

Arazi Kontrolunda Sayısal Modeleme

Numerical Modelling for Ground Control

Sinan YAZICI (*)
Erkin NASUF (**)

ÖZET

Son yıllarda geliştirilen sayısal modelleme yöntemleri arazi kontrolunda geniş uygulama alanı bulmuştur. Bu yazıda yapıların jeoteknik modellemesinde, gerilme ve stabilite analizlerinde en çok kullanılmış olan sonlu elemanlar yönteminin yanında sonlu farklar, sınır elemanlar, ayn elemanlar ve melez yöntemler de kısaca tanıtılmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca arazi kontrolunda kullanılan sayısal modelleme metodolojisi irdelenmiş ve madencilik ile ilgili iki sayısal model uygulaması tanıtılmıştır. Sonuç olarak arazi kontrolunda kullanılan sayısal modelleme yöntemleri ve kullanımları hakkında pratik bazı öneriler sunulmuştur.

ABSTRACT

The numerical methods developed in recent years have been extensively applied in ground control. In this paper, besides the finite element method which was employed widely in modelling structures geotechnically for stress and stability analysis, finite difference, boundary element, distinct element and hybrid methods are described and compared. In addition, the numerical modelling methodology prevailing in ground control is discussed and two numerical models related to mining are reported. Finally, some practical implications during the application of the numerical methods are presented.

(*) Y. Doç. Dr., İTÜ Maden Fakültesi Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Ana Bilim Dalı, Ayazağa - İSTANBUL
(**) Prof. Dr., İTÜ Maden Fakültesi Maden İşletme Ana Bilim Dalı, Ayazağa - İSTANBUL

1.GİRİŞ

Son yirmi yılda arazi kontrolünde, matematik modelleme, laboratuvar ve yerinde ölçme tekniklerine kıyasla daha önem kazanmıştır. Matematik yöntemlerin diğer yöntemlere göre daha çok yaygınlaşmasının nedeni, bu yöntemlerin diğerlerine göre daha kolay olması değil; daha az yatırıma ihtiyaç göstermeleridir. Matematik yöntemlerde, arazi ölçmeleri ve laboratuvar fiziksel modellemesine kıyasla güvenilirliğin daha az olması da bu yöntemlerin kullanılmalna bir engel olmamıştır. Fotoplastisite (Nasuf, 1977), santrifüj ve laboratuvar blok modellemesinde olduğu gibi matematik yöntemlerle de kazı sırasında ve sonrasında arazi davranışlarının ve gerilme durumunun pratik olarak kestirimi yapılabilir. Bu nedenle günümüzde çok yüksek yatırımlarla açılan yeraltı boşluktan ve yeryüzü yapılan genellikle modelleme yapıldıktan sonra tasarlanırlar. Gerçekten de doğru kullanıldığında modelleme arazi kontrolünde emniyetin ve üretimin artırılması için vazgeçilmez bir ön araştırma aracıdır. Matematik modelleme ile bir problemin çözümünde genellikle, diferansiyel ya da integral denklem takımının çözümü gibi karmaşık matematiksel işlemler kullanılır. Bu denklemler dairesel ya da eliptik boşluklar gibi basit yapılar üzerinde yapılan analizlerde analitik olarak çözülebilirler. Ancak kaya içindeki yapılar genellikle düzensiz olduğundan denklemler ancak sayısal yaklaşımlar ile çözümlenebilir. Bu yüzden matematik modelleme yerine sayısal modelleme adı daha yaygın kullanılmaktadır. Sayısal yöntemler yardımıyla en basit problemlerin çözülmesi, aritmetiksel işlem sayısı fazla olması nedeniyle ancak bilgisayar yardımı ile gerçekleştirilebilir.

Arazi kontrolünde 1960'lı yıllarda kullanılan ilk sayısal yöntemlerde kaya kütleleri homojen, izotrop ve elastik olarak kabul edilerek iki boyutta modellenmiş ancak bu basit algoritmalar bile araştırma merkezlerinin bilgisayarlarında uzun zaman alarak çalışmıştır. Günümüzde kişisel bilgisayar ve prog-

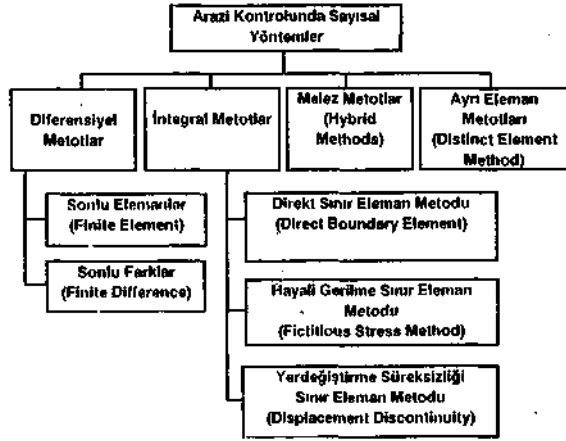
ramlama tekniklerinin gelişmesi ile mühendis seviyesindeki araştırmacılar bile sayısal modellemeyi basan ile kullanabilmekte, hatta üç boyutlu analiz yapabilmektedirler. Günümüzdeki modelleme teknikleri ile statik gerilme analizinin yanında termik, dinamik nedenli ya da akışkan basıncından doğan gerilme ve stabilite analizleri de yapılabilmektedir. Ayrıca, homojen, izotrop ve elastik kaya kütlelerinin dışında süreksizlikler içeren, plastik ya da anisotropik ortamlar da modellenmektedir. Hatta tahkimatı yapılmış kaya kütleleri, aşamalı kazı (incremental excavation), yerçekimi etkisi, kayanın yenilmeden sonraki davranışı, çatlak mekaniği (fracture mechanics) analizlerini yapmak da olanaklıdır.

Arazi kontrolü, modelleme açısından hem problemin az bilindiği hem de verilerin az ve değişken olduğu bir bilim dalıdır. Bu yüzden makina ve inşaat mühendisliğinde olduğu gibi sayısal modelleme tasarım için direkt olarak kullanılmaz. Genellikle jeolojik detayın bilinmemesi modelin kabul edilmemesine yol açabilir. Modelcinin istenilen verileri toplaması ise pahalı laboratuvar deneyleri ve arazi ölçümleri gerektirir. Modellemeye veri toplamak için bu işlemlere fazla yatırım yapmak sayısal modellemenin ucuzluk avantajını ortadan kaldırabilir. Bu durumda ne az, ne de çok ayrıntıya giren modeller başarılı olmuşlardır (Starfield ve Cundall, 1988). Bu yazının amacı arazi kontrolünde modellemenin günümüzdeki durumunu, geçerli modelleme tekniklerini, kullanılan sayısal gereçleri yeniden ele almak ve arazi kontrolü gibi çok bilinmezliği içeren bir konuda sayısal modelleme metodolojisini irdelemektir.

2. ARAZİ KONTROLUNDA KULLANILAN SAYISAL MODELLEME YÖNTEMLERİ

Sayısal yöntemler diferansiyel ve integral yöntemler olarak ikiye ayrılır. Melez yöntemde (Hybrid method) ise diferansiyel ve integral yöntem birleştirilmiş ve her ikisinin avantajlarından yararlanılmıştır. Ayn elemanlar yöntemi (dis-

tinct element) gerilme hesaplanmasını diferansiyel yöntemle dayanarak yaptığı halde içinde bir çok yeni kavram bulunduğu için aynı bir sınıf olarak kabul edilebilir. Sayısal yöntemlerin sınıflandırılması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Arazi kontrolunda kullanılan sayısal yöntemlerin sınıflandırılması

2.1. Diferansiyel Yöntemler

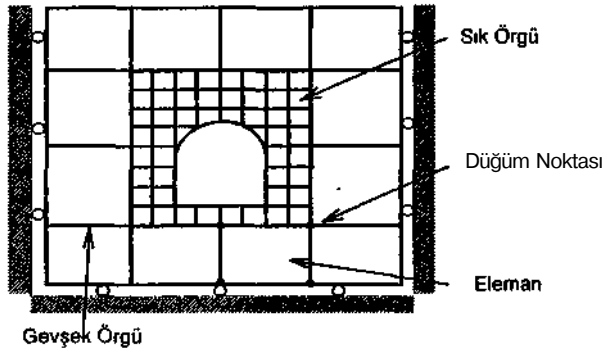
Diferansiyel yöntemde kaya kütesinin tümü elemanlara ya da bölgelere ayrılır. Sonlu eleman (Finite element) ve sonlu farklar (Finite difference) en çok kullanılan diferansiyel yöntemlerdir.

2.1.1. Sonlu Elemanlar

Sonlu elemanlar yönteminde pratik boyutlarda seçilen alanı bir örgü (mesh) oluşturacak şekilde, iki boyutlu problemlerde genellikle üçgen ya da dörtgen elemanlara bölünür (Köse, 1980). Şekil 2'de iki boyutta bir yeraltı boşluğunun etrafındaki kaya kütesinin sonlu elemanlar ile örgüye ayrılmış temsili şekli görülmektedir.

Örgüde bitişik elemanların köşeleri aynı düğüm noktasını (node) paylaşır. Yöntemin esasına göre, bir elemanın içinde herhangi bir noktada yer değiştirme (displacement) elemanın şekline göre düğümlerdeki yer değiştirme

cinsinden yazılır. Aynı elemanı paylaşan düğüm noktalarında yer değiştirmenin sonuçta eşit olması amacı ile lineer bir denklem sistemi kurulur. Modele etki eden ve bilinen kuvvet ve yer değiştirmeler denklem sisteminde bilinenler olarak yer alırlar. Denklem çözümü ile bulunan düğümlerdeki yer değiştirmenin türevi ile birim deformasyon (strain) ve her düğüm noktası için Hooke kanunu ile gerilmeler bulunabilir. İki boyutlu problemlerde düğüm sayısının iki katı kadar denklem ortaya çıkar. Örneğin, orta boyutta bir arazi kontrolü modelinde 1000 kadar düğüm kullanıldığında 2000x2000'lik bir denklem sisteminin çözümü gerekir. Reel sayılardan oluşan bu matris 16 Mb hafıza (genellikle sabit disk RAM olarak kullanılır) kaplayabilir ve çözümü 486 işlemcisi olan bir bilgisayarda dahi saatler sürebilir.



Şekil 2. Sonlu elemanlara ayrılmış kaya kütesi

Avantajları;

a- En çok kullanılan yöntemdir, arazi kontrolunda bir çok başarılı uygulama vardır,

b- Paket programlarda bulunan örgü optimizasyonu yöntemleri (mesh optimization technique) ile başlangıçta gereken büyük hafıza gereksinimi azaltılabilir,

c- Farklı özellikli tabakalar ve kayacın ilerleyen yenilmesi (progressive failure) modellenebilir,

d- Zamana bağlı deformasyon, visko-

elastisite, elastoplastik malzeme, aşamalı kazı (incremental excavation), doğrusal olmayan elastisite (Bilgin, 1977), süreksizlikler (Doktan, 1991), modele katılabilir,

e- Tahkimat yapılmış kaya kütleleri elastik olarak modellenenir.

Dezavantajlan;

a- Tüm kayaç kütlelerinin, hatta kazıdan bir kaç cm uzağının bile elemanlara ayrılması gerekebilir. Bu durum kapasitesi yüksek bilgisayar hafızası gerektiren bir işlemdir (Hoek, ve ark, 1989),

b- Sonsuzdaki sınır şartları yaklaşık olarak hesaplanır,

c- Kayanın yenildikten sonra da yük almasıyla oluşan yüksek yerdeğiştirme değerlerine erişmek problemi sayısal duraysızlığa sokabilir.

2.1.2. Sonlu Farklar

Klasik sonlu farklar yöntemi sınır değer (boundary value) problemlerindeki diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözümü için kullanılmıştır (Sokolnikoff, 1956). Elastisite dahil bir çok sınır değer probleminde sonlu elemanlar sonlu farkların yerini almıştır. Arazi kontrolunda günümüzde kullanımın yöntemi olan Entegre sonlu farklar da (Integrated finite difference) bilinmeyen yerdeğiştirmelerin bulunması klasik sonlu farklardan değişiktir. Ancak bu yöntemde de sonlu elemanlarda olduğu gibi tüm kaya kütleleri elemanlara ayrılır ve elemana farklı özellikler atanabilir; kayacın ilerleyen yenilmesi (post or progressive failure) gibi büyük yerdeğiştirmelere neden olan olaylar çok kolay ele alınabilir.

Entegre sonlu farklar yönteminde çözüm küçük bir zaman parçasında yapılır. Her düğümün yerdeğiştirmesi sadece o zaman parçasında komşu düğümleri etkiler. Örneğin modelin bir köşesinden etkileyen kuvvetin tüm ortama yayılması için her biri küçük bir zaman parçasında modeldeki yerdeğiştirmeleri yeniden hesaplayan bir çok iterasyon gerekir.

Avantajları;

a- Sonlu elemanların avantajlarının c,d ve e maddeleri sonlu farklarda da geçerlidir,

b- Sonlu farklar ile kayacın ilerleyen yenilmesinde ortaya çıkan yüksek yerdeğiştirmeler (cm mertebesinde) modeli sayısal duraysızlığa götürmez,

c- Büyük matrisler ortaya çıkmadığından gereken bilgisayar hafızası ve çözüm zamanı sonlu elemanlardan azdır.

Dezavantajlan;

a- Sonlu elemanların dezavantajlarının a ve b maddeleri sonlu farklarda da geçerlidir,

b- İterasyon zaman aralığını belirleme deneyim ister,

c- Basit elastik problemler sonlu elemanlardan daha uzun zamanda çözülür,

d- Bilgisayar programı henüz iki boyutla yazılmış olup üç boyutlusu geliştirilme aşamasındadır.

2.2. Sınır Elemanları Yöntemi (Boundary Element Method)

Diğer yöntemlerde olduğu gibi önce makine ve inşaat bilim dallarında geliştirilmiş fakat jeoteknik ile ilgili araştırmacılar tarafından daha fazla rağbet görmüştür. Buna neden olarak, bu yöntemde sadece kazının sınırlarını örgüye ayırmanın yeterli olması, bütün kaya kütlelerini örgülemek gerekmediği gösterilebilir. Şekil 3'deki sınır elemanları ile örgüye ayrılmış yeraltı boşluğu görülmektedir.

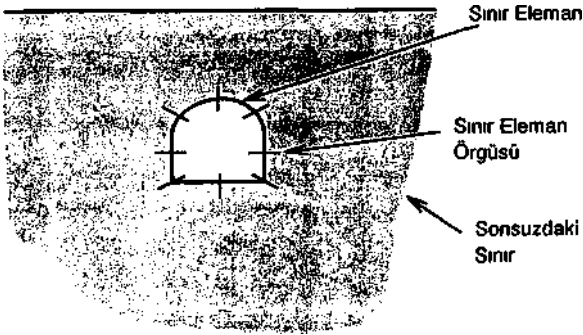
İki boyutta örgü sadece tünel kesitini doğru parçalarına bölmek yoluyla elde edilmiştir. Üç türlü sınır eleman yöntemi mevcut olup (Şekil 1) matematik olarak birbirlerinden çok az farklıdır. Hayali gerilme yöntemi (fictitious stress), iki boyutlu elastik problemlerin çözümüne, yerdeğiştirme süreksizliği (displacement discontinuity) yöntemi süreksizlik içeren kütlelerin elastik analizine uygundur.

Sınır elemanları yönteminde sınır değer problemi sadece sınır üzerindeki komşu

elemanların düğümlerindeki yerdeğiştirmelerin eşit olması varsayımına dayanır. Sonuca ulaşmak için sonlu elemanlarda olduğu gibi büyük bilgisayar hafızası gerektiren lineer denklem sisteminin çözümü gerekir. Ancak aynı problem için sonlu elemanlara kıyasla daha küçük matrisler ortaya çıkar.

Avantajları;

- a- Sonsuzdaki sınır şartları yöntemin yapısı gereği otomatik olarak bulunur,
- b- Süreksizlikler (kaya eklemleri ve faylar), yerdeğiştirme süreksizliği (displacement discontinuity) yöntemi ile ele alınabilir,



Şekil 3. Sınır elemanlara ayrılmış yeraltı boşluğu

c- Sınır elemanları, üçboyutlu problemleri iki ve iki boyutlulara indirgeyen bir yöntem olduğundan örgüye ayırma basitleşmiştir.

Dezavantajları;

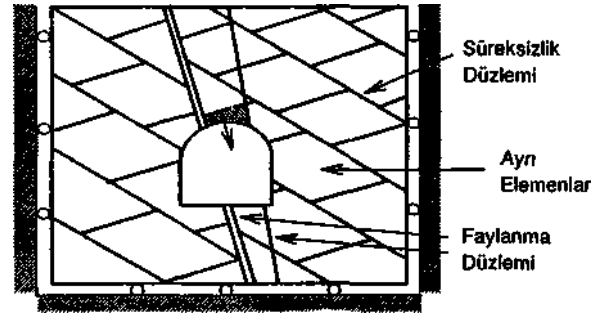
- a- Sınır elemanlarda kuramsal kavramların anlaşılması problemin çözümünde integral denklemler ortaya çıktığından, diferansiyel yöntemden daha zordur. Sınır elemanlar konusunda kuramsal ilerleme yapılması için tensör analizinin bilinmesi de gerekir,
- b- Farklı elastik özellikli tabakalar farklı kuramsal çözümler gerektirirler. Böylece problem çeşitlerine göre paket program geliştirmek gerekir. (Crouch ve Starfield, 1983),

c- Lineer olmayan gerilme, zamana bağlı deformasyon, visko-elastisite, elastoplastik malzeme, aşamalı kazı (incremental excavation), doğrusal olmayan elastisite, tahkimat elemanlarının modellemeye katılması çok zordur (Hoek, ve ark, 1989),

d- Üç boyutlu problemlerin çözümünde yeterli deneyim yoktur.

2.3. Ayrı Elemanlar Yöntemi (Distinct Element Method)

Ayrı elemanlar yöntemi kaya kütesinin süreksizlikler içerdii ortamların modellenmesi için geliştirilmiştir (Cundall, 1987). Bu yöntemde süreksizliklerle komşu bloklardan ayrılmış kaya parçası tek bir eleman olarak kabul edilir.



Şekil 4. Ayrı eleman yöntemi ile elemanlara ayrılmış kaya kütleleri

Şekil 4'deki kaya kütesi iki kaya eklem takımıyla iki faylanma düzlemi içermektedir. Bu ortamda açılacak bir yeraltı boşluğunun stabilitesi oluşan kamaların yerçekimi etkisi ile yerdeğiştirme ve dönmelerine bağlıdır. Şekil 4'deki tünelin tavanındaki taralı blok belli sürtünme şartları gerçekleştiğinde boşluk içine kayabilir. Ayrı elemanlarla bu tür ortamlar modellenbildiği gibi, eğer deformasyon ve gerilme analizi de gerekiyorsa süreksizliklerle sınırlan belirlenmiş her kaya parçası sadece kerdi içinde sonlu farklar ile alt elemanlara ayrılır. Böylece gerilme ve yerçekimi etkisinin bir arada stabilizeye etkisi incelenebilir.

Ayn elemanlar yönteminin esası entegre sonlu farklara benzer. Çözüm küçük bir zaman parçası için yapılır. Her parçanın yerdeğiştirmesinden sadece komşu parçalar etkilenir. Problem ardışık iterasyonlar ile çözülür. Modelci problemin çözüm zamanını deneyimleri ile saptar. Örneğin Şekil 4'deki taralı tavan bloğunun çökmeye başlaması modellemeyi durdurmak için yeter koşul olabilir.

Avantajları;

a- Süreksizlikler (eklemler ve faylar), aşamalı kazı, dolgu, kayacın ilerleyen yenilmesi, visko-elastik, tahkimat elemanları, termal gerilme ve yerçekimi etkisi kolayca ele alınabilir (UDEÇ Manual, 1989),

b- Sınır elemanları ile bu yöntem kaynaştırılabilir.

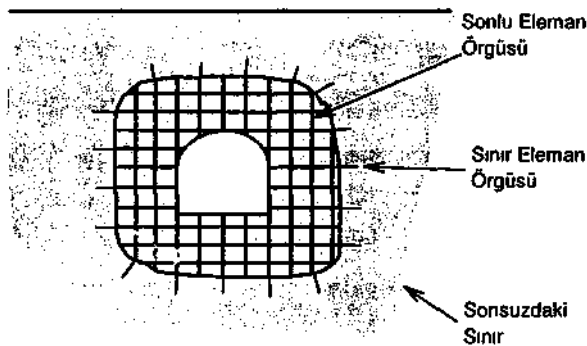
Dezavantajları;

a- Büyük modeller (iki boyutta 1000 eleman), yüksek bilgisayar hafızası ve çözüm zamanı gerekir,

b- Kaya eklemlerinin özelliklerinde örneğin dalım yönü gibi; küçük bir artış sonuçları değiştirebilir, örneğin durayü olan kama kayabilir.

2.4. Melez Yöntemler (Hybrid Methods)

Melez yöntem, genellikle sınır elemanlar yönteminin sonlu elemanlar ya da ayn elemanlar yöntemleriyle matematiksel olarak birleştirilmesinden oluşur.



Şekil 5. Melez yöntemi ile elemanlara ayrılmış kaya kütleleri

Şekil 5'de sonlu ve sınır elemanlarından oluşan bir melez yöntem ile modellenen yeraltı boşluğu görülmektedir. Boşluğun etrafı, örneğin tünel kesiti gibi; çapın 2-3 katına kadar sonlu eleman örgüsüne ayrılmış, sonlu eleman örgünün sınırına ise sınır elemanları yerleştirilmiştir. Böylece hem sonsuzdaki sınır şartları otomatik olarak sağlanmış, hem de bütün kaya kütesinin sonlu elemanlara ayrılması önlenerek bilgisayar hafızası ve zamanından tasarruf edilmiştir. Kazının etrafında sonlu elemanın tüm avantajlarından faydalanılabilirken sonsuzda sınır şartları otomatik olarak hesaplanmıştır. Melez yöntemlerin arazi kontrolünde kullanımı üzerine henüz fazla deneyim olmadığından dikkatle uygulanmaları gerekmektedir.

3. ARAZİ KONTROLÜNDE EN ÇOK KULLANILAN PAKET PROGRAMLAR

Son yirmi yılda arazi kontrolü için bir çok paket program geliştirilmiştir. Ancak bunlardan bir çoğu araştırma merkezlerinin ana bilgisayarlarında atıl olarak kalmış, çok azı arazi kontrolü için piyasaya sürülmüştür. Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM), kaya mekaniğinde kullanılacak paket programları sınıflayarak ayrıntılı olarak yayınlamıştır (Int. J. of Rock Mechanics and Geo. Abstr, 1988). Genelde arazi kontrolünde fakat daha çok yeraltı madenciliğine yönelik olarak yazılmış paket programlar ise Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Paket programlar fiyat ve yaptıkları işler bakımından çok farklılıklar gösterirler. EXAMINE²⁰ yi lisans üstü seviyesinde bir araştırmacı bir, iki günde anlayabilir. Problemin çözümü 486 işlemcisi olan bir bilgisayarda 3-5 dakikada gerçekleşir. Aynı şartları olan bir araştırmacı FLAC, UDEC ve 3DECİ 2-4 ayda etkin olarak kullanabilir. Orta boyutlu problemler (500 eleman) FLAC'da ortalama 2-3 saat, UDEC'de 6-12 saat, 3DEC'de 1-2 gün alabilir. Bir yeraltı madenin 3DBEM ile ayrıntılı modellenmesi gibi büyük bir 3 boyutlu sınır eleman probleminde 10000 düğüm noktası ile 386 işlemcisi olan bir bilgisayar 20 güne kadar çalışabilir (Wiles, 1990, 1991).

Çizelge 1. Arazi Kontrolunda Kullanılabilecek Paket Programlar

İsim	Yöntem	Boyut	Yazan Grup veya Firma
VISAGE	Sonlu Eleman	2,3	Bharü Engineering Kanada
Super SapC Genel	Sonlu Eleman	2,3	
Sonlu Eleman PP)	Eleman		
FLAC(Fast Lagregiarı)	Entegre	2	Itasca.Mineapolis, ABD.
Analysis of Continua)	Sonlu Fark		
EXAMNE2D	Sınır	2	Toronto Üniversitesi Kanada
EXAMNE3D	Eleman Sınır	3	Toronto Üniversitesi Kanada
EXAMINETAB	Eleman Sınır	Pseudo3	Toronto Üniversitesi Kanada
3DBEMC3 Dimensional Boundary Element)	Eleman Sınır	3	Mine Modelling Ltd. Sudbury, Ontario Kanad
UDECOJniversal	Ayn	2	Itasca. Mineapolis, ABD.
Distinct Element Code)	Eleman		
3DECC3 Dimensional	Ayn	3	Itasca, Mineapolis, ABD.
Distinct Element Code)	Eleman		
BEFECBoundary Element	Melez		University of Queensland, Avustralya
Finite Element)			
PHASESCGelistirilmekte)	Melez	2	Toronto Üniversitesi Kanada

4. ARAZI KONTROLUNDA SAYISAL MODELLEME METODOLOJİSİ

Arazi kontrolü modelleme açısından hem problemin az bilindiği hem de verilerin şüpheli olduğu bir bilim dalıdır. Bu yüzden modelleme yöntemi arazi kontrolü probleminin safhasına göre seçilmeli ve model ayrıntısı buna göre belirlenmelidir. Örneğin, maden arama devresinde karot numunelerden kayacın yalnızca mekanik ve süreksizlik özellikleri belirlenirken ana hazırlık galerilerinde oluşabilecek kamaların kaymasını incelemek doğru modelleme metodolojisi değildir. Ayrıntılı olarak veri toplama pahalı laboratuvar deney ve arazi ölçümleri gerektirir. Fizibilite aşamasında modelleme amacıyla veri toplamak için bu işlemlere fazla yatırım yapmak sayısal modellemenin ucuzluk avantajını ortadan kaldırabilir.

Bu safhada eldeki kayacın mekanik, yapısal özellikleri ve yeraltı gerilme durumunun tahinini ile açılacak boşluklara gelecek gerilmeler iki boyutta basit sınır elemanları yöntemleri ile tahinin edilebilir. Maden işletilmesi sırasında faylar ve kaya ehmelerinin doğru konumları bellidir. Bu safhada arazi kontrolü problemleri için ayrıntılı modeller ayrı elemanlar ya da entegre sonlu farklar kullanılabilir. Böylece ayaklarda aşamalı kazı, dolgu ya da kayacın ilerlemeli yertilmesinin olduğu topuklar modellenilebilir.

Yeraltı şartlarında genellikle problemler üç boyutlu elastisitenin iki boyuta, düzlemsel-birim deformasyon (plane strain) yükleme şartlarına indirgenmesi ile çözülür. Ancak madencilikte bir çok problem üç boyutludur. Örneğin bir ayaktaki gerilmelerin saptanması işlemi, eğer ayacın eksenine dik başka bir ayak yakında üretim yapıyorsa; üçboyutlu model ile gerçekleştirilmelidir.

Bir çok deneyimsiz mühendis sayısal modellemeyi en inanılır otorite olarak kabul etmektedir. Halbuki sonuçlar model girdilerinin doğruluğu kadar doğrudur. Arazi kontrolunda ya da kaya mekaniğinde ele alınan malzemeler raa-kına ve inşaat mühendisliğindeki gibi mükemmel şekilde teoriye uymamaktadırlar. Bu yüzden genelde modellemeden çıkan sonuçlara nicelik olarak değil nitelik olarak bakmak gerekir. Çok karmaşık modeller yapma, modele sadadaki gerçekten daha fazla inanma, modellemede düşülen hatalar arasındadır. Sayısal yöntemlere aslında mühendisliğe yüzyılımızın kazandırdığı, doğayı anlamamızda bize yardımcı olan başka bir gereç olarak bakmak en doğru modelleme metodolojidir.

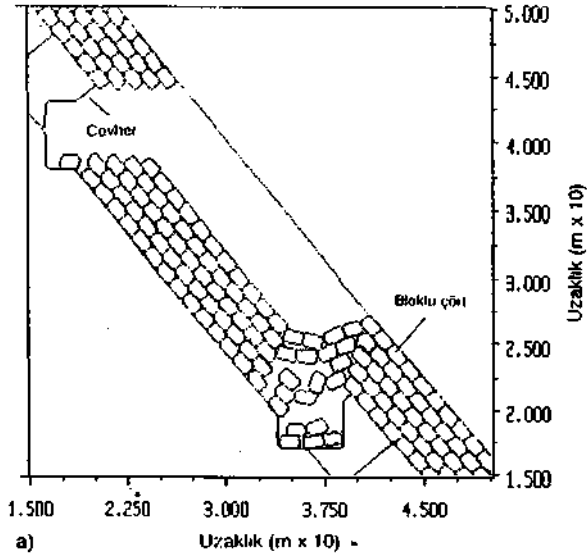
4.1. Sayısal Yöntemlerle İlgili Örnekler

Yukarıda belirtilen görüşlerin ışığında sayısal yöntemlerin uygulanmasını açıklayan iki örnek aşağıda verilmiştir.

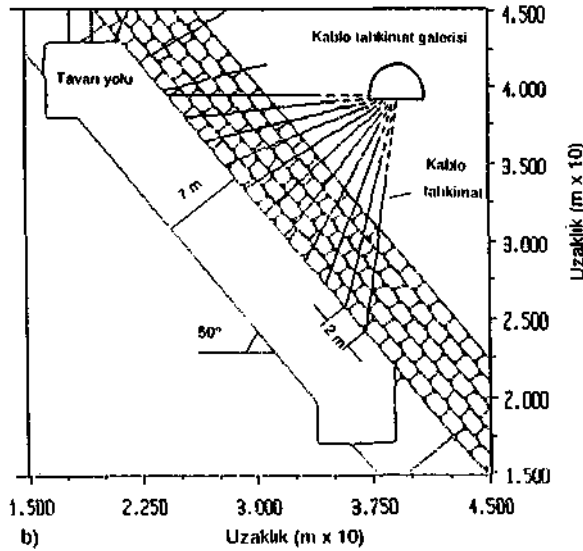
Örnek 1.

Sülfürlü cevher üretebilen bir ayakta arazi kontrolü

- Arazi koşulları: Kuzey Ontario'da Kanada Winston Lake madeninde 300 ile 600 m derinlikte sülfürlü bakır cevheri üretilmektedir. Cevher ortalama 50° dalımlı 7 m genişliğindedir (Şekil 6). Daha ilk ayakların açılmasında çört tavan taşı koparak cevhere karışmış sık sık tüm tavan gabro kantağından çökmüştür. Bu sebeple kazıdan önce ayak tavan yolunun yakınından açılan bir galeriden arma doğru aynada 2 m aralıklı olacak şekilde kablo tahkimat (preinstalled cable bolts) döşenmiştir.



a)



b)

Şekil 6. Winston Lake Madeni Ayn Elemanlar Ayak Modeli, a) Tahkim edilmemiş ayakta çökme, b) Kablo tahkimat ile desteklenmiş ayak

- Modelleme amacı: Kablo tahkimatın boyu, sayısı ve geometrik düzeni amprik yollar ile tasarımlanmıştır. Kablo tahkimatının sayısının azaltılarak ekonomikliğin artırılması amaçlanmaktadır.

- Modelleme yöntemi seçimi ve işlemi: Maden işletme safhasında olduğundan jeoteknik veriler çöktür. Model ilk olarak

kaya kütlesi homojen, izotrop ve elastik kabul edilerek İM boyutlu sınır elemanlar ile yapılmıştır. Ancak kablo tahkimat ve süreksizliklerin de modele katılması amacı ile ayn elemanlar (UDEEC) modelleme yöntemi olarak seçilmiştir. İlk safhada ayağın çökmesi (Şekil 6a), daha sonra kablo tahkimat ile destekli ayak modellenmiştir (Şekil 6b). Kablo tahkimata gelen yüklerin sayısal olarak kullanımı yerine en fazla yükün hangi kabloya geldiğinin araştırılması doğru modelleme metodolojisidir. Model arazi koşullarına uydurulduktan sonra kablo tahkimat özellikleri, sayıları, ayak içindeki yerleri, açılan, kablo ve kayaç arasındaki betonun özellikleri değiştirilerek optimum şartlar belirlenmiştir.

- Modelleme süresi: Winston Lake modellemesi 3 ay sürmüştür. Model 386, 25 MHz işlemcisi olan bir bilgisayarda genelde 1 gün çalışmıştır (Yazıcı ve Kaiser, 1992).

Örnek 2.

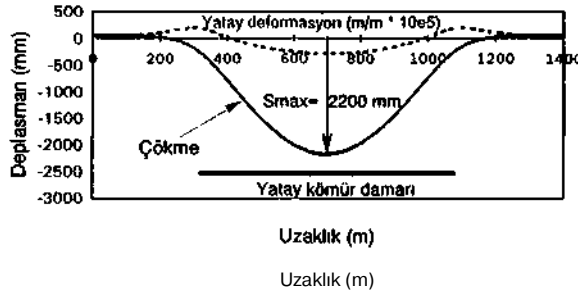
Kömür madenciliğinde oluşan tasmanın modellenmesi

- Arazi koşulları: Zonguldak havzası Kozlu bölgesinde 1975 ve 1980 yılları arasında nivelman ölçümleri yapılarak çeşitli noktalarda yeryüzünde oluşan düşey deplasman (çökme) saptanmıştır (Buyurgan, 1980). Çaydamar 0-15° eğiminde, ortalama 120 m derinlikte ve kazı kalınlığı 4,5 m'dir. Ölçülen en büyük deplasman değeri (S_{max}) 2,4 m civarındadır.

- Modelleme amacı: Yeryüzü tasmanı amprik yöntemlerle yaklaşık olarak belirlemektedir. Ancak amprik yöntemlerde kullanılan katsayılar belirlendikleri madencilik bölgelerinde kullanıldıklarında başarılı olmakta, diğer bir bölgeye uygulandıklarında deplasman değerleri saptamalar göstermektedir. Sayısal modellemeyle tasmanın damar kalınlığı, pano boyu, derinliği, kömür ve kayaç özellikleri, aşamalı kazı boyu gibi verilere dayanarak tahmin etmek amaçlanmaktadır.

- Modelleme yöntemi seçimi ve işlemi: Bu örnekte maden sahasına ait geometrik bilgiler ve tahmini kayaç özelliklerinden başka veri mevcut

olmadığından iki boyutlu sınır elemanları (EXAMINE²⁰) sayısal modelleme yöntemi olarak seçilmiştir. Yaklaşık 750 m boyunda bir pano homojen, izotrop ve elastik olarak (Young modülü 10 GPa ve Poisson oranı 0,2) düzlemsel birim deformasyon yükleme şartlarında modellenmiştir. Şekil 7'de çökme ve yanal birim deformasyon (lateral strain) eğrileri görülmektedir.



Şekil 7. Tasman modelinden elde edilen çökme ve yanal birim deformasyon eğrileri

En yüksek deplasman modelde 2,2 m ve ölçülen deplasman 2,5 m'dir. Çökme teknesinin genel görünümü ve birim deformasyon eğrisinin genel karakteri literatüre uygundur (Şekil 7). Ancak tasman olayını tam olarak elastik kuram ile açıklamak olanaklı değildir. Modelde kömür damarı ve yeryüzü ile damar arasındaki bir çok farklı tabakanın mekanik ve elastik özellikleri ayrı ayrı tanımlanamamış, yaklaşık ortalamaları kullanılmıştır. Ayrıca sınır elemanlar ile aşamalı kazı yapıp tasmanın ayak ilerlemesine göre saptanması ya da göçüğün benzeşimi de olanaklı değildir. Bu yüzden sınır elemanlar ile modelleme genel bir düşünce oluşturmaktan ileri gidememektedir. Modelin daha gelişmiş bir yöntem ile (örneğin entegre sonlu farklar (FLAC) ya da ayrı elemanlar (UDEQ) yeniden ele alınması gerekmektedir.

- Modelleme süresi: Sınır elemanlar ile modelleme için 1 haftalık teorik ön hazırlık yapılmış ve Model 386, 20 MHz işlemcisi olan bir bilgisayarda 5-10 dak çalışmıştır.

5- SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda özellikle arazi kontrolü için

geliştirilen sayısal modelleme yöntemleri, mühendis seviyesindeki araştırmacıların kullanabileceği kadar yaygınlaşmıştır. Jeoteknik projelerin başlangıcında elde edilen az bilgi ile kayaç homojen, izotrop ve elastik kabul edilerek sonlu ya da sınırlı eleman yöntemlerini kullanmak uygundur. Projenin daha ileri safhalarında jeoteknik bilgiler çoğaldıkça entegre sonlu farklar ya da ayrı eleman yöntemlerini kullanarak ayrıntılı modelleme yapılabilir. Sayısal modelleme yönteminin arazi kontrolü probleminin karakterine göre seçilmesi gerekir. Çeşitli modelleme gereksinimlerine göre sayısal yöntemin saptanması Çizelge 2'de verilmiştir. Sayısal modellemede kurulan modele arazideki gerçekten fazla inanma ve gittikçe ayrıntılı modeller kurma araştırmacıların düştüğü hatalar arasındadır. Sayısal yöntemlerle modellemeye kesin yaklaşım aracı olarak bakmayıp, doğayı anlamamızda yardımcı olacak gereç olarak kabul etmek en uygun modelleme metodolojisidir.

Çizelge 2. Yöntem Seçimi

Modelleme Gereksinimi	Modelleme Yöntemi
Birçok süreksizlik düzlemi içeren, veya faylarla kırılgan kaya kütleleri	Ayn Elemanlar
Elastik olarak kabul edilen kaya kütleleri	Sınırlı Elemanlar
Aşamalı kazı, kayanın ilerleyen yenilmesi, dolgu, kaya patlatması, sismik dalga	Sonlu Elemanlar
İki boyutlu problem, büyük boyutlu model	Entegre Sonlu Farklar
Kaya saptamaları, kablo tahkimatı.	Ayn Elemanlar
Çelik bağlarda destekli kaya kütleleri, Bir çok farklı özellikli tabaka içeren kaya kütleleri	Entegre Sonlu Farklar
Projeden modellemeye düşük yatırım deneyimsiz eleman kullanma	Sonlu Elemanlar
Sadece kazı civarının modellenmesi	2 Boyutlu Sınırlı Elemanlar
	Melez Yöntemler

KAYNAKLAR

.....1990; "UDEC- Universal Distinct Element Code Manual", Version ICG 1.6, Itasca Consulting Group, Inc.

.....1988; "List of Computer Programs in Rock Mechanics"- Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. and Geo. Abstr., 25,4,pp. 183-250.

BİLGİN, A., 1977; "Sonlu Eleman Yöntemi ve Madencilğe Uygulama Olanaktan", Türkiye Bilimsel ve Teknik 5. Kongresi, 14-18 Şubat, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, 24 s.

BUYURGAN.S., 1980; "Zonguldak Havzasındaki Tasman Hasarları ve Kentin Geleceği", Türkiye 2. Kömür Kongresi, Zonguldak, s.251-267.

CROUCH. S.LSTARFIELD, A.M., 1983; "Boundary Element Methods in Solid Mechanics", George Allen and Unwin.ISBN 0-04-620010-X, 321 pp.

CUNDALL, P.A., 1987, "Distinct element models of rock and soil structure". Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics edited by E.T. Brown, Allen and Unwin, London, ISBN 0-04-620020-7, pp. 129-163

DOKTAN, M., 1991; "Galeri Yan Duvarlarında Mevcut Yumuşak Tabakaların Galeriyi Durağılığma Etkisi Üzerine Bir Sonlu Elemanlar Analizi", Madencilik, Cilt 30, Sayı 1, s. 21-25.

HOEK, E., GRABINSKY, M., DIEDERICHS, M., 1989, "Numerical Modelling in Rock Engineering"- Mining Research Directorate Laurentian University, Sudbury, Ontario, January, 18 pp.

KÖSE, H., 1980; "Finite Element Yönteminin Kaya Mekaniği Dalındaki Problemlerin Çözümünde Kullanılışı", Madencilik, Cilt 19, Sayı 3, s. 26-34.

NASUF, E., 1993; "Zonguldak Şehrinin Altındaki Topuđun Alınması ile Oluşacak Tasmanın Önceden Tahmini", İ.T.Ü. Araştırma Projesi 1. Ara Raporu, Şubat, İstanbul, Yayınlanmamış.

NASUF, E., 1977; " A Photoelastic and Field Investigation into Interface Problem in Rock Mechanics", Ph.D.Thesis, University of Stathclyde, June, Glasgow, U.K.

SOKOLNIKOFF, I.S., 1956; "Mathematical Theory of Elasticity", Mc-Graw Hill Book Company, 475 pp.

STARFIELD, A.M.,CUNDALL,P.A., 1988; "Towards a Methodology for Rock Mechanics Modelling", Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. and Geo. Abstr., 24, 3, pp. 99-106.

WILES, T., 1991; Kişisel görüşme, Geomechanics Reserch Centre, Laurentian University, Sudbury, Ontario, Canada.

WILES, T., 1991; " Manual for 3DBEM", mine Modelling Ltd., Sudbury, Ontario, Canada.

YAZICI, S., KAISER, P.K., 1992; "UDEC modelling of Winston Lake mine", Unp. Report Geomechanics Research Centre, Laurentian University, Sudbury, Ontario, Canada.

DÜZELTME

Madencilik Dergisi'nin Mart 1993 Sayısında yer alan "Telesiyej Personel Taşıma Sistemi ve TTK'daki Uygulamaları" başlıklı yazıda Şekil.4 de yer alan çizim Şekil.2 de yer alacaktır. Şekil.3 ün orta kısmında yer alan çizimler ise Şekil.4 de yer alacaktır. Derginin dizgisi sırasında meydana gelmiş bu hatadan dolayı okuyucularımızdan ve yazardan özür dileriz.

Yayın Kurulu