



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA METODU(NATM) İLE YÜK
AZALTMA KATSAYISININ (DECONFINEMENT) ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Osman BAKIŞ

**Ocak-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA METODU(NATM) İLE YÜK
AZALTMA KATSAYISININ (DECONFINEMENT) ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Osman BAKIŞ

**Danışman
Doç. Dr. Nuray ALPASLAN**

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ziraddin MAMMADOV

Dr. Öğr. Üyesi Veysel Süleyman YAVUZ

**Ocak-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Osman BAKIŞ tarafından hazırlanan “YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA METODU(NATM) İLE YÜK AZALTMA KATSAYISININ (DECONFINEMENT) ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 22/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ziraddin MAMMADOV

.....

Danışman

Doç. Dr. Nuray ALPASLAN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Veysel Süleyman YAVUZ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Osman BAKIŞ
Tarih: 22.01.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA METODU(NATM) İLE YÜK AZALTMA KATSAYISININ (DECONFINEMENT) ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Osman BAKIŞ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Nuray ALPASLAN

2025, 57 Sayfa

Bu tez çalışmasında, Hakkari Yüksekova-Yeniköprü sahasında gerçekleştirilmiş olan (0+162)-(4+118) kilometreleri arasındaki yol çalışmasında, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) kullanılarak açılan tünel kazısında oluşan deformasyonları incelemek amacıyla sonlu elemanlar (SE) yöntemi uygulanmıştır. NATM ile kazılan tünelin zemin özellikleri, sondajlar ve laboratuvar deneylerinden elde edilen parametreler kullanılarak Plaxis 2D programında modellenmiş ve analiz sonuçları sunulmuştur. Daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için aşamalı kazı yöntemine dayalı hesaplamalar gerçekleştirilmiş; her bir durum için efektif gerilmeler, eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve maksimum yer değiştirme grafikleri elde edilerek değerlendirilmiştir. Bununla birlikte çalışma kapsamında, deconfinement katsayısı kullanılarak NATM ile açılan bir tünel kazısı sayısal olarak iki boyutlu modellenmiştir. Yapılan modellemelerde, tünel üst ve alt yarı kazılarının gerçekleştirildiği inşaat aşamalarında gerilmeleri azaltmak amacıyla yük azaltma katsayıları $(1-\beta)$ %10, %50, %60, %70, %80 ve %90 gibi çeşitli değerlerde belirlenmiştir.

Analizler sonucunda, deconfinement $(1-\beta)$ değeri arttıkça kazı ve kaplama aşamalarında ki gerilme ve yer değiştirme değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, tünel kazı kesitinde kayma ve çekme gerilmelerinin en çok duvarda ve tabanda yoğunlaştığı saptanmıştır. Bundan yola çıkılarak kazı adımlarının uygun seçilmesinin en büyük etken olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deformasyon, Plaxis 2D, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM), Deconfinement $(1-\beta)$ katsayısı

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF LOAD REDUCTION COEFFICIENT (DECONFINEMENT) WITH THE NEW AUSTRIAN TUNNELLING METHOD (NATM)

Osman Bakış

Batman University Graduate Education Institute

Civil Engineering Department of Science

Advisor: Associate Professor Nuray ALPASLAN

2025, 57 Pages

In this thesis, the finite element (FEM) method was applied to investigate the deformations in the tunnel excavation using the New Austrian Tunneling Method (NATM) in the (0+162)-(4+118) kilometers of road work in Hakkari Yüksekova-Yeniköprü area. The soil properties of the tunnel excavated by NATM were modeled in Plaxis 2D program using parameters obtained from borings and laboratory tests and the results of the analysis are presented.

In order to obtain more realistic results, calculations based on the staged excavation method were performed; effective stresses, axial force, shear force, bending moment and maximum displacement graphs were obtained and evaluated for each case. In addition, a tunnel excavation using the New Austrian Tunneling Method (NATM) was numerically modeled in two dimensions using the deconfinement coefficient. In the modeling, load reduction coefficients ($1-\beta$) were determined at various values such as 10%, 50%, 60%, 70%, 70%, 80% and 90% in order to reduce the stresses during the construction phases of the upper and lower half excavations.

As a result of the analyses, it was observed that as the deconfinement ($1-\beta$) value increases, the stress and displacement values in the excavation and lining stages increase. However, it was found that the shear and tensile stresses in the tunnel excavation section were mostly concentrated in the wall and floor. Based on this, it was determined that the appropriate selection of excavation stages is the most important factor.

Keywords: Deconfinement ($1-\beta$) coefficient, Deformation, Plaxis 2D, New Austrian Tunneling Method (NATM)

ÖN SÖZ

Yüksek lisansa başladığım ilk günden beri desteğini esirgemeyen, her zaman yanımda olan, bilgi ve birikimiyle bana her zaman katkı sağlayan, idol olarak benimsediğim, danışman hocam sayın Doç. Dr. Nuray ALPASLAN'a yapmış olduğum destek ve katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tezimin son aşamasına kadar yardımlarını esirgemeyen sayın Dr. Öğr. Üyesi Veysel Süleyman YAVUZ'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmamda destekleri hiçbir zaman esirgemeyen aileme, tezi hazırlamamda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım sayın Jeoloji Yüksek Mühendisi Abdulsalam TEKİN'e teşekkür ederim.

Osman BAKIŞ
BATMAN-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	4
3.1. Tüneller	4
3.2. Tünel Açma İşlemleri	5
3.3. Tünel Açma Yöntemleri	6
3.3.1. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) uygulaması	6
3.4. Tünellerdeki Gerilmeler ve Kemerlenme Etkisi	8
3.4.1. Arazide gerilme durumları	8
3.4.2. Yeraltı açıklıklarının oluşturduğu ikincil gerilmeler	10
3.5. Nümerik (Sayısal) Modelleme Yöntemleri.....	14
3.6. PLAXIS 2D (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis) programı	14
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	19
4.1. Çalışma sahası yeri ve özellikleri	19
4.2. Çalışma Sahasındaki Karayolu Tünelinin Plaxis 2D Programı ile Modellenmesi ve Analizi	21
4.2.2.1. Birinci kazı aşamasındaki tünel deformasyonlarının analizi	26
4.2.2.2. İkinci kazı aşamasındaki tünel deformasyonlarının analizi	28
4.2.2.3. Tünel inşaatındaki Plaxis 2D programı ile yapılan analizlerde elde edilen modeller	30
4.2.2.4. Tünel inşaatındaki Plaxis 2D programı ile yapılan analizlerde elde edilen modeller	34
4.2.2.4.1. Deconfinement (1- β) değeri 0.10 için yapılan analizler	35
4.2.2.4.2. Deconfinement (1- β) değeri 0.50 için yapılan analizler	38
4.2.2.4.3. Deconfinement (1- β) değeri 0.60 için yapılan analizler	40
4.2.2.4.4. Deconfinement (1- β) değeri 0.70 için yapılan analizler	43
4.2.2.4.5. Deconfinement (1- β) değeri 0.80 için yapılan analizler	45
4.2.2.4.6. Deconfinement (1- β) değeri 0.90 için yapılan analizler	48

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	51
5.1 Sonuçlar	51
5.2 Öneriler	53
KAYNAKLAR	55



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 4. 1. PLAXIS 2D programında kullanılan modellemeye ait zemin parametrelerin özellikleri	22
Çizelge 4. 2. PLAXIS 2D programında kullanılan modellemeye ait tünel kaplaması parametrelerin özellikleriPLAXIS 2D programında kullanılan modellemeye ait tünel kaplaması parametrelerin özellikleri.....	23



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3. 1. Bir Tünelin Üç Boyutlu Görünümü (Bozkurt,1981)	5
Şekil 3. 2. Tünel açımı sırasında izlenecek yol (Bell, 1994'den düzenlenmiştir)	6
Şekil 3. 3. NATM (New Austrian Tunnelling Method) (https://www.tunelmarket.com/blog/natm-tunel-metodu)	8
Şekil 3. 4. k oranına bağlı plastik zon oluşumu (Yan ve Shihao, 2010).....	10
Şekil 3. 5. Tünel etrafındaki radyal ve teğetsel gerilmeler	12
Şekil 3. 6. Yeraltında açılan bir boşluk (tünel) çevresinde oluşan farklı gerilme bölgeleri: Elâstik bölge (kazıdan etkilenmemiş ve doğal yapısını koruyan kaya); Koruyucu bölge (Protective Zone, Wiesmann-Trompeter Schutzzone) ve Plâstik bölge	13
Şekil 3. 7. Dairesel kesitli (modern) tünelde, tünel açılırken oluşan sekonder (düşey ve yatay) gerilmelerin dağılımı (Yılmaz, 2007)	13
Şekil 3. 8. Kesitlerine göre köşeli (yamuk ve kare) ve at nalı tipli açılan eski tip tünellerde gerilmelerin aşırı yoğunlaştığı kesimler(Yıldırım ve Gökaşan, 2013)	14
Şekil 3. 9. Deconfinement yöntemi ile Eksik Aşamalı inşaat yönteminin şematik gösterimi (p: gözenek basınçları; σ' : efektif gerilmeler), (https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0108640).....	18
Şekil 4. 1. Çalışma sahası yer bulduru (Google earth'den düzenlenmiştir)	20
Şekil 4. 2. Plaxis 2D programında zemin tabakalı modellemesi	22
Şekil 4. 3. Tünelin geometrik modellemesi	24
Şekil 4. 4. Tünel inşaatı için oluşturulan ağ	25
Şekil 4. 5. Zeminde meydana gelen boşluk suyu basıncı	25
Şekil 4. 6. İlk kazı aşamasında meydana gelen deformasyonlar	26
Şekil 4. 7. İlk kazı sonrası yapılan kaplama aşamasında meydana gelen deformasyonlar	27
Şekil 4. 8. İkinci kazı sonrası meydana gelen deformasyonlar	28
Şekil 4. 9. İkinci kazı sonrası kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlar	29
Şekil 4. 10. Kazı aşamaları ile toplam deformasyon ilişkisi grafiği	29
Şekil 4. 11. Tünel inşaatında meydana gelen toplam yerdeğiştirme	30
Şekil 4. 12. Tünel inşaatında meydana gelen x yörüngesindeki toplam yerdeğiştirme .	31
Şekil 4. 13. Tünel inşaatında meydana gelen y yörüngesindeki toplam yerdeğiştirme .	31
Şekil 4. 14. Zeminde meydana gelen efektif gerilmeler	32
Şekil 4. 15. Tünel kaplamasında meydana gelen toplam yer değiştirme	33
Şekil 4. 16. Tünel kaplamasında meydana gelen kesme kuvveti	33
Şekil 4. 17. Tünel kaplamasında meydana gelen burulma momenti	34
Şekil 4. 19. İlk kaplama aşaması	36
Şekil 4. 20. İkinci kazı aşaması	37
Şekil 4. 21. Kplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlar	37
Şekil 4. 22. İlk kazı aşaması	38
Şekil 4. 23. İlk kaplama aşaması	39
Şekil 4. 24. İkinci kazı aşaması	39
Şekil 4. 25. Kplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlar	40
Şekil 4. 26. İlk kazı aşaması	41
Şekil 4. 27. İlk kaplama aşaması	41

Şekil 4. 28. İkinci kazı aşaması	42
Şekil 4. 29. Kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlar	42
Şekil 4. 30. İlk kazı aşaması	43
Şekil 4. 31. İlk kaplama aşaması	44
Şekil 4. 32. İkinci kazı aşaması	44
Şekil 4. 33. Kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlar	45
Şekil 4. 34. İlk kazı aşaması	46
Şekil 4. 35. İlk kaplama aşaması	46
Şekil 4. 36. İkinci kazı aşaması	47
Şekil 4. 37. Kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlar	47
Şekil 4. 38. İlk kazı aşaması	48
Şekil 4. 39. İlk kazı aşaması ile Deconfinement ($1-\beta$) değeri ilişkisi grafiği	49
Şekil 4. 40. İlk kaplama aşaması ile Deconfinement ($1-\beta$) değeri ilişkisi grafiği	49
Şekil 4. 41. İkinci kazı aşaması ile Deconfinement ($1-\beta$) değeri ilişkisi grafiği	50
Şekil 4. 42. Son kaplama aşaması ile Deconfinement ($1-\beta$) değeri ilişkisi grafiği.....	50



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

β	: Beta katsayısı
σ_h	: Yanal gerilme (MPa)
σ_v	: Düşey gerilme (MPa)
z	: Derinlik (m).
k	: Farklı kayaçlar arasında yanal olarak aktarma oranı
E_1	: Tabakalanma düzlemine paralel yönde kayacın elastisite modülü (GPa)
E_2	: Tabakalanma yönüne dik yönde kayacın elastisite modülü (GPa)
ν_1	: Tabakalanma düzlemine paralel yönde etkiyen gerilme altında kayacın Poisson oranı
ν_2	: Tabakalanma düzlemine dik yönde etkiyen gerilme altında kayacın Poisson oranı
σ_r	: Radyal Gerilme (MPa)
σ_θ	: Teğetsel Gerilme (MPa)
$\sigma_{r\theta}$	: Kesme gerilmesi (MPa)
a	: Tünel yarıçapı (m)
r	: İncelenen noktanın tünel merkezine olan mesafesi (m)
p_i	: Tahkimat basıncı (MPa)
θ	: İncelenen noktayı tünel kesit merkezine bağlayan doğrunun yatay ile yaptığı açı
c	: Kohezyon
ν	: Poisson oranı
φ	: İçsel sürtünme açısı, (o)
γ	: Zeminin birim ağırlığı
EI	: Eğilme rijitliği
EA	: Eksenel rijitlik
W	: Plak ağırlığı
d	: Kalınlık

Kısaltmalar

KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
NATM	: Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SE	: Sonlu Elemanlar

1. GİRİŞ

Tüneller, karayollarının vazgeçilmez bir parçasını teşkil etmektedir. Özellikle karayolu tünelleri zorlu coğrafi engellerin tünel aracılığıyla aşılması, hem ulusal hem de uluslararası ulaşımında büyük avantajlar sunmaktadır. Karayolu tünelleri, yapısal özellikleri sayesinde yol güvenliğinin ön planda olduğu seyahat güzergahlarıdır. Türkiye gibi dağlık bölgelerin yaygın olduğu ülkelerde, karayolu ulaşımının kesintisiz sağlanabilmesi için, arazi koşullarının yol inşasına elverişli olmadığı yerlerde tüneller inşa edilmektedir. Son yıllarda meydana gelen teknolojik gelişmeler, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde yolcu ve yük taşımacılığında karayolu taşımacılığının önemli bir yer edinmesine yol açmıştır. Bu durum, yüksek standartlara sahip karayolu inşaatlarına büyük bütçelerin ayrılmasını gerekli kılmaktadır. Türkiye'nin coğrafi yapısı göz önünde bulundurulduğunda, birçok bölgede kesintisiz, etkin ve ekonomik karayolu ulaşımının sağlanabilmesi için tünel inşaatına özel bir önem verilmiştir.

Günümüzde, sığ derinliklerde açılan ve geniş kazı kesitine sahip tüneller, artan şehirleşmenin bir sonucu olarak ortaya çıkan önemli yapılar haline gelmiştir. Bu tüneller, metro ve karayolu bağlantıları, geçitler, yeraltı depoları, içme suyu ve kanalizasyon sistemleri gibi çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Bu yeraltı yapılarının ortak özelliği genellikle sığ derinliklerde inşa edilmeleridir. Ancak bu tür formasyonların en büyük dezavantajı, düşük taşıma gücüne sahip olmaları ve kolayca deformasyona uğrayabilmeleridir. Sığ tünelcilikte, tünelin açılacağı formasyon genellikle yüzeye yakın olduğu için suya doymun bir durumdadır. Bu durum, tünel kazısı ve destekleme aşamalarında ek önlemler alınmasını zorunlu kılar. Sığ tünelcilik şartlarının geçerli olduğu kazı alanlarının üstünde yerleşim alanları ve yer üstü tesislerinin bulunduğu dikkate alındığında, yeraltı jeoteknik koşullarının titizlikle değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Kazı ve tahkimat işlemleri, ortam koşullarına uygun bir şekilde planlanmalıdır. Bu bağlamda, güzergah boyunca zayıf bölgelerin iyileştirilmesi ve zemin oturmalarının dikkatle izlenmesi, yer üstü yapılarının stabilitesi ve güvenliği açısından kritiktir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Karaoğlu (2002), NATM yöntemiyle yapılmış bir kaya tünelinin detaylı bir incelemesini gerçekleştirmiştir. Bu inceleme, NATM prensiplerine uygun olarak geliştirilmiş Smap-3d ve Tuna-plus yazılımlarıyla modelleme yapılmasıyla desteklenmiştir. Kaya ortamının davranışını daha iyi anlamak için Murrel ve Hoek kırılma kriterleri oluşturulmuştur. Çayeli Tüneli, ilgili yazılımlar kullanılarak analiz edilmiş ve tünel kesiti ile çevresinde meydana gelen deformasyonlar, gerilmeler ve plastikleşen bölgeler tespit edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, tünelde düşey yönde maksimum 2.90 mm, yatay yönde ise 0.40 mm'lik deformasyonlar görülmüştür.

Hao ve Azam (2005), nümerik analiz yöntemini kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada tünel çevresindeki deplasmanları ve plastik alanları incelemişlerdir. İncelemeleri sonucunda, fayın en fazla yeraltı boşluğunun tepe noktasında ve tünel eksenini kestiği bölgede tünel stabilitesini olumsuz yönde etkilediğini belirlemişlerdir.

Aktaş (2009), Kâğıthane-Piyalepaşa tünellerinin inşasında NATM kullanarak, Plaxis 3D Tunnel yazılımıyla detaylı bir analiz gerçekleştirmiştir. Destek sistemleri olarak ise her bölge için ayrı ayrı 25-30 cm kalınlığında püskürtme beton, I160 çelik iksa ve 26 mm çapında, 4 metre uzunluğunda 17 adet bulon kullanılmıştır.

Doğruoğlu (2009), gerçekleştirdiği çalışmada şehir içindeki Otogar-Bağcılar metrosunun Otogar-Kirazlı bölümündeki altı tünel kesitinde zemin yer değiştirme ve deformasyonlarını sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir.

Polat (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, NATM kullanılarak inşa edilen Arhavi tüneli üzerinde incelemeler yapılmıştır. Gerçek veriler kullanılarak Plaxis yazılım paketi ile modellenen tünelin güzergâhındaki deformasyonlar detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Analizler sonucunda, efektif gerilme dağılımları, düşey ve yatay deplasmanlar, toplam bölgesel deplasmanların dağılımı ile tahkimata etki eden iç kuvvetler ve deformasyonlar elde edilmiştir.

Burjus (2015), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak killi bir zemin üzerinde gerçekleşen tünel inşaatı esnasındaki yüzey deformasyonlarını incelemiştir. Bu çalışmada, MC ve HS kriterine dayalı modellerden faydalanılmıştır.

Vali ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada, tünel açmanın yer değiştirmeler üzerindeki etkilerini ve farklı geoteknik parametreler için tünele bitişik yanal yüklü derin

temellerin davranışını araştırmışlardır. Düzlem şekil değiştirme sayısal simülasyonları Plaxis 2D geoteknik mühendislik yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bulgular, zeminin mukavemet ve rijitlik parametrelerinin artırılmasıyla, tünel açmadan önce kazıkların ilk yanal taşıma kapasitesinin kademeli olarak arttığını göstermiştir.

El Raouf ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada, hacim kaybı, kumun bağlı yoğunluğu ve örtü-çap oranı (C/D) gibi bazı parametrelerin etkisini araştırmak için sonlu elemanlar programı (Plaxis2D) aracılığıyla parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Model sonuçlarının doğrulanması ve güvenilirliğinin değerlendirilmesi için, sonlu eleman sonuçları Büyük Kahire Metro tünelinin saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır.

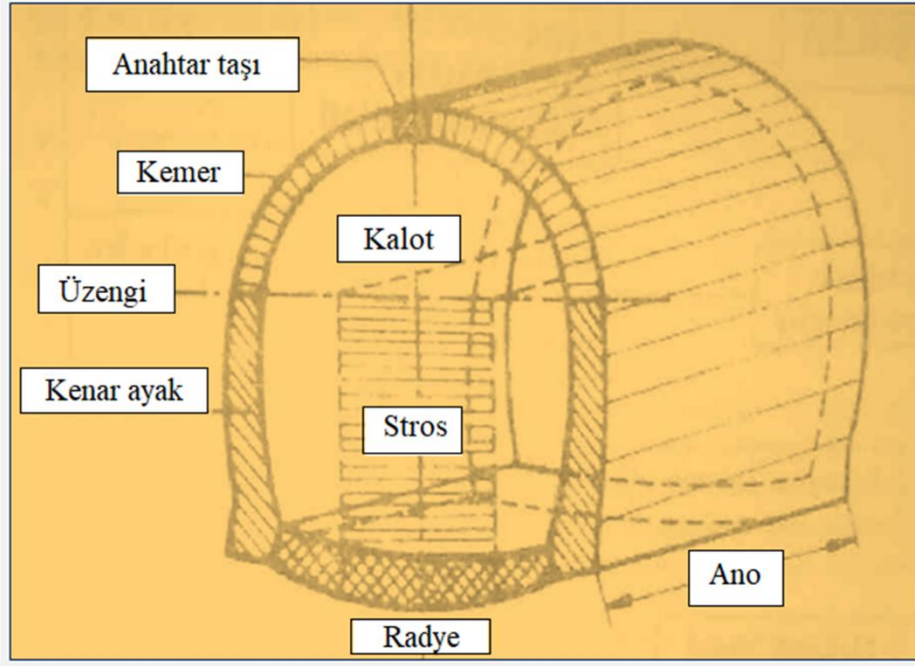
Kaya (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yük azaltma yöntemi (Convergence-Confinement Method, Konverjans Sınırlama yöntemi veya β metodu) kullanarak Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile açılan bir tünel kazısını sayısal olarak iki boyutlu modellenmiştir. Yapılan modellemelerde farklı (1- β) parametresi için %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 değerleri kullanılarak farklı yük azaltma katsayılarının tünel kazısı kaynaklı yüzey deformasyonlarına olan etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Tüneller

Tüneller; eksenin eğim açısı 30° den daha küçük olan, iki ucu açık ve boyuna göre çapı çok küçük olan yeraltı yapılarıdır. Bu tanımdan çıkarılan sonuca göre tünel inşasında en önemli unsur; mevcut kayanın kazılabilme ve desteklenebilme özelliğidir. Başka bir anlatıma göre tünel; demiryolu, karayolu, yaya yolu, kanal vb. taşıma yollarının bir kısmının yeryüzünden geçirilmesinin teknik bakımdan olanaksız olduğu ya da ekonomik bakımdan uygun bulunmadığı yerlerde, bu kısmın yeraltından geçirilmesi için başvuru sanat yapılarıdır (Köse ve ark.,2007). Karayolu tünelleri: Demiryolu tünellerine nazaran güzergâh geometrisi açısından çok daha esnektir. Genellikle karayolu tünel projeleri $\pm\% 2$ 'lik bir eğime göre projelendirilmektedir. Eğer trafik hacmi düşük ise söz konusu eğim $\% \pm 4$ 'e kadar çıkmaktadır. Daha yüksek eğimler, havalandırma (CO, CO₂, NO₂ emisyonları vb.) ve görüş güvenliği açısından uygun değildir. Karayolu enkesiti günlük trafik hacmine sıkı sıkıya bağlıdır. Uzun tünellerde “havalandırma” ve “yangın güvenliği” projenin en önemli öğelerinin başında yer alır (Arıoğlu, 2009).

Tünel en kesitinde (Şekil 3.1), tünelin iç yapısında farklı bölümler belirgin bir şekilde tanımlanmıştır. Tünelin üst kısmı 'tavan' veya 'kemer' olarak adlandırılırken, yan duvarlar 'yan', 'duvar' veya 'ayak' terimleriyle ifade edilir. Alt kısım ise 'taban' veya 'radye' olarak bilinir. Tünelin kemer bölümünün ayaklarıyla birleştiği noktaya 'üzengi' ya da 'üzengi seviyesi' denir; bu seviyenin üst kısmı 'kalot', alt kısmı ise 'orta kısım' veya 'stros' olarak adlandırılır. Tünel kazısı sırasında içeri çıkarılan malzeme 'pasa' olarak nitelendirilirken, uygulanan her bir yöntemin gerçekleştirildiği bölüm ise 'ano' terimiyle anılır(Bozkurt, 1981).



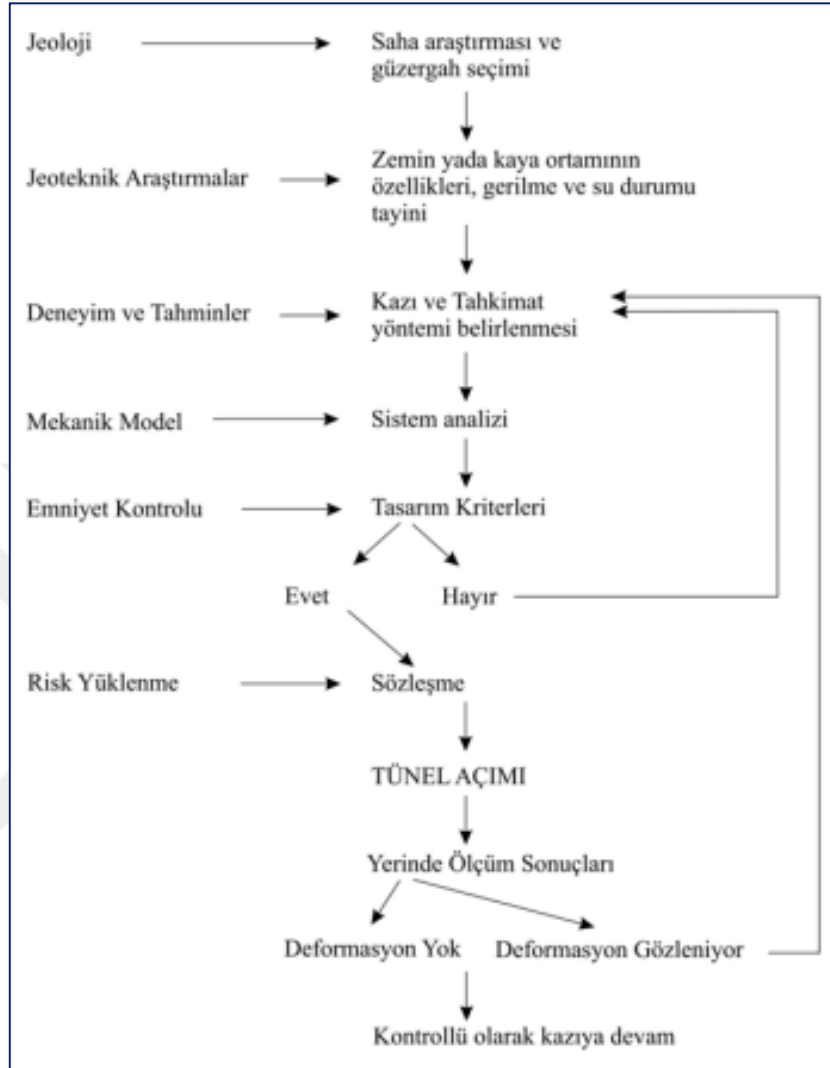
Şekil 3. 1. Bir Tünelin Üç Boyutlu Görünümü (Bozkurt, 1981)

3.2. Tünel Açma İşlemleri

Tünel açma sürecinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için, öncelikle bölgenin jeolojik yapısı, kaya ve zemin özellikleri, jeolojik dayanım gibi faktörlerin yanı sıra geçiş güzergâhının uzunluğu, derinliği, gerilim durumu ile zemin ve kaya kütlesi sınıflaması gibi unsurlar dikkate alınmalıdır. Emniyet, maliyet ve zaman gibi tünel inşaatını etkileyen tüm kaya-zemin özellikleri bir arada değerlendirilerek, bu unsurların kapladığı alanlar, tektonik, jeolojik ve litolojik yapı, dokanak zonları ile dokusal ve bünyesel özellikler titizlikle belirlenmelidir. Ayrıca, jeolojik haritalar ve kesitler ile jeofizik ölçümlerin destekleyici bir rol oynaması da önem arz etmektedir.

Tünel açma süreci, başlangıcından sonuna kadar bir dizi önemli adımı içerir. Öncelikle, saha çalışmaları gerçekleştirilerek bölgenin jeolojisi belirlenmelidir. Bu bilgiler ışığında, tünelin güzergahı, derinliği ve konumu saptanır. Ayrıca, zemin etütleri ve kaya mekaniği analizleri yapılarak zemin özellikleri, kayaç dayanımı, süreksizlikler, faylar ve su durumu hakkında detaylı bilgiler elde edilir. Deneyim ve hesaplamalara dayanarak, kazı kesiti, kazı yöntemi, kullanılacak makineler, zemin susuzlaştırma ve tahkimat elemanları belirlenir. Yapısal bir modelin hazırlanmasıyla birlikte, kazı sürecinin her aşaması için ön ya da nihai tünel kaplaması yönünden farklı zemin koşullarına uygun

modeller oluşturulur. Son olarak, gerilme ve deformasyonlara bağlı olarak sistem güvenliğinin kontrol edilmesi gerekmektedir (Bell, 1994).



Şekil 3. 2. Tünel açımı sırasında izlenecek yol (Bell, 1994)

3.3. Tünel Açma Yöntemleri

3.3.1. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) uygulaması

Tünelcilik alanında yeni bir anlayışın gelişmesine zemin sağlayan "NATM", tünelin açıldığı kaya ortamına kendi kendini taşıma prensibine dayanır (Şekil 3.3). Bu yöntem, en uygun kazı ve sağlamlaştırma tekniklerinin kullanılmasıyla, kazı sonrası meydana gelen ikincil gerilmelerin ve deformasyonların, kaya yapısının stabilitesini bozmayacak şekilde yönetilmesini hedefler. Amacı, kayaçların ilk sağlamlığını mümkün

olduğunca koruyarak, boşluğu çevreleyen alanda kendi kendine tutunan ve taşıyan bir statik sistem oluşturmaktır. Bu süreçte, kayacın yük taşıma kapasitesi etkin bir şekilde kullanılarak, kayaç, yük oluşturulan ortamdan yük taşıyıcı bir yapıya dönüştürülmektedir (Köse ve ark., 2007). NATM yöntemi, 20. yüzyılın ikinci yarısında etkili bir tünel açma tekniği olarak öne çıkmaktadır. Bu metodun temelinde, zemin yapısının zayıf kısımlarını pahalı ve yapay ekipmanlar kullanarak ortadan kaldırmak yerine, zemin özelliklerinin mevcut konumda iyileştirilmesi hedeflenmektedir (Rabcewicz, 1964).

NATM, yani "Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu", tünel inşaatında yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. 1950'lerde Avusturyalı mühendisler tarafından geliştirilen bu yöntem, doğal zemin davranışını göz önünde bulundurarak tünel açma işlemini gerçekleştirir.

NATM, hem yumuşak zeminlerde hem de kayaçlarda tünel açma süreçlerinde uygulanır ve belirli temel prensiplere dayanır:

- ✓ Sürekli Açma Yöntemi: Bu metod, tünelin tamamını tek seferde açmak yerine, önce küçük bir bölümünü açmayı ve desteklemeyi öngörür. Destekleme işlemi tamamlandıktan sonra, bir sonraki bölüm açılır ve desteklenir. Bu döngü, tünelin tüm uzunluğu boyunca devam eder.
- ✓ Geoteknik Gözlem: NATM sürecinde, tünel açma işlemi sırasında oluşan deformasyonlar ve zemin davranışları dikkatle izlenir. Bu gözlemler, mühendislerin uygun destekleme önlemlerini almaları için gerekli bilgileri sağlar.
- ✓ Gelecekteki Yüklerin Hesaba Katılması: NATM, tünel ilerledikçe gelecekte karşılaşılabilecek yükleri dikkate alarak destekleme önlemlerini uygulamayı hedefler. Bu yaklaşım, tünelin dayanıklılığı ve güvenliğini artırır.



Şekil 3. 3. NATM (New Austrian Tunneling Method) (<https://www.tunelmarket.com/blog/natm-tunel-metodu>)

3.4. Tünellerdeki Gerilmeler ve Kemerlenme Etkisi

3.4.1. Arazide gerilme durumları

Birincil gerilmeler, mühendislik uygulamaları öncesinde kaya kütlesi içinde mevcut olan gerilmelerdir. Bu gerilmeler, üç boyutlu olarak farklı yönlerde asal birleşenlerine ayrılmaktadır. Asal birincil gerilme büyüklükleri ve yönlerine dayanarak mühendislik tasarımları gerçekleştirilir. Eğer yüzeyden ek bir yük gelmiyor ya da jeolojik sebeplerle ilave bir yüklenme söz konusu değilse, kaya kütlesinin kendi ağırlığı nedeniyle oluşan düşey gerilme, kabaca Eşitlik (3.1)'de belirtildiği gibi hesaplanabilir (Hoek, 2006).

$$\sigma_v = \gamma z \quad (3.1)$$

Burada;

γ : kayaç birim hacim ağırlığı (kN/m³)

z : derinliktir (m).

Düşey gerilmelere maruz kalan her katmanda, malzeme içinde yanal gerilmeler meydana gelir. Bu yanal gerilmelerin büyüklüğü, her malzemenin kendine özgü mekanik özelliklerine bağlıdır (Amadei ve Stephansson, 1997). Kaya malzemelerinin düşey gerilmeleri, farklı kayaçlar arasında yanal olarak aktarma oranı (k oranı) bakımından farklılık gösterir. Eşitlik (3.2)'de belirtildiği gibi, yanal gerilme ve düşey gerilme arasındaki oran k oranı olarak adlandırılmaktadır.

$$\sigma_h = k\sigma_v \quad (3.2)$$

Burada;

σ_h : yanal gerilme (MPa)

σ_v : düşey gerilmedir (MPa)

Uygulanan düşey normal gerilmenin etkisiyle, Poisson oranına bağlı olarak yanal birim deformasyonlar ortaya çıkmaktadır. Homojen kaya malzemeleri söz konusu olduğunda, yanal ve düşey birim deformasyonlardaki farklılık, düşey ve yanal gerilmelerin birbirinden farklı olmasından kaynaklanır (Karpuz ve Hindistan, 2008). Bu bağlamda, Poisson oranı k oranına bağlı bir değişken olarak değerlendirilir. Poisson oranı ile k oranı arasındaki ilişki, Eşitlik (3. 3)'te açık bir şekilde gösterilmektedir.

$$k = \nu / (1 - \nu) \quad (3.3)$$

k oranı artışı ile artan yanal gerilmeler malzemenin Poisson oranının da artmasına sebep olur.

Anisotropik tabakalanma gösteren kayaçlar için ise bu ilişki Eşitlik (3.4)'te belirtilmiştir (Gerçek, 2007).

$$k = \left[\frac{\nu_2}{1-\nu_1} \right] \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (3.4)$$

Burada;

E_1 : Tabakalanma düzlemine paralel yönde kayacın elastisite modülü (GPa)

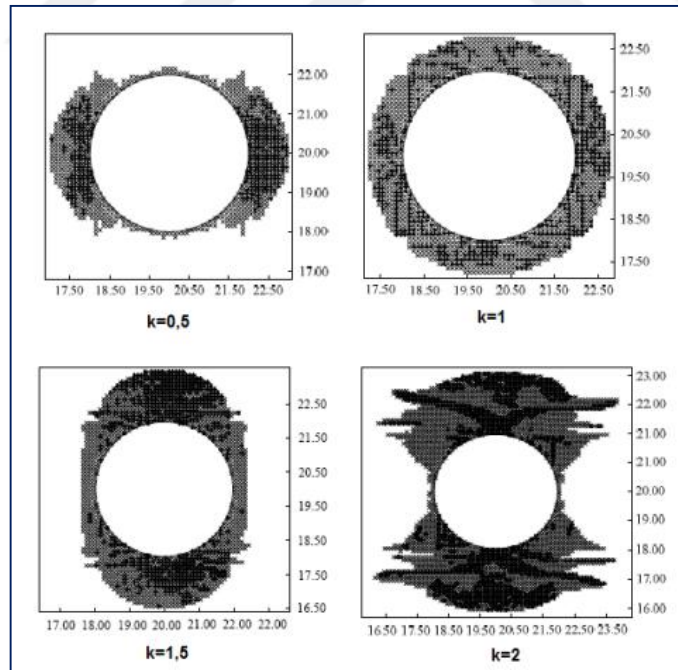
E_2 : Tabakalanma yönüne dik yönde kayacın elastisite modülü (GPa)

θ_1 : Tabakalanma düzlemine paralel yönde etkiyen gerilme altında kayacın Poisson oranı

θ_2 : Tabakalanma düzlemine dik yönde etkiyen gerilme altında kayacın Poisson oranıdır.

3.4.2. Yeraltı açıklıklarının oluşturduğu ikincil gerilmeler

k oranı, tünel çevresindeki gerilme dağılımlarını ve yenilme bölgesi oluşumunu önemli ölçüde etkiler. k oranının belirlenmesine yönelik birçok yöntem ve yerinde gerilme ölçüm imkanları bulunsa da, k oranının yeraltında aynı bölge ve hatta aynı derinlikte bile farklılık gösterebileceği dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, kazı yapılacak alan için güvenli bir değer aralığı belirlemek önemlidir (Yaralı ve Müftüoğlu, 1992; Komurlu, 2012). K oranı, yani yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranı çok yüksek olduğunda, taban ve tavan bölgelerinde duraysızlık riski artar ve plastik zon (yenilme bölgesi) kalınlığı da büyür. Düşey gerilmeler ana birincil gerilmeler olduğunda, k oranı 1'den küçükse yeraltı açıklığının yan duvarlarında yenilme riski meydana gelir. Şekil 3.4'de, k oranına bağlı olarak yeraltı açıklıkları etrafındaki plastik zon sınırlarının değişimini gösterilmiştir (Yan ve Shihao, 2010).



Şekil 3. 4. k oranına bağlı plastik zon oluşumu (Yan ve Shihao, 2010)

Yeraltı açıklıkları sebebiyle meydana gelen ikincil gerilmeler teğetsel, radyal ve makaslama gerilmeleri şeklinde ortaya çıkmaktadır. Eşitlik (3.5), Eşitlik (3.6) ve Eşitlik

(3.7)'de, Kirsch'in k oranına bağılı olarak dairesel kesite sahip yeraltı açıklıklarının çevresinde oluşan radyal, teğetsel ve kesme gerilmeleri ile ilgili ilişkiler sırasıyla sunulmuştur (Kirsch, 1898).

$$\sigma_r = \frac{\sigma_v(1+k)}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{p_i a^2}{r^2} + (\sigma_v(k-1) / 2) \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (3.5)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_v(1+k)}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{p_i a^2}{r^2} - (\sigma_v(k-1) / 2) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (3.6)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{\sigma_v(k-1)}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (3.7)$$

Burada;

σ_r : Radyal Gerilme (MPa)

σ_θ : Teğetsel Gerilme (MPa)

$\sigma_{r\theta}$: Kesme gerilmesi (MPa)

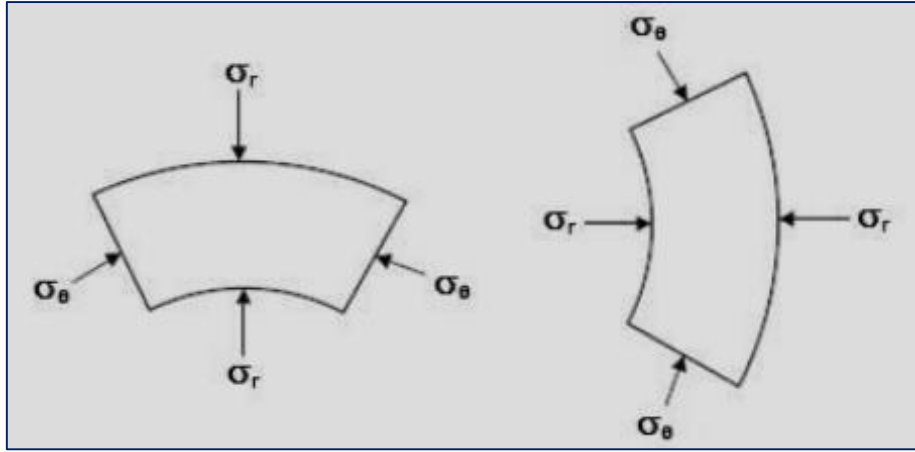
a: Tünel yarıçapı (m)

r : İncelenen noktanın tünel merkezine olan mesafesi (m)

p_i : Tahkimat basıncı (MPa)

θ : İncelenen noktayı tünel kesit merkezine bağlayan doğrunun yatay ile yaptığı açıdır.

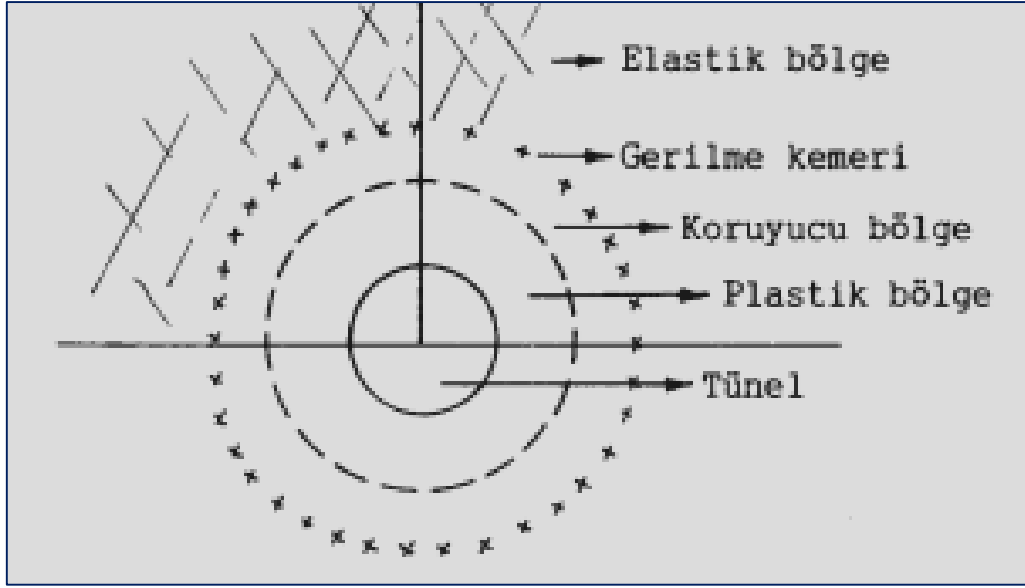
k oranı 1/3 değerinin altında olduğunda kaya ortamlarının tavan ve taban cidarında teğetsel gerilmeler çekme gerilmeleri şeklinde meydana gelir. Bu bölgede yenilmenin önlenmesi için teğetsel gerilmelerin kayacın çekme dayanımından daha düşük olması gerekmektedir. k oranı 1/3'ten büyük olduğunda ise tavan ve taban cidarlarında ($\theta=90^\circ$, $\theta=270^\circ$) teğetsel gerilmeler sıkışma gerilmeleri biçiminde ortaya çıkar. Eğer tahkimat basıncı yoksa cidarda radyal gerilmeler sıfır olacaktır. Bu durumda, teğetsel gerilmelerin kayacın tek eksenli basma (sıkışma) dayanımını aşması durumunda yenilme meydana gelebilir. Teğetsel ve radyal gerilmelerin şematik gösterimi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3. 5. Tünel etrafındaki radyal ve teğetsel gerilmeler (Aksoy & Kömürlü, 2017)

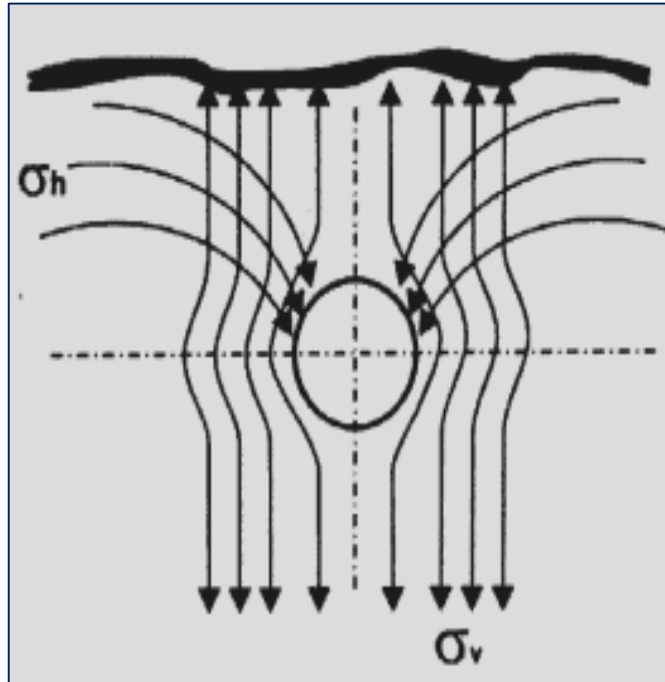
Tüneller içinde kazı yapıldığında, gerilmelerin etkisiyle kayalar açılan boşluğa doğru hareket etme eğilimindedir. Bu durum, ikincil gerilmelerin dağılımı sırasında, tünel çevresinde yeni gerilmelerin şiddetine ve kayacın dokusuna bağlı olarak kemerlenme (arching) adı verilen yük yoğunlaşma bölgelerinin oluşmasına yol açar. Kayalar, bu hareketi birbirine dayanarak bir dereceye kadar engeller ve böylece bir denge durumu ortaya çıkar. Yoğunlaşma yaşanan bu bölgelerde sağlanan dengeye "kemerlenme" denir. Kemerlendirme sayesinde, derinlik basınçları gevşeme zonasından gerilere aktarılmış olur. Başka bir deyişle, kemerlenmeyi, tünel açıldığında süreksizlikler nedeniyle gevşeyen blokların, tünel boşluğuna doğru hareket ederken birbiriyle kenetlenerek dayanıklı bir konum elde etmeleri olarak tanımlayabiliriz.

İkincil gerilmelerin dağılımı sırasında, boşluk çevresinde oluşan yeni gerilmelerin şiddeti ile kayanın dokusu arasında bir ilişki vardır. Bu etkileşim, "kemerlenme" adı verilen ve yüklerin yoğunlaştığı bölgelerin meydana gelmesine yol açar (Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8).

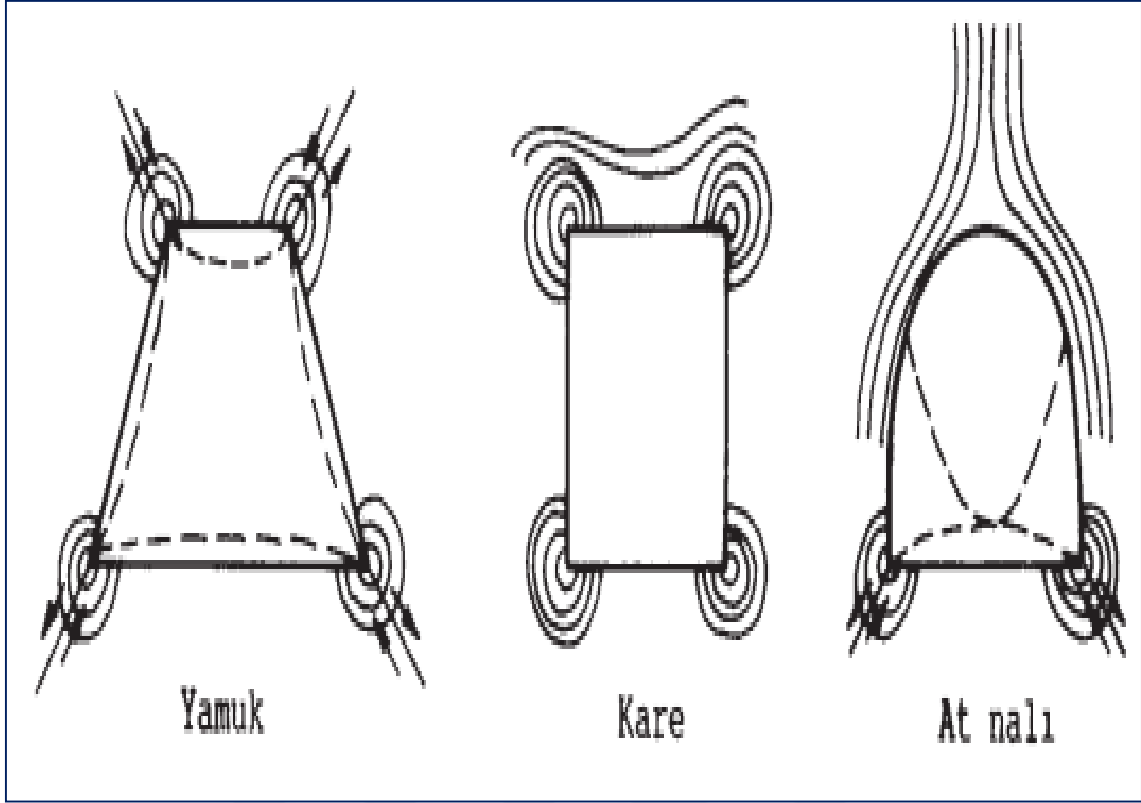


Şekil 3. 6. Yeraltında açılan bir boşluk (tünel) çevresinde oluşan farklı gerilme bölgeleri: Elâstik bölge (kazıdan etkilenmemiş ve doğal yapısını koruyan kaya); Koruyucu bölge (Protective Zone, Wiesmann-Trompeter Schutzzone) ve Plâstik bölge(Yıldırım ve Gökaşan, 2013)

Gerilmeler, dairesel kesitli tünellerde en etkili şekilde kayaya aktarılırken, diğer tünel tiplerinde köşe ve kenarlarda aşırı yoğunlaşarak göçüklere yol açmaktadır.



Şekil 3. 7. Dairesel kesitli (modern) tünelde, tünel açılırken oluşan sekonder (düşey ve yatay) gerilmelerin dağılımı (Yılmaz, 2007)



Şekil 3. 8. Kesitlerine göre köşeli (yamuk ve kare) ve at nalı tipli açılan eski tip tünellerde gerilmelerin aşırı yoğunlaştığı kesimler (Yıldırım ve Gökaşan, 2013)

3.5. Nümerik (Sayısal) Modelleme Yöntemleri

Nümerik modelleme yöntemleri, son yıllardaki teknolojik gelişmelerin sağladığı kolay kullanım ile diğer yöntemlere kıyasla düşük maliyet sunması nedeniyle günümüzde özellikle yeraltı madenciliği alanında önemli bir araştırma aracı haline gelmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi, iki boyutlu problemlerin çözümünde, seçilen alanı bir örgü (mesh) oluşturacak şekilde üçgen veya dörtgen elemanlara bölmeyi öngörür (Köse, 1980). Burada, bitişik elemanların köşeleri, ortak düğüm noktalarını (node) paylaşarak bağlantı kurar. Yöntemin temel prensibine göre, bir elemanın içindeki herhangi bir noktadaki yerdeğiştirme, elemanın şekline bağlı olarak düğümlerdeki yerdeğiştirme ile ifade edilir (Yazıcı ve Nasuf, 1993).

3.6. PLAXIS 2D (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis) programı

Plaxis, 1987 yılında Delfh Teknik Üniversitesi tarafından geoteknik mühendisliğindeki deformasyon ve stabilite problemlerinin sonlu elemanlar yöntemi

kullanılarak analiz edilmesi için geliştirilen bir yazılımdır. 1987 yılında Hollanda'da Delft Teknik Üniversitesi'nde kullanılmaya başlanmış ve yumuşak zeminler üzerindeki nehir dolgularının sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılarak analizi için planlanmıştır. Zamanla daha karmaşık geoteknik problemleri analiz etmek için geliştirilmiştir. Günümüzde yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020).

Geoteknik mühendisliğinde, Plaxis 2D programı özellikle deformasyon ve stabilite analizleri için tasarlanmıştır (Brinkgreve, 2002). Bu program, zemin içindeki su hareketini inceleyerek stabilite ve gerilme şekil değiştirme problemlerini ele alan, iki boyutlu sonlu elemanlar metodunu kullanan bir yazılımdır. Son yıllarda, mühendislik problemlerinin çözümünde bilgisayar programlama dilleri ve tekniklerindeki gelişmeler sayesinde nümerik modelleme yöntemlerinde kayda değer bir ilerleme kaydedilmiştir (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020).

PLAXIS 2D, geoteknik mühendisliği uygulamaları için özel olarak tasarlanmış bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Zemin-yapı etkileşiminin analizi için yaygın olarak kullanılır ve çeşitli yükleme koşulları altında zeminin davranışına ilişkin içgörüler sağlar. Yazılım, mühendislerin basit temellerden karmaşık tünel inşaatlarına kadar karmaşık geoteknik problemleri modellemelerini ve analiz etmelerini sağlar. Öncelikle zemin deformasyonu, konsolidasyon ve stabilite içeren projeler için kullanılır.

PLAXIS 2D'nin Temel Özellikleri;

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM): PLAXIS 2D, problem alanını daha küçük elemanlara ayırmak için sonlu elemanlar yöntemini kullanır. Her bir elemanın davranışı analiz edilir ve sonuçlar daha sonra genel bir çözüm sağlamak için birleştirilir. Bu yaklaşım, karmaşık zemin-yapı etkileşimlerinin son derece hassas bir şekilde modellenmesini sağlar.

Zemin Davranış Modellemesi: Yazılım, doğrusal elastik, Mohr-Coulomb, Sertleşen Zemin ve Yumuşak Zemin modelleri dahil olmak üzere çeşitli zemin modellerini destekler. Bu modeller hem doğrusal hem de doğrusal olmayan tepkileri yakalayarak farklı gerilme ve gerinim koşulları altında zemin davranışını simüle etmeye yardımcı olur (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020).

Doğrusal Olmayan Zemin-Yapı Etkileşimi: PLAXIS 2D, hem zeminin sertliğini hem de yapının tepkisini dikkate alarak zemin ve yapılar arasındaki etkileşimi modelleyebilen bir yazılımdır. Bu özellik, temellerin, istinat duvarlarının, tünellerin ve dolguların yük altındaki davranışını analiz etmek için çok önemlidir (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020).

Ayrıca PLAXIS 2D, özellikle büyük deformasyonlar veya yüksek stres koşulları altında zeminlerin karmaşık davranışını yakalamada çok önemli olan zemin plastisitesi ve gerinim sertleşmesi dahil olmak üzere gelişmiş malzeme modellerini içerir. PLAXIS 2D, özellikle önemli deformasyonlar veya yüksek stres koşulları içeren senaryolarda, zeminlerin karmaşık davranışını anlamak için çok önemli olan zemin plastisitesi ve gerinim sertleşmesini kapsayan gelişmiş malzeme modellerinin uygulanmasını kolaylaştırır (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020).

Konsolidasyon Analizi: PLAXIS 2D, konsolidasyon analizi yapmak için araçlar içerir, böylece mühendislerin yüklemeye bağlı olarak zeminin zamana bağlı oturmasını incelemelerini sağlar. Bu, yumuşak zeminler üzerindeki temelleri veya dolguları içeren projeler için özellikle önemlidir (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020).

Kazı ve Tünel Açma: Yazılım, kazı ve tünel açma süreçlerinin modellenmesi için özel özellikler sunmaktadır. Kazı işleminin çevredeki toprak ve yapılar üzerindeki etkilerinin yanı sıra tünel kaplaması ile toprak arasındaki etkileşimi simüle etmek için araçlar içerir (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020).

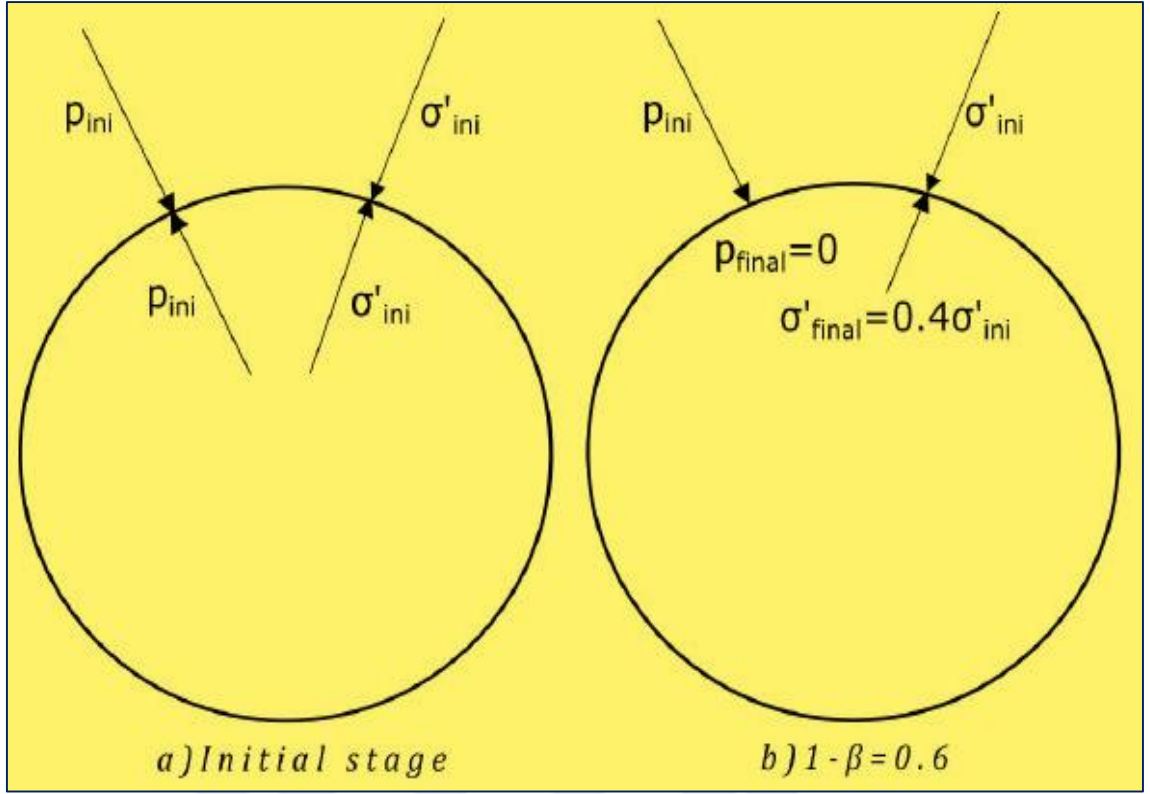
PLAXIS 2D, aşağıdakiler dahil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere çeşitli geoteknik uygulamalarda kullanılır:

- ✓ **Temel Tasarımı:** Kazıklı temeller, mat temeller ve yayılı temelleri kapsayan sığ ve derin temellerin analizinde kullanılır.
- ✓ **Şev Stabilitesi:** Farklı yükleme koşulları altında doğal ve insan yapımı şevlerin stabilitesinin değerlendirilmesi.
- ✓ **Kazı ve Tünelcilik:** Kazıların ve tünel açmanın zemin-yapı etkileşimi üzerindeki etkisi simüle edilir ve tünel destek sistemleri analiz edilir.
- ✓ **İstinat Duvarları:** İstinat duvarlarının tasarımı ve yanal toprak basınçları altında stabilitelerinin değerlendirilmesi.
- ✓ **Geoteknik Deprem Mühendisliği:** Sismik yüklemenin zemin ve yapılar üzerindeki etkilerinin modellenerek potansiyel hasar veya başarısızlığın değerlendirilmesi (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020).

Plaxis 2D programı, özellikle tünel gibi yapılar için karmaşık zemin durumlarının geoteknik analizinde önemli özelliklere sahip bir yazılımdır. Plaxis, dünya genelinde geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir analiz ve tasarım programıdır (Galavi, 2010).

Sonlu elemanlar ağı, tünel yapılarının tasarımında ve modellemesinde önemli bir araçtır. Geleneksel olarak, taşıyıcı sistemler belirli sayıda elemanın, yine belirli sayıda düğüm noktasıyla birbirine bağlı olduğu bir yapıdadır. Bu sistemde, her bir elemanın kuvvet-deformasyon özellikleri dikkate alınarak, tüm yapının statik karakteristikleri belirlenir. Bununla birlikte, sürekli bir ortamda sonsuz sayıda düğüm noktası bulunduğundan, rakamsal çözümleme oldukça karmaşık hale gelir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ise, bu karmaşık ortamı belli sayıda düğüm noktası ile birbirine bağlı birim elemanlara bölerek incelenebilir hale gelmesini sağlar. Plaxis programında, inşaat sırasında bir tünel, kazı mesafesi kısmında sınırlı bir uzunluk boyunca desteksizdir. Bu durum, 2 boyutlu bir tünel kazısında zeminin sonsuz bir uzunlukta desteksiz bırakılması anlamına gelir ve bu da üç boyutlu kemerleme etkisinin yokluğunda başarısızlığa yol açabilir. İki boyutlu modellemenin bu sınırlamasının üstesinden gelmek ve sonlu elemanlar analizi çerçevesinde üçüncü boyutun kazı üzerindeki etkilerini hesaba katmak için Yakınsama-sonlandırma yöntemi veya Beta-yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kazı yapılan ortamdaki kayaçlar kazılan boşluğa doğru hareket etmek isterler. Tüneldeki kayaçların tavan ve yanlarda desteksiz durabilmesine kemerlenme denir. Deconfinement ($1-\beta$) değeri Plaxis programında desteksiz kazılarda yani tünellerdeki ilk kazı aşamalarında kaplama yapılmadan önce oluşan zemin kemerlenme etkisini simüle etmek için kullanılır. Bu değer kazı 1'den daha az tanımlandığında dengesiz kuvvetler kısmen çözülür ve sonraki kazı aşamalarında tamamen çözülmelidir. Uygulamada, toprak kümesi devre dışı bırakılıp, deconfinement ($1-\beta$) değerinin yaratılması başlangıç geriliminin azalmasını simüle eder. Deconfinement ($1-\beta$) değeri maximum olması destek basıncının artık etki etmediği ve tüm yüklerin kaplamaya aktarıldığı anlamına gelir (Şekil 3.9).



Şekil 3. 9. Deconfinement yöntemi ile Eksik Aşamalı inşaat yönteminin şematik gösterimi (p: gözenek basınçları; σ' : efektif gerilmeler) (<https://bentleysystems.service-now.com/community>)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, Hakkari Yüksekova-Yeniköprü sahasında yapılmış olan (0+162) -(4+118) kilometreleri arasındaki yol çalışmasında NATM kullanılarak açılan tünel kazısı esnasında oluşan deformasyonları araştırmak amacıyla Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) kullanılarak kazılan bir tünel çalışmasında, zemin özellikleri sondajlar ve laboratuvar deneylerinden elde edilen parametreler Plaxis 2D programına tanıtılarak modellemeler yapılmış edilmiş ve analiz sonuçları sunulmuştur. Gerçeğe en yakın sonuçlar elde etmek amacıyla aşamalı kazı ile hesaplamaları yapılarak her bir durum için efektif gerilmeler, eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve maximum yer değiştirme grafikleri elde edilmiş değerlendirilip yorumlanmıştır. Bununla birlikte, araştırma alanında zemin birimlerine ait geoteknik parametreler kullanılarak tünel kazısı esnasında oluşan gerilmelerin dağılımları, kazı etrafındaki deformasyonlar ve kaya kütleleri ile örtüşen uygun destek sistemleri Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile araştırılmıştır. Hakkâri Yüksekova-Yeniköprü sahasında yapılmış olan Karayolu Tüneli'nde Deconfinement ($1-\beta$) değerinin bir destek elemanı olarak düşünüldüğünde, gerilmeleri ve dolayısıyla tüneldeki kemerlenme etkisini ne ölçüde azalttığı Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile araştırılmıştır.

Yapılan modellemelerde tünel üst ve alt yarı kazılarının gerçekleştirildiği inşaat aşamalarında gerilmeleri azaltmak için yük azaltma katsayısı olan ($1-\beta$) değerleri %50, %60, %70, %80, %90, %10 olarak farklı değerlerde girilmiştir. Yapılan analizler sonucunda nihai inşaat kademeleri için farklı yük azaltma katsayılarında oluşan yüzey deformasyonları değerlendirilmiştir.

4.1. Çalışma sahası yeri ve özellikleri

Tez çalışmasına konu olan tünel mevcut Hakkari iline bağlı Yüksekova ilçesini konumu itibarı ile bölgenin önemli akslarından biri olan Van-Hakkari (975-10) Devlet Yolu'na bağlamaktadır(Şekil4.1). Hakkari Yüksekova-Yeniköprü sahasında gerçekleştirilmiş olan (0+162)-(4+118) kilometreleri kapsamakta olup, Karayolları 11. Bölge Müdürlüğü sınırları içerisinde yer almaktadır. Tünel güzergahı, KM: 0+162'de

başlayıp yaklaşık $L=3950$ metre uzunluk sonrası Km: 4+118'de sonlanmaktadır. Güzergah boyunca yüksekliği 50 metreyi bulan örtü kalınlığı hakimdir. Tünel çıkışında sağ hat ile sol hattın yaklaşık maksimum 9 metre kot farkı ile kademeli yapılması planlanmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından firma denetiminde, tünelin yapım aşamaları başlamadan önce, projenin gerçekleşeceği güzergâhtaki birimler ve jeolojik özelliklerini belirlemek amacıyla gereklisondaj çalışmaları ve tünele ait sondaj kuyusundan alınan örnekler üzerinde kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için laboratuvar deneyleri yapılmıştır.



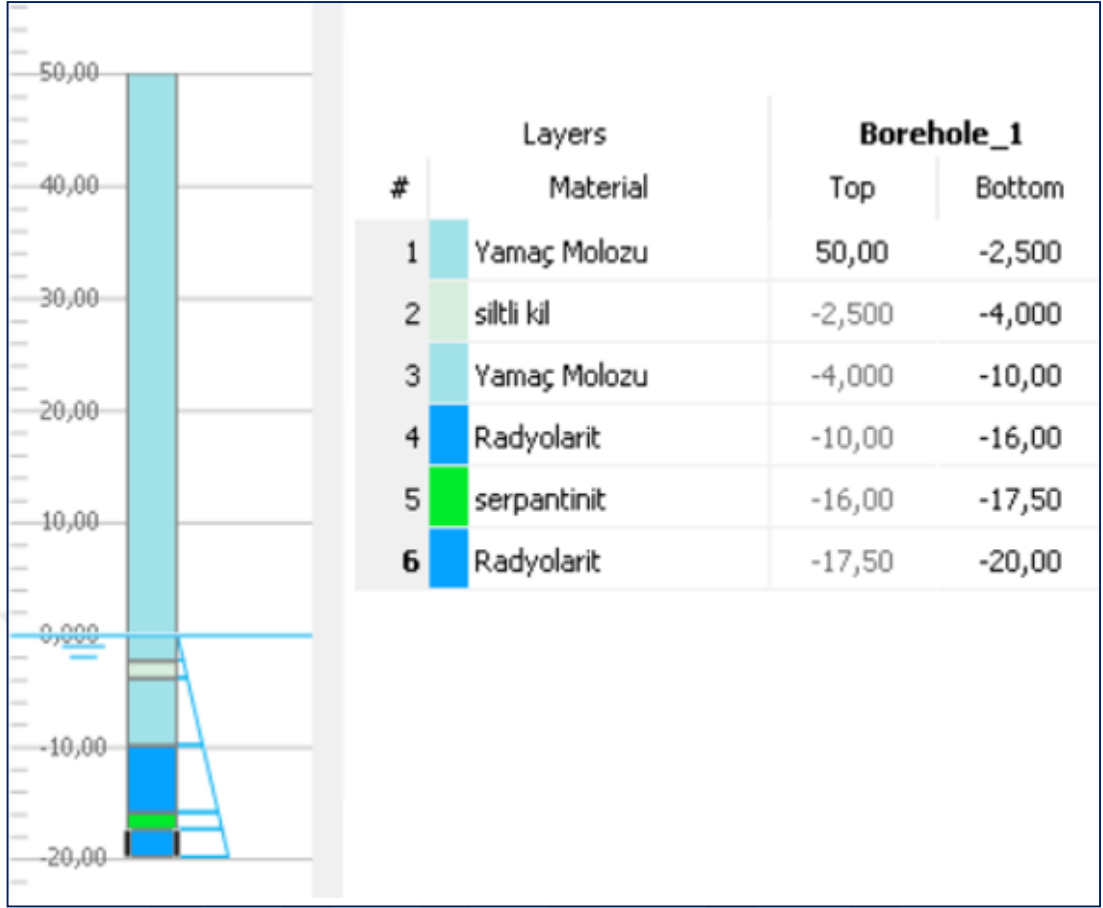
Şekil 4. 1. Çalışma sahası yer bulduru (Google earth'den düzenlenmiştir)

4.2. Çalışma Sahasındaki Karayolu Tünelinin Plaxis 2D Programı ile Modellenmesi ve Analizi

Çalışma sahasındaki karayolu tünelinin; tünel açıklık yarıçapı 2.80 m olmakla birlikte kazı aşamaları NATM yöntemiyle tamamlanmıştır. Püskürtme beton kalınlığı 35 cm olarak tasarlanmıştır. Projenin orijinal verilerinden hareketle 70 m derinliğe kadar zemin tabakaları modellenmiştir (Şekil 4.2). Plaxis programında zemin tabakalarının parametre değerleri girildikten sonra, seçilen 0 derinliğinde yapısal elemanımız olan tünelin modellenmesi yapılmıştır. Modelleme yapıldıktan sonra tünel kaplama parametreleri girilmiştir (Çizelge 4.2). Çalışma sahasında yeraltı su seviyesi 6. metrededir. Çalışmanın son aşamasında NATM yöntemiyle kazı ve kaplama aşamaları modelleri elde edilmiştir.

4.2.1. Modellerde kullanılan malzemelere ait özellikler

Çalışma sahasında, tünelin açılacağı zemin profili, yapılan incelemelerden özetlendiği üzere (Şekil 4.2) 6 tabakalı olarak modellenmiştir. Zeminin davranışını modelleyebilen mohr-coulomb modeli seçilmiştir. Zeminin birim ağırlığı, γ , içsel sürtünme açısı, ϕ , kohezyonu, c , elastisite modülü E ve poisson oranı ν , değerleri kullanılarak programa girilmiştir. Çizelge 4.1’de PLAXIS 2D programında kullanılan modellemeye ait zemin parametrelerin özellikleri ve Çizelge 4.2’de PLAXIS 2D programında kullanılan modellemeye ait tünel kaplaması parametrelerinin özellikleri verilmiştir.



Şekil 4. 2. Plaxis 2D programında zemin tabakalı modellemesi

Çizelge 4. 1. PLAXIS 2D programında kullanılan modellemeye ait zemin parametrelerinin özellikleri

Jeolojik birim	Parametreler	Değerler
Yamaç Molozu	Birim hacim ağırlığı (γ) (kN/m ³)	27
	Kohezyon (c) (kPa)	4
	İçsel sürtünme açısı(ϕ^0)	32
	Elastisite modülü (E) (kN/m ²)	410530 kN/m ²
	Poisson oranı (ν)	0.25
Siltli Kil	Birim hacim ağırlığı (γ) (kN/m ³)	20
	Kohezyon (c) (kPa)	56
	İçsel sürtünme açısı(ϕ^0)	15
	Elastisite modülü (E) (kN/m ²)	412290 kN/m ²
	Poisson oranı (ν)	0.27

Radyolarit	Birim hacim ağırlığı (γ) (kN/m ³)	25
	Kohezyon (c) (kPa)	146
	İçsel sürtünme açısı(ϕ^0)	40.29
	Elastisite modülü (E) (kN/m ²)	537590 kN/m ²
	Poisson oranı (ν)	0.30
Serpantin	Birim hacim ağırlığı (γ) (kN/m ³)	2.75
	Kohezyon (c) (kPa)	158
	İçsel sürtünme açısı(ϕ^0)	36.53
	Elastisite modülü (E) (kN/m ²)	594.230 kN/m ²
	Poisson oranı (ν)	0.30

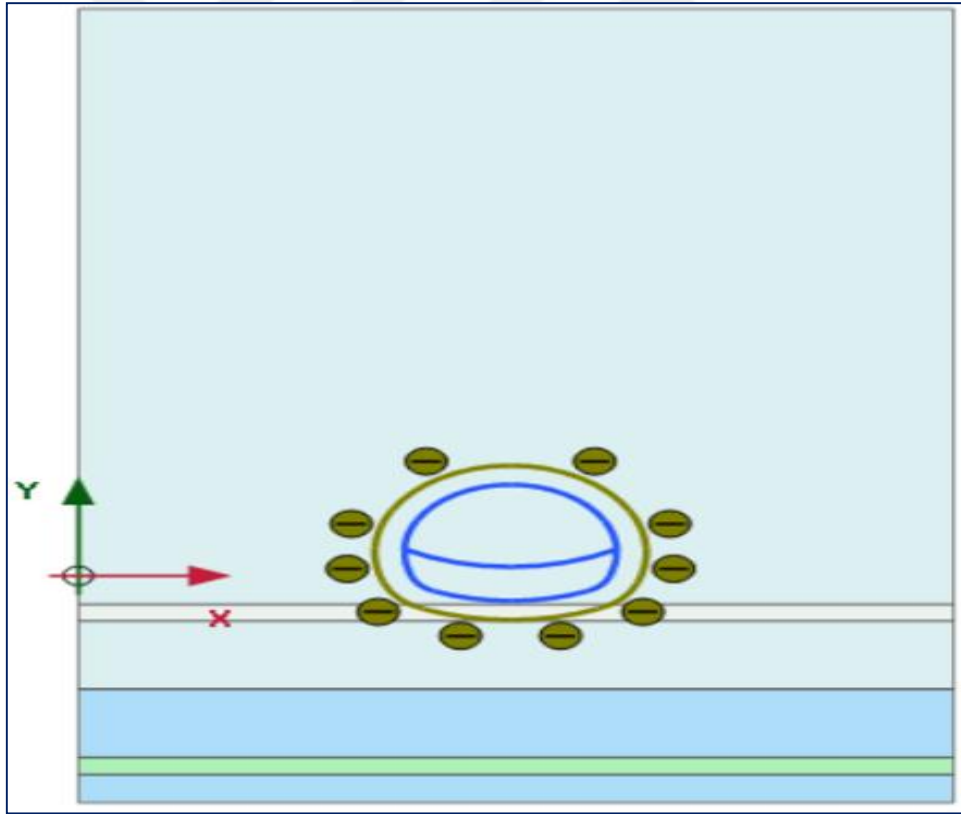
Çizelge 4. 2. PLAXIS 2D programında kullanılan modellemeye ait tünel kaplaması parametrelerinin özellikleri

Elastik Rijitliği (EA) (kN/m) EA = E(hxb)	14000000
Eğilme Rijitliği (EI) (kNm ² /m) EI = E x h ³ xb/12	143000
Kalınlık (d) (m)	0.35
Ağırlık (w) (kN/m/m)	8,5
Poisson oranı (ν)	0.14

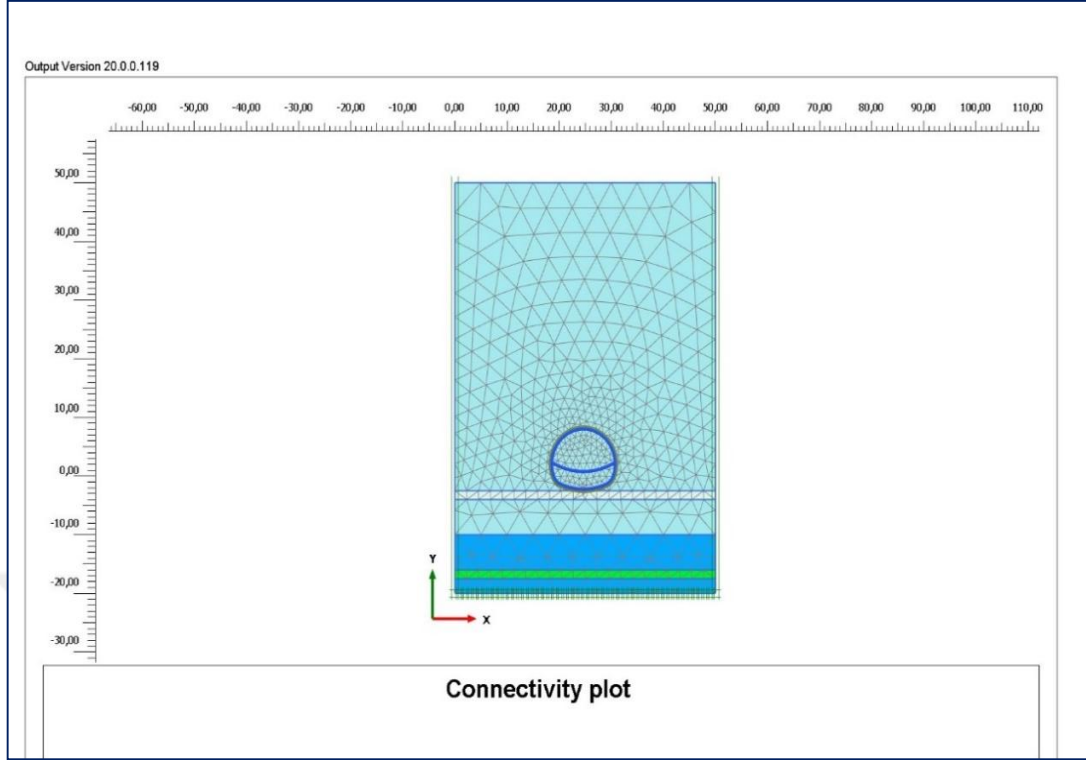
Tünel kazı alanı ve zemin özellikleri göz önüne alınarak; küçük geometrili tünellerin üst yarı ve alt yarı olmak üzere iki aşamalı, daha büyük geometrili tünellerin ise sol üst yarı, sağ üst yarı ve alt yarı olmak üzere üç aşamalı olarak kazılması planlanmıştır. Plaxis programında geometri modeli oluşturulduktan sonra zemin ve tünel modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Geometrik alan değerleri girilmiş, zemin ve tünel modeli oluşturulmuş sisteme ait örnek modeli Şekil4.3’de verilmiştir. Tünel modelinde kullanılacak olan beton elemanları Plaxis programındaki özel plak elemanları olarak modellenir. Püskürtme betonu, zemin modeli tanımlaması gibi “Material Sets” bölümünden plak eleman seçilerek yapılır. Plak eleman tanımlaması yapılırken sisteme;

eğilme rijitliği (EI) ve eksenel rijitlik (EA), Poisson oranı (ν) ve plak ağırlığı (w) değerleri girilmiştir.

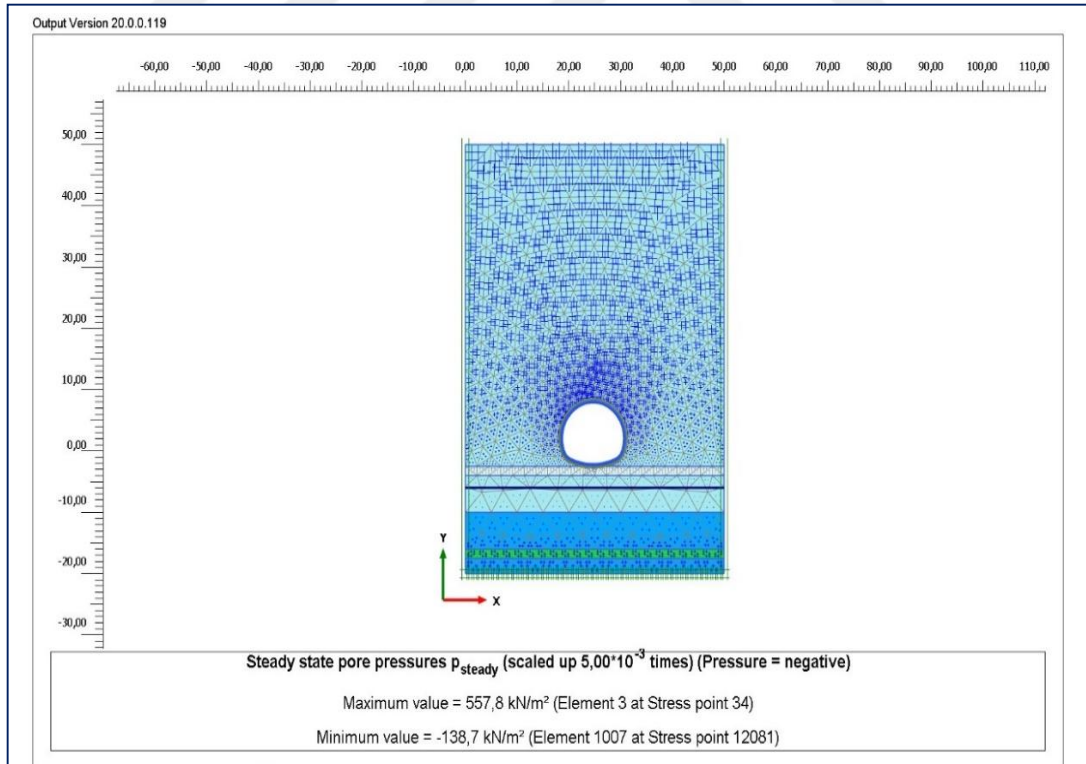
Plaxis programında analiz öncesinde ağ oluşturma safhasında, öge dağıtım parametresi için varsayılan “medium” seçeneği ile ağ oluşturulmuştur. Şekil 4.4’te 17 metre derinlik için örnek bir deforme olmuş ağ ekran görüntüsü gösterilmiştir. Şekil 4.5’de görüldüğü üzere yapılan analizlerde, boşluk suyu basıncı maximum 557.8 kN/m^2 , minimum $-138,7 \text{ kN/m}^2$ değeri olmakla birlikte, yeraltı suyu seviyesinden başlayarak tünel etrafında doğrusal olarak artmaktadır. Tünelin kemer kısmından kilit taşına doğru boşluk suyu basıncı artmaktadır ve maximum boşluk suyu basıncı değeri tünelin kilit taşı kısmında olduğu görülmektedir. Tünel kazılmaya başlandıktan sonra oluşan kazı boşluğundan dolayı kayaçlardaki boşluk suyu basıncı gibi doğal gerilmelerin şiddeti değişerek yeni gerilmelere sebep olmakta ve tünel içerisinde kaya patlaması, kapak atmaları gibi istenmeyen olaylara neden olabilmektedir.



Şekil 4. 3. Tünelin geometrik modellemesi



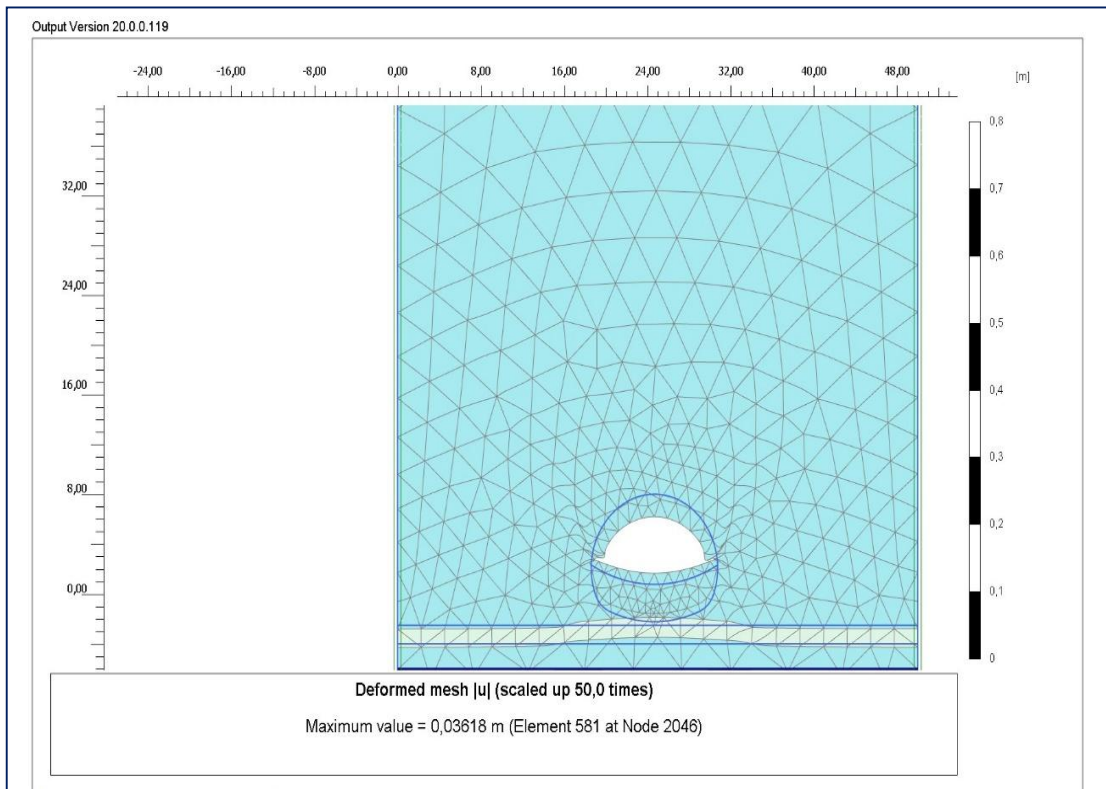
Şekil 4. 4. Tünel inşaatı için oluşturulan ağ



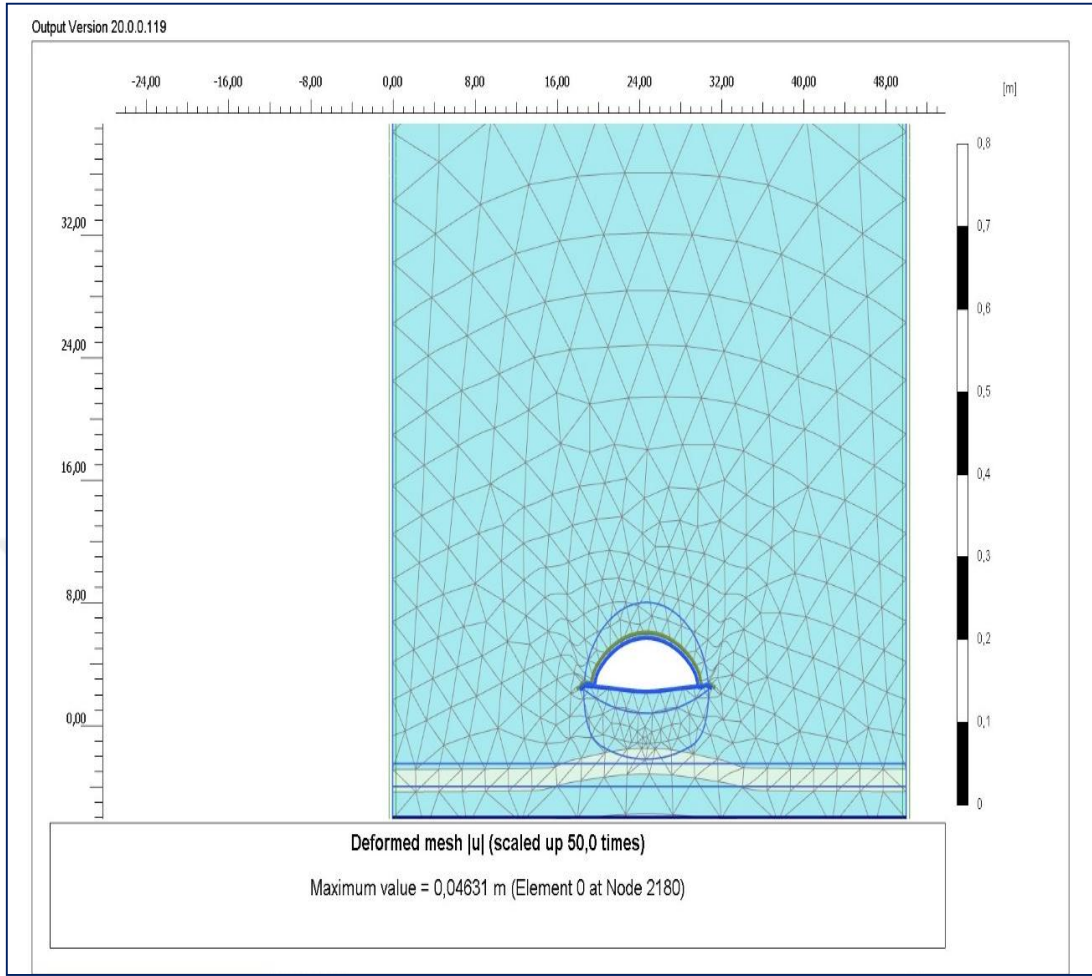
Şekil 4. 5. Zeminde meydana gelen boşluk suyu basıncı

4.2.2.1. Birinci kazı aşamasındaki tünel deformasyonlarının analizi

Tünelin kazı ve kaplama safhasını modelleyebilmek için aşamalı bir inşaat hesaplamasına ihtiyaç duyulur. Bu nedenle hesaplama evrelerini tanımlayabilmek için programın ilgili kısmından 4 aşamalı bir şekilde inşaat safhaları tanımlaması yapılmıştır. Birinci aşamada tünel kaplaması devre dışı bırakılmış ve üst yarma kısmı deaktif edilmiştir. Böylelikle sadece bir tünel kazısı haline getirilmiştir. İkinci aşamada üst yarı kazısını çevreleyen tünel kaplaması aktif hale getirilir. nc aşamada son kazı aşaması olan alt yarma deaktif hale getirilmiştir. Dördüncü aşamada ise alt yarma kazısını çevreleyen kaplama aktif hale getirilmiştir. Tüm bunların ardından programın hesap ve analiz kısmına geçilmiştir. Kazı ve kaplamaların ardından zeminde ve tünel kaplamasında meydana gelen deformasyonlar, kesme kuvvetleri, eksenel kuvvetler ve eēilme momentleri 4 farklı aşama içinde analiz edilmiş ve modellenmiştir. şekil 4.6'da grldē üzere, birinci kazı aşamasında, referans deēerlere göre deformasyon deēeri 0.03618 m olarak hesaplanmıştır. Birinci kazı sonrası yapılan kaplama aşamasında (şekil 4.7) meydana gelen deformasyon deēeri ise 0.04631 m olarak belirlenmiştir.



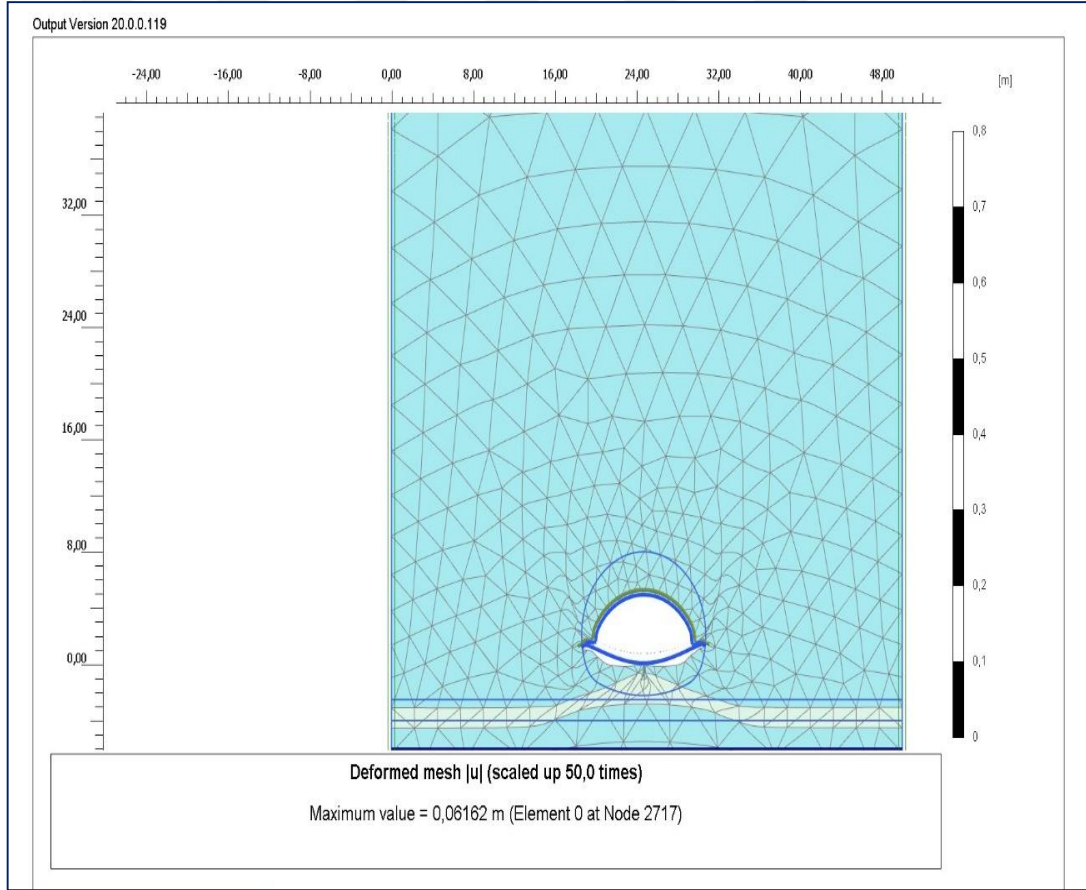
şekil 4. 6. İlk kazı aşamasında meydana gelen deformasyonlar



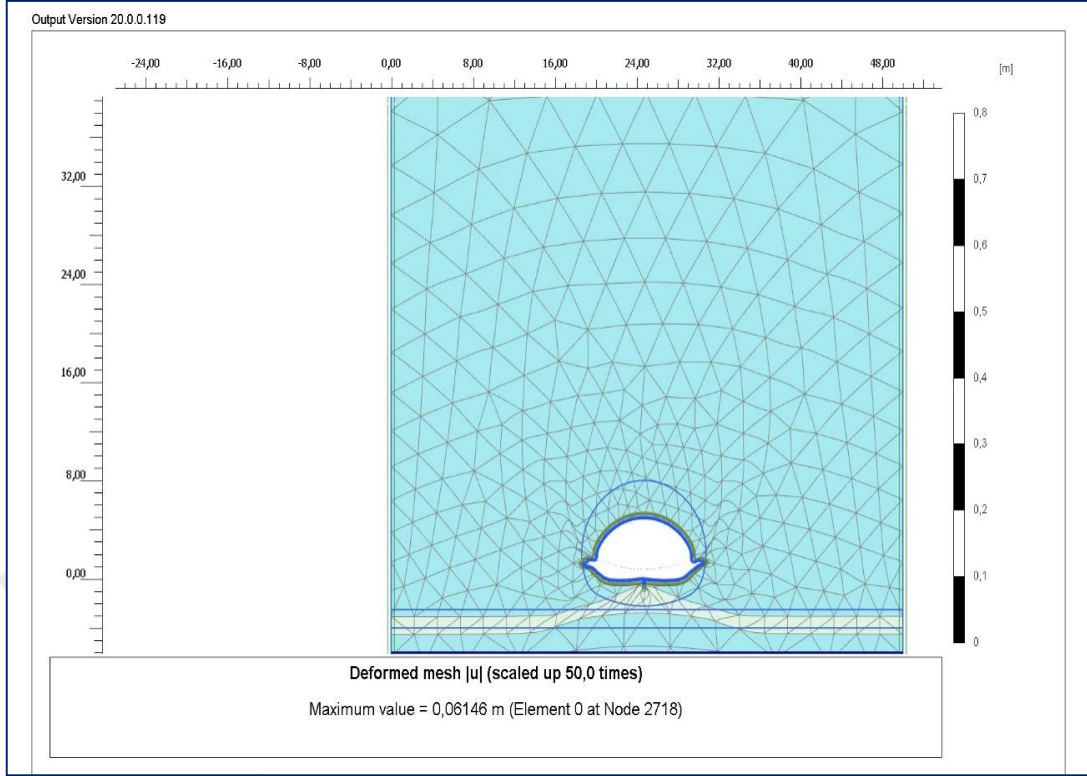
Şekil 4. 7. İlk kazı sonrası yapılan kaplama aşamasında meydana gelen deformasyonlar

4.2.2.2. İkinci kazı aşamasındaki tünel deformasyonlarının analizi

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, ikinci kazı aşamasında, referans değerlere göre deformasyon değeri 0.06162 m olarak hesaplanmıştır. İkinci kazı sonrası yapılan kaplama aşamasında (Şekil 4.9) meydana gelen deformasyon değeri 0.06146 m olarak belirlenmiştir. Kazı yapılan alan büyüklüğüyle meydana gelen deformasyon şiddetleri doğru orantılıdır. Tünel içi deformasyonlarında tünel alt yarı kazıları sırasında kısa sürede ciddi bir artış meydana gelmiştir. Oluşan bu deformasyon değerlerinin büyük bir bölümü tünelin en kritik yeri olarak üst ve alt yarı birleşim noktalarında görülmüştür. Yamaç molozu içerisinde meydana gelen deformasyon durumları killi, kumlu ve siltli zeminlerde karşılaşılması durumunda şiddetlerini artarak ciddi sorunlara yol açabilmektedir.

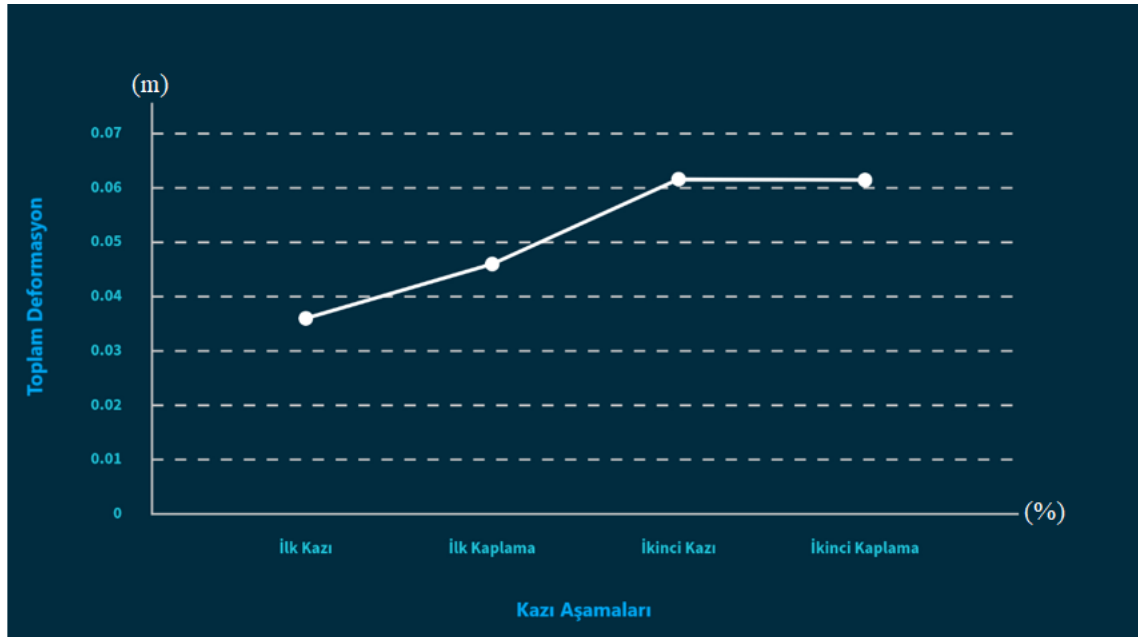


Şekil 4. 8. İkinci kazı sonrası meydana gelen deformasyonlar



Şekil 4. 9. İkinci kazı sonrası kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlar

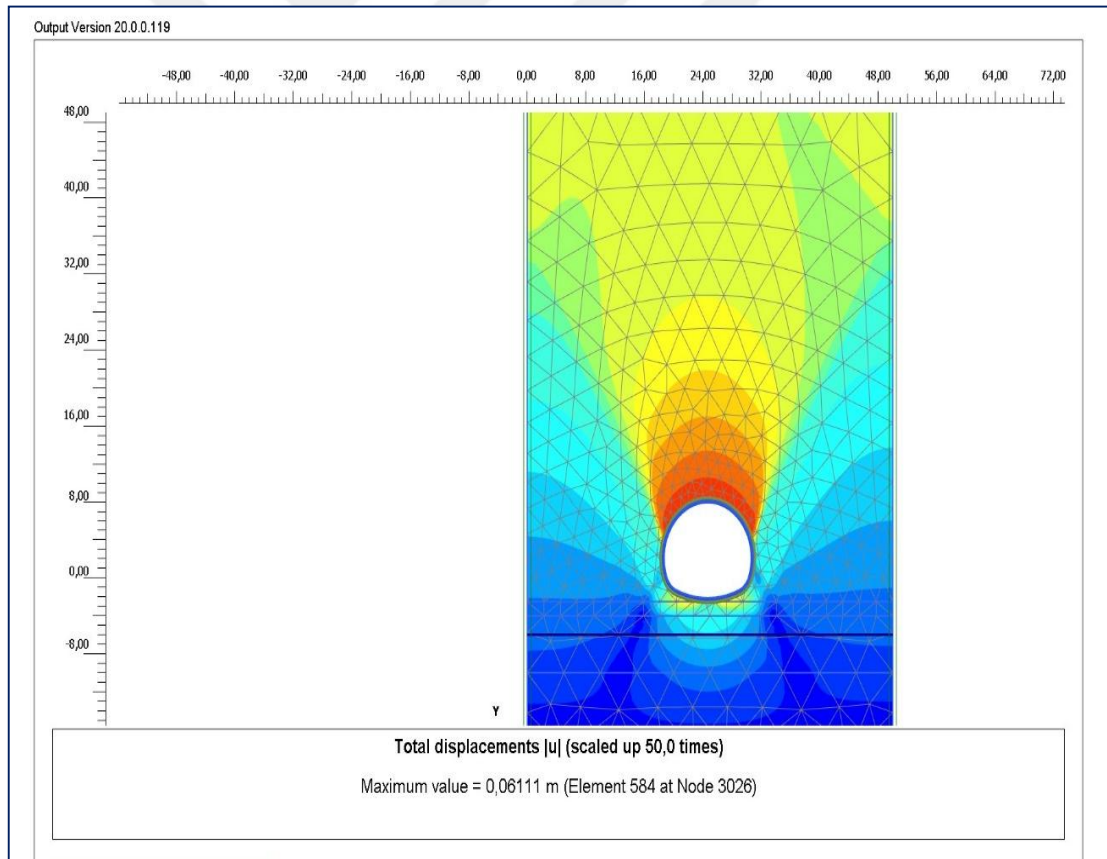
Şekil 4.10'de kazı kaplama aşamalarında meydana gelen deformasyonların grafiği gösterilmiştir. İlk kaplama sonrası kazı aşamasında deformasyon değeri yaklaşık 1.7 oranında artmıştır.



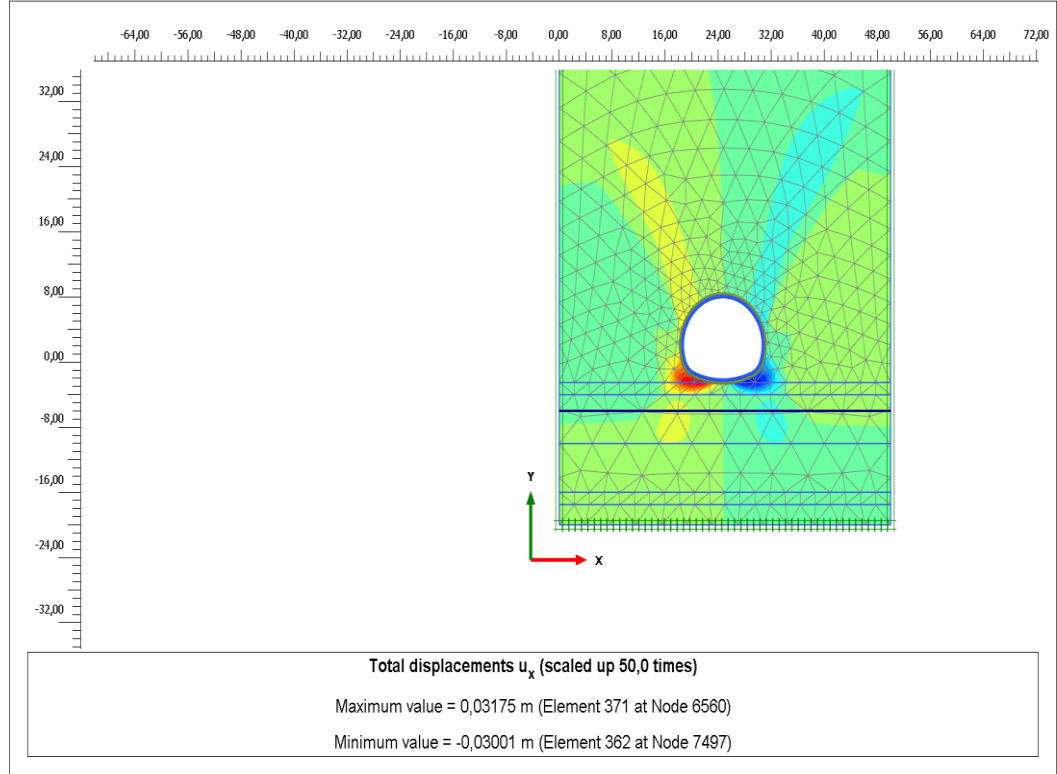
Şekil 4. 10. Kazı aşamaları ile toplam deformasyon ilişkisi grafiği

4.2.2.3. Tünel inşaatındaki Plaxis 2D programı ile yapılan analizlerde elde edilen modeller

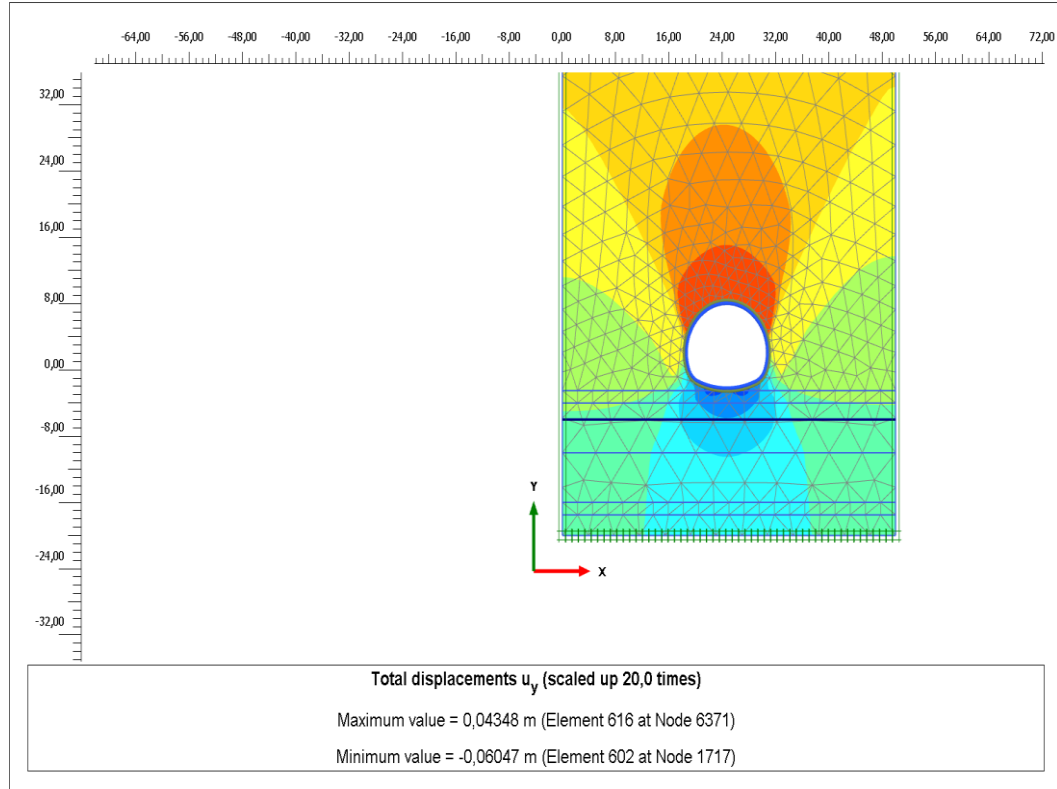
Çalışma sahasındaki tünel inşasında PLAXIS 2D programı kullanılarak yapılan analizlerde; toplam yerdeğiştirme değeri 0.06111 m, olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.11). Tünel inşasında maksimum efektif gerilme değeri 1.757 kN/m^2 , minimum efektif gerilme değeri ise 1972 kN/m^2 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.14). Zeminde meydana gelen efektif gerilmelerin tünelin alt ve üst yarı birleşim bölgesinde artış gösterdiği görülmüştür. Yerdeğiştirme değerlerinin ise zeminin yerçekiminden kaynaklı tünel boşluğuna doğru hareketinden kaynaklı olarak tünelin kemer kısmında artış gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.12). Maksimum yatay yerdeğiştirme değerinin tünelin ayak kısımlarında, maksimum dikey yerdeğiştirme değerinin ise tünelin anahtar taşı kısmında olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.13, Şekil 4.14).



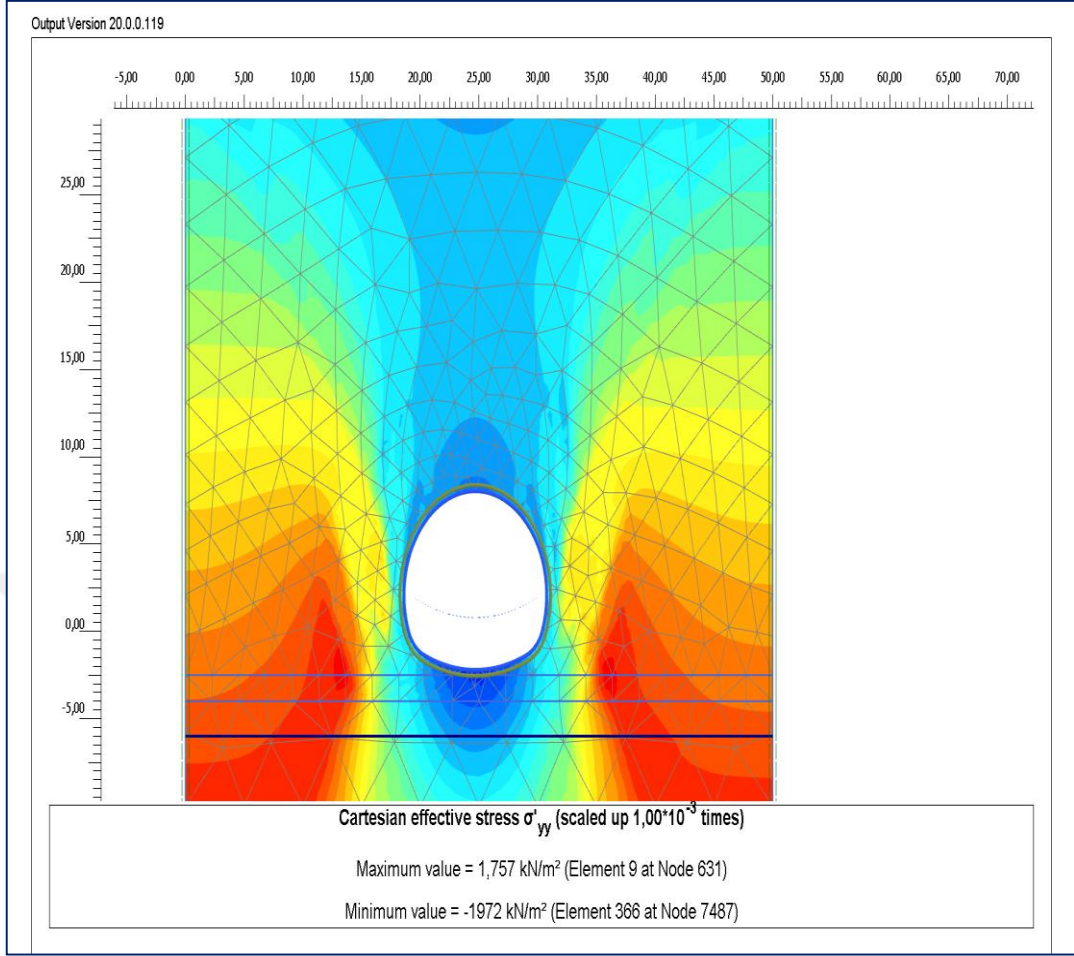
Şekil 4. 11. Tünel inşaatında meydana gelen toplam yerdeğiştirme



Şekil 4. 122. Tünel inşasında meydana gelen x yörüngesindeki toplam yerdeğiştirme

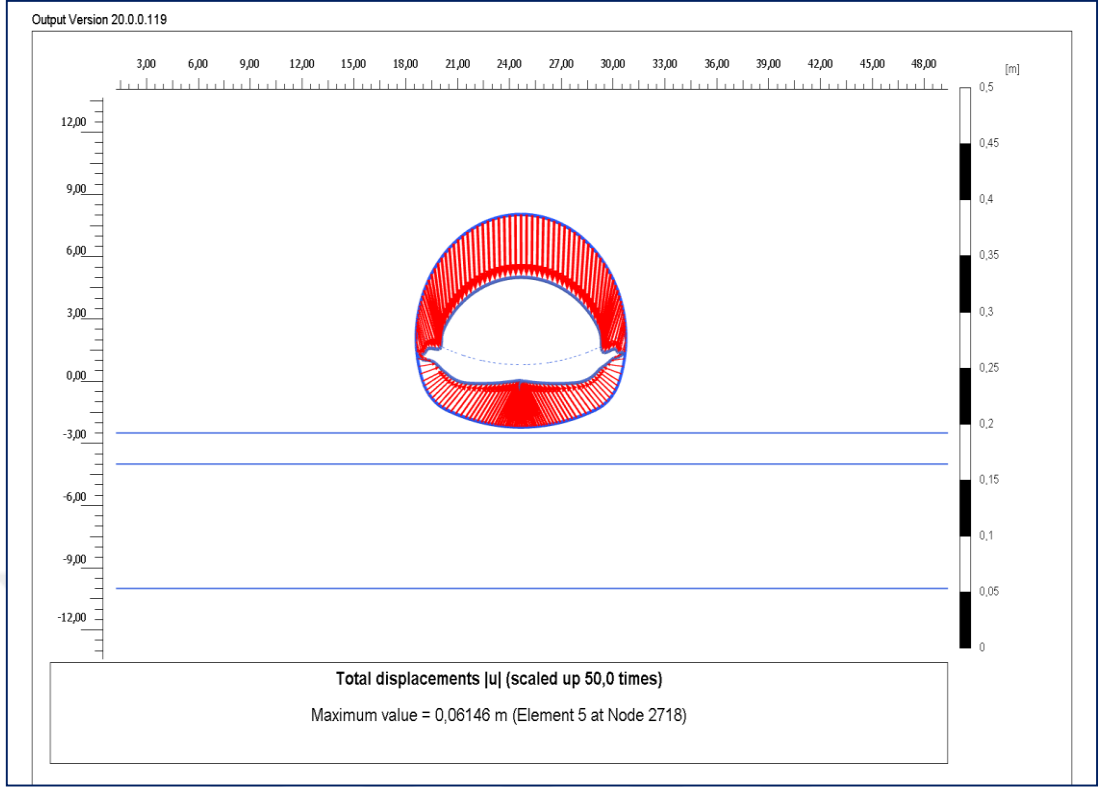


Şekil 4. 133. Tünel inşasında meydana gelen y yörüngesindeki toplam yerdeğiştirme

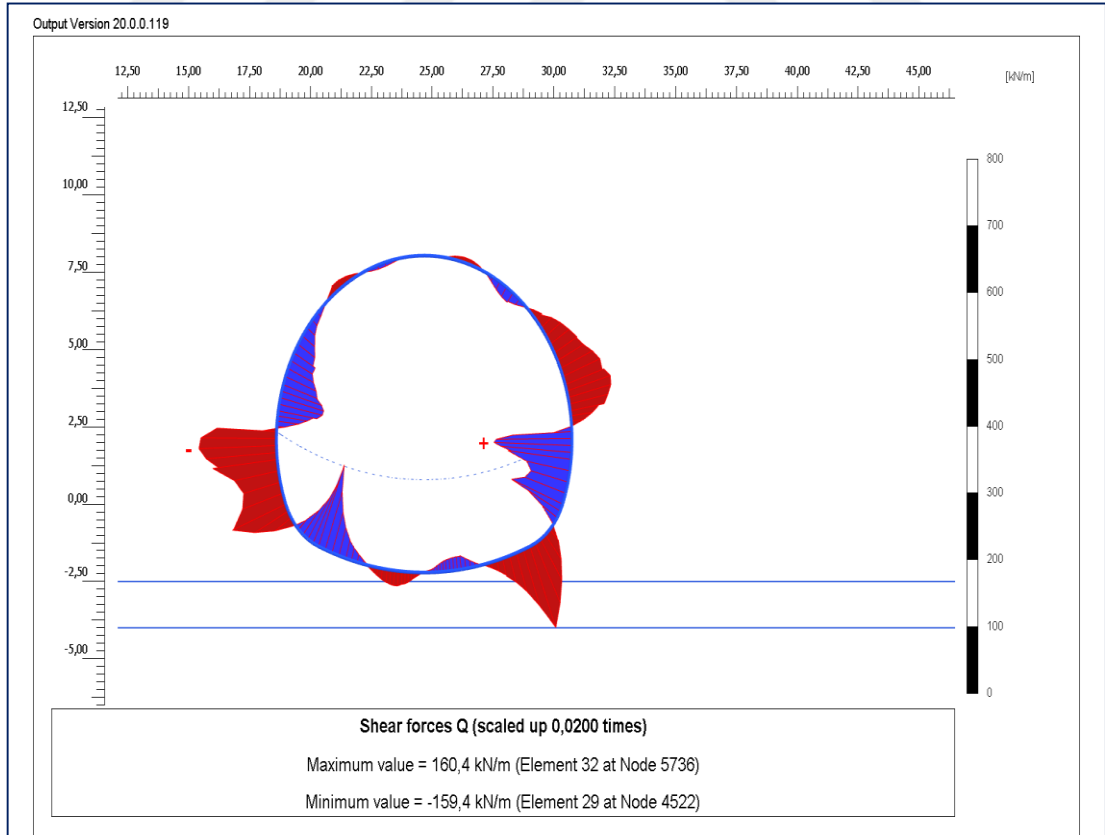


Şekil 4. 144. Zeminde meydana gelen efektif gerilmeler

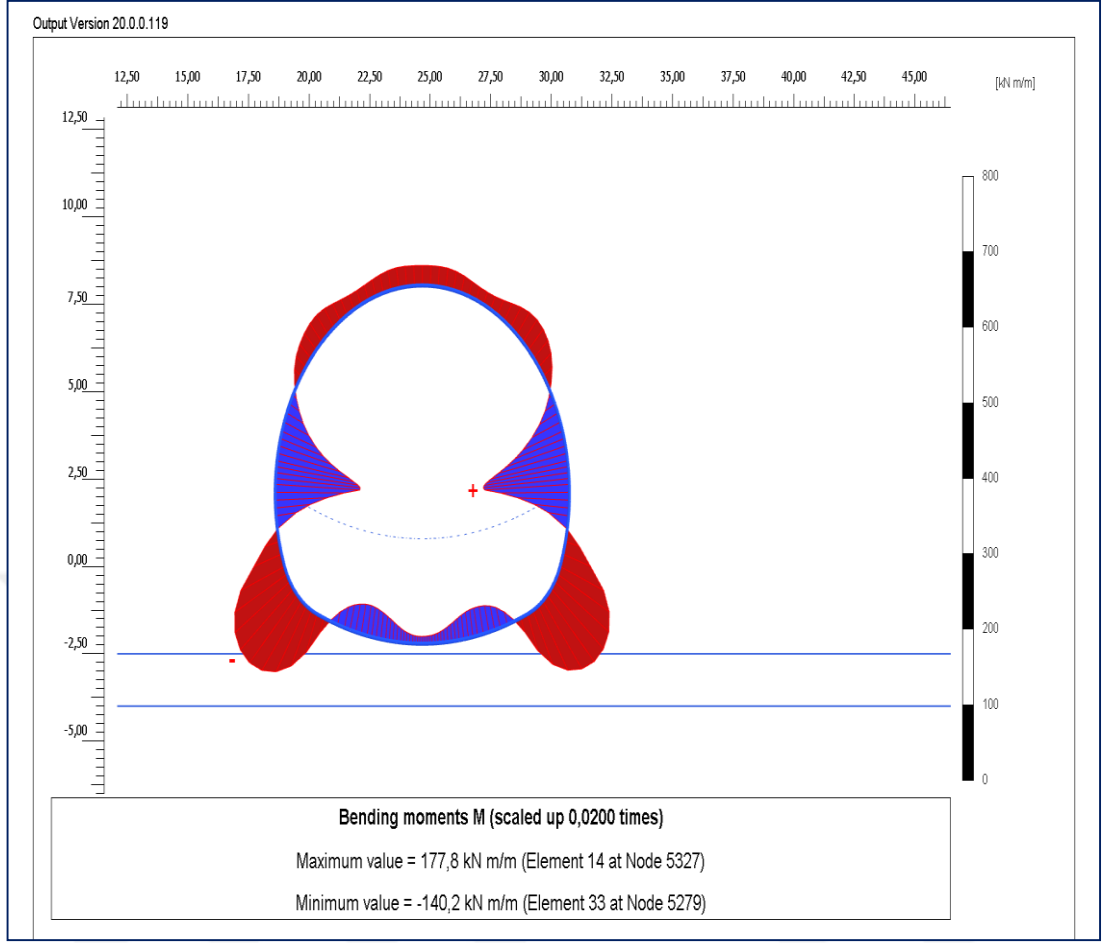
Çalışma sahasındaki tünel inşaatındaki tünel kaplaması için PLAXIS 2D programı kullanılarak yapılan analizlerde; toplam yerdeğiştirme değeri 0.06146 m olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.15). Tünel inşaatında tünel kaplaması için yapılan analizlerde; meydana gelen maksimum kesme kuvveti değeri 160.4 kN/m, minimum kesme kuvveti değeri ise -159.4 kN/m olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.16). Kesme kuvveti değerinin tünellerin sağ ve sol kısımlarında daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Tünel inşaatında tünel kaplaması için yapılan analizlerde; meydana gelen maksimum burulma momenti değeri 177.8 kNm/m, minimum burulma momenti değeri ise -140.2 kNm/m olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.17). Dolayısıyla tünelde burulma ve kesme momentinin etkisiyle çatlaklar oluşabileceği söylenebilir.



Şekil 4. 155. Tünel kaplamasında meydana gelen toplam yer değiştirme



Şekil 4. 166. Tünel kaplamasında meydana gelen kesme kuvveti



Şekil 4. 177. Tünel kaplamasında meydana gelen burulma momenti

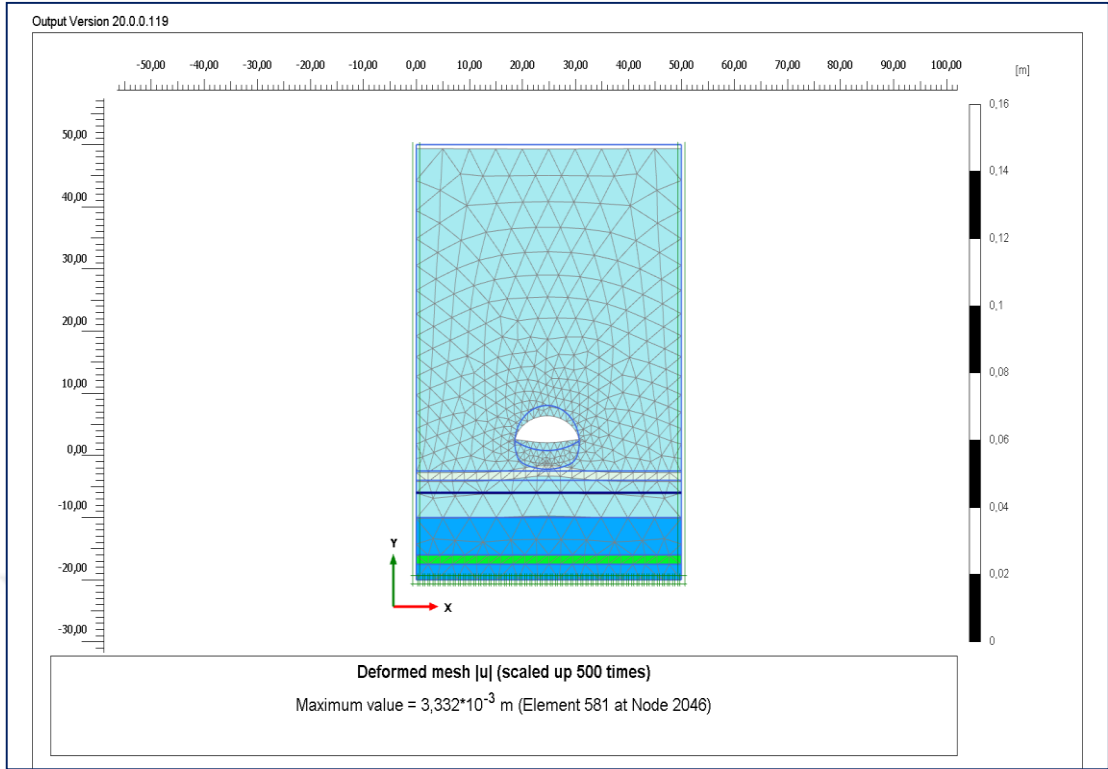
4.2.2.4. Tünel inşaatındaki Plaxis 2D programı ile yapılan analizlerde elde edilen modeller

Tünel inşaatı öncesi, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile çalışan programlar ile analizler yapılabilmektedir. En doğru gerilim ve deformasyon değerleri 3 boyutlu modellerde ortaya çıkmaktadır ancak üç boyutlu modellemelerin çok fazla parametre içermesi zaman ve maliyeti arttırmışından dolayı 2 boyutlu programlar tercih edilmektedir. 2 boyutlu programlarda hesaplanan değerlerin doğruluğunu arttırmak için 3 boyut etkisi katan Deconfinement yani yük azaltma yöntemi gibi yöntemler kullanılmaktadır. NATM kullanılarak açılacak tünellerin iki boyutlu olarak modellenmesi sonucu deformasyonların tahmin edilmesine yönelik Panet ve Guenot (1982) tarafından yük azaltma yöntemi önerilmiştir. Deconfinement ($1-\beta$) değeri Plaxis gibi sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan programlarda desteksiz kazılarda yani tünellerdeki ilk kazı

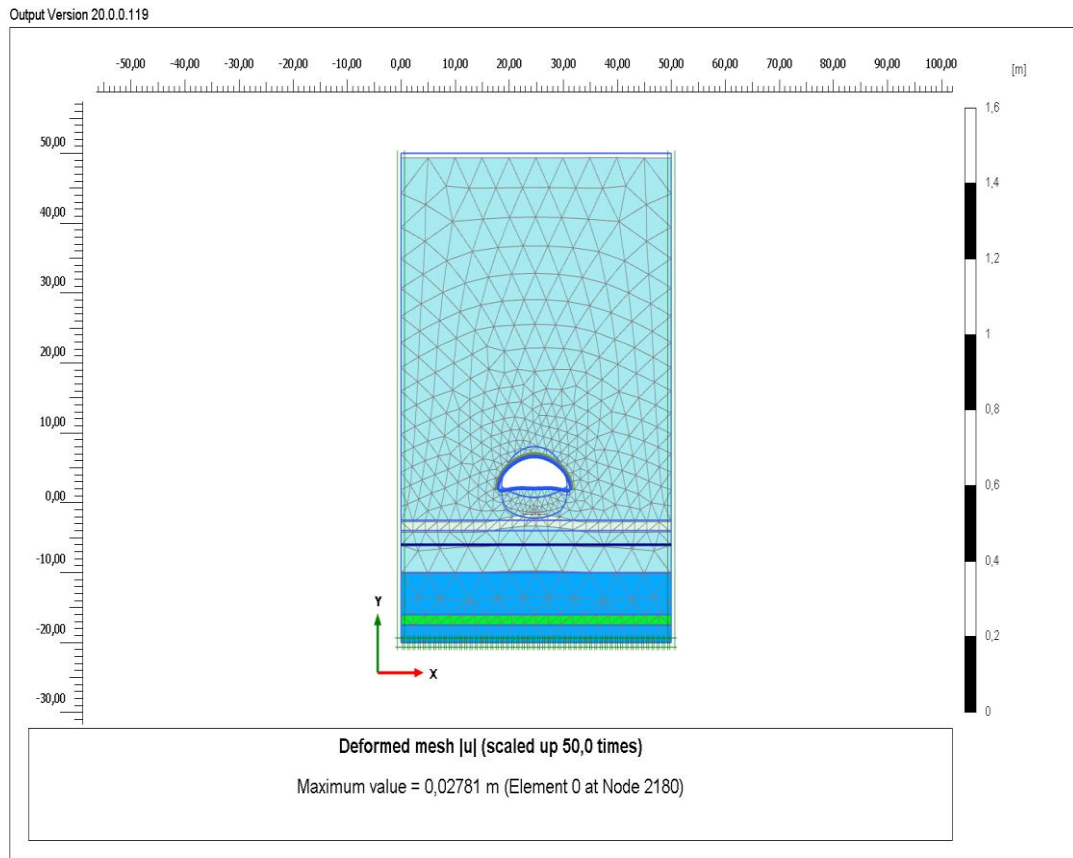
aşamalarında kaplama yapılmadan önce oluşan zemin kemerlenme etkisini simüle etmek için kullanılır. Bahsedilen β parametresi tünel kazısı sonrası gerilme değerlerinin tünel kazısı ile kaplama yapılması arasında geçen sürede gevşeme yüzdesini ifade etmektedir. Uygulamada NATM kullanılırken kazıdan sonra kayanın gevşeyip gerilmelerin dağılması için bir süre beklenilmektedir. Böylelikle kazı çevresinde uygulanan kaplamalara etki eden yük azaltılmış olmaktadır. Bu değer kazı 1'den daha az tanımlandığında dengesiz kuvvetler kısmen gevşer ve sonraki kazı aşamalarında tamamen çözülür. Çalışma sahasında yapılan modellemelerde tünel üst ve alt yarı kazılarının gerçekleştirildiği inşaat aşamalarında gerilmeleri azaltmak için yük azaltma katsayısı ($1-\beta$) değerleri %50, %60, %70, %80, %90, %10 olarak girilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, nihai inşaat kademeleri için farklı yük azaltma katsayılarında oluşan yüzey deformasyonları değerlendirilmiştir. Yapılan analizler ile elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

4.2.2.4.1. Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.10 için yapılan analizler

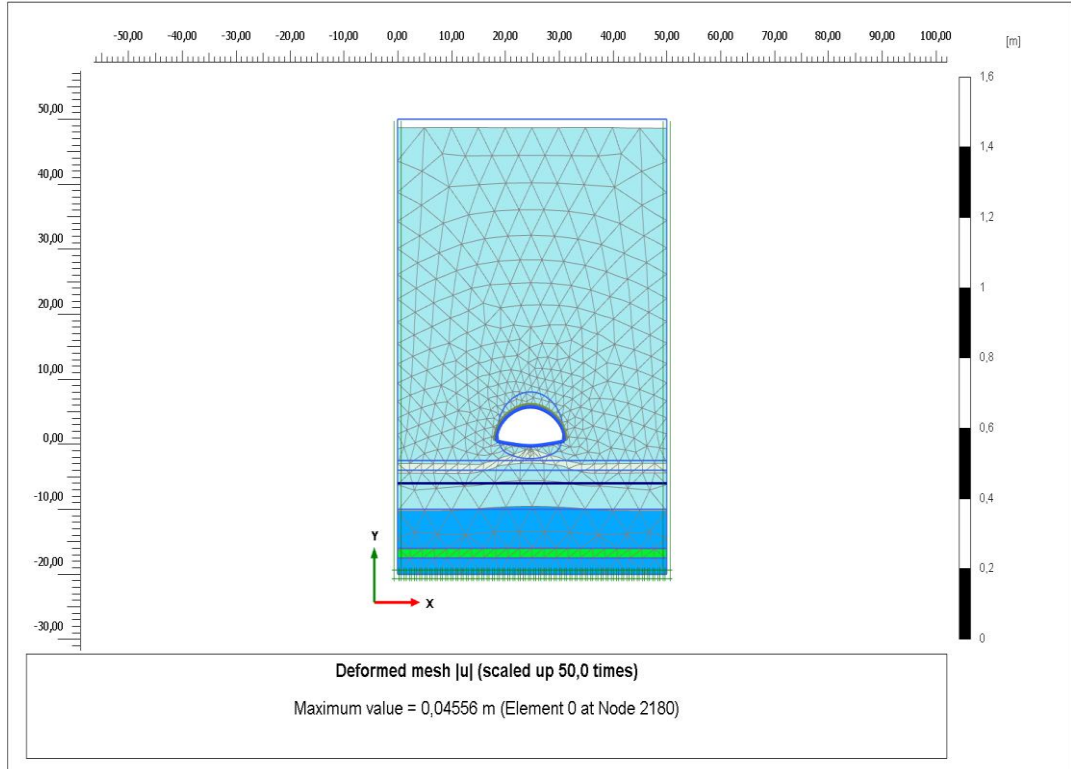
Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.10 girildiğinde çalışma sahasındaki tünel inşaatındaki kazı aşamaları için yapılan analizlerde; ilk kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme (Şekil 4.18) değeri $3.332 \times 10^{-3} \text{m}$, ilk kaplama aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 0.02781m (Şekil 4.19), ikinci kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 0.04556m (Şekil 4.20), kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlarda ise toplam yerdeğiştirme değeri 0.04504m olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.21). Girilen 0.10 değeri kaplama yapılana kadar geçen süre içerisindeki kazı kaynaklı ikincil gerilmelerin %10 oranında azaldığı ve geri kalan %90'lık kısmın tünel kaplaması tarafından karşılandığı belirlenmiştir.



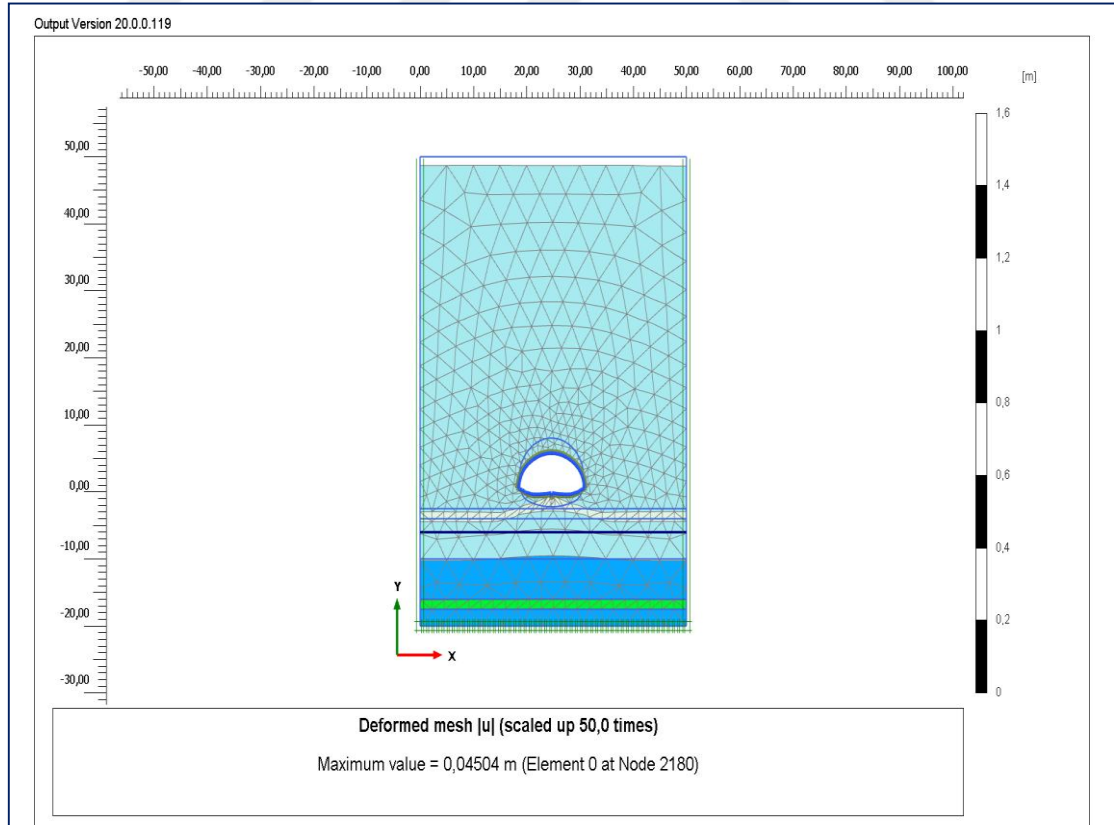
Şekil 4. 18. İlk kazı aşaması



Şekil 4. 18. İlk kaplama aşaması



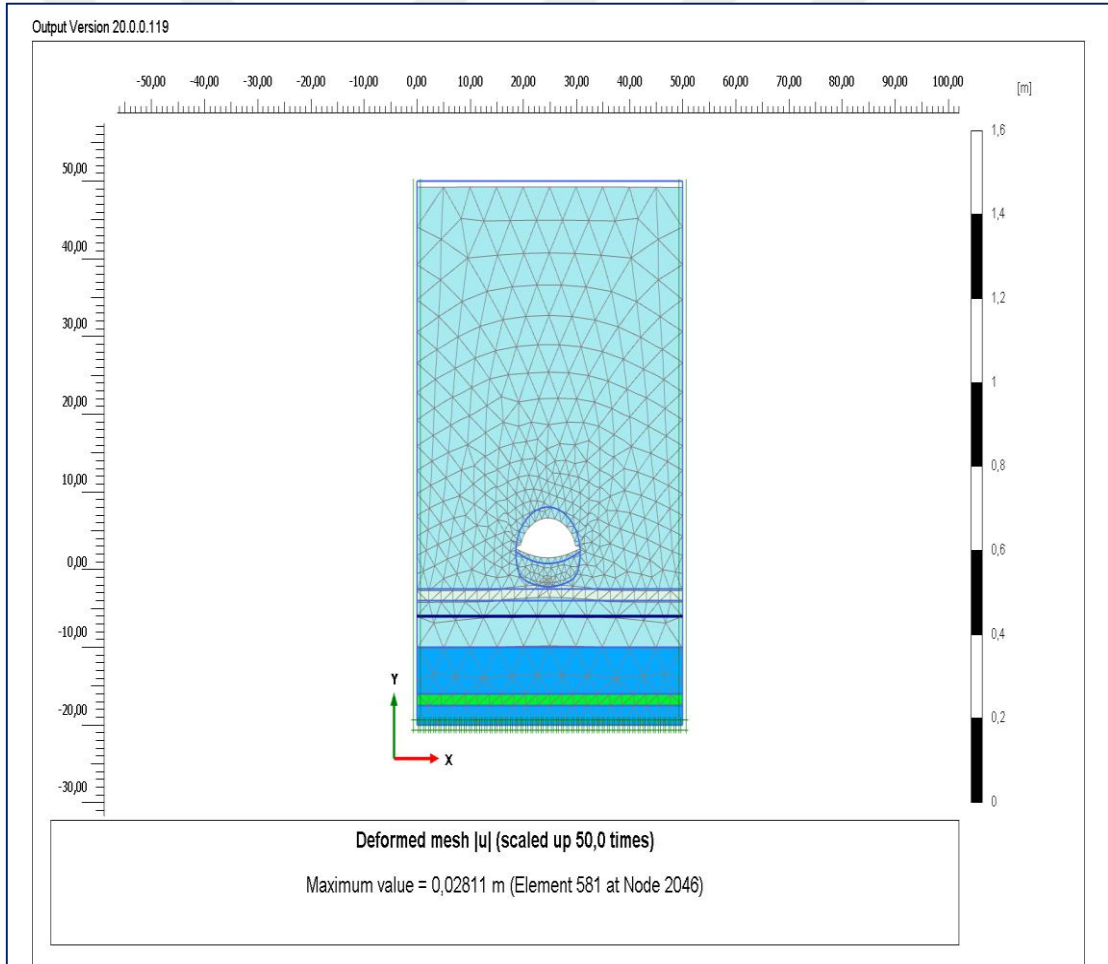
Şekil 4. 19. İkinci kazı aşaması



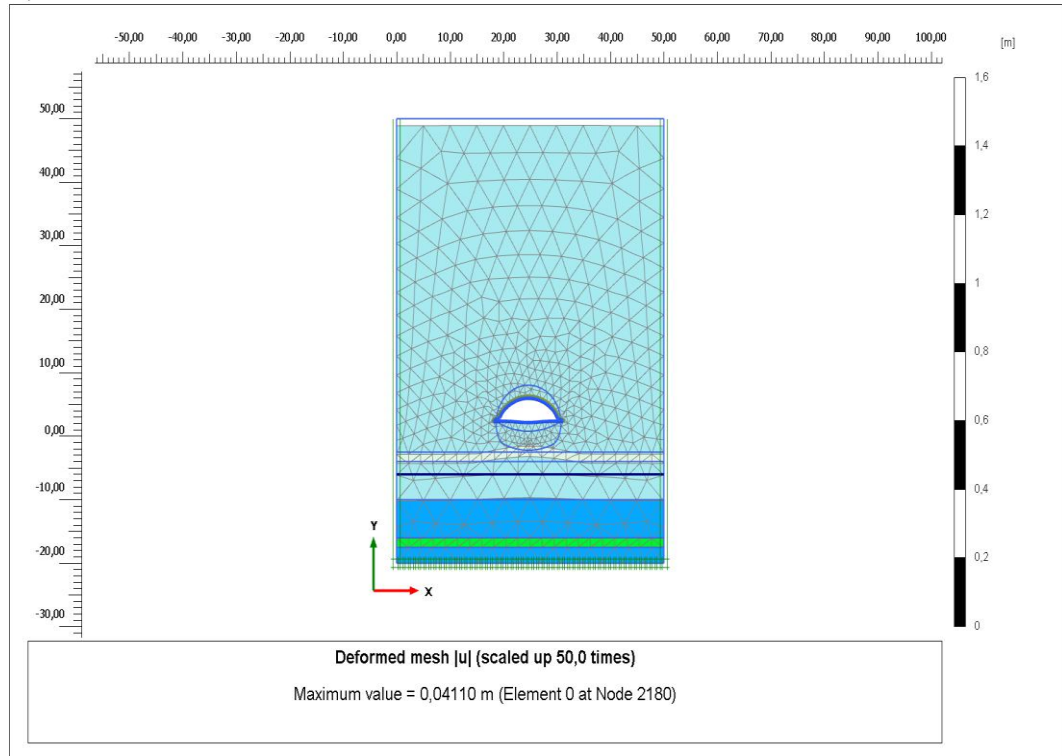
Şekil 4. 20. Kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlar

4.2.2.4.2. Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.50 için yapılan analizler

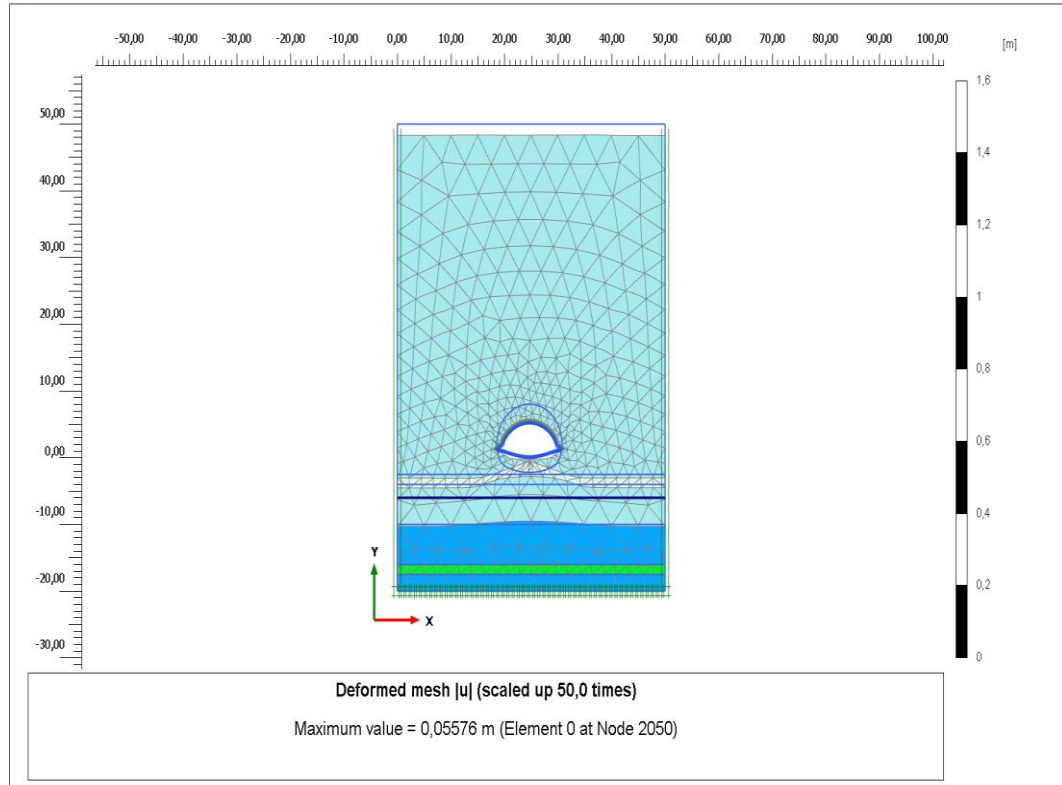
Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.50 girildiğinde çalışma sahasındaki tünel inşaatındaki kazı aşamaları için yapılan analizlerde; ilk kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme (Şekil 4.22) değeri 0.02811m , ilk kaplama aşamasında meydana gelen toplam yer değıştirme değeri 0.04110m (Şekil 4.23), ikinci kazı aşamasında meydana gelen toplam yer değıştirme değeri 0.05576m (Şekil 4.24), kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlarda ise toplam yerdeğiştirme değeri 0.05521m olarak hesaplanmıştır(Şekil 4.25). Girilen 0.50 değeri kaplama yapılana kadar geçen süre içindeki kazı kaynaklı ikincil gerilmelerin %50 oranında azaldığı ve geri kalan %50'lik kısmın tünel kaplaması tarafından karşılandığı tespit edilmiştir.



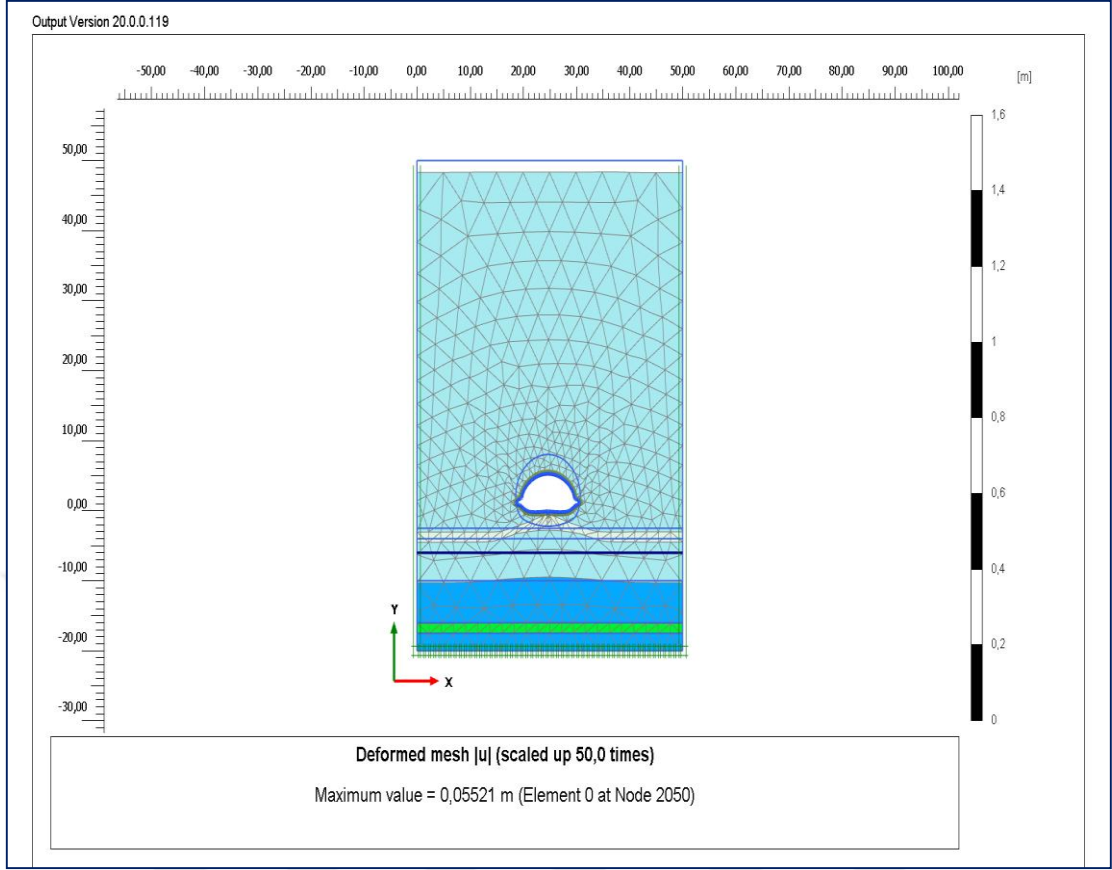
Şekil 4. 21. İlk kazı aşaması



Şekil 4. 22. İlk kazı aşaması



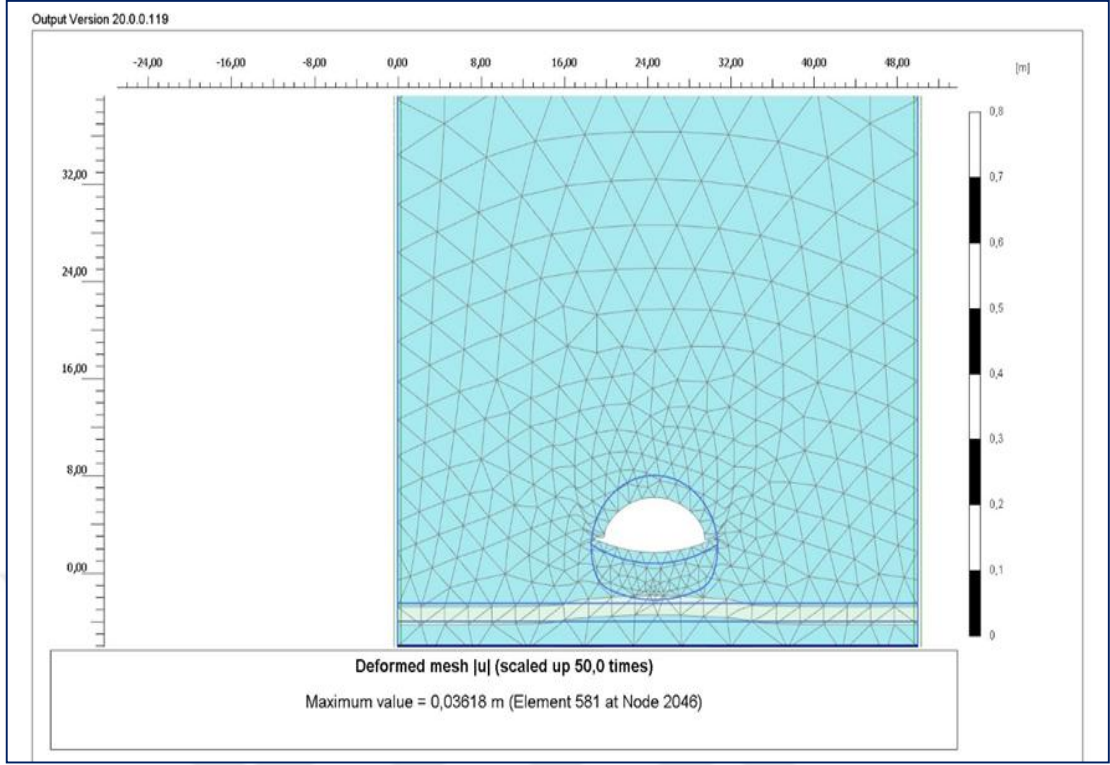
Şekil 4. 23. İkinci kazı aşaması



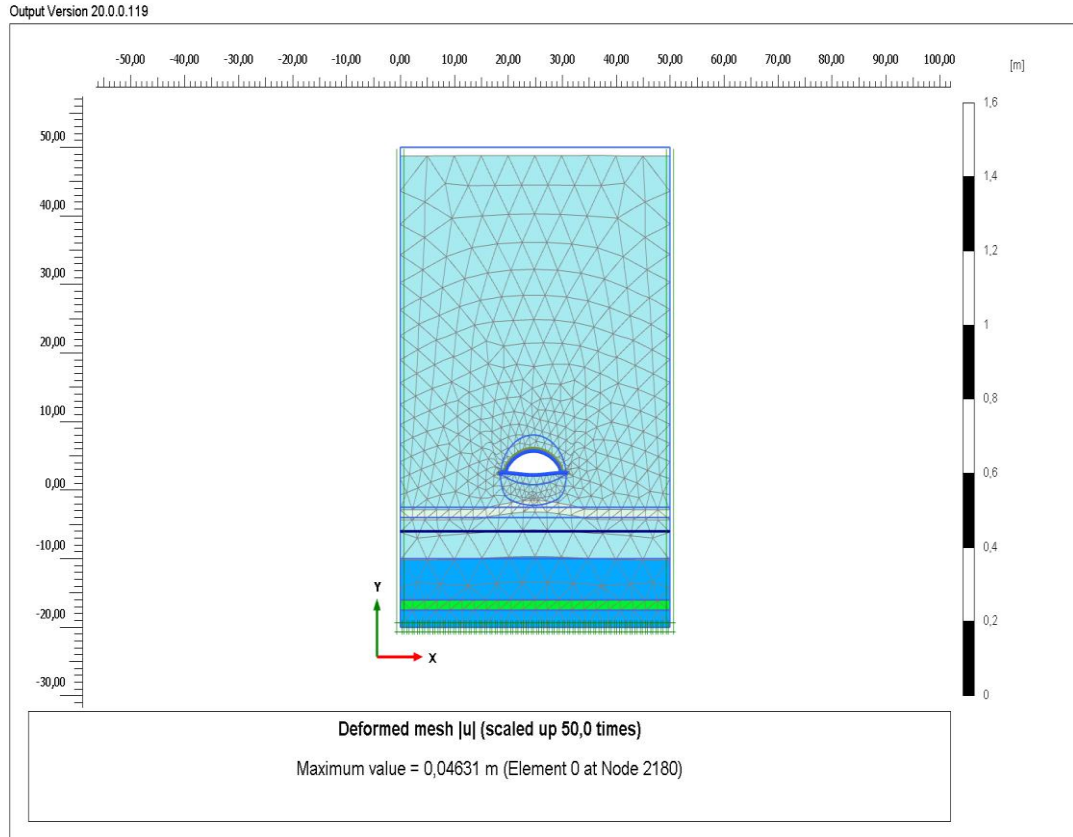
Şekil 4. 24. Kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlar

4.2.2.4.3. Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.60 için yapılan analizler

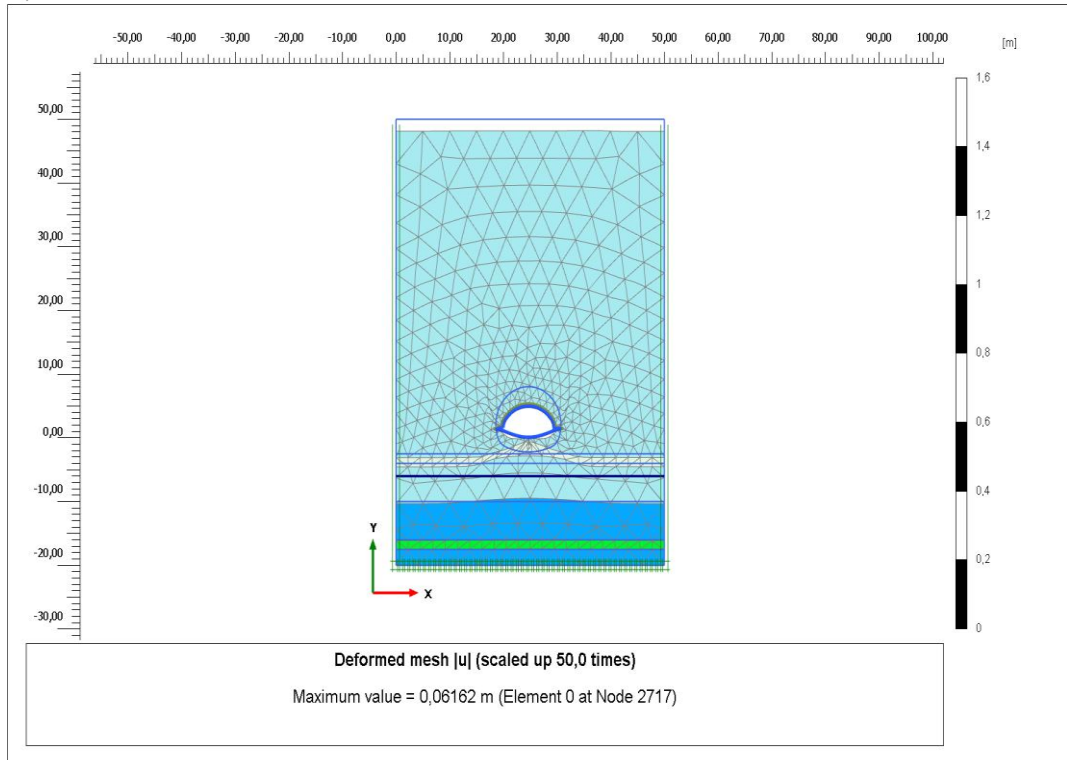
Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.60 girildiğinde çalışma sahasındaki tünel inşaatındaki kazı aşamaları için yapılan analizlerde; ilk kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme (Şekil 4.26) değeri 0.03618m , ilk kaplama aşamasında meydana gelen toplam yer değıştirme değeri 0.04631m (Şekil 4.27), ikinci kazı aşamasında meydana gelen toplam yer değıştirme değeri 0.06162m (Şekil 4.28), kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlarda ise toplam yerdeğiştirme değeri 0.06146m olarak hesaplanmıştır(Şekil 4.29). Girilen 0.60 değeri kaplama yapılana kadar geçen süre içindeki kazı kaynaklı ikincil gerilmelerin %60 oranında azaldığı ve geri kalan %40'lık kısmın tünel kaplaması tarafından karşılandığını tespit edilmiştir.



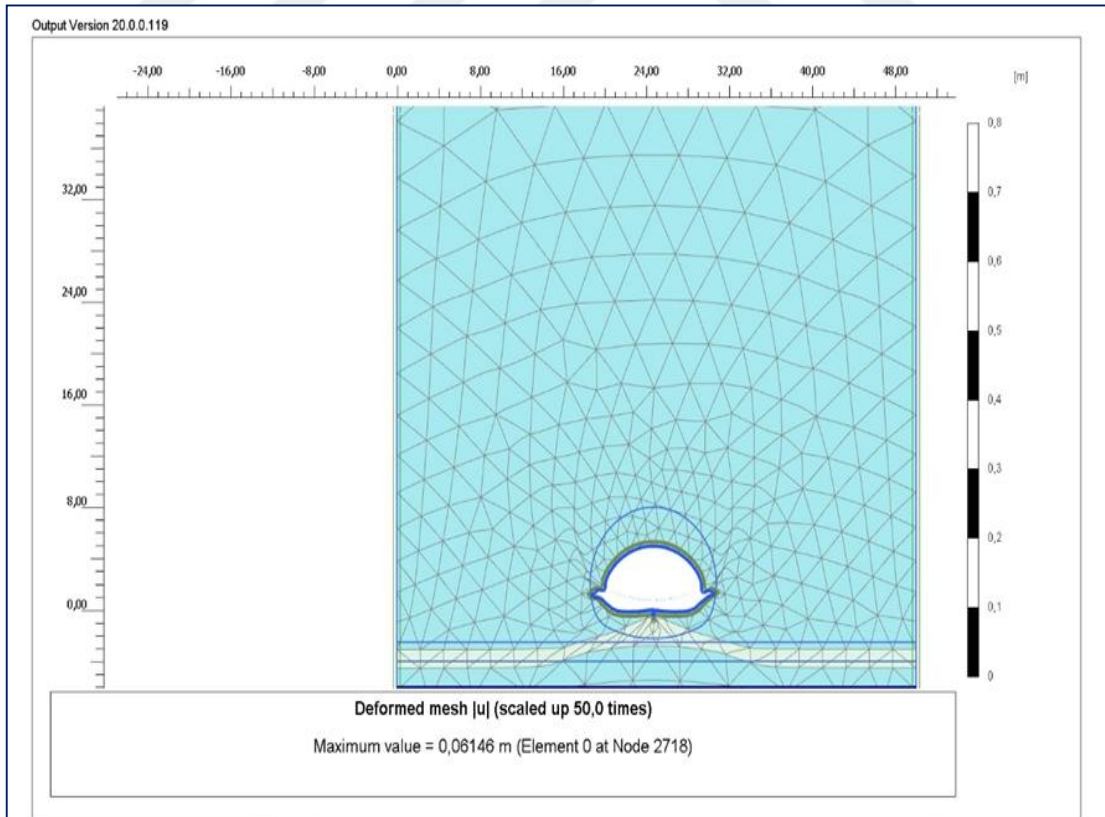
Şekil 4. 25. İlk kazı aşaması



Şekil 4. 26. İlk kaplama aşaması



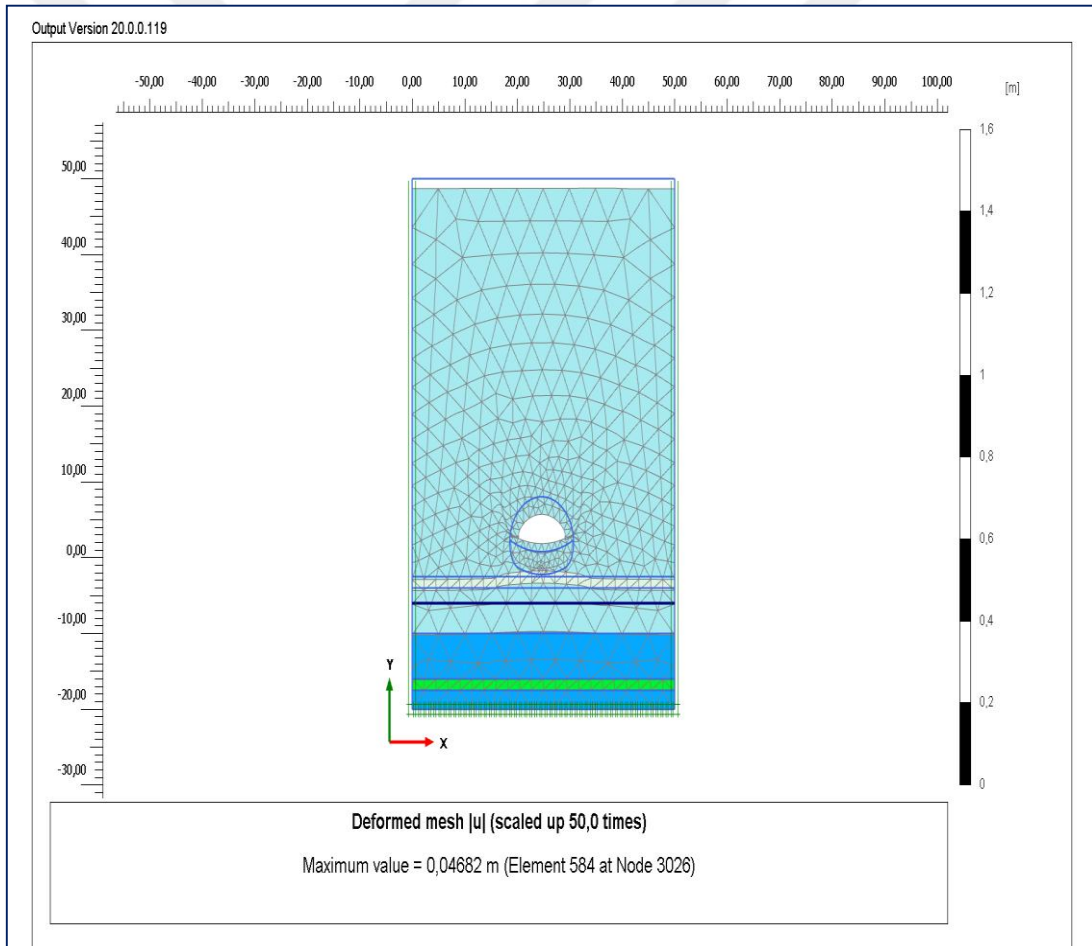
Şekil 4. 27. İkinci kazı aşaması



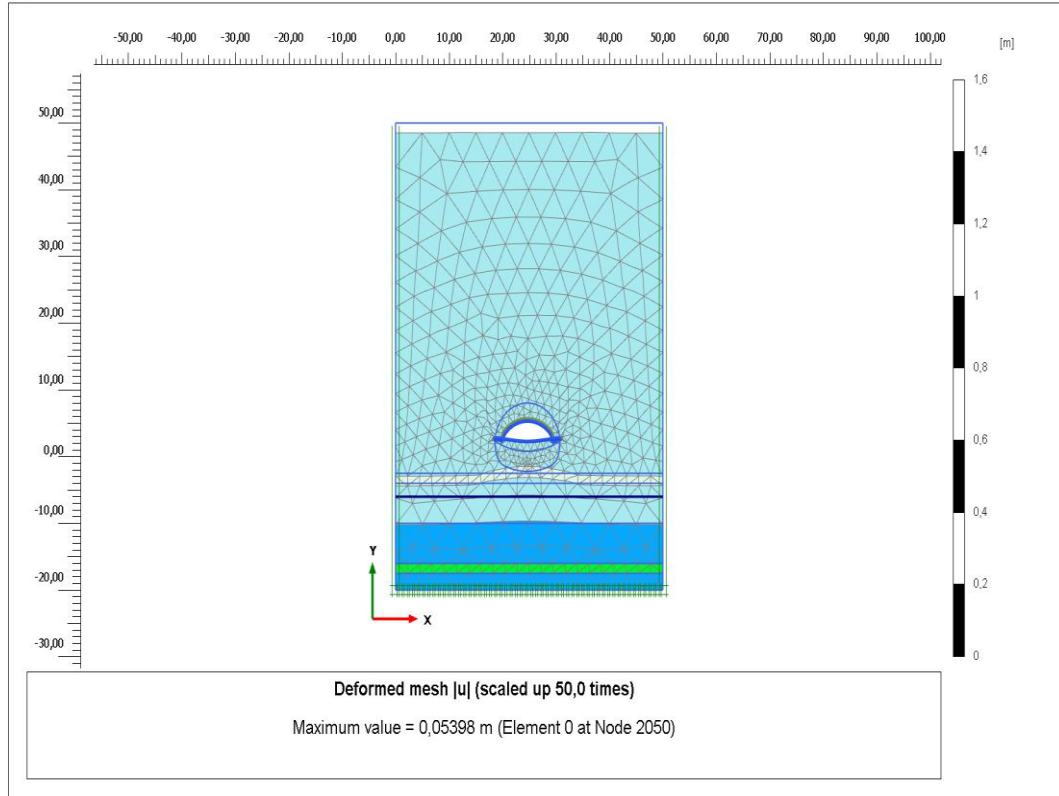
Şekil 4. 28. Kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlar

4.2.2.4.4. Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.70 için yapılan analizler

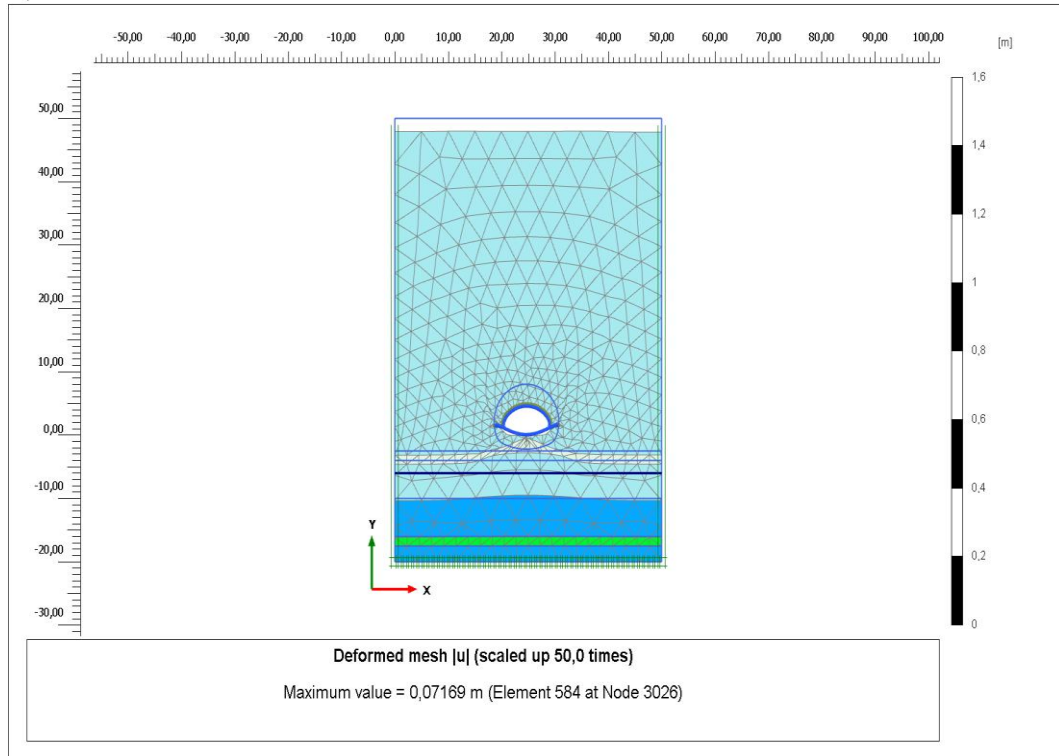
Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.70 girildiğinde çalışma sahasındaki tünel inşaatındaki kazı aşamaları için yapılan analizlerde; ilk kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme (Şekil 4.30) değeri 0.04682m , ilk kaplama aşamasında meydana gelen toplam yer değiştirme değeri 0.05398m (Şekil 4.31), ikinci kazı aşamasında meydana gelen toplam yer değiştirme değeri 0.07169m (Şekil 4.32), kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlarda ise toplam yerdeğiştirme değeri 0.07176m olarak hesaplanmıştır(Şekil 4.33). Girilen 0.70 değeri kaplama yapılana kadar geçen süre içerisindeki kazı kaynaklı ikincil gerilmelerin %70 oranında azaldığı ve geri kalan %30'luk kısmın tünel kaplaması tarafından karşılandığı belirlenmiştir.



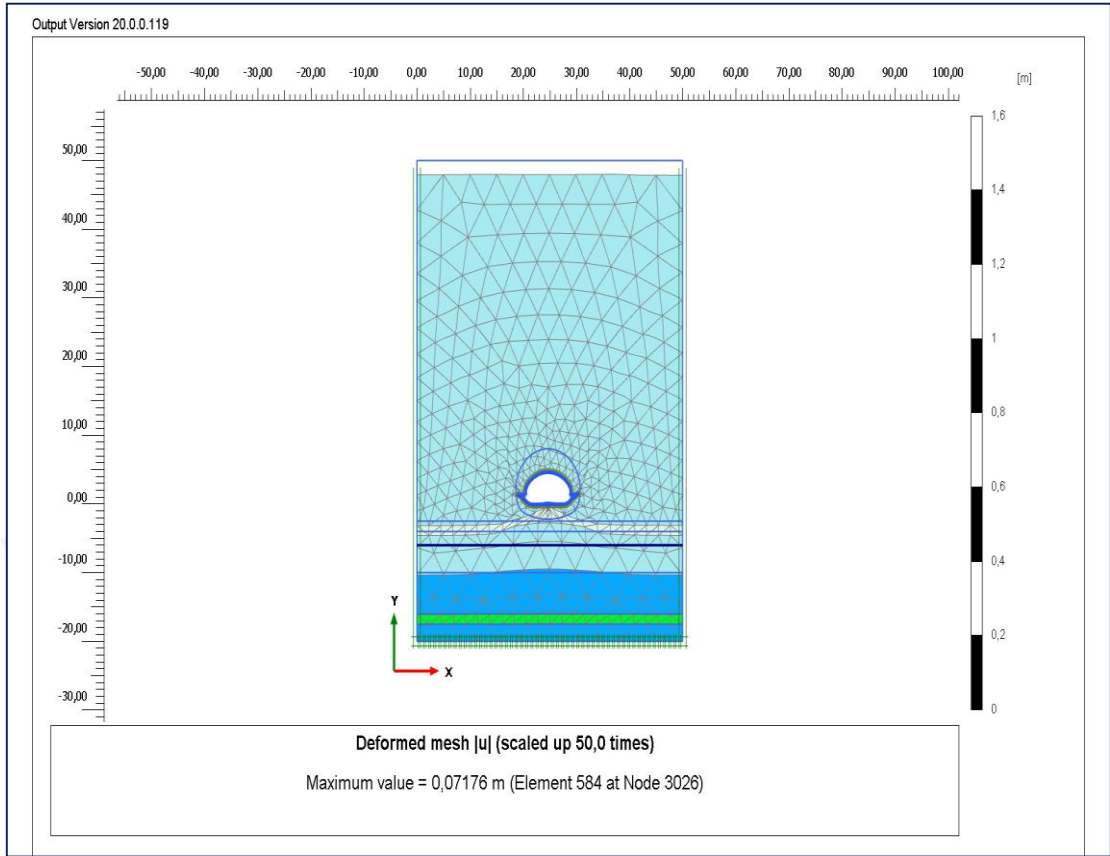
Şekil 4. 29. İlk kazı aşaması



Şekil 4. 30. İlk kazı aşaması



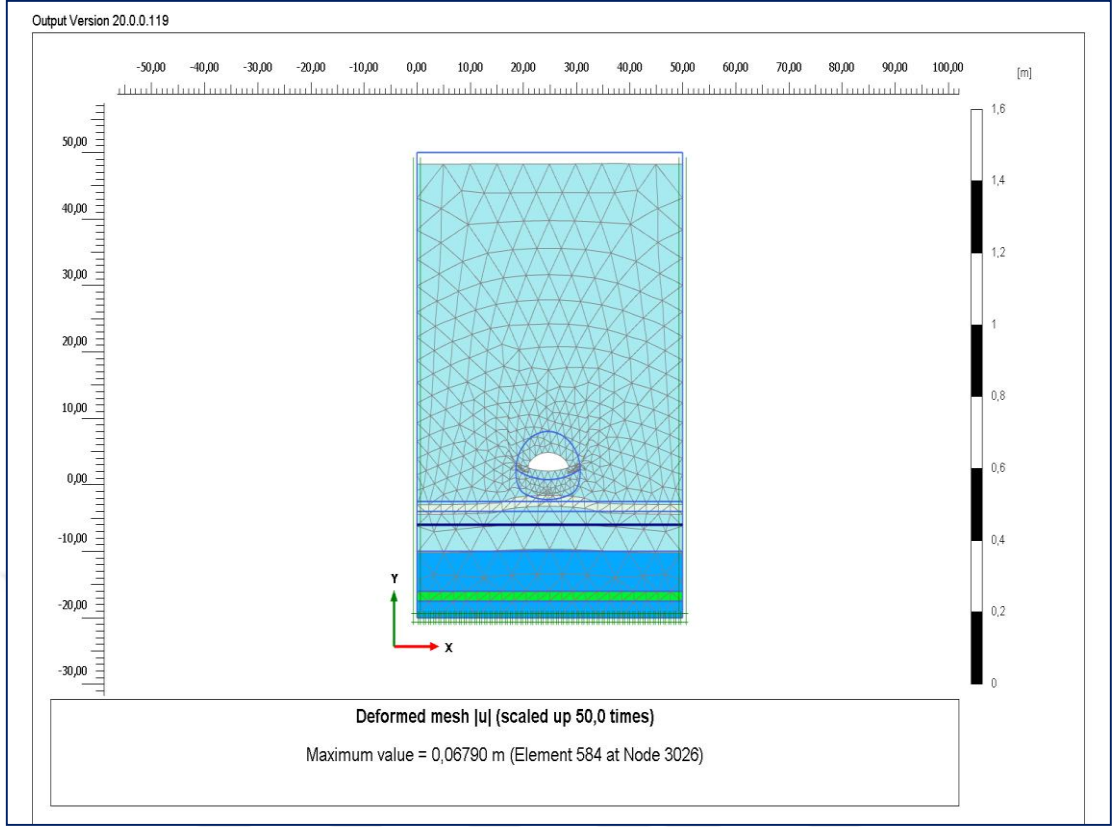
Şekil 4. 31. İkinci kazı aşaması



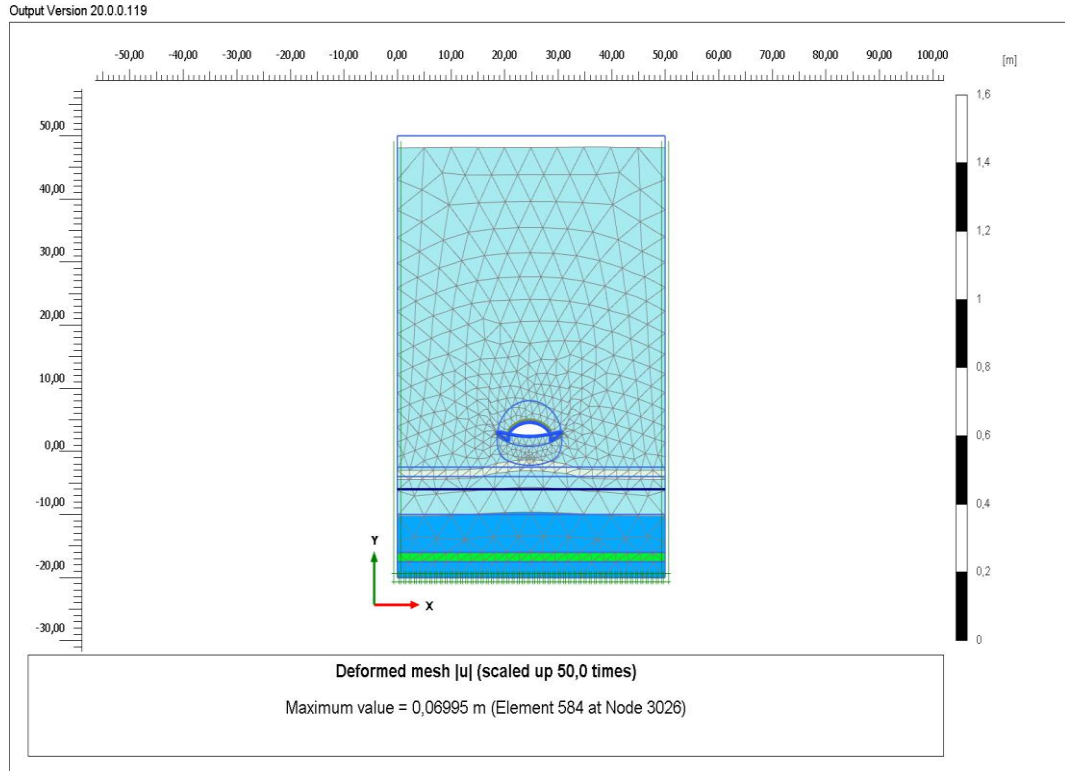
Şekil 4. 32. Kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlar

4.2.2.4.5. Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.80 için yapılan analizler

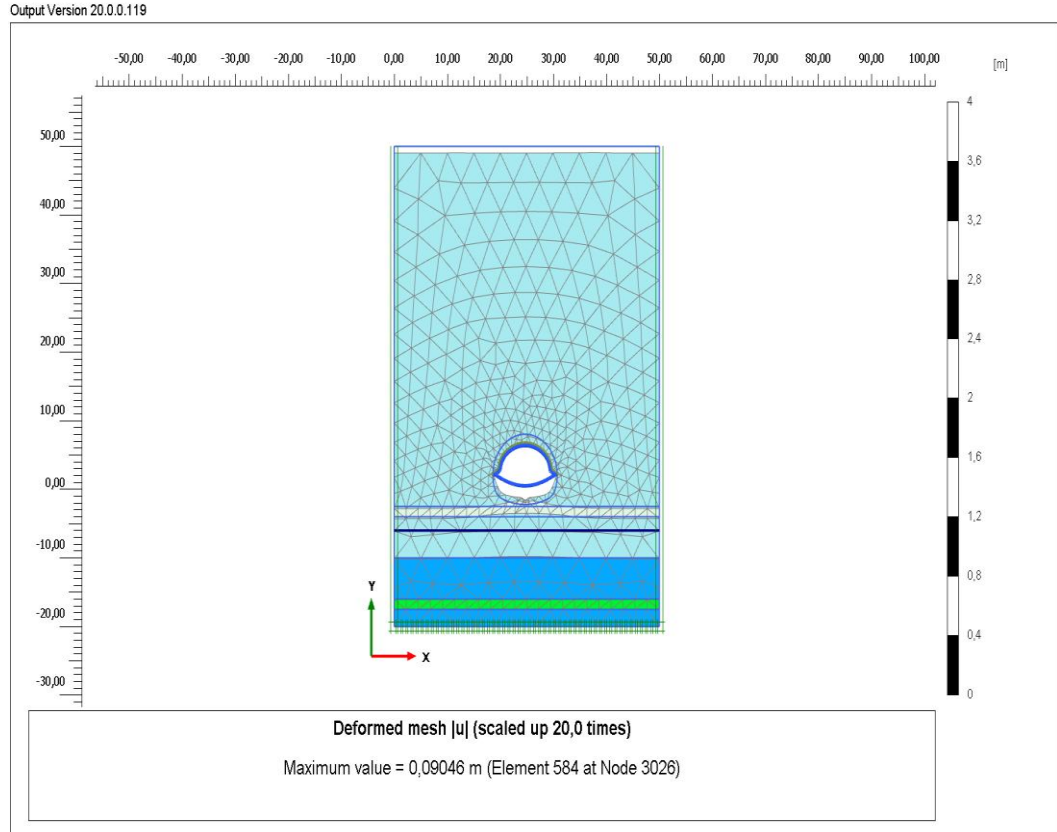
Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.80 girildiğinde çalışma sahasındaki tünel inşaatındaki kazı aşamaları için yapılan analizlerde; ilk kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme (Şekil 4.34) değeri 0.06790m , ilk kaplama aşamasında meydana gelen toplam yer değıştirme değeri 0.06995m (Şekil 4.35), ikinci kazı aşamasında meydana gelen toplam yer değıştirme değeri 0.09046m (Şekil 4.36), kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlarda ise toplam yerdeğiştirme değeri 0.09025m olarak hesaplanmıştır(Şekil 4.37). Girilen 0.80 değeri kaplama yapılına kadar geçen süre içerisindeki kazı kaynaklı ikincil gerilmelerin %80 oranında azaldığı ve geri kalan %20'lik kısmın tünel kaplaması tarafından karşılandığını belirlenmiştir.



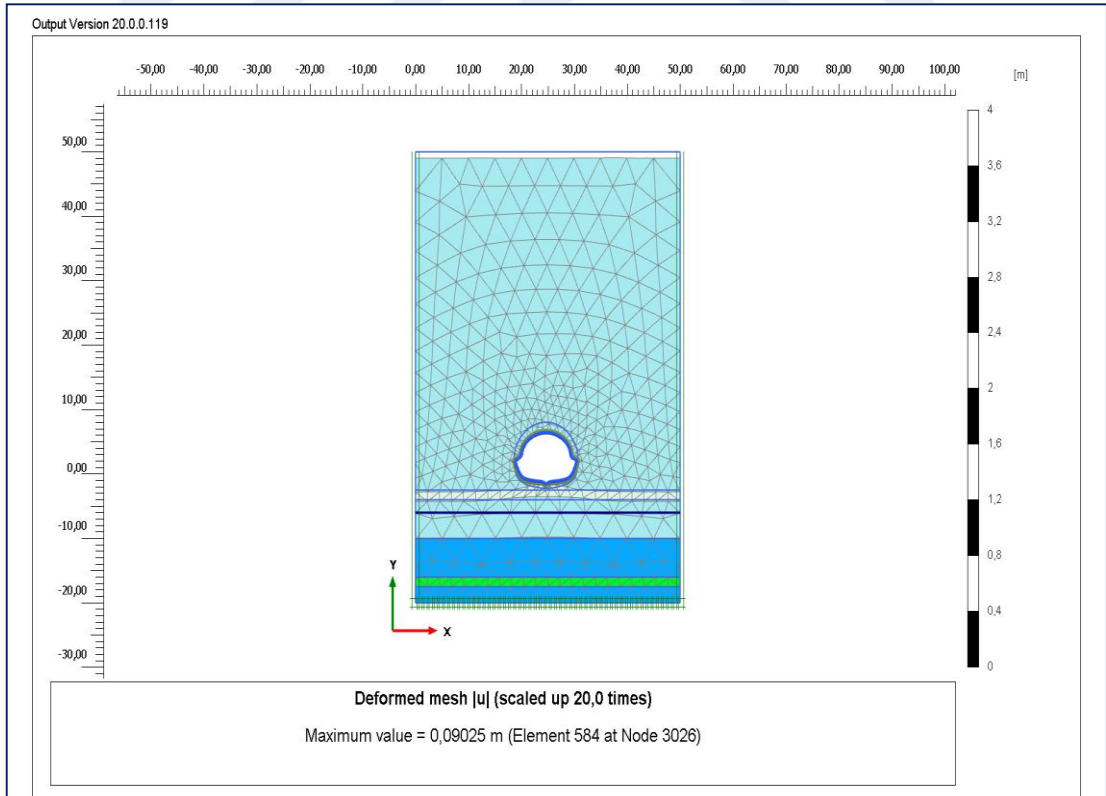
Şekil 4. 33. İlk kazı aşaması



Şekil 4. 34. İlk kaplama aşaması



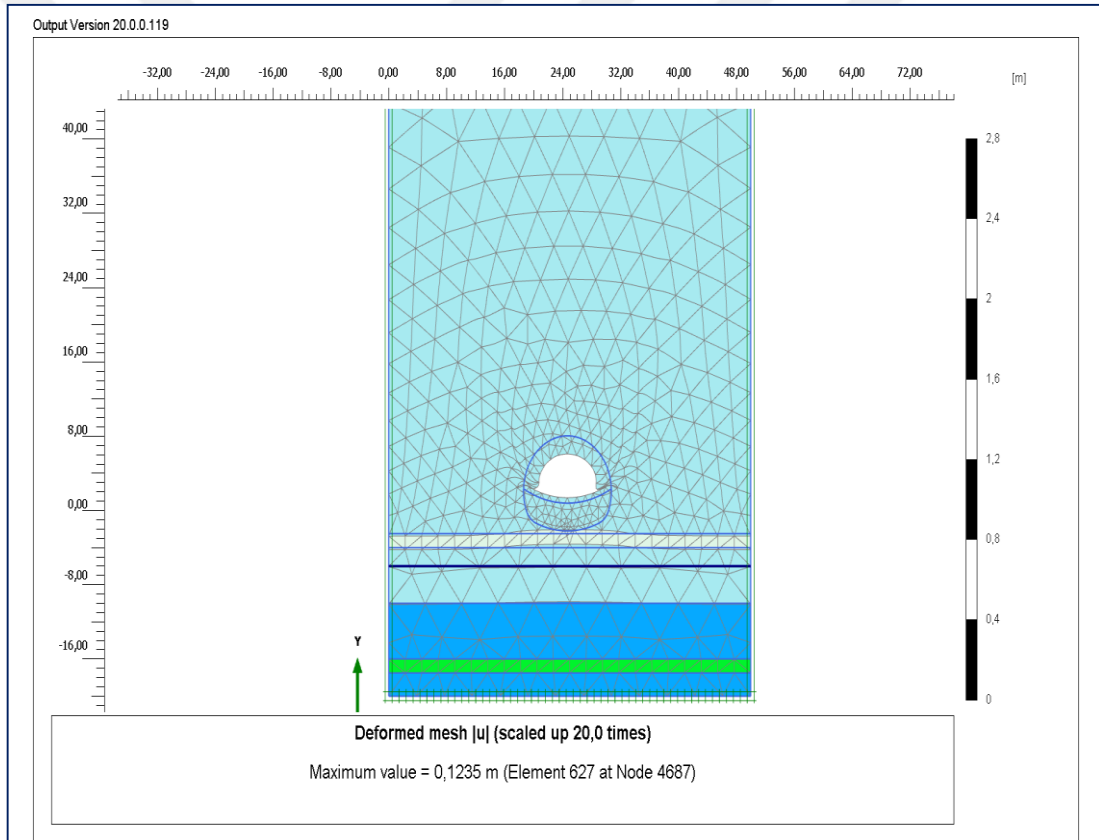
Şekil 4. 35. İkinci kazı aşaması



Şekil 4. 36. Kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlar

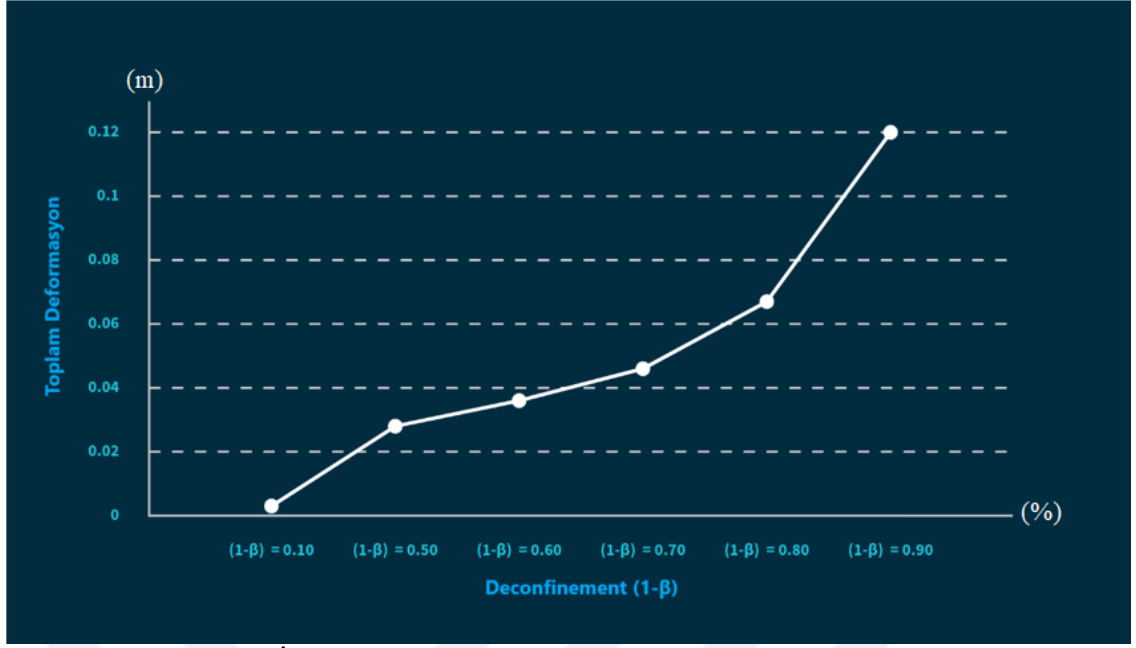
4.2.2.4.6. Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.90 için yapılan analizler

Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.90 girildiğinde çalışma sahasındaki tünel inşaatındaki ilk kazı aşaması için yapılan analizlerde; meydana gelen toplam yerdeğiştirme (Şekil 4.38) değeri 0.1235m olarak hesaplanmıştır. Kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlarda ise İlk kazı aşamasından sonra çökme meydana geldiği için program modelleme yapılamamıştır. Girilen 0.90 değeri kaplama yapılana kadar geçen süre içerisindeki kazı kaynaklı ikincil gerilmelerin %90 oranında azaldığı ve geri kalan %10'luk kısmın tünel kaplaması tarafından karşılandığı tespit edilmiştir.



Şekil 4. 37. İlk kazı aşaması

Şekil 4.39'da ilk kazı aşaması ile deconfinement değeri arasındaki ilişki grafiği gösterilmiştir. Deconfinement değeri arttıkça kazı yüzeyinde meydana gelen deformasyon değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.



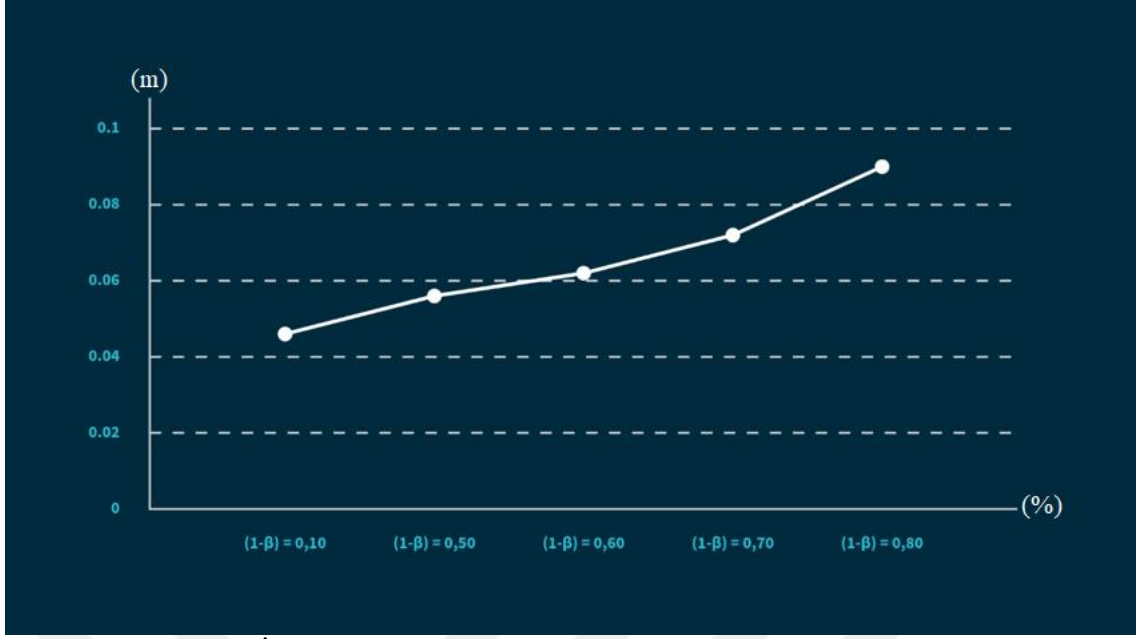
Şekil 4. 38. İlk kazı aşaması ile Deconfinement (1-β) değeri ilişkisi grafiği

Şekil 4.40'da ilk kaplama aşaması ile deconfinement değeri arasındaki ilişki grafiği gösterilmiştir. Deconfinement değeri arttıkça kazı yüzeyinde meydana gelen deformasyon değerlerinin arttığı görülmektedir.



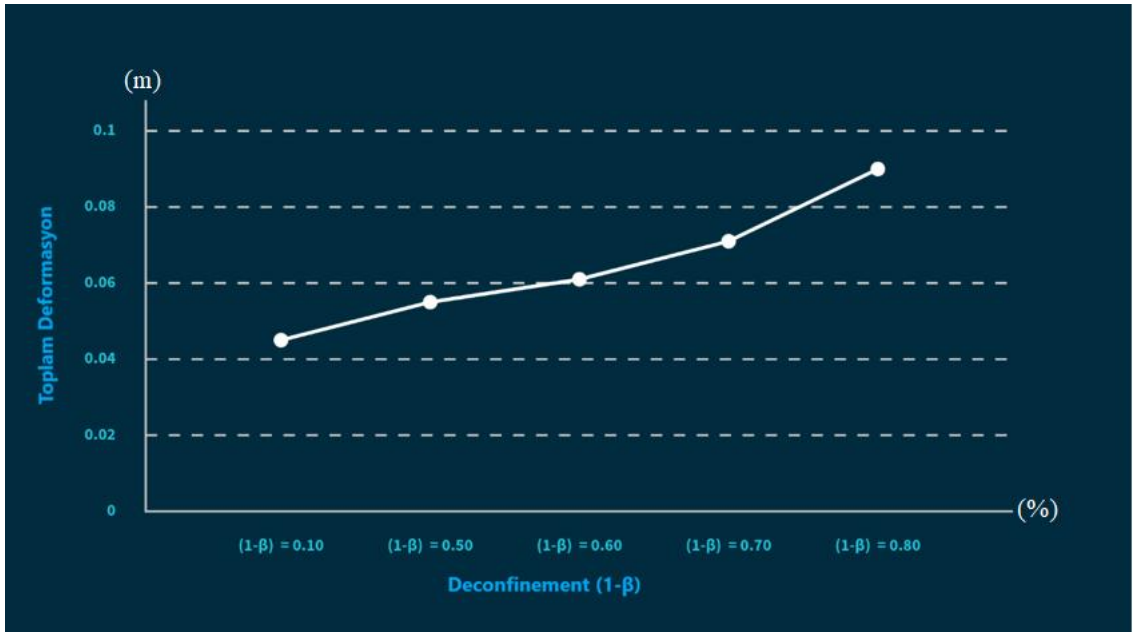
Şekil 4. 39. İlk kaplama aşaması ile Deconfinement (1-β) değeri ilişkisi grafiği

Şekil 4.41'de ikinci kazı aşaması ile deconfinement değeri arasındaki ilişki grafiği gösterilmiştir. Deconfinement değeri arttıkça kazı yüzeyinde meydana gelen deformasyon değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 40. İkinci kazı aşaması ile Deconfinement ($1-\beta$) değeri ilişkisi grafiği

Şekil 4.42’de son kaplama aşaması ile deconfinement değeri arasındaki ilişki grafiği gösterilmiştir. Deconfinement değeri arttıkça kazı yüzeyinde meydana gelen deformasyon değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 41. Son kaplama aşaması ile Deconfinement ($1-\beta$) değeri ilişkisi grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, Hakkari Yüksekova-Yeniköprü sahasında yapılmış olan (0+162) -(4+118) kilometreleri arasındaki yol çalışmasında Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) kullanılarak açılan tünel kazısı esnasında oluşan deformasyonları araştırmak amacıyla Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan modellemelerde tünel üst ve alt yarı kazılarının gerçekleştirildiği inşaat aşamalarında gerilmeleri azaltmak için yük azaltma katsayısı ($1-\beta$) değerleri %10, %50, %60, %70, %80, %90, olarak farklı değerlerde girilmiştir. Yapılan analizler sonucunda nihai inşaat kademeleri için farklı yük azaltma katsayılarında oluşan yüzey deformasyonları değerlendirilmiştir. Yapılan analizler ile elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

1-) Birinci kazı aşamasında, referans değerlere göre deformasyon değeri 0.03618 m, birinci kazı sonrası yapılan kaplama aşamasında meydana gelen deformasyon değeri 0.04631 m olarak hesaplanmıştır. Maximum deformasyon değerlerinin kenar ayak kısımlarında arttığı gözlemlenmiştir.

2-) İkinci kazı aşamasındaki referans değerlere göre hesaplanan deformasyon değeri 0.06162 m ve ikinci kazı sonrası yapılan kaplama aşamasında meydana gelen deformasyon değeri 0.06146 m olarak belirlenmiştir. Kazı yapılan alan büyüklüğüyle meydana gelen deformasyon şiddetlerinin doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Tünel içi deformasyon ölçümleri tünel alt yarı kazıları sırasında kısa sürede ciddi bir artış meydana gelmiştir.

3-) Çalışma sahasındaki tünel inşasında PLAXIS 2D programı kullanılarak yapılan analizlerde; hesaplanan toplam yerdeğiştirme değeri 0.06111 m olarak hesaplanmıştır. Tünel inşasında maksimum efektif gerilme değeri 1.757 kN/m^2 , minimum efektif gerilme değeri ise 1972 kN/m^2 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, zeminde meydana gelen efektif gerilmelerin ise tünelin sağ ve sol taraflarında artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Zeminde meydana gelen efektif gerilmelerin, tünelin alt ve üst yarı birleşim bölgesinde artış gösterdiği görülmüştür. Yerdeğiştirme değerlerinin ise zeminin

yerçekiminden kaynaklı tünel boşluğuna doğru hareketinden kaynaklı olarak tünelin kemer kısmında artış gösterdiği belirlenmiştir.

4-) Tünel inşasındaki tünel kaplaması için, PLAXIS 2D programı kullanılarak yapılan analizlerde; hesaplanan toplam yerdeğiştirme değeri 0.06146 m olarak hesaplanmıştır. Yerdeğiştirme değerlerinin tünelin kemer kısımlarında arttığı belirlenmiştir.

5-) Tünel inşasında tünel kaplaması için yapılan analizlerde; meydana gelen maksimum kesme kuvveti değeri 160.4 kN/m, minimum kesme kuvveti değeri ise -159.4 kN/m olarak belirlenmiştir. Tünel inşasında tünel kaplaması için yapılan analizlerde; meydana gelen maksimum burulma momenti değeri 177.8 kNm/m, minimum burulma momenti değeri ise -140.2 kNm/m olarak hesaplanmıştır. Kesme ve Burulma momenti değerlerinin tünelin üst ve alt yarı bölgelerinin birleşim bölgelerinde olduğu gözlemlenmiştir.

6-) Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.50 girildiğinde çalışma sahasındaki tünel inşasındaki kazı aşamaları için yapılan analizlerde; ilk kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 0.02811m, ilk kaplama aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 0.04110m, ikinci kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 0.05576m, kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlarda ise toplam yerdeğiştirme değeri 0.05521m olarak hesaplanmıştır.

7-) Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.60 girildiğinde çalışma sahasındaki tünel inşasındaki kazı aşamaları için yapılan analizlerde; ilk kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 0.03618m, ilk kaplama aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 0.04631m, ikinci kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 0.06162m, kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlarda ise toplam yerdeğiştirme değeri 0.06146m olarak hesaplanmıştır.

8-) Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.70 girildiğinde çalışma sahasındaki tünel inşasındaki kazı aşamaları için yapılan analizlerde; ilk kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 0.04682m, ilk kaplama aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 0.05398m, ikinci kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 0.07169m, kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlarda ise toplam yerdeğiştirme değeri 0.07176m olarak hesaplanmıştır.

9-) Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.80 girildiğinde çalışma sahasındaki tünel inşasındaki kazı aşamaları için yapılan analizlerde; ilk kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 0.06790m, ilk kaplama aşamasında meydana gelen toplam yer

değiştirme değeri 0.06995m, ikinci kazı aşamasında meydana gelen toplam yer değiştirme değeri 0.09046m, kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlarda ise toplam yerdeğiştirme değeri 0.09025m olarak hesaplanmıştır.

10-) Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.90 girildiğinde çalışma sahasındaki tünel inşaatındaki ilk kazı aşaması için yapılan analizlerde; meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 0.1235m olarak hesaplanmıştır. Kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlarda ise, ilk kazı aşamasından sonra çökme meydana geldiği için programda modelleme yapılamamıştır.

11-) Deconfinement ($1-\beta$) değeri 0.10 girildiğinde çalışma sahasındaki tünel inşaatındaki kazı aşamaları için yapılan analizlerde; ilk kazı aşamasında meydana gelen toplam yerdeğiştirme değeri 3.332×10^{-3} m, ilk kaplama aşamasında meydana gelen toplam yer değiştirme değeri 0.02781m, ikinci kazı aşamasında meydana gelen toplam yer değiştirme değeri 0.04556m, kaplama tamamlandıktan sonra meydana gelen deformasyonlarda ise toplam yerdeğiştirme değeri 0.04504m olarak hesaplanmıştır.

12-)Yapılan analizlerde, Deconfinement ($1-\beta$) değeri arttıkça kazı ve kaplama aşamalarında ki gerilme ve yerdeğiştirme değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan sayısal analizler sonucunda tünel kazı kesitinde kayma ve çekme gerilmelerinin en çok duvarda ve tabanda yoğunlaştığı saptanmıştır. Bundan yola çıkılarak kazı adımlarının uygun seçilmesinin en büyük etken olduğu tespit edilmiştir.

5.2 Öneriler

Tünellerde kazı alanlarında ve bulunduğu bölgedeki zemin gerilmeleri daima takip edilmelidir. Tünel kazısından önce sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan programlarda gerekli analizlerin yapılması ve kazıyla eş zamanlı olarak bu analizlerin devam etmesi çok önemlidir. Elde edilen deformasyon değerleri 1 mm'nin altına düştüğü zaman deformasyon okumaları sonlandırılabilir. Dolayısıyla deformasyonların durumuna göre, iksa sisteminin tasarımı değiştirilebilmesi daha güvenilir tasarımlar için avantaj sağlar.

Tünelde kesme ve burulma momenti kuvvetlerinin etkisiyle çatlaklar oluşabilmektedir. Kesme kuvveti ve burulma momenti değerlerinin tünellerin sağ ve sol kısımlarında daha

fazla olması, bu bölgelerde enjeksiyon, kaya bulon gibi desteklemeler yapılmasının önemini gösterir.

Yapılan sayısal analizler sonucunda tünel kazı kesitinde kayma ve çekme gerilmelerinin en çok duvarda ve tabanda yoğunlaştığı saptanmıştır. Bundan yola çıkılarak, kazı adımlarının uygun seçilmesi oldukça önemlidir.

Yapılan analizlerde, Deconfinement ($1-\beta$) değeri arttıkça kazı ve kaplama aşamalarında ki gerilme ve yerdeğiştirme değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Doğru değerlerin seçilmesi tünel inşaatı için önemlidir.



KAYNAKLAR

- Abd El Raouf, M., & Bahloul, K. M. (2024). Study of Seismic Response of Mechanically Stabilized Earth Wall. *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, 5(2), 129-139.
- Aksoy, O., & Kömürlü, E. (2017). Temel Maden Bilgileri. Ankara: *Mayeb Basın*.
- Aktaş S. Ş., *Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi İle İnşa Edilen Bir Tünelin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Analizi ve Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2009), 243585
- Amadei, B., Stephansson, O., Amadei, B., & Stephansson, O. (1997). Methods of in situ stress measurement. *Rock stress and its measurement*, 95-120.
- Basarir, H., Karpuz, C., & Tutluoglu, L. (2008). Specific energy based rippability classification system for coal measure rock. *Journal of Terramechanics*, 45(1-2), 51-62.
- Bell, F.G. (1994), Engineering in Rock Mass. *Great Britain: Butterworths*
- Brinkgreve, R., Broere, W., & Waterman, D. (2002). *Plaxis 2D-version 8*. Swets and Zeitlinger publishers.
- Broere, W., & Brinkgreve, R. B. J. (2002). Phased simulation of a tunnel boring process in soft soil. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Mestat (ed.)*, Presses de l'ENPC/LCPC, Paris, 529-536
- Broere, W., & Brinkgreve, R. B. J. (2002). *Phased simulation of a tunnel boring process in soft soil*.
- Burjus, A. B. M. B. *Prediction of the settlements induced by tunneling in clayey soil* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Doğruoğlu, M. T. (2009). *TBM metodu ile açılan ikiz tünellerde meydana gelebilecek deformasyonların sonlu elemanlar metodu ve numerik hesaplarla tahmini* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- El Raouf, M. A., & Bahloul, K. M. (2023). Numerical Simulation of Ground Movement Due to Tunneling. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 104(3), 653-663
- Galavi, V. (2010). Groundwater flow, fully coupled flow deformation and undrained analyses in PLAXIS 2D and 3D. *Plaxis Report*.
- Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 43(2), 203-215.

- Karaoğlu H., *Kaya Zeminde Tünel Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2002), 127018
- Karaoğlu, H. (2002). *Kaya zeminde tünel tasarımı* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kaya, Y. (2023). Natm Tünel Kazılarında Yük Azaltma Yöntemi Katsayısı Değişiminin Deformasyonlara Etkisi, *9th Geotechnical Symposium*, 22-24th November, İstanbul, DOI: 10.5505/2023geoteknik.SS-25
- Kirsch, E. G. (1898). Die Theorie der Elastizität und die Ergebnisse der Festigkeitslehre. *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, 42, 797-807.
- Komurlu, E., & Kesimal, A. (2012). Using sprayed polymer as tunnel support. In *ISRM International Symposium-Asian Rock Mechanics Symposium* (pp. ISRM-ARMS7). ISRM.
- Köse, H., Gürgen, S., Onargan, T., Yenice, H., Aksoy, C. O. (2007). Tünel ve Kuyu Açma. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları*, Yayın No:145, 310, İzmir.
- Kun, M. (2010). *Zayıf kayalarda ve faylı zonlarda tünel açma tasarım ve yapım gereksinimlerinin araştırılması ve çözümlenmesi* (Doctoral dissertation, Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey)).
- Manual, P. L. A. X. I. S. (2020). PLAXIS 2D-Reference Manual.
- Panet, M., & Guenot, A. (1982), "Analysis of Convergence Behind The Face of a Tunnel", The 3rd International Symposium, London, Institute of Mining and Metallurgy, 197-204
- Plaxis 2D Reference Manual. (2020). Bentley Communities.
- Polat D., *NATM Metodu Kullanılarak Tünel Tasarımı Ve Modellenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2010), 293960
- Rabcewicz, L. V. (1964). The new Austrian tunnelling method. *Water power*.
- Unlutep, A., Tellioglu, V., & Arioglu, B. (2009). Predicted and observed ground deformations due to TBM tunnel excavations on the İzmir Metro Project (Stage 1). In *ITAAITES World Tunnel Congress: safe tunnelling for the city and environment conference proceedings* (pp. 234-240).
- Vali, R., Saberian, M., Beygi, M., Porhoseini, R., & Abbaspour, M. (2020). Numerical analysis of laterally loaded single-pile behavior affected by urban metro tunnel. *Indian Geotechnical Journal*, 50(3), 410-425

- Yan, L. U., & Shihao, T. U. (2010). Rules of distribution in a plastic zone of rocks surrounding a roadway affected by tectonic stress. *Mining Science and Technology (China)*, 20(1), 47-52.
- Yarali, O., & Muftuoglu, V. Y. (1992). Support design for rock bolts with numerical methods. In *Proceedings of 8th coal congress of Turkey* (pp. 279-290).
- Yazici, S., & Nasuf, E. (1993). Numerical Modelling for Ground Control. *Mining Journal*, 32, 3-4
- Yıldırım, M., ve Gökaşan, E., (2013), *Mühendisler için jeoloji Bilgileri*, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
- Yılmaz, I., 2007, “*Mühendislik Jeolojisi, İlkeler ve Temel Kavramlar*”, Teknik Yayınevi, Mühendislik Mimarlık Yayınları, 490 s., Kızılay/Ankara, 2007
- <https://www.tunelmarket.com/blog/natm-tunel-metodu>
- <https://bentleysystems.service-now.com/community>