

**TÜRKİYE MADENCİLİK BİLİMSEL
VE TEKNİK 5.KONGRESİ**

14-18/2/1977.dsi salonu/ankara

SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ VE
MADENCİLİĞE
UYGULAMA OLANAKLARI

TMMOB

MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE MADENCİLİĞE UYGULAMA OLANAKLARI

Aydın BİLGİN *

Özet

Bilgisayar kullanımı gerektiren Sonlu Elemanlar Metodu, yapıların analizinde kullanılan sayısal bir yaklaşım yöntemidir. Bu tebliğde Sonlu Elemanlar Metodu tanıtılmış ve kullanım alanları belirtilmiştir. Sonlu Elemanlar Metodu nun jeoteknik ve madencilik yapılarının denge ve emniyetliliğinin araştırılmasındaki önemi vurgulanmıştır. Ayrıca, maden yapılarının dizaynında metodun geçerliliği ve güvenilirliği araştırılmıştır.

Abstract

The Finite Element Method, which needs the use of digital computers; is a numerical approach used for the analysis of structures. In this paper, the description and the fields of application of the Finite Element Method are given. Attention is also given to the importance of analysis of stability and safety of geotechnical and mine structures. On the other hand, the validity and reliability of the method in the design of mine structures are investigated.

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE MADENCİLİĞE UYGULAMA OLANAĞI, MADENCİLİK VE DİZAYN :

Kısaca, madencilik emniyetli ve ekonomik koşullarda herhangi bir cevherin çıkarılması olarak tanımlanabilir. Bu

(*) Maden Müh., Asistan., ODTÜ, Maden Müh. Böl.

tanınım gerçekleşebilmesi ancak iyi bir plânlamayla mümkündür. Kaya mekaniği açısından madenler, pek çok galeri, kuyu, ayak, topuk v.b.'den oluşan büyük yapılardır. Her çeşit mühendislik yapısında olduğu gibi, madenlerde de dizaynın önemi büyüktür. Özellikle üretim ile emniyetin birlikte yürütülmelerinin gereği hatırlanınca bu önem daha da artar.

Bu noktada, maden yapılarının dizaynını kısaca inceleyelim.

1 — Verilerin Toplanması :

Bunların başlıcaları kayaçların içinde buldukları gerilim durumları, kayaların mekanik özellikleri, bölgenin jeolojik yapısı, fay ve diğer yapısal çatlak sistemlerinin saptanması ve varsa dolgu malzemesinin özellikleri, yeraltı suyu durumu, kazı kesiti v.b.'dir.

2 — Yaklaşım Yöntemleri :

Kendisinden bekleneni verebilen madencilik yapılarının oluşabilmesini sağlamak için, toplanan verilerin ışığı altında, fiziksel açıdan bu yapılara benzeyen ve çözümü bilinen basit problemler yaklaşım olarak kullanılmalıdır. Bu yöntemler üç sınıfta toplanabilir.

a) Analitik Yaklaşımlar :

Galerileri ince ve kaim cidarlı silindirler, kaçamak yolu tavanlarını kirişler olarak düşünebiliriz.

b) Sayısal Yaklaşımlar :

Sonlu elemanlar metodu, dinamik serbestleşme metodu gibi.

c) Fiziksel Modeller :

Bunlar laboratuvar çapında yapılan modellerdir ve gözlem değerindedir. Sayısal sonuç vermezler.

• 3 — Dizayn :

İlk dizayn toplanan verilerin, laboratuvar modellerinin veya diğer yaklaşımların ışığı altında daha gerçekçi bir şe-

kilde yapılabilir. Genellikle ilk dizayn esas olmakla birlikte gerçek boyutta uygulamaya geçildikten sonra çıkabilecek sorunlar, nedenleri saptanarak ilk dizaynın değiştirilmesinde kullanılabilir.

SONLU ELEMENLAB METODU :

Mühendislik yapıları genellikle iki ana grupta toplanabilir. Birinci grup bina, köprü, gemi, uçak gibi birçok parçanın birleştirilmesiyle oluşanlardır. Madenleri de kapsayan ikinci grup genellikle bir bütün malzemenin işlenmesiyle oluşur. Kaya mekaniği açısından madenler, kayaların çeşitli şekillerde kazısı ile oluşan yapılardır. Kayalar doğal yapısal malzemeler olarak değerlendirilir ve özellikleri yatay malzemelerden farklıdır.

Uygulamalı fizikte sınır değer (Boundary value) problemleri genellikle iki metodla çözülür. Birinci metod analitik çözümdür. Analitik çözüm yapısal malzemenin davranışını temsil eden bir matematik ifadedir. Analitik çözüm yöntemi malzemenin mekanik özelliklerinin ve yapı geometrisinin basit olduğu ve genellikle yapının sonsuz bir ortam içinde var sayıldığı durumlar için geçerlidir. Malzeme özelliklerinin ve yapı geometrisi ile, sınır koşullarının karmaşık olduğu durumlarda, mühendis sayısal (nümerik) metodları kullanır. Sonlu Elemanlar Metodu bunlardan biridir. Tablo -1 sonlu metodunun hangi alanlarda uygulandığını göstermektedir. Bir sınır değer probleminde problemin bilinmeyenleri, sınırlarda bilinen değerler yardımıyla bulunur. Bilgisayar kullanımını gerektiren sonlu elemanlar metodu bu problemlere sayısal çözümler getirir. Sınır değer problemleri üç ayrı yaklaşımla çözülür.

- a) Yerdeğişim (Displacement) metodu,
- b) Denge (Equilibrium) metodu,
- c) Karışık (Mixed) metod,

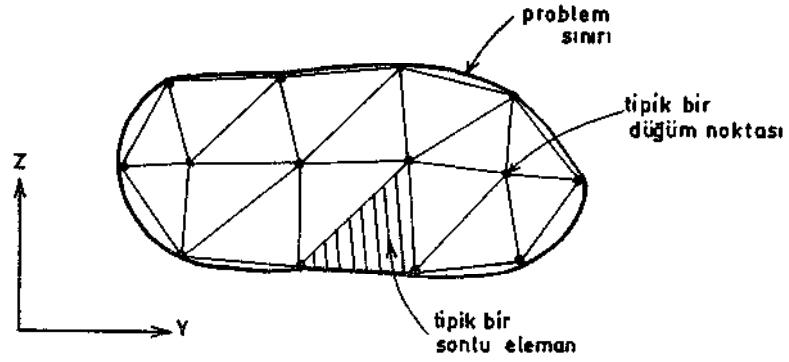
«a» yaklaşımında malzemenin yerdeğişimleri problemin bilinmeyenleridir. «b» yaklaşımında malzemenin gerilimleri prob-

lemin bilinmeyenlerini oluşturur, «C» yaklaşımında bazı yerdeğişimler ve bazı gerilimler problemin bilinmeyenleridir. Bu tebliğde metodun tanımını kolaylaştırmak ve anlaşılabilirliğini sağlamak için yerdeğişim yaklaşımı kullanılacaktır.

SONLU ELEMANLAR ANALİZ YÖNTEMİ W

1 — Sürekli Yapının Parçalara Ayrılması :

Süreklilik, analizi istenen fiziksel bir yapıdır. Sonlu elemanlar metodu bir bütün yapının parçalara ayrılıp incelenmesini öngörür. Şekil - 1'de görülen bu parçaların herbiri bir sonlu elemandır (Finite Element). Sonlu elemanlar düğüm noktaları (Nodes) denilen belirli noktalarda birbirlerine bağlanır.



Şekil -- 1

Problemi bir bütün olarak çözmek yerine, herbir sonlu eleman için denge koşulu formüle edilir ve formülasyonlar birleştirilerek yapının tümü için çözüm bulunur. İki - boyutlu analizlerde sonlu elemanlar üçgen veya dörtgenler şeklindedir. Üç-boyutlu analizlerde üçgen, dörtgen prizmalar veya küpler kullanılabilir.

Tablo 1 – Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislik Uygulama Alanları

UYGULAMA ALANI	DENGE PROBLEMLERİ (Equilibrium problems)	AYGENBEĞER PROBLEMLERİ (Eigenvalue problems)	YAYILMA PROBLEMLERİ (Propagation problems)
1 – İnşaat Mühendisliği	Kiriş, Plak, Kabuk yapılarının analizi	Yapıların emniyetliliği	Gerilme dalgalarının yayılması
Yapı Mekaniği	Karmaşık yapıların analizi	Yapıların titreşim analizleri	Yapıların dinamik mukavemeti
Uzay Mühendisliği	İki ve üç-boyutlu gerilim analizleri Prizmatik kesitlerin bükülme problemleri	Doğrusal visko-elastik salınım	Termoelastisite ve termoviskoelastisite problemleri
2 – Kaya Mekaniği	İki ve üç-boyutlu gerilim analizleri	Zemin-yapı kombinasyonunun dinamik etüdü	Zemin ve kayalarda kararsız sıvı akışı (Transient flow) zemin oturması problemleri,
Zemin Mekaniği	Yapı ve kazı problemleri		Gerilim dalgalarının yayılması
Temel Mühendisliği	Şev problemleri Yapı-Temel problemleri Tünel, Baraj, Sondaj, Kanal, Menfez, Köprü analizi Zemin ve kayalarda kararlı sıvı akışı (Steady-State flow)		Dinamik zemin-yapı etüdü
3 – Isı Transferi	Katı ve sıvılarda kararlı ısı dağılımı		Katı ve sıvılarda kararsız (Transient) ısı dağılımı
4 – Hidrodinamik, Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği	Sıvıların potansiyel ve viskoz akış problemleri Gözenekli ortamda kararlı sıvı akışı Hidrolik yapı ve baraj etüdü	Göl ve limanlarda ritmik su seviyesi değişimi problemleri Rijit kaplarda sıvı çalkalanması problemleri	Nehir ağzlarında tuzluluk ve kirlilik etüdü Tortu taşınması problemleri Dalga yayılımı problemleri Gözenekli ortamda sıvı akışı problemleri
5 – Nükleer Mühendisliği	Nükleer santral yapıları etüdü Nükleer santral ve Reaktörlerde kararlı ısı dağılımı problemleri		Dinamik ve Termoviskoelastik nükleer santral yapısı etüdü Reaktör ve santrallarda kararlı ısı dağılımı prob.

Yapıyı parçalara ayırma işlemi problemin sonuçlarını ve dizaynın güvenilirliğini etkileyeceği için son derece önemlidir ve mühendislik zekâsını ve tecrübeyi gerektirir.⁸

2 — Yerdeğişimi Modellerinin Seçimi :

Herbir sonlu eleman içindeki yerdeğişimlerin dağılımını veya değişimini temsil eden basit fonksiyonlar seçilir. Bunlara yerdeğişim modeli denir. Düğüm noktalarındaki yerdeğişim değerleri problemin bilinmeyenleridir. Böylece problemin tümünün çözümü, bize yapının düğüm noktalarındaki yerdeğişimlerini verir. Trigonometrik yerdeğişim modelleri seçilebileceği gibi, matematik işlemlerde kolaylık sağladığı için polinom şeklinde modeller tercih edilir. Yerdeğişim modelinin seçiminde birbirleriyle ilgili bazı faktörler rol oynar.^{1, 28}

a) Model polinomun terim sayısı :

Yapı bünyesindeki yerdeğişimleri gerçeğe yakın bir yaklaşıklıkla bulabilmek için model polinomun terim sayısı önemlidir. Model polinomun terim sayısı en az, bir düğüm noktasındaki bilinmeyen sayısı ile elemanın düğüm noktaları sayısının çarpımı kadar olmalıdır. Örneğin tek boyutlu, bir elemanın iki düğüm noktasının, tek yönde yerdeğişimleri söz konusudur ve model polinom en az iki terimli olmalıdır.

b) Yerdeğişim uygunluğu

(Displacement Compatibility) :

Sonlu elemanlar arasında yerdeğişim uygunluğu sağlanmalıdır. Örneğin iki komşu elemanın ortak düğüm noktalarında, birinci elemanın o düğümünün belirli bir yöndeki yerdeğişimi, komşu elemanın aynı düğümünün aynı yöndeki yerdeğişimine eşit olmalıdır.

c) Sabit birim - def ormasyon koşulu

(Constant strain mode) :

Herhangibir sonlu elemanı o kadar küçültelim ki, bu eleman içinde birim - deformasyon değişmez olsun. Bu durumda

sonlu eleman yapının sabit birim - deformasyona sahip bir kısmını temsil etmektedir. Yanlış sonuç almayı önlemek için, yerdeğişim modeline bu durumu karşılar bir terim konulmalıdır.

d) Şekil değiştirmeden yerdeğişim

(Rigid-body movements) :

. • Herhangibir cisim, mukavemetine bağlı olarak deforme olmadan yerdeğiştirebilir. Model polinom seçiminde bu noktayı da gözönüne almak gerekir.

3 .— Sonlu eleman Rijitlik (Stiffness) matrisinin bulunması :

Her sonlu elemanın dengede (Equilibrium) olabilmesi için eleman düğüm noktalarında denge eşitliklerinin (Equilibrium equations) sağlanması gerekir. Sonlu eleman rijitlik matrisi bu eşitliklerin sabitelerinden (coefficients) oluşur. Örneğin bir eleman için genel denge eşitliği şöyle yazılabilir.

$$[k] \{q\} = \{Q\}$$

$[k]$ = eleman rijitlik matrisi,

$\{q\}$ = düğüm noktaları yerdeğişim vektörü,

$\{Q\}$ = düğüm noktaları kuvvet vektörü,

4 — Sonlu elemanlar denge eşitliklerinin birleştirilmesi :

Sonlu eleman denge eşitlikleri teker teker kurulup, bunlar uygun şekilde birleştirilerek, yapının tümü için geçerli denge durumu sağlanır. Bu ortaya aynı zamanda geçerli- denklemler (Simultaneous algebraic equations) çıkarır. Geometrik sınır koşulları için gerekli değişiklikler yapılır.

5 — Denklemlerin çözümü :

Bilgisayarlarda bilinen matris cebiri yöntemleriyle denklemler çözülür ve yapının düğüm noktalarının yerdeğişimleri bulunur.

6 — Elemen birim - deformasyon ve gerilmelerinin bulunması :

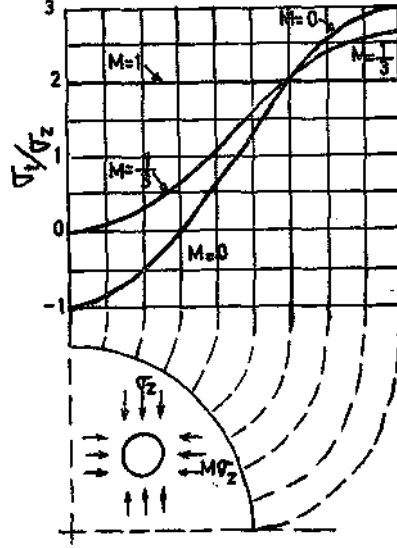
Elastik teori prensiplerinden yararlanarak, bulunmuş olan yerdeğişimlerden eleman birim - deformasyonları ve birim - deformasyonlardan da gerilmeler bulunur.

ÖRNEK PROBLEMLER :

Bu bölümde, sonlu elemanlar metodunu açıklığa kavuşturmak amacıyla basit iki örnek problem verilmiştir. Yöntemin sağladığı olanaklar, avantaj ve dezavantajları ayrıntılı olarak daha sonra incelenecektir.

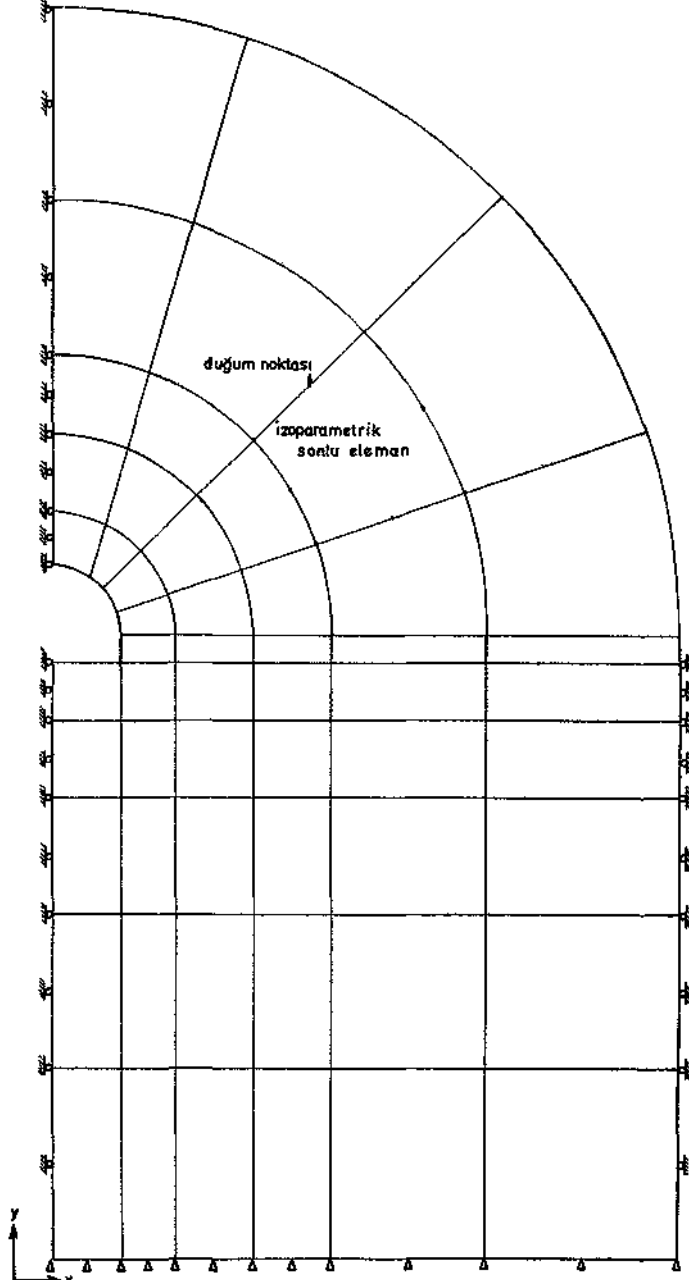
ELASTİK KAYAÇLARDA TÜNEL DİZAYNI :

Burada incelenen tünel diğer yeraltı yapılarından etkilenmeyecek uzaklıktadır. Dizayn açısından problem, tüneli çevreleyen kayalarda oluşan gerilmeleri ve bunların dağılımını bulmaktır. Tünelin sağlam olması, çevre kayalardaki gerilmenin, aynı kayaların mukavemetinden az olmasını gerektirir. Çevre kayalarda gerilme dağılımı, arazi gerilmelerine, tünel kesitine ve kayaların mekanik özelliklerine bağlıdır. Şekil-2 dairesel kesitli bir tünel için analitik çözüm sonucunu göstermektedir.^{3,4} Şekil - 3 B - 5 kesitli bir galeri çevresinde gerilme dağılımının sonlu elemanlar metoduyla bulunmasında kullanılan ağı göstermektedir. Bu analizde kayacın elastik modülü $E=8 \times 10^6$ tons/m², Poisson oranı 0.2 ve yoğunluğu 2.64 tons/m³ alınmıştır. Analizde kullanılan ağ 55 sonlu eleman ve 198 düğüm noktasından oluşmuştur.



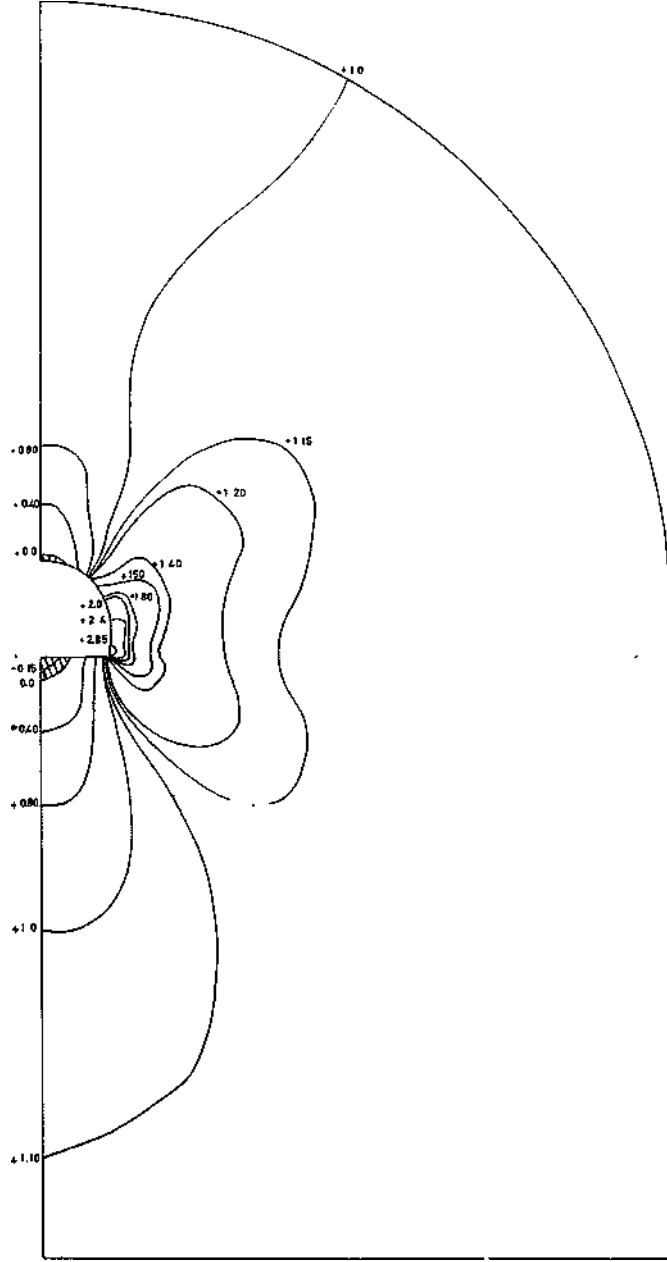
Şekil - 2

Eleman tipi 8 düğüm noktalı izoparametrik dörtgendir. Şekil - 4 ve Şekil - 5 sırasıyla eşit düşey gerilme ve eşit yatay gerilme konsantrasyonu eğrilerini göstermektedir.



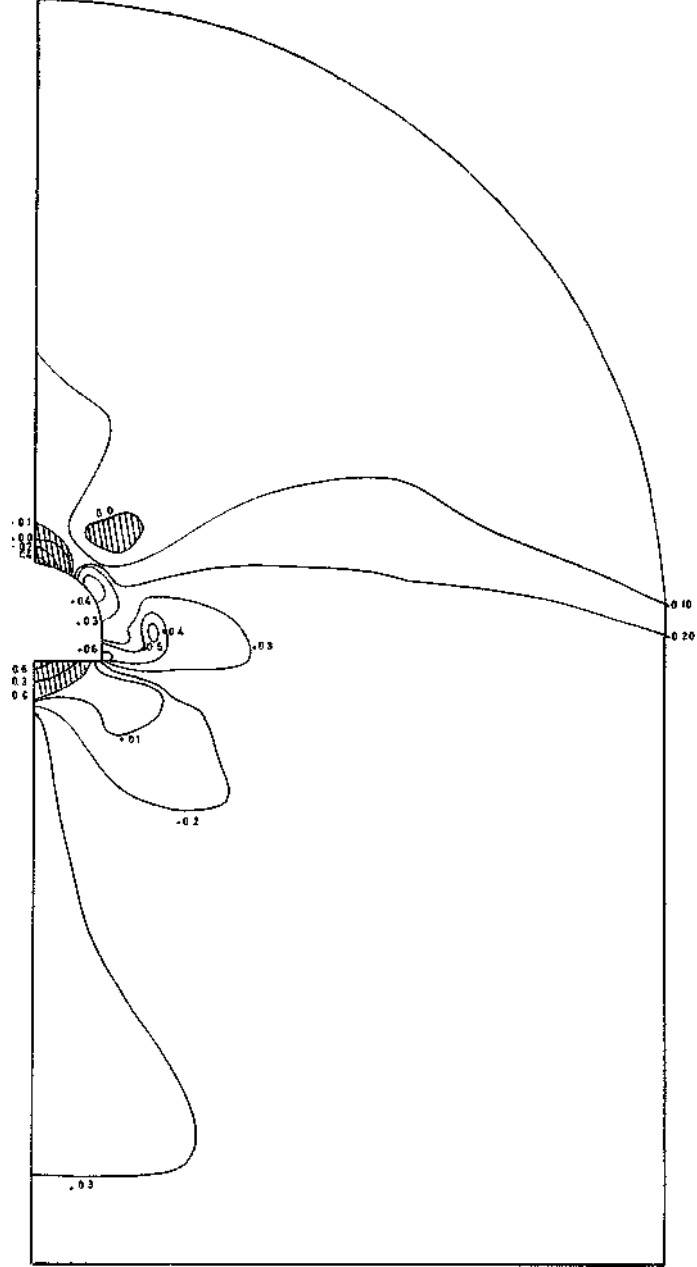
Şekil 3- Sonlu elemanlar ağı

Şekil — 3



Şekil A--Eşit düşey ısıtım konsantrasyon eğrileri! (O[^]/V.H)

Şekil — 4



Şekil 5-Eşit yatay gerilim konsantrasyonu eğrileri (CTy/VHI)

ŞeMİ — 5

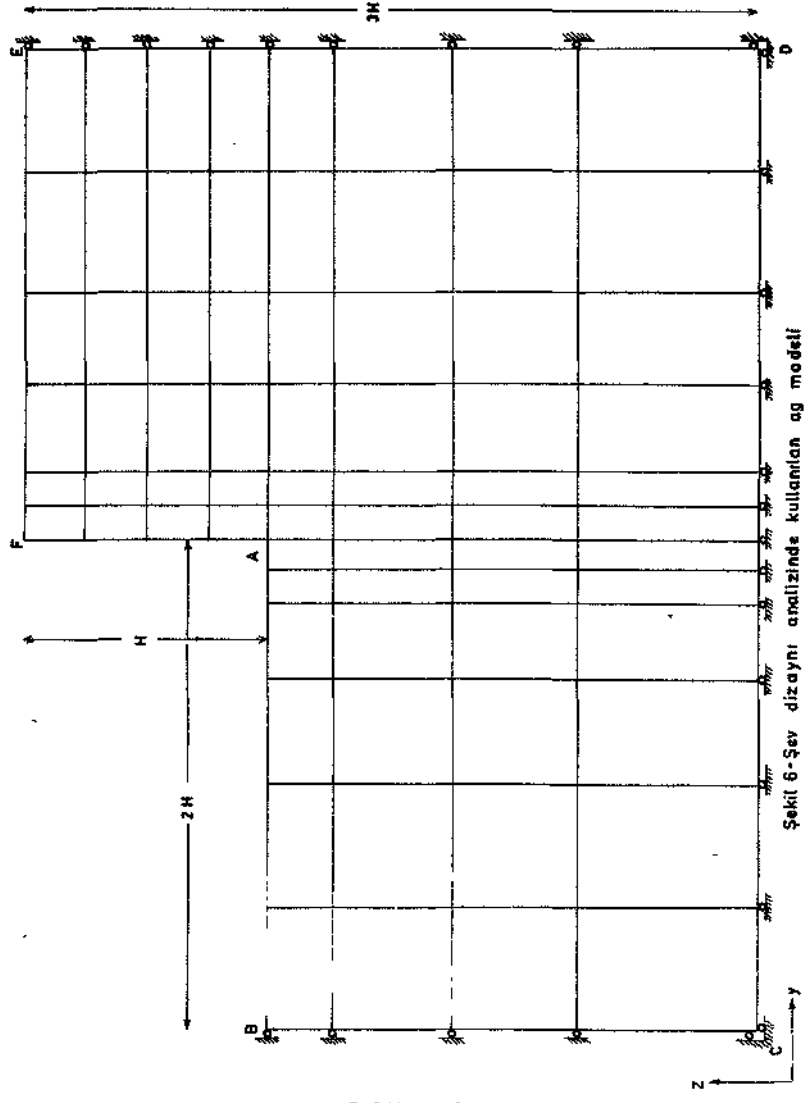
Galeri tek yönlü arazi (düşey) gerilmesi etkisi altında incelenmiştir. Galerinin duvarının tabana yakın kısımlarında düşey gerilme, normal arazi gerilmesinin 2.85 katına ulaştığı görülmüştür. Analitik çözümde galerinin yan duvarında düşey gerilme normal arazi gerilmesinin 3.0 katıdır. Burada gözden kaçırılmaması gereken iki nokta vardır. Birincisi iki galerinin geometrilerinin farklı olmasıdır. İkinci nokta analitik çözümün galerinin duvarında (teğet) gerilmeyi bulduğu, buna karşın kullanılan sonlu eleman bilgisayar programında sonuçların güvenilirliğini sağlamak için; gerilmelerin eleman içerisindeki (integrasyon) noktalarda bulunduğudır. Bu nedenle galerinin duvarında normal arazi gerilmesinin 2.85 katından daha fazla bir gerilme bulunduğu ve bunun analitik çözümle aynı olabileceği söylenebilir.

Analitik çözümde galerinin tavanında gerilme değeri, normal arazi gerilmesine eşdeğer yatay yönlü çekme gerilmesi olarak oluşmaktadır. Galerinin tabanında da aynı değerde bir yatay çekme gerilmesi oluşmaktadır. Sonlu elemanlar çözümü ile tavanında, normal arazi gerilme değerinin onda dördü (0.4) oranında bir yatay çekme gerilmesi oluştuğu, tabanında ise yatay çekme gerilmesinin normal arazi gerilmesinin onda altısı (0.6) oranına ulaştığı görülmektedir. Yukarıda düşey gerilmelerin belirtilmesinde belirtilen olgular burada da geçerlidir. Şurası unutulmamalıdır ki sonlu elemanlar yöntemi gerçek değil, yaklaşık sonuçlar vermekte ve yaklaşıklık derecesi pek çok faktörlere bağlı bulunmaktadır. Bu konuya ileride geniş olarak değinilecektir.

ELASTİK KAYACILARDA ŞEV BİZAYNI

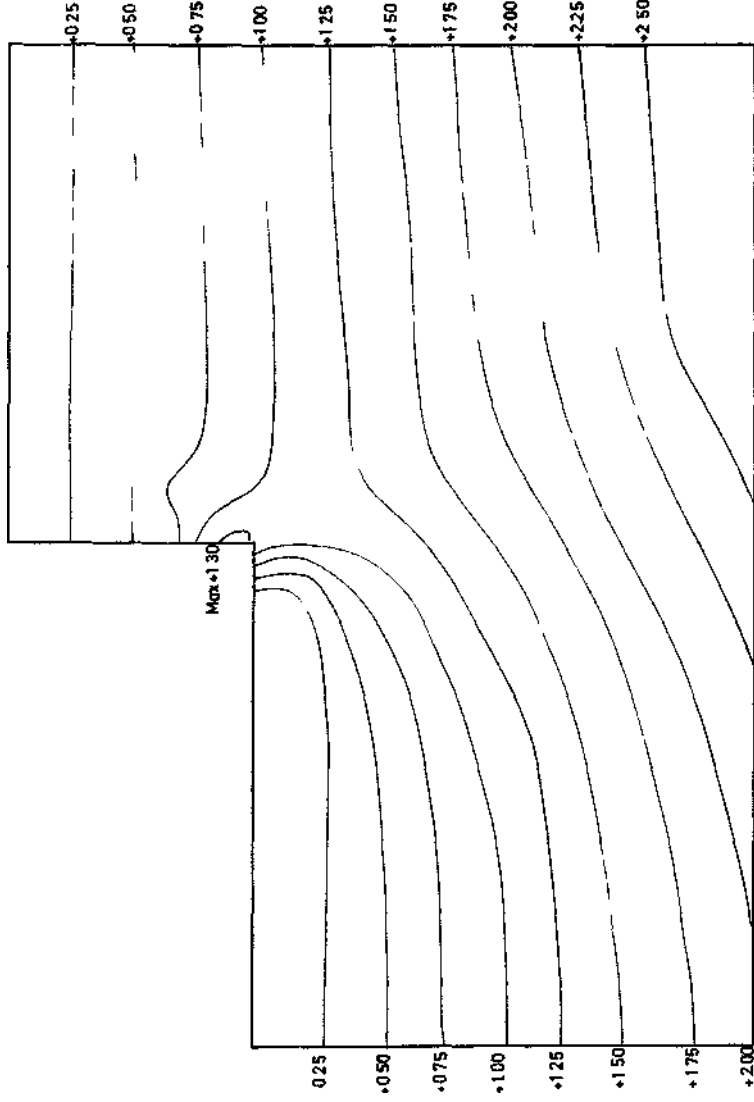
Bu problemde kayaç elastik malzeme kabul edilmiştir. Şekil - 6 analizde kullanılan sonlu elemanlar ağını göstermektedir. Homojen, izotropik ve doğrusal elastik kayaçta açılan şev açısı 90 derecedir. Şev yüksekliği, H, sınırların şeve uzaklığı şevin her iki yanında 2H'dir. Şevin toplam yüksekliği 3H'dir. Bu problemde şev düşey yönde kendi ağırlığı (yerçekim kuvveti) ile yüklenmiştir. Şekil-6 da gözüken DE sınırı boyunca yerçekim kuvvetine Poisson oranı ile

orantılı olarak bir tektonik kuvvet uygulanmıştır. Kayacın mekanik özellikleri, elastik modül 4×10^6 tons /m², Poisson oranı 0.33 ve yoğunluğu 2.4 tons/m³ olarak alınmıştır. Analizde 4 düğüm noktalı dikdörtgen elemanlar kullanılmıştır. Sonlu eleman ağında toplam 72 sonlu eleman ve 93 düğüm noktası vardır. Şekil - 7 eşit düşey gerilme konsantrasyon eğrilerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi şev aynasının tabana yakın kısımlarında, normal arazi gerilmesinin 1.3 katına erişen bir basma gerilmesi oluşmuştur. Şev tabanından H derinlikte olan kayaçlarda konsantrasyon İdir. Yani o noktada, ki gerilme normal arazi gerilmesine eşittir. Normal arazi gerilmesinin kayacın yoğunluğu ile derinliğin çarpımı, $T \sim dH$, olduğu hatırlandığında bu sonuç normaldir ve beklenen sonuçtur. Şekil-8 aynı şevde eşit yatay gerilme konsantrasyonu eğrilerini göstermektedir. Beklenildiği gibi yine en büyük gerilme konsantrasyonu şev aynası ile tabanının kesim noktalarına yakın olmaktadır. Değer olarak normal arazi gerilmesinin onda altısına (0.6) eşittir ve basma gerilimidir. Şev aynasında ve üste yakın kısımlarda görülen taranmış bölge, çekme gerilimi altındadır. Sıfır eğrileri ise gerilim altında olmayan noktalardan geçmektedir. Bu analizde görülen en büyük çekme gerilmesi şev aynasının üst kesimlerinde görülmekte ve normal arazi gerilmesinin yüzde biri (0.01) değerindedir. Kayaların çekme mukavemetlerinin genellikle çok düşük olduğu hatırlanırsa, bu bölgenin şev kaymasına yol açmayacağına daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekir. Bunun için kayanın çekme mukavemetinin, bunun yeraltı suyunun etkisi ile azalıp azalmadığının, çekme bölgesindeki gerilme değerinin, bu bölgedeki çatlak sistemlerinin ve şevin dengesine etkisinin araştırılması gerekir. Şekil-9 aynı şevdeki eşit makaslama gerilmesi konsantrasyon eğrilerini göstermektedir. Şev tabanında normal arazi gerilmesi yansına (0.5) eşit değerde bir makaslama gerilmesi oluşmuştur.



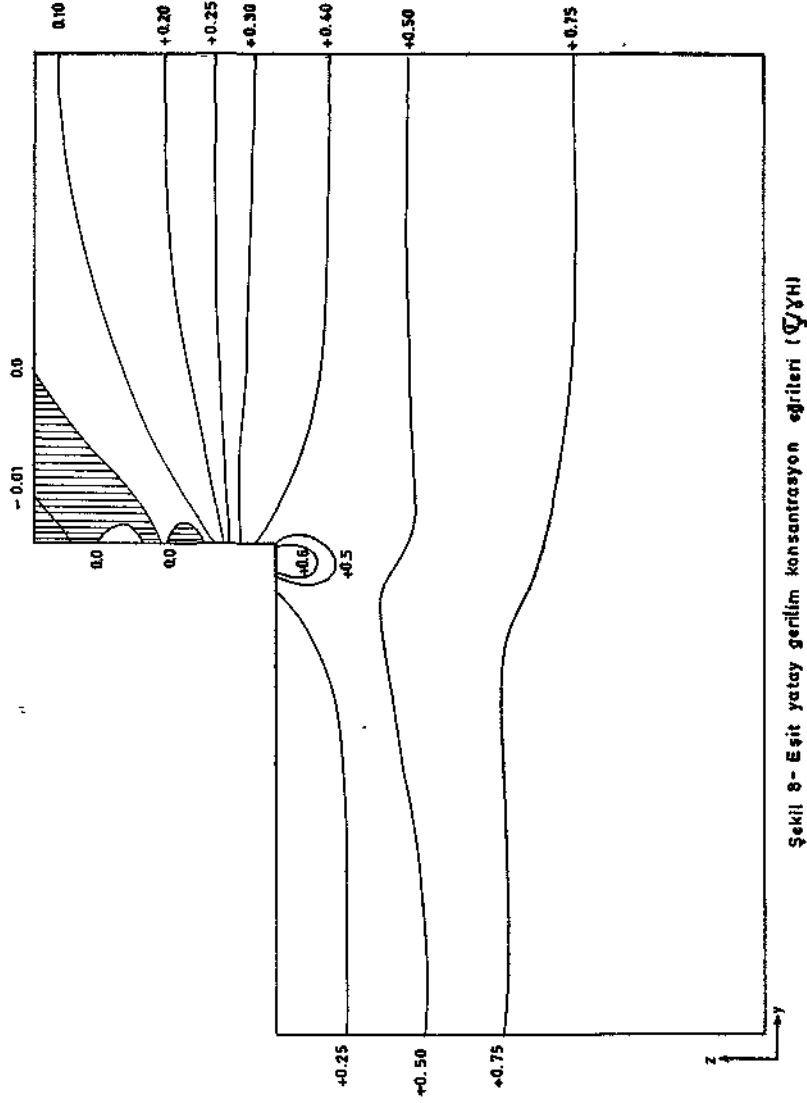
Şekil 6-Şev dizaynı analizinde kullanılan ağ modeli

Şekil — 6



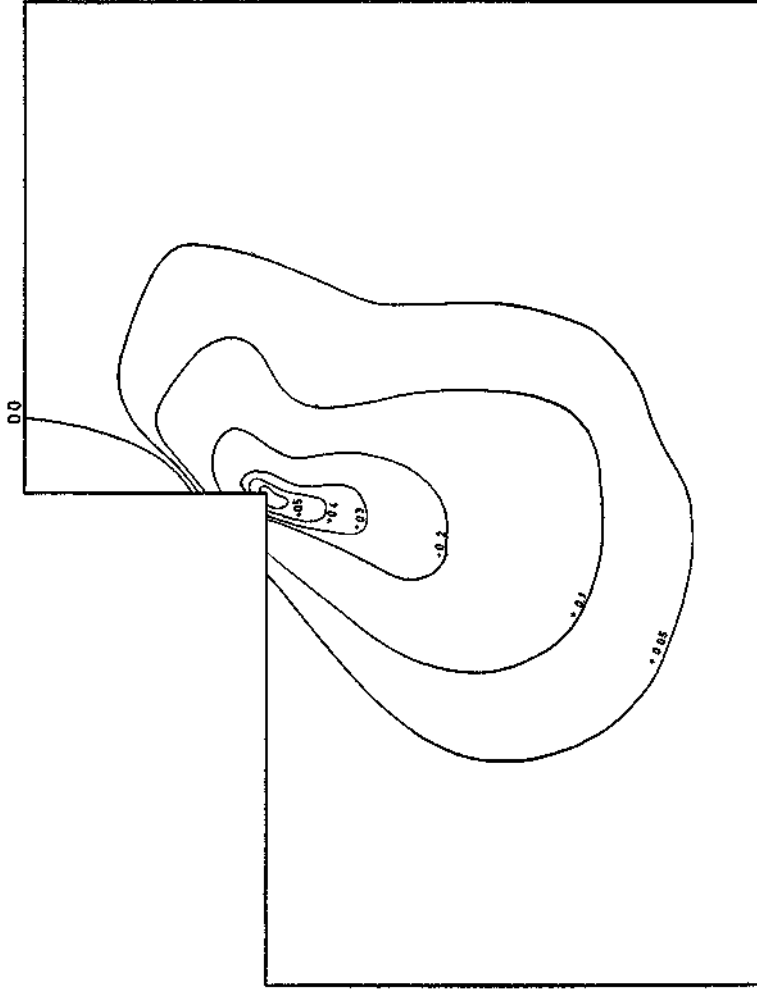
Şekil - İ

Şekil 7- Eşit düzey gerilim konsantrasyon eğrileri ($\sigma_2 / \gamma H$)



Şekil 8- Eşit yatay gerilim konsantrasyon eğrileri (σ_{yy})

ŞeM! -- §



Şekil 9- Eşit makaslama gerilimi konsantrasyonu eğrileri (C_{yz} / X_H)

Şekil - 9

SONLU ELEMANLAR METODUNUN SAĞLADIĞI OLANAKLAR, SINIRLAMALARI VE GELECEĞİ :

Sonlu elemanlar analiz yöntemi elastik teori prensiplerinden doğmuştur. Bu nedenle önceleri sadece homojen, izotropik ve doğrusal elastik malzemelerin analizi yapılabilmıştır. Yöntemde yapılan son değişiklikler, süreksiz ve doğrusal olmayan malzemelerin analizi olanağını sağlamıştır.

Doğrusal olmayan, problemler :

Bu problemlerin birinci grubu, malzemenin doğrusal olmayan davranış göstermesi durumunu kapsar. Doğrusal olmayan elastik veya elastik - plastik malzemeleri ve genel visko - elastik problemleri, örneğin yükleme hızının (-zaman) ve malzemenin ön - deformasyonlarının etkisini incelemek olanağı vardır.^{1,2,8}

İkinci grup doğrusal olmama durumu geometrik doğrusal olmamadır. Bilindiği gibi elastik teori küçük deormasyonları ve yerdeğişimleri kabul eder. Son gelişmelerle birim-deformasyonların büyük olduğu problemlerde çözülebilmektedir.^{1,2,8}

Doğrusal olmayan problemler başlıca üç yöntemle çözülür.'

a) Adım-Adım yöntemi (Incremental procedure)

Bu yöntemin esasını doğrusal olmayan problemleri, her biri doğrusal olan birtakım problemler demeti halinde çözmek oluşturur.

b) Öteleme yöntemi (Iterative procedure)

Bu yöntem problemin bir tüm olarak çözülüp, denge sağlanıncaya dek çözümün düzeltilmesini öngörür.

c) Karışık yöntem (Step-iterative procedure)

"a" ve "b" yöntemlerinin birlikte uygulanması demektir.

Süreksiz mateme

Çatlaklar ve kırıklarla parçalanmış bir kayaç süreksiz malzemedir. Bu gibi malzemenin bulunduğu problemler de

bugün çözülebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi gerçek problemi basit bir şekilde indirgeyerek, probleme gerçeğe yaklaşıklık çözümler getirir.

a) Hayali çatlak yöntemi (Ubiquitous joint analysis)

Hoek⁵ çatlakları sadece yön ve yatımlarıyla temsil etmeyi önermektedir. Bu yaklaşımda problem çatlaksız malzeme varmışçasına çözülür. Bilgisayar programına eklenen bir alt-program çatlağın bulunduğu yön ve açıdaki gerilmelerle, çatlağın daha önce ölçülmüş ve bilinen makaslama mukavemetini karşılaştırır. Böylece herhangi bir göçük veya kaymaya neden olabilecek çatlaklı bölgelerin analizi yapılır ve yapının emniyetlilik durumu irdelenmiş olur.

b) Çekme mukavemeti olmayan malzeme yöntemi (No-tension)

Genellikle kayaçların çekme mukavemetleri çok düşüktür. Bu nedenle kayaçta oluşabilecek çekme gerilmeleri önem kazanır. Problem doğrusal elastik olarak çözülür ve bir bilgisayar altprogramı kayaçta oluşan gerilmeleri kontrol eder. Herhangibir göçük veya kaymaya neden olabilecek çekme gerilmesi bölgeleri belirlenir. Çekme gerilmeleri «gerilme taşınması»⁶ denilen bir yöntemle yok edilerek yapının dengeli ve emniyetli olma durumu araştırılır.

c) Çatlak, Kırık elemanları yöntemi

Bu yaklaşımda kayacın kırık ve çatlakları, kayacın sürekli kısımları için kullanılan farklı bir elemanla temsil edilirler. Çatlak ve kırık elemanları Goodman⁷ tarafından bulunmuş ve formülasyonları tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan problemler alanına giren bu yöntemin kullanılması özel önlemler gerektirir.⁵⁻⁸ Bir diğer nokta hızlı ve geniş bellekli bilgisayara gerek olmasıdır.^{3,9}

Üç-boyutlu analizler

Bu tebliğde verilen örnekler iki-boyutlu analizleri kapsamaktadır. Günümüzde ancak basit üç-boyutlu problemleri çözmek olanağı vardır. Bu, üç-boyutlu analizlerin geniş bilgisayar belleği gerektirmesindedir. Üç-boyutlu analizlerde daha fazla sayıda sonlu eleman ve düğüm noktası olması bu

gereksinimi doğurmaktadır. Yüksek hız ve geniş bellekli bilgisayarların pahalılığı gözönüne alınır, problemin iki-boyutlu çözümü olanağının varolduğu durumlarda, üç-boyutlu analizlere gidilmemesi ekonomik bir çözüm olur.

Çözümün güvenilirliği ve alınması gereken önlemler

Gerçeğe en yaklaşık çözümleri, en ucuza (en az bilgisayar zamanı kullanarak) verecek yaklaşım modelleri seçilmesi bazı koşulların varolmasına bağlıdır.

a) Sonlu eleman tipi

Birçok tebliğ ve bazı kitaplarda^{1*2}- "belirtildiği gibi, eleman tipi çok önemlidir. Doğrusal birim-deformasyon olanağı olan elemanların jeoteknik ve madencilik problemleri için yeterli olduğu görülmüştür.¹ Buna karşın, galeri örneğinde gördüğümüz yüksek dereceli izoparametrik elemanlar iyi netice vermekle beraber, fazla bilgisayar zamanı gerektirdiklerinden daha pahalıya malolmaktadırlar.

b) Sonlu eleman ağı ve eleman büyüklüğü

Kulhaw⁹ ye göre homojen kayaçlarda, basit ve bir simetri ekseni olan problemlerde 125 ile 150 doğrusal birim-deformasyon olanaklı eleman gerekmektedir. Galeri örneğini verdiğimiz çalışmamızda 55 eleman kullanılmıştır. Bu, yüksek dereceli ve hassas elemanlar kullanmakla mümkün olmuştur. Model ağın eleman sayısı kadar önemi olan bir diğer nokta, elemanın büyüklüğüdür. Yüksek gerilme beklenen bölgelerde eleman boyutunu küçültmek gerekir. Bu yapılmadığı takdirde, sayısal yanlış yapma olasılığı artar ve çözüm güvenilirliğini yitirir.

c) Problem sınırlarının seçimi

Analitik çözümlerde yapının sonsuz bir ortak içinde varsayıldığı hatırlanırsa, problem sınırlarının seçiminin önemi artar. Sınırların yapıya çok yakın olması çözüm sonucunu etkiler, buna karşın yapıdan uzak olması, inceleme alanını büyüttüğünden fazla bilgisayar zamanı kullanımına yolaçar. Kulhaw⁹ galeri genişliğinin 3 katı uzaklığı yeterli görürken "Dahi" sınırların yapıdan, yapı genişliğinin 4.5 katı uzak olmasını önermektedir. DahFin önerisinin daha hassas sonuç vermesi olağandır.

d) Arazi gerilmeleri ve yerçekim kuvveti

Homojen kayaçlar için yapılan pek çok sonlu eleman analizinde, yerçekiminin yarattığı gerilmeler değişmez kabul edilmiştir. Kulhawy¹⁰ 150 m.den fazla derinlikler için bunun kullanılabileceğini, ancak daha az derinliklerdeki yapıların analizinde, normal arazi gerilmesinin yanısıra, yerçekim kuvvetinin de analizlere katılması gerektiğini göstermiştir.

e) Yapı kesitinin etkisi

Yapı kesitinin, yerçekim kuvvetinin etkisiyle yapının emniyetine olan etkisini değiştirdiği gözlenmiştir. Yeni bir tebliğ de¹⁰ yeraltı enerji santrali gibi yapılarda, yerçekiminin kayaçlardaki gerilmelere olan etkisi anlatılmıştır.

f) Kazı tekniğinin etkisi

Bazı yapılar kullanma amacına bağlı olarak geniştiriler. Geniş yapılar, özellikle yeraltımdakiler, bir defa da kazılmazlar. Bu nedenle önce bir pilot tünel açılır ve daha sonra adım adım kazılarla yapı son şeklini alır. Bu gibi yapı tekniği uygulandığında, yapıyı çevreleyen kayaçlardaki deformasyonlar ve gerilmeler farklı olacağından, bu adım adım kazı yöntemi sonlu elemanlar analizine konulmalıdır. Bu yaklaşım yöntemi Kulhawy⁹ tarafından tanımlanmıştır.

Sonlu Elemanlar **Metodunun** uygulanabilirliği

Sonlu elemanlar metodunun uygulanabilirliğini ve geçerliliğini tartışmak gerekirse, görüşümüz olumludur. Bütün sınırlamalarına rağmen, hızlı ve ucuz bir analiz yöntemidir. Madencilikte dizayn malzemesi diğer mühendislerin malzemeleri (örneğin çelik, beton) gibi homojen olmadığından, kayaçları modellemek kolay değildir. Bu açıdan sonucun geçerliliğini tartışılabilir.

Tüm bu dezavantajlarına rağmen, yöntem bize yapı çevresindeki kayaçların yerdeğişim ve gerilme durumları hakkında fikir vermesi ve aydınlatması bakımından, tahkimat sisteminin seçiminde önemli yarar sağlar. Hoek ve Londe⁷ sonlu elemanlar analiz yöntemi dönemini, «Sonlu Eleman Çağı» olarak nitelemişlerdir. Bunun nedeni zamanımıza dek

hiçbir analitik yöntemin kaya mekaniğine getiremediği katkıları, sonlu elemanlar analiz yönteminin getirmesidir. Metodun madencilikte kesin dizayn için kullanılması, bazı geliştirmelere bağlıdır ve bu açıdan metodun geleceğine ümitle bakılmalıdır.

REFERANSIAE :

- 1 — Desai, CS.; Abel, J.F. : «Introduction to the Finite Element Method», Van Nostrand Reinhold Com., New York, 1972
- 2 — Martin, H.C.; Carey, G.F. : «Introduction to the Finite Element Analysis», McGraw-Hill Book Com., New York, 1973
- 3 — Cummins, A.B. (Chief Editor) : «SME Mining Engineering Handbook» Vol.1, Society of Mining Engineers of AIME, New York, 1973
- 4 — Woodruff, S.D. : «Methods of Working Coal and Metal Mines» Vol.1, Pergamo'n Press, London, 1966
- 5 — Hoek, E. : «Large Underground Excavations», Restricted Report, Imperial College, 1974
- 6 — Zienkiewicz, O.C.; Valliappan, S.; King, LP. : «Stress Analysis of Rock as a 'No-Tension Material' », Geotechnique 18, 1968
- 7 — Goodman, R.E. and Dubois, J. : «Duplication of Dilatancy in Analysis of Jointed Rocks» Journal of Soil Mech. and Foundations Div. ASCE», 1972
- 8 — Zienkiewicz, O.C. : «The Finite Element Method in Engineering Science», McGraw-Hill, 1971
- 9 — Kulhawy, F.H. : «Finite Element Modelling Criteria for Underground openings in Rock», Int. J. Rock Mech. and Min. Sei and Geomech. Abstracts, Vol.11, 1972
- 10 — Kulhawy, F.H. :
 - a) «Stresses and Displacements Around Openings in Homogeneous Rock»
 - b) «Stresses and Displacements Around Openings in Rock Containing an Elastic Discontinuity»
 - c) «Stresses and Displacements Around Openings in Rock Containing an Inelastic Discontinuity»Int. J. Rock Mech. Min. Sei. and Geomech. Abstracts. Vol.12,1975
- 11 — Dahi, H.D. : «A Finite Element Model for Anisotropic Yielding in Gravity Loaded Rock», Ph. D. Thesis, 1969, Pennsylvania State Univ.
- 12 — Hoek, E. and Londe, P. : «The Design of Rock Slopes and Foundations», General Report, 3th Congress for Int. Soc. of Rock Mech., 1974