

TÜRKİYE 6. KÖMÜR KONGRESİ
The Sixth coal Congress of TURKEY

ODA-TOPUK KÖMÜR MADENCİLİĞİ İÇİN ÜÇ BOYUTLU DURAYLIK
ÇÖZÜMLEMESİ

THREE-DIMENSIONAL STABILITY ANALYSIS
FOR ROOM-AND-PILLAR COAL MINING

Hasan GERÇEK*

Ö Z E T

Bu bildiriye, uç boyutlu gerilme ve duraylık çözümlerinin bazı ülkelerde yaygın olarak uygulanan oda-topuk kömür madenciliğinde tasarıma önemli katkıları olabileceği vurgulanmıştır.

Üç boyutlu sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı bir dizi parametrik çalışma yardımıyla, topuk büyüklüğünün ve yatay birincil gerilmelerin duraylık üzerindeki etkileri incelenmiştir.

A B S T R A C T

In this paper, it is stressed that three-dimensional stress and stability analyses can make important contribution to the design in room-and-pillar coal mining which is widely applied in some countries.

The effects of pillar size and horizontal in-situ stresses on the stability have been investigated through a series of parametric studies, employing the three-dimensional finite element method.

(*) Yrd. Doç. Dr., H.U. Zonguldak Muh. Fak., Maden Müh. Bol., ZONGULDAK

1. GİRİŞ

Oda-topuk üretim yöntemi, yeraltı kömür madenciliğinde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasındadır. Özellikle A.B.D., Kanada, Avustralya ve Güney Afrika Cumhuriyeti gibi ülkelerde, yeraltı madenlerinde üretilen kömürün önemli bir bölümü (örneğin, A.B.D.'de yaklaşık % 90'ı) oda-topuk yöntemleri ile elde edilmektedir.

Uzun bir geçmişi olmasına ve oldukça yaygın olarak uygulanmasına karşılık, yöntemin tabaka kontrolü açısından temel tasarım parametrelerinin (odaların tavan genişliği, topukların boyutları, v.b.) belirlenmesinde daha çok görgül (ampirik) yaklaşımlar kullanılmaktadır (1-3). Öyle ki, çoğu zaman topuklar ve aralarındaki galeriler (odalar) ayrı ayrı ele alınarak verilen koşullardaki en uygun oda-topuk geometrisine ve düzenine ulaşılmaya çalışılmaktadır.

Aslında, birbirinden bağımsız olarak düşünülemez derecede belirgin bir etkileşimi olan topuklar ile aralarındaki galerilerin bu şekilde tasarlanmasında bir çok sakıncaların olduğu kuşkusuzdur. Öte yandan, söz konusu yaygın tasarım yaklaşımlarında, problemin temel özelliği olan üç boyutlu etkileşimin genellikle gözardı edilmesine karşılık, oldukça başarılı sonuçların da elde edildiği de yadsınamaz. Bunda, uzun yıllardır süregelen uygulamalardan kaynaklanan deneyim birikimi ile yerinde Ölçüm ve deneyler temel alınarak tasarım amacıyla geliştirilen görgül bağıntıların ve pratik ölçütlerin katkısı büyüktür.

Yine de, kapsamlı bir oda-topuk tasarımı için; topuktaki, topuklar arasındaki galeriler çevresindeki ve özellikle de galerilerin kesişmesiyle oluşan (üretim sisteminin kaçınılmaz bir parçası durumundaki) kavşaklar çevresindeki ikincil gerilmelerin bütünleme bir yaklaşım içinde incelenmesi gerekmektedir. Başka bir deyişle, üretim sisteminin

temel yapısal unsurlarının bir arada ve üç boyutlu geometride değerlendirilmesi zorunludur. Böyle bir yaklaşımın, mevcut tasarım uygulamalarına yararlı katkıları olacağı kuşkusuzdur. Nitekim, bu amaçla yapılmış bazı çalışmalar* bulunmaktadır (4-6).

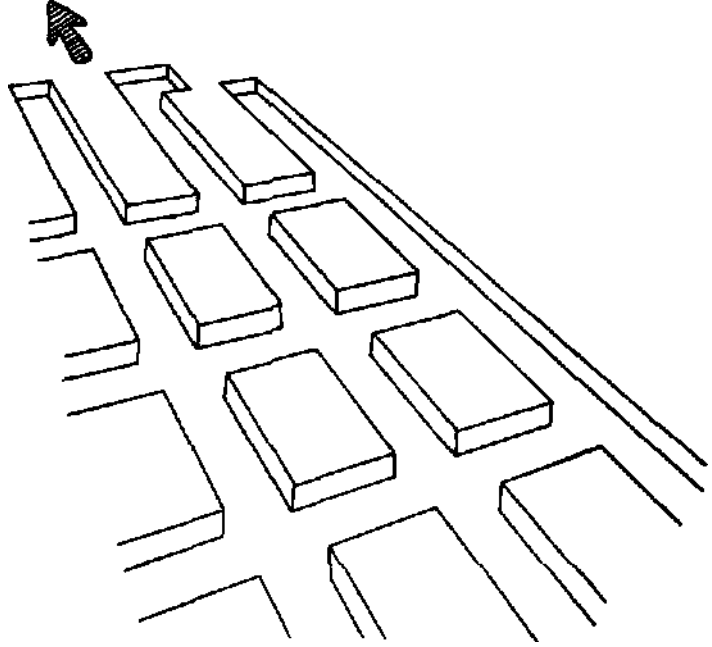
Bu bildiride, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan Uç boyutlu gerilme çözümleri yardımıyla oda-topuk tasarımında yararlı olabilecek bazı sonuçların elde edilişi (7) anlatılmaktadır.

2. PROBLEMİN TANIMLANMASI VE KOŞULLAR

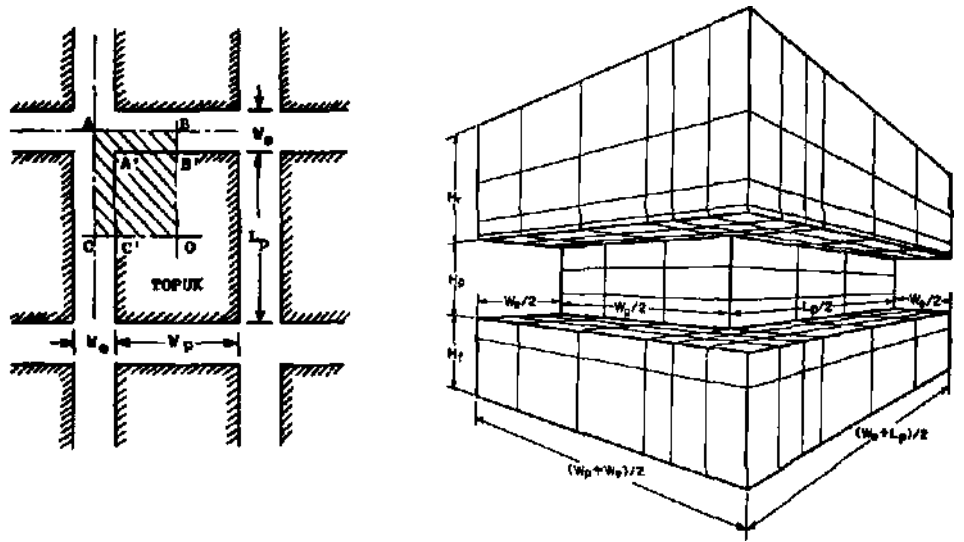
Sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme çözümleri yapılan problemde, plan görünüşü dikdörtgen olan topukların düzenli bir şekilde oluşturulduğu geniş bir oda-topuk üretim panosu gozonünde bulundurulmuştur (Şek. 1). Panonun kenarlarından ve üretim arınlarından uzak olan orta kısımlarında, birbirine dik doğrultuda açılmış olan galerilerin (odaların) ortalarından ve topuk kenarlarının ortasından geçen birbirine dik konumdaki düşey düzlemlere göre tekrarlanan geometrik bir simetri olduğu varsayılmıştır (Şek. 2.a).

Ayrıca, yatay birincil gerilmelerin topuk kenarlarına paralel doğrultuda olduğu varsayımı yardımıyla da plan görünüşteki geometrik simetrisinin sınır koşullarında da geçerli olması sağlanmıştır. Bu durumda, problemin çözümü için plan görünüşte tekrarlanan simetrik birimlerden yalnızca birinin (Şek. 2.a'daki taralı kısmın) incelenmesi yeterli olacaktır.

Böylece, hem topuk içindeki hem de galeriler (odalar) ve oluşturdukları doryol kavşağı çevresindeki ikincil gerilmelerin ve yer değiştirmelerin çözümlenmesini aynı anda sağlayan uç boyutlu sonlu elemanlar modeli belirlenmiştir. Model, daha sonra uygun şekilde uç boyutlu



Şekil 1. Tipik bir oda-topuk panosunun görünüşü



a. Plan görünüş

b. Perspektif görünüş

Şekil 2. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeli

elemanlara bölünmüştür. Normal olarak 297 dörtgen prizmaya bölünen modelde; her bir prizma, 5 adet sabit birim deformasyon dörtyüzlüsünün (constant strain tetrahedron) bir araya gelmesi ile oluştuğu için modelin gerçek eleman sayısı 1495 olup, toplam 494 düğüm noktası vardır (Şek. 2.b).

Modelin yer değiştirme sınır koşulları da o şekilde seçilmiştir ki, hem simetri koşulları sağlanmış hem de modelin serbest cisim hareketi önlenmiştir. Buna göre, modeli sınırlayan düşey düzlemlerdeki düğüm noktalarının, düzleme dik doğrultudaki yer değiştirmeleri önlenirken, modelin tabanındaki düğüm noktaları da hiçbir doğrultuda yer değiştirmeyecek şekilde sabit edilmiştir. Bu sınırlamalar sonucu, modelin toplam yer değiştirme serbestliği derecesi (translational degrees of freedom) 1084 olmuştur. Başka bir deyişle, modelin tüm düğüm noktalarında hesaplanacak olan 494 adet yer değiştirme vektörünün 1482 bileşeninden 1084 tanesi sıfır olmak zorunda değildir.

Bu model temel alınarak, dört farklı topuk genişlik/yükseklik oranı için dört ayrı model oluşturulmuştur. Söz konusu modellerin boyutları Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Sonlu elemanlar çözümlemesinde kullanılan modellerin boyutları

| Boyut | Simge | Model \! | | | |
|----------------------------------|-----------|----------|-----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Galeri (oda) genişliği (m) | W_e | 6 | | | |
| Topuk (üretim) yüksekliği (m) | H_p | 1.5 | | | |
| Topuğun Genişlik/Uzunluk oranı | W_p/l_p | 0.75 | | | |
| Topuğun Genişlik/Yükseklik oranı | VH_p | 2 | 5 | 8 | 12 |
| Topuk genişliği (m) | W_p | 3 | 7.5 | 12 | 18 |
| Topuk uzunluğu (m) | l_p | 4 | 10 | 16 | 24 |

Bütün modeller, Şekil 3'de gösterildiği gibi yatay tabakalara bölünmüştür ve bu tabakalar temel olarak 5 değişik kayaç cinsini içermektedir. Bu kayaçların Özellikleri de Şekil 3'deki çizelgede verilmiştir.

Daha sonra, bu modellerin her biri sırayla üç ayrı birincil gerilme durumunda incelenmiştir. Düşey birincil gerilmenin (dolayısıyla derinliğin) sabit ve $P_v = 7.9 \text{ MPa}$ olarak alındığı bu durumlarda, birbirine eşit olduğu varsayılan yatay birincil gerilmelerin düşey birincil gerilmeye oranı ($k = P^ / P_v$) sırasıyla 0.5, 1 ve 2 olarak değiştirilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde, yalnızca elastik çözümleme sonuçları üzerinde durulacaktır.

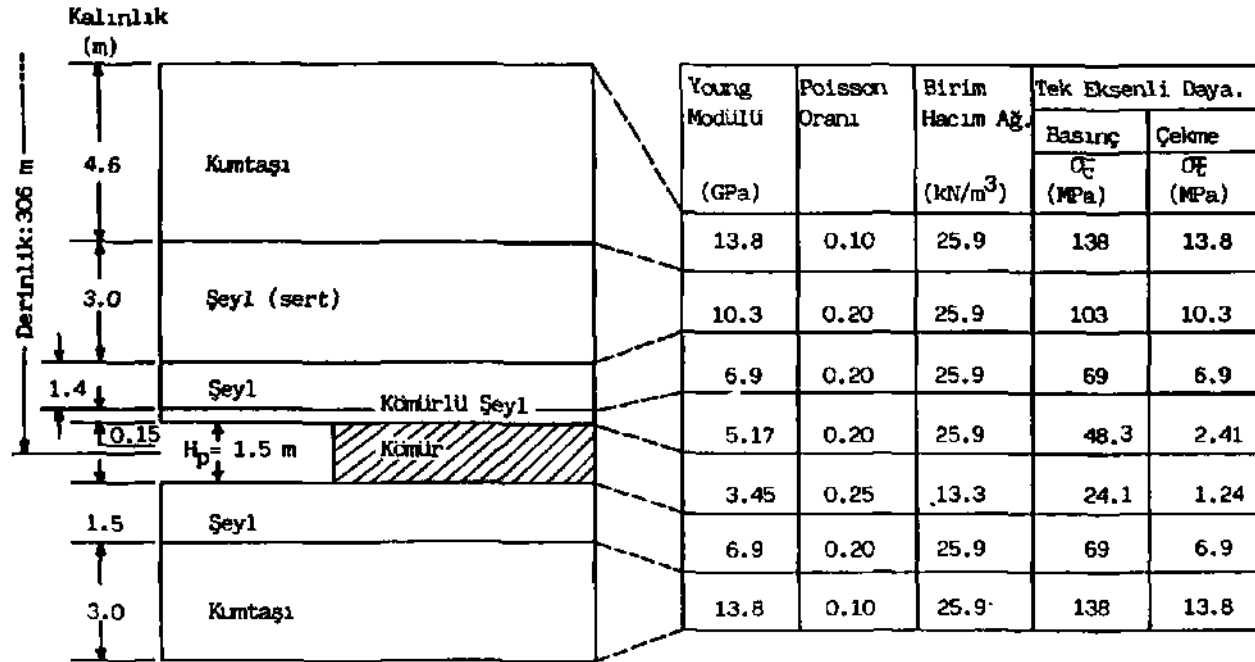
3. DÜŞEY İKİNCİL GERİLMELER

Öncelikle, düğüm noktalarında hesaplanan ikincil gerilme gereyinin (tansörünün) düşey doğrultudaki normal bileşeninin ya da düşey ikincil gerilmenin (O^r) topuk içindeki dağılımı incelenmiştir.

Bilindiği gibi, oda-topuk tasarımında ortalama topuk gerilmesi (O_p), "eşyüklü alanlar kuramı" (tributary area theory) yardımıyla, pratik olarak

$$O^r = P_v (L_p + W_c)(W_p + W_c)/(L_p.W_p) \quad [1]$$

bağıntısından hesaplanmaktadır (8). Yine bilindiği gibi, \hat{o} aslında topuğun yatay kesitinde düzgün bir dağılım göstermemektedir. Ancak, topuk kesitindeki düşey ikincil gerilmelerin ortalama değerinin (\hat{o} 'nin) kuramsal olarak C_u 'ye eşit olması gerekmektedir (5,6). Nitekim, yapılan kontrollere göre; gözönünde bulundurulmuş bütün durumlarda, O^r 'nin çok yaklaşık olarak (% 3'den az bir hata ile) O_p 'ye eşit olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Modellenen kömür damarı ile tabakaların kalınlıkları ve özellikleri

Çözümlemelerin sonuçlarına göre, topuktaki düşey ikincil gerilmeler,

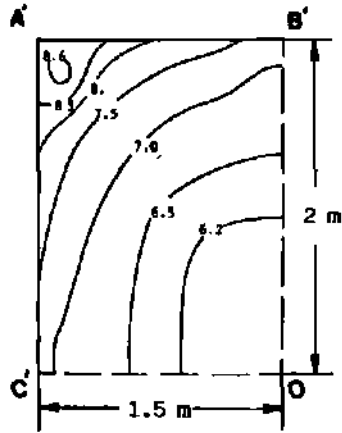
- a. doğal olarak, artan topuk kesiti ile (topuğun genişlik/yükseklik oranı arttıkça) azalmaktadır;
- b. yatay birincil gerilmelerden fazla etkilenmemekte, yalnızca yatay birincil gerilmeler arttıkça hafifçe azalmaktadır;
- c. üç boyutlu bir dağılım göstermektedir; öyle ki, bu gerilmeler en yüksek değerlerine topuğun orta yüksekliğinden geçen yatay kesitlerin kenarlarında ve özellikle köşelerde ulaşırken, en düşük değerlerini de topuğun tabanına yakın kesitte ve topuğun orta kısımlarında almaktadır.

Özellikle bütün modellerde, topuğun orta yüksekliğinden geçen yatay kesitlerdeki düşey ikincil gerilme yığılması katsayısı (C^h/P_v); topuğun dış kısımlarında, ortalama topuk gerilme yığılması katsayısından (CT/P 'den) daha büyük değerler alırken, topuğun orta kısımlarında ise tam tersi bir durum gözlenmektedir (Şek. 4).

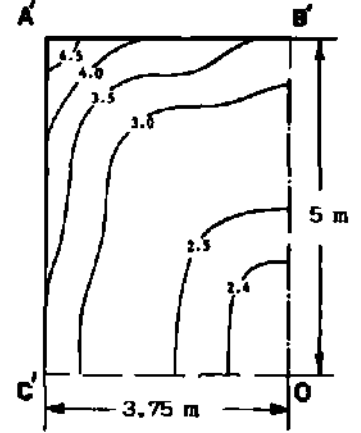
Daha sonra, düşey ikincil gerilme yığılması katsayısının (σ^h/P 'nin), çapraz olarak topuğun merkezinden, topuğun köşesinden ve kavşağın merkezinden geçen düşey düzlemler içindeki değişimi $k = \sigma^h/P = 0.5$ durumu için incelenmiştir. Kavşak tavanındaki ve tabanındaki tabakalarda, CT/P hemen hemen topuk büyüklüğünden bağımsız bir dağılım gösterirken; topuğu da içeren tabakalar sütununda, σ^h/P dağılımının topuk büyüklüğünden önemli derecede etkilendiği gözlenmiştir (Şek. 5).

3. DURAYLIK ÇÖZÜMLEMESİ

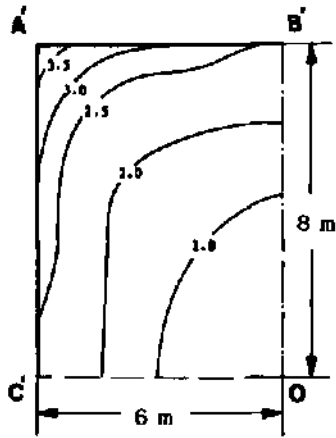
Topuk içindeki ve dörtyol kavşağı çevresindeki ikincil gerilme dağılımının üç boyutlu olacağı zaten beklenen bxr sonucu. Bu arada farkedilen önemli bir husus da şudur: Soz konusu bölgedeki birincil gerilmelerin, kazı nedeniyle ikincil gerilmelere dönüşümünün genel bir



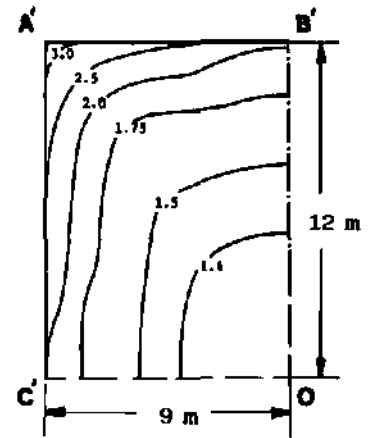
a. $W_p / H_p = 2$
 $\sigma_p / P_v = 7.5 *$



b. $W_p / H_p = 5$
 $\sigma_p / P_v = 2.88 *$



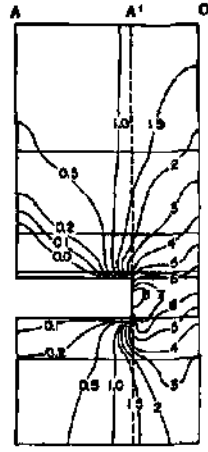
c. $W_p / H_p = 8$
 $\sigma_p / P_v = 2.06 *$



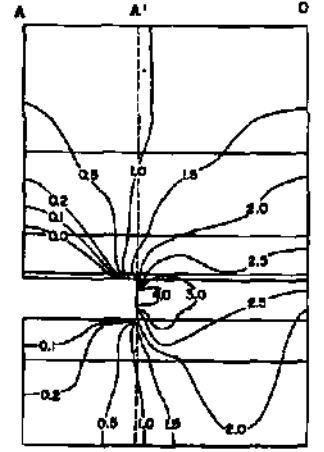
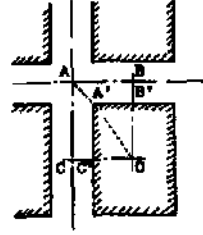
d. $W_p / H_p = 12$
 $\sigma_p / P_v = 1.67 *$

* $\sigma_p / P_v =$ "eşyüklü alanlar kuramı" na göre hesaplanan
 ortalama topuk gerilme yığılması katsayısı

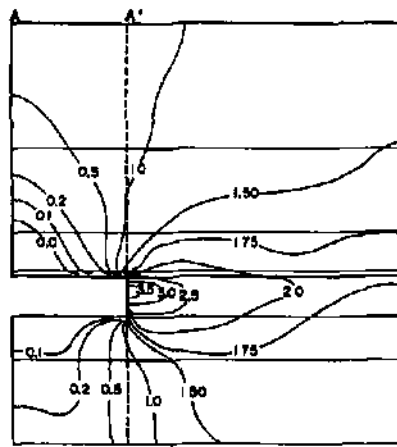
Şekil 4. Düşey ikincil gerilme yığılması katsayısının (σ_p / P_v)
 topuğun orta yüksekliğinden geçen yatay düzlemler
 içindeki dağılımı



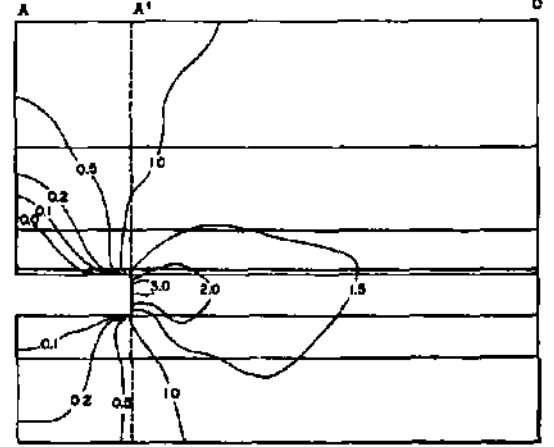
a. $W_p/H_p = 2$



b. $W_p/H_p = 5$



c. $W_p/H_p = 8$



d. $W_p/H_p = 12$

Şekil 5. Düşey ikincil gerilme yığılması katsayılarının ($\hat{\sigma}_v/\hat{\sigma}_0$) topuk merkezî (O), topuk köşesi (A') ve kavşak merkezinden (A) geçen düşey düzlemler içindeki dağılım, $k = \frac{P^c}{P^v} = 0.5$

değerlendirmesini yapabilmek için yalnızca düşey ikincil gerilmelerin incelenmesi yeterli olmamaktadır. Bu bulgu, incelenen bölgede oluşan gerilme değişimlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacak başka bir ölçüte gereksinim olduğunu ortaya çıkarmıştır. Öte yandan; bu amaçla, topuktaki ve odalar çeresindeki noktalarda oluşan ikincil gerilmelerin tüm bileşenlerinin ayrı ayrı incelenmesi ise pratik bir yaklaşım olmayacaktır. Üstelik, akademik açıdan ne kadar ilginç olursa olsun, böyle bir yaklaşım usandırıcı bir çalışma gerektirecek ve sonuçları da önemli genelleştirmeler yapmaya olanak vermeyecek şekilde karmaşık olacaktır.

Yeraltı maden açıklıkları ya da yapılarının yenilme durumuna yakınlığını belirten "duraylık" ve "güvenlik" kavramları jeomekanik açıdan eşdeğer anlamlıdır (5,6). Genelde, her iki kavram da katı maddelerle ilgili ortak fiziksel özellik ve prensipler yardımıyla ve jeolojik malzemelere uygun davranışlar gözönünde tutularak değerlendirilebilir. Bu durumda, "güvenlik katsayısı" olarak bilinen "malzeme dayanımının etkiyen gerilmelere oranı," yararlı olduğu kadar pratik bir duraylık ölçütü olmaktadır (5,6).

İncelenen bölgedeki ikincil gerilme dağılımının üç boyutlu oluşu gözönünde tutularak, amaçlanan duraylık çözümlemesinde kullanılacak olan güvenlik katsayısına ya da duraylık göstergesine temel olarak "geliştirilmiş von Mises yenilme ölçütü" seçilmiştir. Eşyönlü (izotropik) malzemeler için bu ölçüt,

$$(J_2)^* = A I_1 + B \quad [2]$$

şeklinde yazılabilir (9). Burada; J_2 , saptırıcı gerilme gereyinin ikinci değişmezidir (second invariant of the deviatoric stress tensor). Bilindiği gibi, J_2 aslında malzeme bünyesinde (birim hacimde) depolanan biçim değişimi ile ilgili elastik birim şekil değiştirme enerjisinin bir ölçüsüdür. Ayrıca, I_1 gerilme gereyinin birinci değişmezi ve A ile B de

malzeme dayanımına bağlı sabitlerdir. Bu büyüklükler, aşağıda tanımlanmıştır (basınç gerilmesi artı olarak alınmıştır).

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad [3]$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad M$$

$$A = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad [5]$$

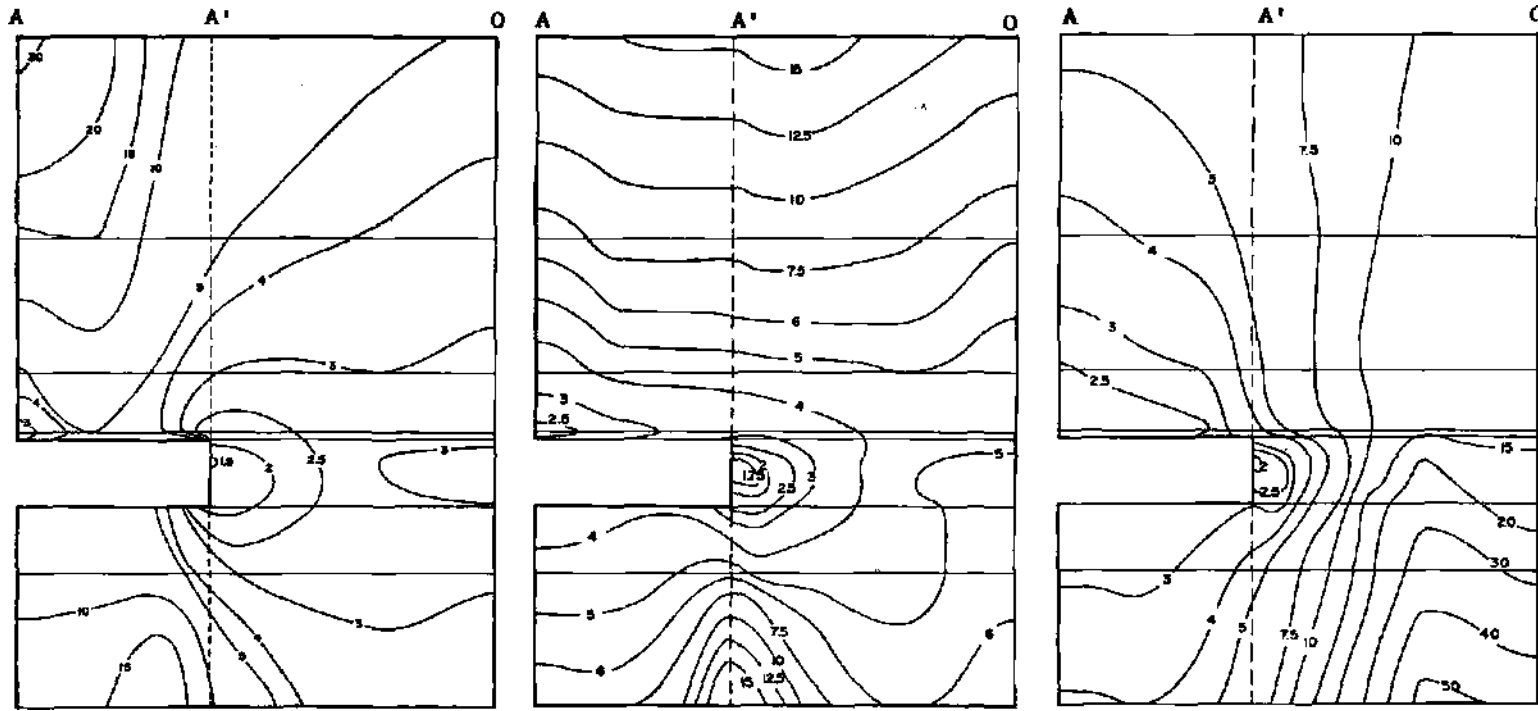
$$B = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_c \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad [6]$$

Yukarıdaki bağıntılarda; σ_T , (T ve CT incelenen noktadaki asal gerilmeler olup, σ_c ve σ_t de malzemenin sırasıyla tek eksenli basınç ve tek eksenli çekme dayanımlarıdır.

Dikkat edilirse, söz konusu güvenlik katsayısı noktasaldır; gerilme gereyi noktadan noktaya değiştiğinde, aldığı değer de noktanın ait olduğu malzemenin dayanım özelliklerine bağlı olarak değişim gösterir.

Elastik çözümlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak düğüm noktalarında hesaplanan güvenlik katsayılarının, çapraz olarak topuğun merkezinden, topuğun köşesinden ve kavşağın merkezinden geçen düşey düzlemler içindeki dağılımı incelenmiştir. Bu dağılımlar, gözöğünde bulunduran bütün birincil gerilme koşullarında ($k = P/P = 0.5; 1; 2$), Model 2 ($W_P/H_P = 5$) ve Model 3 ($W_P/H_P = 8$) için sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Bu şekillerin incelenmesi sonucu elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- a. Beklendiği gibi, topuk büyüklüğü arttıkça topuğun duraylılığı da artmaktadır ve topuğun iç kısmı doğal olarak kanarlarına kıyasla daha duraylıdır.



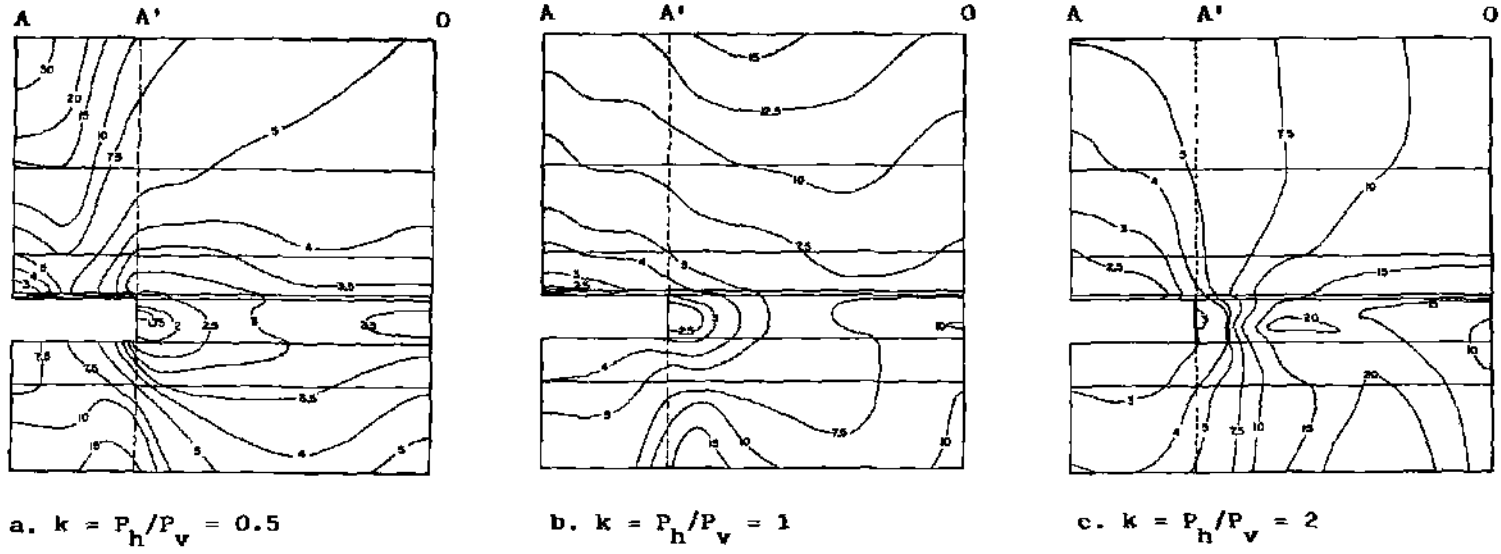
a. $k = \frac{P_h}{P_v} = 0.5$

b. $k = \frac{P_h}{P_v} = 1$

c. $k = \frac{P}{P} = 2$
n v

Şekil 6. Güvenlik katsayılarının topuk merkezi (O), topuk köşesi (A¹) ve kavşak merkezinden (A) geçen düşey düzlemler içindeki dağılımı (Model 2; W/H = 5)

P P



Şekil 7. Güvenlik katsayılarının topuk merkezi (O), topuk köşesi (A') ve kavşak merkezinden (A) geçen düşey düzlemler içindeki dağılımı (Model $3j^W/H = 8$)

- b. Yüksek yatay birincil gerilme koşullarında topuğun duraylılığı artmaktadır.
- c. Kavşak tavanı ve tabanının duraylılığı topuk büyüklüğünden önemli derecede etkilenmemektedir.
- d. Yüksek yatay birincil gerilmeler, kavşak tavanındaki ve tabanındaki tabakaların duraylılığını azaltmaktadır. Öyle ki, yatay birincil gerilmenin düşey birincil gerilmeye oranı ($k = fV/P$) arttıkça, kavşak tavanında bir kubbe geometrisinde oluşan duraylılığı düşük (aşırı gerilme) bölgesinin yüksekliği artmaktadır.

Özellikle sonuncu bulgunun, yüksek yatay birincil gerilmelerin söz konusu olduğu oda-topuk uygulamalarında, kavşaklarda karşılaşılan duraysızlıkları ve gözlenen gocuk tipini açıklamada kullanılmış olması (10), dikkate değer bir gelişmedir.

5. SONUÇLAR

Görüldüğü gibi, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan uç boyutlu gerilme ve duraylık çözümlenmeleri, oda-topuk tasarımına yeni boyutlar kazandırmaktadır. Bu tür bir yaklaşım ile topukların, aralarındaki galenlerin ve kavşakların duraylılığı tek bir model üzerinde ve birlikte değerlendirilebilmektedir.

Özetlenecek olursa; duraylılığın değerlendirilmesi için düşey ikincil gerilme dağılımının tek başına yeterli olmadığı görülmüştür; topuk büyüklüğünün yalnızca topuğun duraylılığını etkilediği, odaların tavan ve tabanındaki duraylılığa önemli bir katkısı olmadığı gözlenmiştir; ayrıca, yüksek yatay birincil gerilme koşullarının topukların duraylılığını olumlu, odaların tavan ve tabanındaki duraylılığı da olumsuz yönde etkilediği anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

1. **PARISEAU, W. G.**, Limit design of mine pillars under uncertainty, Proc. 16th US Symp. on Rock Mechanics, 1977, pp. 287-301.
2. **HEENTIAÄFEKX, Z. T.**, Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A. A. Balkema, Rotterdam, 1984, 272 p.
3. **BIENLAWSKI, Z. T.**, Strata Control in Mineral Engineering, A. A. Balkema, Rotterdam, 1987, 212 p.
4. **PENG, S. S., QKUBO, S.**, Roof bolting patterns at the four-way intersections, AIME Annual Meeting, 1978, Preprint No. 78-AM-5, 15 p.
5. **PARISEAU, W. G., SORENSEN, W. K.**, 3D Mine pillar design information from 2D FEM analysis, Int. J. for Numer. Analyt. Meth. in Geomech., Vol. 3, 1979, pp. 145-157.
6. **PAKCEAÜ, W. G.**, Inexpensive but technically sound mine pillar design analysis, Int. J. for Numer. Analyt. Meth. in Geomech., Vol. 5, 1981, pp. 429-447.
7. **GESÇEK, H.**, Stability of Intersections in Room-and-Pillar Coal Mining, Ph. D. Thesis, The Pennsylvania State University, University Park, Pa., 1982, 186 p.
8. **OBERT, L., DUVALL, W. I., MERRILL, R. H.**, Design of Underground Openings in Competent Rock, US Bureau of Mines Bulletin, No. 587 1960, 36 p.
9. **PARISEAU, W. G.**, Plasticity theory for anisotropic rocks and *lo. ls* Proc. 10th US Symp. on Rock Mech., 1972, pp. 267-295.
10. **HAIWÄ, K., HARAMY, K., CONOVER, D.**, Effect of nigh horizontal s: , DM on coal mine entry intersection stability, Proc. 5th Conf. on Ground Control in Mining, 1986, pp. 167-182.