

Metro tünellerinde uygulanan şemsiye-kemer yönteminin sayısal analizi

Erdal Emre ÇEÇEN*, Mete İNCECİK

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Tünel tasarımcıları, zayıf zeminlerde projelene tüneller için inşa sırasında işçi ve yapım güvenliği ve özellikle şehir içinde daha da önem taşıyan yüzey oturmaları gibi kritik konuları denetim altına almak durumundadır. Bu çalışmada, zayıf zeminlerdeki tünel inşaatlarında tünelin göçmeden açılabilmesi ve tünel içi (konverjans) ve yüzey deformasyonlarını denetim altına almak için uygulanan şemsiye-kemer (umbrella-arch) yönteminin, tünel içi ve arazide oluşturduğu iyileşmelerin etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Sayısal hesaplamalarda sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Plaxis yazılımı kullanılmıştır. Sayısal analizlerde, zemin davranışını temsil etmek amacıyla elastoplastik Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılmıştır. Hesaplamalar, 2 boyutlu düzlem-gerilme ortamında elastik mesnetlere oturan giriş kabulleriyle yapılmıştır. Yapılan sayısal modellemeler sonucunda şemsiye borularının uzunluklarının (L_p) en büyük yüzey oturmalarına (S_{maks}) etkisi için farklı her tünel derinliğinde (Z) geçerli olabilecek bir bağıntıdan söz etmek mümkün görülmemektedir. Ancak, şemsiye borularının boylarının (L_p) artırılmasının oturmaların yüzey dağılımı üzerinde olumlu bir etki yaparak yüzey oturma bölgesini daralttığı anlaşılmıştır. Şemsiye-kemer borularının uygulama açısının yataydan uzaklaşması ($\beta \neq 0^\circ$) yüzey oturma dağılımına ve aynada oluşan aksenal deformasyonlara (dx) olumsuz etki yaptığı, uygulama açısını artırmanın daha yüksek aksenal deformasyonlar verdiği görülmektedir. Şemsiye borularına verilecek en elverişli açının tünel eksenine paralel olduğu ($\beta = 0^\circ$) ve uygulamada boruların mümkün olan en küçük açı ile imal edilmesinin uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Şemsiye-kemer boru boylarının (L_p) tünel tavanı düşey deformasyonlarını her kazı kademesi için azalttığı görülmüştür. Şemsiye-kemer borularının boylarının (L_p) ayna yatay deformasyonlarını olumlu yönde etkilediği ve daha uzun boru boyu kullanmanın ayna yatay deformasyonlarını azalttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Mohr-Coulomb, zemin modeli, şemsiye-kiriş, elastik-kiriş, sonlu elemanlar.

*Yazışmaların yapılacağı yazar:Erdal Emre ÇEÇEN. e.cecen@iku.edu.tr; Tel: (212) 498 42 66.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Kent içi tünellerinde uygulanan şemsiye-kemer ve ayna denetimli yöntemlerinin sayısal analizi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 02.05.2007 tarihinde dergiye ulaşılmış, 19.06.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 01.03.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Numerical analysis of umbrella-arch method performed in metro tunnels

Extended abstract

As a result of rapid urbanization, complex transportation networks have been built to overcome the demand for public transport. In urban areas the surface settlements (which take place during tunnel construction and service life) should be within the tolerance limits and should not effect nearby the superstructures. The tunnel excavation and support system should provide an adequate tunnel wall and face stability for worker and equipment safety and should prevent a possible collapse.

The umbrella-arch method can be defined as a reinforcement technique which involves installing pipes ahead of the tunnel face prior to the excavation in order to limit the deformations that occur in the crown, face and surface settlements, in order to provide a longer stand-up time and to excavate the tunnel in safety. Quantifying the level of improvement provided by the reinforcements would enhance the design stage. The media in which a tunnel is going to be excavated would usually expose heterogenous and unisotropic properties and the tunnel route possesses varying cross-sections such as stations, rail switches, service depots etc. Therefore, there is a need to use simple and flexible methods that are applicable to different underground conditions. In this study, the effects of umbrella arch pipe roofing method on limiting the aforementioned deformations are investigated by numerical methods.

Modelling each umbrella pipe individually by using 3D methods is not very efficient in application projects for the reasons summarized below;

- *There are too many parameters affecting the reinforcement behaviour in tunnel excavation.*
- *Software chosen should be capable of reflecting the real in situ behavior of the material (stress-strain, long/short term behavior, pore-water pressures and movements, interaction between the support material etc.) in a convenient manner.*
- *Commercial software available on the market are usually not user-friendly and requires extensive training.*
- *These 3D analyses require special and expensive hardware setups.*
- *Solution times are unacceptably long for the conditions where a quick respond is needed.*

These points urge the engineer to use more practical 2D software applications capable of reflecting the real in situ behaviour within a reasonable accuracy.

This study presents the results of over 100 parametric Finite Element analyses of umbrella arch tunnel roof reinforcing based on two dimensional plane strain conditions with the assumption of beam on elastic multi-supports inserted in elastoplastic medium. Therefore, the analyses performed are on the longitudinal profile. In the constitutive model, the soil is discretized as 15 noded triangular elements; the umbrella pipes are modelled as beam elements of 5 nodes each of which has three degrees of freedom; the steel sets are modelled as strut elements which are one node spring elements of constant spring stiffness (normal stiffness) which are fixed at one end at a predefined length. The lateral far boundaries are taken at least eight times the diameter of the tunnel in order to obtain more accurate Finite Element Method (FEM) results. The vertical boundary of the model changes by the depth of tunnel. The out-of-plane dimension is taken as unit width (1m), therefore, some modifications are applied on the stiffness properties of beams. The tunnel is assumed to be excavated in a cohesive medium. For practical reasons it is assumed that no ground water exists. Total excavation length is 10m which is achieved by ten steps of 1m long advances. The cover depth (C), the length of umbrella pipes (L_p), the length of overlapping of pipes (L_o) and the application angle of pipes (β) are the main constituents of parametric study.

The results of parametric study show that it is not possible to deduce a general expression which is valid for all tunnel depths that the length of pipes (L_p), have a positive effect on decreasing maximum surface settlements (s_{max}). However, the length of pipes has a positive effect on narrowing the settlement trough, and decreasing the crown settlements and lateral face deformations (dx). The increase in the thickness of pipe reinforcing provides lining stability and limits the tunnel and surface deformations. Deviation of the application angle of pipes from horizontal plane, negatively affects the settlement trough, and lateral face. However, because it is not possible to place the pipes laterally due to the space that is occupied by the overlap, smallest minimum angle should be applied in order to achieve the best benefit from the method.

Keywords: *Mohr-Coulomb, soil model, FEM, fore-pole umbrella, elastic support.*

Giriş

Kent içi ulaşım amaçlı metro tünelleri uygarlığın bir göstergesi sayılmaktadır. Metronun amacı, kent insanını bir yere ulaştırmak değil, büyük kent hayatını yaşanabilir kılmaktır. Burada temel hedef, kentlinin zaman ve yarar değerlerini en üst düzeye çıkarmak, onu rahat ve huzurlu bir ortamda, güvenli ve düzenli koşullarda kent-sel öğelerle ilişkili kılmak ve uygarca yaşatmaktır (Vardar, 1994).

Tünel inşaatları arazideki ortamın sürekli değişiklik göstermesi nedeniyle temel mühendisliği uygulamalarının en zorlayıcısı olarak kabul edilegelmiştir. Zira her ne kadar ayrıntılı ve kapsamlı bir araştırma yapılmış olsa da kazının başlamasıyla birlikte doğanın yeni süprizleriyle karşılaşmaktadır. Tünelin güzergâhının geçtiği ortamın çatlaksız, masif ve sağlam kaya özelliği gösterdiği durumlarda mühendislik problemi kazının nitelikleri üzerinde yoğunlaşırken ortamın çatlaklı, yumuşak kaya ya da zemin özelliği gösterdiği durumlarda problem destekleme sistemi üzerine yoğunlaşır.

Yapılaşmanın yoğun olduğu şehirleşmiş bölgelerde açılacak tünellerin yapım aşamasında ve servis ömrü sırasında oluşacak yüzey oturmalarının üst yapılara zarar vermeyecek sınırlar içerisinde kalması zorunludur. Güvenli bir destek sistemi, tünel açma yönteminden bağımsız olarak kazı ayna ve duvarlarının stabilitesini ve dolayısıyla tünel açımı sırasında oluşabilecek göçmeye karşı inşaatta çalışan insanların ve kazı ekipmanının güvenliğini sağlamalıdır.

Modern tünelcilik yaklaşımlarının en önemlisi kuşkusuz temelleri Rabcewics (1963) tarafından atılan ve Müller (1978) tarafından geliştirilen, ülkemiz literatürüne de Vardar (1979) tarafından taşınan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemidir. Bu yöntemde ana amaç, tüneli çevreleyen kaya ya da zemin ortamlarda nihai kaplama imal edilmeden önce bir takım önlemler alınarak kaya ortamı kendi kendine taşıtmak ve tünelin açılmasıyla ortaya çıkacak olan gerilme ve deformasyonların kabul edilebilir bir değerde tutulmasını sağlamaktır.

Tünel kazısı öncesi üstüarı boyunca ayna çevresine düşük eğimli borular sokularak içlerine beton enjekte edilmesi ve boru-kirişlerden oluşan şemsiye şeklinde bir kemer (umbrella-arch) elde edilmesi yöntemi, kazı sırasında oluşacak deformasyonların denetim altına alınması ve tünelin güvenli bir şekilde açılmasını sağlamak amacıyla güncel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ortama ilave edilen bu elemanların oluşturacakları iyileşmenin uygulama öncesi hesaplanabilmesi, projelendirme sırasında çok büyük katkı sağlayacaktır. Nitekim, tünel açılan ortam çoğunlukla homojen ve izotropik olmayan özellikler gösterir ve açılan tünel enkesiti de değişen geometrilerde (istasyon, tiryaj, makas, vb.) bulunabilir. Dolayısıyla farklı yeraltı koşullarına kolaylıkla uyum sağlayabilecek esneklikte olan ve hızlı çözümler üretebilecek yöntemlere ihtiyaç vardır.

Tünellerin oluşturduğu yüzey oturmaları, bilgisayar teknolojisindeki ilerlemelere paralel olarak daha çok sayısal olarak yapılmaktadır. Bilgisayar yardımı ile yapılacak çözümlerde mekanizmanın karmaşık olması ve etkileyen parametrelerin çok fazla oluşu yüzünden bir takım kısıtlamalar vardır. Dolayısıyla kullanılacak yazılımın incelenen problemdeki arazi şartlarını iyi yansıtabilmesi, malzeme davranışını (gerilme-şekil değiştirme, kısa dönem-uzun dönem, su hareketi, ısı etkisi, diğer malzemelerle etkileşim, vb.) uygun bir şekilde modelleyebilmesi gerekmektedir. Mühendislik probleminin çözümüne yönelik programlanmamış ya da çözüm için yetersiz kalan yazılımların kullanıldığı aksu durumlarda elde edilecek bol renkli resim ve grafik içeren sonuçların, mühendislik açısından bir şey ifade etmemesi dışında tasarımcıyı yanlış yönlendirerek hatalı tasarımlara yol açma tehlikesi barındırdığı açıktır.

Tünelin oluşturduğu yüzey oturmaları

Tünel tasarımında ve yapımındaki en önemli sorunlardan birisi, arazide oluşan yüzey oturmalarıdır. Tünelin inşasıyla oluşan yüzey oturmaları (azaltıcı önlemler alınmazsa) üst yapılarda ve zeminde gömülü bulunan diğer yapılar üzerinde çok ciddi boyutlarda yapısal hasara yol açabilir. Dolayısıyla tünel güzergâhı boyunca, tünelin

yüzeydeki etkisinin ortaya çıkacağı bölgenin sınırlarının belirlenmesi için bir gerçekçi yöntem geliştirilmelidir. Gerekirse bu kritik bölgelerde daha detaylı araştırmalar yapılarak, oluşabilecek olumsuzlukların önüne geçilebilecektir.

Tünel güzergâhının üzerinde oluşan yüzey oturma kalıbının (tasman) normal dağılım eğriyle ifadesi Peck (1969) tarafından tanımlanmıştır. Aynı araştırmacı, yüzeydeki oturma kalıbının hacminin yaklaşık olarak tünelde aşırı kazılan miktara eşit olduğunu ifade etmiştir. Aşırı kazılma ifadesi bir inşaat hatasını göstermez. Tünel açma tipinden bağımsız olarak kazı sırasında gevşeyen bölgenin kapanması (konverjans) kaçınılmazdır (Ör. TBM/Tunnel Boring Machine ve şild makineleri konik yapıda imal edilmek durumundadır). Tünelin oluşturduğu yüzey oturma kalıbının genişliği geliştirilen bir takım ampirik yöntemlerle elde edilebilir.

Aşırı kazılma miktarının (dolayısıyla konverjansların) belirlenmesi için çeşitli ampirik, yarı-teorik, deneysel modellere dayalı çözümler sunulmuştur. Yüzeydeki oturma kalıbının büyüklüğünün belirlenebilmesi için hacim kaybını temsil eden boşluk-parametresi (gap parameter) Lo ve Rowe (1982) ve Rowe ve diğerleri (1983) tarafından ifade edilmiştir. Bu parametrenin hesabı için öneriler, Lee ve diğerleri (1992) ve Rowe ve Lee (1983) çalışmalarında verilmiştir.

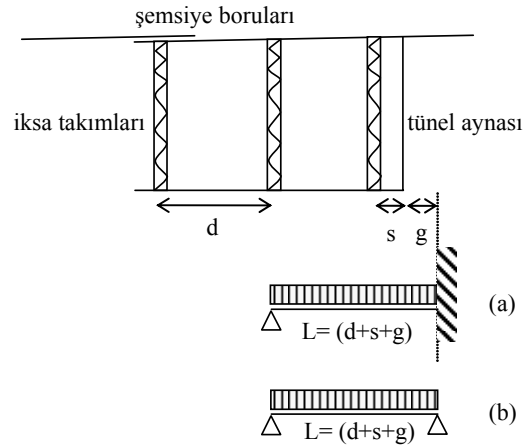
Problemin tanımı ve çalışmanın amacı

Bu çalışmada, zemin ortamda açılan sığ ve orta derinlikteki tünellerde, arazide ve tünel içinde oluşan deformasyonları denetim altına alarak tüneli güvenli bir şekilde açmak için tünel yapımından önce tünel üstyarısı boyunca uygulanan şemsiye-kemer borularının, tünel içinde ve arazi yüzeyinde oluşturduğu gerilme ve şekil değiştirme üzerindeki iyileşmelerin etkisi, sayısal olarak incelenmiştir.

Bilgisayarla yapılan analizlerde 3 boyutlu yöntemler kullanarak tünel aynasının üzerinde inşa edilen şemsiye-kemer borularının ayırık model-

lenmesi, çözüm süresinin çok uzun olması ve boru-enjeksiyon-zemin etkileşiminin gerçeğe uygun bir şekilde modellenmesindeki güçlükler nedeniyle uygulama projelerinde tercih edilmemektedir. Kazı sırasında karşılaşılan zemin ya da kaya ortamın niteliklerinin çok sık değişiklik gösterdiği durumları yansıtılabilmek amacıyla modelin sınır şartlarının kolaylıkla değiştirilebilir olması gereği, uygulama projelerinde analizlerin 3 boyutlu yöntemlere kıyasla daha çabuk yapılabildiği ve makul doğrulukta çözümler sunan 2 boyutlu yöntemlerle yapılmasını kaçınılmaz kılmaktadır.

Literatürde şemsiye-kirişlerin ortamdaki davranışlarını incelemek üzere 2 farklı yaklaşım seçeneği dikkat çekmektedir. Analitik çözüm içeren birinci yaklaşımda şemsiye kiriş boruları çoklu mesnetler üzerine yerleşen elastik kirişler analogjisi kullanılır. Burada borular için kesit seçimi, en kritik olduğu düşünülen kirişlerin son mesneti ile aynaya soketlendiği kısımdaki momentlerin hesaplanmasıyla gerçekleştirilir (Şekil 1).



Şekil 1. Şemsiye-kemer borularının analitik çözümü (Oreste ve Peila, 1997)

Borularla oluşturulan şemsiyenin bütün bir kiriş olarak kabul edildiği analitik yaklaşımla (Oreste ve Peila, 1997) pek çok parametrik çözüm yapılarak abaklar hazırlanmıştır. Burada moment hesabı yapılırken kirişin sağ mesneti ya ankastre, ya da zeminin bir miktar içindeki bir nokta $(d+s+g)$ dahil edilerek sabit mesnet

olarak alınır. Oreste ve Peila (1997), en büyük moment hesabını, birtakım basitleştirmeler yaparak

$$M_{maks} = \frac{1}{12} q_u \left(\frac{3}{2} d + 0.5 \right)^2 \quad (1)$$

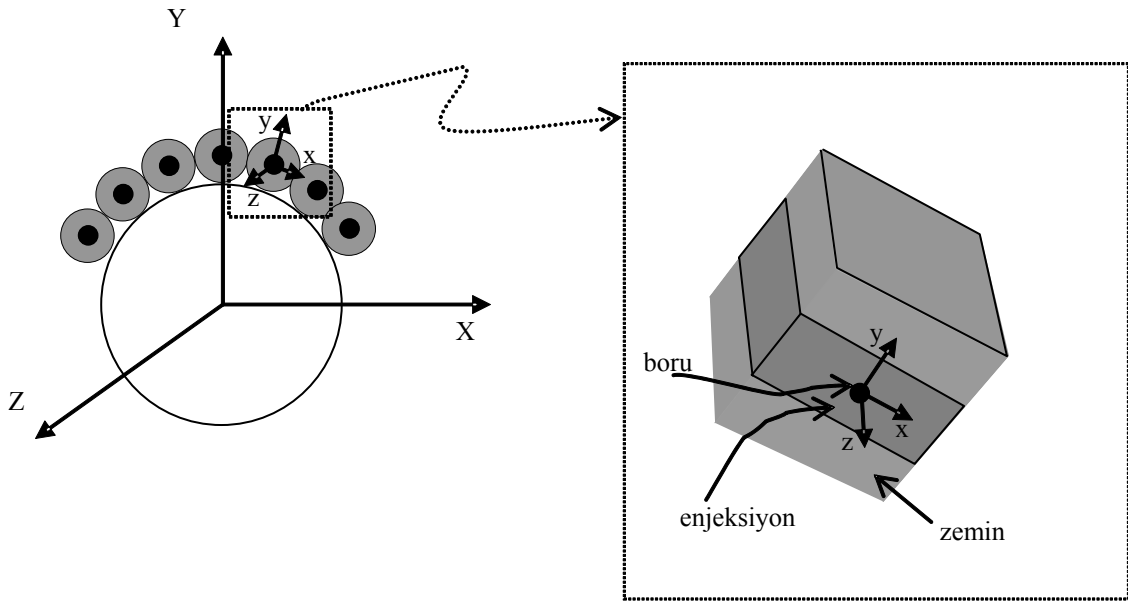
şeklinde hesaplanabileceğini belirtmiştir. Eşitlikte q_u ; birim uzunluktaki kirişe etkiyen eşdeğer yük, d ; iksalar arasındaki mesafe olarak ifade edilmiştir.

İkinci yaklaşım olan *homojenleştirme tekniği* şemsiye-kiriş borularıyla donatılan zeminin mekanik özelliklerinin, birim alandaki donatı-zemin-beton katkı oranları kadar geliştirerek, “mühendislik özellikleri iyileştirilmiş yeni bir malzeme” olarak tanımlama esasına dayanmaktadır (Bae vd., 2005). Homojenleştirme yöntemi, boruların ayrı modellendiği 3 boyutlu yöntemlere göre çözüm sürelerinde çok büyük avantajlar göstermektedir (Şekil 2). Ancak bu yöntemde borularda oluşan gerilme ve momentlerin dağılımı, kesit kontrolleri, boru-enjeksiyon malzemesi-zemin arasındaki ilişki incelenmemektedir. Bu çalışmada adı geçen homojenleştirme yöntemi, şemsiye-kiriş boruları yerine aynı kabuller kullanılarak ayna donatılarının ortamdaki etkisinin incelenmesinde kullanılmıştır.

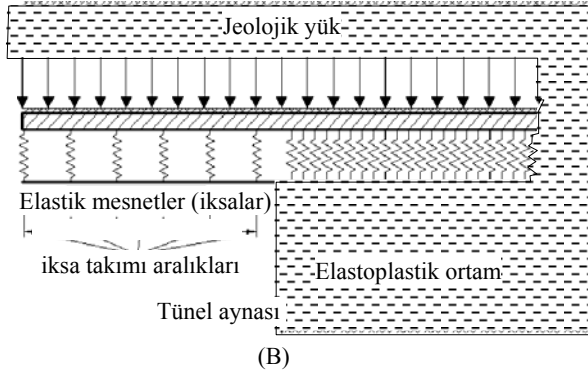
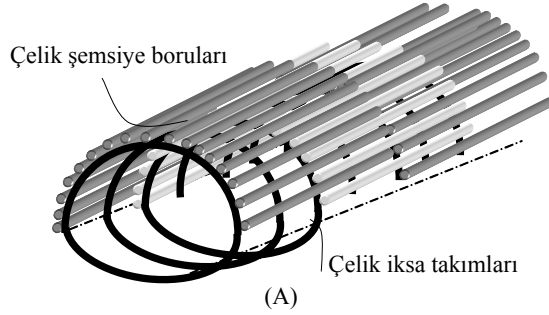
Bu çalışmada şemsiye-kemer yöntemi ile ortamda oluşan iyileşmeler ve bunların kapsamaları, *elastik mesnetlere oturan elastik kiriş* yöntemiyle hesaplanmıştır. İksaların üzerine oturan şemsiye-kiriş borularının üzerinde kalan ve boruların soketlendiği zemin (aynanın önünde yer alan kısım), elasto-plastik davranış gösteren malzeme olarak tanımlanmıştır (Şekil 3).

Şemsiye-kemer boruları üzerinde yapılan parametrik çalışmalar

Şemsiye-kemer borularının sayısal olarak modellenmesi üzerine temellenen parametrik çalışmalar, iki boyutta (2D) sonlu elemanlar yöntemi (FEM) prensibiyle çalışan PLAXIS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı firmadan tünel analizi için geliştirdikleri, üç boyutlu analiz gerçekleştirebilen “PLAXIS 3D Tunnel ver.” kullanılarak şemsiye-kemer borularının uygulama açılarındaki değiştirilememesi, boru-zemin-enjeksiyon malzemesi etkileşiminin ayrı olarak modellenememesi ve düğüm noktası (node) sayısının yeterli bulunmaması, kullanıcıyı benzer kabullerin kullanıldığı ancak çözüm ve modelleme sürelerinin çok daha uygun olduğu iki boyutlu programın kullanımına yönlendirmiştir.



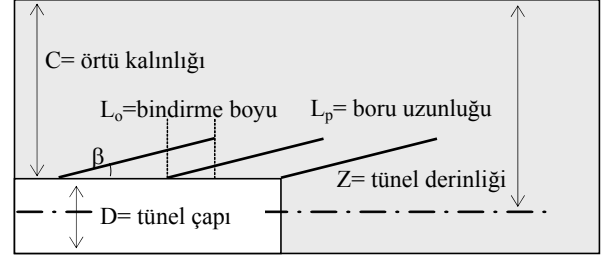
Şekil 2. Şemsiye-kemer yönteminde homojenleştirme yöntemi uygulaması (Bae vd., 2005)



Şekil 3. Şemsiye-kiriş yöntemi
(A) gerçek durum, (B) elastik-kiriş analojisi

Zayıf zeminlerde açılan tüneller için bir ön donatılama yöntemi olan şemsiye-kemer donatılarının sayısal analizi, boykesit düzlem-gerilme prensibiyle gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yapısal modelde zeminler 15 düğüm noktalı üçgen elemanlarla, şemsiye kirişleri 5 düğüm noktalı ve her bir düğüm noktasında ikisi ötelenme biri de dönme serbestlik derecesine sahip kiriş elemanlar olarak, kirişlere mesnetlik eden iksa takımları da tek düğüm noktalı, yay rijitliği (normal rijitlik) sabit, diğer ucu tutulu elastik bir yay elemanı olan iksa (strut) malzemesi olarak modellenmiştir. Boru-şemsiye kirişleri, çoklu elastik mesnetler üzerinde oturan elastik kirişler olarak modellenmiştir.

Boykesit analizinde düzlemin içine doğru olan 3. boyut, birim genişlikte (1m) kabul edildiğinden, kirişlerin rijitlik özellikleri hesaplanırken düzeltmeler yapılmıştır. Pratiklik amacıyla ortamda yeraltı suyunun olmadığı kabul edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan zemin, Mohr-Coulomb yenilme kriterine (Brinkgreve ve Vermeer, 1998) uygun davranış gösteren elastoplastik bir malzeme olarak kabul edilmiştir. Parametrik çalışmalarda kullanılan değişkenler Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Parametrik çalışmalarda kullanılan değişkenler

Parametrik çalışmada farklı tünel derinlikleri (C) için boru uzunlukları (L_p) ve bindirme boyları (L_o) ile uygulama açılarının (β) tünel ve yüzey deformasyonlarında neden oldukları iyileşmeleri incelenmiştir. Hesaplamalarda değişkenler;

- L_p : 6m, 9m, 12m, 15m
 L_o : 2m, 3m, 4m, 5m
 β : 0° , 5° , 10° , 15° , 30°
C: 1.5D, 2.5D, 5.5D, 10.5D

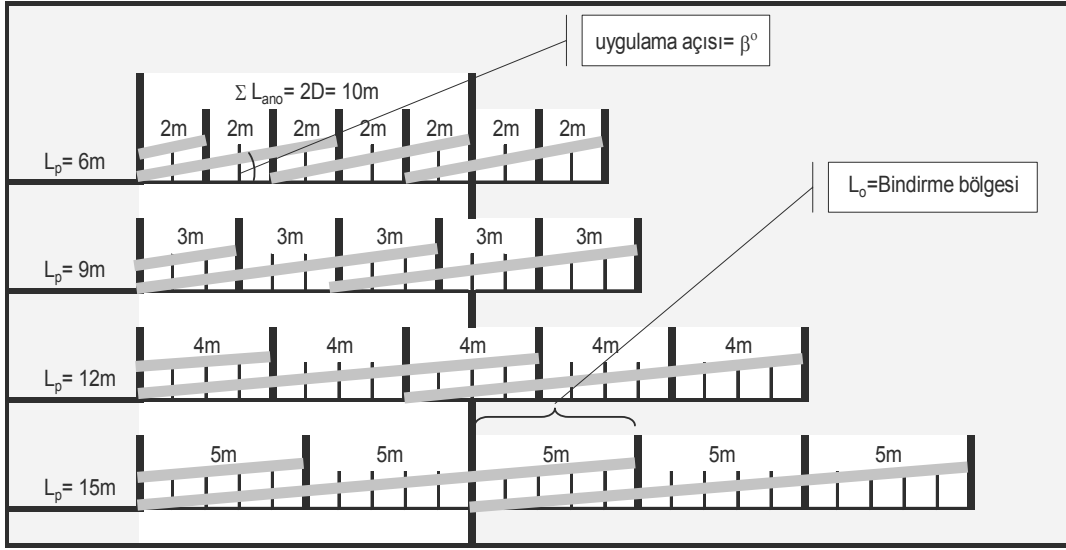
olarak kullanılmıştır. Altı çizili değerler ilişki grafiklerinin gösterildiği referans modellerdir.

Kurulan modelin şematik gösterimi Şekil 5'de verilmiştir. Burada bindirmelerin şemsiye-kiriş borusunun başındaki ve sonundaki 1/3'lük kısmında gerçekleştiği ve bindirmesiz kısmın (en kritik durum) borunun tam ortasında bulunduğu görülmektedir. İncelenen tünel kazısı uzunluğu, iki tünel çapı kadar alınmıştır ($\Sigma L_{ano} = 2D = 10m$).

İksa takımlarını temsil eden elemanlar modelde basınca çalışmaktadır. Modelde iksa ve boru-kiriş sistemleri için kullanılan malzemelerin mühendislik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Modellerde kullanılan boru-kiriş ve çelik iksa takımlarının mühendislik özellikleri

Parametre	Sembol	Malzeme		Birim
		Boru-kiriş	İksa takımı	
Davranış		elastik	elastik	
Eksenel rijit.	EA	5.0×10^6	2.0×10^5	kN/m
Eğilme rijit.	EI	8.5×10^4	-	kNm^2/m
Eşdeğer kalınlık	d	0.452	-	m
Ağırlık	s	-	-	kN/m/m
Poisson oranı	v	0.15	-	-



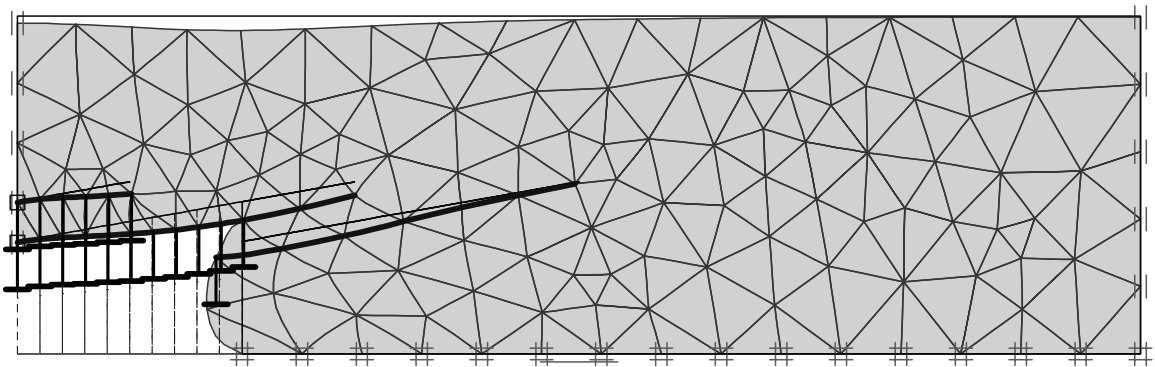
Şekil 5. Şemsiye-kemer borularının uygulama şeması

Modelde kullanılan zemine ait geoteknik özellikler Tablo 2’de sunulmuştur.

Hesaplamlarda boru-kirişlerin etkisinin daha belirgin görülebilmesi amacıyla tünel geçici kaplaması (püskürtme beton-çelik hasır vb.) modele dahil edilmemiştir. Modelin geometrik sınırları sayısal analiz sonuçlarının değişmeyeceği büyüklükte (yatayda tünel aynasından 8D kadar uzakta olan 50m, düşeyde örtü kalınlığıyla değişen) alınmıştır. Parametrik çalışmaların sonucunda oluşan deforme olmuş sonlu elemanlar ağı, bir örnek olarak 15m boru boyu, tünel örtü kalınlığı 10m ($C=2D$) durumu için Şekil 6’da verilmiştir. Burada deformasyonların belirgin olarak anlaşılması amacıyla ölçek 150 kat abartılmıştır.

Tablo 2. Modellerde kullanılan zemine ait geoteknik özellikler

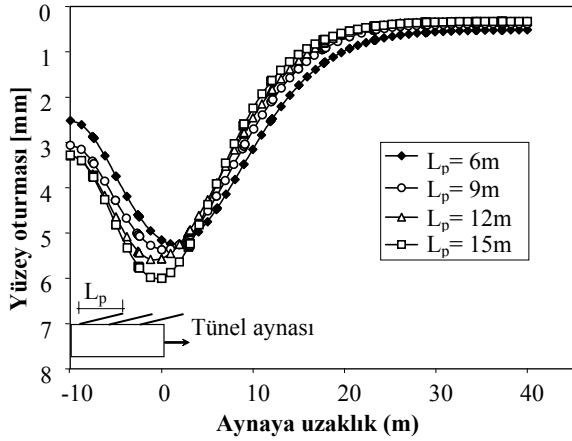
Parametre	Sembol	Zemin	Birim
Malzeme Modeli		Moh-CI.	-
Davranışı Tipi		Drenajlı	-
Kuru bir. hacim ağı.	γ_{dry}	18	kN/m ³
Doygun bir hacim ağı.	γ_{wet}	20	kN/m ³
Yatay permeabilite	k_x	1	m/gün
Düşey permeabilite	k_y	1	m/gün
Elastisite modülü	E_{ref}	2.0×10^4	kN/m ²
Poisson oranı	ν	0.30	-
Kohezyon	c_{ref}	60	kN/m ²
Sürtünme açısı	ϕ	30	°
Kabarma açısı	ψ	0	°
Arabirim azaltma fak.	R_{inter}	Rijit	-
Arab. permblt. par.	Perm.	Doğal	-



Şekil 6. Deforme olmuş sonlu elemanlar ağı, ($C=2D=10m$, $L_b=15m$, ölçek 150 kat abartılı)

Şemsiye-kemer borularının yüzey oturmalarına etkisi

Şemsiye borularının her 1 metrelik kısmının çelik iksa takımları ile desteklendiği düşünülen 2 tünel çaplık tünel kazısı sonundaki kazı durumu incelendiğinde farklı boru boyu seçiminin tünel üzerinde oluşan yüzey oturma dağılımlarına etkisi ($C=2D$, $\beta=5^\circ$ özel durumu) Şekil 7’de verilmiştir. Burada dikkat çekici bir durum, yüzey oturmalarının aynanın yaklaşık $4D$ kadar ilerisinde başladığının ve $2D$ kadar arkasına kadar da devam ettiği ve en büyük değerinin de ayna üzerinde gerçekleştiğidir. Boru boylarının (L_p) artırılması yüzey dağılımı üzerinde olumlu bir etki yapmakta ve yüzey oturma bölgesini daralttığı görülmektedir.

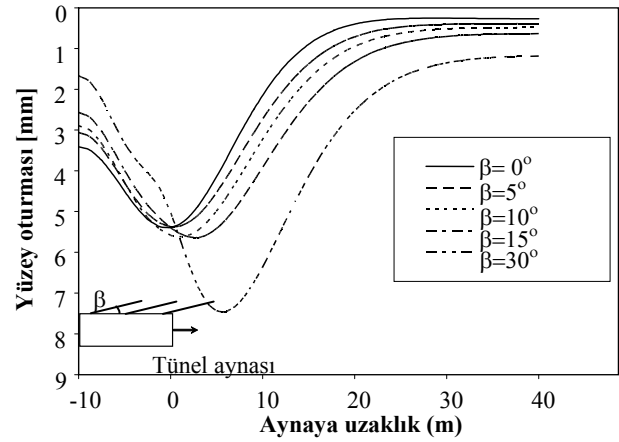


Şekil 7. Şemsiye borularının yüzey oturmalarına etkisi, ($C=2D$, $\beta=5^\circ$)

Tünel aynasının üzerinde oluşan en büyük yüzey oturma değerlerinin şemsiye borularının uzunluğundan (L_p) olumsuz olarak etkilendiği görülmektedir. Ancak bu durum kazı boyunun $2D$ olduğu adım için doğru olmakla birlikte farklı kazı adımları için yapılan diğer modellerde farklı sonuçlara ulaşıldığından “şemsiye borusu boyu uzunluğunun en büyük yüzey oturmalarına olumlu ya da olumsuz etki yaptığından” söz etmek mümkün görülmemektedir.

Şemsiye-kemer borularının farklı uygulama açılarının yüzey oturma dağılımına etkisi Şekil 8’de ($C=2D$, $L_p=9m$ özel durumu) görülmektedir. Burada uygulama açısının artırılmasının yüzey

oturma miktarlarına olumsuz etki yaptığı görülmektedir. Bu durum farklı her şemsiye borusu koşulu için geçerlidir. Dolayısıyla yüzey oturmaları değeri için en elverişli uygulama açısının tünel eksenine paralel olduğu ($\beta=0^\circ$) söylenebilir. Ancak böyle bir durum ardışık boruların çakılmasına engel olacağı için pratikte uygulanabilirliği yoktur. Dolayısıyla imalat sırasında şemsiye-kemer borularının mümkün olan en küçük açıyla uygulanmasının, deformasyon denetiminde en yüksek verimi vereceği söylenebilir.

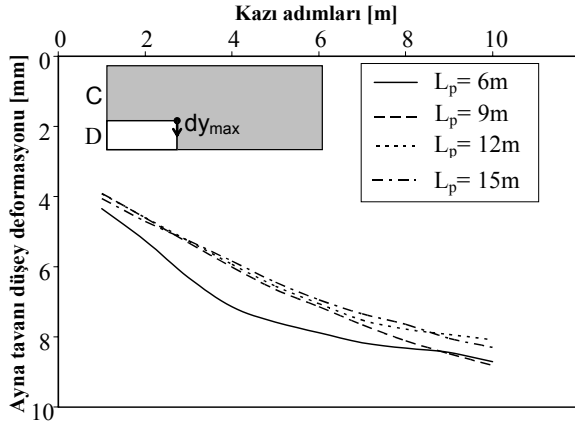


Şekil 8. Şemsiye borularının uygulama açısının yüzey oturmalarına etkisi, ($C=2D$, $L_p=9m$)

Şemsiye-kemer borularının ayna tavanı deformasyonlarına etkisi

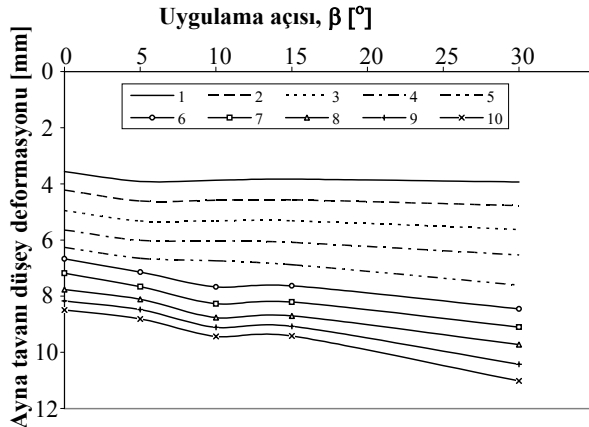
Şemsiye-kemer borularının kazı adımları boyunca ayna tavanı düşey deformasyonlarına etkisi incelenmiştir. Her bir kazı adımı 1 metredir. Tünel örtü kalınlığının iki tünel çapına eşit olduğu ($C=2D$) ve şemsiye kemer borusu uygulama açısının 5° alındığı durum için elde edilen tünel tavanı düşey deformasyon grafiği Şekil 9’da verilmiştir. Anılan grafikte ve diğer parametrik modellerden elde edilen sonuç, boru boylarının tünel tavanı düşey deformasyonlarını her kazı kademesi için azalttığı yönündedir.

Şemsiye-kemer borularının uygulama açısının (β), farklı kazı kademeleri için tünel tavanı düşey deformasyonlarına etkisi Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 9. Ayna tavanı en büyük düşey deformasyonu (dy_{maks})-kazı adımları ilişkisi ($C=2D$; $\beta=5^\circ$)

Sunulan grafikte ve diğer parametrik çalışmalarda ayna tavanı düşey deformasyonlarının kazı kademelerinin artımıyla birlikte arttığı ve özellikle ilk 1 tünel çapı kadarlık kazı ($L_{ano}=D$) için şemsiye-kemer uygulama açılarının (β) anılan düşey deformasyonları pek etkilemediği, kazının bundan daha büyük değerleri için uygulama açısının artımı deformasyonları bir miktar artırdığı görülmektedir.

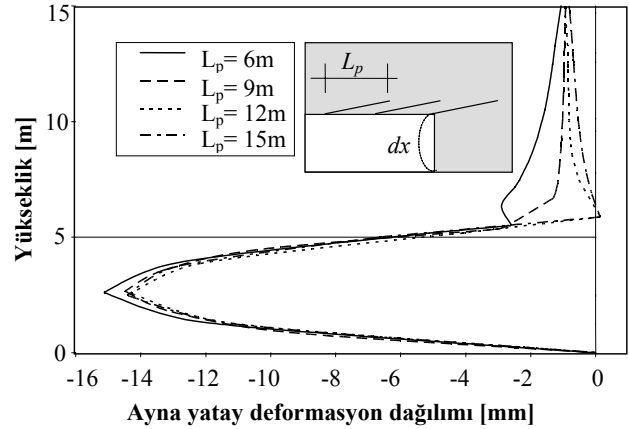


Şekil 10. Farklı uygulama açılarının (β) kazı adımları boyunca ayna tavanı en büyük düşey deformasyonuna etkisi ($C=2D$; $L_p=9m$)

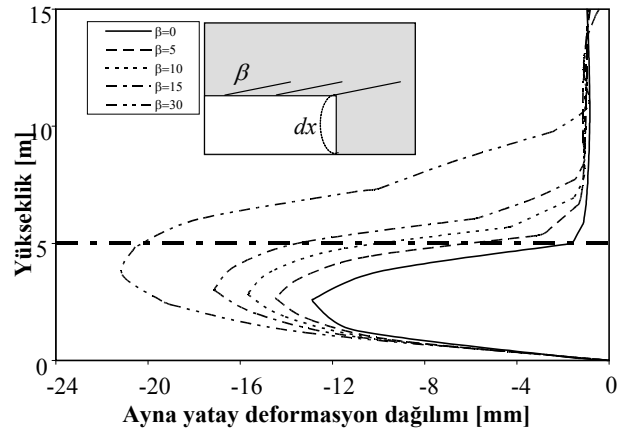
Şemsiye-kemer borularının ayna boyunca oluşan yatay deformasyon dağılımlarına etkisi

Yapılan parametrik çalışmalarda farklı tünel örtü kalınlıkları, şemsiye-kemer borusu boyları ve uygulama açıları için tünel aynası boyunca oluşan yatay deformasyon dağılımları incelenmiştir. Çalışmaların sonucu olarak şemsiye-kemer

borularının boylarının (L_p) ayna yatay deformasyonlarını olumlu yönde etkilediği ve daha uzun boru boyu kullanmanın ayna yatay deformasyonlarını azalttığı söylenebilir (Şekil 11). Uygulama açısının yatay deformasyonlara olumsuz etki yaptığı, uygulama açısını artırmanın daha yüksek yatay deformasyonlara neden olduğu görülmektedir (Şekil 12). Kurulan modellerde görülen bir diğer sonuç da en büyük ayna deformasyonlarının tünelin üstyarısında oluştuğudur.



Şekil 11. Şemsiye boru uzunluklarının (L_p) ayna yatay deformasyon dağılımına etkisi ($C=2D$; $\beta=5^\circ$)



Şekil 12. Şemsiye borusu uygulama açılarının (β) ayna yatay deformasyon dağılımına etkisi ($C=2D$; $L_p=9m$)

Sonuçlar

Zayıf zeminlerde açılan sığ ve orta derinlikteki tünellerde, bir sağlamlaştırma/ön donatılama yöntemi olan şemsiye-kemer yönteminin 2 boyutlu FEM prensibi kullanan elastik-kiriş

boykesit yöntemi ile analizinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Malzeme davranışını ve yükleme durumlarını gerçeğe en yakın şekilde temsil edebilmek için kullanılacak matematik modelin yapısının karmaşık olması, mekanizmayı etkileyen parametrelerin çokluğu ve bu etkileri hesaba katmada kullanılacak yazılımın yeterli kapsama sahip olma zorunluluğu, çözüm için harcanacak zamanın uzaması ve kullanılabilir bilgisayar donanımının da özel ve pahalı olması, uygulama projelerinde detaylı 3 boyutlu analizlerin kullanımını zorlaştırmaktadır.
- Yapılan sayısal modellemeler sonucunda şemsiye borularının uzunluklarının (L_p) en büyük yüzey oturmalarına (S_{maks}) etkisi için farklı her tünel derinliğinde (C) geçerli olabilecek bir bağıntıdan söz etmek mümkün görülmemektedir. Ancak, şemsiye borularının boylarının (L_p) arttırılmasının oturmaların yüzey dağılımı üzerinde olumlu bir etki yaparak yüzey oturma bölgesini daralttığı anlaşılmıştır.
- Tünel çevresinde borularla oluşturulan kemerin kalınlığının arttırılmasının gerek cidar duraylılığının artması gerekse tünel içinde oluşan deformasyonların ve yüzey oturmalarının azalmasına yol açtığı bilinmektedir. Yapılan parametrik hesaplamalar sonucunda şemsiye-kemer borularının uygulama açıları yataydan uzaklaştığı ($\beta \neq 0$) takdirde yüzey oturma dağılımına olumsuz etki yaptığı görülmektedir. Bu durum her farklı parametrik koşul için geçerlidir. Dolayısıyla düşük yüzey oturmaları elde edebilmek için şemsiye borularına verilecek en elverişli uygulama açısının tünel eksenine paralel olduğu ($\beta=0^\circ$) söylenebilir. Ancak bu durumda boruların tünel içinde imal edilmesi mümkün olmayacağından uygulamada şemsiye-kemer borularına, imalatı mümkün olan en küçük açının verilmesinin uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.
- Şemsiye-kemer boru boylarının (L_p) tünel tavanı düşey deformasyonlarını her kazı kademesi için azalttığı görülmüştür.

- Şemsiye-kemer borularının boylarının (L_p) ayna yatay deformasyonlarını olumlu yönde etkilediği ve daha uzun boru boyu kullanımının ayna yatay deformasyonlarını azalttığı görülmüştür.
- Şemsiye-kemer borularının uygulama açısının (β) aynada oluşan aksel deformasyonlara (dx) olumsuz etki yaptığı, uygulama açısını artırmanın daha yüksek aksel deformasyonlar verdiği görülmektedir.

Kaynaklar

- Bae, G.J., Shin, H.S., Sicilia, C., Choi, Y.G., ve Lim, J.J., (2005). Homogenization framework for three-dimensional elastoplastic finite element analysis of a grouted pipe-roofing reinforcement method for tunnelling, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **29**, 1–24.
- Brinkgreve, R.B.J. ve Vermeer, P.A., (1998). “Plaxis Reference Manual (Version 8)” University of Stuttgart, Germany A.A.Balkema/ Rotterdam/ Brookfield.
- Lee, K.M., Rowe, R.K., Lo, K.Y., (1992). Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter, *Canadian Geotechnical Journal*, **29**, 929-954.
- Lo, K.Y., ve Rowe, R.K., (1982). Prediction of ground subsidence due to tunnelling in clays, Research report GEOT-10-82, Faculty of Engineering Science, The University of Western Ontario, London, Ont.
- Müller, N., (1978). *Der Felsbau, Dritterband: Tunnelbau*, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Oreste, P.P ve Peila, D., (1997). La progettazione degli infilaggi in avanzamento nella costruzione della gallerie, *Convegno di ingegneria geotecnica*, Perugia Ottobre 1997.
- Peck, R.B., (1969). Deep excavations and tunnelling in soft ground. State-of-the Art Volume, *Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 225-290, Mexico City.
- Rabcewicz, L. V., (1963). Bemessung von hohlraumbauten. Die “Neue Österreichische Bauweise” und ihr einfluss auf gebirgsdruck, wirkungen und dimensionierung, *Felsmech*, u. Ing. Geol. Vol. I, H. 374.
- Rowe, R.K., Lo, K.Y., Kack, G.J., (1983). A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground. *Canadian Geotechnical Journal*, **20**, 11-22.
- Rowe, R.K., Lee, K.M., (1992). Subsidence owing to tunnelling. II. Evaluation of a prediction

- technique, *Canadian Geotechnical Journal*, 29: 941-954.
- Vardar, M., (1979). *Yeraltı Kaya Yapıları Mekaniğinde Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Ana İlkeleri*, Ankrajlar ve Boyutlandırılması, DSİ, Ankara.
- Vardar M. (1994). Metro Tünellerinde Duraylılığın Korunması ve Sağlanması Sağlamlaştırma-Destekleme-İyileştirme. *Ulaşımda Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu* (Genişletilmiş 2. Baskı)