

Makale Gönderim Tarihi: 15.03.2019

Yayına Kabul Tarihi: 08.04.2019

Kaya Kütlesi Poisson Oranı ve Elastisite Modülü Değerlerinin Tünel Etrafındaki Plastik Zon Sınırları üzerinde Etkileri

Effect of Poisson's Ratio and Modulus of Elasticity of Rock Masses on Plastic Zone around Tunnels

Eren Kömürlü ^{a*}, Serhat Demir ^b

^a *Giresun Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye*

^b *Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye*

* *Sorumlu Yazar: ekomurlu@giresun.edu.tr*

Özet

Bu çalışmada kaya kütlesi Poisson oranı ve Elastisite Modülü değerlerinin izotrop, homojen ve elastik ortamlarda kazılan tünellerin etrafında oluşan plastik zon üzerindeki etkileri sonlu elemanlar analizleri ile numerik olarak incelenmiştir. Farklı arazi gerilmesi (birincil gerilme) dağılımı koşullarında Poisson oranı artışı ile plastik zon sınırlarında daralma olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, kaya kütlesinin elastisite modülü değerleri artışı ile az olsa da plastik zon sınırlarında daralma görülmüştür. Plastik zon kestirimlerinde kaya kütlelerinin Poisson oranı değerlerinin ihmal edilmeyecek düzeyde sonuçları etkilediği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tünellerde duraylılık, Tünel etrafında yenilme bölgesi, Plastik zon, Poisson oranı, Elastisite modülü

Abstract

In this study, effect of changes in Poisson's ratio and Modulus of Elasticity values on plastic zone borders around the tunnels excavated in isotropic, homogeneous and elastic rock masses was numerically investigated by carrying out a series of finite element analyses. It was determined under varying in situ stress distribution conditions that the plastic zone thickness narrows with an increase in the Poisson's ratio. The plastic zone thickness was found to slightly decrease with an increase in the Modulus of Elasticity. It was assessed in the plastic zone thickness estimation analyses that Poisson's ratio is not a negligible parameter to change the results.

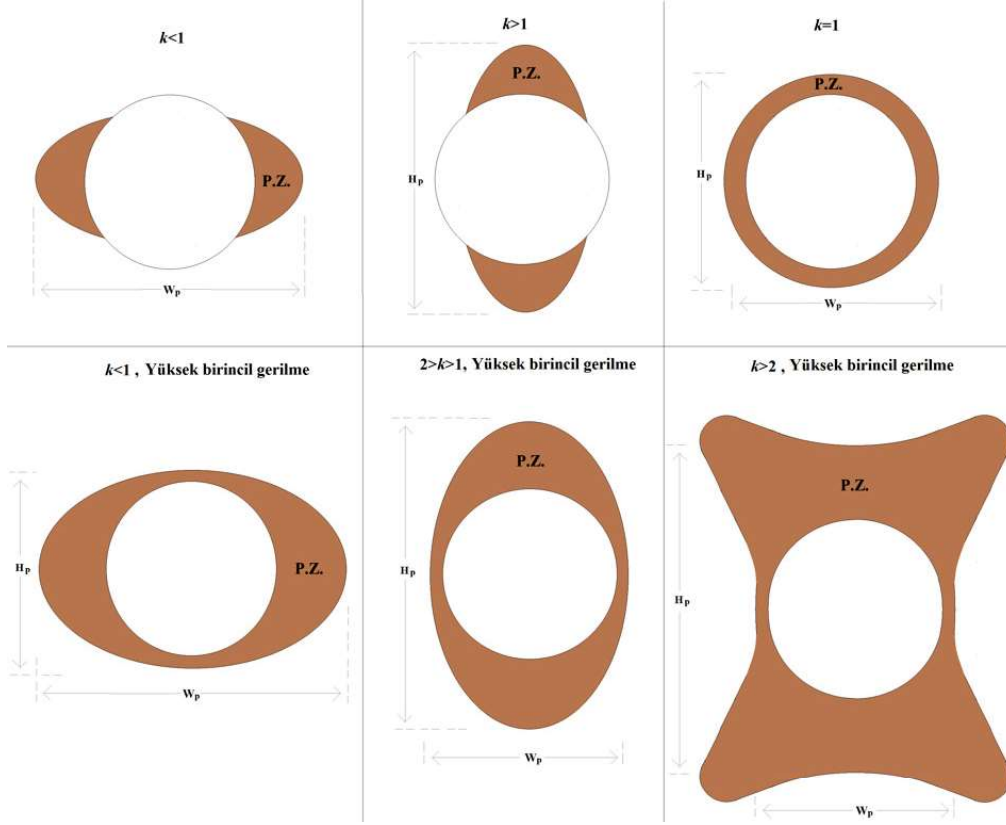
Keywords: Tunnel stability, Failure zone around tunnels, Plastic zone, Poisson's ratio, Modulus of Elasticity

1. Giriş

Elastik, izotropik ve homojen kaya kütleleri için tünel kesitleri etrafında oluşan yenilme bölgesi sınırları konusunda literatürde yaygın çalışmalar yapılmıştır. Plastik zon olarak da isimlendirilmekte olan yenilme bölgesinin geometrisi ve boyutları üzerine yaklaşımlarda genel kullanılan çeşitli parametreler tünel kesit geometrisi ve boyutları, kaya kütlesi dayanım değerleri, arazi-deki birincil (bakir) düşey ve yatay gerilmeleridir. Birincil yatay gerilmelerin düşey gerilmeye olan oranı ($k = \sigma_h / \sigma_v$) plastik bölge sınırlarını belirleyen önemli bir parametre olup, k oranı artışı ile plastik bölge kalınlığı tünel tavan ve tabanı doğrultusunda artmaktadır. k oranı 1'den küçük olduğu durumlarda plastik bölge (plastik zon) tünel yan cidarları hizasında daha geniş ve hidrostatik basınç koşullarında ($k=1$) dairesel tüneller için plastik bölgenin kalınlığı tavan-taban ve yan cidarlar hizasında birbirine eşittir (Şekil 1). k oranı çok yüksek değerler aldığı zaman plastik bölge sınırları tünel omuzları doğrultusunda en yüksek boyutlarına ulaşmaktadır.

Literatürdeki yenilme bölgesi sınırı tayinine yönelik çok sayıdaki yaklaşımda Poisson oranı ve kaya kütlesi elastisite modülü değerlerinin etkileri ihmal edilmiştir (Yan ve Shihao, 2010; Komurlu vd. 2015; Huang vd., 2016; Shi ve Bai, 2017; Zhu vd., 2018; Hoek, 1998; Bagheri vd. 2014). Bu durum, kaya kütleleri için önemli deformabilite özellikleri olan Poisson oranı ve elastisite modülü değerlerinin tünel etrafında kazı sonrası oluşan ikincil gerilmeler üzerindeki etkilerinin gözardı edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada Poisson oranı ve elastisite modülü parametrelerinin tünel etrafındaki gerilme dağılımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı Poisson oranı ve elastisite modülü değerleri, farklı arazi gerilmesi ve kaya kütlesi dayanımı koşulları için sonlu elemanlar analizi ile plastik zon boyutları belirlenmiştir.

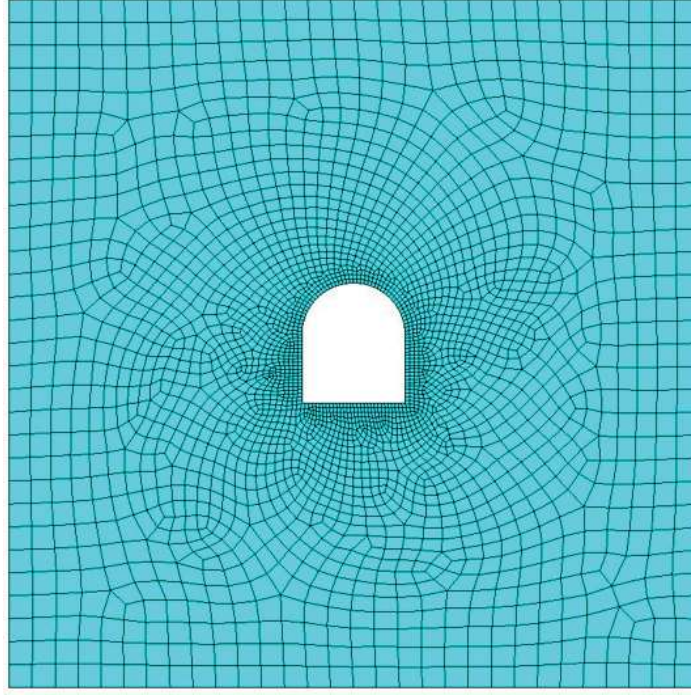
Poisson oranı kaya kütleleri için çoğunlukla 0.2 ve 0.4 arasında değişmekte ve bazen çok düşük Poisson oranı değerleri 0.1 seviyelerine kadar inebilmektedir. Kaya kütleleri için Poisson oranı nadiren 0.4 üzerine çıkmaktadır (Gerçek, 2007; Kömürlü, 2012). Kaya kütleleri için elastisite modülü değerleri ise çoğunlukla tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin 250 ile 750 katı arasında değişmektedir. Kaya kütlelerinin elastisite modüllerinin tek eksenli sıkışma dayanımlarına oranı (MR) nadiren 1000 dolaylarına kadar çıkabilmektedir (Hoek, 2006; Kolymbas, 2005). Bu çalışmada kaya kütleleri için farklı Poisson oranları ve elastisite modülü değerleri koşullarında yenilme analizleri yapılmış olup, çalışmalara yönelik yöntemsel detaylar sıradaki başlık altında verilmiştir.



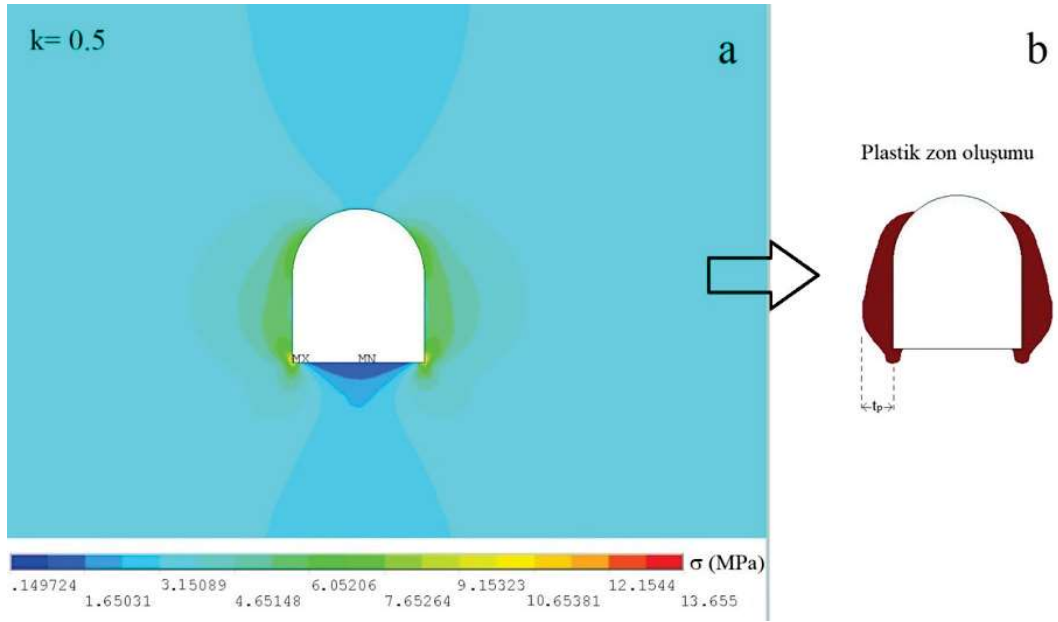
Şekil 1. H_p ve W_p parametreleri (sırası ile tünel kesit yüksekliği doğrultusunda ve tünel eni doğrultusunda yenilme bölgesi sınırları arası mesafeler), farklı k oranları için bazı tipik plastik zon (P.Z.) şekilleri

2. Numerik Çalışma

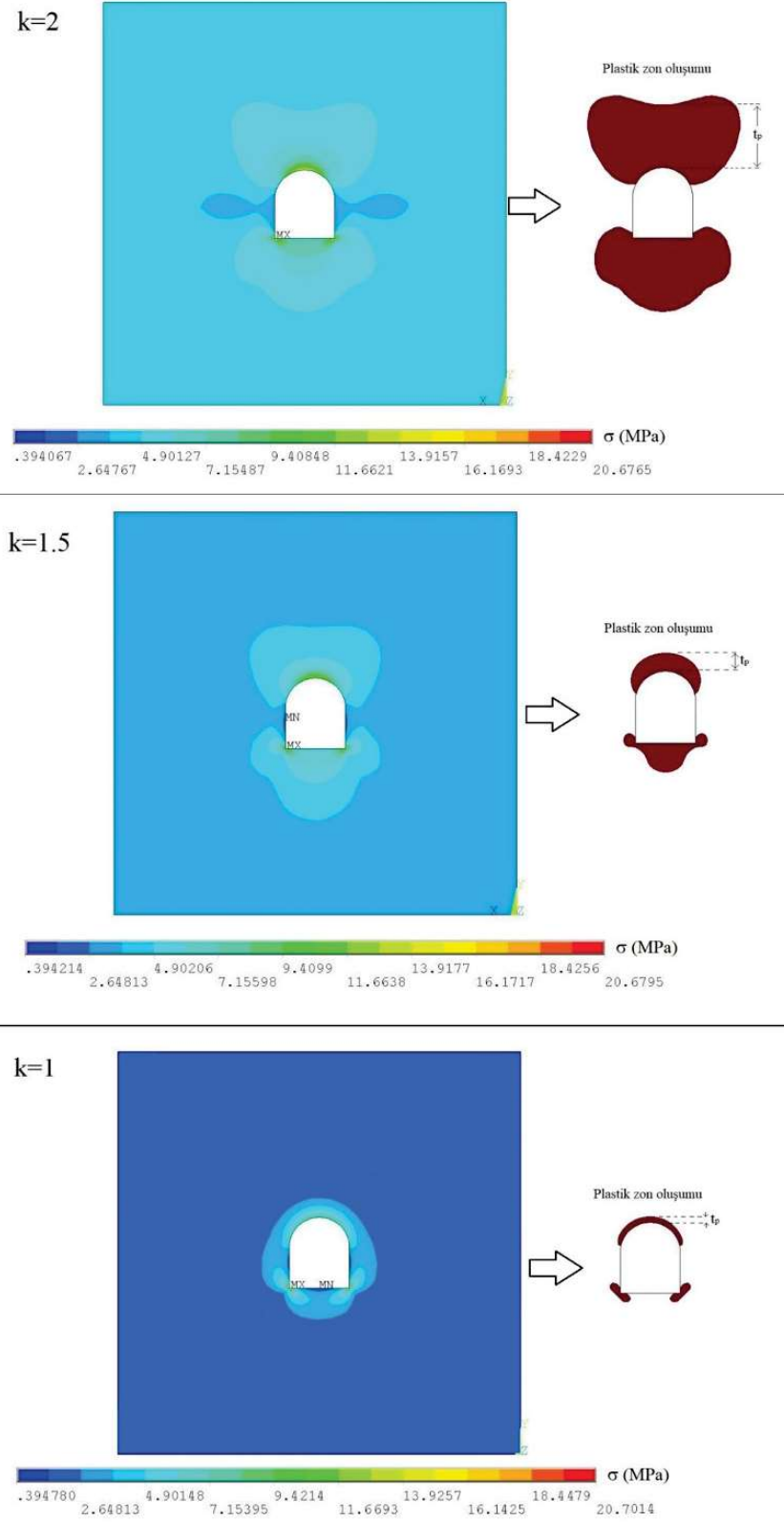
Numerik çalışmalarda ANSYS programı kullanılarak bir dizi sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Analizlerde çok düşük ve çok yüksek k oranları kullanılmadan farklı düşey arazi gerilmeleri modellenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada farklı kaya kütlesi tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c) ve birincil düşey gerilme (σ_v) değerleri oranı ($\sigma_c / \sigma_v = 1.80$, $\sigma_c / \sigma_v = 1.40$) ve farklı k oranları (0.5, 1, 1.5, 2) için, farklı Poisson oranı (ν) değerleri (0.2, 0.4) ve farklı MR değerleri (350, 700) incelenmiştir. İncelenen Poisson oranı ve elastisite modülleri tipik değer aralıkları dikkate alınarak seçilmiştir. Düşey yönde kazı öncesi birincil gerilme 3.5 MPa (σ_v) ve tünel eşdeğer çapı 7 metre olarak seçilmiştir. Kesit alanı 38 m² olan tünel çevresi 20 santimetre boyutunda sonlu elemanlara ayrılmış, tünel cidarından uzaklaştıkça sonlu eleman boyutu artırılmıştır. Şekil 2’de tünel modellerinin sonlu eleman ağı görülmektedir. Seçilen eleman boyutlarının yeterli ölçüde küçük olduğundan emin olmak amaçlı, bir dizi ön analiz gerçekleştirilmiştir. Numerik modelleme 3 boyutlu olarak yapılmış ve farklı koşullar altında plastik zon sınırları belirlenmiştir. Numerik modellere göre bazı örnek plastik bölge şekilleri Şekil 3 ve Şekil 4’te görülmektedir. Analizlerden elde edilen sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir. Poisson oranı ve elastisite modülü değerlerinin plastik zon üzerindeki etkileri ayrıca Şekil 5’te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Tünel modellerinde sonlu eleman ağı



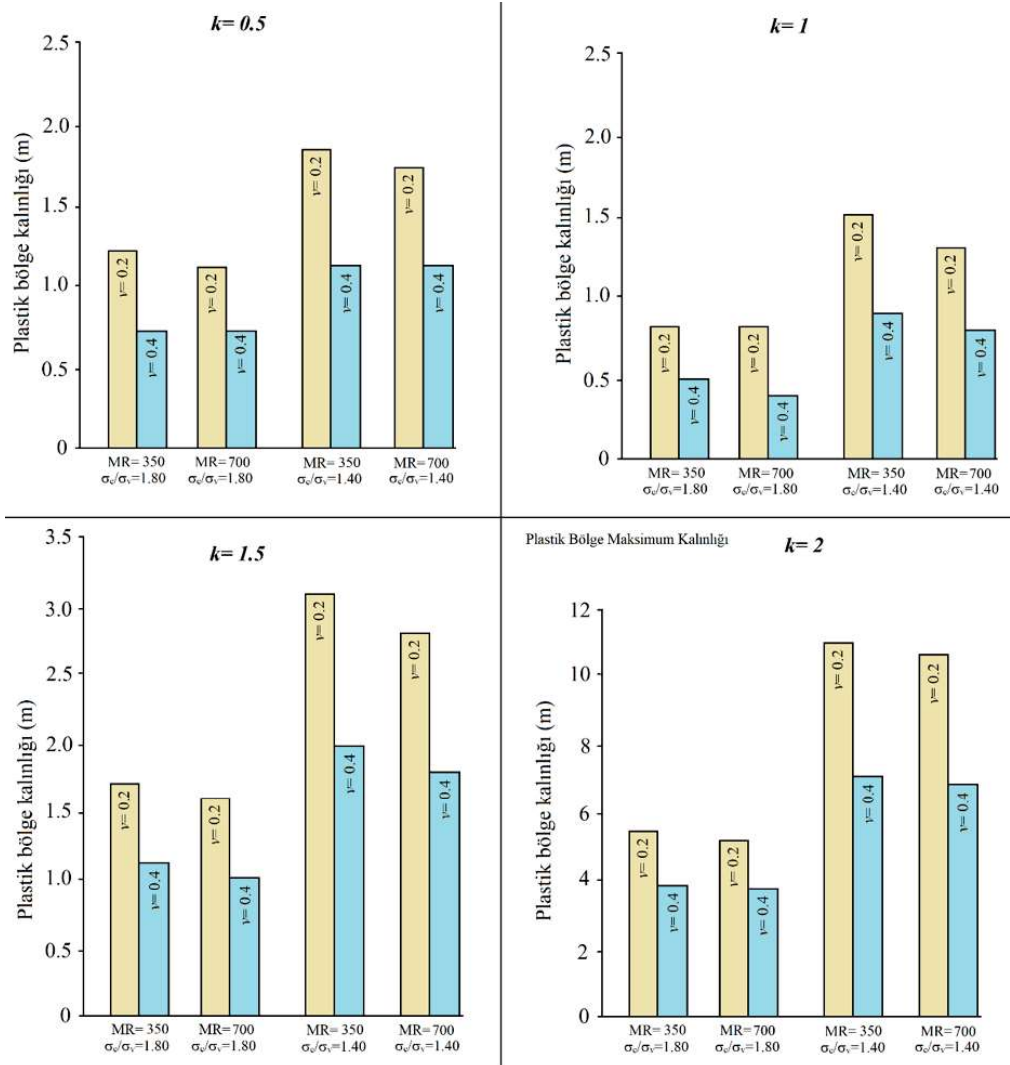
Şekil 3. $k < 1$ durumu için plastik zon oluşumu: a) Tünel etrafında gerilme (von Mises) dağılımı ($k=0,5$, $\sigma / \sigma_v=1,40$, MR: 700, ν : 0.2), b) plastik zon oluşumu ve plastik zon kalınlığı (t_p) gösterimi



Şekil 4. $k \geq 1$ için plastik zon oluşumu ve tünel etrafında gerilme dağılımları ($\sigma_c / \sigma_v = 1.40$, MR: 350, $\nu = 0.4$)

Tablo 1. Numerik çalışma sonuçları (tp: plastic zon kalınlığı, Dir.: Doğrultu, H: tünel yüksekliği doğrultusu (düşey doğrultu), W: Tünel kesit eni doğrultusu (yatay doğrultu))

Model	k	MR= 350, $\nu=0.2$		MR= 350, $\nu=0.4$		MR= 700, $\nu=0.2$		MR= 700, $\nu=0.4$	
		tp (m)	Dir.	tp (m)	Dir.	tp (m)	Dir.	tp (m)	Dir.
$\sigma_c/\sigma_v=1.80$	0.5	1.2	W	0.7	W	1.1	W	0.7	W
	1	0.8	H	0.5	H	0.8	H	0.4	H
	1.5	1.7	H	1.1	H	1.6	H	1.0	H
	2	5.5	H	3.9	H	5.3	H	3.8	H
$\sigma_c/\sigma_v=1.40$	0.5	1.8	W	1.1	W	1.7	W	1.1	W
	1	1.5	H	0.9	H	1.3	H	0.8	H
	1.5	3.1	H	2.0	H	2.8	H	1.8	H
	2	11.0	H	7.1	H	10.6	H	6.9	H



Şekil 5. Sonuçların grafiksel gösterimi

3. Tartışma Ve Sonuç

Elde edilen sonuçlara göre elastisite modülü ve Poisson oranı değerlerinin değişimi neticesince plastik zon kalınlığının farklılıklar gösterebildiği görülmüştür. Özellikle Poisson oranının plastik zon sınırlarını önemli ölçüde etkilemekte olduğu belirlenmiştir. Bir kazı yapıldıktan sonra açıklık etrafında oluşan yeni gerilmeler (ikincil gerilmeler) Poisson oranı ve elastisite modülü değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Bu bulgu farklı araştırmacılar tarafından elde edilen sonuçlar ile de benzerlik göstermektedir (Konietzky, 2018; Zhu vd., 2016; Li vd., 2014; Jianjun vd., 2011; Zareifard ve Fahimifar, 2012). Yeraltı açıklıkları etrafındaki ikincil gerilme değerleri üzerindeki etkileri sebebi ile plastik bölge sınır tayini çalışmalarında Poisson oranı ve elastisite modülü parametrelerini kullanmak gerekmektedir. Ancak, kaya kütlesi deformabilite özelliklerinin yerinde doğru olarak belirlenmesi oldukça zordur. Bu sebeple, çeşitli ampirik yöntemlerle elde edilen kaya kütlesi puanlandırmalarına bağlı yaklaşık elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri kullanılabilir (Rehman vd., 2018; Aydan ve Kawamoto, 2000; Karaman vd., 2015; Aksoy ve Kömürlü, 2017).

Kaya kütlelerinin yerinde deformabilite özelliklerinin doğru belirlenmesine yönelik güncel test koşullarındaki zorluklar sebebi ile tasarımlarda güvenlik faktörünün göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Kaya kütlesi deformabilite özelliklerinin belirlenmesindeki deneysel zorluklara ek olarak, bu değerlerin yeraltında lokal olarak önemli farklılıklar gösterebilmesi belirsizliği artırmaktadır (Stephansson ve Zang, 2012; Amadei ve Stephansson, 1997; Stacey, 2016; Yaralı ve Müftüoğlu, 1992). Kaya mühendisliği diğer çoğu mühendislik disiplinine kıyasla kesin olmayan değerler kullanmak durumundadır. Bu durum tasarımcıları kaya kütlesi deformabilite özellikleri gibi önemli parametreleri göz ardı etmeye yönlendirmemelidir. Yeraltında değişen koşulların kaya kütlesi deformabilite özellikleri üzerindeki etkileri dikkate alınmalı, kaya malzemesine yönelik laboratuvar çalışmaları, kaya kütlelerinin iyi sınıflandırılması ve puanlandırılmasına yönelik saha çalışmaları gerçekleştirilmelidir. Tasarımın güncellenmesi gerektiğine karar verebilmek için kazı süresince kaya kütlesi iyi takip edilmeli ve değerlendirilmelidir (Shi, vd. 2016; Kömürlü ve Kesimal, 2013 ; Bieniawski, 1989).

Elastisite modülü değerlerinin plastik bölge sınırları üzerindeki etkileri Poisson oranına nazaran oldukça düşüktür. Poisson oranı belirlenmeyen kaya kütleleri için tasarımda kötü koşullar (düşük Poisson oranı değerleri) dikkate alınmalıdır (Brady ve Brown, 2005; Barla vd., 2015; Kömürlü ve Kesimal, 2017; Hoek, 2001). Poisson oranı ve elastisite modülü değerlerindeki azalma neticesinde kaya kütlesi dayanım değerleri üzerindeki ikincil gerilmelerin tünel etrafında daha geniş bir alana yayılmakta olduğu ve bu sebeple ile yenilme bölgesi sınırlarının genişlemekte olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, kaya kütlelerinin Poisson oranı ve elastisite modülü değerlerinde artış ile plastik zon kalınlığının azaldığı belirlenmiştir. Plastik zon kestirimlerinde kaya kütlelerinin Poisson oranı değerlerinin ihmal edilmeyecek düzeyde sonuçları etkilediği, elastisite modülü değerlerinin ise sınırlı ölçüde değişikliğe sebebiyet verdiği görülmüştür.

Referanslar

Aksoy, C.O., Komurlu, E., 2017. Temel Kaya Mekanikliği, Temel Madencilik Bilgileri e-kitabı, Mayeb, Ankara, pp. 1-69, ISBN: 978-605-64724-1-1

Amadei, B., Stephansson O., 1997. Rock Stress and Its Measurements, Chapman&Hall, London.

Aydan, Ö., Kawamoto, T., 2000. Assessing mechanical properties of rock masses by RMR rock classification method, Proceedings of the GeoEng 2000 Symposium, Melbourne, Australia, 19–24.

Barla, G., Debernardi, D., Perinoi A., 2015. Lessons learned from deep-seated landslides activated by tunnel excavation. *Geomechanics and Tunnelling*, vol. 8, 394-401.

Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*, Mc Graw Hill; John Willey and Sons, Newyork, 237 pp.

Brady, B.H.G., Brown, E.T., 2005. *Rock Mechanics for Underground Mining*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Gercek, H., 2007. Poisson's ratio values for rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 44(1), 1–13.

Hoek E., 1998. Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 35(I), 63-68.

Hoek, E., 2001. Big Tunnels in Bad Rock. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127(9): 726-740.

Hoek, E., 2006. *Kaya Mühendisliği* (Turkish translation by Karakus&Basarir), Publication of Chambers of Mining Engineers of Turkey, Ankara, Turkey

Huang, X., Zhang, J., Yang, L., Yang, S., Wang, X., 2016. Elastoplastic analysis of the surrounding rock mass in circular tunnel based on the generalized nonlinear unified strength theory, *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 26 (5), 819–823.

Jianjun, W., Binsong, J., Qiang, Z., 2011. Elastic-Plastic-Brittle Unified Solution of Surrounding Rocks in Deep Openings, *Procedia Engineering*, vol. 26, 1225 – 1233.

Karaman, K., Cihangir, F., Kesimal, A., 2015. A comparative assessment of rock mass deformation modulus, *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 25, 735–740.

Kolymbas, D., 2005. *Tunnelling and Tunnel Mechanics*, Springer, Germany

Komurlu, E., 2012. Effects of Rock and Granular Material Horizontal Stresses on Support Design. MSc Thesis, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 2012 (In Turkish)

Komurlu, E., Kesimal A., 2013. New Support Materials for Forepoling and Umbrella Applications (in Turkish). 3rd International Symposium and Exhibition on Underground Excavations for Transportation. 29-30 November, İstanbul/Turkey, pp. 423-435.

Komurlu, E., Kesimal, A., 2017. Usability of Thin Spray-on Liners (TSL) for Akarsen Underground Mine in Murgul (in Turkish). *MT Bilimsel, Journal of Underground Resources*, vol. 12, 3-25.

Komurlu E, Kesimal A., Hasanpour, R., 2015. In situ horizontal stress effect on plastic zone around circular underground openings excavated in elastic zones. *Geomechanics and Engineering*, vol. 8, 783-799.

Konietzky, H., 2018. Simple analytical solutions for underground circular and elliptical openings, *Introduction into Geomechanics (E-book)*, Editor: H. Konietzky, TU Bergakademie Freiberg

Li, P., Fang, Q., Zhang, D., 2014. Analytical solutions of stresses and displacements for deep circular tunnels with liners in saturated ground, *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics and Engineering)*, vol. 15(6), 395-404.

Stacey, T.R., 2016. Addressing the consequences of dynamic rock failure in underground excavations, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 49, 4091–4101.

Shi, H., Bai, M., 2017. Plastic Zone Analysis of Deep-Buried, Noncircular Tunnel and Application on the High-Speed Railway in the Karst Area, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2017, Article ID 9523267

Shi, P., Zhang, D., Pan, J., Liu, W., 2016. Geological Investigation and Tunnel Excavation Aspects of the Weakness Zones of Xiang'an Subsea Tunnels in China, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 49, 4853–4867.

Stephansson, O., Zang, A., 2012. ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation-Part 5: Establishing a Model for the In Situ Stress at a Given Site, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 955-969.

Rehman, H., Ali, W., Naji, A.M., Kim, J.J., Abdullah, R.A., Yoo, H.K., 2018. Review of Rock-Mass Rating and Tunneling Quality Index Systems for Tunnel Design: Development, Refinement, Application and Limitation, *Applied Sciences*, 8, paper no: 1250

Yan, L., Shihao, T.U., 2010. Rules of distribution in a plastic zone of rocks surrounding a roadway affected by tectonic stress, *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 20, 47–52.

Yaralı, O., Muftuoglu, V.Y., 1992. Support design for rock bolts with numerical methods, *Proceedings of 8th coal congress of Turkey, Zonguldak*, pp. 279-290.

Zareifard, M.R., Fahimifar, A., 2012. A new solution for shallow and deep tunnels by considering the gravitational loads, *Acta Geotechnica Slovenica*, vol. 9(2) 37-49.

Zhu, C.Q., Yin, Z.Q., Li, C.M., Feng, R.M., 2016. Elastoplastic Analysis of Tunnel Surrounding Rocks based on the Statistical Damage Constitutive Model, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 9 (3), 27-34.

Zhu, M.Z., Yang, Y., Gao, F., Liu, J., 2018. Analytical Solution of Tunnel Surrounding Rock for Stress and Displacement Based on Lade–Duncan Criterion, *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, Article ID 5363658.