



**TÜNEL DELME MAKİNESİ (TBM) İLE AÇILAN İKİZ TÜNELLERDE
YÜZEYDE OLUŞAN OTURMALARIN SONLU ELEMANLAR METODU
İLE İNCELENMESİ**

Badesu DUMANOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHNEİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Badesu DUMANOĞLU

25/01/2022

TÜNEL DELME MAKİNESİ (TBM) İLE AÇILAN İKİZ TÜNELLERDE YÜZEYDE OLUŞAN OTURMALARIN SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Badesu DUMANOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2022

ÖZET

Tüneller, yatay yönde veya belirli bir eğimle yer altında yapılan kazılarla oluşturulan yapılar olup geçmişten günümüze yer altı madenciliğinde, karayolu, demiryolu, metro gibi ulaşım sektöründe, temiz/atık su derivasyon sistemlerinde ve hidroelektrik santralleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle tüm dünyada ulaşım sektöründe kullanılan tüneller; popülasyonun yoğun olduğu şehirlerde ulaşım yollarının yetersizliği sebebiyle ve trafiğin azaltılması amacıyla; hem alternatif ve hızlı bir ulaşım dalı olması hem de halihazırda var olan yoğun kentleşme bölgelerinde yer yüzünde herhangi bir alana ihtiyaç duymaması ve herhangi bir yapılaşmayı bozmaması sebebiyle oldukça tercih edilmektedir. Tüneller birçok yöntem ile kazılmaktadır ve bunlardan bazıları; konvansiyonel tünel yöntemleri, tam mekanize tünel yöntemleri ve aç-kapa tünel yöntemi olarak sıralanabilir. En yaygın kullanılanlar; konvansiyonel tünel yöntemlerinden biri olan Yeni Avusturya Tünel Metodu (NATM) ve tam mekanize tünel yöntemlerinden biri olan Tünel Delme Makinesi (TBM) ile tünel açma yöntemidir. Hangi yöntemin kullanılacağı tasarımı yapılacak projenin maliyeti, proje süresi, konumu, güzergâhı, jeolojik koşullar, yapı etkileşimi ve yer altı su seviyesi gibi birçok etkene bağlıdır. Bununla birlikte genel olarak yoğun yapılaşmanın olduğu ve tünelin yüzeye yakın olduğu projelerde TBM ile tünel açma yöntemi tercih edilmektedir. Bu tezde özellikle kentleşmenin yoğun olduğu yerlerde tercih edilen TBM yöntemi ile açılan tünellerde meydana gelecek tünel gerilmelerinin ve bu kazılara bağlı yüzeyde oluşacak oturmaların bir sonlu elemanlar programı yardımı ile tahmini yapılmıştır. Yapılan numerik analizlerde ikiz tüneller dikkate alınmış olup birkaç değişken seçilmiş ve değişkenlere bağlı elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Bunun için belirlenen değişkenler; zemin koşulu, örtü yüksekliği ve tünel yerleşimi olarak sıralanabilir. Analizlerde Plaxis 2D programı kullanılmış ve ilgili program sonlu elemanlar yöntemi ile (FEM) deformasyon analizlerinde, dinamik analizlerde, stabilite analizlerinde, temel, ankrajlı duvar, yol dolgusu, oturma analizi ve tünel tasarımı gibi birçok geoteknik mühendisliği dalında kullanılmaktadır.

Bilim Kodu : 91105

Anahtar Kelimeler : TBM, tünel delme makinesi, ikiz tüneller, yüzey oturması, Plaxis2D, sonlu elemanlar metodu

Sayfa Adedi : 230

Danışman : Prof. Dr. Seyhan FIRAT

COMPARISON OF SURFACE SETTLEMENTS ON TWIN TUNNELS EXCAVATED
BY TUNNEL BORING MACHINE (TBM) WITH FINITE ELEMENT ANALYSIS
(MSc. Thesis)

Badesu DUMANOĞLU

GAZI UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
JANUARY 2022

ABSTRACT

Tunnels are constructed by excavation under the ground in a horizontal direction or with a certain slope. Tunnels are used in many areas such as underground mining, transportation sector such as highway, railway, subway, clean/waste water diversion systems and hydroelectric power plants from past to present. They are used especially in the transportation sector all over the world in the cities with high population due to the inadequacy of the transportation roads and in order to reduce the traffic. It is also highly preferred based on it is an alternative and fast transit system and it does not need any space on the surface in already existing dense urbanization areas and does not affect any superstructures. Tunnels are excavated by many methods and some of them can be listed as; conventional tunneling methods, fully mechanized tunneling methods and cut-cover tunneling method. The most commonly used methods are; New Austrian Tunneling Method (NATM) which is one of the conventional tunneling methods and tunnel excavation with Tunnel Boring Machine (TBM) which is one of the fully mechanized tunneling methods. The decision of the excavation method depends on many factors such as the cost of the project to be designed, the duration of the project, location of the project, alignment, geological conditions, interaction with surrounding structures and groundwater level. In addition to this, TBM tunneling method is preferred in projects where generally there is dense urbanization and where the tunnel is close to the surface. In this thesis, the tunnel stresses that occurs in the tunnels opened with the TBM method, which is preferred especially in areas where urbanization is intense, and the surface settlements due to these excavations are estimated with a finite element program. Twin tunnels are taken into account in the numerical analyzes and several variables are selected and the results obtained depending on the variables are compared. The variables determined for this comparison can be given as; soil material, overburden depth and tunnel layout. The program Plaxis 2D which is used in the analysis generally uses for many geotechnical engineering branches such as deformation analysis, dynamic analysis, stability analysis, foundation, anchored wall, embankment, settlement analysis and tunnel design with the finite element method (FEM).

Science Code : 91105

Key Words : TBM, tunnel boring machine, twin tunnels, surface settlement, Plaxis2D, finite element method

Page Number : 230

Supervisor : Prof. Dr. Seyhan FIRAT

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu tez çalışması sürecinde bilgisini, kıymetli desteğini ve deneyimini esirgemeyen Sayın Danışman Hocam Prof. Dr. Seyhan FIRATA'a, sonrasında ise engin bilgileri ile yardımcı olup, katkıları ile yol gösteren Sayın Hocam Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK'a teşekkürlerimi sunuyorum. Bu tezin yazımında iş hayatında öğrenmiş olduğum deneyimlerin çok büyük katkısı vardır. Bunun için SYSTRA SWS firmasından özellikle Paolo OCCIDENTE ve Francesco Saverio AGRESTI'ye sonrasında ise kıymetli ekip arkadaşlarıma göstermiş oldukları anlayış ve katkıları için teşekkürü borç bilirim. Bu dönemde ve tüm hayatım boyunca karşılıksız her şekilde yanımda olup desteklerini asla esirgemeyen sevgili annem Serpil DUMANOĞLU'na, sevgili babam Dilaver DUMANOĞLU'na ve canım kardeşim Naz DUMANOĞLU'na da en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Son olarak hayatımda ve bu süreçte desteklerini hep hissettiğim sevgili kuzenlerim Damla YEŞİLBAĞ'a ve Ege OK'a, bana güç veren diğer aile dostlarıma, kıymetli arkadaşlarıma ve Berkay BOLAT'a çok teşekkür ederim. Onların katkıları olmasaydı bu çalışmanın ortaya çıkması mümkün olmazdı.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xv
RESİMLERİN LİSTESİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
2.1. Önceki Çalışmalar.....	5
2.2. Tünel Tarihçesi.....	11
3. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ.....	19
3.1. Aç – Kapa Yöntemi.....	20
3.2. Konvansiyonel Tünel Açma Yöntemleri	23
3.2.1. Delme – patlatma yöntemi	26
3.2.2. Aşamalı kazı yöntemi.....	27
3.2.3. Tam yüz kazı yöntemi.....	32
3.3. Tam Mekanize Tünel Açma Yöntemleri.....	36
3.3.1. Kalkansız tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi	42
3.3.2. Tek kalkanlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi.....	43
3.3.3. Çift kalkanlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi.....	45
3.3.4. Hava basınçlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi	46

	Sayfa
3.3.5. Pasa basınçlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi	48
3.3.6. Çamur basınçlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi.....	49
3.4. Su Altı Tünel Açma Yöntemleri	51
3.4.1. Batık yüzer tipi tünel yöntemi.....	51
3.4.2. Batırma tipi tünel yöntemi	52
3.4.3. Deniz altı tünel kazı yöntemi	53
4. TÜNEL KAZISINA BAĞLI OLUŞAN OTURMALAR.....	57
4.1. Yüzey Oturmalarının Bağlı Olduğu Etkenler	58
4.2. Yüzey Oturmalarının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler.....	62
4.3. Uygulama Öncesinde Belirlenen Yüzey Oturmaları.....	63
4.3.1. Ampirik yöntem	63
4.3.2. Numerik yöntem	70
4.4. Uygulama Boyunca Belirlenen Yüzey Oturmaları	74
4.4.1. Tünel İçi Deformasyon (Konverjans) Ölçümleri	76
4.4.2. Yer altı Hareket Ölçümleri (Ekstansometre).....	76
4.4.3. Yüzey Deformasyon Ölçümleri	77
4.5. Belirlenen Oturmalara Bağlı Olarak Alınması Gereken Önlemler	78
5. ANALİZLER.....	81
5.1. Analizler İçin Seçilen Sabitler ve Değişkenler	81
5.2. Sonlu Elemanlar Programında Kullanılan Ana Girdi Verileri	83
5.3. Sonlu Elemanlar Programında Kullanılan Zemin Girdi Verileri	85
5.4. Sonlu Elemanlar Programında Kullanılan Tünel Girdi Verileri	90
5.5. Sonlu Elemanlar Programında Tünel Kazısı İçin Girdi Verileri.....	96
5.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Belirlenen Yüzey Oturma Analizleri ve Sonuçları	98

	Sayfa
5.7. Ampirik Yöntem ile Belirlenen Yüzey Oturma Analizleri ve Sonuçları.....	105
5.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Tünel Kaplamasının Deformasyonu Sonucu Yüzeyde Oluşacak Oturmaların Belirlenmesi.....	108
6. SONUÇLARIN YORUMLANMASI.....	115
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	123
KAYNAKLAR	127
EKLER.....	133
EK-1. PLAXIS 2D programı sonuçları.....	134
EK-2. ROCDATA programı jeolojik parametreler	209
EK-3. PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu	215
ÖZGEÇMİŞ	215

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Hacim kaybı V_L değerleri [6]	69
Çizelge 5.1. Analizlerde kullanılan değişkenler ve sabitler	82
Çizelge 5.2. Kaya biriminde (Kireçtaşı) kullanılan geoteknik parametreler	88
Çizelge 5.3. Zemin biriminde (Sert kil) kullanılan geoteknik parametreler	89
Çizelge 5.4. Beton sınıfına bağlı dayanımlar [57]	94
Çizelge 5.5. Plaxis 2D programı tünel plaka girdi verileri	95
Çizelge 5.6. Analizler için seçilen hacim kaybı değerleri [6]	96
Çizelge 5.7. Ampirik analizlerde kullanılan ana girdi verileri	105
Çizelge 5.8. Ampirik yöntem ile maksimum yüzey oturma değeri hesabı S_m – Kaya ortamı – Analiz 2	107
Çizelge 5.9. Ampirik yöntem ile maksimum yüzey oturma değeri hesabı S_m – Zemin ortamı – Analiz 7	107
Çizelge 5.10. Ampirik analizlerde kullanılan ana girdi verileri	108
Çizelge 5.11. Kaya biriminde (Kireçtaşı) kullanılan geoteknik parametreler	109
Çizelge 5.12. Zemin biriminde (Sert kil) kullanılan geoteknik parametreler	110
Çizelge 5.13. Plaxis 2D programı tünel plaka girdi verileri	111
Çizelge 6.1. Ampirik ve numerik yöntemler ile belirlenen maksimum yüzey oturma değerleri	119
Çizelge 6.2. Numerik yöntemler ile belirlenen toplam yüzey oturma değerleri ve sadece kaplama deformasyonuna bağlı yüzey oturma değerleri	121

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Su taşıma sistemi örneği	12
Şekil 2.2. Londra metro ağı planı.....	13
Şekil 2.3. New York metro ağı planı	14
Şekil 2.4. Karaköy-Beyoğlu metrosu profil çizimi.....	15
Şekil 2.5. Dünyadaki en uzun karayolu ve demiryolu tünelleri.....	16
Şekil 3.1. Tünel kazı ve inşaat yöntemleri.....	19
Şekil 3.2. Açık kazı ile aç – kapa yöntemi aşamaları	21
Şekil 3.3. Aşağıdan yukarıya aç – kapa yöntemi aşamaları.....	22
Şekil 3.4. Yukarıdan aşağıya aç – kapa yöntemi aşamaları.....	23
Şekil 3.5. Delme – patlatma yöntemi aşamaları [3].....	26
Şekil 3.6. Çok aşamalı tünel kazısı için tipik kazı aşaması gösterimi	28
Şekil 3.7. Parçalı kazı yöntemi aşamaları [29]	29
Şekil 3.8. NATM kazı destek sistemi gösterimi – az ayrılmış kaya birimi.....	30
Şekil 3.9. NATM kazı destek sistemi gösterimi – çok ayrılmış kaya birimi.....	31
Şekil 3.10. NATM kazı destek sistemi gösterimi – kötü zemin birimi.....	31
Şekil 3.11. Tünel kazısı için ilgili unsurlar – ADECO-RS [30]	33
Şekil 3.12. Tünel çekirdek bölgesinde meydana gelen deformasyonlar – ADECO-RS [30]	34
Şekil 3.13. ADECO-RS yöntemi aşamaları.....	35
Şekil 3.14. Tipik tünel delme makinesi bölümleri.....	37
Şekil 3.15. Tünel delme makinesi kalkan gösterimi	38
Şekil 3.16. Pabuçlu tünel delme makinesi	38
Şekil 3.17. İtme silindirli tünel delme makinesi	39
Şekil 3.18. Segment ve ring gösterimi	40

Şekil	Sayfa
Şekil 3.19. Segmentler arası bağlantı ve su yalıtım elemanı gösterimi 1/2	41
Şekil 3.20. Segmentler arası bağlantı ve su yalıtım elemanı gösterimi 2/2	41
Şekil 3.21. Kalkansız tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi [6]	43
Şekil 3.22. Tek kalkanlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi [6]	44
Şekil 3.23. Çift kalkanlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi [6]	46
Şekil 3.24. Hava basınçlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi [6]	47
Şekil 3.25. Pasa basınçlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi [6]	49
Şekil 3.26. Çamur basınçlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi [6]	50
Şekil 3.27. Su altı tünel yöntemleri gösterimi [31]	51
Şekil 3.28. Batık yüzer tipi tünel yöntemi aşamaları	52
Şekil 3.29. Batırma tipi tünel yöntemi aşamaları	53
Şekil 3.30. Örnek deniz altı tüneli gösterimi	54
Şekil 4.1. Tipik yüzey oturma eğrisi en kesit gösterimi [16]	57
Şekil 4.2. Tipik yüzey oturma eğrisi en kesit gösterimi [34]	58
Şekil 4.3. Yüzey oturmalarına etki eden genel faktörler [35]	59
Şekil 4.4. Mekanize tünel kazısı sebebiyle tünel içinde oturmaya sebep olan bileşenler [36]	60
Şekil 4.5. Konvansiyonel tünel kazısı sebebiyle tünel içinde oturmaya sebep olan bileşenler [37]	61
Şekil 4.6. Yüzey oturma eğrisi gösterimi – Tekil tünel [16]	64
Şekil 4.7. Yüzey oturma eğrisi gösterimi – İkiz tünel	66
Şekil 4.8. Boşluk yöntemi prensibi için tünel delme makinesinde alınan en kesit gösterimi	71
Şekil 4.9. Boşluk yöntemi prensibi a) Enjeksiyon öncesi durum, b) Enjeksiyon uygulaması sonrası durum [44]	71
Şekil 4.10. Gerilme azaltma yöntemi aşamaları [37]	72

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. Büzülme yöntemi aşamaları [37]	73
Şekil 4.12. Projede uygulanan aletsel ölçümler	75
Şekil 4.13. İzleme sistemlerine ait tipik gösterim.....	75
Şekil 4.14. Konverjans ölçüm örneği.....	76
Şekil 4.15. Ekstansometre ölçüm örneği.....	77
Şekil 4.16. Yüzey oturma ölçüm örneği	77
Şekil 5.1. Sonlu elemanlar yönteminde dikkate alınan analiz şeması	82
Şekil 5.2. Plaxis modelleme yöntemi a) Düzlemsel deformasyon yöntemi, b) Eksenel simetri yöntemi [51]	84
Şekil 5.3. Plaxis 2D zemin üçgenlemelerindeki düğüm noktaları	84
Şekil 5.4. Kaya ortamı – Analiz 5 Plaxis programı üçgenleme örneği.....	86
Şekil 5.5. Zemin ortamı – Analiz 10 Plaxis programı üçgenleme örneği.....	86
Şekil 5.6. Kaya ortamı – Analiz 1 ~ 5 Plaxis programı zemin modeli gösterimi	88
Şekil 5.7. Zemin ortamı – Analiz 6 ~ 10 Plaxis programı zemin modeli gösterimi	90
Şekil 5.8. Plaxis 2D programında plaka uygulama örnekleri	91
Şekil 5.9. Plaxis 2D plaka üçgenleme örneği	91
Şekil 5.10. Analizlerde dikkate alınan tünele ait geometrik özellikler	92
Şekil 5.11. Tünel segmentinin birbirine temas ettiği kalınlık h_j	95
Şekil 5.12. Kaya biriminde yapılacak analizler için taslak Plaxis 2D gösterimi	97
Şekil 5.13. Zemin biriminde yapılacak analizler için taslak Plaxis 2D gösterimi	98
Şekil 5.14. Tipik Plaxis modellemesi – Aşama 0: Geostatik durum	99
Şekil 5.15. Tipik Plaxis modellemesi – Aşama 1: Tünel kazılarının hacim kaybı verilerek yapılması ve kalıcı kaplamanın uygulanması	99
Şekil 5.16. Analiz 1 – Kaya ortamı – H=2D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi	100

Şekil	Sayfa
Şekil 5.17. Analiz 2 – Kaya ortamı – H=4D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi	100
Şekil 5.18. Analiz 3 – Kaya ortamı – H=6D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi	101
Şekil 5.19. Analiz 4 – Kaya ortamı – H=8D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi	101
Şekil 5.20. Analiz 5 – Kaya ortamı – H=10D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi	102
Şekil 5.21. Analiz 6 – Zemin ortamı – H=2D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi	102
Şekil 5.22. Analiz 7 – Zemin ortamı – H=4D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi	103
Şekil 5.23. Analiz 8 – Zemin ortamı – H=6D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi	103
Şekil 5.24. Analiz 9 – Zemin ortamı – H=8D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi	104
Şekil 5.25. Analiz 10 – Zemin ortamı – H=10D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi	104
Şekil 5.26. Ampirik yöntemde dikkate alınan analiz kesitleri	106
Şekil 5.27. Kaya biriminde yapılacak analiz (Analiz 2) için taslak Plaxis 2D gösterimi.....	111
Şekil 5.28. Zemin biriminde yapılacak analiz (Analiz 7) için taslak Plaxis 2D gösterimi.....	112
Şekil 5.29. Tipik Plaxis modellemesi – Aşama 0: Geostatik durum	113
Şekil 5.30. Tipik Plaxis modellemesi – Aşama 1: Tünel kazılarının hacim kaybı verilmeksizin yapılması ve kalıcı kaplamanın uygulanması.....	113
Şekil 5.31. Analiz 2 – Kaya ortamı – H=4D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi	113
Şekil 5.32. Analiz 7 – Zemin ortamı – H=4D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi	114
Şekil 6.1. Analiz 1 ~ 5 (Kaya ortamı) – Örtü yüksekliğine bağlı yüzey oturma eğrileri değişimi.....	115

Şekil	Sayfa
Şekil 6.2. Analiz 6 ~ 10 (Zemin ortamı) – Örtü yüksekliğine bağlı yüzey oturma eğrileri değişimi.....	116
Şekil 6.3. Analiz 1 ~ 10 – Örtü yüksekliği ve zemin birimine bağlı yüzey oturma eğrileri değişimi.....	118

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Roma’da bulunan su kemeri örneği.....	11
Resim 2.2. Londra metrosu görünüşü.....	13
Resim 2.3. New York metrosu görünüşü.....	14
Resim 2.4. Karaköy-Beyoğlu metrosu görünüşü.....	15

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Kaplamanın kesit alanı
a	Kaya kütlesi yüzey özelliklerine bağlı parametre
b	Kaplamanın genişliği
c	Kohezyon Mohr – Coulomb
cm	Santimetre
C_{ref}	Kohezyon Hardening – Soil
cm⁴	Santimetre üzeri dört
D	Tünel kazı çapı
d	İki tünelin merkez eksenleri arasındaki mesafe
D_i	Tünel iç çapı
D_o	Tünel dış çapı
E	Beton elastik modülü
EA	Eksenel rijitliği
EI	Eğilme rijitliği
E_{oed}^{ref}	Oedometre elastik modülü
E_{rm}	Zemin deformasyon elastik modülü
E_s	Tünel kazısı yapılan zeminin elastik modül değeri
E_{ur}^{ref}	Yükleme – geri yükleme elastik modülü
f_{ck}	Beton dayanımı
H	Örtü yüksekliği
h	Segment kalınlığı
h_j	Segment bağlantı bölgesindeki kesit kalınlığı
I_e	Eş değer atalet momenti
I	Kaplamanın normal kalınlığına bağlı atalet momenti
I	Beton Atalet momenti
I_j	Segment bağlantı bölgesindeki atalet momenti
i	Yüzey oturma eğrisi dönüm noktası tünel mesafesi

Simgeler	Açıklamalar
K	Zemin tipine bağlı katsayı
km	Kilometre
kN	Kilonewton
kPa	Kilopaskal
K₀	Sükûnet durumunda toprak basıncı katsayısı
mm	Milimetre
m (power)	Gerilme artışına bağlı rijitlik kontrol parametresi - MC
m	Metre
m_b	Kaya kütlesi bileşim parametresi
m_i	Kaya malzeme parametresi
m³	Metreküp
m⁴	Metre üzeri dört
MPa	Megapaskal
n	Segment sayısı
p₀	Geostatik durumdaki zemin gerilmesi
R	Tünel kazı yarı çapı
S	Tünel aksına x mesafede meydana gelen oturma değeri
S_m	Yüzeyde meydana gelen maksimum oturma değeri
t	Tabaka kalınlığı
V_L	Hacim kaybı yüzdesi
x	Tünel aksına olan mesafe
x_A	İlk açılan tünelin merkezinden x kadar mesafe
z₀	Tünel merkezinden yüzeye olan mesafe
°	Derece
β	Yük azaltma faktörü
ν	Poisson oranı
ψ	Dilatasyon açısı
φ	İçsel sürtünme açısı
γ	Zeminin birim hacim ağırlığı
γ_n	Zeminin doğal birim hacim ağırlığı
σ_{ci}	Tek eksenli basınç dayanımı
σ_s	Sürşarj yükü

Simgeler**Açıklamalar**

%	Yüzde
2D	İki tünel çapı
4D	Dört tünel çapı
6D	Altı tünel çapı
8D	Sekiz tünel çapı
10D	On tünel çapı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ADECO-RS	Kaya ve Zeminlerde Kontrollü Deformasyon Analizi
CEN	Avrupa Standartlar Komitesi
EPB	Pasa Basıncılı Tünel Delme Makinesi
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
GSI	Jeolojik Dayanım İndeksi
HB	Hoek – Brown
HS	Hardening Soil
ISO	Uluslararası Standartlar Organizasyonu
MC	Mohr – Coulomb
MR	Elastik Modül Oranı
NATM	Yeni Avusturya Tünel Metodu
SPB	Çamur Basıncılı Tünel Delme Makinesi
TBM	Tünel Delme Makinesi
TS500	Türk Standartları 500

1. GİRİŞ

Tüneller temel olarak insan ya da malzemenin bir yerden bir yere taşınma ihtiyacını karşılamak, taşıma hareketini daha kısa yoldan yapmak veya yeryüzündeki doğaya zarar vermeden taşımayı sağlamak amacıyla; yüzeyde var olan yolların pratik olmaması ya da yetersiz kalması nedeniyle oluşturulan yapılardır [1]. Genel olarak tüneller ulaşım için kullanılan yer altı geçitleridir ve su, kanalizasyon, yük, maden ve yolcu gibi şeyleri taşımak amacıyla kullanılabilirler. Tünellerin yapım süresi boyunca, yüzeyde var olan canlıların doğal yaşamını bozmadan ve yüzeydeki trafiği bölmeden bu işlem sürdürülebilir [2].

Günümüzde en çok ihtiyaç duyulan tüneller yolcu ulaşımını sağlamak amacı ile tasarlanan tüneller olarak nitelendirilebilir. Nüfusun fazla olduğu yerlerde toplumun alternatif ulaşım dallarına duyduğu ihtiyaç artmaktadır. Bu nedenle nüfusun gün geçtikçe artması ve teknolojinin ilerlemesiyle ulaşım sektörü tüm dünyada kritik bir rol oynamaya başlamıştır. Ulaşımında insanların kullandığı tünellerden bazıları karayolu ve demiryolu tünelleri olarak isimlendirilebilir. Özellikle demiryolu ulaşımında kullanılan ve raylı sistemlerden biri olan metro tünelleri kentleşmenin fazla olduğu şehirlerde çok büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir; yüksek yolcu kapasitesine sahip olması, dakik olması, hızlı olması, düşük enerji tüketimine sahip olması ve düşük maliyetli olması gibi [3].

Dünyada bulunan tüm metro ağları incelendiği zaman; 21. yüzyılın özellikle ilk 15 yılında metro altyapısının dünya çapında %40 büyüdüğü gözlemlenmiştir [4]. Ayrıca toplumlar son yıllarda daha çok kentleşmiş, metrolar daha kritik bir önem kazanmış ve bunun sonucu ise bazı istatistiklere bakıldığında şöyle görülmüştür; 2017 yılı sonunda toplamda 56 ülkede 182 şehirde günde ortalama 168 milyon yolcu taşıyan metrolar inşa edilmiştir. 2000 ile 2018 yılları arasında özellikle Asya'daki bazı ülkeler başta olmak üzere 75 yer altı metrosu açılmış ve bununla birlikte metro sistemlerinde %70 büyüme gözlemlenmiştir [5].

Tüneller birbirinden farklı geometrilerde, çaplarda veya formlarda olabilir ve birçok yöntem kullanılarak inşa edilebilir. Günümüzde bu yöntemlerden en yaygın kullanılanlar; aç-kapa metodu, tam mekanize kazı yöntemi (Tünel Delme Makinesi – TBM), konvansiyonel tünel yöntemlerinden; delme patlatma yöntemi, aşamalı kazı yöntemi (Yeni Avusturya Tünel Metodu – NATM) ve tam yüz kazı yöntemi (Yeni İtalyan Tünel Açma Metodu – ADECO-RS), su altında uygulanan; batık yüzer tünel, batırma tünel yöntemi ve deniz altı tünelleri,

olarak sıralanabilir. Hangi yöntemin kullanılacağı tasarımı yapılacak projenin maliyeti, proje süresi, konumu, güzergâhı, jeolojik koşullar, tünel-yapı etkileşimi ve yer altı su seviyesi gibi birçok etkene bağlıdır.

Şehir içinde, özellikle kalabalık ve gelişmiş veya gelişmekte olan yerlerde ulaşım için seçilen en popüler araç metrolar olmuştur. Bu sebeple metro projelerinde tüneller; yapılaşmanın sık olduğu konumlarda, erişilebilirliğin kolay olması için yüzeye yakın inşa edilmektedir. Bu durum dikkate alındığında metro projelerinde dikkat edilmesi gereken en önemli etkenlerden biri yüzeyde oluşacak oturmalar. Bu oturmaların kaynağı zeminde oluşan hareketlerdir.

Zemin hareketleri tünel inşasında kaçınılmazdır. Çünkü kazı yapılan bölgede bir boşluk oluşturup o boşluğun bire bir geri doldurmak mümkün değildir ve tünel çevresinde oluşan deformasyonun etkisi yüzeye kadar ulaşır yüzey oturmaları meydana getirir [6]. Bu oturmaların belirli bir limiti geçmemesi gerekmekte ve yüzeydeki yapılarda oluşacak oturmaların izin verilen sınırları aşmadan tünel kazılarının tamamlanması gerekmektedir. Yüzey oturmaları metro güzergâhı boyunca aynı miktarda olmamakta ve değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenlik ilgili yerdeki; jeolojik birime, yer altı su seviyesine, tünel üstündeki örtü yüksekliğine, tünellerin yerleşimine, kazı sıralamasına, operasyon kalitesine ve tünel üstündeki yapılaşmaya bağlıdır.

Bununla birlikte genel olarak yoğun yapılaşmanın olduğu metro projelerinde sık sık TBM ile tünel açma yöntemi tercih edilmektedir. TBM makinesi ile kazıda elde edilebilecek bazı avantajlar şöyle sıralanabilir; yüksek performans, düşük işçilik maliyeti, yumuşak zeminlerde hızlı ilerleme imkânı, maliyet verimliliği, devamlı operasyon imkânı, kazı sırasında düşük gürültüyle çevredeki yapılara rahatsızlık vermeden çalışma imkânı ve tünel uzunluğunun fazla olduğu projelerde maliyet açısından tercih edilebilecek en uygun tünel inşa yöntemlerinden biri olması [7].

Bu tez kapsamında TBM metodu ile açılan ikiz tünellerin; farklı jeolojik formasyonlarda ve farklı örtü yüksekliklerinde yüzeyde meydana getireceği oturmalar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yüzeyde oluşan oturmalar kıyaslanmış ve hangi durumlarda oturmaların arttığı ya da azaldığı örselenmiştir. Oturma farklılıklarının hangi faktörlere bağlı olduğu incelenmiştir. Bunun için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile birçok geoteknik

mühendisliği dalında kullanılan Plaxis 2D [8] bilgisayar programı kullanılmıştır. Analizler için literatür taraması yapılmıştır. Sonrasında analiz metodu belirlenmiş, analizlerde uygulanacak parametreler seçilmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Son olarak, elde edilen analiz sonuçları dikkate alınarak yorumlara ve sonuçlara yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Tünelcilik son zamanlarda özellikle Türkiye’de oldukça gelişmekte olan bir alandır. Dünya genelinde de tünel ile alakalı literatürde birçok veri bulunmaktadır. Aşağıda kronolojik sırayla önceki akademik çalışmalar hakkında bazı bilgilere yer verilmiştir. Ardından tünellerin tarihçesi ve geçmişteki önemli tüneller ile ilgili veriler paylaşılmıştır.

2.1. Önceki Çalışmalar

Bulut [9] Fevzi Çakmak mahallesi, Esenler, İstanbul’da gerçekleştirilen tünel kazı çalışmaları sırasında hali hazırda uygun standartlarda inşa edilmemiş ve oluşan ilave deformasyonlar nedeniyle boşaltılmış olan bir yapıdaki oturma değerlerini incelemiştir. Oturmaları üç boyutlu zemin programı Plaxis 3D [10] ve yapısal doğrulama programı Etabs [11] ile belirlemiştir. Analizlerden elde edilen verileri, ilgili bina üzerine ve bina çevresindeki zemine yerleştirilmiş olan deformasyon okuma aygıtlarından ölçülen veriler ile karşılaştırmış ve yapının hasar tespitini yapmıştır. İlk olarak tünel kazısına bağlı yapının eş değer ağırlığında elde edilen deformasyon değerlerini geoteknik bilgisayar programı yardımıyla belirlemiştir. Sonrasında ilgili deformasyon değerlerini yapısal analiz programında yapıya yer değiştirme yükü olarak etki ettirmiştir. Sonuçlara bakıldığında sahada okunan deformasyon değerleri ile analizlerden elde edilen değerler oldukça birbirine yakındır. Bu durum zemin-yapı etkileşiminin doğru şekilde modellenebildiğini göstermiş ve yapıya gelebilecek ilave zorlamaların bu şekilde belirlenebileceğini kanıtlamıştır.

Suwansawat ve Einstein [12] incelemiş oldukları bir çalışmada, ikiz tünellerin neden olduğu oturma havzası geometrisinin; jeolojik birim, tünel geometrisi, inşaat operasyonu gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğu için belirlemenin çok kolay olmadığını belirtmişlerdir. Araştırmaları için Bangkok’da yer alan bir tünel inşaat projesini esas almışlardır. TBM ilerleme parametrelerinin yüzey oturmalarında sebep olabileceği etkileri açıklamışlardır. Yüzey oturmalarını ilk etkileyen faktörün tünel ayna basınç değerleri olduğunu; düşük ayna basıncı uygulanırsa yüzeyde büyük oturmalarla sebep olabileceğini, yüksek ayna basıncı uygulanırsa da yüzeyde kabarma meydana gelebileceğini söylemişlerdir. Öte yandan, penetrasyon hızının da yüzey oturmalarındaki etkisini irdelermişlerdir. Araştırmalarına göre, normal şartlarda TBM operatörünün toprak basınç dengesini sağlaması için kazılıp atılan malzeme oranına bağlı penetrasyon oranını kontrol etmesi gerekmektedir. Eğer EPB tipi bir tünel

delme makinesinde kazılıp atılan malzeme oranı, penetrasyon oranından çok daha yüksek ise; kalkanın dolduracağı hacimden çok daha fazla bir hacim kazılmıştır ve bu durum da yüzeyde oturma meydana gelir. Fakat durum tam tersi ise; bu sefer kalkanın dolduracağı hacimden çok daha az bir hacim kazılmıştır ve bu durum da ise yüzeyde kabarma meydana gelebilir.

Hajebi [13] Otogar – Bağcılar Raylı Toplu Taşıma Sistemi projesinde jeolojik birim açısından kritik olduğu düşünülen bölgede tünel davranışının belirlenmesi için zemin deformasyonlarını farklı yaklaşımlar kullanarak incelemiştir. Bunun için TBM yerleşimi ve tünel derinliği verilerini, sahadan elde edilen yüzey oturma noktalarından ve bina oturma noktalarından elde edilen deformasyon ölçümlerini ve inklinometre – ekstansometre ölçümlerini dikkate alarak ampirik metotlarla yüzey oturma değerleri ve zemin hacim kayıp oranlarını belirlemiştir. Sonuç olarak ilgili bölgedeki jeolojik birimin sıkı kum ve çakıllı kil tabakalarından oluşması ve projede buna uygun olarak EPB tipi TBM yöntemi kullanılarak tünel kazılarının yapılması sayesinde güzergâh boyunca önemli bir geoteknik sorun oluşmamış, tünel kazısı nedeniyle oluşan hacim kayıpları ve buna bağlı meydana gelen yüzey oturmaları belirlediği değerler ile paralel olmuştur.

Doğruoğlu [14], Hajebi [13] ile aynı projenin Otogar – Kirazlı arasındaki bölümünde tünel kazısına bağlı yüzeyde oluşacak oturmaları incelemiştir. Bunun için ilk olarak Chow'un [15] tünel üstündeki yüzeyde meydana gelen oturma için belirlemiş olduğu ampirik bağıntısından yararlanarak deformasyon dağılımı elde etmiştir. Bunun sonuçlarına bakıldığında örtü yüksekliğinin dört tünel çapına kadar olduğu yerlerde sonuçların gerçekçi, daha fazla olduğu yerlerde ise gerçekten farklı olarak daha yüksek oturma değerleri elde edildiğini görmüştür. Sonrasında Peck'in [16] tünel kazısına bağlı yüzeyde oluşacak oturmayı tanımlamak için geliştirdiği bağıntıları kullanarak Gauss oturma eğrisini belirlemiştir. Bunun için sahada elde edilen oturma değerlerini hesaplamalarda bulmaya çalışmış ve farklı hacim kaybı değerleri kullanmıştır. Sahadaki ile benzer değerleri elde ettiği hacim kaybı oranlarını belirlemiştir. Bu yöntemde hacim kaybı eğer doğru belirlenir ise Gauss oturma eğrisi ile yüzeydeki oturma değişimi son derece başarılı bir şekilde tanımlanabilmektedir. Son olaraksa Plaxis 2D [8] programını kullanarak numerik analizler ile bina yüklerini dikkate alarak sondaj verilerine göre modellemeler yapmış ve oturma değerleri elde etmiştir. Yine sahada okunan deformasyon değerinin denk geleceği hacim kaybı oranlarını belirlemiştir. Bu koşullarda ise jeolojik parametreler ve yapılar doğru modellenir ise program çıktısında gerçeğe yakın

oturma değerleri belirlenebilmiştir. Tüm sonuçlar kıyaslandığı zaman bina yükleri sadece sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenen modelde dikkate alınabildiği için oturmaların en gerçeğe yakın Plaxis 2D [8] programı ile elde edildiğinden bahsetmiştir.

Yurtaydın [17] İstanbul’da yer alan iki tünelde TBM performanslarını araştırdığı çalışmasında, TBM’in ilerleme parametrelerinin kazı sırasında karşılaşılan jeolojik birimlere son derece bağlı olduğunu belirtmiştir. Teknolojinin ilerlemesi ile günümüzde tüm zemin birimlerinde kazı yapılmasının mümkün kılındığı fakat yine parametrelere bağlı olarak ilerleme koşullarında büyük farklılıklar gösterebildiğinden bahsetmiştir. Genel olarak penetrasyon hızı, itme kuvveti ve tork değerleri gibi makinenin performans parametrelerini incelemiş ve ilgili parametrelerin jeolojik koşullara göre değişkenlik gösterdiğini söylemiştir. İncelenen projelerdeki tünellerin kazısında elde edilen performans parametrelerine göre çoğunlukla kaya biriminde ilerlendiğinden bahsetmiştir. Çünkü kesici kafa devrinin bir problem yaşamadan yüksek olduğunu, bu koşullarda uygun itme kuvvetleri ile yüksek penetrasyon oranları elde edilmesi nedeniyle yumuşak kaya koşullarında kazıların yapıldığını ve son olarak tork değerlerine bakıldığında ise kazılan malzemenin yapışkan bir malzeme olmadığını öngörmüş ve projeler için uygun makineler seçildiğini söylemiştir. Sonuç olarak kazının yapıldığı jeolojik parametrelerin, makinenin ilerleme oranı üzerinde ciddi bir etkiye sahip olduğunu ve tünel açma makinesinin yanlış seçimi ile projede ciddi gecikmeler ve maliyet kayıpları gibi olumsuz durumlara sebep olabileceğini söylemiştir. Ayrıca TBM için projelerdeki yatırımın oldukça yüksek olduğunu ve bu nedenle jeolojik koşulların çok detaylı incelenmesi ve analiz edilmesi gerektiğini belirtmiş, iyi bir analiz sonucunda tünel kazısı sırasında yaşanacak zorluklardan kaçınılabılır ve ek maliyetlerin azaltılabilir olduğundan bahsetmiştir.

Eren [18] İstanbul’da Üsküdar Sahil – Sancaktepe arasında inşa edilen M5 metro projesi hakkında yaptığı bir çalışmada, NATM ve TBM yöntemleri ile kazılan tünellerde yüzeyde meydana gelen zemin reaksiyonlarını izlemeyi hedeflemiştir. Bunun için zemin ve bina duvarına oturma bulonları yerleştirmiş ve geometrik nivelman yöntemiyle ölçümler yapılarak deformasyonların analizini yapmıştır. Toplamda hem TBM hem NATM ile açılan tünellerin ikisinde de otuzdan fazla noktada deformasyonları belirlemiştir. Sonuçlara göre NATM kazısı nedeniyle oluşan deformasyon değerleri TBM kazısına göre oluşan deformasyon değerlerinden 3 kat fazla çıkmıştır. Araştırmasına göre elde ettiği bulgular şu şekildedir; kazı sonrasındaki 1 ile 2 gün içinde zemin hareketleri devam etmiştir,

yapılaşmanın yoğun olduğu yerlerde TBM yöntemi ile kazının daha uygun olduğunu belirtmiş, özellikle vadi bölgelerinde yapılan kazılarda sedimentli jeolojik birimlerden geçilmesi nedeniyle zeminin kendi kendini ayakta tutması oldukça güç olup bu nedenle vadi geçişlerinde TBM ile kazının daha uygun olacağından bahsetmiştir. Fakat maliyet sebebi ile TBM yani tam mekanize tünel açma makinesi uygulanamayan projelerde yapılacak mekanize kazı yöntemlerinden biri olan NATM kazılarında ise kazı mesafesinin kısa olması gerektiği ve tünel kazı destek sisteminin sık aralıklarla uygulanması gerektiğini öne sürmüştür.

Uluslararası Standartlar Organizasyonu [19] tarafından oluşturulan bir standartta geoteknikte sahada uygulanması gereken izleme sistemine dair bir şema verilmiştir. Şemaya göre zemin araştırması sonrası belirli güvenlik yaklaşımlarıyla uygulama tasarımı yapılır. Bu tasarımın yüklenici, müşavir ve işveren tarafından onaylanması ardından işin yapımına başlanır. Uygulama süresince var olan yapılar, yollarda ve uygulaması yapılıyor olan yapıda geoteknik ölçümler ile takibi sağlanır. Eğer var olan yapılarda problem yok ise ölçümler alınmaya devam ederek bu döngü devam eder. Fakat var olan yapılarda limitlerin üstünde oturmalar var ise uygulama tasarımı gözden geçirilir ve yeni tasarımla birlikte aynı prosedür tekrar uygulanır. Uygulaması yapılıyor olan yapı içinde aynı şey geçerlidir. Uygulama boyunca ölçümler limitler içinde kalır ise uygulama devam eder. Fakat limitten yüksek değerler sahada gözlemlenirse proje tasarımı gözden geçirilir. Tasarımda bir problem yoksa yapıma devam edilir fakat uygulama kalitesi incelenir. Eğer tasarım uygun değilse, tekrar bir tasarım yapılarak proje aynı prosedürlerden geçer ve proje bitimine kadar bu sistem bu şekilde ilerler.

Satıcı ve Topal [20] yayınlanmış oldukları bir çalışmalarında, tünelcilikte kullanılan yöntemlerin genel mantığının birbirine benzediğini belirtmişlerdir. Fakat yöntem ne olursa olsun, kazı yapılacak yerin tüm verilerinin doğru tanımlanması gerektiği ve uygun şekilde sayısal modellemeye dökülerek tasarımın yapılması gerektiğinden bahsetmişlerdir. Yaptıkları araştırmaya göre; analizlerden elde edilmiş olan sonuçların gerçekliği sahadaki ayna kazısı sebebiyle elde edilen deformasyonlar ile devamlı karşılaştırılmalıdır. Bilgisayar yazılımı her koşulda doğru ya da yanlış bir sonuç verecektir bu nedenle sonuçların çok iyi yorumlanması gerekmektedir. Eğer sahada elde edilen verilere göre deformasyonlar beklenenden farklı ise, modellemelerin gözden geçirilebileceği bir sistem ile kazı destek sisteminin kontrol edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Sojoudi [21] bir araştırmasında Ankara’da yapılan Tandoğan – Keçiören metrosunda alüvyondan geçen ikinci tüp kazısında göçükler meydana gelmiş ve bunların sebebini incelemiştir. Araştırma sonuçlarına göre, genel olarak meydana gelen göçükler yüzeyden iki ile on iki metre arasında bir derinliğe sahip olup altmış metreküp ile seksen metreküp arasında hacim boşalmaları yaşanmış ve göçmelerin bazıları yapıların altında meydana gelmiştir. Bunun sebebi tünel delme makinesinin kesici kafasında bulunan dişlerin aşınmış olması, ilerlemenin yavaşlaması ve EPB tipi tünel demle makinesinin ayna basınçlarının ayarlanamaması olarak belirtilmiştir.

Çınar [22] Mecidiyeköy – Mahmutbey Metrosu projesinde zemin ve kaya biriminde gerçekleştirilen EPB tipi tünel demle makinesi kazıları sırasında yüzeyde meydana gelen deformasyonları incelemiştir. Saha verilerine bakıldığında sık ve daha yoğun kentleşme olan bölgelerde yüzey ölçümleri sınır değerlerinin üzerinde kalmıştır. Bu sebeple ilgili projede deformasyonların yoğun olduğu yerlerde bulunan yapılardan bazıları denetim altına alınmış bir tanesi ise denetimli olarak yıkılmıştır. Sonrasında zemindeki boşlukların doldurulması ve zemin iyileştirmesi amacıyla enjeksiyon uygulamaları yapılmıştır. Yapılan enjeksiyonlar sonrası yine aynı makineler ile kazılara devam edilmiştir. İyileştirmeler sonrası kazılar incelendiğinde aynı formasyon ve aynı parametrelere sahip bölgelerde yapılan kazılarda deformasyonların sınır değerler altında kaldığı görülmüştür. Çalışmada binaların deformasyon grafikleri detaylıca incelenmiş ve maksimum deformasyonların sol tünel aksına denk gelen binalar üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum sebebiyle, sağ tünel kazısı sırasında zeminin örselendiği ve bu örselenme üzerine ikinci tünel kazısı da yapılırca sol tünelde tek tünelde elde edilecek olan deformasyonlardan daha fazla bir deformasyon elde edildiği verisine varılmıştır.

Zakaria ve diğerleri [23] yaptıkları çalışmada, TBM tüneli çevresindeki zeminde oluşacak gerilme ve oturma değerlerinin tahminini yapmışlardır. Araştırmalarına göre tünel inşaatı, kazılara yakın olan yapılarda kritik bir öneme sahiptir ve tünel açma nedeniyle oturma büyüklüğü ve dağılımının uygun bir tahmininin yapılması gerekmektedir. Çünkü kentsel bölgelerde tünel inşaatı sırasında yapılan kazı işlemi zemin hareketlerine neden olur. Son yıllarda kentsel ortamda ekonomik açıdan tüneller daha çekici hale geldikten sonra yumuşak zeminlerde kazı yöntemleri geliştirilmiştir. Örneğin, tünel açma makinesi (TBM) zemindeki yüzey oturmasını azalttığı için tünellerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca tünel inşaat yöntemi, yüzey oturmaları üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Tünelin farklı

kesitlerinde kullanılan çeşitli inşaat yöntemlerine göre yüzey oturmaları değişkenlik gösterir. Bu nedenle özellikle son zamanlarda; çeşitli zemin ve yapı davranışları, farklı yapım yöntemleri dikkate alınarak sonlu elemanlar metodu (FEM) analizi ile gerçeğe yakın bir şekilde modellemeler yapılarak yüzey oturmalarının doğru tahminin öngörülmesi popüler bir durum haline gelmiştir.

Forsat ve diğerleri [24] Tahran’da çakıllı kum biriminde kazısı yapılan bir metro hattı projesini dikkate alarak tek ve çift tüplü tünelleri Plaxis 3D [10] programında modellemiş ve sonuçları incelemişlerdir. TBM tüneli ile yapılan analizlerin sonucuna göre; maksimum oturma kalkanın sonundaki enjeksiyonun uygulandığı bölgede oluşmuştur fakat enjeksiyon basıncı miktarının oturmalarda bir etkisi olmamıştır. Araştırmalarına göre, ayna basıncı değerlerinin oturmalardaki etkisi kalkan sonunda uygulanan enjeksiyon bölgesinde meydana gelen oturmadan daha fazladır. Ayrıca iki tünel arasındaki mesafe otuz metreden fazla ise tünellerin birbirlerine olan etkilerinin yok olduğunu ve iki tünel arası mesafe bu değerden düşük ise ikiz tünel olarak analiz edilmesi, fazla ise iki farklı tek tüp tünel olarak analiz edilebileceğini söylemişlerdir.

Golser ve Steiner [25] yayınlamış oldukları bir çalışmada geoteknik izleme ve enstrümantasyon standartlarını incelemişlerdir. Gözlemsel yaklaşım kavramında izleme ve enstrümantasyonun tünel tasarımındaki öneminden bahsetmişlerdir. Makaleye göre 2013 yılından bu zamana kadar dünyada bu konu ile alakalı Avrupa’da CEN – Avrupa Standartlar Komitesince ve uluslararası ISO – Uluslararası Standartlar Organizasyonunca birçok izleme sistemi standardı geliştirilmiştir. 2020 yılına kadar genel kurallar, ekstansometre, eğimölçer ve piyezometre gibi uygulamaları kapsayan standartlar yayınlandığını, ilerleyen zamanlarda da başka standartların yayınlanacağını açıklamışlardır. Çalışmalarına göre; geoteknik projelerinin tasarımı yapılan bazı sondaj verileri ile sınırlıdır. Zemin ve kaya birimleri heterojen ve izotropik olmayan bir davranış sergilerler. Ayrıca zemin birimi ya da kaya biriminin dayanımı bölgeden bölgeye büyük değişkenlikler gösterebilir. Bu sebeple bilinmezlikler dikkate alındığında inşaat sırasında önemli riskler her zaman mevcuttur ve bu durum göz önüne alındığında kazı sırasında izleme sistemi ile deformasyon takibinin yapılması oldukça önemlidir.

2.2. Tünel Tarihçesi

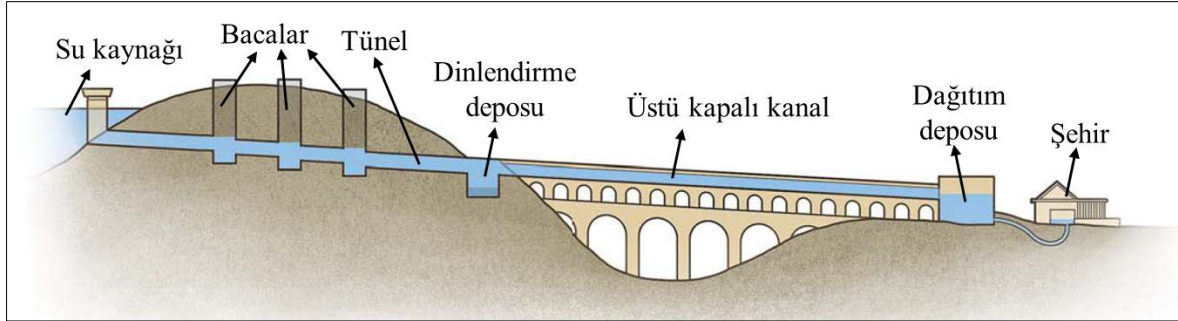
Tarihi milattan önceki yıllara kadar dayanmaktadır ve dört bin yıldan fazladır insanoğlunun hayatında yer almaktadır [3]. Bilinen bazı tüneller; mağaralar olarak ve sonrasında yer altı şehirleri olarak kabul edilebilir. Bunlar madenler, sığınaklar, mezar odaları gibi yerlerden oluşabilir. Barınma, tehlikeden korunma ve avlanan besinleri saklama amacıyla ilk tüneller sayılabilecek mağaralar ile tünellerin tarihi başlamaktadır.

Sonrasında ise antik çağlarda şehirlerin su kaynakları etrafına kurulmasına rağmen nüfusun artışı sebebiyle suyun yetmemesi ile suyun bir noktadan başka bir noktaya taşıma ihtiyacı doğmuştur. Bu nedenle suyun taşınması için bazı yapılar tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Resim 2.1’de görüldüğü üzere bunun en güzel örneklerinden biri Roma’da bulunan su kemerleri olarak belirtilebilir. Milattan önce 312 yılından, milattan sonra 226 yılına kadar günümüzde isimleri en çok bilinen on bir adet su kemeri Roma’da inşa edilmiştir. Bunlardan en uzununu yaklaşık doksan iki kilometre ile Acqua Marcia su kemeri olarak bilinmektedir. Normal şartlarda su kemeri deyince akla kilometrelerce uzanan yer yüzündeki yüksek yapılar gelir. Fakat örneğin Acqua Marcia su kemerinin sadece on bir kilometresi yer yüzünde inşa edilmiştir. Geriye kalan seksen bir kilometresi yer altında tüneller olarak inşa edilmiştir. Bu sayede hem erozyona karşı koruma sağlanmış hem de yüzeydeki yerleşim alanları etkilenmemiş ve ekonomik bir tasarım olmuştur.



Resim 2.1. Roma’da bulunan su kemeri örneği

Su kemerlerinin tasarımını yapan mühendisler bugünün isimlendirilmesi ile bazı şaflar tasarlamıştır. Bu bacalar; kazının yönünün şaşmamasını ve kazılan malzemelerin kazılan şaflardan çıkartılmasını sağlamıştır. Yine açılan şaflar sayesinde tünel kazısında çalışan işçilere havalandırma sistemi kurulması da hedeflenmiştir. Ayrıca gerektiğinde bakım yapılması için tünele ulaşım sağlaması amacıyla kazılan bacalar kullanılmıştır. Aşağıdaki Şekil 2.1’de örnek bir su taşıma sistemi için çizime yer verilmiştir. Günümüzde birçok kazım metodu ve tünel kazıları için özel makineler geliştirilmiştir. Fakat hala metro projelerinde ve yapılaşmanın olduğu bölgelerde şaflar açılarak tünel kazıları sağlanmaktadır. Bu da Roma’da açılan bacaların günümüz tünelciliğinin temellerini oluşturduğunun bir örneğidir.

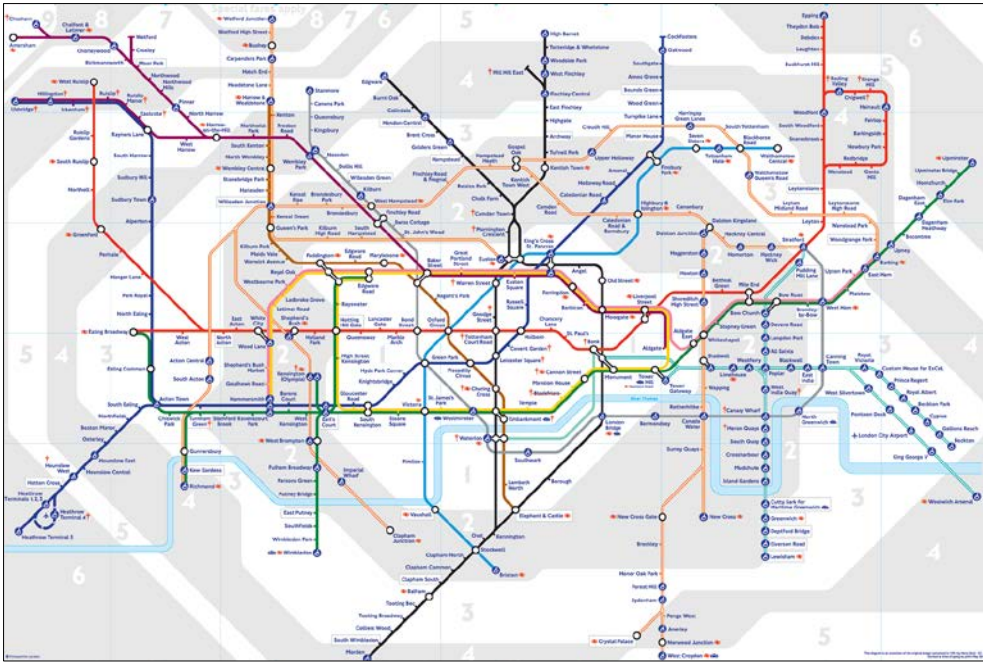


Şekil 2.1. Su taşıma sistemi örneği

Özellikle son dönemlerde önemli ihtiyaçlardan biri toplu taşıma sistemleri olmaktadır. Bu nedenle şehir içinde otobüs gibi yer üstünde ve metro gibi yer altında kullanılan toplu taşıma araçları bulunmaktadır. Birçok ülkede geçmişten bu zamana kadar hala kullanımda olan ve ek hatlar ile geliştirilen, tüm şehri dolaşan metro ağları bulunmaktadır. Bunların en önemlilerinden biri Londra metrosudur. Londra metrosu dünyada ilk yer altında bulunan metro sistemidir ve inşasına 1860’da başlanıp 1863 yılında kullanıma açılmıştır [26]. Açıldığı dönemdeki görünüşü Resim 2.2’de verildiği gibidir. Gün geçtikçe eklenen yeni hatlarla birlikte şu anda 402 kilometreden fazla uzunluğa ve 270’den fazla istasyon sayısına sahiptir. Şekil 2.2’de Londra metro ağına ait bir yerleşim planına yer verilmiştir.



Resim 2.2. Londra metrosu görünüşü

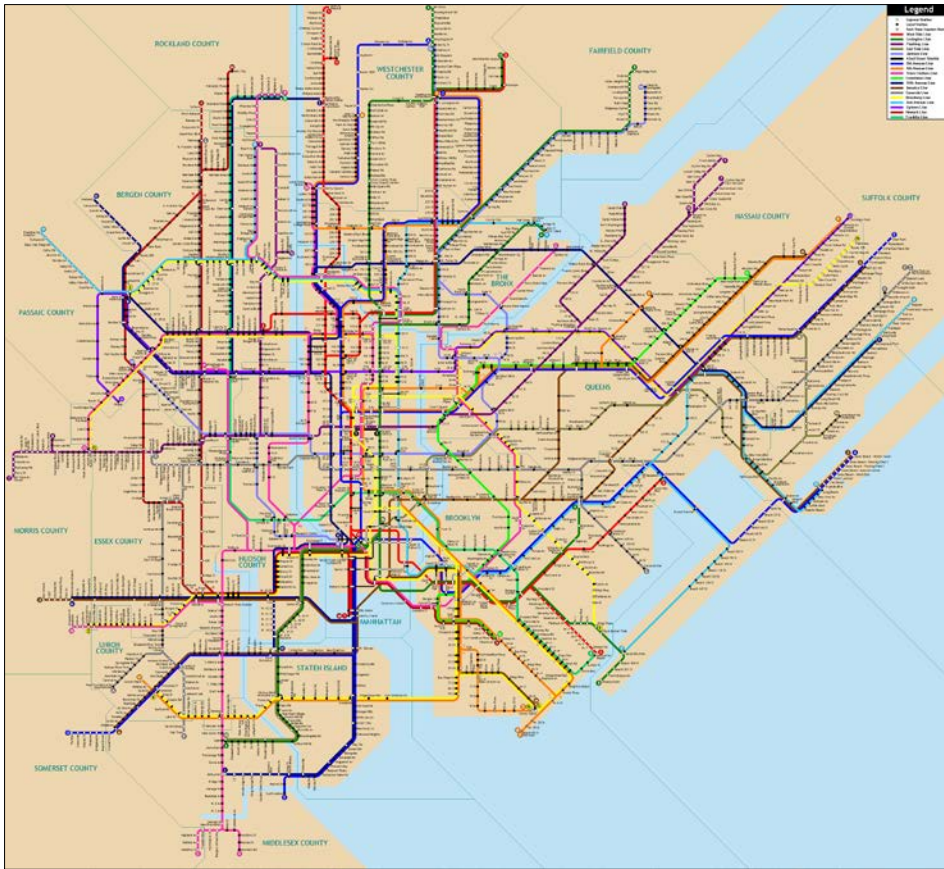


Şekil 2.2. Londra metro ağı planı

Avrupa'daki ilk metro 1896 yılında Budapeşte'de açılmıştır. 1900 yılında ise bu sırayı Paris izlemiştir. Amerika'da ise New York metrosu oldukça büyük bir metro ağıdır. 1904 yılında kullanıma açılmış ve 24 saat hizmet vermektedir [26]. Açıldığı dönemdeki görünüşü Resim 2.3'te verildiği gibidir. Toplamda 375 kilometreden fazla uzunluğa ve 422'den fazla istasyona sahip bir metro ağıdır. Aşağıdaki Şekil 2.3'te New York metrosuna ait bir yerleşim planı verilmiştir.



Resim 2.3. New York metrosu görünüşü

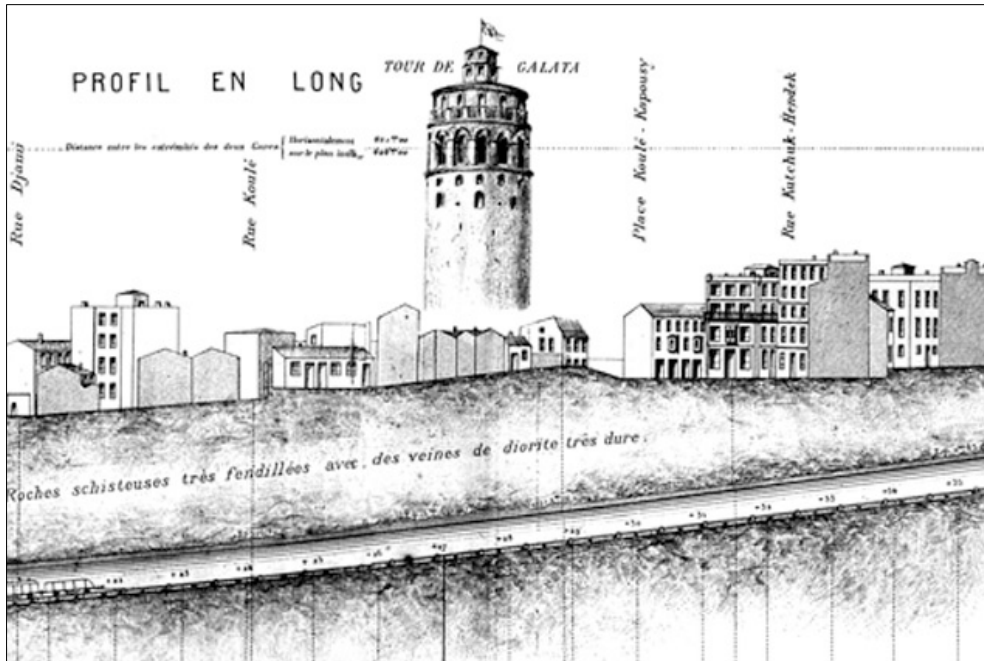


Şekil 2.3. New York metro ağı planı

Türkiye’de ise ilk yer altı ulaşım sistemi 1876 yılında İstanbul’da açılan Karaköy-Beyoğlu metrosudur. İnşası 1871 yılında başlayıp 1874 yılında bitmiştir. Toplam uzunluğu 573 metredir. Aşağıdaki Resim 2.4’te açıldığı dönemdeki görünüşüne bir örnek verilmiştir. Şekil 2.4’te projeye ait tasarlanmış tünel profil çizimine yer verilmiştir.



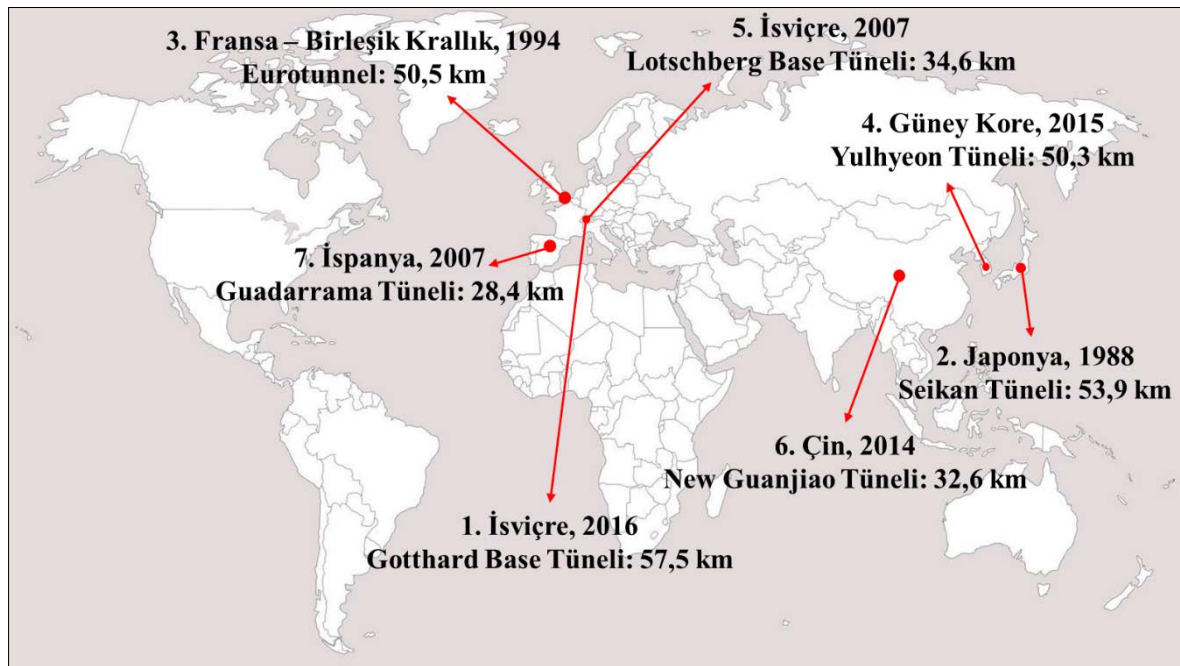
Resim 2.4. Karaköy-Beyoğlu metrosu görünüşü



Şekil 2.4. Karaköy-Beyoğlu metrosu profil çizimi

Karaköy-Beyoğlu raylı sistemi aslında bir föniküler taşıma sistemidir. Yani iki vagonun eğimli yerlerde kendi ağırlıkları ve bir çekme motoru ile birbirilerini hareket ettirebilmesi için kullanılan bir sistemdir. Birbirine halatlarla bağlanan vagonlardan birinin yukarı çıkması için diğer vagonun aşağı inmesi gerekmektedir. Bu sayede yukarı çıkan vagon, aşağı inen vagonun hızını yavaşlatmaya yardımcı olur. Aşağı inen vagonsa yukarı çıkan vagonu aşağı çekerek yukarı çıkmasına yardım etmektedir.

Gün ve gün ilerleyen teknoloji ile tünel inşasında kullanılan makineler ve sistemler de gelişmektedir. Ayrıca, tünel yapımı hakkında sahip olunan bilgi arttıkça tünel tasarımlarına olan eğilim de artmaktadır. Bunlara bağlı olarak, farklı çapta, farklı derinliklerde, farklı uzunluklarda ve farklı yapım yöntemi ile tüneller inşa edilebilir olmuştur. Buna örnek olarak aşağıda dünyada genelinde inşa edilmiş en uzun demiryolu ve karayolu tünelleri Şekil 2.5'te verildiği gibidir.



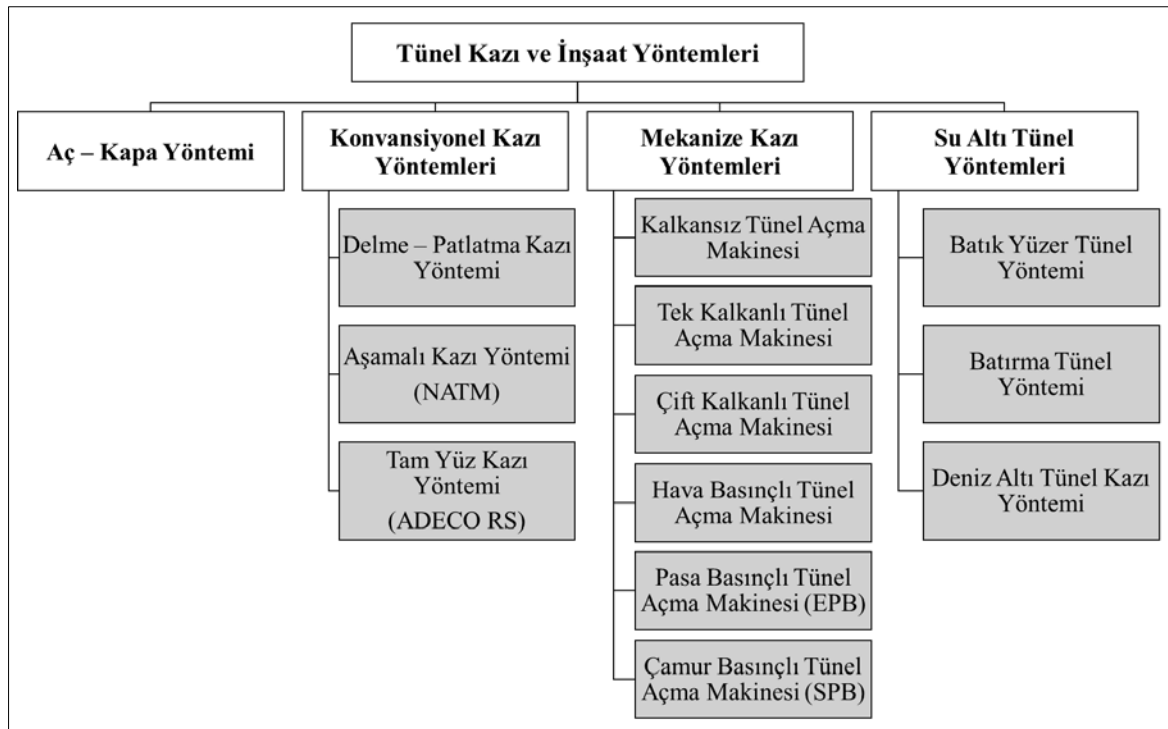
Şekil 2.5. Dünyadaki en uzun karayolu ve demiryolu tünelleri

Yukarıdaki verilere bakıldığında zaman tünelciliğin çok geçmiş tarihlerden bu yana insanların hayatında önemli bir etken olduğu anlaşılabılır. Bu durum milattan önce temel olarak erzak saklamak ve soğuktan korunmak için yapılan mağaralar ile başlayıp, sonrasında su, malzeme ve insan taşıma amacıyla kullanılması ile devam etmiştir. Zaman ilerledikçe teknoloji de ilerlemiş ve tünellerin yapım yöntemleri artmıştır. Bu sebeple günümüzde daha pratik

yöntemlerle kilometrelerce uzunluklarda tüneller açmak geçmiştekine göre daha kolay bir hal almıştır. Örneğin Londra ve New York metrosu gibi dünyada her gün yoğun olarak kullanılan metrolar; çok fazla hat sayıları, istasyonları ve seferleri ile yer üstündekinden tamamıyla farklı bir ulaşım ağı olma niteliğindedir. Bu durum öyle bir hal almıştır ki insanlar bir noktadan başka bir noktaya gitmek için günümüzde artık metroları alternatif bir seçenek olarak değil, ilk tercih olarak görmeye başlamıştır. Bir sonraki bölümde tünel açma yöntemleri hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir.

3. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

Koşullara bağlı olarak birçok tünel inşaat metodu günümüzde kullanılmaktadır. Uygulanacak projenin güzergahına ve jeolojik koşullara göre tünel açma metodu etkilenecektir. Tünel kazısı yapılamayacak kadar yüzeye yakın bir tünel inşa edilmesi gerekiyorsa, ya da örtü yüksekliği belli bölgelerde güvenli tünel kazısı yapamayacak kadar düşük ise o zaman aç – kapa kazı yöntemi seçilebilir. Bu yöntemde tünel açık kazı yapılarak zemine inşa edilir ve üstü kapatılarak oluşturulur. Bundan farklı olarak zemin altında herhangi bir açık kazıya ihtiyaç duymadan yatay yönde ya da belirli bir eğimle yer altında yapılan kazılarla yer altı tünelleri oluşturulur. Bunlara örnek olarak konvansiyonel ve tam mekanize kazı yöntemleri verilebilir. Su altından geçecek olan tüneller ise kazı ile açılırsa deniz altı tünel kazı yöntemi ile inşa edilebilir. Yüzeyde prefabrik olarak hazırlanıp batırılarak zemine yerleştirilir ise batırma tünel, zemine yerleştirilmez ve su içinde asılı kalırsa batık yüzer tünel olarak inşa edilebilir. Şekil 3.1’de görüleceği üzere birçok tünel açma metodu mevcuttur ve bazıları özetlendiği gibidir. Bir sonraki bölümde bu tüneller hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir.



Şekil 3.1. Tünel kazı ve inşaat yöntemleri

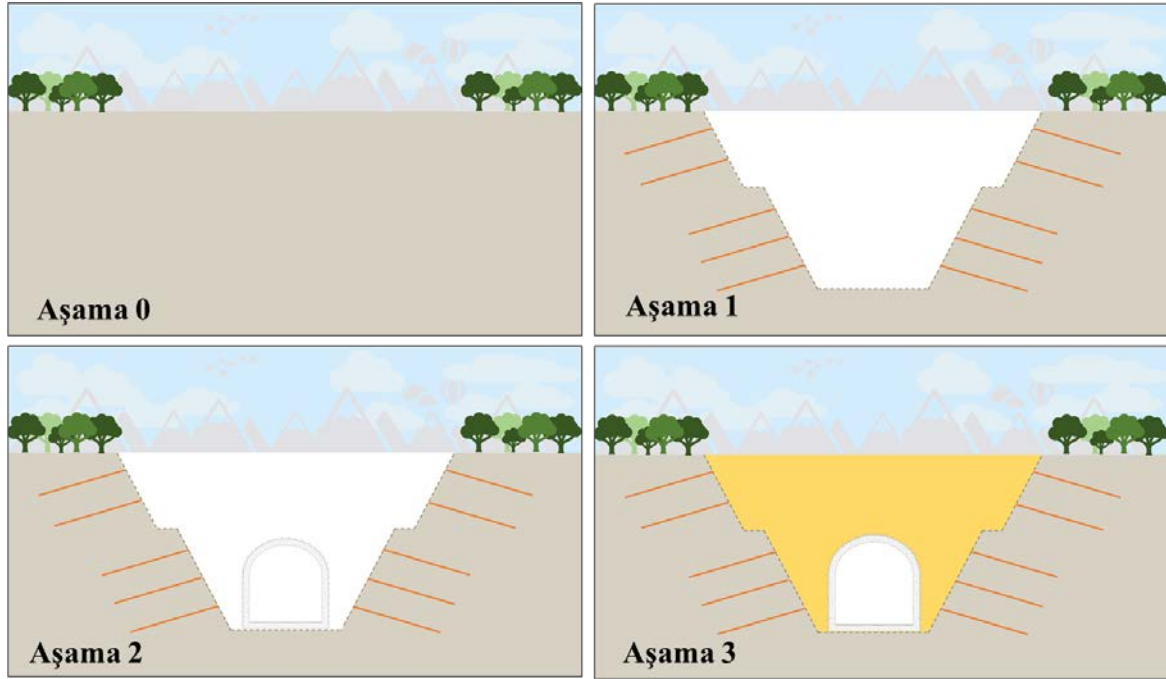
3.1. Aç – Kapa Yöntemi

Aç – kapa tünellerinin ana uygulama yöntemi şu şekilde açıklanabilir; zemine dikey uygulanan kazık veya diyafram duvarı gibi tutma elemanları yardımı ile hendek kazısı ya da arazi müsait ise şev ve palyeden oluşan yarma kazıları, yapı taban kotuna kadar yapılır. Ardından yerinde döküm ya da prefabrik olarak tasarlanan tünel yapısı yerleştirilir ve üstü kapanıp geri dolgu ile kazıdan önceki haline benzetilir. Aç – kapa yapıları on metreden sıkı tünelleri inşa etmek için kullanılabilir [27].

Aç – kapa yapıları tünel giriş ve çıkış portal bölgelerinde, demiryollarında, karayollarında ve metro istasyonlarında sıkça kullanılmaktadır. Normal tünellerden farklı olarak aç – kapa tünellerinin yüzeyde alana ihtiyaç duyması özellikle yoğun bölgelerde örneğin metro istasyon inşaatlarında daha zorlu olmaktadır. Çünkü kentleşmenin fazla olduğu bölgelerde yüzeyde projeye uygun düzenlemeler yapılması, trafik akışının düzenlenmesi, çevredeki yapıların güvenilirliğinin sağlanması ve mümkün olduğunca az bir yüzey alanının yapım süresince işgal edilmesi gerekmektedir. Fakat genelde projelerde portal bölgeleri, daha az yerleşkenin olduğu alanlarda inşa edilir ve bu sayede kent içinde tasarlanan aç – kapa yapılarından yapımı daha kolay tamamlanabilir.

Aç – kapa tünellerinin inşaatı genellikle; açık kazı olarak, aşağıdan yukarıya yöntemi ile ya da yukarıdan aşağıda yöntemi ile tamamlanmaktadır. Açık kazı yönteminde genelde demiryolu, karayolu gibi güzergâh projelerinde tünel giriş ve çıkışlarında uygulanan yöntemdir. Aşağıdan yukarıya yöntemde takip edilen aşamalar aşağıda sıralandığı ve Şekil 3.2’de gösterildiği gibidir:

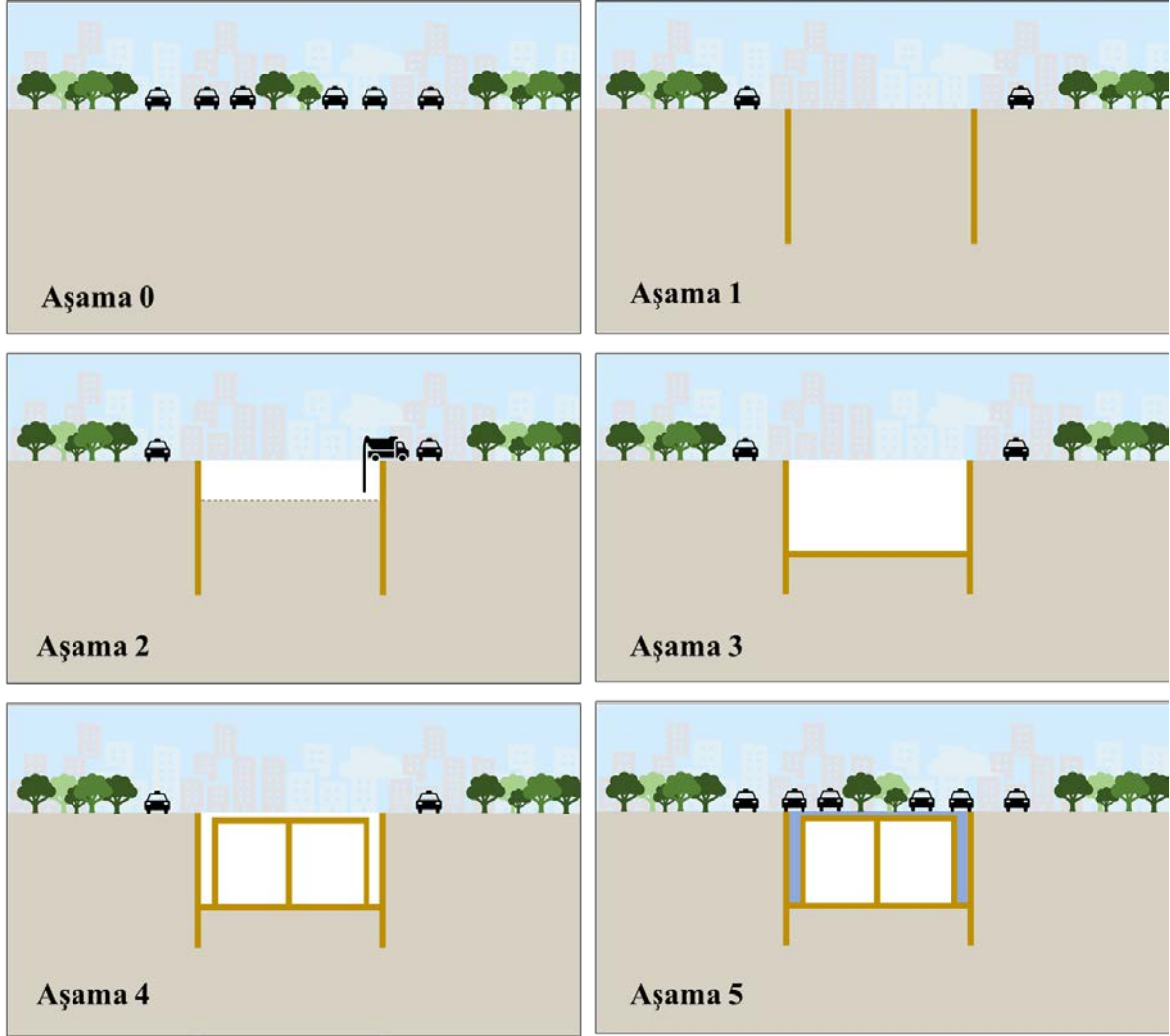
- Aşama 0: İnşaat öncesi hali hazırdaki yerleşim
- Aşama 1: Yan şevler ile kazının yapılması ve gerekirse şev korumalarının yerleştirilmesi
- Aşama 2: Aç – kapa inşaatının yapılması
- Aşama 3: Geri dolgunun uygulanması



Şekil 3.2. Açık kazı ile aç – kapa yöntemi aşamaları

Yüzeyde müsait bir alan olması ve projede izin verilen sınırların dışına çıkılmaması durumunda eğer jeolojik birim uygunsa yukarıdaki gibi açık kazılar ile aç – kapa yapısı tamamlanıp üstü kapatılabilir. Eğer kentleşmenin çok olduğu bölgelerde aç – kapa uygulaması yapılacak ise başka alternatifler dikkate alınmalıdır. Aşağıdan yukarıya yöntemde takip edilen aşamalar aşağıda sıralandığı ve Şekil 3.3'te gösterildiği gibidir:

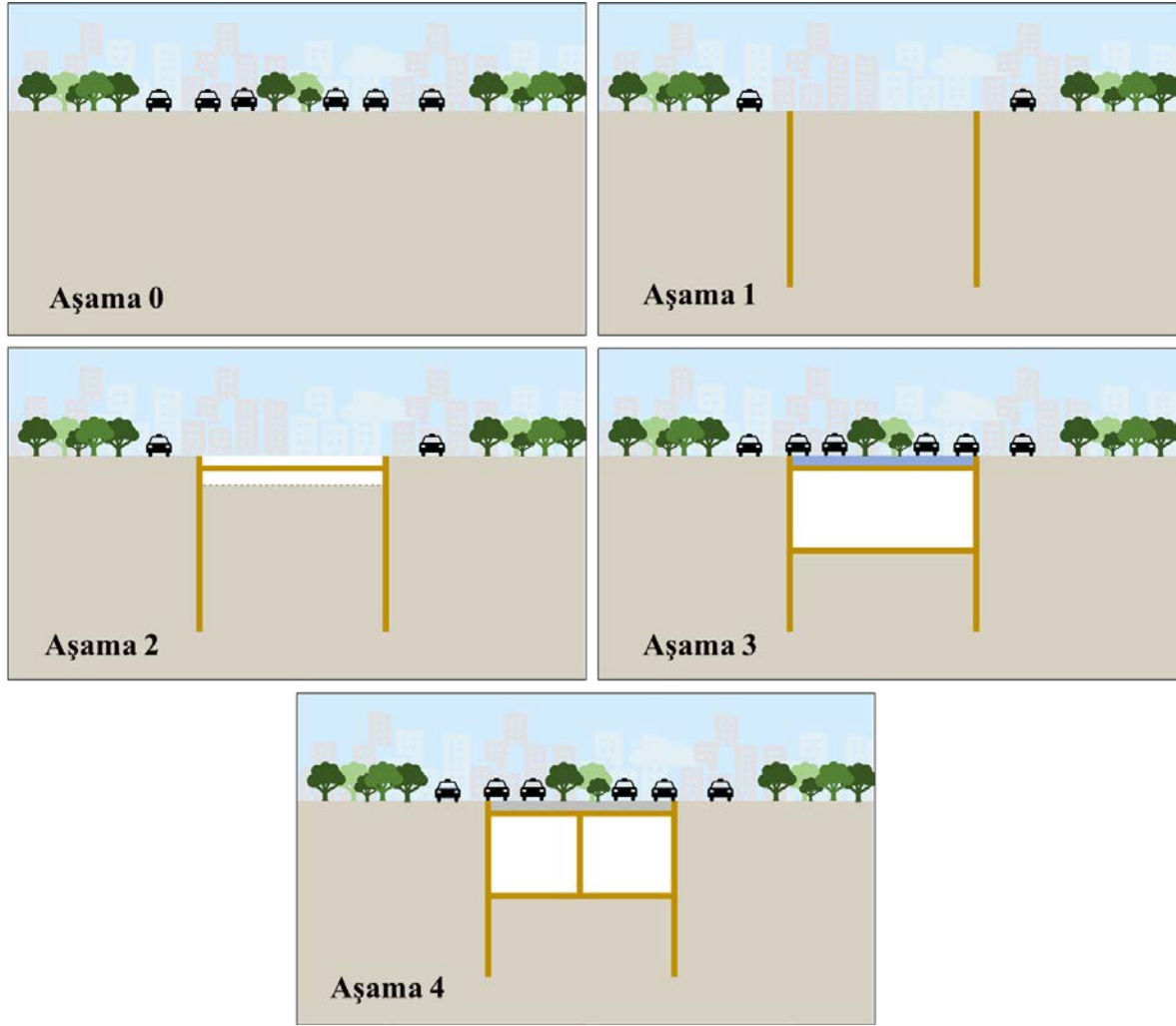
- Aşama 0: İnşaat öncesi hali hazırdaki yerleşim
- Aşama 1: Trafik akışının düzenlenmesi ve geçici destek duvarlarının inşası
- Aşama 2: Kazının yapılması ve su var ise drene edilmesi
- Aşama 3: Döşemenin inşası
- Aşama 4: Yapının inşasının duvar ve üst döşeme uygulaması ile tamamlanması
- Aşama 5: Geri dolgunun uygulanması ve trafiğin açılması



Şekil 3.3. Aşağıdan yukarıya aç – kapa yöntemi aşamaları

Bu durumda trafik inşaat süresince durdurulmak zorundadır. Bu sebeple zaman ve hız oldukça kritiktir. Yukarıdan aşağıya yöntemde takip edilen aşamalar aşağıda sıralandığı ve Şekil 3.4’te gösterildiği gibidir:

- **Aşama 0:** İnşaat öncesi hali hazırdaki yerleşim
- **Aşama 1:** Trafik akışının düzenlenmesi ve geçici destek duvarlarının inşası
- **Aşama 2:** Kazının üst döşeme uygulaması için ihtiyaç olan derinliğe kadar yapılması ve üst döşeme duvarının inşasının tamamlanması
- **Aşama 3:** Geri dolgu uygulaması, trafiğin açılması ve alt döşemeye kadar kazının yapılıp alt döşemenin inşa edilmesi
- **Aşama 4:** İç duvarların uygulamasının tamamlanması



Şekil 3.4. Yukarıdan aşağıya aç – kapa yöntemi aşamaları

Bu durumda trafik inşaat süresince sadece üst döşeme tamamlanana kadar ve üstü doldurulana kadar bölünür. Bu yöntem yoğun kentleşme bölgelerinde o yüzden oldukça faydalıdır. Bir sonraki bölümde konvansiyonel tünel açma yöntemleri hakkında bilgilere yer verilmiştir.

3.2. Konvansiyonel Tünel Açma Yöntemleri

Kazıların tamamının yer altında yapılacağı bölgelerde, konvansiyonel tünel açma yöntemi dünya genelinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Konvansiyonel tünel açma yöntemlerindeki temel uygulama mantığı tüm tiplerde birbiri ile aynıdır. Çalışma prensibi ilk olarak kazının yapılması, sonrasında kazı destek sisteminin uygulanması ve son olaraksa kalıcı kaplama yapımının tamamlanması ile tünel projesinin sonlanmasıdır.

Kazı destek sistemi, tüneli kazarken tünel çevresindeki zemini taşıyan ilk sistem olarak kabul edilir ve konvansiyonel tünellerde en kritik aşama kazı destek sistemi uygulama aşamasıdır. Çünkü kazı destek sistemi uygulaması sırasında hem tünel kazısı devam etmekte hem de tünelde kısa dönem stabilizasyonunu sağlamak için kazı destek sistemi malzemelerinin tünel aynası ve çeperine uygulanması gerekmektedir. Herhangi bir deprem durumunda kalıcı kaplaması uygulanmış olan bir tünelden beklenen performansı vermesi mümkün değildir.

Kalıcı kaplama ise statik ve sismik yükler altında tüneli uzun dönem stabil olarak bir problem olmaksızın ayakta tutacak, belirlenen servis ömrü boyunca üstüne gelen yükleri taşıyacak yapı elemanı olarak kabul edilebilir. Kazı destek sistemi kalınlığı ve kalıcı kaplama kalınlığı tünel geometrisi, örtü yüksekliği ve jeolojik koşullara göre oldukça değişkendir. Örnek vermek gerekirse kazı destek sistemi, çok iyi bir kayada on santimetre kalınlığından çok kötü bir zeminde rahatlıkla otuz beş santimetre kalınlığına kadar çıkabilir. Kalıcı kaplama ise; çok iyi bir kayada hiç uygulanmayabilir fakat projeden projeye bir metreden daha fazla bir kalınlığa kadar da çıkabilir.

Projelerde birinci adım olarak kazı destek sisteminin tasarımı yapılır. Bunun için ilk olarak tünelin desteksiz kalabildiği kazı adımı yani bir kerede en fazla tasarlanmış olan tünel kesitinde kaç metre ileriye kadar kazılabileceği; tünel geometrisi, jeolojik koşul, malzemenin plastikleşme özelliği gibi birçok etkene bağlı olarak belirlenir. Sonrasında ön görülen verilere göre çok sağlam ya da orta dayanımlı bir kaya ise delme-patlatma, parçalı kazı ya da tam yüz kazı yöntemi kullanılarak desteksiz maksimum gidilebilen bir kazı adımı için kazılar tamamlanır. Zemin biriminde ya da çok parçalı bir kayada ise aşamalı kazı ya da tam yüz kazısı ile bir kazı adımı için kazılar tamamlanır. Ardından tünel aynası ve tünelin desteksiz kazılmış olan bölgesi ilk sıra genelde yaklaşık olarak beş santimetre kalınlığında püskürtme beton ile kapatılır. Ardından var ise çelik iksa ya da kafes kiriş ya da hasır çelik tünel çevresine yerleştirilir ve ikinci sıra püskürtme betonu uygulanır. Son olarak da projeye göre var ise tünel aynasında, tünel kemer ve döşemesinde projeye bağlı olarak kaya bulonu, zemin çivisi, süren, şemsiye boru gibi destek sistemi elemanları uygulanır ve bir kazı adımı için kazı destek sistemi tamamlanmış olur. Kaya birimindeki kazılarda genelde hafif bir kazı destek sistemi kullanılabilir. Tünel çevresindeki kaya bloklarını yerine sabitlemek için kaya bulonları çakılabilir. Yine tünel aynasında kaya bloklarının düşmemesi adına bulonlar çakılabilir. Fakat kazı birimi zemin veya çok ayrılmış bir kaya ise o zaman tünel kazısı

yaparken kemer bölgesinde malzeme dökülmesi meydana gelebilir. Bu durum önlenmezse tünel kemerinde ve aynasında göçükler meydana gelebilir. Bunun için süren ya da şemsiye boru uygulaması ile kemerin üstünden tünel ilerleme yönüne doğru kemer geometrisine uygun olarak borular çakılıp enjeksiyon ile doldurulur ve tünel üstünde bir koruma bölgesi oluşturulup kazılar bu bölge altında yapılır. Bu durum çakılan boru uzunluğuna bağlı olarak birkaç kazı adımıyla bir tekrarlanmalıdır. Bir projede her zaman tek tip bir kazı destek sistemi uygulanmaz ve bu jeolojik koşullara göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin jeolojik birime göre on kazı adımı kaya için belirlenmiş bir kazı destek sistemi sonrasında ise zemin birimi için belirlenmiş bir kazı destek sistemi uygulaması ile devam edebilir. Bu proje tasarım aşmasında jeomekanik profile göre, sondaj verilerine ve geoteknik karakterizasyona göre belirlenir. Fakat sahada öngörülemeyen zonlar ile tünel kazısında karşılaşılma ihtimali yüksektir. Bu nedenle tünel içinde yapılacak okuma değerleri ile deformasyonların artışına göre gerektiğinde kazı destek sisteminin ağırlaştırılması gerekmektedir. Bu şekilde tünelde meydana gelebilecek göçüklerin önüne geçilebilir.

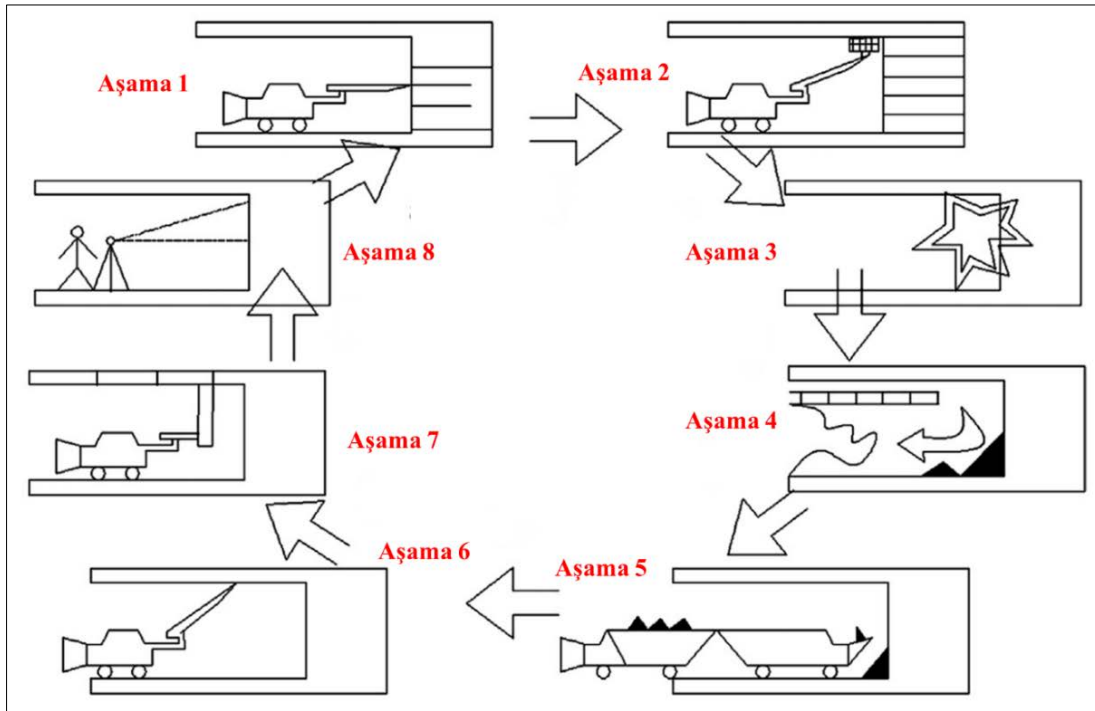
Kazı destek sisteminin hızlı ve çabuk uygulanması hem yüzeyde meydana gelecek deformasyonların minimuma indirilmesi için, hem de kazı öncesinde hiç dokunulmamış zeminin, kazı sonrası havaya maruz kalarak doğal nemini kaybetmemesi yani zemin dayanım özelliklerini kaybetmemesi için oldukça önemlidir.

Mekanize kazıların kendi içinde değişkenlik gösterse de kazı destek sisteminden belli bir mesafe sonra, jeolojik koşullara göre kalıcı kaplama uygulaması yapılır. Çok iyi kayalarda bazı projelerde kalıcı kaplama uygulamasına bile ihtiyaç duyulmayabilir. Kalıcı kaplama aşamasına geçildiğinde özel üretilmiş kalıplar kurularak ve donatılar yerleştirilerek beton dökümü gerçekleştirilir. Bir tünel uzunluğunca aynı anda beton dökümü yapılması mümkün değildir beton dökümü üretilen kalıpların uzunluğuna bağlı olarak dökülür. Bir kerede en fazla üretilen kalıp uzunluğunca beton dökümü gerçekleştirilebilir. Bu uzunluğa bağlı olarak dökülen her beton bloğu ile oluşan tünele ano adı verilir. Anolar arasında soğuk derz ile tünelin devamlılığı sağlanır ve su sızdırmazlığı için su tutucu kauçuk malzemeler yerleştirilir. Yine su sızdırmazlığının önüne geçilmesi için kalıcı kaplama ile kazı destek sistemi arasına su yalıtım malzemesi döşenir. Böylece kalıcı kaplama işleminin bitmesiyle tünelin kaba işleri tamamlanmış olur. Aşağıdaki bölümde konvansiyonel tünel açma yöntemleri hakkında bazı bilgilere yer verilmiş ve konvansiyonel tünel kazılarının uygulama aşamaları hakkında birtakım açıklamalarda bulunulmuştur.

3.2.1. Delme – patlatma yöntemi

Günümüzde artık klasik bir yöntem olarak görülen delme – patlatma yöntemi kaya birimlerinde yapılan kazılarda tercih edilmektedir. Kaya düşük dayanımlı veya yüksek dayanımlı olabilir. Bu işlem tünel aynasına yerleştirilen bir patlayıcı malzemesi kullanılarak kayanın parçalara ayrılması ile tamamlanan bir tünel kazı yöntemidir. Aşağıda bu yöntemin sahadaki uygulama aşamaları sıralanmış ve Şekil 3.5’te gösterilmiştir:

- **Aşama 1:** Projeye uygun olarak patlayıcı deliklerinin delinmesi
- **Aşama 2:** Patlayıcıların projede belirlenen tip ve miktarlarına göre deliklere yerleştirilmesi
- **Aşama 3:** Güvenli mesafeye geçerek patlatma işleminin uyarılar ile gerçekleştirilmesi
- **Aşama 4:** Patlatma sonrası havalandırma işleminin sağlanması
- **Aşama 5:** Patlatılan malzemenin toplanıp taşınması
- **Aşama 6:** Sağlam olmayan kayaların sökülmesi
- **Aşama 7:** Projede belirlenen kazı destek sisteminin ilgili kazı adımına uygulanması (varsa kafes kirişi ve/veya hasır çelik ile püskürtme beton ve varsa kaya bulonun uygulanması)
- **Aşama 8:** Ölçümlerin yapılması ve tekrar aynı işlemlerin bir aksilik olmaması durumunda devam etmesi



Şekil 3.5. Delme – patlatma yöntemi aşamaları [3]

Bu yöntemde en önemli etken kontrolsüz patlamalardan kaçınmaktır. Kullanılan patlayıcının miktarı ve türü gibi durumlara dikkat edilmezse kontrolsüz patlatma sonucu işçi güvenliği tehlikeye girebilir, gürültü, titreşim gibi sonuçlara sebebiyet verebilir, hatta beklenmedik göçükler tünel içinde meydana gelebilir. Özellikle kentsel bölgelerde çevredeki yapıların etkileneceği göz önünde bulundurularak delme ve patlatma uygulaması öncesi yer altında oluşacak titreşimlerin göz önünde bulundurulması ve olası etkilerin araştırılması gerekmektedir. Her projede hatta bir projenin kendi içinde bile kullanılan patlayıcı miktarı, kazılacak alan ve kazı şartları birbirinden farklıdır çünkü bu durumlar jeolojik koşullara ve çevresel koşullara göre değişiklik gösterir. Özellikle kısa tünellerde mekanize kazıda yapılması gerekenden daha düşük bir maliyet yatırımı yapılması gerektiği için sıkça tercih edilmektedir. Aynı zamanda kaya biriminde yapılan kazılarda mekanize kazılarda kullanılan kesici aletlerde yıpranma olduğu için sık sık değiştirilmesi gerekir ve bu da ekstra bir maliyet olarak projeye yansımaktadır ve delme – patlatma yönteminde böyle bir durum söz konusu değildir. Fakat mekanize kazılara göre daha yavaş ilerleme hızı olduğu için proje öncesinde bu durumun çok iyi analiz edilip ona göre makine seçimi yapılması önemlidir [27]. Bir sonraki bölümde aşamalı kazı yöntemi ile tünel açmanın prensiplerinden bahsedilmiştir.

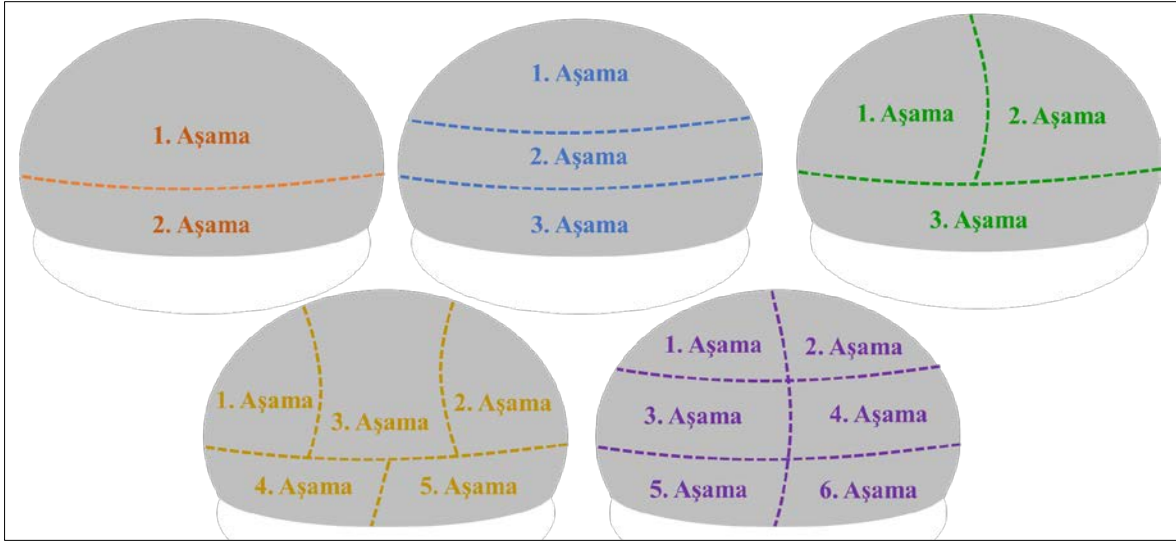
3.2.2. Aşamalı kazı yöntemi

Aşamalı kazı yöntemlerinden biri ve en yaygın kullanılanı yani Yeni Avusturya Tünel Metodu (NATM) dünyada, özellikle de Türkiye’de en çok kullanılan tünel açma metotlarından biridir. Her türlü jeolojik koşullarda uygulanabilir olması ve gerektiğinde hızlıca kazı sisteminde değişikliğe gidilebilip bu sisteme adapte olabilmesi önemli bir noktadır. Ayrıca kısa, fakat birden çok farklı tünel kesitinin bulunduğu özellikle metro projelerinde, bir tünel kesitinden diğerine hızlı bir şekilde adapte edilebilmesi büyük bir önem taşımaktadır. Bu da düşük maliyetle çalışma imkânı sağlamaktadır.

Metot kayanın kendi kendini taşıması prensibine dayanmaktadır. Yani amaç; kazı sonrası tünelde meydana gelecek birtakım deformasyonlara izin verip kayanın kendini taşımasını sağlamaktır. Bu şekilde tünel çevresindeki kaya birimi bir yük olmaktan çıkıp taşıyıcı eleman görevi görecektir. Bu sistemin iki hedefi vardır. Bunlar geçici destek sistemi uygulaması ile deformasyonları sınırlandırıp ve bu sayede tünel çevresindeki kaya basıncını düşürmektir. Buna bağlı olarak da deforme edilen kayanın basıncını tünel çevresindeki kayaya dağıtmaktır [28]. Deformasyonlara izin vermek için esnek bir destek sistemi

kullanılır. Bu şekilde kazı destek sistemine daha az yük binecek ve maliyet azalacaktır. Fakat izin verilen deformasyonların belirli limitleri aşmaması oldukça önemlidir. Deformasyonlar aşılsa tünel içinde problemler ortaya çıkabilir ve bu da yüzeye kadar yansıyabilir. İşçi güvenliği ve çevre güvenliği için deformasyonların çok düzgün takip edilmesi ve bir şekilde kontrol altında tutularak kazı yapılması oldukça kritiktir.

NATM tünelleri birden çok aşamalı kazı ile tamamlanabilir. Örneğin üst yarı ve alt yarı kazısından oluşabilir. Üç aşamalı hatta beş aşamalı ve daha fazla aşamalı kazıdan da oluşabilir. Bunlar için tipik en kesitlere Şekil 3.6'da yer verilmiştir.

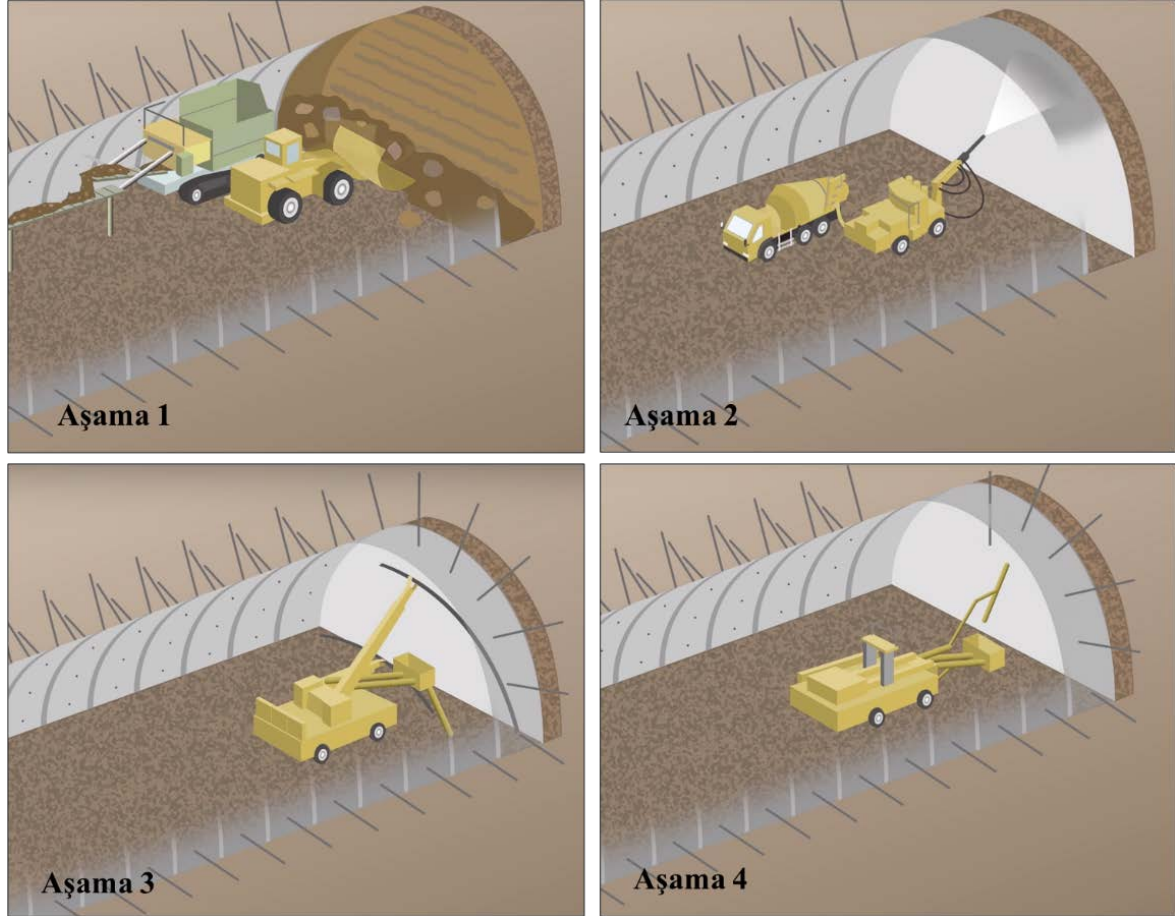


Şekil 3.6. Çok aşamalı tünel kazısı için tipik kazı aşaması gösterimi

Aşamalı kazının kaç parçalı olacağı jeolojik koşullara ve tünel geometrisine bağlıdır. Kazı sonrası yukarıda da bahsedilmiş olduğu gibi kazı destek sistemi uygulanmaktadır. Bunun için kullanılan ana malzemeler; püskürtme beton, kafes kiriş, çelik iksa, çelik hasır, kaya bulonu, zemin çivisi, şemsiye boru, süren gibi elemanlardan oluşmaktadır. Aşağıda kazı destek sistemi uygulanmasına dair örnek aşamalar sıralanmış ve Şekil 3.7'de yer verilmiştir:

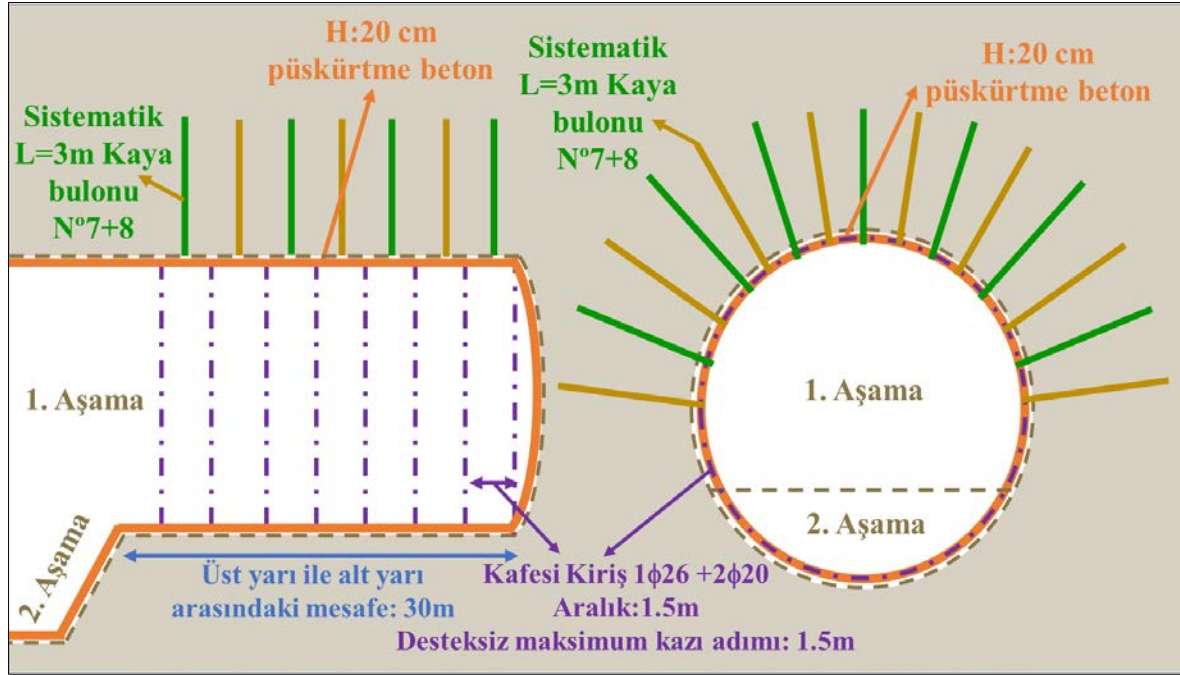
- **Aşama 1:** Üst yarı kazısının yapılması
- **Aşama 2:** İnce bir tabaka tünel kemeri ve aynasına püskürtme beton uygulanması
- **Aşama 3:** Tünel üst yarı kemerine çelik iksa ya da kafes kiriş yerleşimi, hasır çelik yerleşimi ve püskürtme beton uygulanmasının gerekli kalınlığa kadar tamamlanması
- **Aşama 4:** Var ise tünel ayna ve kemerinde kaya bulonu uygulaması

Bu aşamalar kaç parçalı ise kazı her parça için gerçekleştirilerek tünel kazıları ve kazı destek sistemi tamamlanmaktadır.



Şekil 3.7. Parçalı kazı yöntemi aşamaları [29]

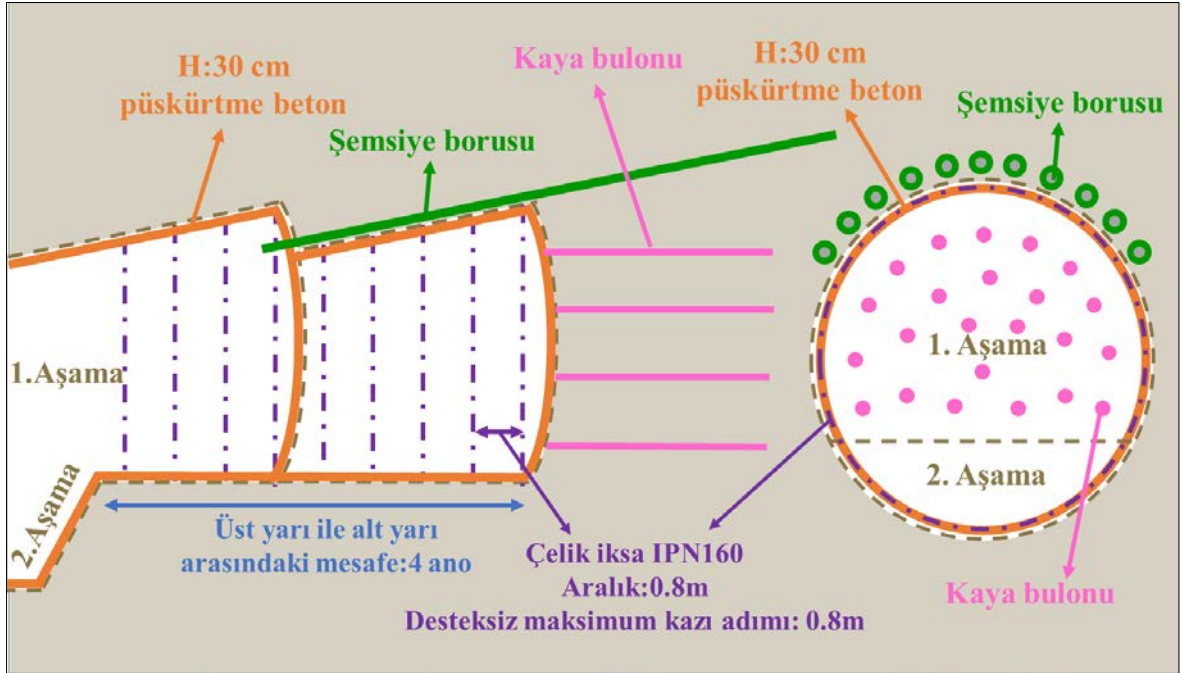
Kazı destek sisteminde kullanılan malzemelerin adedi, püskürtme betonun kalınlığı ne kadar artarsa ve iksa aralığı ne kadar azalırsa jeolojik koşullar paralel olarak o kadar elverişsiz gelmektedir. Ayrıca aşamalı kazılarda kazı mesafeleri ne kadar azsa o kadar zemin koşulları kötü demektir. Bunun sebebi istenenden fazla deforme olmasını engellemek amacıyla ringin kazı destek sistemi ile en kısa sürede kapanmasını sağlamaktır. Aşağıda az ayrılmış bir kaya biriminde yapılan kazı için Şekil 3.8’de, çok ayrılmış bir kaya birimi için Şekil 3.9’da ve nispeten oldukça kötü bir zemin biriminde yapılan kazı için Şekil 3.10’da uygulanabilecek kazı destek sistemlerine ait örnek en kesit ve boy kesit görsellerine yer verilmiştir.



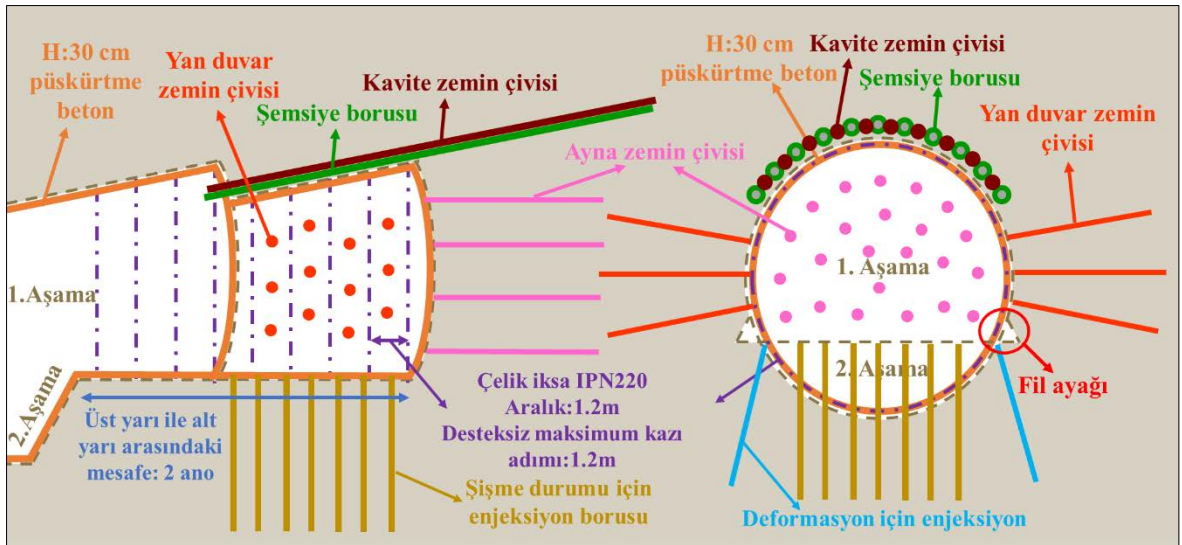
Şekil 3.8. NATM kazı destek sistemi gösterimi – az ayrılmış kaya birimi

Yukarıdaki şekilden görüleceği üzere tünel az ayrılmış bir kayadan geçmektedir. Bir kazı adımı yani 1,50 metre uzunluğu, kazı destek sistemless ilerlenebilecek maksimum mesafedir. Kayanın kendini tutabileceği ve dökülme olmayacağı düşünülerek tünel kemerinde korumaya ihtiyaç bulunmamaktadır. Desteksiz üst yarı kazısı sonrası, 20 santimetre püskürtme beton ve kafes kiriş yerleşim uygulamaları tamamlanır. Sonrasında ise kaya bulonları radyal olarak tünel kemerine çakılmaktadır. Bu işlem bir kazı adımı için bitince ikinci kazı adımına geçilir. Alt yarı kazısı projeye bağlı olarak bu örneğe göre 30 metre geriden takip etmektedir.

Bir sonraki örnekte tünel çok ayrılmış bir kayadan geçmektedir. Bir kazı adımı yani 1,20 metre uzunluğu, kazı destek sistemless ilerlenebilecek maksimum mesafedir. Tünel kemerinden kazı sırasında kaya dökülmesi meydana gelebileceği için tünelin her kazı anında bir şemsiye borular ile tünel üstünde koruma oluşturularak kazılara devam edilmektedir. Ayrıca tünel aynasında da aynı şekilde stabilizasyon problemleri oluşabileceği için her kazı anında bir aynaya kaya bulonu uygulaması öngörülmüştür. Üst yarı kazısı bir kazı adımı için tamamlandıktan sonra 25 santimetre püskürtme beton ve çelik iksa yerleşimi ile kazı destek sistemi uygulaması tamamlanır. Bu işlem bir kazı adımı için bitince ikinci kazı adımına geçilir. Alt yarı kazısı projeye bağlı olarak bu örneğe göre dört ano boyu geriden takip etmektedir.



Şekil 3.9. NATM kazı destek sistemi gösterimi – çok ayrılmış kaya birimi



Şekil 3.10. NATM kazı destek sistemi gösterimi – kötü zemin birimi

Yukarıdaki örnekten ise görülebileceği gibi tünel çok kötü, kil birimi içeren bir zeminde kazılmaktadır. Bir kazı adımı yani 0,80 metre uzunluğu, kazı destek sistemsiz ilerlenebilecek maksimum mesafedir. Tünel kemerinden kazı sırasında zemin dökülmesi meydana gelebileceği için tünelin her kazı anında bir şemsiye borular ve bu boruların arasından kavite zemin çivileri ile enjeksiyonlar uygulanarak aralar doldurulur ve tünel üstünde koruma oluşturularak kazılara devam edilir. Ayrıca tünel aynasında da aynı şekilde stabilizasyon problemleri oluşabileceği için her kazı anında bir aynaya zemin çivisi

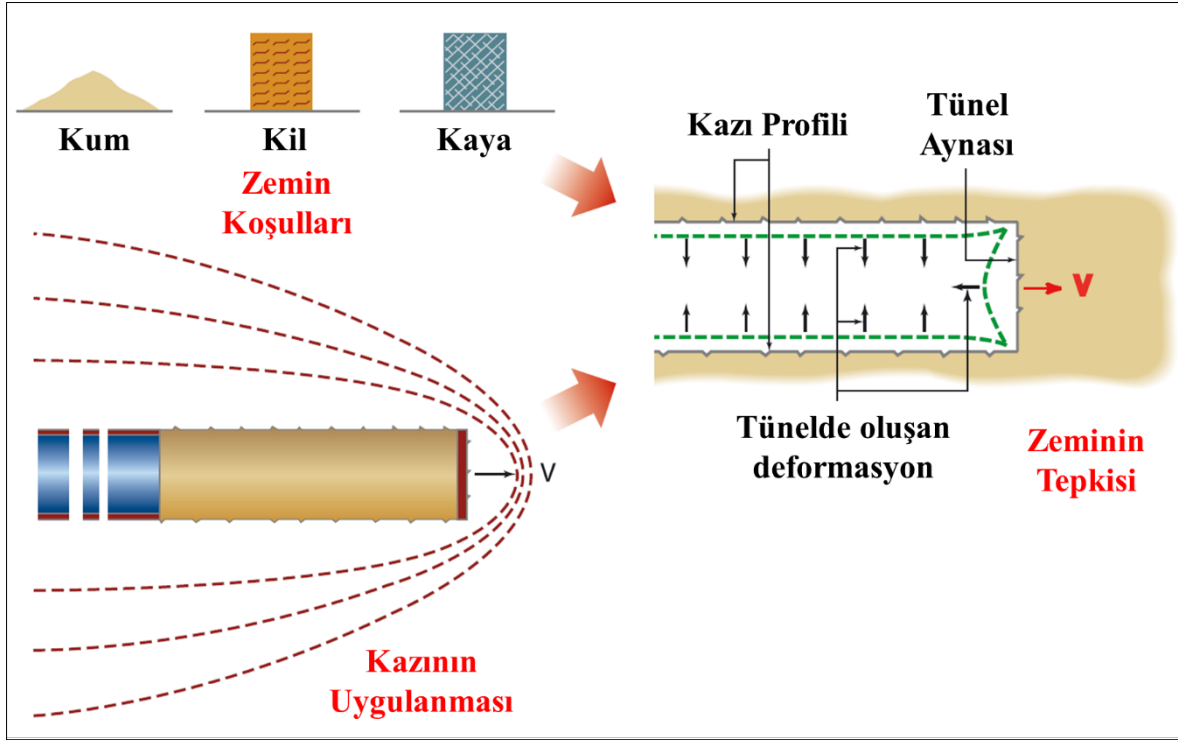
uygulaması öngörülmüştür. Bunlardan bağımsız olarak tünel yan duvarlarında tünelin düşey yöndeki ağırlığından dolayı meydana gelebilecek oturmaların önüne geçilmesi için zemin çivisi enjeksiyonu tasarlanmıştır. Üst yarı kazısı bir kazı adımı için tamamlandıktan sonra 30 santimetre püskürtme beton ve çelik iksa yerleşimi ile radyal kazı destek sistemi uygulaması yapılır. Kullanılan çelik iksalar fil ayağı ile birlikte tünel üst yarısına yerleştirilir ve yine düşey yönde hareketin azaltılması amaçlanır. Ayrıca fil ayaklarından uygulanan, deformasyon engelleyici enjeksiyon boruları sayesinde de oturmaların yavaşlatılması ve azaltılması planlanmıştır. Son olarak tünel üst yarı zemininde jeolojik birime bağlı olarak şişme durumu söz konusu olması durumunda o bölgeden yapılacak enjeksiyon boruları ile bu durumun da önüne geçilmesi sağlanır. Bu işlemler bir kazı adımı için bitince ikinci kazı adımına geçilir. Alt yarı kazısı projeye bağlı olarak bu örneğe göre iki ano geriden takip etmektedir.

Sonuç olarak kullanılacak ekipman seçimi jeolojik koşullara, tünel geometrisine ve ayrıca maliyete bağlıdır. NATM yöntemi mekanize tünel açma yöntemlerine göre daha yavaştır ve sürekli takibi gereken bir yöntemdir. İnşaat kontrolünün ve ölçümlerin çok sık alınması gerekmektedir. Ayrıca işçilik kalitesi son derece önemlidir ve kaliteli malzeme kullanılması doğru bir uygulama için kritiktir fakat her zemin tipinde uygulanabilirliği çok pratik olduğu için dünyada en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Bir sonraki başlıkta yine konvansiyonel tünel yöntemlerinden biri olan tam yüz kazı metodu hakkında bilgilere yer verilecektir.

3.2.3. Tam yüz kazı yöntemi

Tam yüz kazı yöntemlerinden biri olan Yeni İtalyan Tünel Açma Metodu (ADECO-RS) çok kötü zeminlerdeki ve düşük örtü yüksekliklerindeki tünel kazılarında elde edilen performansı nedeniyle, ek olarak da güvenli ve hızlı bir yöntem olması sebebiyle çok tercih edilmektedir. İlgili metoda göre güvenli tünel kazısı için 3 ana unsurun bilinmesi gerekmektedir. Bu unsurlar Şekil 3.11’de de verildiği gibi şu şekilde sıralanabilir:

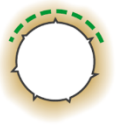
- Tünel kazısının yapılacağı zemin koşullarının belirlenmesi
- Kazı yönteminin belirlenmesi
- Kazıya bağlı zeminin tepkisinin belirlenebilmesi [30]



Şekil 3.11. Tünel kazısı için ilgili unsurlar – ADECO-RS [30]

Zemin tepkisi genel olarak tünelin aynası gerisinde başlar. Daha kazı yapılmamış bölge fakat kazıdan etkilenen bölge olarak da nitelendirilen çekirdek bölgesi içinde deformasyonlar oluşur ve bu hareketlenme tünel kazısının yapıldığı bölgede artış göstererek tünel içinde meydana gelen deformasyonları oluşturur. Çekirdek bölgesinde meydana gelen deformasyon tünel içindekinden daha az olmaktadır fakat bu deformasyonlar önlenemezse zeminde meydana gelen plastikleşme ile göçme yaşanır. Çekirdek bölgesinde meydana gelen deformasyonların üç sonucu olur. Bunlar aşağıda listelendiği gibi ve Şekil 3.12’de gösterildiği gibi şu şekilde belirtilebilir:

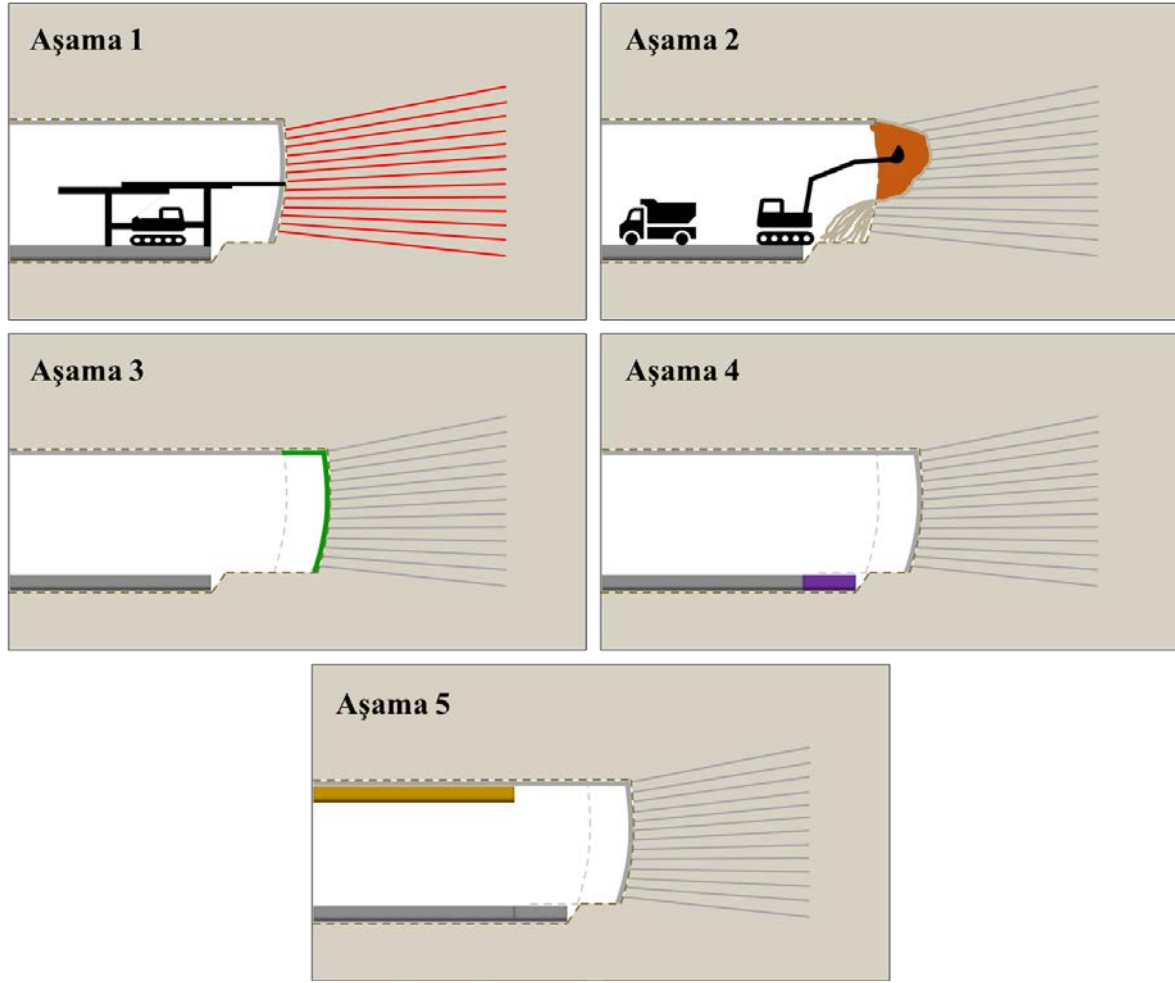
- Çekirdek bölgesinde meydana gelen minimum hareketlenme sayesinde; tünel içinde düşük deformasyon değerleri ile stabil bir tünel kazısının sağlanması
- Çekirdek bölgesinde meydana gelen hareketlenme sebebiyle tünel aynasında ve tünel içinde kabul edilebilir deformasyonlar oluşması ve kısa dönem stabil bir tünel kazısının yapılması
- Çekirdek bölgesinde kabul edilemez hareketlenmelerin meydana gelmesi sebebiyle tünel içinde ve aynasında yüksek deformasyon değerlerinin elde edilmesi ve stabil olmayan bir tünel kazısı sonrası göçük yaşanması [30]

Zemin Tepkisi	Tünel Profilinde Meydana Gelen Deformasyon	Tünel Çevresinde Meydana Gelen Davranış	Tünel Aynası Davranışı
Stabil			Stabil
Ayna Deformasyonu			Kısa dönem stabil
Göçük			Stabil olmayan

Şekil 3.12. Tünel çekirdek bölgesinde meydana gelen deformasyonlar – ADECO-RS [30]

ADECO-RS yöntemine göre tünel kazılarındaki en önemli unsur çekirdek bölgesinde başlayacak olan deformasyonların sınırlandırılmasıdır. Bunun için çekirdek bölgesinde bir ayna iyileştirmesi ile güçlendirme yapılır. Bu aynadan çakılan enjeksiyonlu cam elyaf elemanlar ile tamamlanır. Aynanın sağlamlaştırılması ile kazıda oluşacak deformasyonların azalacağı kabul edilir. Tam yüz kazısının çalışma prensibi sırasıyla Şekil 3.13'te de gösterilmiş olduğu gibi şu şekildedir:

- **Aşama 1:** Tünel aynasının güçlendirilmesi
- **Aşama 2:** Döşeme üzerinde makinelerin tünel içinde gidip gelmesini sağlayacak bölge harici bir kerede tüm tünel kesitinin kazısının yapılması
- **Aşama 3:** Tünel çevresine püskürtme beton ve iksa sisteminin, tünel aynasına da püskürtme beton uygulanması
- **Aşama 4:** Döşeme kazısı yapılarak tünel aynasına en yakın noktaya kadar döşeme kalıcı kaplamasının uygulanması
- **Aşama 5:** Belirli bir mesafede oturmalara izin vermeden kemer kalıcı kaplamasının uygulanması



Şekil 3.13. ADECO-RS yöntemi aşamaları

Metoda göre NATM gibi aşamalı kazılarda; üst yarı aynası, üst yarı tabanı ve alt yarı aynası birlikte çalışıp tek bir tünel aynası gibi davranmaktadır. Yani tünel aynası oldukça büyük bir alanı temsil eder. İlgili alanın hepsinin cam elyaf ya da ayna destek sistemi elemanı ile iyileştirilememesi deformasyonların başlıca sebeplerinden biri olarak kabul edilir. Bu yöntem sayesinde hem kazı hem de kalıcı kaplama bir kerede tamamlanır ve zamandan ciddi anlamda tasarruf edilir. Zemin koşullarının daha kötü olduğu ya da aşamalı kazı yöntemine göre bir seferde açılacak kazı aynası ADECO-RS metodunda daha büyük olsa dahi, sistemin çalışma mantığına göre tünel bölgesinde meydana gelecek oturmalar minimuma indirilerek güvenli bir kazı sağlanır. Tünel içindeki çalışma alanı aşamalı kazıya göre daha temiz ve daha düzenlidir. Fakat metot için özel makineler gerekir ve piyasada kolaylıkla bulunan cihazlar değildir. Bunun için projeye özel olarak makinenin bulunması gerekmekte ve bu da maliyet açısından yüksek olabilir. Aşağıda konvansiyonel kazılardan farklı bir uygulama sistemine sahip olan tam mekanize tünel açma yöntemlerinin birkaçı hakkında bazı bilgiler paylaşılmıştır.

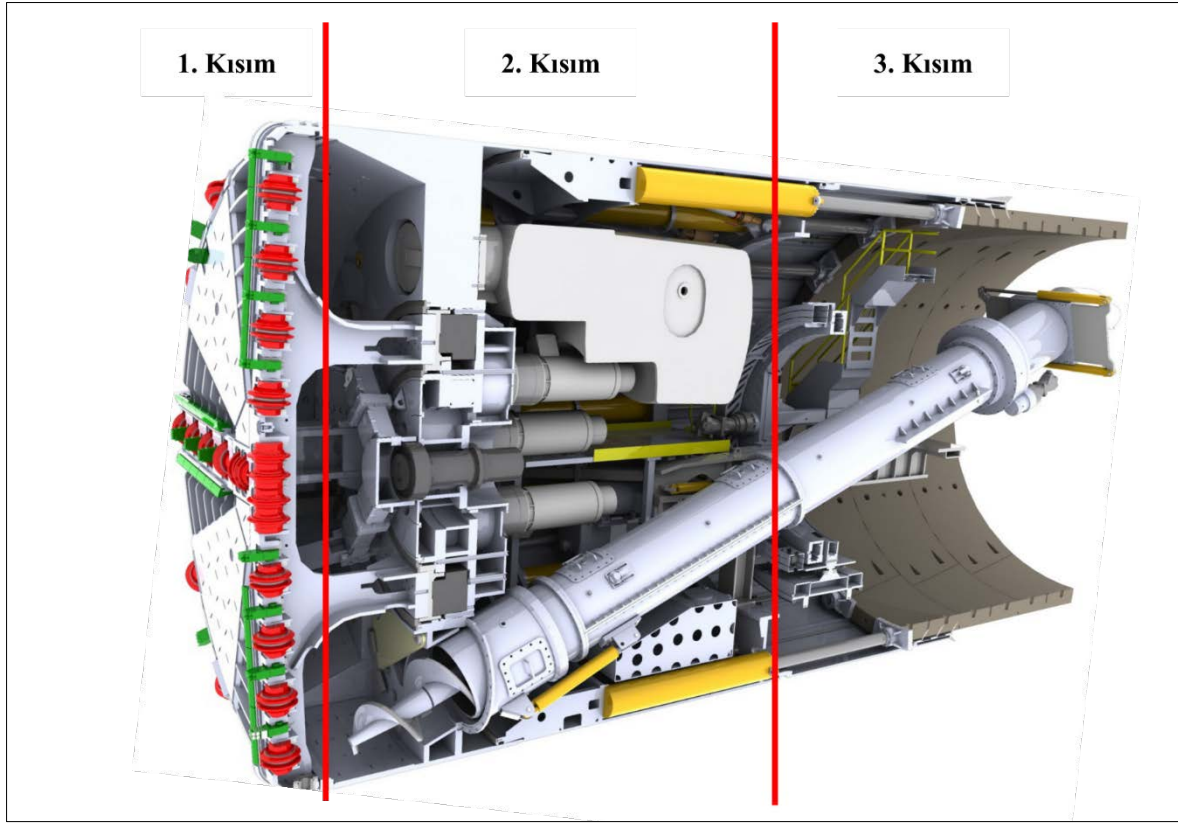
3.3. Tam Mekanize Tünel Açma Yöntemleri

Tünel delme makinesi (TBM) ile yapılan tünel kazıları mekanize tünel açma yöntemi olarak isimlendirilmektedir. Bunun sebebi tünel kazısının insan gücüne ihtiyaç olmaksızın bir makine tarafından yapıyor olmasıdır. Genelde dairesel kesitte ve 2,0 metreden, 15,0 metre çapına kadar kazı yapabilen tünel delme makineleri vardır. Bu yöntem ile tünel kazıları tüm formasyonlarda yapılabilmektedir.

Tünel delme makinesinin temel çalışma prensibi bir yandan tünel kazısını yaparken bir yandan da tünelin kaplamalarının uygulanabilir olmasıdır. Jeolojik koşullara göre çok iyi bir kayaysa önden sadece püskürtme beton uygulaması ve/veya kaya bulonu uygulaması ile tünel kazısı bitip sonradan gerekirse kalıcı kaplaması uygulanabilir. Fakat tünel kazısı çok iyi bir kayadan geçmiyorsa o zaman kazı ile paralel olarak kalıcı kaplama uygulaması ile tünel yapımı tamamlanabilmektedir.

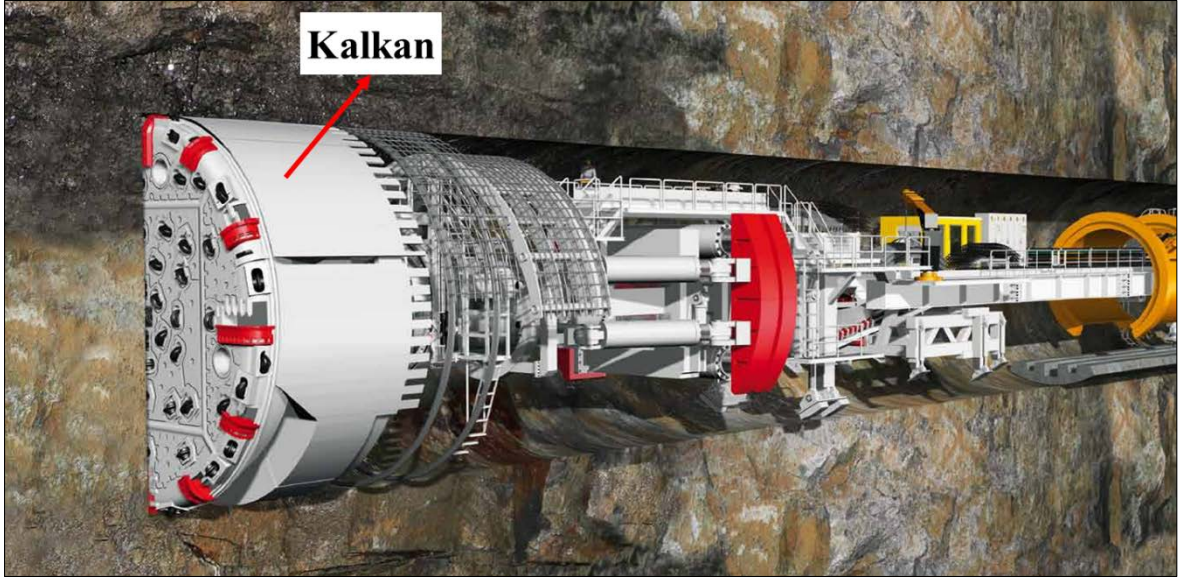
Tünel delme makinesinin ön kısmı üç ana bölümden oluşmaktadır. En önde kesici dişlerin bulunduğu kısım olan kesici kafa vardır. Onun arkasında makinenin tipine göre değişiklik gösteren kalkanlı, yarı kalkanlı ya da kalkansız olmak üzere makinenin ana bileşenlerini içeren ekipmanların bulunduğu kısım vardır. Son kısım ise tünelin ilerlemesini sağlayan pabuç ya da itme silindirlerinin olduğu bölümdür. Aşağıda tipik bir tünel delme makinesinin bölümlerinin gösterildiği bir görsele Şekil 3.14'te yer verilmiştir.

Tünelin en önünde bulunan kesici diş ile tünel kazısı yapılır. Kazı, makineye operatör tarafından belirli bir itme gücü ve dönme hızı vermesiyle tamamlanır. Kazılan malzeme bir sistem ile tünelin kesici kafanın olduğu bölgeden tünel içine toplanır ve oradan da dışarıya nakledilir. Her projeye göre zaman aralığı değişse dahi, kesici dişlerin uygulama sırasında bakımlarının yapılması ve değiştirilmesi oldukça önemlidir.



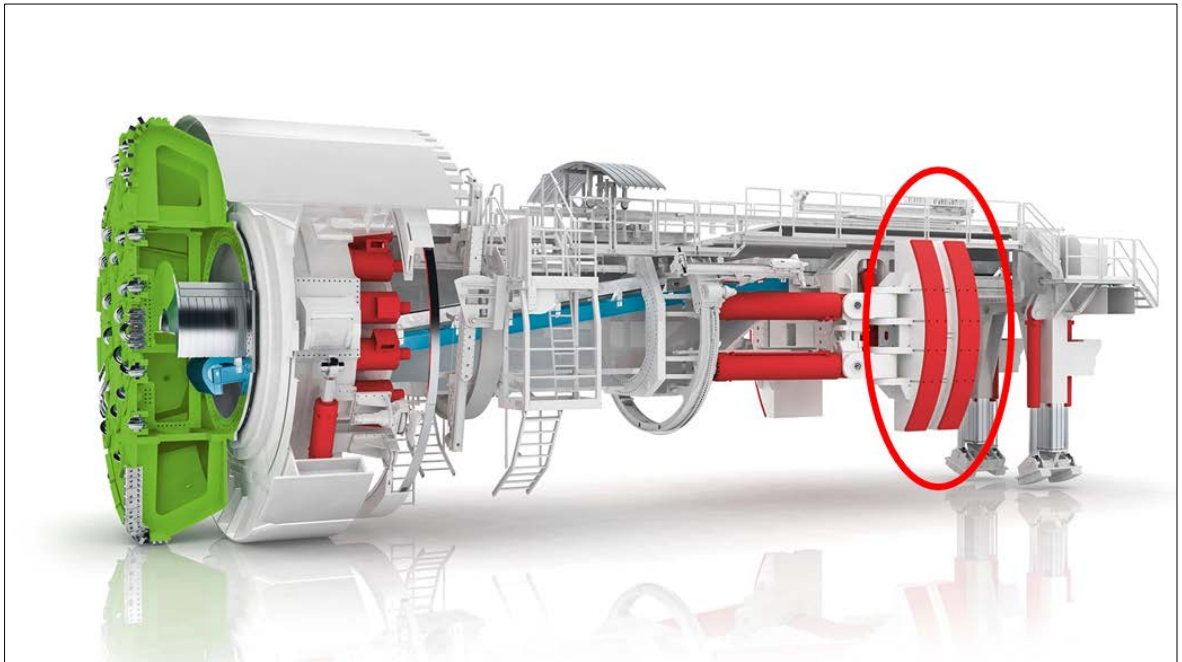
Şekil 3.14. Tipik tünel delme makinesi bölümleri

İkinci kısım yukarıda bahsedildiği gibi makinenin ana bileşenlerini içeren ekipmanların olduğu bölümdür ve var ise kalkan diye nitelendirilen kısımda bu bölümde bulunmaktadır. Eğer TBM tipi kalkanlı ise, kesici diş arkasında bulunur ve malzemenin dökülmesini engeller. Ayrıca kesici dişler ile kazılan alan, neredeyse kalkanın kapladığı alan ile aynı olmaktadır. Bu sebeple zeminde sadece ufak bir deformasyon ile kaplama yapılana kadar kalkan ile zeminin stabilizasyonu ve deformasyon olmasına izin vermeden ilgili bölgede koruma sağlanır. Tüm makinelerde kalkan olması zorunlu değildir. Çok iyi kaya birimlerinde ihtiyaç duyulmayabilir. O durumda kalkansız tünel delme makineleri kullanılabilir. Aşağıda kalkan gösterimine Şekil 3.15'te yer verilmiştir. Ayrıca bu bölümde jeolojik koşullara bağlı olarak tünel aynasında kazıya bağlı oluşabilecek stabilizasyon sorununun önüne geçmek için aynada basınç uygulanıp uygulanmayacağının kararı verilmelidir. Tünel aynasında basınç uygulanmadan kazılar yapılacaksa buna açık modda kazı denir. Bu, genelde kaya gibi aynada stabilizasyon problemi olmayan zeminlerde kullanılır. Eğer tünel aynasında stabilizasyon sorunu olarsa kapalı modda kazı yani tünel aynasına basınç uygulanarak ayna stabilizasyonunun sağlanması ile kazı yapılır. Bu daha çok ayrışmış kaya ve kil gibi zemin birimlerinde meydana gelmektedir.

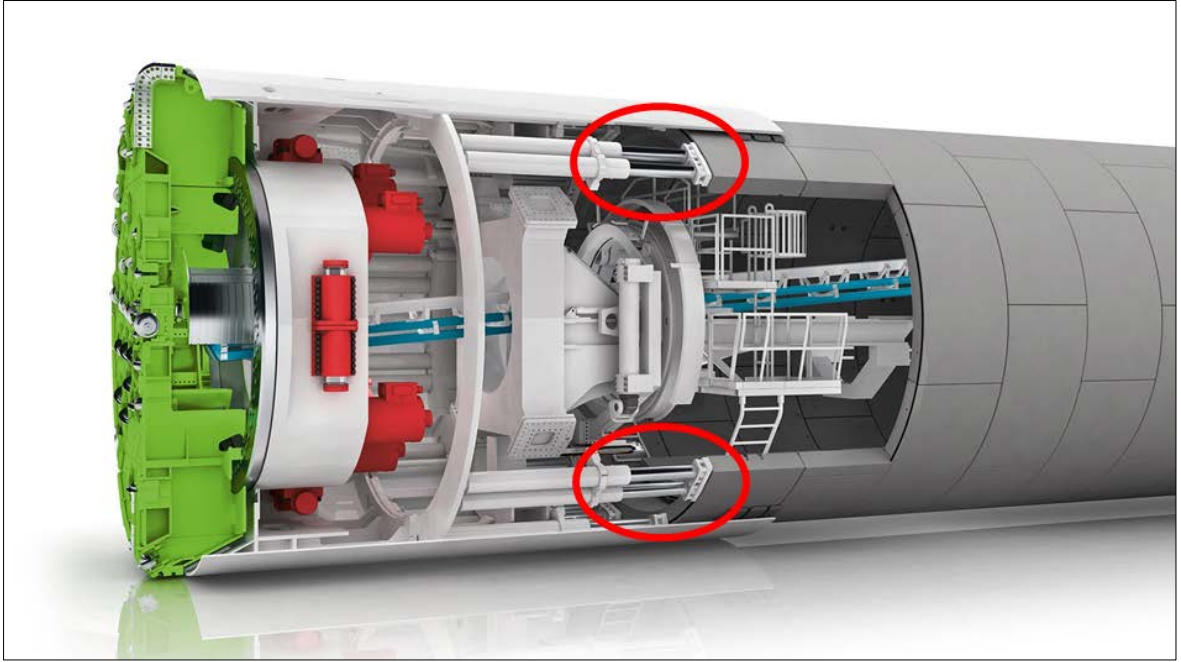


Şekil 3.15. Tünel delme makinesi kalkan gösterimi

Son kısım ise tünelin ilerlemesi için bulunan mekanizmadır. Makine tipine bağlı olarak ilerleme; özellikle iyi kayalarda pabuçlarla, geri kalan birimlerde ise itme silindirleri ile sağlanmaktadır. Pabuçlar; mekanik ayaklarla kazılan bölgedeki yan çeperlerden destek alarak makinenin ilerlemesini sağlar. İtme silindirleri ise tünelin en son döşenmiş olan kalıcı kaplamasına mekanik ayakları basarak ileri doğru hareketi sağlar. Bu iki mekanizma için örnek gösterime Şekil 3.16’da ve Şekil 3.17’de yer verilmiştir.



Şekil 3.16. Pabuçlu tünel delme makinesi

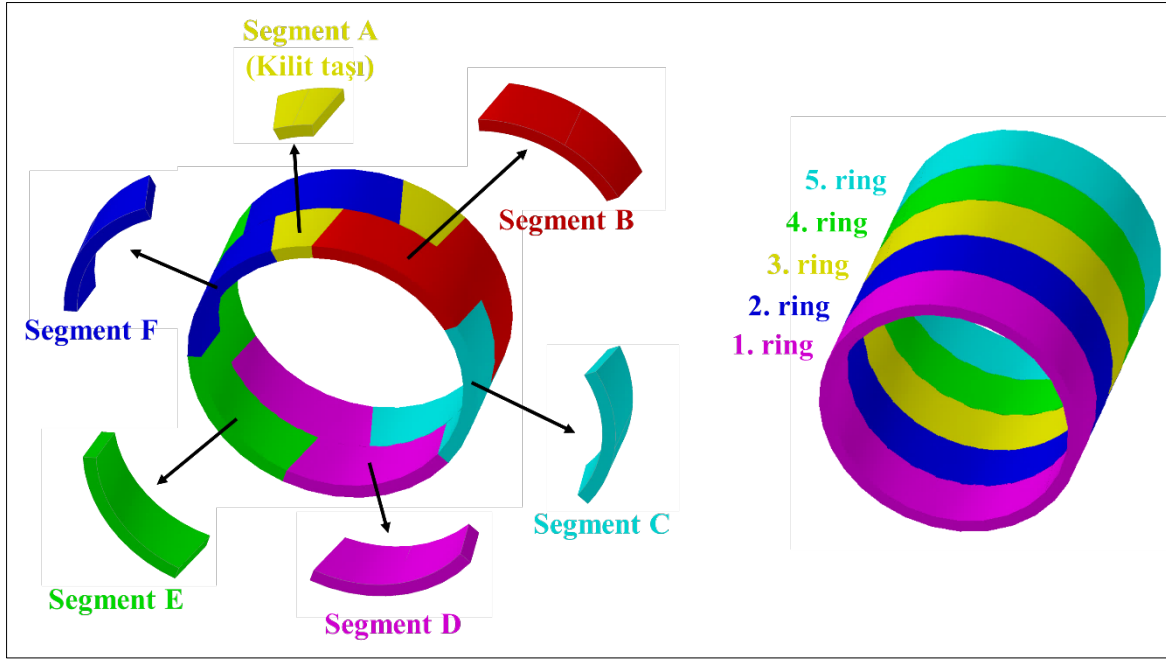


Şekil 3.17. İtme silindirli tünel delme makinesi

Yukarıdaki açıklamalar dikkate alındığında tünel delme makinesi seçiminde belirlenmesi gerekenler bazı hususlar şu şekilde sıralanabilir:

- Kesici diş arkasındaki bölümde kalkan tipinin seçilmesi (kalkansız veya yarı kalkanlı veya kalkanlı)
- Hesaplanan desteksiz tünel ayna stabilitesine göre gerekirse ayna basınç tipinin seçilmesi (açık modda veya kapalı modda kazı)
- Tünel delme makinesi ilerleme tipinin seçilmesi (pabuçlu veya itme silindirli)

Tünel delme makinesi ile yapılan kazılarda son aşama kalıcı kaplamanın uygulanmasıdır. Çok iyi kayalar hariç, kazı tamamlanıp tünelin kendini ileriye yönlendirmesi ile arkada ortaya çıkan kazılmış alana tünelin kalıcı kaplaması yerleştirilir. Bunun için önceden hazırlanmış prefabrik segment adı verilen birbirine kenetlenebilen beton blokları kullanılır. Segmentlerin birbirine kenetlenip içi boş tam bir yuvarlak şeklini alması ve bir tünelin belirli bir uzunluğunu oluşturması durumu elde edilen sisteme ring adı verilmektedir. Ringlerin uzunlukları genelde 1,5 metre ile 2 metre arasında değişmektedir. Segmentlerin birleştirilip ringleri oluşturması ve yan yana birçok ringin bir araya gelip tünelleri oluşturması ile tünel inşası tamamlanmış olur. Aşağıda segment ve ring için Şekil 3.18’de örnek gösterime yer verilmiştir.

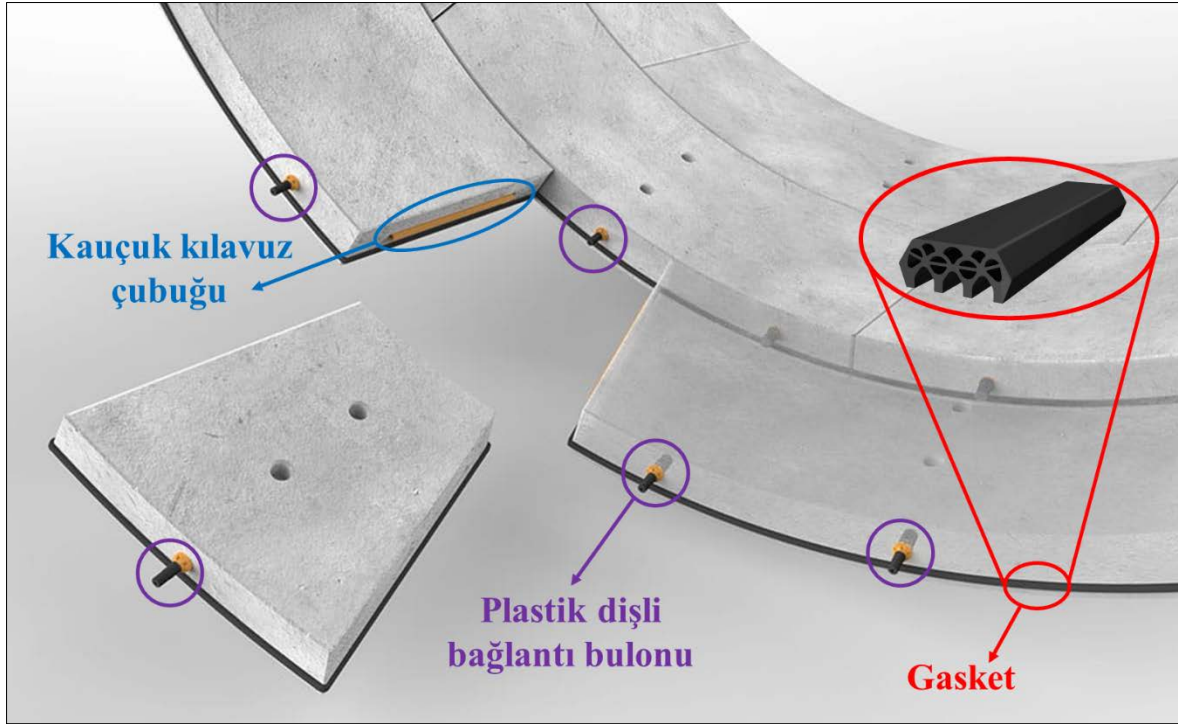


Şekil 3.18. Segment ve ring gösterimi

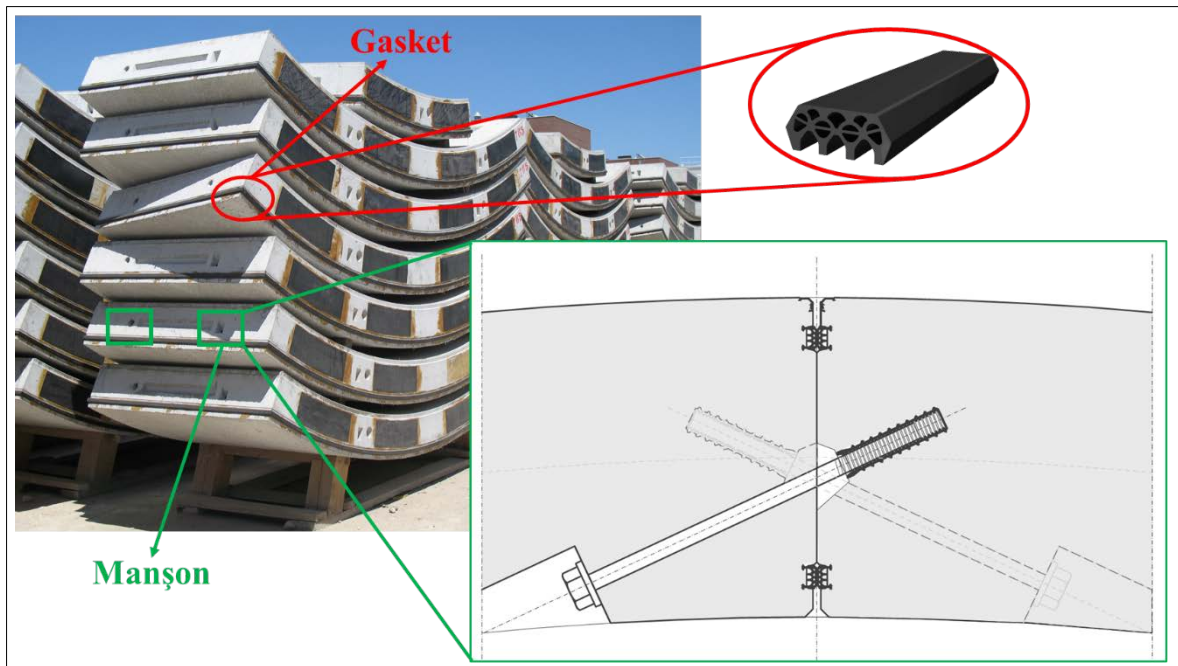
Segmentlerin enine ve boyuna yöndeki uzunluğu ve kalınlığı her proje için değişkendir. Bir ring oluşturulması için kaç adet segment kullanılması gerektiği de yine projeye göre değişkenlik gösterebilir. Fakat segment adedi ne olursa olsun bir ringin tamamlanması için kilit taşı olarak isimlendirilen son segmentin yerine yerleştirilmesi gerekmektedir. Kilit taşının yerine yerleştirilmesi ile bir ringdeki tüm segmentlerin boşluk oluşturmaksızın birbirine kenetlenmesi sağlanır ve bu şekilde bir ringin stabilizasyonu sağlanmış olur.

Segmentler ve ringler kendi aralarında bağlama elemanları kullanılarak bağlanır ve bu sayede birbirine kenetlenmeleri sağlanır. Bu malzemeler manşon ya da kauçuk dişli plastik bulon gibi segment ya da ringleri birbirine bağlayan elemanlardır. İki segment arasındaki yerleşimin doğru yapılması için kauçuk kılavuz çubukları da kullanılmaktadır. Bunlara ait örnek gösterimlere Şekil 3.19’da ve Şekil 3.20’de yer verilmiştir.

Ayrıca tünel delme makinesi ile açılan tünellerde tüneli çepeçevre saran herhangi bir su yalıtım malzemesi kullanılmamaktadır. Bunun yerine her segmentin dört bir yanını saran bant gibi gasket adı verilen bir malzeme kullanılır. Segmentler yerleştirilirken gasketler iki segment arasında sıkışır ve böylelikle suyun sızdırmazlığı sağlanır. Aşağıda gasket için Şekil 3.19’da ve Şekil 3.20’de örneklere yer verilmiştir.



Şekil 3.19. Segmentler arası bağlantı ve su yalıtım elemanı gösterimi 1/2



Şekil 3.20. Segmentler arası bağlantı ve su yalıtım elemanı gösterimi 2/2

Diğer tünel kazılarına göre tünel delme makinesinin başlangıç yatırımı oldukça yüksektir. Bu nedenle kısa tünellerde çok fazla maliyet açısından avantaj sağlamaz fakat uzun tünellerde başlangıç maliyeti yüksek dahi olsa çok hızlı kazı yapıp aynı anda tüneli oluşturabildiği için diğer konvansiyonel metotlara göre çok daha kısa sürede proje

tamamlanıp başlangıçtaki maliyet açığı kapatılabilir hatta ciddi anlamda düşürülebilir. Aynı zamanda konvansiyonel tünellere göre daha güvenli bir kazı yapılıyor olması da büyük bir artı olmaktadır. Genel olarak metro projelerinde tünel delme makinelerinin sık sık seçilme nedeni, yüzeye yakın yerlerde tasarlanan projelerde ya da çok kötü zemin koşulundan geçen tünellerde hem işçi hem de çevre yapıların güvenliğinin sağlanması amacıyla kazıyı minimum deformasyon ile tamamlamaktır.

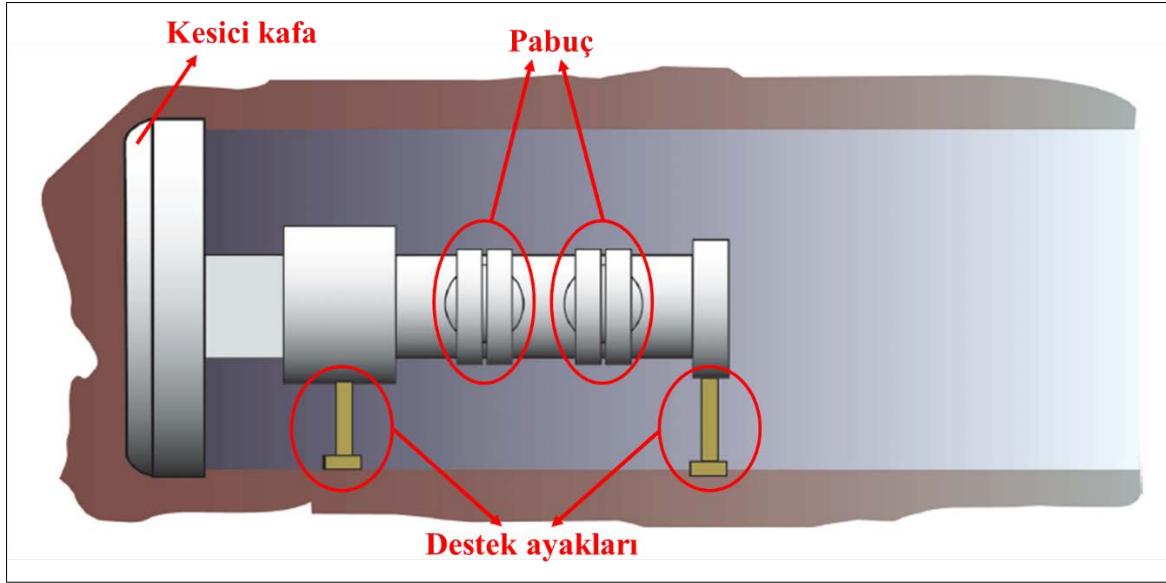
Günümüzde birçok tünel delme makinesi tipi vardır ve bunlar jeolojik koşullara bağlı olarak projelerde seçilir. Çok iyi kayalarda kalkansız tünel delme makineleri kullanılmaktadır. Diğer birimlerde ise tünel makinesinin ilerlemesini sağlayan tek kalkanlı, çift kalkanlı, hava basınçlı, pasa basınçlı veya çamur basınçlı makineler de bulunmaktadır. Bir projede eğer tünel delme makinesi kullanılacaksa en önemli unsur bölgenin çok iyi jeolojik analizinin yapıp ona göre doğru makinenin seçilmesidir. Makineler kötü zeminlerde ayna stabilizasyonu sağlayabilecek kapasitede olmalıdırlar. Eğer öyle bir kapasiteye sahip olmazlarsa yüzeyde ciddi oturma ve ciddi hasarlar ortaya çıkabilir. O zaman aynada basınçla ilerleyecek yani kapalı modda ilerleyecek bir makine seçilmesi önemlidir. Aşağıdaki bölümde bazı tünel delme makineleri hakkında bilgilere yer verilmiştir.

3.3.1. Kalkansız tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi

Tünel kazısı boyunca iyi ve çok iyi kaya birimlerinden geçilecekse, bu durumda kalkansız tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi kullanılabilir. Bu sistemde aynı aşamalı konvansiyonel kazılarda kullanıldığı gibi kazı destek sistemi uygulaması yapılmaktadır. Yani tünel kazısı sonrası kaya bulunu, gerekirse hasır çelik ve püskürtme beton kullanılarak bir destek sistemi uygulanmaktadır.

Bu makine ile kazıda jeolojik koşullar iyi olacağı için tünel aynasında herhangi bir stabilizasyon problemi olmayacaktır. Bu sebeple de aynada basınçsız yani açık modda kazı yapılır. Kazılan malzeme bir konveyör yardımı ya da araçlar yardımı ile dışarı taşınabilmektedir.

Kazılar genelde kalkansız yapılır ya da işçi güvenliği için sadece kemerde lokal bir kalkan bulunmaktadır. Ayrıca tünel ilerlemesi, yukarıda bahsedilmiş olduğu gibi pabuçlar ile yapılır. Aşağıda kalkansız ve pabuçlu bir tünel delme makinesi görseline yer verilmiştir.



Şekil 3.21. Kalkansız tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi [6]

Kalkansız kazılarda uygulama aşamaları basit bir şekilde şöyle sıralanabilir:

- Aşama 1: Pabuçların tünel çeperine dayanarak sabitlenmesi
- Aşama 2: Destek ayaklarının yukarı çekilerek etken dışı bırakılması
- Aşama 3: Pabuçlardan destek alarak makinenin kendini ileri itmesi ile tünel kazısının yapılması
- Aşama 4: Destek ayaklarının kazı sonunda yere sabitlenmesi
- Aşama 5: Pabuçların biraz ilerdeki tünel çeperine dayanarak sabitlenmesi

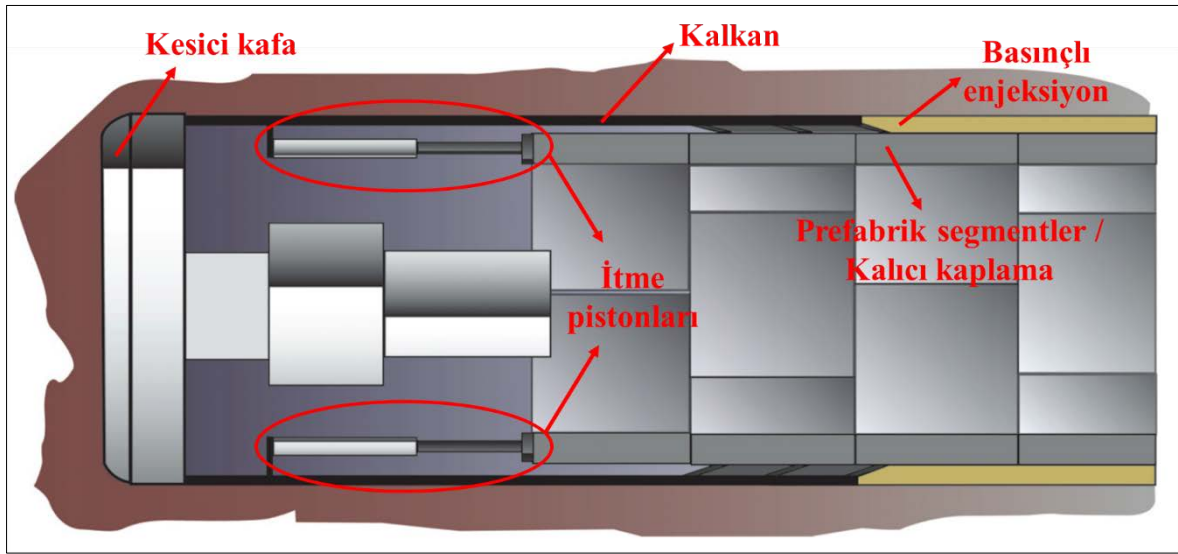
Yukarıdaki döngü ile aynı aşamalar kazı sonuna kadar takip edilir. Yani jeolojik açıdan iyi bir kayada kazı yapılıyorsa kalkansız, pabuçlu, açık modda kazı ile tünel kazısının oldukça hızlı bir şekilde tamamlanması mümkündür. Fakat jeolojik koşullar daha kötü olacak ise farklı bir makinenin seçilmesinde fayda vardır.

3.3.2. Tek kalkanlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi

Tünel kazısı orta kaya ile zayıf kaya arasında yapılacak ise ve tünel kazısı sonrası prefabrik segmentlerin zeminin stabil kalması adına uygulanması gerekiyor ise kalkanlı tünel delme makinesinin kullanılması gerekmektedir. Kalkanın temel amacı yukarıda da bahsedildiği

gibi oturmaları minimuma indirmeye yardımcı olmaktır. Ayrıca tünel kazısı sonra makinenin içinde bulunan işçilerin de güvenliği açısından oldukça önemlidir.

Kalkansız kazıdan farkı daha kötü kayalarda uygulanıyor olması, ilerlemenin pabuçlarla değil dizilmiş olan segmentlere basarak itme pistonları ile yapılıyor olması ve kalkanın kuyruk kısmında bulunan basınçlı enjeksiyon makinesi sayesinde tünel kaplamasının dışı ile kazı sınırı arasındaki bölgenin tünel kazısına paralel olarak dolduruluyor olmasıdır. Aşağıda tek kalkanlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi için Şekil 3.22’de bir görsele yer verilmiştir.



Şekil 3.22. Tek kalkanlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi [6]

Tek kalkanlı kazılarda uygulama aşamaları özetle aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- **Aşama 1:** İtme pistonlarının segmentlere dayanarak tünel kazısının yapılması ve durulması
- **Aşama 2:** Kazılan mesafe kadar kalkan gerisinde meydana gelen boşlukta segmentlerin yerleştirilmesi ile bir ringin oluşturulması
- **Aşama 3:** Kalıcı kaplama ile zemin arasındaki kalkan nedeniyle meydana gelen boşluğun basınçlı enjeksiyon ile doldurulması
- **Aşama 4:** İtme pistonlarının segmentlere dayanması

Yukarıdaki döngü ile aynı aşamalar kazı sonuna kadar takip edilir. Yani jeolojik açıdan orta ve kötü birimleri içinde barındıran bir kayada kazı yapılıyorsa tek kalkanlı, itme pistonlu, açık modda kazı ile kalıcı kaplama uygulanarak tünel kazısının tamamlanması mümkündür.

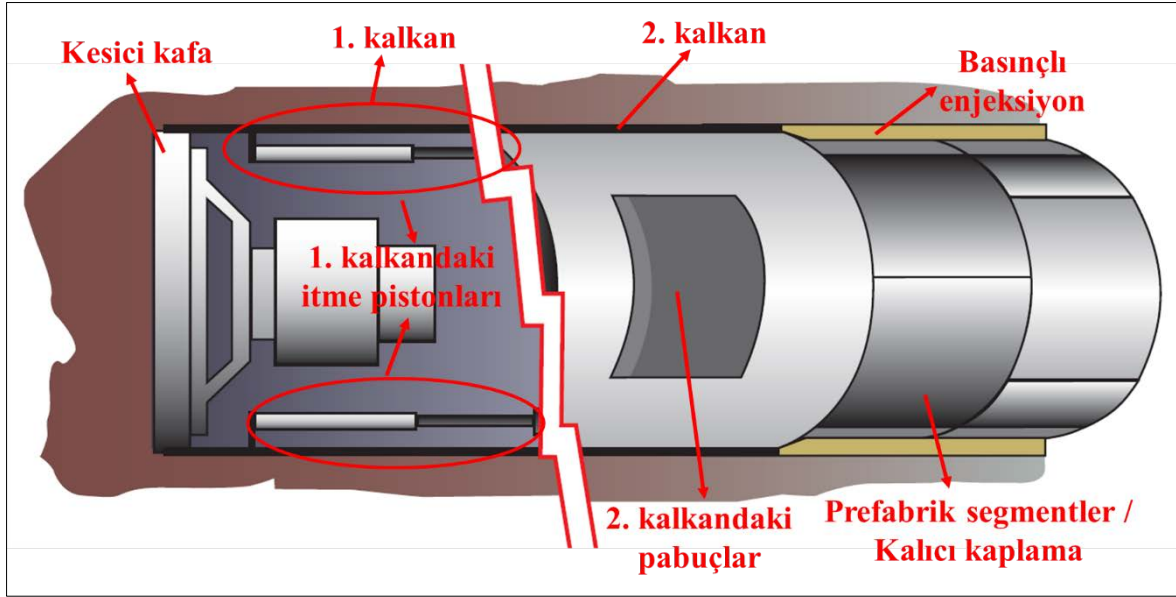
3.3.3. Çift kalkanlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi

Çift kalkanlı tünel delme makinelerinde isminden de anlaşılacağı üzere iki farklı kalkan bulunmaktadır. Bunun temel amacı kazının hiç durmadan ilerlemesidir. Kesici kafa ön kalkan ile birlikte ilerleyerek kazı yaparken, arka kalkan ise eş zamanlı olarak segmentlerin yerleşimini yapmaktadır. Tek kalkanlı makinelerde tünel kazısı bir ring kalınlığı kadar ilerleyip durmak zorunda ve segmentler yerleştirildikten sonra kazının tekrar ilerlemesi gerekmektedir. Fakat çift kalkanlı makinelerde ise kazı hiç durmadığı için tünel kazıları çok daha hızlı bir şekilde tamamlanabilir. Yine iyi kayadan kötü kayaya kadar tüm kaya birimlerinde çift kalkanlı tünel delme makinesi ile kazı yapılmaktadır.

Kazı öndeki itme ayaklarının ikinci kalkana basarak ilerlemesi ile yapılır. Bir arkadaki kalkanın ilerlemesi ise; pabuçlarla veya itme silindirleri ile tamamlanabilmektedir. Duruma bağlı olarak; eğer tünel kazıları iyi kayada yapılıyorsa tünel sadece kazı destek sistemi elemanları ile tamamlanabilir. Fakat orta ile kötü kaya birimlerinde kazı yapılıyorsa tünel kalıcı kaplama segmentleri döşenerek tünel kazısı ilerleyebilir. Çift kalkanlı kazılarda uygulama aşamaları özetle aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- **Aşama 1:** Birinci kalkandaki itme pistonlarının segmentlere dayanarak tünel kazısının hiç durmadan sürekli olarak yapılması
- **Aşama 2:** İkinci kalkanın itme pistonları ya da itme silindirleri ile ilerlemesi ve durması
- **Aşama 3:** Var ise kalıcı kaplama segmentlerinin ikinci kalkan bölgesinde yerleştirilmesi ve basınçlı enjeksiyon sayesinde kalkan ile segment arasının doldurulması, kalıcı kaplama yok ise kazı destek sisteminin uygulanması
- **Aşama 4:** Birinci kalkanda kazı ilerliyorken ikinci kalkanca pabuç ya da itme pistonları ile tekrar ilerlemesi

Yukarıdaki döngü ile aynı aşamalar kazı sonuna kadar takip edilir. Çift kalkandan oluşmuş ve kalıcı kaplama ile döşenen bir tünel delme makinesi görseline Şekil 3.23'te yer verilmiştir.



Şekil 3.23. Çift kalkanlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi [6]

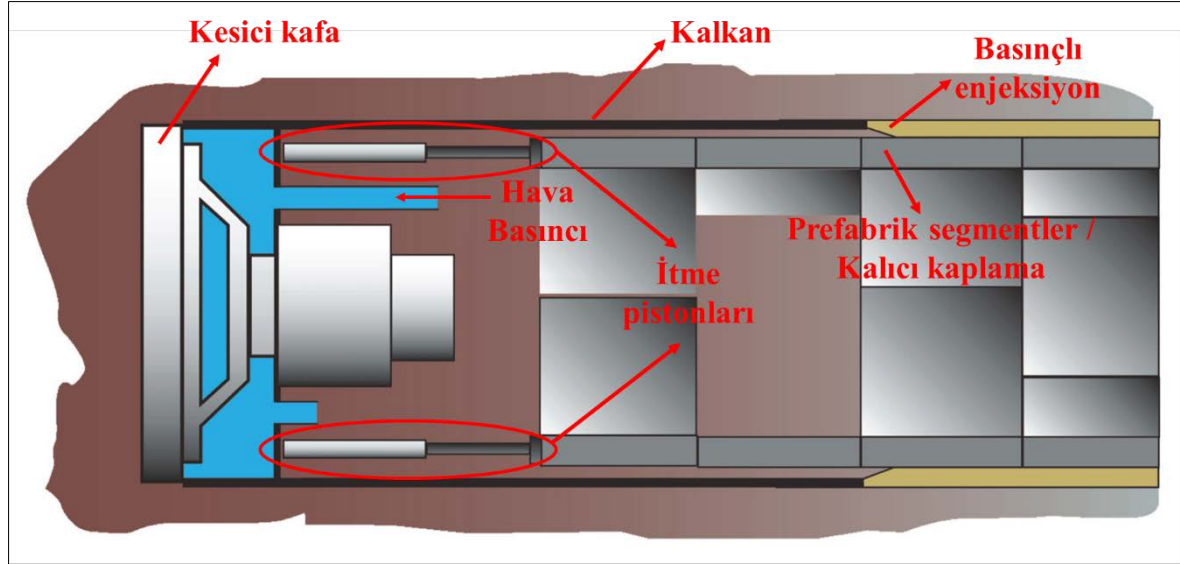
Yani jeolojik açıdan çok iyi kayadan kötü kayaya kadar tüm birimleri içinde barındıran bir kayada kazı yapılıyorsa çift kalkanlı, pabuçlu ya da itme pistonlu, açık modda kazı ile kazı destek sistemi ya da kalıcı kaplama uygulanarak tünel kazısının tamamlanması mümkündür. Bu makinenin hem hızlı hem de birçok kaya tipine uyması birçok proje için avantajlı olmaktadır.

3.3.4. Hava basınçlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi

Zayıf kayalarda ya da kohezyonlu zemin birimlerinde tünel kazısı yaparken tünel aynasında stabilizasyon problemleri oluşur. Bu sebeple tünel delme makinesi ile kazı yapılırken tünel aynasına bir kuvvet uygulanarak stabilizasyon sağlanması gerekir. Yani makinenin kapalı modda kazı yapması gerekmektedir. Hava basınçlı tünel delme makinesinde aynaya uygulanması gereken kuvvet kesici dişlere verilen bir hava basıncı ile sağlanır. Güzergahta geçilen jeolojik birimlere bağlı olarak aynaya verilen basınç değişiklik gösterebilir. Bunun uygulama öncesi tasarım aşamasında ve uygulama sırasında sahadaki duruma göre gözden geçirilmesi önemlidir.

Jeolojik koşula bağlı olarak kazı yapıldıktan sonra tünel çevresinde de stabilizasyon problemleri meydana geleceği ve malzeme dökülmesi, hatta ileri safhalarda göçük meydana gelmesi durumu oluşabileceği için işçilerin güvenliği ve yüzeyde meydana gelecek

oturmaları engellemek amacıyla kalkan kullanılmaktadır. Ayrıca kalkandan sonraki bölümde itme pistonları, kalıcı kaplama segmentleri ve basınçlı enjeksiyon malzemesi bulunmaktadır. Şekil 3.24'te örnek bir hava basınçlı tünel delme makinesi gösterimine yer verilmiştir.



Şekil 3.24. Hava basınçlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi [6]

Aşağıda hava basınçlı tünel delme makinesi kullanılarak kazıların yapılmasına dair uygulama aşamaları verilmiştir:

- **Aşama 1:** İtme pistonlarının segmentlere dayanarak ve tünel aynasına belirli bir hava basıncı verilerek tünel kazısının yapılması ve durulması
- **Aşama 2:** Kazılan mesafe kadar kalkan gerisinde meydana gelen boşlukta segmentlerin yerleştirilmesi ile bir ringin oluşturulması
- **Aşama 3:** Kalıcı kaplama ile zemin arasındaki kalkan nedeniyle meydana gelen boşluğun basınçlı enjeksiyon ile doldurulması
- **Aşama 4:** İtme pistonlarının segmentlere dayanması

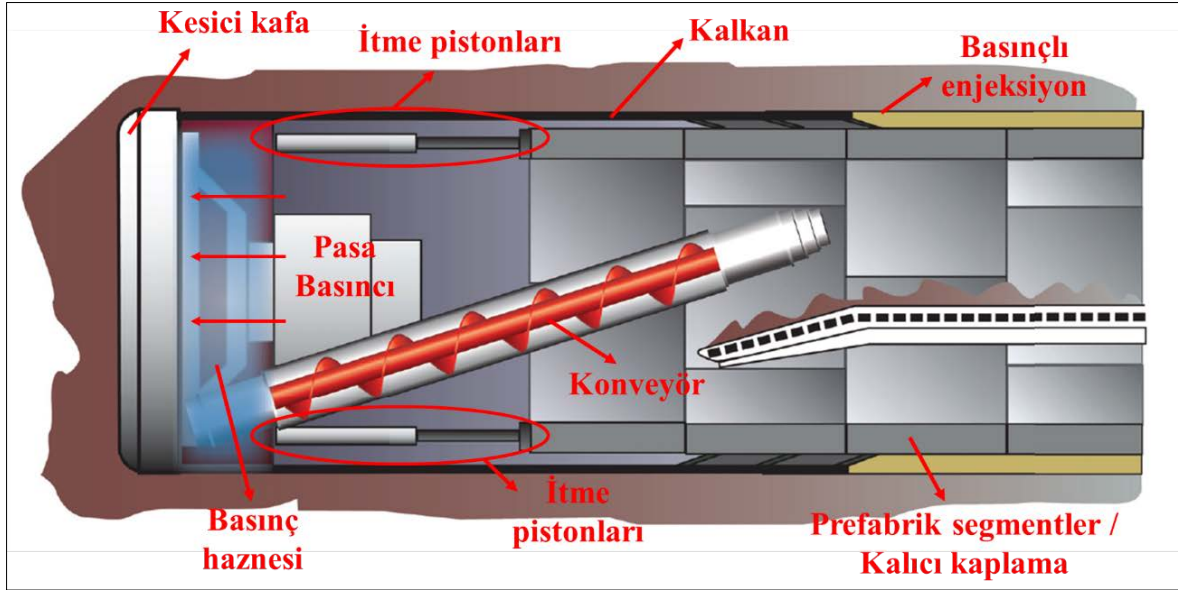
Yukarıdaki döngü ile aynı aşamalar kazı sonuna kadar takip edilir. Yani jeolojik açıdan kendi kendini tutamayan kaya ve kohezyonlu zemin birimlerinde kazı yapılıyorsa kalkanlı, itme pistonlu, hava basınçlı ayna desteklemesi ile kapalı modda kazı ile kalıcı kaplama uygulanarak tünel kazısının tamamlanması mümkündür.

3.3.5. Pasa basınçlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi

Pasa basınçlı tünel delme makinesinin (EPB) çalışma mantığı hava basınçlı tünel delme makinesi ile aynıdır. Fakat özellikle pasa basınçlı tünel delme makineleri siltli birimler ya da kum içeren killi birimlerde tercih edilmektedir.

Buradaki en önemli unsur ayna stabilitesinin sağlanması için kazılan malzeme; uygulanması gereken ayna basıncına paralel olarak kesici kafanın hemen arkasındaki üniteye tutulur ve kazılmış olan malzeme ile ayna basıncının oluşturulması sağlanır. Kazı yani basınç haznesindeki kazılmış malzemenin miktarı aynada uygulanması gereken basınca göre değişkenlik gösterir. Eğer aynaya yüksek basınç uygulanması gerekirse haznede bulunan miktar daha fazla, düşük basınç uygulanması gerekirse de haznede muhafaza edilen malzeme miktarının daha az olması gerekmektedir. Haznedeki malzeme kazı ilerledikçe bir konveyör yardımıyla orantılı olarak basınç haznesinden taşınıp tünel dışına çıkartılmaktadır. Şekil 3.25'te örnek bir pasa basınçlı tünel delme makinesi gösterimine yer verilmiştir. Pasa basınçlı tünel delme makinesi kullanılarak kazıların yapılmasına dair uygulama aşamaları şu şekilde sıralanabilir:

- **Aşama 1:** İtme pistonlarının segmentlere dayanarak ve tünel aynasına kazılan malzemenin kullanımı ile gerekli pasa basıncı verilerek tünel kazısının yapılması ve durulması
- **Aşama 2:** Kazılan mesafe kadar kalkan gerisinde meydana gelen boşlukta segmentlerin yerleştirilmesi ile bir ringin oluşturulması
- **Aşama 3:** Kalıcı kaplama ile zemin arasındaki kalkan nedeniyle meydana gelen boşluğun basınçlı enjeksiyon ile doldurulması
- **Aşama 4:** İtme pistonlarının segmentlere dayanması



Şekil 3.25. Pasa basınçlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi [6]

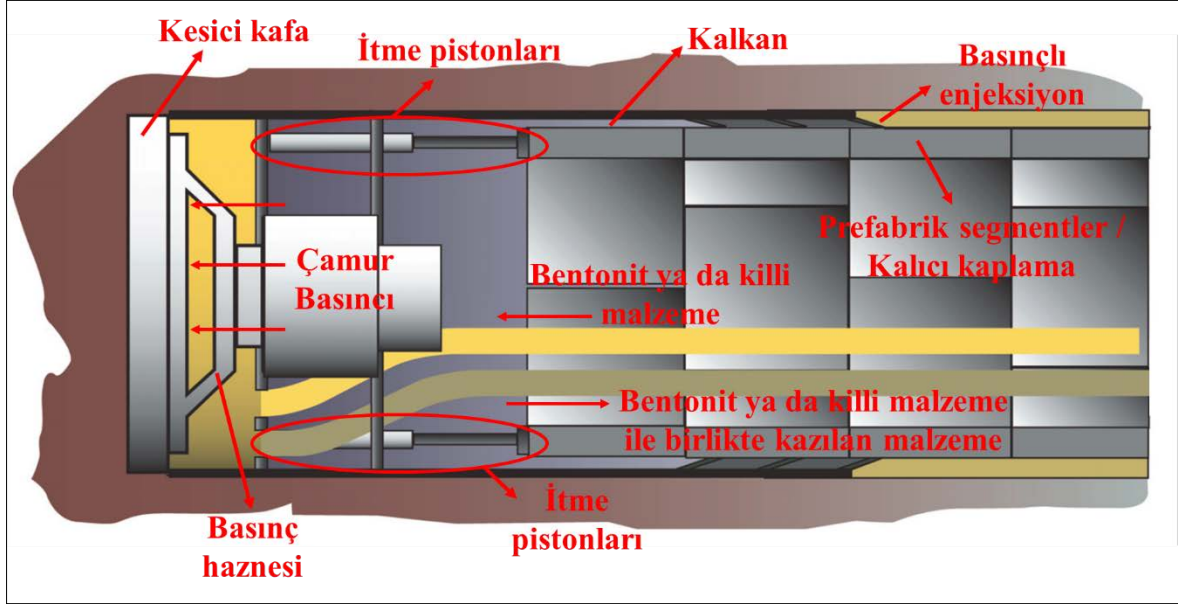
Yukarıdaki döngü ile aynı aşamalar kazı sonuna kadar takip edilir. Yani jeolojik açıdan siltli veya killi zemin birimlerinde kazı yapılıyorsa kalkanlı, itme pistonlu, pasa basınçlı ayna desteklemesi ile kapalı modda kazı ile kalıcı kaplama uygulanarak tünel kazısının tamamlanması mümkündür.

3.3.6. Çamur basınçlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi

Kum ve siltli çakılların bulunduğu jeolojik koşullarda tünel delme makinesi ile kazı yapılacaksa en uygun makine çamur basınçlı tünel delme makinesi (SPB) olmaktadır. Kapalı modda kazı yapan pasa basınçlı tünel delme makinesi ile çalışma prensibi neredeyse aynı olmaktadır. Tek fark kazıya uygun olunan jeolojik koşullar ve kazı aynasına uygulanan basıncın nasıl sağlandığıdır.

Çamur basınçlı tünel delme makinelerinde ayna stabilizasyonu dışarıdan kazı haznesine iletilen bir bentonit ya da kil içerikli bir malzeme ile yapılır. Kazı haznesine aktarılan bentonit ya da killi malzeme, hali hazırda kazılıyor olan zemin malzemesi ile birleşerek bir bulamaç haline gelir ve çamur diye adlandırılan malzemenin tünel aynasına uygulanması ile ayna stabilizasyonu sağlanır. Yine tünel aynasında uygulanması gereken basınca göre haznede bulundurulması gereken malzeme miktarı değişkenlik göstermektedir. Malzeme sirkülasyonu şu şekildedir; bir yandan bentonit ya da killi malzeme ile haznede bulunan malzeme basınç uygulanması için gerekli kıvama getirilir, öteki yandan da aynadan

kazılarak hazneye aktarılan ve çamur haline gelen malzeme kazı haznesinden atılarak tünel dışına taşınır ve bir sonraki kazılan malzeme için haznede boş alan açılır. Şekil 3.26’da örnek bir çamur basınçlı tünel delme makinesi gösterimine yer verilmiştir.



Şekil 3.26. Çamur basınçlı tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi [6]

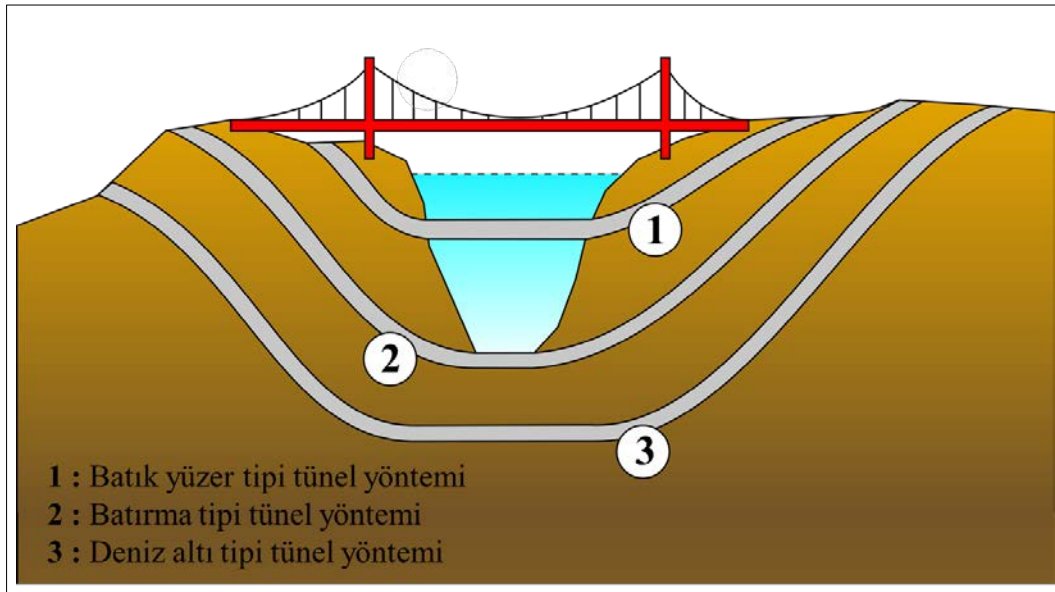
Aşağıda çamur basınçlı tünel delme makinesi kullanılarak kazıların yapılmasına dair uygulama aşamalarına yer verilmiştir:

- **Aşama 1:** İtme pistonlarının segmentlere dayanarak ve tünel aynasına kazılan malzeme ve dışarıdan eklenen bentonit ya da kil malzemesi katkısıyla elde edilen bulamaç ile gerekli çamur basıncı verilerek tünel kazısının yapılması ve durulması
- **Aşama 2:** Kazılan mesafe kadar kalkan gerisinde meydana gelen boşlukta segmentlerin yerleştirilmesi ile bir ringin oluşturulması
- **Aşama 3:** Kalıcı kaplama ile zemin arasındaki kalkan nedeniyle meydana gelen boşluğun basınçlı enjeksiyon ile doldurulması
- **Aşama 4:** İtme pistonlarının segmentlere dayanması

Yukarıdaki döngü ile aynı aşamalar kazı sonuna kadar takip edilir. Yani jeolojik açıdan kumlu veya çakıllı zemin birimlerinde kazı yapılıyorsa kalkanlı, itme pistonlu, çamur basınçlı ayna desteklemesi ile kapalı modda kazı ile kalıcı kaplama uygulanarak tünel kazısının tamamlanması mümkündür.

3.4. Su Altı Tünel Açma Yöntemleri

Genelde denize sınırı olan ülkelerde yoğun kentleşme sebebiyle alternatif yollardan biri olan su altı tünelciliği tercih edilebilmektedir. Genel olarak su altında uygulanan üç çeşit tünel yapım yöntemi vardır. Bunlar Şekil 3.27’de de gösterildiği gibi; batık yüzer tüneller, batırma tünel ve deniz altı tünelleri olarak sıralanabilir.



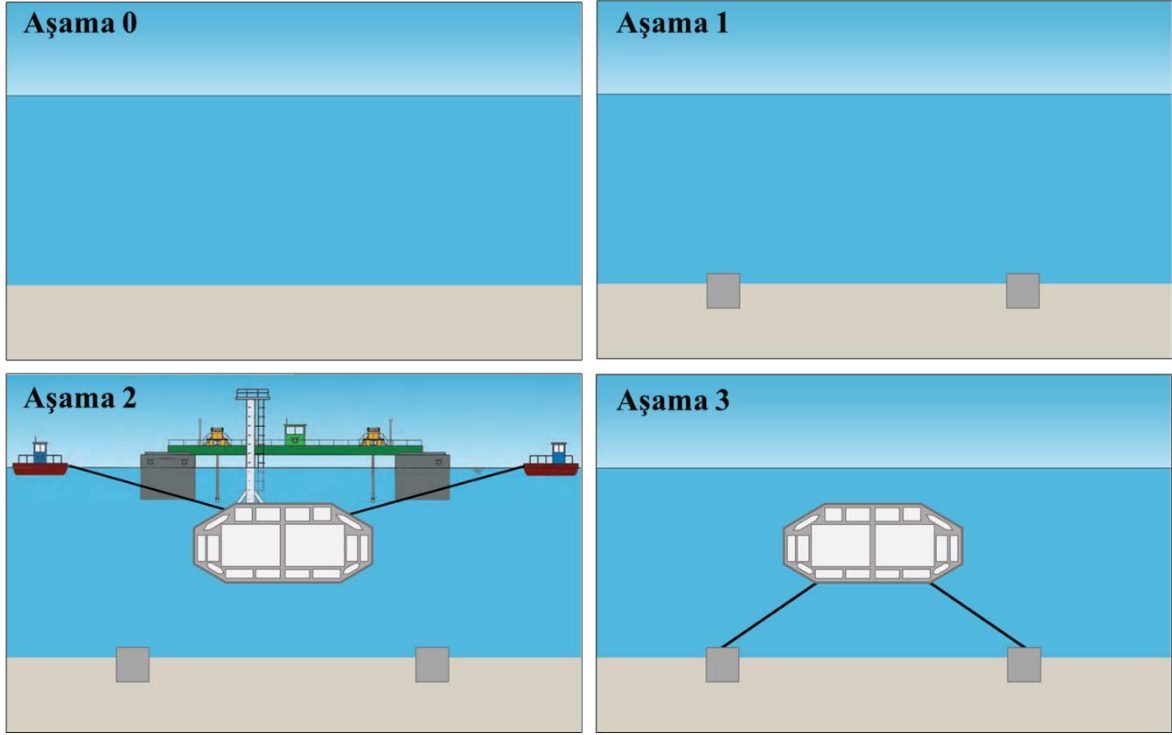
Şekil 3.27. Su altı tünel yöntemleri gösterimi [31]

Aşağıda bu yöntemlere ait uygulama aşamaları hakkında bazı bilgilere yer verilmiştir.

3.4.1. Batık yüzer tipi tünel yöntemi

Batık yüzer tipi tünel yöntemi, ulaşımaya yeni bir yaklaşım metodu açmıştır. Uzun, geniş ve derin sulardan ulaşım sağlanırken oldukça avantaj sağlamaktadır. Genel prensip, tünelin suda asılı kalan bir tüpün deplasman yaşamamasını sağlamak için özel kablolar ile deniz zemininde temellere bağlanmasına dayanır. Su, elektrik ve iletişim borusu gibi hatların döşenmesinde kullanılmak için oldukça uygundur. Fakat uygulama öncesi dalga yükünün ve girdap kaynaklı oluşabilecek titreşim gibi bazı parametrelerin iyice irdelenmesi gerekmektedir [32]. Yapım aşamaları kısaca aşağıda sıralandığı ve Şekil 3.28’de gösterildiği gibi kabul edilebilir:

- **Aşama 0:** Başlangıç aşaması
- **Aşama 1:** Tünelin bağlanacağı halatlar için temellerin tasarıma bağlı olarak belirli aralar ile oluşturulması
- **Aşama 2:** Prefabrik olarak üretilen tünelin suya indirilmesi
- **Aşama 3:** Tünel ile temellerin özel halatlar ile bağlanması

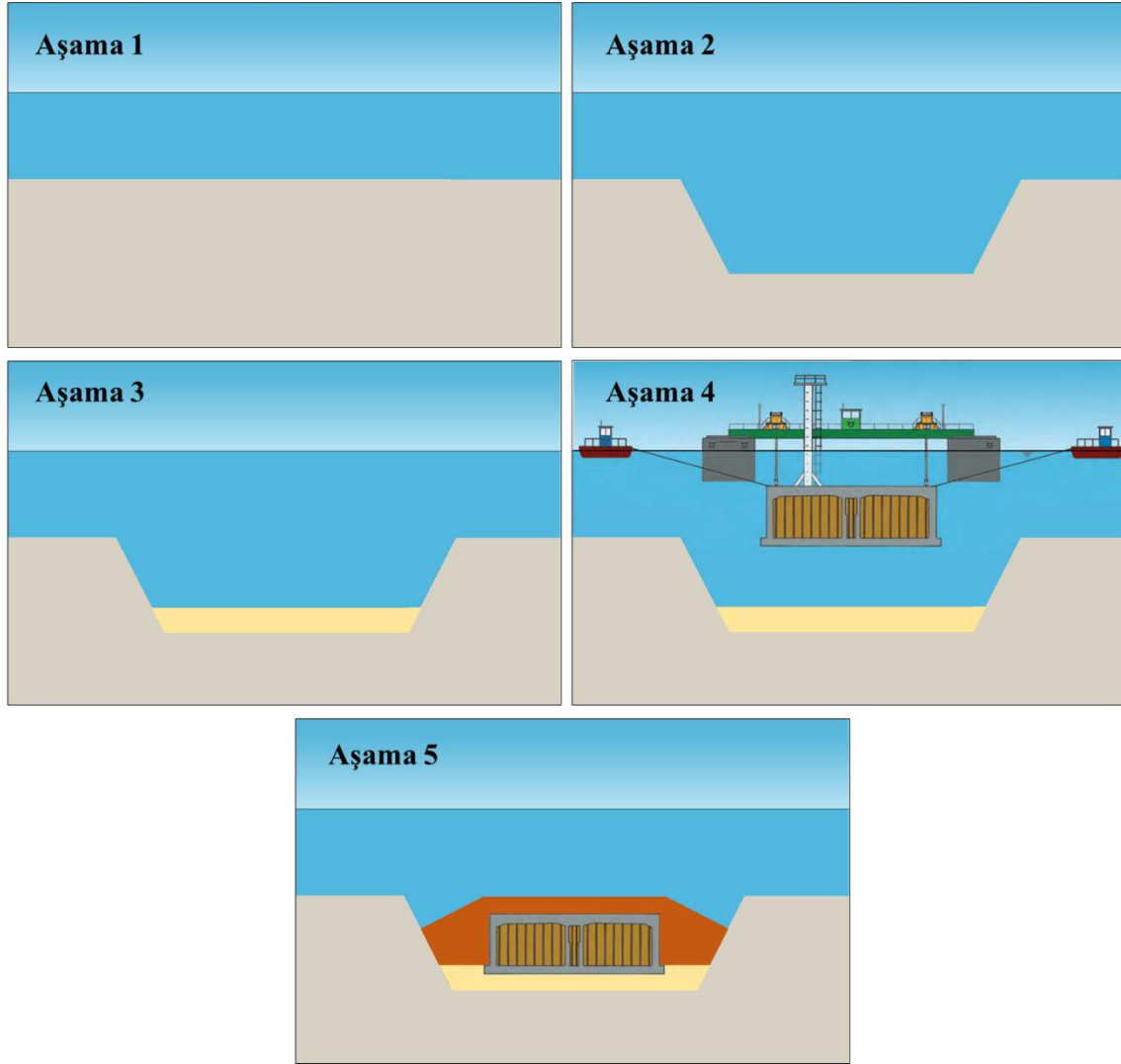


Şekil 3.28. Batık yüzer tipi tünel yöntemi aşamaları

3.4.2. Batırma tipi tünel yöntemi

Batırma tipi tünel yöntemi her durum için uygun olmasa da sudan geçilmesi gerektiği durumlarda kullanılabilir. Yer altında kazı yapılan tünellerden farklı olarak tünel kesitinin dairesel olması mecburi değildir, kutu kesitlerde kullanılabilir. Bu da özellikle geniş karayolları için avantajlı olabilir [33]. Örneğin Türkiye İstanbul'da, Asya ile Avrupa'yı birbirine bağlayan Marmaray metro projesinde İstanbul boğazı bölgesinde de su altında yapılan tünel tasarımlarında batırma tipi tünel yöntemi kullanılmıştır.

Çalışma sistemi, prefabrik olarak hazırlanmış olan tünel anolarının su altında birleştirilmesi ve üstünün geri dolgu ile kapatılması sayesinde koruma oluşturularak geçişin sağlanmasıdır. Uygulama aşamaları Şekil 3.29'da gösterildiği ve aşağıda sıralandığı verilebilir.



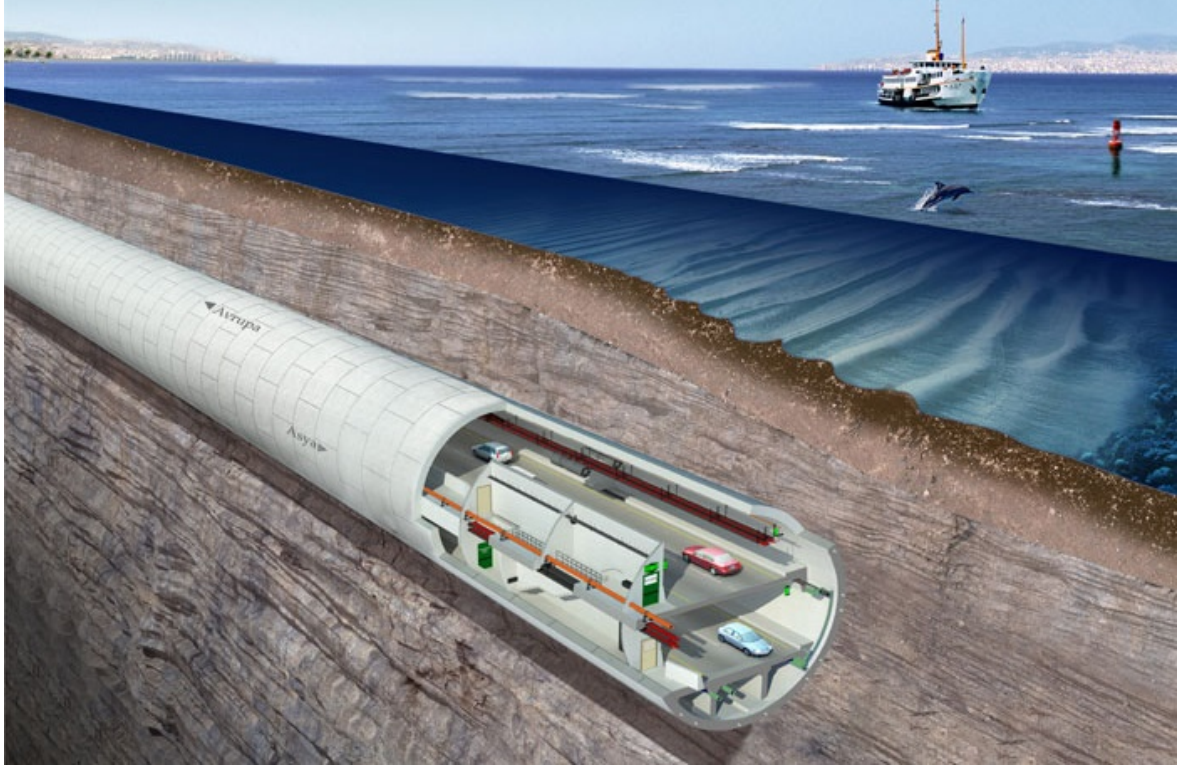
Şekil 3.29. Batırma tipi tünel yöntemi aşamaları

- **Aşama 0:** Başlangıç aşaması
- **Aşama 1:** Tünelin yerleştirileceği alanın kazısı
- **Aşama 2:** Tünelin yerleşeceği tabanda çakıl veya kum yatağı ile güçlendirme oluşturulması veya jeolojik koşullara göre kazıklı temel uygulamasının yapılması
- **Aşama 3:** Prefabrik olarak üretilen tünelin yerine yerleştirilmesi
- **Aşama 4:** Tünelin üstünün çakıl veya kaya gibi bir malzeme ile yaklaşık iki metre civarı geri dolgu ile kapatılması

3.4.3. Deniz altı tünel kazı yöntemi

Deniz altında açılan tüneller jeolojik koşullara bağlı olarak çok iyi kayalarda tünel çevresinde özel iyileştirmelerle birlikte delme – patlatma yöntemi ile veya diğer zeminlerde

mekanize kazı yöntemi ile yani tünel delme makineleri ile sağlanmaktadır. Aşağıda su altında tünel delme makinesi ile açılan bir tünelin Şekil 3.30’da örnek görseline yer verilmiştir.



Şekil 3.30. Örnek deniz altı tüneli gösterimi

Tünel delme makinesi ile su altındaki zeminde kazı yapılarak oluşturulan tünellerden en bilindik örneği Türkiye’deki Avrasya karayolu projesi olarak adlandırılabilir. Deniz altında batırma tünel metodu kullanılamayacak yerlerde bu yöntem uygulanabilecek bir metot olarak kabul edilebilir. Kazı öncesi hangi birimde kazı yapılacağına dair sondajlar ve detaylı çalışmaların yapılması önemlidir ve özellikle suyun etkisi çok iyi araştırılmalıdır. Su altı tünelciliğinin normal bir yer altı tünelciliğine göre daha karmaşık bir sistemden oluştuğu ve etkenlerin de daha farklı olduğu göz ardı edilemez fakat dünyada düzgün uygulamalar ile birçok başarıyla yapımı tamamlanmış su altı tünelleri bulunmaktadır.

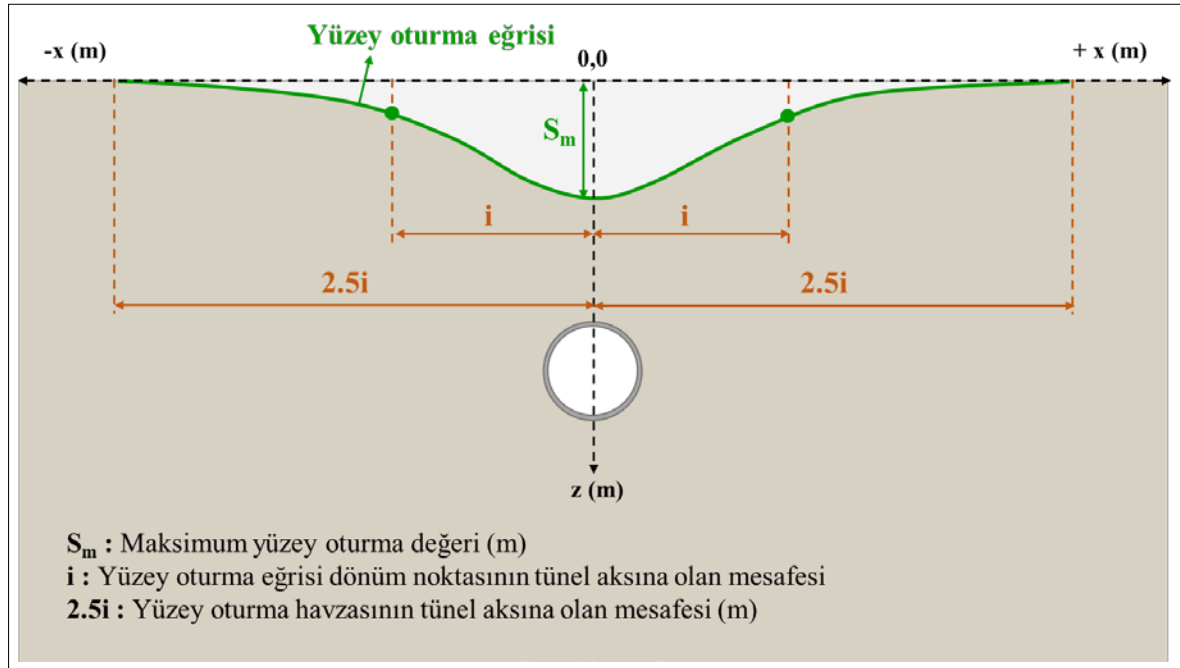
Yukarıdaki yöntemlere bakıldığında tünel kazıları için birçok seçenek mevcuttur. Projenin konumu, jeolojik koşulları, çevresel faktörleri ve maliyeti gibi etkenlere bağlı olarak tünel kazı metodu seçilebilir. Günümüzde genel olarak metro projelerinde güzergâh uzunluğuna da bağlı olarak TBM tüneli kullanılmaktadır. TBM kullanılacak projelerde en önemli etkenlerden biri makinenin seçimidir. Makinenin EPB tipi, SPB tipi veya daha farklı bir

özelliğe sahip olması gerektiği ya da gerekmediği iyice araştırılmalıdır. Yani tünel delme makinesinin pabuçlu veya itme silindirli olması gerektiği, ayna basınçlı ya da ayna basınçsız olması gerektiği ve kalkansız veya kalkanlı ise de tek kalkanlı ya da çift kalkanlı olması gerektiği kararının çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. Onun haricinde en sık kullanılan yöntemlerden biri delme – patlatma ile tünel açma yöntemi ve aşamalı tünel kazısı, örneğin NATM metodudur. Demiryolu ve karayolu projelerinde birden çok portal mevcuttur bu nedenle NATM ve delme – patlatma yöntemine ek olarak portal bölgelerinde yani tünele giriş ve çıkış bölgelerinde açık kazılı aç – kapa yöntemi, yüzeye yakın metro projelerinde ise istasyon kazılarında; yukarıdan aşağı ya da aşağıdan yukarı aç – kapa yöntemi kullanılmaktadır. Ayrıca özellikle yurt dışında Avrupa’da tercih edilen ve konvansiyonel kazılara göre oldukça güvenli bir kazıyı sağlayan ADECO – RS yöntemi de tünelcilikte yer etmiş metotlardan biridir.

Projelerde hangi yöntem kullanılarak kazı yapılacağının seçilmesi oldukça önemlidir. Yönteme göre yüzeyde ve tünel çevresinde oturmalar hatta ileri seviyelerde göçükler meydana gelebilir. Bu oturmaların kazı yöntemine paralel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Tünel kazı yöntemi göz önüne alınarak oturmaların belirlenmesi, kazı sırasında bir risk oluşup oluşmayacağının görülebilmesine yardımcı olacaktır. Bir sonraki bölümde yüzey oturmalarının meydana gelmesindeki sebepler, oturmaların bağlı olduğu faktörler, oturmaların uygulama öncesi ve uygulama sırasında belirlenmesi için kullanılan yöntemler, oturmalara bağlı meydana gelebilecek problemler ve oturmaların nasıl önlenileceği hakkında bazı bilgiler paylaşılmıştır.

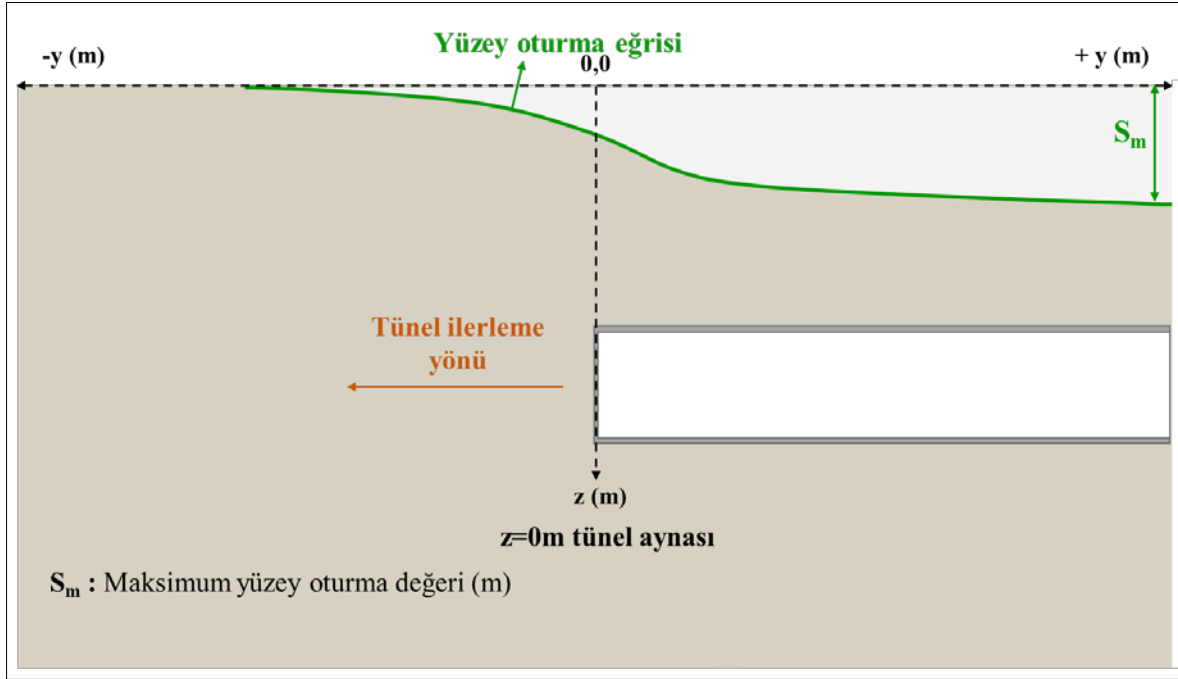
4. TÜNEL KAZISINA BAĞLI OLUŞAN OTURMALAR

Tünel kazısı sonrası, geostatik zemin gerilmesinde rahatlama meydana gelir ve bu kısmen tünel çevresinde uygulanan bir destekleme sistemi ile sınırlandırılır. Fakat zeminde ani bir boşluk yaratıp bu boşluğu bire bir aynı şekilde dolduracak rijit bir malzeme uygulamak mümkün değildir. Bu nedenle tünel kazısı çevresindeki zeminde bir miktar deformasyon meydana gelir ve bu deformasyon zincirleme bir hareketle yüzeye kadar ulaşır yüzey oturmaları oluşur [6]. Peck [16] bir çalışmada önermiş olduğu gibi tipik yüzey oturma dağılım en kesiti Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Tipik yüzey oturma eğrisi en kesit gösterimi [16]

En kesite bakıldığında zaman maksimum oturma değerinin tünelin orta ekseninde oluştuğu ve tünelden uzaklaştıkça değerlerin azaldığı görülmektedir. Attewell ve Woodman [34] ise yaptıkları bir çalışmada belirtmiş oldukları gibi; boyuna yönde elde edilen deformasyonlar tünel aynasının gerisinden yani kazı yapılmamış olan bölgeden başlar ve maksimum değere kazının yapılıp kaplamanın tamamlandığı yerde ulaşır. Bu durumda tipik yüzey oturma dağılım boy kesiti Şekil 4.2’de gösterildiği şekildedir.



Şekil 4.2. Tipik yüzey oturma eğrisi en kesit gösterimi [34]

Maksimum yüzey oturma miktarları ve oturma geometrileri aynı projenin içinde dahi bölgeden bölgeye değişkenlik gösterebilir. Yani genel olarak oturma eğsinin miktarı ve geometrisi birçok etkene bağlıdır. Bu etkenlere aşağıdaki bölümde yer verilmiştir.

4.1. Yüzey Oturmalarının Bağlı Olduğu Etkenler

Yüzey oturmasını Guglielmetti ve arkadaşları [6] üç ana başlıkta incelemiştir. Bunlar, kısa dönem yani ani oturmalar, tünel kaplamasına bağlı oturmalar ve uzun dönem oturmaları olarak açıklanmıştır. Kısa dönem oturmaları; tünel kazısına bağlı oluşan oturmalarlardır. Kazı metodu, tünel ayna stabilitesi, ilerleme hızı, tünel kaplama uygulaması için gerekli süre gibi faktörler nedeniyle ortaya çıkar. Tünel kaplamasında meydana gelen deformasyona bağlı oluşan oturmalar ise genel olarak yüzeye yakın ve geometri olarak çapı büyük olan tüneller sebebiyle meydana gelir. Fakat kaplama sebebiyle ortaya çıkan değerler, kazıda oluşacak gerilmelerin düzgün bir şekilde ön görülmesi ile tünel kaplamasının uygun şekilde tasarlanması ve uygulanması sayesinde minimuma indirilebilir. Uzun dönem oturmaları ise zemin birimine bağlıdır, kazı tamamlandıktan bir süre sonra eğer kazılar; kil içeriği yüksek, kohezyonlu zemin içinde yapıldıysa konsolidasyon oturması sebebiyle yüzey hareketleri bir süre daha devam edebilir.

Arioğlu'da [35] oturmalarına etki eden faktörleri üç ana başlıkta özetlemiştir. Bunlar jeolojik faktörler, tünel kazı geometrisi ve yöntemi ile alakalı faktörler ve kazı çevresindeki mevcut yapılara ilişkin faktörler olmaktadır. Jeolojik faktörler; tünelin kazısının yapıldığı formasyon, o formasyonun dayanım parametreleri ve yer altı su seviyesine bağlıdır. Tünel kazı geometrisi ve yöntemi ile alakalı faktörler ise; tünel derinliği, tünel pozisyonu, tünel adedi, kazı çapı ve tünel kazı metodu gibi etkenlerden oluşmaktadır. Son olarak kazı çevresindeki yapılardan kaynaklanan faktörler ise; yapının boyutu, temel sistemi, taşıyıcı eleman sistemi ve yapı inşaatı sırasındaki düzgün işçilik olarak açıklanmaktadır. Elde edilen bilgiler ışığında oturmaların etkilendiği faktörler Şekil 4.3'te özet halinde sunulmuştur.

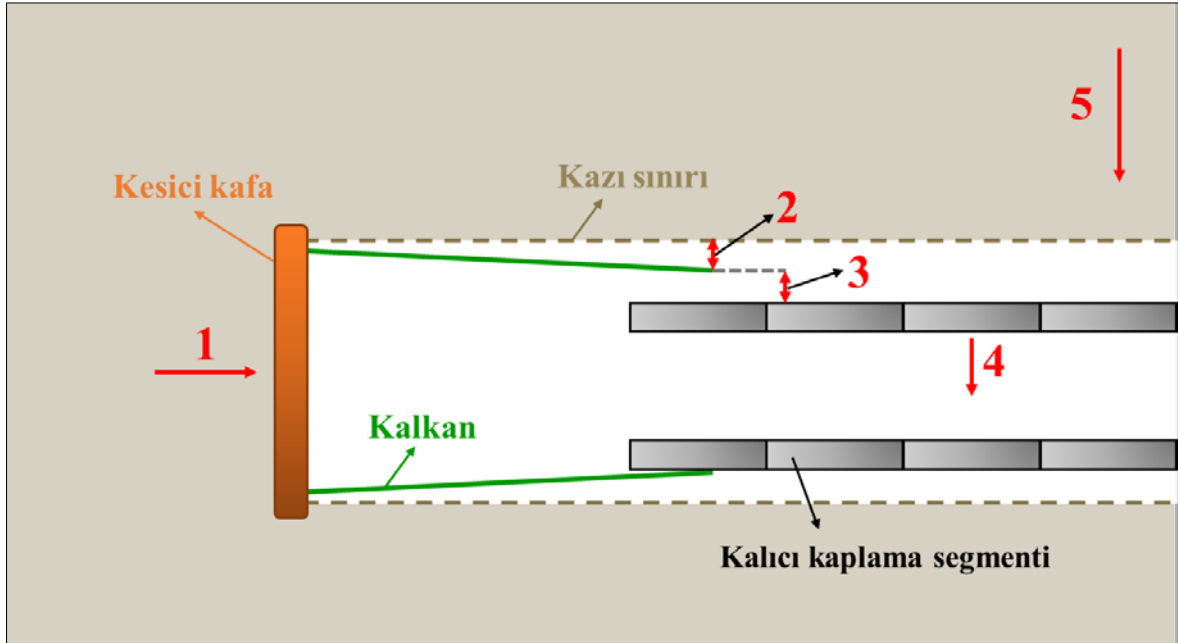


Şekil 4.3. Yüzey oturmalarına etki eden genel faktörler [35]

Tünel metoduna bağlı olarak yüzey oturmalarının ne şekilde etkilendiği detaylıca Mair ve Taylor [36] tarafından açıklanmıştır. Tünel açma yöntemine göre oturmaların meydana gelmesindeki oluşum değişkenlik gösterir. Tam mekanize tünel kazılarında, tünel içinde oluşup yüzeye yansıyabilecek deformasyonlar Şekil 4.4'te verildiği gibi şu şekildedir:

1. Tünel aynasının kazı yapılan yöne doğru hareket etmesi,
2. Kesici kafanın arkasındaki kalkan bölgesinde, radyal deformasyon ile zeminin kalkana doğru hareket etmesi,
3. Kalkan ile segment arasındaki boşluk nedeniyle, zeminin radyal olarak hareket etmesi,
4. Segment kaplamasının deformasyona uğraması nedeniyle zeminin radyal yönde hareketi,

5. Konsolidasyon sebebiyle tünel çevresindeki zeminin radyal olarak hareket etmesi

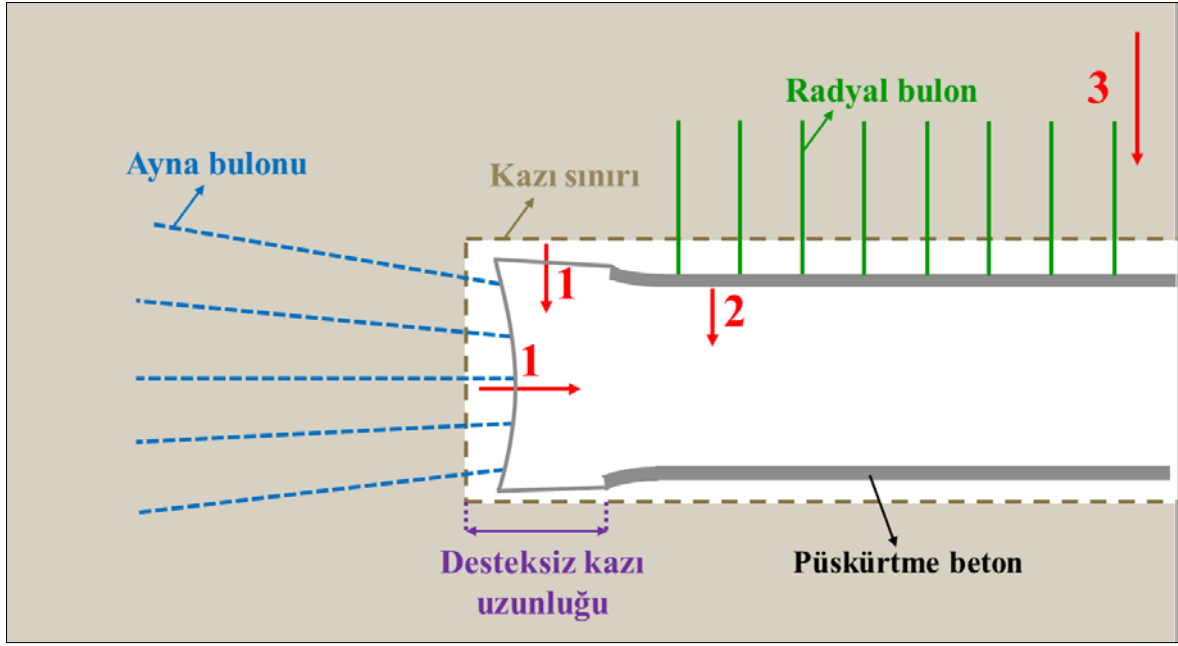


Şekil 4.4. Mekanize tünel kazısı sebebiyle tünel içinde oturmaya sebep olan bileşenler [36]

İlk bileşen sebebiyle oluşacak oturma tünel aynasında uygulanabilen ayna basınçları sayesinde oldukça düşürülebilir. Eğer kalkan konik bir geometriye sahipse ve kalkanın yönlendirilmesi ile alakalı uygulamada sorunlar yaşanırsa, ikinci bileşen oturmalarla etkili olabilir. Üçüncü ve en önemli bileşen kalkanın kuyruğu ile segment arasında oluşan boşluk sebebiyle ortaya çıkan oturmalarla. Fakat düzgün ve doğru uygulanan basınçlı bir enjeksiyon ile deformasyonlar kontrol altında tutulabilir. Kalıcı kaplamanın deformasyona uğraması ile ortaya çıkacak oturma; mekanize kazı ile açılan tünellerden çok konvansiyonel kazı ile açılan tünellerde kritiktir. Konsolidasyon sebebiyle oluşacak oturmalar ise yumuşak ve geçirimsizliği düşük zeminlerde ortaya çıkabilecek bir bileşendir [37].

Yine Mair ve Taylor'ın [36] bahsetmiş olduğu gibi konvansiyonel tünel kazılarında, tünel içinde oluşup yüzeye yansıyabilecek deformasyonlar Şekil 4.5'te verildiği gibi şu şekildedir:

1. Tünel aynasının ve desteksiz tünel kemerinin kazı yapılan yöne doğru hareket etmesi,
2. Püskürtme betonun deformasyona uğraması nedeniyle, zeminin radyal olarak hareket etmesi,
3. Konsolidasyon sebebiyle tünel çevresindeki zeminin radyal olarak hareket etmesi



Şekil 4.5. Konvansiyonel tünel kazısı sebebiyle tünel içinde oturmaya sebep olan bileşenler [37]

Konvansiyonel kazıda tünel aynasında ve destek sisteminin daha uygulanmamış olduğu kemer ve döşemede, deformasyonun oluşması beklenmedik bir durum değildir. Fakat bu bölgede oluşacak deformasyon alınabilecek kazı destek sistemi kapsamındaki önlemlerle azaltılabilir. Örneğin, tünel aynasında ayna bulonları veya tünel kemerinde radyal bulonlar kullanılabilir ve desteksiz kazı uzunluğu azaltılabilir. Fakat deformasyon ne kadar minimize edilse de birinci bileşenden gelecek deformasyonlar tamamıyla önlenemez ve konvansiyonel tünelde en kritik oturmalar bu bileşen sebebiyle ortaya çıkar. Benzer şekilde, geçici destek sisteminde kullanılan püskürtme betonun esnek bir yapıya sahip olması oturmalarla sebebiyet veren önemli bir etkidir ve ikinci bileşende göz ardı edilemez. Fakat püskürtme betonun matürasyonunu daha kısa sürede almasını sağlamak için ve püskürtme beton sertliğinin artırılması için birçok katkı malzemesi eklenir. Bu durum oturmaların çok artmadan belirli bir seviyede kalmasını sağlar. Son olarak mekanize kazıda da olduğu gibi konsolidasyon sebebiyle oluşacak oturmalar ise yumuşak ve geçirimsizliği düşük zeminlerde ortaya çıkabilecek bir bileşendir [37].

4.2. Yüzey Oturmalarının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

Yüzey oturmaları birçok yöntem kullanılarak belirlenebilmektedir. Bu yöntemlerin temel amacı; uygulama öncesi tasarım aşamasında yüzey oturmalarını belirlemek ve uygulama sırasında sahada oluşacak yüzey oturmalarını belirlemektir. İki amacın arasındaki fark şu şekilde açıklanabilir; uygulama öncesi belirlenen oturmalarda, analizler ile sahada oluşabilecek deformasyonlar öngörülmektedir. Uygulama sırasında belirlenen oturmalarda ise oturmaların kazı süresince takibi yapılarak, projedeki gerçek oturma değerlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Sahada elde edilen değerlerin sürekli izlenmesi sayesinde, çevredeki yapılar ve kazısı yapılan tünelde tasarım aşamasında öngörülmemiş bir problem olup olmayacağı anlaşılır. Tünel ve çevresindeki yapılarda meydana gelebilecek göçme ve yüksek deformasyonların tespiti sayesinde, gerekli önlemlerin zamanında alınmasıyla can güvenliği sağlanabilir ve ekonomik kayıp önlenir [13].

Projenin uygulama aşamasından önce, tasarım aşamasında yüzey oturmalarının kontrolü yapılmalıdır. Sahada kazı sırasında karşılaşılabilecek problemler ve alınması gereken önlemlerin tasarım aşamasında belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için ilk olarak bazı ampirik, analitik, yarı analitik ve numerik yöntemlerden biri ya da birçoğu kullanılarak beklenebilecek oturmalar belirlenir [38]. Deformasyon çoğu zaman özellikle metro projelerinde kaçınılmaz olsa da yüzey oturmalarının izin verilebilir limitler içinde kalıp kalmayacağını görmek amacıyla irdelenmelidir. Bu oturmalara bağlı olarak hangi yapılarda nasıl problemler çıkabileceği öngörülebilir ve kazı öncesi gerekli önlemler alınabilir.

Fakat tasarımdaki verilere göre yapılan analizler sadece bir öngörü olmaktadır. Sahadaki koşulun birebir analizlere yansıtılması mümkün değildir ve hesaplanan değerler sahada meydana gelecek değerler ile her zaman birebir olmayabilir. Bu farklılıklar bazı sebeplerden kaynaklanmaktadır. Sahada beklenmedik jeolojik koşullar ortaya çıkabilir, yer altı su seviyesi beklenmedik olabilir, projenin imalatı sırasında tasarıma birebir uyulup uyulmadığına veya bir aksilik olup olmayacağına dair bir kesinlik söz konusu değildir. Sahada uzun bir süre kazıların açık olarak beklemesi, tünel delme makinesinin bir süre durması gerekebilir, yani teknik aksaklıklar meydana gelebilir. Bu durumların olma ihtimali her proje için oldukça yüksektir. Bu sebeple tasarımda belirlenen değerler bir öngörü olarak kabul edilmelidir.

Projenin uygulama aşamasında, gözlemsel ve aletsel ölçümler ile deformasyonların takibinin yapılması önemlidir. Tasarım sonrasında belirlenen oturmaların saha ile kıyaslanması ve uyumlu olması tasarımın ve uygulamanın doğruluğunu gösterir. Sahada yapılan ölçümlerin kazı öncesi başlayıp kazı bitinceye kadar devam etmesi gerekmektedir. Gerektiğinde sahadaki verilere göre tasarımlar gözden geçirilmelidir. Tasarımdaki değerler yerini sahada aletsel ölçümlere bırakır. Bunun için yüzeyde, çevredeki yapılarda ve tünel içinde birçok yöntem kullanılarak ölçümler yapılabilir. Aşağıda uygulama öncesinde ve uygulama boyunca belirlenen yüzey oturmaları hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir.

4.3. Uygulama Öncesinde Belirlenen Yüzey Oturmaları

Tünel kazılarının önceden belirlenmesinde kullanılabilen yöntemlerden bazıları ampirik, analitik ve numerik olarak sıralanabilir. Aşağıda ampirik ve numerik yöntemler ile yüzey oturma tahminlerinin nasıl yapıldığını anlatan bazı veriler paylaşılmıştır.

4.3.1. Ampirik yöntem

Ampirik olarak yüzeyde meydana gelecek oturma eğrisinin tanımı tekil tünelde Peck [16]'in yapmış olduğu çalışma ile açıklanabilir. Bu çalışmaya göre tünel inşaatına bağlı olarak tünel çevresindeki zeminde meydana gelen hareket sonrası, yüzeyin radyal ve boyuna yönde yer değiştirmesi sonucu yeryüzünde ortaya çıkan deformasyonlar olarak belirtilmiştir. Buna göre Eş.1'de verilmiş olduğu gibi ve Şekil 4.6'da gösterildiği gibi yüzeydeki oturma geometrisi yani havzası aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$S = S_m \times \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

Burada,

S : Tünel aksına x kadar bir mesafede meydana gelen oturma değeri (m)

S_m : Yüzeyde meydana gelen maksimum oturma değeri (m)

x : Tünel aksına olan mesafe (m)

i : Yüzey oturma eğrisi dönüm noktasının tünel aksına olan mesafesi (m)

$$S_m = 0,785 \times (\gamma_n \times z_0 + \sigma_s) \times \left(\frac{D^2}{i \times E_s} \right) \quad (4)$$

Burada,

γ_n : Zeminin doğal birim hacim ağırlığı (kN/m³)

z_0 : Tünel merkezinden yüzeye olan mesafe (m)

σ_s : Sürşarj yükü (kPa)

D : Tünel kazı çapı (m)

i : Yüzey oturma eğrisi dönüm noktasının tünel aksına olan mesafesi (m)

E_s : Tünel kazısı yapılan zeminin elastik modül değeri (kPa)

İkiz tünellerde ise yüzeyde meydana gelen oturmaanın farklı bir yaklaşım ile belirlenmesi gerekmektedir. Örneğin O'Reilly ve New [41] yaptıkları çalışmada geliştirmiş oldukları süper pozisyon yöntemi ile iki tünel kazısının birbirine olan etkisini çok basitleştirilmiş bir şekilde oturmalarda dikkate almışlardır. Yönteme göre, her bir tünel üzerinde ayrı ayrı oturma eğrileri tünel kazıları birbirilerinden etkilenmiyor gibi düşünülerek belirlenir ve bu eğrilerin toplamı hesaplanarak ikiz tünel kazıları sebebiyle yüzeyde oluşacak oturma değerleri elde edilmiş olur. Bu basitleştirilmiş yöntemle göre; tüneller paralel ve aynı çaplarda, aynı hacim kaybına sahip yani aynı oturma havzasına sahip oldukları ön görülür. Bunun için belirledikleri formül aşağıdaki Eş.5'de ve oturma örneği görseli ise Şekil 4.7'de verildiği gibidir.

$$S = S_m \left[e^{\left(\frac{-x_A^2}{2i^2} \right)} + e^{\left(\frac{-(x_A-d)^2}{2i^2} \right)} \right] \quad (5)$$

Burada;

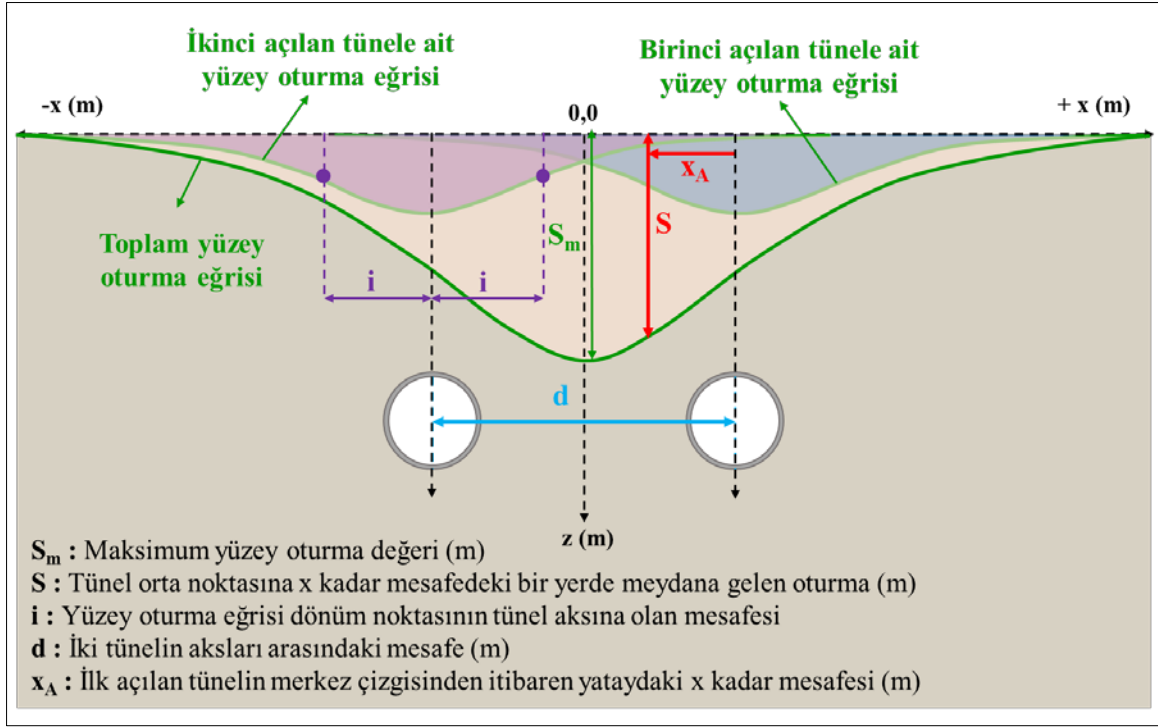
S : Tünel aksına x kadar bir mesafede meydana gelen oturma değeri (m)

S_m : Yüzeyde meydana gelen maksimum oturma değeri (m)

x_A : İlk açılan tünelin merkez çizgisinden itibaren yataydaki x kadar mesafesi (m)

i : Yüzey oturma eğrisi dönüm noktasının tünel aksına olan mesafesi (m)

d : İki tünelin merkez eksenleri arasındaki mesafe (m)



Şekil 4.7. Yüzey oturma eğrisi gösterimi – İkiz tünel

İkiz tünellerde meydana gelen maksimum oturma değeri S_m , yine bazı yaklaşımlar ile belirlenebilmektedir. En yaygın kullanılan maksimum oturma değeri bağıntısı Herzog [40] tarafından ileri sürülmüştür. Aşağıda Eş.6' de belirtildiği gibi ilgili bağıntı dikkate alınabilir.

$$S_m = 4,71 \times (\gamma_n \times z_0 + \sigma_s) \times \left(\frac{D^2}{(3i+d) \times E_s} \right) \quad (6)$$

Burada,

γ_n : Zeminin doğal birim hacim ağırlığı (kN/m³)

z_0 : Tünel merkezinden yüzeye olan mesafe (m)

σ_s : Sürşarj yükü (kPa)

D : Tünel kazı çapı (m)

i : Yüzey oturma eğrisi dönüm noktasının tünel aksına olan mesafesi (m)

d : İki tünelin merkez eksenleri arasındaki mesafe (m)

E_s : Tünel kazısı yapılan zeminin elastik modül değeri (kPa)

Yukarıda verilmiş olan bağıntılara göre yüzey oturma eğrisi dönüm noktası parametresi i , ve tünel hacim kaybı V_L , maksimum oturmanın belirlenmesinde önemli etkenlerdir. İki parametrede birden çok yaklaşım ile belirlenebilir. Örneğin, yüzey oturma eğrisinin dönüm

noktasının belirlenmesi için O'Reilly ve New [41] aşağıda Eş.7'de, verilen bağıntıyı dikkate almışlardır.

$$i = K \times z_0 \quad (7)$$

Burada,

K : Zemin tipine bağlı katsayı (-) (Kilde 0,5, kum ve çakılda 0,25)

z_0 : Tünel merkezinden yüzeye olan mesafe (m)

Chakeri ve arkadaşları [42] ise yayınlamış oldukları bir makalede yüzey oturma eğrisi dönüm noktasının tünel aksına olan mesafesini i , Eş.8'de belirtildiği gibi birkaç metot ile belirlenen i değerinin ortalaması olarak kabul etmişlerdir. Bağıntıya göre bu değerler Eş.9 ve Eş.11'de Arıoğlu'nun [35] çalışmasından seçilmiştir. Ayrıca Eş.10'de Glossop'un [43], Eş.12'de ise O'Reilly ve New'in [41] yapmış olduğu çalışmadaki formüller dikkate alınmıştır.

$$i = \frac{i_1 + i_2 + i_3 + i_4}{4} \quad (8)$$

$$i_1 = 0,386z_0 + 2,84 \quad (9)$$

$$i_2 = 0,5z_0 \quad (10)$$

$$i_3 = 0,9R \left(\frac{z_0}{2R} \right)^{0.88} \quad (11)$$

$$i_4 = 0,43z_0 + 1,1 \quad (12)$$

Burada,

z_0 : Tünel merkezinden yüzeye olan mesafe (m)

R : Tünel kazı yarı çapı (m)

Yukarıda da bahsedildiği gibi maksimum oturmanın belirlenmesinde önemli olan etkenlerden bir başkası ise hacim kaybı değeri V_L , olmaktadır. Bu değer birçok yöntemle belirlenebilmektedir. Örneğin Schmidt [39] tarafından, Herzog [40] tarafından ve

Guglielmetti ve arkadaşları [6] tarafından yaptıkları çalışmalarda farklı yaklaşımlar ile hacim kaybı değerleri vurgulanmıştır. Schmidt [39] için bu hacim kaybı değeri aşağıdaki Eş.13'te, Herzog [40] içinse Eş.14 ve Eş.15'te verilen formüle bağlıdır.

$$V_L = 2,506 \times i \times S_m \quad (13)$$

Burada,

S_m : Yüzeyde meydana gelen maksimum oturma değeri (m)

i : Yüzey oturma eğrisi dönüm noktasının tünel aksına olan mesafesi (m)

$$V_L = \pi \times u \times D \quad (14)$$

Burada,

u : Radyal yönde meydana gelecek kapanma nedeniyle oluşacak zemin kaybı (m)

D : Tünel kazı çapı (m)

$$u = \frac{D}{2} \times \left(\frac{1+\nu}{E_s} \right) \times (\sigma_s + \gamma \times z_0) \quad (15)$$

Burada,

D : Tünel kazı çapı (m)

ν : Tünel kazısı yapılan zeminin poisson oranı

E_s : Tünel kazısı yapılan zeminin elastik modül değeri (kPa)

σ_s : Sürşarj yükü (kPa)

γ_n : Zeminin doğal birim hacim ağırlığı (kN/m³)

z_0 : Tünel merkezinden yüzeye olan mesafe (m)

Guglielmetti ve arkadaşları [6] tarafından yapılmış olan çalışmalarına göre ise tünel üstündeki zemin tabakaları ve tünel kazı tabakasındaki jeolojik koşullara göre dikkate alınabilecek hacim kaybı yüzdeleri Çizelge 4.1'de verildiği gibidir.

Çizelge 4.1. Hacim kaybı V_L değerleri [6]

		TÜNEL AYNASI JEOLJİK KOŞULLARI			
		1) Zemin benzeri malzeme	2) Karma malzeme (zemin ve kaya)	3) Fay zonları ve/ve ya zemin bantları	4) Süreksizlik kaya ve zayıf kayalar
TÜNEL ÖRTÜ YÜKSEKLİĞİ JEOLJİK KOŞULLARI	A) Zemin benzeri malzeme	$V_L = \%0,8-1,0$	$V_L = \%1,0-1,2$	$V_L = \%0,8-1,0$	$V_L = \%0,5-0,8$
	B) Karma malzeme (zemin ve kaya)	$V_L = \%0,5-0,7$	$V_L = \%0,6-0,8$	$V_L = \%0,5-0,8$	$V_L < \%0,5$
	C) Fay zonları ve/ve ya zemin bantları	$V_L = \%0,4-0,8$	$V_L = \%0,5-0,9$	$V_L = \%0,6-1,2$	$V_L = \%0,4-0,9$
	D) Süreksizlik kaya ve zayıf kayalar	$V_L = \%0,3-0,5$	$V_L = \%0,4-0,6$	$V_L < \%0,4$	$V_L < \%0,2$

Elde edilen verilere göre normal şartlarda aşamalı kazılarda tünellerin ikisinde de aynı yüzey deformasyon değerlerinin elde edilmesi mümkün değildir. Çünkü zaten hali hazırda ilk tünel kazısı ile zemin örselenmiş ve kendi çevresinde mesafe uzaklaştıkça, etkisi azalarak bir plastikleşme bölgesi oluşmuştur. Ardından ikinci tünel kazısının yapılmasıyla kemerlenme etkisi ile birlikte ilk tünel kazısı sebebiyle örselenmiş alanda bir kazı daha yapınca ikinci tüneldeki oturmalar daha kritik bir hal alır ve iki tünelin yüzeyde meydana getirdiği oturma eğrisi daha farklı olur. Ayrıca, yüzeyde meydana gelen oturma yukarıdaki bölümlerde bahsedildiği gibi sadece kazıya bağlı zemin hareketi olarak değil, kaplamada meydana gelen deformasyona bağlı zemin hareketi nedeniyle de oluşmaktadır. Fakat analitik yöntemlerde bunun ön görülmesi mümkün değildir. Bu nedenle bu analitik yöntem sadece basit bir öngörü için kullanılabilir. Bir sonraki bölümde numerik yöntemlerle yüzey oturmasının nasıl belirlenebileceği hakkında bazı bilgilere yer verilmiştir.

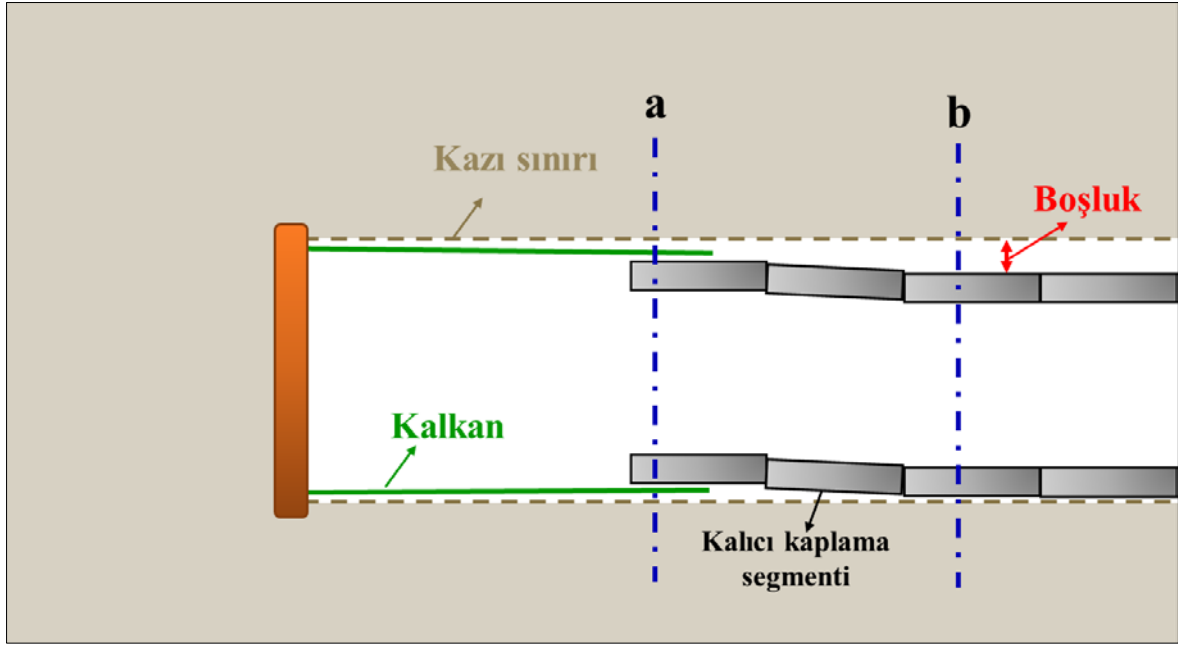
4.3.2. Numerik yöntem

Yüzey oturma tahminlerinde en güvenilir ve gerçeğe yakın sonuç verebilecek olan yöntem numerik analizlerdir. Çünkü numerik analizlerde birçok parametre programa tanımlanabilmektedir. Sonlu elemanlar metodu kullanılan bir yüzey oturma analizlerinde tünel delme makinesi ile yapılan kazılarda, programa girilmesi gereken veriler şu şekilde sıralanabilir:

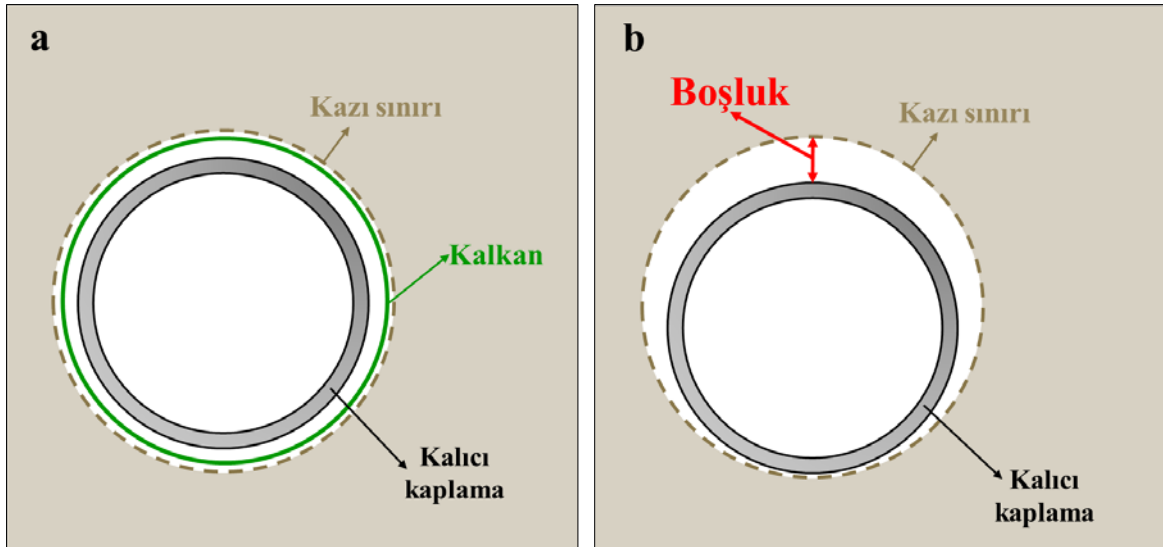
- Zemin parametreleri
- Zemin tabaka kalınlıkları
- Tünel geometrisi
- Tünel kalıcı kaplama rijitliği
- Tünel yerleşimi (farklı tünel kotları)
- Kazı aşamaları
- Hacim kaybı değeri
- Kazıya bağlı tünel çevresindeki zeminde meydana gelen rahatlama oranı

Numerik modellemelerde yüzeyde meydana gelen oturmalar farklı yöntemler kullanılarak belirlenebilmektedir. Örneğin Möller [37] yapmış olduğu bir çalışmada üç farklı yöntem ile iki boyutlu sayısal analizlerde yüzey oturmasının belirlenebileceğinden bahsetmiştir. Bunlar; boşluk yöntemi ile yüzey oturmasının belirlenmesi, gerilme azaltma yöntemi ile yüzey oturmasının belirlenmesi ve tünel büzülme yöntemi ile yüzey oturmasının belirlenmesi olarak sıralanabilir.

Boşluk yönteminin prensibi kısaca Rowe [44] tarafından hazırlanan bir makalede açıklanmıştır. Araştırmaya göre zemin ile tünel kaplaması arasındaki boşluğun doldurulması için uygulanan enjeksiyon malzemesinin katılaşp dayanımına ulaştığı süre zarfı içinde, kalıcı kaplamanın ağırlığı nedeniyle düşey yönde tünel hareket etmektedir. Bu hareket tünel taban kazı kotuna kadar devam eder ve kalıcı kaplama tabana oturur. Bu sebeple tünel kemerinde boşluk meydana gelir ve meydana gelen boşluk sebebiyle tünel çevredeki zemin aşağı yönde hareket ederek yüzeyde oturması meydana gelir. Bu durum zemin hareketi Şekil 4.8'de ve Şekil 4.9'da gösterildiği gibi açıklanabilir.



Şekil 4.8. Boşluk yöntemi prensibi için tünel delme makinesinde alınan en kesit gösterimi

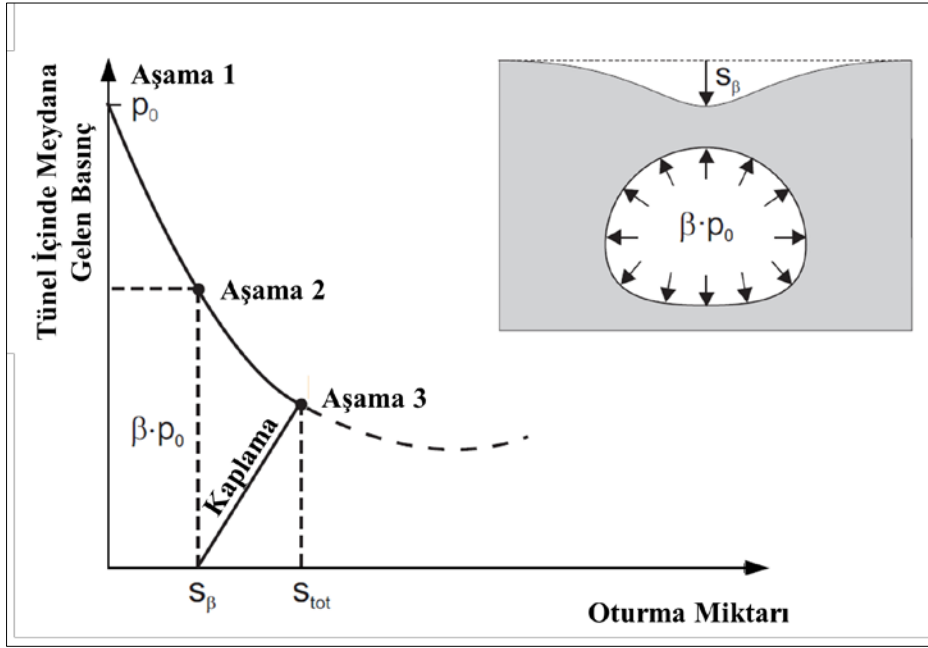


Şekil 4.9. Boşluk yöntemi prensibi a) Enjeksiyon öncesi durum, b) Enjeksiyon uygulaması sonrası durum [44]

Yukarıdaki şekiller göz önünde bulundurulduğunda numerik analizlerde yüzeyde oluşacak oturmaların belirlenmesi için boşluk parametresi dikkate alınarak modellemeler yapılabilmekte ve bu şekilde yüzey oturma davranışı incelenebilmektedir.

Gerilme azaltma yöntemi ise Panet ve Guénot [45] tarafından yapılan bir çalışma ile açıklanabilir. Bu yöntem tünel çevresindeki zeminde kazı sonrası belirli bir rahatlamanın meydana geleceği ve bu rahatlamanın da tünel çevresinde birtakım deformasyona sebep

olacağı prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemle göre, tünel kazısından sonra zeminde bir gevşeme meydana gelmektedir. Bu gevşeme sonrası tünel çevresindeki gerilmenin bir miktar azalacağı düşünülmektedir. Bu azalma miktarı bir yük azaltma faktörü β , değerine bağlı olmaktadır. Bu değer azaldıkça tünel çevresindeki rahatlama artmakta ve buna bağlı olarak da deformasyon artmaktadır. Bu durumda üç aşamada ilgili yöntem izah edilebilir. Bu aşamaların takip edilebileceği bir görsele Şekil 4.10'da yer verilmiştir.

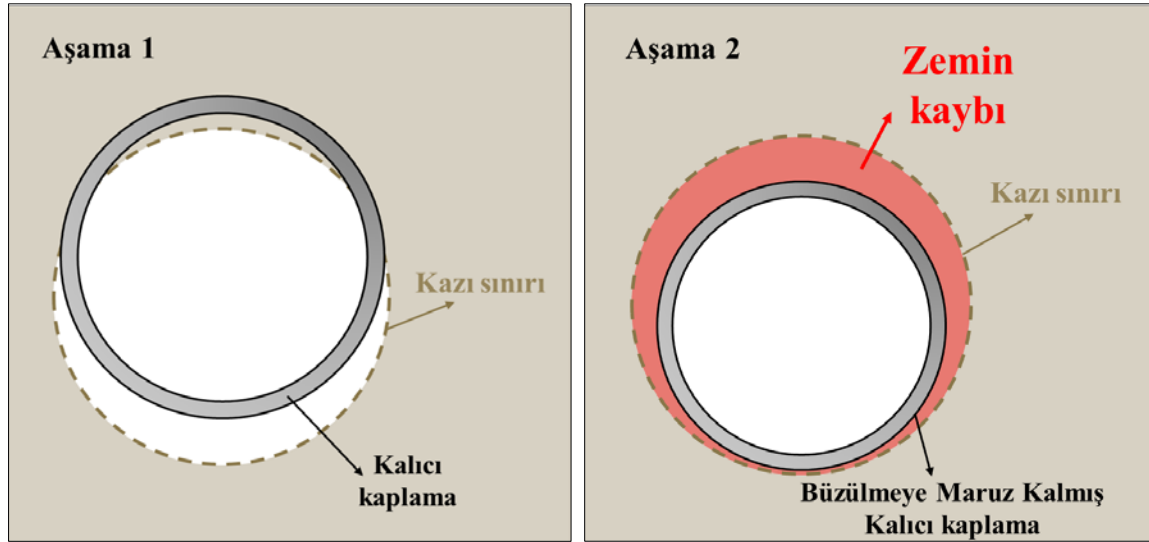


Şekil 4.10. Gerilme azaltma yöntemi aşamaları [37]

İlk aşamada geostatik durumdaki zemin gerilmesi p_0 , mevcuttur. İkinci aşamada tünel içindeki malzemenin kaldırılması ile başlangıç gerilmesi p_0 , yük azaltma faktörü β , aracılığı ile azaltılmaktadır. Bu aşamada sadece yüzeyde bir miktar oturma S_β , meydana gelir ve tünel içinde bir destek sistemi ya da kalıcı kaplama olmaksızın zeminde bir rahatlama söz konusudur. Bir sonraki aşamada ise kalıcı kaplama uygulanır ve zemindeki rahatlama bir miktar daha artıp nihai haline ulaşarak zemin yükü kalıcı kaplama üzerine gelmektedir. Bu noktada yüzeyde meydana gelecek oturma da S_m , nihai haline ulaşacaktır. Bu yöntem aracılığı ile sonlu elemanlar programlarında yük azaltma faktörü girdisi β , kullanılarak yüzeyde oluşacak oturmaların tahmini yapılabilir.

Yüzey oturmasının belirlenmesi için sonlu elemanlar yönteminde kullanılan bir başka yaklaşım ise büzülme yöntemidir. Bu yöntemin prensibi Vermeer ve Brinkgreve [46] tarafından hazırlanan bir çalışmada açıklanmıştır. Büzülme yönteminde, ilk aşma tünel kazısı yapılması ve aynı zamanda kaplamanın yerleştirilmesini içermektedir. Bu koşullarda

kazı sebebiyle tünel kaplaması yukarı doğru hareket eder. Bu aşamada kaplamanın bir ağırlığı olsa dahi göz ardı edilecek kadar azdır. Bir sonraki aşamada ise tünel kaplamasında bir hareket ile büzülme meydana gelerek tünel çevresinde bir deformasyon meydana gelir ve bu da yüzeyde meydana gelen oturmaları oluşturur. İlgili aşamalar Şekil 4.11’de gösterildiği gibi açıklanabilir.



Şekil 4.11. Büzülme yöntemi aşamaları [37]

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılan programlarda büzülme miktarı, hacim kaybı değeri V_L ile aynı kabul edilir. Bu nedenle analizlerde hacim kaybı değeri V_L kullanılarak yüzeyde oluşacak oturmaların tahmini yapılmaktadır. Bu nedenle numerik modellemelerdeki en önemli unsurlardan biri hacim kaybı değeri olmaktadır. Yüzeyde oluşan oturma hacminin, tünel kazısı sebebiyle tünel içinde oluşan hacim kaybına ($V_L\%$) eşit olacağı ön görülür [47].

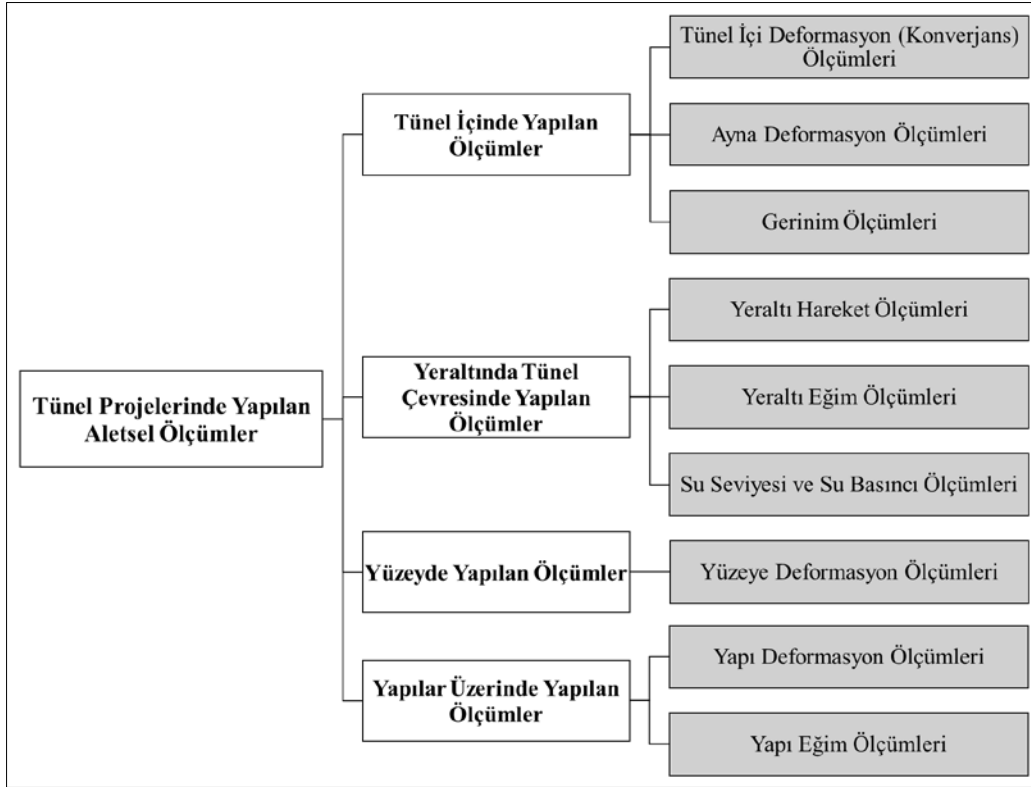
Bu araştırma kapsamında nümerik analizlerde, tünel kazıları sırasında hacim kaybı uygulanmış ve yüzeyde oluşan oturmalar tünel çevresinde uygulanmış olan hacim kaybına bağlı olarak elde edilmiştir. Ayrıca modelleme yöntemlerinden görüldüğü gibi ve önceki bölümde de bahsedildiği gibi yüzey oluşan oturma değerleri sadece tünel kazısını sebebiyle tünel çevresinde oluşan deformasyona bağlı değildir. Buna ek olarak kalıcı kaplamanın kendisinde meydana gelen deformasyonlarda da yüzeydeki oturmaları düşük bir miktarda da olsa etkilemektedir. Yapılan çalışma kapsamında bu durum dikkate alınarak kalıcı kaplamanın oturmaya olan etkisi de incelenmiştir. Bunlarla ilgili detaylı bilgilere analizler bölümünde yer verilmiştir.

4.4. Uygulama Boyunca Belirlenen Yüzey Oturmaları

Oturmaların tünel yapımı öncesi belirlenmesi sonrasında izleme sistemi ile uygulama boyunca takip edilmesi de birçok problemin önüne geçilmesini sağlar. Genel olarak projelerde izleme sistemleri; zeminde tünel kazısı sebebiyle meydana gelen tepkiyi görebilmek, uygulama süresince inşaat bölgesini kontrol altında tutabilmek, tasarım parametreleri ve modellerin doğruluğunu sağlamak, tünel kaplamasının kazı süresince ve sonrasında performansını takip edebilmek, yüzey oturmasını görebilmek ve yer altı suyu değişikliğinin takibi gibi çevrede oluşan etkileri gözlemleyebilmektir [48].

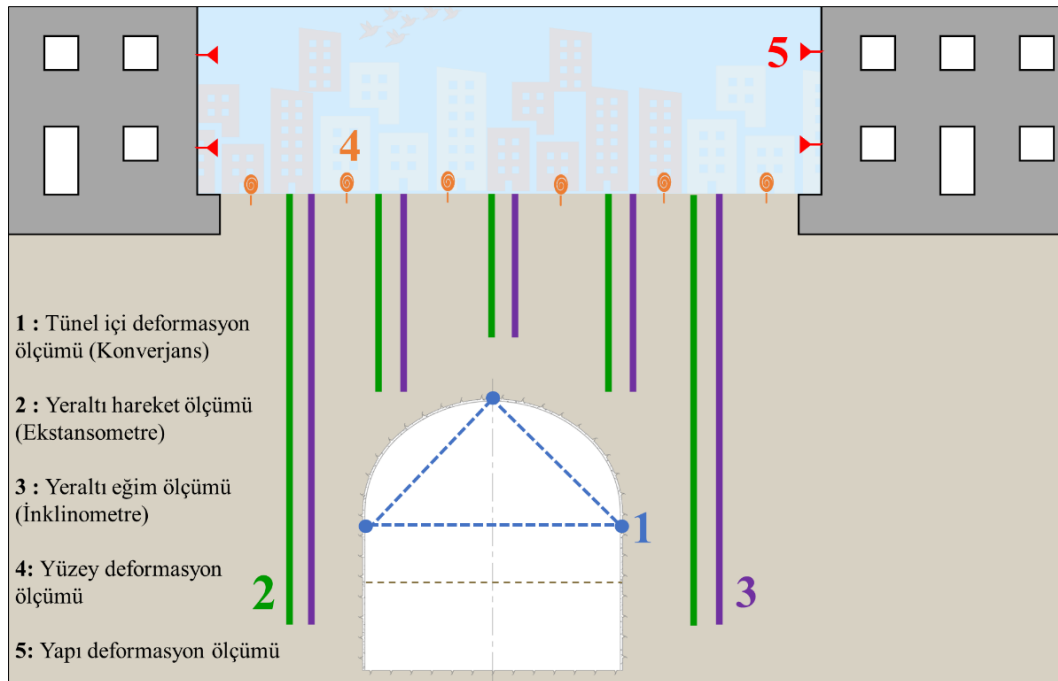
Yani tünel içinde kullanılan izleme cihazları, hem tünelde meydana gelecek riskleri önceden fark edebilmek için, hem de tünel içinde oluşan oturmalara bağlı yüzeyde meydana gelebilecek oturmaları önceden fark edebilip ona göre önlem alabilmek amacıyla önemlidir. Çevredeki yapılarda ise orantısız bir oturma ile karşılaşmamak ve ciddi sonuçlar meydana gelmemesi amacıyla yüzey ve yapılar üzerine yerleştirilen cihazlarla oturmaların takip edilmesi de oldukça kritiktir.

Ayrıca izleme sistemi için takip edilmesi gereken bazı aşamalar vardır. Bunlar; izleme konseptinin belirlenmesi, izleme programının oluşturulması, izleme sisteminin sahada kurulması, sonuçlarının toplanması, verilerin değerlendirilmesi ve raporlanmasıdır [49]. Bu döngü sahadan gelen verilere göre sürekli olarak tekrar eder. Eğer herhangi bir ölçümde problem varsa; bunun hangi aşamaya bağlı olduğu bulunmalıdır. Örneğin, ilk olarak izleme sistemlerinden toplanan verilerin doğruluğu incelenmelidir. Eğer bu aşamada bir yanlışlık yoksa, uygulama aşamasının doğruluğu teyit edilmeli ve gerekirse tasarım aşaması gözden geçirilmelidir. Sonuç olarak hangi aşamada sorun varsa onun çözülmesi sağlanır ve okuma değerleri raporlanmaya devam eder. Bu süreç proje sonuna kadar bu şekilde ilerlemelidir. İzleme sistemlerinde dikkate alınan parametreler ve ölçümlerden bazıları Şekil 4.12’de verildiği gibidir.



Şekil 4.12. Projede uygulanan aletsel ölçümler

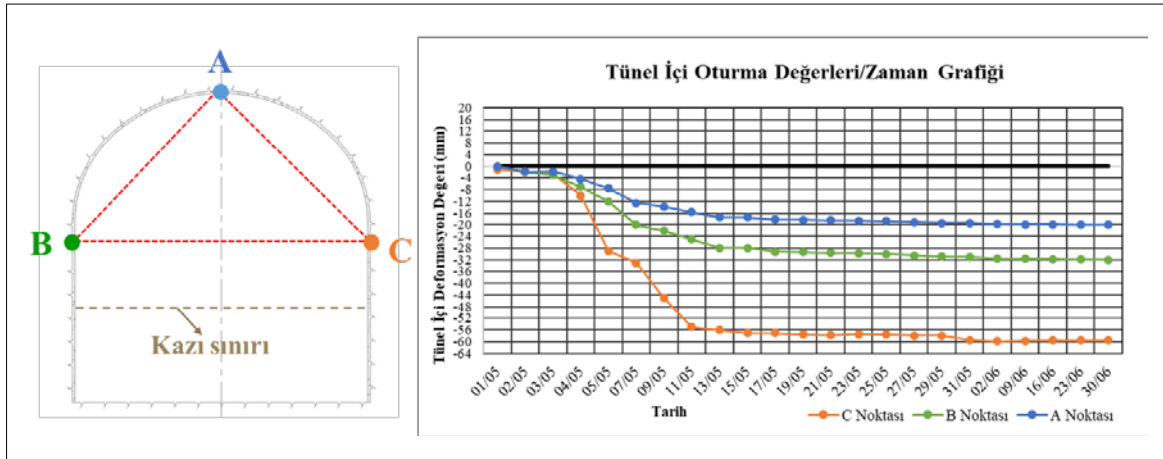
Kullanılan aletlerden bazılarının ait tipik gösterim Şekil 4.13'te verilmiş olup yöntemlerden birkaçı hakkında aşağıda detaylara yer verilmiştir.



Şekil 4.13. İzleme sistemlerine ait tipik gösterim

4.4.1. Tünel İçi Deformasyon (Konverjans) Ölçümleri

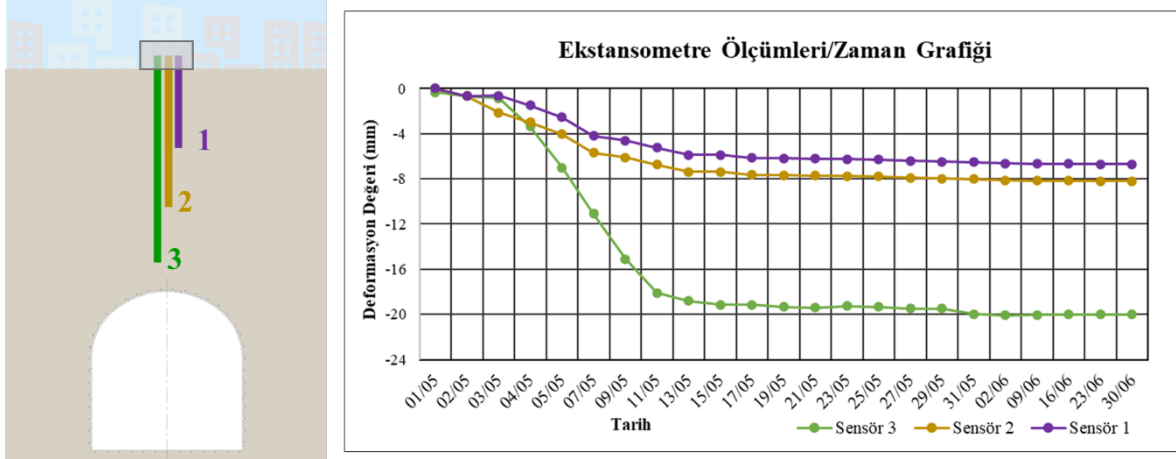
Tünel içinde meydana gelen hareketler; tünel içine deformasyon bulonları yerleştirilip, zamana bağlı olarak okumalar alınarak takip edilir. Bunun için tünel kazısı ardından uygulanan kazı destek sistemi sonrası bulonlar yerleştirilir. Bulonların tünel en kesitindeki konumları tünel geometrisi, çapı, yüksekliği ve genişliğine bağlıdır. Bir en kesite yerleştirilen bulonlara istasyon adı verilir. İstasyonların tünel uzunluğunda hangi arayla yerleştirileceği; jeolojik koşullara, örtü yüksekliğine ve tünel çevresindeki yapılaşmaya bağlıdır. İzleme sisteminden elde edilen deformasyonlar, grafiklere dökülerek değerlendirilir ve raporlanır. Şekil 4.14'te tünele yerleştirilen ölçüm noktaları ve oturma değerlerinin zamana bağlı grafiği için örnek olması amacıyla bir görsele yer verilmiştir.



Şekil 4.14. Konverjans ölçüm örneği

4.4.2. Yer altı Hareket Ölçümleri (Ekstansometre)

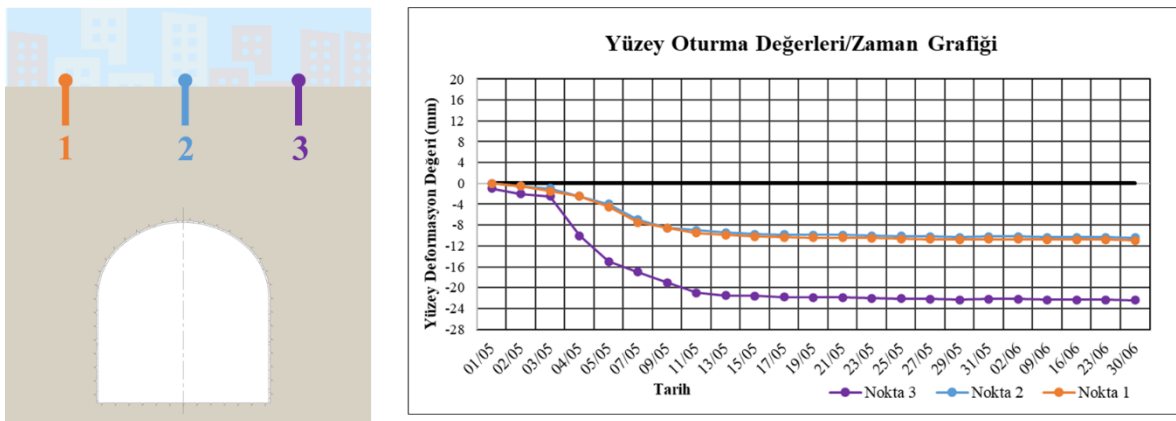
Tünel etrafında meydana gelen deformasyonların izlenmesi için ekstansometre kullanılabilir. Ekstansometre ölçümleri ile tünel seviyesinden yüzeye kadar bulunan jeolojik birimlerin birbirine göre hareketlerinin belirlenebilmesi sağlanır. Verilerin elde edilmesi için yer altına birçok farklı derinlikte sensörler yerleştirilir ve sensörlerden elde edilen deformasyonlar grafiklere dökülerek değerlendirilip raporlanır. Şekil 4.15'te yer altında ekstansometre ölçümü için tipik yerleşim görseline ve değerlerin zamana bağlı değişimi için örnek olması amacıyla bir grafiğe yer verilmiştir.



Şekil 4.15. Ekstansometre ölçüm örneği

4.4.3. Yüzey Deformasyon Ölçümleri

Tünel kazısı sebebi ile yüzeyde meydana gelen oturmalar yüzeye yerleştirilen oturma bulonları ile ölçülebilir. Bulonların adet ve konum bilgileri projenin kazılarında önce belirlenir ve proje başlangıcında bulonlar yerleştirilir. Özellikle dış etkenlerin fazla olacağı yüzeyde değerlerin doğru okunması için bulonların sağlam yerlere yerleştirilmiş olması önemlidir. Bulonlar; karayolu, demiryolu, köprü ayağı, viyadük ayağı ve bina çevresindeki zemine yerleştirilerek, yapılar çevresindeki yüzeyde meydana gelen deformasyonların takibi sağlanmaktadır. Şekil 4.16'da yüzeye yerleştirilen ölçüm noktaları için ve oturma değerlerinin zamana bağlı grafiği için örnek olması amacıyla bir görsele yer verilmiştir.



Şekil 4.16. Yüzey oturma ölçüm örneği

İzleme sistemlerinden elde edilen değerlere göre; eğer deformasyonlar limit değerlerden düşük ise uygulama işi ve tasarım doğru ilerliyor anlamına gelmektedir. Bu koşullarda her

şey olduğu gibi devam edebilir. Fakat değerler limit değerlere yakın ya da üstünde ise o zaman bazı önlemler ile bunların düzeltilmesi çok önemli bir husustur. Aşağıda deformasyonların sınır koşullarını geçtiği veya yaklaştığı durumlarda oturmalarla ilgili olarak alınabilecek önlemler hakkında birtakım açıklamalarda bulunulmuştur.

4.5. Belirlenen Oturmalarla Bağlı Olarak Alınması Gereken Önlemler

Tünel içinde oturma meydana gelmesi ve oturma değerlerinin artması ile yüzeydeki yollarda ya da yapılarda da oturmalar gözlemlenebilir. Genelde bu oturmalar homojen ise ciddi problemler ortaya çıkmaz fakat yine de projedeki şartname ya da standartlarda belirtilen limitleri aşmaması gerekmektedir. Oturma eğer orantısız olur ise; bina, köprü, viyadük gibi yapılarda ya da demiryolu ve karayolu gibi yol boyunca çatlaklar ve göçükler hatta yıkılmalar meydana gelebilir.

Özellikle demiryollarında raylarda oluşan milimetre cinsinden deformasyonlar bile ciddi sıkıntılar yaratabilir, meydana gelen oturmalar çok ciddi risklere sebep olabilir ve trenlerin raydan çıkması gibi durumlar yaşanabilir. Bu nedenle demiryolu olan bölgelerde oturma limitleri diğer bölgelere göre çok daha düşüktür.

Genel olarak oturmalar sebebiyle ciddi problemler yaşanmaması için tüm yapılar ve yollarda deformasyonların takibinin yapılması ve yapıdaki farklı noktalarda meydana gelen oturmalar arasındaki açılarının takibinin yapılması oldukça önemlidir. Eğer bu açı limit değerleri aşıyorsa, ilk olarak kazıların durdurulması ve konvansiyonel tünel kazıları yapıyorsa kalıcı kaplamaların tünel aynasına mümkün olan en yakın noktaya kadar tamamlanması gerekmektedir. Bu durum yeterli gelmezse tünelin kemerinden yukarı doğru, ya da yapı ile yol çevresinden zemin iyileştirme işlemlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bunun için enjeksiyonlar yapıp yapı ve yol altındaki bölgenin güçlendirilmesi veya tünel üstündeki bölgenin güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu durumlara rağmen oturmalar önlenemezse o zaman işveren onayı ile ilgili yapıların boşaltılması ve ilgili yolların kullanıma kapatılması gerekmektedir. Oturmaların tamamlanıp daha fazla deformasyon artışı elde edilmediği zamana kadar tünel projesi beklemelidir. Oturmalar tamamlandıktan sonra yapı ve yollardaki hasarların tespiti yapılmalı ve ilgili bölgedeki yapı ile yolların kullanılıp kullanılmayacağına karar verilmesi gerekir.

Oturmalar projede tasarlanacak izleme sistemlerine göre gün aŗı hatta günde iki kere ve hafta aŗı olarak kontrol edilebilir. Bunun için yapılar da ve yüzeydeki yollar da tasarım aŗamasında risk analizleri ve yüzey oturma kontrolleri yapılır ve belirlenen risk hasar kategorilerine göre bu deformasyon okuma aralıkları seçilir. Projelerde bu aŗamada çok hassas ve doğru bir takip ile okumaların alınması çok önemli bir husustur.

5. ANALİZLER

Bu bölümde numerik modeller ile ikiz TBM yani tünel delme makinesi ile açılan tünellerin kazısı sebebiyle yüzeyde meydana gelecek oturmaların parametrik bir çalışması yapılmıştır. Farklı analizler için yüzey oturmaları sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmiştir. Oturmaların bağlı olduğu etkenler incelenmiş ve özellikle metro projelerinde yapılacak TBM ile ikiz tünel kazılarında hangi faktörlerin kritik olabileceği belirlenmiştir. Bunun için numerik analizlerde Plaxis 2D [8] kullanılarak ikiz TBM tüneli kazılarına bağlı elde edilen yüzey oturmaları; bazı sabitler ve bazı değişkenler belirlenerek hesaplanmıştır. Sabitler tünel çapı ve iki tünel arasındaki yata mesafe olarak belirlenmiştir. Değişkenler ise farklı jeolojik birimler ve farklı örtü yükseklikleri olarak seçilmiştir. Sonrasında elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Ardından seçilen iki analiz için yine ikiz TBM tüneli kazıları dikkate alınarak ampirik yöntemler ile yüzeyde meydana gelecek oturmalar belirlenmiştir. Bu oturmalarda ise dikkate alınan bağıntılardaki parametreler, farklı yaklaşımlar ile belirlenmiş ve buna bağlı yüzey oturma değerleri elde edilmiştir. Sonrasında ilgili analizlerde ampirik yöntemlerle elde edilen maksimum oturma değerleri ile numerik yöntemler ile elde edilen maksimum yüzey oturma değerleri kıyaslanmıştır.

Son olaraksa yüzeyde meydana gelecek oturmaların ne kadarlık bir miktarın tüneldeki kalıcı kaplamanın deformasyonu nedeniyle meydana geldiği sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir.

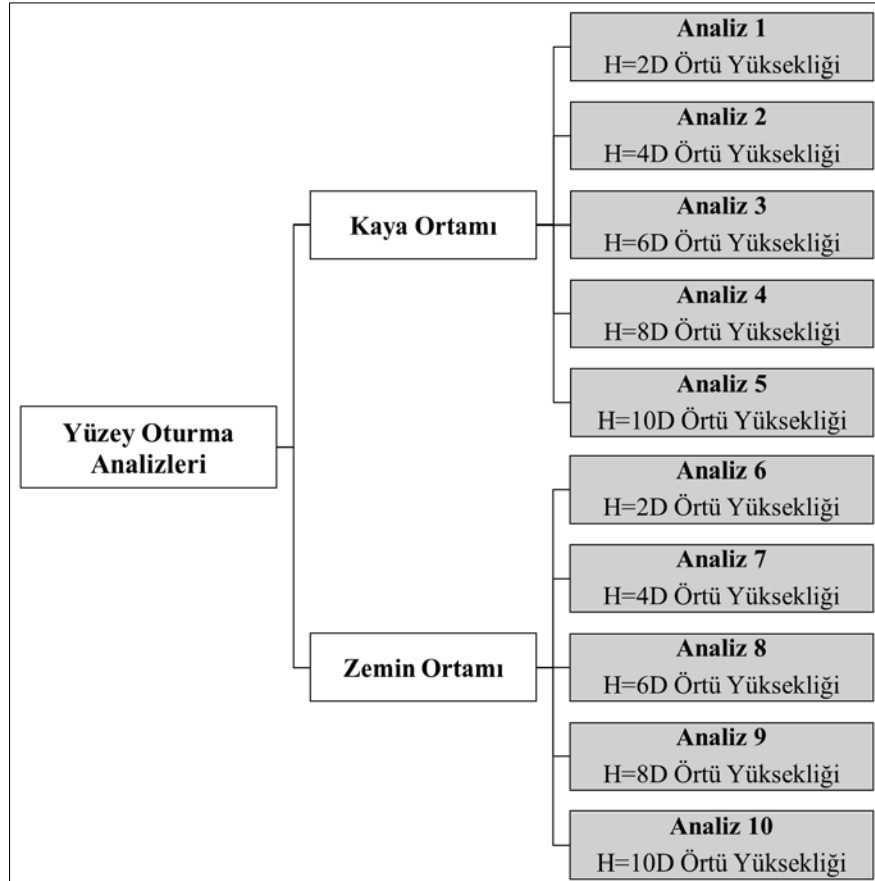
5.1. Analizler İçin Seçilen Sabitler ve Değişkenler

Sonlu elemanlar yöntemi ile incelenecek analizler için bazı değişkenler ve sabitler seçilmiştir. Bunlar; farklı zemin koşulları (kaya ortamı ve zemin ortamı) ve farklı örtü yükseklikleri (2 tünel çapı ve katları kadar – 2D, 4D, 6D 8D ve 10D) olarak açıklanabilir. Sabit parametreler ise tünel çapı ($D=6,30\text{m}$), ikiz tüneller arasındaki mesafe (2 tünel çapı – 2D) ve kazı sıralaması (aynı anda kazı yapılması) olarak belirlenmiştir. Bu durumu özetler bir tabloya Çizelge 5.1’de yer verilmiştir.

Çizelge 5.1. Analizlerde kullanılan değişkenler ve sabitler

Değişkenler	
Zemin Birimi	Kaya Ortamı Kta Formasyonu – Kireçtaşı
	Zemin Ortam TQk Formasyonu – Sert Kil
Örtü Yüksekliği	2D (12,60m)
	4D (25,20m)
	6D (37,80m)
	8D (50,40m)
	10D (63,0m)
Sabitler	
Tünel Çapı	D (6,30m)
İkiz Tüneller Arasındaki Yatay Mesafe	2D (12,60m)
Kazı Sıralaması	İki tünelin aynı anda kazılması <i>Aşama 1: Sol ve sağ tünel kazısı</i>

Belirlenen değişkenler ve sabitlere bağlı olarak bir analiz şeması çıkartılmıştır. Aşağıdaki Şekil 5.1’de verildiği üzere toplamda 10 adet analiz yapılmıştır.



Şekil 5.1. Sonlu elemanlar yönteminde dikkate alınan analiz şeması

Ampirik yöntemler ile incelenecek yüzey oturma hesaplamaları için iki analiz dikkate alınmıştır. Bu analizler bir adet kaya ortamı (Analiz 2) ve bir adet ise zemin ortamı (Analiz 7) için seçilmiş olup ortalama örtü derinliği (4 tünel çapı – 4D) dikkate alınmıştır.

Tünel kaplaması nedeniyle yüzeyde meydana gelen oturmaların kıyaslanması için de yine ortalama bir örtü yüksekliği seçilerek bir adet kaya ortamı (Analiz 2) için bir adette zemin ortamı (Analiz 7) için analizler tamamlanmıştır.

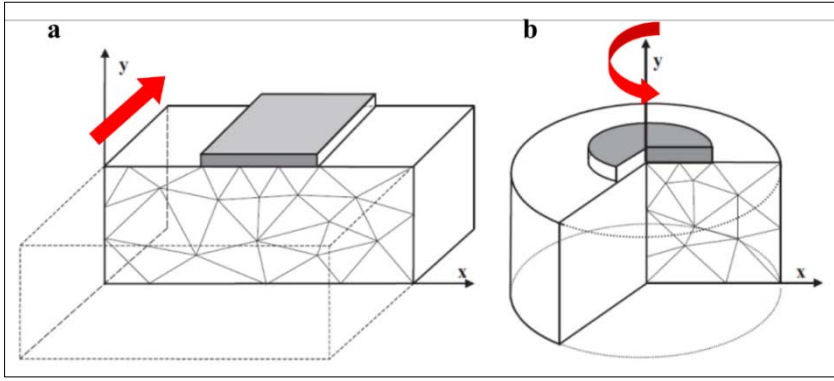
Aşağıda ilk olarak sonlu elemanlar programında kullanılacak bazı analiz girdi verileri hakkında bilgiler paylaşılmıştır. Sonrasında analizler yapılmış ve sonuçlar verilmiştir. Ardından ampirik yöntemlerle yapılan analizler için girdi ve sonuç verilerine yer verilmiş ve son olarak da kaplama nedeni ile yüzeyde oluşacak oturmalar için girdi verileri ve analizlerine yer verilmiştir.

5.2. Sonlu Elemanlar Programında Kullanılan Ana Girdi Verileri

Analizler için numerik hesaplama yönteminde kullanılacak Plaxis 2D [8] programı (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis) geoteknik mühendisliğinde, sonlu elemanlar yöntemi ile (FEM – Finite Element Method) deformasyon analizleri, stabilite analizleri, dinamik analizler gibi bazı analizlerin yapılmasına yardımcı olan bir bilgisayar programıdır. Temellerde, ankrajlı duvarlarda, yol dolgularında, oturma analizlerinde, tünel kazılarında gibi birçok analizde kullanılmaktadır. Deformasyon ve gerilmelerin bölünmüş elemanlara aktarılması ile analiz yapılır [8]. İlgili program 1987 yılında Hollanda, Delft Teknik Üniversitesinde geliştirilmiş ve çok yönlü, karmaşık olan geoteknik uygulamalarında kullanılabilecek önemli özellikler içermektedir [50].

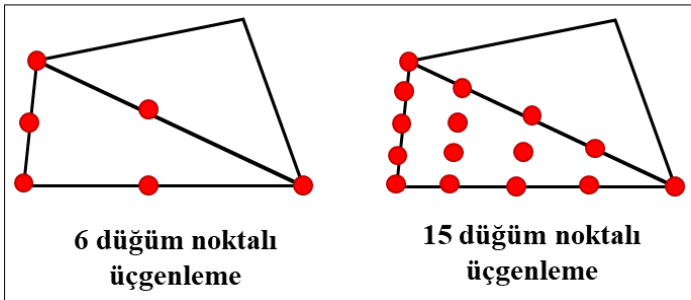
Genel olarak üç ara yüzden oluşmaktadır. Bunlar; girdi, hesaplama ve çıktılar olarak belirtilebilir. Girdi bölümünde geometrik tüm bilgiler programa işlenir, ilgili parametrelerin hepsi tanımlanır. Bunlar zemin modelleme yöntemi, zemin geometrisi, zemin parametreleri, tünel geometrisi, tünel malzeme özellikleri ve analiz çözümü için üçgenleme adedi olarak özetle belirtilebilir. Hesaplama bölümünde; hesap yöntemi ve yapım aşamaları gibi parametreler tanımlanır ve analizler başlatılır. Çıktı bölümünde ise; analizlere bağlı elde edilen deformasyonlar ve gerilmeler gibi bilgiler elde edilir.

Analizlerde oluşturulacak modelleme koşullarının doğru seçilmesi çok önemlidir. Bunun için Plaxis 2D programında iki farklı yöntem vardır. Bunlar “Düzlemsel Deformasyon” (Plain Strain) yöntemi ve “Eksenel Simetri” (Axisymmetry) yöntemi olarak belirtilebilir. Düzlemsel deformasyon yöntemi; bir zemin veya yapı geometrisinin bir yönde aynı şekilde uzadığı varsayılan, birim metrede dilim alınarak oluşturulan modelleme yöntemidir. Eksenel simetri yöntemi ise; bir geometrinin belirli bir eksene göre simetrik olduğu kabul edilen modelleme yöntemidir.



Şekil 5.2. Plaxis modelleme yöntemi a) Düzlemsel deformasyon yöntemi, b) Eksenel simetri yöntemi [51]

Analizlerin çözüm yapması için üçgenlere (mesh) bölünmesi gerekmektedir. Çünkü analizler bölünen üçgenlerde bulunan noktalarda yapılan çözümlemelerin bir sonraki üçgene aktarılması ile tamamlanır. Bu elemanların düğüm nokta sayısı Plaxis 2D’de 6 noktalı (6-Node) veya 15 noktalı (15-Node) olarak ikiye ayrılmaktadır. 6 noktalı düğüm elemanı seçilirse her elemanın 6 farklı noktada çözümleneceği anlamına gelir. 15 noktalı düğüm elemanı seçilirse de 15 noktada çözümlenecek demektir. Daha hassas çözümler için genelde 15 noktalı düğüm elemanları kullanılmaktadır. Şekil 5.3’te üçgenler üzerindeki düğüm noktalarını gösterir bir görsele yer verilmiştir.



Şekil 5.3. Plaxis 2D zemin üçgenlemelerindeki düğüm noktaları

Araştırma kapsamında Plaxis 2D’de dikkate alınacak aşamalar şu şekilde sıralanabilir:

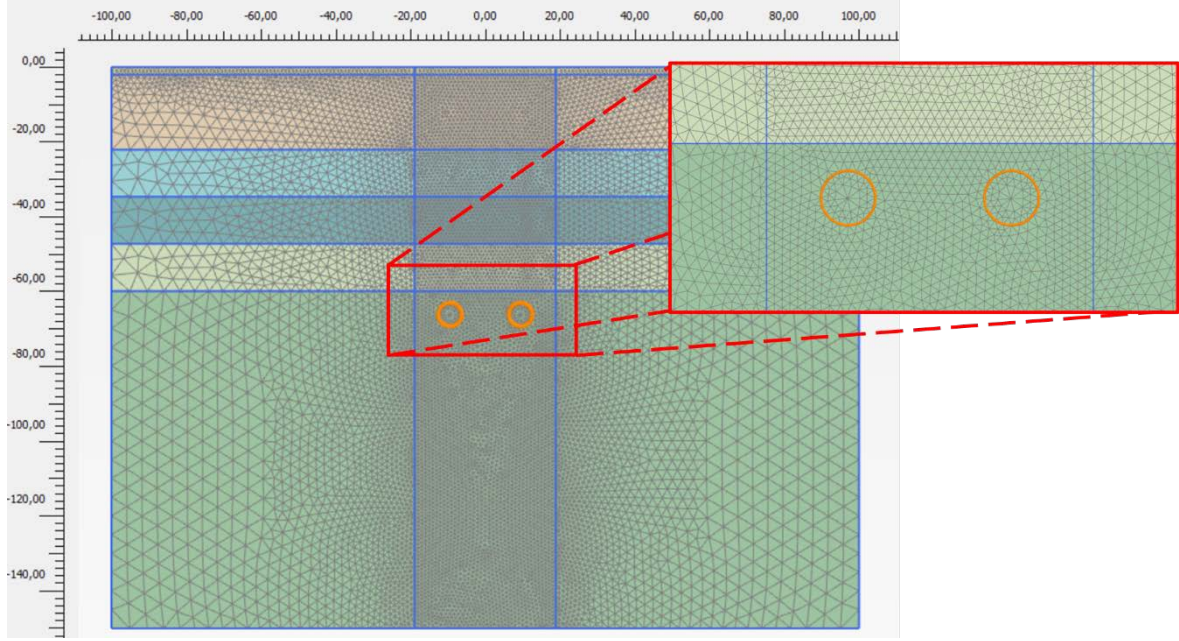
- Sınır Koşullarının Belirlenmesi: Her bir analiz kesiti için gerekli zemin modelinin oluşturulması (jeomekanik modelin programa işlenmesi), tabaka sınırlarının belirlenmesi, gerekli dış etkenlerin modelde uygulanması (yapı yükü, trafik yükü gibi) ve modele ait sınır koşullarının belirlenmesi.
- Geometrinin Tanımlanması: Tünel geometrisinin belirlenmesi.
- Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması: Belirlenmiş zemin/kaya parametrelerinin her bir tabaka için belirlenmesi, gerekli tünel malzemesi özelliklerinin (tünel delme makinesine ait kalıcı kaplama segment özelliklerinin) belirlenmesi.
- Modelin Üçgenlere Bölünmesi (Mesh): Analizin hassaslığının belirlenmesi ve nümerik hesaplamanın nerelerde daha hassas olması isteniyorsa oraları daha küçük üçgenlere bölerek, analiz üçgenlerinin belirlenmesi.
- İnşa Aşamalarının Tanımlanması: Sahayı en yakın temsil edecek şekilde inşa aşamalarının (sahada yapılacak kazı sıralamasına, nihai kaplama uygulama sıralamasına özen göstererek) modellenmesi.
- Hesapların Yapılması: Nümerik modelin çözümlenmesi.
- Sonuçların Analizi: Hesap sonuçlarının analizinin yapılması.
- Sonuçların Kıyaslanması: Elde edilen sonuçların kıyaslamasının yapılması.

Araştırma kapsamında yapılacak analizlerde zemin koşulu için düzlemsel deformasyon modelleme yöntemi seçilmiştir. Analizler 15 düğüm noktalı üçgenlemesi seçilerek kaya (Kireçtaşı) ve zemin (Sert kil) birimi için tamamlanmıştır. Aşağıda programa girilen zemin koşulları ve parametrelerinden bahsedilmiştir.

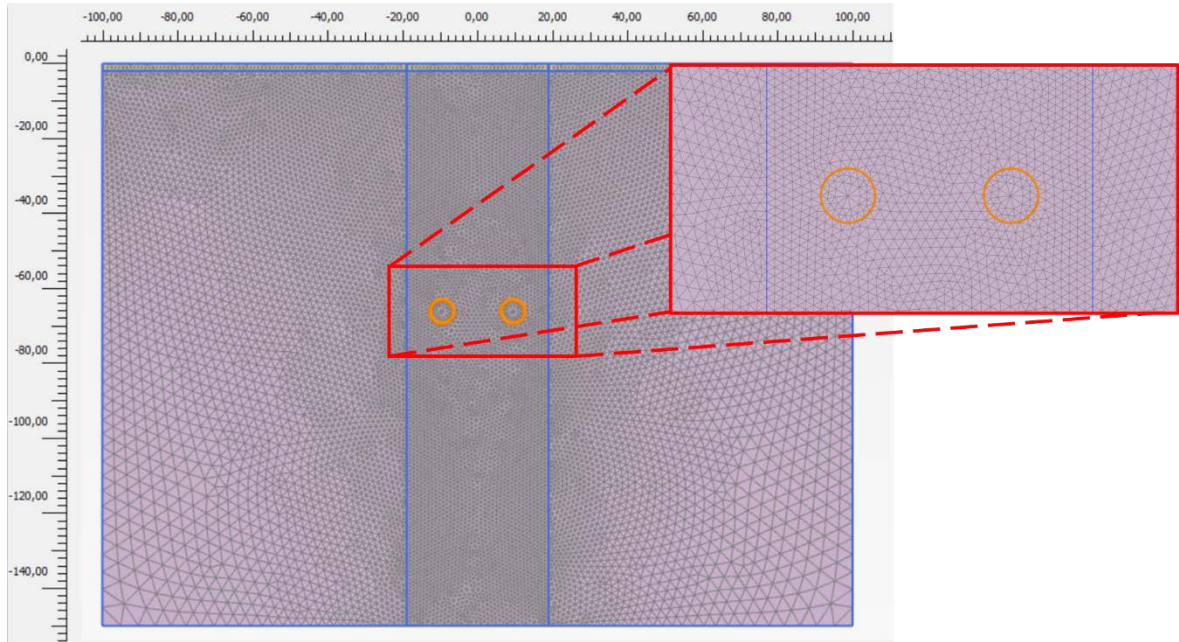
5.3. Sonlu Elemanlar Programında Kullanılan Zemin Girdi Verileri

Modellemelerde kaya – zemin ortamı 150,0 metre düşey ve 200,0 metre yatay olarak sınırlandırılmıştır. Toplam üçgenleme adedi kaya birimindeki analizlerde (Analiz 1 ~ 5) 22.000 elemandan fazla olarak, zemin birimindeki analizlerde (Analiz 6 ~ 10) ise 28.000 elemandan fazla olarak modellenmiştir.

Aşağıda iki zemin birimi içinde maksimum örtü yüksekliğindeki üçgenleme görseline Şekil 5.4'te Analiz 5 için ve Şekil 5.5'te Analiz 10 için yer verilmiştir. Tüm analizlerdeki üçgenleme yöntemleri ve diğer tüm Plaxis 2D verileri için detaylı bilgiler EK-1'de sunulmuştur.



Şekil 5.4. Kaya ortamı – Analiz 5 Plaxis programı üçgenleme örneği

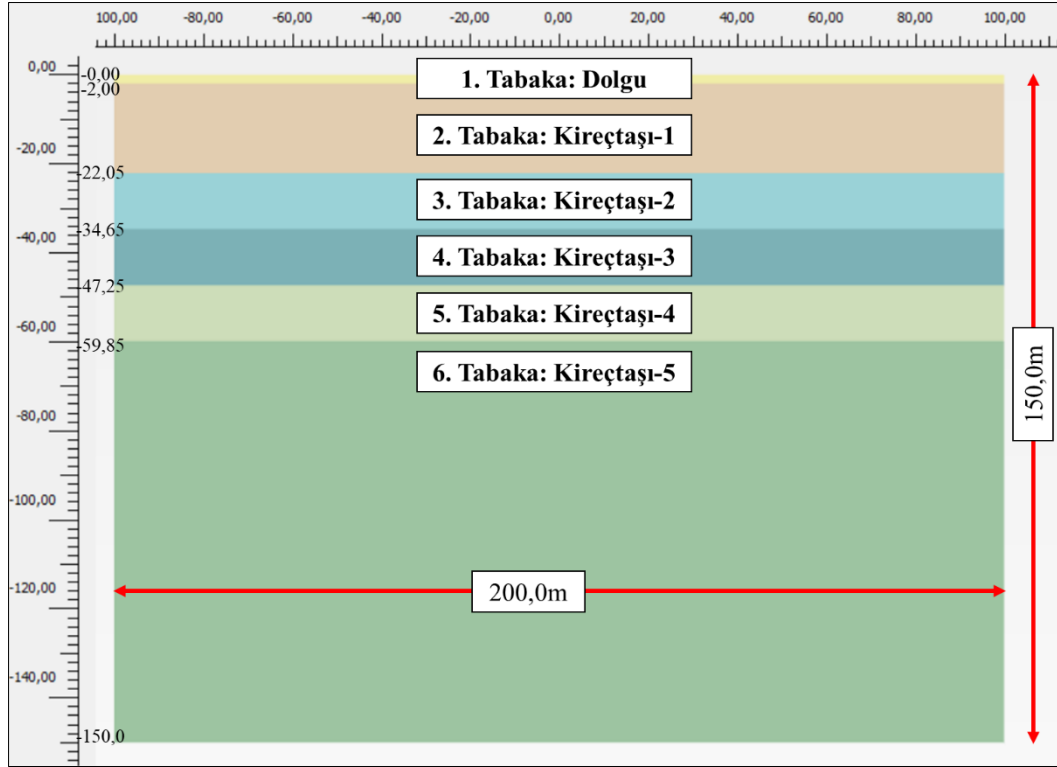


Şekil 5.5. Zemin ortamı – Analiz 10 Plaxis programı üçgenleme örneği

Modelin en üst katmanında dolgu malzemesi olduğu kabul edilmiş ve tüm analizlerde (Analiz 1 ~ 10) kalınlığı 2,00 metre seçilmiştir. Altında ise Analiz 1 ~ 5’da kireçtaşı tabakası, Analiz 6 ~ 10’da ise sert kil tabakası eklenmiştir. Analizlerde dolgu tabakasını simüle etmek için Mohr – Coulomb (MC) malzeme modeli, kireçtaşı tabakasını simüle etmek için Hoek – Brown (HB) malzeme modeli, sert kili simüle etmek içinse Hardening – Soil (HS) zemin modeli kullanılmıştır. Aşağıdaki bu zemin modelleri hakkında açıklamalarda bulunulmuştur.

- Mohr – Coulomb (MC) Zemin Modeli: Zeminin elasto-plastik bir davranış sergilediğini kabul eder [52]. Her katman için sabit bir ortalama rijitlik kabul eder. Dikkate aldığı parametreler; zeminin birim hacim ağırlığı γ , kohezyonu c , içsel sürtünme açısı ϕ , dilatasyon açısı ψ , zemin deformasyon elastik modülü E_{rm} ve poisson oranı ν olarak özetlenebilir.
- Hoek – Brown (HB) Zemin Modeli: Kaya niteliği taşıyan ve kaya parametrelerine sahip jeolojik birimler için kullanılan bir zemin modelidir. Dikkate aldığı parametreler; kayanın birim hacim ağırlığı γ , tek eksenli basınç dayanımı σ_{ci} , kaya malzeme parametresi m_i , jeolojik dayanım indeksi GSI , kaya kütlesi bileşim parametresi m_b , kaya kütlesi yapısına ait parametre s , kaya kütlesi yüzey özelliklerine bağlı parametre a , kaya deformasyon elastik modülü E_{rm} ve poisson oranı ν olarak özetlenebilir.
- Hardening – Soil (HS) Zemin Modeli: Pekleşen zemin modeli olarak da ifade edilir ve yumuşak, sert zemin ortamları için kullanılmaktadır. Gerilme ve derinliğe bağlı rijitlik artışını göz önüne alır [53]. Dikkate aldığı parametreler; zeminin birim hacim ağırlığı γ , kohezyonu c_{ref} , içsel sürtünme açısı ϕ , dilatasyon açısı ψ , zemin deformasyon elastik modülü E_{rm} , oedometre elastik modülü E_{oed}^{ref} , yükleme – geri yükleme elastik modülü E_{ur}^{ref} , gerilme artışına bağlı olarak rijitliği kontrol eden parametre m (power) ve poisson oranı ν olarak özetlenebilir.

Kaya (Kireçtaşı) biriminde sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmış olan parametreler Çizelge 5.2’de, zemin modeline ait Plaxis 2D görselleri ise Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.6. Kaya ortamı – Analiz 1 ~ 5 Plaxis programı zemin modeli gösterimi

Çizelge 5.2. Kaya biriminde (Kireçtaşı) kullanılan geoteknik parametreler

Litoloji	Zemin Modeli [-]	t [m]	γ [kN/m ³]	MC		HB						E_{rm} [MPa]	ν [-]
				c [kPa]	ϕ [°]	σ_{ci} [MPa]	m_i [-]	m_b [-]	s [-]	a [-]	GSI [-]		
Dolgu	MC	0,0-2,0	20	5	30	-	-	-	-	-	-	10	0,3
Kireçtaşı-1	HB	2,0-22,05	26	-	-	12	9	0,517	0,0001	0,544	20	219	0,3
Kireçtaşı-2	HB	22,05-34,65	26	-	-	14	9	0,618	0,0002	0,531	25	377	0,3
Kireçtaşı-3	HB	34,65-47,25	26	-	-	16	9	0,739	0,0004	0,522	30	651	0,3
Kireçtaşı-4	HB	47,25-59,85	26	-	-	18	9	0,883	0,0007	0,516	35	1122	0,3
Kireçtaşı-5	HB	>59,85	26	-	-	20	9	1,056	0,0013	0,511	40	1915	0,3

Burada,

MC: Mohr – Coulomb zemin modeli

HB: Hoek – Brown zemin modeli

t: Tabaka kalınlığı

γ : Birim hacim ağırlığı

c: Mohr – Coulomb yenilme kriteri kohezyon değeri

ϕ : Mohr – Coulomb yenilme kriteri içsel sürtünme açısı değeri

σ_{ci} : Hoek – Brown yenilme kriteri tek eksenli basınç dayanımı

m_i : Hoek – Brown yenilme kriteri kaya malzeme parametresi

m_b : Hoek – Brown yenilme kriteri kaya kütlesi bileşim parametresi

s : Hoek – Brown yenilme kriteri kaya kütlesi yapısına ait parametre

a : Hoek – Brown yenilme kriteri kaya kütlesi yüzey özelliklerine bağlı parametre

GSI: Hoek – Brown yenilme kriteri jeolojik dayanım indeksi

E_{rm} : Deformasyon elastik modülü

ν : Poisson oranı

Analizlerde dikkate alınan elastik modül değerleri RocData 4.0 [54] programından kullanılan kaya parametrelerine göre elde edilmiştir. Bununla ilgili program sonuçlarına EK-2’de yer verilmiştir. Ayrıca sükûnet durumunda toprak basıncı katsayısı K_0 , modellerde otomatik olarak program tarafından belirlenmiştir.

Zemin (Sert kil) biriminde sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmış olan parametreler Çizelge 5.3’te, zemin modeline ait Plaxis 2D görselleri ise Şekil 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Zemin biriminde (Sert kil) kullanılan geoteknik parametreler

Litoloji	Zemin Modeli [-]	t [m]	γ [kN/m ³]	MC		HS			E_{rm} [MPa]	E_{oed}^{ref} [MPa]	E_{ur}^{ref} [MPa]	ν [-]
				c [kPa]	ϕ [°]	c_{ref} [kPa]	ϕ [°]	m [-]				
Dolgu	MC	0,0-2,0	20	5	30	-	-	-	10	-	-	0,3
Sert Kil	HS	>2,0	19	-	-	15	32	0,5	-	80	160	0,3

Burada,

MC: Mohr – Coulomb zemin modeli

HS: Hardening – Soil zemin modeli

t: Tabaka kalınlığı

γ : Birim hacim ağırlığı

c: Mohr – Coulomb yenilme kriteri kohezyon değeri

ϕ : Mohr – Coulomb ve Hardening – Soil yenilme kriteri içsel sürtünme açısı değeri

c_{ref} : Hardening – Soil yenilme kriteri kohezyon değeri

m (power): Mohr – Coulomb yenilme kriteri gerilme artışına bağlı olarak rijitliği kontrol eden parametre

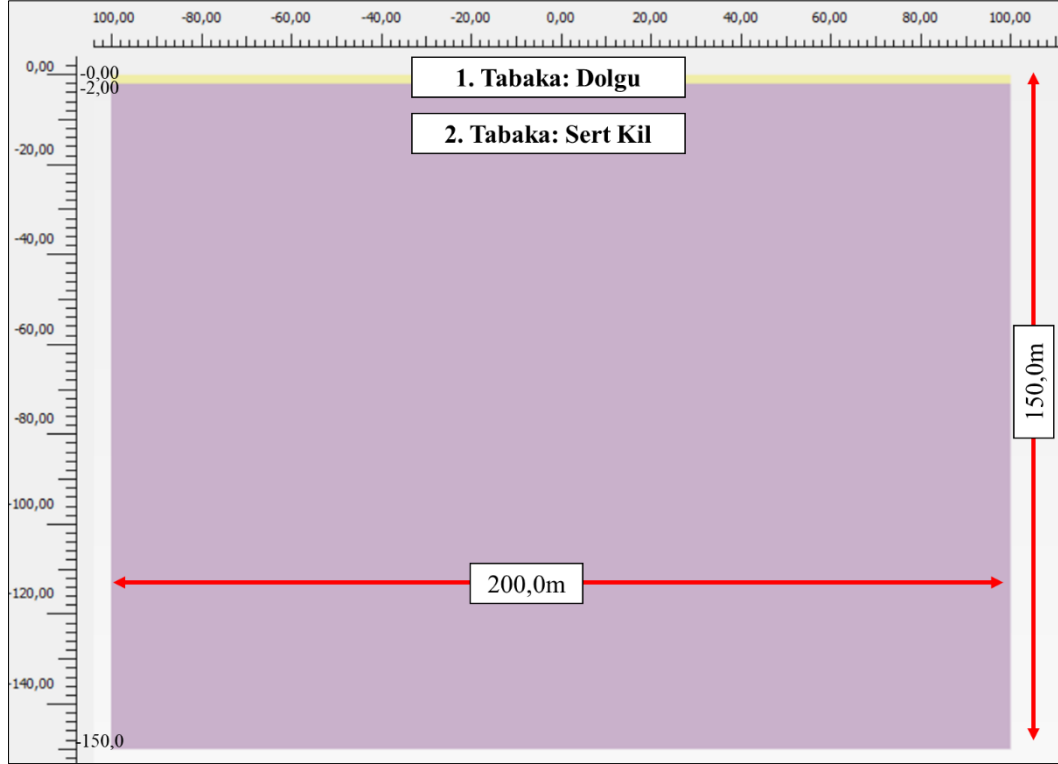
E_{rm} : Deformasyon elastik modülü

E_{oed}^{ref} : Oedometre elastik modülü

E_{ur}^{ref} : Yükleme – geri yükleme elastik modülü

ν : Poisson oranı

Ayrıca sükûnet durumunda toprak basıncı katsayısı K_0 , modellerde otomatik olarak program tarafından belirlenmiştir.

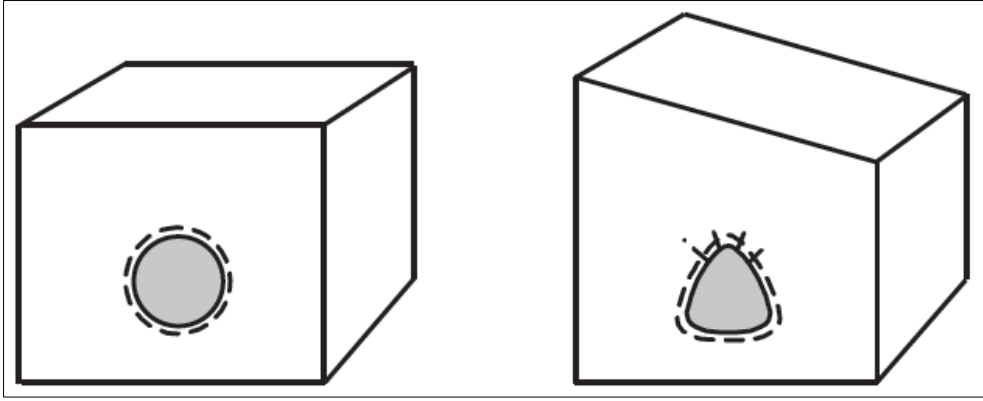


Şekil 5.7. Zemin ortamı – Analiz 6 ~ 10 Plaxis programı zemin modeli gösterimi

Bir sonraki bölümde Plaxis 2D programında kullanılan tünellere ait girdi verileri hakkında bilgiler paylaşılmıştır.

5.4. Sonlu Elemanlar Programında Kullanılan Tünel Girdi Verileri

TBM tünelleri Plaxis 2D programında plaka (plate) elemanı olarak modellenebilmektedir. Bu eleman aslında bir kiriş elemanı olarak kabul edilir. Plaka zeminde yüksek eğilme rijitliği bulunan yapıları modellemek için kullanılmaktadır ve düzlemsel deformasyon metodu ile çözümlenen modellerde bir yönde uzanan elemanlar olarak kullanılabilirler [55]. Bunun bazı örnekleri Şekil 5.8’de verildiği gibidir.

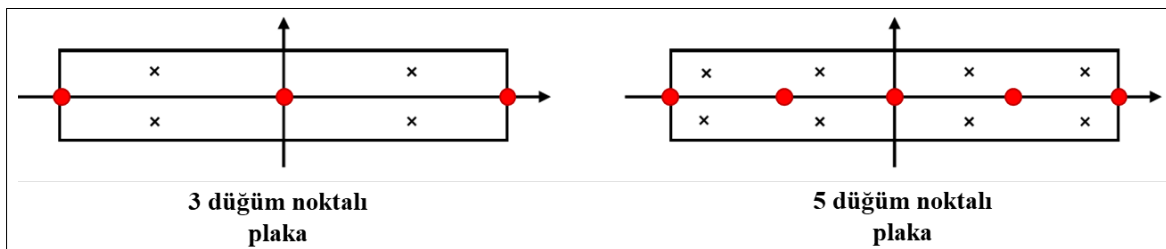


Şekil 5.8. Plaxis 2D programında plaka uygulama örnekleri

Analizlerde plaka elemanlarının çözülmesi için belirlenen düğüm noktaları, zemin üçgenlemesinde seçilen tipe göre değişiklik göstermektedir [53]. Bu durum şu şekilde açıklanabilir:

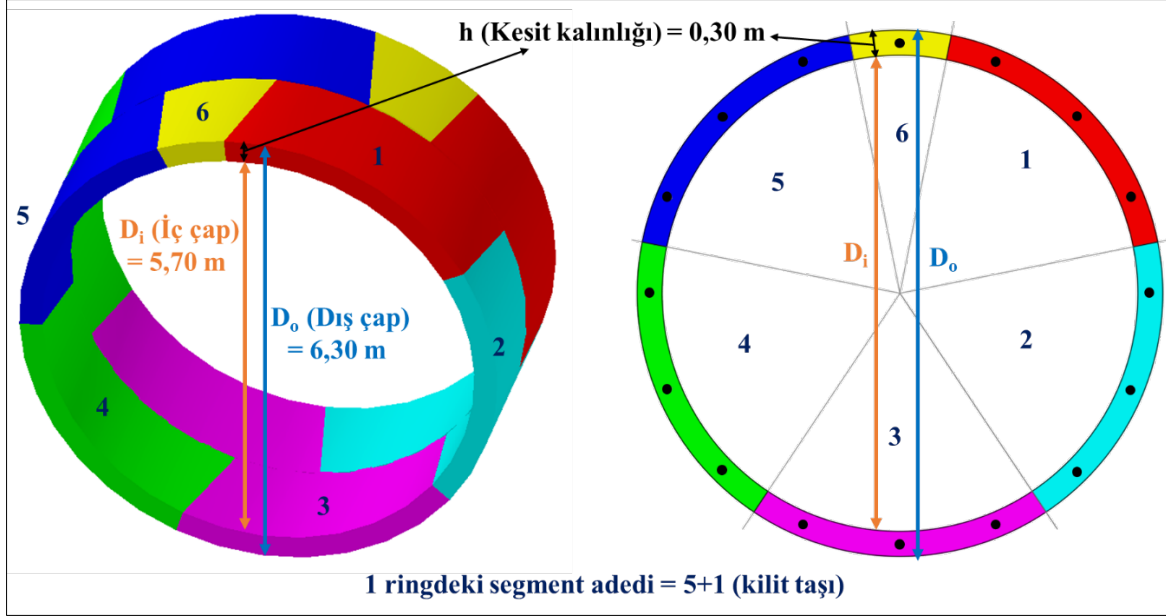
- Zemin elemanları 6 noktalı düğüm noktası ile çözülüyorsa; plakalar bu durumda 3 düğüm noktası ile çözülür.
- Zemin elemanları 15 noktalı düğüm noktası ile çözülüyorsa, bu durumda ise plakalar 5 düğüm noktalı bir eleman olarak çözülür.

Yani yukarıda da belirtildiği gibi zemin üçgenlemesi 15 noktalı düğüm elemanı seçilerek çözüldüğünde, daha hassas bir analiz yapılmış olur. Bu durum plaka içinde geçerlidir. Buna paralel olarak zemin üçgenlerindeki düğüm noktası artınca plaka elemanındaki düğüm noktası da artar ve bu da daha hassas bir üçgenleme ile plaka elemanlarının çözülmesine yardımcı olur. Aşağıda plaka elemanlarına ait düğüm noktası görseline Şekil 5.9'da yer verilmiştir.



Şekil 5.9. Plaxis 2D plaka üçgenleme örneği

Analizlerde dikkate alınacak tünel kesiti yukarıda da belirtildiği gibi bir TBM tüneli olup dış apı $D_0=6,30$ m olarak seçilmiştir. Tüneldeki kalıcı kaplama segmentlerinin kalınlığı $h= 30,0$ cm olarak belirlenmiştir. Bu sebeple i ap $D_i=5,70$ m olmaktadır. Aşağıda bunları özetler tünel geometrik özelliklerine dair bir görsele şekil 5.10'da yer verilmiştir.



şekil 5.10. Analizlerde dikkate alınan tünele ait geometrik zellikler

Plaxis programında tünel modellemek için kullanılan plakalar için dikkate alınan parametreler; elemanın aksenal rijitliği EA , eğilme rijitliği EI ve poisson oranı ν olarak özetlenebilir. Burada; E değerı kaplama betonun elastik modülünü, A değerı kaplamanın bir birim genişliğindeki kesit alanını ve I değerı ise kaplamaya ait atalet momentini temsil etmektedir. Aşağıdaki Eş.16'ya ve Eş.17'ye bakıldığında normal şartlarda EA ve EI değerlerinin nasıl hesaplandığı verilmiştir.

$$EA = E \times h \times b \quad (16)$$

$$EI = E \times \frac{b \times h^3}{12} \quad (17)$$

Burada,

E : Kapslama betonun elastik modülü (MPa)

h : Kapslama betonunun kalınlığı (m)

b : Kapslamanın genişliği (m)

Kaplama genişliği b , Plaxis 2D programında düzlemsel deformasyon analizlerinde bir birim yani bir metre genişliği dikkate alınarak çözüm yapıldığı için bu değer 1,0 m seçilmiştir. Fakat kaplama kalınlığı h , yukarıda da belirtildiği gibi 0,30 m olarak seçilmemiştir. Çünkü Wood [56] yapmış olduğu bir çalışmada, bir ringdeki segment adedi 4'ten fazla ise segmentlerin bağlantı bölgelerinde ciddi rijitlik kaybı olacağı, sonuç olarak ringin kaplamasının bu durumdan direkt olarak etkileneyeceği ve kaplamanın dayanımının düşeceğini belirtmiştir. Bunun için bazı önermiş olduğu eşitlikler dikkate alınarak bir atalet momenti elde edilebilir ve elde edilen atalet momenti ile eş değer kesit kalınlığı hesaplanabilir. Son olarak hesaplanan eş değer kesit kalınlığı göz önüne alınarak eş değer EA ve EI değerleri Plaxis 2D programındaki plaka özellikleri olarak seçebilir. İlgili çalışmada eş değer parametreler şu eşitlikler ile belirlenir:

$$I_e = I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^2 \times I \text{ Eğer; } I_e \leq I \text{ ve } n > 4 \text{ ise,} \quad (18)$$

Burada,

I_e : Eş değer atalet momenti (m^4)

I_j : Segment bağlantı bölgesindeki atalet momenti (m^4)

I : Kaplamanın normal kalınlığına bağlı atalet momenti (m^4)

n : Segment sayısı (-)

Aşağıdaki Eş.19'da segment bağlantı bölgesindeki atalet momentinin nasıl belirlendiği gösterilmiştir.

$$I_j = \frac{b \times h_j^3}{12} \quad (19)$$

Burada,

b : Kesit kalınlığı (m)

h_j : Segment bağlantı bölgesindeki kesit kalınlığı (m)

Eş.20'de Bir sonraki eşitlikte kaplamanın normal kalınlığına bağlı atalet momentinin I , nasıl hesaplandığı açıklanmıştır.

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (20)$$

Burada,

h : Kaplama betonunun kalınlığı (m)

b : Kaplamanın genişliği (m)

Bunlara bağlı olarak elde edilen eş değer atalet momentinden geri analiz ile eş değer kesit kalınlığının h_e nasıl belirlendiği Eş.21’de gösterilmiştir.

$$h_e = \sqrt[3]{12 \times \frac{I_e}{b}} \quad (21)$$

Burada,

h_e : Eş değer kesit kalınlığı (m)

I_e : Eş değer atalet momenti (m⁴)

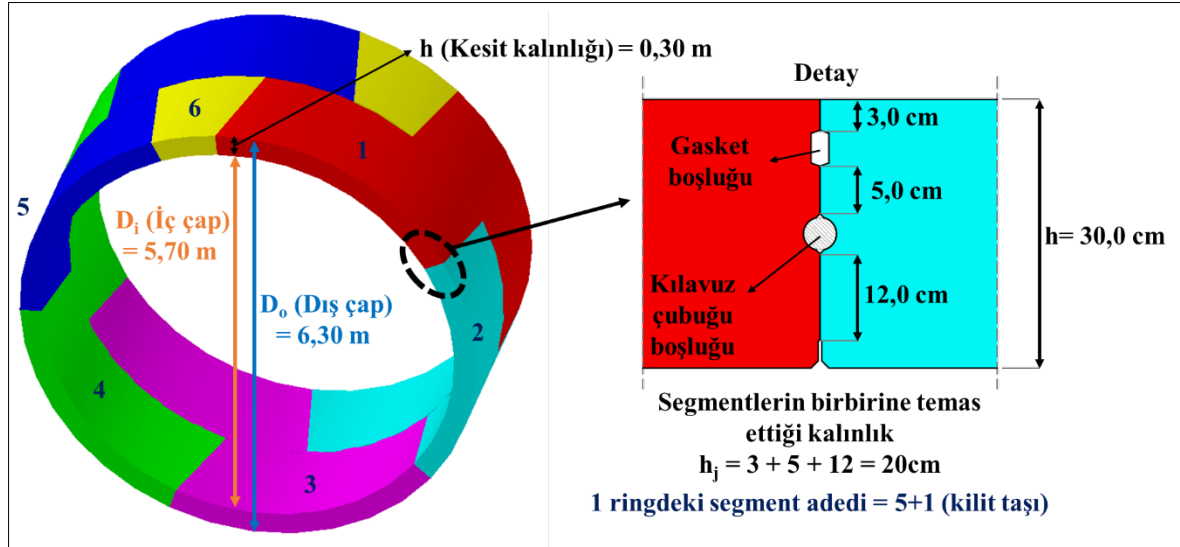
b : Kaplamanın genişliği (m)

Analizler kapsamında dikkate alınmış beton dayanımı C45/55 olarak seçilmiştir. Buna bağlı olarak seçilen elastik modül değeri Çizelge 5.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Beton sınıfına bağlı dayanımlar [57]

Beton Sınıfı	Karakteristik Basınç Dayanımı, f_{ck} (MPa)	Eşdeğer küp (150mm) Basınç Dayanımı (MPa)	Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı (MPa)	28 Günlük Elastisite Modülü E_c (MPa)
C16	16	20	1,4	27000
C18	18	22	1,5	27500
C20	20	25	1,6	28000
C25	25	30	1,8	30000
C30	30	37	1,9	32000
C35	25	45	2,1	33000
C40	40	50	2,2	34000
C45	45	55	2,3	36000
C50	50	60	2,5	37000

Ayrıca TS500 [57]’e göre betonun poisson oranı $\nu=0,20$ olarak seçilmiştir. Aşağıda Şekil 5.11’de segment bağlantı bölgesindeki kesit kalınlığının belirtildiği görsele yer verilmiştir.



Şekil 5.11. Tünel segmentinin birbirine temas ettiği kalınlık h_j

Yukarıdan görüldüğü üzere segmentlerin birbirine en az temas ettiği bölgelerde kalınlık 20,0 cm olmaktadır. Analizlerde segment birleşim yerleri rijit kabul edilmiş olup yukarıdaki verilere göre ve Wood [56]'un yapmış olduğu çalışmaya göre Plaxis 2D programında girilecek olan EA, EI değerleri Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Plaxis 2D programı tünel plaka girdi verileri

Segment Bağlantı Bölgesi Geometrik Parametreleri		Segment Bağlantı Olmayan Bölgelerdeki Geometrik Parametreler	
h_j [cm]	20	h [cm]	30
b [cm]	100	b [cm]	100
I_j [cm ⁴]	66666,67	I [cm ⁴]	225000
Eş Değer Geometrik Parametreler		Plaxis 2D Programında Kullanılacak Plaka Parametreleri	
n [-]	6	Beton Sınıfı	C45/55
I_e [cm ⁴]	166666,67	f_{ck} [MPa]	45
I_e [m ⁴]	0,001666667	E [MPa]	36000
h_e [cm]	27,144	EA [kN/m]	9771903
h_e [m]	0,27144	EI [kNm ² /m]	60000

Plaxis programında kullanılan tünel parametreleri hakkında detaylı bilgilere EK-1'de yer verilmiştir. Aşağıda sonlu elemanlar programında tünel kazıları için modelleme kriteri ve analizleri özetler görsellere yer verilmiştir.

5.5. Sonlu Elemanlar Programında Tünel Kazısı İçin Girdi Verileri

Tünel kazısına bağlı yüzeyde oluşması beklenen oturmalar tünelde meydana gelen hacim kaybına (% V_L) bağlıdır. Bu çalışmada önceki bölümlerde bahsedilmiş olduğu gibi bükülme yöntemi yani hacim kaybı değeri yüzey oturmalarının belirlenmesi için sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmıştır. Yine önceki bölümlerde bahsedildiği gibi hacim kaybı oranı birçok parametreye bağlıdır. Fakat özellikle tünel üstündeki örtü yüksekliği boyunca ve tünel kazısının bulunduğu kottaki jeolojik koşullar hacim kaybı oranının belirlenmesinde oldukça baskın olmaktadır. Guglielmetti ve arkadaşları [6] yapmış oldukları bir çalışmada mekanize tünel kazılarında meydana gelecek hacim kayıplarını örtü yüksekliği ve tünel aynasındaki jeolojik koşullara bağlamışlardır. Bunun için aşağıdaki Çizelge 5.6'da işaretlenen değerler numerik analizlerde dikkate alınan hacim kayıp değerleri olarak seçilmiştir.

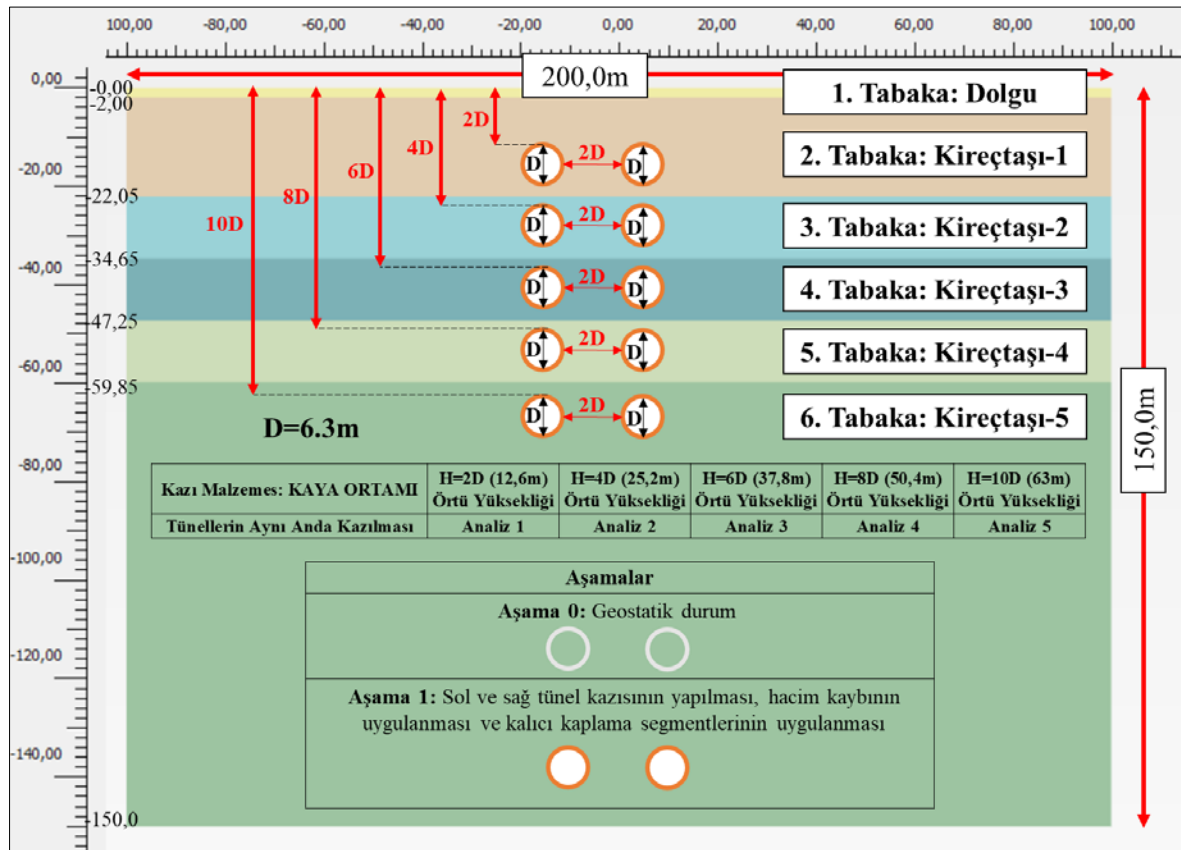
Çizelge 5.6. Analizler için seçilen hacim kaybı değerleri [6]

TÜNEL AYNASI JEOLJİK KOŞULLARI				
	1) Zemin benzeri malzeme	2) Karma malzeme (zemin ve kaya)	3) Fay zonları ve/ve ya zemin bantları	4) Stireksizlik kaya ve zayıf kayalar
TÜNEL ÖRTÜ YÜKSEKLİĞİ JEOLJİK KOŞULLARI	A) Zemin benzeri malzeme $V_L = \%0,8-1,0$ Zemin ortamı $V_L = \%1.0$ (Analiz 6 ~ 10)	$V_L = \%1,0-1,2$	$V_L = \%0,8-1,0$	$V_L = \%0,5-0,8$
	B) Karma malzeme (zemin ve kaya) $V_L = \%0,5-0,7$	$V_L = \%0,6-0,8$	$V_L = \%0,5-0,8$	$V_L < \%0,5$
	C) Fay zonları ve/ve ya zemin bantları $V_L = \%0,4-0,8$	$V_L = \%0,5-0,9$	$V_L = \%0,6-1,2$	Kaya ortamı $V_L = \%0.5$ (Analiz 1 ~ 5) $V_L = \%0,4-0,9$
	D) Stireksizlik kaya ve zayıf kayalar $V_L = \%0,3-0,5$	$V_L = \%0,4-0,6$	$V_L < \%0,4$	$V_L < \%0,2$

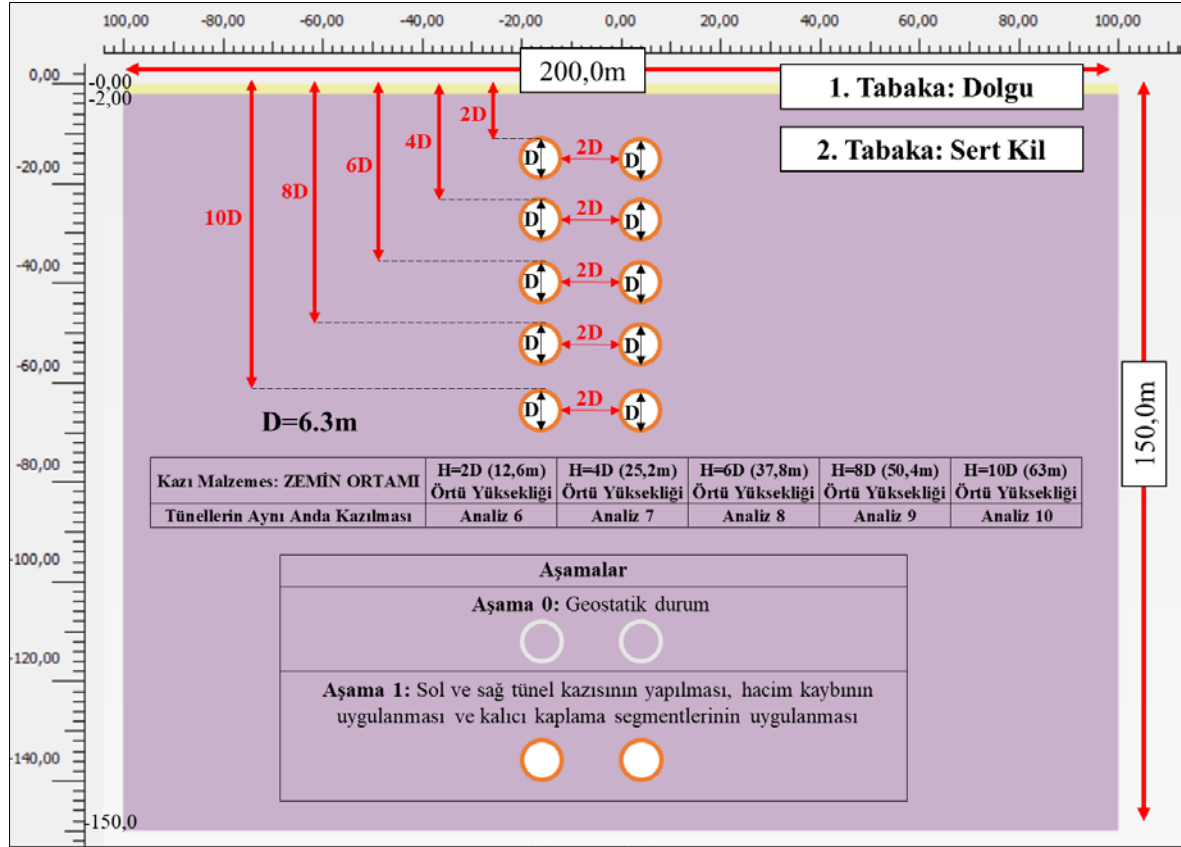
Hacim kaybı yukarıda da gösterildiği gibi kaya birimindeki analizlerde %0,5 olarak, zemin birimindeki analizlerde ise %1,0 olarak seçilmiştir.

Plaxis 2D programında tünel kazılarında bağlı oluşacak yüzey oturmaları elle ile girdi verisi olarak tanımlanan deformasyon başlığı içindeki “line contraction” sekmesi üzerinden yapılmaktadır. Bu sekme, tünel kaplaması etrafındaki alan kaybını modellemek için kullanılır ve birimi yoktur. Fakat TBM tünel kazılarında çevrede meydana gelen alan kaybı yüzde değeri olarak girilmelidir [55]. Analizlerde tünel modeli için programda tanımlanan plakaya direkt olarak belirlenen hacim kaybı değeri girilerek modellemeler yapılmıştır.

Aşağıda kaya ve zemin birimindeki analizlerde dikkate alınan tabakalar hakkında, zemin sınır koşulları hakkında, tünel yerleşimleri yani örtü yükseklikleri hakkında ve kazı sıralamaları hakkında Şekil 5.12’de ve Şekil 5.13’de bazı özet analiz görsellerine yer verilmiştir.



Şekil 5.12. Kaya biriminde yapılacak analizler için taslak Plaxis 2D gösterimi



Şekil 5.13. Zemin biriminde yapılacak analizler için taslak Plaxis 2D gösterimi

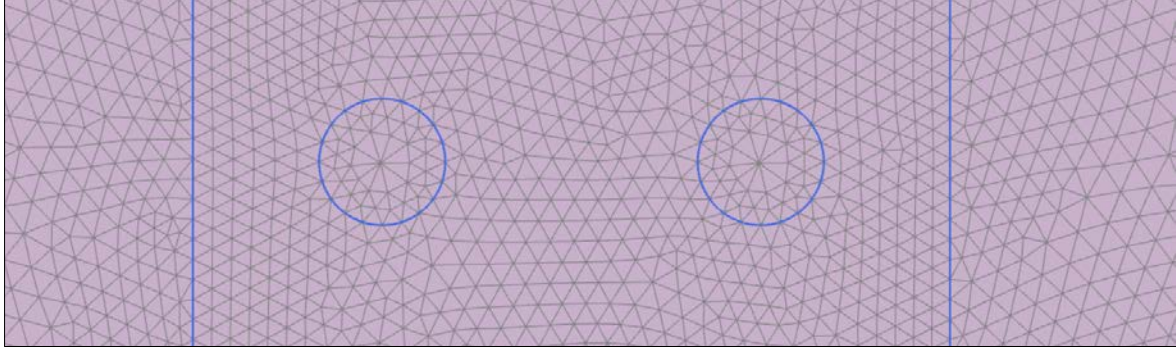
Analiz ve analiz sonuçları hakkında detaylı bilgilere yüzey oturma analizleri ve sonuçları isimli bir sonraki bölümde yer verilmiştir.

5.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Belirlenen Yüzey Oturma Analizleri ve Sonuçları

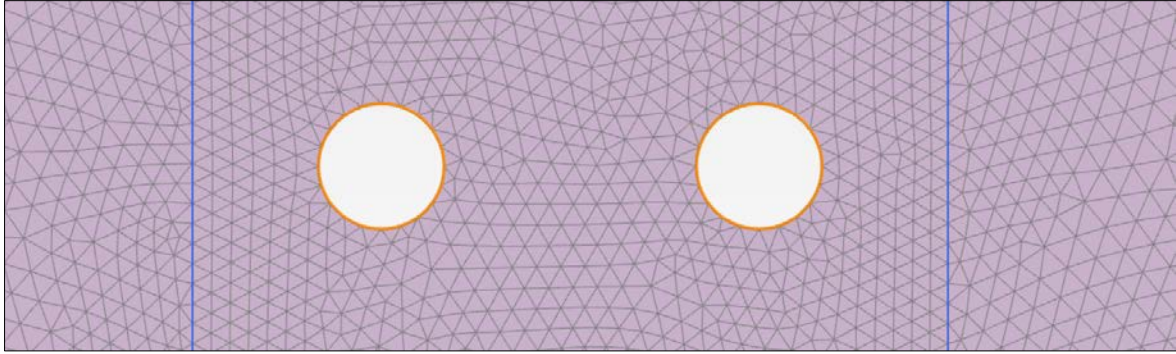
Yukarıda belirtilen girdiler dikkate alınarak her analizde elde edilen oturma değerleri hem Plaxis 2D çıktı verilerinde hem de grafikler üzerinde aşağıda gösterilmiştir. Analizlerde dikkate alınan tipik kazı sıralaması şu şekildedir:

- **Aşam 0:** Geostatik durum. Burada kazı öncesi o bölgedeki zemin gerilmelerinin modellenmesi ön görülmüştür.
- **Aşama 1:** Tünel kazılarının yapılması. Burada belirtilen hacim kayıplarına göre tünel kazıları yapılmış ve kalıcı kaplama segment özelliklerine göre de plaka materyali etkinleştirilmiş yani kaplamanın simülasyonu sağlanmıştır.

Bu aşamalara dair yine tipik bir gösterime Şekil 5.14'te ve Şekil 5.15'te yer verilmiştir. Her analiz için detaylı analiz aşamaları görsellerine EK-1'de verilmiştir.

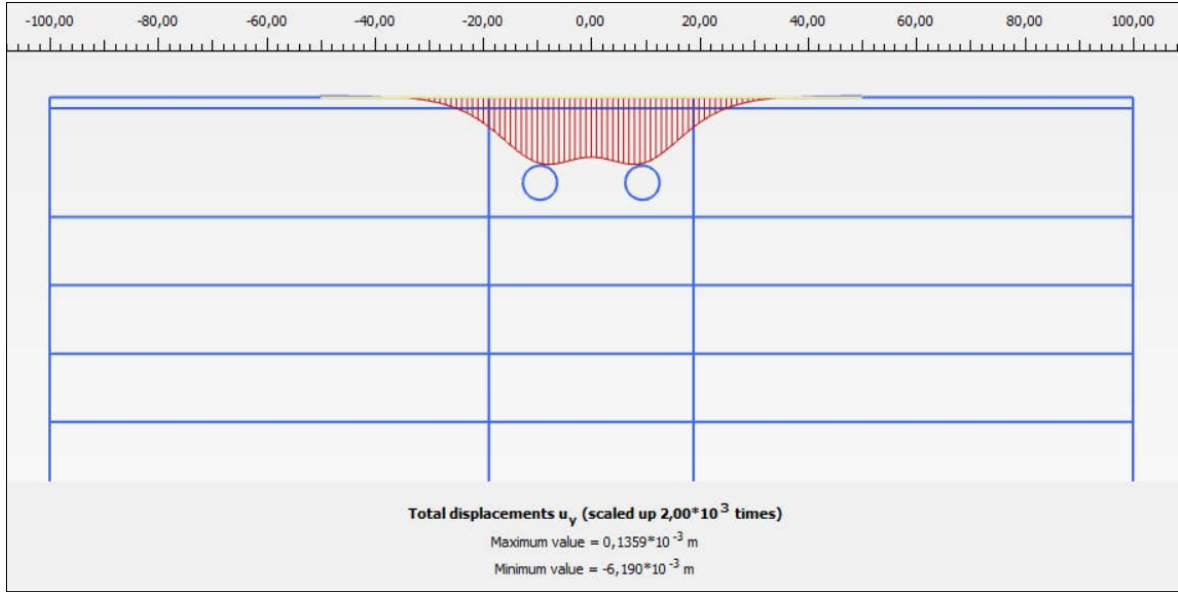


Şekil 5.14. Tipik Plaxis modellemesi – Aşama 0: Geostatik durum



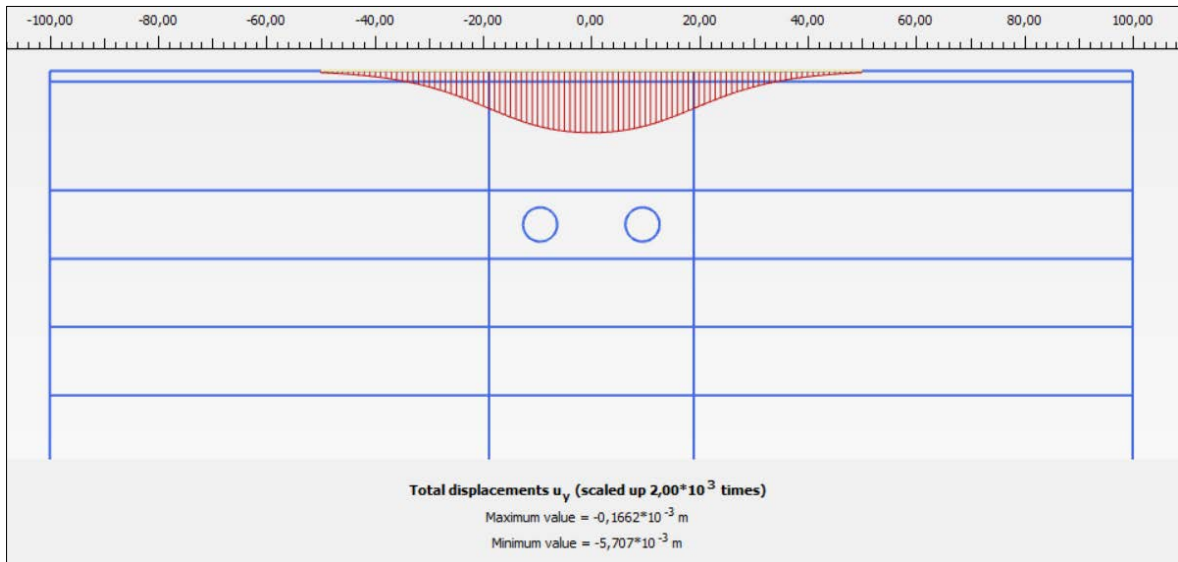
Şekil 5.15. Tipik Plaxis modellemesi – Aşama 1: Tünel kazılarının hacim kaybı verilerek yapılması ve kalıcı kaplamanın uygulanması

Aşağıda sırayla her analize ait yüzey oturma eğrileri Şekil 5.16 ile Şekil 5.25 arasında verilmiştir.



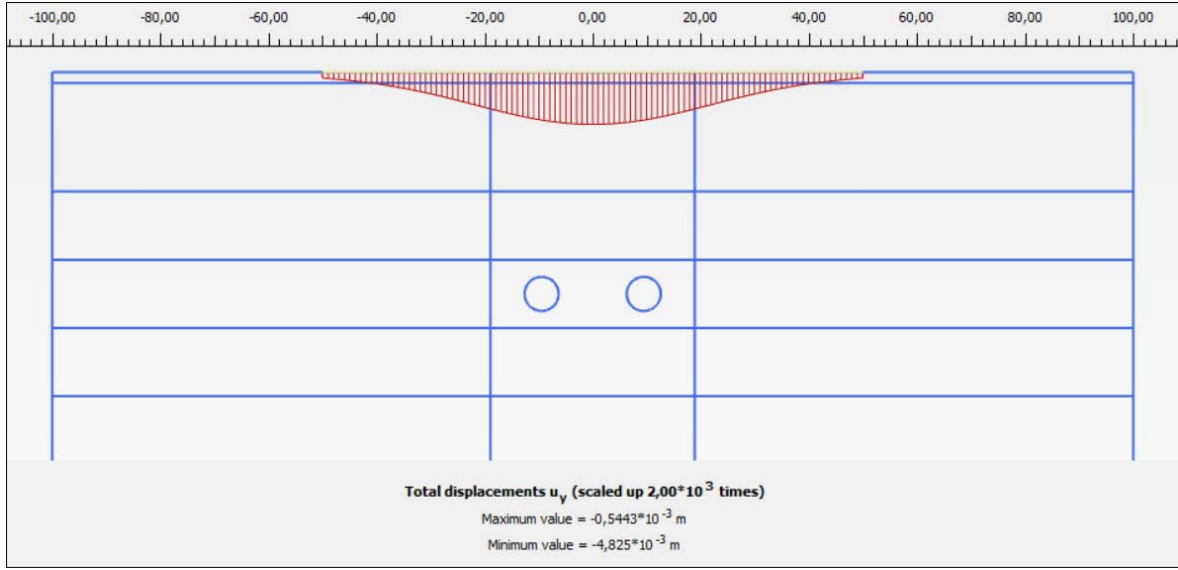
Şekil 5.16. Analiz 1 – Kaya ortamı – H=2D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi

Yukarıdaki grafiğe göre Analiz 1 minimum örtü yüksekliğinde kaya ortamında meydana gelen deformasyon değeri maksimum 0,619 cm olmaktadır. Maksimum oturma değerleri iki tünelin merkez eksenlerinde elde edilmektedir.



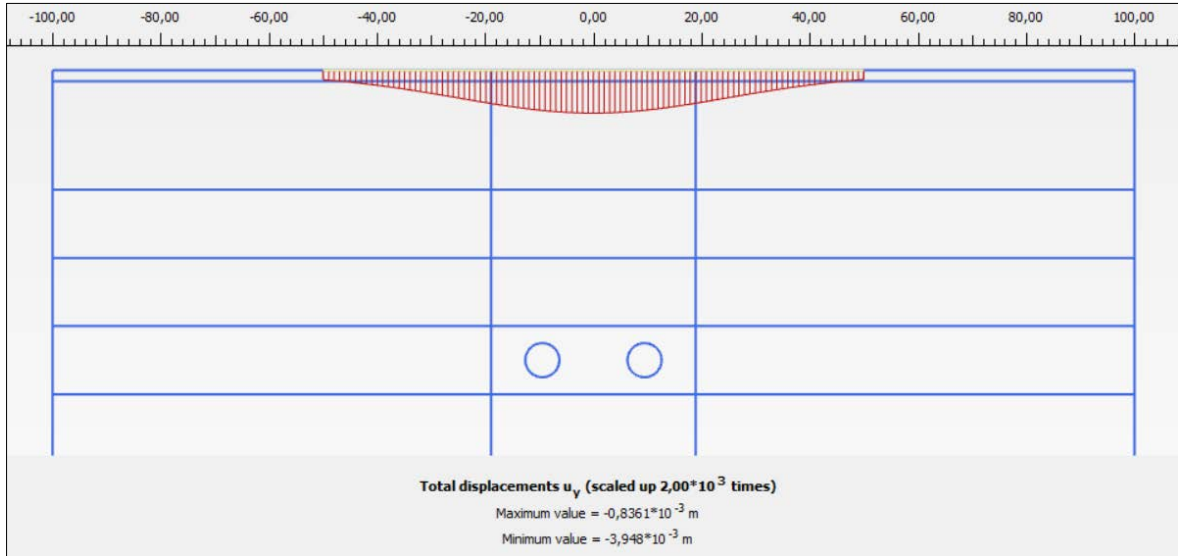
Şekil 5.17. Analiz 2 – Kaya ortamı – H=4D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi

Yukarıdaki sonuçtan anlaşıldığı üzere kaya biriminde Analiz 2’de yani dört tünel çapı kadar örtü yüksekliğinin bulunduğu modelde maksimum yüzey oturma değeri 0,571 cm civarındadır. Bu durum örtü yüksekliği arttığında oturmanın azaldığını göstermektedir. Bu durumda maksimum oturma iki tünelin tam ortasındaki eksende oluşmuştur.



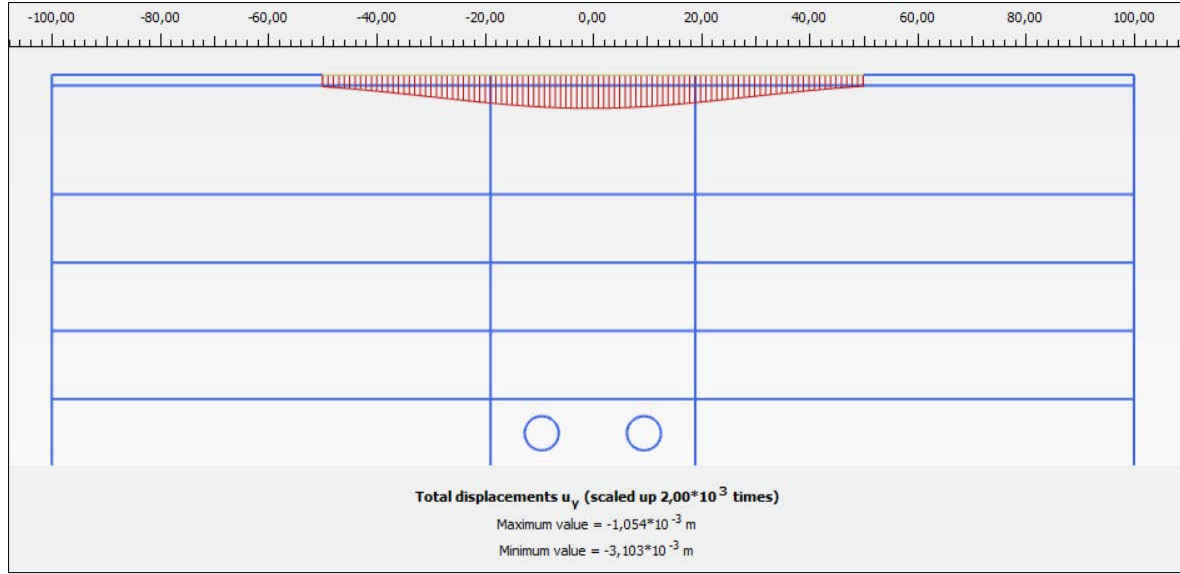
Şekil 5.18. Analiz 3 – Kaya ortamı – H=6D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi

Altı tünel çapı kadarki örtü yüksekliğinde bulunan kaya ortamında kazı yapılan Analiz 3’de maksimum oturma değeri 0,482 cm olarak belirlenmiştir. Oturma değerleri yükseklik artması ile azalmıştır.



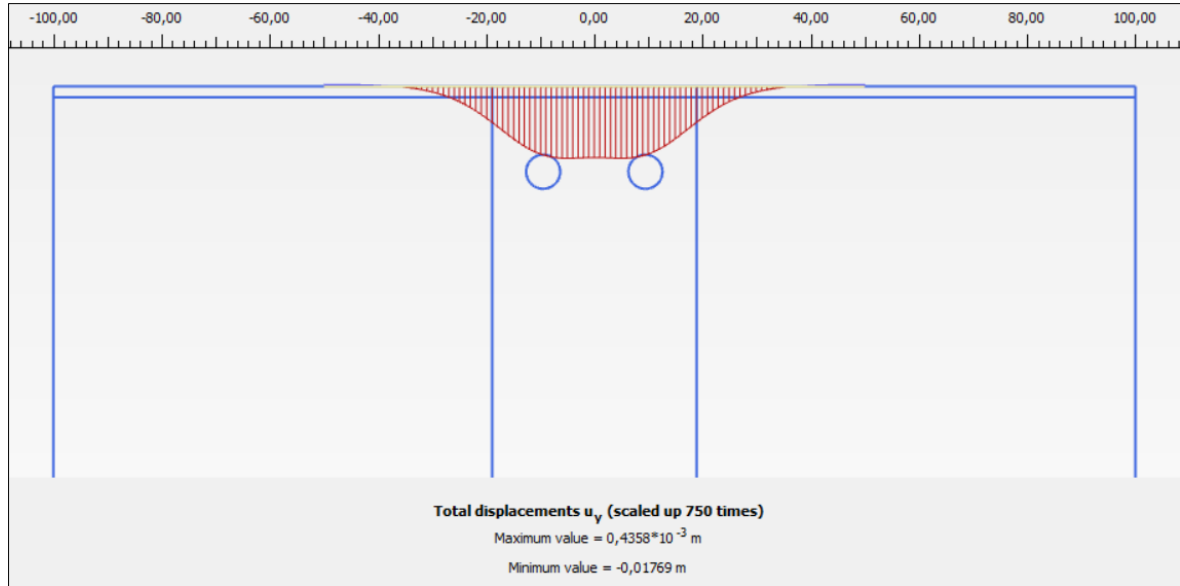
Şekil 5.19. Analiz 4 – Kaya ortamı – H=8D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi

Örtü yüksekliği biraz daha artıp sekiz tünel çapı kadar olduğu kaya ortamındaki tünel kazısına bağlı yüzeyde oluşan oturma Analiz 4 için maksimum 0,395 cm gelmiştir. Analiz-3’e göre oturma değerleri derinlik artışı ile azalmıştır.



Şekil 5.20. Analiz 5 – Kaya ortamı – H=10D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi

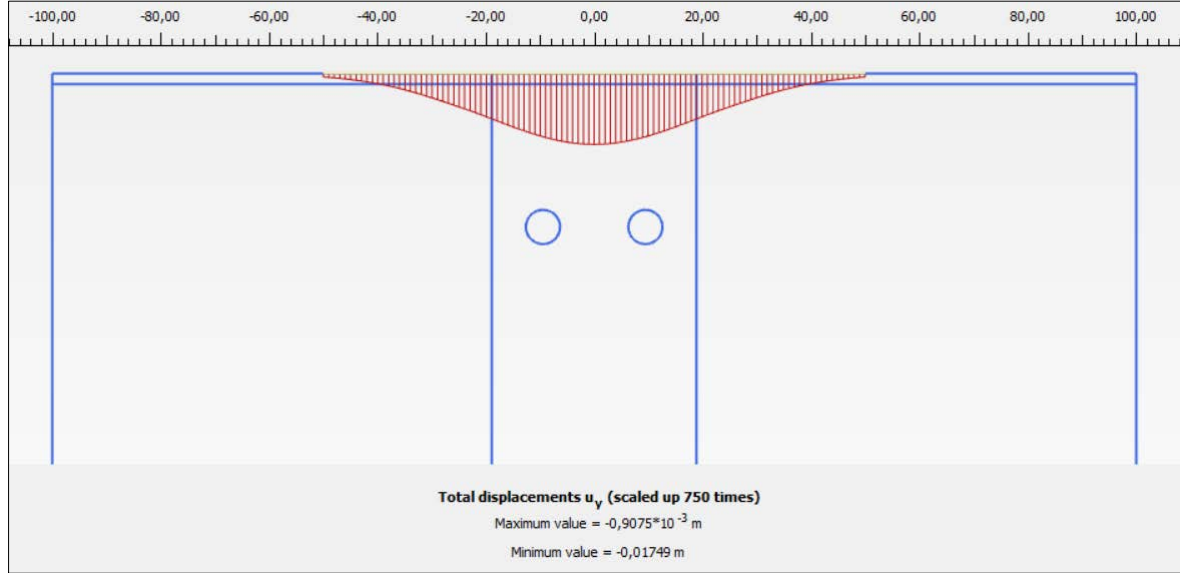
Kaya birimindeki son analiz olan Analiz 5’de maksimum örtü yüksekliği yani on tünel çapı kadarki örtü yüksekliğinde tünel kazısına bağlı yüzeyde oluşan oturma değeri 0,310 cm olarak kabul edilebilir. Bu durumda minimum oturma değeri maksimum örtü yüksekliğinde elde edilmiştir.



Şekil 5.21. Analiz 6 – Zemin ortamı – H=2D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi

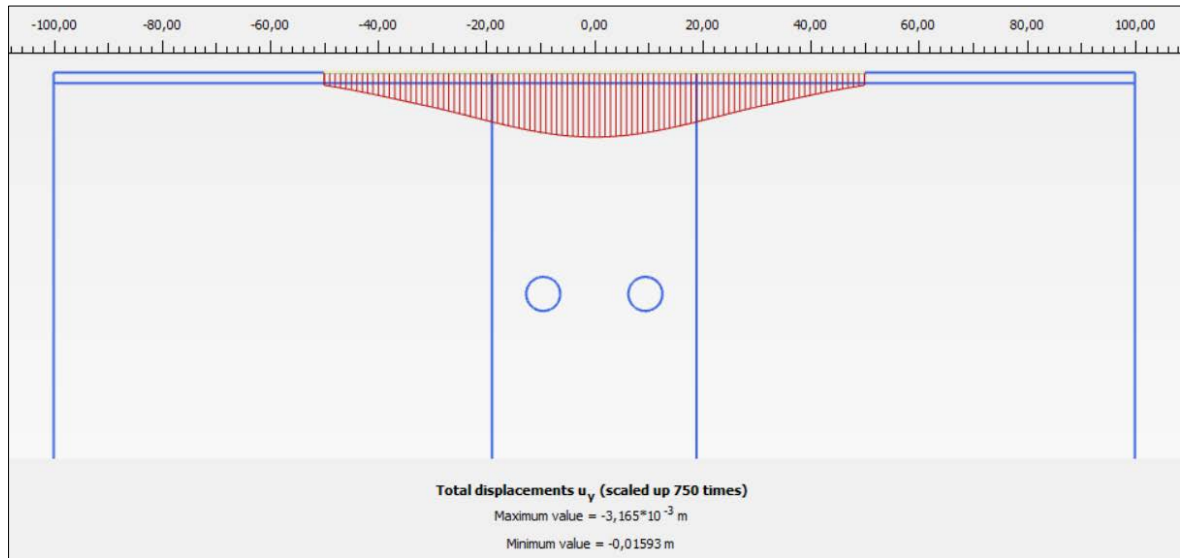
Zemin birimindeki minimum örtü yüksekliği yani iki tünel çapı olan Analiz 6’da maksimum yüzey oturması 1,769 cm olarak belirlenmiştir. Bu değer kaya birimindeki kazı sonucunda (Analiz 1 ~ 5) meydana gelen oturma değerleri ile kıyaslandığında daha yüksektir. Analiz

6'da kaya birimin Analiz 1'de elde edilen maksimum oturma değerin 2,85 katı kadar daha fazla yüzey oturması tespit edilmiştir.



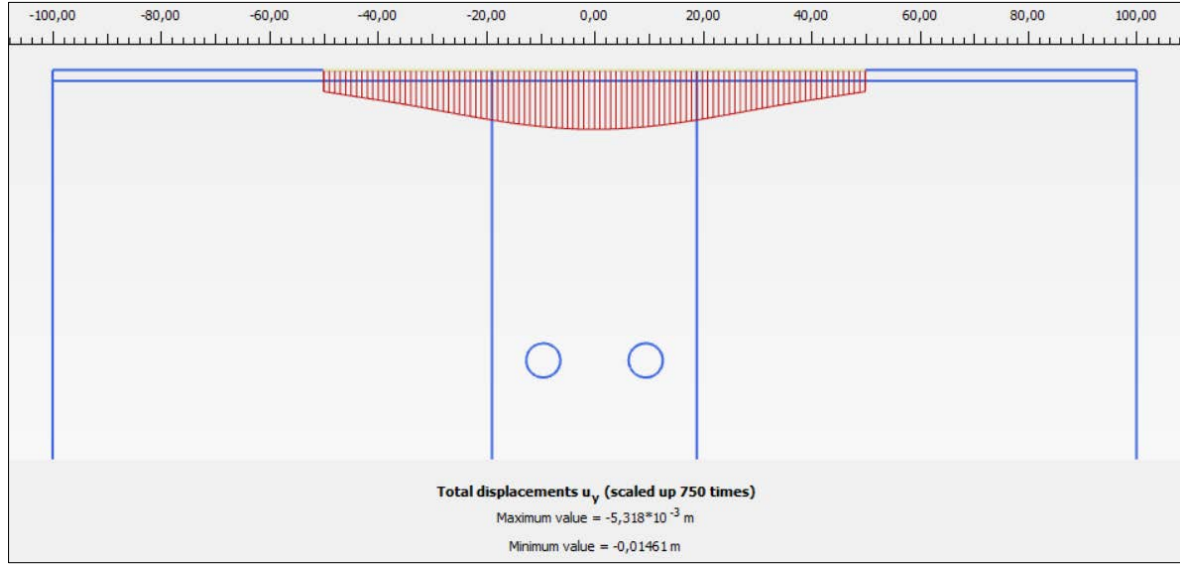
Şekil 5.22. Analiz 7 – Zemin ortamı – H=4D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi

Analiz 7 yani zemin biriminde dört tünel çapı örtü yüksekliğindeki analizde maksimum yüzey deformasyonu 1,749 cm olmaktadır. Bu durumda yine kaya birimindeki analizlerde olduğu gibi derinlik artması sonucu oturma değerleri de azalmıştır.



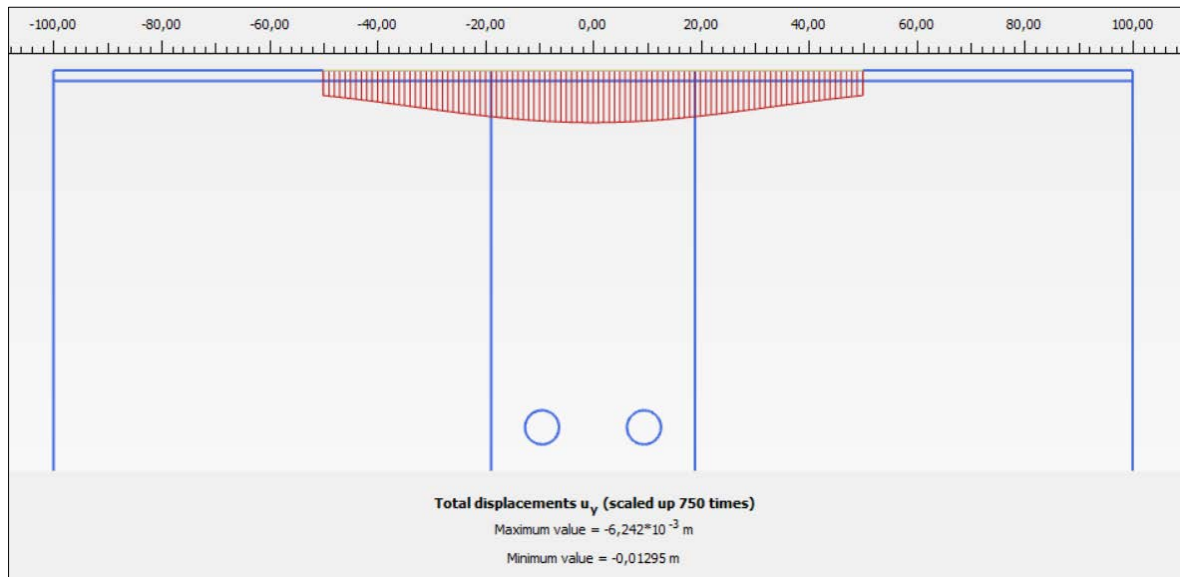
Şekil 5.23. Analiz 8 – Zemin ortamı – H=6D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi

Örtü yüksekliğinin altı tünel çapı kadar olduğu Analiz 8’de zemin biriminde yapılan kazılarda yüzeyde meydana gelen oturma değeri yaklaşık 1,593 cm olmaktadır. Zemin birimindeki değerler kıyaslandığı zaman oturma değerlerine azalma olduğu görülmüştür.



Şekil 5.24. Analiz 9 – Zemin ortamı – H=8D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi

Zemin ortamında örtü yüksekliğinin sekiz tünel çapı kadar olduğu Analiz 8’de oturma değeri 1,461 cm kabul edilmiştir. Analiz 7’deki sonuçlar ile kıyaslandığında oturma değerleri azalmıştır.



Şekil 5.25. Analiz 10 – Zemin ortamı – H=10D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi

Son olarak Analiz 10’da maksimum örtü yüksekliği olan on tünel çapı kadarki yükseklikte yapılan tünel kazısına bağlı zemin biriminde meydana gelen oturma değeri maksimum 1,295 cm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak kaya biriminde yapılan analizler ile zemin biriminde yapılan analizlerde benzer davranışlar olduğu görülmüştür. Maksimum örtü yüksekliğinde en düşük oturmalar meydana gelmiştir. Yani minimum örtü yüksekliğindeki oturma değeri ile maksimum örtü yüksekliğindeki oturma değeri arasındaki oran zemin biriminde 1,4 kat olarak belirlenmiştir. Bir sonraki bölümde ampirik yöntemlerle belirlenen yüzey oturma analizlerine yer verilmiştir.

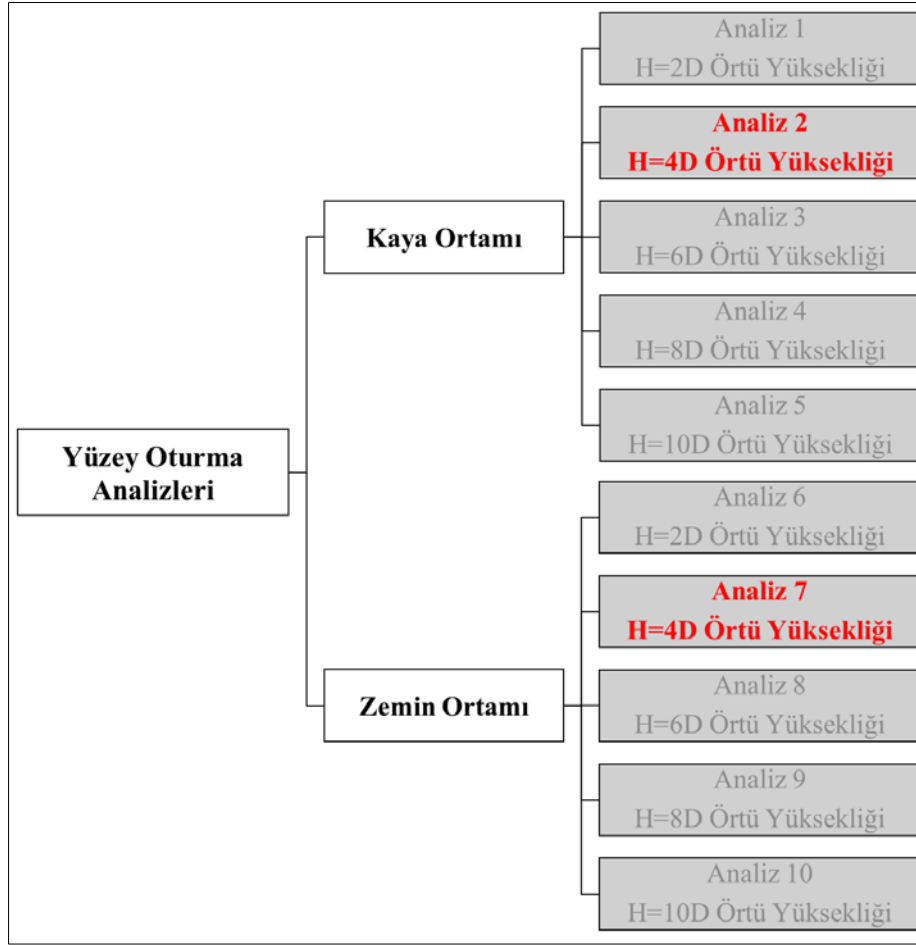
5.7. Ampirik Yöntem ile Belirlenen Yüzey Oturma Analizleri ve Sonuçları

Sonlu elemanlar yöntemi ortaya çıkmadan önce yüzey oturmaları analitik ve ampirik metotlar ile belirlenmekteydi. Bu durum dikkate alınarak bu bölümde ampirik yöntemler ile yüzey oturmaları belirlenmiştir. İncelenecek analizler için bazı değişkenler ve sabitler seçilmiştir. Değişkenler farklı zemin koşulları (kaya ortamı ve zemin ortamı) olarak açıklanabilir. Sabit parametreler ise tünel çapı ($D=6,30m$), ikiz tüneller arasındaki mesafe (2 tünel çapı $- 2D$) ve ortalama örtü yüksekliği (4 tünel çapı $- 4D$) olarak belirlenmiştir. Bu durumu özetler bir tabloya Çizelge 5.7’de yer verilmiştir.

Çizelge 5.7. Ampirik analizlerde kullanılan ana girdi verileri

Değişkenler	
Zemin Birimi	Kaya Ortamı Kta Formasyonu – Kireçtaşı
	Zemin Ortam TQk Formasyonu – Sert Kil
Sabitler	
Örtü Yüksekliği	4D (25,20m)
Tünel Çapı	D (6,30m)
İkiz Tüneller Arasındaki Yatay Mesafe	2D (12,60m)

Yukarıdaki tablodan görüleceği üzere bir önceki bölümde numerik analizlerde dikkate alınan analiz şemasına göre Analiz 2 ve Analiz 7 yapılan ampirik hesaplamalarda kullanılmıştır. Aşağıda verilen Şekil 5.26’da ilgili kesitler kırmızı ile belirtilmiştir.



Şekil 5.26. Ampirik yöntemde dikkate alınan analiz kesitleri

Analizler, ikiz tünellerde meydana gelecek oturmalar için verilmiş olan bağıntılar dikkate alınarak tamamlanmıştır. Maksimum oturma değeri S_m için Herzog [40] tarafından Eş.6'da verilen bağıntı kullanılarak belirlenmiştir. İlgili bağıntıda dikkate alınan parametreler; zeminin doğal birim hacim ağırlığı γ_n , tünel merkezinden yüzeye olan mesafe z_0 , sürşarj yükü σ_s , tünel kazı çapı D , yüzey oturma eğrisi dönüm noktasının tünel aksına olan mesafesi i , iki tünelin merkez eksenleri arasındaki mesafe d ve tünel kazısı yapılan zeminin elastik modül değeri E_s olmaktadır. Yüzey oturma eğrisi dönüm noktası parametresi olan i için Chakeri ve arkadaşları [42] tarafında önerilen Eş.8, Arıoğlu [35] tarafından belirlenen Eş.9 ve Eş.11, Glossop [43] tarafından verilen Eş.10 ve O'Reilly ve New'in [41] tarafından verilen Eş.12 dikkate alınmıştır. İlgili eşitlikler için gerekli olan parametreler tünel kazı yarı çapı R ve tünel merkezinden yüzeye olan mesafe z_0 olmaktadır. Aşağıda Analiz 2 ve Analiz 7 için elde edilen oturma değerleri sırasıyla Çizelge 5.8'de ve Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.8. Ampirik yöntem ile maksimum yüzey oturma değeri hesabı S_m – Kaya ortamı – Analiz 2

Ampirik Yöntem ile Maksimum Yüzey Oturma Değeri Hesabı Kaya Ortamı - Analiz 2 (H=4D)			
i [m]		S_m [m]	
z_0 [m]	28,35	γ [kN/m ³]	26
R [m]	3,15	σ_s [kPa]	0
i_1 [m]	13,78	D [m]	6,3
i_2 [m]	14,18	d [m]	18,9
i_3 [m]	10,65	E [kPa]	377000
i_4 [m]	13,29	S_m [m]	0,0063
i [m]	12,97	S_m [cm]	0,632

Yukarıdaki çizelgede görüleceği üzere kaya ortamında ortalama örtü yüksekliğinde (H=4D) yapılan analizde (Analiz 2) maksimum yüzey oturma değeri 0,632 cm olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.9. Ampirik yöntem ile maksimum yüzey oturma değeri hesabı S_m – Zemin ortamı – Analiz 7

Ampirik Yöntem ile Maksimum Yüzey Oturma Değeri Hesabı Zemin Ortamı - Analiz 7 (H=4D)			
i [m]		S_m [m]	
z_0 [m]	28,35	γ [kN/m ³]	19
R [m]	3,15	σ_s [kPa]	0
i_1 [m]	13,78	D [m]	6,3
i_2 [m]	14,18	d [m]	18,9
i_3 [m]	10,65	E [kPa]	80000
i_4 [m]	13,29	S_m [m]	0,0218
i [m]	12,97	S_m [cm]	2,177

Yukarıdaki çizelgede görüleceği üzere zemin ortamında ortalama örtü yüksekliğinde (H=4D) yapılan analizde (Analiz 7) maksimum yüzey oturma değeri 2,177 cm olarak belirlenmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde sayısal analizlerde olduğu gibi ampirik analizlerde de kaya biriminde elde edilen oturma değeri zemin biriminde elde edilen oturma değerinden daha az olmaktadır. Zemin biriminde elde edilen oturma değeri kaya biriminde elde edilen oturma değerine göre 1,545 cm daha fazladır ve bu durumda zemin birimindeki oturma değeri kaya birimindeki oturma değerinin 3,44 katı olarak belirlenmiştir. Ampirik yöntem ile beklenen

yüzey oturma geometrisi dikkate alındığında maksimum oturma değerlerinin iki tünelin ortasındaki eksen üzerinde oluşacağı ön görülmektedir. Yine sayısal analizlere paralel olarak oturma havzası genişliği 2,5i, iki analizde de aynı örtü yüksekliği olması sebebiyle benzer gelmiştir.

Nümerik ve ampirik yöntem ile belirlenen oturma değerleri aşağıdaki bölümlerde detaylıca karşılaştırılmış olup bir sonraki başlıkta kaplama nedeniyle meydana gelen deformasyon değerlerinin nümerik analizler ile tahmini yapılmıştır.

5.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Tünel Kaplamasının Deformasyonu Sonucu Yüzeyde Oluşacak Oturmaların Belirlenmesi

Yüzeyde meydana gelecek oturma değerlerini etkileyen faktörlerden biri de tünel kalıcı kaplamasında meydana gelen deformasyonlar olmaktadır. Bu bölümde kaplama da oluşan deformasyonun yüzeyde oluşan oturmaya olan etkisi araştırılmıştır. Bunun için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. İncelenen analizler için ampirik yöntemlerde olduğu gibi bazı değişkenler ve sabitler seçilmiştir. Değişkenler farklı zemin koşulları (kaya ortamı ve zemin ortamı) olarak açıklanabilir. Sabit parametreler ise tünel çapı ($D=6,30m$), ikiz tüneller arasındaki mesafe (2 tünel çapı – $2D$), kazı sıralaması (aynı anda kazı yapılması) ve ortalama örtü yüksekliği (4 tünel çapı – $4D$) olarak belirlenmiş olup ampirik yöntemde dikkate alınan analiz kesitleri (Analiz 2 ve Analiz 7) bu bölümdeki araştırma da aynı şekilde kullanılmıştır. Bu durumu özetler bir tabloya Çizelge 5.10’da yer verilmiştir.

Çizelge 5.10. Ampirik analizlerde kullanılan ana girdi verileri

Değişkenler	
Zemin Birimi	Kaya Ortamı Kta Formasyonu – Kireçtaşı
	Zemin Ortam TQk Formasyonu – Sert Kil
Sabitler	
Örtü Yüksekliği	4D (25,20m)
Tünel Çapı	D (6,30m)
İkiz Tüneller Arasındaki Yatay Mesafe	2D (12,60m)
Kazı Sıralaması	İki tünelin aynı anda kazılması <i>Aşama 1:</i> Sol ve sağ tünel kazısı

Sonlu elemanlar programında önceki analizlerde dikkate alınan tabakalar, zemin sınır koşulları, jeolojik parametreler, kazı sıralamaları ve segment için kullanılan plaka özellikleri gibi Plaxis2D girdi verileri bu analizlerde de aynı şekilde kullanılmıştır.

Zemin girdi verileri için modelin en üst katmanında dolgu malzemesi olduğu kabul edilmiş ve tüm analizlerde (Analiz 2 ve 7) kalınlığı 2,00 metre seçilmiştir. Altında ise Analiz 2’de kireçtaşı tabakası, Analiz 7’de ise sert kil tabakası eklenmiştir. Analizlerde dolgu tabakasını simüle etmek için Mohr – Coulomb (MC) malzeme modeli, kireçtaşı tabakasını simüle etmek için Hoek – Brown (HB) malzeme modeli, sert kili simüle etmek içinse Hardening – Soil (HS) zemin modeli kullanılmıştır. Bu parametre tablolarına Çizelge 5.11’de ve Çizelge 5.12’de yer verilmiştir.

Çizelge 5.11. Kaya biriminde (Kireçtaşı) kullanılan geoteknik parametreler

Litoloji	Zemin Modeli [-]	t [m]	γ [kN/m ³]	MC		HB						E_m [MPa]	ν [-]
				c [kPa]	ϕ [°]	σ_{ci} [MPa]	m_i [-]	m_b [-]	s [-]	a [-]	GSI [-]		
Dolgu	MC	0,0-2,0	20	5	30	-	-	-	-	-	-	10	0,3
Kireçtaşı-1	HB	2,0-22,05	26	-	-	12	9	0,517	0,0001	0,544	20	219	0,3
Kireçtaşı-2	HB	22,05-34,65	26	-	-	14	9	0,618	0,0002	0,531	25	377	0,3
Kireçtaşı-3	HB	34,65-47,25	26	-	-	16	9	0,739	0,0004	0,522	30	651	0,3
Kireçtaşı-4	HB	47,25-59,85	26	-	-	18	9	0,883	0,0007	0,516	35	1122	0,3
Kireçtaşı-5	HB	>59,85	26	-	-	20	9	1,056	0,0013	0,511	40	1915	0,3

Burada,

MC: Mohr – Coulomb zemin modeli

HB: Hoek – Brown zemin modeli

t: Tabaka kalınlığı

γ : Birim hacim ağırlığı

c: Mohr – Coulomb yenilme kriteri kohezyon değeri

ϕ : Mohr – Coulomb yenilme kriteri içsel sürtünme açısı değeri

σ_{ci} : Hoek – Brown yenilme kriteri tek eksenli basınç dayanımı

m_i : Hoek – Brown yenilme kriteri kaya malzeme parametresi

m_b : Hoek – Brown yenilme kriteri kaya kütlesi bileşim parametresi

s: Hoek – Brown yenilme kriteri kaya kütlesi yapısına ait parametre

a: Hoek – Brown yenilme kriteri kaya kütlesi yüzey özelliklerine bağlı parametre

GSI: Hoek – Brown yenilme kriteri jeolojik dayanım indeksi

E_{rm} : Deformasyon elastik modülü

ν : Poisson oranı

Analizlerde dikkate alınan elastik modül değerleri RocData 4.0 [54] programından kullanılan kaya parametrelerine göre elde edilmiştir. Bununla ilgili program sonuçlarına EK-2’de yer verilmiştir.

Çizelge 5.12. Zemin biriminde (Sert kil) kullanılan geoteknik parametreler

Litoloji	Zemin Modeli [-]	t [m]	γ [kN/m ³]	MC		HS			E_{rm} [MPa]	E_{oed}^{ref} [MPa]	E_{ur}^{ref} [MPa]	ν [-]
				c [kPa]	ϕ [°]	c_{ref} [kPa]	ϕ [°]	m [-]				
Dolgu	MC	0,0-2,0	20	5	30	-	-	-	10	-	-	0,3
Sert Kil	HS	>2,0	19	-	-	15	32	0,5	-	80	160	0,3

Burada,

MC: Mohr – Coulomb zemin modeli

HS: Hardening – Soil zemin modeli

t: Tabaka kalınlığı

γ : Birim hacim ağırlığı

c: Mohr – Coulomb yenilme kriteri kohezyon değeri

ϕ : Mohr – Coulomb ve Hardening – Soil yenilme kriteri içsel sürtünme açısı değeri

c_{ref} : Hardening – Soil yenilme kriteri kohezyon değeri

m (power): Mohr – Coulomb yenilme kriteri gerilme artışına bağlı olarak rijitliği kontrol eden parametre

E_{rm} : Deformasyon elastik modülü

E_{oed}^{ref} : Oedometre elastik modülü

E_{ur}^{ref} : Yükleme – geri yükleme elastik modülü

ν : Poisson oranı

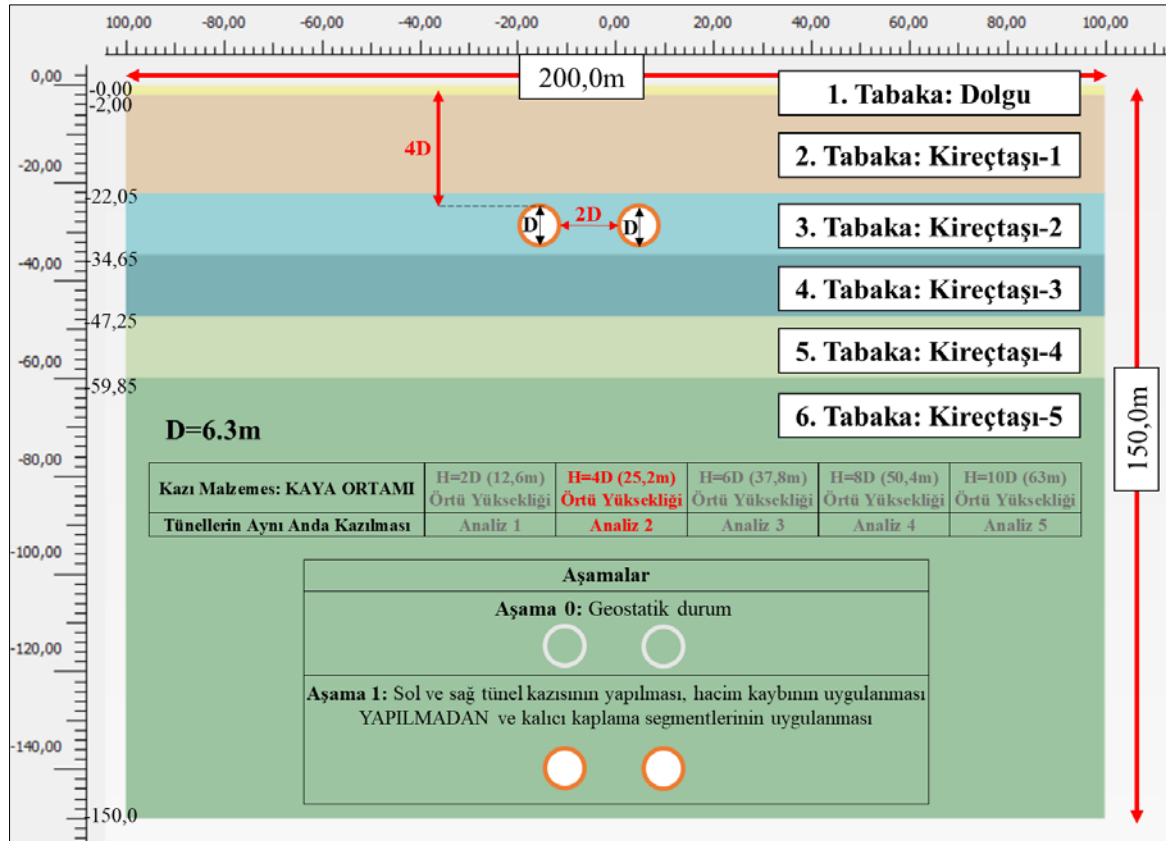
Ayrıca sükûnet durumunda hem zemin hem de kaya biriminde toprak basıncı katsayısı K_0 , modellerde otomatik olarak program tarafından belirlenmiştir.

Tünel girdi verileri segment birleşim yerleri rijit kabul edilerek belirlenmiş olup Plaxis 2D programında girilecek olan EA, EI değerleri Çizelge 5.13’de verilmiştir.

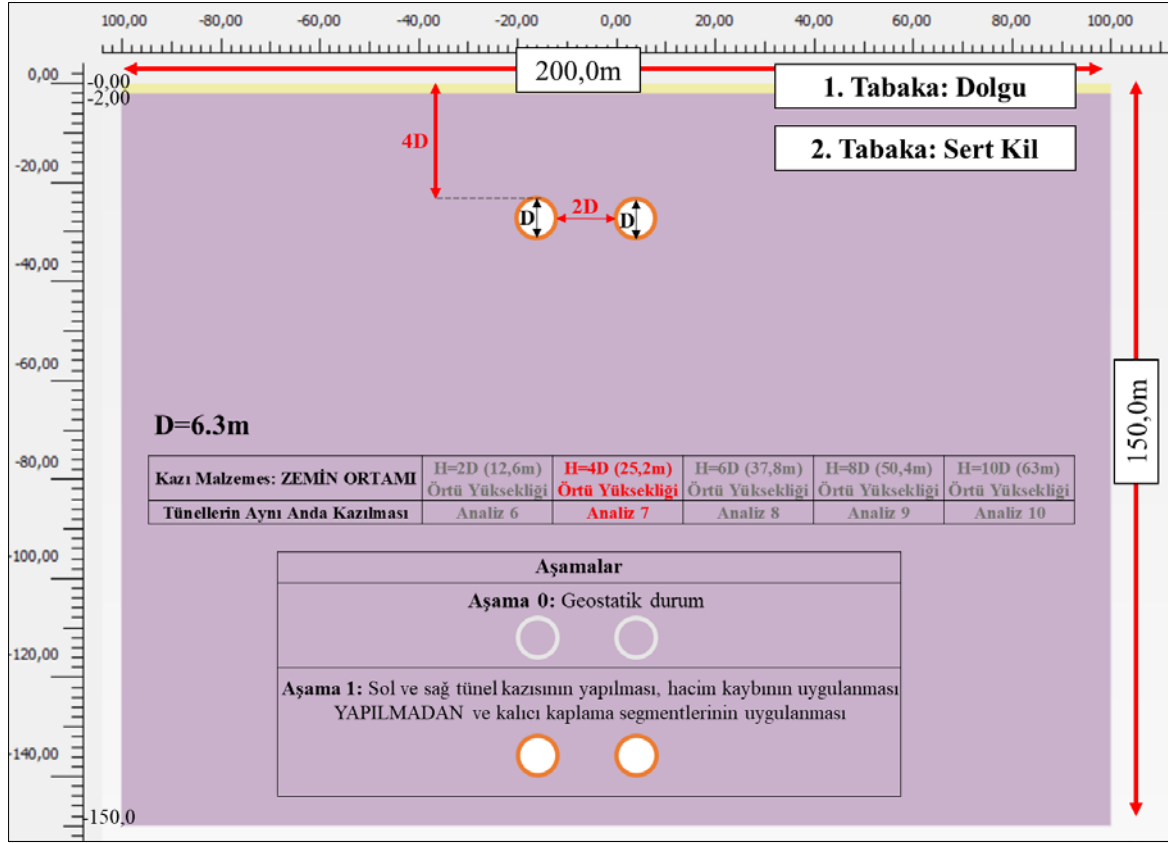
Çizelge 5.13. Plaxis 2D programı tünel plaka girdi verileri

Segment Bağlantı Bölgesi Geometrik Parametreleri		Segment Bağlantı Olmayan Bölgelerdeki Geometrik Parametreler	
h_j [cm]	20	h [cm]	30
b [cm]	100	b [cm]	100
I_j [cm ⁴]	66666,67	I [cm ⁴]	225000
Eş Değer Geometrik Parametreler		Plaxis 2D Programında Kullanılacak Plaka Parametreleri	
n [-]	6	Beton Sınıfı	C45/55
I_e [cm ⁴]	166666,67	f_{ck} [MPa]	45
I_e [m ⁴]	0,001666667	E [MPa]	36000
h_e [cm]	27,144	EA [kN/m]	9771903
h_e [m]	0,27144	EI [kNm ² /m]	60000

Aşağıda Şekil 5.27’de kaya ortamında dikkate alınan analiz kesiti (Analiz 2) için, Şekil 5.28’de ise zemin ortamında dikkate alınan analiz kesiti (Analiz 7) için özet görsellere yer verilmiştir.



Şekil 5.27. Kaya biriminde yapılacak analiz (Analiz 2) için taslak Plaxis 2D gösterimi



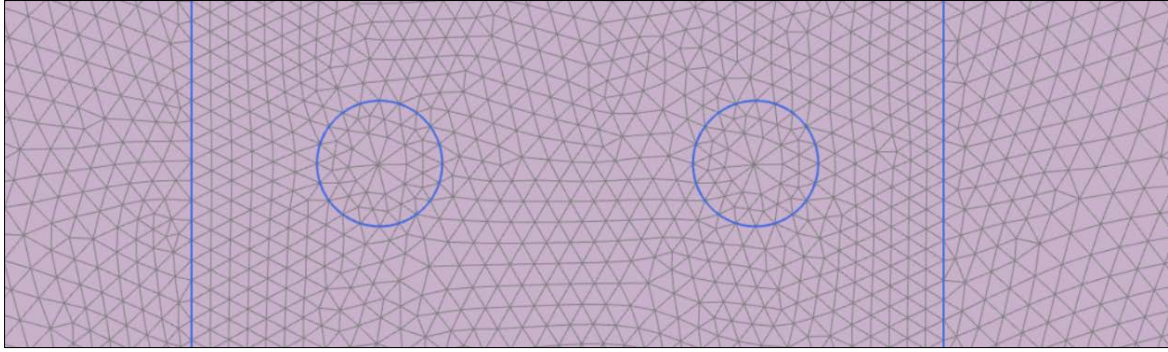
Şekil 5.28. Zemin biriminde yapılacak analiz (Analiz 7) için taslak Plaxis 2D gösterimi

Tünel kazısı girdi verileri için önceki sayısal analizlerden farklı olarak hacim kaybı değeri V_L bu analizlerde dikkate alınmamıştır. Bu sayede tünel çevresindeki zemin nedeniyle kaplamada yük oluşmuş ve buna bağlı olarak kaplamada oluşan geometrik değişim sebebiyle yüzeyde oluşan oturma incelenmiştir. Bu durumda Plaxis 2D programında tünel kazıları modellenirken “line contraction” sekmesi kullanılmamıştır.

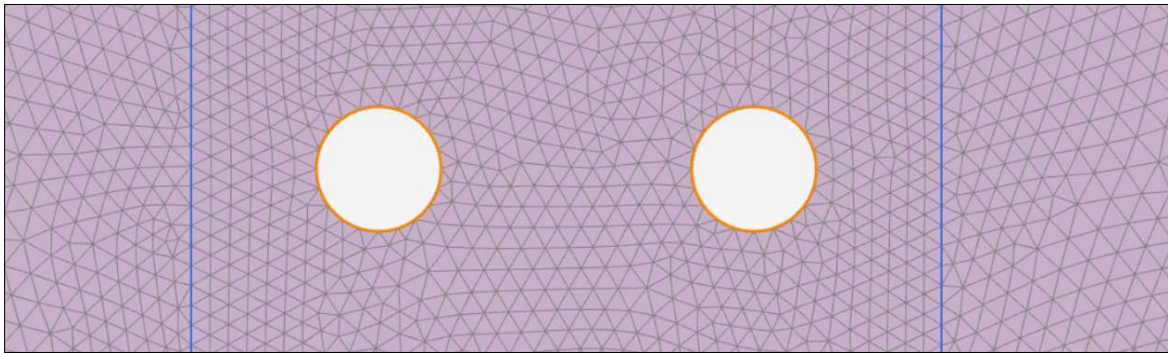
Analizlerde dikkate alınan tipik kazı sıralaması şu şekildedir:

- **Aşam 0:** Geostatik durum. Burada kazı öncesi o bölgedeki zemin gerilmelerinin modellenmesi ön görülmüştür.
- **Aşama 1:** Tünel kazılarının yapılması. Burada belirtilen hacim kayıpları dikkate alınmaksızın tünel kazıları yapılmış ve kalıcı kaplama segment özelliklerine göre de plaka materyali etkinleştirilmiş yani kaplamanın simülasyonu sağlanmıştır.

Bu aşamalara dair yine tipik bir gösterime aşağıda Şekil 5.29’te ve Şekil 5.30’te yer verilmiştir.

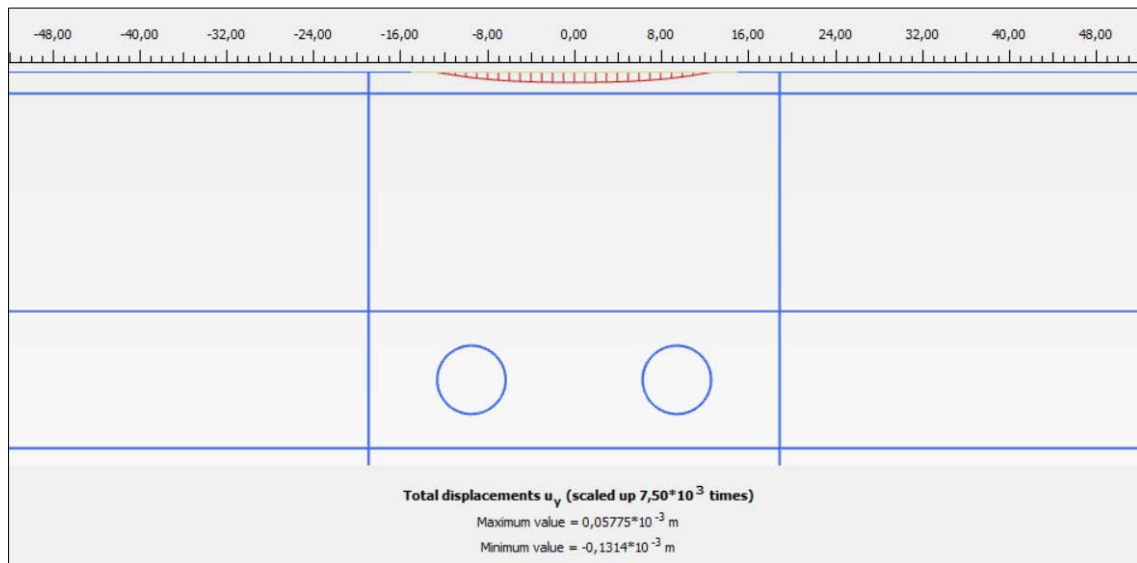


Şekil 5.29. Tipik Plaxis modellemesi – Aşama 0: Geostatik durum



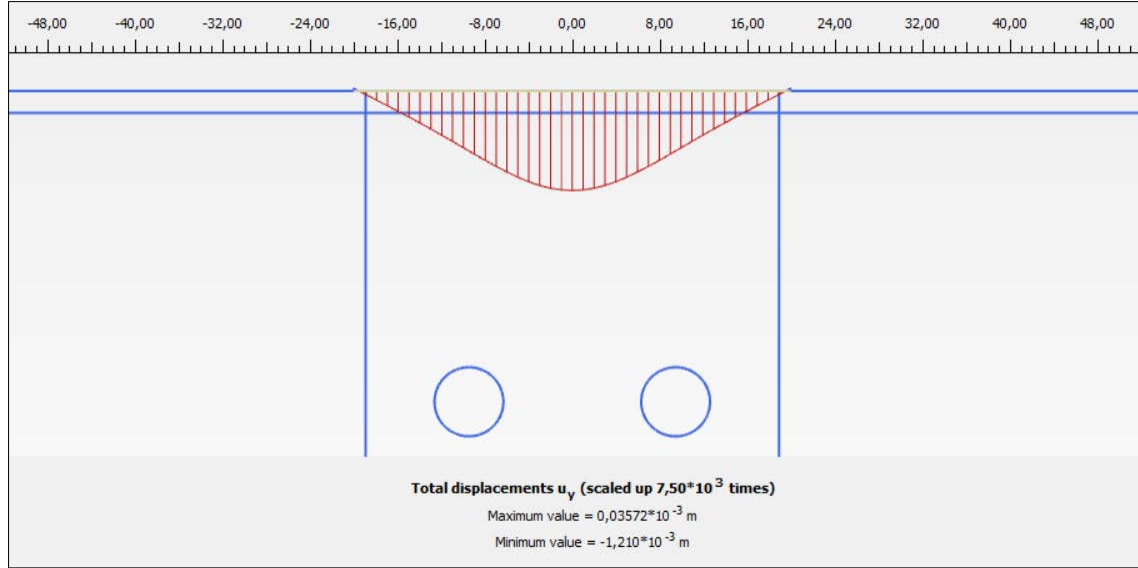
Şekil 5.30. Tipik Plaxis modellemesi – Aşama 1: Tünel kazılarının hacim kaybı verilmeksizin yapılması ve kalıcı kaplamanın uygulanması

Aşağıda sırayla Analiz 2 ve Analiz 7'ye ait yüzey oturma eğrileri Plaxis2D çıktısı olarak Şekil 5.31'de ve Şekil 5.32'de verilmiştir. Ayrıca her analiz için girdi ve çıktı verileri ile ilgili bilgiler detaylarla EK-3'de verilmiştir.



Şekil 5.31. Analiz 2 – Kaya ortamı – H=4D örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi

Yukarıdaki sonuçtan görüleceği üzere kaya biriminde Analiz 2’de yani dört tünel çapı kadar örtü yüksekliğinin bulunduğu modelde kalıcı kaplama nedeniyle meydana gelen maksimum yüzey oturma değeri 0,013 cm civarındadır. Bu durumda maksimum oturma iki tünelin tam ortasındaki eksende oluşmuştur.



Şekil 5.32. Analiz 7 – Zemin ortamı – $H=4D$ örtü yüksekliği – Plaxis 2D yüzey oturma eğrisi

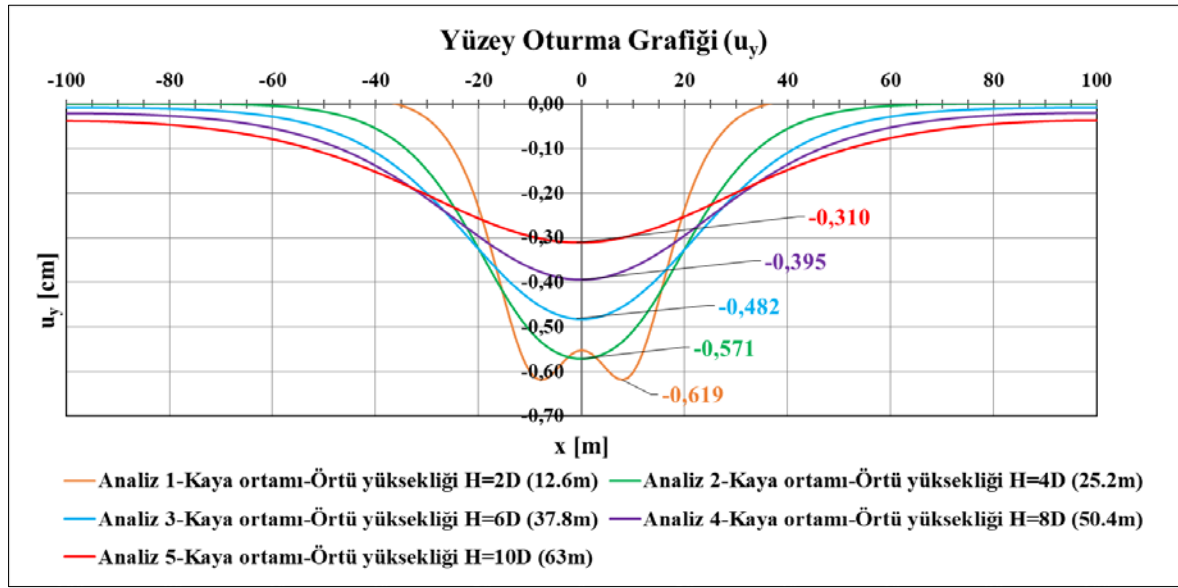
Analiz 7 yani zemin biriminde dört tünel çapı örtü yüksekliğindeki analizde, kalıcı kaplama deformasyonuna bağlı olarak elde edilen maksimum yüzey deformasyonu 0,121 cm olmaktadır.

Sonuçlar incelendiğinde kaya biriminde kaplama sebebiyle elde edilen oturma değeri zemin biriminde elde edilen oturma değerinden daha az olmaktadır. Her iki koşulda da elde edilen oturma değerleri oldukça düşük miktarlardadır. Zemin biriminde elde edilen oturma değeri kaya biriminde elde edilen değer 9,30 katı olarak belirlenmiştir. Her iki modelde de yüzey oturma geometrisi iki tünelin ortasındaki eksen üzerinde maksimuma ulaşmıştır.

Bir sonraki bölümde sırasıyla; normal koşullar altında sayısal analizler ile elde edilen yüzey oturmaları, ampirik yöntemler ile belirlenen yüzey oturmaları ve son olarak kaplama deformasyonuna bağlı olarak yüzeyde meydana gelen oturma değerleri hakkında bazı yorumlara yer verilmiştir.

6. SONUÇLARIN YORUMLANMASI

Nümerik yöntemlerle tamamlanan yüzey oturma analizlerine bakıldığında zaman bazı yorumlara varılmıştır. Öncelikle sonuçların kıyaslanabilmesi için tüm yüzey oturma eğrileri Şekil 6.1’de ve Şekil 6.2’de görüldüğü üzere kaya ortamı için bir grafiğe ve zemin ortamı için bir grafiğe dökülmüştür.



Şekil 6.1. Analiz 1 ~ 5 (Kaya ortamı) – Örtü yüksekliğine bağlı yüzey oturma eğrileri değişimi

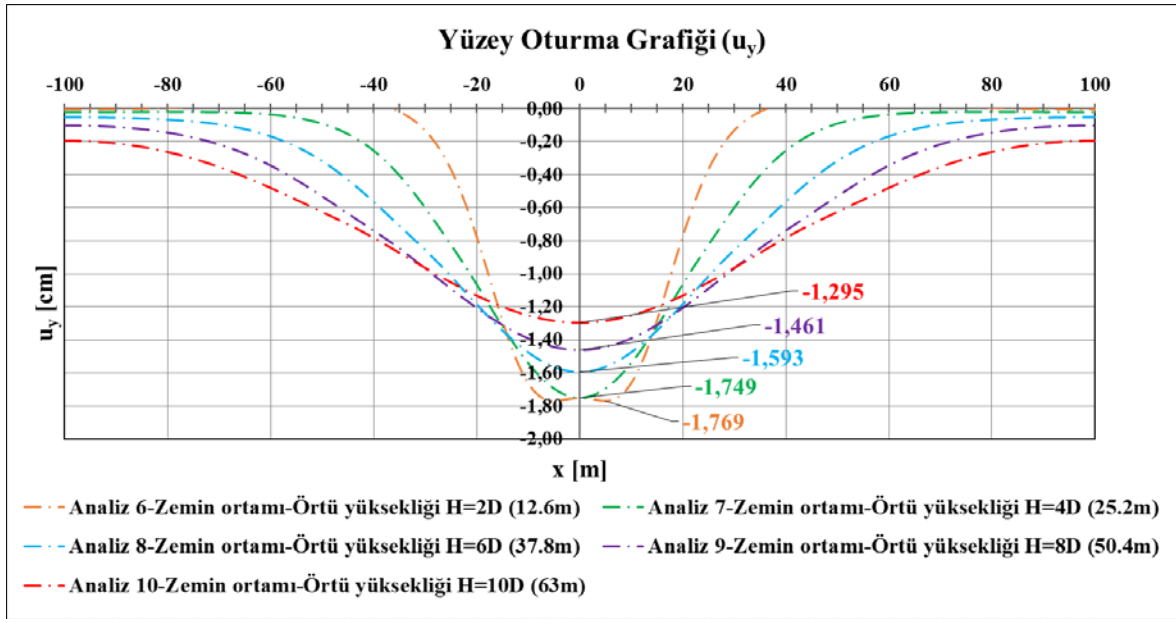
Kaya ortamında yapılan analizlerin geneline bakıldığında; örtü yüksekliğinin artması ile oturmaların azaldığı görülmüştür. Genelde her analiz arasında meydana gelen oturma farkı ortalama 0,085 cm ile 0,089 cm arası olarak belirlenmiştir. Sadece 2D örtü yüksekliği ve 4D örtü yüksekliği nedeniyle meydana gelen oturma farkı 0,048 m olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi oturma geometrilerinin farklılığından kaynaklanıyor olabilir.

Oturma geometrileri incelendiği zaman 2D örtü yüksekliği haricindeki tüm analizlerde, maksimum oturma değerleri iki tünelin orta aksında meydana gelmiştir. Fakat 2D örtü yüksekliğinde plastikleşmenin daha lokal olması ve direkt olarak yüzeye ulaşması sebebiyle maksimum oturma iki tünelin de kendi aksı üzerinde meydana gelmiştir. Bu plastikleşmeler EK-1’den de takip edilebilir. Bu durumda örtü yüksekliği düştükçe oturmaların iki farklı tünel gibi davranış göstererek ilgili tünellerin üstünde maksimum değerlere ulaştığı kabul edilebilir. Fakat derinlik 4D yani dört tünel çapına çıkar çıkmaz kemerleşme etkisi daha

büyük bir alana yayıldığı için yüzeyde tünellerin oturması birbirini etkilemiş ve bu nedenle ortada maksimum oturma elde edilmiştir.

Tünellerdeki oturma havzaları birbiri ile kıyaslandığı zaman derinlik artışı ile havza genişliğinin arttığı görülmüştür. 2D örtü yüksekliğinde oluşan oturma havzası genişliği 35 m civarındayken örtü yüksekliği arttıkça bu değer ciddi anlamda artış göstermektedir. Yukarıdaki bölümlerde belirtildiği gibi analitik yöntemlerle tünel havzası genişliği $2,5i$, Peck [16] tarafından geometrik olarak ortaya konmuştu. Mair ve Taylor [36] tarafindansa i değerinin zemin tipine bağlı katsayı K ile tünel merkezinden yüzeye olan mesafenin z_0 çarpımı olarak tanımlanmıştı. Bu eşitlik dikkate alındığında tünel derinliğinin artışı ile orantılı bir şekilde havza genişliğinin de artması gerekmektedir. Yapılan sayısal analizlerde bu durumun doğruluğu Şekil 6.1'ye göre ispat edilmiştir.

Yüzeyin kazıdan etkilenmesi, oturma geometrilerine bakıldığında şöyle belirtilebilir. Tünel ne kadar yüzeye yakınsa oturmadan etkilenecek bölge o kadar azalmıştır. Fakat meydana gelen oturma da bir o kadar artmıştır. Bu durumda yüzeyde oturmadan etkilenecek olan yapı adeti örtü yüksekliği azalınca azalacaktır fakat oturma miktarı artacağı için yüzeye yakın tünel kazıları yapılması genelde ilk tercih olmamaktadır.



Şekil 6.2. Analiz 6 ~ 10 (Zemin ortamı) – Örtü yüksekliğine bağlı yüzey oturma eğrileri değişimi

Zemin ortamında yapılan analizlerin geneline bakıldığında; yine kayadakine benzer bir davranış sergilenmiştir. Örtü yüksekliğinin artması ile oturmaların azaldığı görülmüştür. Örtü yüksekliklerinin 2D ve 4D olduğu analizlerde meydana gelen maksimum oturma değerleri birbiri ile neredeyse aynıdır. Bunun sebebi oturma geometrileri olabilir. Onun dışında diğer analizlerde meydana gelen oturma farkı 0,132 cm ile 0,166 cm arasında olarak belirlenmiştir.

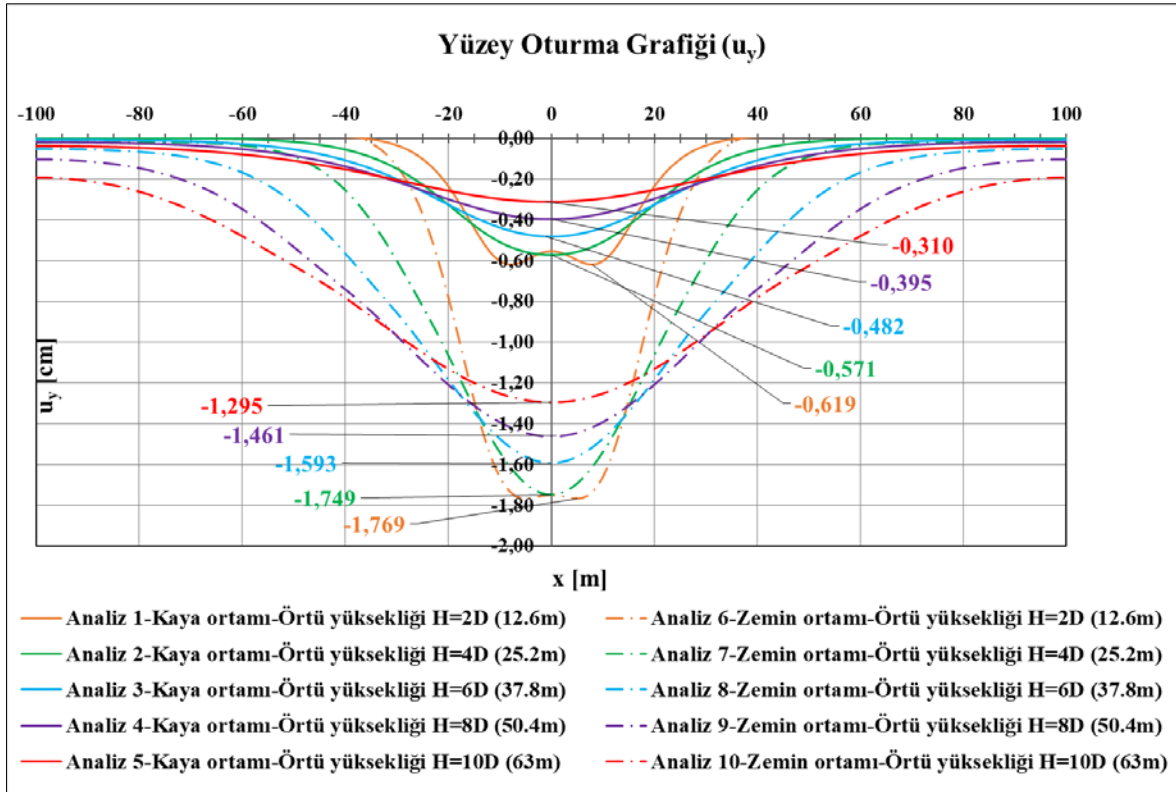
Kaya birimindeki analizlerle benzer olarak oturma geometrileri incelendiği zaman 2D örtü yüksekliği haricindeki tüm analizlerde, maksimum oturma değerleri iki tünelin orta aksında meydana gelmiştir. Fakat 2D örtü yüksekliğinde kemerleşme etkisinin daha lokal olması ve direkt olarak yüzeyi etkilemesi sebebiyle maksimum oturma iki tünelin de kendi aksı üzerinde meydana gelmiştir. Bu durumda örtü yüksekliği düştükçe oturmaların iki farklı tünel gibi davranış göstererek ilgili tünellerin üstünde maksimum değerlere ulaştığı kabul edilebilir. Fakat derinlik 4D yani dört tünel çapına çıkar çıkmaz kemerleşme etkisi daha büyük bir alana yayıldığı için yüzeyde tünellerin oturması birbirini etkilemiş ve bu nedenle ortada maksimum oturma elde edilmiştir.

Tünellerdeki oturma havzaları birbiri ile kıyaslandığı zaman kaya birimindeki analizlerdeki sonuçlara paralel olarak derinlik artışı ile havza genişliğinin yine arttığı görülmüştür. 2D örtü yüksekliğinde oluşan oturma havzası genişliği 35 m civarındayken örtü yüksekliği arttıkça bu değer ciddi anlamda artış göstermektedir. Yukarıdaki bölümlerde belirtildiği gibi analitik yöntemlerle tünel havzası genişliği $2,5i$, Peck [16] tarafından geometrik olarak ortaya konmuştu. Mair ve Taylor [36] tarafından i değerinin zemin tipine bağlı katsayı K ile tünel merkezinden yüzeye olan mesafenin z_0 çarpımı olarak tanımlanmıştı. Bu eşitlik dikkate alındığında tünel derinliğinin artışı ile orantılı bir şekilde havza genişliğinin de artması gerekmektedir. Yapılan sayısal analizlerde bu durumun doğruluğu Şekil 6.2'ye göre ispat edilmiştir.

Yüzeyin kazıdan etkilenmesi, oturma geometrilerine bakıldığında kaya birimindeki yaklaşım ile benzer olmaktadır. Tünel ne kadar yüzeye yakınsa oturmadan etkilenecek bölge o kadar azalmıştır. Fakat meydana gelen oturma da bir o kadar artmıştır. Bu durumda yüzeyde oturmadan etkilenecek olan yapı adeti örtü yüksekliği azalınca azalacaktır fakat oturma miktarı artacağı için özellikle kil biriminde meydana gelen oturma miktarlarının daha

fazla olduğu göz önüne alındığında yüzeye yakın tünel kazıları yapılması genelde ilk tercih olmamaktadır.

Aşağıda kaya ve zemin ortamında elde edilen oturmaların kıyaslanabilmesi için hem zemin hem de kaya biriminde oluşan oturmaların bulunduğu bir grafik Şekil 6.3’de eklenmiştir.



Şekil 6.3. Analiz 1 ~ 10 – Örtü yüksekliği ve zemin birimine bağlı yüzey oturma eğrileri değişimi

Analizlerin geneline bakıldığında; zeminde oluşan yüzey oturma değerlerinin kayada oluşan yüzey oturma değerlerinden daha fazla olduğu görülmüştür. İki zemin birimindeki aynı örtü yüksekliklerinde belirlenen yüzey oturma değerleri kıyaslandığında oturma değerlerinin farkı genelde 1,0 cm’den fazla olarak belirlenmiştir. Oturma davranışları derinliğe bağlı kıyaslandığı zaman hemen hemen aynı geometriye sahip fakat farklı miktarda oturmaların oluştuğu görülmüştür.

Her tünel derinliğinde farklı malzemelerden dolayı meydana gelen maksimum oturma değerleri kendi içinde kıyaslandığı zaman derinlik arttıkça bu oranda değişiklik olduğu görülmüştür. Örneğin zemin birimi 2D örtü yüksekliğinde elde edilen oturma ile kaya birim

2D örtü yüksekliğinde elde edilen oturma miktarı oranlandığında bu değer yaklaşık 2,85 olarak belirlenmiştir. Yani zemin biriminde kaya birimine göre 2,85 kat daha fazla oturma meydana gelmiştir. Fakat derinlik artıp zemin ve kaya birimindeki maksimum örtü yüksekliklerindeki oturma miktarları kıyaslandığında bu oran 4,18 olarak hesaplanabilir. Yani maksimum örtü yüksekliğinde zeminde meydana gelen oturma kayada meydana gelen oturmanın 4,18 katı olarak nitelendirilebilir. Bu durum zemin biriminde derinliğe bağlı oturma değer azalışının kaya göre daha az olduğunu göstermektedir. Tam tersi olarak bakıldığında ise kaya biriminde derinliğe bağlı meydana gelen oturmadaki azalış zemin birimine göre daha fazla olduğu söylenebilir. Bu durumun direkt olarak birimlerin jeolojik özelliklerine bağlı olduğu kabul edilebilir.

Çalışmanın bir sonraki bölümünde ampirik yöntemler ile elde edilen yüzey oturma değerleri belirlenmiştir. Bunun için iki farklı analiz kesiti (Analiz 2 – Kaya ortamı ve Analiz 7 – Zemin ortamı) dikkate alınmıştır. Yapılan ampirik yaklaşımlara göre, yüzeyde oluşan maksimum oturma değerleri S_m , numerik yöntemlerde yüzeyde oluşmuş olan maksimum oturma değerleri ile kıyaslanmıştır. Bu sonuçlar Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Ampirik ve numerik yöntemler ile belirlenen maksimum yüzey oturma değerleri

Yöntem	Analiz	Jeolojik Koşul	Örtü Yüksekliği	S_m
Nümerik Yöntem	Analiz 2	Kaya Ortamı	4D (25,20m)	0,571 cm
Ampirik Yöntem	Analiz 2	Kaya Ortamı	4D (25,20m)	0,632 cm
<i>Yöntemler Arasındaki Oturma Farkı</i>	<u>Analiz 2</u>	<i>Kaya Ortamı</i>	<i>4D (25,20m)</i>	<i>0,061 cm</i>
Nümerik Yöntem	Analiz 7	Zemin Ortamı	4D (25,20m)	1,749 cm
Ampirik Yöntem	Analiz 7	Zemin Ortamı	4D (25,20m)	2,177 cm
<i>Yöntemler Arasındaki Oturma Farkı</i>	<u>Analiz 7</u>	<i>Zemin Ortamı</i>	<i>4D (25,20m)</i>	<i>0,428 cm</i>

Çizelgeye göre ampirik yöntem ile kaya biriminde belirlenen maksimum yüzey oturma değeri 0,632 cm olmaktadır. Aynı koşullarda numerik analizlerde bu değer 0,571 cm civarında elde edilmiştir. Bu durumda iki yöntem arasındaki oturma farkı 0,061 cm olmaktadır. Sonuç olarak ampirik yöntemde elde edilen oturma miktarı numerik yöntemde elde edilen oturma miktarından 1,10 kat kadar daha fazladır.

Jeolojik koşullar kötüleşip zemin biriminde yapılan analizlerin sonuçlarına bakıldığında ise numerik yöntem ile belirlenen maksimum yüzey oturma değeri 1,749 cm olmaktadır. Aynı

koşullarda ampirik yöntem ile bu değer 2,177 cm olarak belirlenmiştir. Bu durumda kaya biriminde elde edilen ile benzer bir davranış gözlemlenmiş ve zemin biriminde yapılan analizlerde de ampirik yöntemde oturma miktarı daha yüksek gelmiştir. Bu analizlere göre oturma miktarı farkı 0,428 cm civarı olup ampirik yöntemde elde edilen oturma miktarı numerik yöntemde elde edilen oturma miktarının 1,24 katı kadar daha fazladır.

Yüzeyde meydana gelecek oturmaların belirlenmesi için kullanılan ampirik bağıntılar, elde hiçbir verinin olmaması durumunda tercih edilebilir. Analiz sonuçlarına bakıldığında oturmalar ampirik yöntemde daha fazla belirlense de numerik analizlerde belirlenen değerlerle ile arasındaki fark çok fazla değildir. Fakat ampirik yöntemler sadece bir yaklaşım olmaktadır. Bunun sebeplerinden biri sadece tünel seviyesindeki jeolojik parametrelerin dikkate alınabilmesi olarak belirtilebilir. Fakat sahada tünelin üstündeki jeolojik tabakalar oldukça değişkendir ve tünelin üstünde kalan farklı jeolojik birimler ampirik analizlerde dikkate alınamamaktadır. Ayrıca kemerleşmenin analizlerde bir şekilde bağıntılara eklenememesi bir başka etken olmaktadır.

Son olaraksa TBM ile açılan tünellerdeki segment kaplamalarının deformasyona uğraması sebebiyle yüzeyde meydana gelecek oturma değerleri sayısal yöntemlerle belirlenmiştir. Bu durum için ampirik yöntemde kullanılan analiz kesitleri (Analiz 2 ve Analiz 7) dikkate alınmıştır. Analizler sonunda sadece kaplama sebebiyle oluşacak oturmanın belirlenmesi hedeflendiği için tünel çevresindeki zeminde meydana gelecek hacim kaybı değeri V_L modellere girilmemiştir. Bu sayede ilk başta yapılmış olan numerik analizlerdeki hem kaplama hem de hacim kaybı değerine göre elde edilen oturma değerlerinden, sadece kaplama sebebiyle oluşan oturma değerleri çıkartılarak hacim kaybına bağlı meydana gelen oturma değerleri de belirlenebilmiştir.

Numerik analizler yardımı ile kaplama nedeniyle meydana gelen yüzey oturma değerleri ve toplam yüzey oturma değerleri aşağıdaki Çizelge 6.2'de verildiği gibi özetlenebilir. Çizelgeye göre sadece kaplama deformasyonu sebebiyle kaya biriminde belirlenen maksimum yüzey oturma değeri 0,013 cm olmaktadır. Aynı koşullarda hem kaplama hem hacim kaybına bağlı numerik analizlerde bu değer 0,571 cm civarında elde edilmiştir. Bu durumda iki yöntem arasındaki oturma farkı 0,531 cm olmaktadır. Sonuç olarak kaplamada meydana gelen deformasyon sebebiyle yüzeyde oluşan oturmanın oldukça az olduğu ve

kayada yapılan analizlerde %0,5 olarak seçilen hacim kaybı değerine V_L bağlı olarak yüzeyde meydana gelen oturma değerinin 0,558 cm olduğu da belirlenmiştir.

Çizelge 6.2. Numerik yöntemler ile belirlenen toplam yüzey oturma değerleri ve sadece kaplama deformasyonuna bağlı yüzey oturma değerleri

Yöntem	Analiz	Jeolojik Koşul	Örtü Yüksekliği	S_m
Toplam Yüzey Oturma Değeri	Analiz 2	Kaya Ortamı	4D (25,20m)	0,571 cm
Sadece Kaplama Deformasyonu Sebebiyle Yüzeyde Oluşan Oturma Değeri	Analiz 2	Kaya Ortamı	4D (25,20m)	0,013 cm
<i>Yöntemler Arasındaki Oturma Farkı</i>	<u>Analiz 2</u>	<i>Kaya Ortamı</i>	<i>4D (25,20m)</i>	<i>0,558 cm</i>
Toplam Yüzey Oturma Değeri	Analiz 7	Zemin Ortamı	4D (25,20m)	1,749 cm
Sadece Kaplama Deformasyonu Sebebiyle Yüzeyde Oluşan Oturma Değeri	Analiz 7	Zemin Ortamı	4D (25,20m)	0,121 cm
<i>Yöntemler Arasındaki Oturma Farkı</i>	<u>Analiz 7</u>	<i>Zemin Ortamı</i>	<i>4D (25,20m)</i>	<i>1,628 cm</i>

Jeolojik koşullar kötüleşip zemin biriminde yapılan analizlerin sonuçlarına bakıldığında ise belirlenen maksimum yüzey oturma değeri 0,121 cm olmaktadır. Aynı koşullarda hem kaplama hem hacim kaybına bağlı numerik analizlerde bu değer 1,749 cm civarında elde edilmiştir. Bu durumda iki yöntem arasındaki oturma farkı 1,628 cm olmaktadır. Sonuç olarak zemin biriminde kaplamada meydana gelen deformasyon sebebiyle yüzeyde oluşan oturma kayaya biriminde elde edilen değere göre daha fazla olsa bile, zemin biriminde elde edilmiş olan toplam oturma değerine göre oldukça az olduğu görülmektedir. Toplam yüzey oturma analizlerinden kaplama deformasyonu sebebiyle meydana gelen oturma değeri çıkartıldığı zaman %1,0 olarak seçilen hacim kaybı değerine V_L bağlı olarak yüzeyde meydana gelen oturma değerinin 1,628 cm olduğu belirlenmiştir.

Bir sonraki bölümde bu çalışmanın neleri kapsamış olduğu hakkında bazı bilgilere yer verilmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırma kapsamında tam mekanize tünel açma yöntemlerinden biri olan TBM metodu ile açılan ikiz tünellerde oluşan yüzey oturmaları incelenmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır. İlk olarak tüneller, tünellere bağlı yüzey oturmaları, oturma hesaplama yöntemleri, farklı yöntemlere göre belirlenen oturmaların kıyaslanması, sahada uygulanan bazı projelerden örnekler ve oturma için ilgili önlemlerin alınması gibi daha önce yapılmış olan çalışmalar irdelenmiştir. Sonrasında ise tünel tarihçesinden bahsedilmiş ve dünyadan bazı tünel örneklerine yer verilmiştir.

Bir sonraki bölümde tünel açma yöntemlerinden aç – kapa yöntemi, delme – patlatma yöntemi, aşamalı kazı yöntemi, tam yüz kazısı yöntemi ve mekanize kazı yöntemleri hakkında açıklamalarda bulunulmuştur. Mekanize kazılarda özellikle; kalkansız, tek kalkanlı, çift kalkanlı, hava basınçlı, pasa basınçlı ve çamur basınçlı tünel delme makinesi ile kazı yöntemi incelenmiştir. Bu yöntemlerin yapım aşamaları ve uygulama alanları hakkında örneklere yer verilmiştir.

Sonrasında tünel kazısına bağlı yüzeyde oluşacak oturmalar için dikkate alınması gereken etkenler incelenmiştir. Oturmaların belirlenmesi için kullanılan yöntemler araştırılmıştır. İlk olarak uygulama öncesi yüzey oturmalarının ampirik ve numerik yöntemlerle nasıl belirlenebileceği, sonrasında ise uygulama boyunca oturmaların; konverjans ölçümleri, ekstansometre ölçümleri ve yüzey oturma ölçümleri ile nasıl takip edilebileceği açıklanmıştır.

Ardından tam mekanize tünel açma yöntemlerinden biri olan TBM metodu ile açılan ikiz tünellerde oluşan yüzey oturmaları numerik analizler dikkate alınarak incelenmiştir. 2 boyutlu bir sonlu elemanlar programı olan Plaxis 2D [8] programında analizler tamamlanmıştır. Bunun için analizlerde bazı sabitler ve değişkenler seçilmiştir. Sabitler; tünel çapları, tüneller arası mesafeler ve kazı sıralaması olarak seçilmiştir. Değişkenler ise; zemin birimi ve örtü yüksekliği olarak belirlenmiştir. Bu değişkenler dikkate alınarak yüzeyde oluşan oturma farklılıkları incelenmiştir. Analizlerde yüzey oturmalarının belirlenmesi için hacim kaybı uygulanmıştır. Bir sonraki adımda bir adet kaya biriminde bir adet ise zemin biriminde ampirik yöntemler ile yüzeyde oluşacak maksimum oturma

değerleri belirlenmiş ve sonuçlar numerik analizler ile kıyaslanmıştır. Son olaraksa numerik analizlerde kaplama sebebiyle meydana gelecek yüzey oturması incelenmiş ve toplam yüzey oturmasındaki etkisi incelenmiştir.

Numerik analizlerde kullanılan örtü yüksekliği değişkeninin etkisine bakıldığında; iki zemin biriminde de derinlik azaldıkça yüzey oturmaları düşünüldüğü gibi benzer davranışlar göstererek artmaktadır. Maksimum yüzey oturması tüm analizlerde genelde iki tünelin ortasındaki eksen üzerinde oluşmaktadır. Örtü yüksekliğinin 4 tünel çapı ($4D=25,2m$) olduğu derinliğe kadar bu artış orantılı bir şekilde ilerlemektedir. Örtü yüksekliğinin $4D$ 'den daha az olduğu koşullarda oturma eğrilerinin davranışı değişmekte ve maksimum oturmalar her tünel eksenini üzerinde en yüksek değere ulaşmaktadır. Yapılan analizlerin sonuçlarına göre hem kaya biriminde hem de zemin biriminde tünel derinliğinin azalmasıyla; yüzeyde oluşan oturma değerleri artarken oturma havzasının genişliği öngörüldüğü gibi azalmaktadır. İki zemin birimindeki aynı örtü yükseklikleri kıyaslandığında oluşan oturma havzaları benzer davranış göstermektedir.

Ampirik yöntemler ile 4 tünel çapı ($4D=25,2m$) örtü yüksekliğinde kaya ve zemin biriminde analizler yapılmış ve maksimum oturma değerleri belirlenmiştir. Elde edilen maksimum yüzey oturma değerleri, numerik yöntemlerdeki aynı örtü yüksekliğinde elde edilen oturma değerleri ile kıyaslandığında ampirik yöntemlerde elde edilen değerler daha yüksek gelmiştir. Bunun sebebi ampirik yöntemlerin; tünel çapı, tünelin geçtiği jeolojik koşullar ve tünel örtü yüksekliği gibi sadece birkaç etkeni dikkate alması olarak kabul edilebilir. Çünkü ampirik yöntem kullanıldığında tünel üstündeki farklı zemin katmanlarının dikkate alınması mümkün değildir. Ek olarak tünel çevresindeki kemerleşme etkisi hesaplara katılamamakta ve tünel çevresindeki gerilme dağılımı bağıntılarda işleme sokulamamaktadır.

Ayrıca numerik yöntemler kullanılarak tünel kaplaması sebebiyle meydana gelen yüzey oturma değerleri de araştırma kapsamında incelenmiştir. Oturmanın belirlenmesi için tünel çevresindeki zeminde meydana gelecek hacim kaybı V_L analizlerde hiç dikkate alınmadan direkt olarak modellerde kazı yapılmış ve segment yerleştirilmiştir. Bu sayede segmenetlerin çevresindeki zemin yükü direkt olarak kaplamaya binmiş ve bu sebeple kaplamada meydana gelen deformasyonun yüzeydeki etkisi incelenmiştir. Yapılan analizlerde kaplamada meydana gelen deformasyon sebebi ile yüzeyde de bir miktar oturma olduğu görülmüştür. Fakat oluşan oturmanın etkisinin oldukça düşük olduğu elde edilen değerlerden de

anlaşılmaktadır. Özellikle tünel delme makinesi ile açılan tünellerde yüzeydeki oturmalar; jeolojik koşullar, örtü yüksekliği ve tünel geometrisi gibi etkenlere bağlı olup, kaplamanın deforme olması sebebiyle meydana gelen oturma diğer faktörlere göre oldukça düşük ve göz ardı edilebilir bir konumdadır.

Yukarıdaki durumlar incelendiğinde bu araştırma sonucunda TBM tünel kazılarının zemin birimi fark etmeksizin yüzeyde değişkende olsa bir oturmaya sebep olduğu görülmüştür. Bu nedenle belirlenen oturma havzası bölgesinde ayrıca yapı ve yolların olduğu yerlerde; kazı öncesinde, kazı sırasınca ve kazı sonrasında bir süre daha yüzeyde oluşacak oturmaların takip edilmesi gerekmektedir.

Tünel inşası boyunca yüzey deformasyonlarının izlenmesi yapılan tasarımda öngörülenden farklı kazı ve kazı destek sistemi yönteminin seçilmesi, kontrol edilmesi ve gerekirse değiştirilmesi için ve özellikle de zemin yüzeyinde bulunan yapıların güvenliğinin sağlanması için gereklidir. Kentleşmenin çok olduğu yerlerde yapılan sığ tünellerde yüzey deformasyonlarını izlemenin temel amacı yapılara zarar gelmesini önlemek, yani hizmet verilebilirlik sınır durumlarına karşı koruma sağlamak için zemin yüzey oturmalarının yeterince düşük değerlerle sınırlamaktır. Kabul edilebilir oturma değerleri genellikle çok düşük olduğu için, hassas ve doğru ölçümler gereklidir. Çoğu zaman hızlı veri toplama ve toplanan verilerin hızlıca değerlendirilmesi gerekir [47].

Özellikle zemin biriminde yapılan kazılarda oturmaların daha kritik olduğu ve tünel kazılarının yüzeye yaklaştıkça daha da arttığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple örtü yüksekliği azalıp kazı malzemesi kötüleştikçe oluşabilecek problemlerin önüne geçilmesi için yüzey oturma ölçümlerinin düzenli olarak sık aralıklarla alınması ve aynı zamanda tünel içinde de deformasyon okumalarının yapılması çok ciddi bir önem arz etmektedir.

Yapılaşmanın çok sık olduğu metro projelerinde planlama yapılırken tünel kazıları kadar yüzeydeki oturmaların da özenle belirlenmesi, takip edilmesi ve gerektiğinde tasarımda düzenlemeler yapılması güvenli bir tünel kazısını sağlar. Genel olarak tünel projelerinde ana amaç topluma ulaşım için alternatif bir çözüm sağlamaktır. Fakat bunun mühendislik açısından ve uygulama açısından ekonomik ve güvenli, çevresel faktörler açısından risk teşkil etmeden kolay uygulanabilirlik ile tamamlanması gerektiği unutulmamalıdır.

Bundan sonraki çalışmalarda ikiz tünellerde bazı değişken ve sabitlere göre elde edilecek yüzey oturmalarının belirlenmesi ile alakalı yapılacak kıyaslamalarda 3 boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanılabilir. Bu sayede, bu çalışmada yapıldığı gibi sadece enine yöndeki oturmalar değil aynı zamanda boyuna yönde tünel kazısı gerisinden itibaren meydana gelen oturmalarda incelenebilir. Bunun için tünel delme makinesi dikkate alınacak ise makine tipine uygun olarak gerçekçi modellemeler yapılp saha elde edilecek sonuçlara en yakın değerlerin belirlenmesi hedeflenebilir. Bu değerler; tünel aynasında var ise uygulanan ayna basıncının sayısal analizlerde kullanılması, itme silindiri varsa onun uyguladığı kuvvetlerin modellenmesi, kalkan var ise geometrik özelliklerine göre analizlerde dikkate alınması ve enjeksiyon malzemesi ile segmentlerin yerleşiminin detaylıca sayısal analizlerde kullanılması ile sağlanabilir. Ayrıca daha farklı değişken ve sabitler analizlere katılarak daha geniş kapsamlı bir çalışma yapılabilir ve mümkün ise sahadan elde edilen veriler ile analiz sonuçları kıyaslanarak modellemelerin doğruluğu ve gerçekliği kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR

1. Bickel, J. O., Kuesel, T. R. and King, E. H. (1996). *Tunnel Engineering Handbook (Second Edition)*. London: Kluwer Academic Publishers.
2. İnternet: Balasubramanian, A. (2014) Tunnels, Types & Importance. URL: https://www.researchgate.net/publication/314174382_Tunnels-types_and_importance, Son Erişim Tarihi: 8 Aralık 2021.
3. Yun, B. (2018). *Underground Engineering Planning, Design Construction and Operation of the Underground Space*. London: Academic Press, 118-133.
4. İnternet: International Association of Public Transport, (2015). World Metro Figures: Statistics Brief. URL: <http://www.uitp.org>, Son Erişim Tarihi: 2 Ekim 2012.
5. İnternet: International Association of Public Transport, (2018). World Metro Figures: Statistics Brief. URL: <http://www.uitp.org>, Son Erişim Tarihi: 8 Aralık 2021.
6. Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahbat, A. ve Xu, S. (2008). *Mechanized Tunnelling in Urban Areas Design Methodology and Construction Control*. Turin: Taylor & Francis.
7. Khan, A. ve Abdullah, R. A. (2016). A Review on Selection of Tunneling Method and Parameters Affecting Ground Settlements. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21, 4460-4475.
8. İnternet: Bentley Systems, (2021). *Plaxis 2D*. URL: <https://www.bentley.com>, Son Erişim Tarihi: 8 Aralık 2021.
9. Bulut, A. (2007). *Tünel Kazısı Nedeniyle Meydana Gelen Zemin Oturmaları ve Bunların Mevcut Bir Yapıya Olan Etkisi*. Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
10. İnternet: Bentley Systems, (2021). *Plaxis 3D*. URL: <https://www.bentley.com>, Son Erişim Tarihi: 8 Aralık 2021.
11. İnternet: Computers and Structures, (2009). *Etabs*. URL: <https://www.csiamerica.com>, Son Erişim Tarihi: 8 Aralık 2021.
12. Suwansawat, S. ve Einstein, H.h. (2007). Describing Settlements Troughs Over Twin Tunnels Using a Superposition Technique. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133, 445-468.
13. Hajebi, D. (2008). *TBM ile Açılan İkiz Tüneller Çevresinde Gözlenen Oturma ve Deformasyonlar*. Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

14. Doğruoğlu, T. M. (2009). *TBM Metodu ile Açılan İkiz Tünellerde Meydana Gelebilecek Deformasyonların Sonlu Elemanlar Metodu ve Numerik Hesaplarla Tahmini*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
15. Chow, L. (1994). *The Prediction of Surface Settlements Due to Tunnelling in Soft Ground*. Yüksek lisans tezi, Oxford Üniversitesi, Oxford.
16. Peck, R. B. (1969). *Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground*, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, 225-290.
17. Yurtaydın, H. Ö. (2011). *TBM Performance in Two Tunnels in Istanbul and the Effect of Rock Quality Designation*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
18. Eren, M. (2014). *İki Farklı Yöntemle (NATM-TBM) İle Açılan Bir Tünelde Düşey Deformasyon/Deplasman'ların Belirlenmesi: M5 Metro Örneği*. Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
19. CEN, (2015). *EN ISO 18674-1 - Geotechnical Investigation and Testing - Geotechnical Monitoring by Field Instrumentation - Part 1: General Rules - Annex C*, Brussels, 17.
20. Satıcı, Ö ve Topal, T. (2015). Tünel Açma Yöntemlerinin Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Sınıflama Sistemleri ile Değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 39, 45-56.
21. Sojoudi, H. (2015). *Yerleşim Alanlarında Tünel Kazılarına Bağlı Deformasyon Modellenmesi (Dışkapı, Ankara)*. Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
22. Çınar, T. (2016). *Mecidiyeköy-Mahmutbey Metrosu TBM Güzergahındaki Zeminin Jeoteknik Özellikleri ile Yüzey Deformasyonlarının İlişkisi*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
23. Zakaria, W. A., Mahdi, Q. A. ve Muhammed, H. H. (2019) Prediction of Stress and Settlement of TBM Tunnel Surrounding Soil. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 04, 50-59.
24. Forsat, M., Taghipoor, M. ve Palassi, M. (2021) 3D FEM Model on the Parameters' Influence of EPB-TBM on Settlements of Single and Twin Metro Tunnels During Construction. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14.
25. Golser, J. ve Steiner, W. (2021). International and European Standards for Geotechnical Monitoring and Instrumentation. *Geomechanics and Tunnelling*, 1, 63-77.
26. Çetindağ, B. (2003). *Metro İstasyonları Tasarım Kriterleri İstanbul Metrosu ve Londra Tottenham Court Road İstasyonu Örnekleri*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

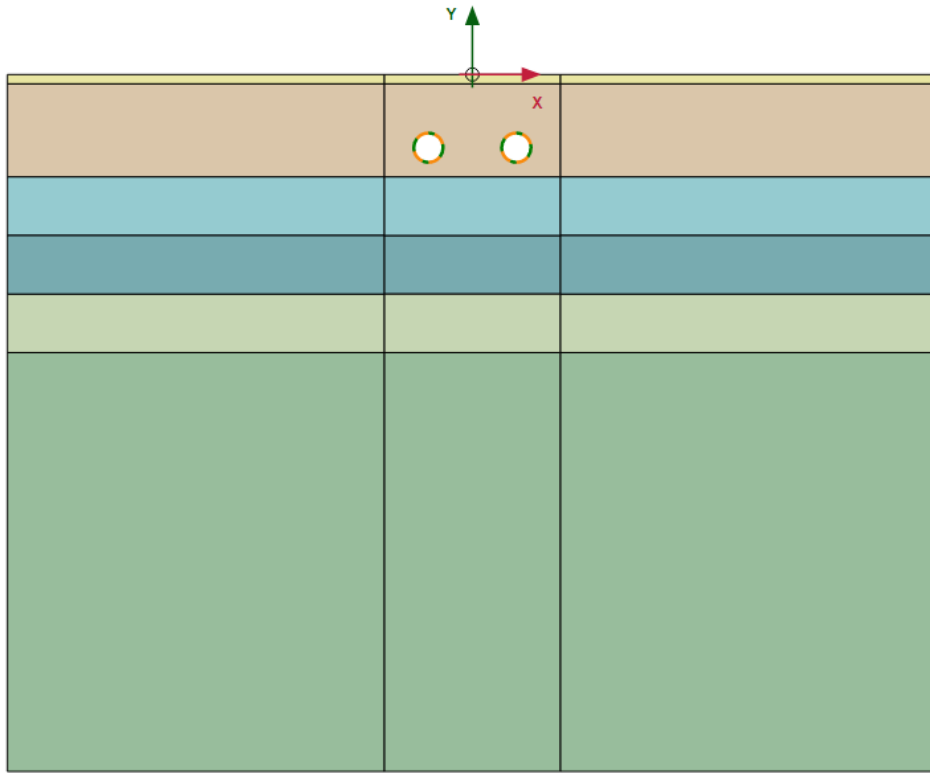
27. Kapusuz, Z. A. (2018) *İkiz Tünel Kazılarına Bağlı Oluşan Yüzey Oturmanlarının Tahmini*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
28. Öngen, Ö. ve Güzel, A. (2015) Farklı Kaya Sınıfları İçin Yapılan Sayısal Modelleme Çalışmalarının Karşılaştırılması-Örnek Uygulama. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11, 254-255.
29. İnternet: Central Japan Railway Company. (2018). *Maglev System*. URL: <https://scmaglev.jr-central-global.com>, Son Erişim Tarihi: 21 Aralık 2021.
30. Lunardi, P. (2008). *Design and Construction of Tunnels Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soils (ADECO-RS)*, Milano: Springer, 3-45.
31. Moan, T. ve Eidem, M. E. (2020) *Floating Bridges and Submerged Tunnels in Noeway-The History and Furutre Outlook*, World Conference on Floating Solutions, Singapore, 81-111.
32. Xiang, Y. ve Yang, Y. (2016). Challenge in Design and Construction of Submerged Floating Tunnel and State-of-Art, *Procedia Engineering*, 166, 53-60.
33. International Tunnelling and Underground Space Association, (2016). *An Owners Guide to Immersed Tunnels - Immersed and Floating Tunnels*, Avignon, 6-9.
34. Attewell P. B. ve Woodman J. P. (1982). Predicting the Dynamics of Ground Settlement and its Derivatives Causeed by Tunnelling in Soil, *Ground Engineering*, 8, 13-22.
35. Arıoğlu, E. (1992). *Surface Movements due to Tunnelling Activities in Urban Areas and Minimization of Building Damages*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
36. Mair R. J. ve Taylor R. N. (1997). *Bored Tunnelling in te Urban Environment*, 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, 2353-2385.
37. Möller, S. (2006). *Tunnel Induced Settlements and Structural Forces in Linings*, Yüksek lisans tezi, Stuttgart Üniversitesi, Stuttgart.
38. Hasanpour, R., Chakeri, H., Ozcelik, Y. ve Denel, H. (2012). Evaluation of Surface Settlements in the İstanbul Metro in Term of Analytical, Numerical, and Direct Measurements, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, 499-510.
39. Schmidt, B. (1969). A Method of Estimating Surface Settlement Above Tunnels Constructed in Soft Ground, *Canadia Geotech*, 20, 11-22.
40. Herzog, M. (1985). Die Setzungsmulde ber Seicht Liegenden Tunneln, *Bautechnik*, 11, 375-377.

41. O'Reilly, M. P. ve New, B. M. (1982). Settlement Above Tunnels in the United Kingdom-Their Magnitude and Prediction, *Tunnelling 82 3 rd International Symposium, Institute of Mining and Metallurgy*, London, 173-181.
42. Chakeri, H., Ozcelik, Y. ve Unver, B. (2015) Investigation of Ground Surface Settlement in Twin Tunnels Driven with EPBM in Urban Area, *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 7655-7666.
43. Glossop, N. H. (1978). *Soil Deformations Caused by Soft-Ground Tunnelling*. Yüksek lisans tezi, Durham Üniversitesi, Durham.
44. Rowe, R. K. ve Kack, G. J. (1983). A Theoretical Examination of the Settlements Induced by Yunnelling: Four Case Histories, *Canadian Geotechnical Journal*, 20, 299-314.
45. Panet, M. ve Guénot, A. (1982). Analysis of Convergence Behing the Face of a Tunnel, *Tunnelling'82, 3rd International Symposium, Institute of Mining and Metallurgy*, London, 197-204.
46. Vermeer, P.A ve Brinkgreve, R. (1993). *Plaxis Version 5 Manual*. Rotterdam, Balkema.
47. Ercelebi, S. G., Copur, H. ve Ocak, I. (2011). Surface Settlement Predictions for Istanbul Metro Tunnels Excavated by EPB-TBM, *Environmental Earth Sciences*, 62, 257-365.
48. International Tunnelling and Underground Space Association, (2011). *Monitoring and Control in Tunnel Construction*, Avignon, 6-7.
49. International Organization for Standardization, (2014). *Geotechnical Investigation and Testing - Geotechnical Monitoring by Field Insurmentation - General Rules*, Brussels, 1-27.
50. Yıldız, L. (2005). *Donatıyla Güçlendirilmiş Şevli Zemin Oturan Yüzeysel Temel Analizi*. Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
51. Mamaqani, B. H. M. H. (2014) *Numerical Modeling of Ground Movements Associated With Trenchless Box Jacking Technique*, Doktora tezi, University of Texas at Arlington, Arlington.
52. Şengün, E. (2013) *Oyuk Genişlemesi Probleminin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İki Boyutlu Sayısal Analizi*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
53. Çalık, Ö. (2018). *Donatılı Duvarların (Zeminlerin) Sayısal Analizi*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

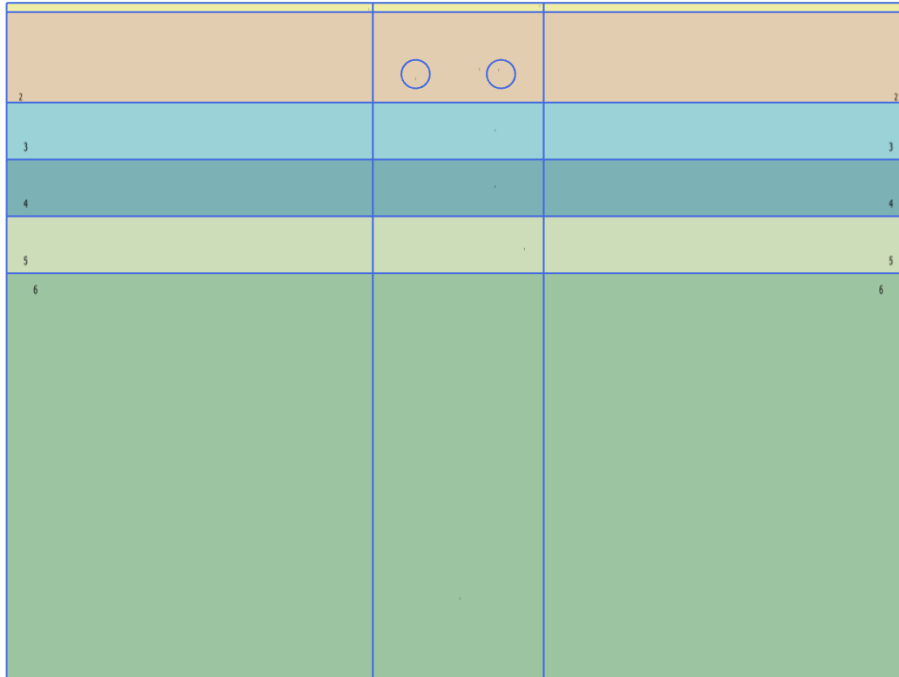
54. İnternet: Rocscience (2014). *RocData 4.0*. URL: <https://www.roscience.com>, Son Erişim Tarihi: 21 Aralık 2021.
55. Bentley Systems (2016). *Plaxis 2D Reference Manual*, 78.
56. Wood, M. A. M. (1975). The Circular Tunnel in Elastic Ground, *Geotechnique*, 1, 115-127.
57. Türk Standartları Enstitüsü, (2000). *Türk Standardı TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*, Ankara.

EKLER

EK-1. PLAXIS 2D programı sonuçları

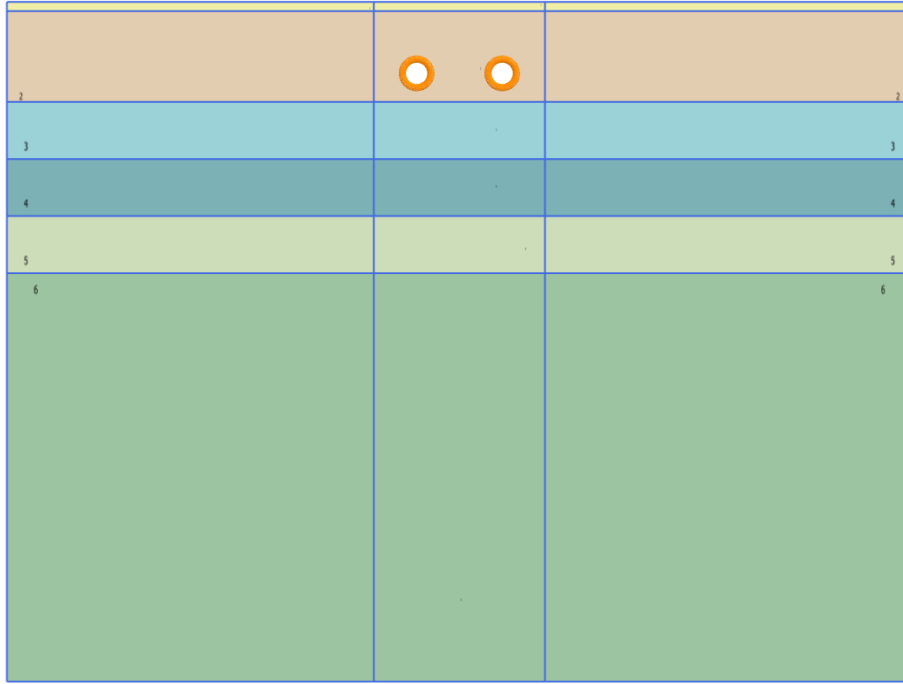


Şekil E1. 1 Analiz 1 Plaxis programı – zemin model gösterimi

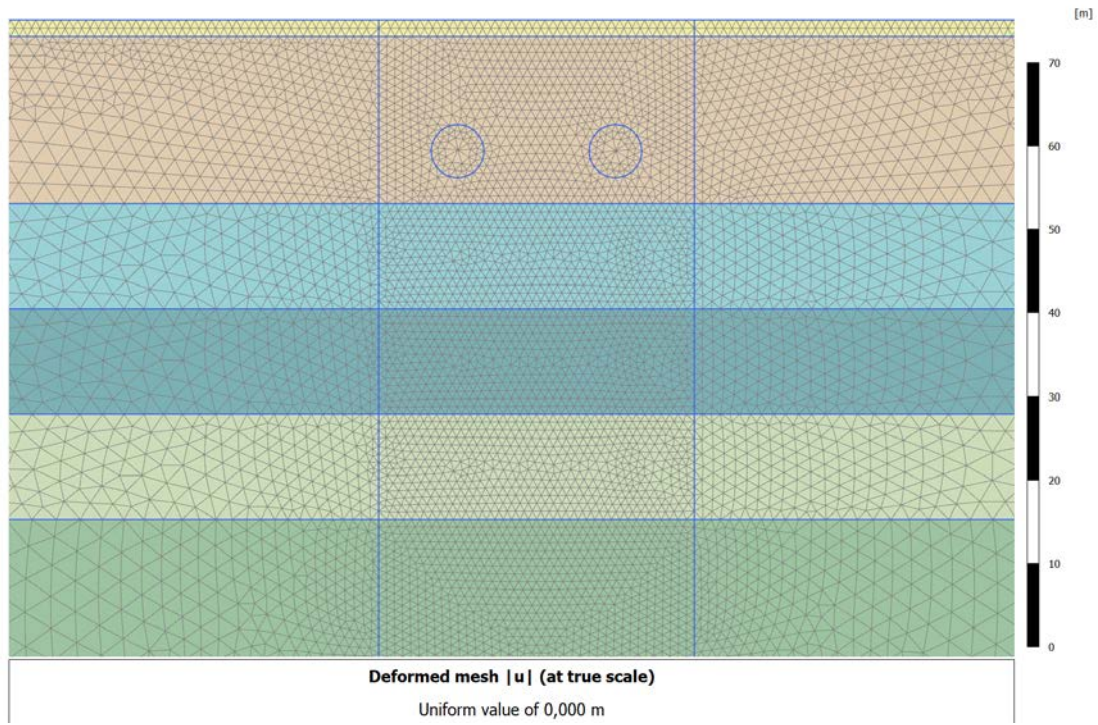


Şekil E1. 2 Analiz 1 Plaxis programı – Aşama 0 gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

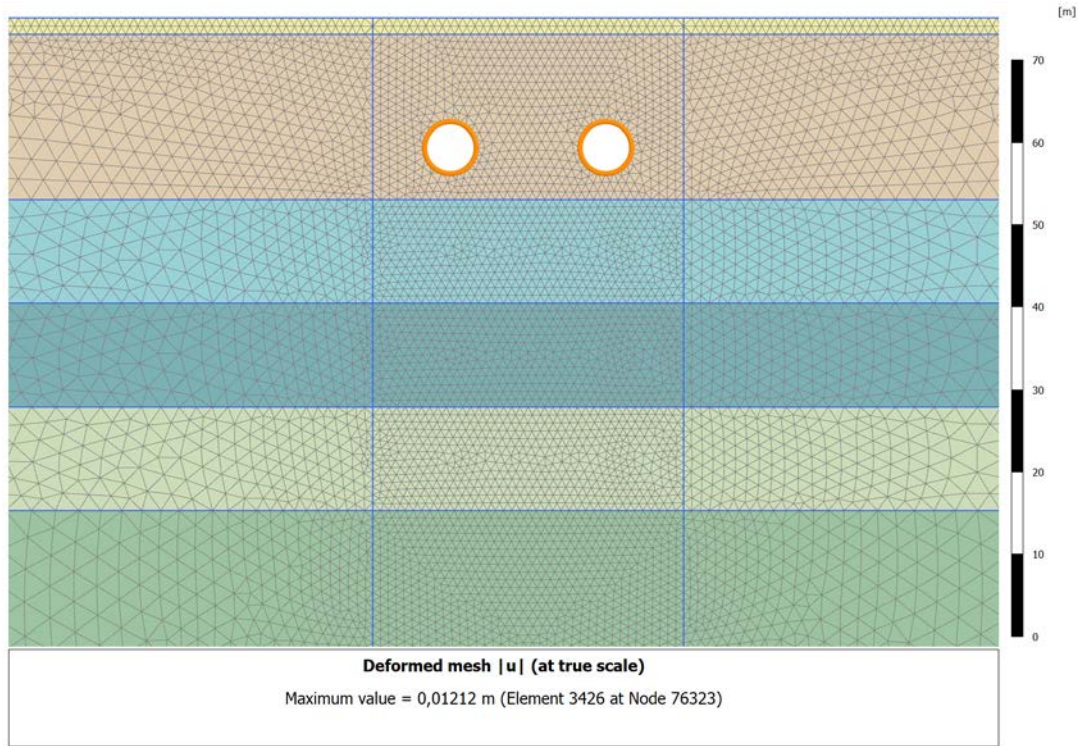


Şekil E1. 3 Analiz 1 Plaxis programı – Aşama 1 gösterimi

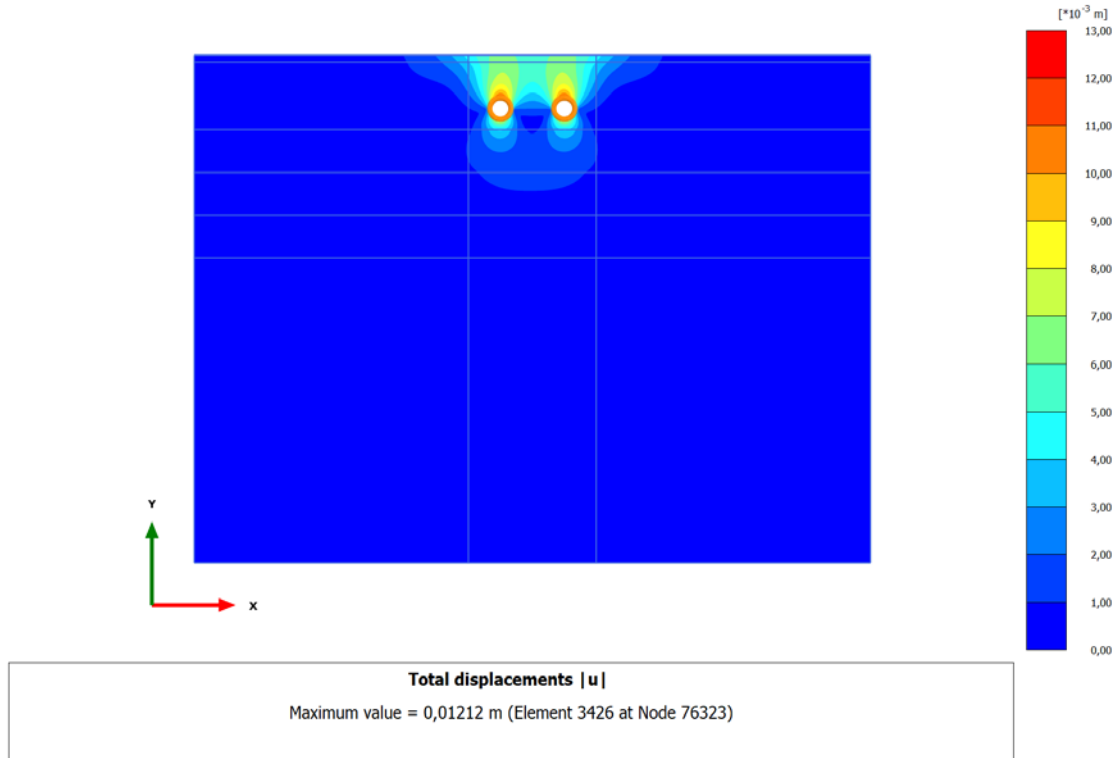


Şekil E1. 4 Analiz 1 Plaxis programı – Aşama 0 üçgenleme gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

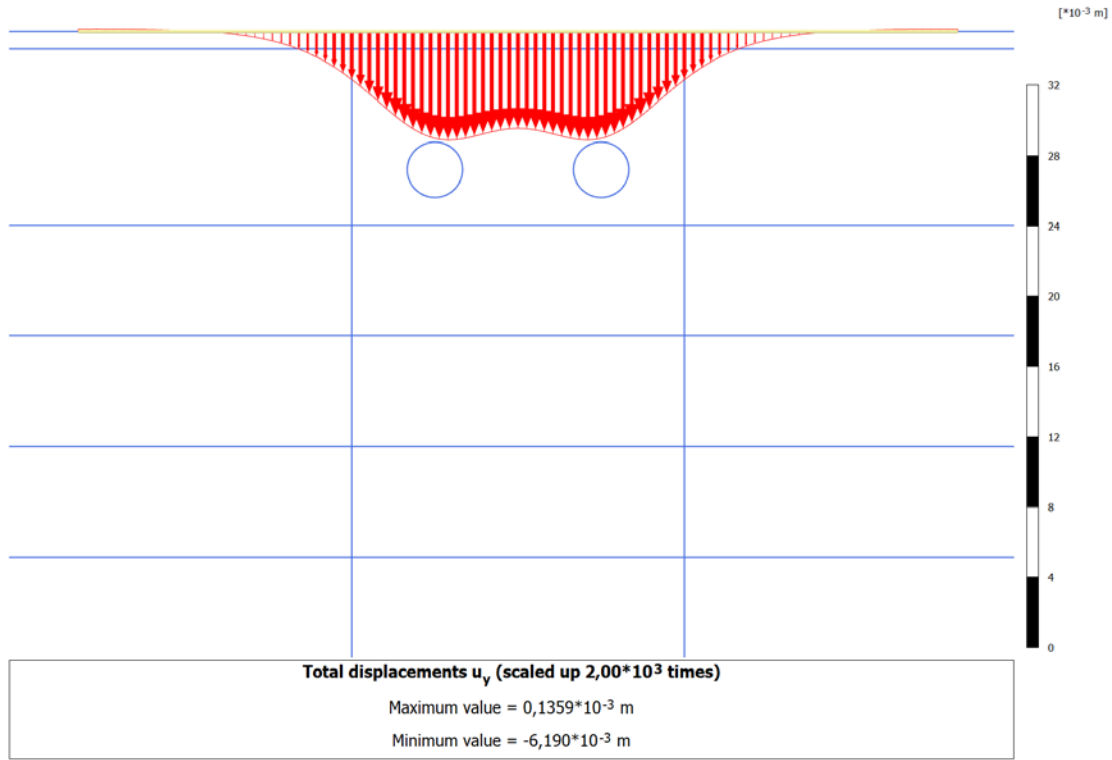


Şekil E1. 5 Analiz 1 Plaxis programı – Aşama 1 üçgenleme gösterimi



Şekil E1. 6 Analiz 1 Plaxis programı – kazıya bağlı zemin deformasyonu

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları



Şekil E1. 7 Analiz 1 Plaxis programı – kazıya bağlı yüzeyde oluşan oturma

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 1 Analiz 1 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Mohr Cloulomb

Identification		1.Tabaka - Kontrosuz Dolgu
Identification number		1
Drainage type		Drained
Colour		
Comments		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E	kN/m ²	10,00E3
ν (nu)		0,3000
G	kN/m ²	3846
E_{oed}	kN/m ²	13,46E3
c_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
V_s	m/s	43,43
V_p	m/s	81,26
Set to default values		Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
c_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
ν_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	375,0E3
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
δ_{inter}		0,000
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,5000
$K_{0,z}$		0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 2 Analiz 1 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hoek Brown

Identification		2.Tabaka-Kaya-Kirectasi-1	3.Tabaka-Kaya-Kirectasi-2	4.Tabaka-Kaya-Kirectasi-3
Identification number		2	3	4
Drainage type		Drained	Drained	Drained
Colour				
Comments				
γ_{unsat}	kN/m ³	26,00	26,00	26,00
γ_{sat}	kN/m ³	26,00	26,00	26,00
Dilatancy cut-off		No	No	No
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000	0,000
E	kN/m ²	219,0E3	377,0E3	651,0E3
ν (nu)		0,3000	0,3000	0,3000
σ_{ci}	kN/m ²	12,00E3	14,00E3	16,00E3
m_i		9,000	9,000	9,000
GSI		20,00	25,00	30,00
D		0,000	0,000	0,000
Ψ_{max}	°	0,000	0,000	0,000
σ_{Ψ}	kN/m ²	0,000	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000	0,000
R	m ² K/kW	0,000	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000	0,5000
$K_{0,z}$		0,5000	0,5000	0,5000
Data set		Standard	Standard	Standard
Type		Coarse	Coarse	Coarse
< 2 μm	%	10,00	10,00	10,00
2 μm - 50 μm	%	13,00	13,00	13,00
50 μm - 2 mm	%	77,00	77,00	77,00
Set to default values		No	No	No
k_x	m/day	0,000	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000	0,000
$-\Psi_{\text{unsat}}$	m	10,00E3	10,00E3	10,00E3
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 3 Analiz 1 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hoek Brown

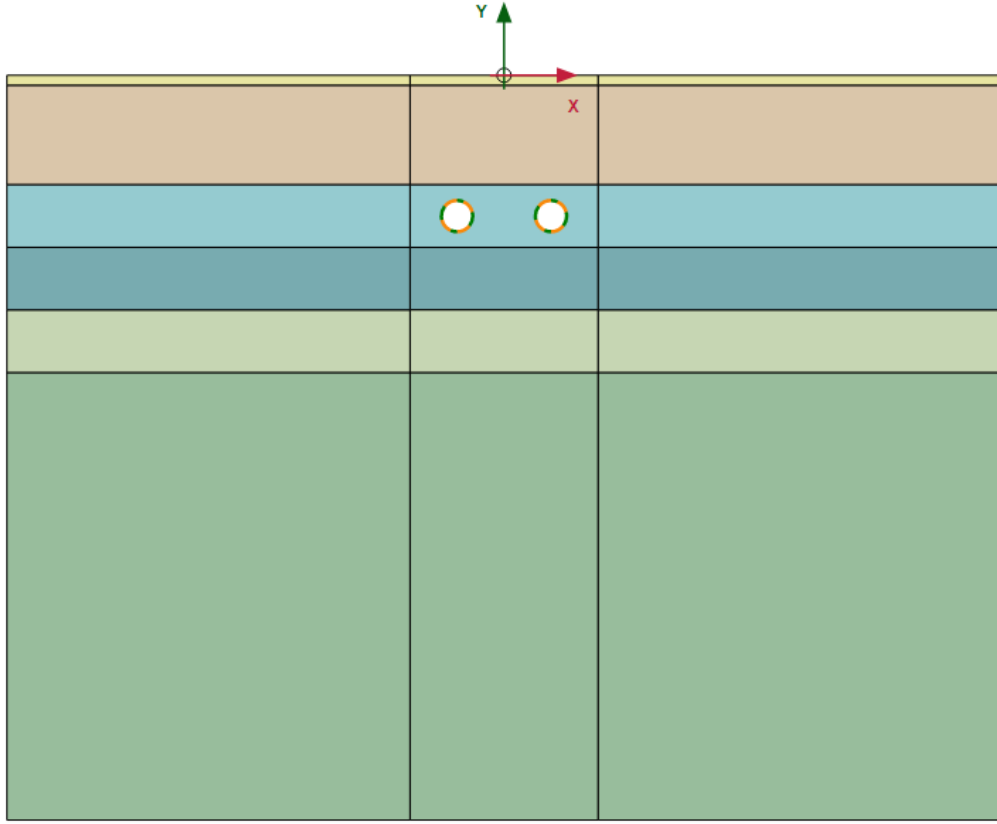
Identification		5.Tabaka-Kaya-Kirectasi-4	6.Tabaka-Kaya-Kirectasi-5
Identification number		5	6
Drainage type		Drained	Drained
Colour			
Comments			
γ_{unsat}	kN/m ³	26,00	26,00
γ_{sat}	kN/m ³	26,00	26,00
Dilatancy cut-off		No	No
e_{init}		0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000
E	kN/m ²	1,122E6	1,915E6
ν (nu)		0,3000	0,3000
σ_{ci}	kN/m ²	18,00E3	20,00E3
m_i		9,000	9,000
GSI		35,00	40,00
D		0,000	0,000
Ψ_{max}	°	0,000	0,000
σ_{Ψ}	kN/m ²	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000
R	m ² K/kW	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000
$K_{0,z}$		0,5000	0,5000
Data set		Standard	Standard
Type		Coarse	Coarse
< 2 μm	%	10,00	10,00
2 μm - 50 μm	%	13,00	13,00
50 μm - 2 mm	%	77,00	77,00
Set to default values		No	No
k_x	m/day	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000
$-\Psi_{\text{unsat}}$	m	10,00E3	10,00E3
e_{init}		0,5000	0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

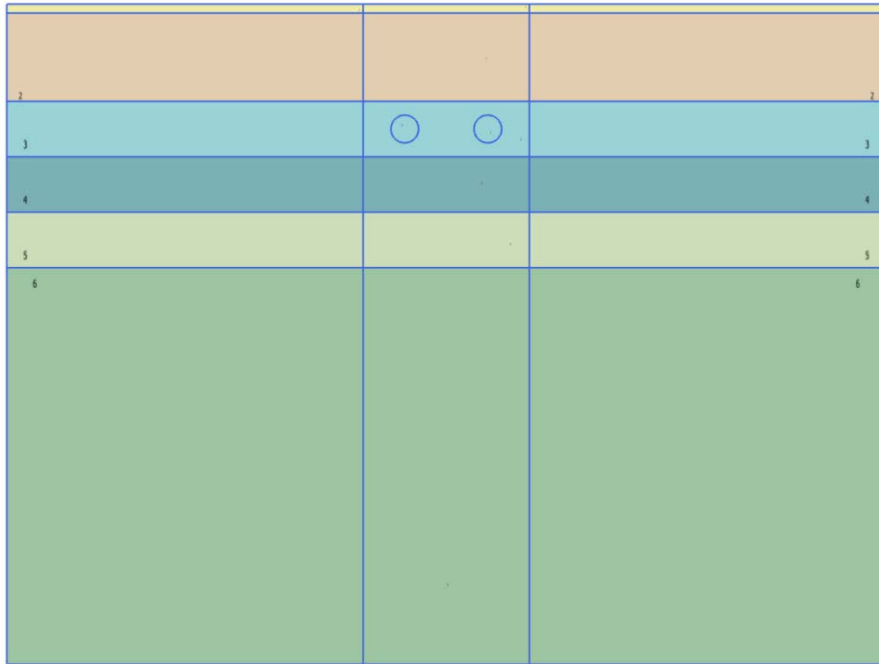
Çizelge E1. 4 Analiz 1 Plaxis programı – Tünel kaplama parametresi

Identification		TBM Segment (H=30cm) C45/55
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
Isotropic		Yes
End bearing		No
EA ₁	kN/m	9,772E6
EA ₂	kN/m	9,772E6
EI	kN m ² /m	60,00E3
d	m	0,2714
w	kN/m/m	7,500
ν (nu)		0,2000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Identification number		1
c	kJ/t/K	0,000
λ	kW/m/K	0,000
ρ	t/m ³	0,000
α	1/K	0,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

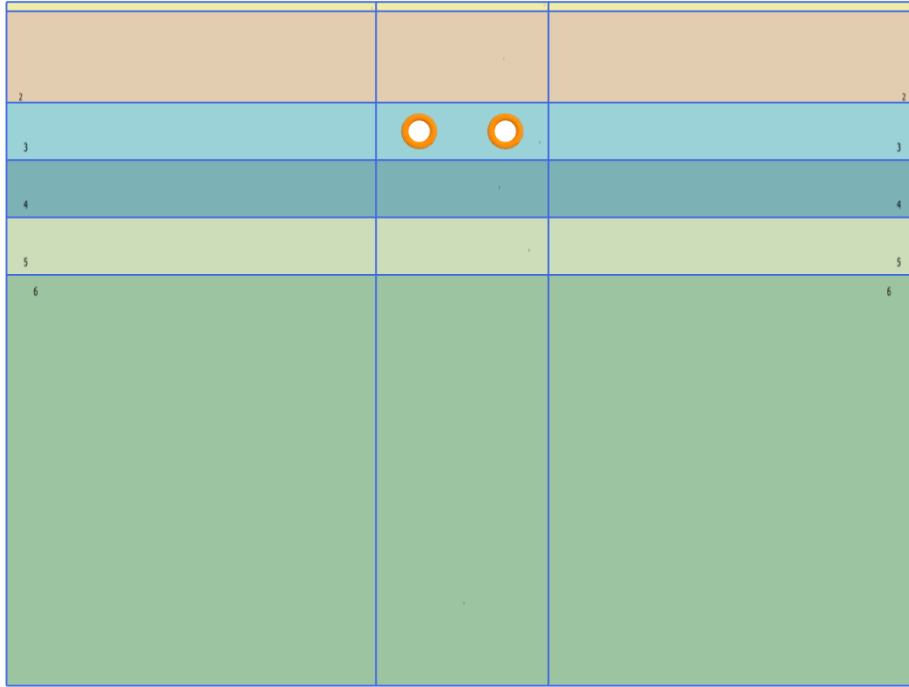


Şekil E1. 8 Analiz 2 Plaxis programı – zemin model gösterimi

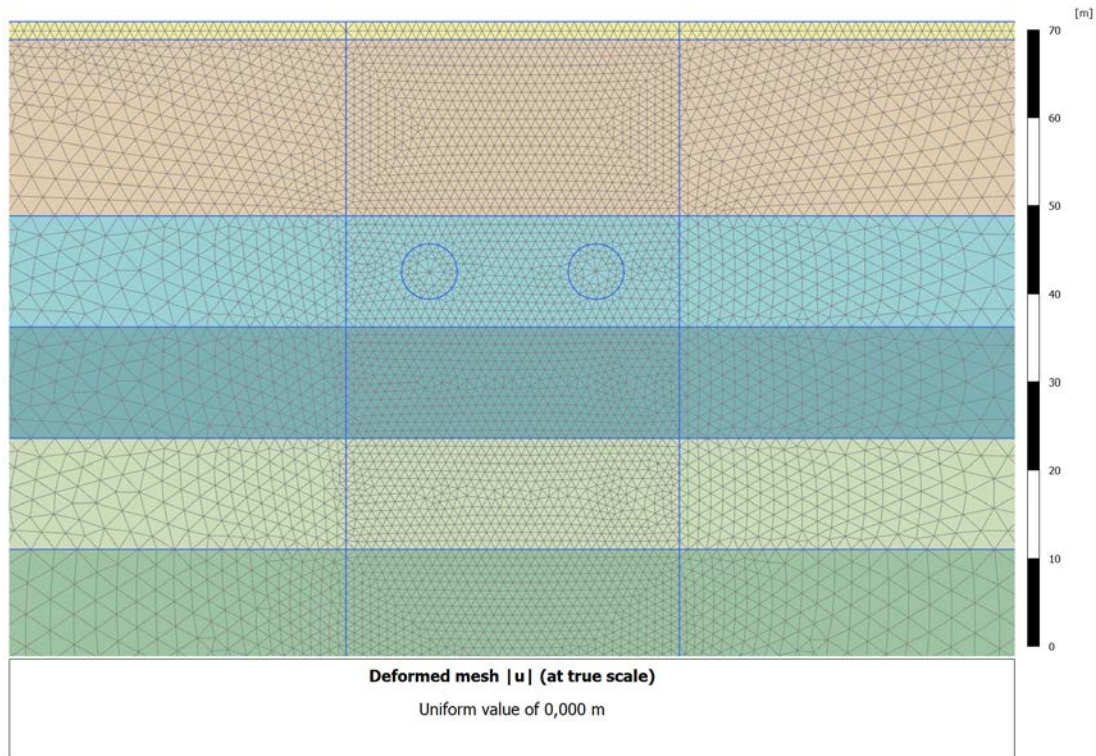


Şekil E1. 9 Analiz 2 Plaxis programı – Aşama 0 gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

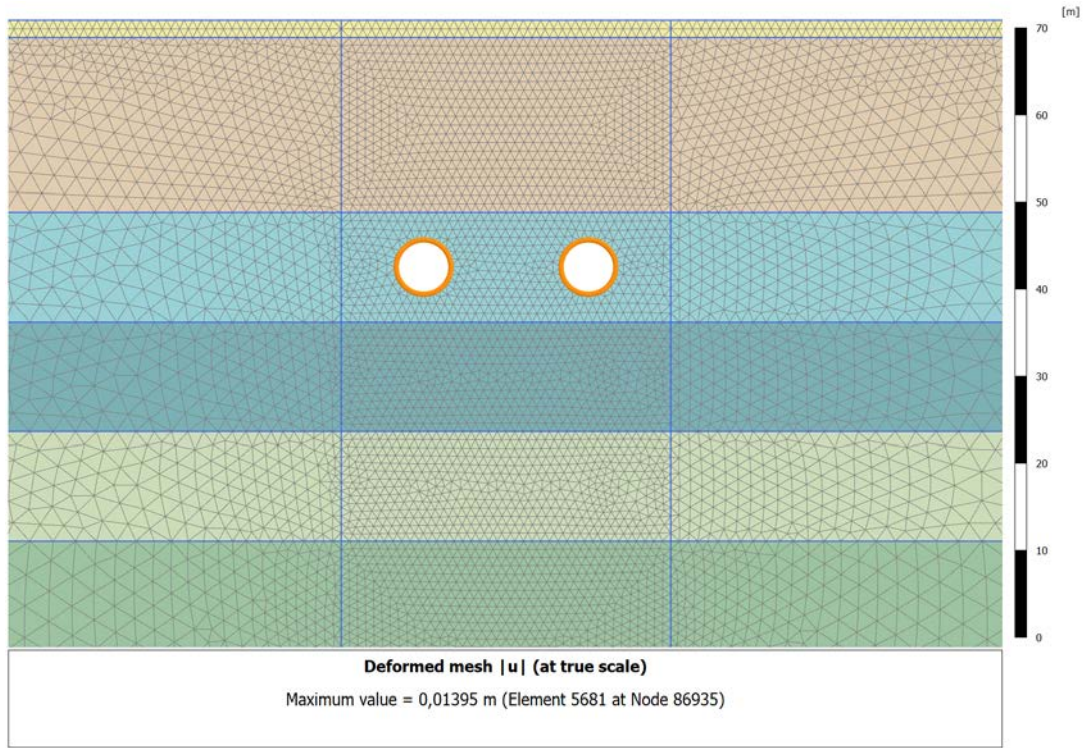


Şekil E1. 10 Analiz 2 Plaxis programı – Aşama 1 gösterimi

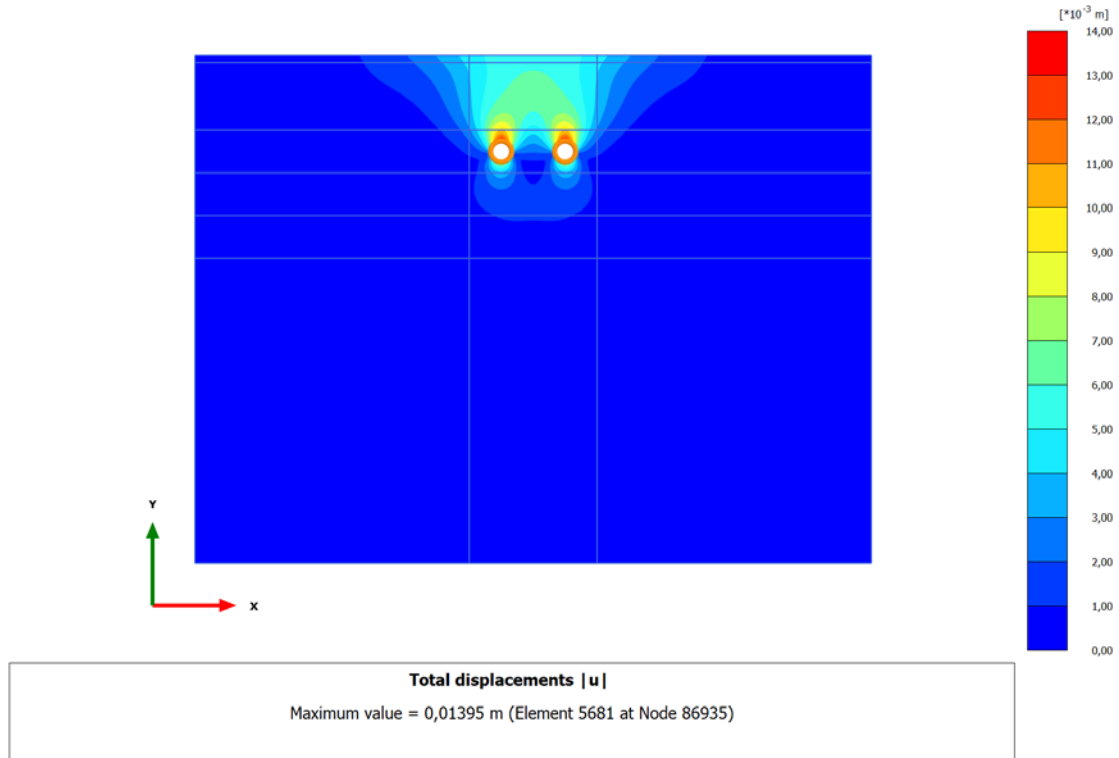


Şekil E1. 11 Analiz 2 Plaxis programı – Aşama 0 üçgenleme gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

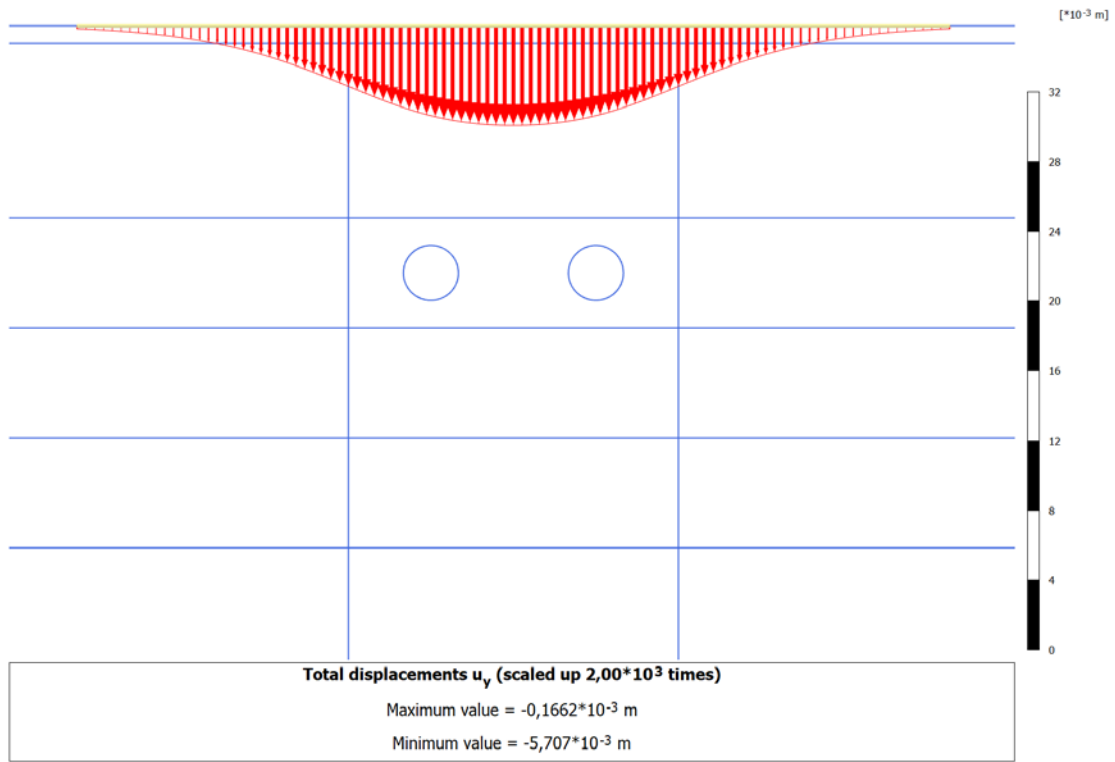


Şekil E1. 12 Analiz 2 Plaxis programı – Aşama 1 üçgenleme gösterimi



Şekil E1. 13 Analiz 2 Plaxis programı – kazıya bağlı zemin deformasyonu

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları



Şekil E1. 14 Analiz 2 Plaxis programı – kazıya bağlı yüzeyde oluşan oturma

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 5 Analiz 2 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Mohr Cloulomb

Identification		1.Tabaka - Kontrosuz Dolgu
Identification number		1
Drainage type		Drained
Colour		
Comments		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E	kN/m ²	10,00E3
ν (nu)		0,3000
G	kN/m ²	3846
E_{oed}	kN/m ²	13,46E3
C_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
V_s	m/s	43,43
V_p	m/s	81,26
Set to default values		Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
ν_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	375,0E3
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
δ_{inter}		0,000
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,5000
$K_{0,z}$		0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 6 Analiz 2 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hoek Brown

Identification		2.Tabaka-Kaya-Kirectasi-1	3.Tabaka-Kaya-Kirectasi-2	4.Tabaka-Kaya-Kirectasi-3
Identification number		2	3	4
Drainage type		Drained	Drained	Drained
Colour				
Comments				
γ_{unsat}	kN/m ³	26,00	26,00	26,00
γ_{sat}	kN/m ³	26,00	26,00	26,00
Dilatancy cut-off		No	No	No
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000	0,000
E	kN/m ²	219,0E3	377,0E3	651,0E3
ν (nu)		0,3000	0,3000	0,3000
σ_{ci}	kN/m ²	12,00E3	14,00E3	16,00E3
m_i		9,000	9,000	9,000
GSI		20,00	25,00	30,00
D		0,000	0,000	0,000
Ψ_{max}	°	0,000	0,000	0,000
σ_{Ψ}	kN/m ²	0,000	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000	0,000
R	m ² K/kW	0,000	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000	0,5000
$K_{0,z}$		0,5000	0,5000	0,5000
Data set		Standard	Standard	Standard
Type		Coarse	Coarse	Coarse
< 2 μm	%	10,00	10,00	10,00
2 μm - 50 μm	%	13,00	13,00	13,00
50 μm - 2 mm	%	77,00	77,00	77,00
Set to default values		No	No	No
k_x	m/day	0,000	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000	0,000
$-\Psi_{\text{unsat}}$	m	10,00E3	10,00E3	10,00E3
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 7 Analiz 2 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hoek Brown

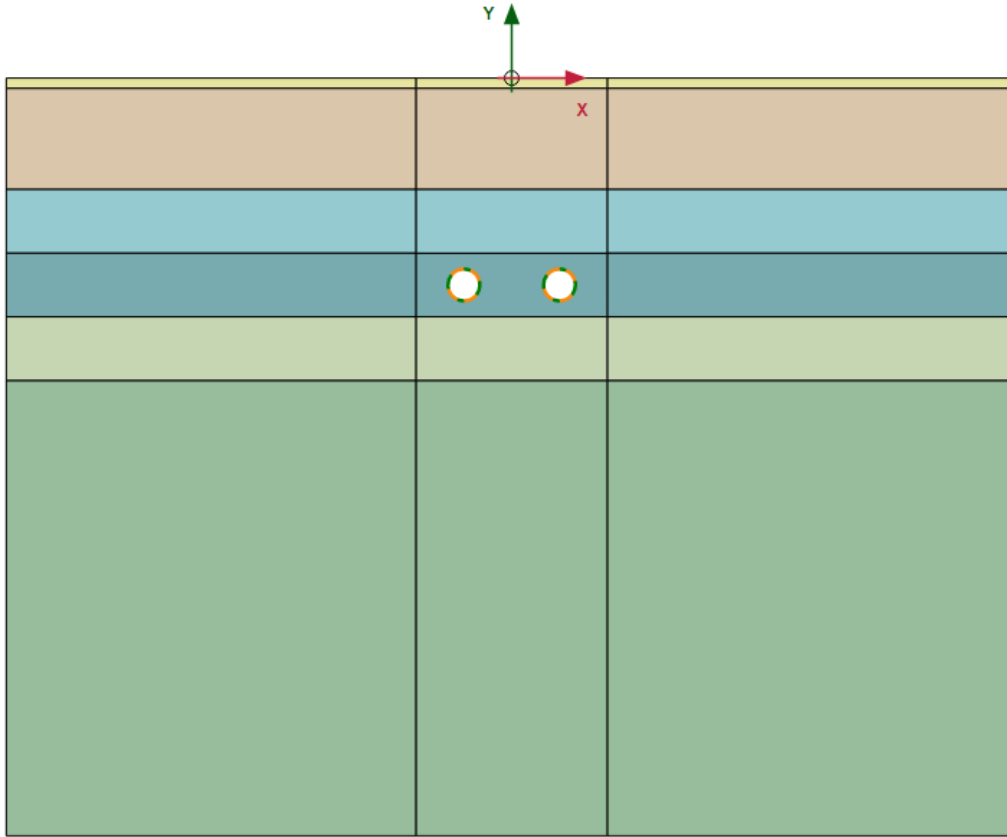
Identification		5.Tabaka-Kaya-Kirectasi-4	6.Tabaka-Kaya-Kirectasi-5
Identification number		5	6
Drainage type		Drained	Drained
Colour			
Comments			
γ_{unsat}	kN/m ³	26,00	26,00
γ_{sat}	kN/m ³	26,00	26,00
Dilatancy cut-off		No	No
e_{init}		0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000
E	kN/m ²	1,122E6	1,915E6
ν (nu)		0,3000	0,3000
σ_{ci}	kN/m ²	18,00E3	20,00E3
m_i		9,000	9,000
GSI		35,00	40,00
D		0,000	0,000
Ψ_{max}	°	0,000	0,000
σ_{Ψ}	kN/m ²	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000
R	m ² K/kW	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000
$K_{0,z}$		0,5000	0,5000
Data set		Standard	Standard
Type		Coarse	Coarse
< 2 μm	%	10,00	10,00
2 μm - 50 μm	%	13,00	13,00
50 μm - 2 mm	%	77,00	77,00
Set to default values		No	No
k_x	m/day	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000
$-\Psi_{\text{unsat}}$	m	10,00E3	10,00E3
e_{init}		0,5000	0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

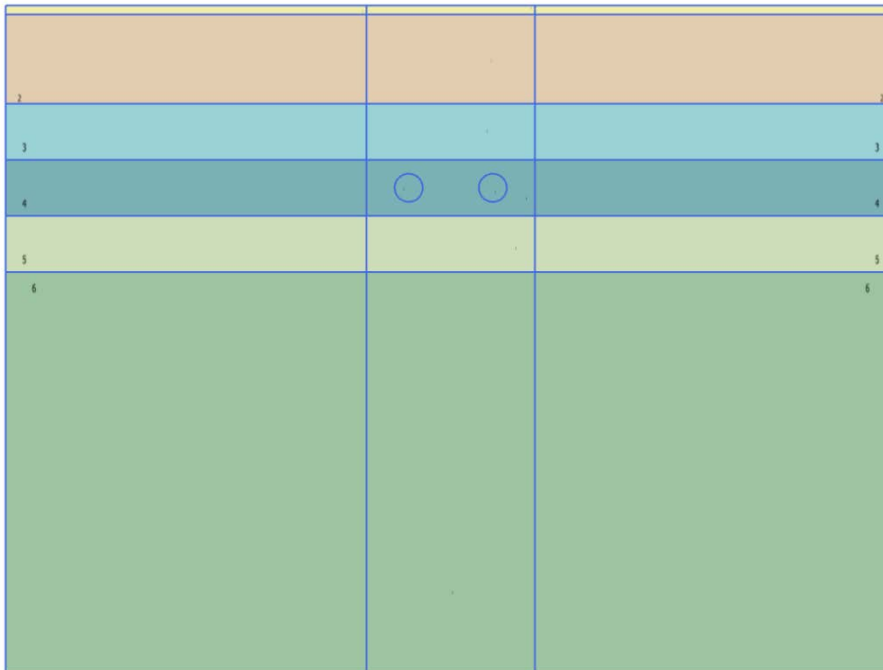
Çizelge E1. 8 Analiz 2 Plaxis programı – Tünel kaplama parametresi

Identification		TBM Segment (H=30cm) C45/55
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
Isotropic		Yes
End bearing		No
EA ₁	kN/m	9,772E6
EA ₂	kN/m	9,772E6
EI	kN m ² /m	60,00E3
d	m	0,2714
w	kN/m/m	7,500
ν (nu)		0,2000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Identification number		1
c	kJ/t/K	0,000
λ	kW/m/K	0,000
ρ	t/m ³	0,000
α	1/K	0,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

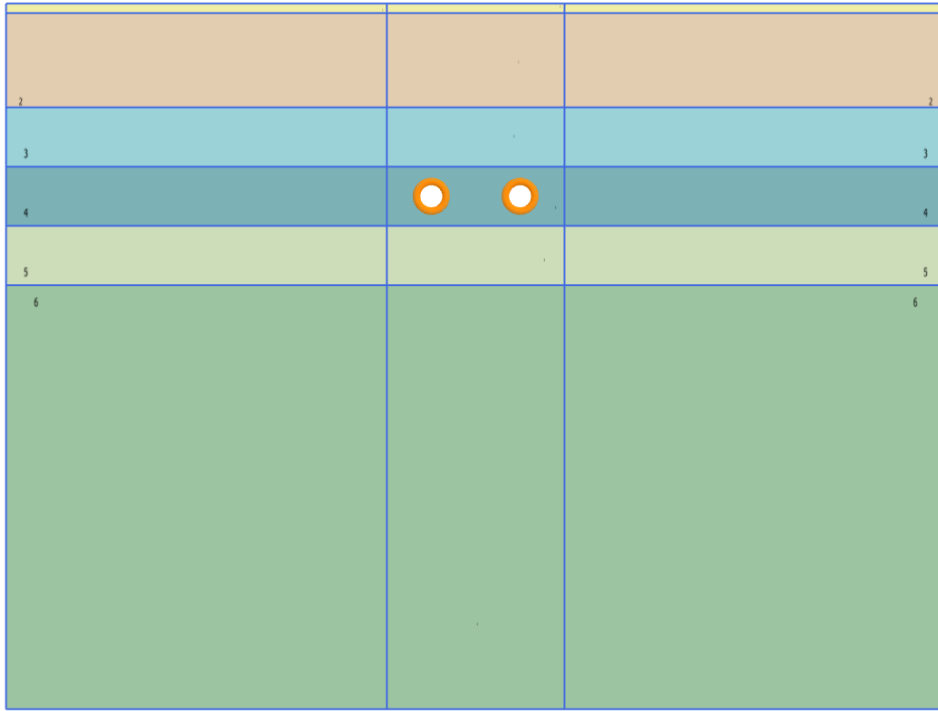


Şekil E1. 15 Analiz 3 Plaxis programı – zemin model gösterimi

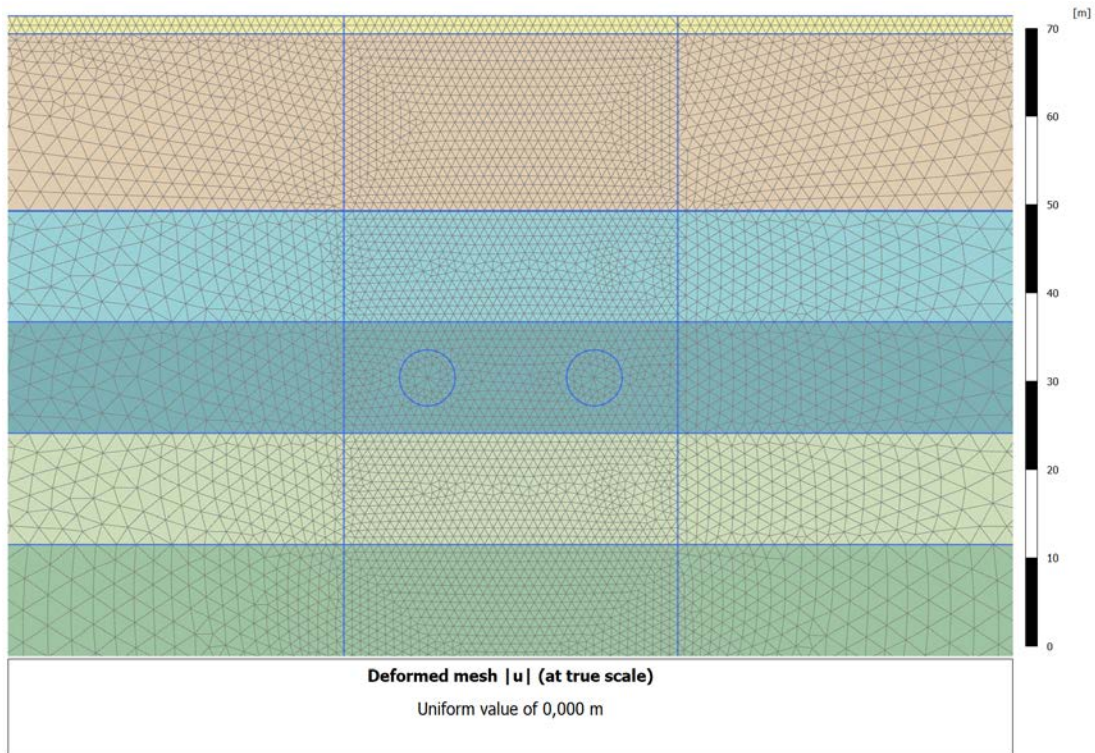


Şekil E1. 16 Analiz 3 Plaxis programı – Aşama 0 gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

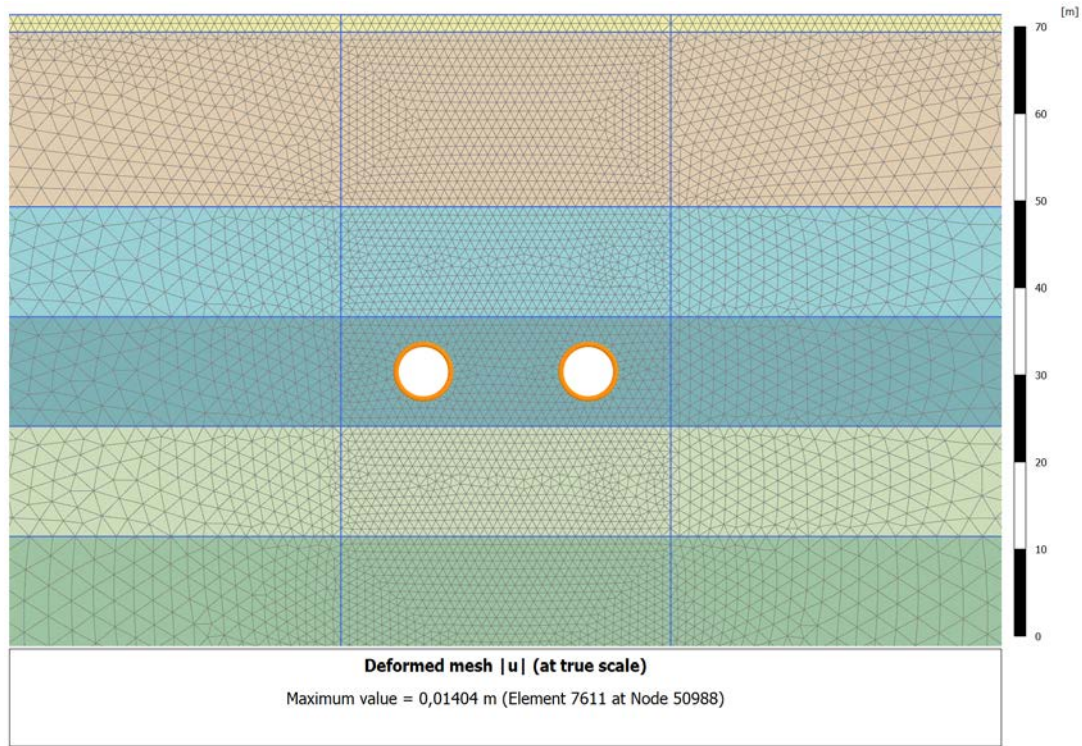


Şekil E1. 17 Analiz 3 Plaxis programı – Aşama 1 gösterimi

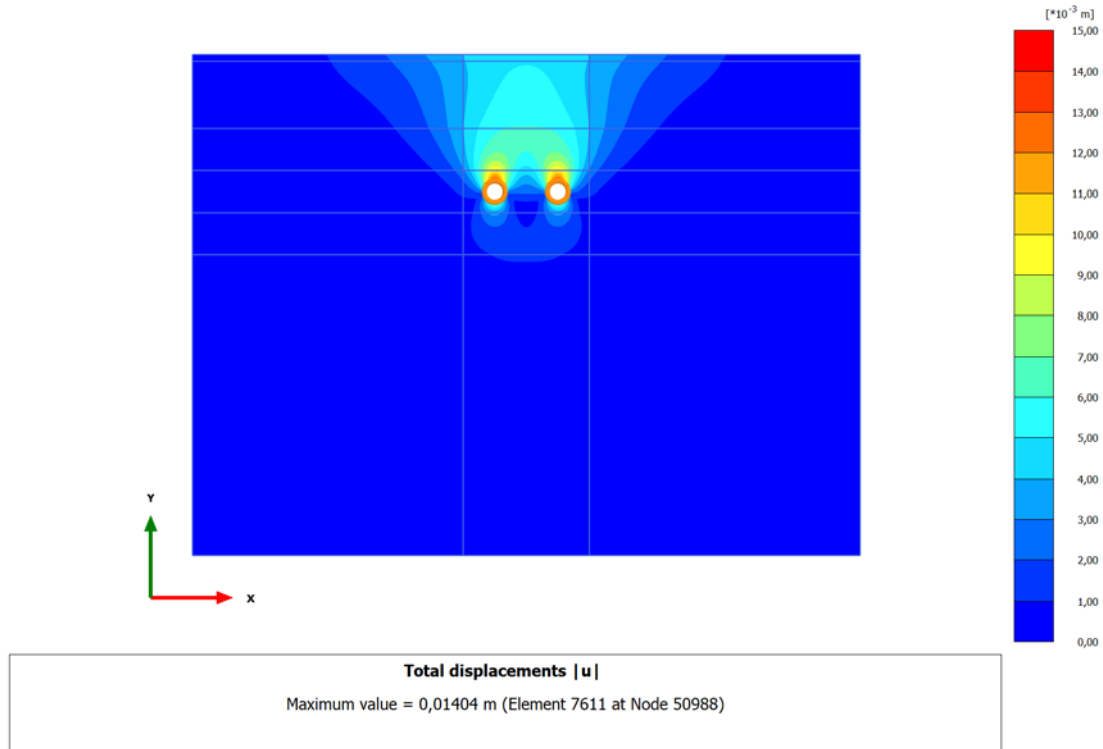


Şekil E1. 18 Analiz 3 Plaxis programı – Aşama 0 üçgenleme gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

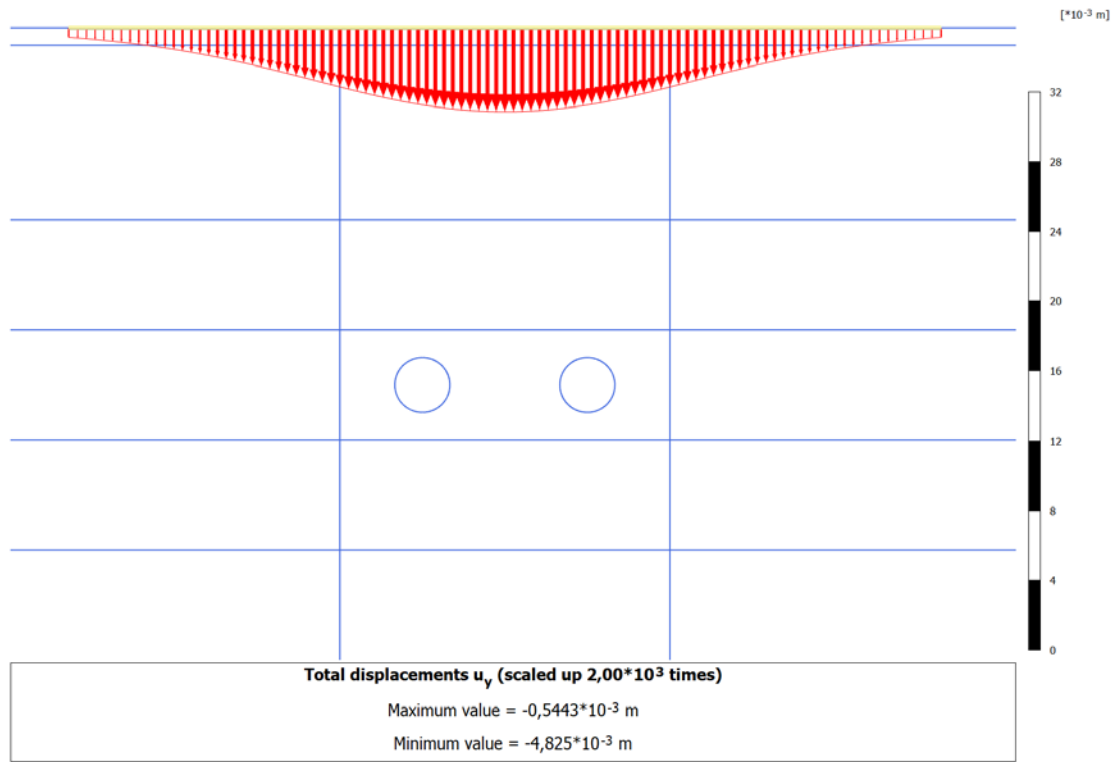


Şekil E1. 19 Analiz 3 Plaxis programı – Aşama 1 üçgenleme gösterimi



Şekil E1. 20 Analiz 3 Plaxis programı – kazıya bağlı zemin deformasyonu

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları



Şekil E1. 21 Analiz 3 Plaxis programı – kazıya bağlı yüzeyde oluşan oturma

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 9 Analiz 3 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Mohr Cloulomb

Identification		1.Tabaka - Kontrosuz Dolgu
Identification number		1
Drainage type		Drained
Colour		
Comments		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E	kN/m ²	10,00E3
ν (nu)		0,3000
G	kN/m ²	3846
E_{oed}	kN/m ²	13,46E3
C_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
V_s	m/s	43,43
V_p	m/s	81,26
Set to default values		Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
ν_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	375,0E3
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
δ_{inter}		0,000
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,5000
$K_{0,z}$		0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 10 Analiz 3 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hoek Brown

Identification		2.Tabaka-Kaya-Kirectasi-1	3.Tabaka-Kaya-Kirectasi-2	4.Tabaka-Kaya-Kirectasi-3
Identification number		2	3	4
Drainage type		Drained	Drained	Drained
Colour				
Comments				
γ_{unsat}	kN/m ³	26,00	26,00	26,00
γ_{sat}	kN/m ³	26,00	26,00	26,00
Dilatancy cut-off		No	No	No
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000	0,000
E	kN/m ²	219,0E3	377,0E3	651,0E3
ν (nu)		0,3000	0,3000	0,3000
σ_{ci}	kN/m ²	12,00E3	14,00E3	16,00E3
m_i		9,000	9,000	9,000
GSI		20,00	25,00	30,00
D		0,000	0,000	0,000
Ψ_{max}	°	0,000	0,000	0,000
σ_{Ψ}	kN/m ²	0,000	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000	0,000
R	m ² K/kW	0,000	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000	0,5000
$K_{0,z}$		0,5000	0,5000	0,5000
Data set		Standard	Standard	Standard
Type		Coarse	Coarse	Coarse
< 2 μm	%	10,00	10,00	10,00
2 μm - 50 μm	%	13,00	13,00	13,00
50 μm - 2 mm	%	77,00	77,00	77,00
Set to default values		No	No	No
k_x	m/day	0,000	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000	0,000
$-\Psi_{\text{unsat}}$	m	10,00E3	10,00E3	10,00E3
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 11 Analiz 3 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hoek Brown

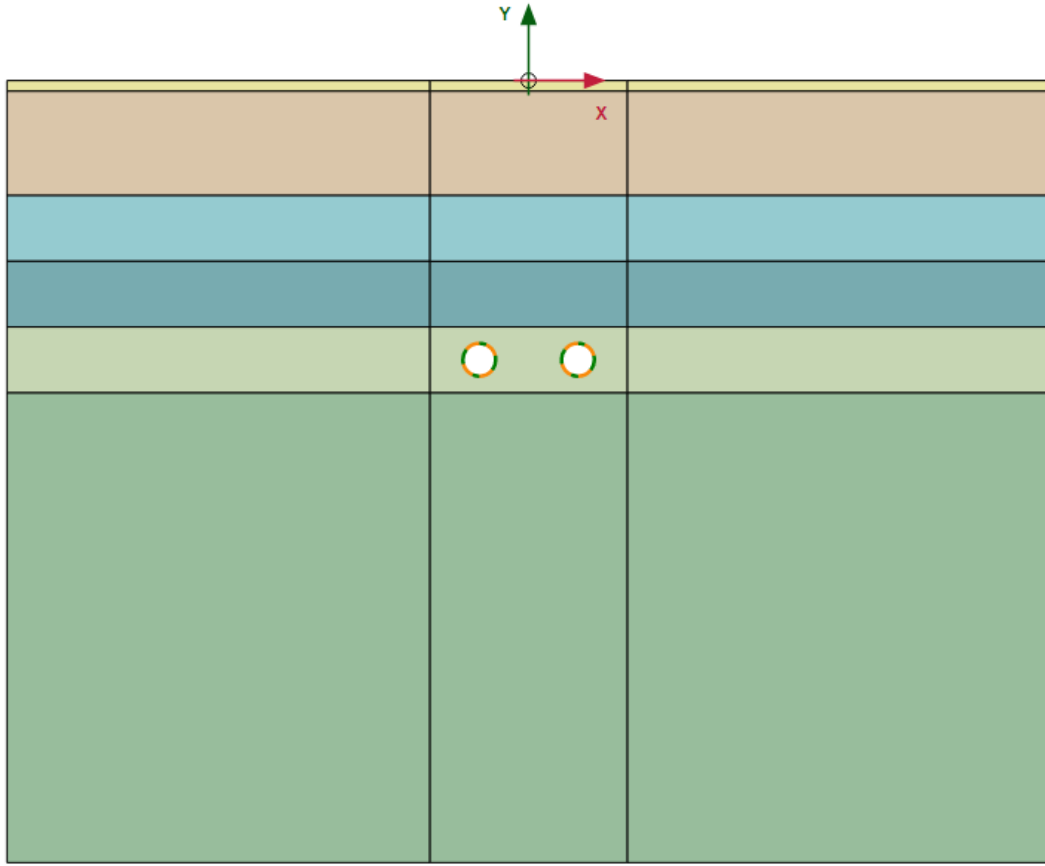
Identification		5.Tabaka-Kaya-Kirectasi-4	6.Tabaka-Kaya-Kirectasi-5
Identification number		5	6
Drainage type		Drained	Drained
Colour			
Comments			
γ_{unsat}	kN/m ³	26,00	26,00
γ_{sat}	kN/m ³	26,00	26,00
Dilatancy cut-off		No	No
e_{init}		0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000
E	kN/m ²	1,122E6	1,915E6
ν (nu)		0,3000	0,3000
σ_{ci}	kN/m ²	18,00E3	20,00E3
m_i		9,000	9,000
GSI		35,00	40,00
D		0,000	0,000
Ψ_{max}	°	0,000	0,000
σ_{Ψ}	kN/m ²	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000
R	m ² K/kW	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000
$K_{0,z}$		0,5000	0,5000
Data set		Standard	Standard
Type		Coarse	Coarse
< 2 μm	%	10,00	10,00
2 μm - 50 μm	%	13,00	13,00
50 μm - 2 mm	%	77,00	77,00
Set to default values		No	No
k_x	m/day	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000
$-\Psi_{\text{unsat}}$	m	10,00E3	10,00E3
e_{init}		0,5000	0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

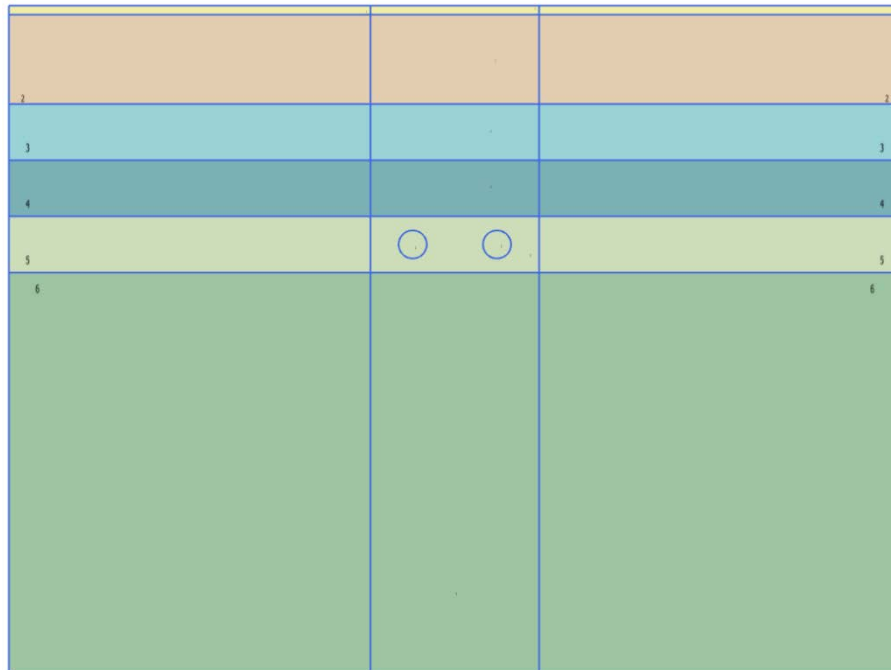
Çizelge E1. 12 Analiz 3 Plaxis programı – Tünel kaplama parametresi

Identification		TBM Segment (H=30cm) C45/55
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
Isotropic		Yes
End bearing		No
EA ₁	kN/m	9,772E6
EA ₂	kN/m	9,772E6
EI	kN m ² /m	60,00E3
d	m	0,2714
w	kN/m/m	7,500
ν (nu)		0,2000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Identification number		1
c	kJ/t/K	0,000
λ	kW/m/K	0,000
ρ	t/m ³	0,000
α	1/K	0,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

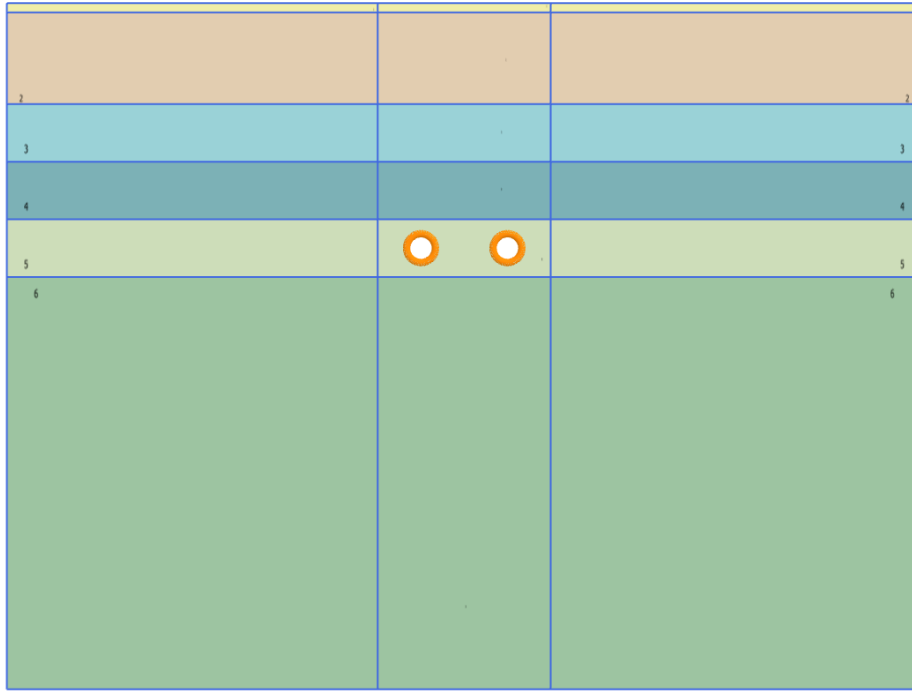


Şekil E1. 22 Analiz 4 Plaxis programı – zemin model gösterimi

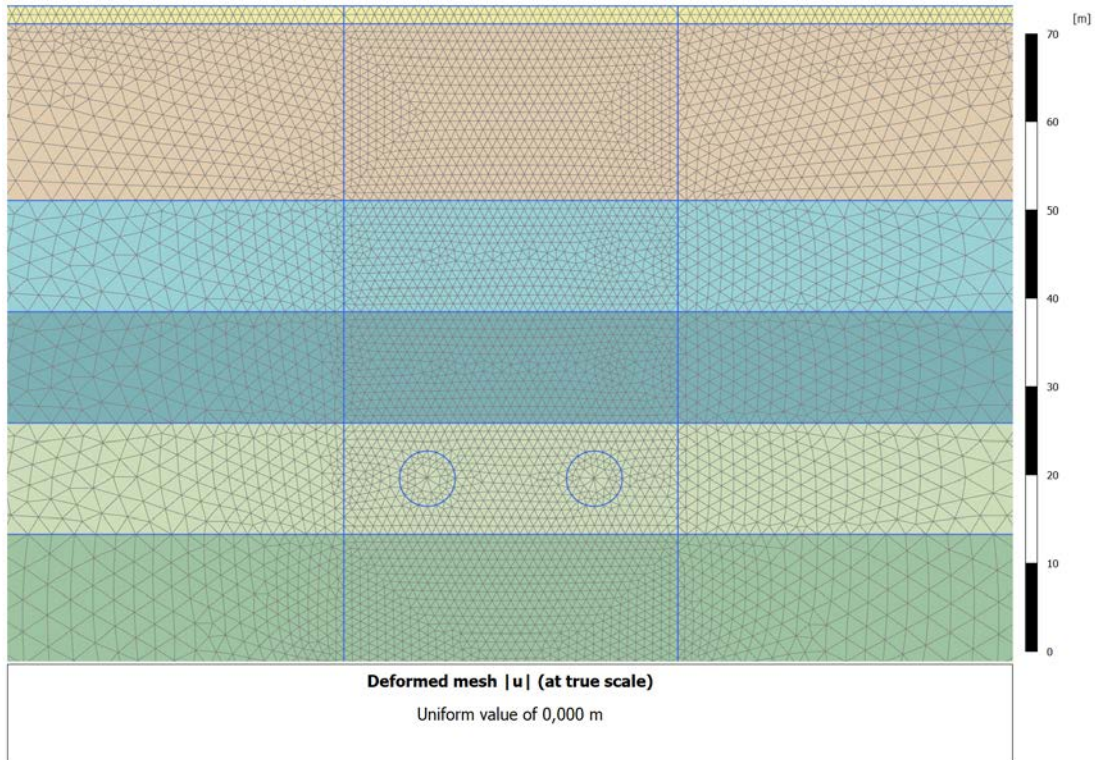


Şekil E1. 23 Analiz 4 Plaxis programı – Aşama 0 gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

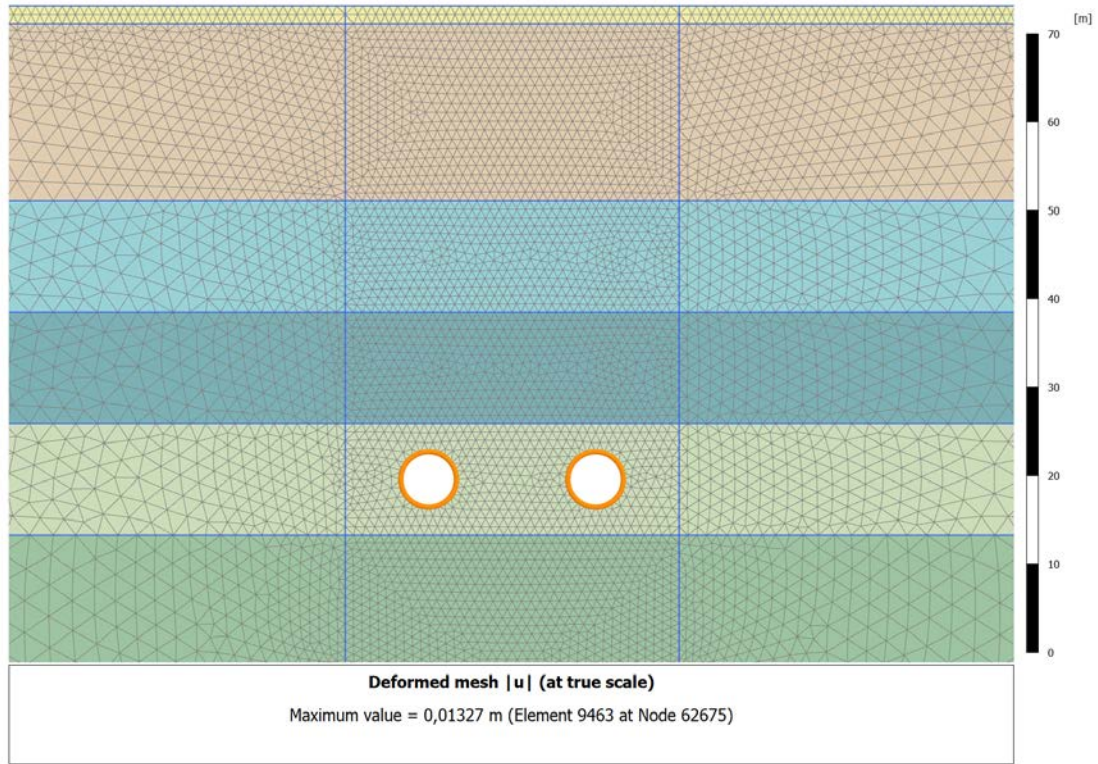


Şekil E1. 24 Analiz 4 Plaxis programı – Aşama 1 gösterimi

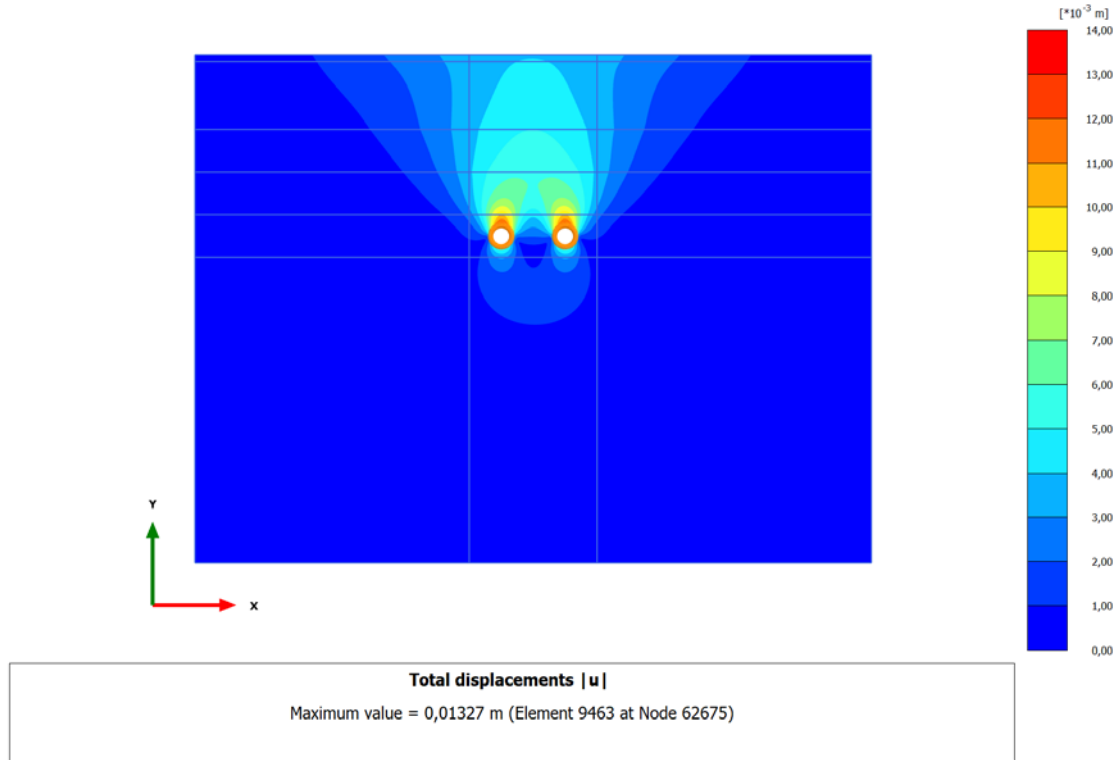


Şekil E1. 25 Analiz 4 Plaxis programı – Aşama 0 üçgenleme gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

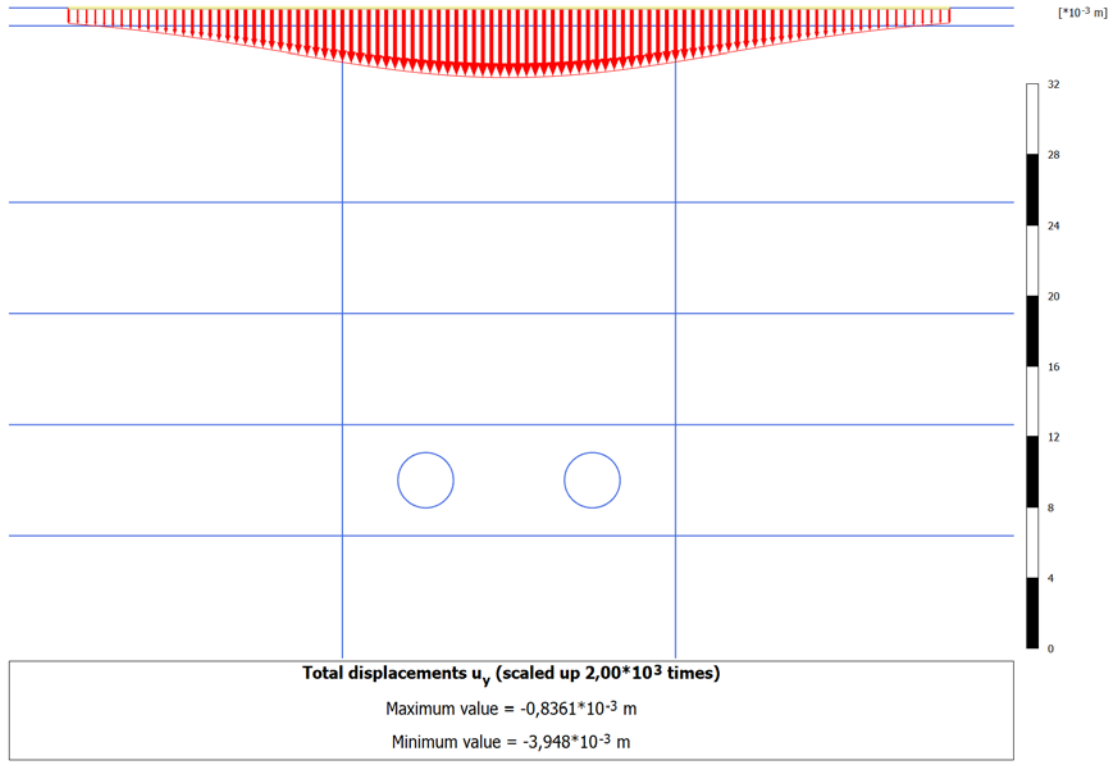


Şekil E1. 26 Analiz 4 Plaxis programı – Aşama 1 üçgenleme gösterimi



Şekil E1. 27 Analiz 4 Plaxis programı – kazıya bağlı zemin deformasyonu

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları



Şekil E1. 28 Analiz 4 Plaxis programı – kazıya bağlı yüzeyde oluşan oturma

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 13 Analiz 4 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Mohr Cloulomb

Identification		1.Tabaka - Kontrosuz Dolgu
Identification number		1
Drainage type		Drained
Colour		
Comments		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E	kN/m ²	10,00E3
ν (nu)		0,3000
G	kN/m ²	3846
E_{oed}	kN/m ²	13,46E3
C_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
V_s	m/s	43,43
V_p	m/s	81,26
Set to default values		Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
ν_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	375,0E3
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
δ_{inter}		0,000
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,5000
$K_{0,z}$		0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 14 Analiz 4 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hoek Brown

Identification		2.Tabaka-Kaya-Kirectasi-1	3.Tabaka-Kaya-Kirectasi-2	4.Tabaka-Kaya-Kirectasi-3
Identification number		2	3	4
Drainage type		Drained	Drained	Drained
Colour				
Comments				
γ_{unsat}	kN/m ³	26,00	26,00	26,00
γ_{sat}	kN/m ³	26,00	26,00	26,00
Dilatancy cut-off		No	No	No
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000	0,000
E	kN/m ²	219,0E3	377,0E3	651,0E3
ν (nu)		0,3000	0,3000	0,3000
σ_{ci}	kN/m ²	12,00E3	14,00E3	16,00E3
m_i		9,000	9,000	9,000
GSI		20,00	25,00	30,00
D		0,000	0,000	0,000
Ψ_{max}	°	0,000	0,000	0,000
σ_{Ψ}	kN/m ²	0,000	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000	0,000
R	m ² K/kW	0,000	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000	0,5000
$K_{0,z}$		0,5000	0,5000	0,5000
Data set		Standard	Standard	Standard
Type		Coarse	Coarse	Coarse
< 2 μm	%	10,00	10,00	10,00
2 μm - 50 μm	%	13,00	13,00	13,00
50 μm - 2 mm	%	77,00	77,00	77,00
Set to default values		No	No	No
k_x	m/day	0,000	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000	0,000
$-\Psi_{\text{unsat}}$	m	10,00E3	10,00E3	10,00E3
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 15 Analiz 4 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hoek Brown

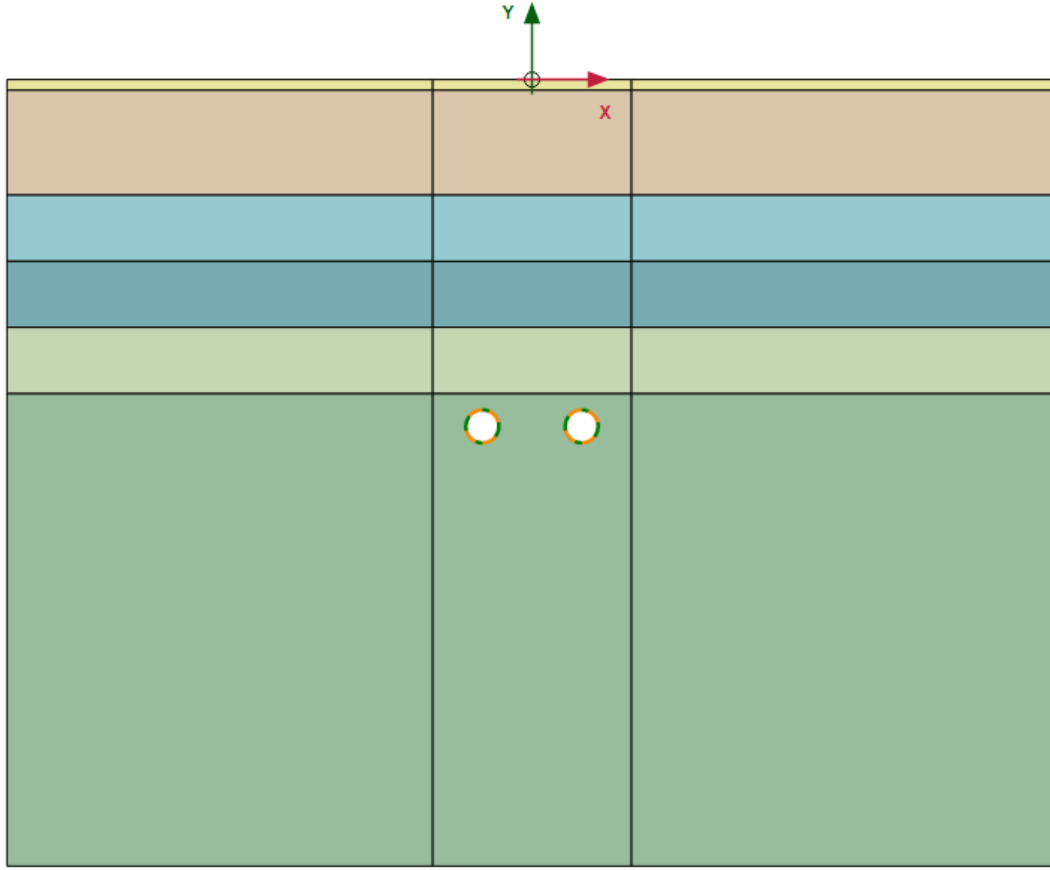
Identification		5.Tabaka-Kaya-Kirectasi-4	6.Tabaka-Kaya-Kirectasi-5
Identification number		5	6
Drainage type		Drained	Drained
Colour			
Comments			
γ_{unsat}	kN/m ³	26,00	26,00
γ_{sat}	kN/m ³	26,00	26,00
Dilatancy cut-off		No	No
e_{init}		0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000
E	kN/m ²	1,122E6	1,915E6
ν (nu)		0,3000	0,3000
σ_{ci}	kN/m ²	18,00E3	20,00E3
m_i		9,000	9,000
GSI		35,00	40,00
D		0,000	0,000
Ψ_{max}	°	0,000	0,000
σ_{Ψ}	kN/m ²	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000
R	m ² K/kW	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000
$K_{0,z}$		0,5000	0,5000
Data set		Standard	Standard
Type		Coarse	Coarse
< 2 μm	%	10,00	10,00
2 μm - 50 μm	%	13,00	13,00
50 μm - 2 mm	%	77,00	77,00
Set to default values		No	No
k_x	m/day	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000
$-\Psi_{\text{unsat}}$	m	10,00E3	10,00E3
e_{init}		0,5000	0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

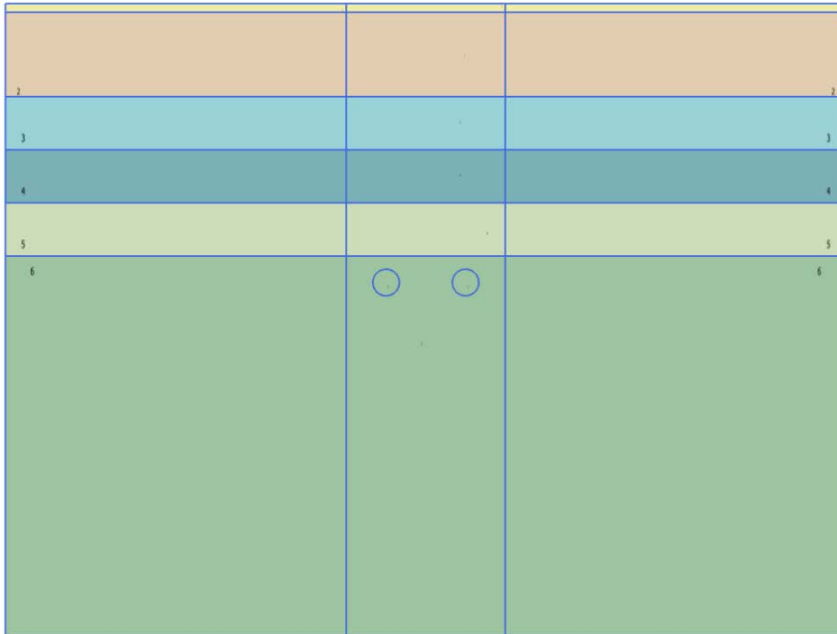
Çizelge E1. 16 Analiz 4 Plaxis programı – Tünel kaplama parametresi

Identification		TBM Segment (H=30cm) C45/55
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
Isotropic		Yes
End bearing		No
EA ₁	kN/m	9,772E6
EA ₂	kN/m	9,772E6
EI	kN m ² /m	60,00E3
d	m	0,2714
w	kN/m/m	7,500
ν (nu)		0,2000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Identification number		1
c	kJ/t/K	0,000
λ	kW/m/K	0,000
ρ	t/m ³	0,000
α	1/K	0,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

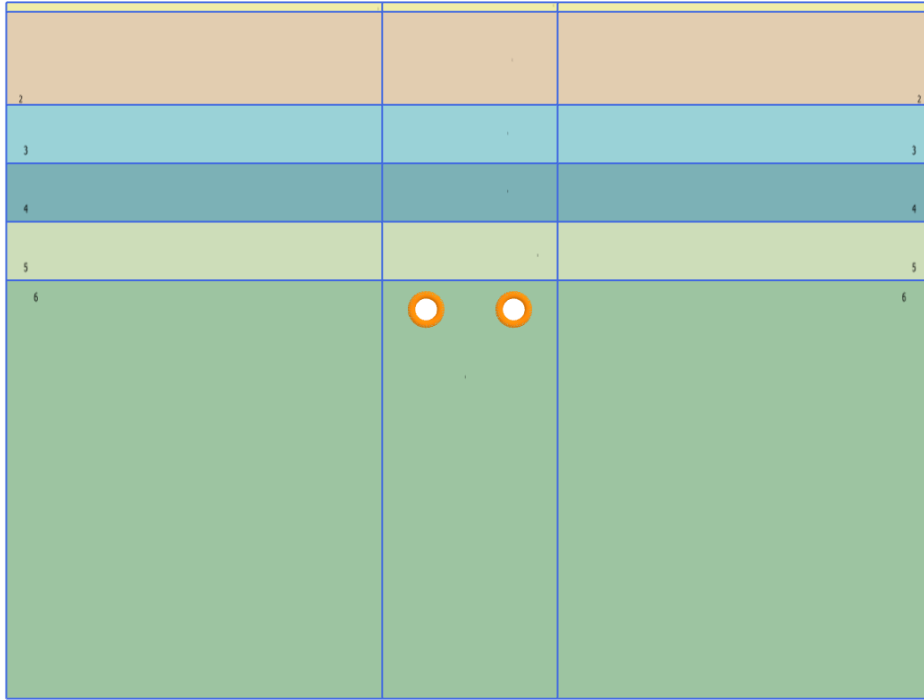


Şekil E1. 29 Analiz 5 Plaxis programı – zemin model gösterimi

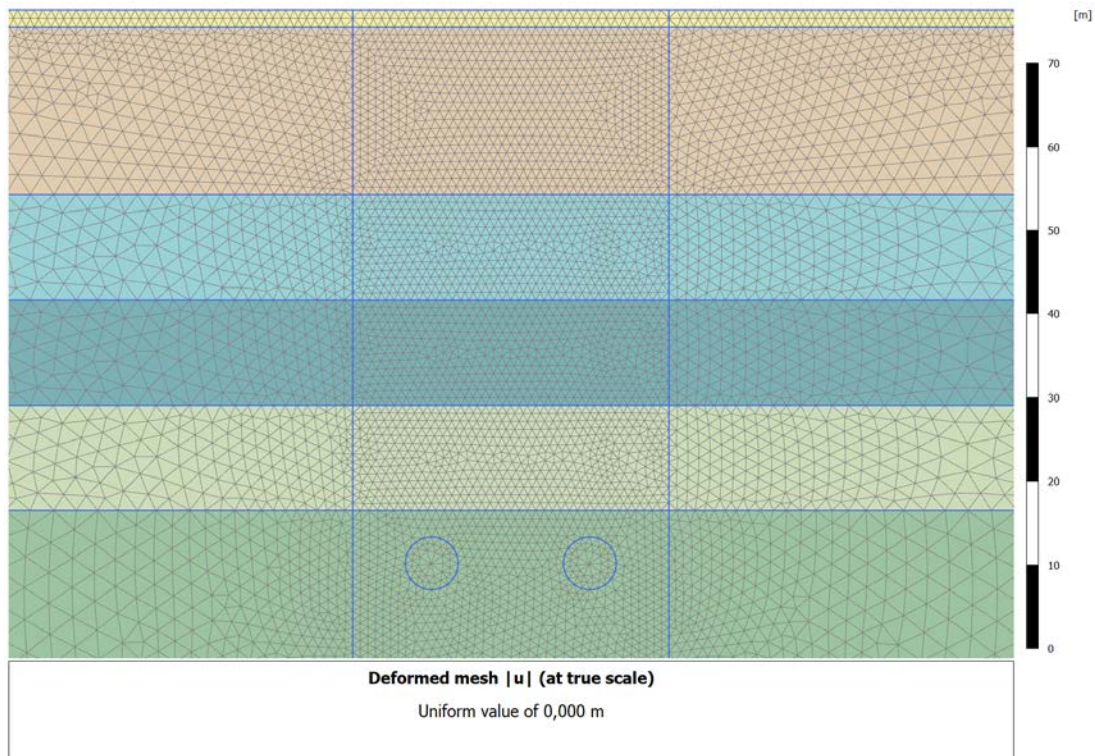


Şekil E1. 30 Analiz 5 Plaxis programı – Aşama 0 gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

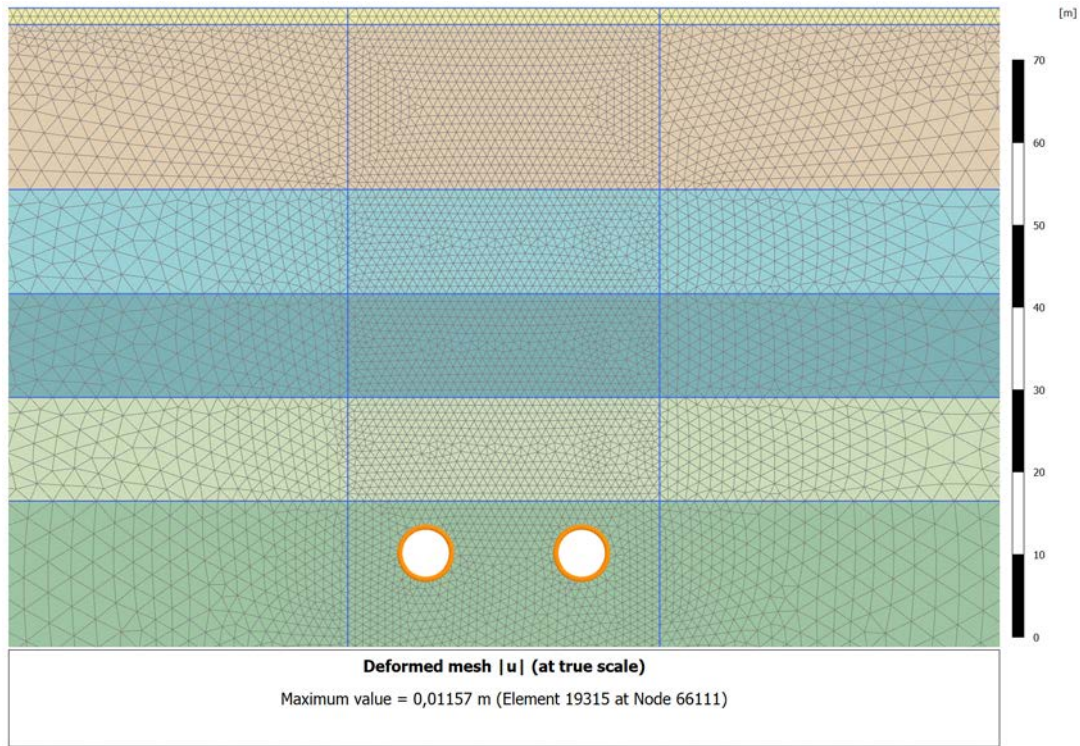


Şekil E1. 31 Analiz 5 Plaxis programı – Aşama 1 gösterimi

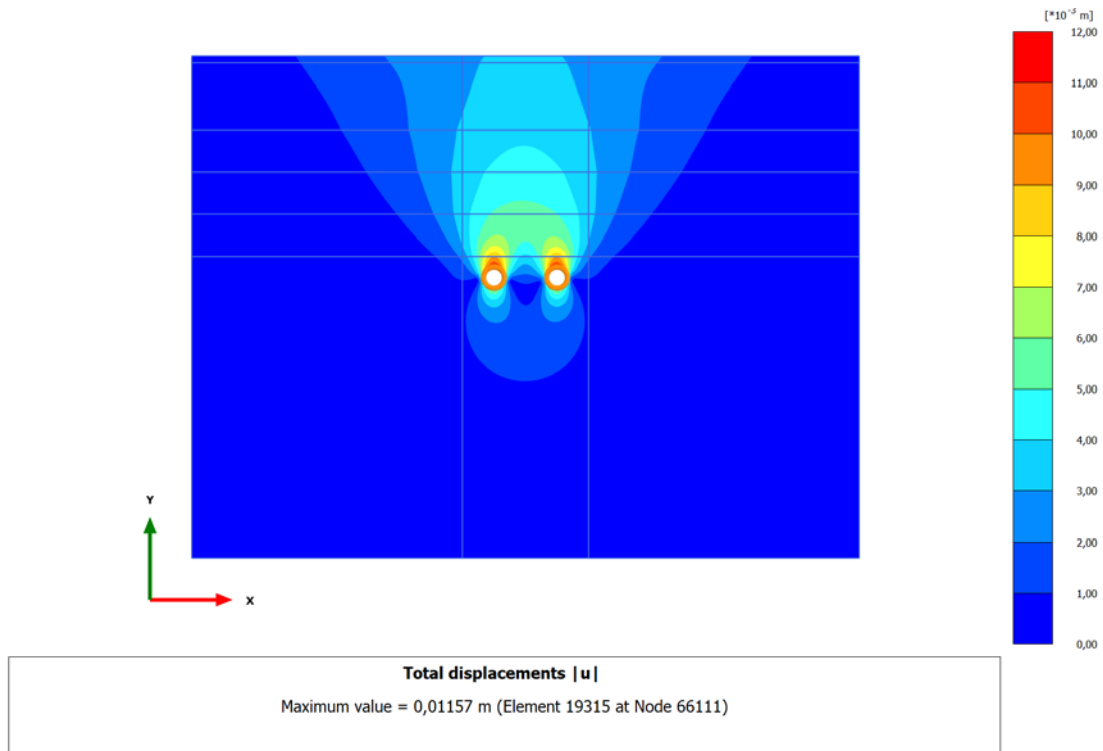


Şekil E1. 32 Analiz 5 Plaxis programı – Aşama 0 üçgenleme gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

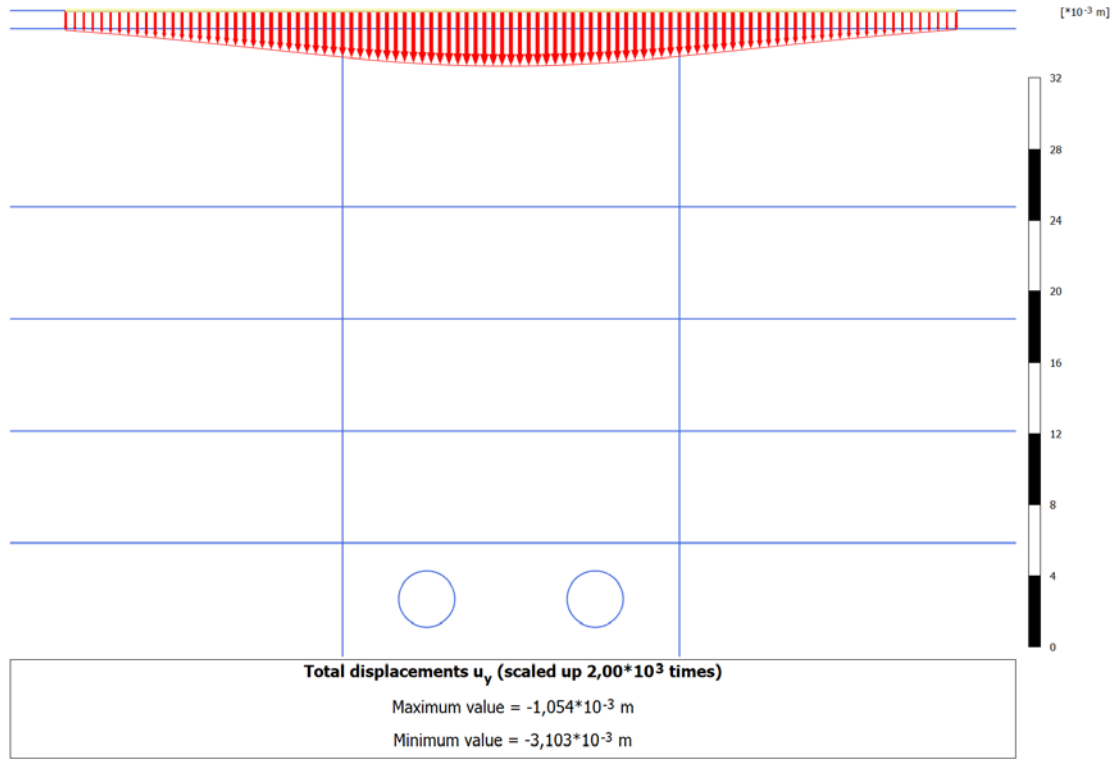


Şekil E1. 33 Analiz 5 Plaxis programı – Aşama 1 üçgenleme gösterimi



Şekil E1. 34 Analiz 5 Plaxis programı – kazıya bağlı zemin deformasyonu

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları



Şekil E1. 35 Analiz 5 Plaxis programı – kazıya bağlı yüzeyde oluşan oturma

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 17 Analiz 5 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Mohr Cloulomb

Identification		1.Tabaka - Kontrosuz Dolgu
Identification number		1
Drainage type		Drained
Colour		
Comments		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E	kN/m ²	10,00E3
ν (nu)		0,3000
G	kN/m ²	3846
E_{oed}	kN/m ²	13,46E3
C_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
V_s	m/s	43,43
V_p	m/s	81,26
Set to default values		Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
ν_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	375,0E3
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
δ_{inter}		0,000
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,5000
$K_{0,z}$		0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 18 Analiz 5 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hoek Brown

Identification		2.Tabaka-Kaya-Kirectasi-1	3.Tabaka-Kaya-Kirectasi-2	4.Tabaka-Kaya-Kirectasi-3
Identification number		2	3	4
Drainage type		Drained	Drained	Drained
Colour				
Comments				
γ_{unsat}	kN/m ³	26,00	26,00	26,00
γ_{sat}	kN/m ³	26,00	26,00	26,00
Dilatancy cut-off		No	No	No
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000	0,000
E	kN/m ²	219,0E3	377,0E3	651,0E3
ν (nu)		0,3000	0,3000	0,3000
σ_{ci}	kN/m ²	12,00E3	14,00E3	16,00E3
m_i		9,000	9,000	9,000
GSI		20,00	25,00	30,00
D		0,000	0,000	0,000
Ψ_{max}	°	0,000	0,000	0,000
σ_{Ψ}	kN/m ²	0,000	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000	0,000
R	m ² K/kW	0,000	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000	0,5000
$K_{0,z}$		0,5000	0,5000	0,5000
Data set		Standard	Standard	Standard
Type		Coarse	Coarse	Coarse
< 2 μm	%	10,00	10,00	10,00
2 μm - 50 μm	%	13,00	13,00	13,00
50 μm - 2 mm	%	77,00	77,00	77,00
Set to default values		No	No	No
k_x	m/day	0,000	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000	0,000
$-\Psi_{\text{unsat}}$	m	10,00E3	10,00E3	10,00E3
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 19 Analiz 5 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hoek Brown

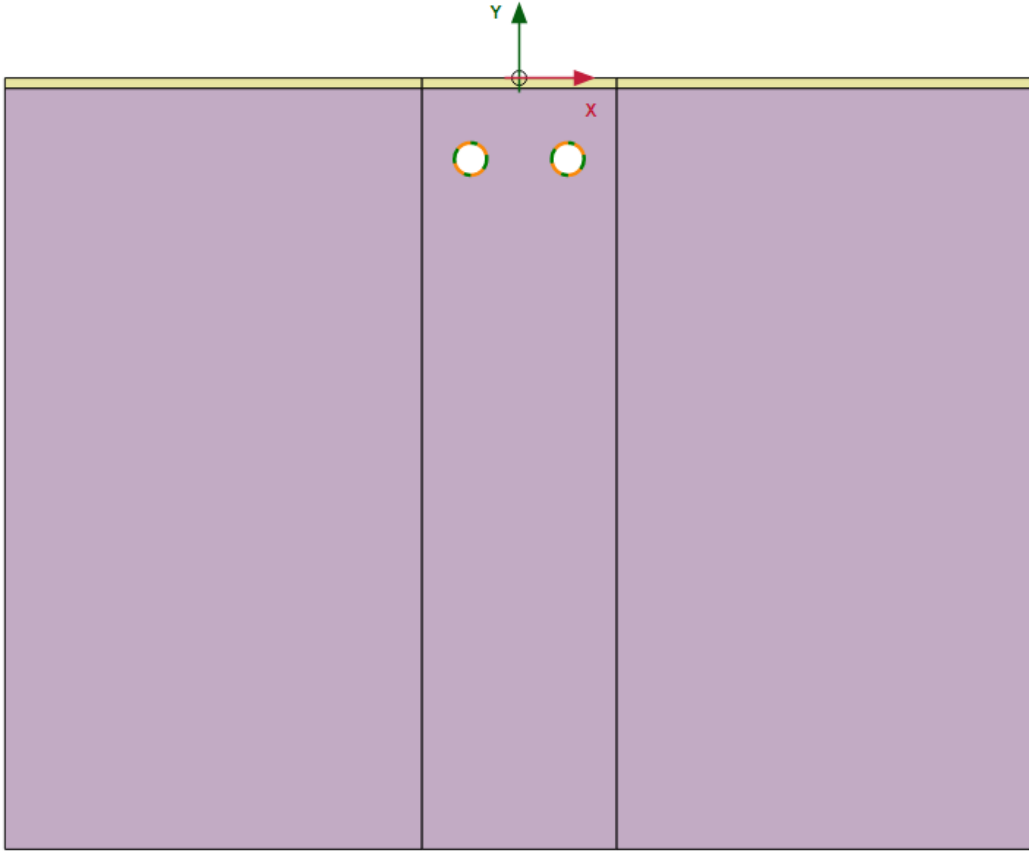
Identification		5.Tabaka-Kaya-Kirectasi-4	6.Tabaka-Kaya-Kirectasi-5
Identification number		5	6
Drainage type		Drained	Drained
Colour			
Comments			
γ_{unsat}	kN/m ³	26,00	26,00
γ_{sat}	kN/m ³	26,00	26,00
Dilatancy cut-off		No	No
e_{init}		0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000
E	kN/m ²	1,122E6	1,915E6
ν (nu)		0,3000	0,3000
σ_{ci}	kN/m ²	18,00E3	20,00E3
m_i		9,000	9,000
GSI		35,00	40,00
D		0,000	0,000
Ψ_{max}	°	0,000	0,000
σ_{Ψ}	kN/m ²	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000
R	m ² K/kW	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000
$K_{0,z}$		0,5000	0,5000
Data set		Standard	Standard
Type		Coarse	Coarse
< 2 μm	%	10,00	10,00
2 μm - 50 μm	%	13,00	13,00
50 μm - 2 mm	%	77,00	77,00
Set to default values		No	No
k_x	m/day	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000
$-\Psi_{\text{unsat}}$	m	10,00E3	10,00E3
e_{init}		0,5000	0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

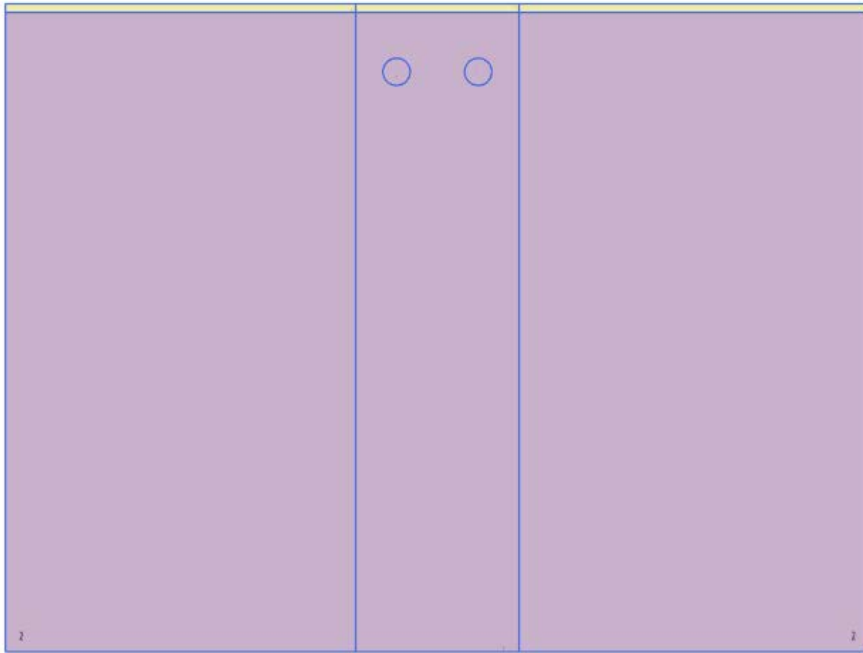
Çizelge E1. 20 Analiz 5 Plaxis programı – Tünel kaplama parametresi

Identification		TBM Segment (H=30cm) C45/55
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
Isotropic		Yes
End bearing		No
EA ₁	kN/m	9,772E6
EA ₂	kN/m	9,772E6
EI	kN m ² /m	60,00E3
d	m	0,2714
w	kN/m/m	7,500
ν (nu)		0,2000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Identification number		1
c	kJ/t/K	0,000
λ	kW/m/K	0,000
ρ	t/m ³	0,000
α	1/K	0,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

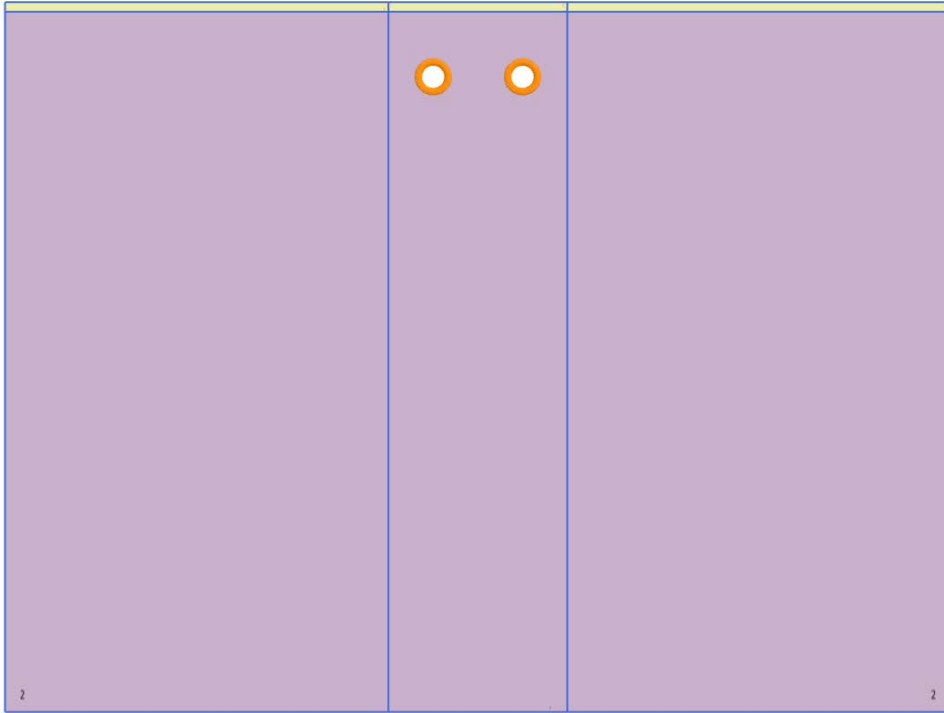


Şekil E1. 36 Analiz 6 Plaxis programı – zemin model gösterimi



Şekil E1. 37 Analiz 6 Plaxis programı – Aşama 0 gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

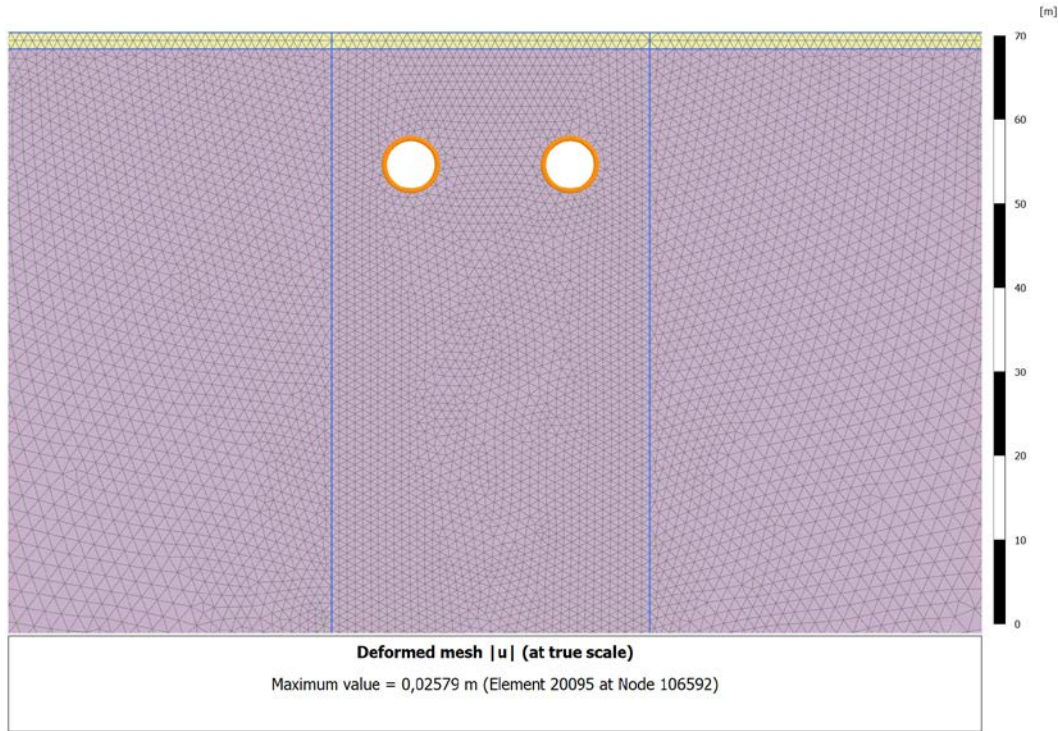


Şekil E1. 38 Analiz 6 Plaxis programı – Aşama 1 gösterimi

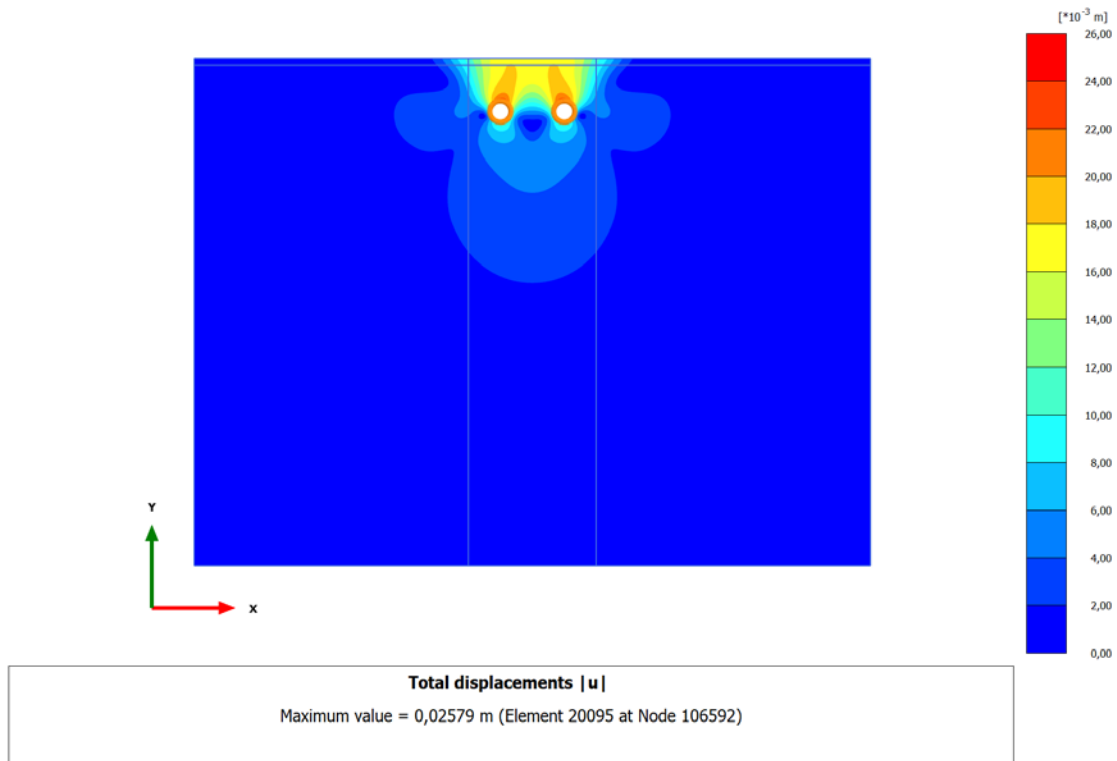


Şekil E1. 39 Analiz 6 Plaxis programı – Aşama 0 üçgenleme gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

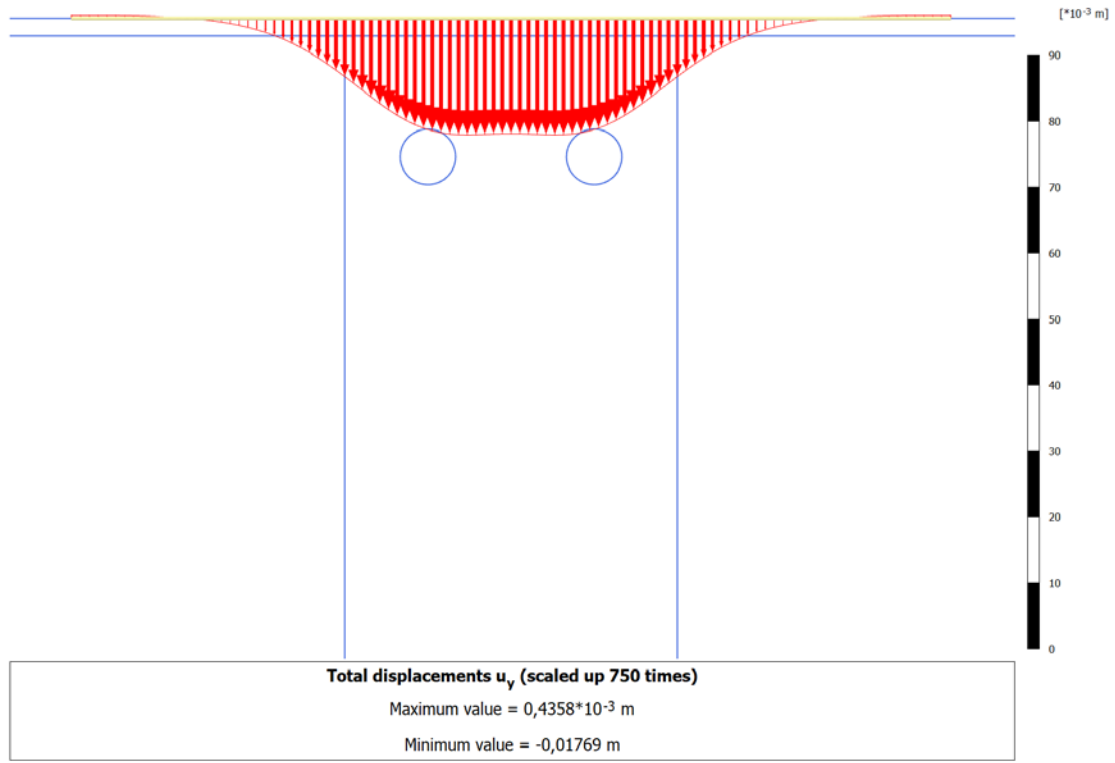


Şekil E1. 40 Analiz 6 Plaxis programı – Aşama 1 üçgenleme gösterimi



Şekil E1. 41 Analiz 6 Plaxis programı – kazıya bağlı zemin deformasyonu

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları



Şekil E1. 42 Analiz 6 Plaxis programı – kazıya bağlı yüzeyde oluşan oturma

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 21 Analiz 6 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Mohr Cloulomb

Identification		1.Tabaka - Kontrosuz Dolgu
Identification number		1
Drainage type		Drained
Colour		
Comments		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E	kN/m ²	10,00E3
ν (nu)		0,3000
G	kN/m ²	3846
E_{oad}	kN/m ²	13,46E3
C_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
V_s	m/s	43,43
V_p	m/s	81,26
Set to default values		Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
ν_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	375,0E3
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
δ_{inter}		0,000
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,5000
$K_{0,z}$		0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 22 Analiz 6 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hardening Soil

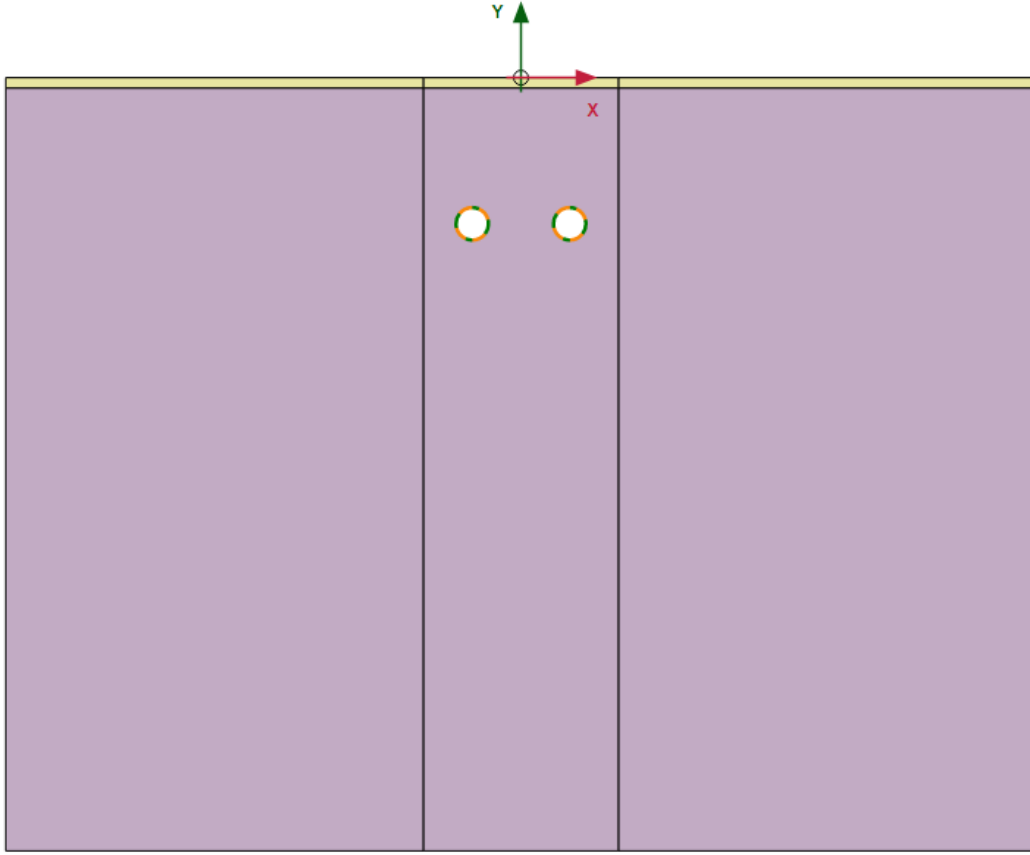
Identification		2.Tabaka-Zemin-Sert Kil
Identification number		2
Drainage type		Drained
Colour		
γ_{unsat}	kN/m ³	19,00
γ_{sat}	kN/m ³	19,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E_{50}^{ref}	kN/m ²	80,00E3
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	80,00E3
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	160,0E3
power (m)		0,5000
Use alternatives		No
C_c		4,312E-3
C_s		1,941E-3
e_{init}		0,5000
C_{ref}	kN/m ²	15,00
ϕ (phi)	°	32,00
ψ (psi)	°	0,000
Set to default values		Yes
v_{ur}		0,2000
p_{ref}	kN/m ²	100,0
K_0^{nc}		0,4701
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
R_f		0,9000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9866
v_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	6,556E6
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,4701
OCR		1,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

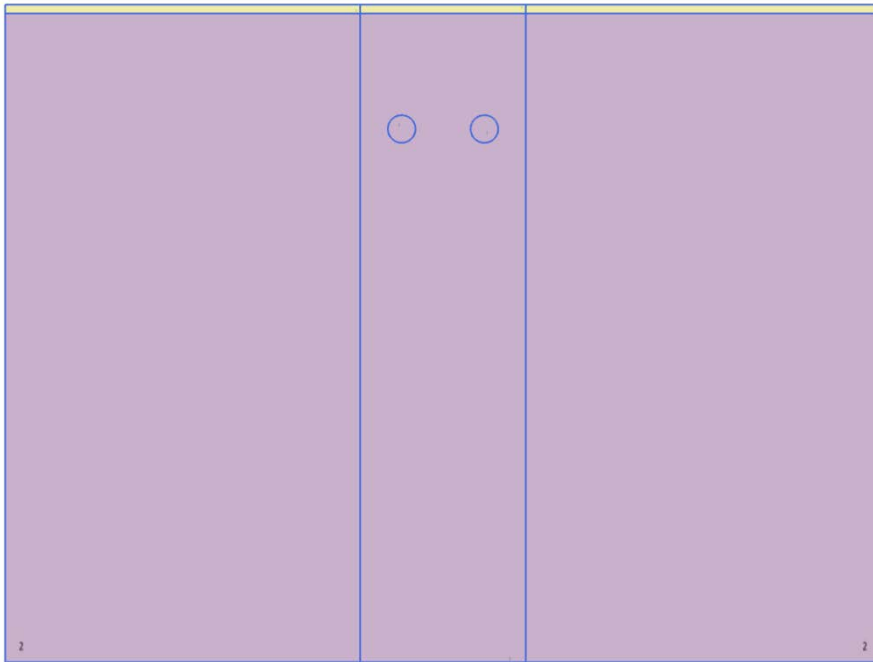
Çizelge E1. 23 Analiz 6 Plaxis programı – Tünel kaplama parametresi

Identification		TBM Segment (H=30cm) C45/55
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
Isotropic		Yes
End bearing		No
EA ₁	kN/m	9,772E6
EA ₂	kN/m	9,772E6
EI	kN m ² /m	60,00E3
d	m	0,2714
w	kN/m/m	7,500
ν (nu)		0,2000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Identification number		1
c	kJ/t/K	0,000
λ	kW/m/K	0,000
ρ	t/m ³	0,000
α	1/K	0,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

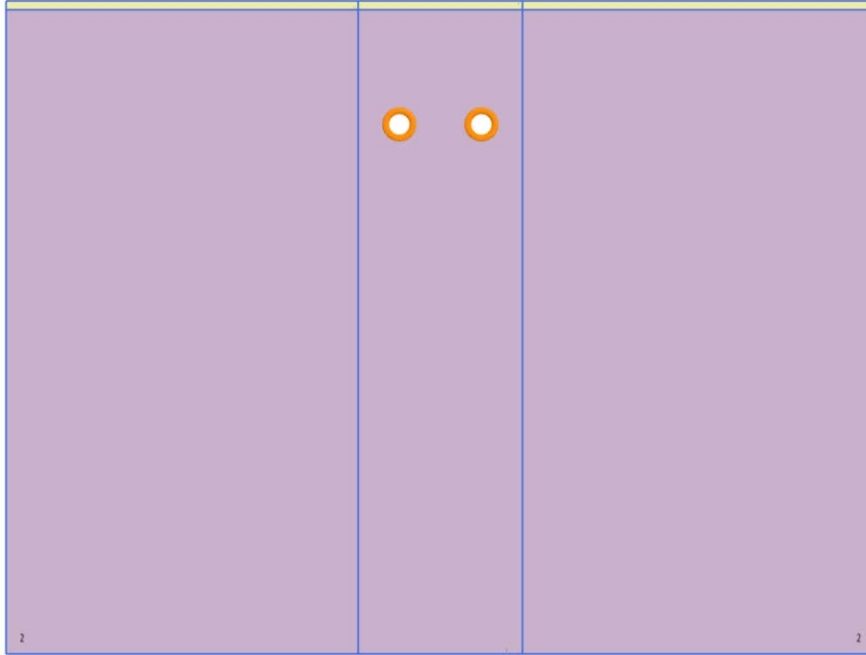


Şekil E1. 43 Analiz 7 Plaxis programı – zemin model gösterimi

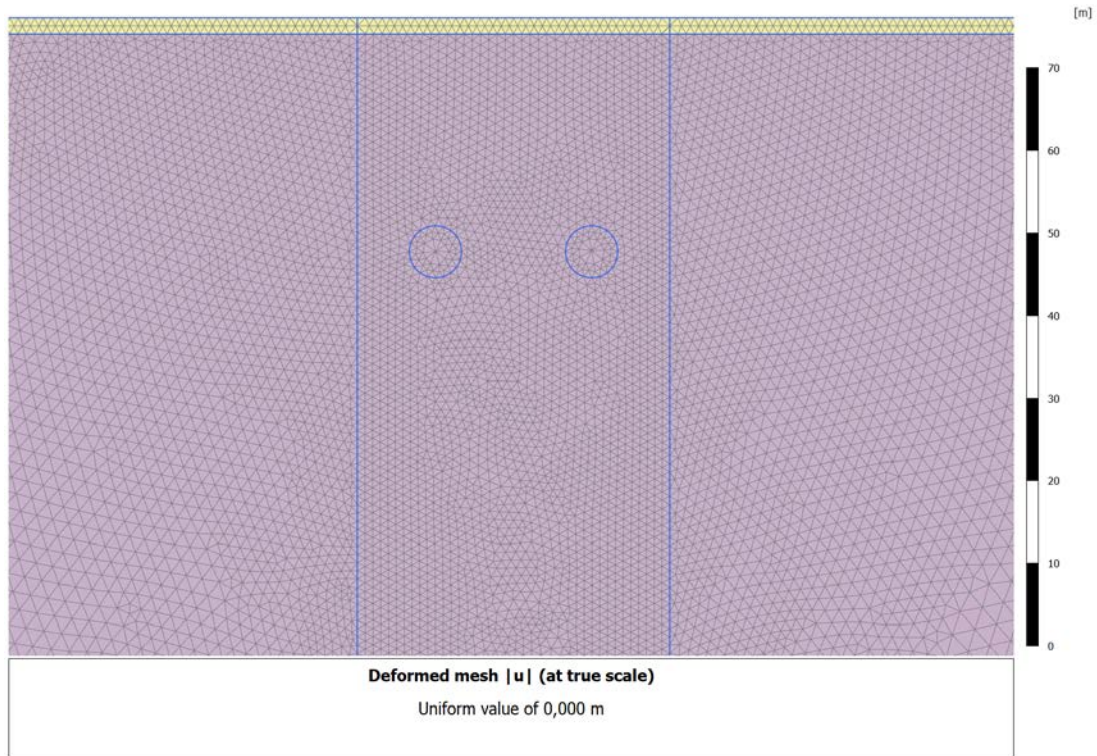


Şekil E1. 44 Analiz 7 Plaxis programı – Aşama 0 gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

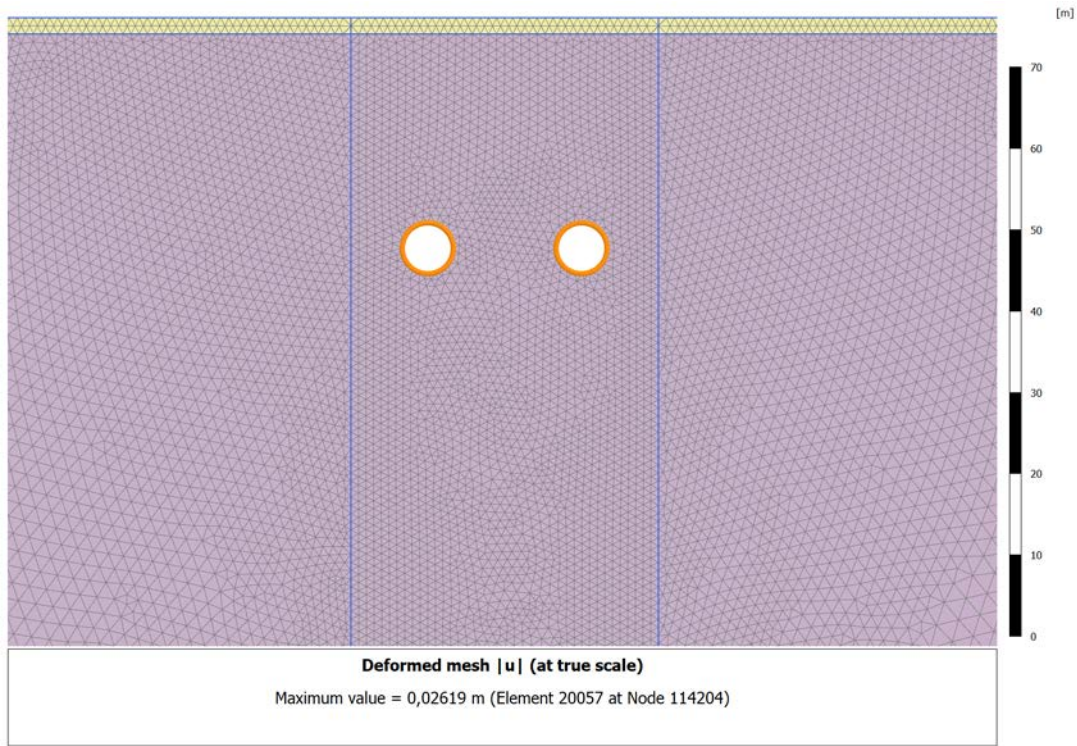


Şekil E1. 45 Analiz 7 Plaxis programı – Aşama 1 gösterimi

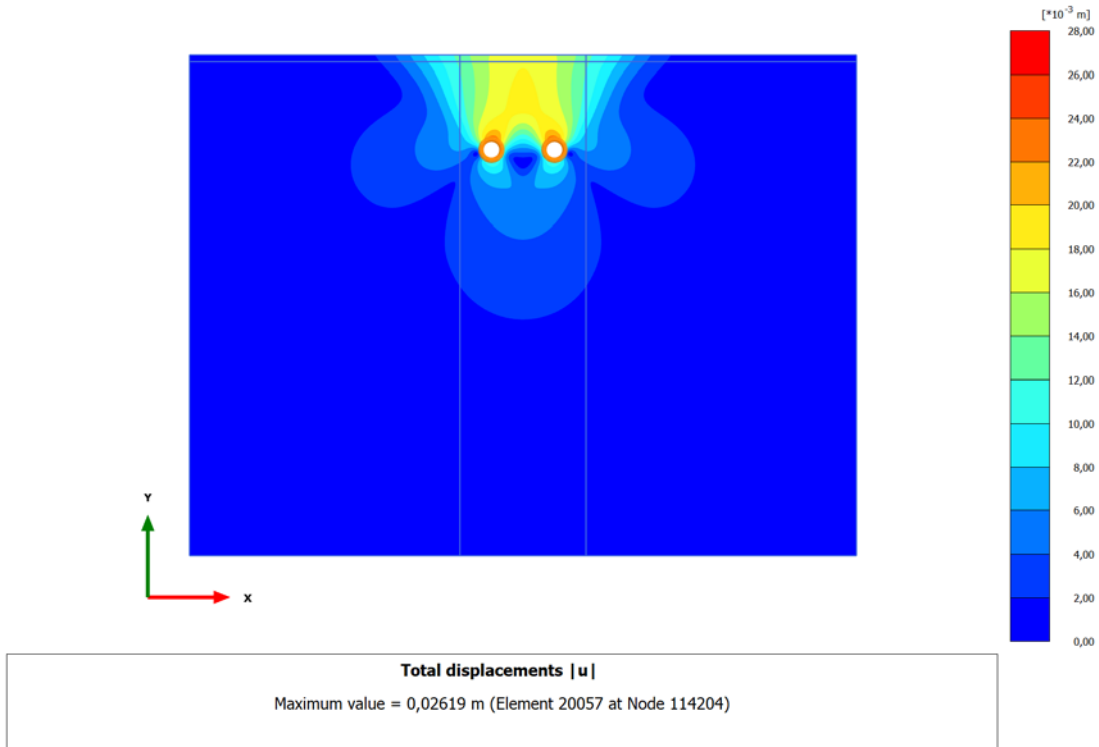


Şekil E1. 46 Analiz 7 Plaxis programı – Aşama 0 üçgenleme gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

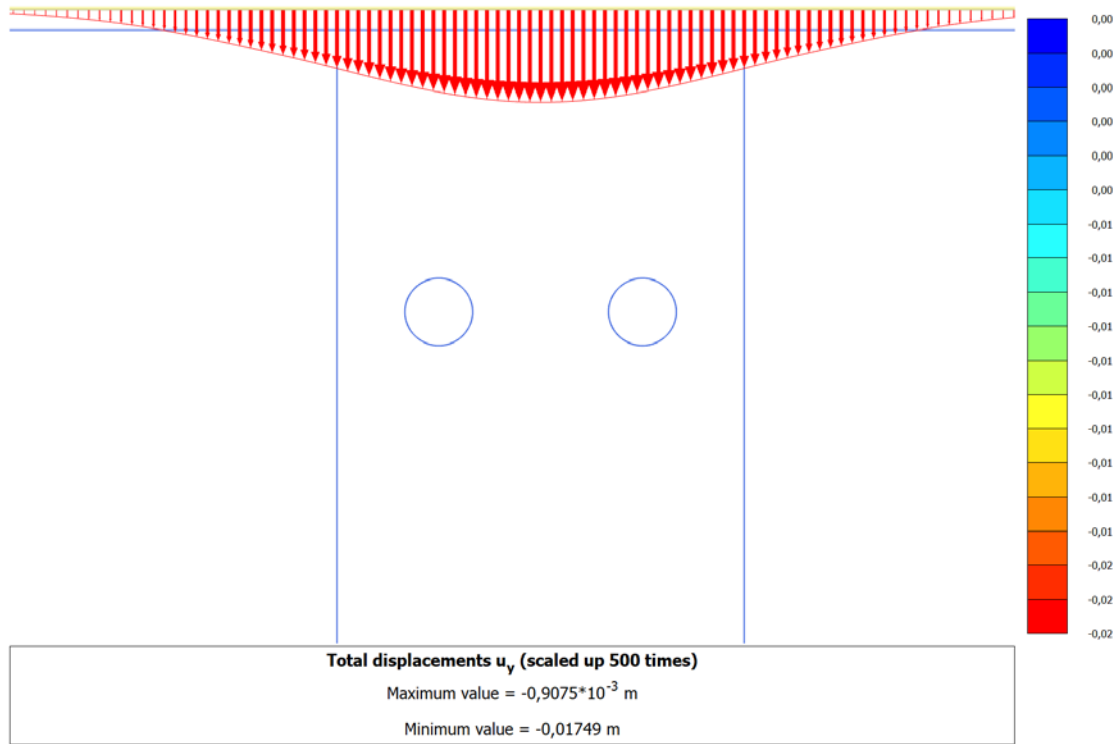


Şekil E1. 47 Analiz 7 Plaxis programı – Aşama 1 üçgenleme gösterimi



Şekil E1. 48 Analiz 7 Plaxis programı – kazıya bağlı zemin deformasyonu

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları



Şekil E1. 49 Analiz 7 Plaxis programı – kazıya bağlı yüzeyde oluşan oturma

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 24 Analiz 7 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Mohr Cloulomb

Identification		1.Tabaka - Kontrosuz Dolgu
Identification number		1
Drainage type		Drained
Colour		
Comments		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E	kN/m ²	10,00E3
ν (nu)		0,3000
G	kN/m ²	3846
E_{oed}	kN/m ²	13,46E3
C_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
V_s	m/s	43,43
V_p	m/s	81,26
Set to default values		Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
ν_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	375,0E3
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
δ_{inter}		0,000
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,5000
$K_{0,z}$		0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 25 Analiz 7 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hardening Soil

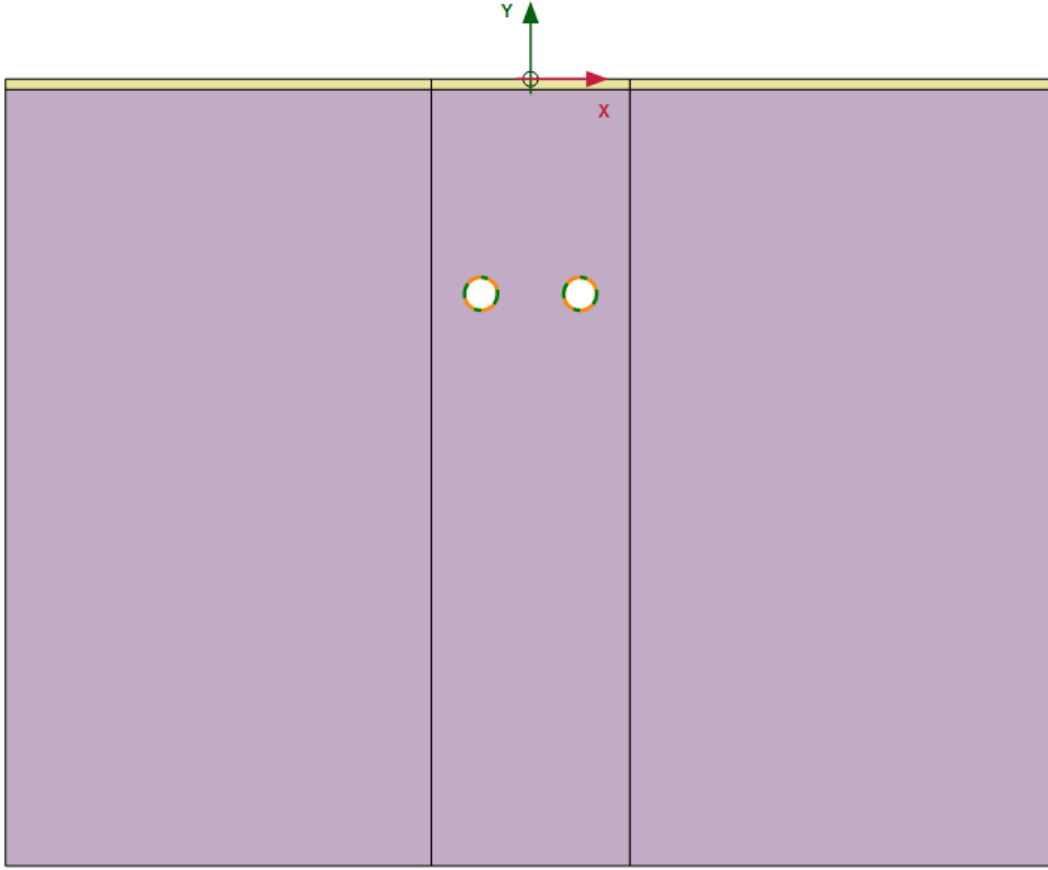
Identification		2.Tabaka-Zemin-Sert Kil
Identification number		2
Drainage type		Drained
Colour		
γ_{unsat}	kN/m ³	19,00
γ_{sat}	kN/m ³	19,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E_{50}^{ref}	kN/m ²	80,00E3
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	80,00E3
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	160,0E3
power (m)		0,5000
Use alternatives		No
C_c		4,312E-3
C_s		1,941E-3
e_{init}		0,5000
C_{ref}	kN/m ²	15,00
ϕ (phi)	°	32,00
ψ (psi)	°	0,000
Set to default values		Yes
v_{ur}		0,2000
p_{ref}	kN/m ²	100,0
K_0^{nc}		0,4701
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
R_f		0,9000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9866
v_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	6,556E6
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,4701
OCR		1,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

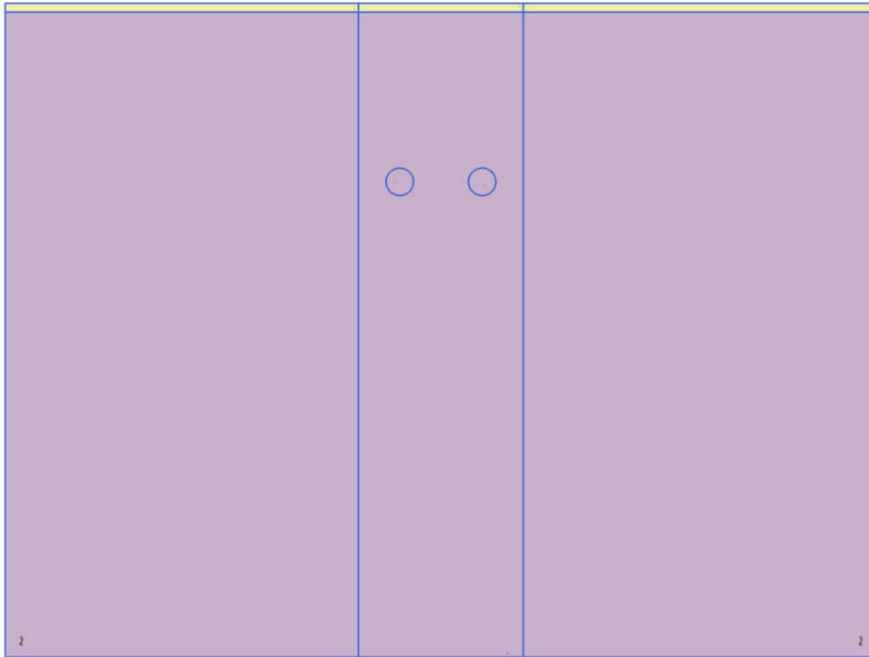
Çizelge E1. 26 Analiz 7 Plaxis programı – Tünel kaplama parametresi

Identification		TBM Segment (H=30cm) C45/55
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
Isotropic		Yes
End bearing		No
EA ₁	kN/m	9,772E6
EA ₂	kN/m	9,772E6
EI	kN m ² /m	60,00E3
d	m	0,2714
w	kN/m/m	7,500
ν (nu)		0,2000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Identification number		1
c	kJ/t/K	0,000
λ	kW/m/K	0,000
ρ	t/m ³	0,000
α	1/K	0,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

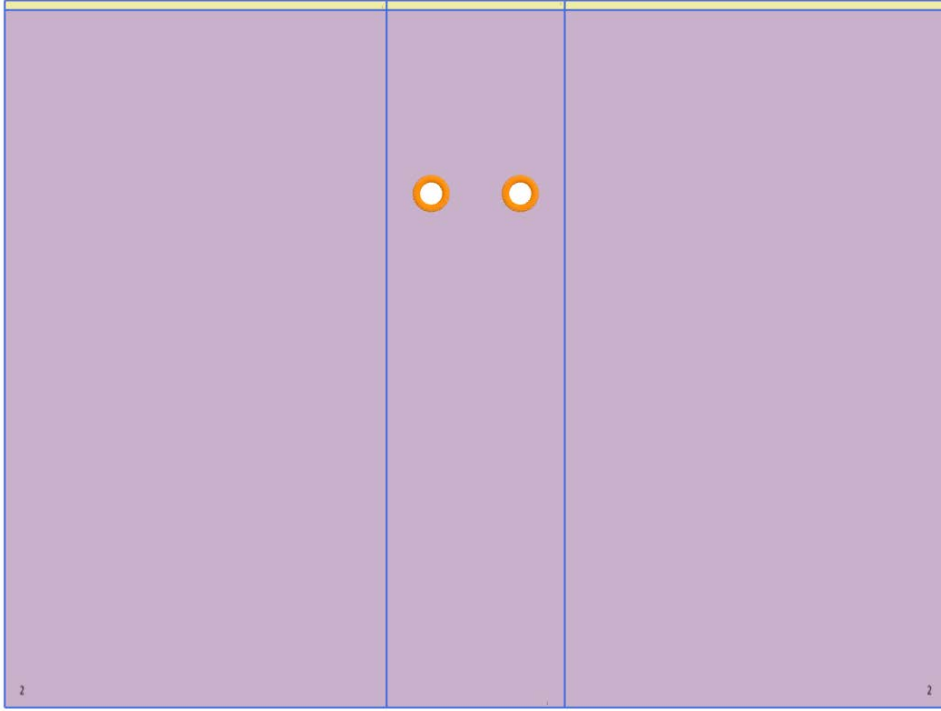


Şekil E1. 50 Analiz 8 Plaxis programı – zemin model gösterimi

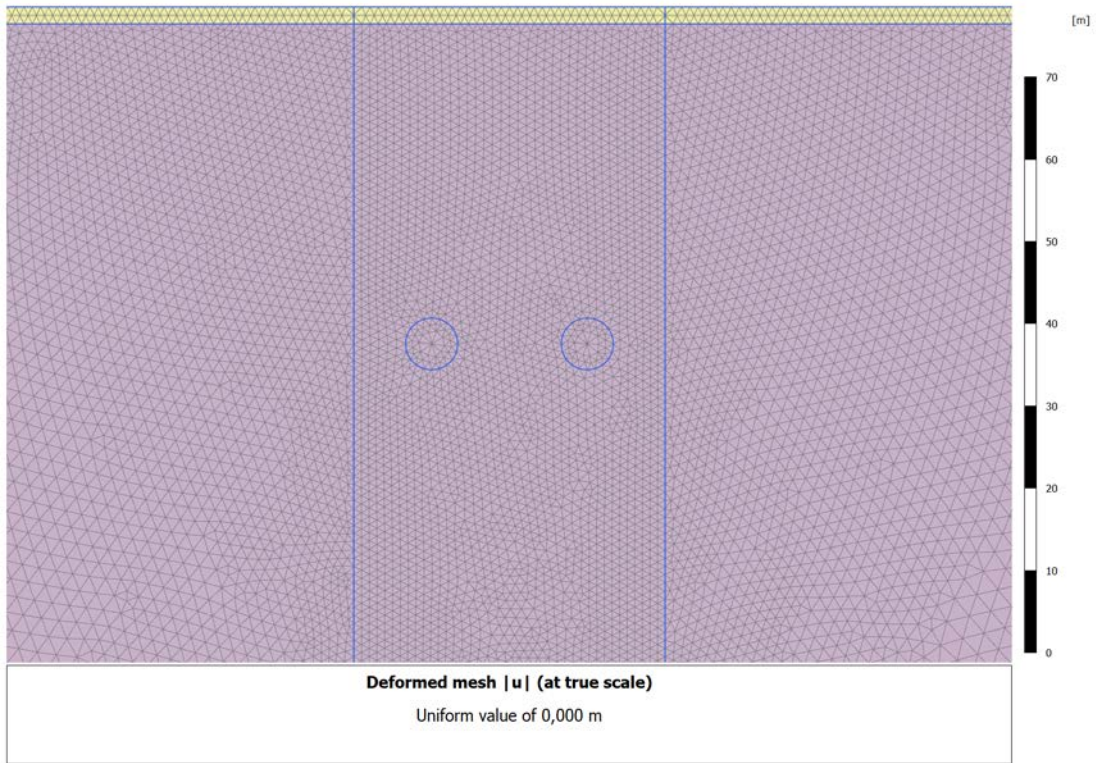


Şekil E1. 51 Analiz 8 Plaxis programı – Aşama 0 gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

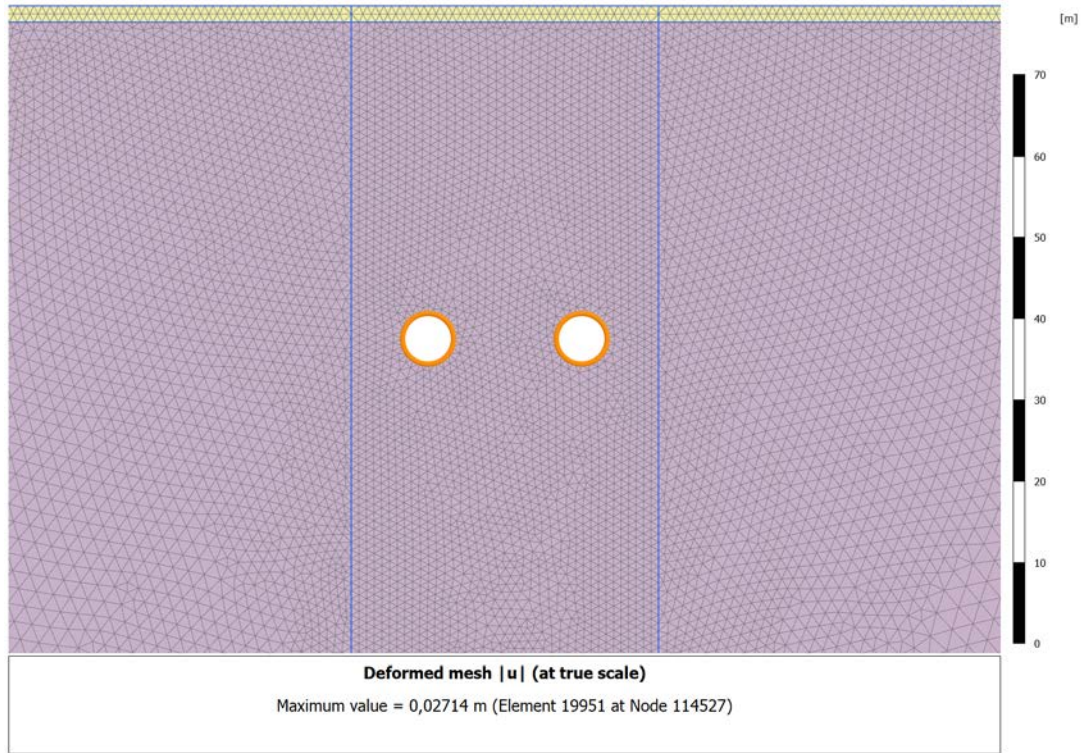


Şekil E1. 52 Analiz 8 Plaxis programı – Aşama 1 gösterimi

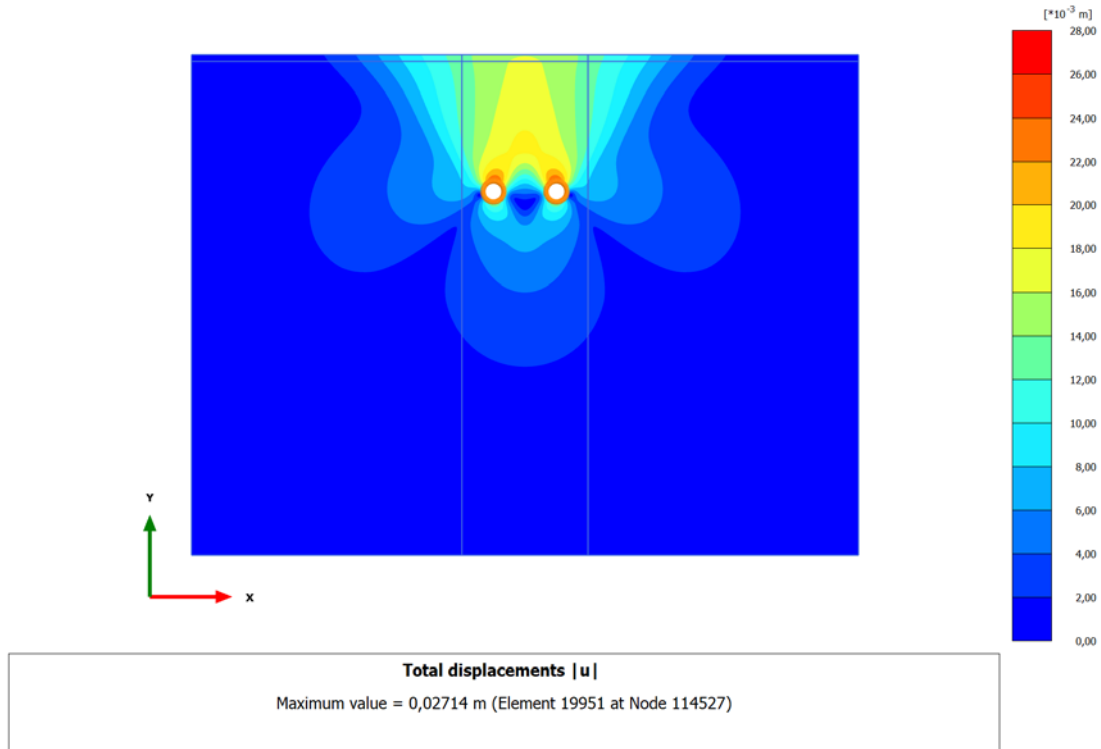


Şekil E1. 53 Analiz 8 Plaxis programı – Aşama 0 üçgenleme gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

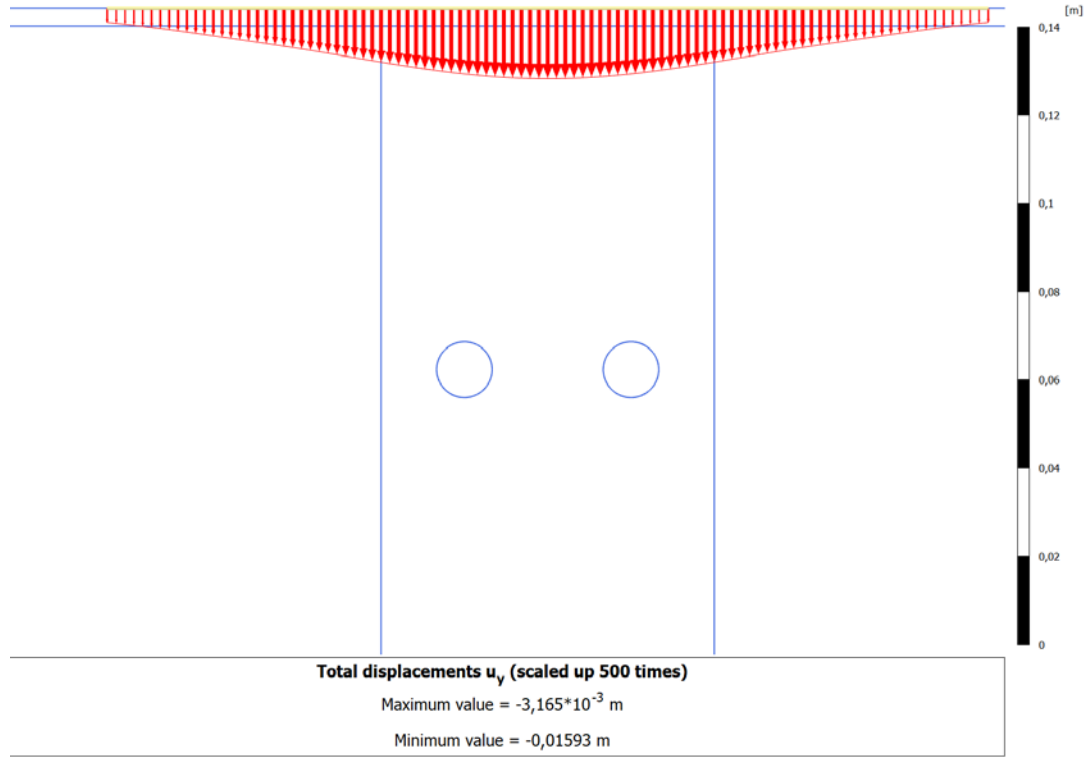


Şekil E1. 54 Analiz 8 Plaxis programı – Aşama 1 üçgenleme gösterimi



Şekil E1. 55 Analiz 8 Plaxis programı – kazıya bağlı zemin deformasyonu

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları



Şekil E1. 56 Analiz 8 Plaxis programı – kazıya bağlı yüzeyde oluşan oturma

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 27 Analiz 8 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Mohr Cloulomb

Identification		1.Tabaka - Kontrosuz Dolgu
Identification number		1
Drainage type		Drained
Colour		
Comments		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E	kN/m ²	10,00E3
ν (nu)		0,3000
G	kN/m ²	3846
E_{oed}	kN/m ²	13,46E3
c_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
V_s	m/s	43,43
V_p	m/s	81,26
Set to default values		Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
c_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
ν_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	375,0E3
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
δ_{inter}		0,000
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,5000
$K_{0,z}$		0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 28 Analiz 8 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hardening Soil

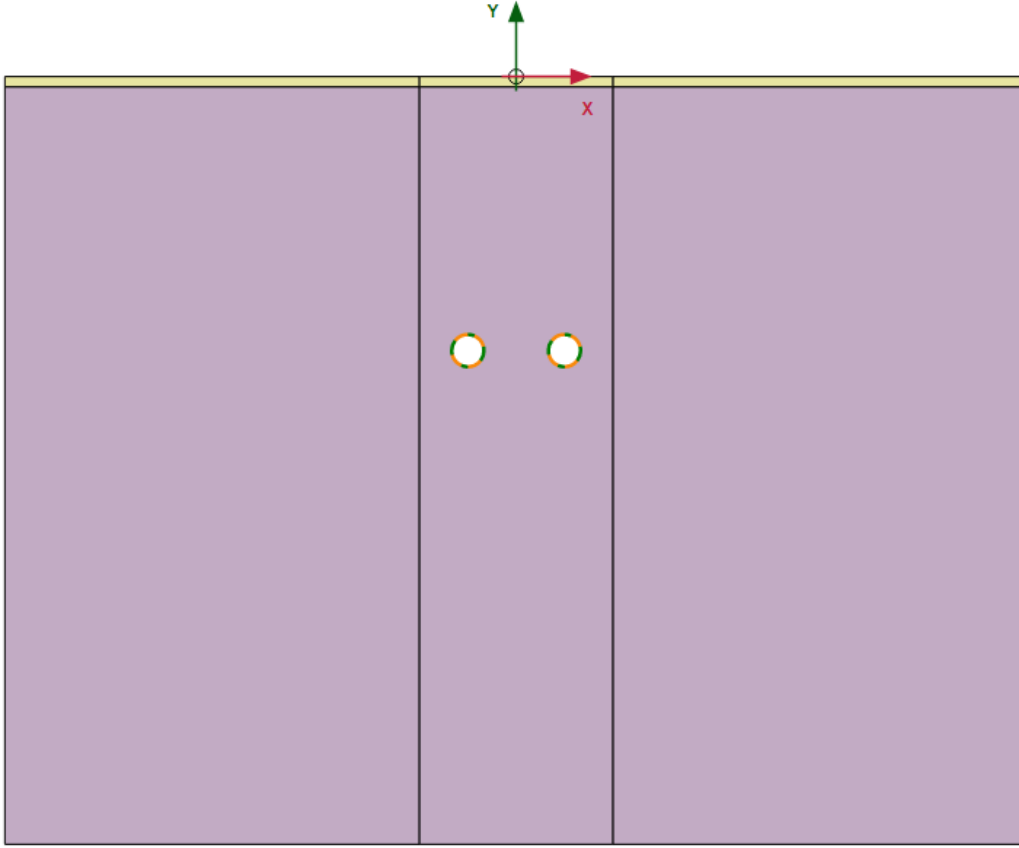
Identification		2.Tabaka-Zemin-Sert Kil
Identification number		2
Drainage type		Drained
Colour		
γ_{unsat}	kN/m ³	19,00
γ_{sat}	kN/m ³	19,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E_{50}^{ref}	kN/m ²	80,00E3
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	80,00E3
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	160,0E3
power (m)		0,5000
Use alternatives		No
C_c		4,312E-3
C_s		1,941E-3
e_{init}		0,5000
C_{ref}	kN/m ²	15,00
ϕ (phi)	°	32,00
ψ (psi)	°	0,000
Set to default values		Yes
v_{ur}		0,2000
p_{ref}	kN/m ²	100,0
K_0^{nc}		0,4701
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
R_f		0,9000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9866
v_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	6,556E6
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,4701
OCR		1,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

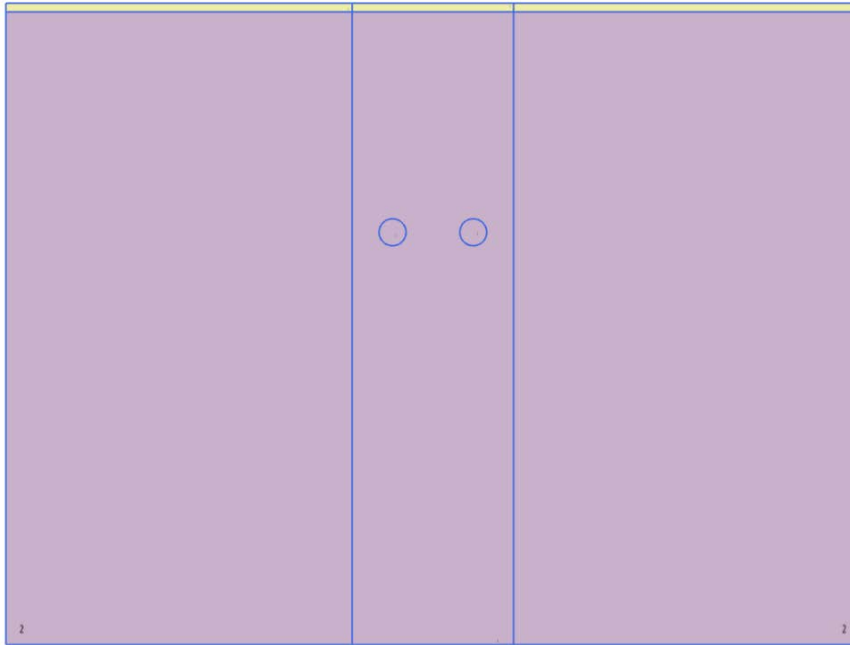
Çizelge E1. 29 Analiz 8 Plaxis programı – Tünel kaplama parametresi

Identification		TBM Segment (H=30cm) C45/55
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
Isotropic		Yes
End bearing		No
EA ₁	kN/m	9,772E6
EA ₂	kN/m	9,772E6
EI	kN m ² /m	60,00E3
d	m	0,2714
w	kN/m/m	7,500
ν (nu)		0,2000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Identification number		1
c	kJ/t/K	0,000
λ	kW/m/K	0,000
ρ	t/m ³	0,000
α	1/K	0,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

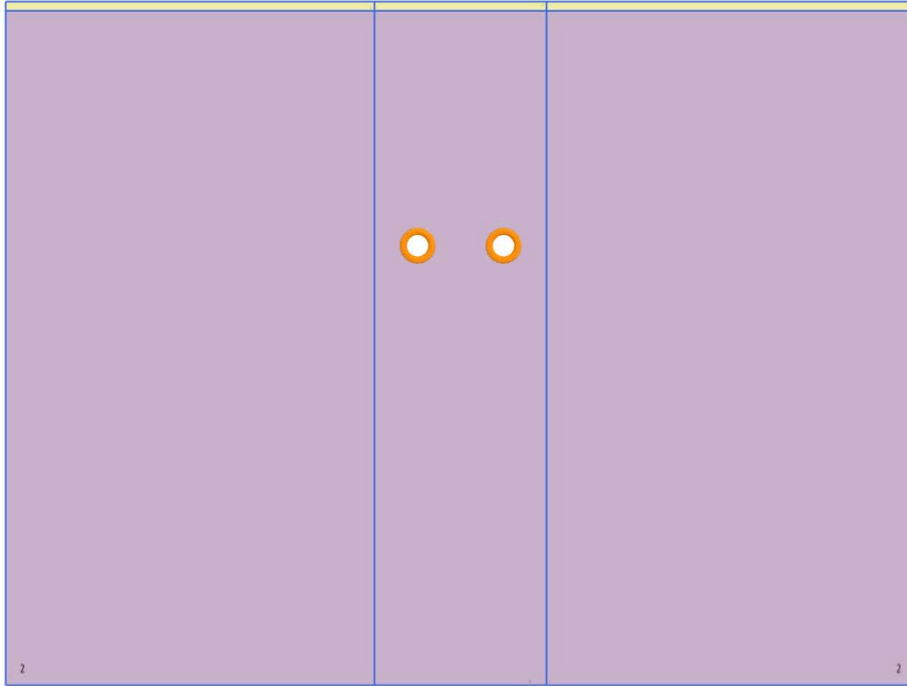


Şekil E1. 57 Analiz 9 Plaxis programı – zemin model gösterimi

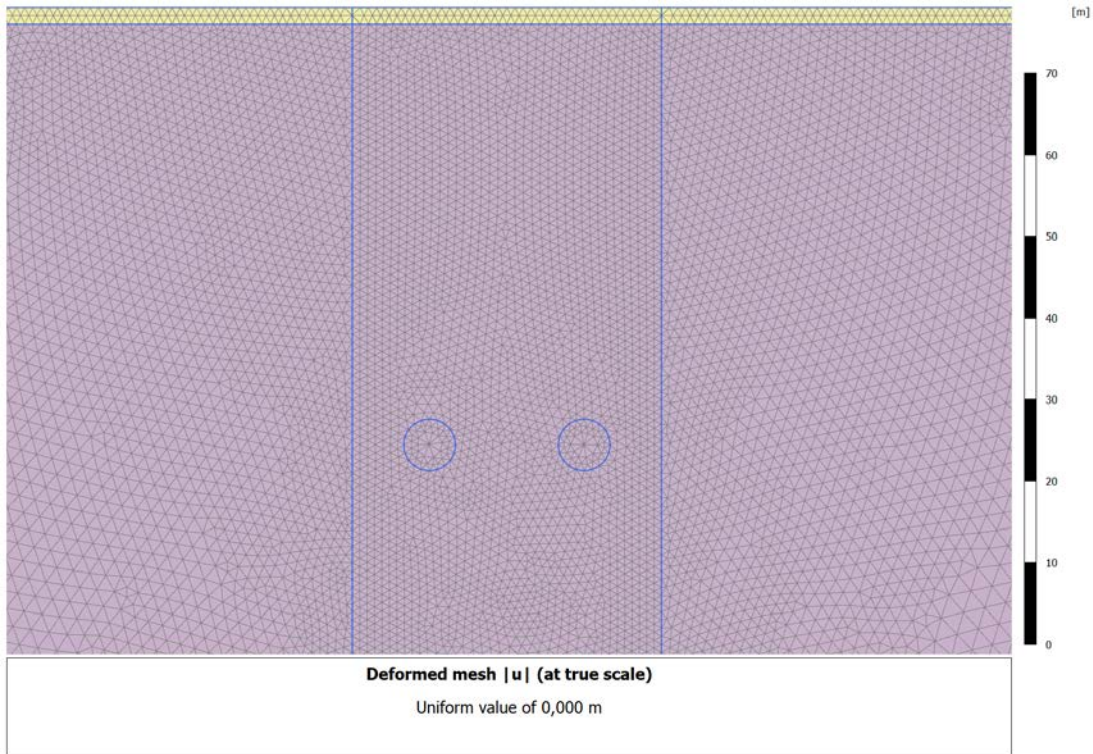


Şekil E1. 58 Analiz 9 Plaxis programı – Aşama 0 gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

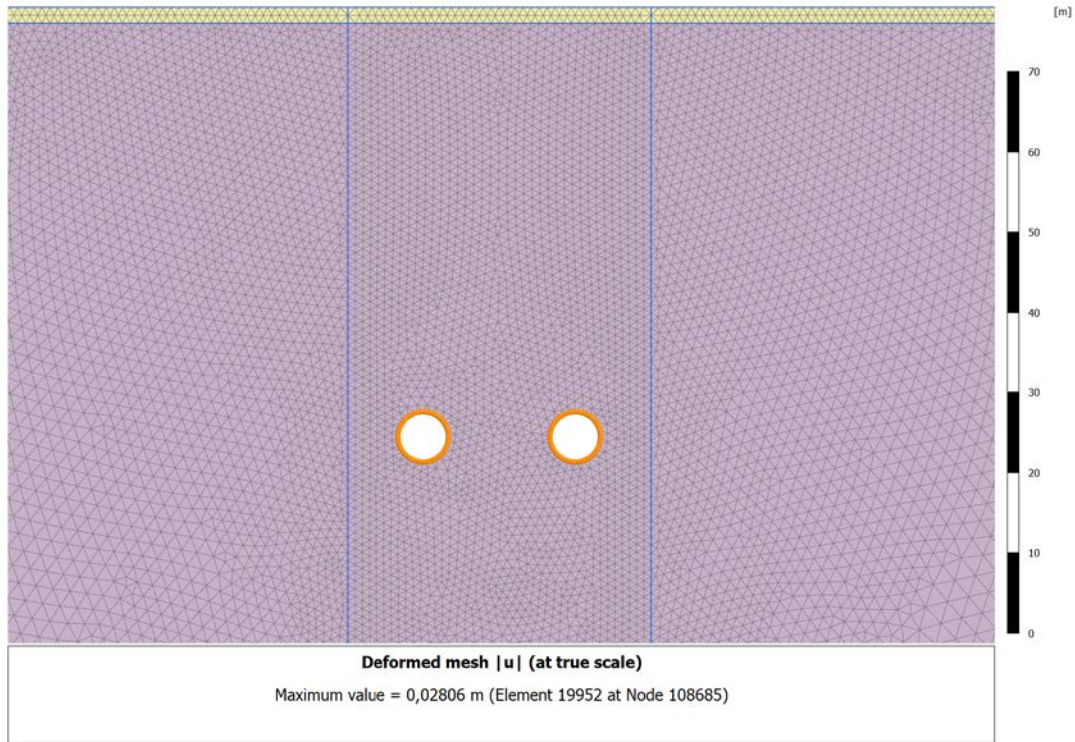


Şekil E1. 59 Analiz 9 Plaxis programı – Aşama 1 gösterimi

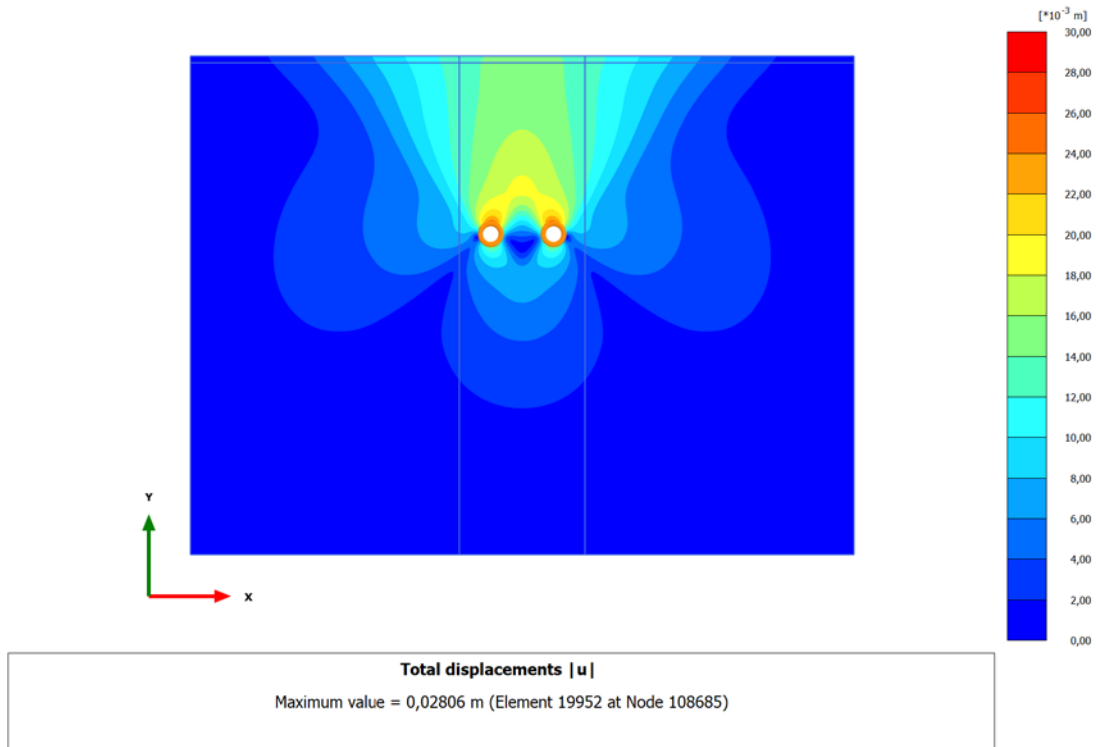


Şekil E1. 60 Analiz 9 Plaxis programı – Aşama 0 üçgenleme gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

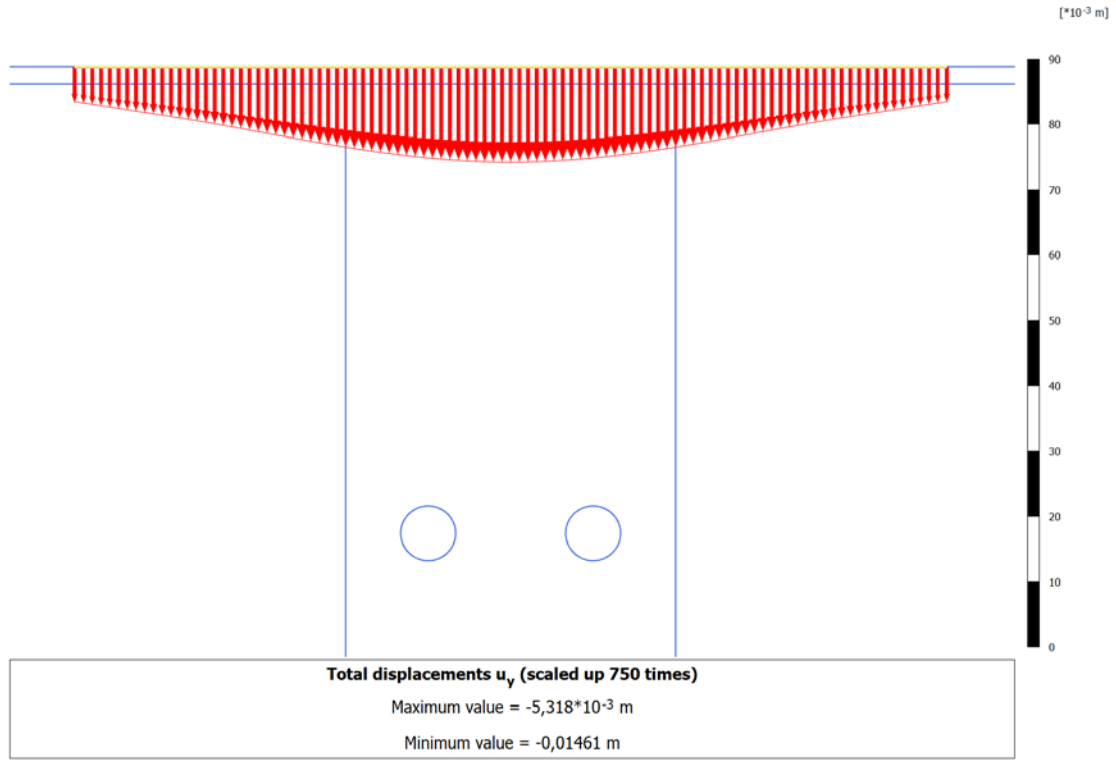


Şekil E1. 61 Analiz 9 Plaxis programı – Aşama 1 üçgenleme gösterimi



Şekil E1. 62 Analiz 9 Plaxis programı – kazıya bağlı zemin deformasyonu

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları



Şekil E1. 63 Analiz 9 Plaxis programı – kazıya bağlı yüzeyde oluşan oturma

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 30 Analiz 9 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Mohr Cloulomb

Identification		1.Tabaka - Kontrosuz Dolgu
Identification number		1
Drainage type		Drained
Colour		
Comments		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E	kN/m ²	10,00E3
ν (nu)		0,3000
G	kN/m ²	3846
E_{oed}	kN/m ²	13,46E3
C_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
V_s	m/s	43,43
V_p	m/s	81,26
Set to default values		Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
ν_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	375,0E3
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
δ_{inter}		0,000
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,5000
$K_{0,z}$		0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 31 Analiz 9 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hardening Soil

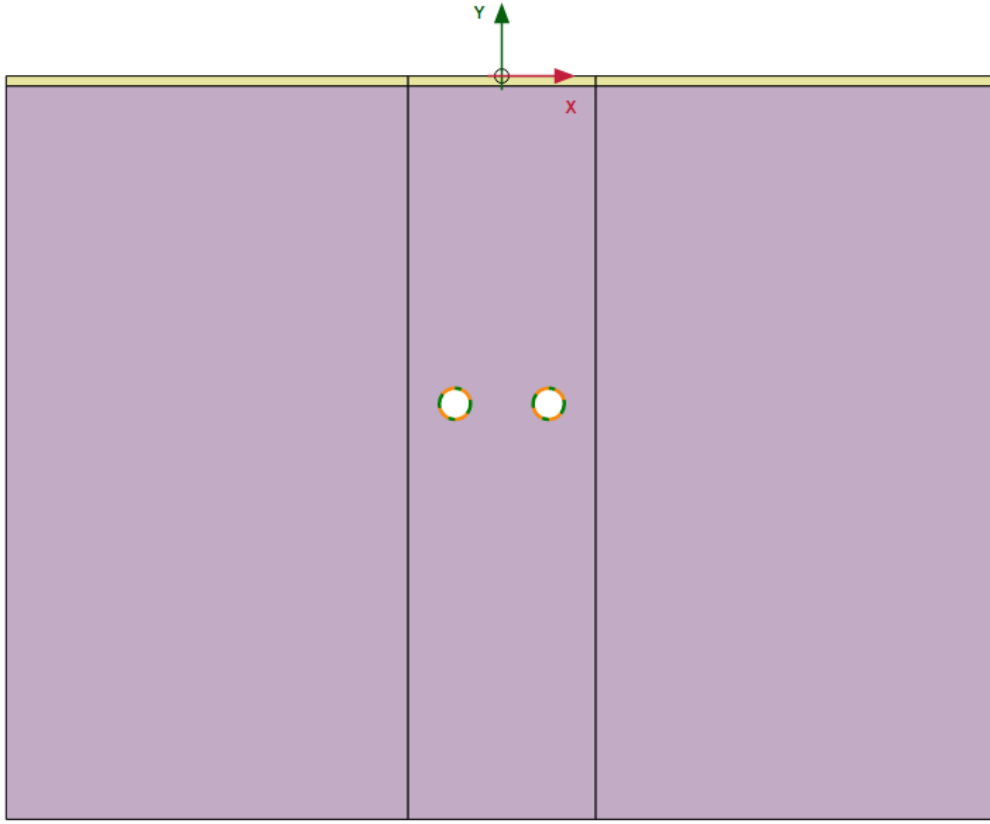
Identification		2.Tabaka-Zemin-Sert Kil
Identification number		2
Drainage type		Drained
Colour		
γ_{unsat}	kN/m ³	19,00
γ_{sat}	kN/m ³	19,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E_{50}^{ref}	kN/m ²	80,00E3
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	80,00E3
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	160,0E3
power (m)		0,5000
Use alternatives		No
C_c		4,312E-3
C_s		1,941E-3
e_{init}		0,5000
C_{ref}	kN/m ²	15,00
ϕ (phi)	°	32,00
ψ (psi)	°	0,000
Set to default values		Yes
v_{ur}		0,2000
p_{ref}	kN/m ²	100,0
K_0^{nc}		0,4701
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
R_f		0,9000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9866
v_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	6,556E6
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,4701
OCR		1,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

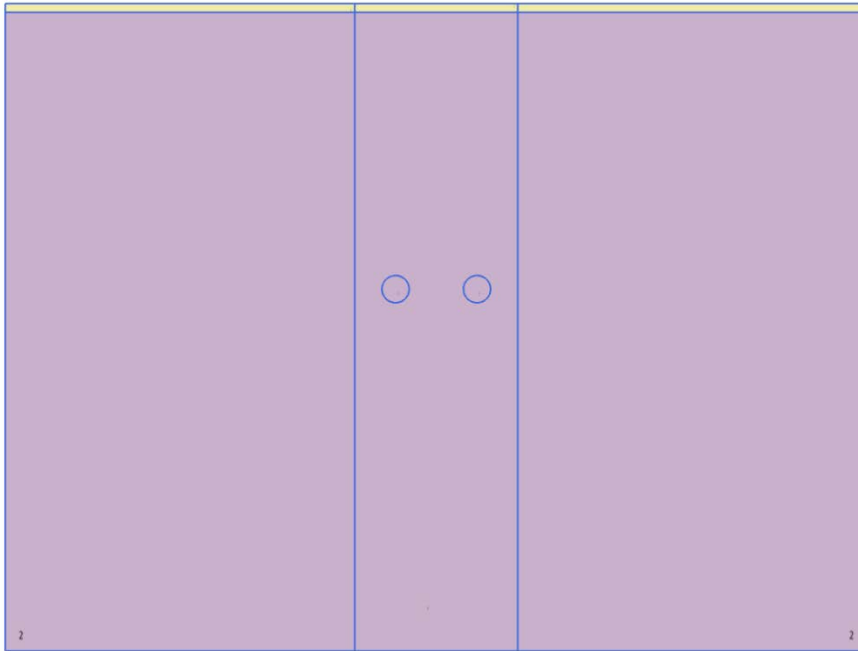
Çizelge E1. 32 Analiz 9 Plaxis programı – Tünel kaplama parametresi

Identification		TBM Segment (H=30cm) C45/55
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
Isotropic		Yes
End bearing		No
EA ₁	kN/m	9,772E6
EA ₂	kN/m	9,772E6
EI	kN m ² /m	60,00E3
d	m	0,2714
w	kN/m/m	7,500
ν (nu)		0,2000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Identification number		1
c	kJ/t/K	0,000
λ	kW/m/K	0,000
ρ	t/m ³	0,000
α	1/K	0,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

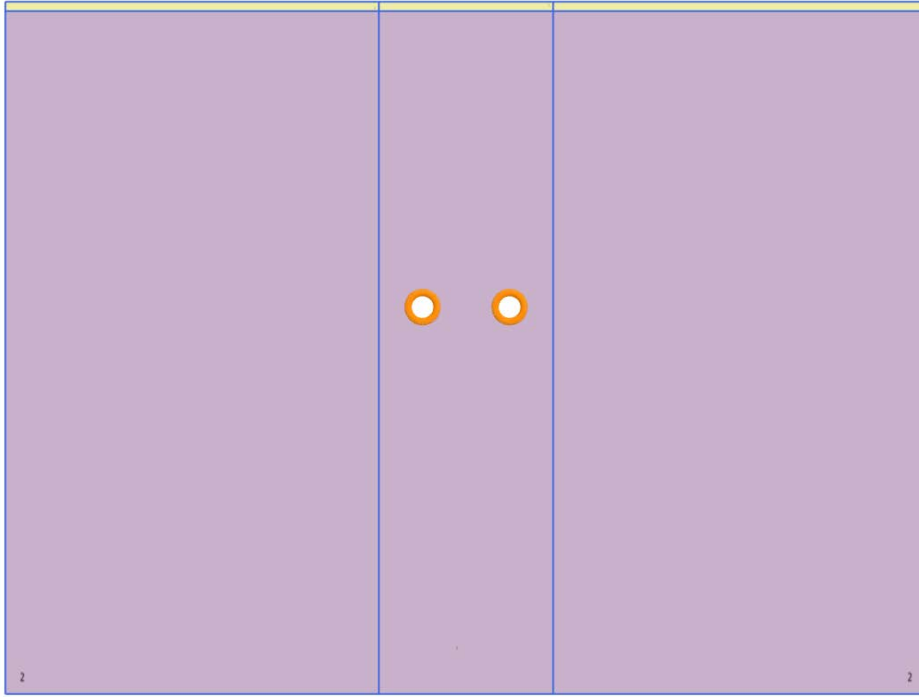


Şekil E1. 64 Analiz 10 Plaxis programı – zemin model gösterimi

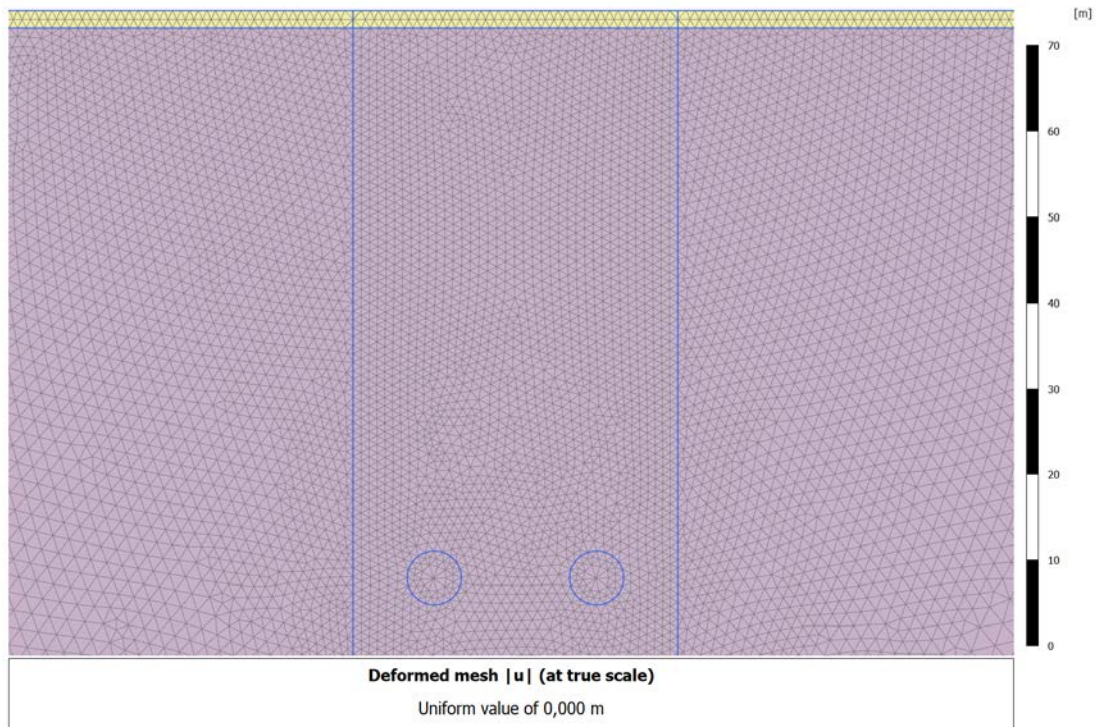


Şekil E1. 65 Analiz 10 Plaxis programı – Aşama 0 gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

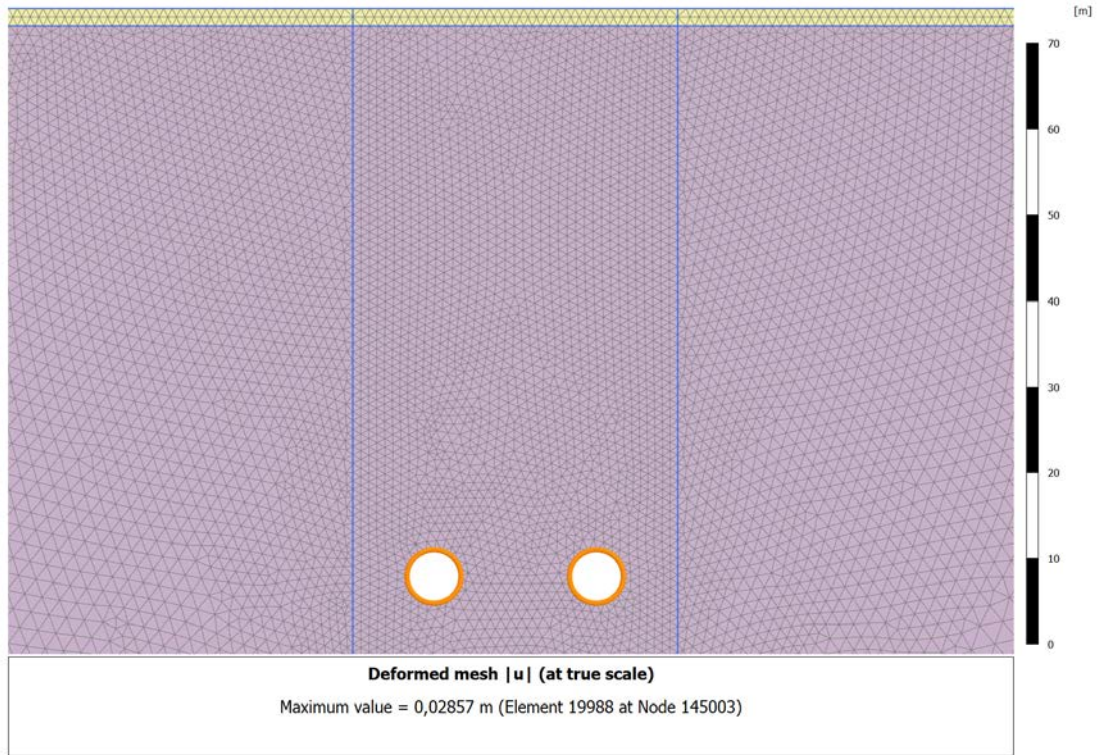


Şekil E1. 66 Analiz 10 Plaxis programı – Aşama 1 gösterimi

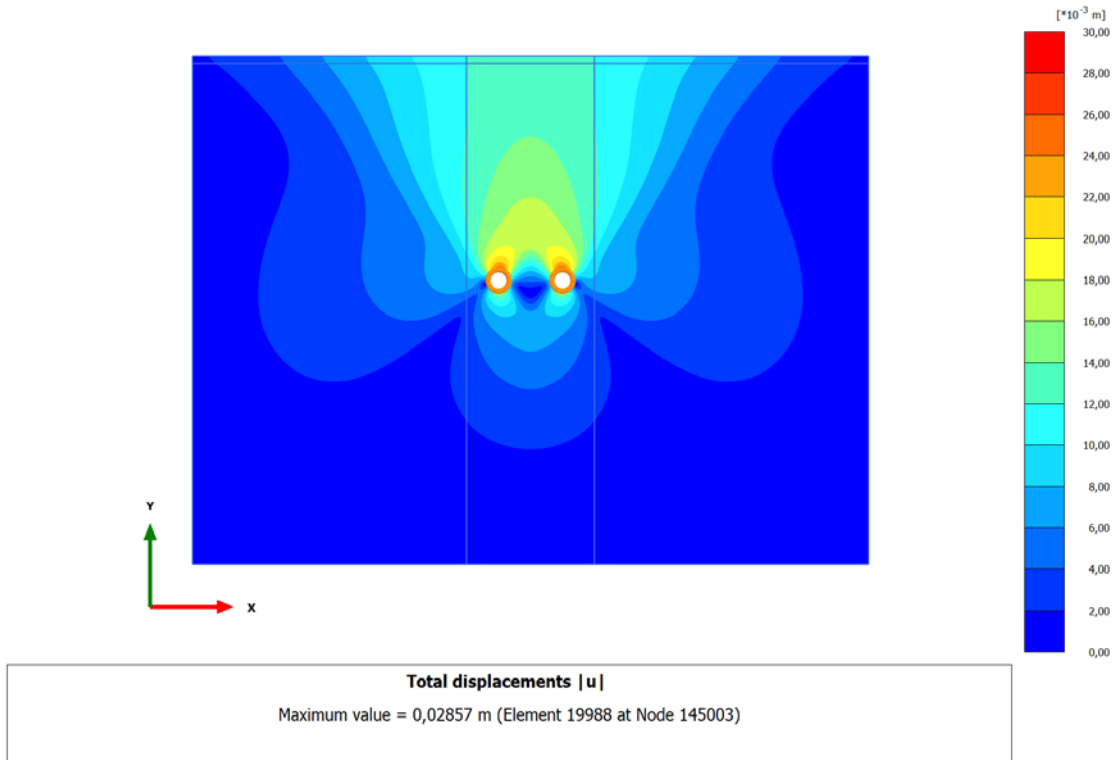


Şekil E1. 67 Analiz 10 Plaxis programı – Aşama 0 üçgenleme gösterimi

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

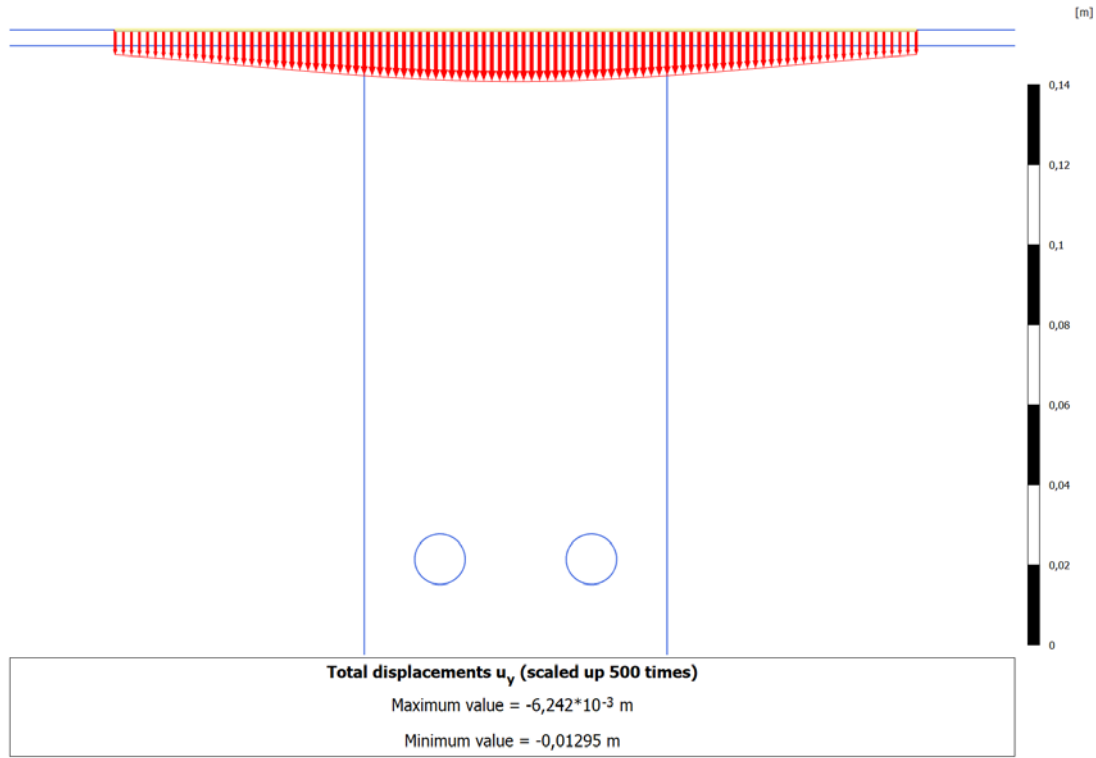


Şekil E1. 68 Analiz 10 Plaxis programı – Aşama 1 üçgenleme gösterimi



Şekil E1. 69 Analiz 10 Plaxis programı – kazıya bağlı zemin deformasyonu

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları



Şekil E1. 70 Analiz 10 Plaxis programı – kazıya bağlı yüzeyde oluşan oturma

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 33 Analiz 10 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Mohr Cloulomb

Identification		1.Tabaka - Kontrosuz Dolgu
Identification number		1
Drainage type		Drained
Colour		
Comments		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E	kN/m ²	10,00E3
ν (nu)		0,3000
G	kN/m ²	3846
E_{oed}	kN/m ²	13,46E3
c_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
V_s	m/s	43,43
V_p	m/s	81,26
Set to default values		Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
c_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
ν_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	375,0E3
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
δ_{inter}		0,000
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,5000
$K_{0,z}$		0,5000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 34 Analiz 10 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hardening Soil

Identification		2.Tabaka-Zemin-Sert Kil
Identification number		2
Drainage type		Drained
Colour		
γ_{unsat}	kN/m ³	19,00
γ_{sat}	kN/m ³	19,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E_{50}^{ref}	kN/m ²	80,00E3
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	80,00E3
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	160,0E3
power (m)		0,5000
Use alternatives		No
C_c		4,312E-3
C_s		1,941E-3
e_{init}		0,5000
C_{ref}	kN/m ²	15,00
ϕ (phi)	°	32,00
ψ (psi)	°	0,000
Set to default values		Yes
v_{ur}		0,2000
p_{ref}	kN/m ²	100,0
K_0^{nc}		0,4701
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
R_f		0,9000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9866
v_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	6,556E6
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,4701
OCR		1,000

EK-1. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları

Çizelge E1. 35 Analiz 10 Plaxis programı – Tünel kaplama parametresi

Identification		TBM Segment (H=30cm) C45/55
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
Isotropic		Yes
End bearing		No
EA ₁	kN/m	9,772E6
EA ₂	kN/m	9,772E6
EI	kN m ² /m	60,00E3
d	m	0,2714
w	kN/m/m	7,500
ν (nu)		0,2000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Identification number		1
c	kJ/t/K	0,000
λ	kW/m/K	0,000
ρ	t/m ³	0,000
α	1/K	0,000

EK-2. ROCDATA programı jeolojik parametreler

Estimate Ei using a Modulus Ratio ($E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$)

Using a modulus ratio (MR), it is possible to estimate the intact modulus (E_i) from:

$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$

This relationship is useful when no direct values of the intact modulus are available or where completely undisturbed sampling for measurement of E_i is difficult.

Pick MR Value by Rock Type:

Agglomerate	500 ± 100
Amphibolites	450 ± 50
Andesite	400 ± 100
Anhydrite	350 ± 0
Basalt	350 ± 100
Breccia	500 ± 0
Breccias	290 ± 60
Chalk	1000 ± 0
Claystones	250 ± 50
Conglomerates	350 ± 50
Crystalline Limestone	500 ± 100
Dacite	400 ± 50
Diabase	325 ± 25
Diorite	325 ± 25
Dolerite	350 ± 50
Dolomites	425 ± 75
Gabbro	450 ± 50
Gneiss	525 ± 225

Estimated Intact Modulus (E_i)

E_i : 12000

MR Value: 400 σ_{ci} : 30

MR Filter List

☐ Rock Type

☒ Sedimentary
 ☐ Igneous
 ☐ Metamorphic

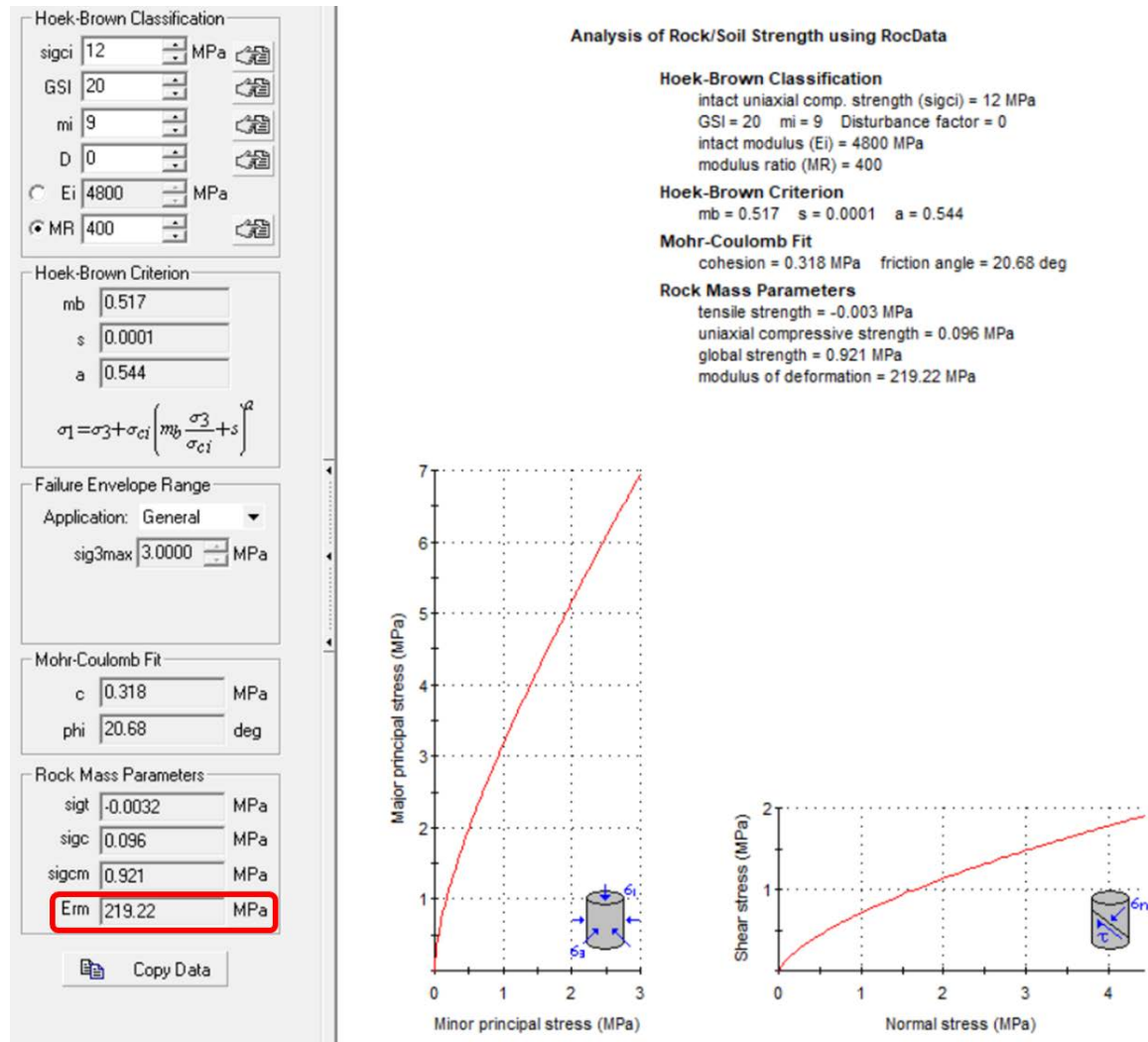
☐ Texture

☒ Coarse
 ☐ Medium
 ☐ Fine
 ☐ Very Fine

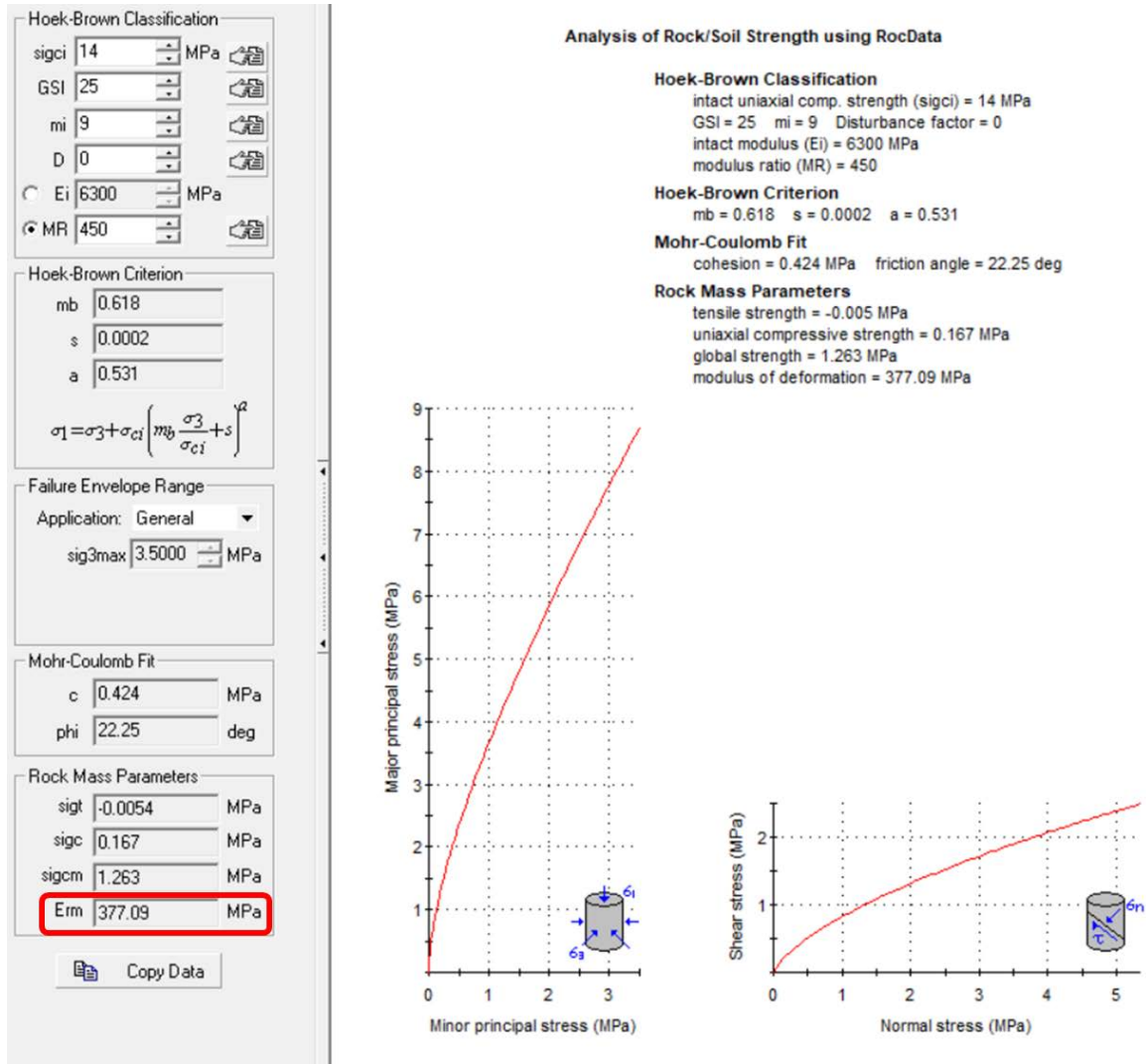
OK Cancel

Şekil E2. 1 RocData programı kaya birimleri için elastik modül oranı (MR)

EK-2. (devam) ROCDATA programı jeolojik parametreler

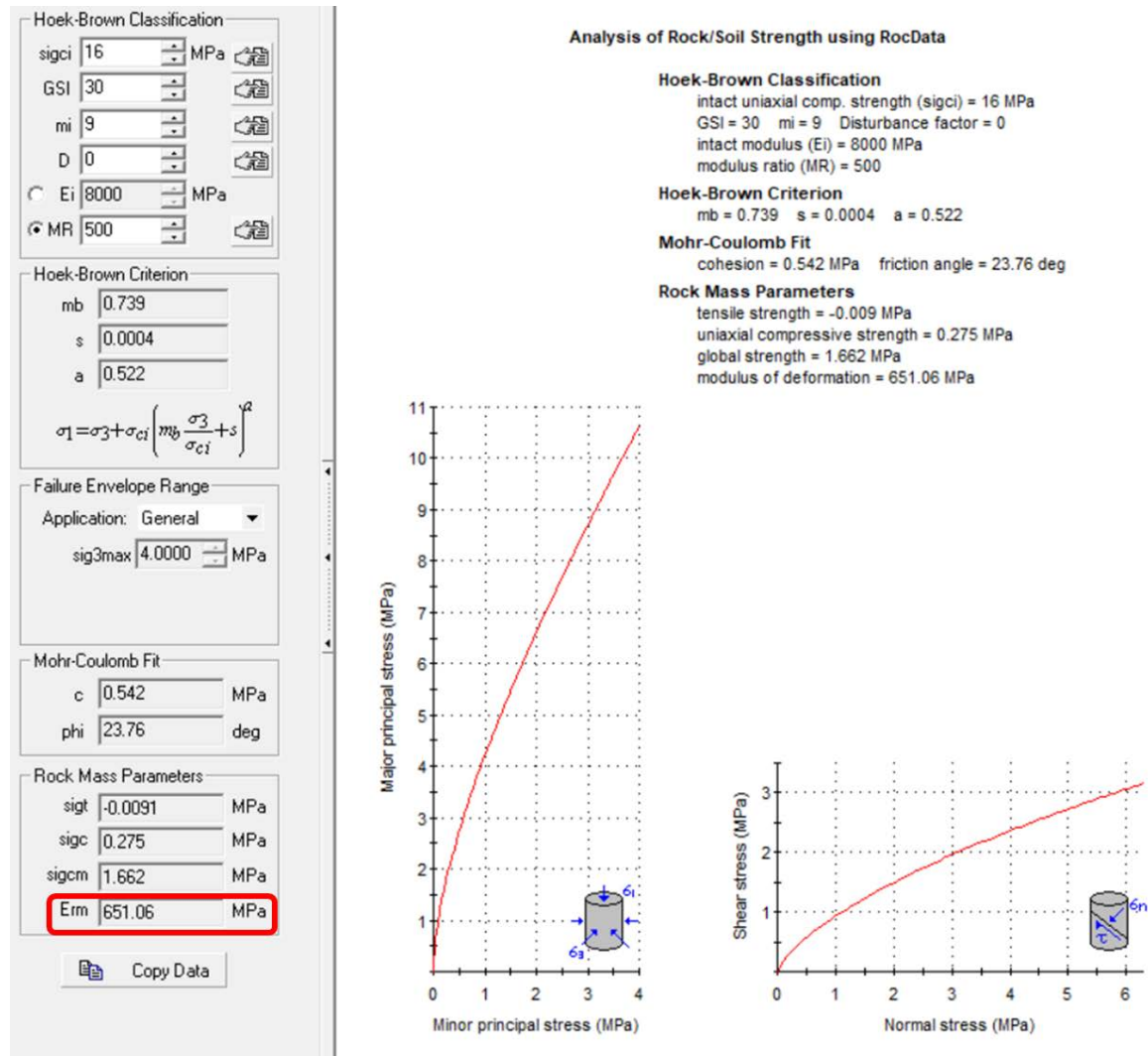
Şekil E2. 2 RocData programı kaya birimleri için elastik modül (E_m) – Kireçtaşı 1

EK-2. (devam) ROCDATA programı jeolojik parametreler

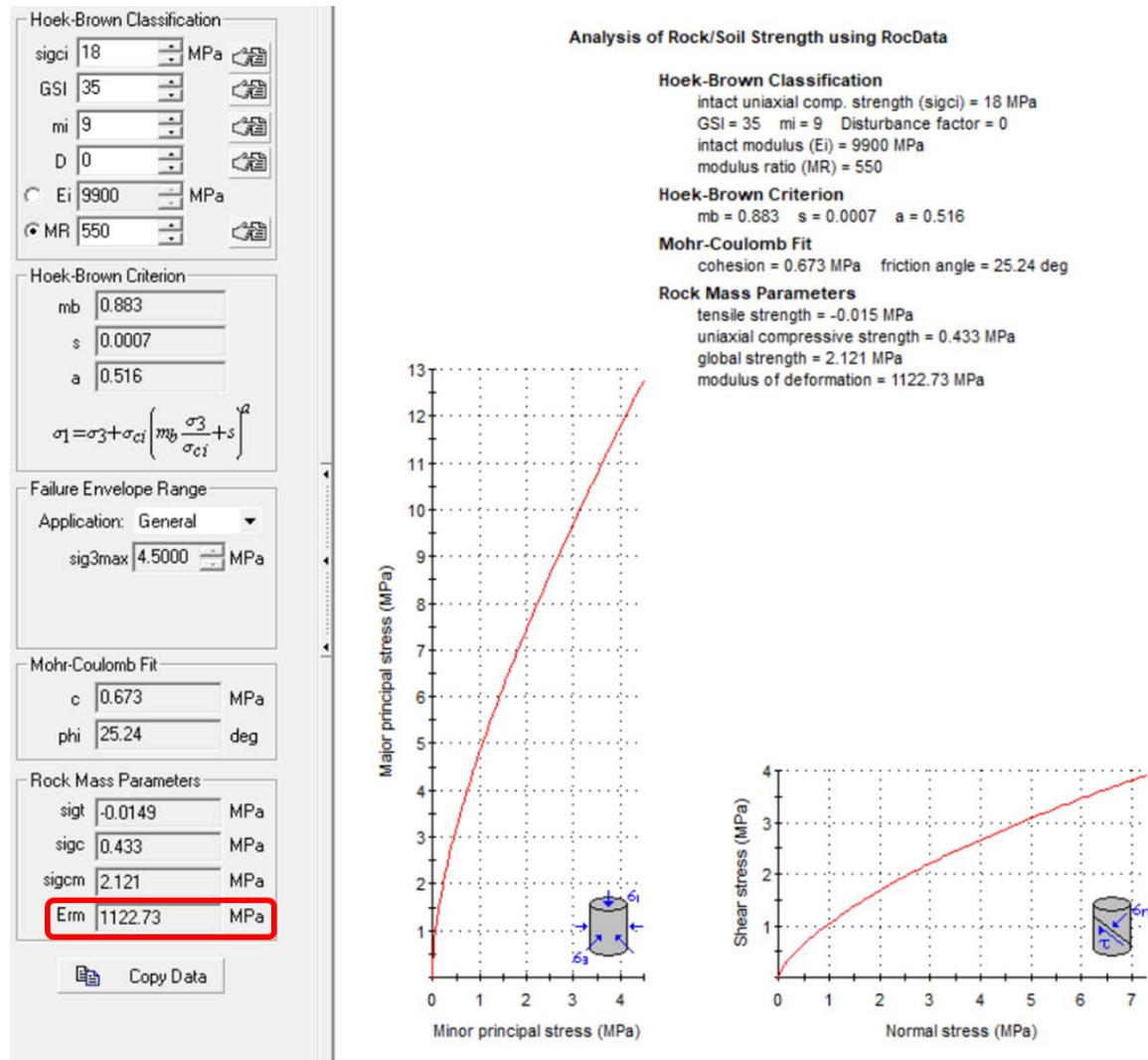


Şekil E2. 3 RocData programı kaya birimleri için elastik modül (E_m) – Kireçtaşı 2

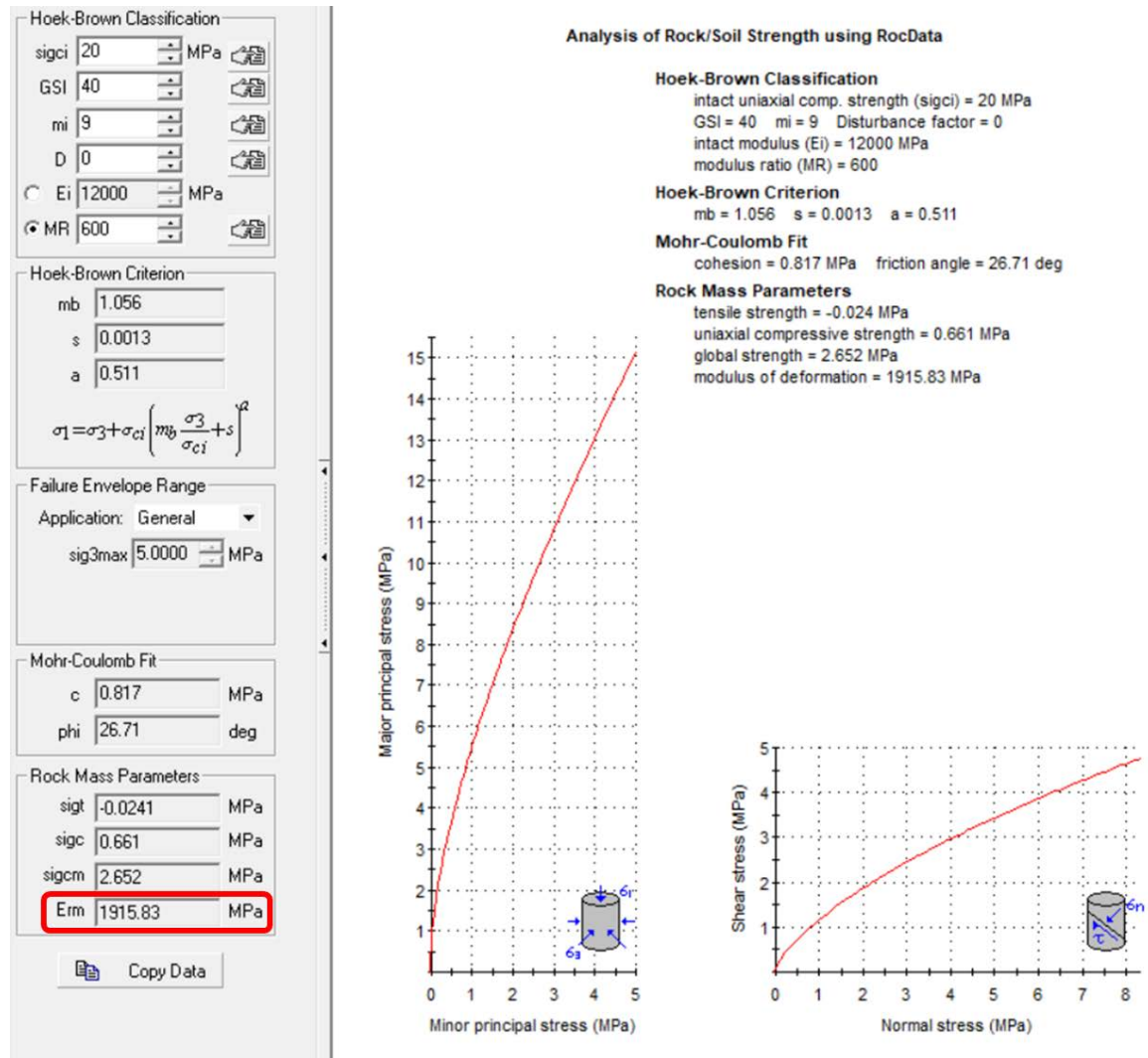
EK-2. (devam) ROCDATA programı jeolojik parametreler

Şekil E2. 4 RocData programı kaya birimleri için elastik modül (E_{rm}) – Kireçtaşı 3

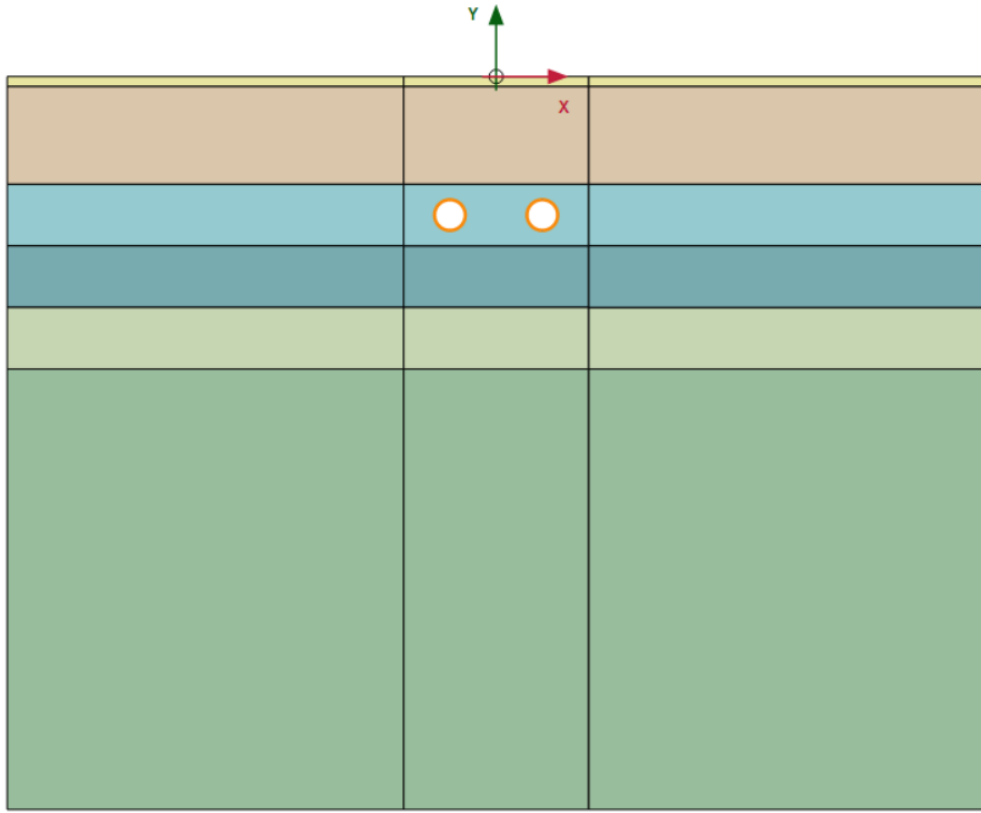
EK-2. (devam) ROCDATA programı jeolojik parametreler

Şekil E2. 5 RocData programı kaya birimleri için elastik modül (E_m) – Kireçtaşı 4

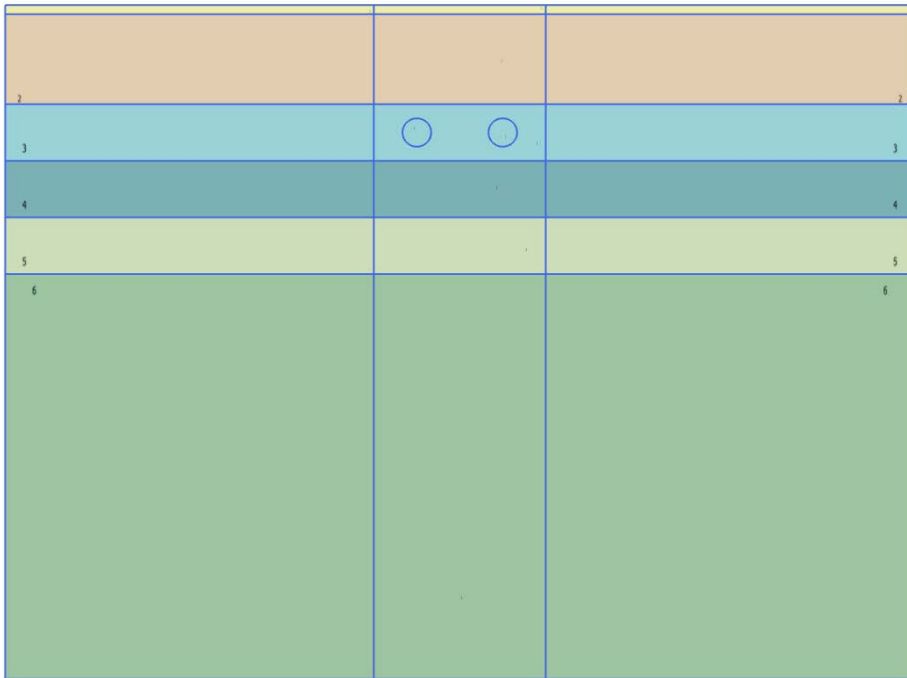
EK-2. (devam) ROCDATA programı jeolojik parametreler

Şekil E2. 6 RocData programı kaya birimleri için elastik modül (E_m) – Kireçtaşı 5

EK-3. PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu

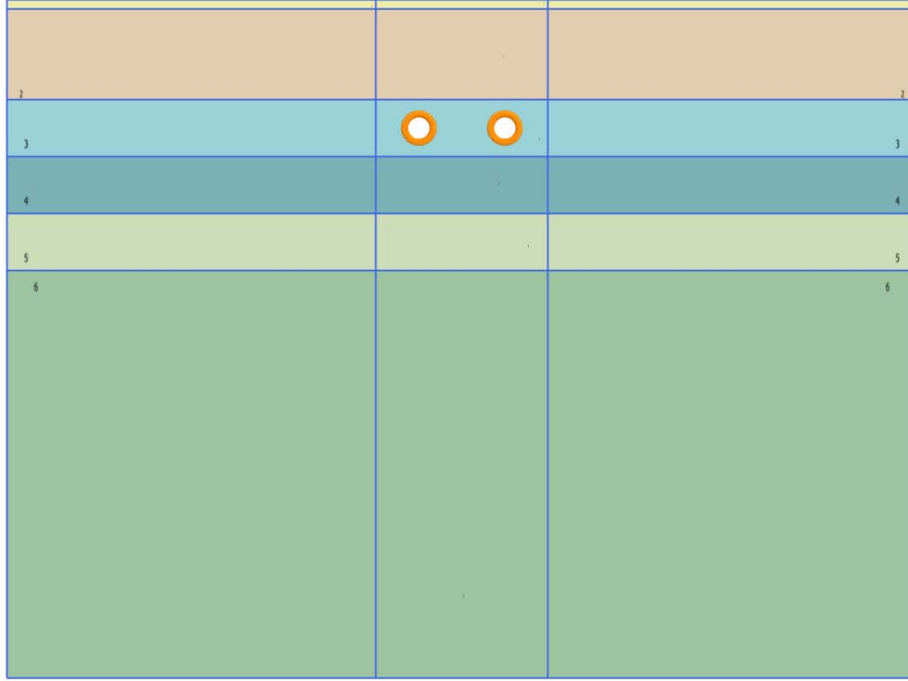


Şekil E3. 1 Analiz 2 Plaxis programı – zemin model gösterimi

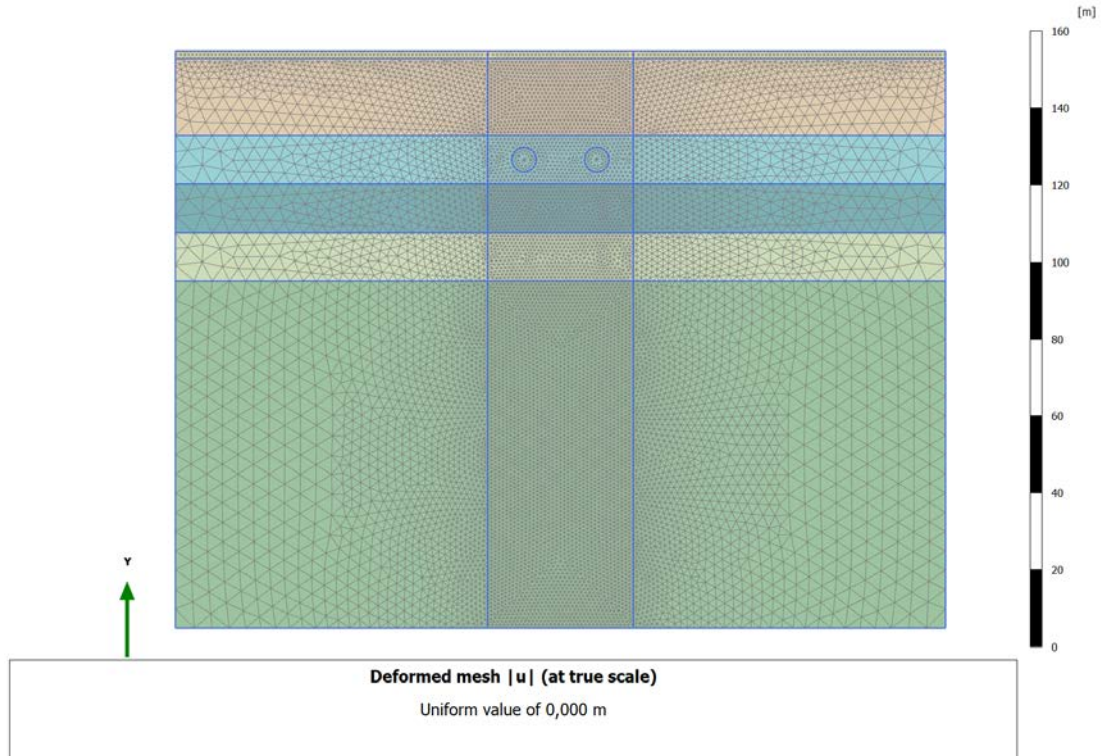


Şekil E3. 2 Analiz 2 Plaxis programı – Aşama 0 gösterimi

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu

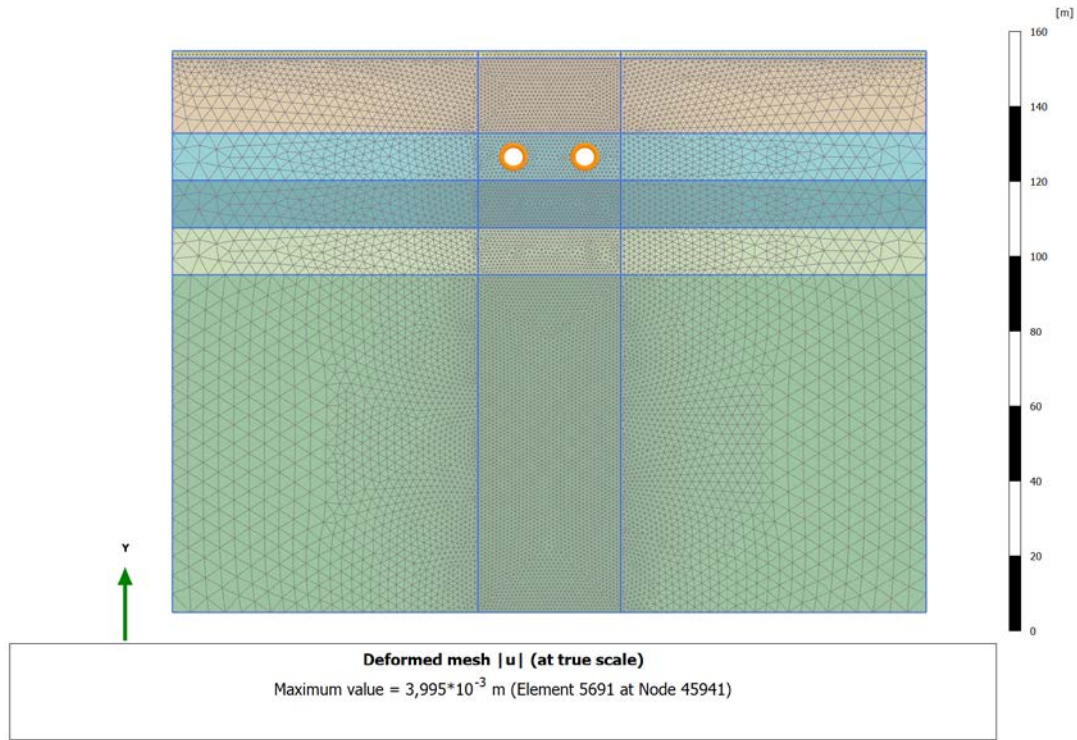


Şekil E3. 3 Analiz 2 Plaxis programı – Aşama 1 gösterimi

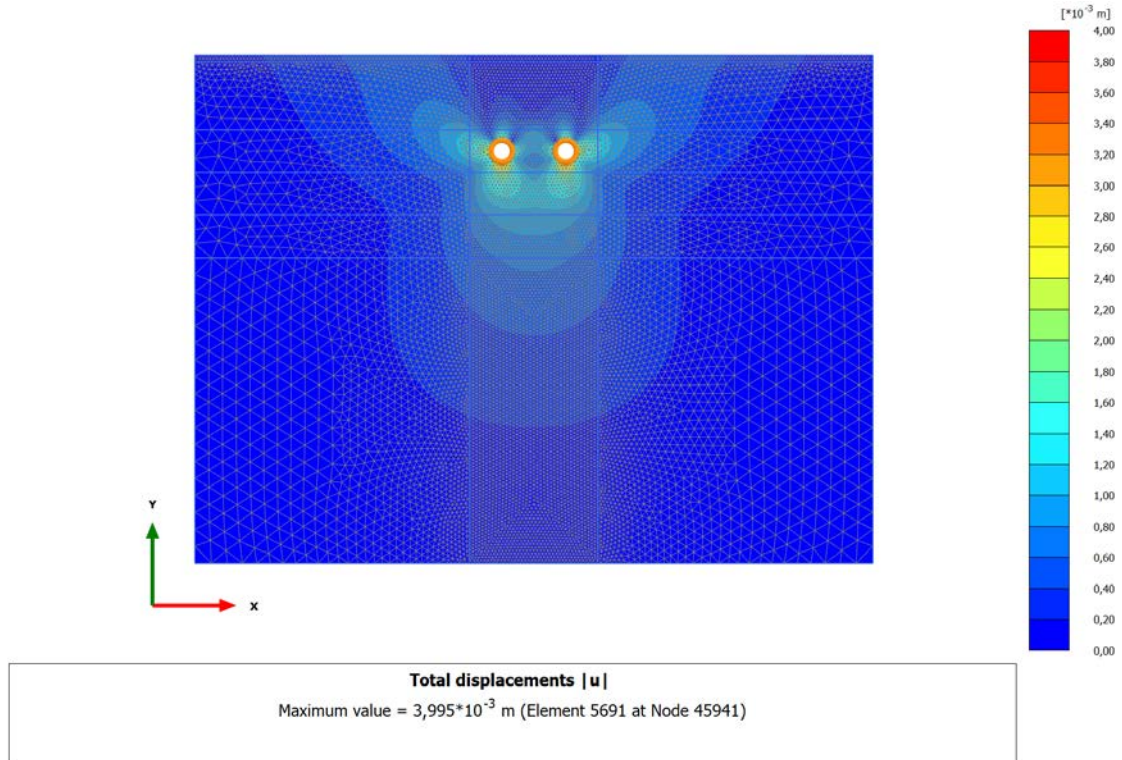


Şekil E3. 4 Analiz 2 Plaxis programı – Aşama 0 üçgenleme gösterimi

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu

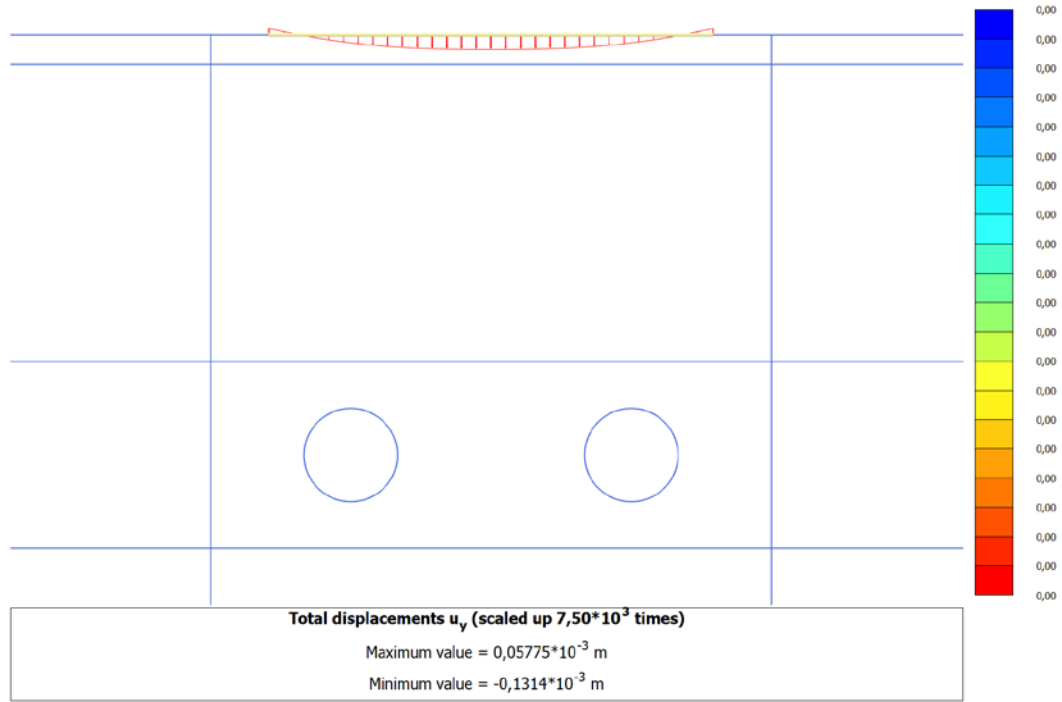


Şekil E3. 5 Analiz 2 Plaxis programı – Aşama 1 üçgenleme gösterimi



Şekil E3. 6 Analiz 2 Plaxis programı – kazıya bağlı zemin deformasyonu

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu



Şekil E3. 7 Analiz 2 Plaxis programı – kazıya bağlı yüzeyde oluşan oturma

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu

Çizelge E3. 1 Analiz 2 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Mohr Cloulomb

Identification		1.Tabaka - Kontrosuz Dolgu
Identification number		1
Drainage type		Drained
Colour		
Comments		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E	kN/m ²	10,00E3
ν (nu)		0,3000
G	kN/m ²	3846
E_{oed}	kN/m ²	13,46E3
c_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
V_s	m/s	43,43
V_p	m/s	81,26
Set to default values		Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
c_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
ν_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	375,0E3
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
δ_{inter}		0,000
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,5000
$K_{0,z}$		0,5000

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu

Çizelge E3. 2 Analiz 2 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hoek Brown

Identification		2.Tabaka-Kaya-Kirectasi-1	3.Tabaka-Kaya-Kirectasi-2	4.Tabaka-Kaya-Kirectasi-3
Identification number		2	3	4
Drainage type		Drained	Drained	Drained
Colour				
Comments				
γ_{unsat}	kN/m ³	26,00	26,00	26,00
γ_{sat}	kN/m ³	26,00	26,00	26,00
Dilatancy cut-off		No	No	No
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000	0,000
E	kN/m ²	219,0E3	377,0E3	651,0E3
ν (nu)		0,3000	0,3000	0,3000
σ_{ci}	kN/m ²	12,00E3	14,00E3	16,00E3
m_i		9,000	9,000	9,000
GSI		20,00	25,00	30,00
D		0,000	0,000	0,000
Ψ_{max}	°	0,000	0,000	0,000
σ_{Ψ}	kN/m ²	0,000	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000	0,000
R	m ² K/kW	0,000	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000	0,5000
$K_{0,z}$		0,5000	0,5000	0,5000
Data set		Standard	Standard	Standard
Type		Coarse	Coarse	Coarse
< 2 μm	%	10,00	10,00	10,00
2 μm - 50 μm	%	13,00	13,00	13,00
50 μm - 2 mm	%	77,00	77,00	77,00
Set to default values		No	No	No
k_x	m/day	0,000	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000	0,000
$-\Psi_{\text{unsat}}$	m	10,00E3	10,00E3	10,00E3
e_{init}		0,5000	0,5000	0,5000

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu

Çizelge E3. 3 Analiz 2 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hoek Brown

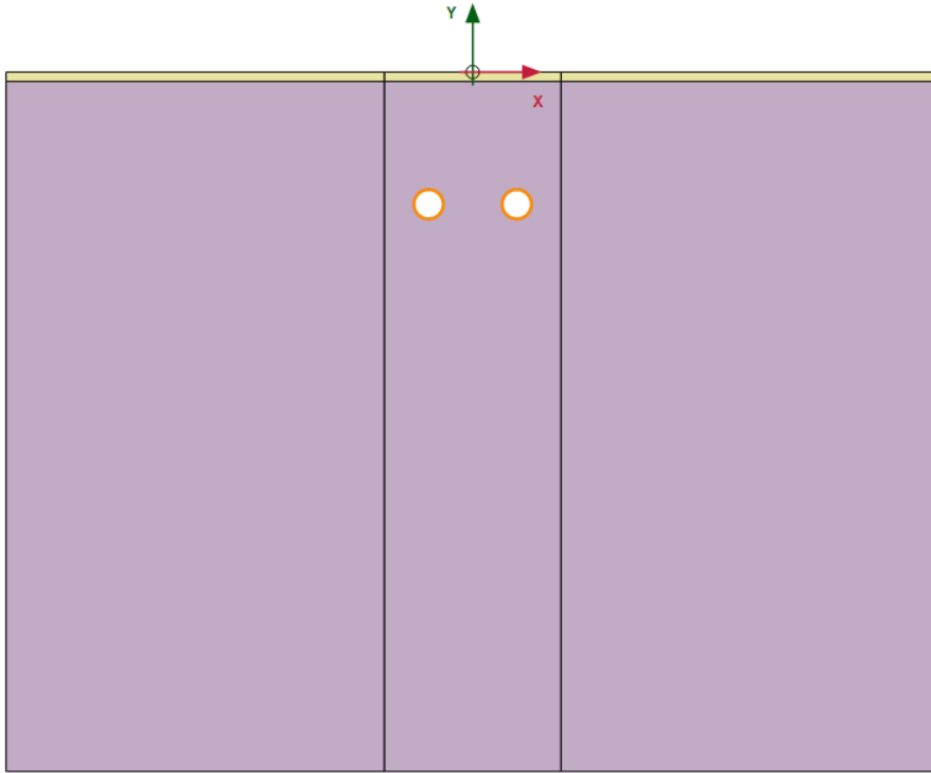
Identification		5.Tabaka-Kaya-Kirectasi-4	6.Tabaka-Kaya-Kirectasi-5
Identification number		5	6
Drainage type		Drained	Drained
Colour			
Comments			
γ_{unsat}	kN/m ³	26,00	26,00
γ_{sat}	kN/m ³	26,00	26,00
Dilatancy cut-off		No	No
e_{init}		0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000
E	kN/m ²	1,122E6	1,915E6
ν (nu)		0,3000	0,3000
σ_{ci}	kN/m ²	18,00E3	20,00E3
m_i		9,000	9,000
GSI		35,00	40,00
D		0,000	0,000
Ψ_{max}	°	0,000	0,000
σ_{Ψ}	kN/m ²	0,000	0,000
Undrained behaviour		Standard	Standard
Strength		Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000
R	m ² K/kW	0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes
$K_{0,x}$		0,5000	0,5000
$K_{0,z}$		0,5000	0,5000
Data set		Standard	Standard
Type		Coarse	Coarse
< 2 μm	%	10,00	10,00
2 μm - 50 μm	%	13,00	13,00
50 μm - 2 mm	%	77,00	77,00
Set to default values		No	No
k_x	m/day	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000
$-\Psi_{\text{unsat}}$	m	10,00E3	10,00E3
e_{init}		0,5000	0,5000

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu

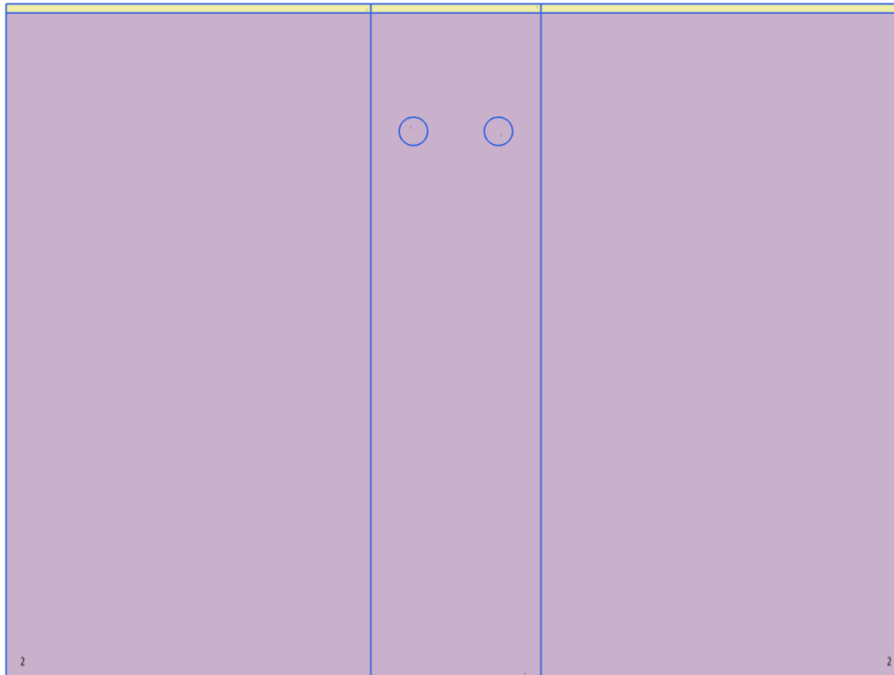
Çizelge E3. 4 Analiz 2 Plaxis programı – Tünel kaplama parametresi

Identification		TBM Segment (H=30cm) C45/55
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
Isotropic		Yes
End bearing		No
EA ₁	kN/m	9,772E6
EA ₂	kN/m	9,772E6
EI	kN m ² /m	60,00E3
d	m	0,2714
w	kN/m/m	7,500
ν (nu)		0,2000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Identification number		1
c	kJ/t/K	0,000
λ	kW/m/K	0,000
ρ	t/m ³	0,000
α	1/K	0,000

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu

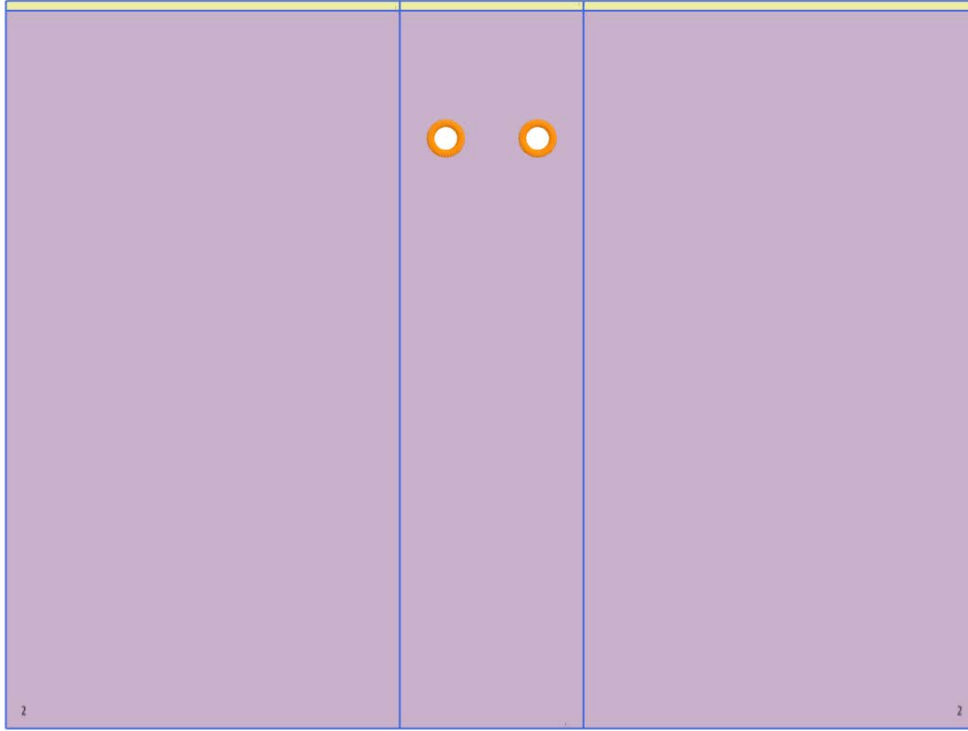


Şekil E3. 8 Analiz 7 Plaxis programı – zemin model gösterimi

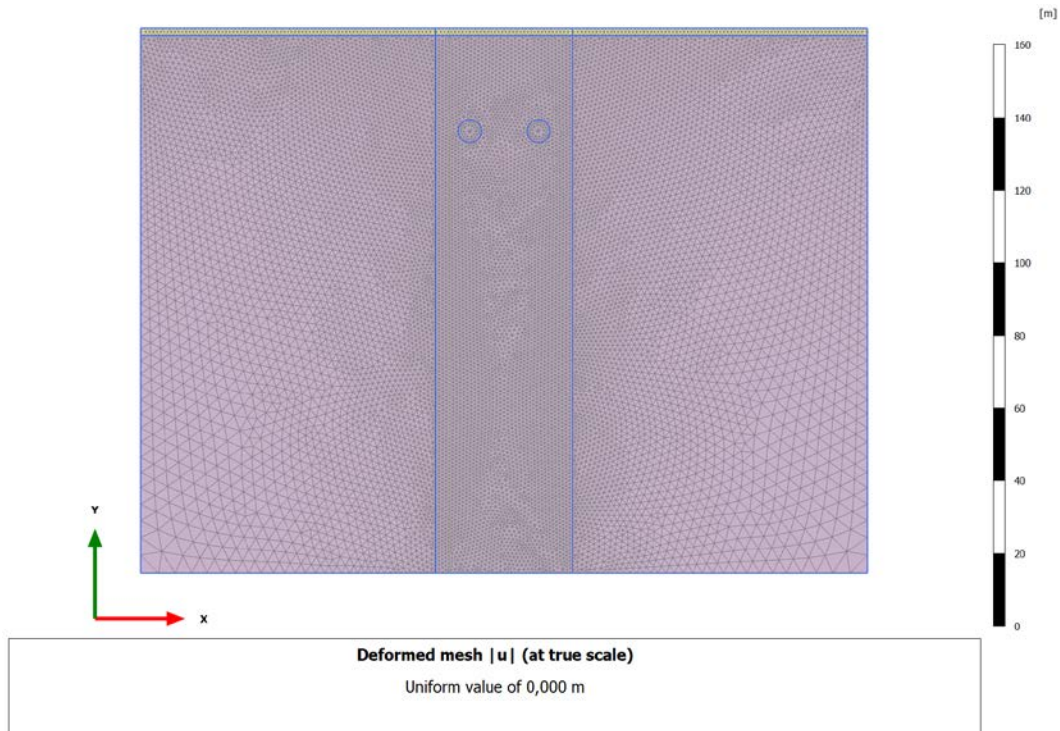


Şekil E3. 9 Analiz 7 Plaxis programı – Aşama 0 gösterimi

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu

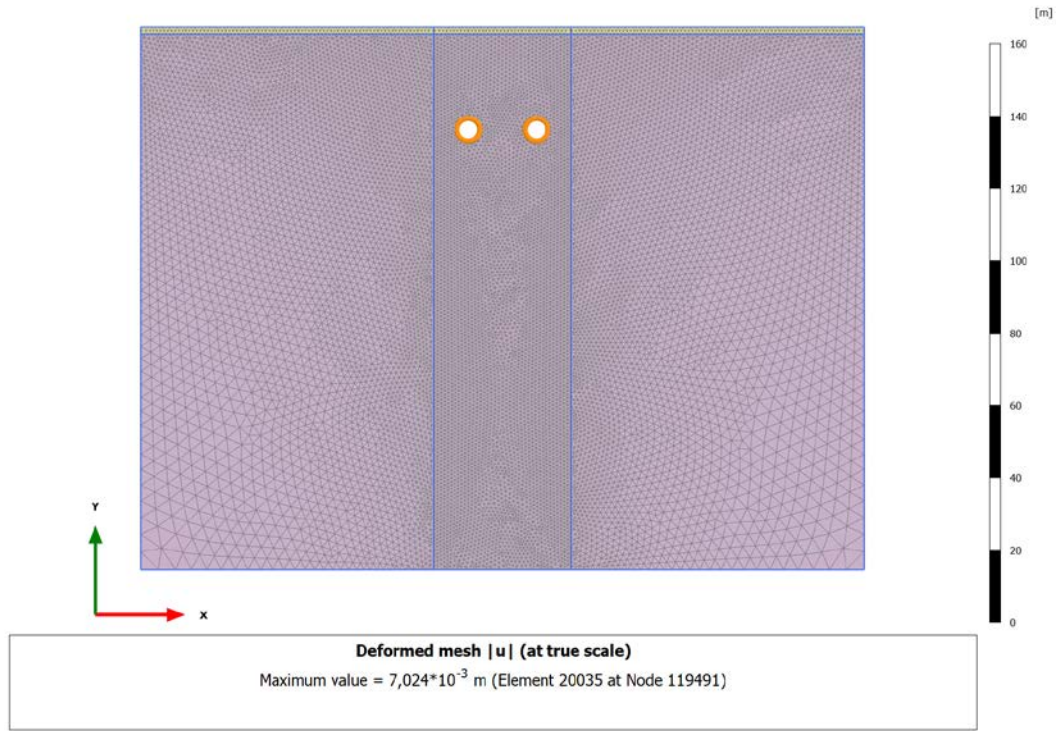


Şekil E3. 10 Analiz 7 Plaxis programı – Aşama 1 gösterimi

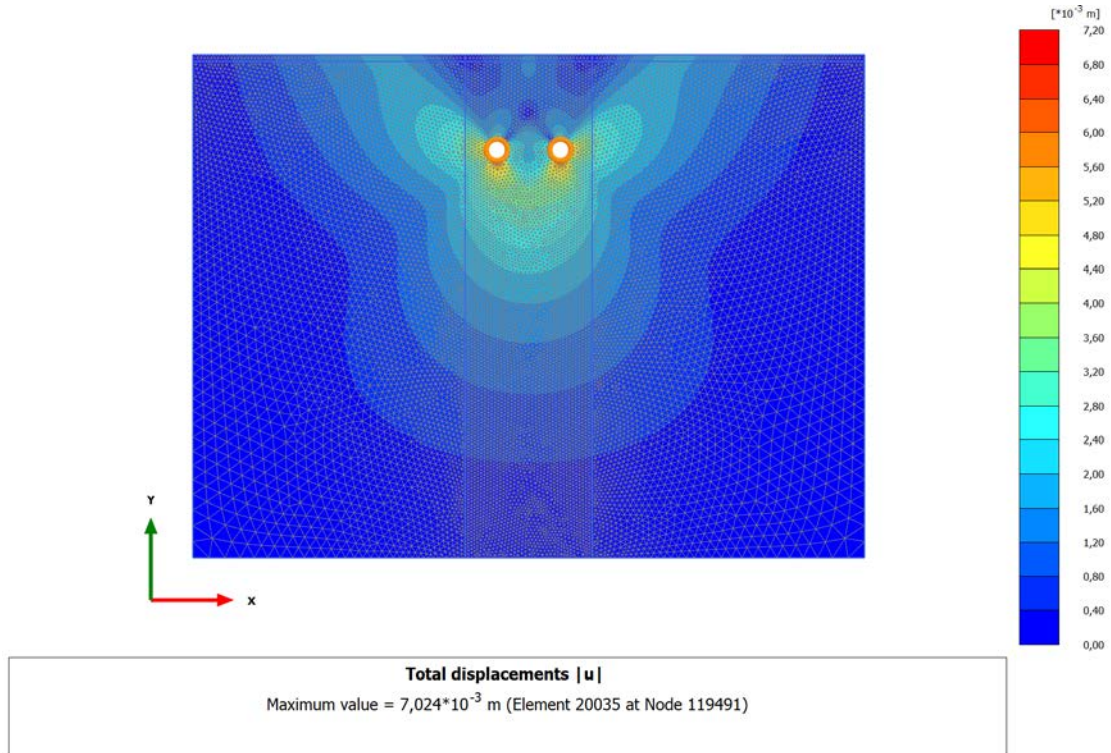


Şekil E3. 11 Analiz 7 Plaxis programı – Aşama 0 üçgenleme gösterimi

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu

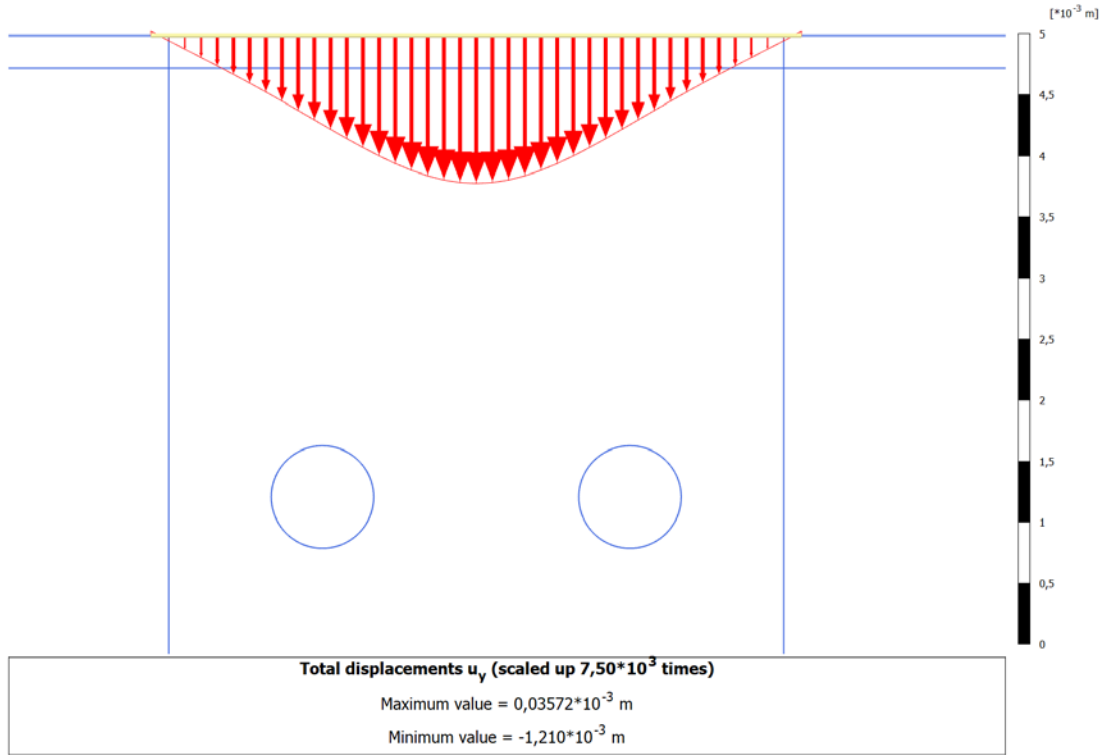


Şekil E3. 12 Analiz 7 Plaxis programı – Aşama 1 üçgenleme gösterimi



Şekil E3. 13 Analiz 7 Plaxis programı – kazıya bağlı zemin deformasyonu

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu



Şekil E3. 14 Analiz 7 Plaxis programı – kazıya bağlı yüzeyde oluşan oturma

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu

Çizelge E3. 5 Analiz 7 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Mohr Cloulomb

Identification		1.Tabaka - Kontrosuz Dolgu
Identification number		1
Drainage type		Drained
Colour		
Comments		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E	kN/m ²	10,00E3
ν (nu)		0,3000
G	kN/m ²	3846
E_{oed}	kN/m ²	13,46E3
C_{ref}	kN/m ²	5,000
ϕ (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
V_s	m/s	43,43
V_p	m/s	81,26
Set to default values		Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
ν_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	375,0E3
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
δ_{inter}		0,000
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,5000
$K_{0,z}$		0,5000

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu

Çizelge E3. 6 Analiz 7 Plaxis programı – Zemin tabaka parametreleri – Hardening Soil

Identification		2.Tabaka-Zemin-Sert Kil
Identification number		2
Drainage type		Drained
Colour		
γ_{unsat}	kN/m ³	19,00
γ_{sat}	kN/m ³	19,00
Dilatancy cut-off		No
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
E_{50}^{ref}	kN/m ²	80,00E3
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	80,00E3
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	160,0E3
power (m)		0,5000
Use alternatives		No
C_c		4,312E-3
C_s		1,941E-3
e_{init}		0,5000
C_{ref}	kN/m ²	15,00
ϕ (phi)	°	32,00
ψ (psi)	°	0,000
Set to default values		Yes
v_{ur}		0,2000
p_{ref}	kN/m ²	100,0
K_0^{nc}		0,4701
C_{inc}	kN/m ² /m	0,000
y_{ref}	m	0,000
R_f		0,9000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9866
v_u		0,4950
$K_{w,\text{ref}} / n$	kN/m ²	6,556E6
Strength		Rigid
R_{inter}		1,000
Consider gap closure		No
R	m ² K/kW	0,000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0,4701
OCR		1,000

EK-3. (devam) PLAXIS 2D programı sonuçları – Kaplama Deformasyonu

Çizelge E3. 7 Analiz 7 Plaxis programı – Tünel kaplama parametresi

Identification		TBM Segment (H=30cm) C45/55
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
Isotropic		Yes
End bearing		No
EA ₁	kN/m	9,772E6
EA ₂	kN/m	9,772E6
EI	kN m ² /m	60,00E3
d	m	0,2714
w	kN/m/m	7,500
ν (nu)		0,2000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Identification number		1
c	kJ/t/K	0,000
λ	kW/m/K	0,000
ρ	t/m ³	0,000
α	1/K	0,000



GAZİ GELECEKTİR...