

***Galeri Yan Duvarlarında Mevcut
Yumuşak Tabakaların Galeri
Duraylılığına Etkisi Üzerine Bir
Sonlu Elemanlar Analizi***

Finite Element Analysis into the Effect of
Soft Layers Present in Side Walls on the
Stability of A Roadway

Mehmet DOKTAN (*)

ÖZET

Bu yazıda, tüneller etrafındaki kayalar içerisinde mevcut yumuşak tabakaların varlığının genel tünel duraylılığına etkisi incelenmektedir. Bu amaçla sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır.

ABSTRACT

In this paper the effect of the presence of soft layers within the rock around tunnels on the overall stability of a tunnel is investigated. The finite elements method has been utilized for this purpose.

(*) Dr. Maden Y. Müh., İKİ KLI Müessesesi, SOMA

1. GİRİŞ

Madencilik amacıyla açılan tünel, galeri ya da bacalarda çoğu zaman homojen ve tek tip kayaçla karşılaşmak pek mümkün olmamaktadır. Özellikle, açıklık çevresindeki ana kayaç içinde ince bandlar halinde kil ya da göreceli olarak çoğunluktaki kayaçtan daha yumuşak bir ya da birkaç kayaç çeşiti bulunabilmektedir. Bu tür kayaçlar açıklık duraylılığını büyük ölçüde etkilemektedir.

Bu etkinin, her iki kayacın gelen yük karşısındaki farklı deformasyon özellikleri göstermesi ve diferansiyel deformasyon sonucu oluşan çekme ve makaslama gerilmeleri ile ortaya çıktığı bilinmektedir (Doktan, 1983).

Daha çok zamana bağlı olarak ve galeri çevresindeki kayaçların blok olarak galeri içine doğru hareketlenmesi şeklinde gözlenebilen bu deformasyon açıklık, bakım birim maliyetini arttırmakta ve özel durumlarda büyük taramalar gerektirerek açıklık geometrisinin değişmesi ile sonuçlanmaktadır.

Bu nedenle, problemin oluşumunun iyi araştırılmasında ve incelenmesinde büyük ekonomik katkılar sağlanabileceği umulmaktadır. Günümüzde, artık bu tür jeoteknik sorunlar işletmelerde yaygınlaşan bilgisayarlar ve geliştirilmiş paketler ile irdelenebilmektedir (Köse, 1980; Köse 1986).

2. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ

2.1. Giriş

Herhangi bir gerilme (stress) analiz probleminin çözümü, ilgili diferansiyel eşitliklerin kurulmasını ve bir ya da daha fazla sayıda sınır koşullarının (boundary conditions) belirlenmesini gerektirmektedir. Sayısal analizlerin büyük çoğunluğu ise yeraltı açıklıkları gibi düzensiz şekilli yapılarla ilişkilendirilmiş eşitliklerin çözümü için elverişli değildir. Bu yöndeki eleştirilerin artması, enerji kuramlarının işin içine girdiği yeni yaklaşımların gelişmesine ışık tutmuş ve "Sonlu Elemanlar" (Finite Elements) kavramı ortaya çıkmıştır (Senger, 1979). Kaya mühendisliğinin kendine özgü koşulları nedeniyle, üç eksenli elastisite, anizotropi, heferojenite, çatlaklar, zamana bağlı deformasyon, visko elastisite elasto plastik malzeme, aşamalı kazı (incremental excavation) doğrusal olmayan elastisite (non-linear elastisite) ve kı-

rıktı kayaç ortamı gibi özellikleri içeren düzenlemeler yapılmıştır.

Sonlu elemanlar gerilme analizi ile ilgili kuramsal temeller bilinen birçok kaynak tarafından detaylı olarak verilmiş olup, burada yinelenmesine gerek görülmemiştir (Zienkiewicz ve Cheng, 1967; Goodman, 1977; Pafec, 1978, Smith, 1971).

2.2. Kullanılan Paket Program PAFEC-75

PAFEC-75 (Program For Automatic Finite Element Calculations) PAFEC Limited Şirketi tarafından geliştirilmiş ve günlenmekte olan çok güçlü bir programlar paketidir. Paket, iki ya da üç boyutlu problemleri dinamik ya da statik yükleme koşullarında değişken sayıda, yan düğüm noktası üçgen ya da dörtgen elemanlarla modelleme gücünde olup elle ya da otomatik örgü (mesh) yaratma olanağına sahiptir. Çeşitli mühendislik uygulamaları için doğrusal ya da doğrusal olmayan vizko elastik problemleri, doğrusal birim deformasyon ya da doğrusal gerilme (plane strain, plane stress) koşullarında çözüme kavuşturmaktadır.

Paketin şu ana kadar en büyük eksikliği, kayasal yapıların deformasyonel özelliklerini büyük ölçüde kontrol eden kırık, çatlak ve süreksizlik takımlarının çekme dayanımsız analizlerin modellenemiyor olmasıdır.

Bu yazıda sözü edilen çalışma IBM 370 sisteminde NUMAC (Northumbrian Universities Multi Accers Computer) Newcastle, İngiltere bilgi işlem merkezinde gerçekleştirilmiştir.

3. MODELLEMENİN YAPILMASI

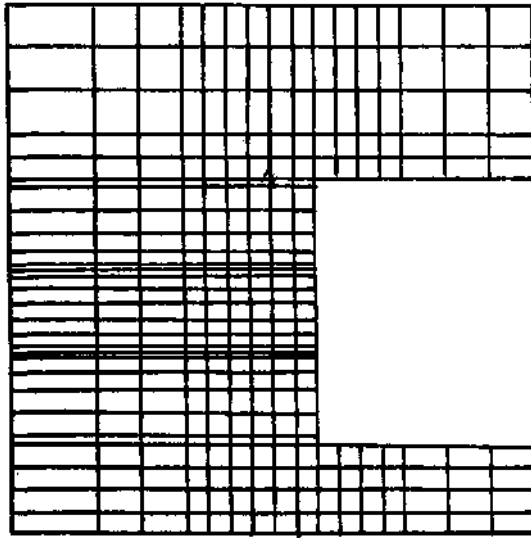
3.1. Örgü (Mesh) Tasarımı

Örgü tasarımında özellikle sınır koşullarının (boundary conditions) gerilme dağılımı üzerinde etkisinin olmaması için örgü büyüklüğüne dikkat etmek gerekir. Kulhawy (1974), açıklık merkezi ile örgü sınırı arazinin 6 yarı çap büyüklüğünden fazla olması gerektiğine işaret etmektedir. Daha büyük örgüler ise bilgisayar kaynaklarının sınırlı olması ve verimli olmaması nedenleriyle seçilememektedir.

iç örgü deseni, paketin blok yaratma özelliği olan PAFBLOCK ile otomatik olarak üretilmiş olup model, 343 dörtgen eleman ve 407 ana düğümden oluşmaktadır. İri elemanlardan

oluşan örgü düzeni hatalı gerilme dağılımı yaratabileceği gibi iyi tasarlanmadan kullanılan ince örgü ise yuvarlama (round-off) yanlışlıkları ortaya çıkartacaktır. Bu nedenle hassasiyetin gerektiği yerlerde bilgisayar kaynaklarının elverdiği ölçüde sık dokulu örgü kullanılmaya dikkat edilmiştir.

Sınır koşulları olarak da, yapının tabanındaki yatay düzlemde düşey yöndeki deformasyon, yapının yan düşey düzleminde ise yatay yöndeki deformasyonlar kısıtlanmıştır. Bu kısıtlamalar da incelenecek olan yapısal özellik gözönünde tutulursa mantıklı görünmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Testlerde kullanılan tipik örgü (mesh) yapısı

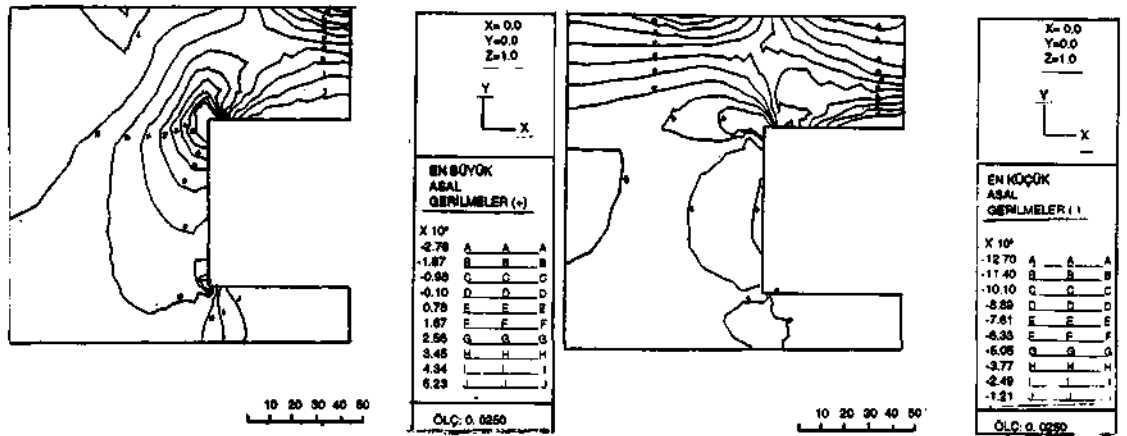
Galeri çevresindeki yatay yatımlı yumuşak tabakaların kalınlıkları her bir denemede 0,05 metreden 0,05'er metre artışlarla 0,25 metreye değiştirildiği için, her bir denemede örgü yapısı çok az oranda değiştirilmiştir. Ancak temsili bir model yapısı Şekil 1'de görülmektedir. Benzer örgü tasarımları çeşitli yazarlarca da kullanılmıştır (Crouch, 1970; Watson 1979, Tincelin, 1972).

3.2. Analiz

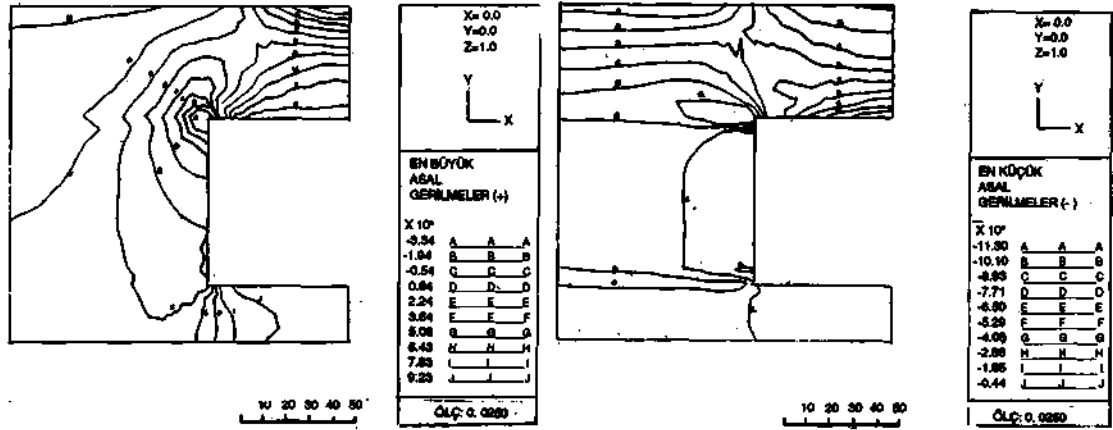
Analizde dört grup deneme yapılmıştır. İlk grup denemelerde galeri çevresindeki gerilme dağılımı, yumuşak tabakanın olmadığı durumu için yapılmış ve kayaç elastisite oranları (Young's Modulus) 0,7 - 14 GPa'ya değiştirilmiş, poisons oranı sabit tutulmuş ve 3 MPa'lık gerilme üst yüzeyden uygulanmıştır (Şekil 2).

İkinci grup denemelerde, biri galeri tavanına diğeri tabana yakın yerde iki adet yumuşak, kalınlıkları 0,05 metreden 0,05'er metre artarak 0,25 metreye kadar çıkan damarın varlığı incelenmiştir. Bu aşamada üst yüzeyden, verilen gerilme 3 MPa olmuş, ana kayaç Young's Modülü 14 GPa, yumuşak damarın ise, 0,7 GPa olarak kabul edilmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4).

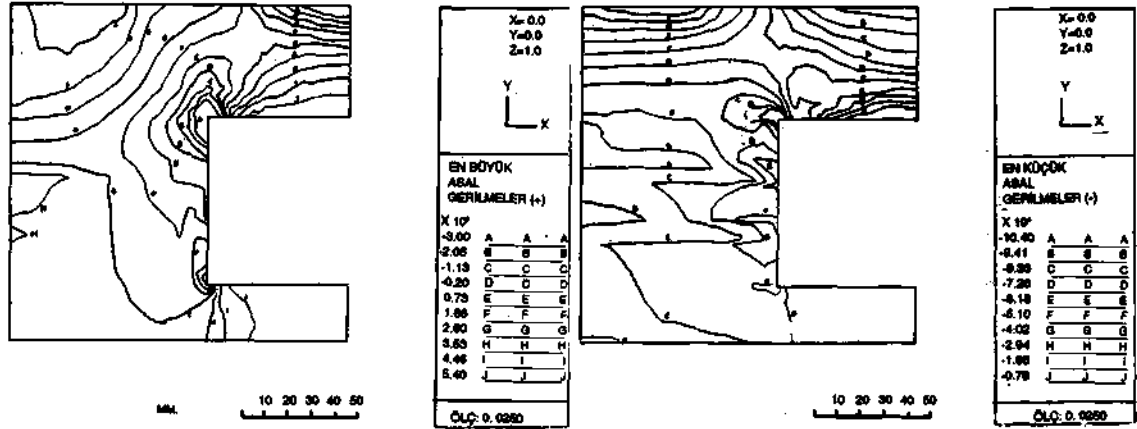
Üçüncü grup denemelerde yumuşak damarın tavan ve tabandan eşit uzaklıkta topuk ortasına doğru konumlandığı varsayılmış ve yine aynı yükleme koşulları denenmiştir (Şekil 5 ve Şekil 6).



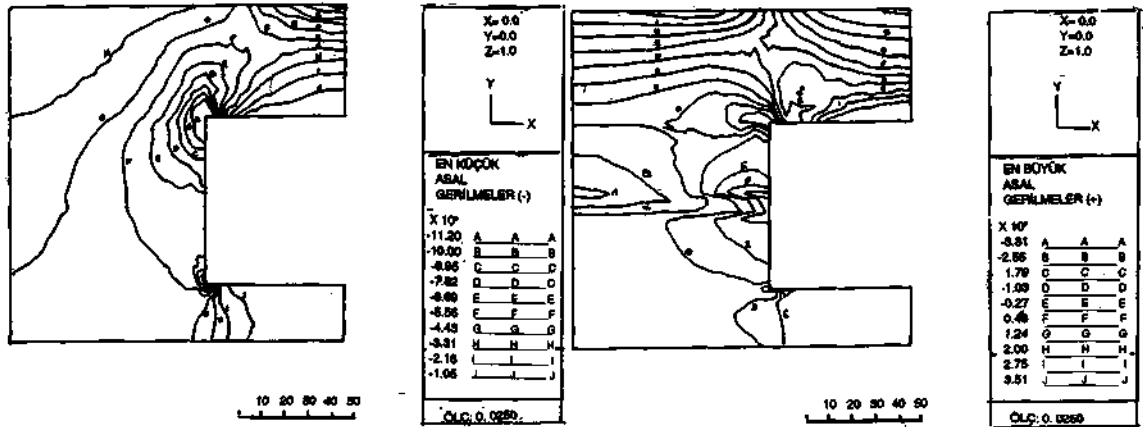
Şekil 2. Yumuşak tabakanın olmadığı durumdaki gerilme dağılımı (küçük ve büyük asal gerilmeler)



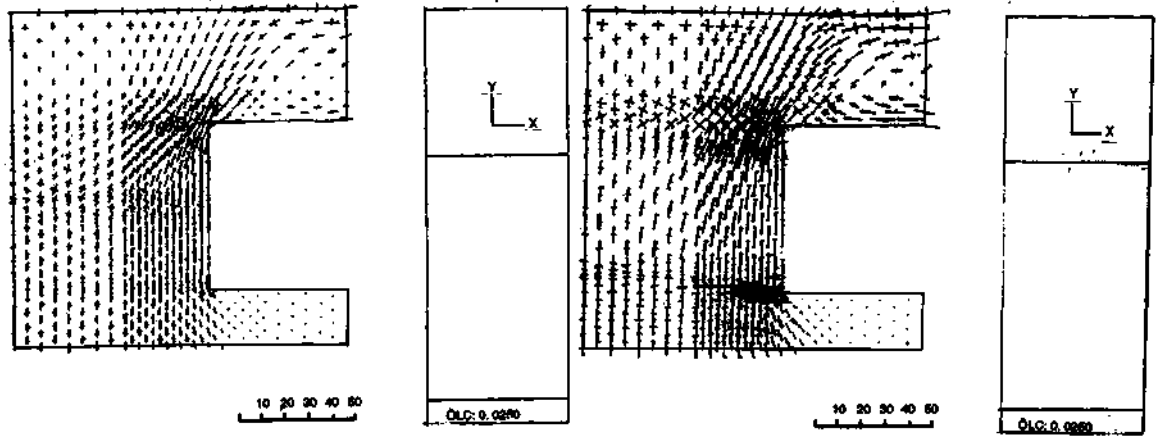
Şekil 3. Yumuşak tabakanın (0-2 m kalınlığında) açıklık tavan ve tabanına yakın olması durumunda gerilme dağılımı (küçük ve büyük asal gerilmeler)



Şekil 4. Yumuşak tabakanın açıklık tavan ve tabanından belli mesafe (açıklık boyunun 1/4'ü kadar) uzaklıkta olması durumunda gerilme dağılımı



Şekil 5. Yumuşak tabakanın açıklık ortasında olması durumunda gerilme dağılımı



Şekil 6. Gerilme dağılım vektörleri

Dördüncü grup denemelerde ise yumuşak tabakanın topuk ortasında konumlandığı ve değişken kalınlıklarda olduğu varsayılmıştır (Şekil 7 ve Şekil 8).

4. ANALİZ SONUÇLARI

Analiz sonuçları burada asal gerilme eğrileri (principal Stress Contours) ve gerilme vektörleri olarak verilmiştir (Şekil 3 - 6).

Elde edilen tüm sayısal çıktıları burada sunma imkanı olmasa da, verilen şekiller analizi yeteri kadar açıklamaktadır.

İkinci grup deneme sonuçları ile ilk grup deneme sonuçları birlikte değerlendirildiğinde:

a. Büyük asal gerilmeler (maximum principal stresses) tavana yakın kısımda çekme gerilmesi olarak görülmekte ve yumuşak tabaka kalınlığı attıkça artmakta, gerilmesi türünde olan küçük asal gerilmeler (minumum principal stresses) ise azalmaktadır.

b. Tavana yakın yerde büyük asal gerilmeler (magnitüde), artan yumuşak tabaka kalınlığı ile artmakta ancak asal gerilme azalmaktadır.

c. Topuk yüzeyine yakın yerlerde, büyük asal gerilmeleri artan yumuşak tabaka kalınlığı ile azalmaktadır.

e. Topuk içlerindeki her iki asal gerilme basma gerilmesi özelliği taşımakta olup, yumuşak tabaka kalınlığı attıkça azalmaktadır.

f. Topuk köşelerinde her iki asal gerilme basma gerilmesi özelliği taşımakta, yumuşak tabaka kalınlığı artışıyla büyük asal gerilmeler

artmakta, küçük asal gerilmeler ise azalmaktadır.

Üçüncü grup denemelerde ilk grup denemelerin sonuçları birlikte değerlendirildiğinde:

a. Tavanın alt kesimlerinde çekme gerilmesi olarak görülen büyük asal gerilmeler, yumuşak tabakanın artmasıyla artar küçük asal gerilmeler ise azalır.

b. Tavanın üst kesimlerinde her iki gerilme de basma gerilmesi türünde olup yumuşak tabaka kalınlığının artmasıyla büyük asal gerilmeler artmaktadır.

c. Topuk çevresinde ise yumuşak tabakanın kalınlığının artmasıyla büyük asal gerilmeler çekme gerilmesi (tensile) niteliği kazanır ve büyüklükleri artar. Buna karşın küçük asal gerilmeler ise basma gerilmesi türünde olup büyüklüğü azalır.

d. Topuk içerisinde her iki gerilme de basma gerilmesi özelliğinde olup büyüklükleri, yumuşak tabaka kalınlığının artmasıyla azalır.

e. Topuk kenarlarında her iki gerilme dağılımı da basma gerilme türünde olup büyüklükleri yumuşak tabaka kalınlığının artmasıyla azalır.

Dördüncü grup çalışmalarla ilk grup çalışmaları değerlendirildiğinde:

a. Tavan alt kısımlarında, açıklık köşelerinde, topuk içerisinde gerilmelerin özellikleri öncekiler gibi olup yumuşak tabaka kalınlığının artmasıyla ortaya çıkan büyüklük değişimi daha az belirginleşmiştir.

b. Topuk çevresinde özellikle yumuşak tabaka dokunağında büyük asal gerilmeler çek-

me özelliğindedir ve yumuşak tabaka kalınlığının artmasıyla oldukça büyük değişiklik göstermektedirler.

Söz konusu çalışmalar doğrusal elastik özellik taşıyan bir yapı için doğrusal birim deformasyon koşullarında gerçekleştirilmiş olup gerçek durumun yaklaşık bir modeli olarak değerlendirilmelidir.

5. SONUÇ

Bir yeraltı galerisi yan duvarlarında ana çevre kayaç içinde yer alan yumuşak tabakaların galeri duraylılığına etkisi dört ana grupta toplanılabilecek sonlu elemanlar modelleriyle araştırılmış ve şu sonuçlara varılmıştır.

a. Galeriye çevreleyen kayaçlarda hiç bir yumuşak tabakanın olmadığı durumda gerilme dağılımı yaygın olarak kabul edilen şeklini almış; galeri köşelerinde yüksek gerilme yoğunlaşmaları, topuk tarafında sıkışmış bir çekirdek (confined core), tavan kirişi alt yüzeylerinde yüksek çekme gerilmeleri oluşmuştur.

b. Tavan ve tabana yakın doğrusal konumda ve kalınlıkları 0,05 metreden 0,25 metreye değişen iki yumuşak tabakanın olduğu durumda gerilme dağılımı ve büyüklükleri değişmektedir. Ancak iki tabakanın birbirinden uzaklığı ve tavan tabanın deformasyona karşı dayanımı sonucu topuk çevresindeki etkisi sınırlı olmuştur.

c. İki yumuşak tabakanın, topuk içerisinde ve tabandan belirli uzaklıklarda tavan olması durumunda ise topuk yüzeyine yakın yerlerde çekme gerilmeleri ortaya çıkar ve büyüklükleri yumuşak tabaka kalınlığı ile artar. Bu gerilmelerinin yönleri ise topuk çevresinde bloklar ya da kavlaklar halinde kaya kopmalarına yol açabilecek konumdadır.

d. Topuk ortasında tek bir yumuşak tabakanın varlığı da topuk yüzeyinde çekme gerilmelerinin ortaya çıkmasına neden olur ve gerilmelerin büyüklükleri de yumuşak tabaka kalınlığı ile büyük ölçüde artar.

Özet olarak, galeri çevresinde yumuşak tabakaların varlığı orijinal gerilme dağılımını büyük ölçüde değiştirmekte ve topuk yüzeyinde kavlak atması olayı pratikteki gözlemlerle uyum sağlamaktadır. Özellikle galeri yan duvarlarında ortaya çıkan çekme gerilmeleri ve diferansiyel deformasyon sonucu ortaya çıkan çekme ve makaslama gerilmeleri buna neden olmaktadır.

KAYNAKLAR

- DOKTAN, M., 1983; "The Long Term Stability of Room and Pillar Workings in a Gypsum Mine", PhD Thesis, Newcastle.
- KÖSE, H., 1986; "Uzunayak Etrafında Oluşan Basınçların Kuramsal Modeller Üzerinde İncelenmesi" Türkiye 5. Kömür Kongresi Zonguldak, s. 297-315.
- KÖSE, H., 1980; "Finite Element Yönteminin Kaya Mekaniği Dalındaki Problemlerin Çözümünde Kullanılışı, Madencilik, Cilt 19, Sayı 3, Ankara, s. 26-34.
- JEAGER, J.C. and COOK N.G.W., 1979 "Fundamentals of Rock Mechanics", 3rd. Ed. Chapman Hall.
- ZIENKIEWICZ, O.C and CHENG Y.K., 1967; "The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics. Mc Graw-Hill, London
- GOODMAN, R.E., 1977; "Finite Element Analysis for Discontinuous Rocks", Numerical Methods in Geotechnical Engineering.
- SMITH, G.N., 1971; "Introduction to Matrix and Finite Element Methods in Civil Engineering". Applied Science Publishers.
- PAFEC MANUALS, 1978; "Pafec", (ed, Pafec House, Nottingham).
- KULHAWY, F.H., 1974; "Finite Element Modelling Criteria for Underground Openings in Rock" Int. Jour. Rock Mechanics and Min. Sd., Vol. 11 pp 465-72.
- CROUCH, S.L., 1980; "Experimental Determinations of Volumetric Strain in Failed Rock", Int. Jour. Rock Mech. and Min. Sci. Vol. 7, pp 589-604.
- WATSON, S.H., 1979; "The Characteristics of Linear Arch Structure and its Application", PhD. Thesis Univ. of Newcastle, Upon Tyne
- TINCELIN E. ve Diğerleri 1972; "A Comparison Between Forecasts calculated by the Finite Element Method and the Actual Behaviour of Mine Workings Using the Small Pillar Method", 5th Int. Conf. Strata Control, London.