

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜNEL KAZISI SEBEBİYLE MEYDANA GELEN ZEMİN OTURMALARI
VE MEVCUT YAPILARA OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hatice Gül SELMAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

MAYIS, 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜNEL KAZISI SEBEBİYLE MEYDANA GELEN ZEMİN OTURMALARI
VE MEVCUT YAPILARA OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hatice Gül SELMAN
501101031**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim BAKIRTAŞ

MAYIS, 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501101031 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Hatice Gül SELMAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“TÜNEL KAZISI SEBEBİYLE MEYDANA GELEN ZEMİN OTURMALARI VE MEVCUT YAPILARA OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. İbrahim BAKIRTAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Abdul HAYIR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Turgut KOCATÜRK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **02 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi : **27 Mayıs 2014**

Anneme,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ile kazılmış geniş gabarili bir makas tünelinin kazısı nedeniyle zeminde meydana gelebilecek oturmalar ve kazı etki alanı içerisindeki mevcut yapılara olan etkisi incelenmiştir. Tünel kazısı sebebiyle, zemin stabilitesi değişmekte olup, üstyapıya etkisi, zemin durumuna, kazı yöntemine, kazı ve iksa yapım hızına göre farklılıklar gösterebilmektedir. Bu çalışmada, geniş hacimli tek bir makas tünelin kazısının etkilerini ve zemin davranışını incelemek için nümerik analizlerde sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmiş ve zemin ile tünel kazı aşamaları Plaxis programında modellenmiştir. Elde edilen deformasyonlar ve zemin hareketleri sonucu Burland yöntemi kullanılarak bina hasarları tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Desteğini ve özverisini hiçbir zaman esirgemeyen, bilgi ve tecrübesi ile bana yardımcı olan değerli tez danışmanım Prof. Dr. İbrahim BAKIRTAŞ'a, değerli yardımlarından dolayı Üsküdar Ümraniye Çekmeköy Metro Projesi Proje Müdürü Melih DUMLU'ya, Proje Müdür Yardımcısı Ömer Uzay KARAKOYUNLU'ya, Tasarım Şefi Barış ÖZCAN'a ve İnş. Yük. Müh. Ozan ÇELİK'e teşekkürü bir borç bilir, en içten sevgi ve saygılarımı sunarım. Bu süreçteki değerli katkıları ve anlayışları benim için anlamlı ve önemlidir.

Lisansüstü eğitimimde bilgi, deneyim ve zamanını benimle paylaşan bütün hocalarıma ayrıca teşekkür ederim.

Yaşamım süresince desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, sevgi ve ilgileri ile bana büyük destek olan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam sırasında göstermiş olduğu sabır ve hoşgöründen dolayı ayrıca sevgili anneme teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2014

Hatice Gül Selman

İnş. Müh.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Konu	1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
2. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ.....	3
2.1 TBM İle Tünel Açma	3
2.2 NATM İle Tünel Açma	4
2.2.1 NATM kazı inşaat aşamaları.....	6
2.2.2 NATM kazı prensibi ve iksa elemanları	7
2.2.3 Farklı zeminlerde kazı yapılması ve iyileştirme	11
2.2.4 Tünel kazısı sırasında deformasyon ölçümleri.....	13
3. YÜZEY OTURMALARI VE BİNA HASAR DEĞERLENDİRMESİ	15
3.1 Zeminde Meydana Gelen Oturmaların Yapılara Etkileri	15
3.2 Tünel Tasarım Yöntemleri	16
3.2.1 Sonlu elemanlar yöntemi ve kullanılan program detayları	16
3.3 Oturma Analizi	17
3.3.1 Hacim kaybı hesabı	17
3.3.2 Oturma analizi metodolojisi.....	20
3.4 Bina Oturma Tahmini.....	22
3.4.1 Tünel kazısı nedeniyle binalarda oluşabilecek hasarın değerlendirilmesi için kullanılan metodoloji	23
3.4.2 Oturmalarla ilgili teknik şartname gerekleri	28
4. TÜNELİN MODELLENMESİ VE ANALİZ SONUÇLARI.....	29
4.1 Makas Tüneli Geometrisi ve İksa Bilgileri	29
4.2 Jeoloji ve Parametre Bilgileri	30
4.3 Makas Tünelinin Sonlu Elemanlar Modeli ve Parametreler	33
4.4 Analiz Sonuçları	37
5. HASAR DEĞERLENDİRMESİ.....	47
5.1 Bina Hasar Değerlendirmesi	47
5.2 İncelenen Binalar.....	49
5.3 Bina Hasar Değerlendirmesi	49
5.3.1 Birinci aşama değerlendirilmesi.....	49
5.3.2 İkinci aşama değerlendirilmesi.....	50
5.3.3 Üçüncü aşama değerlendirilmesi	51

5.4 Sonuç ve Değerlendirme	51
KAYNAKLAR.....	55
EKLER.....	57
ÖZGEÇMİŞ	77

KISALTMALAR

NATM	: Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu
TBM	: Tunnel boring machine
GSI	: Jeolojik dayanım indeksi
UCS	: Tek eksenli basınç dayanımı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : Görünen bina hasarlarının sınıflandırılması	24
Çizelge 3.2 : Birinci aşama değerlendirmesindeki güvenli oturma ve açılal dönme değerleri	24
Çizelge 3.3 : İkinci aşama değerlendirmesindeki güvenli çekme deformasyonu değerleri	25
Çizelge 4.1 : Tek eksenli basınç dayanımı testi sonuçları	31
Çizelge 4.2 : Girdi sonuçları	32
Çizelge 4.3 : Sonlu elemanlar modeli için geoteknik parametreler	33
Çizelge 4.4 : Oturma analizi sonuçları	45
Çizelge 5.1 : İncelenen binalar-1	48
Çizelge 5.2 : İncelenen binalar-2	49
Çizelge 5.3 : Birinci aşama değerlendirmesi	50
Çizelge 5.4 : Bina çekme birim deformasyon değerleri ve hasar değerlendirme sonuçları	50

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : TBM Segmenti	4
Şekil 2.2 : TBM Montajı	4
Şekil 2.3 : Deformasyon (u)-İksa Basıncı (P) değişimi	6
Şekil 2.4 : NATM kazı ilerlemeleri-1	6
Şekil 2.5 : NATM kazı ilerlemeleri-2	7
Şekil 2.6 : İksa sistemi tip yerleşim	7
Şekil 2.7 : Dairesel olmayan bir tünelde tipik iksa sistemi	8
Şekil 2.8 : NATM ile kazılan tünelde püskürtme beton uygulaması	9
Şekil 2.9 : NATM ile kazılan tünelde kaya bulonu uygulaması	10
Şekil 2.10 : NATM ile kazılan tünelde hasır çelik ve iksa uygulaması	10
Şekil 2.11 : NATM ile kazılan tünelde süren uygulaması	11
Şekil 2.12 : NATM ile kazılan tünelde aynaya destek yapılması	12
Şekil 3.1 : Yüzey oturması için Gauss eğrisi ve hacim kaybı	17
Şekil 3.2 : Oturma Oranlaması	18
Şekil 3.3 : Yüzey oturması – hacim kaybı değişimi	19
Şekil 3.4 : Yüzey oturması – örtü kalınlığı değişimi	19
Şekil 3.5 : Yüzey oturması – tünel çapı değişimi	20
Şekil 3.6 : Oturma eğrisi	21
Şekil 3.7 : Bina hasar değerlendirilmesinde kullanılan üç aşamalı yaklaşım	23
Şekil 3.8 : Bina, eşdeğer kiriş, eğilme davranışı, kayma davranışı	26
Şekil 3.9 : Aşağı ve yukarı doğru eğilme bölgelerinde yapı eşdeğer kiriş modeli	26
Şekil 4.1 : Makas Tüneli Yerleşimi	29
Şekil 4.2 : Makas Tüneli Geometrisi	30
Şekil 4.3 : Makas bölgesinde beklenen jeoloji	31
Şekil 4.4 : Kaya dayanım analizi	32
Şekil 4.5 : Plaxis model geometrisi	33
Şekil 4.6 : Plaxis model zemin bilgileri girilmesi	34
Şekil 4.7 : Plaxis model: Makas tüneli ilk destek parametreleri	34
Şekil 4.8 : Makas tüneli kazı aşamaları	35
Şekil 4.9 : Makas ilk kazı aşamaları	36
Şekil 4.10 : Makas ilk kazı aşamaları	36
Şekil 4.11 : Sonlu elemanlar modeli deforme olmuş şekil	37
Şekil 4.12 : Tünel çevresindeki efektif asal gerilmeler	37
Şekil 4.13 : Düşey yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı %0.1)	38
Şekil 4.14 : Yatay yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı %0.1)	38
Şekil 4.15 : Düşey yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %0.1)	39
Şekil 4.16 : Yatay yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı %0.1)	39
Şekil 4.17 : Düşey yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %0.5)	40
Şekil 4.18 : Yatay yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %0.5)	41
Şekil 4.19 : Düşey yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %0.5)	41

Şekil 4.20	: Yatay yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %0.5)	42
Şekil 4.21	: Düşey yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %1.0)	42
Şekil 4.22	: Yatay yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %1.0)	43
Şekil 4.23	: Düşey yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %1.0)	43
Şekil 4.24	: Yatay yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %1.0)	44
Şekil 5.1	: İncelenen binalar vaziyet planı	48
Şekil 5.2	: $V_L=0.1, 0.5, 1.0$ % için bina hasar kategorisi	51
Şekil 5.3	: Yüzey deformasyon bulonu yerleşimi	52
Şekil 5.4	: Yüzey deformasyon bulonu okumaları	53
Şekil 5.5	: Yüzey deformasyon okumaları grafiği	54

SEMBOL LİSTESİ

S	:	Tünel yüzeyindeki çökme değeri
P	:	Basınç
U_r	:	Radyal Yerdeğiştirme
V_s	:	Birim tünel uzunluğu başına yüzey oturması hacmi
V_L	:	Teorik kazı hacmi dışında kazılan zeminin hacim kaybı
S_{max}	:	Tünel yüzeyindeki maksimum çökme değeri
D	:	Tünel çapı
c	:	Derinlik
S(x)	:	Tünel aksından x mesafedeki oturma değeri
ε_b_{max}	:	Maksimum çekme birim deformasyonu
ε_d_{max}	:	Maksimum kayma birim deformasyonu
ε_h_{max}	:	Maksimum yatay deformasyon
U(x)	:	Yatay hareket
Z₀	:	Tünel aks derinliği
K	:	Jeolojik bir değer
i	:	Dönme noktasının tünel aksına olan mesafesi
L	:	Bina boyu
H	:	Bina yüksekliği
E	:	Bina Young modülü
G	:	Bina kayma modülü
L_h	:	Yukarı doğru eğilme bölgesindeki kısmi uzunluk
L_s	:	Aşağı doğru eğilme bölgesindeki kısmi uzunluk
D_h	:	Yukarı doğru eğilmede deformasyon
D_s	:	Aşağı doğru eğilmede deformasyon
E_{rm}	:	Kaya kütlelerinin elastisite modülü
m_i	:	Ana kaya için geomekanik sabiti
E_i	:	Ana kayanın elastisite modülü
f	:	İçsel sürtünme açısı
c	:	Kohezyon
v	:	Poisson oranı

TÜNEL KAZISI SEBEBİYLE MEYDANA GELEN ZEMİN OTURMALARI VE MEVCUT YAPILARA OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde kentsel bölgelerdeki tünel imalatının yüzeyde meydana getirdiği etki, binaları ve altyapı sistemlerini etkilemeyecek düzeyde olmalıdır. Yerin altında tünel kazılırken yüzeyde tünelin kazıldığı derinliğe ve zemine bağlı olarak oturmalar meydana gelir. Yüzey oturmaları, seçilen kazı yöntemine ve zemin koşullarına bağlıdır ve tünel kazısı sebebiyle meydana gelen hacim kaybının kaçınılmaz bir sonucudur. Bu oturmalar, dikkatle takip edilmediği ve/veya gerekli önlemlerle azaltılmadığı takdirde yapılara maddi hasar vermekle birlikte yıkılmalarına ve can kayıplarına sebep olabilir. Bu sebeple çeşitli kabuller ve metodolojilerle, tünellerin veya derin kazıların yapılması durumunda yüzeyde meydana gelebilecek oturmalar ve bu oturmaların mevcut binalara olan etkisinin irdelenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada incelenen tünel, çeşitli yapıların altından geçmektedir ve bu nedenle kazı sırasında yapılarda meydana gelecek hasar düzeylerinin belirlenmesi oldukça gerekli bir hal almıştır.

Bu çalışmada Üsküdar Ümraniye Çekmeköy Metro Projesi kapsamında Çekmeköy ilçesinde kazılan (NATM ile) geniş hacimli bir makas tünelinin mevcut üstyapılara olan etkisi incelenmiş ve Burland yöntemi ile bina hasar değerlendirmesi yapılmıştır.

Çalışma beş bölümden oluşmaktadır:

Birinci bölümde, çalışmanın amacı, kapsamı ve literatür ile ilgili bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde, Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (NATM) ile ilgili bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde, yüzey oturmalarının yarı ampirik analizi ve metodolojisi anlatılmış ve bina hasar değerlendirmesi yöntemi açıklanmaya çalışılmıştır.

Dördüncü bölümde, Üsküdar Ümraniye Çekmeköy Metro Projesi güzergahındaki makas tüneli lokasyonu, zemin durumu, zemin parametreleri, makas tüneli geometrisi ve kazı aşamaları ile ilgili bilgi verilmekte ve Plaxis modellemesi açıklanmaktadır.

Son bölümde ise analiz sonuçları ve bina değerlendirmelerine yer verilmektedir.

SOIL MOVEMENTS INDUCED BY TUNNELING AND THEIR EFFECTS ON EXISTENT BUILDING

SUMMARY

In the present days, the possible effects of tunnel construction on the surface must be at a level that is not going to be harmful for buildings and substructures in urban areas. Settlements are most likely to happen on the surface due to soil type and the depth of excavation as the tunnel is being constructed underneath. Besides, these settlements depend directly on selected tunneling method, soil condition and is also an inevitable consequence of volume loss that happen during the excavation process. Settlements might be the reason of severe damages on the structures and even cause loss of lives unless they are tracked down carefully or be reduced with proper precautions. Hence, detailed evaluation of surface settlements together with their possible damages on structures and assessments derived from them based on certain assumptions and methodologies reserve a vital place. The tunnel in question of this study passes under various types of structures. Therefore, identification of damage level during excavation has become an obligation.

Tunnel construction in urban areas has as main challenge limiting surface disturbance induced to buildings and existing surface and buried utilities. Settlements are the result of the ground conditions and of the excavation method, which inevitable produce a certain volume loss. The surface settlements are calculated using the semi empirical approach of the Gaussian curve theory. This method for calculating transverse settlements was firstly described by Martos (1958), Peck (1969) and Schmidt (1969). They proposed that the shape of the settlement through could be well represented by a Gaussian or Normal distribution curve. Later on, O'Reilly and New (1982) developed the Gaussian model considering that the ground loss could be represented by a radial flow of material to the tunnel and the trough could be related to the ground conditions through an empirical width parameter. Therefore, several semi empirical equations were developed based on excavation case studies giving a suitable procedure of the general surface settlements behavior. Where the tunnel drive passes below an existing structure, it is important to estimate these settlements upon the structure. However, the ground deformations should not simply be imposed upon a structure, because the structure contributes to stiffening of the ground.

In this study, a widen tunnel excavating with NATM effects on existing building is determined and given information about building assessment with Burland Method.

The study consists of five main sections:

In the first section, general issues and the purpose and the scope of this study are described and recent experimental and theoretical studies are addressed.

In the second section, NATM is described. This method has been developed basically in Austria therefore its name make use of providing flexible primary lining in shape of shotcrete, wire mesh, rock bolts, lattice girder. In case of weaker rock mass the use of pipe forepole/pipe roofing is also resrted for crown support which in turn lead to less overbreak as well as ensure safety during the execution. The main aspect of the approach is dynamic design based on rock mass classification as well as the in deformation observed.

Third section is explained to semi-empirical and FEM analysis of surface settlement and methodology and building risk assessment. The surface settlements are calculated using the semi empirical approach of the Gaussian curve theory. This method for calculating transverse settlements was firstly described by Martos (1958), Peck (1969) and Schmidt (1969). They proposed that the shape of the settlement through could be well represented by a Gaussian or Normal distribution curve. Later on, O'Reilly and New (1982) developed the Gaussian model considering that the ground loss could be represented by a radial flow of material to the tunnel and the trough could be related to the ground conditions through an empirical width parameter. Therefore, several semi empirical equations were developed based on excavation case studies giving a suitable procedure of the general surface settlements behaviour.

The deformation and stress analyses around the opening can be performed by means of a Finite Element Method. Monitoring and controlling the excavation, placing the in-situ tests, evaluating the material properties, analyzing the laboratory test, developing the design charts and tables can also be executed in FEM analysis. Especially different loading and modeling conditions can be considered in this method.

In the fourth stage is explained to widen tunnel (from Üsküdar Ümraniye Metro Project) location, alignment, ground condition, ground parameters, geometry and construction sequences and Plaxis modal.

In the last stage, the study is substantially summarized. Analyze' results and building assessment is explained.

1. GİRİŞ

1.1 Konu

Gelişmekte olan her kentin ulaşım problemine en etkin çözüm olan metro hatlarının yapımı, özellikle şehir içinde ve yapılaşmanın sık olduğu bölgelerde detaylı ve nitelikli bir araştırma, inceleme ve ölçüm gerektirmektedir. Günümüzde zemin üst-yapı ilişkisi önemli bir çalışma ve araştırma alanı iken, tünel kazısı sırasında zeminin davranışı ve üstyapılar ile etkileşimi de metro inşaatları sırasında öncelik verilen konulardandır.

Çalışmanın konusu İstanbul’da yapımı devam etmekte olan Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy metro projesi kapsamında, Çekmeköy ilçesinde kazılan T4 makas tüneline kazı sırasındaki zemin davranışını ve hacim kaybını belirlemek ve bu sebeple etki alanında bulunan binalarda meydana gelebilecek hasarı belirlemektir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışma kapsamında geniş hacimli bir makas tüneline kazısı sırasında meydana gelebilecek deformasyonlar ve kazı etkileşim alanında bulunan yapılara etkisi irdelenmiştir.

Yüzey oturmaları ele alınırken, oluşan hacim kaybının belirlenmesi ve kaplamanın modellenmesi belirleyici faktörlerdir. Tünel açılması sırasındaki oturmaları belirlemekte sıklıkla kullanılan yöntem bir sayısal hesap yöntemi olan “Sonlu Elemanlar Yöntemi”dir. Sonlu elemanlar yöntemi ile Plaxis programında [1] zemin ve tünel modellenerek deformasyonlar ve zemin davranışı belirlenmiştir. Bundan sonraki aşamada ise yüzey oturmaları ve yapıların hasar değerlendirmesi gelmektedir. Yüzey oturmaları Gauss eğrisi teorisinin yarı ampirik yaklaşımı kullanılarak hesaplanır. Bu yöntem ilk olarak Martos (1958), Peck (1969) ve Schmidt (1969) [2] tarafından tanımlanmıştır. Söz konusu araştırmacılar, oturma eğrisinin şeklinin en iyi Gauss eğrisi veya normal dağılım eğrisi ile temsil edileceğini savunmuşlardır. Sonraki dönemde, O’Reilly ve New (1982) [3] zemin hacim kaybının zemin koşullarına bağlı olduğunu ve tüneline içinde radyal yöndeki zemin

akışı ile temsil edileceğini gösteren Gauss modelini geliştirmiştir. Böylece, belirli örneklerle ilgili olarak genel yüzey oturma davranışını veren çeşitli yarı ampirik bağıntılar geliştirilmiştir.

Bina değerlendirmesi ise hesaplanan zemin/kaya hareketleri ve bunların yapılara olan etkileri kullanılarak, muhtemel etkiler üzerine bir değerlendirmeyi ifade eder. Bina değerlendirmesinde kullanılan metodoloji Mair (1996) [4] tarafından önerilen üç aşamalı bir değerlendirmedir. Bina değerlendirmesi sonuçlarına göre koruma gerekleri değerlendirilmektedir. Eğer hesaplanan oturmalar binaların kabul edilebilir eşik değerlerini geçerse ek önlemler göz önünde bulundurulabilir.

Bu çalışmada Üsküdar Ümraniye Çekmeköy Metro Projesi kapsamında Çekmeköy ilçesinde kazılan (NATM ile) geniş hacimli bir makas tünelinin mevcut üstyapılara olan etkisi incelenmiş ve Burland [5] yöntemi ile bina hasar değerlendirmesi yapılmıştır.

Birinci bölümde, çalışmanın amacı, kapsamı ve literatür ile ilgili bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde, Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (NATM) ile ilgili bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde, yüzey oturmalarının yarı ampirik analizi ve metodolojisi anlatılmış ve bina hasar değerlendirmesi Burland yöntemi açıklanmaya çalışılmıştır.

Dördüncü bölümde, Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Projesi güzergahındaki makas tüneli lokasyonu, zemin durumu, zemin parametreleri, makas tüneli geometrisi ve kazı aşamaları ile ilgili bilgi verilmekte ve Plaxis modellemesi açıklanmaktadır.

Son bölümde ise analiz sonuçları ve bina değerlendirmelerine yer verilmektedir.

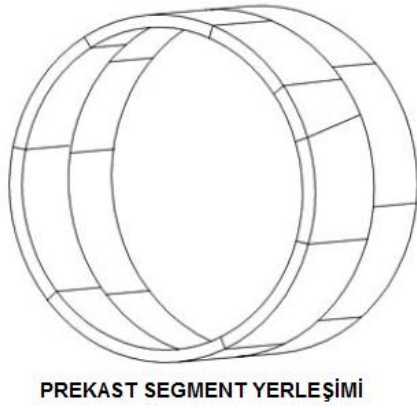
2. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

Tüneller geometri ve gabarilerine göre Yeni Avusturya Yöntemi (NATM) veya teknolojik makinalarla (TBM) kazılabilir. Peron, makas, makas bağlantıları ve paralel tüneller arası acil kaçış bağlantı tünelleri başta olmak üzere gerekli görülen yerlerde tünellerin bir kısmının “Yeni Avusturya Tünel Açma” (NATM) yöntemiyle, güzergah anahat tünellerinin ise mekanize olarak “Tünel Açma Makinesi” (TBM) ile aılabilmektedir. TBM’in (Tunnel Boring Machine) ortaya çıkmadığı dönemlerde anahat tünelleri de yine NATM yöntemi ile kazılmaktadı.

2.1 TBM İle Tünel Açma

Tam kesitli kazılarda, kalıcı kaplamasını imal ederek ilerleyen mekanizma TBM’in esasını oluşturmaktadır. Sistem; inşa edilmesi tasarlanan boyutta dairesel bir silindirik formu olan ring içerisinde tünel yapımı için gerekli teknolojiyi barındıran bir tünel yapım makinesidir. TBM makinelerinin tasarımı; tünel büyüklüğü, tünel i kaplama cinsi, zemin ve proje koşullarına göre belirlenmektedir. Sistemin baş kısmında kazılması planlanan zemin koşullarına göre tasarlanmış bir kazıcı kafa ile kazılan malzemenin dışarıya taşınmasını sağlayan konveyör bant gibi bir sistem mevcuttur. Makinenin silindirik formu kazılan zemini tutarak zemin stabilizesini korur. Çalışma biçimi zemin koşullarına göre değişmekle beraber, zayıf zonlarda EPB modda yani ayna basıncı uygulayarak, sağlam zonlarda ise kapalı modda ilerleyebilmektedir.

TBM’in kaplama elemanlarına segment denilmektedir. Prekast olarak imal edilen bu parçalar TBM içerisine yerleştirilerek nihai kaplama imalatı da kazı sırasında gerçekleşmiş olur. Projesine göre tasarlanan ve üretilen segmentler bir ringi tamamlamak için çeşitli adetlerde imal edilebilir. Burada her ringte birleşimi tamamlayan ve diğer parçalara göre ebat olarak daha küçük olan “kilit” elemanı mevcuttur.



Şekil 2.1 : TBM Segmenti

TBM'lerin projesine göre üretilmesi, nakliyatı, montajı ve kazı aralarında (ayna değişikliği) bakımı, demontajı gibi konular kazı hızını etkileyen ve maliyeti belirleyen konulardandır.



Şekil 2.2 : TBM Montajı

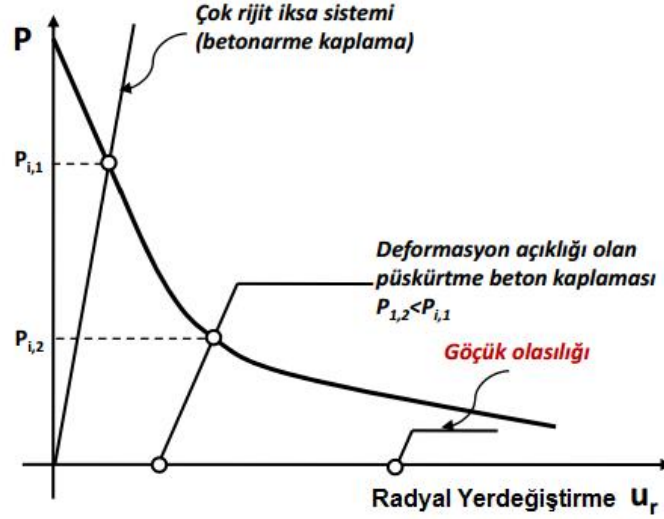
2.2 NATM İle Tünel Açma

Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi zeminin kendisini taşıma prensibine dayanmaktadır. İksa imalatında esas amaç: Kazıya acil destek sağlamak, tünel deformasyonlarını kabul edilebilir seviyelerde tutmak ve kalıcı kaplama imalatına kadar kazı stabilitesini güvenli bir şekilde sağlamaktır. Açılan bir boşlukta, boşluğu çevreleyen yan cidarlarda ortaya çıkan kuvvetlerin dikkatle ve uygun olarak yeniden

uyarlanması işlemi ve kuvvetlerin kontrolü ile buna bağlı olarak seçilen tahkimatın (iksa) uygulanması bu yöntemin esasını oluşturmaktadır.

En uygun kazı ve tahkimat yöntemleri kullanılarak kazıdan sonra oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonların, yapılan tahkimatlar ile birlikte kayaya taşıtılması, yönlendirilmesidir. Tünel kesitini çevreleyen kayaç zonunun ilk sağlamlığının olabildiğince korunarak, tüneli çevreleyen bölgenin kendi kendini tutarak doğal bir tahkimat oluşturması amaçlanmaktadır. Böylelikle boşluğu çevreleyen kayaç zonunun yük oluşturan değil yük taşıyan bir konuma geçmesi sağlanır. [6] Bu yöntem, dairesel olmayan tünel kesitler ve karmaşık tünel kesişmelerinde uygulanabilirliği sebebiyle, *püskürtme beton* ile kaplama uygulaması tünelcilikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük inşaat ekipmanı maliyetleri de bu uygulamanın tercih edilmesinde etkili olan bir diğer önemli faktördür. Genel olarak, püskürtme beton ile kaplama uygulaması Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (NATM) olarak ifade edilmektedir. NATM’da tünel ayna duraylılığı ve yüzey oturumlarındaki sınırlamalara bağlı olarak tünel ilerlemesi genellikle farklı tünel açım aşamaları ve açım uzunlukları ile yapılır. NATM yönteminde proje değişikliği sürekli söz konusu olan bir durumdur. Sondajlarla ve geoteknik parametrelerle belirlenen iksa sistemi, yerinde farklı jeoloji ile karşılaşılması durumunda değiştirilebilir. Bu sebeple NATM tünel kazısı projeleri farklı zemin sınıflarında alternatifli projeler olarak üretilir ve ayna jeolojisi de takip edilerek, belirlenen sınıf için hazırlanan iksa sistemi tatbik edilir. Beklenmedik zemin durumlarında (zemin boşlukları, fay zonları, zemin gelmesi durumu vb.) ilave tedbir ve önemler alınarak kazıda ilerlenmesi gerekir.

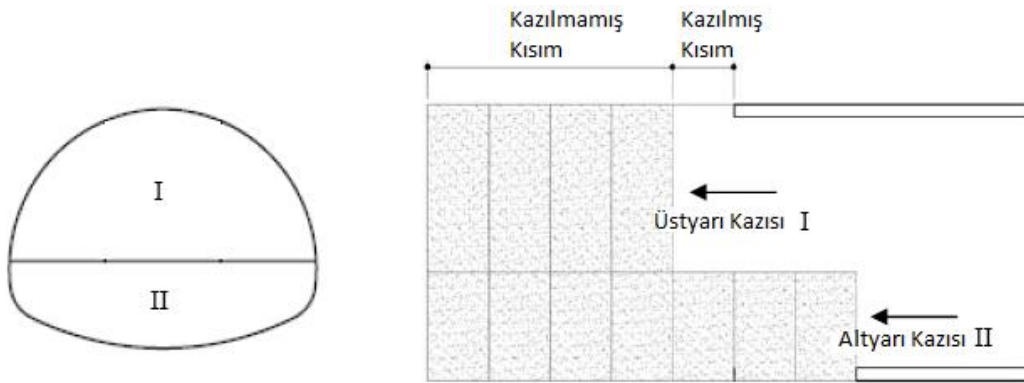
Kazı faaliyetlerinden sonra yapılacak kaplama veya iksa rijitliğine bağlı olarak taşınan arazi basıncı (P) ve deformasyonlar değişebilmektedir. Kazı faaliyetlerinden hemen sonra çok rijit bir iksa sisteminin yerleştirilmesi durumunda kaplama tarafından taşınan arazi basıncı yüksek olur ve bu pahalı bir çözümdür. Tünelde radyal yerdeğiştirmenin kontrollü bir şekilde artmasına izin verecek iksa sisteminin taşıdığı “basınç” önemli ölçüde azaltılabilir ve ekonomik iksa çözümleri üretilebilir. Eğer iksa sistemi kazı bölgesine geç yerleştirilir ve taşıma kapasitesi de yeterli değilse, fiziksel olarak “denge noktası” oluşmadığından deformasyonlar ve göçük oluşur. [7]



Şekil 2.3 : Deformasyon (u) -İksa Basıncı (P) değişimi [7]

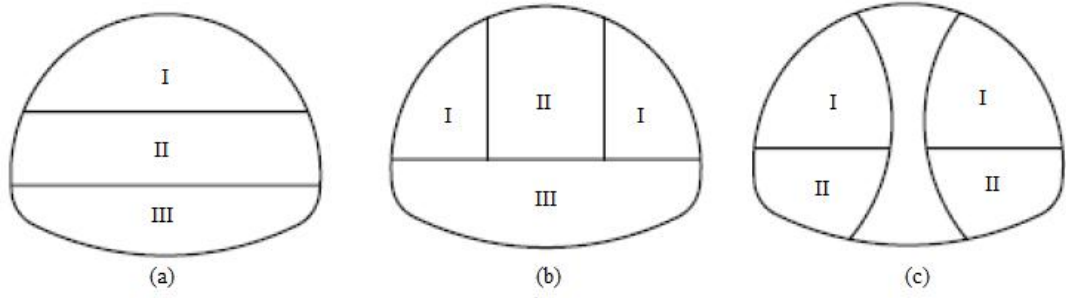
2.2.1 NATM kazı inşaat aşamaları

NATM ile açılacak bit tünelin kazı şekli, iksa sistemine, zemin durumuna, tünel geometrisine, tünelin kazılacağı güzergahtaki yerüstü yapılarına göre değişiklik göstermektedir. Dairesel olmayan bir tünel kesitinde, tam kesit kazı yapılacağı gibi, çok parçalı kazı yapılması da mümkündür. Genel olarak NATM bir tünel üstyarı ve altyarı olmak üzere iki aşamalı kazılarla açılır.



Şekil 2.4 : NATM kazı ilerlemeleri-1

Kazı yapılırken üstyarı altyarıdan projelerde belirtilen mesafelerde önde kazılarak ilerlenir ve destek sistemi inşa edilir. Sağlam kaya ortamında gidilmesi durumunda altyarıya iksa imalatı yapılmayabilir.

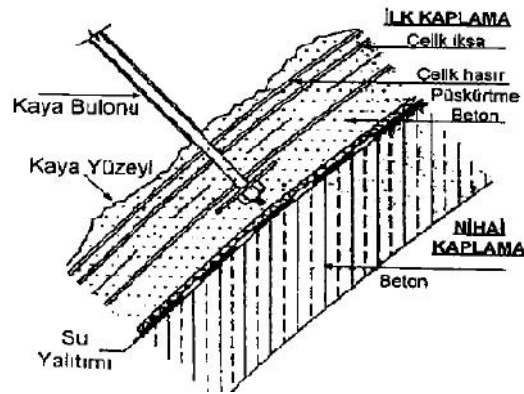


Şekil 2.5 : NATM kazı ilerlemeleri-2

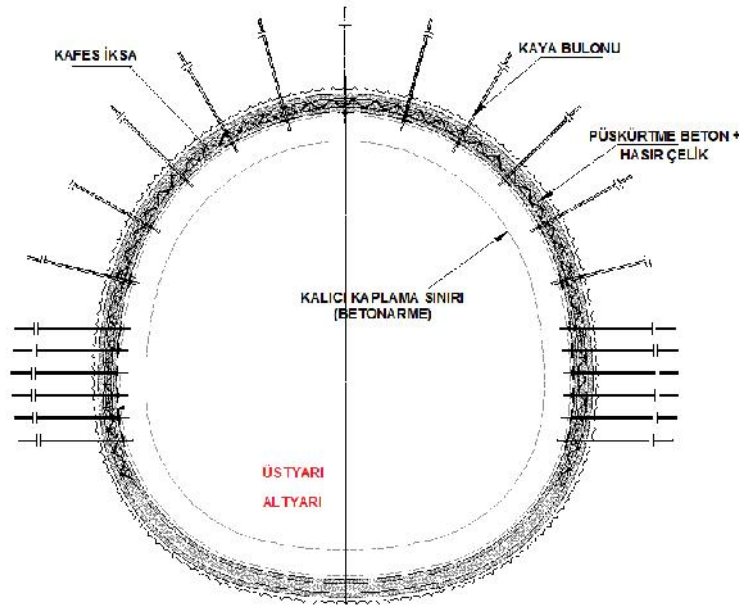
Zemin durumunun kötüleşmesi veya deformasyonların sınırlandırılması için üstyarı kazısı bölümlenebilir (a ve b) ya da çapraz diyagram metodu (c) ile kazı işlemi yapılabilir. Özellikle makas tünelleri gibi büyük kazı kesitlerinde (b) ile belirtilen biçimde yani üstyarının bölümlenerek kazılması durumu sıkça tercih edilir. Bazı projelerde altyarının da bölümlenerek kazılması planlanabilir.

2.2.2 NATM kazı prensibi ve iksa elemanları

Tünel kazısında ilk destekleme elemanı olarak püskürtme beton kullanılır. İksa yapısını genel olarak Şekil 2.6'da görüldüğü gibi püskürtme beton, çelik hasır, çelik iksa (profil veya kafes iksa) ve bulon oluşturmaktadır.



Şekil 2.6 : İksa sistemi tip yerleşim



Şekil 2.7 : Dairesel olmayan bir tünelde tipik iksa sistemi

NATM iksada ana taşıyıcı eleman püskürtme beton kaplamadır. Püskürtme beton; ince kum, agrega, çimento, çelik elyaf, priz hızlandırıcı karışımlardan oluşan kuru yada ıslak olarak teşkil edilebilen ve kazı yüzeyine püskürtme suretiyle yapıştırılabilen bir çeşit harçtır. Püskürtme beton kazı yüzeyine yakın, zemin veya kayanın kesme dayanımını artırır, tünel kesiti çevresindeki kayanın gevşememesini, kayadaki süreksizlikleri doldurarak dökülmeleri ve sökülmeleri önler. Kazıdan hemen sonra oluşan gerilme ve deplasmanların bir kısmını karşılar. İksa projesine göre donatılı ve donatısız olarak kullanılır. Püskürtme beton kaplama aynı zamanda bulonların çakıldığı, *bulonlama* noktaları arasındaki yüzeyin dengelenmesi özelliğine sahiptir.

Püskürtme beton uygulaması olabildiğinde kazı şekli ile uyumlu olarak uygulanmalı iksa yüzeyinde dalgalanmış bir görüntü ile imal edilmemelidir. Püskürtme beton uygulaması yapıldığı sırada tünel havalandırmasına da dikkat edilmelidir.

Püskürtme beton kalınlığı zemin durumuna, tünel geometrisine göre değişken olmakla birlikte sağlam kayada 5-15 cm, orta sertlikte bir zeminde 15-25 cm, zayıf zeminde ise 25-50 cm kalınlığında uygulanabilmektedir.



Şekil 2.8 : NATM ile kazılan tünelde püskürtme beton uygulaması

İksa sisteminin bir diğer önemli elemanı da kaya bulonlarıdır. Bulonlarda zeminin yükünün taşınması plaka yardımı ile yapılmaktadır ve bu nedenle bulon her noktasında gerilmeye çalışmakta ve gerilme her noktada aynı olmaktadır. Kaya bulonları kayayı çekme gerilmelerini taşıyabilecek şekilde sağlamlaştırmak, çekme gerilmelerini ana kayaya iletmek, süreksizliklerin sürtünme direncini arttırmak veya kayada üç eksenli gerilme durumu oluşturmak için yerkabuğu içine bağlanan demir çubuklardır. Amacı kazı sonrası ikincil durumlar sebebi ile oluşan plastik deformasyon bölgesini, elastik deformasyon bölgesine tutturarak, doğal dengesi bozulan kayaçları sağlamlaştırmaktır. Çeşitli tipte kaya bulonları vardır, bunların seçimi ihtiyaca göre belirlenir. Kaya bulonları (genelde Ø26 veya Ø32'lik dişli donatılardır), sehpalı el tabancaları veya delici makine ile açılmış deliklere enjeksiyon (su, çimento karışımı) şarj edildikten sonra yerleştirilerek uygulanır. Bulon plakaları, püskürtme betona veya zemine yapışacak duruma gelene kadar bulon somunu sıkılarak uygulanır. Enjeksiyonun gereken priz süresi sonunda, somun tork anahtarı ile sıkılarak bulona gereken tork verilir. Bulon boyları, çapları, aralıkları ve adetleri tünel kesitine, zemin cinsine, iksa sistemine bağlı olarak değişmektedir. Kaya bulonları tek başlarına tahkimat elemanı olarak uygulanabildiği gibi, tünellerde, iksa, hasır-çelik ve püskürtme betondan oluşan tahkimatın tamamlayıcı elemanı olarak kullanılmaktadır. Taşıyıcı plakaları püskürtme beton kabuğunun yüzeyine basacak biçimde, kabuğun kaya kemeri ile birlikte çalışmasını sağlar.



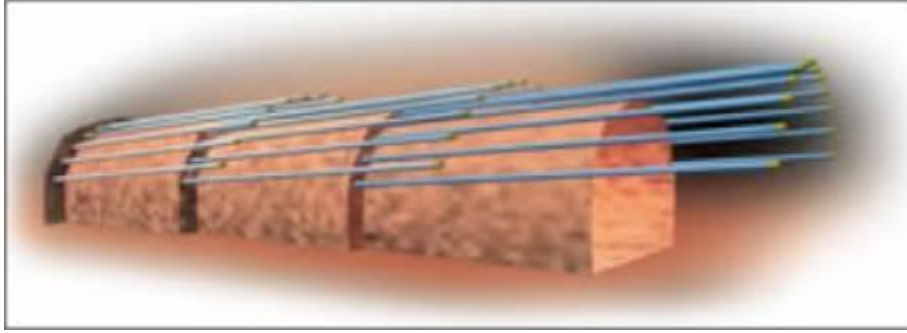
Şekil 2.9: NATM ile kazılan tünelde kaya bulonu uygulaması

İksa sisteminin bir diğer elemanı çelik hasır ve çelik iksa'dır. Ek tahkimat olarak hasır çeliklerin ön görevi zayıf zonlar arasındaki iksayı arttırıcı köprü olarak çalışmasıdır. Çelik iksa, kazı yapılan tünel kesitinde püskürtme beton dayanımını kazanıncaya kadar geçen sürede yapım güvenliğini sağlamak ve püskürtme betonda yük dağılımına yardımcı olmak amacıyla kullanılırlar. Tünellerde kullanılan çelik hasırlar, anolar arasında, projelerde belirtilen bindirme boyu kadar bindirme yapılarak sürekliliği ve sistemin rijitliğinin devamı sağlanır. Montaj sırasında donatının kaya yüzeyine mümkün olduğunca yaklaştırılması ve tünel geometrisine uygun yerleştirilmesi dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur. Hasır çelik uygulaması zemin durumuna göre belirlenir. Genelde tünel tavanı ve yan cidarlara hasır çelik montajı yapılır. (Altyarı kazısında hasır çelik montajı zemin durumunun çok kötü olduğu durumlarda yapılabilir.) Montajı yapılmış hasır çelik kapanıncaya kadar püskürtme beton uygulaması ile betonarme bir yapı elde edilir. Çelik iksa ise hasır çelik altına yerleştirilmekte olup tipleri kaya veya zemin ortamına göre çelik profil veya kafes kiriş olarak seçilebilir.



Şekil 2.10 : NATM ile kazılan tünelde hasır çelik ve iksa uygulaması

Zayıf ve çok zayıf zemin ortamlarında, iksa sisteminde tercih edilen ilave bir yöntem de süren montajıdır. Kazı sonrası dökülmeye meyilli kaya-zemin ortamlarında, özellikle sulu bölgelerde, kazıya girmeden önce süren uygulaması yapılır. Sürenler, tünel kesitinde, dairesel olan tavan kesitinden omuzlara (yan cidarlara doğru) kadar olan bölümde, kazı yönünde şemsiye şeklinde uygulanmaktadır. Bu uygulamadaki amaç bir sonraki kazı tavanının duraylılığını sağlamaktır. Süren tesis edilmesi daimi kalıcı iksa uygulaması gerektirir. Çelik iksa üzerinden yatayla maksimum 5 ile 10 derece açı yapacak biçimde çakılırlar, adetleri ve boyları kazı destek türlerine göre değişir.

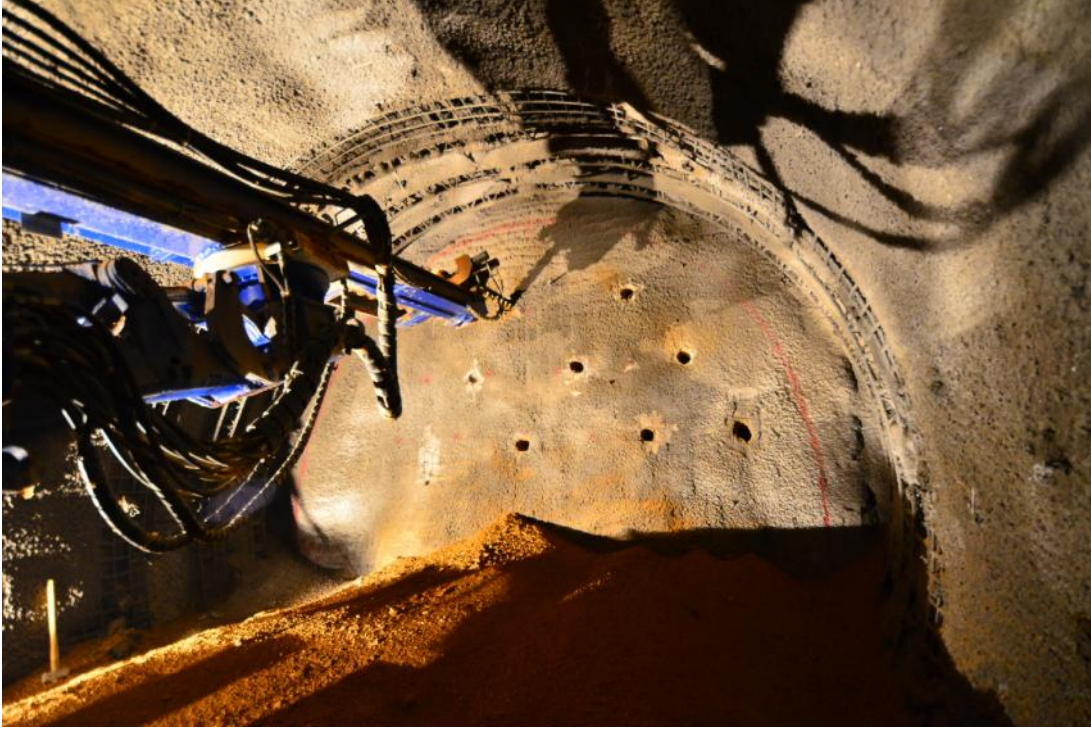


Şekil 2.11 : NATM ile kazılan tünelde süren uygulaması

2.2.3 Farklı zeminlerde kazı yapılması ve iyileştirme

Tünel açma işlemleri farklı zemin bölgelerinde yapılabilir. Bu durum farklı koşullarda, farklı hızlarda ve önlemlerle ilerlemeyi beraberinde getirir. Çok zayıf zeminlerde hem göçük hem de oturma problemleri öncül meseleler olduğundan kazıya başlamadan önce güvenli çalışma ortamı da oluşturulması için iyileştirme, ilk tahkimat ve çok parçalı kazılar yapılabilir. Özellikle tünellerde lokal olarak zemin gelmesi durumu, zeminde karşılaşılan karstik boşluklar veya gözenekler dolgu enjeksiyonu yapılarak doldurulur. Dolgu enjeksiyonu özellikle yüzeyde oluşabilecek oturmaların ve tünele su gelmesinin azalmasına katkı sağlamaktadır. Bir diğer zemin iyileştirme yöntemi ise çimento enjeksiyonudur. Çimento, kum ve su karışımı, çatlaklı ve parçalı kayaç ortamlarda uygulanarak, tanelerin birbirine yapışmasını ve birlikte çalışmasını sağlayarak homojen bir mekanik davranış oluşmasını sağlar. Jet dolgu (Jet Grouting) uygulaması da zemin iyileştirme de önemli bir uygulamadır. Yüksek basınç altında uygulanan çimento şerbeti zeminle karıştırılarak dayanımlı bir zemin ortamı oluşturulur.

Zayıf bir zeminde kazı yapılıyorsa kazı öncesi zemin, enjeksiyon veya uygun görülecek bir başka metotla (Jet Grouting) ile sağlamlaştırılarak ve geçirimsiz hale getirilerek kazıya başlanmaktadır. Kazı, kırıcı uçlu makinalar ile kısa adımlarla yapılır. Sonraki aşamada iksa yerleşimi yapılır. Tünelde kazı yüzeyi “ayna” olarak nitelendirilmektedir. Tünel aynasının tutulması için aynaya da püskürtme beton, hasır çelik ve kaya bulonu (veya zemin çivisi) yerleşimi yapılabilir.



Şekil 2.12 : NATM ile kazılan tünelde aynaya destek yapılması

Orta sertlikte bir zeminde kazı yapılıyorsa zeminde enjeksiyon uygulamasına gerek olmadan kazı kırıcı uçlu makinalarla yapılabilir. Genelde bir aynada kazı ve kazı malzemesi nakli yapılırken, ikinci aynada çelik hasır, iksa, püskürtme beton ve bulonlama ile destekleme yapılır.

Sert zeminlerde (kaya) ortamında kazı kırıcı uçlu makinalar ile yapılamıyorsa dinamit ile patlatma suretiyle de kazı faaliyetleri yapılabilmektedir. Burada iksa kalınlığı ince olur veya hiç kullanılmayabilir. Kaya ortamı kendini taşıyabilir özellikle olduğu için bu tip ortamlarda inşa edilen tünellerde stabilite problemi ile karşılaşmamaktadır.

Tünel kazısı ve destekleme işleri tamamlandıktan sonra nihai kaplama işleri yapılarak tünel kesiti tamamlanır.

2.2.4 Tünel kazısı sırasında deformasyon ölçümleri

Zemin-yapı ilişkisini iyi değerlendirebilmek için zemin hareketlerinin sürekli ve dikkatli biçimde takip edilmesi gerekir. Tünel içerisinde ve zemin yüzeyinde yapılan ölçümler, deformasyon okumaları, önceden tespit edilen riskli binalarda ve/veya üstyapılarda ölçülen deformasyonlar, önlem alınmasını ve ek analizlerle sürecin değerlendirilmesinde önemli rol oynar. Tünel inşaatlarında genel olarak şu ölçümler yapılmaktadır:

- Yüzey oturması (tasman) ölçümleri,
- Tünel içi deformasyon ve opto-trigonometrik (konverjans) ölçümler,
- Ekstensometre ve inklinometre ölçümleri,
- Tünel içinde radyal ve teğetsel basınç hücreleri, yerleştirme ve ölçme,
- Ayna jeolojik haritası ve jeomekanik büyüklüklerin belirlenmesi

Kısaca ölçüm yöntemlerini ve terimleri açıklamak gerekirse:

Konverjans Bulonu: Tünel içi geometrisindeki değişimi ölçmek için kullanılan veri toplama aparatıdır.

Uzama Ölçer: Tünel içinde , Açık kazılarda ve yüzeyde yapılan kazıdan dolayı oluşan çevresel deformasyonu belirleyen aletlerdir.

Yüzey ve Bina Oturma Bulonları: Tünel veya açık kazıların etkisi ile yüzeyde veya çevre binalarda oluşabilecek düşey yönlü hareketi ölçmeye yardımcı olan aparatlardır.

Basınç Hücreleri: Püskürtme betonu içinde oluşabilecek gerilme dağılımını ölçmek için kullanılan aletlerdir.

Diskli Yük Hücresi: Öngerilmeli ankrajler ile kaya bulonlarında oluşabilecek gerilme değişikliklerini ölçmeye yarayan aletlerdir.

Eğilme Ölçer: Tünel veya Açık kazıların etkisi ile yüzeyde veya çevre binalarda oluşabilecek yatay yönlü hareketi ölçen alettir.

Gerilme Ölçer: Tünel kaplamalarındaki beton deformasyonunun değerlendirilmesinde kullanılan aletlerdir.

Çatlak Ölçer: Mühendislik yapılarında oluşan çatlaklardaki veya mevcut inşaat derzlerindeki hareketlerin yönlerini ve büyüklüklerini tespit etmeye yarayan aletlerdir.

Bina Yatay Deplasman Reflektörü: Yerüstü yapılarında oluşabilecek deplasmanları ölçmeye yardımcı olan ayardır.

3. YÜZEY OTURMALARI VE BİNA HASAR DEĞERLENDİRMESİ

3.1 Zeminde Meydana Gelen Oturmaların Yapılara Etkileri

Zemin hareketleri ve buna bağlı oturmalar çeşitli sebeplerden meydana gelebilmektedir. Bu çalışmanın esasını oluşturan zeminde oturmalar, tünel kazıları, maden kazıları veya derin kazılar sebebiyle oluşabilmektedir. İksa sisteminin rijitliği, zeminin davranışının iyi tahlil edilememesi, zeminde beklenmedik/öngörülemeyen zayıf zonların veya boşlukların bulunması, zemin sıvılaşması, deformasyonların kontrol edilememesine bağlı olarak iksa sisteminde önlem veya iyileştirme yapılamaması gibi nedenlerden ötürü zeminde oturma, yerdeğiştirme gibi hareketler meydana gelir. Bu deformasyonlar üst yapılara etkimekte, büyük veya küçük ölçekte hasarlar meydana getirebilmektedir.

Zemin rijitliğinin azalmasına ve deformasyonların artmasına neden olan önemli etmenlerden bazıları zeminde yapılan açık kazılar, maden çalışmaları ve tünel çalışmalarıdır. Yeraltındaki kazılarda, tünel açılması ve desteklenmesi sırasında zemin içerisindeki gerilmelerde değişiklik ve zemin kaybı oluşur. Bu gerilme değişimleri yatayda ve düşeydeki deplasmanlardan dolayı ortaya çıkar. Bu duruma bağlı olarak yapıda dönme, oturma, burulma ve yer değiştirme doğurur, dolayısıyla yer hareketlerine bağlı olarak yapılarda hasar oluşabilir. [8]

Özellikle gelişmekte olan kentlerde metro inşaatlarının da artması ile zeminde meydana gelen deformasyonlar ve üstyapılarla ilişkisi özel ve önemli bir araştırma konusudur. Zemin özellikleri iyi incelenmeden yapılan binaların, kaçak yapılaşmanın veya çok yıllık üstyapıların, imalat sırasında yeterli denetim uygulanmamış olan binaların zemin-üstyapı ilişkisi ve hasar tespiti konuları gereklilik arz etmektedir. Bu sebepten ötürü birçok yapının deprem etkisine maruz kalmadan, sadece zeminde yapılan kazılar sonucu göçme potansiyeli göz ardı edilmemelidir. [8]

Bu çalışma kapsamında altından makas tüneli geçen yapılar incelenmiş ve hasar dereceleri belirlenmiştir.

3.2 Tünel Tasarım Yöntemleri

Tünellerde kazı-destek ve kaplama sistemi tasarımı için geliştirilen pek çok yöntem mevcuttur. Tünelin gerçeğe yakın bir şekilde modellenmesi tasarımın en önemli kısmıdır. Yüzey oturmaları ele alınırken, tünelde oluşan hacim kaybı ve deformasyonlar ile kaplama rijitliği belirleyici faktörlerdir. Tünel açılması sırasındaki oturmaları belirlemekte sıklıkla kullanılan yöntem bir sayısal hesap yöntemi olan “Sonlu Elemanlar Yöntemi”dir. Bu yöntemde karmaşık zemin durumu modellenenilmekte ve zemin davranışına göre hesap modeli seçilebilmektedir. Mevcut yöntemler (ampirik veya analitik yöntemler) sağlıklı nicel veriler ortaya çıkarmak için birlikte de kullanılabilmektedir.

3.2.1 Sonlu elemanlar yöntemi ve kullanılan program detayları

Sonlu Eleman Metodu (SEM), matematiksel olarak bilgisayar kullanımını gerekli kılan diferansiyel denklemlerin çözümü için geliştirilmiş sayısal bir yaklaşımdır.

Bu metodun kaya ve zemin mekaniği ile olan ilgi alanı, birim deformasyon – gerilme ilişkisini inceleyen denklemlerden oluşmaktadır. Fiziksel olarak ise SEM, bir yapı içinden uygulanan dış yüklerin yayılımını, o yapı içinde var olan her bir elemanın rijitelerine bağlı olarak inceleyen bir çözüm yöntemi olarak tanımlanmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile sonsuz genişlikteki zemin kütlesi, yapılan sondaj ve geoteknik parametlerele, kazı yapılacak sahanın sınır şartları belirlenebilmektedir.

Yeraltı açıklığını çevreleyen kaya kütlesi içindeki ilgi sahası belirlendikten sonra, bu saha birbirlerine düğüm noktalarında bağlı olan ve iki boyutlu analiz için genellikle üç veya dört kenarlı şekillere sahip olan elemanlara bölünür. Sınır şartları ve yükleme tipleri belirlenip, model içindeki her bir sonlu eleman ve jeolojik süreksizlikler - eğer varsa - tanımlandıktan sonra matematiksel çözüme gidilip, her elemanın yüke karşı olan reaksiyonu belirlenir. [9]

Gerilme analizleri ile ilgili pek çok program oluşturulmakla beraber zemini modelleyerek ve 3 boyutlu analiz yapılarak farklı yükleme koşullarının da girilebildiği PLAXIS programı da geliştirilmiştir.

Tünel tasarımında, gerilme ve deformasyon analizinin yanı sıra kazı-destek yapısının da zamanlamasının ve inşaat aşamalarının tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Plaxis ile mevcut zemin ortamı, sınır koşulları, yükleme durumları, iksa ve kalıcı

kaplama kriterleri, malzeme özellikleri, sonlu elemanlar ağının biçimi ve inşaat aşamaları ve kazı süreçleri tanımlanabilmektedir.

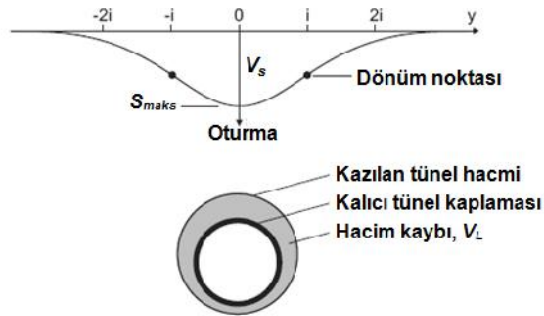
3.3 Oturma Analizi

Oturma analizleri yarı ampirik yöntemler kullanılarak tünel kazısı sebebiyle meydana gelecek olan yüzey deformasyonlarını belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Böylece, tünel kazısının etki alanında yer alan binalar, yaygın bir kullanım alanı olan üç aşamalı bina risk değerlendirmesine göre değerlendirilmektedir.

3.3.1 Hacim kaybı hesabı

Tünel kazısı nedeniyle oturma'nın büyük bir bölümü kazı sebebiyle meydana gelen hacim kaybıdır. Tünel kazısı nedeniyle oluşan oturmaların hesaplanabilmesi için hacim kayıplarının ve parametrelerinin belirlenmesi çok önemlidir. Seçilen değerler tünelcilik işlerindeki deneyim, literatür bilgisi ve mevcut zemin koşullarıyla ilgilidir ve hacim kayıplarının gerçeğe yakın tahmini teorik olarak mümkün olmasına rağmen çok fazla parametre içermesi nedeniyle oldukça zordur. Hacim kaybı, kaya kütlelerinin deformasyon ve dayanım parametreleri ile iksanın rijitliği ve taşıma kapasitesi göz önünde bulundurularak belirlenir. Tünel açılması sırasında zeminde meydana gelen oturmalar genellikle, tünel aksı doğrultusunda oluşan gauss eğrisi ile ifade edilir. [4] Bu eğrilerin tünel doğrultusunda entegre edilmesiyle oturma yüzeyi elde edilir. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, V_s birim tünel uzunluğu başına yüzey oturması hacmi ve V_L ise tünelin teorik kazı hacmi dışında kazılan zeminin hacmi olarak tanımlanan hacim kaybıdır. Bu iki değer aynı olarak kabul edilebilir, çünkü bu değerler arasındaki fark uzun dönemde ihmal edilebilir nitelikte olmaktadır.

$$V_s \approx V_L \quad (3.1)$$



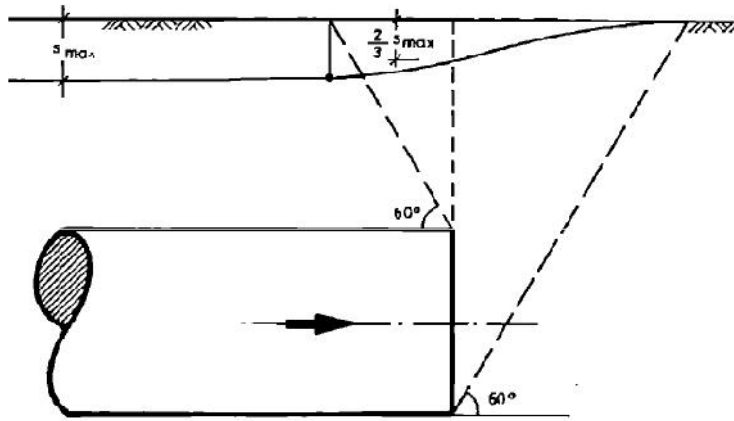
Şekil 3.1 : Yüzey oturması için Gauss eğrisi ve hacim kaybı

Hacim kaybı $V_L(\%)$, genel olarak tünelin teorik kazı hacmi dışında kazılan zeminin hacminin V_L teorik tünel hacmine, $V_{t\ddot{u}nel}$ oranı ile ifade edilir.

$$V_L (\%) = \frac{V_L}{V_{t\ddot{u}nel}} \quad (3.2)$$

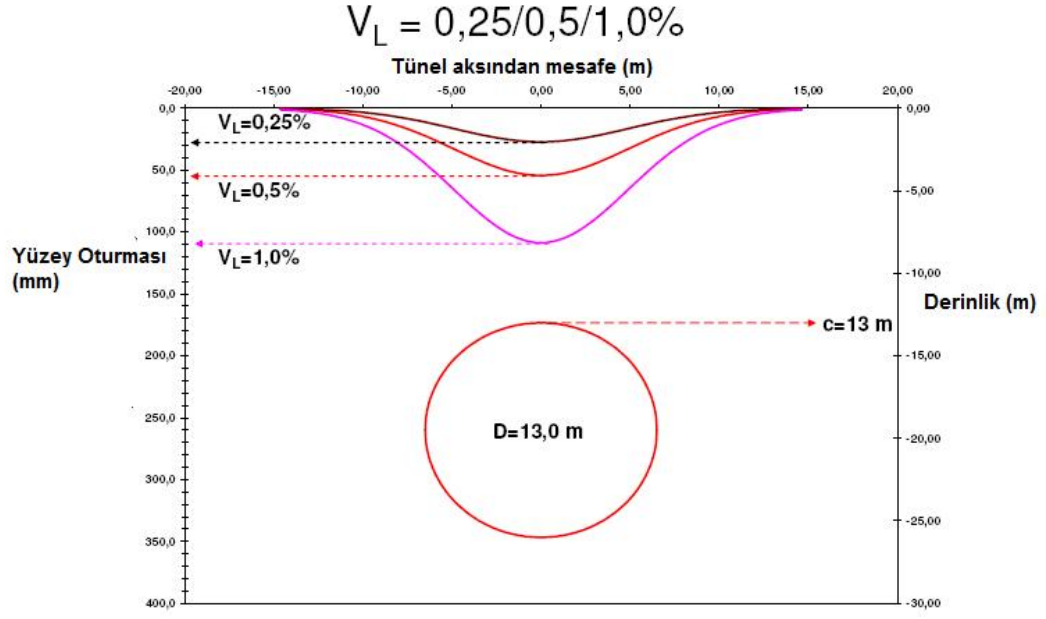
Hacim kaybının sayısal değeri zemin şartlarına ve tünel açma metoduna bağlıdır. Rijit ve aşırı-konsolide zeminlerde örnek olarak Londra Kili'nde bu değer yaklaşık 2% civarında olduğu belirlenmiştir. [4]

Hacim kaybı, TBM kazısı ve NATM kazısı için ayrı ayrı belirlenmektedir. Malzemenin tünel eksenini boyunca boşluğa hareketinden dolayı oluşan hacim kaybından, bu genellikle *kuyruk kaybı* olarak adlandırılır. Malzemenin tünel ağzına taşınma hareketinden, bu da *yüzey kaybı* olarak nitelendirilir.

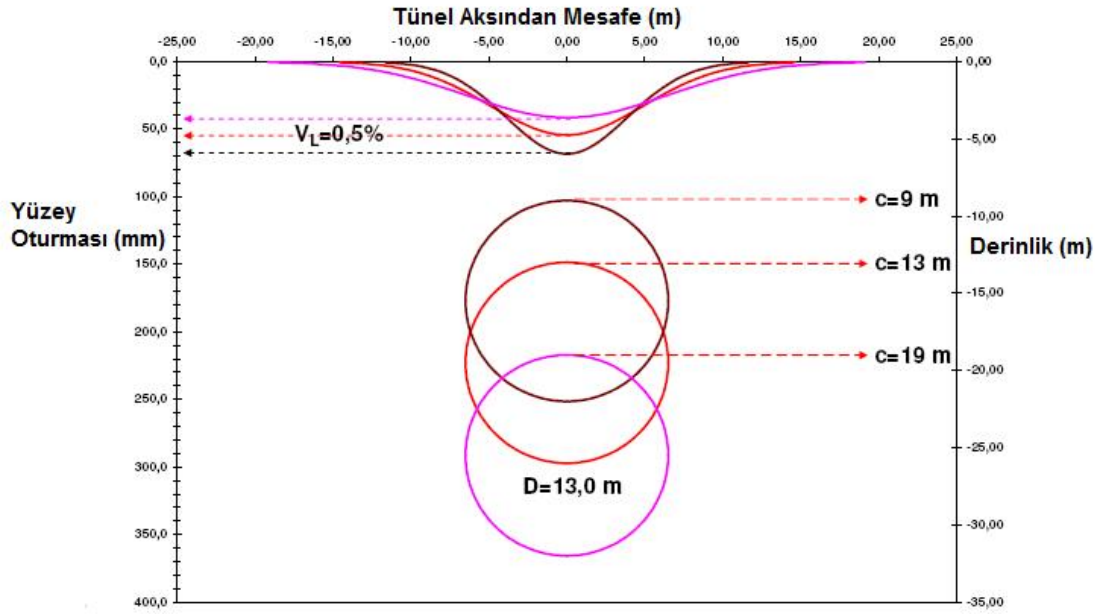


Şekil 3.2 : Oturma oranlaması

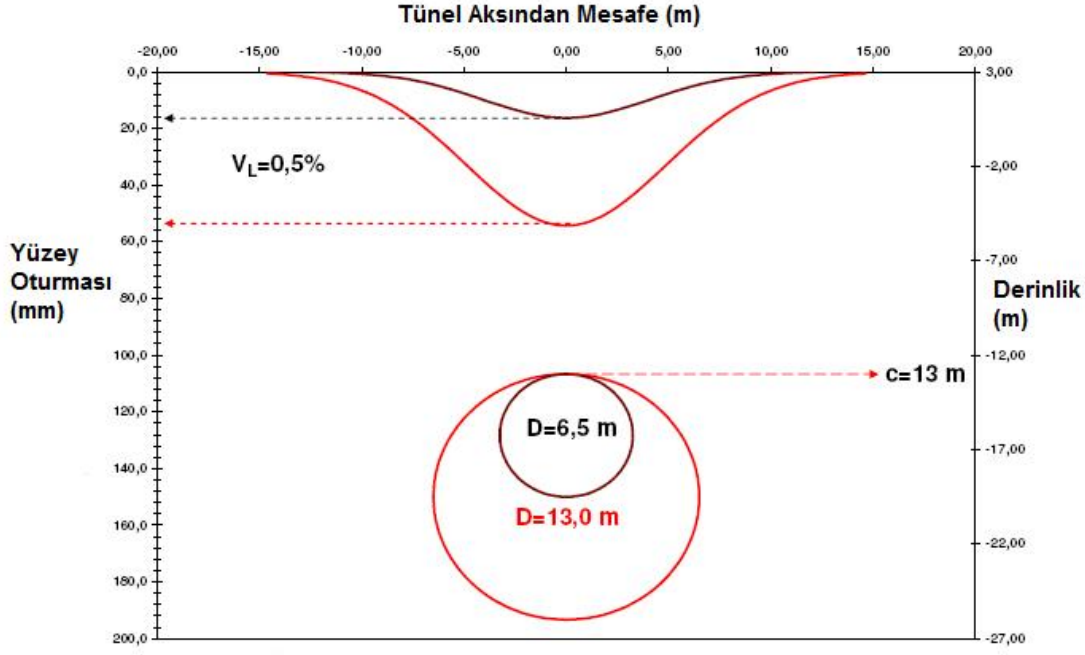
Yüzey oturmaları hacim kaybı, tünel çapı (veya eşdeğer çap) ve tünelin üzerindeki örtü kalınlığına göre değişmektedir. Aynı büyüklükte bir tünel, farklı hacim kayıpları göz önüne alındığında farklı yüzey oturmaları elde edilir. Hacim kaybı arttıkça yüzey oturmaları artar. Bununla birlikte, aynı hacim kaybı göz önüne alındığında tünel büyüklüğü de değiştirilmeden örtü kalınlığı azaltılırsa, yani tünel yüzeye yakın kazılırsa yine yüzeydeki oturmalar artar. Aynı hacim kaybında, örtü kalınlığı değiştirilmeden sadece tünel geometrisi büyütülürse, yüzeyde oturmalar artar.



Şekil 3.3 : Yüzey oturması- hacim kaybı değişimi



Şekil 3.4 : Yüzey oturması- örtü kalınlığı değişimi

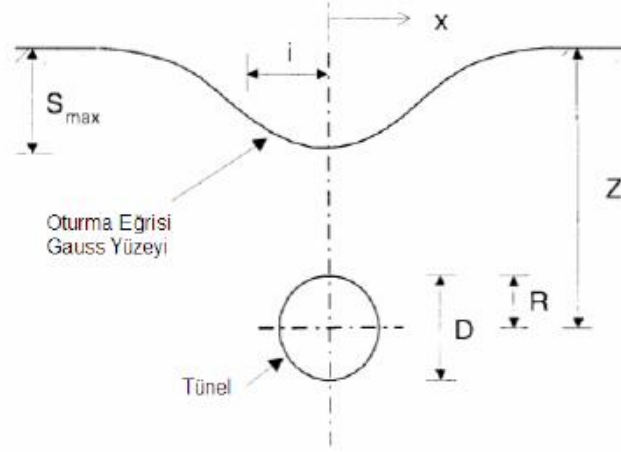


Şekil 3.5 : Yüzey oturması- tünel çapı değişimi

3.3.2 Oturma analizi metodolojisi

Yüzey oturmaları Gauss eğrisi teorisinin yarı ampirik yaklaşımı kullanılarak hesaplanır. Bu yöntem ilk olarak Martos (1958), Peck (1969) ve Schmidt (1969) tarafından tanımlanmıştır. Söz konusu araştırmacılar, oturma eğrisinin şeklinin en iyi Gauss eğrisi veya normal dağılım eğrisi ile temsil edileceğini savunmuşlardır. Daha sonra, O'Reilly ve New (1982) zemin hacim kaybının zemin koşullarına bağlı olduğunu ve tünelin içinde radyal yöndeki zemin akışı ile temsil edileceğini gösteren Gauss modelini geliştirmiştir. Böylece, belirli örneklerle bağlı olarak genel yüzey oturma davranışını veren çeşitli yarı ampirik bağıntılar geliştirilmiştir.

Tünel açıldıktan sonra, zemin konsolide oldukça oturmalar devam eder. Bununla birlikte tünel açılmasına bağlı olarak meydana gelen hasarın araştırılmasında, konsolidasyondan dolayı oluşan oturmalar genellikle ihmal edilir [11].



Şekil 3.6 : Oturma eğrisi

Zemin hareketi analizlerinden elde edilen oturmalar, düşey oturmalar ve tünel en kesitindeki yatay hareketlerdir. Düşey oturma, $S(x)$ olarak verilmekte olup, aşağıdaki bağıntı ile tanımlanan bir Gauss dağılımı ile ifade edilebilir [2]:

$$S(x) = S_{\max} \cdot e^{\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right)} \quad (3.3)$$

Burada;

$S(x)$ = Tünel aksından x mesafedeki oturma değeri

$S_{\max}$ = Tünel aksındaki maksimum oturma değeri'ni ifade etmektedir.

$$S_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi}i} \quad (3.4)$$

Burada, V_s tünelin kazı hacminin yüzdesi olarak ifade edilen hacim kaybı, V_L değerine göre hesaplanan kesit kaybı değeridir.

i ise dönme (büküm) noktasının tünel aksına olan mesafesidir. Z_0 tünel aks derinliği ve K jeolojik bir değer (genel olarak granüler zeminler için 0,35 ve kohezyonlu zeminler için 0,50 alınır) olmak üzere $i = Z_0 K$ bağıntısıyla belirlenebilir[12].

Yatay hareket, $U(x)$

Yatay hareket, meydana gelen deplasmanın tünel aksına doğru yönlendirileceği göz önünde bulundurularak düşey oturmadan türetilir ve aşağıdaki bağıntı ile belirlenebilir:

$$U(x) = \frac{x}{Z_0} S(x) \quad (3.5)$$

Burada;

x = Tünel aksından olan mesafe

Z_0 = Tünel aks derinliği

Açısal zemin deformasyonu

Açısal zemin deformasyonu, oturma eğrisinin eğimi ile ifade edilir. İki nokta arasındaki düşey oturma farkıdır. Böylece, maksimum açısal zemin deformasyonu, dönme (büküm) noktasında kaydedilir. Binanın yapısal tepkisini belirlemek için önemli bir parametredir, çünkü binanın iki noktası arasındaki rölatif düşey hareketi ifade eder.

Yatay deformasyon

Yatay deformasyon, ϵ_h (%) iki nokta arasındaki yatay hareketin değişimi olarak hesaplanabilir. Binanın yapısal tepkisini belirlemek için önemli bir parametredir, çünkü binanın basınç veya çekme davranışını ifade eder.

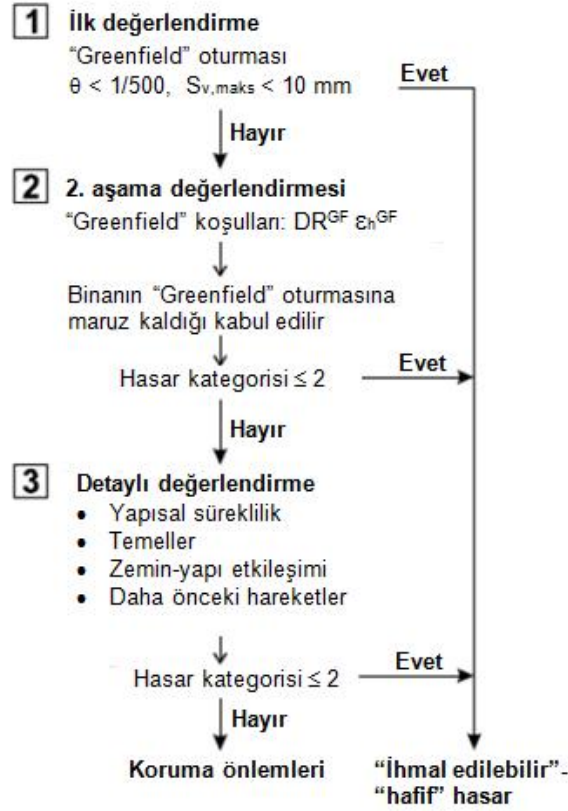
3.4 Bina Oturma Tahmini

Bu bölümde tünel kazısının bina davranışları üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Hesaplanan zemin/kaya hareketleri ve bunların bina ve yapılara olan etkileri kullanılarak muhtemel etkiler üzerine bir değerlendirme yapılmıştır. Bina değerlendirmesinde kullanılan metodoloji Mair (1996) [4] tarafından önerilen üç aşamalı bir değerlendirmedir .

Bina değerlendirmesi sonuçlarına göre koruma gerekleri tartışılacaktır. Eğer hesaplanan oturmalar binaların kabul edilebilir eşik değerlerini geçerse ek önlemler göz önünde bulundurulabilir. Hesaplanan oturmalar hasar durumu ile öngörüyü oluşturmaktadır. Kazı sırasında ciddi hasar alacağı tespit edilen yapıların gözlenmesi, bu bölgelerden geçerken hasarı aza indirmek için iksa da takviye yapılması ve az adımlı kazı hızı ile ilerlenmesi gerekir.

3.4.1 Tünel kazısı nedeniyle binalarda oluşabilecek hasarın değerlendirilmesi için kullanılan metodoloji

Metodoloji aşağıdaki şekilde açıklanmalıdır.



Şekil 3.7 : Bina hasar değerlendirilmesinde kullanılan üç aşamalı yaklaşım

1. aşama değerlendirme

1.aşama değerlendirme, hesaplanan “Greenfield” oturması ve açılmal zemin deformasyonuna bağlıdır. İlk olarak planda binaları içeren güzergah boyunca hesaplanan yüzey oturma sınırları çizilir. Böylece, öngörülen oturma ve açılmal zemin deformasyonu değerleri tanımlanabilir.

Ayrıca aşağıdaki tabloya göre her bina için bir hasar kategorisi belirlenir. Temel olarak, binalarda estetik, işlevsel ve stabilite olmak üzere üç tip hasar meydana gelir. Altındaki tabloda bu hasarlara ve bunların onarılma kolaylıklarına göre binaları sınıflandırmak için altı adet hasar kategorisi ve tipik hasar tanımları verilmiştir. Altındaki tabloda hasar kategorilerinin tanımı ve özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Görünen bina hasarlarının sınıflandırılması

Hasar tipi	Hasar kategorisi	Önem derecesi	Tipik hasar tanımı
Estetik	0	İhmal edilebilir	Yaklaşık 0,1 mm'den küçük kılcal çatlaklar
Estetik	1	Çok hafif	İnce çatlaklar. Normal bir dekorasyonla tamir edilir. Hasar genellikle iç duvarlarla sınırlıdır. Kagir yapılarda çok yakından yapılan incelemeyle bazı dış çatlaklar görülebilir. Tipik çatlak genişliği 1 mm ve altındadır.
Estetik	2	Hafif	Kolayca doldurulan çatlaklar. Muhtemelen dekorasyon gerekir. Buna rağmen kalan çatlaklar uygun bir kaplama ile giderilir. Çatlaklar dıştan görülebilir ve su yalıtımını sağlamak için harçla sıva yapmak gerekebilir. Kapılar ve pencereler hafifçe sıkışabilir. Tipik çatlak genişliği 5 mm ve altındadır.
İşlevsel	3	Orta	Çatlakların genişletilmesi gerekebilir ve çatlaklar tuğla ile kapatılabilir. Harçla sıva yapmak gerekebilir. Kapılar ve pencereler sıkışır. Servis boruları çatlayabilir. Su yalıtımı zarar görür. Tipik çatlak genişliği 5 – 15 mm 'dir veya bazıları > 3 mm
İşlevsel	4	Ciddi	Özellikle kapı ve pencere üstündeki bazı duvar kesitlerinin yenilenmesi gerekir. Pencere ve kapı çerçeveleri bükülür. kirişlerde taşıma gücü kaybı oluşur. Servis boruları çatlar. Tipik çatlak genişliği 15 – 25 mm'dir fakat bu değer çatlak sayısına bağlı olarak değişir.
Stabilite	5	Çok ciddi	Binanın belli bir kısmının veya tümünün yeniden inşasını içeren büyük tamir gerekir. Kirişler taşıma gücünü kaybeder, duvarlar eğilir ve destekleme gerekir. Pencereler çarpılarak kırılır.. Stabilite kaybı riski vardır. Tipik çatlak genişliği 25 mm'den büyüktür fakat bu değer çatlak sayısına bağlı olarak değişir.

1.aşama analizinden sonra tasarımcı hesaplanan oturma ve açısız zemin deformasyonu değerlerine göre her bina için hasar kategorisi belirler.

Kazılan tünellerden öngörülen oturma 10 mm'den ve öngörülen açısız zemin deformasyonu 1/500'den küçük olan bölgelerdeki binalar için ek bir değerlendirme yapılmamıştır çünkü olabilecek tüm hasarlar ihmal edilebilir olacaktır. 1. aşama değerlendirmesi için güvenli oturma ve açısız zemin deformasyonu değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Güvenli oturma ve açısız zemin deformasyonu değerleri [12]

Hasar kategorisi	Maksimum oturma (mm)	Maksimum açısız zemin deformasyonu
0 – 1 İhmal edilebilir – Çok hafif	<10 mm	< 1/500
2 Hafif	10 – 50 mm	1/200 – 1/500
3 Orta	50 – 75 mm	1/50 – 1/200
4 Ciddi	> 75 mm	1/50 – 1/200
5 Çok ciddi	> 75 mm	> 1/50

2. aşama değerlendirme

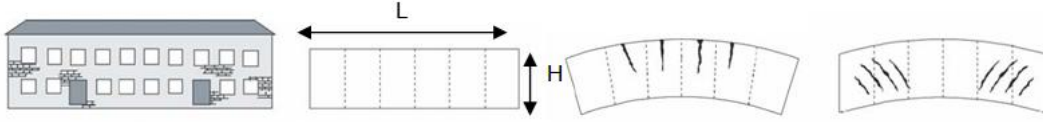
2. aşama değerlendirme, 1. aşama değerlendirmesinde hasar derecesi “hafif” – “çok ciddi” olarak belirlenen tüm binalar için uygulanır. Bu değerlendirme, hesaplanan maksimum çekme deformasyonu ve buna bağlı olarak belirlenen hasar kategorisini (aşağıdaki tablo) temel alır.

Çizelge 3.3 : 2.Aşama değerlendirmesindeki çekme deformasyonu değerleri [8]

Hasar kategorisi	Maksimum çekme birim deformasyonu (%)
0 İhmal edilebilir	<0,05
1 Çok hafif	0,05- 0,075
2 Hafif	0,075- 0,15
3 Orta	0,15- 0,03
4 – 5 Ciddi-Çok ciddi	>0,03

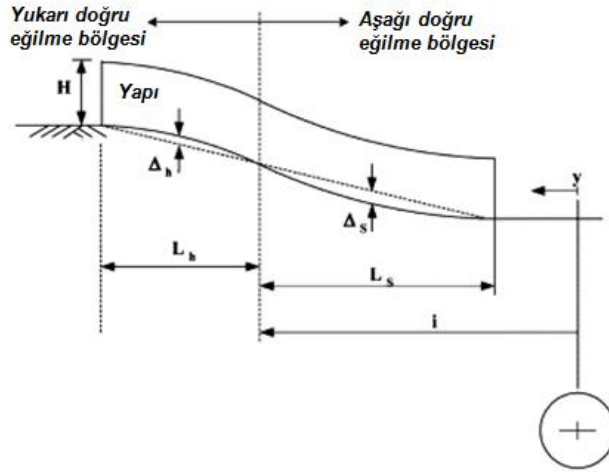
Binalar için çekme birim deformasyonunun belirlenmesinin ardından eşdeğer kiriş analizi uygulanır [5]. Bu model, basit bir dikdörtgen kiriş (eğilme deformasyonu altındaki basit bir ağırlıksız kiriş) aracılığıyla binayı temsil eder. Burland ve Wroth (1975) çalışmalarında, daha önceki çalışmalarda ele alınan yapı hasar durumlarını karşılaştırarak analitik bir açıklama getirmiştir. Şekil 1.3’te görüldüğü üzere yapıyı elastik basit mesnetli derin kiriş gibi idealize etmişler ve kirişte maksimum çekme birim deformasyonu ile ölçülebilir bir değer olan sapma oranı “ Δ/l ” arasında kinematik bir ilişki kurmuşlardır. Bu yaklaşım, kullanılan yapı malzemelerinden ve yüklemekten bağımsız olarak kırılma mekanizması hakkında fikir verir ve kritik çekme birim deformasyonunun hesaplanmasına olanak tanır. Bu çekme birim deformasyonu eğilme nedeniyle oluşan kayma birim deformasyonu (ϵ_b) ve kayma nedeniyle oluşan kayma deformasyonunun (ϵ_d) büyük olanıdır. [8] Bu deformasyonlara yatay çekme deformasyonun (ϵ_h) eklendiği bir modifikasyon önermiştir.

2. aşama değerlendirme konservatif olarak değerlendirilebilir çünkü binaların bir rijitliği olmadığını ve “Greenfield modeli” oturma eğrisini takip ederek deforme olduğunu kabul eder.



Şekil 3.8 : Bina, eşdeğer kiriş, eğilme davranışı, kayma davranışı (Burland & Wroth)

Bina, oturma eğrisine olan konumuna göre aşağı doğru veya yukarı doğru eğilmeye maruz kalır (Şekil 3.9) ve bu özellik de yapının davranışını belirler. [10]



Şekil 3.9 : Aşağı ve yukarı doğru eğilme bölgelerinde yapı eşdeğer kiriş modeli

Eğilme ve kayma hareketleri ile aşağı ve yukarı doğru eğilme davranışlarını dikkate alarak çekme birim deformasyonunu belirlemeyi sağlayan aşağıdaki formüller çıkarılmıştır. [13] Bu formüller geometrik karakteristikler (L/H), binanın yapısal tipi (E/G), aşağı ve yukarı doğru eğilmede binanın birim çekme deformasyonu arasındaki ilişkiyi gösterir. [14]

Eğilme davranışı:

$$\frac{\Delta_s}{L_s} = \frac{1}{5} \left(\frac{L_s}{1.2H} + \frac{H}{L_s} \frac{E}{G} \right) \epsilon_{b \max} \quad \frac{\Delta_h}{L_h} = \frac{1}{10} \left(\frac{L_h}{1.2H} + \frac{4H}{L_h} \frac{E}{G} \right) \epsilon_{b \max} \quad (3.6)$$

Kayma davranışı:

$$\frac{\Delta_s}{L_s} = \left(1 + \frac{2L_s^2}{3H^2} \cdot \frac{G}{E} \right) \epsilon_{d \max} \quad \frac{\Delta_h}{L_h} = \left(1 + \frac{L_h^2}{6H^2} \cdot \frac{G}{E} \right) \epsilon_{d \max} \quad (3.7)$$

Burada:

L = Bina boyu

H = Bina yüksekliği

E = Bina Young modülü

G = Bina kayma modülü

L_h = Yukarı doğru eğilme bölgesinde kısmi uzunluk

L_s = Aşağı doğru eğilme bölgesinde kısmi uzunluk

Δ_h = Yukarı doğru eğilmede deformasyon

Δ_s = Aşağı doğru eğilmede deformasyon ifade etmektedir.

Yukarıdaki bağıntılarında tarafsız eksenin kiriş yüksekliği boyunca devam ettiği varsayılmıştır. Gerçekte yapı temelde farklı noktalarda farklı sehim ve eğilme deformasyonlarına maruz kalacağından L uzunluğundaki yapının farklı etkiye maruz kalan bölümlerinin ayrı ele alınarak incelenmesi de daha doğrudur. İncelenen yapıda hesap edilen en büyük ϵ_b ve ϵ_d değerleri yapının sınırlandırıcı parametreleri olarak ele alınır ve sıklıkla 0.05% değeriyle kabul edilen, çatlamanın başlama anını ifade eden kritik çekme birim deformasyonu ϵ_{crit} değeri ile karşılaştırılır (Boscardin ve Cording 1989, Mair 1996).

Burland ve Wroth'un bu çalışmaları oldukça basit olarak görünmesine karşın çeşitli araştırma ve bina değerlendirmelerinde, riskli binaların tespitinde, öngörü kazanılması ve gerekiyorsa tedbir alınması amacıyla sıklıkla başvurulmuş yöntemlerdendir. Kerisel (1975) ise Burland ve Wroth'un geliştirdiği modele uygulanması zor olmakla beraber, yığma yapılarda hasar belirleyici faktörler olan büyük pencere boşluklarının etkisini de incelemiştir.

L/H bina en-boy oranını ifade etmektedir. Binanın uzunluğu (L) ile yüksekliği (H) arasındaki ilişkidir. Binanın izotropik elastik bir kirişle yeterli olarak temsil edilemediği durumda, E/G oranı binanın çekme birim deformasyon kapasitesini tanımlamak için kullanılır. E Young modülüdür ve G binanın eğilme modülüdür. E/G aşağıda gösterildiği gibi bina tipine bağlıdır [5] ve sıkça kullanılan değerler şunlardır [15]:

- Yük taşıyan duvarlar (E/G= 2,6)
- Çerçeve yapılar (E/G = 12,5) ve
- Kagir yapılar (E/G = 0,5) (yatay deformasyon yoktur)

Sonuç olarak, bir binadaki maksimum çekme birim deformasyonu aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\epsilon_{dt} = \epsilon_h \left(\frac{1-n}{2} \right) + \sqrt{\epsilon_h^2 \left(\frac{1-n}{2} \right)^2 + \epsilon_d \max^2} \quad (3.8)$$

3. aşama değerlendirme

3. aşama değerlendirme, 2. aşama değerlendirmesinde hasar önem derecesi “orta” – “çok ciddi” olarak belirlenen tüm binalar için uygulanmalıdır. Bu değerlendirmede, tünel kazısının mevcut binalar üzerindeki etkisini temsil eden SEM (Sonlu Elemanlar Metodu/Yöntemi) yazılımı kullanılır. Hesapların hassasiyet derecesi daha kesin oturma ve deformasyon değerleri vermektedir. Bu çalışmada aşağıdaki özellikler göz önünde bulundurulur:

1. Kazı yöntemi ve tünel yapım aşamaları; geoteknik ve geomekanik koşullar
2. Binaların yapısal tipi, rijitlik ve temeller
3. Yapısal oturmalar, su seviyesindeki düşüş, yapının yakınındaki kazı çukurları gibi daha önceden meydana gelmiş hareketler

3. aşama değerlendirmesine göre bina hasar derecesi “orta” veya üstünde belirlenirse, zemin iyileştirmesi ve/veya ek sayısal analiz modelleri ile bina güçlendirmesi yöntemleri uygulanabilir.

3.4.2 Oturmalarla İlgili Teknik Şartname Gerekleri

Oturma analizi yapılacak tünel ve incelenecek binalar Üsküdar Ümraniye Çekmeköy Metro Projesi teknik şartnamesinde belirtilen sınırlar ve kontrol kriterlerine göre değerlendirme yapılmıştır. Oturma analizini uygulamak ve bina analizi yapmak için konu ile ilgili literatür ve şartname maddeleri gözden geçirilmiştir.

Kontrol kriterleri aşağıdaki biçimde tanımlanmıştır.

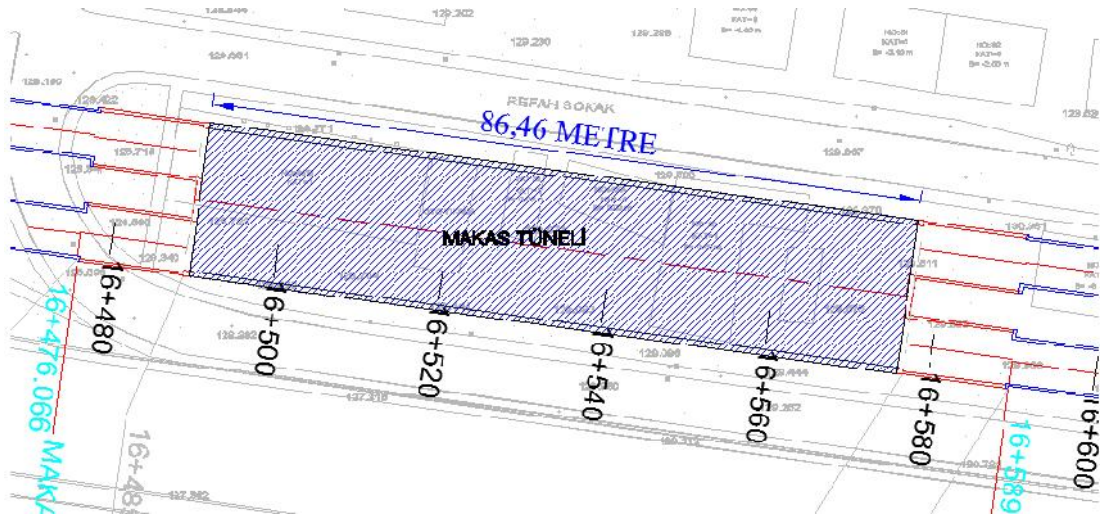
- Örtü kalınlığının, tünel çapının 2 katından daha az olduğu yerlerde çökme, yüzey/hacim kaybının %1,0’ından az olacaktır.
- Örtü kalınlığının, tünel çapının 2 katından daha fazla olduğu yerlerde çökme, yüzey/hacim kaybının %1,5’inden daha az olacaktır.
- Yapılarda azami toplam çökme, 25 mm’yi geçmeyecektir. Kagir, yığma yapılar ile tarihi yapılarda bu değer 10 mm’yi geçmeyecektir.
- Binaların açıl zemin deformasyonu 1/500’ü geçmeyecektir.

Şartname NATM ve TBM kazıları arasında fark gözetmemiştir. [16]

4. TÜNELİN MODELLENMESİ VE ANALİZ SONUÇLARI

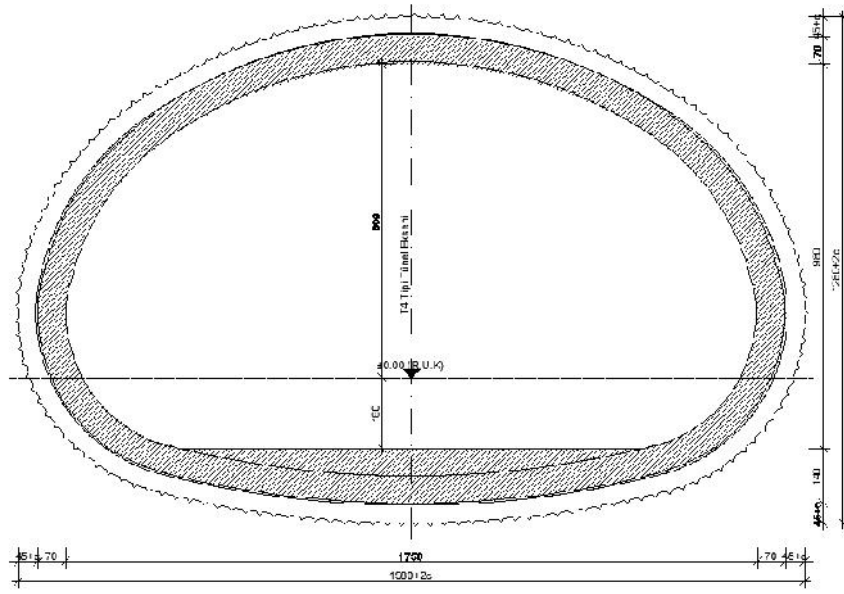
4.1 Makas Tüneli Geometrisi ve İksa Bilgileri

Makas tüneli Çekmeköy İstasyonu'ndan önce konuşlanmış olup, yaklaşık 86.5 metre uzunluğundadır. 45 cm püskürtme beton kalınlığı ve 70 cm nihai (kalıcı) kaplama kalınlığında, kazı alanı 203.8 m^2 'dir ve kalıcı kaplama yapıldıktan sonra kalan net kullanım alanı ise 141.97 m^2 'dir. Makasın kazı genişliği (yatay ölçü) 19.80 m, kazı yüksekliği ise ekseninde (düşey ölçü) 12.80 m'dir. Makasın projedeki isimlendirmesi T4'tür. Makas tüneli üstyarısı üç aşamalı, altyarısı ise tek aşamalı olmak üzere toplamda dört aşamalı kazı prensibine sahiptir. Ray üst kotu +105.570 ile +106.100 kotları arasında değişmekte ve arazi kotu ise +129.000 kotlarındadır. Ray üst kotundan yüzey arasındaki mesafe yani örtü kalınlığı ortalama 23 metredir.



Şekil 4.1 : Makas tüneli yerleşimi

Makas tüneli kazılırken ilk destek elemanları Çizelge 4.1’de verilmektedir.



Şekil 4.2 : Makas tüneli geometrisi

4.2 Jeoloji ve Parametre Bilgileri

Jeoloji yapılan sondajlar ve laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir. Bu bilgiler programa girdi olarak hazır elde edilen bilgilerdir. Yapılan sondajlara göre (iki adet sondaj) makas tüneli kireçtaşında kazılacaktır.

Çekmeköy İstasyonu bölgesini kapsayan bu kesimde yapılmış olan sondajlarda Pelitli Formasyonu'nun Dolayoba Kireçtaşı Üyesi'ne ait litolojik seviyeler geçildiği görülmektedir. Açık-koyu renklerde, pembemsi-morumsu renkli bol mercan ve makro fosilli resifal kireçtaşlarını kapsaması ile belirgin olan bu karbonat seviyesini, Paeckelmann, W. (1938) "Halysites'li Kireçtaşı" ve Baykal, F. (1943) "Mercanlı Kalker" olarak tanımlamıştır. Kaya, O. (1978) bu kireçtaşlarını, Yayalar Formasyonu'nun üst düzeyini oluşturan şeylleri de kapsayacak şekilde, "Dolayoba Kireçtaş" Önal, M. (1982) ise aynı istifi Dolayoba Kireçtaşı adıyla formasyon aşamasında incelemişlerdir. Birim Özgül, N. (2005) tarafından Pelitli Formasyonu'nun ayırtman kılavuz düzeyi olarak tanımlanmış ve Dolayoba Kireçtaşı Üyesi olarak ayırt edilmiştir. [17] Sondaj bilgilerinden yola çıkarak jeolojik birim kireçtaşı ($48 < RMR < 72$) olarak belirlenmiş ve tek eksenli basınç dayanımı testine göre parametreler belirlenmeye çalışılmıştır [17] , [18] , [19]. (Sondaj fotoğrafları ve bilgileri **EK A**'da verilmektedir.)



Şekil 4.3 : Çekmeköy makas bölgesinde beklenen jeoloji [19]

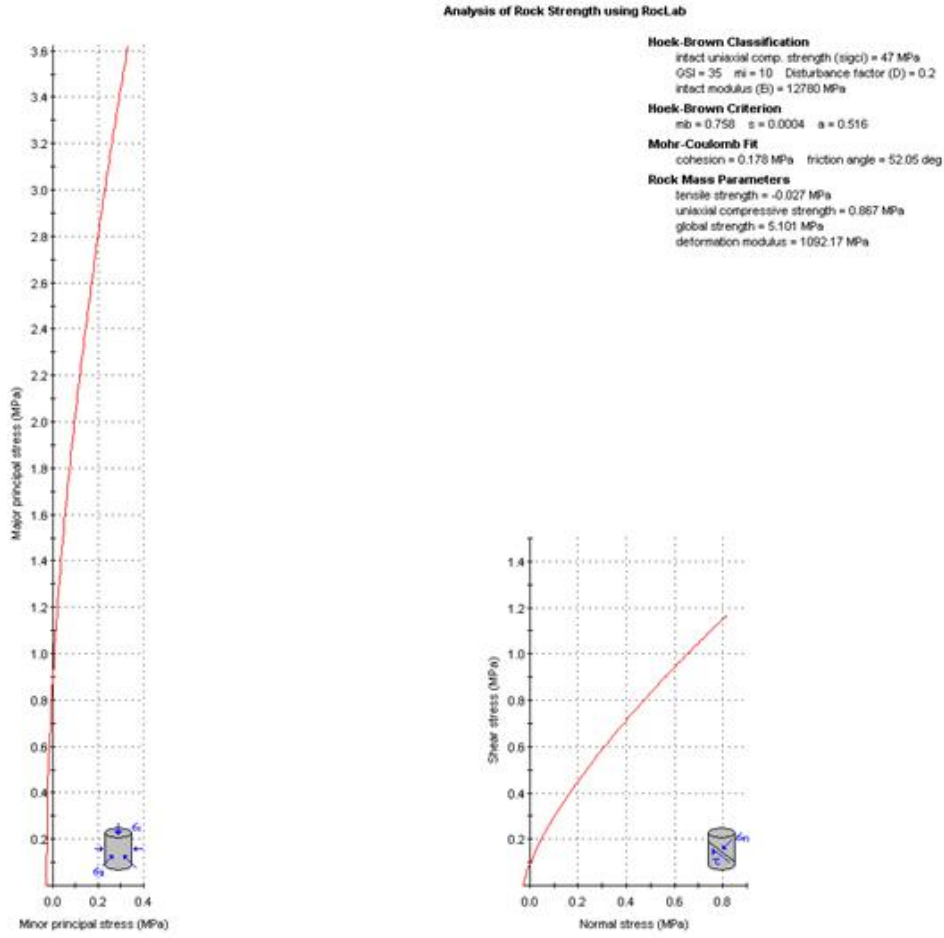
Sondaj numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı testine göre elastisite modülü (E) ve kaya basınç dayanımı (UCS) değerleri Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4.1 : Tek eksenli basınç dayanım testi sonuçları

Sondaj Kuyusu	Derinlik [m]	Formasyon	UCS [MPa]	Elastisite Modülü,E [MPa]	ν
STÇ-1	15.10-15.40	kireçtaşı	79.6	19767.8	0.21
	22.90-23.10	kireçtaşı	39.0	11556.7	0.22
S40	11.44-11.63	kireçtaşı	29.3	9926.7	0.23
	18.6-18.95	kireçtaşı	40.4	9876.2	0.21
			47.0	12780	0.22

Deney sonuçlarına göre ortalama kaya basınç dayanımı 47 MPa, ortalama elastisite modülü 12780 MPa olarak belirlenmiştir.

- mi (kireçtaşı)= 10
- Jeolojik Dayanım İndeksi, GSI= 35 ([20])
- Ortalama Derinlik 129.081-105.925=23.156m → 23m (Ortalama ray üst kotundan)
- Birim Hacim Ağırlık = 27.0kN/m³
- D=0.2 (NATM kazı)



Şekil 4.4 : Kaya dayanımı analizi

Çizelge 4.2 : Girdi Sonuçları

Litoloji	Örtü Tabakası (m)	Sağlam Kaya			GSI	M.C.		Şekil Değiştirebilirlik	Global dayanım [MPa]
	[m]	UCS [MPa]	Ei [MPa]	m_i -		c [kPa]	Φ [°]	Erm [MPa]	
Kireçtaşı	23.0	47	12780	10	35	180	52	1100	5.1

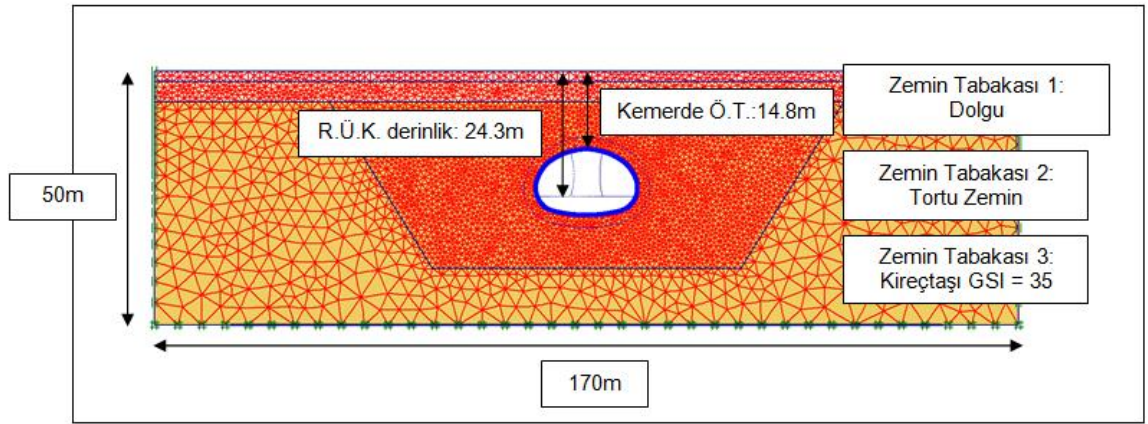
Çizelge 4.3 : Sonlu elemanlar modeli için geoteknik parametreler

Tabaka	Tabaka Kalınlığı	Zemin Tipi	Birim Hacim Ağırlık [kN/m ³]	Elastisite Modülü [MPa]	Poisson Oranı [-]	Kohezyon [kPa]	İçsel Sürtünme Açısı
1	2.0 m	Dolgu	18	10.0	0.4	0	20.0
2	4.0 m	Tortu Zemin (*)	22	32.8	0.3	160	21.6
3	-	Kireçtaşı GSI = 35	27	1100.0	0.23	180	52.0

(*): Parametreler Tablo 5-12'den alınmıştır [20].

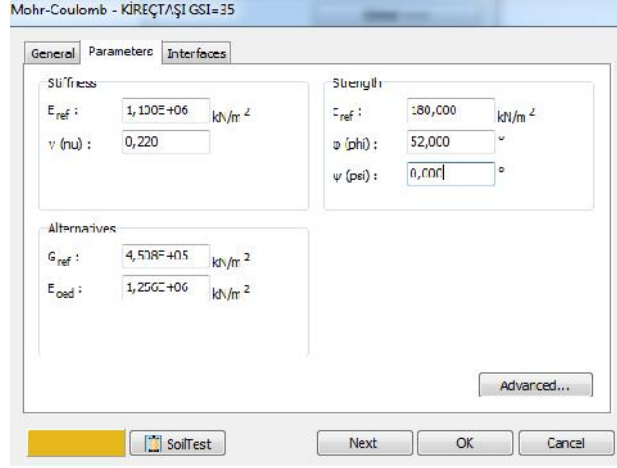
4.3 Makas Tünelinin Sonlu Elemanlar Modeli ve Parametreler

Makas tüneli Plaxis modeli Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Şekil 4.5'ten görüleceği gibi ray üst kotundan zemin yüzeyine olan mesafe yaklaşık 24.3 metre, kemer üstündeki örtü kalınlığı 14.8 metre'dir. Plaxis modele işlenen geoteknik parametreler Çizelge 4.3'te verilmektedir. (Plaxis modelinin oluşturulması **EK B**'de anlatılmaktadır.)



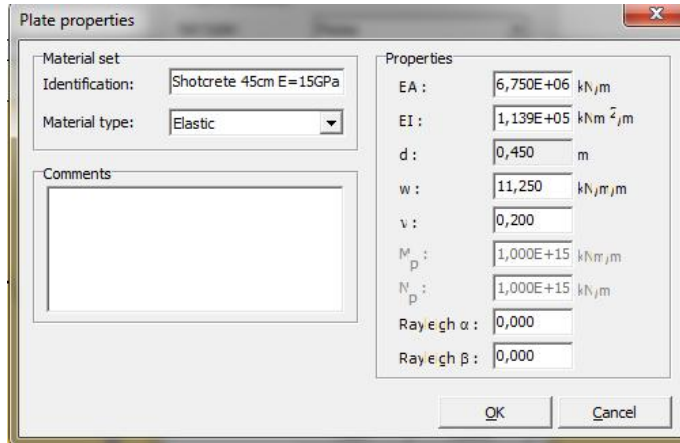
Şekil 4.5 : Plaxis model geometrisi

Zemin bilgileri ve geoteknik parametreler (içsel sürtünme açısı, kohezyon) değerleri modelde tanımlanır.



Şekil 4.6 : Plaxis model zemin bilgilerinin girilmesi

İksa bilgisi özellikleri malzeme tanımında programa girilir. Burada tüm değerler bir metre için girilmektedir. (İksa bilgileri ile ilgili tablo ve görseller **EK C**'de verilmektedir.)



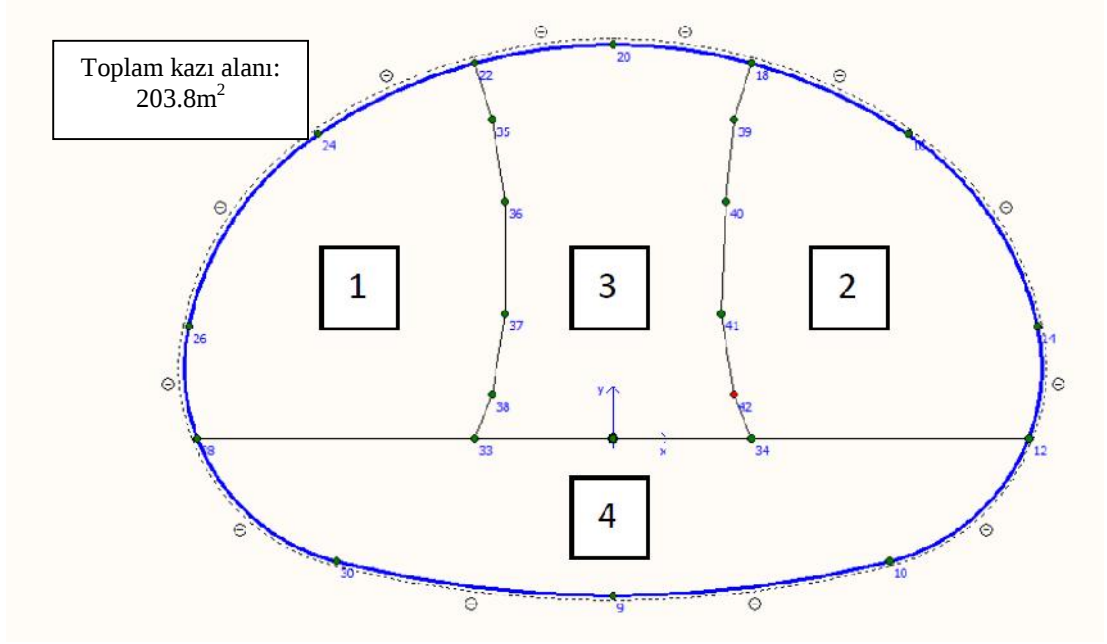
Şekil 4.7 : Plaxis model: Makas tüneli ilk destek parametreleri

Makas tüneli geleneksel kazısı: 3 üst yarı aşaması + 1 altyarı aşaması ile modellenmiş ve Şekil 4.8'te gösterilmiştir. 45cm ilk destek püskürtme beton tabakası uygulaması ($E_{\text{püskürtmebeton}} = 15\text{GPa}$, $\nu_{\text{püskürtmebeton}} = 0.2$) analizlerde dikkate alınmıştır. (Betonun birim hacim ağırlığı 25 kN/m^3)

$$EA = 15000000 \times 0.45 \times 1.0 = 6.75 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$$

$$EI = 15000000 \times 1 \times 0.45^3 / 12 = 1,139 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$$

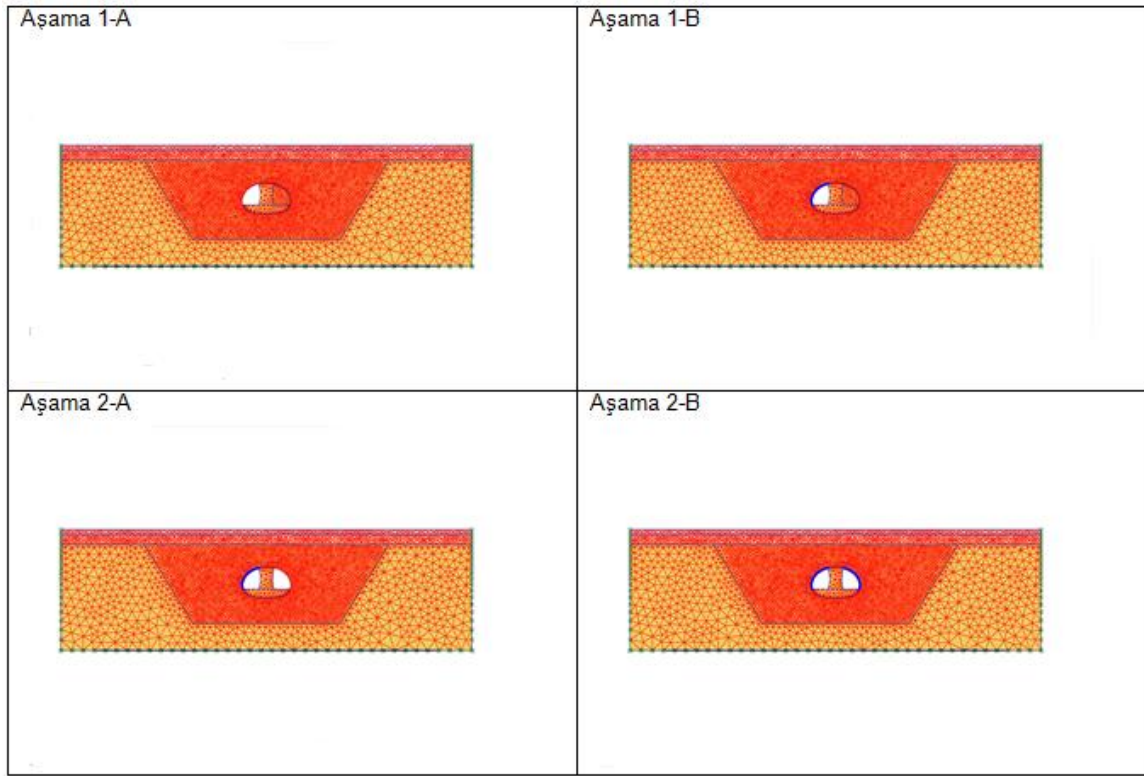
$$\text{Ağırlık ise } w = 0.45 \times 1 \times 25 = 11.25 \text{ kN/m/m}$$



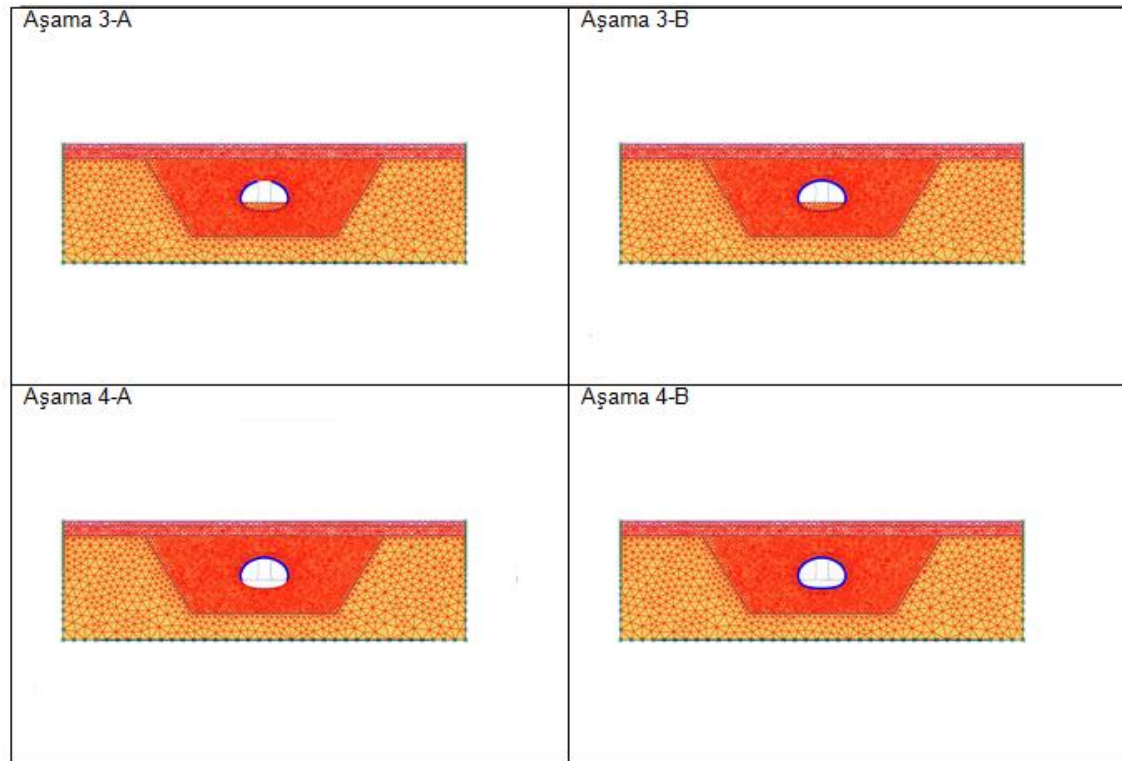
Şekil 4.8 : Makas tünel kazı aşamaları (çoklu aşamalar)

Makas tünelinin sonlu elemanlar modelinde kazı aşamaları Şekil 4.8’de verilmektedir. Aşamalar aşağıda da sıralanmıştır.

- Aşama 0: Litostatik gerilme başlangıcını tariflemektedir.
- Aşama 1-A: Makas Tüneli 1.Üst yarı kazı aşamasını tariflemektedir.
- Aşama 1-B: Makas Tüneli 1.Üst yarı iksa aşamasını tariflemektedir.
- Aşama 2-A: Makas Tüneli 2.Üst yarı kazı aşamasını tariflemektedir.
- Aşama 2-B: Makas Tüneli 2.Üst yarı iksa aşamasını tariflemektedir.
- Aşama 3-A: Makas Tüneli 3.Üst yarı kazı aşamasını tariflemektedir.
- Aşama 3-B: Makas Tüneli 3.Üst yarı iksa aşamasını tariflemektedir.
- Aşama 4-A: Makas Tüneli alt yarı kazı aşamasını tariflemektedir.
- Aşama 4-B: Makas Tüneli alt yarı iksa aşamasını tariflemektedir.



Şekil 4.9 : Makas tüneli kazı aşamaları (45cm püskürtme betonu)

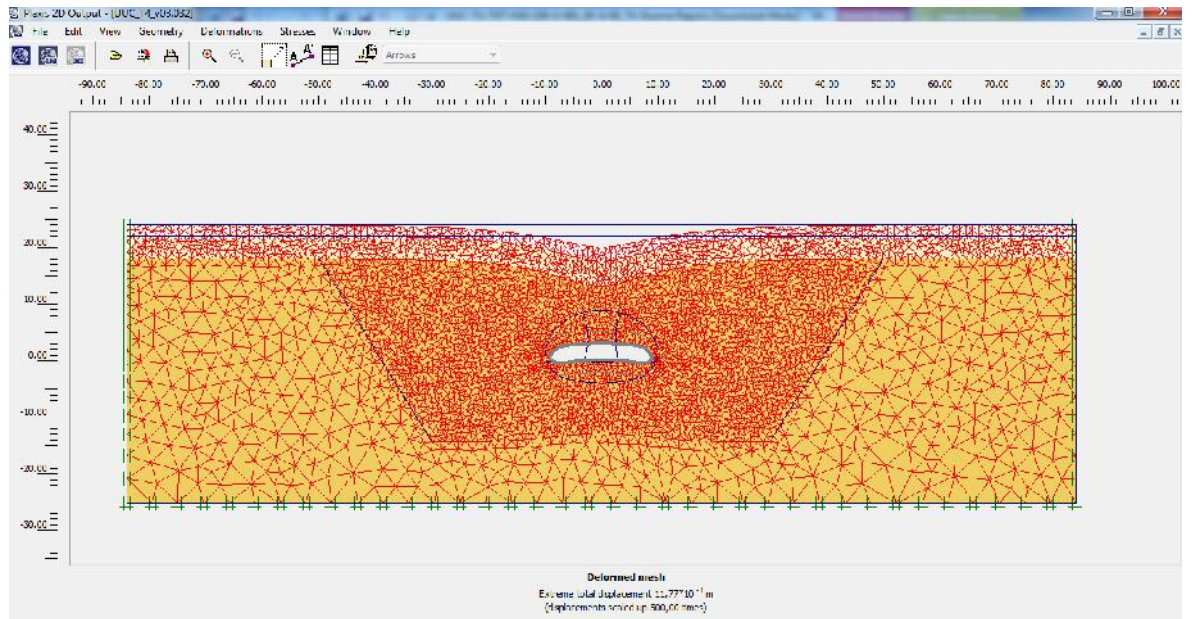


Şekil 4.10 : Makas tüneli kazı aşamaları (45cm püskürtme betonu)

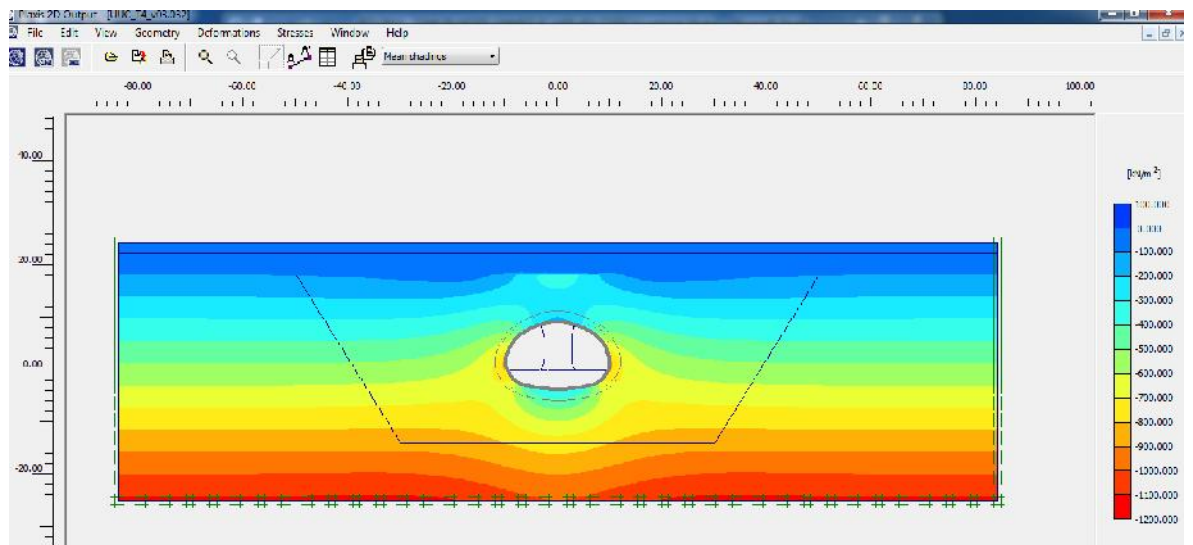
4.4 Analiz Sonuçları

Kireçtaşı GSI=35 parametrelerine göre elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

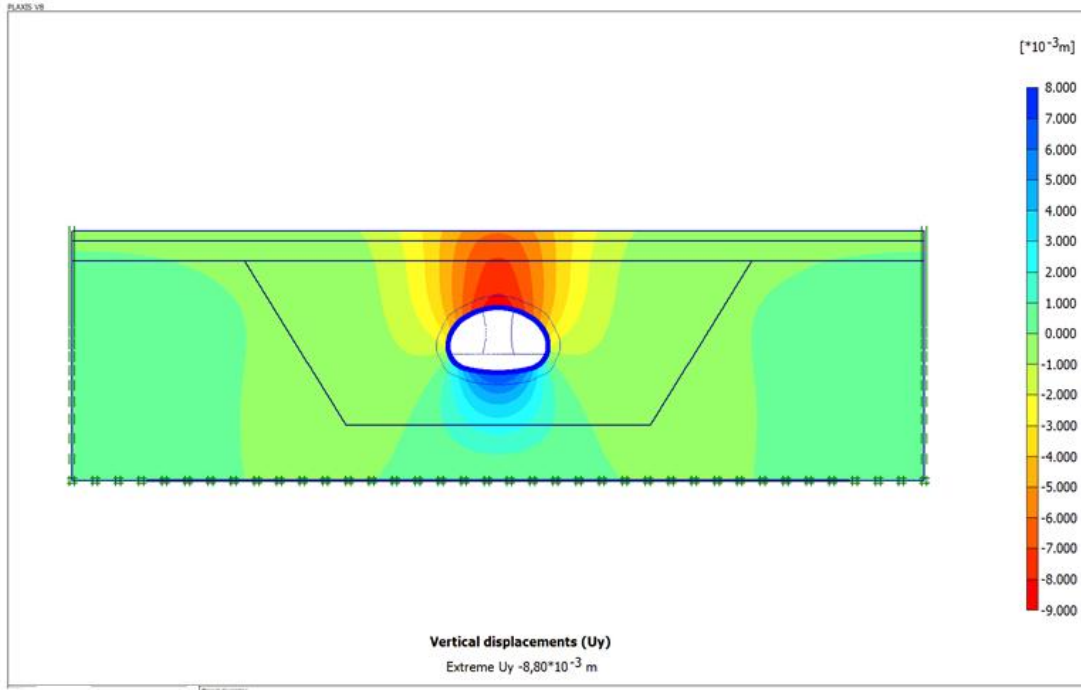
- Yüzeyde maksimum oturma: **8mm**.
- Yüzeyde maksimum yatay yer değiştirme: **3mm**.
- Hacim kaybı sonuçları $V_L = 0.10\%$.
- Yüzeyde maksimum açılal zemin deformasyonu: $\beta_{maks.} = 1/3838$.
- Yukarı doğru eğilme bölgesindeki maksimum yatay deformasyon: $\epsilon_{maks.} = 1/7926$.



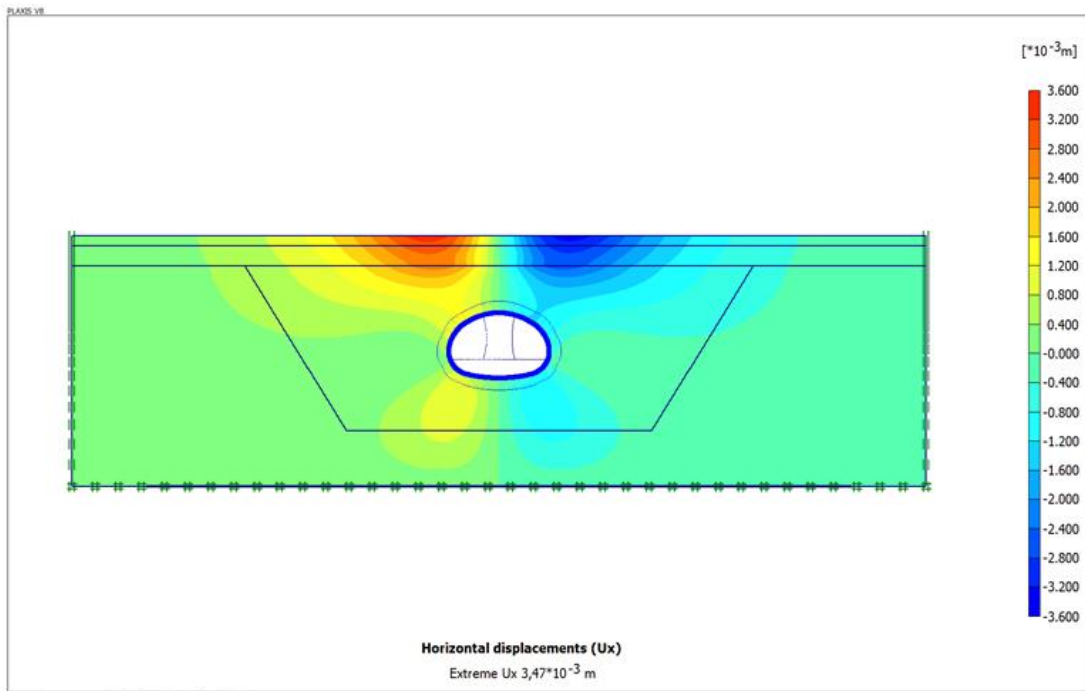
Şekil 4.11 : Sonlu elemanlar modeli deforme olmuş şekil



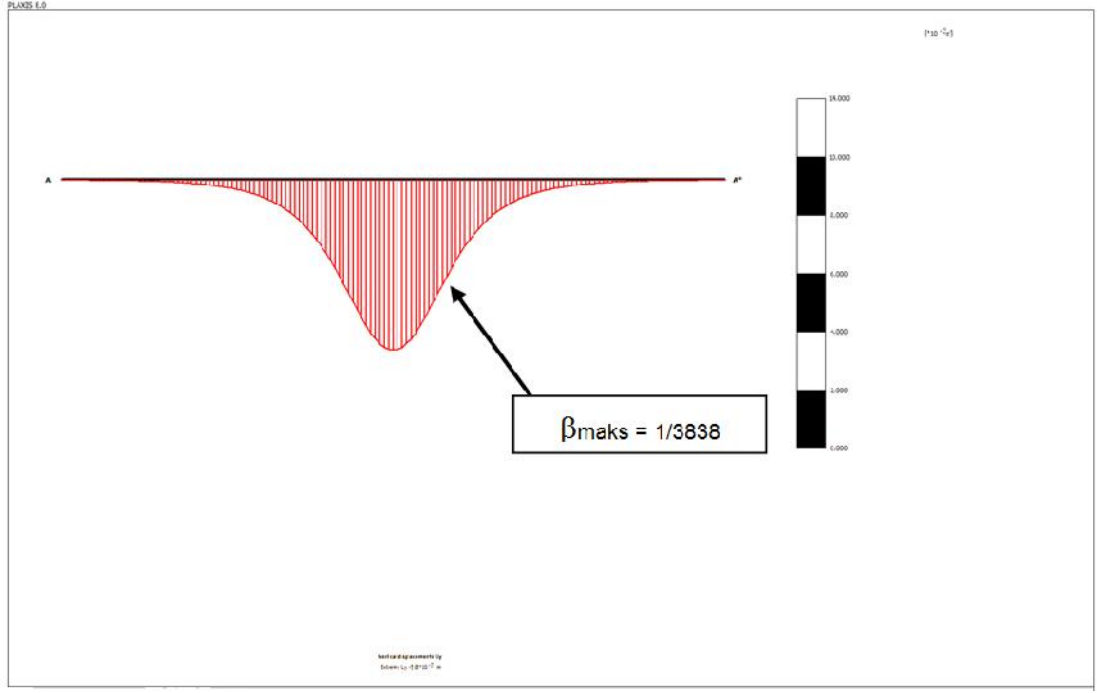
Şekil 4.12 : Tünel çevresindeki efektif asal gerilmeler



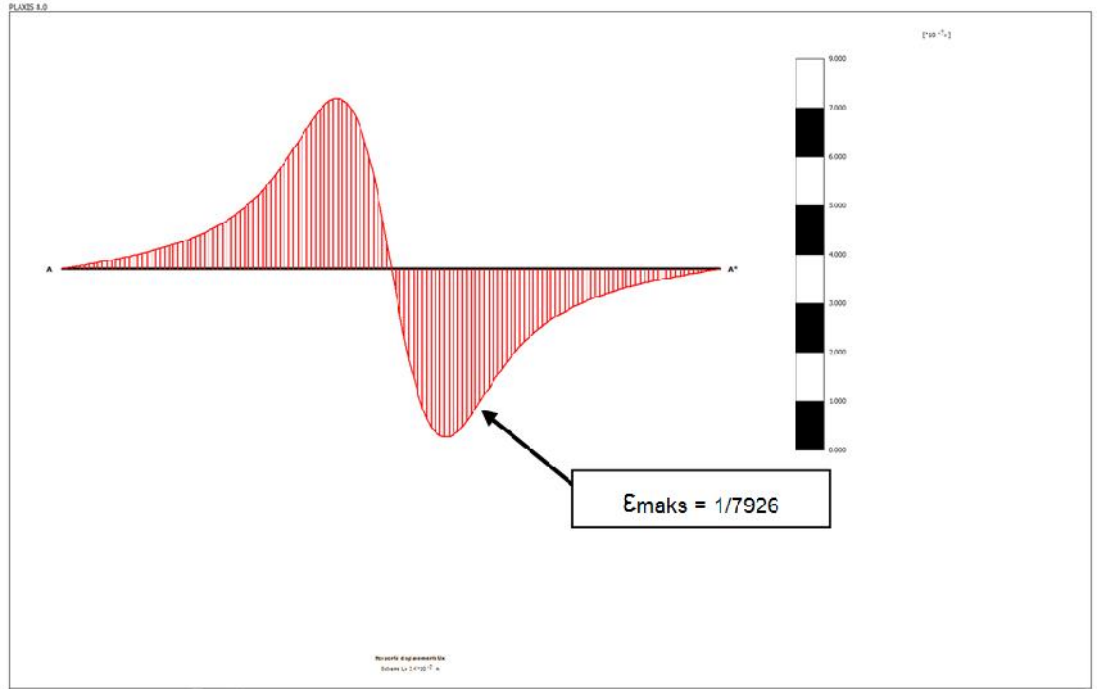
Şekil 4.13 : Düşey yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %0.1)



Şekil 4.14 : Yatay yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %0.1)



Şekil 4.15 : Düşey yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %0.1)



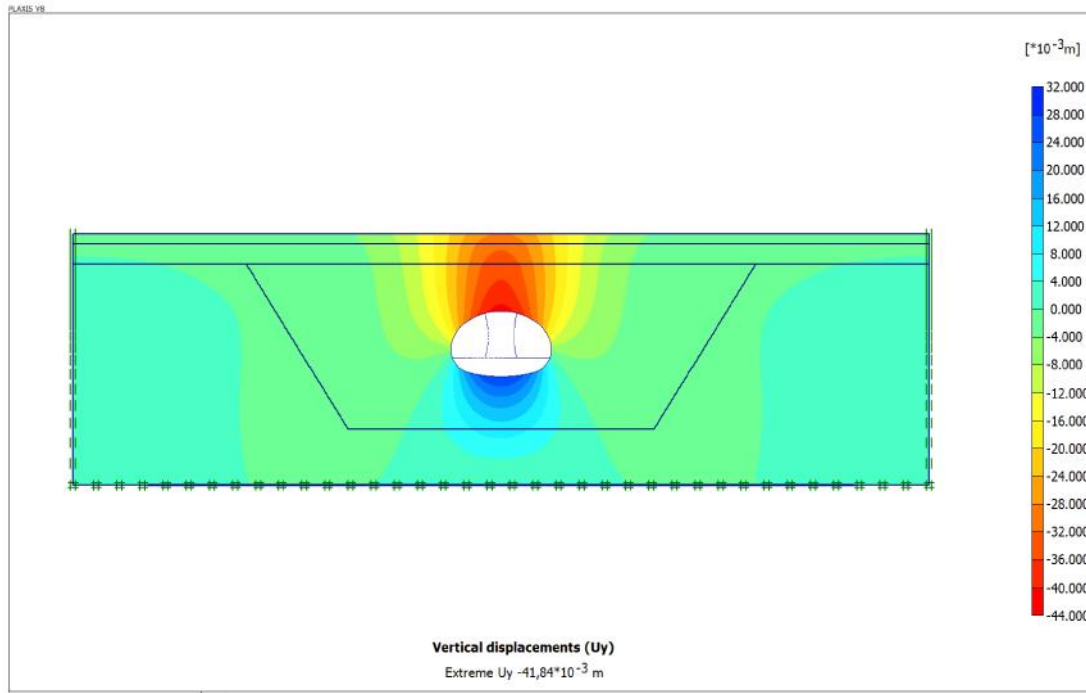
Şekil 4.16 : Yatay yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %0.1)

Tünelcilik tarihçesi ve literatüre dayanarak, Çizelge 4.3'te yer alan GSI=35 kireçtaşı parametreleri kullanılarak analiz sonucu elde edilen %0.1'lik hacim kaybının oldukça iyimser bir değer olduğu görülmektedir. Sondaj verileri STÇ-1 ve S40

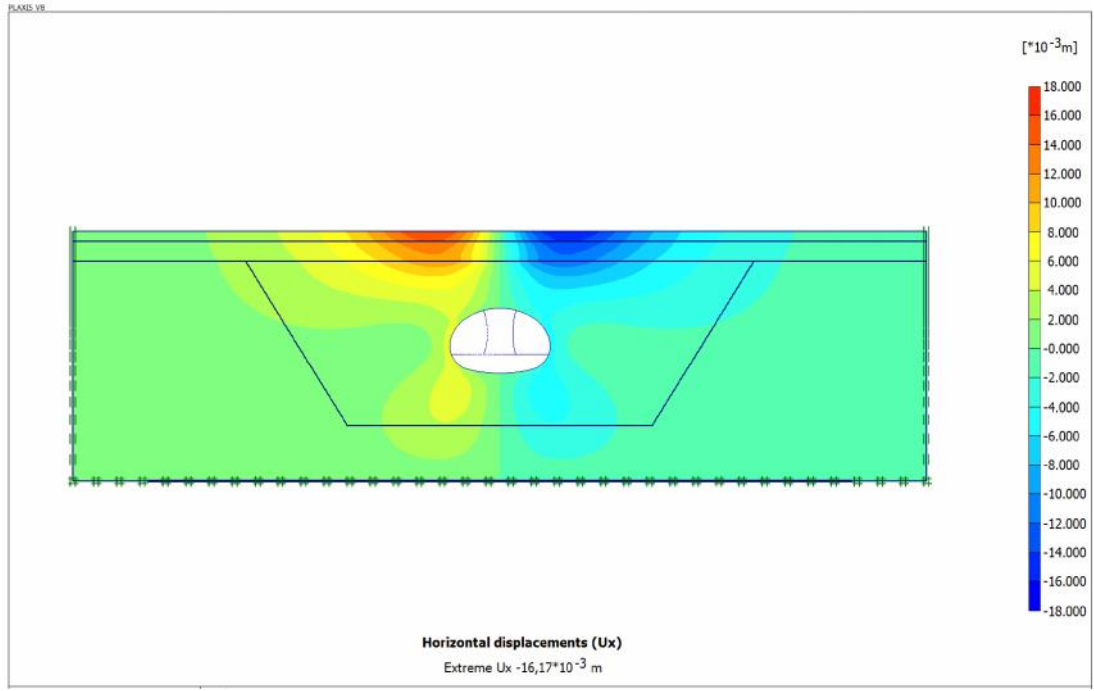
sondaj kuyularında çok iyi kaya karakteristiklerine rastlanılması sebebi ile, hacim kayıpları, geniş makas kesiti geleneksel kazı ile açıldığında beklenen değerin altında çıkmıştır. Bu nedenle, oturma ve bina hasar tahmini, bu bölgede yer alan kaya tipinde geleneksel yöntemle açılan tünellerde görülen hacim kaybı değerleri olan %0.5 ve %1.0 kullanılarak bu çalışmaya eklenmiştir.

Çizelge 4.2’de verilen sonlu elemanlar modelinde girdi parametresi olan kireçtaşının elastisite modülü E_{m} , analiz sonucunda %0.5 ve %1.0 hacim kaybı değerleri elde edilene kadar düşürülmüştür. Elde edilen sonuçlar aşağıda Çizelge 4.4’te gösterilmiştir.

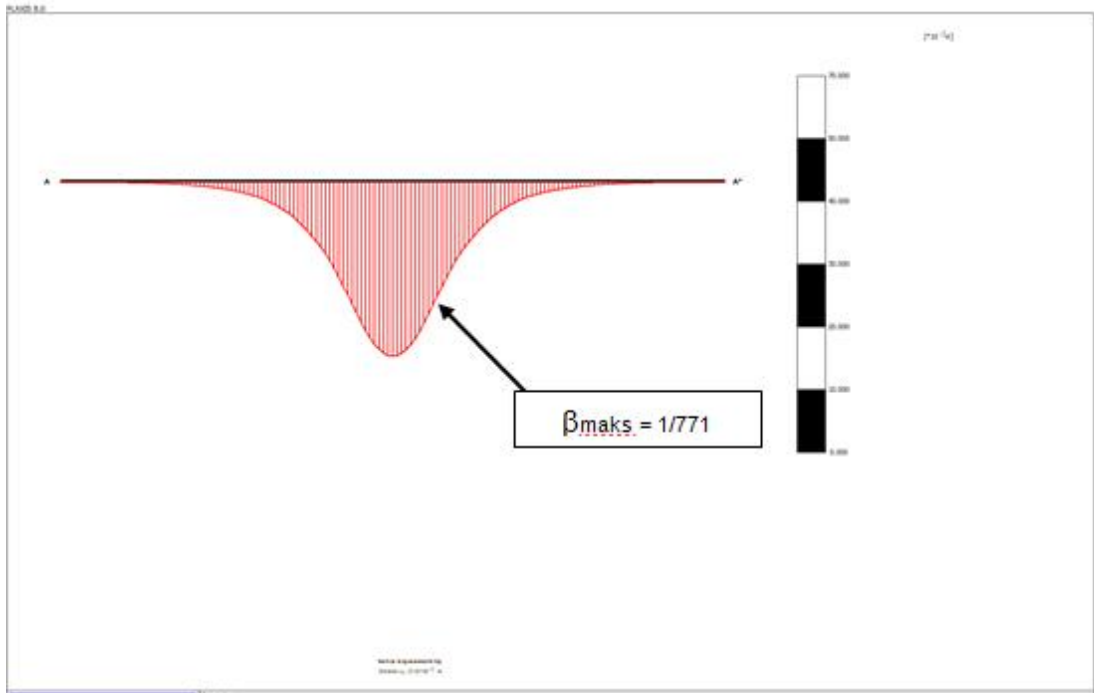
Hacim kaybı %0.5 elde edilene kadar çözülen modelde elde edilen açısız zemin deformasyonu ve oturma eğrisi sonuçları aşağıdaki gibidir.



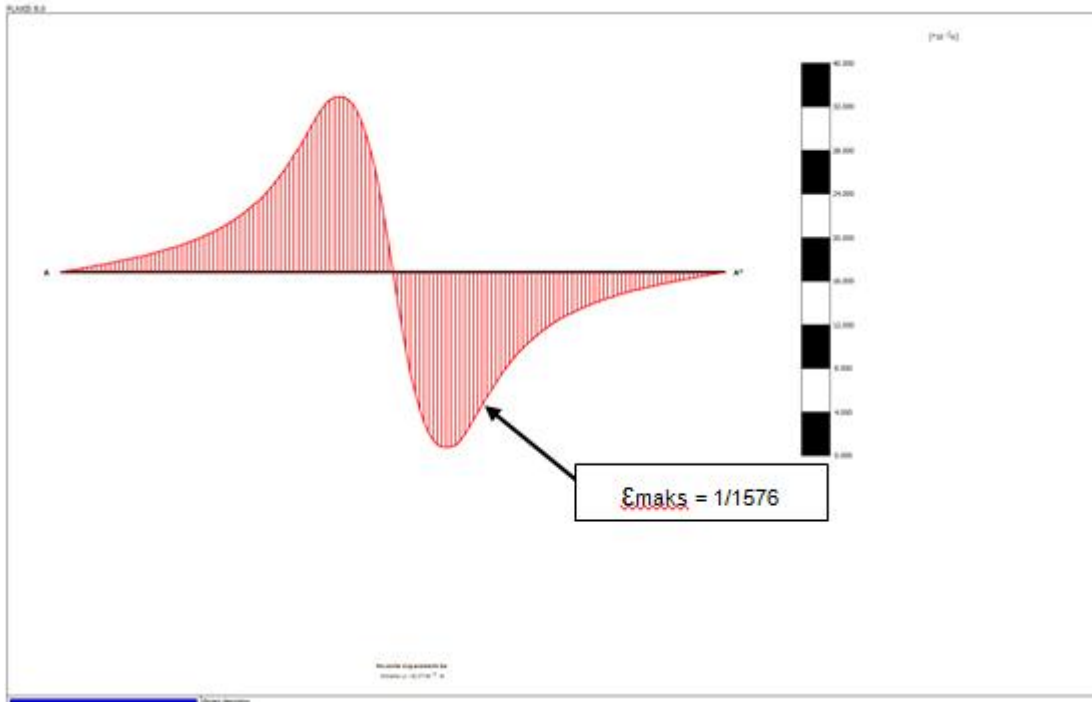
Şekil 4.17 : Düşey yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %0.5)



Şekil 4.18 : Yatay yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %0.5)

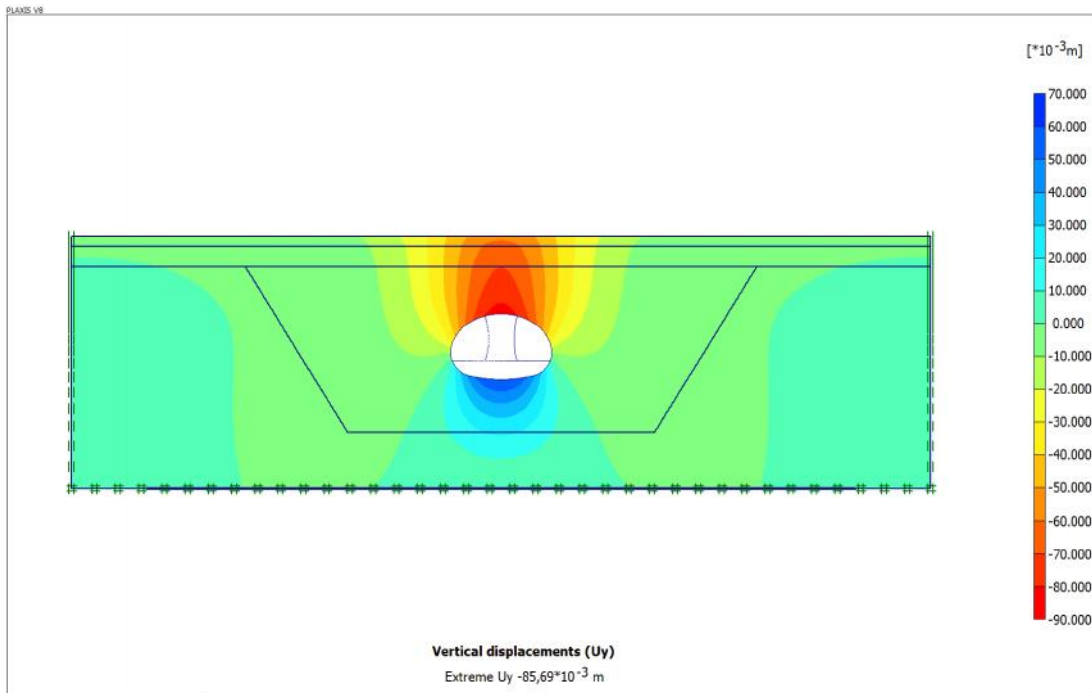


Şekil 4.19 : Düşey yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %0.5)

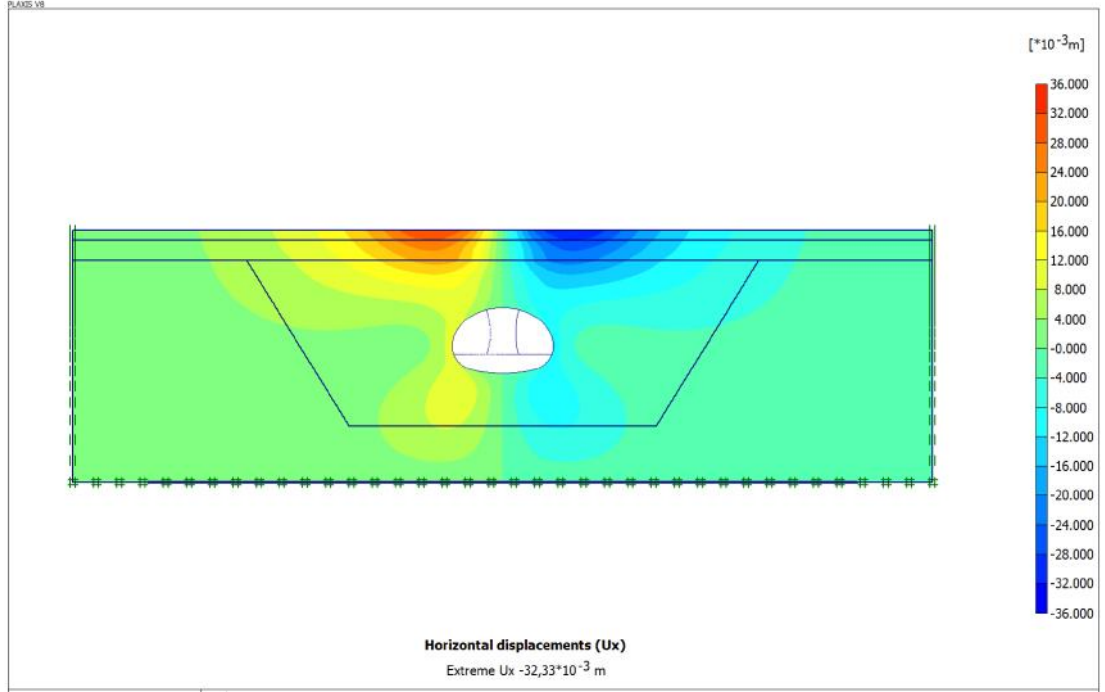


Şekil 4.20 : Yatay yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %0.5)

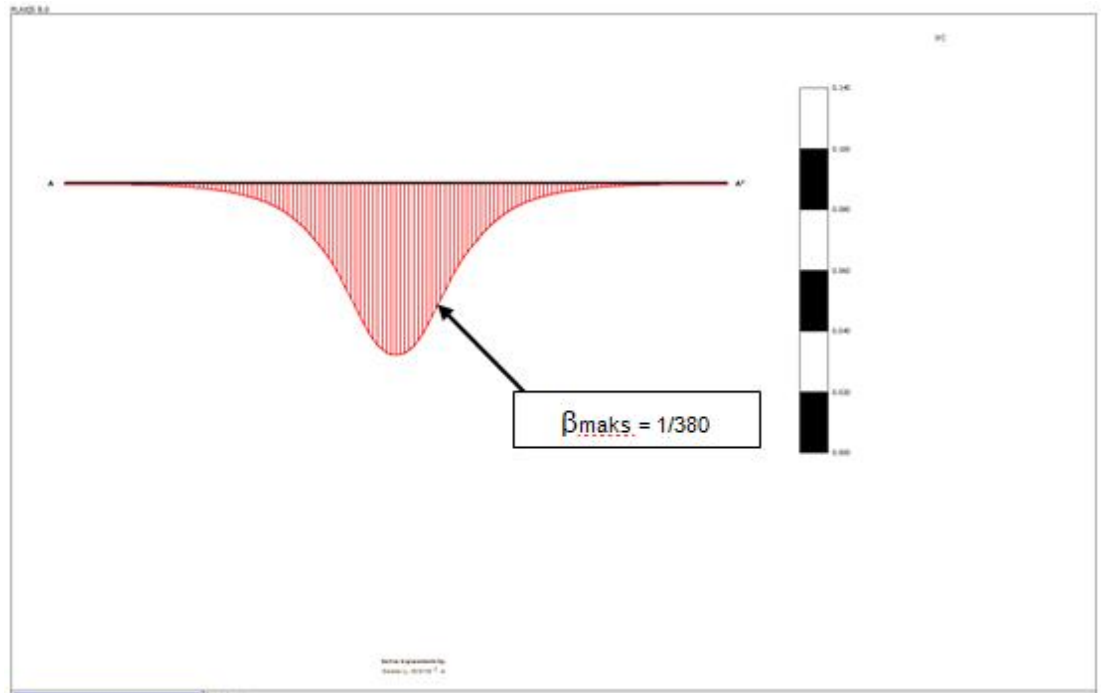
Hacim kaybı %1.0 elde edilene kadar çözülen modelde elde edilen açılal zemin deformasyonu ve oturma eğrisi sonuçları aşağıdaki gibidir.



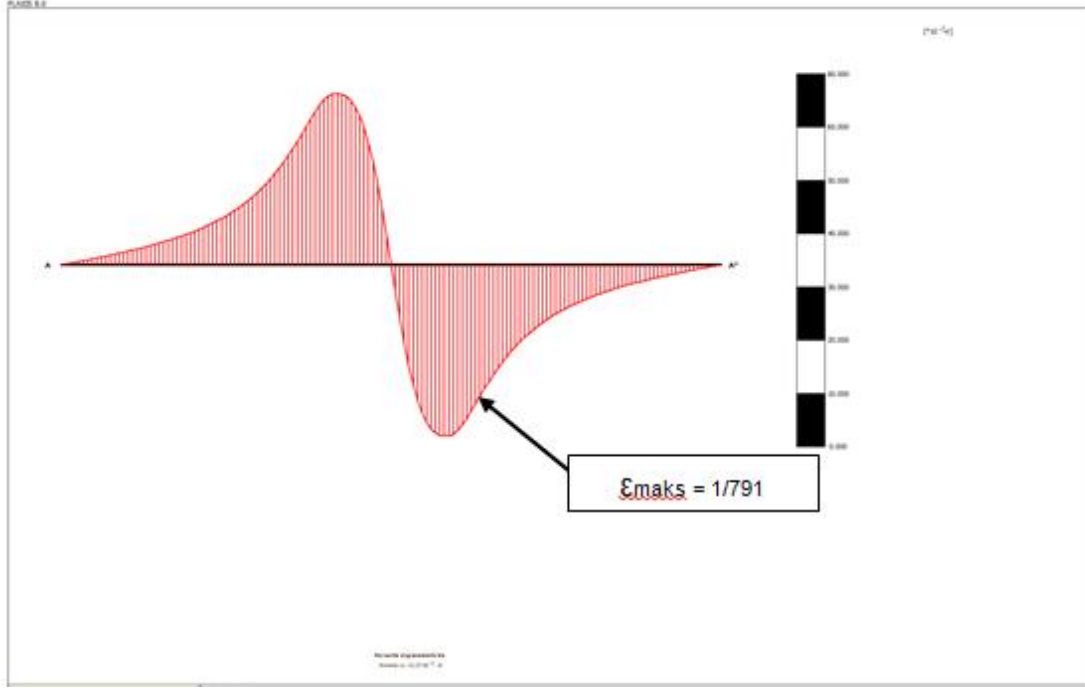
Şekil 4.21 : Düşey yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %1.0)



Şekil 4.22 : Yatay yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %1.0)



Şekil 4.23 : Düşey yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %1.0)



Şekil 4.24 : Yatay yerdeğiştirme (Elde edilen hacim kaybı: %1.0)

Sonuçlar Çizelge 4.4'te özetlenmiştir. Buna göre %0.1'lik hacim kaybına göre değerlendirme yapıldığında yüzeyde maksimum düşey oturma 6 mm olarak belirlenmiştir ve bu değer ihmal edilebilir bir değerdir. Tünel boyutu ve zeminde beklenmedik, farklı zonlarla karşılaşılması durumunda hacim kayıplarını arttırarak yeniden oturmalar ve yerdeğiştirmeler belirlenmiştir. Bu şekilde hesap yapıldığında; %0.5'lik hacim kaybı düşünüldüğünde deformasyonların doğal olarak arttığı ve yüzeyde maksimum düzey oturma değerinin 28 mm'e kadar çıktığı görülmektedir. Hacim kaybı daha kötü bir senaryo ile %1.0 olarak düşünüldüğünde ise yüzeyde maksimum oturma değeri 57 mm olmaktadır ki bu değer hasara yol açabilecek bir değerdir. İlk öngörülerden sonra tespit edilen binaların hasar değerlendirmesi Bölüm 3 'te tariflenen yöntemlere göre yapılacaktır.

Çizelge 4.4: Oturma analizi sonuçları

Kaya Kütlesi parametreleri	Hesaplanan yüzeydeki hacim kaybı	Maksimum düşey oturma	Yüzeyde maksimum yerdeğiştirme	Maksimum açısız zemin deformasyonu	Maksimum yatay deformasyon (yukarı doğru eğilme bölgesi)
Kireçtaşı GSI = 35 ($E_{RM} = 1100\text{MPa}$)	0.10% (*)	6mm	3mm	1/3838	1/7926
Kireçtaşı GSI = 35 (E_{RM} azaltma 300MPa)	0.50% (**)	28mm	16mm	1/771	1/1576
Kireçtaşı GSI = 35 (E_{RM} azaltma 140MPa)	1.00% (**)	57mm	32mm	1/380	1/791

(*): Kireçtaşı GSI = 35 parametreleri Çizelge 4.3'e göre yapılan SEM modeli hesabından elde edilen değerler.

(**): Kireçtaşı GSI = 35 Elastisite Modülü üzerine SEM modelinde uygulanan azaltma ile elde edilen değerler.

Oturma analizi sonuçlarından anlaşılabacağı gibi hacim kaybı arttıkça yüzey oturmalarının ve açısız zemin deformasyonlarının arttığı görülür. Elde edilen bu verilerden yola çıkarak, tespit edilen binaların, seçilen metodun (Burland) güvenlik değerlerine göre hasar analizi yapılarak, makas tüneline çalışmaları devam ederken binalarda meydana gelebilecek hasar tahminleri yapılacaktır.

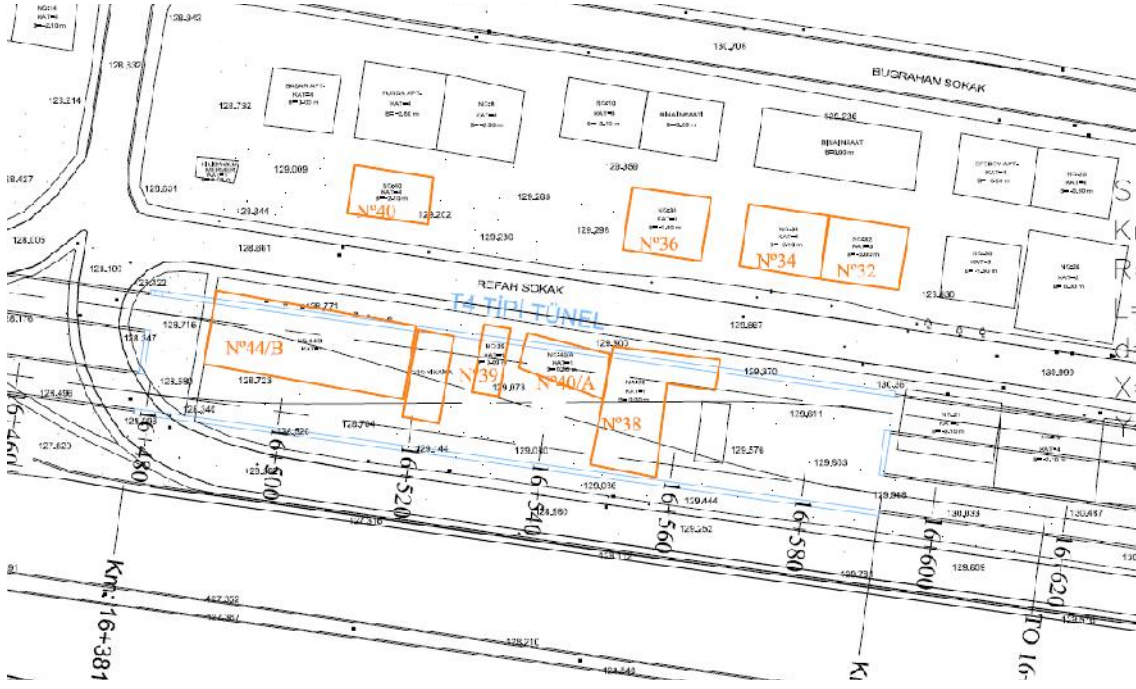
5. HASAR DEĞERLENDİRMESİ

5.1 Bina Hasar Değerlendirmesi

Makas tüneli kazısı nedeniyle binalarda oluşabilecek hasarı belirlemek için analizler uygulanmıştır. Plaxis ile hesaplanan makas tüneli kesitinde, hacim kaybı %0.1 olarak saptanmış, bu değer kireçtaşı parametrelerinin yüksek olması sebebi ile kabul edilebilir olmakla birlikte, makas tünelinin büyüklüğü, kazı sırasında karşılaşılabilecek farklı jeolojiler veya zayıf zonlar sebebi ile, literatür ve tünelcilik geçmişine bağlı olarak, %0.5 ve %1.0 hacim kayıpları düşünüldüğünde oturmalar ve açılmalarda zemin deformasyonu hangi değerlere ulaşmaktadır bunun da cevabı aranmıştır. Bu aşamadan sonra elde edilen deformasyonlar bina değerlendirmesinde kullanılarak, binalara etkilerinin boyutları tahmin edilmeye çalışılmıştır.

5.2 İncelenen Binalar

Makas tüneli kazı yüzeyinde etkileşim alanında bulunan binalar 8 adet olup bu binalarda tünel açılması sırasında meydana gelebilecek hasarların durumları araştırılmıştır. Binalar tünel açılmadan önce tespit edilmiş bodrum kat olması durumu ve derinliği, kat sayısı, binada çatlak mevcudiyeti, kullanım amacı, cephe kaplaması durumları araştırılmıştır.



Şekil 5.1 : İncelenen binalar vaziyet planı

Bina bilgileri aşağıdaki çizelgede özetlenmiştir.

Çizelge 5.1 : İncelenen binalar-1

Bina	N° 44/B	N° 39	N° 40/A	N° 38
Konum	16+500	16+530	16+540	16+560
Kullanım	Ticari	Ticari	Ticari	Ticari
Kat Sayısı n°	1	1	1	1
Bodrum Katlar	0	0	0	0
Yapı	Betonarme	Betonarme	Betonarme	Betonarme
Cephe	Alüminyum	Sıva	Sıva	Sıva
Görünür Çatlaklar	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır
Fotoğraf				

Çizelge 5.2 : İncelenen binalar-2

Bina	N° 40	N° 36	N° 34	N° 32
Konum	16+510	16+550	16+570	16+580
Kullanım	Konut&Ticari	Konut	Konut	Konut&Ticari
Kat Sayısı n°	4	3	3	3
Bodrum Katlar	1	1	1	1
Yapı	Betonarme	Betonarme	Betonarme	Betonarme
Cephe	Sıva	Sıva	Sıva	Sıva
Görünür Çatlaklar	Hayır	Hayır	Evet	Evet
Fotoğraf				

5.3 Bina Hasar Değerlendirmesi

Bina hasar değerlendirmesi bölüm 3'te anlatıldığı gibi birinci aşama, ikinci aşama ve üçüncü aşama değerlendirmelerini kapsayacaktır. Birinci aşamada ihmal edilebilir hasarlar ortaya çıkarsa ikinci ve üçüncü aşama değerlendirmelerine gerek kalmayacaktır.

5.2.1 Birinci aşama değerlendirme

Uygulanan 1. aşama analizi (oturma > 10 mm) sonuçlarına göre çeşitli binaların hasar derecesi “hafif” ve “orta” olarak belirlenmiştir ve böylece bu binalarda 2. aşama değerlendirme uygulanmıştır. Bu değerlendirme, oturmalarından dolayı oluşan çekme deformasyonunun hesaplandığı Burland Yöntemini temel alır.

- E = Binanın elastisite modülü
- G = Binanın kayma modülü
- L = Bina genişliği
- H = Bina yüksekliği

Çizelge 5.3 : Birinci aşama değerlendirmesi

Hasar kategorisi	Maksimum oturma (mm)	Maksimum açısız zemin deformasyonu
0 – 1 İhmal edilebilir – Çok hafif	<10 mm	< 1/500
2 Hafif	10 – 50 mm	1/200 – 1/500
3 Orta	50 – 75 mm	1/50 – 1/200
4 Ciddi	> 75 mm	1/50 – 1/200
5 Çok ciddi	> 75 mm	> 1/50

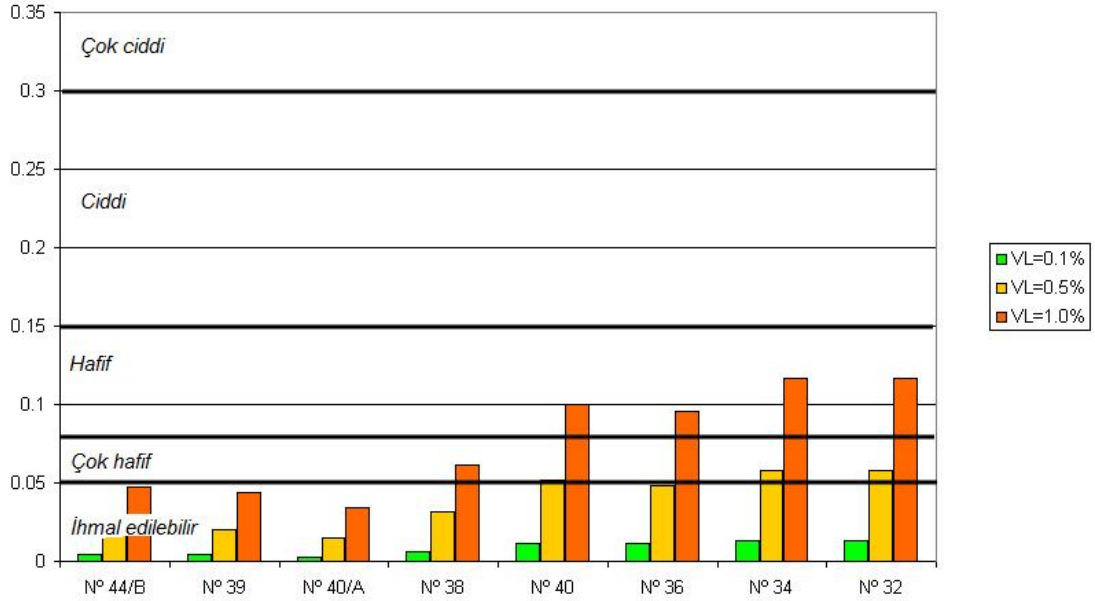
Bölüm 4’te verilen sonuç çizelgesinde, 3 farklı hacim kaybı değerine göre düşey oturmalar; 6 mm, 28 mm, 57 mm’dir. Bu sebeple hafif ve orta hasar kategorisine giren değerler sebebi ile ikinci aşama değerlendirmesi yapılmıştır.

5.3.2 İkinci aşama değerlendirme

İncelenen binalarda, Burland yöntemine göre hesaplanan (Bölüm 3 te formülasyonları belirtilmiştir) çekme birim deformasyonları aşağıdaki grafikte sunulmaktadır:

Çizelge 5.4 : Bina çekme birim deformasyonları ve hasar değerlendirme sonuçları

Binalar	L (m)	H (m)	E/G	V _L =0.1%		V _L =0.5%		V _L =1.0%	
				Hesaplanan Çekme Birim Deformasyonu (%)	Hasar Kategorisi	Hesaplanan Çekme Birim Deformasyonu (%)	Hasar Kategorisi	Hesaplanan Çekme Birim Deformasyonu (%)	Hasar Kategorisi
N° 44/B	11	3	2.6	0.004	İhmal edilebilir	0.023	İhmal edilebilir	0.047	İhmal edilebilir
N° 39	10	3	2.6	0.004	İhmal edilebilir	0.020	İhmal edilebilir	0.044	İhmal edilebilir
N° 40/A	7	3	2.6	0.003	İhmal edilebilir	0.015	İhmal edilebilir	0.034	İhmal edilebilir
N° 38	19	3	2.6	0.006	İhmal edilebilir	0.032	İhmal edilebilir	0.061	Çok Hafif
N° 40	7	12	2.6	0.011	İhmal edilebilir	0.052	Çok Hafif	0.100	Hafif
N° 36	10	9	2.6	0.011	İhmal edilebilir	0.048	İhmal edilebilir	0.096	Hafif
N° 34	9.5	9	0.5	0.013	İhmal edilebilir	0.058	Çok Hafif	0.117	Hafif
N° 32	9.5	9	0.5	0.013	İhmal edilebilir	0.058	Çok Hafif	0.117	Hafif



Şekil 5.2 : $V_L=0.1, 0.5, 1.0$ % için bina hasar kategorisi

5.3.3 Üçüncü aşama değerlendirme

2. aşama değerlendirmesine göre tüm binalar “hafif” hasar (veya daha düşüğü) kategorisinin altında olduğu için bu aşama uygulanabilir değildir.

5.4 Sonuçlar ve Değerlendirme

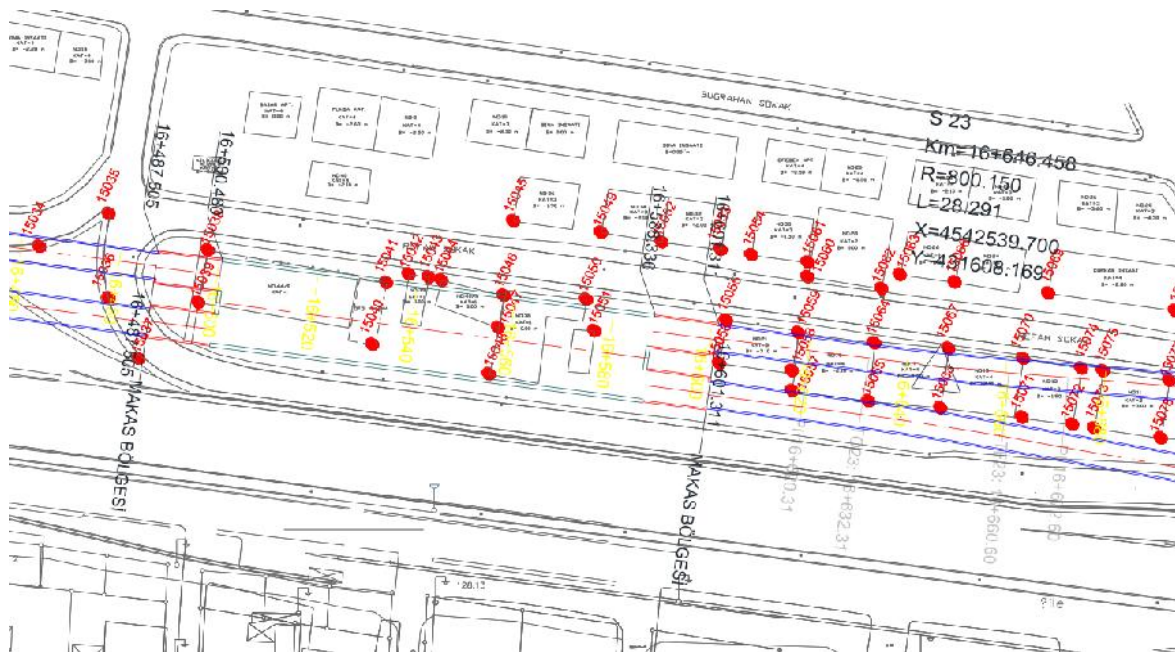
Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi, Geoteknik Anahat Parametre Raporu’nda verilen zemin koşulları dikkate alındığında (iyimser bir senaryoya göre $V_L=0.1\%$), T4 makas tüneli kazısı etki alanında olan binalarda herhangi bir hasar oluşması beklenmemektedir.

Diğer taraftan, daha yüksek hacim kayıpları dikkate alınsa bile $V_L=1.0\%$ (Literatüre göre kaya tipi malzeme ile geleneksel kazı yapmak için, kaydedilen hacim kaybı değerleri 0.5-1.0% değerleri arasında değişmektedir), 40, 36, 34 ve 32 numaralı binalarda “ihmal edilebilir” hasarlar oluşurken, diğer binalardaki hasar tipi “estetik”tir (Bkz. Çizelge 5.4) ve herhangi bir iyileştirme yöntemi uygulaması gerekli değildir.

Bina hasar tahmini sonuçlarına göre, %1’in altındaki hacim kayıplarını önlemek için T4 makas tüneli kesiti kazı tasarımı ve ilk destek tipleri uygulanır ve bu sayede yüzeydeki binalar ağır hasarlardan korunmuş olur. Yinede bu büyüklükte tünel kazılarının etkilerini gözlemlemek için kötü durumda olduğu düşünülen binalara bulon çakılarak deformasyon okumaları yapılabilir. Aynı şekilde zemin jeolojisinin

Özellikle metro ağı sisteminin kentlerin gelişmesinde önemli etkisi olduğu düşünüldüğünde ve metro projelerinin giderek artması sebebi ile, şehir içinde kazılan tüneller ve zemin ile ilişkilerini irdelemek önemli bir husus olmaktadır. Farklı geometrilerdeki tünellerin, yan yana açılan ikiz tünellerin, NATM ya da TBM ile açılması farketmeksizin müşterek oturma ve hasar tahminleri yapılarak olası kazalar ve can kayıpları önlenebilir. Bu konudaki farkındalık ve arge çalışmaları ile büyük bütçeli projelerin güvenli ve sağlıklı bitirilmesi, üçüncü şahıs ve mallarına zarar verilmeden ya da az hasarlı bitirilmesi hedeflenmelidir.

Yerinde yapılan ölçümler göstermiştir ki bu bölgede yüzey izleme noktalarında yüzey deformasyonları okunduğunda oturmalar 10mm'in altında kalmaktadır.

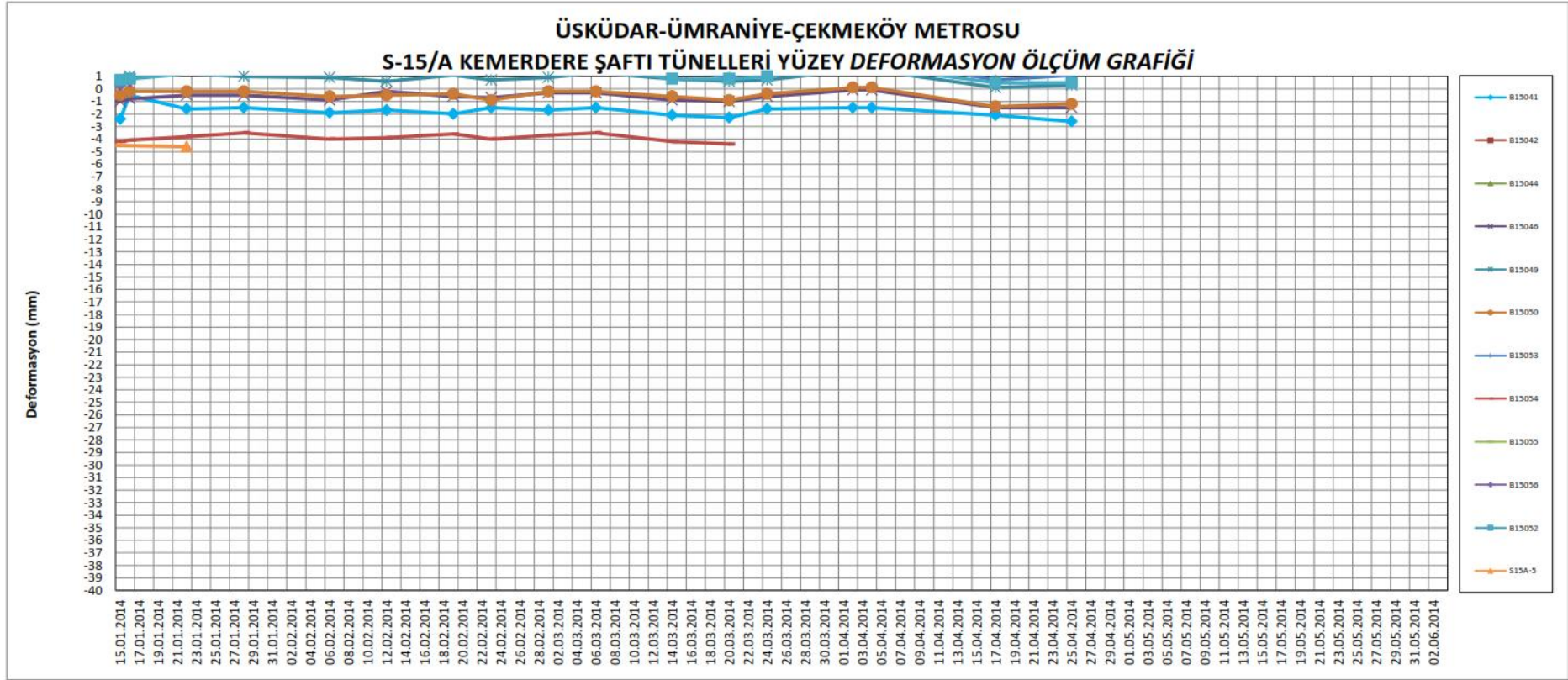


Yerinde yapılan ölçümlerde şu aşamalar takip edilmiştir: Öncelikle etki alanında kaldığı belirlenen binalara (her binanın dört köşesine) bulonlar çakılır ve bulonlar

özel bir enjeksiyonla sabitlenir. Sabitlenen bulonların, belirli zamanlarda mira ve hassas ölçüm aletleri (total station) yardımıyla hareketi okunur. Hassasiyet milimetrenin binde biridir ve ilk gün okunan kot değerinden, sonraki günlerde okunan kot değeri çıkartılarak hareketin yönü ve miktarı belirlenir.



Şekil 5.4 : Yüzey deformasyon bulonu okumaları



Şekil 5.5 : Yüzey deformasyon okumaları grafiği

Yüzey deformasyon okumalarına bakıldığında, bulon ile okuma yapılan röper noktalarındaki oturmaların 5 mm mertebelerinde olduğu görülmektedir. Bu değer hesaplanan maksimum düşey oturma değeri 6 mm (Hacim kaybı 0.10 değeri için) ile örtüşmektedir. Bu karşılaştırma ile ilk kabul edilen hacim kaybı ile hesaplanan oturmalar ve Plaxis 2D sonuçları yerinde gözlemler ve ölçümlerle desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Plaxis Programı V8.** (2004) Plaxis 2D Tunnel version 2 Material Models Manual. Delft University of Technology & PLAXIS B.V.
- [2] **Peck, R. B.** (1969). Deep excavations and tunnelling in soft ground. *Proc. Of the 7th int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* . Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, A.C.
- [3] **O'Reilly, M. P., & New, B. M.** (1982). Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitudes and prediction. *Tunnelling' 82*.
- [4] **Mair, R. J.** (1996). Settlement effects of bored tunnels. *In International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. London.
- [5] **Burland, J.** The assessment of the risk of damage to Binas due to tunnelling and excavations – An historical perspective, AulaPaymacotas UPC 2008.
- [6] **Köse, H.; Gürgen, S; Onargan, T; Yenice, H; Aksoy, C. O.,** (2007). Tünel ve Kuyu Açma, *D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 256*, İzmir.
- [7] **Arioğlu, E.,** (2014). Tünel Ders Notları. Yıldız Teknik Üniversitesi, Alındığı yer; <http://www.inm.yildiz.edu.tr/anabilimdallari/ulastirmatr/tunel.htm>.
- [8] **Boscardin, M., Cording, E.,** (1989), "Building Response to Excavation Induced Settlement", *ASCE Journal of Geotech. Eng.*
- [9] **Schwartz, C.W.,** 1979, Numerical analysis of underground structures computing in Civil Engineering, p:217 – 229.
- [10] ITA/AITES Settlements induced by tunnelling in soft ground, Report 2006.
- [11] **Ward, W. ve Pender, M.** (1981), "Tunneling in Soft Ground-General Report", *Proc. 10th ICSMFE*, 261-275.
- [12] **Rankin, W.** (1988), "Ground Movements Resulting from Urban Tunneling: Prediction and Effects", *Proc. 23rd conf. Of the Eng. Group of the Geological Society*, London: Geological Society, 79-92.
- [13] **Franzius, JN,** (2003). Behaviour of Binas due to tunnel induced subsidence thesis, University of London, Department of Civil and Environmental Engineering.

- [14] **Cording, EJ** et al, Examples of Bina response to excavation and tunnelling, AulaPaymacotas UPC 2008.
- [15] **Finno, R**, (2010). Evaluating excavation support systems to protect adjacent structures, Dept. of Civil and Environmental Eng, University of Houston.
- [16] Üsküdar Ümraniye Çekmeköy Metrosu Teknik Şartnamesi (2012)
- [17] Geoteknik Rapor & Ekler “Geoteknik Veri Raporu – Dudullu İstasyonu-S15A Şaftı” – Ayson Geoteknik ve Deniz İnşaat A.Ş. – Eylül 2012 (15/10/2012).
- [18] Geoteknik Rapor & Ekler “Geoteknik Rapor – Ümraniye - Samandıra ve Depo Sahası Raylı Sistem Projesi” (2006-01-007) – STFA Temel Araştırma ve Sondaj A.Ş. – Ağustos 2006.
- [19] Jeolojik Profil ve Güncel Güzergah “Güzergah Anahat 1-20_03-04-2013 PRT_Rev03” – Prota ve Dogus (r04/04/2013).
- [20] Geoteknik Anahat Parametre Raporu “UUC-GE-000-000-100-U-001-01A”, GBR rev.1, S04 ile S11 arasında. (06/03/2013).

EKLER

EK A: İncelenen bölgede yapılan sondajlara ait bilgiler

EK B: Plaxis modelinin açıklanması

EK C: İncelenen tünele ait iksa bilgi ve tabloları

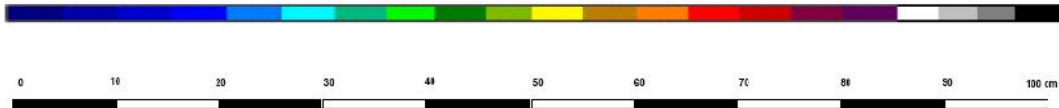
EK A

Makas tünelinin geçtiği zemin formasyonu ve o bölgede yapılan sondajlara ait görseller ve sondaj bilgileri aşağıda verilmektedir.

PROJE ADI	ÜSKÜDAR ÜMRANIYE METRO PROJESİ
YERİ	S-15 A ŞAFTI
SONDAJ NO	SK-ÇEK-1
SANDIK NO	1 / 6
DERİNLİK (m)	0.00 – 7.50



PROJE ADI	ÜSKÜDAR - ÜMRANIYE METRO PROJESİ
YERİ	S-15 A ŞAFTI
SONDAJ NO	SK-ÇEK-1
SANDIK NO	2 / 6
DERİNLİK (m)	7.50 – 11.25



PROJE ADI	ÜSKÜDAR - ÜMRANIYE METRO PROJESİ
YERİ	S-15 A ŞAFTI
SONDAI NO	SK-ÇFK-1
SANDIK NO	3 / 6
DERİNLİK (m)	11.75 – 15.00



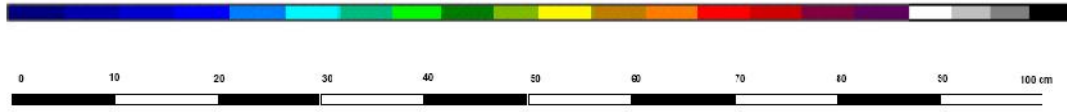
PROJE ADI	ÜSKÜDAR - ÜMRANIYE METRO PROJESİ
YERİ	S 15 A ŞAFTI
SONDAI NO	SK-ÇFK-1
SANDIK NO	4 / 6
DERİNLİK (m)	15.00 – 19.00



PROJE ADI	ÜSKÜDAR - ÜMRANİYE METRO PROJESİ
YERİ	S-15 A ŞAFTI
SONDAJ NO	SK-ÇEK-1
SANDIK NO	5 / 6
DERİNLİK (m)	19.00 – 22.50



PROJE ADI	ÜSKÜDAR - ÜMRANİYE METRO PROJESİ
YERİ	S-15 A ŞAFTI
SONDAJ NO	SK ÇEK 1
SANDIK NO	6 / 6
DERİNLİK (m)	22.50 – 23.50



Şekil A.1 : Sondaj Fotoğrafları (S-ÇEK-1)

YER : TOPLU KONUT-ÇEKMEKÖY 16+173 KM										KUYU NO : STÇ1			
EKİPMAN : DIAMEC 262										ZEMİN KOTU : 134.12 m. G.D.			
SONDAJ YÖNTEMİ : ROTARY : 0.00-26.50m arası										KOORD. : N : 4 542 690.94 E : 411 524.74			
KUYU ÇAPI : 0.00-26.50m arası - 80cm										BAŞLANGIÇ : 27.03.2006 BİTİŞ : 29.03.2006			
NUMUNE VE YERİNDE DENİY.		S.P.T. darbe sayısı			Muh. Dm. (m) Tarih	Y.A.S. Dm. (m)	TCR %	RQD %	SCR %	Dm. (m)	ZEMİN CİNSİ	KOT (m)	LEJANO
Dm. (M)	TİP	15	15	15									
					27.03.06								
										0.40	DOLMA ZEMİN	134.10	
1.60	D1	15	20	25							Çakıl 100 KUM (SC) - 5-25 mm-kaba kum; 1/24 mm. kumlu çakıl; 5/41 duşuk plastisite 16, sınırlı katılaşmış; yeşil; HCl+ nemli kati.		
1.95			N = 43							2.00			132.79
3.00	D2	11	18	22							Kumlu Yüklük Plastisite 16, (CL) - 169 yüklük plastisite 16; 5-25 mm kum; 5/5 mm. kumlu çakıl; sınırlı katılaşmış; HCl+ nemli; kar-karbonat taşları gözetimlidir.		
3.45			N = 40										
4.50	D3	13	20	24		Y.A.S.					5.30		
4.95			N = 44		5.00	5.10							132.50
5.20					28/03								
								100	83	83			
6.70								100	84	87			
8.10								100	86	88			
9.10								100	78	84			
9.55								100	86	88			
10.90								100	88	88			
12.30								100	88	89			
13.30								100	88	89			
15.40								97	88	90			
15.90								100	48	72			
16.70								87	67	85			
17.45						5.00	5.10	99	61	77			
18.90					29/03	4.10		100	32	57			
19.01								100	62	74			
								93	76	90			

Şekil A.2 : Sondaj Bilgileri (STÇ-1) -1

YER : TOPLU KONUT-ÇEKMEKÖY 15-173 KM										KUYU NO : STÇ1			
EKİPMAN : DIAMEC 282										ZEMİN KOTU : 134,79 ml. C.D.			
SONDAJ YÖNTEMİ : HÖLTMAN : 0.00-08.40m arası.										KÖORD : N : 4 542 620.64 E : 437 524.74			
KUYU ÇAPI : 0.00-28.60m arası - 88mm.										BAŞLANGIÇ : 27/03/2006 BİTİŞ : 28/03/2006			
NUMUNE VE YERİNDE DENEY.		S.P.T. darbe sayısı			Muh. Dm. (m) Tarih	Y.A.S. Dm. (m)	TCR %	RQD %	SCR %	Dm. (m)	ZEMİN CİNSİ	KOT (m)	LEJAND
Dm. (M)	TİP	15	15	15									
20.50					29/03		93	78	88		Orta siltli, açıkta koyu, orta taneli (kırıntı) kumlu kireçtaşı, çok az mıcır tabakası bitümlü ve/veya siltli siltli kumlarla		
							94	69	69		Orta geçirgen yer yer çakıl içeren, siltli kum 1: 25-35 derece, bitümlü, pürüzlü, kısıtlı dolgu, açık kireçsiz, düzensiz.		
21.00							100	75	87		12.00-12.40m arası, 85-70 derece, düzensiz, pürüzlü, kısıtlı dolgu, açık siltli kumlarla.		
21.50							100	69	36		15.00-15.50m arası, 85-90 derece, kısıtlı dolgu, açık.		
24.50							100	83	36		13.20-13.40m arası, 75-85 derece, düzensiz, pürüzlü, kısıtlı dolgu, açık.		
25.50							86	91	91		16.00-16.50m arası, 90 derece, düzensiz, pürüzlü, kısıtlı dolgu, çakıl.		
26.50							97	85	38		15.00-15.50m arası, kırıntı çakıl, 20m, çakıllar arası az dolgu.		
28.00							100	86	96	28.00	6.40-6.50m, 8.00-8.30m, 10.05-10.10m, 12.05-12.10m, 17.70-17.85m, 18.00-18.05m arası, 30mm'ye kadar ebatları dolgu, yer yer 30'ye dolgu.	106.25	
28.50											17.85m'de maksimum kum tabakası dolgu, mikro siltli kumlarla, mikro taneli dolgu.		
											SONDAJ BİTİŞİ		

Şekil A.3 : Sondaj Bilgileri (STÇ-1) -2

Şekil A.3 : Sondaj Bilgileri (S40)

temel

araştırma ve sondaj ltd.

ÜMRANİYE (Altınşehir)-SAMANDIRA RAYLI SİSTEM PROJ
JEOTEKNİK ARAŞTIRMALARI

Sayfa 1 / 2

YER : ÇEKMEKÖY İSTASYONU 18+450 KM										KUYU NO : S40			
EKİPMAN : ACKER TÖREDO										ZEMİN KOTU : 134.23 m. C.D			
SONDAJ YÖNTEMİ : ROTARY, 0.00-34.60m arası.										KOORD. : N : 4 542 695.52 E : 431 600.69			
KUYU ÇAPI : 0.00-34.60m arası - 86mm.										BAŞLANGIÇ : 30.03.2006 BİTİŞ : 03.04.2006			
NUMUNE VE YERİNDE DENEY.		S.P.T. darbe sayılar			Muh. Drn. (m) Tarih	Y.A.S. Drn. (m)	TCR %	RQD %	SCR %	Drn. (m)	ZEMİN CİNSİ	KOT (m)	LEJAND
Drn. (M)	TİP	15	15	15									
1.50	D1	8	3	5	31.03.20						DOLMA ZEMİN (Kum, Çakıl, blok ve kırıntı parçacıkları)	131.73	
1.95			N = 8							2.50			
3.00	D2	7	9	22									
3.45			N = 21										
4.50	D3	8	10	14		Y.A.S							
4.95			N = 24			5.10							
5.00	D4	6	11	13									
5.45			N = 24										
7.50	D5	10	14	19						5.00		128.23	
7.85			N = 33										
9.00										9.00		125.23	
9.48							86	25	35				
10.20					31/03	5.20	100	90	90				
10.90						5.40	96	41	63				
12.00							91	65	73				
12.45							81	78	78				
13.00							100	58	58				
13.60					01/04	8.50	100	45	67				
14.60						9.50	96	79	82				
15.70							55	61	61				
17.00							100	62	62				
18.30							100	78	67				
19.70							92	77	79				
							80	58	73				
NOTLAR :													
SONDÖR : A.ÜSTÜNDAĞ LOGU HAZIRLAYAN : B.ÜLGEN KONTROL EDEN : Ş.ĞAĞOĞLU													

Şekil A.4 : Sondaj Bilgileri (S40) -1

YER : ÇEKMEKÖY İSTASYONU 16+450 KM											KUYU NO : S40		
EKİPMAN : ACKER TOREDO											ZEMİN KOTU : 134.23 m. C.D.		
SONDAJ YÖNTEMİ : ROTARY. : 0.00-34.50m arası.											KOORD. : N : 4 542 625.52 E : 431 803.89		
KUYU ÇAPI : 0.00-34.50m arası - 86mm.											BAŞLANGIÇ : 30.03.2008 BİTİŞ : 03.04.2008		
NUMUNE VE YERİNDE DENEY.		S.P.T. darbe sayısı			Muh. Drn. (m) Tarih	Y.A.S. Drn. (m)	TCR %	RQD %	SCR %	Drn. (m)	ZEMİN CİNSİ	KOT (m)	LEJAND
Drn. (M)	TİP	15	15	15									
20.80					01/04		86	68	73		Orta sağlam-sağlam, açık gri-koyu gr. ince taneli, katı damarlı, az ayrışmış, taze KIREÇTAŞI, çamurlu ara seviyeli. Dar aralık-orta geniş Eklem sistemi 1, 20-30 derece, düzensiz yer yer basamaklı, düz yer yer pürüzlü, kı ve kalırlı dolgu. Açık körselik düzlemleri. 3.20m-3.50m arası, çok kırılgan, çok çatıllı zon, orta ayrışmış ve çatıllar arası taneli kalırlı dolgu. 10.15m-10.18m arası, çirne boşluğu gözlenmektedir. Eklem sistemi 2, 80-90 derece, düzensiz, pürüzlü, yer yer düz, açık, katırlı dolgu.		
21.85							100	48	70				
23.00							98	66	72				
24.00					9.50	5.00	100	62	80				
25.00					02/04	6.00	100	81	96				
26.00							100	41	84				
27.50							100	64	78	27.50		136.73	
29.00							97	71	77				
30.25							100	57	72		Orta sağlam-sağlam, açık gri-yeşilimsi in kristall, taneli katırlı damarlı ince taneli KUMTAŞI, çamurlu ara seviyeli. Orta geniş aralık, Eklem sistemi 1, 15-25 derece, basamaklı, pürüzlü, katırlı dolgu. Eklem sistemi 2, 55-65 derece, düzensiz, düz, katırlı dolgu, açık. 30.00m-31.00m çok kırılgan zon. 33.50m-34.50m çok kırık, çatıllı zon, az-orta ayrışmış kumtaşı.		
31.00							97	16	24				
32.00					9.50	5.50	100	77	84				
33.00					03/04	6.00	100	54	72				
34.00							100	0	18				
34.50					9.50	5.10	93	0	15	34.50	SONDAJ BİTİMİ	136.83	
					03/04								
NOTLAR :													
SONDÖR : A.ÜSTÜNDAĞ													
LOGU HAZIRLAYAN : B.ÜLGEN													
KONTROL EDEN : ŞAĞAOĞLU													

Şekil A.5 : Sondaj Bilgileri (S40) -2

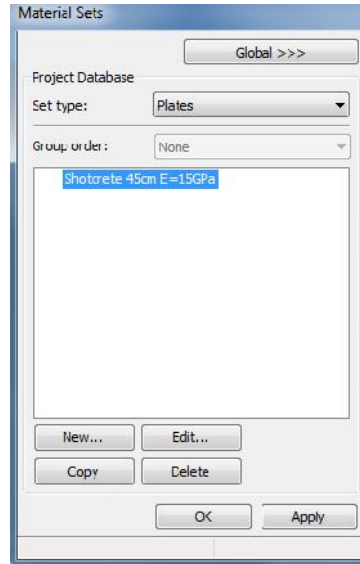
EK B

Plaxis Programının yapısı aşağıdaki gibi özetlenmektedir.

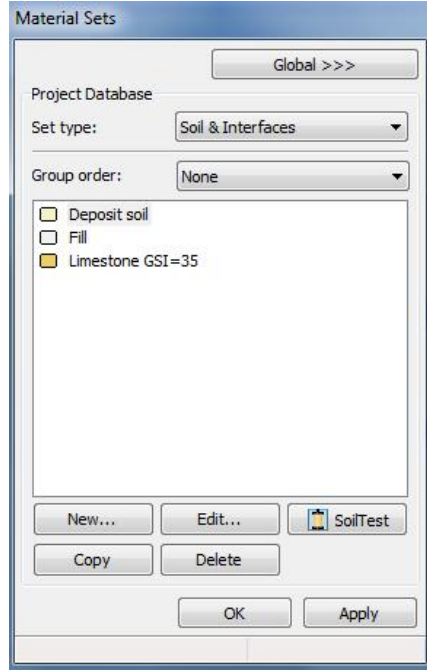
- Geometrinin girilmesi (Plaxis Input)
- Ağın oluşturulması (Plaxis Input)
- Başlangıç koşullarının oluşturulması (Plaxis Calculations)
- Hesap aşamalarının oluşturulması (Plaxis Calculations)
- Hesap (Plaxis Calculations)
- Sonuçların görüntülenmesi (Plaxis Output)

Geometrinin girilmesi, fiziksel yapıyı temsil eder. Burada zemin tabakaları, yapısal elemanlar ve yükler (sürşarj vb) tanımlanır. Geometri, nokta, çizgi ve hücrelerden oluşabilir. Fare (mouse) komut satırına koordinatların girilmesi sureti ile geometri oluşturulur.

Plaxis programında modelin oluşturulmasına öncelikle zemin ve ilgili kalıcı yapı veya iksa yapısının statik, mekanik ve geoteknik özellikleri tanımlanarak başlanır. Mazleme bilgileri programın “*Material Sets*” bölümünden yapılmaktadır.

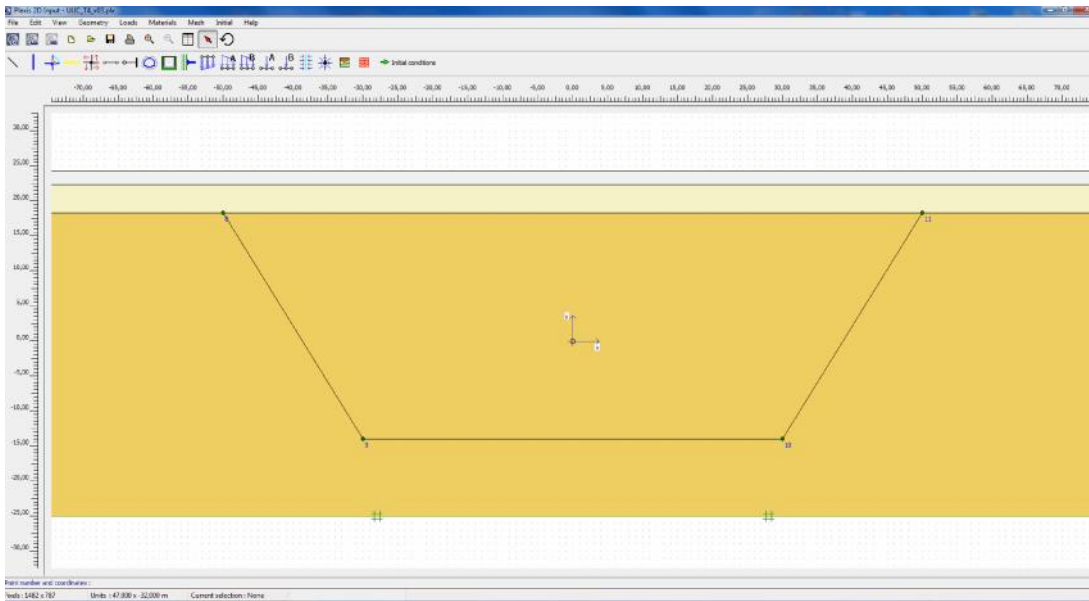


Şekil B.1: Kaplama malzemesinin tanımlanması



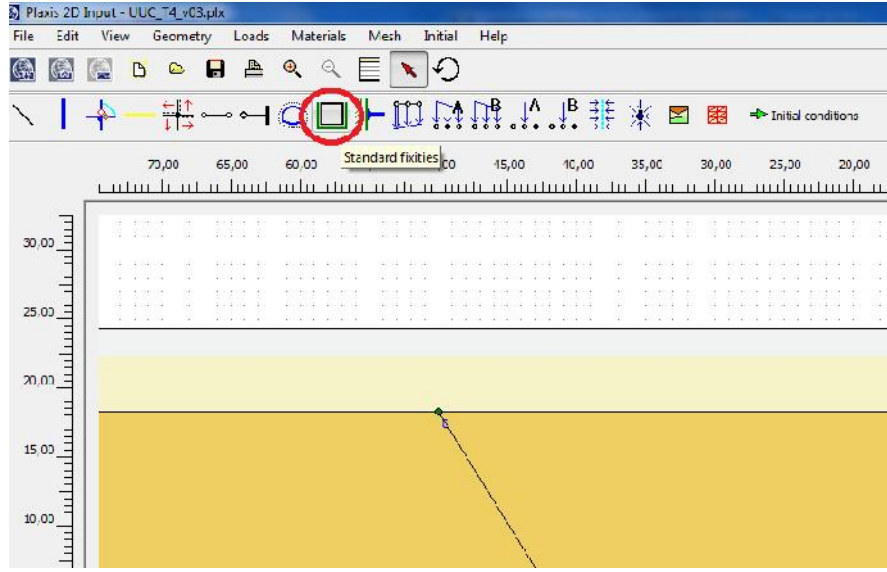
Şekil B.2: Zemin bilgilerinin tanımlanması

Zemin ve kaplama ile ilgili tanımlamalar tamamlandıktan sonra, modelin görsel olarak oluşturulmasına geçilir. Öncelikle tünel kazısının yapılacağı zemin modeli geometri sınırları belirlenerek (varsa katmanları da) tanımlanan ilgili zemin parametreleri bu bölümlere atanır. Atama işlemi “Material Sets”te tanımlanan bilgi satırlarının tutulup anasayfada ilgili geometri sınırına bırakılması ile yapılır. Zemin modeli tanımlanırken uygun zemin malzeme özellikleri (lineer elastik, Mohr-Coulomb), zemin davranışı (drained, undrained), zemin genel özellikleri (ağırlık, permeabilite), zemin yapı etkileşimi söz konusu ise arayüz elemanı özellikleri tanımlanabilir.



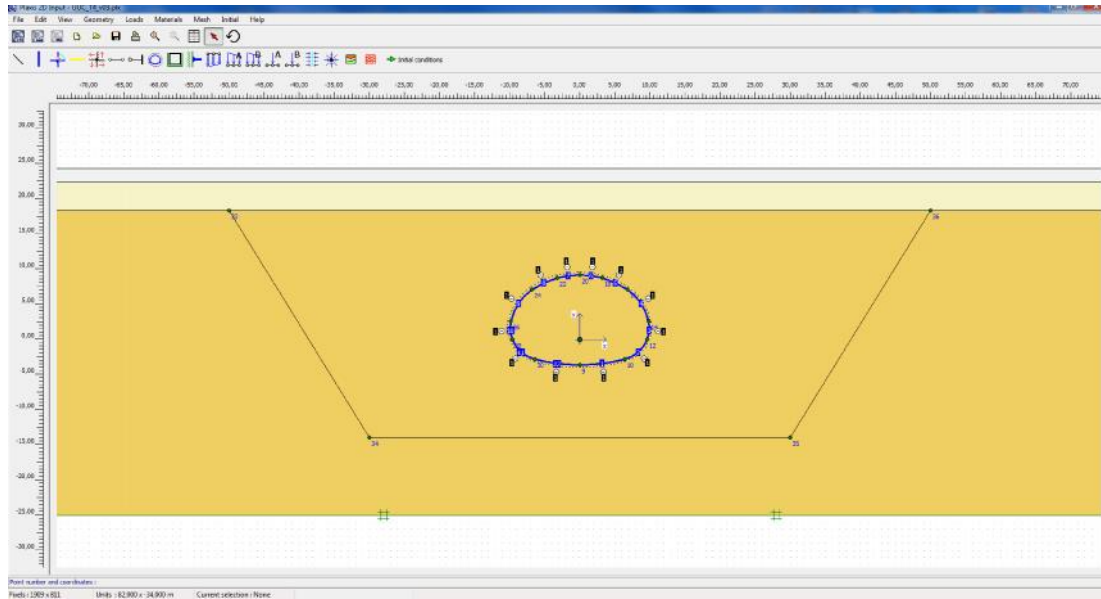
Şekil B.3: Zemin modelinin kurulması

Burada zemin modeli sınırlarını programın kabul edebileceği sınırlara indirgemek için “Standart Fixities” ikonunu tıklanarak sınırlandırma yapılır.

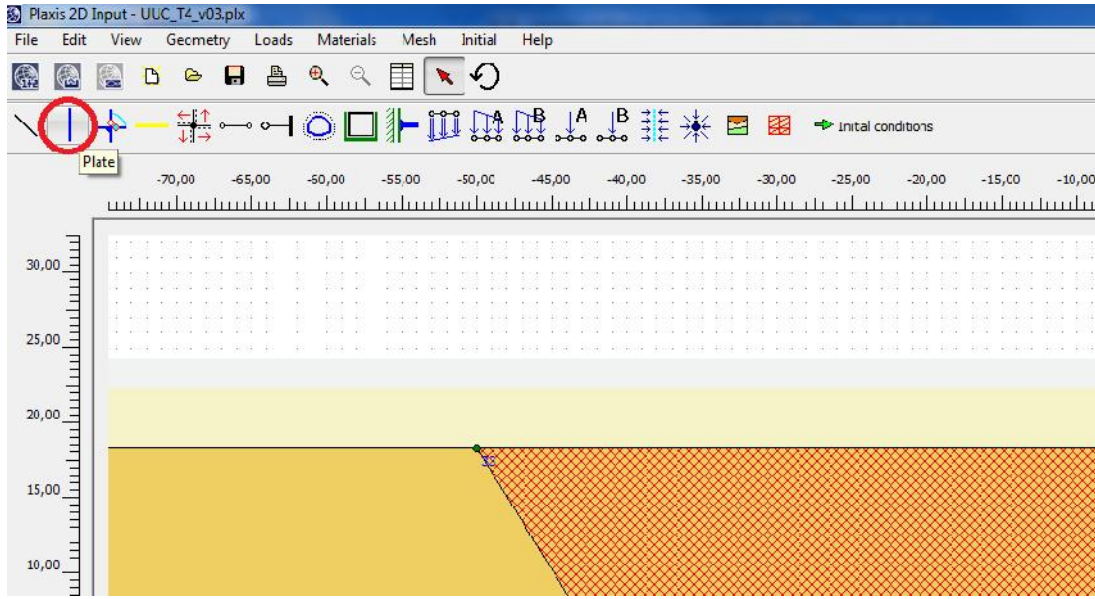


Şekil B.4: Zemin modelinin sınırlandırılması

Zemin modeli tanımlandıktan sonra tünel geometrisi ve daha önce tanımlanan iksa bilgisi bu geometriye atanır. Geometri şekli çizilirken “Plate” ikonunu tıklanarak geometri çizilir.

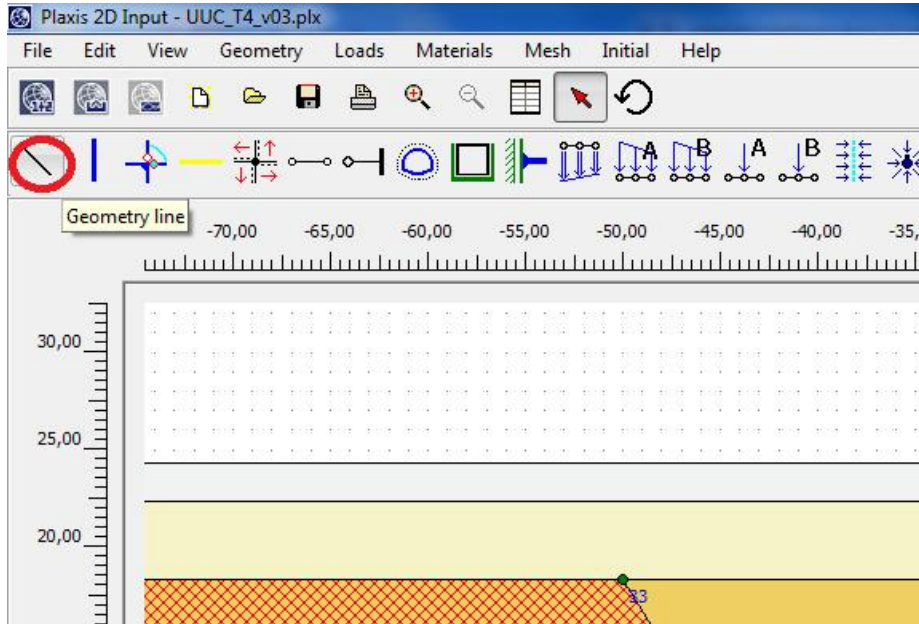


Şekil B.5: Tünel geometrisinin çizilmesi

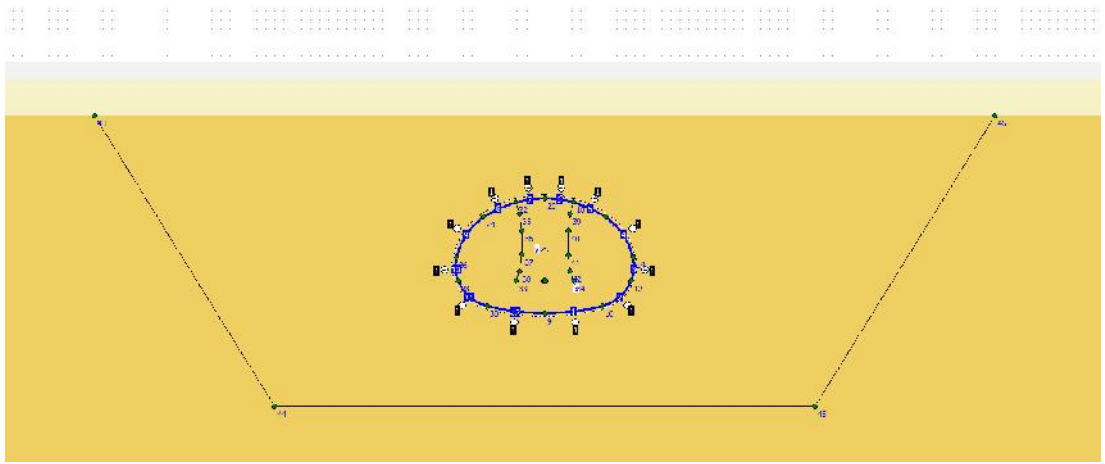


Şekil B.6: Tünel geometrisi “Plate” ikonu

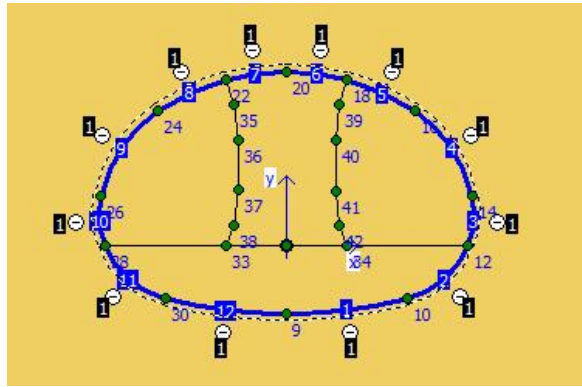
Tünel bilgileri girildikten sonra kazı aşamalarını tariflemek için “Geometry Line” ikonu ile tünel içinde aşamalar çizilir.



Şekil B.7: Tünel inşaat aşamalarının tariflenmesi-1

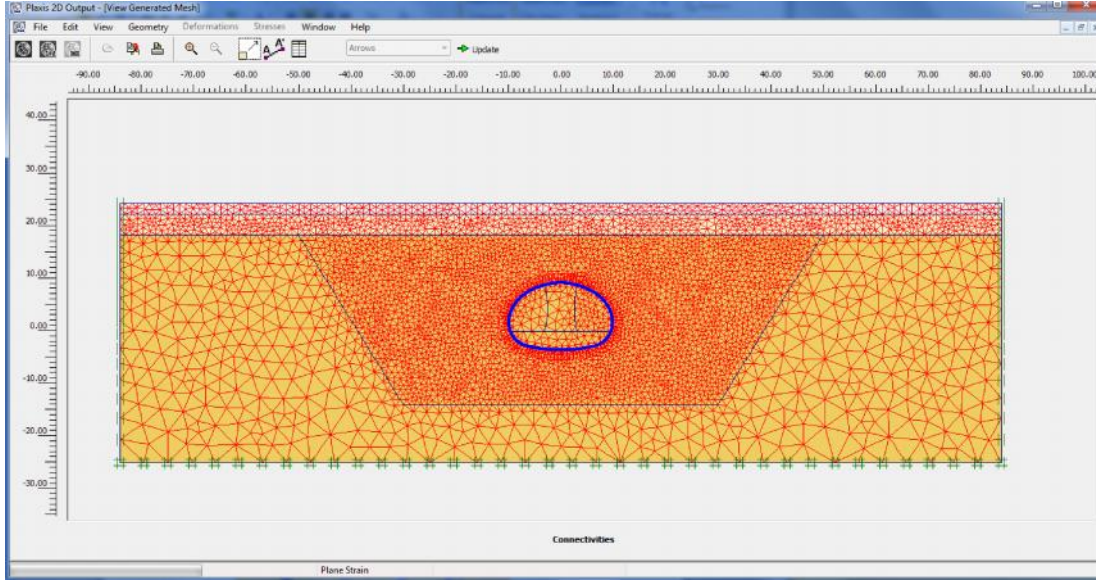


Şekil B.8: Tünel inşaat aşamalarının tariflenmesi-2



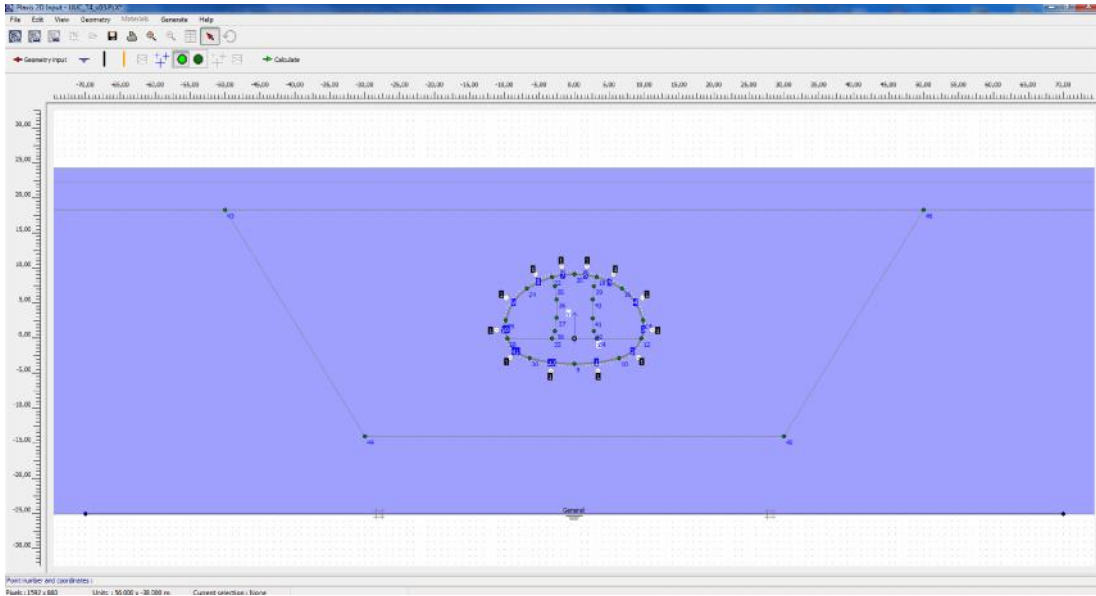
Şekil B.9: Tünel inşaat aşamalarının tariflenmesi-3

Geometri ve iksa bilgileri tanımlandıktan sonra modelin sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Burada “Mesh” ikonu tıklanarak otomatik sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Burada ağın global veya lokal olarak inceltmesi yapılabilir. Menü’de “Global Coarseness” satırından *Very Coarse*, *Coarse*, *Medium*, *Fine* ve *Very Fine* seçeneklerinden biri ile ağ biçimi değiştirilebilir.



Şekil B.10: Mesh Yapılması

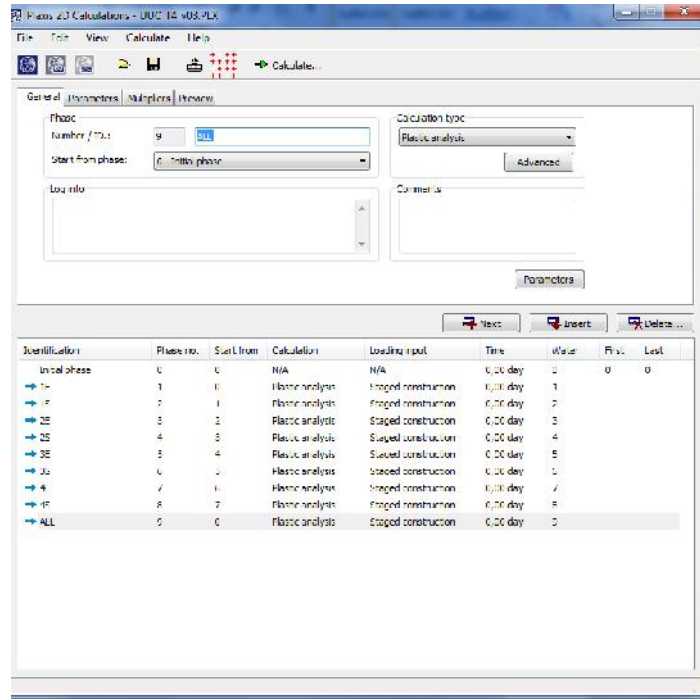
Mesh yapıldıktan sonra zemin modelinde yeraltı suyu mevcudiyeti söz konusu ise su bilgisi-sınırı da girilebilir.



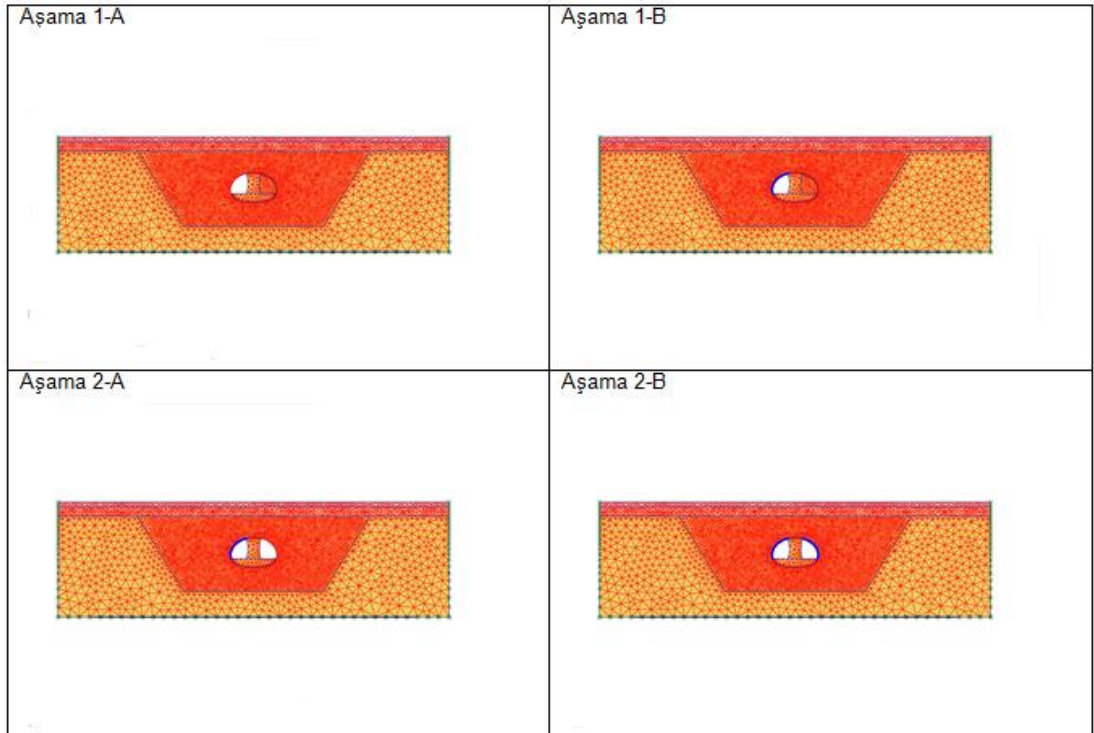
Şekil B.11: Yeraltı su seviyesinin belirlenmesi

Yeraltı su seviyesi tanımlandıktan sonra (varsa) model oluşturulmuş demektir ve “Calculation” programına geçilebilir.

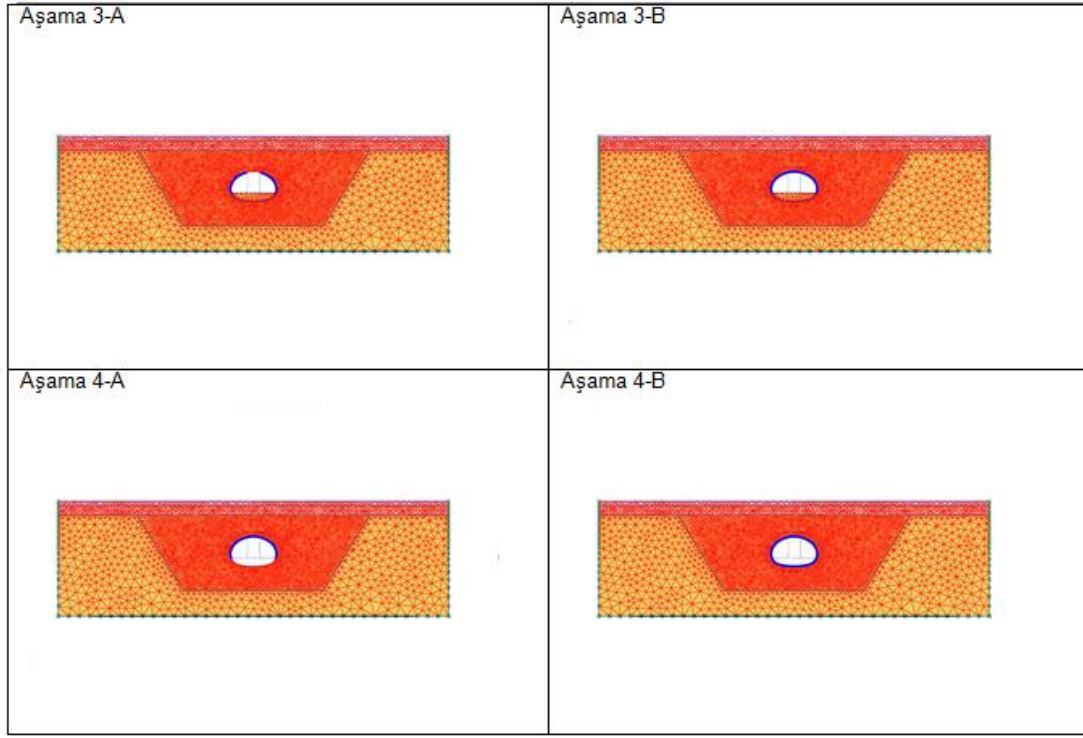
Calculation programında hesap adımları girilmeden önce başlangıç durumu girilir ve hesap prosedürü seçilir. Genel deformasyon analizi için “Plastik Analiz” seçilir.



Şekil B.12: Hesap adımlarının girilmesi



Şekil B.13: İnşaat (kazı) aşamalarının girilmesi-1

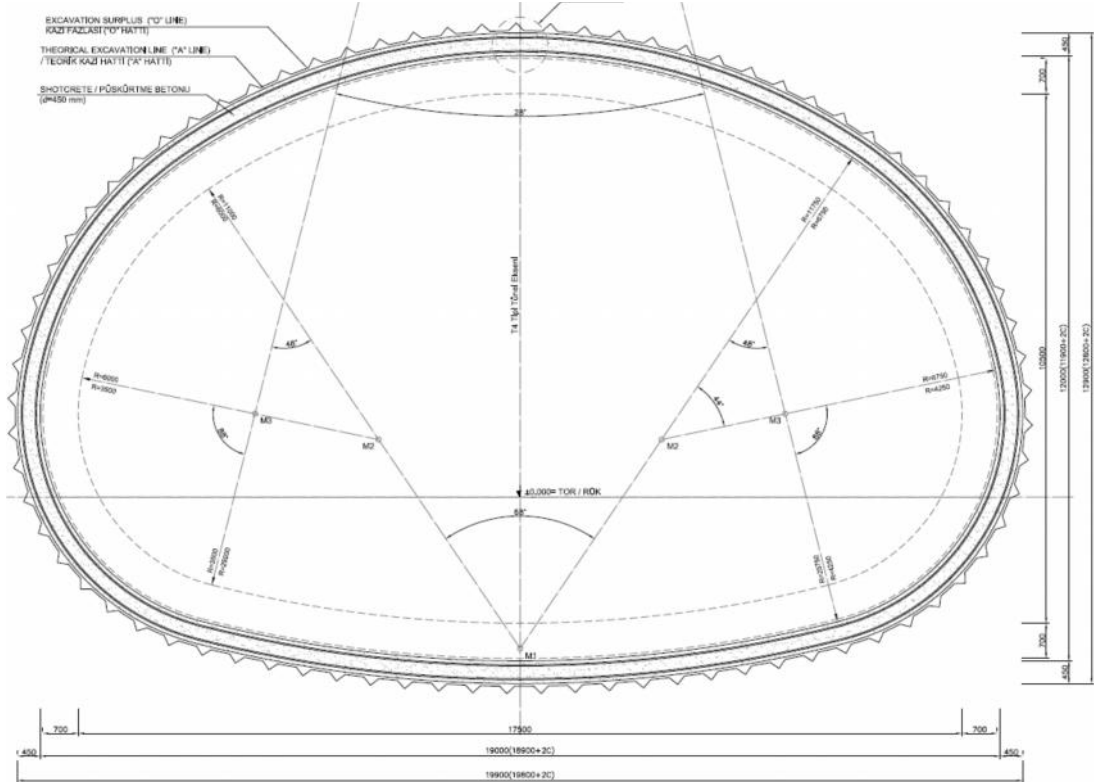


Şekil B.14: İnşaat (kazı) aşamalarının girilmesi-2

Hesap aşamaları programa girildikten sonra “Calculate” ile hesaplama yapılır ve sonuçlar Output’tan alınır. Burada deplasmanlar (toplam, hesap safhası veya adımsal safhalar), mutlak düşey ve yatay deplasmanlar, efektif ve toplam gerilmeler, toplam aktif ve artık boşluk suyu basıncı, birim deformasyonlar, iksaya gelen maksimum ve minimum moment ve kesme kuvveti değerleri ve bunlarla ilgili görseller alınabilir.

EK C

Makas tüneline ait iksa bilgileri aşağıdaki çizegelerde verilmektedir.



Şekil C.1: Tünel kazı kesiti

Tüneldeki imalatları ve kullanılacak iksa tipleri **Çizelge C.1**'de verilmektedir.

Çizelge C.1: Tünel iksa bilgileri

DESTEK	PÜSKÜRTME BETON KALINLIĞI		450 mm
	ÇELİK HASIR		2 sıra Q335/335
	KAFES KİRİŞLER		H=300 mm @0.8-1.0 m
	SÜREN		1 sıra L=6 m (Gerektiğinde)
	BULONLAR	Tünel Üst Yarısında	13/14 @0.8-1.0 m L=6 m
Kafes Kiriş Ayaklarında		4 + 4 @0.8-1.0 m L=6 m	
AYNADA DESTEK	AYNADA PÜSKÜRTME BETON		100 mm (Üst Yarı İçin: Aynada zemin çivisi gerektiğinde mutlaka/ veya gerektiğinde)
	AYNADA ZEMİN ÇİVİSİ		34 adet, Ø14 mm, L=9-12 m (Gerektiğinde)
	AYNADA BULON		L=3,4,6 m (Sahadaki kaya koşullarına göre kaya bulonları kullanılabilir.)
	AYNADA ÇELİK HASIR		1 sıra Q221/221 (Üst Yarı İçin: Aynada zemin çivisi gerektiğinde mutlaka/ veya gerektiğinde; (Alt Yarı İçin: Gerektiğinde)
GEÇİCİ DESTEK	KAYA BULONLARI (ÜST YARI)		Ø26 mm, 4/4 Bulon @0.8-1.0m, L=3m (Gerektiğinde)
	PÜSKÜRTME BETON		250 mm
	ÇELİK HASIR		1 sıra Q335/335
	KAFES KİRİŞLER		H=174 mm
	GEÇİCİ İNVERT		300 mm Püskürtme Beton + 2 sıra Q211/221 Çelik Hasır
KAZI AŞAMALARI			Parçalı Kazılar (3 Üst Yarı/8 Alt Yarı)
ALT YARIDA KAFES KİRİŞ			Gerektiğinde
KALICI KAPLAMA (YERİNDE DÖKME BETON)			700 mm

Kazı profili desteği için atanacak olan malzemelerin karakteristikleri Çizelge C.2’de verilmektedir.

Çizelge C.2: Tünel iksa malzeme bilgileri

Destek	Ölçüler	Malzeme Özellikleri
PÜSKÜRTME BETON	450mm	fck,küp= 21 MPa
ÇELİK HASIR Q335/335	Çift sıra Q335/335 8 mm (150X150 mm)	fyk = 500 Mpa
KAFES KİRİŞ	H=300mm (3 26mm) @0.8-1.0m	fyk = 420 MPa
SÜREN BORULARI	L = 6m (Gerektiğinde)	S235JR
KAYA BULONLARI (ÜST YARIDA)	26mm 13/14 @0.8-1.0m L = 6m	Bulonların minimum çekme dayanımı = 18 ton Ankraj Plakası St 37
KAYA BULONLARI (ALT YARIDA)	26mm 4 + 4 @0.8-1.0m L = 6m	

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Hatice Gül SELMAN

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul-1988

Adres: Bahçelievler-İstanbul

Lise: Yenibosna Lisesi (2005)

Lisans: İnşaat Mühendisliği – Yıldız Teknik Üniversitesi (2010)

Yüksek Lisans: Yapı Mühendisliği – İstanbul Teknik Üniversitesi

Mesleki Deneyim:

- Soyak - Yapı Stajı (30/06/2008 –10/08/2008)
- YTÜ Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı –Asistan Öğrenci (01/03/2009 – 01/06/2009)
- Karayolları 1. Bölge Müdürlüğü – Ulaşım Stajı (22/06/2009 – 31/07/2009)
- B-St Grup – Proje Mühendisi (23/06/2010 - 22/11/2010)
- Yenilik Yapı – Proje Mühendisi (01/04/2011- Dönemsel)
- Doğuş İnşaat ve Ticaret A.Ş. – Tasarım Mühendisi (20/06/2012 - ...)

Bilgisayar Bilgisi: MS Office Programları (Word, Excel, Powerpoint), AutoCad, Sta4Cad, Sap2000, Plaxis 2D

E-posta Adresi: hgulselman@gmail.com