleri en aza indirecek özgün kepçe dışı tasarımlarını kapsamalıdır.

Bu çalışmada ele alınan yükler çekme-kepçenin operasyonu sırasında meydana gelen kepçedeki yüke ve kepçenin ivmesine bağlı olan dinamik kuvvetlerdir. Ayrıca, kepçenin kendi ağırlığı da hesaplamalara dahil edilmiştir. Bu sonuçlar operatör etkisi dahil edilmeksizin ideal operasyonlar için kullanılabilir. Ancak, kepçe üzerindeki gerilme dağılımlarını etkileyen en önemli faktörlerden birinin operatörün yetkinliği ve tecrübesi olduğu unutulmamalıdır. Bu bağlamda, çekme kepçeli yerkazar operatörünün kabinlerinin kontrol sistemleri ile donatılması ve gerektiğinde operatöre uyarı gönderecek bir izlemenin gerekliliği kaçınılmazdır.

KAYNAKLAR

Becker, A. A., 2004; An Introductory Guide to Finite Element Analysis, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 167 sayfa.

Cleary, P. W. (1998); The Filling of Dragline Buckets. *Mathematical Engineering in Industry*, **7(1)**, 1-24.

Coetzee, C. J., Basson, A. H. ve Vermeer, P. A. (2007). Discrete and Continuum Modelling of Excavator Bucket Filling. *Journal of Terramechanics*, **44**, 177–186.

Demirel, N., 2006;. "Dynamic Dragline Modeling and Boom Stress Analysis for Efficient Excavation," (Doktora Tezi, Missouri University

of Science and Technology, 2007), 148 sayfa. Gilewicz, P., 2000; *International Dragline Population Matures, Coal Age*, **105(6)**, 30-32.

McKyes, E., 1985; *Soil Cutting and Tillage*. Retrieved from McGill Bioresource Engineering, http://www.mcgill.ca/files/bioeng/BREE512_part1.pdf

Mouazen, A. M. ve Nemenyi., M, 1999; *Finite Element Analysis of Subsoiler Cutting in Non-Homogeneous. Soil and Tillage Research*, **51**, 1-15.

O'Beirne, T. ve Lumley, G., 1997; *Improved Dragline Productivity Through Rigging Design*. Retrieved June 2010, from Australian Coal Association Research Program (ACARP), <http://www.acarp.com.au/abstracts.aspx?repld=C4003>

Özdoğan, M., 2003; *Dragline Yerkazarlarda Kepçe Saplanış Mekanizması ve Kuvveti*, *Madencilik Dergisi*, **42(1)**, 17-26.

Parlak, T., 1985; *Açık Kömür İşletmeciliğinde Yerinde İncelenen Dragline Uygulamaları*, *Madencilik Dergisi*, **24(2)**, 5-24.

Sharrock, G.B., Aspinall, T. O. ve Scott A., 1995; "Measurement and Analysis of Dragline Operating Parameters for Block Excavation," *Proc. Int. Symp. On Mine Planning and Equipment Selection*, Raj Singhal vd. (eds) A. A Balkema, Balkema, Rotterdam, 517-522.

Simulia, 2010; Dassault Systèmes, Rising Sun Mills, 166 Valley Street Providence, RI, http://www.simulia.com/locations/simulia_hq.html.

Solidworks Corp., 2009;. Dassault Systemes SolidWorks Corp. 300 Baker Avenue Concord, MA01742, <http://www.solidworks.com/sw/contact-b.htm>.

Townson, P., Murthy, P., Guan, Z. ve Gurgenci, H., 2001; *Optimisation of Design Load Levels for Dragline Buckets*. Retrieved June 2010, from Australian Coal Association Research Program (ACARP), <http://www.acarp.com.au/abstracts.aspx?repld=C7003>.