

Zayıf Kaya Kütlelerinde Açılan Dairesel Kesitli Bir Tünelde Radyal Deformasyonların Sayısal Modelleme ile Analizi

Alaattin SAKCALI*¹, Hüseyin YAVUZ²

¹Atatürk Üniversitesi, Oltu Yer Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 25400, Erzurum
(ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9246-917X>)

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta
(ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2728-7374>)

(Alınış / Received: 13.07.2018, Kabul / Accepted: 31.01.2019, Online Yayınlanma / Published Online: 17.04.2019)

Anahtar Kelimeler

Radyal
deformasyon,
Sayısal modelleme,
Sonlu farklar,
Zayıf kaya kütleleri

Özet: Teknolojik gelişmeler, nüfus artışı, seyahat için istenen güven ve konfor gibi farklı nedenler son zamanlarda daha fazla tünel açımına neden olmuştur. Tünel kazısı sırasında tünel çevresindeki kaya kütlelerinde oluşacak deformasyonun tahmini tahkimat tasarımı için önemli bir parametredir. Araştırmacılar dairesel tünellerde tünel ilerleme yönünün arkasındaki deformasyonların aynaya olan mesafeye bağlı olarak değiştiğini vurgulamışlar ve dairesel kesitli yer altı açıklıkları için uzunlamasına deformasyon profilini (LDP) veren farklı eşitlikler önermişlerdir. Bu eşitlikler kullanılarak tünel çevresinde oluşacak deformasyonlar yaklaşık olarak tahmin edilebilmektedir. Bir yer altı açıklığında meydana gelecek deformasyonları daha net tahmin etmek için sayısal veya fiziki modellemeler yapılması gerekmektedir. Sayısal modelleme yöntemi hem kolay hem de ekonomik olması nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Bu çalışmada, zayıf kaya kütlelerini temsilen bir koşul belirlenmiş ve bu kaya kütleleri koşulunda, 6,63 m kazı çapında açılmış dairesel bir tünel farklı derinlikler (arazi gerilmesi) için sonlu farklar yöntemine dayalı olarak modellenmiştir. Modellerden alınan deformasyon değerleri kullanılarak farklı derinlikler için LDP eğrileri oluşturulmuş ve derinliğe bağlı deformasyon değişimleri araştırılmıştır. Modelleme ile elde edilen bu LDP eğrileri, literatürdeki eşitlikler ile karşılaştırılmıştır.

Numerical Modelling Analysis of Radial Deformations Around a Circular Tunnel Excavated in Weak Rock Masses

Keywords

Radial deformation,
Numerical modelling,
Finite difference,
Weak rock mass

Abstract: Different causes such as technological developments, population growth, safety and comfort desired for travel have recently led to more tunnel opening. During the tunnel excavation, the deformation prediction of the rock mass around the tunnel is an important parameter for the support design. Researchers emphasize that the deformations behind of the advancing face in circular tunnels vary depending on distance to the face and proposed different equations that give longitudinal deformation profile (LDP) for circular underground openings. By using these equations, deformations around the tunnel can be estimated approximately. Numerical or physical modeling is required to predict deformations occurring in an underground opening. Numerical modeling method is more preferred because it is both easy and economical. In this study, a condition representing weak rock mass was determined and a circular opening which is 6,63 m in diameter in this rock mass condition was modelled for different depths (in situ stresses) based on the finite difference method. LDP curves for different depths using the deformation values obtained from models were created and the changes of depth-dependent deformation were investigated. These LDP curves obtained by modeling were compared with the equations in the literature.

1. Giriş

Yeryüzündeki alan yetersizliği ve engebeli topoğrafik koşullar tünellerin açılmasını kaçınılmaz kılmıştır.

Tüneller ağırlıklı olarak ulaşım amacıyla açılrsa da haberleşme hattı tünelleri, su tünelleri, gaz nakil hattı tünelleri, askeri amaçlı tüneller farklı kullanım alanlarındaki tünellere örnek olarak verilebilir.

Madencilikte ise tüneller daha çok ekonomik değere sahip madenlere ulaşmak amacıyla açılmakta olup bunun dışında son yıllarda atık su, derivasyon gibi daha özel amaçlı tünellerin açılması da zorunlu hale gelmiştir. Tünellerin açılmasında farklı yöntemler uygulanmasına rağmen yeryüzüne yakın yerlerde daha ekonomik olması nedeniyle aç-kapa yöntemi kullanılmaktadır. Derinlerde tünel açımı ise sığ derinliklerde açılan tünellere nazaran biraz daha zor olmaktadır.

Küçük kesitli tünellerin açılması tek kademede gerçekleştirilebilirken kesitin büyümesi aynanın kademeli olarak kazılmasını gerektirmektedir. Geçmişten günümüze tünel açımında farklı kazı yöntemleri kullanılmıştır. Makineli üretim ve akabinde gelişen teknoloji bu sektörde de kendini göstermiş ve farklı kazı makinelerinin üretilmesini sağlamıştır. Tünel aynasını kısmen kavrayarak kazının gerçekleştirildiği kollu tünel açma makineleri (roadheader) ve tam cephe tünel açma makineleri (TBM-Full Face Tunnel Boring Machine) son yıllarda yaygın olarak kullanılan tünel açma makineleridir. Ayrıca kazının yapıldığı kayanın durumu göz önünde bulundurularak farklı TBM türleri de geliştirilmiştir.

Hangi yöntemle açılırsa açılın tünel aynası çevresinde oluşan deformasyon ve gerilmeler tahkimat tasarımı için büyük önem arz etmektedir. Araştırmacılar bu amaç doğrultusunda tünel aynası çevresinde oluşacak deformasyonların tahmin edilmesi ve tahkimat tasarımının yapılmasına yönelik görgül, yarı görgül veya analitik çeşitli çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deformasyonu tahmin etmek için yapılan çalışmalarda uzunlamasına deformasyon profilleri (LDP) kullanılarak tünel aynası çevresinde meydana gelecek radyal deformasyonların tahmin edilebileceği vurgulanmaktadır.

Corbetta vd. [1] LDP tahminine yönelik yaptıkları çalışmalarında kaya kütlelerinin elastik özellik gösterdiği varsayımından yola çıkmışlardır. Kaya kütleleri kırılma meydana gelinceye kadar elastik özellik, kırılma sonrasında ise farklı davranışlar göstermektedir. Corbetta vd. [1] tarafından önerilen eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\frac{u_r}{u_r^M} = 0,29 + 0,71 \left[1 - e^{(-1,5(L/R))^{0,7}} \right] \quad (1)$$

Panet [2] çalışmasında kaya kütlelerini yine elastik bir malzeme olarak ele alıp tünel aynası arkasında meydana gelen deformasyonları tahmin eden bir eşitlik önermiştir. Önerilen bu eşitlik Panet ve Guenot [3] ile Panet [4] tarafından hidrostatik koşullar altındaki dairesel kesitli tüneller için geliştirilen eşitliğin revize edilmiş halidir. Aşağıda Panet [2] tarafından önerilen eşitlik verilmiştir.

$$\frac{u_r}{u_r^M} = 0,25 + 0,75 \left[1 - \left(\frac{0,75}{0,75 + L/R} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Carranza-Torres ve Fairhurst [5] çalışmalarında elasto-plastik davranış gösteren kaya kütlelerinde LDP eğrilerinin oluşturulmasına yönelik Hoek [6] tarafından önerilen eşitliği sayısal modellerle karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları Eşitlik 3, Chern vd. [7]'nin arazi ölçüm verileri ile Hoek [6] tarafından geliştirilen LDP eşitliğidir.

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + e^{\left(\frac{-L/R}{1,1} \right)^{-1,7}} \right] \quad (3)$$

Unlu ve Gerçek [8] yaptıkları çalışmada Poisson oranı değişiminin tünel deformasyonlarına etkisini incelemişlerdir. LDP eğrilerinin oluşturulmasında tünel aynasına olan mesafeye ek olarak Poisson oranının da bir parametre olarak alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Tünel aynası arkasında meydana gelecek deformasyon değişimini Eşitlik 4 ile tanımlamışlardır.

$$\frac{u_r}{u_r^M} = u_{r0} + A_b \left\{ 1 - \left[B_b / (B_b + (L/R)) \right]^2 \right\} \quad (4)$$

Vlachopoulos ve Diederichs [9] LDP belirlenirken aynaya olan mesafenin yanı sıra plastik zon yarıçapının tünel yarıçapına göre normalize edilmiş halinin de değişken olarak kullanılması gerektiğini vurgulamışlar ve tünel aynası arkasında oluşacak deformasyonlar için Eşitlik 5'i önermişlerdir.

$$\frac{u_r}{u_r^M} = 1 - \left(1 - \frac{u_{r0}}{u_r^M} \right) e^{-((3L/R)/(2R_p/R))} \quad (5)$$

Eşitlik 1-5'te; u_r radyal deformasyonu, u_r^M maksimum radyal deformasyonu, L tünel aynasına olan mesafeyi, R kazı yarıçapını, u_{r0} aynada oluşan deformasyonu ifade etmektedir. Eşitlik 4'te u_{r0} , A_b ve B_b Poisson oranına bağlı birer katsayı olup $u_{r0}=0,22\nu+0,19$; $A_b=-0,22\nu+0,81$; $B_b=0,39\nu+0,65$ ile hesaplanır. Eşitlik 5'te ise R_p plastik zon yarıçapı olup $u_{r0}=(1/3)\exp(-0,15R_p/R)$ ile bulunur.

Bu çalışmalarda önerilen eşitliklerle uzunlamasına deformasyon profilleri (LDP) oluşturulabilmektedir. Maksimum deformasyon kaya kütleleri özelliklerine göre değişmekte olup düzlem-birim deformasyon (plain-strain) analizlerinin yanı sıra kapanma-yakınsama (convergence-confinement) yöntemindeki tahkimat basıncının 0 olduğu değerden de belirlenebilmektedir.

Basarir vd. [10] çalışmalarında kaya kütleleri sınıflama sistemlerinden RMR'ı kullanarak maksimum deformasyon değerine bağlı olmaksızın LDP eğrilerinin oluşturulabileceğini vurgulamışlardır. Önerdikleri eşitliklerde tünel aynası çevresinde meydana gelen radyal deformasyonlar kaya kütleleri sınıflama sistemlerinden biri olan RMR değerinin yanı sıra tünel aynasına olan mesafenin kazı çapına oranı ile değişmektedir. Eşitlik 6, Basarir vd. [10] tarafından ayna arkasındaki deformasyonun tahmini

için geliştirilen bir eşitlik olup bu eşitlikteki katsayılar derinliğe göre değişmektedir.

$$\frac{u_r}{R} = aRMR^b(L/D)^c \quad (6)$$

Eşitlikteki a, b ve c katsayıları derinliğe göre değişmektedir. 100, 200, 300 ve 400 m derinlik için a katsayısı sırasıyla 1271,065; 17316,930; 103903,104; 560042,059'dur. Eşitlikteki b katsayısı sırasıyla -2,755; -3,269; -3,635; -4,007 iken c katsayısı ise sırasıyla 0,114; 0,127; 0,145; 0,164'tür.

Tünel aynası arkasında oluşacak deformasyonların tahmin edilmesine yönelik yapılan bu çalışmaların amacı deformasyonların önceden belirlenerek uygun tahkimat tasarımının yapılmasıdır. Önerilen eşitlikler kullanılarak deformasyonlar tahmin edilebilmesine rağmen maksimum deformasyonun belirlenmesi için ayrı bir çalışma yapmak gerekecektir. Bu nedenle modelleme konusunda pratiği olan birinin direk modelden bu verileri sağlaması hem daha net sonuçlar almasını sağlayacak hem de daha az zamanını alacaktır.

Bu çalışmada, zayıf kaya kütlelerini temsil eden bir kaya kütleli koşulu belirlenip bu koşullarda 6,63 m kazı çapında, farklı derinlikte, dairesel kesitli açılmış tüneller modellenmiştir. Modellenen tünellerin tavanından alınan deformasyon verileri kullanılarak LDP eğrileri oluşturulmuştur. Farklı derinliklerdeki kazılar için yapılan modellerden elde edilen normalize edilmiş radyal deformasyon değişimleri literatürdeki eşitlikler kullanılarak belirlenen LDP eğrileriyle kıyaslanmıştır. Ayrıca, çalışma içerisinde kazı çevresindeki radyal deformasyonların ayrıntılı olarak incelenmesi için deformasyon konturları da sunulmuştur.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Zayıf kaya kütleli özellikleri

Kaya kütlelerinde açılacak bir tünelin sayısal olarak modellenmesi için kaya kütlelerinin gerilme-birim deformasyon davranışının bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada zayıf kaya kütlelerinde açılan farklı derinliklerdeki tüneller modellendiği için kaya kütlelerinin elastik-ideal plastik davranış gösterdiği varsayılmıştır. FLAC3D [11] ile modellemede model Hoek-Brown kullanılmış olup genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme kriteri Eşitlik 7'de verilmiştir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma'_{ci}} + s \right)^a \quad (7)$$

Süreksizlik içeren kaya kütlelerinde dayanımlar belirlenirken kaya kütlelerini temsil eden numune boyutları çok büyük olmalıdır. Bu boyutlarda numune almanın zorluğunun yanı sıra dayanımının belirlenmesi için kullanılacak deney hücreleri de büyük boyutlarda olmaktadır [12]. Bu sorunun önüne

geçmek için kaya kütleli sınıflama sistemleri geliştirilmiştir. Kaya kütleli sınıflamasında farklı sınıflama sistemleri olmasına rağmen Bieniawski [13] tarafından önerilen RMR, Barton vd. [14] tarafından önerilen Q ve Hoek vd. [15] tarafından önerilen GSI kaya kütleli sınıflama sistemleri yaygın olarak kullanılanlardır. Bu çalışmada GSI sınıflama sistemi kullanılmış olup modellenen kaya kütleli bu sınıflama sisteminde zayıf kaya kütleli için tanımlanan aralıktadır.

GSI sınıflama sisteminde zayıf kaya kütleli tanımlandığı GSI değeri 10 ile 50 arasında değişmektedir. Bieniawski [16] tarafından önerilen RMR sınıflama sistemine göre zayıf kaya kütleli RMR değeri ise 20 ile 40 arasındadır. RMR sınıflama sistemi ile GSI arasında doğrusal bir ilişki olup GSI değerini belirlemede Eşitlik 8 kullanılabilir [17].

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (8)$$

Zayıf kaya kütleli RMR'a göre tanımlandığı bu aralıkta GSI değeri ise Eşitlik 8'e göre 15 ile 35 arası olarak hesaplanmıştır. Modellenen kaya kütleli GSI değeri 25 olarak alınmış olup bu değer GSI ve RMR sınıflama sistemlerinde zayıf kaya kütleli için tanımlanan aralığın ortalama değeridir.

Kaya kütleli basınç dayanımı (σ_{cm}) kaya kütleli yapısı, süreksizlik özellikleri ve yüzey durumu gibi özelliklere bağlı olarak değişmektedir. Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}) zayıf kaya kütleli için 5-25 MPa, orta kalitede kaya kütleli için ise 25-50 MPa aralığında değişmektedir [17]. Kaya malzemesinin basınç dayanımı farklı kaya kütleli için değişebileceğinden keskin bir sınır oluşturulmadan kaya malzemesi tanımlanmıştır. Modellerde kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı ortalama bir değer olarak 30 MPa alınmıştır.

Hoek ve Brown [17] tarafından önerilen ve literatürde farklı kaya kökenlerindeki zayıf kaya kütleli için belirlenen m_i değerlerine bakılarak modellerde kullanılan kaya kütleli m_i değeri ortalama bir değer olarak 15 alınmıştır.

Kaya kütleli dayanım karakteristiğini tanımlayan Hoek-Brown'un m_b , s, a değerinin belirlenmesinde Hoek ve Brown [18] tarafından önerilen Hoek vd. [19] tarafından geliştirilen Eşitlik 10-12 kullanılmıştır.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (10)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (11)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (12)$$

Burada m_b , m_i , s ve a Hoek-Brown sabitleri olup D ise patlatma hasarı ve gerilme gevşemesinden kaynaklı

örülenme faktörüdür. Zayıf kaya kütlelerinde mekanize veya patlatma yapılmadan gerçekleştirilen kazılarda kazı çevresindeki kaya kütlelerinde çok az zarar gözlenir [19]. Bu nedenle örülenme faktörü m_b ve s sabitlerinin belirlenmesinde 0 olarak alınmıştır.

Deformasyon modülünün (E_m) belirlenmesinde ise ($\sigma_{ci} < 100$ MPa için) Serafim ve Pereira [20] tarafından RMR değerine bağlı olarak önerilen eşitliğin modifiye edilmiş hali olan Eşitlik 13 kullanılmıştır [17].

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{((GSI-10)/40)} \quad (13)$$

Burada E_m deformasyon modülü (GPa), σ_{ci} kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa), GSI ise Hoek ve Brown [17] tarafından önerilen kaya kütlelerinin jeolojik dayanım indeksi değeridir. Kayma ve hacimsel esneme modüllerinin belirlenmesinde ise sırasıyla Eşitlik 14 ve 15 kullanılmıştır.

$$G = \frac{E_m}{2(1+\nu)} \quad (14)$$

$$K = \frac{(1+\nu)G}{(3/2)(1-2\nu)} \quad (15)$$

Burada G kayma modülü (GPa), K hacimsel esneme modülü (GPa) ve ν Poisson oranıdır. Zayıf kaya kütlelerinde ortalama Poisson oranı 0,25 olarak alınmış ve buna göre hesaplamalar yapılmıştır. Modellenen zayıf kaya kütlelerinin veri olarak girilen mekanik ve elastik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

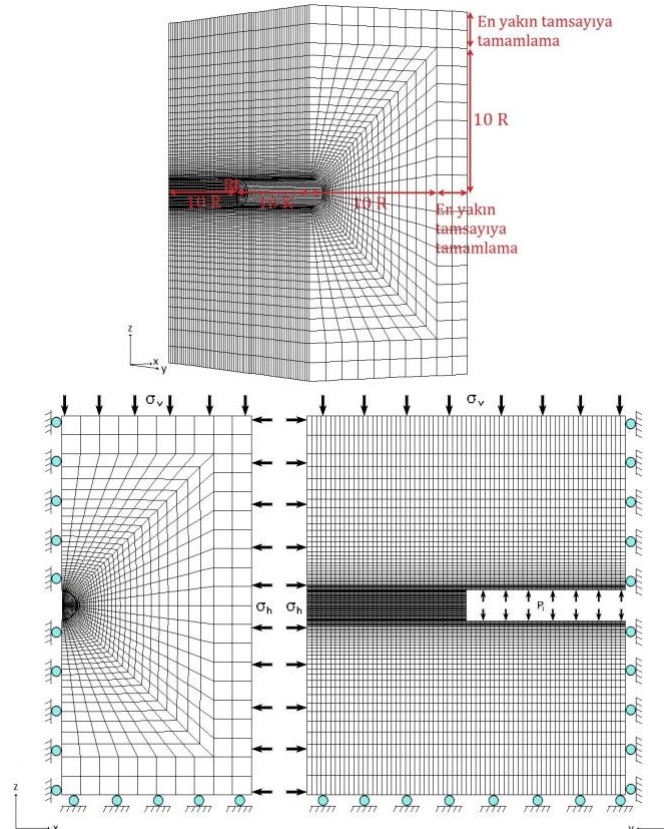
Tablo 1. Zayıf kaya kütlelerinin karakteristikleri

| Kaya kütle özellikleri | | Değerler |
|------------------------|---------------------|----------|
| Dayanım özelliği | a | 0,53 |
| | m_b | 1,03 |
| | s | 0,00024 |
| Elastiklik özelliği | σ_{ci} (MPa) | 30 |
| | G (GPa) | 0,52 |
| | K (GPa) | 0,87 |

2.2. Tünel kazı çapı ve derinlikleri

Tüneller kullanım amacına göre farklı kazı çaplarında açılmaktadır. İstanbul'da TBM ile açılan metro tünelleri genellikle 5,7 m segment iç çaplı (D_{i1}) olarak kazılırken, atık su tünelleri 2,6 m segment iç çapında açılmaktadır [21, 22]. Son yıllarda metro tünellerine yapılan yatırımların artması nedeniyle bu çalışmada metro kazıları için kullanılan kazı çapı tercih edilmiş ve kazı çapı 6,63 m olan dairesel kesitli tüneller modellenmiştir.

Tüneller topoğrafik, jeolojik şartlar ve kullanım amacı göz önünde bulundurularak farklı derinliklerde açılmaktadır. Şehir içinde ulaşım amacıyla açılan metro tünelleri yayaların ulaşımı da göz önünde bulundurularak mümkün mertebe sığ derinliklerde olmaktadır. Dağ, tepe gibi zor engellerin aşılması için açılacak tünellerde ise bu derinlikler artmaktadır. Derinlik değişiminin tünel aynası çevresinde oluşacak deformasyona etkilerini araştırmak amacıyla 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 m derinliğe sahip tüneller modellenmiştir.



Şekil 1. Model ağları, sınır koşulları ve boyutları

2.3. Model koşulları

Modellerin doğru sonuçlar vermesi için kaya kütleleri özellikleri ve tünel geometrilerinin yanı sıra model ağ sayısı, model ağ boyutları ve sınır koşulları gibi model parametrelerinin de iyi belirlenmesi gerekmektedir.

Bu amaç doğrultusunda farklı model ağlarının ve model sınırlarının etkisinin incelendiği parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Model sınırları tünel yarıçapının 7-8 katı uzaklığında alındığında kenar ve köşe etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Bu nedenle model sınırı kazı yarıçapının yaklaşık 10 katı olarak alınmıştır. Model tünelin kazı eksenini yönündeki uzunluğu 68 m olarak seçilmiştir. Toplam kazının yapıldığı uzunluk ise kuvvetlerin dengeye ulaşmasına izin verecek boyutta tercih edilmiş olup 34 m'dir. Şekil 1'de kazısı tamamlanmış bir tünel modelinin model ağları, sınır koşulları ve boyutları verilmiştir.

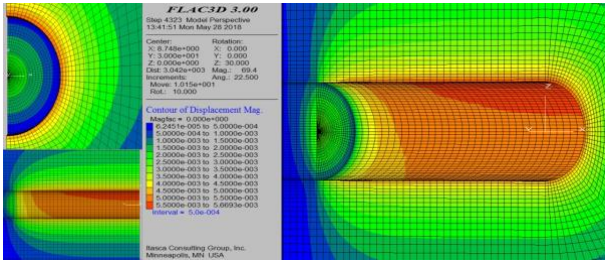
Modellenen tünel kazı çaplarının tam sayı olmaması ve model sınırlarının kazı yarıçapına bağlı olarak belirlenmesi nedeniyle sınır mesafeleri de tam sayı olmayacaktır. Bu nedenle x ve z yönlerinde model sınırlarını yarıçapın yaklaşık 10 katında tutabilmek

için küp model ağlar eklenmiş ve x ile z yönündeki mesafeler 40 m olarak belirlenmiştir.

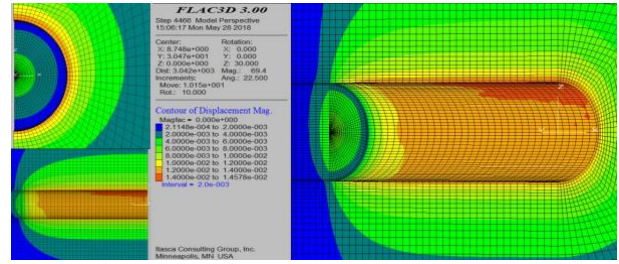
Model sınırlarına ise derinliğe bağlı olarak değişen arazi gerilmeleri uygulanmıştır. Brown ve Hoek [23] 0-3000 m aralığındaki derinliklerde düşey gerilme belirlenirken gerilme değişiminin 0,027 MPa/m olarak alınabileceğini ve arazi gerilmesinin Eşitlik 16 ile belirlenebileceğini vurgulamışlardır.

$$\sigma_v = 0,027 H \quad (16)$$

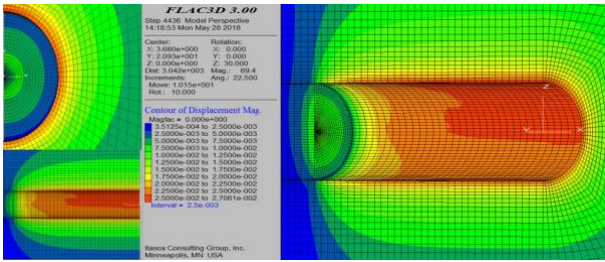
Modellerde arazi gerilmesinin hidrostatik olduğu varsayılmıştır. Hidrostatik koşullar altında yatay gerilme düşey gerilmeye eşit olup derinlik değişimine göre hesaplanan düşey gerilme değeri aynı zamanda yatay gerilme değeri olarak uygulanmıştır. 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 m derinlik için uygulanan düşey ve yatay gerilmeler sırasıyla 1,35; 2,7; 4,05; 5,4; 6,05 ve 8,1 MPa'dır. Farklı derinliklerde tahkimatsız açılan tüneller modellenmiştir. Dairesel kesitli yer altı açıklığı çevresinde oluşacak deformasyonlar kesit boyunca yaklaşık değerlerde olacağından tünel aynasının gerisine doğru birer metre aralıklarla tavan bölgesinden deformasyonlar kaydedilerek analizler gerçekleştirilmiştir.



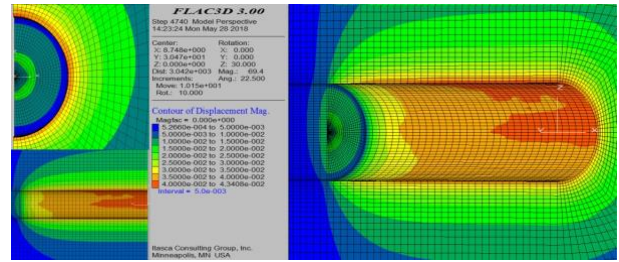
(a) 50 m



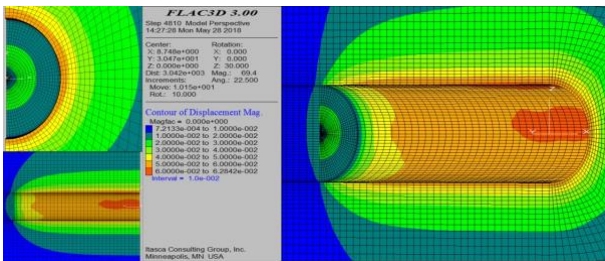
(b) 100 m



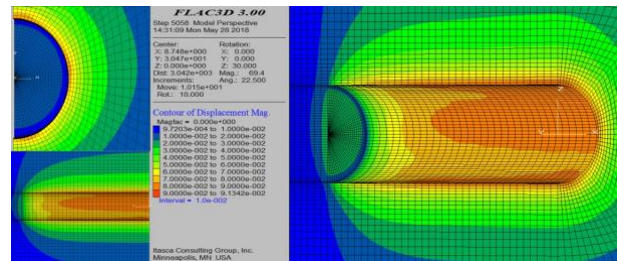
(c) 150 m



(d) 200 m



(e) 250 m



(f) 300 m

Şekil 2. Farklı derinliklerde açılmış tünel aynası çevresindeki deformasyon konturları

3. Bulgular

Üzerindeki kaya kütlelerinden kaynaklı yer altındaki birincil gerilmeler tünel kazısı sonrasında yerini ikincil gerilmelere bırakacak ve deformasyonlar söz konusu olacaktır. Araştırmacılar farklı yöntemler kullanarak önerdikleri LDP eşitlikleriyle tünel aynası çevresinde oluşan radyal deformasyonların tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, kaya kütleleri parametreleri $GSI=25$, $\sigma_{ci}=30$ MPa ve $m_i=15$ olan kaya kütlelerinde, 6,63 m kazı çapında sırasıyla 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 m derinlikte açılmış dairesel tüneller modellenmiştir. Tünellerde oluşan deformasyonların konturları Şekil 2'de verilmiştir. Modellerin deformasyon konturlarına bakılacak olursa zayıf kaya kütlelerinde, aynı kazı çapında, farklı derinliklerde açılmış dairesel kesitli tünellerde deformasyonlar derinlik artışı ile artmaktadır. Derinlik artışı ile üzerindeki kaya kütlelerinden kaynaklı tünel çevresinde gerilme artışı söz konusu olacaktır. Gerilme artışı ise daha fazla deformasyonun meydana gelmesini sağlamaktadır. Tünel aynası önünde kazı yarıçapının yaklaşık 4 katı uzaklıkta deformasyon gözlenmekte ve tünel aynasına doğru yaklaşıldıkça bu artmaktadır. Yine aynı şekilde tünel aynasının arkasına doğru deformasyonlar artarak devam etmekte ve tünel kazı yarıçapının yaklaşık 8 katı mesafeden sonra sabit kalmaktadır.

Modellerden x, y ve z yönünde kaydedilen u_x , u_y ve u_z deformasyonları kullanılarak radyal deformasyonlar (u_r) hesaplanmıştır. Tünel tavanından birer metre aralıklarla kaydedilen veriler kullanılarak farklı derinlikler için uzunlamasına deformasyon profilleri oluşturulmuştur. Farklı derinliklerde açılmış dairesel kesitli bir tünel için sayısal modelleme verileri

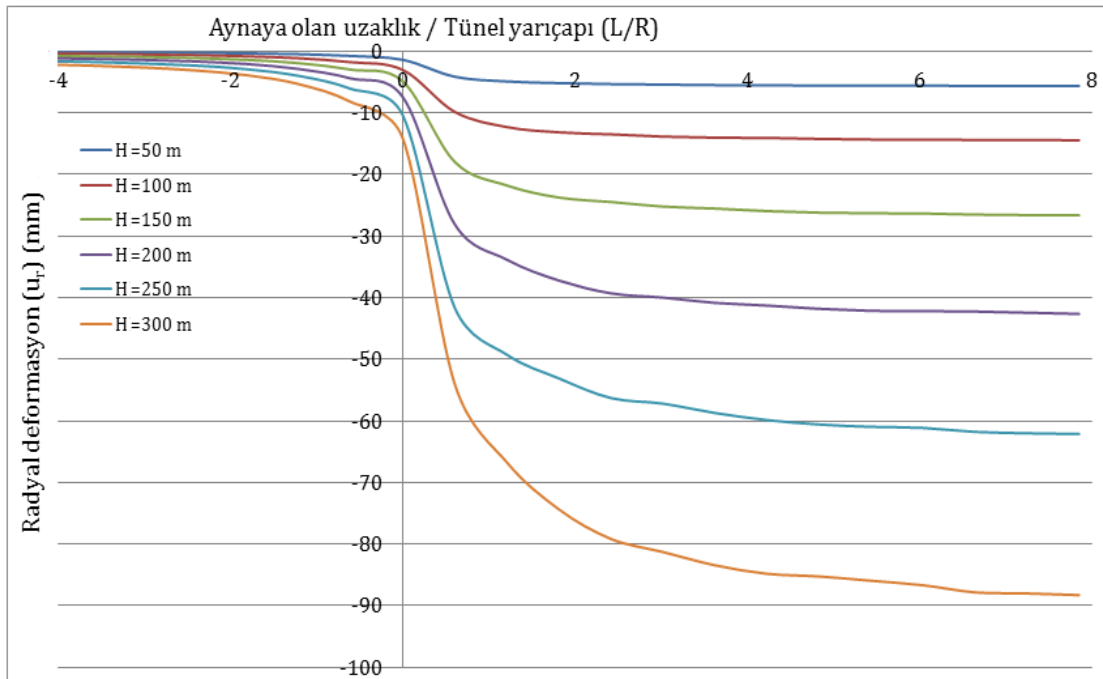
kullanılarak oluşturulmuş LDP eğrileri Şekil 3'te verilmiştir.

Derinlik artışı ile deformasyonlar artmasına rağmen deformasyon değişimini maksimum deformasyon ile oranlanırsa farklılık gözlenmemektedir. Bu nedenle radyal deformasyonlar tünel çevresindeki maksimum deformasyonla normalize edilmiştir. Bu hem derinlik ile tünel aynası çevresindeki deformasyon değişimini hem de literatürde önerilen eşitliklerle modellerin karşılaştırılmasını sağlayacaktır. Literatürde önerilen eşitlikler ve modellerden alınan veriler kullanılarak farklı derinlikler için oluşturulan LDP eğrileri Şekil 4'te verilmiştir.

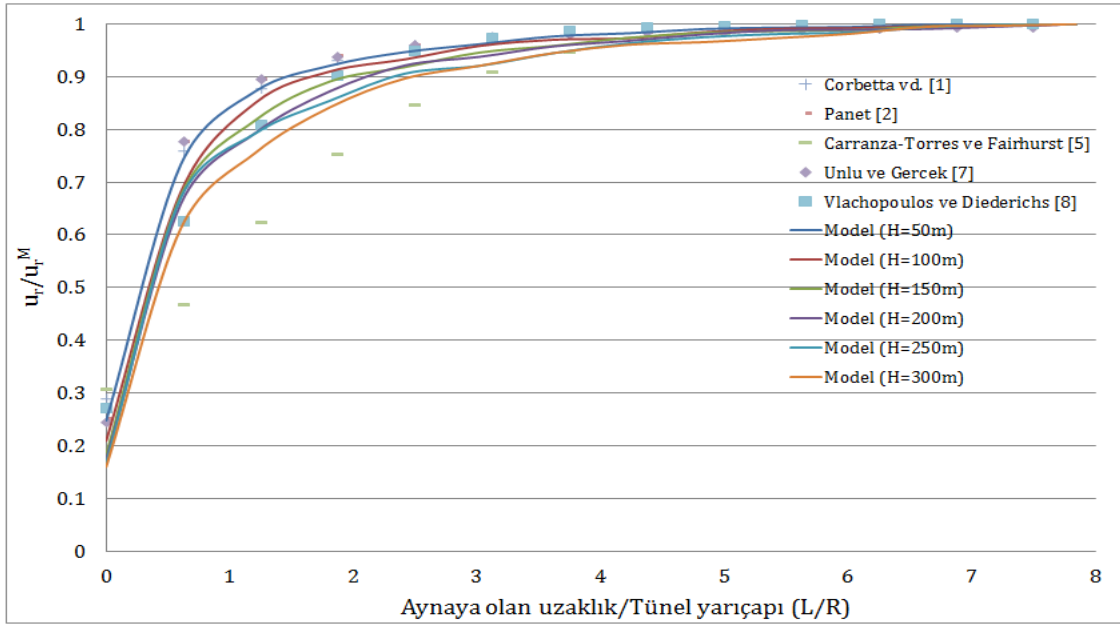
Farklı derinlikler için yapılan tünel modellerinde plastik zon yarıçapları 50 m'den 300 m'ye sırasıyla 3,49; 3,83; 4,28; 4,70; 5,10 ve 5,49 m'dir. Zayıf kaya kütlelerinde açılan bir tünelde derinlik artışı plastik zon yarıçapını artırdığı gibi Şekil 3 ve 4'ten görüleceği üzere radyal deformasyonlarda da dikkate değer artış olmaktadır. Radyal deformasyonun maksimum deformasyona oranı ise (normalize edilmiş radyal deformasyon) belli bir ölçüde azalmaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Dairesel tünellerde tünel çevresindeki kaya kütlelerinde oluşan deformasyonların tahmini için farklı yöntemlerle önerilmiş eşitlikler bulunmaktadır. Bu eşitliklerle LDP eğrileri oluşturulabilirken o tünel çevresindeki maksimum deformasyon değeri düzlem-birim deformasyon analizi veya farklı yöntemlerle belirlenmektedir. Bu zaman alan bir işlem olduğu gibi sayısal modelleme yöntemleri daha kesin sonuçlar almamızı sağlayacaktır.



Şekil 3. Farklı derinliklerdeki LDP eğrileri



Şekil 4. LDP eğrilerinin karşılaştırılması

Bu çalışmada, dairesel kesitli tünel çevresinde oluşacak deformasyonların belirlenmesi için kullanılan eşitliklerin modellerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda zayıf kaya kütlelerinde, 6,63 m kazı çapında açılan farklı derinliklerdeki dairesel kesitli tüneller modellenmiştir.

Araştırmaya konu olan tüneller dairesel olduğu için simetriden dolayı kesitin yarısı modellenmiştir. Tünel çevresindeki deformasyon konturları çalışma içerisinde verilmiş olup tünel tavanından birer metre aralıklarla kaydedilen veriler kullanılarak oluşturulan LDP eğrisi önerilen eşitliklerle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- Gerilme-birim deformasyon ilişkisi kullanılarak sonlu farklar yöntemiyle tünel aynası çevresinde oluşan deformasyonlar modellenebilir.
- Ayna arkasına doğru gidildikçe deformasyonlar artmakta ve tünel yarıçapının yaklaşık 8 katı mesafede bu deformasyonlar maksimum değere ulaşmaktadır.
- Tünellerin açılacağı derinliklerdeki artış arazi gerilmelerinin artmasına neden olduğu gibi ayna tavanında meydana gelecek deformasyonların da artmasına neden olmaktadır.
- Derinlik artışı ile plastik zon yarıçapı artmasına rağmen maksimum deformasyon ile normalize edilmiş radyal deformasyonlar azalmaktadır.
- LDP eğrilerinin oluşturulmasında literatürde önerilerin eşitlikler yerine sayısal modelleme yöntemlerinin kullanılması daha net sonuçların alınmasını sağlayacaktır.

Teşekkür

Çalışmaya ÖYP-05714-DR-14 No'lu Proje ile maddi destek sağlayan SDÜ ÖYP Kurum Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Corbetta, F., Bernaud, D., Nguyen-Minh, D., 1991. Contribution á la Méthode Convergence-Confinement Parle Principe de la Similitude. Rev Fr Géotech, 54 (1991), 5-11.
- [2] Panet, M., 1995. Calcul des Tunnels par la Methodede Convergence-Confinement. Presses de l'ENPC, Paris.
- [3] Panet, M., Guenot, A., 1982. Analysis of Convergence Behind the Face of a Tunnel. Proceedings of the International Symposium on Tunneling, London, 197-204.
- [4] Panet, M., 1993. Understanding Deformations in Tunnels. Comprehensive Rock Engineering, 1 (1993), 663-690.
- [5] Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 2000. Application of the Convergence Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses that Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion. Tunnelling and Underground Space Technology, 15:2 (2000), 187-213.
- [6] Hoek, E., 1999. Personal communication conducted by Carranza-Torres and Fairhurst. Taken from Carranza-Torres and Fairhurst (2000)'s paper.
- [7] Chern, J.C., Shiao, F.Y., Yu, C.W., 1998. An Empirical Safety Criterion for Tunnel Construction. Proceedings of the Regional Symposium on Sediment Rock Engineering, Taipei, 222-227.
- [8] Unlu, T., Gercek, H., 2003. Effect of Poisson's Ratio on the Normalized Radial Displacements Occurring Around the Face of a Circular Tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, 18 (2003), 547-553.

- [9] Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S., 2009. Improved Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42 (2009), 131-146.
- [10] Basarir, H., Genis, M., Ozarslan, A., 2010. The Analysis of Radial Displacements Occurring Near the Face of a Circular Opening in Weak Rock Mass. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 47 (2010), 771-783.
- [11] FLAC3D, 2005. Manuals, FLAC3D Version 3.0. Itasca Consulting Group, Inc., Mill Place, Minnesota.
- [12] Karpuz, C., Hindistan, M.A., 2006. Kaya Mekaniği İlkeleri, Uygulamaları. TMMOB Maden Müh. Odası Yay., Eylül 2006, Ankara, 346 s.
- [13] Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. *Trans S Afr Inst Civ Eng*, 15 (1973), 335-344.
- [14] Barton, N.R., Lien, R., Lunde, J, 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6:4 (1974), 189-239.
- [15] Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M., 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) Classification for Weak and Sheared Rock Masses-the Case of the Athens Schist Formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57:2 (1998), 151-160.
- [16] Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York, 251 s.
- [17] Hoek, E., Brown, E.T., 1997. Practical Estimates or Rock Mass Strength. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 34:8 (1997), 1165-1186.
- [18] Hoek, E., Brown, E.T., 1988. The Hoek-Brown Failure Criterion-1988 Update. *Proceedings 15th Canadian Rock Mechanics Symposium*, Toronto, 31-38.
- [19] Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. 2002. The Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition. *Proc. NARMS-TAC*, 267-273.
- [20] Serafim, J.L., Pereira, J.P., 1983. Consideration of the Geomechanical Classification of Bieniawski. *Proceedings of International Symposium on Engineering Geology and Underground Construction*, 1 (II), Lisbon, 33-44.
- [21] Teknik Rapor, 2016. TBM Hat Tünelleri Ø 5.7m İç Çaplı Segment Kaplama Teknik Raporu. Dudullu-Bostancı Metrosu İnşaat ve Elektromekanik İşleri, Yer Altı Aktarma Merkezleri (otoparklar), Depo Alanı ile Yönetim Binası ve Kontrol Merkezi İnşaatı, 07.10.2016, 250 s.
- [22] NTF PTK, 2008. NTF firmasına Ait Proje Tanıtım Kitapçığı. Beykoz-Kavacık Paşabahçe Tünel Yapımı, 250 s.
- [23] Brown, E.T., Hoek, E., 1978. Trends in Relationships Between Measured and in Situ Stresses and Depth. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15:4 (1978), 211-215.