



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Tünel Geometrisinin Deformasyonlar Üzerindeki Etkisinin Sığ ve Tabakalı Kaya Ortamında İncelenmesi

Kübra Nur ADLİM, Sinem BOZATLI, Yavuz ABUT\*

Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ulaştırma Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye  
Kübra Nur ADLİM, ORCID No: 0000-0001-8590-0371, Sinem BOZATLI, ORCID No: 0000-0002-8285-6050,  
Yavuz ABUT, ORCID No: 0000-0003-4249-7791  
\*Sorumlu yazar e-posta: yavuz.abut@yalova.edu.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 21.03.2022  
Kabul: 05.07.2022  
Online Aralık 2022  
DOI: 10.53433/yyufbed.1090576

#### Anahtar Kelimeler

Deformasyon,  
Konverjans,  
Tasman,  
Tünel tasarımı

**Öz:** Tünel içindeki deformasyonlar, üst yapıdan gelen sürşarj yükü, aşırı yüklenme, kayaç veya zemin biriminde oluşan içsel gerilmeler ile diğer faktörlerin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Tünel içi deformasyon ölçümü, tüneldeki plastik şekil değiştirmenin büyüklüğünü belirleyebilmek için önemlidir ve tünel güvenliğinin izlenmesinde önemli bir safhayı oluşturur. Bu çalışmada, dört tabakalı bir kaya formasyonunda ve yeraltı suyu etkisinde bulunan, at nalı veya yumurta şeklinde tasarlanan, NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu) tekniği ile kademeli olarak açılacak olan tünellerin üç boyutlu ve doğrusal olmayan davranışları sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Kazı adımlarına göre farklı yüklenme koşullarına maruz kalan taç ve tünel çevresinde meydana gelen kalıcı deformasyonlar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ayrıca her iki tünel geometrisinde, bütün kazı aşamalarında tünelin kritik kesitleri boyunca oluşacak olan kalıcı şekil değiştirmeler, deformasyon eğrileri sayesinde görel olarak karşılaştırılmıştır. Sığ ve tabakalı kaya ortamında tasman ve konverjans miktarının azaltılmasında, tünel geometrisinin at nalı tipi yerine yumurta şeklinde seçilmesinin daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir.

### Investigation of the Effect of Tunnel Geometry on Deformations in Shallow and Stratified Rock Formation

#### Article Info

Received: 21.03.2022  
Accepted: 05.07.2022  
Online December 2022  
DOI: 10.53433/yyufbed.1090576

#### Keywords

Convergence,  
Deformation,  
Settlement,  
Tunnel design

**Abstract:** Deformations in the tunnel occur as a result of surcharge load from the structures on the surface, overloading, internal stresses in the rock or soil, and other factors. In-tunnel deformation measurement is important to determine the magnitude of plastic deformation in the tunnel and is an important step in monitoring tunnel safety. In this study, three-dimensional and non-linear behavior of tunnels designed as horseshoe or egg shape in a groundwater environment in a four-layered rock formation and gradually excavated with NATM (New Austrian Tunneling Method) principle were analyzed using the finite element method. The tunnel crown and wall, which were exposed to different loading conditions according to the excavation steps, were examined in detail in terms of permanent deformations. In addition, thanks to the deformation curves, the permanent deformations occurring along the critical sections of the tunnel during all excavation stages were compared relatively for both tunnel geometries. It has been determined that it is more advantageous to choose the tunnel geometry as egg-shaped rather than horseshoe type for reducing the settlement and the convergence in the shallow and layered rock environment.

## 1. Giriş

Tüm dünyada kentleşme ve yenilikçi inşaat uygulamaları kentlerin dikey genişlemesini artırmıştır. Tünel teknolojisi, ulaştırma ve lojistik hizmetlerinin daha hızlı gerçekleşmesi için en çok tercih edilen ulaştırma modları haline gelmiştir (Meguid ve ark., 2008; Zaid & Mishra, 2021). Bununla birlikte, karmaşık jeolojik yapı, su girişi, depremler ve kuvvetli yer hareketi gibi doğal veya yapay afetler sonucunda ortaya çıkan aşırı deformasyonlar (konverjans ve tasman) tünel yapımı sırasında veya sonrasında sıklıkla meydana gelir ve bu da tünellerin güvenilirliğini ciddi oranda etkiler (Li ve ark., 2013; Gao ve ark., 2018; Song ve ark., 2019; Wang ve ark., 2019). Toprak veya kaya ortamında inşa edilen tünellerin stabilitesini değerlendirmek için çeşitli araştırmacılar tarafından çalışmalar yapılmıştır (Carranza-Torres & Fairhurst, 1999; Ouchi ve ark., 2004). Tünellerin çoğu, kemerlenme etkisiyle düşük gerilmelere sahip jeolojik olarak bloklu ve tabakalı yapılardan oluşurlar (Moussaiea ve ark., 2019). Tünel içinde veya zemin yüzeyinde meydana gelen deformasyonun büyüklüğü; zeminin jeolojik özellikleri, yeraltı su seviyesi, tüneli açmak için kullanılan kazı yöntemi, zeminin taşıdığı üst yapının tipi, konumu, büyüklüğü ile orantılı olarak değişim gösterir. Bu bağlamda, tünellerde iç ve dış deformasyonların izlenmesi zaman alıcı ve zor süreçlerdir. Genel anlamda tünellerde deformasyon ölçümü; total station, deformasyon bulonları, çatlak ve eğim ölçerler, yüzey, prob, şerit ve kuyu tipi ekstansometreler, inklonometre ve pendulumlar, hidrolik sistemli ölçerler, lazer tarama sistemleri, gömülü veya yüzey tipi birim deformasyon ölçer (strain gauge) gibi enstrümanlarla yapılmaktadır.

Zayıf kayanın elastik veya plastik yenilmesi, yükleme ve boşaltma durumları Sakurai (1983) tarafından incelenmiştir. Boşaltma durumu için kayanın plastik yenilmesi durumunda deformasyonun telafi edilemez olduğu sonucuna varılmıştır. Tünellerin dairesel olarak teşkil edilmesi, yapımdan sonra meydana gelecek yük değişikliklerine yeniden uyum sağlama yeteneği ve doğası gereği daha yüksek mukavemete sahip olması nedeniyle zayıf veya yumuşak zemin durumunda tercih edilir (Mishra ve ark., 2018). Tek eksenli basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, Young modülü, Poisson oranı gibi temel mühendislik özellikleri, kayadaki deformasyonlar üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gupta (1997) tarafından farklı kayaçları ayrışma derecesine göre sınıflandırmak için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Dayanım parametrelerinin ayrışma derecesinden etkilendiği ve kayanın dayanımını azalttığı sonucuna varılmıştır.

Statik yükleme altında, sığ tünellerde stabilite analizi farklı araştırmacılar tarafından yapılmıştır (Athar ve ark., 2019; Naqvi ve ark., 2020; Zaid & Mishra, 2021). Ayrıca, Chehade & Shahrour (2008) ikiz tünel arasındaki hizalamanın etkisini incelemişlerdir. En fazla oturmanın düşey dizilimli tünellerde, minimum oturmanın ise yatay dizilimli tünellerde gözlemlendiği sonucuna varmışlardır.

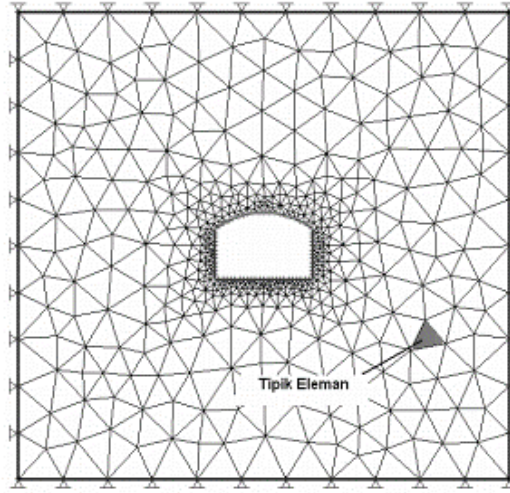
At nalı (*horse-shoe*) ve yumurta (*egg-shape*) şeklindeki tünel geometrisi tasarımcılar tarafından sıklıkla kullanılmasına rağmen, sığ tünel inşaatında ve birden fazla tabakalı kaya ortamında oluşacak olan deformasyon miktarlarının (tünel içinde konverjans ve yüzeyde tasman) görelî incelenmesi literatürde sınırlıdır.

Bu çalışmada, tabakalı bir kaya ortamında NATM yöntemine göre kademeli olarak açılması hedeflenen iki farklı tünel geometrisi, TUNAPLUS sonlu elemanlar yöntemi ile irdelenmiştir. Bu amaçla, her bir kazı aşamasında ortaya çıkan boşluğunun neden olduğu tünel içi ve tünel dışı deformasyonlar, aynı kesit alanına sahip at nalı ve yumurta tipi tünel geometrileri üzerinden analiz edilmiştir. Tünel ortamında suyun varlığı deformasyonları daha kritik yapacağından, bütün kazı aşamalarında yer altı su seviyesi etkili olacak şekilde modellenmiştir. Kazı adımlarına göre farklı yükleme koşullarına maruz kalan taç ve tünel çevresinde meydana gelen kalıcı deformasyonlar (tünel içinde konverjans ve yüzeyde tasman) ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ayrıca her iki tünel geometrisinde, bütün kazı aşamalarında tünelin kritik kesitleri boyunca oluşacak olan kalıcı şekil değiştirme ve kesit tesirleri, deformasyon eğrileri sayesinde görelî olarak karşılaştırılmıştır.

## 2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sayısal yöntemlerin mühendislik hesaplamalarında kullanımı ile ortaya çıkan problemlerin çözümünde bilgisayarların payı önemli bir yer tutmaktadır. Geçmişte yapısal analizler için geliştirilen Sonlu Elemanlar Yöntemi, günümüzde birden fazla mühendislik alanında uygulanmaktadır. Bunun sebebi, yöntemin bilgisayar programlamasına uygun oluşu, bununla birlikte prensiplerin ve dayandığı teorilerin genel olmasıdır. Ayrıca bu yöntemin diğer yöntemlere göre maliyeti düşüktür. Yöntem,

tünellerin karmaşıklığından kaynaklı gerilme ve defomasyon analizlerinin yapılması için bölgelendirme uygulamasını esas almaktadır. Fakat bu bölgelendirme işlemi, elemanların tanımlanması için birçok eşitsizliklerden oluşmaktadır. Fazla sayıda denklemlerin çözülmesinde daha pratik işlem hafızasına sahip bir teknoloji ürünü olan bilgisayarlar ve bilgisayar programları kullanılmaktadır. Yöntemde tünel ortamı ve tünel yapısı sonlu elemanlara bölünmektedir (Şekil 1). Bu parçacıklar birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanmaktadır ve geometrik sınırları tanımlandığından “sonlu” olarak kabul edilmektedir. Sonlu elemanlar içerisinde bir noktada meydana gelen yer değiştirme, basit fonksiyonlar kullanılarak elemanların düğüm noktalarındaki değerler ile hesaplanmaktadır. Yöntemde daha sonra bulunacak olan yer değiştirmeler ve düğüm noktalarındaki yer değiştirme bileşenleri, serbestlik derecesi olarak adlandırılmaktadır. Düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler ilk olarak bir elemanın davranış denklemlerinin kullanılması ile hesaplanır. Tünel yapısının tüm davranış denklemleri, yapıyı oluşturan elemanların denge denklemlerinin, elemanlar arasında deplasman sürekliliğini sağlayacak şekilde toplanması ile bulunmaktadır. Bulunan bu denklemler yer değiştirme sınırı şartlarına uygun şekilde değiştirilmektedir. Bu işlemlerden sonra bilinmeyen değişkenleri, yer değiştirmeler olan birçok lineer cebirsel eşitsizlik ortaya çıkar. Bu eşitsizliklerin çözülmesi, düğüm noktalarında meydana gelen yer değiştirmelerin hesaplanması anlamına gelir ve hesaplanan bu değerlerin türevinin alınması ile yapıya ait şekil değiştirme ve gerilme bileşenleri elde edilmektedir.



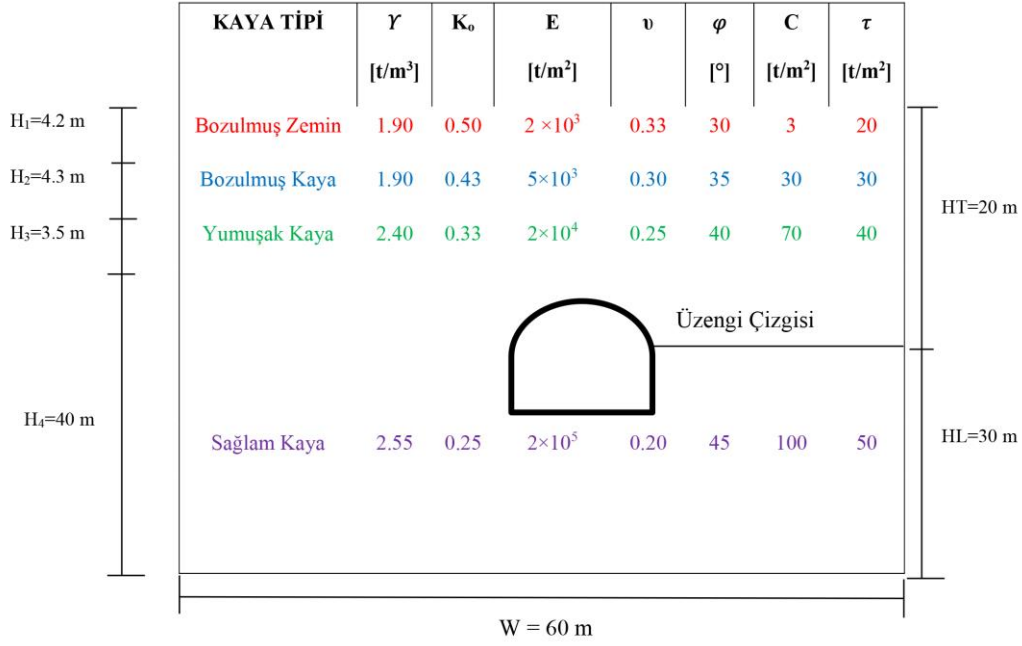
Şekil 1. Tüneller için tipik bir sonlu elemanlar ağı (Öztürk, 2007).

Sonlu elemanlar yönteminin genel itibariyle diğer yöntemlere göre baskın olmasının sebebi, modellenmesi oldukça güç yeraltı yapılarına ait problemlere çözümler üretebilmesidir. Yeraltı yapıları mühendisliğinde zamana bağlı ilerleme hızı oldukça önemlidir. Mühendislikte yeraltı yapıları dahil olmak üzere birçok alanda karşılaşılan problemlere çözümler üreten programların geliştirilmesi ile istenilen şekilde zamandan ve maliyetten tasarruf sağlanabilmektedir. Mühendislik çözümleri için geliştirilen bu tarz bilgisayar programlarında, farklı rijit ve elastik sınır şartları, çeşitli yükleme durumları, iki ve üç boyutlu problemler, birden fazla geometride sistemler ve birçok yapının statik ve dinamik gerilme, şekil değiştirme analizleri esnek bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

### 3. Materyal ve Yöntem

#### 3.1. Kaya ortamının özellikleri

Tüneller için kabul edilen kaya ortamı dört farklı formasyondan oluşmaktadır ve bu katmanlarda yer altı su seviyesi yüzeyden itibaren 10 m'dir. Kaya ortamı yüzeyden itibaren bozulmuş zemin, bozulmuş kaya, yumuşak kaya ve sağlam kayadan oluşmaktadır. Tünel geçişinde kaya ortamı ve katmanların mühendislik özellikleri Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Tünelin bulunduğu kaya ortamı ve özellikleri.

Şekil 2'deki zemin indeks özellikleri;  $\gamma$ : Birim hacim ağırlık,  $K_0$ : Sükunetteki toprak basıncı, E: Elastisite modülü,  $\nu$ : Poisson oranı,  $\varphi$ : İçsel sürtünme açısı, c: Kohezyon,  $\tau$ : Çekme gerilmesi.

### 3.2. Tünel destek elemanlarının tasarımı

NATM tekniğine göre açılan kazı işlerinde kullanılan geçici ve kalıcı destek elemanlarının geometrik ve mekanik özellikleri Çizelge 1'de, taşıyıcı elemanların mühendislik özellikleri ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Tünel kazısı geçici ve kalıcı destek elemanlarının geometrik ve mekanik özellikleri

Destek Elemanı	Değer	Birim
Püskürtme beton kalınlığı (TS)	20	cm
Final kaplama kalınlığı (TL)	40	cm
Final kaplamada alt-üst paspayı	5	cm
Final kaplamada alt-üst donatı en kesit alanı	33	cm <sup>2</sup>
Kaya bulonları kesit alanı, ( $\phi 25$ )	0.000491	m <sup>2</sup>
Kaya bulonları birim uzunluğunun ağırlığı	0.00383	ton/m
Kaya bulonları Elastisite Modülü	210	GPa
Kaya bulonları başlangıç gerilmesi	0	t/m <sup>2</sup>
Kaya bulonları akma dayanımı	230	MPa
Kaya bulonu sayısı	11	adet
Kaya bulonlarının uzunluğu	3	m
Kaya bulonlarının tünel boyu aralığı	1.35	m
Kaya bulonları arası mesafe	1.20	m

Çizelge 2. Taşıyıcı elemanların mühendislik özellikleri

Taşıyıcı Eleman	$\gamma$ [t/m <sup>3</sup> ]	E [t/m <sup>2</sup> ]	$\nu$	$\varphi$ [°]	C [t/m <sup>2</sup> ]	$\tau$ [t/m <sup>2</sup> ]
Püskürtme Beton	2.40	$1.50 \times 10^6$	0.20	30	500	100
Donatılı Final Kaplama	2.50	$2.10 \times 10^6$	0.20	30	500	300
Çelik Donatı	-	$2.10 \times 10^7$	0.20	-	-	-

### 3.3. Tünel kazısının planlanması ve kazı paterninin seçilmesi

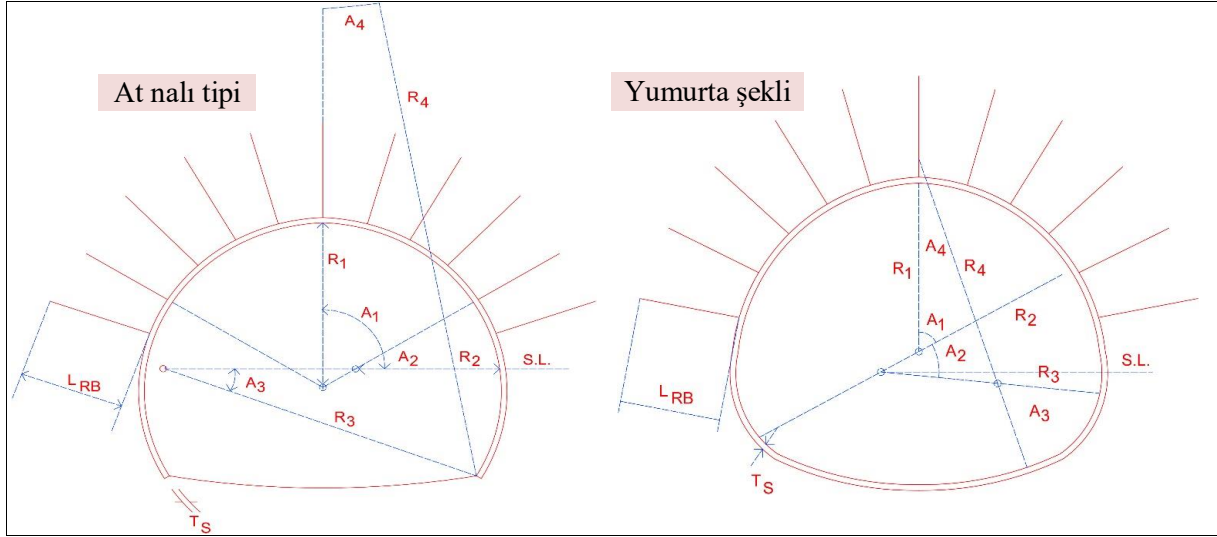
Tasarlanan tünelde kazı çalışmaları geleneksel NATM tekniğine uygun olarak 22 adımda gerçekleştirilmektedir. At nalı ve yumurta şekli için kazı adımları benzerdir ve Şekil 3'te bu kazı adımları sadece at nalı geometrisi üzerinden gösterilmiştir.



Şekil 3. Tasarlanan tünelin kazı adımları.

### 3.4. Tünel geometrisinin tasarımı

Analizde iki farklı tünel geometrisi incelenmiştir. Eşit en kesit alanı prensibine göre tasarlanan tünel geometrileri Şekil 4'te ve ölçüleri Çizelge 3'te verilmektedir.



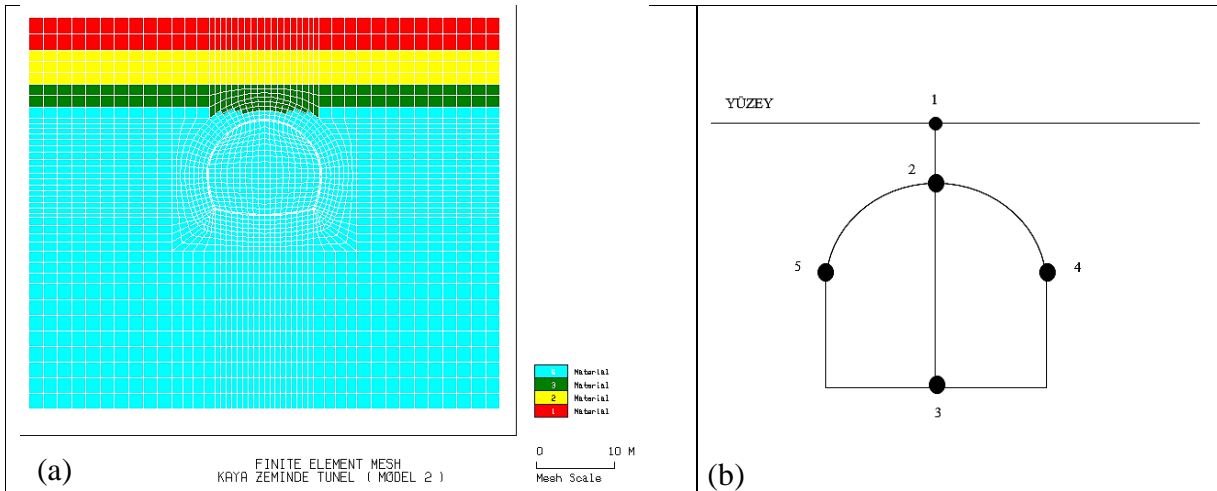
Şekil 4. Tasarlanan tünellerin geometrik özellikleri.

Çizelge 3. Tünel geometri özellikleri

TÜNEL GEOMETRİSİ	R <sub>1</sub> (m)	R <sub>2</sub> (m)	R <sub>3</sub> (m)	R <sub>4</sub> (m)	A <sub>1</sub> (°)	A <sub>2</sub> (°)	A <sub>3</sub> (°)
At nalı tipi	7.2	6.2	11.9	25.9	60	30	21.8
Yumurta şekli	6.5	8.7	7.3	11.4	65	35	65

### 3.5. Sonlu elemanlar modeli

TUNAPLUS programına tanıtılan sonlu elemanlar modeli Şekil 5(a)'da ve şekil değiştirme kapasiteleri için belirlenen kritik deformasyon noktaları Şekil 5(b)'de verilmektedir. Bu kritik deformasyon noktalarından 1 nolu nokta yüzeyde gerçekleşeceği için "tasman" ve 2, 3, 4, 5 noktaları ise tünel cidarında gerçekleşeceği için "konverjans" olarak tanımlanmaktadır.



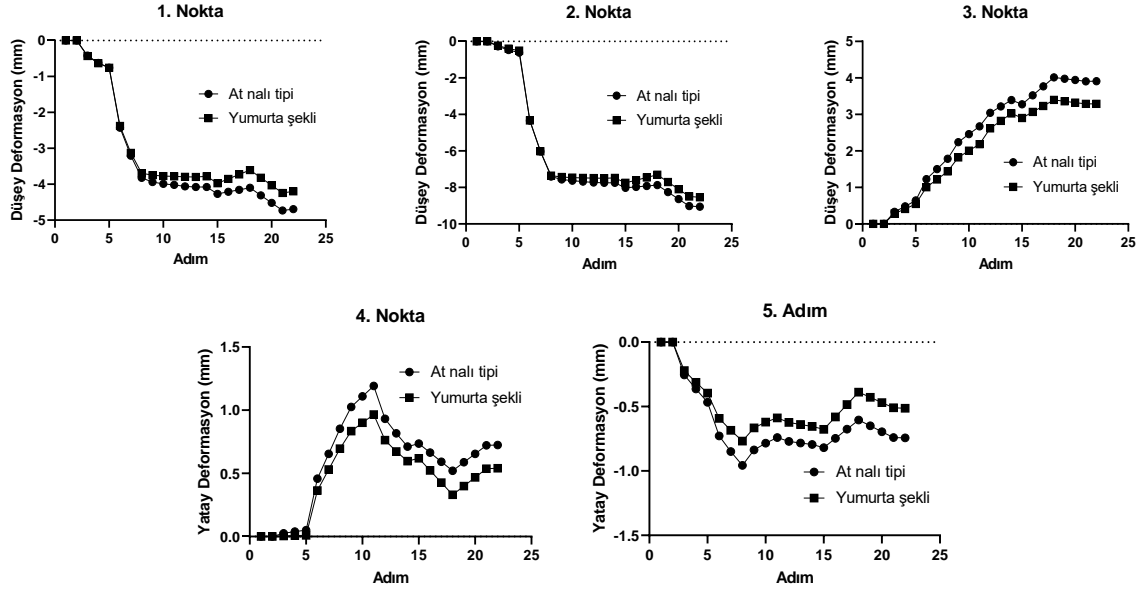
Şekil 5. a) Sonlu elemanlar modeli, b) Kritik deformasyon noktaları.

### 4. Defomasyon Analizi Sonuçları

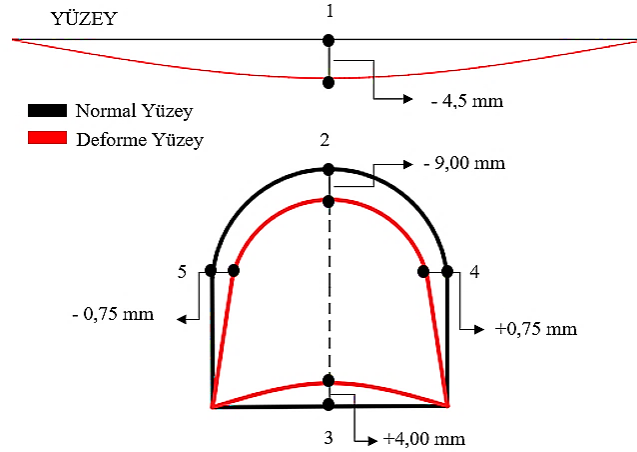
Kazı adımlarıyla ilişkili olarak, kritik düğüm noktalarına ait şekil değiştirme (defomasyon) eğrisi, her iki tünel geometrisi için Şekil 6'da topluca verilmiştir. İçeri doğru kapanma etkisinin 22. (son)



kazı adımında neden olduğu deforme olmuş hal, at nalı şekli üzerinden Şekil 7’de ayrıca gösterilmektedir.



Şekil 6. Kritik düğüm noktalarına ait deformasyonların kazı adımlarına göre değişimi.



Şekil 7. 22. (son) kazı adımından sonra at nalı geometrisinde oluşan deformasyonlar.

Bu grafiklere göre;

Son kazı adımında 1 numaralı düğüm noktası olan yüzeyde, at nalı şeklindeki tünelde 4.5 mm’lik bir tasman meydana gelmiştir. Yumurta şeklinde yapılan tünel için ise bu deformasyon 4.1 mm mertebesinde (Şekil 6). 2 (taç noktası) ve 3 (invert) numaralı düğüm noktalarında meydana gelen deformasyon miktarları at nalı geometrisi için sırasıyla yaklaşık 9.0 mm ve 4.0 mm’dir. Yumurta tipi geometrisinde ise deformasyon miktarı 8.5 mm ve 3.2 mm civarındadır (Şekil 6). 4 ve 5 numaralı düğüm noktası olan üzengi çizgisinde yatayda at nalı şeklindeki tünel için simetrik olarak 0.75 mm’lik ötelenme meydana gelmiştir. Bu durum yumurta şeklindeki tünel için 0.54 mm civarındadır.

Hesaplanan deformasyon miktarlarının pozitif veya negatif olması tünelde meydana gelecek olan kapanmanın iç ya da dış kısma doğru gerçekleşeceğini belirtmektedir. Örneğin, Şekil 7’deki deforme olmuş hal incelenirse, tünelin taç kısmında deformasyon miktarı -9.0 mm olarak hesaplanmıştır ve bu durum tünelin merkez noktasına doğru bir iç kapanma yaptığı anlamına gelmektedir. Yüzey kısmında (1 numaralı düğüm noktasında) meydana gelen tasman değeri -4.5 mm olarak hesaplanmıştır ve bu durum yüzeyden tünel merkezine doğru bir oturma olduğunu göstermektedir.

## 5. Sonuç ve Öneriler

Elde edilen sonuçlara göre, yüzeyde meydana gelecek göçme durumunda yumurta şekli alternatifinin daha az deformasyon gösterme kabiliyeti sayesinde daha avantajlı olduğu söylenebilir. Yüzeyde olduğu gibi tünel içi deformasyonlarda da bir miktar yumurta şeklinin avantajlı olduğu görülmektedir.

Tasarlanan tünel geometrisi, beton sınıfı ve kalınlığı, kaya bulunuşu çeşidi, adedi ve çapı, örtü yükü veya ek destek sistemlerinde değişiklikler yapılarak istenilen şartlarda değerler hesaplanabilmektedir. Bu kısımda tünel tasarımı, belirli kabuller doğrultusunda tasarlanmış olabilir, fakat deformasyonların kesin doğru yapılması muhtemel ek optimizasyonlar sonucu belirlenebilecektir. Güvenlik faktörlerine uymadığı takdirde bu değerler üzerinde güvenli yönde kalabilmek adına değişiklikler yapılmalıdır. Bununla birlikte tünelin inşaat aşamasına geçildiği zaman, maliyet, güvenlik ve konfor gibi sebeplerden ötürü değişiklikler yapılması istenebilir. Bu bağlamda da tasarımcı tarafından, kullanılan parametreler bahsedilen çözüm önerileri doğrultusunda değiştirilebilmektedir.

Hesaplanan tasman ve konverjans miktarları proje şartname limitlerini aşarsa, deformasyonları azaltmak için bu çalışmada kullanılan kaya bulonlarının çapı  $\phi 25$ 'ten  $\phi 30$ 'a çıkartılabilir veya sayısı artırılabilir. Bunun yanı sıra ek destek sistemi olarak şemsiye uygulaması (Umbrella) ile birlikte zemin çivisi kullanılabilir veya beton kaplama kalınlığı ile tünel geometrisi değiştirilebilir.

Bu çalışmada, belirli koşullar altında tasman ve konverjans miktarının azaltılmasında, tünel geometrisinin at nalı tipi yerine yumurta şeklinde seçilmesinin daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. Araştırmanın ilerleyen kısımlarında ise, dairesel veya farklı bir geometride tasarım yapılması halinde ve ortamda bulunan su basıncı etkisinin ortadan kaldırılması durumunda ortaya çıkacak olan yeni deformasyon durumları, parametrik çalışma alanı genişletilerek değerlendirilebilecektir.

## Kaynakça

- Athar, M. F., Zaid, M., & Sadique, M. R. (2019, February). *Stability of different shapes of tunnels in weathering stages of basalt*. Proceedings of National Conference on Advances on Structural Technology, NIT Silchar, India.
- Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (1999). The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 777–809. doi: 10.1016/S0148-9062(99)00047-9
- Chehade, F. H., & Shahrour, I. (2008). Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: influence of the relative position and construction procedure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, 210-214. doi: 10.1016/j.tust.2007.03.004
- Gao, C. L., Li, S. C., Wang, J., Li, L. P., & Lin, P. (2018). The risk assessment of tunnels based on grey correlation and entropy weight method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(3), 1621-1631. doi: 10.1007/s10706-017-0415-5
- Gupta, A. S. (1997). *Engineering behavior and classification of weathering rocks*. (PhD), Indian Institute of Technology, Delhi, India.
- Li, S. C., Zhou, Z. Q., Li, L. P., Xu, Z. H., Zhang, Q. Q., & Shi, S. S. (2013). Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on attribute synthetic evaluation system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 50-58. doi: 10.1016/j.tust.2013.05.001
- Meguid, M. A., Saada, O., Nunes, M. A., & Mattar, J. (2008). Physical modeling of tunnels in soft ground: A review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, 185-198. doi: 10.1016/j.tust.2007.02.003
- Mishra, S., Rao, S., Gupta, N. K., & Kumar, A. (2018). Damage to shallow tunnels in different geomaterials under static and dynamic loading. *Thin-Walled Structures*, 126, 138-149. doi: 10.1016/j.tws.2017.11.051
- Moussaiea, N., Sharifzadeh, M., Sahriarc, K., & Khosravia, M. H. (2019). A new classification of failure mechanisms at tunnels in stratified rock masses through physical and numerical modeling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 91, 103017. doi: 10.1016/j.tust.2019.103017



- Naqvi, M. W., Akhtar, M. F., Zaid, M., & Sadique, M. R. (2020). Effect of superstructure on the stability of underground tunnels. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 8, 142-161. doi: 10.1007/s40515-020-00119-6
- Ouchi, A. M., Pakalnis, R., & Brady, T. M. (2004, April). *Update of span design curve for weak rock masses*. Proceedings of the 99th annual AGM-CIM conference, Edmonton, AB, Canada.
- Öztürk, H. T. (2007). *Tüneller ve Tasarım İlkeleri*. (M.Sc), Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye.
- Sakurai, S. (1983, September). *Displacement measurements associated with the design of underground openings*. Proceedings of international symposium on field measurements in geo-mechanics, Zurich, Switzerland.
- Song, S., Li, S., Li, L., Shi, S., Zhou, Z., Liu, Z., ... & Sun, H. (2019). Model test study on vibration blasting of large cross-section tunnel with small clearance in horizontal stratified surrounding rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 92, 103013. doi: 10.1016/j.tust.2019.103013
- Wang, J., Li, S. C., Li, L. P., Lin, P., Xu, Z. H., & Gao, C. L. (2019). Attribute recognition model for risk assessment of water inrush. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(2), 1057-1071. doi: 10.1007/s10064-017-1159-4
- Zaid, M., & Mishra, S. (2021). Numerical analysis of shallow tunnels under static loading: A finite element approach. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39, 2581-2607. doi: 10.1007/s10706-020-01647-1