

Paralel Tünel veya Galerilerin Etkileşimi

Interaction of Parallel Tunnels or Roadways

Hasan GERÇEK (*)

ÖZET

Paralel tünel veya galerilerin etkileşimi, yeraltı açıklarının tasarımında karşılaşılan karmaşık problemlerden biridir. Bu çalışmada, tasarımcılara yararlı olabilecek bazı yaklaşımlar sunulmuş ve paralel açıklıklar çevresindeki ikincil gerilmelerin dağılımı özel olarak göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca, konu ile ilgili yayınlardaki bilgiler kullanılarak bu özel problemin çeşitli yönleri incelenmiştir.

ABSTRACT

Interaction of parallel tunnels or roadways is one of the complex problems encountered in the design of underground openings. In this study, some practical approaches which can be useful for the designers have been presented and a special consideration has been given to the distribution of induced stresses around parallel openings. Also, various aspects of this special problem have been investigated by using the available information in the related literature.

(*) Y.Doç.Dr., H.Ü. Zonguldak Müh. Fak., Maden Müh. Böl., ZONGULDAK

1. GİRİŞ

Yeraltı açıklıklarının duraylılığına etkiyen önemli faktörlerden biri de "komşu açıklıklar arasındaki etkileşim"dir (Bieniawski, 1984). Bu nedenle, madencilik ya da inşaat mühendisliği amacıyla birbirine yakın olarak açılan paralel galerilerin ya da tünellerin tasarımı sırasında, bu yeraltı yapıları arasındaki etkileşimin genel duraylılığa etkisinin göz önünde tutulması gerekir.

Aslında, "paralel tünel ya da galerilerin etkileşimi" mekanik açıdan karmaşık bir problemdir. Çünkü söz konusu açıklıklar birbirine yakın olarak planlandığında, tünellerden birinin kazılmasıyla ortamdaki birincil gerilmeler ikincil gerilmelere dönüşecektir. Böylece, ikinci tünel de birincinin neden olduğu ikincil gerilme alanı içinde acıtırken, ilk tünel çevresindeki ikincil gerilmeler de ikinci tüneline etkisiyle değişime uğrayacaktır. Sonuçta, ortamın yapısal duraylılığı ve davranışı da söz konusu açıklıkların oluşturduğu yeni geometri ve koşullardan etkilenecektir.

Burada sunulan çalışmada, bu özel konuda tasarımcıya yararlı olabilecek bazı pratik yaklaşımların ve seçeneklerin tanıtılması amaçlanmıştır. Öncelikle, paralel tünellerin konumlandırılması üzerinde durulmuş ve bu tür açıklıkların etki alanı ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Daha sonra, paralel tünellerin çevresinde oluşan ikincil gerilmelerin hesaplanması için kullanılan bazı yöntemler ve bağıntılar tanıtılmıştır. Son olarak da kazı aşamalarının paralel açıklıkların duraylılığına etkisi değerlendirilmiştir.

2. PARALEL TÜNELLERİN KONUMLANDIRILMASI

Paralel tünel ya da galerilerin konumlandırılmasında, bunların birbirini ne dereceye kadar etkilemelerine izin verilebileceğine karar vermek, sonuçta da arada bırakılacak güvenli bir topuğun boyutlarını belirlemek mühendisin görevleri arasındadır. Bu konuda tasarımcıya yardımcı olabilecek bazı görgül (ampirik) yaklaşımlar vardır. Örneğin, Amerikan Ordu Mühendisleri Grubu, iki ya da daha fazla sayıda paralel tüneller planlandığında, bunlar arasında bırakılması gereken güvenli bir topuk genişliğinin yüksek nitelikli ve sağlam kayada tünel çapının en az 1 ile 1.3 katı, düşük nitelikli ve zayıf kayada ise tünel çapının en az 3 katı olmasını önermektedir (US Army Corps of Engineers, 1978).

Aslında paralel tünellerin etkileşimi probleminin çözümüne kuramsal bir yaklaşım getirmek için "yeraltı açıklığının etki alanı" kavramı kullanılabilir. Bu alan, bir yeraltı açıklığının kazıdan önceki birincil gerilmeleri, önceden belirlenen bir dereceye kadar değiştirdiği bölge olarak tanımlanmaktadır (Brown, 1985). Etki alanı kavramı, yeraltı açıklığının "yakın çevresi" ile "uzak çevresi" arasındaki farklılığı ortaya koyarak bu tür yapıların konumlandırılmasında ve tasarımında kolaylık sağlar.

Doğal olarak, bir yeraltı açıklığı çevresindeki gerilme dağılımına etki eden açıklık geometrisi ile birincil gerilmelerin doğrultu ve büyüklükleri, aynı zamanda açıklığın etki alanının genişliğini belirleyen faktörler olacaktır. Ancak, etki alanının büyüklüğünün açıklığın tam şekline değil de daha çok açıklık kesitinin eksenler oranına bağlı olduğu bilinmektedir (Brown, 1985). Bir yeraltı açıklığı çevresindeki gerilmelerin dağılımını veren kapalı ya da tam matematiksel çözümler, bu açıklığın ortamdaki birincil gerilmeleri belirli bir dereceye kadar değiştirdiği etki alanının boyutlarını belirlemede kullanılabilirler. Örneğin, dairesel kesitli bir tüneline etki alanının genişliği Kirsch'in çözümü (Kirsch, 1898); elips kesitli bir galerinin etki alanının büyüklüğü de Inglis'in çözümü (Inglis, 1913) kullanılarak bulunabilir.

Nitekim, genişliği "W" ve yüksekliği "H" olan, düşey doğrultuda "P" ve yatay doğrultuda "k.P" büyüklüğünde etkiyen birincil gerilme alanında açılan elips kesitli bir açıklığın (yaklaşık olarak yine elips şeklinde olması beklenen) etki alanının boyutları (Brown 1985) tarafından verilmektedir. Bu etki alanı içinde oluşan ikincil asal gerilmeler (a ve a_{m,j_n}), birincil gerilmelerden, en büyük birincil gerilmenin (P_{max}) en fazla "% m"si kadar sapmaktadır (Şekil 1). Yani etki alanı dışında

$$(|\sigma_{max} - P_{max}| / P_{max}) < \% m \quad (1a)$$

ya da

$$(|\sigma_{min} - P_{min}| / P_{max}) < \% m \quad (1b)$$

olmaktadır. Burada, $k < 1$ ise $P_{max} = P$ ve $P_{min} = k.P$; $k > 1$ ise $P_{max} = k.P$ ve $P_{min} = P$ olduğu unutulmamalıdır.

Etki alanının genişliği (W); aşağıdaki iki eşitlikten büyük değer vereni ile belirlenir.

$$W = H \left\{ 50.5 \left[q(q+2) - k(3+2q) \right] / m \right\}^{1/2} \quad (2a)$$

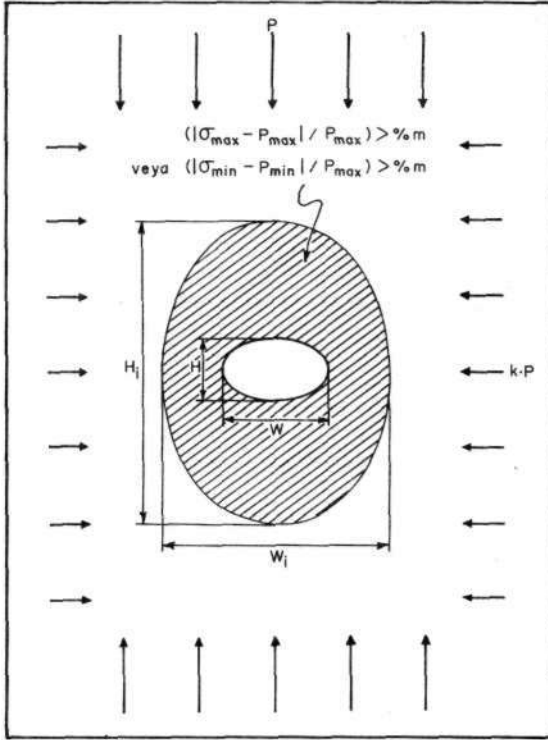
$$W = H \left\{ 5 \left[50(k+q^2) / m + kq^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (2b)$$

Etki alanının yüksekliği (Hj) de yine aşağıdaki iki bağıntıdan büyük değeri ile hesaplanır.

$$H = H \left\{ 50.5 \left[k(1+2q) - q(3q+2) \right] / m \right\}^{1/2} \quad (3a)$$

$$H = H \left\{ \left[50(k+q^2) / m + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (3b)$$

Burada, $q=W/H$ olup, $k < 1$ için $S = 1$ ve $k > 1$ için $S = 1/k$ alınmalıdır. Ayrıca, k ve q 'nun değerlerinin 5'ten büyük olması durumunda W_j 'nin, k ve q 'nun 0.2'den küçük olması durumunda ise H_j 'nin % 15 kadar artırılması önerilmektedir (Brady ve Brown, 1985).

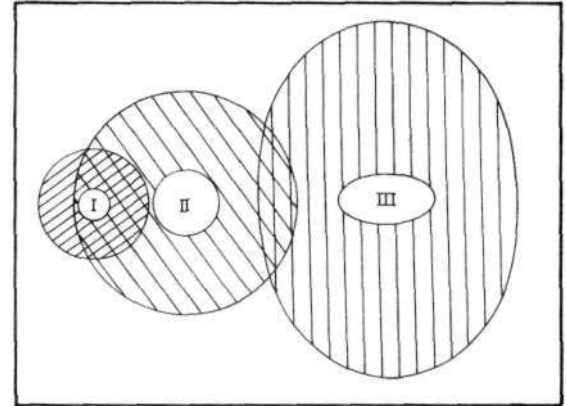


Şekil 1. Elips kesitli bir yeraltı açıklığının etki alanı (Brady ve Brown, 1985).

Yaygın uygulanmaya göre, bir yeraltı açıklığının gerçek etki alanı pratik olarak ikincil asal gerilmelerin birincil asal gerilmelerden farkının, en büyük birincil gerilmenin + % 5'i kadar değişiklik gösterdiği noktalar ile sınırlanmaktadır (Brady ve Brown, 1985; Brown, 1985). Yani, yukarıdaki eşitliklerde $m = 5$ alınarak boyutları belirlenecek

olan etki alanı dışındaki noktalarda açıklığın varlığı pratik olarak algılanmayacaktır. Bu durumda, kazı kesiti komşu paralel açıklığın % 5'lik etki alanı dışında kalan herhangi bir tünelim tasarımında, çevrede başka bir açıklık bulunmadığı varsayılabilir. Örneğin, hidrostatik birincil gerilme alanı içinde birbirine paralel olarak planlanan, aynı büyüklükteki dairesel iki tünel arasında bırakılacak topuğun genişliği tünel çapının yaklaşık iki katı kadar tutulduğu sürece bu tünellerin mekanik etkileşimi yoktur denilebilir.

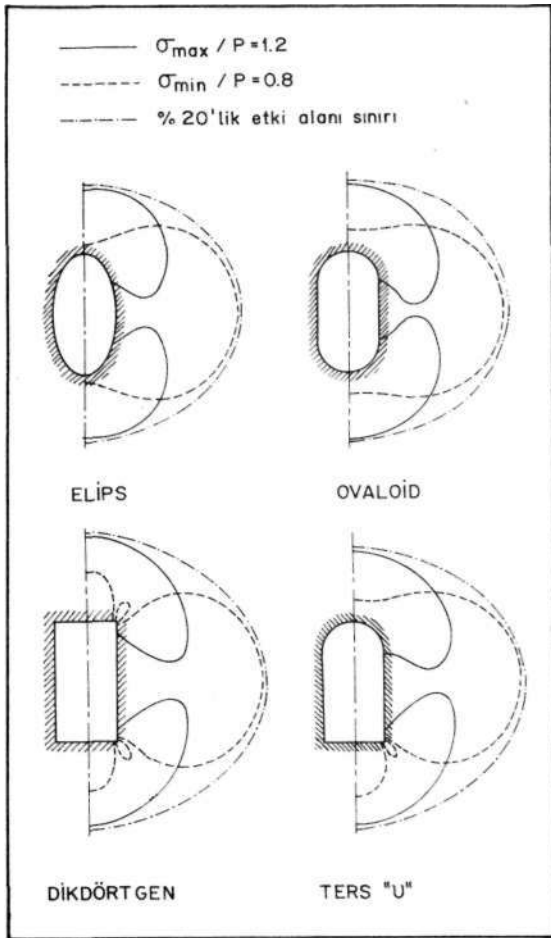
Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak, farklı geometride üç paralel tünelin hidrostatik birincil gerilme alanı içindeki % 10'luk etki bölgeleri belirlenmiş ve Şekil 2'de örnek olarak gösterilmiştir. Şekildeki I ve II tünellerinin kesitleri dairesel fakat çapları farklı, II ve III tünellerinin de kazı kesitleri eşit fakat şekilleri farklıdır. Burada, belirli bir birincil gerilme alanı içinde oluşturulan açıklık çevresindeki etki alanı geometrisinin açıklık boyutlarına ve şekline bağımlılığı kolayca görülebilmektedir. Şekil 2'den de anlaşılacağı gibi; I tüneli, II tünelinin % 10'luk etki alanı içinde kalırken; II tüneli de I ve III tünellerinin etki alanları dışındadır.



Şekil 2. Çeşitli yeraltı açıklıklarının hidrostatik birincil gerilme alanında oluşturdukları %10'luk etki alanları.

Öte yandan kesitleri basit bir geometride olmayan paralel galeri ya da tünellerin konumlandırılması da söz konusu olabilir. Öyle ki, tasarımcının açıklık çevresindeki gerilme dağılımını bulmasına yarayacak matematiksel bir çözüm bulunabilir ya da açıklığın etki alanının belirlenmesi için kullanılması gereken bağıntılar pratik sayılmayacak derecede karmaşık olabilir. Bu durumda, daha başka yaklaşımların kullanılması gerekir. Örneğin, sınır elemanları gerilme çözümlemesi yöntemi kullanıla-

arak, değişik kesitli bazı açıklıkların hidrostatik birincil gerilmeler durumunda çevrelerinde oluşan % 20'lik etki alanları belirlenmiş ve Şekil 3'de gösterilmiştir. Burada, şekilleri farklı fakat "genişlik/yükseklik oranı" aynı ($W / H = 0.5$) olan bu açıklıkların % 20'lik etki alanlarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu daha önce de belirtildiği gibi, bir açıklığın etki alanının büyüklüğünün, açıklığın tam şekline değil de daha çok kazı kesitinin eksenler oranına bağlı olacağını kanıtlamaktadır. Ayrıca, dikdörtgen kesitli açıklığın etki alanı boyutlarının elips kesitli olandan yaklaşık % 15-20 kadar daha büyük olması, 2 ve 3 eşitlikleri ile (elips kesitli açıklıklar için) verilen bağıntıların yaklaşık olarak benzer (aynı w/H oranlı) diğer açıklıklara da uygulanabileceğini göstermektedir.



Şekil 3. Genişlik/yükseklik oranları 0.5 olan çeşitli yeraltı açıklıklarının hidrostatik birincil gerilme durumundaki % 20'lik etki alanları.

Yine de bu bağıntıların kusursuz ortam özellikleri ve elastik malzeme davranışı varsayımları yapı-

larak elde edildiği unutulmamalıdır. İkincil gerilmeler nedeni ile açıklık çevresindeki malzemede yenilme bekleniyorsa, yenilme bölgesinin boyutlarının açıklığın etkin boyutları olarak alınması, tasarımda biraz kaba fakat güvenlik bir yaklaşıklık sağlayacaktır (Daemen ve Fairhurst, 1978).

3. PARALEL TÜNELLERİN ÇEVRESİNDEKİ GERİLMELER

Paralel tünel ya da galerilerin konumlandırılması her zaman mühendisin seçenekleri arasında bulunmayabilir. Başka bir deyişle; söz konusu açıklıklar, proje gereğince birbirlerinin etki alanları içinde planlanmış olabilirler. Bu durumda, tasarımcı bu açıklıkların mekanik etkileşiminin genel duraylığa etkisini teknik girişimler öncesi bilmek isteyecektir. Bu doğrultuda akla ilk gelen yaklaşım, gerilme çözümlemesi yöntemleri kullanılarak paralel tünel sisteminin duraylığının incelenmesidir.

Bilindiği gibi, yeraltı açıklıkları çevresindeki gerilmelerin çözümlemeleri matematiksel, fiziksel model ve sayısal yöntemler olmak üzere başlıca üç tür yaklaşımla yapılabilmektedir. Nitekim, paralel tünellerin etkileşimi problemi, çeşitli araştırmacılar tarafından bu üç yöntemle de incelenmiştir. Bu bölümde, bu çalışmalardan örnekler verilerek, tasarımcıya yardımcı olabilecek bazı pratik çözümler sunulacaktır.

3.1. Matematiksel Yaklaşımlar

Bir yeraltı açıklığı çevresindeki gerilme dağılımını veren tam matematiksel çözümlerin çoğu ancak açıklık geometrisi ile problemin sınır koşullarında basitleştirmeler ve açıklığı çevreleyen ortamın mekanik özellikleri ile davranışında idealleştirmeler yapılarak elde edilebilmektedir. Bu bağıntıların iki boyutlu (kesitsel boyutları uzunluğuna kıyasla küçük ve değişmeyen) bir yeraltı açıklığına uygulanabilen bir çoğu da "sonsuz geniş plaka içindeki delik çevresindeki elastik gerilmelerin dağılımı" problemlerinin çözümleri yardımıyla bulunmuştur. Benzer şekilde, düzgün kenar yükleri altındaki sonsuz büyük plaka içinde açılmış delikler çevresindeki elastik gerilmelerin dağılımı probleminin çözümleri, yeryüzünden yeterli derinlikte ve kusursuz sayılabilecek bir ortamda açılan paralel tünel ya da galeriler çevresindeki elastik ikincil gerilmelerin dağılımını belirlemede kullanı-

labilirler. Ne var ki, bu çözümler yalnızca dairesel kesitleri tünellere uygulanabilmektedir.

3.1.1. Sonsuz Plaka İçindeki Delikler Çevresindeki Gerilmeler

Bu konudaki belli başlı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Howland (1935), merkezleri aynı doğrultu üzerinde olan, eşit aralıklarla ve aynı çapta açılmış sonsuz sayıdaki dairesel deliğin, sonsuz genişlikteki plaka içindeki gerilmelerin dağılımına etkisini incelemiştir. Özellikle, plakaya uygulanan düzgün kenar yüklerinin, deliklerin merkezlerinden geçen doğrultuya paralel ve dik olduğu durumlar için çözümler sunmuştur.

Howland ve Knight (1939), bir plaka içinde açılmış eşit büyüklükteki dairesel deliklerin, çeşitli düzeylerde ve gruplar halinde dizilmeleri ile ilgili problemlere uygulanabilen gerilme ilişkilerini vermişlerdir.

Ling (1948), sonsuz plaka içinde açılmış ve aralarındaki uzaklık değişebilen, iki eşit dairesel delik çevresindeki gerilmelerin dağılımı problemini incelemiş ve plakaya uygulanan yüklerin her yönden eşit, dairelerin merkezinden geçen doğrultuya dik ve paralel olduğu üç ayrı durum için çözümler elde edilmiştir.

Haddon (1967), yine sonsuz plaka içinde açılmış ve aralarındaki uzaklık değişebilen farklı büyüklükteki iki dairesel delik çevresindeki gerilmeleri, deliklerin merkezlerinden geçen doğrultu ile herhangi bir açı yapabilen tek eksenli gerilme durumu için incelemiştir.

Tominaga ve Kinoshita (1972), sayıları 2 ile 5 arasında değişen ve birbirinden eşit uzaklıkta fakat çeşitli konumlarda dizilmiş, aynı çaplı dairesel açıklıkların yüzeyindeki gerilmeleri ve bunların asal değerlerini veren diyagramları sunmuşlardır.

Yukarıda sözü edilen çalışmalarda, matematiksel yaklaşımlar ile elde edilen bağıntıların hemen hepsi pratik sayılmayacak derecede karmaşık olup, bunlar daha çok akademik uygulamalar açısından değer taşımaktadırlar. Yine de paralel tünellerin etkileşiminin incelenmesinde kullanılabilecek göreceli basit bağıntılar elde etmek olasıdır. Bu amaçla, Ling (1948) tarafından verilen çözümlerin

(açıklık yüzeyindeki gerilmeleri veren şekillerinin) uygun olarak düzenlenmesi ile iki eksenli gerilme alanında açılmış, paralel ve eşit çaplı iki dairesel tünel yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeleri veren bir bağıntı geliştirilmiştir.

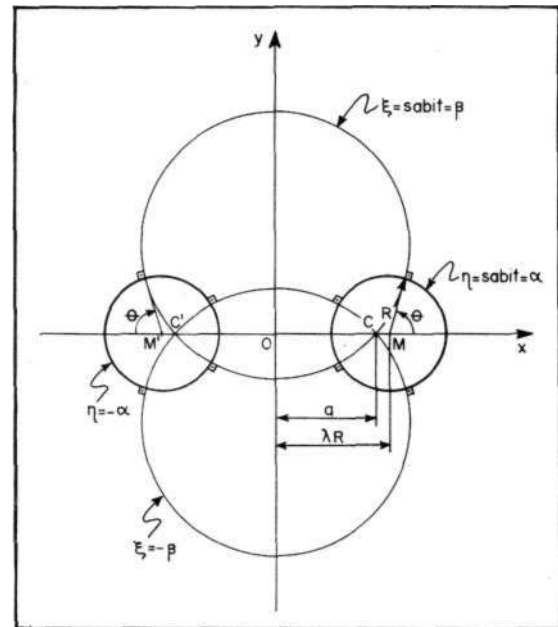
3.1.2. İki Kutuplu (Bipolar) Koordinatlar

Ling'in (1948) özgün çözümü iki kutuplu (bipolar) koordinat sisteminde elde edildiği için önce bu sistem kısaca tanıtılacaktır. İki kutuplu koordinatlar (ξ, η) alışagelmış dikdörtgensel koordinatlar (x, y) arasındaki ilişki

$$x = a \cdot \sinh \eta / (\cosh \eta - \cos \xi) \quad (4a)$$

$$y = a \cdot \sin \xi / (\cosh \eta - \cos \xi) \quad (4b)$$

bağıntılarıyla verilmektedir. Burada, ξ bileşeninin sabit değerleri ($\xi = \pm \beta$) için merkezi y ekseninde bulunan, yarıçapı $|a / \sin \beta|$ olan ve x eksenini $C(a; 0)$ ile $C(-a; 0)$ noktalarında kesen çemberler elde edilir (Şekil 4). Bunlar,



Şekil 4. İki kutuplu (bipolar) koordinat sistemi.

$$x^2 + (y - a \cdot \cot \beta)^2 = a^2 / \sin^2 \beta \quad (5a)$$

genel denklemi ile tanımlanırlar. Öte yandan, 17 bileşeninin sabit değerleri ($\eta = \pm \beta$) için de $|y| \geq a$ çember ailesini dik olarak kesen çemberler elde edilir. Bunların merkezleri, x ekseninde baş

noktasından "+ a. coth d' kadar uzakta olup, yarıçapları " | dif sinh a.V dir (Şekil 4). Bu çemberler ise

$$(x - a \cdot \coth \gamma)^2 + y^2 = a^2 / \sinh^2 \gamma \quad (5b)$$

genel denklemi ile tanımlanmaktadır.

Ling'in (1948) çözümünde, paralel tünellere karşılık gelen dairesel deliklerin yüzeyleri de işte bu ikinci çember ailesi ile tanımlanmaktadır. Verilen $T = a$ sabit değeri ile belirlenen M merkezli bir çemberin y eksenine göre simetriği de $r\phi$ — «alınarak elde edilen M' merkezli fakat eşit yarıçaplı başka bir çember olacaktır (Şekil 4). Bunların yarıçapını " $R = a/\sinh a$ " ile ve merkezleri arasındaki uzaklığı " $2 \times X R$ " ile tanımlarsak, verilen bir X (açıklıklar arası belirli bir uzaklık) değeri için $17 = a$ koordinat bileşeni,

$$a = \operatorname{arccosh} X \quad (6a)$$

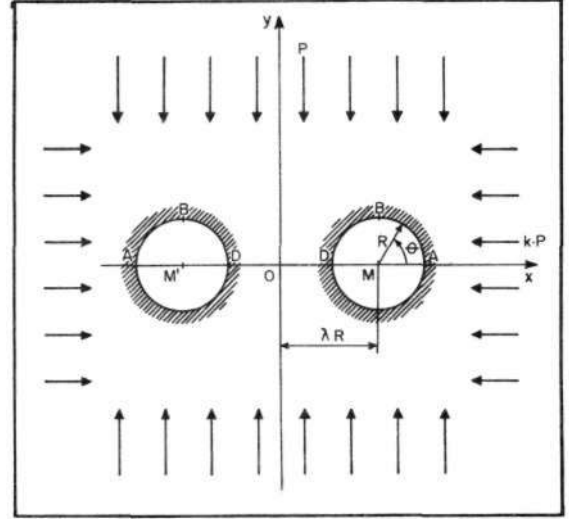
bağıntısından bulunarak çemberler belirlenir. Ayrıca, $17 = a$ çemberi üzerindeki bir noktayı M merkezine birleştiren doğrultunun artı x eksenine göre dönüşün tersi yönünde yaptığı kutupsal açı " ϕ " olsun. Bu noktanın iki kutuplu koordinatlardaki $\xi = \beta$ bileşeni de

$$|\beta| = \arccos[(1 + X \cdot \cos \phi) / (A + \cos \phi)] \quad (6b)$$

bağıntısından bulunur. Dikkat edilirse, söz konusu noktanın y eksenine göre simetriği $T = -$ «çemberi üzerinde olup, bu noktayı M' merkezine birleştiren doğrultunun eksi x eksenine göre dönüşü yönünde yaptığı kutupsal açı yine " ϕ " dır (Şekil 4).

3.1.3. Paralel İki Dairesel Tünel Yüzeyindeki Gerilmeler

Burada çözümü sunulan probleme göre, yarıçapları " R " ve merkezleri arasındaki uzaklık " $2 AR$ " olan paralel iki dairesel tünel, yüzeyden oldukça derinde, düşey bileşeni " P " ve yatay bileşeni de " $k.P$ " ile tanımlanan birincil gerilme alanında yer almaktadırlar (Şekil 5). Ayrıca, bu açıklıkların doğrusal elastik davranış gösteren türdeş (homojen) ve eşyönlü (izotropik) bir ortamda açıldığı varsayılmaktadır. Bu tüneller birbirlerine teğet olmadıkça ($X > 1$), koordinatları $T = |a|$ ve $\xi = |\beta|$ (6a ve 6b eşitlikleri) ile verilen (açıklık yüzeyindeki) noktalarda oluşan tegetsel gerilme yığılması katsayısı



Şekil 5. İki paralel tünel probleminin geometrisi ve koşulları.

$$\text{On } I P = 2(\cosh a - \cos \beta)$$

$$\left\{ \frac{[k+2(1-k)A \cdot \sinh^2 a] (\sin^2 a + 4C \cdot \sinh a)}{0.5 + \tanh a \cdot \sinh^2 a - 4B} \right.$$

$$\left. + 2(1-k)D \right\} \quad (7)$$

bağıntısından bulunabilir. Burada A, B, C ve D katsayıları

$$A = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sinh 2na + n \cdot \sinh 2a} \quad (8a)$$

$$B = 2 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\exp(-na) \cdot \sinh na + n^2 \cdot \sinh a! \cdot (n \cdot \sinh a + \cosh a)}{n(n^2 - 1) (\sinh 2na + n \cdot \sinh 2a)}$$

$$C = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sinh n a \cdot \cos n \beta}{\sinh 2na + n \cdot \sinh 2a} \quad (8c)$$

$$D = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n \cdot \sinh na \cdot \sinh a - \cosh na \cdot \cosh a) \cos n \beta}{\sinh 2na + n \cdot \sinh 2a} \quad (8d)$$

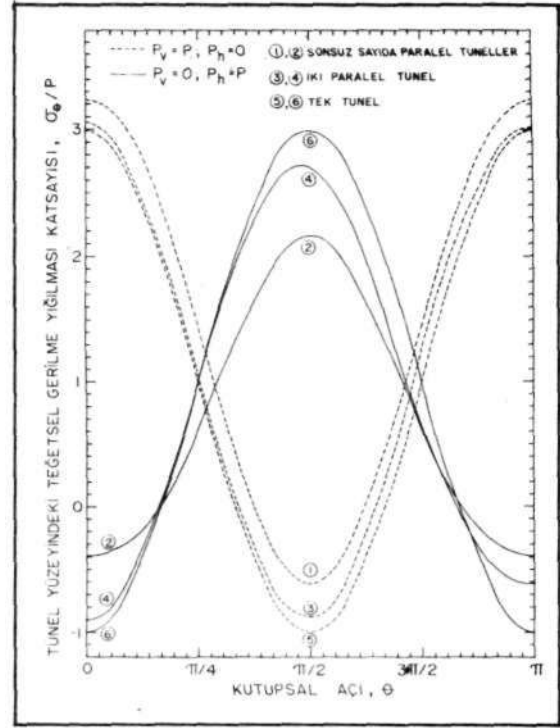
serileri kullanılarak hesaplanır. Bu katsayılar hesaplanırken, tünellerin birbirine (X'nin Ve) yaklaşması durumunda bu serilerin yakınsamasının yavaşladığı ($n > 20$ alınması gerektiği); tersi durumda da serilerin hızla yakınsadığı dikkate alınmalıdır. Eğer problemde birincil gerilmelerin düşey bileşeni "k.P" ve yatay bileşeni de "P" ile tanımlanmak istenirse, 7 no'lu bağıntıda "k" lar yerine "1" ve "Vier yerine de "k" konulmalıdır. Böylece, merkezleri aynı yatay ya da aynı düşey doğrultu üzerinde olan paralel iki tünelin yüzeyindeki teğetsel gerilmeler bulunabilir.

Yukarıda sunulan bağıntılar kullanılarak, aralarındaki topuk genişliği bir tünel çapı kadar olan ($X = 2$) iki paralel tünelin yüzeyinde oluşan teğetsel gerilme yığılmalarının (a_{θ} / P) kutupsal açı (θ) ile değişimi, yalnız düşey birincil gerilme ($P_v = P$; $P_n = 0$) ve yalnız yatay birincil gerilme ($P_v = 0$; $P_n = P$) durumları için hesaplanmış ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Ayrıca, aynı koşullardaki tek bir dairesel tünel yüzeyi ile aralarındaki topuk genişliği bir tünel çapı kadar olan sonsuz sayıda paralel tünellerin yüzeyindeki "oa / P" değişimleri de karşılaştırma amacıyla aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Sonsuz sayıdaki tüneller için verilen eğriler, Howland'ın (1935) çözümlerinin Savin (1961) tarafından verilen sayısal değerleri kullanılarak çizilmiştir.

Şekil 6'da görüldüğü gibi, aradaki topuk genişliği bir tünel çapı kadar olduğu zaman, iki paralel tünelin birbirinden uzak olan yan duvarlarında oluşan teğetsel gerilmeler, aynı koşullarda tek bir tünelin yan duvarlarında oluşan teğetsel gerilmelere çok yakındır. Ancak, tünellerin birbirlerine yakın yan duvarlarında durum, az da olsa farklıdır.

3.1.4. Sonsuz Sayıdaki Paralel Tünel Yüzeyindeki Gerilmeler

Bu problemin çözümü aslında Howland (1935) tarafından verilmiştir. Ne var ki, verilen uzun bağıntılarda yer alan birçok katsayı yüzünden bu çözümün pratikliği tartışılabilir, öte yandan, sınırlı olarak uygulanabilmelerine karşın, Roark ve Young (1975) tarafından verilen iki bağıntı çok daha pratik ve kısadır. Eşit aralıklarla ve aynı çapta açılmış, çok sayıdaki bir sıra paralel tünel uygulanan bu bağıntılardan ilki, tek eksenli birincil gerilmenin (P) açıklıkların merkezlerinden geçen doğrultuya dik olması durumunda tünellerin yan duvarında (D noktasında; $\theta = 0$ veya π) oluşan teğetsel gerilme katsayısını vermektedir.



Şekil 6. Aralarındaki topuk genişliği bir tünel çapı kadar olan paralel ve dairesel kesitli tünellerin yüzeyinde oluşan teğetsel gerilme yığılmaları.

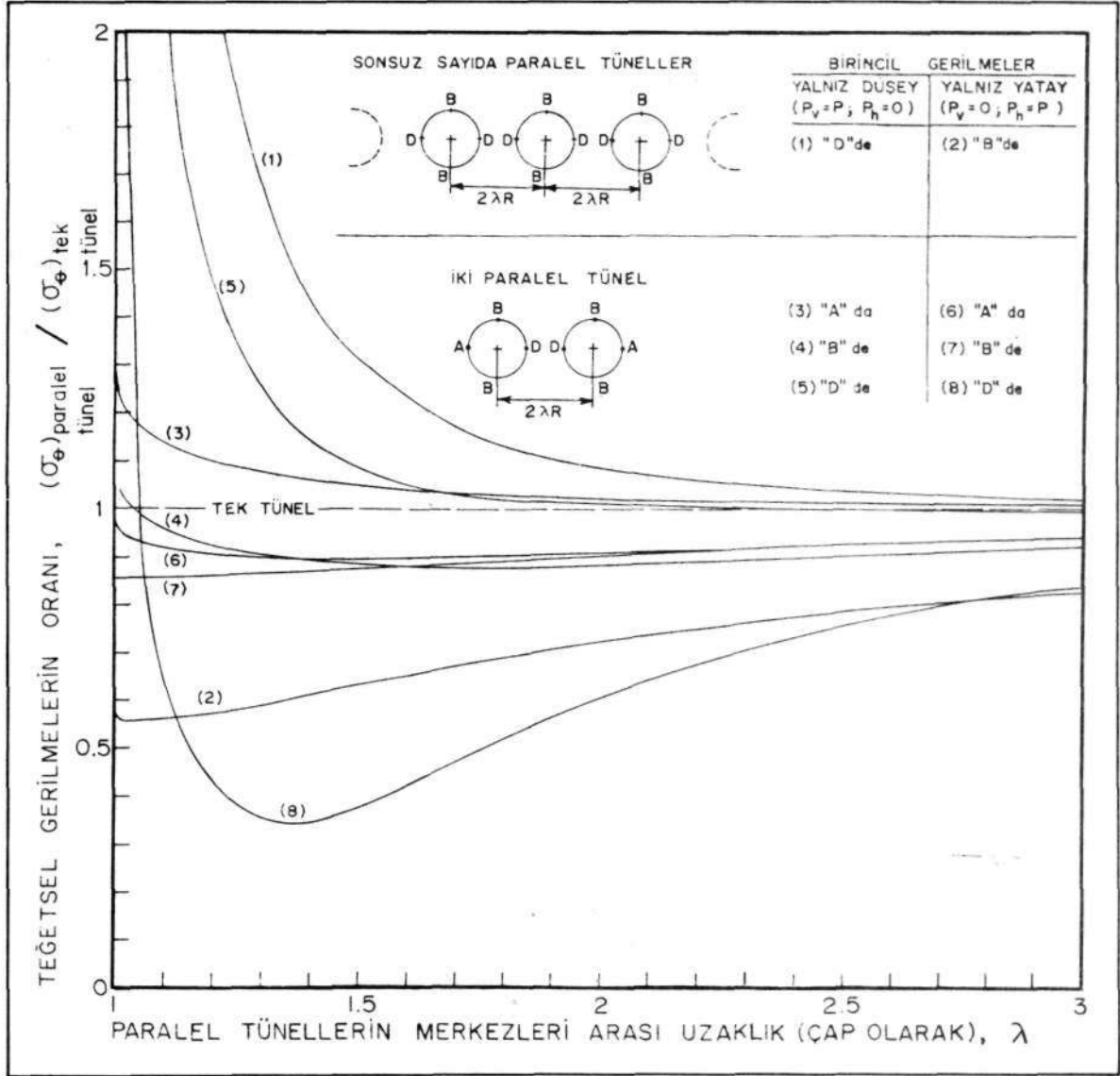
$$\left(\frac{a_{\theta}}{P}\right)_D = (3X - 3.057 + 0.214/X + 0.843/X^2) / (X - 1) \quad (9a)$$

Burada, X komşu iki tünelin merkezleri arasındaki uzaklığı tünel çapı cinsinden belirten katsayıdır. Diğer bağıntı da, birincil gerilmenin tünellerin merkezlerinden geçen doğrultuya paralel olması durumunda tünellerin tavanında ya da tabanında (B noktasında; $\theta = 0 + n/2$) oluşan teğetsel gerilme yığılması katsayısını verir.

$$\left(\frac{a_{\theta}}{P}\right)_B = 3 - 1.061/X - 2.136/X^2 + 1.877/X^3$$

Bu bağıntılar, uygulandıkları koşullarda ve noktalarda, Savin (1961) tarafından verilen Howland'ın (1935) çözümleri ile aynı değerleri vermektedirler.

Yukarıdaki 7 ve 9 eşitlikleri kullanılarak, paralel iki tünel ile sonsuz sayıdaki tünellerin yüzeyindeki belirli noktalarda oluşan teğetsel gerilmelerin, aynı koşullarda tek bir tünelin yüzeyinde (aynı konumdaki noktalarda) oluşan teğetsel gerilmelere oranı hesaplanarak bu oranın "X" ile değişimi Şe-



Şekil 7. Paralel tünellerin yüzeyindeki belirli noktalarda oluşan teğetsel gerilmelerin tüneller arasındaki uzaklık ile değişimi.

Şekil 7'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, tünellerin merkezleri arasındaki uzaklık 3 tünel çapından fazla olduğu zaman, paralel tünellerin etkileşimi, sayıları ne olursa olsun, pratik olarak ortadan kalkmaktadır.

3.2. Fiziksel Model Yaklaşımları

Yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan gerilmelerin çözümlenmesinde kullanılan fiziksel model yaklaşımlarının en yaygını olan fotoelastisite yöntemi, paralel tünellerin etkileşimini incelemek için de kullanılmıştır, örneğin, Duvall (1948) tarafından dairesel ve oval kesitli paralel açıklıklar için

yapılan fotoelastisite deneylerinin sonuçlarına göre, eşit aralıklı ve aynı kesitli beş ya da daha fazla paralel açıklık planlandığı zaman, ortadaki açıklıklar çevresindeki gerilme dağılımı sonsuz sayıda paralel tünellerin çevresindeki gerilme dağılımına yakınsamaktadır (Obert ve ark., 1960; Obert ve Duvall, 1967). Söz konusu araştırmada, paralel açıklıklar arasındaki topuk içindeki düşey ikincil gerilmelerin dağılımı ile ilgili bazı önemli gözlemler de yapılmıştır.

Bilindiği gibi, aynı kesitli ve eşit aralıklarla açılan çok sayıda paralel galeriler arasında bırakılan topuklardan her birine etkiyen ortalama düşey ge-

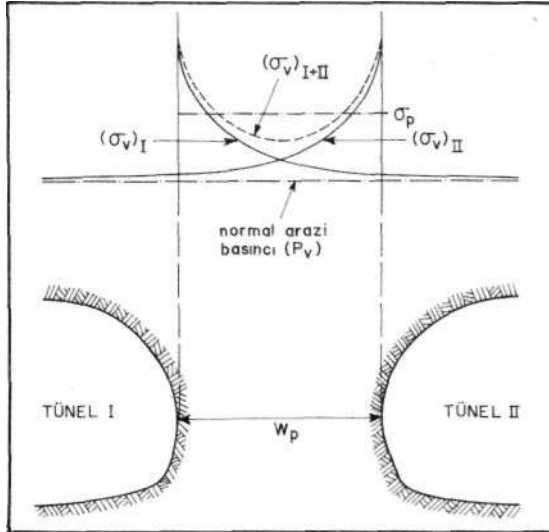
rilme ya da "ortalama topuk gerilmesi" (a), "eş-
yüklü alanlar kuramı" (tributary area theory) kul-
lanılarak hesaplanmaktadır (Hoek ve Brown, 1980;
Bieniawski, 1984; Brady ve Brown, 1985). Bu ge-
rilme, "açıklık genişliği / topuk genişliği" (W/W_p)
oranına bağlıdır ve " P_v " kadarlık bir düşey birincil
gerilme durumunda

$$a_p = P_v (1 + W/W_p) \quad (10)$$

bağıntısından bulunabilir (Obert ve ark., 1960).

Aslında, paralel açıklıklar arasındaki topuğun
yarı yüksekliğindeki yatay kesitine etkiyen düşey
ikincil gerilmelerin (σ_v) bu düzlemdeki gerçek da-
ğılımı, birincil gerilme alanından ve topuk geomet-
risinden etkilenecektir. Doğal olarak, topuğun geo-
metrisi de paralel açıklıkların kesit şekillerine ve
aralarındaki uzaklığa bağlı olacaktır. Normal ko-
şullarda, topukta yenilme olmadığı sürece, topuk
kenarlarında a 'nin a 'den daha büyük ve topu-
ğun orta kısımlarında ise a 'nin a 'den daha kü-
çük olduğu bilinmektedir.

Bazı durumlarda, a 'nin topuk kesitindeki da-
ğılımı, komşu açıklıklar birbirlerinden çok uzak
oldukları zaman her birinin yan duvarının yarı yük-
sekliğinden geçen yatay kesitte oluşacak düşey
ikincil gerilmelerin topuk bölgesinde üst üste eklen-
mesi (süperpozisyonu) ile yaklaşık olarak buluna-
bilir (Deere ve ark., 1969; Hoek ve Brown, 1980).
Ancak, Şekil 8'de gösterilen bu yaklaşım, arada bı-
rakılan topuk çok dar olduğu zaman geçerli olma-
yacaktır.



Şekil 8. Paralel tüneller arasındaki topuklarda olu-
şan düşey ikincil gerilmelerin yaklaşık olarak bulunması.

Kuramsal olarak, topuk kesitindeki a 'nin or-
talama değerinin a 'ye eşit olması gerekmektedir.
Açıklıklar birbirine çok yakın olunca, bu yöntemle
elde edilecek olan "toplam a " eğrisinin ortala-
ması o 'den daha küçük olacaktır. Çünkü, komşu
açıklıkların her birinin yan duvarı içindeki a da-
ğılımı veren eğriler ile normal arazi basıncı (P) ara-
sında kalan alanlar toplamının, "toplam a " eğrisi
(ya da a düzeyi ile P_v düzeyi arasında kalan alana
eşit olması gerekir. Ancak, dar bir topuk kesitinde
toplama yapıldığında, eğrilerin uç kısımlarından
önemli bir kısım hesaba katılmamakta ve hata
oluşmaktadır.

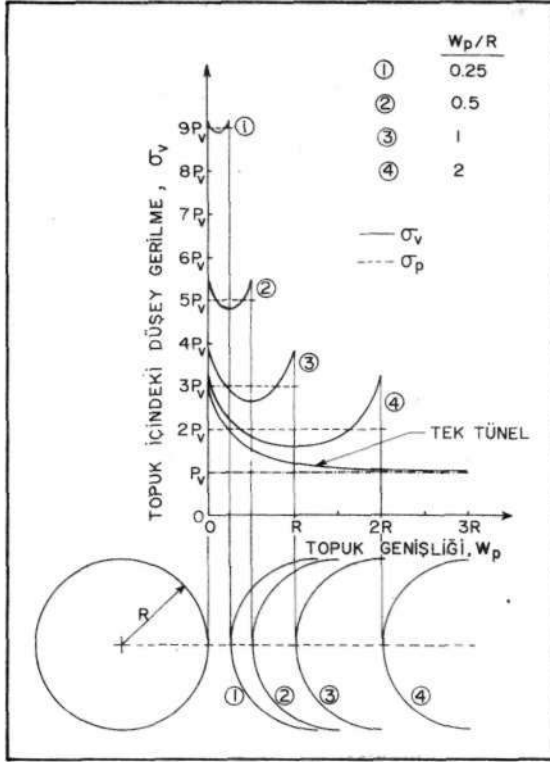
Dairesel kesitli ve birbirine paralel tüneller ara-
sındaki topukların yarı yüksekliğindeki yatay ke-
sitlerine etkiyen düşey ikincil gerilmelerin topuk
içindeki dağılımını (yukarıda sözü edilen toplama
hatası olmadan) yaklaşık olarak belirleyen bir ba-
ğıntı Schwaigerer (1970) tarafından verilmiştir.

$$a_v = P_v \{ 1 + [1/(2X-1)^3 + 1/(2X-1)](2X-2) \\ + 0.5[(R/r)^2 + 1/(2X-r/R)^2] \\ + 1.5[(R/r)^4 + 1/(2X-r/R)^4] \quad (11)$$

Burada; P_v , düşey birincil gerilme; R , tünel yarıça-
pı; r , tünel merkezinden uzaklık ($R < r < R + W$)
ve X , komşu tünellerin merkezleri arasındaki uzak-
lığı tünel çapı cinsinden belirleyen katsayıdır.

Bu bağıntı kullanılarak, a_v 'nin topuk içindeki
değişimi çeşitli topuk genişlikleri ($W = 0.25 R$;
 $0.5 R$; R ve $2 R$) için hesaplanmış ve Şekil 9'da
gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, dü-
şey ikincil gerilmelerin (σ_v) topuk içindeki de-
ğişimi veren eğri ile normal arazi basıncı (P) ara-
sında kalan alan (topuk genişliği ne olursa olsun) dai-
ma sabit kalmaktadır. Ayrıca, göz önünde bulun-
durulan bütün durumlarda, 10 no'lu eşitlikten he-
saplanan ortalama topuk gerilmesinin (a), o e-
ğrisinin bir ortalaması olduğu da Şekil 9'da gör-
ülmektedir. Dikkat edilirse; topuk genişliği azaldık-
ça, düşey ikincil gerilmeler hızla artmakta ve to-
puk içindeki dağılımları daha az farklılık göster-
mektedir. Öyle ki, çok dar topukların yarı yüksek-
liğindeki kesitleri düzgün bir tek eksenli basınç al-
tında olacaktır.

İşte, yukarıda kuramsal olarak açıklanan du-
rumlar, Duvall'in (1948) paralel açıklıklar üzerine
yaptığı fotoelastik model çalışmalarındaki gözlem-
lerle uyum içindedir.



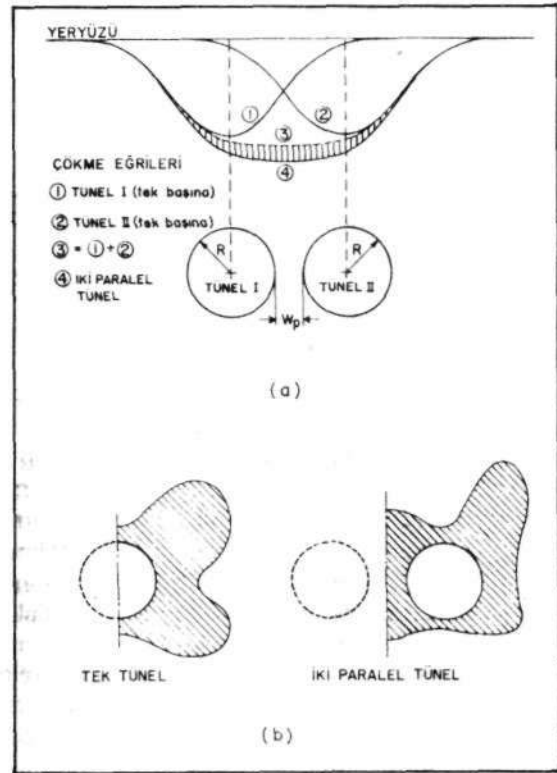
Şekil 9. Paralel tüneller arasındaki topukta oluşan düşey ikincil gerilmelerin topuk genişliği ile değişimi.

3.3. Sayısal Yaklaşımlar

Bilindiği gibi, son yıllarda büyük gelişmeler gösteren sayısal gerilme çözümlemesi yöntemleri (sonlu elemanlar yöntemi, sınır elemanları yöntemi, vb), karmaşık mekanik davranışı ve özellikleri olan jeolojik ortamlarda açılan, hemen her türlü geometri-
deki yeraltı açıklıklarının duraylılığını incelemeye yaygın olarak ve başarıyla kullanılmaktadır. Tahmin edilebileceği gibi, paralel tünel ya da galerilerin etkileşimi problemi de bu yöntemler kullanılarak çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Ne var ki, bu çalışmaların sayısı burada hepsinden söz etmeye olanak vermeyecek kadar çoktur. Üstelik, söz konusu çalışmaların büyük bir çoğunluğu da, sonuçları pratik açıdan genelleştirme yapmaya izin vermeyecek şekilde özel koşulları olan belirli tasarım problemlerinin uygulamalarıdır. Örneğin, Kulhawy (1981) tarafından Atlanta Metrosu'nun (ABD) ön çalışmaları sırasında, paralel konumdaki üç yeraltı açıklığının etkileşimini ve duraylılığını incelemek için yapılan sonlu elemanlar çözümlemesi bu tür bir çalışmadır.

Öte yandan, paralel açıklıkların tasarımında yararlanılabilecek bazı genel sonuçların elde edildiği

araştırmalar da vardır, örneğin, yine sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan iki ayrı çalışma (Barla ve Ottoviani, 1974; Ghaboussi ve Ranken, 1977), yeryüzüne yakın seviyelerde yanyana açılan iki dairesel tünelin etkileşimi açısından önemlidir. Bu çalışmalarda; derinliğin, tüneller arasındaki uzaklığın, ortamın mekanik özellikleri ile davranışının ve tünellerin kazısı ile tahkimatındaki sıranın genel duraylılığa ve yeryüzündeki tasmana etkileri incelenmiştir.



Şekil 10. Yeryüzüne yakın açılan paralel tünellerde (a) tipik tasman eğrileri ve (b) tipik yenilme bölgeleri (Ghaboussi ve Ranken, 1977).

Ghaboussi ve Ranken (1977), çok sığ derinliklerde açılan paralel tüneller arasındaki topuk genişliğinin tünel çapı kadar ya da daha fazla alınması durumunda yeryüzünde oluşan elastik çökme eğrisinin, tünellerin her birinin ayrı ayrı yol açacağı tasman eğrilerinin üst üste toplanması (süperpozisyonu) ile yaklaşık olarak tahmin edilebileceğini göstermişlerdir. Ancak, topuk genişliği azaldıkça, topuğun düşey doğrultudaki kılınmasının artışı yüzünden "gerçek toplam çökme", bu şekilde elde edilen "yaklaşık toplam çökme"den daha fazla olmaktadır (Şekil 10.a). Bu bulgu, Münih Metrosu (Federal Almanya) çalışmaları sırasında sığ ve paralel tüneller arasında bırakılan dar topuklarda göz-

lenen davranış ile uyum içindedir (Hochmuth ve ark., 1987). Bu araştırmacılar ayrıca elasto-plastik ortam davranışı durumunda, paralel tüneller çevresinde oluşabilecek yenilme bölgesini de incelemişlerdir (Şekil 10.b).

4. KAZI AŞAMALARININ VE SIRASININ DURAYLIGA ETKİSİ

Proje gereği, birbirlerinin etki bölgeleri içinde konumlandırılmış olan paralel tünel ya da galerilerin kazısında ve tahkimatında izlenecek yaklaşımın, sistemin genel duraylılığına önemli etkileri olacağı kuşkusuzdur. Her ne kadar bu konuda tasarımcıya yararlı olabilecek bazı fotoelastik model (Barla ve Boshkov, 1968) ya da sayısal gerilme çözümlenmesi (Ghaboussi ve Ranken, 1977) yaklaşımları varsa da asıl önemli bilgilerin, benzer koşullarda yapılmış olan gerçek arazi uygulamalarından elde edilen deneyimlerden alınabileceği unutulmamalıdır.

Yaygın bir uygulamaya göre; birbirine yakın iki paralel tünelin açılması sırasında, kazı arnları birbirinden oldukça (tünel çapının dört katından fazla) uzaktaysa, kazısı önde giden tünele kalıcı (son) tahkimatın uygulanması diğer tünelin kazı arnı sözü konusu bölgeyi geçinkeye kadar geciktirilmektedir. Böylece, ikinci tünelin kazısı sırasında oluşan arazi hareketlerinin ve ikincil gerilmelerdeki değişimin, ilk tünelin kalıcı tahkimatına verebileceği zarar önlenmektedir, özellikle zemin türündeki yumuşak ortamlarda açılmış bir tünele paralel sürülen ikinci bir tünelin etkileri ile ilgili birçok veri bulunmaktadır (Deere ve ark., 1969; Peck, 1969). Örneğin, yine Münih Metrosu çalışmaları sırasında, yeryüzüne yakın sürülen iki paralel tünelin yanyana ve aynı anda kazılması yerine, tünellerin kazı arnları arasında tünel genişliğinin 4 katından fazla bir uzaklık korunarak ilerlenmesi sonucu yeryüzündeki toplam tasmanın beşte bir oranında azaltıldığı rapor edilmektedir (Hochmuth ve ark., 1987). Ayrıca, bu gibi durumlarda, ikinci tünelin kazısının ilk tünelin açılması sırasında rahatsız edilmiş (gevşetilmiş) bir arazide yapılacağı ve bu nedenle de ilkine kıyasla daha olumsuz koşullarla karşılaşabileceği göz önünde tutulmalıdır.

Diğer önemli bir sorun da, sığ derinliklerde yanyana açılan iki ya da daha fazla sayıdaki paralel tünellerin birbirine yakın konumlandırılmaları sonucu doğal arazi kemerleşmesinin sağlanamaması ile

ilgilidir, örneğin, Garrison Barajı (ABD) için açılan yedi paralel tünelde doğal arazi kemerleşmesi oluşmamış ve tahkimata gelen yükler hemen hemen üst katmanların ağırlığına ulaşmıştır (Deere ve ark., 1969). Aynı projede, bir tünelin mevcut iki tünel arasından açılması durumunun, iki tünelin daha önce açılmış bir tünelin her iki tarafından açılmasından daha az sakıncalı olduğu gözlenmiştir.

Yukarıda kısaca değinilen örnekler, konunun bu yönünün de gözardı edilemeyecek ölçüde önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada sunulan bilgilerden de anlaşılacağı gibi, "paralel tünel ya da galerilerin etkileşimi" gerçekten de karmaşık bir problemdir. Üstelik, gerçek arazi davranışı ve koşulları olayı daha da karmaşık bir hale getirebilmektedir. Bu nedenle, bu tür açıklıkların tasarımı ve kazısını üstlenmiş olan mühendisler, "bazı karmaşık problemlerin basit ve akla yakın fakat yanlış yanıtları olduğunu" unutmamaları, her durumu kendine özgü koşulları ile birlikte değerlendirmelidirler.

Öte yandan, bu çalışmada sunulan yaklaşımlar ve bağıntılar, her ne kadar (malzeme davranışında ve problem geometrisinde) bazı basitleştirmeler yapılarak elde edilmişse de, problemin zorluğuna karşılık durumun mühendis için hiç de umutsuz olmadığını göstermektedir. Kuşkusuz, daha çok ön tasarım aşamasında kullanılması gereken bu bağıntıların uygulanmasında, sağlam kuramsal temellere dayanan bilgiler ile dengelenmiş bir deneyimin ürünü olan "mühendislik yargısı"nın önemi büyüktür.

KAYNAKLAR

- BARLA, G., BOSHKOV, S., 1968; "Insights into Undercutting in Block Caving", Proc. 5th Canadian Rock Mech. Symp., s. 41-58.
- BARLA, G., OTTOVIANI, M., 1974; "Stresses and Displacements around Two Adjacent Circular Openings near to the Ground Surface", Proc. 3rd Int. Congr. on Rock Mechanics, Cut 2, s. 975-980.
- BIENIAWSKI, Z.T., 1984; Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A.A. Balkema, Rotterdam, 272 s.
- BRADY, B.H.G., BROWN, E.T., 1985; Rock Mechanics for Underground Mining, George Allen and Unwin, London, 527 s.

- BROWN, E.T., 1985; "From Theory to Practice in Rock Engineering", Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. A: Min. Industry), Cilt 94, s. A67-82.
- DAEMEN, J.J.K., FAIRHURST, C., 1978; "Ground/Support Interaction Fundamentals and Design Implications", Appendix K, Tunnels and Shafts in Rock, Engineer Manual, EM 1110-2-2901, Dept. of the Army, Corps of Engineers, Washington, DC, s. K1-157.
- DEERE, D.U., PECK, R.B., MONSEES, J.E., SCHMIDT, B., 1969; "Design of Tunnel Liners and Support Systems", Final Report, Office of High Speed Ground Transportation, Contract No. 3-0152, US Dept. of Transportation, Washington, DC, 287 s.
- DUVALL, W.I., 1948; "Stress Analysis Applied to Underground Mining Problems, Part II - Stress Analysis Applied to Multiple Openings and Pillars", US Bureau of Mines, RI 4387.
- GHABOUSSI, J., RANKEN, R.E., 1977; "Interaction Between Two Parallel Tunnels", Int. J. Numer. Anal. Methods in Geomech., Cilt 1, s. 75-103.
- HADDON, A.W., 1967; "Stresses in an Infinite Plate with Two Unequal Circular Holes", Quart. J. Mech. and Applied Math., Cut 20, s. 277-291.
- HOCHMUTH, W., KRISCHKE, A., WEBER, J., 1987; "Subway Construction in Munich, Developments in Tunneling with Shotcrete Support", Rock Mech. and Rock Engineering, Cilt 20, Sayı 1, s. 1-38.
- HOEK, E., BROWN, E.T., 1980; Underground Excavations in Rock, Instn. of Mining Engineers, London, 527 s.
- HOWLAND, R.C.J., 1935; "Stresses in a Plate Containing an Infinite Row of Holes", Proc. Roy. Soc. (Series A), Cut 148, s. 471-491.
- HOWLAND, R.C.J., KNIGHT, R.C., 1939; "Stress Functions for a Plate Containing Groups of Circular Holes", Phil. Trans. Roy. Soc. (Series A), Cut 238, s. 357-392.
- INGLIS, C.E., 1913; "Stresses in a Plate Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners", Trans. Inst. Naval Arch., Cut 55, s. 219-230.
- KIRSCH, G., 1898; "Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre", Ver. Deut. Ing., Cilt 42, s. 797-807.
- KULHAWY, F., 1981; "Design", Chapter IV, The Aüanta Research Chamber Applied Research for Tunnels, Final Report, UMTA - GA - 0007-81-1, US Dept of Transportation, Urban Mass Transp. Administration, Washington, DC, s. IV1-14.
- LING, C.B., 1948; "On the Stresses in a Plate Containing Two Circular Holes", J. Appl. Physics, Cilt 19, s. 77-82.
- OBERT, L., DUVALL, W.I., MERRILL, R.H., 1960; "Design of Underground Openings in Component Rock", US Bureau of Mines, Bulletin 587, 36 s.
- OBERT, L., DUVALL, W.I., 1967; Rock Mechanics and Design of Structures in Rock, John Wiley and Sons, New York, 650 s.
- PECK, R.B., 1969; "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground", Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng., s. 225-290.
- ROARK, R.J., YOUNG, W.C., 1975; Formulas for Stress and Strain, McGraw-Hill, New York, 624 s.
- SAVIN, G.N., 1961; Stress Concentration around Holes, Pergamon Press, London, 430 s.
- SCHWAIGERER, S., 1970; Festigkeitsberechnung von Bauelementen des Dampfkessel-Behälter und Rohrleitungsbaues, Springer-Verlag, Berlin, 167 s.
- TOMINAGA, Y., KINOSHITA, S., 1972; "Stress Concentration around the Multiple Circular Openings in the Elastic Rock", J. Min. Metall. Inst. of Japan, Cilt 88, s. 775-780.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1978; "Tunnels and Shafts in Rock", Engineer Manual, EM 1110-2-2901, Dept. of the Army, Corps of Engineers, Washington, DC.