

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞİŞEN KİLLER VE TÜNEL TASARIMINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ülkü Ebru YILDIRIM

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Zemin Mekaniği ve
Geoteknik Mühendisliği

HAZİRAN 2009

ŞİŞEN KİLLER VE TÜNEL TASARIMINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ülkü Ebru YILDIRIM
(501041325)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 01 Haziran 2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mete İNCECİK (İTÜ)
Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN (YTÜ)

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, ulaşım yapılarının vazgeçilmez tercihlerinden olan ve yeraltı ile bütünleşmiş olarak inşa edilen tünel yapıları ve bu yapıların imalat aşaması sırasında karşılaşılan en büyük zoluklardan olan şişme potansiyeli gösterebilen zeminlerde uygulanması ve etkileri konu edilmiştir. Bu çalışmayı gerçekleştirmemde değerli katkılarını ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Sağlamer'e, İ.B.B. Raylı Sistem Müdürü Sayın Yalçın Eyigün ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2009

Ülkü Ebru YILDIRIM

İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
SEMBOL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KİLLERİN TANITIMI	3
2.1 Kıl Türleri.....	3
2.1.1 Kaolinit grubu kıl mineralleri	4
2.1.2 Smektit grubu kıl mineralleri	7
2.1.3 İllit ve vermikülitler grubu kıl mineralleri.....	8
2.1.4 Klorit grubu kıl mineralleri.....	9
2.2 Kıl Danesinin Özellikleri.....	9
2.2.1 Kılın yüzey alanı	10
2.3 Kılın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	11
2.3.1 Kıvam ve kıvam limitleri.....	13
2.3.2 Kıvam limitlerinin mühendislikte kullanımı.....	16
2.4 Tabii Kılın Kıvamı	18
3. ŞİŞEN KİLLERİN ÖZELLİKLERİ.....	19
3.1 Şişen Zeminler	20
3.2 Şişmeye Etki Eden Faktörler	24
3.2.1 Başlangıç su muhtevası	24
3.2.2 Kuru birim hacim ağırlık	25
3.2.3 Kompaksiyon yöntemi.....	25
3.2.4 Şişmeye etki eden diğer faktörler.....	26
3.3 Kılın Nem Etkileşimi.....	26
3.4 Göçebilen Zeminler.....	27
3.5 Dağınık Yapılı Kılın.....	28
4. TÜNEL İNŞAATI.....	29
4.1 Tünellerin Tarihçesi	30
4.2 Tünel Açılmasını Etkileyen Faktörler.....	40
4.3 Tünel Açma Yöntemleri	47
4.3.1 Yeni avusturya tünel açma yöntemi (NATM)	47
4.4 Zeminlerde Tünel Açılması Esnasında Karşılaşılan Sorunlar.....	52
4.4.1 Zemin basınçları: sebep ve oluşumları	54
4.4.2 Zayıf kohezyonsuz zeminler: su ve duraysızlık problemleri	56
5. TÜNELLERİN PROJELENDİRİLMESİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	61
5.1 Elasto – Plastik Analiz Yöntemi Teorik Temeli	61
5.2 Yeraltı Açıklığının Açılımı Süresinde Kabarma Olayının Teorisi	63

5.3 Sonlu Elemanlar Analizi	65
6. KİLLERİN TASARIMA ETKİSİ – PLAXIS ANALİZİ	67
6.1 Ümitköy-Çayyolu Arası Metro Tüneli İnşaatı	67
6.1.1 Tünel inşaatı	71
6.1.2 İlave önlemler	71
6.1.3 Plaxis analizi.....	71
6.1.3.1 Kullanılan parametreler	72
6.1.3.2 Analiz sonuçları	74
6.1.4 Değişen koşullar	81
6.1.4.1 Kullanılan parametreler	81
6.1.4.2 Analiz sonuçları	83
6.2 İstanbul Metrosu Unkapanı-Yenikapı Arası Metro İnşaatı.....	87
6.2.1 Süleymaniye bölgesi	87
6.2.1.1 Tünel inşaatı.....	95
6.2.1.2 Plaxis analizi	96
6.2.2 Yenikapı bölgesi tünel uygulaması.....	110
6.2.2.1 Kullanılan parametreler	111
6.2.2.2 Yer altı su seviyesi bulunmaksızın yapılan analiz (Kuru durum).....	114
6.2.2.3 Yer altı su seviyesi varlığı altında davranış.....	118
6.3 Plaxis Analizi Sonuçları.....	124
7. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME.....	127
7.1 Sonuçlar	127
7.2 Öneriler	128
KAYNAKLAR.....	131
ÖZGEÇMİŞ.....	135

SEMBOL LİSTESİ

A_c	: Aktivite Katsayısı
C	: Kil Yüzdesi
C_u	: Üniformaluluk Sayısı
e_o	: Başlangıç Boşluk Oranı
Δe	: Boşlu Oranı Farkı
GP	: Göçme Potansiyeli
I_s	: Şişme İndisi
I_p	: Plastisite İndisi
p_c	: Emme Gerilmesi
q_c	: Serbest Basınç Mukavemeti
SAR	: Sodyum Absorpsiyon Katsayısı
S_p	: Şişme Yüzdesi
$\bar{S}_p$	: Şişme Potansiyeli
w_L	: Likit Limit
w_n	: Doğal Su Muhtevası
w_o	: Başlangıç Su Muhtevası
w_p	: Plastik Limit
w_s	: Büzülme Limiti
ρ_n	: Birim Hacim Ağırlığı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Danelerin ortalama boyutları ve spesifik yüzeyleri	10
Çizelge 2.2: Kil cinsine göre aktivite katsayısı	17
Çizelge 2.3: İnce daneli zeminlerin kıvamı	18
Çizelge 3.1: Şişme potansiyeli sınıflandırması	21
Çizelge 3.2: Şişme potansiyeli formülleri	23
Çizelge 3.3: Şişen killerde muhtemel hacim değişikliği verileri	24
Çizelge 4.1: Proje Genel Özellikleri	35
Çizelge 5.1: Değişik formasyonlarda düşey itki	63
Çizelge 6.1: Zemin özellikleri	73
Çizelge 6.2: Tünel Kaplaması Özellikleri	74
Çizelge 6.3: Zemin Özellikleri	82
Çizelge 6.4: Tünel Kaplaması Özellikleri	82
Çizelge 6.5: Kullanılan Zemin Parametreleri	96
Çizelge 6.6: Tünel Kaplaması Özellikleri	97
Çizelge 6.7: Kullanılan Zemin Parametreleri (Süleymaniye Formasyonu)	112
Çizelge 6.8: Kullanılan Zemin Parametreleri	113
Çizelge 6.9: Tünel Kaplaması Özellikleri	114
Çizelge 6.10: Plaxis analizi sonuçlarının karşılaştırılması	124

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Kaolinitin atomik yapısı.....	4
Şekil 2.2: Kaolinitin yük dağılımı	5
Şekil 2.3: Killeşme akış diyagramı	6
Şekil 2.4: Montmorillonitin atomik yapısı.....	7
Şekil 2.5: Montmorillonitin elektron mikroskobundan görünüşü.....	8
Şekil 2.6: Kaolinit ve İllit dane şekilleri.....	9
Şekil 2.7: Kil minerallerindeki silis levhasının ana ünitesi	12
Şekil 2.8: Kil minerallerindeki alüminyum veya magnezyum levhasının ana ünitesi	12
Şekil 2.9: Çift katman dağılımı	13
Şekil 2.10: Çift katmanda dipolar moleküllerin çekimi	14
Şekil 2.11: Zeminlerde su muhtevası-hacim değişimi davranışı ve kıvam	15
Şekil 2.12: Casagrande plastisite kartı.....	16
Şekil 3.1: Killerde şişme potansiyeli.....	20
Şekil 3.2: Şişme yüzdesi tahmini	22
Şekil 3.3: Su muhtevasının hacim değişimine etkisi.....	24
Şekil 3.4: Kompaksiyon yönteminin şişmeye olan etkisi.....	26
Şekil 3.5: Casagrande'ye göre yüklü zeminde göçme mekanizması	27
Şekil 3.6: Zeminlerde göçebilirlik sınıflandırması.....	28
Şekil 4.1: Çeşitli yer altı yapıları.....	29
Şekil 4.2: Sol üstte 1902'de Tünel(Beyoğlu) giriş kapısı.Sağ üstte boy ve sol altta en kesiti (Gavand,1876),sağ altta Karaköy Tüneli işletme aşaması	32
Şekil 4.3: İstanbul Raylı Sistem Hatları	33
Şekil 4.4: Boğaz Geçiş Projesi.....	34
Şekil 4.5: Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi güzergah ve kesiti.....	36
Şekil 4.6: Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi bitiş durumu simülasyonu.....	36
Şekil 4.7: Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi inşaat aşamaları	37
Şekil 4.8: Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi batırma tüp	37
Şekil 4.9: Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi batırma tüpün	38
Şekil 4.10:Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi batırma tüpün havuzlarda imalatı...38	
Şekil 4.11: Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi batırma tüpün havuz çıkışı.....	39
Şekil 4.12: Şanlıurfa Tünelleri Genel Vaziyet Planı	39
Şekil 4.13: Şanlıurfa Tünelleri Kesiti – Kazı Aşamaları	40
Şekil 4.14: Fay Düzlemini Kesen Tünelin Değişik Pozisyonları.....	43
Şekil 4.15: Dik Yamaca Yakın Tüneller	44
Şekil 4.16: Tünel Güzergahında Tabakalanmanın Etkisi	45
Şekil 4.17: Tünel Güzergâhında Tabakalanmanın Etkisi	46
Şekil 4.18: Tünelde yük – deformasyon eğrisi	48
Şekil 4.19: Tüneli çevreleyen ana kayanın durumu	49
Şekil 4.20: Kayanın başlangıçtaki sağlamlığının korunması.....	49
Şekil 4.21: Tünel açılması ile kayada oluşan gevşeme durumu	50

Şekil 4.22: Tünelcilikte kullanılan aletler	51
Şekil 4.23: Fenner-Pacher Konverjans Eğrilerine göre Zeminle İksanın	52
Şekil 4.24: Yumuşak zeminde moment alanı	53
Şekil 4.25: Şişen zeminlerde tünel kesiti; 1- kazılan kısım, 2- destek, 3- şişen kısım	53
Şekil 4.26: Boşluk hacmi sırasında suyun davranışı.....	57
Şekil 4.27: Yeraltı suyunun tünelin açılan kısmına etkisi.....	58
Şekil 4.28: Agri Sauro Tüneli'nin 2.63 km sinde göçük karakterlerinin değişimini gösteren sistematik diyagram	59
Şekil 5.1: Yumuşak formasyonlarda açıklık etrafında oluşan halka	62
Şekil 5.2: Yumuşak zemin tünellerinin kaplaması üzerindeki basınçlar ve kaplamanın yanlardaki pasif itkiler sonucu çatlaması olayı.....	63
Şekil 5.3: Yumuşak zeminde açılan yeraltı açıklığı sonucu kabarma olayının ve gerilme durumunun zamana bağlı olarak gelişimi, (a) başlangıç durumu, (b) tünel kazısı, ikincil durum (sec), (c) tahkimatsız kabarma deformasyonu, üçüncül durum (sa), (d) tahkimatlı kabarma deformasyonu, üçüncü durum (sb), (e) üçüncül durumda tahkimatsız kabarma deformasyonu, (sa) gerilme artışı ilişkisi, (f) üçüncül durumda tahkimatlı kabarma – gerilme ilişkisi.....	65
Şekil 6.1: Ümitköy-Çayyolu arası metro inşaatı göçük bölgesi	67
Şekil 6.2: Tünel enkesiti.....	69
Şekil 6.3: Analiz öncesi gerilme durumu	74
Şekil 6.4: Efektif gerilmeler	75
Şekil 6.5: İlk tüp açılımı sonrası şekil değiştirme diyagramı	75
Şekil 6.6: İlk tüp açılımı sonrası yatay efektif gerilmeler.....	76
Şekil 6.7: İlk tüp açılımı sonrası düşey yer değiştirmeler.....	76
Şekil 6.8: İlk tüp açılımı sonrası toplam gerilmeler.....	77
Şekil 6.9: İlk tüp açılımı sonrası toplam yer değiştirme	77
Şekil 6.10: Tünel inşaatı sonrası efektif gerilmeler	78
Şekil 6.11: Tünel inşaatı sonrası şekil değiştirme diyagramı	78
Şekil 6.12: Tünel inşaatı sonrası yatay efektif gerilmeler.....	79
Şekil 6.13: Tünel inşaatı sonrası yatay yer değiştirmeler	79
Şekil 6.14: Tünel inşaatı sonrası düşey yer değiştirme	80
Şekil 6.15: Tünel inşaatı sonrası toplam yer değiştirme	80
Şekil 6.16: 2.kat püskürtme beton atıldıktan sonra zemin göçme durumu	83
Şekil 6.17: Deformasyon diyagramı	84
Şekil 6.18: Aktif boşluk suyu basıncı	84
Şekil 6.19: Doygunluk derecesi %100.....	85
Şekil 6.20: Toplam gerilme diyagramı	85
Şekil 6.21: Düşey yerdeğiştirmeler.....	86
Şekil 6.22: Toplam yerdeğiştirmeler.....	86
Şekil 6.23: Süleymaniye Bölgesi Tünel Boykesit	89
Şekil 6.24: C1 Tipi Tünel Kesiti.....	91
Şekil 6.25: T Tipi Tünel Kesiti	93
Şekil 6.26: C1 tipi tünel inşaatı şekil değiştirme diyagramı.....	97
Şekil 6.27: C1 tipi tünel inşaatı sonrası toplam yer değiştirme	98
Şekil 6.28: C1 tipi tünel inşaatı rölatif kesme gerilmesi	98
Şekil 6.29: C1 tipi tünel düşey yer değiştirme	99
Şekil 6.30: C1 tipi tünel düşey toplam gerilme	99
Şekil 6.31: C1 tipi tünel toplam gerilme	100

Şekil 6.32: C1 tipi tünel toplam şekil değiştirme.....	100
Şekil 6.33: C1 tipi tünel yatay yer değiştirme.....	101
Şekil 6.34: C1 tipi tünel yatay efektif gerilme.....	101
Şekil 6.35: C1 tipi tünel toplam yer değiştirme	102
Şekil 6.36: C1 tipi tünel düşey yer değiştirme.....	102
Şekil 6.37: Süleymaniye Bölgesi tünel güzergâhı nivelman yerleşimi	103
Şekil 6.38: Nivelman ölçüm değerleri.....	104
Şekil 6.39: Süleymaniye Bölgesi tünel içi konverjans ölçümleri sonucu gerçekleşen maksimum deformasyon 4.25 mm olarak ölçülmüştür.	105
Şekil 6.40: T tipi tünel ikinci bölüm kazısı deformasyonu.....	106
Şekil 6.41: T tipi tünel ikinci bölüm kazısı efektif gerilme	106
Şekil 6.42: T tipi tünel ikinci bölüm kazısı toplam yer değiştirme	107
Şekil 6.43: T tipi tünel ilk bölüm kazısı toplam gerilme	107
Şekil 6.44: T tipi tünel tamamlanmış kazı deformasyon diyagramı	108
Şekil 6.45: T tipi tünel tamamlanmış kazı efektif gerilme	108
Şekil 6.46: T tipi tünel tamamlanmış kazı yatay yer değiştirme.....	109
Şekil 6.47: T tipi tünel tamamlanmış kazı toplam yer değiştirme	109
Şekil 6.48: T tipi tünel tamamlanmış kazı düşey yer değiştirme	110
Şekil 6.49: T tipi tünel ikinci bölüm kazısı deformasyon diyagramı	114
Şekil 6.50: T tipi tünel ikinci bölüm kazısı yatay yer değiştirme	115
Şekil 6.51: T tipi tünel ilk bölüm kazısı düşey yer değiştirme	115
Şekil 6.52: T tipi tünel ikinci bölüm kazı toplam yer değiştirme	116
Şekil 6.53: T tipi tünel tam kesit deformasyon diyagramı	116
Şekil 6.54: T tipi tünel tam kesit yatay yer değiştirme.....	117
Şekil 6.55: T tipi tünel tam kesit düşey yer değiştirme	117
Şekil 6.56: T tipi tünel tam kesit toplam yer değiştirme	118
Şekil 6.57: Aktif boşluk suyu basıncı diyagramı	119
Şekil 6.58: İnşaat aşamaları tanımlamalarında göçme durumu ve aşaması	119
Şekil 6.59: Göçme öncesi son deformasyon durumu	120
Şekil 6.60: Göçme öncesi toplam yer değiştirme.....	120
Şekil 6.61: Göçme öncesi düşey yer değiştirme	121
Şekil 6.62: Göçme öncesi yatay yer değiştirme.....	121
Şekil 6.63: YASS altında tünel boşluğuna akan kil bölümü-göçük oluşumu deformasyon diyagramı	122
Şekil 6.64: Doygunluk derecesi (% 100).....	122
Şekil 6.65: Göçme durumu toplam yer değiştirme	123
Şekil 6.66: Göçme durumu düşey yer değiştirme	123

ŞİŞEN KİLLER VE TÜNEL TASARIMINA ETKİSİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, ulaşım sanat yapılarının vazgeçilmez parçalarından olan tünel yapıları ve en kötü zemin cinsi olan şişen kil zeminlerde açılımı konu edilmiştir. Özellikle şehiriçi tünelciliğinin günümüzde önemi artmakla birlikte, uygulandığı koşullar, inşaat aşamalarını ve alınacak önlemleri değiştirmektedir. Türkiye’de, özellikle İstanbul ve Ankara’da yapılmakta olan metro inşaatlarında uygulanan tünel kesitleri ve kil zemin koşullarındaki davranışları çevresel koşullar dikkate alınarak hesaplanmıştır. Ankara’daki metro inşaatında çift hatlı metro tünelleri, İstanbul’da aynı güzergahta bulunan farklı kil koşullarındaki çift hatlı metro tünelleri esas alınarak konu irdelenmiştir. İstanbul’daki tünellerden Yenikapı bölgesi tünel uygulaması ile Ankara metrosu tünel uygulaması şişme özelliği yüksek olan kil koşullarında, Süleymaniye Bölgesi’nde ise farklı tip tünel kesitleri kullanılarak, normal durumları ile iyileştirme koşulları dahil edilerek toplam yedi adet analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları, kildeki değişimler baz alınarak değerlendirilmiştir. Tünel tasarımları Plaxis (Sonlu Elemanlar Analiz Metodu) programı kullanılarak yapılmıştır. Tasarımlar, tünel tiplerine, açılım yöntemlerine ve uygulanan tahkimat sistemlerine göre farklılıklar göstermektedir. Özellikle tahkimat sistemi ve şişme basıncı arasındaki bağlantı kilin şişme özelliğinin tünel inşaatı üzerindeki etkisini yorumlamamızı sağlamaktadır. Analiz sonuçları, tünelin kademeli olarak açılış yöntemine bağlı olarak da değişmektedir. Bu durum ise, dış basıncın karşılanması ve/veya şişme basıncının sönmelenmesi açısından önem arz etmektedir. Tez içerisinde yer alan analiz sonuçları, farklı kesitlerdeki tünellerde, farklı açılım yöntemlerine bağlı olarak tünellerde meydana gelen değişimleri göstermektedir. Yapılan analiz sonuçlarına göre farklı özellikteki killerde güvenli bir kazı için gerekli olabilecek önlemler tezin sonuçlar bölümünde sıralanmıştır.

SWELLEX CLAYS AND THE EFFECTS ON THE TUNNELLING DESIGN

SUMMARY

In this thesis, tunnel structures that are one of the most important places in transportation planning and that are design on the expansive soils are subjected. That's the point that the urban tunnelling is one of the most important construction system. This construction system depends on the construction stages and environmental conditions. The tunnelling sections were applied at the metro constructions in Turkey and their behaviours (deformations, displacements, etc..) were calculated with considering the environmental effects. The subject were analyzed based on tunnel with double tracks at Ankara Subway and double tracks at same line considering different clay conditions at İstanbul Subway. There are seven analyses within normal soil conditions and soil improvement were applied. Tunnelling at Ankara Subway and Yenikapı section at İstanbul Subway were applied at swellex clay conditions. Tunnelling at Süleymaniye section at İstanbul Subway were applied at clay that is not swellex. The results of the analyses were considered based on changing of clay behaviours. The tunneling design is analyzed using the Plaxis (Finite Element Method). That designs can have a lot of differences according to their types of tunnel, types of boring and reinforcement of their applications. Especially the relation between the reinforcement and swelling pressure makes the sense of effects of swelling of the clay on the tunneling. The results of the analyses can be changeable due to the type of boring which is in stages. These stages are very important for the reaction of pressure and/or amortizing of the swelling pressure. The results of analyses given in this thesis shows the permutation which occurs in tunnels boring in different types. According to analysis are figured out, clays having different characteristics, precautions which is wanted to safety of the excavation are putted in order.

1. GİRİŞ

1930’lu yıllardan önce hafif yapıların çokluğu, bu yapıların esneme kabiliyeti olan ve bu nedenle yapısında gözle görülür çatlakların oluşmasına engel olan ahşap ve esnemeye karşı koymayan bağlayıcı maddelerden oluşması zeminde meydana gelen değişimlerin fark edilmemesine yol açmıştır. 20. yy ın ilk yarısından itibaren yüksek katlı yapılar tercih edilen veya yaygın yapılar haline gelmiş, gelişmiş şehirlerin simgesi olmuştur. Bu durum beraberinde; köyden şehre göç, nüfus artışı, nüfus artışına paralel olarak kullanım alanlarının azalması, arz-talep dengesi sonucu arazilerin değerlendirilmesi, ekonomi, zaman vs. sebeplerinden ötürü şehir planlamasının büyük önem kazanmasına yol açmıştır. Artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılayabilmek adına yapılaşmanın sınırları zorlanmaktadır. Bu aşamada ulaşımdaki yapılanma büyük önem arz etmektedir.

Trafik planlaması yapılırken toplu ulaşım araçları ağının birbiriyle bütünleşmiş olması; bekleme ve seyahat süreleri açısından rahatlama sağlamaktadır. Bu alanda, yeraltı ulaşım ağlarının yüzeyde biriken insan ve trafik yükünü en aza indiren çözüm olduğu kaçınılmaz bir gerçektir.

Tünel inşaatları; mühendislik açısından farklı ana bilim dallarının birlikte çalışmasını gerektiren bir olgudur. Farklı zemin karakteristiklerinde, zamanında, yeterli ve ekonomik çözüm getirebilmek temel prensiplerdir. Çünkü artık, yapımızı tamamı ile zemine taşımak değil, zeminin bir parçası haline getirmektediriz.

Şehir tünelciliği, üzerindeki yapılara zarar vermeden tünel inşaatının tamamlanmasını zorunlu kılmaktadır. Uygun zemin koşullarında rahatlıkla açılabilen tünel yapıları, kil, silt, kum gibi kayma dayanımı düşük olan zeminlerde farklı inşaat tekniklerini beraberinde getirmektedir. Özellikle kil zeminler, kendilerine özgü yapılarından ötürü birçok araştırmaya konu olmuştur.

Kil zeminler, bünyelerine suyu aldıklarında gösterdikleri hacim artışları nedeniyle yüzeyde kabarmalara, yeraltında açılmış olan yapılarda ise çökmelere neden olmaktadır. Özellikle şehirlerdeki yapılaşma düşünüldüğünde her ikisini birden muhafaza ederek ilerlemek gerekmektedir. Geoteknik Mühendisliğinin doğuşunu sağlayan bu zemin cinsine ülkemizdeki farklı jeolojik koşullarda daima rastlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, ulaşımın kaçınılmaz tercihi olan tünellerin inşaatı sırasında karşılaşılan kil zeminlerin şişme özelliklerinin tünel yapıları ve tünel tasarımına olan etkisi incelenecektir.

2. KİLLERİN TANITIMI

Kil, hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlarından oluşan, dane boyutu 2 mikron veya daha küçük olan, aynı boyuttaki başka minerallerden farklı olarak su ile karıştırıldığında çamur oluşturan, hamur halinde şekil verilebilecek kadar plastisiteye sahipken pişirildiğinde büyük dayanım artışları gösteren bir katı maddeye dönüşen, ısıtıldığında ise genellikle hacim artışı gösteren, kurutulduğunda ise hacmi azalan ve genellikle çatlayan yapıya sahip bir mineraldir.

Kil türleri, zeminin geçirimliliği, şişme-büzülme davranışı, sıkışabilirlik ve kayma direnci gibi özelliklerinden dolayı geoteknik mühendisliğinde tanımlanma açısından büyük önem taşır. Kil mineralinin türü ana kayaktan çok çevre koşullarınca belirlenir. Kil mineralinin oluşmasında ortamdaki suyun etkisi büyüktür. Kilin oluşum süreci aşağıdaki gibidir;

- Alkali metaller silikayı çökeltir (floklanma, yumaklanma),
- K^+ , Na^+ , Li^+ gibi alkali metaller silikayı dağıtır,
- Düşük pH sistemi floklandırır,
- Yüksek elektrolit içeriği sistemi floklandırır,
- Alümina yüklü çözeltiler silikalılara oranla daha kolay floküle olur,
- Yeraltı suyu hareketi veya yüzeyden su sızması dağınık (disperse) fazı daha kolay sistem dışına alır.

2.1 Kil Türleri

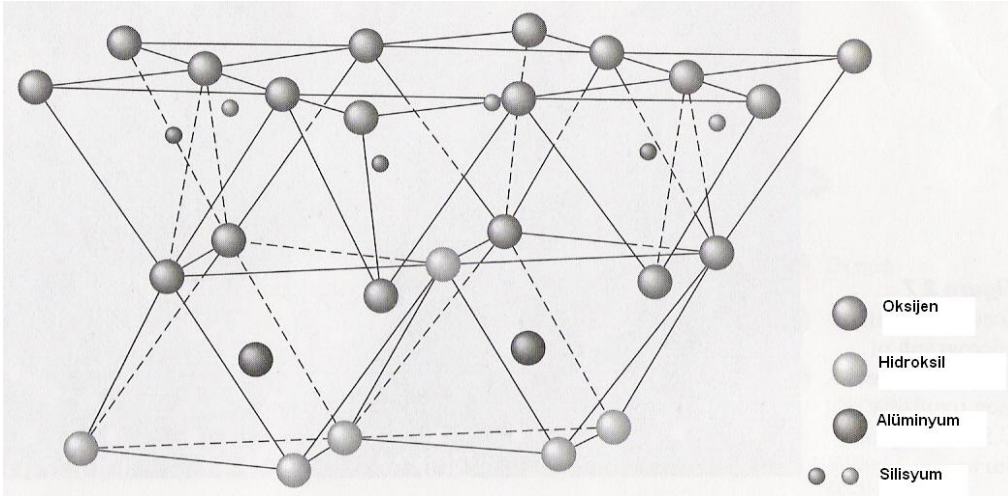
Kil mineralleri, başlıca silisyum (dörtüzlü-tetrahedron) ve alüminyum (sekizyüzlü-octahedron) ünitelerinin birleşiminden oluşan alüminyum silikatlarıdır. Her bir dörtüzlü bölüm silisyum atomlarıyla çevrili dört oksijen atomundan ibarettir. Başlıca dört çeşit kil minerali bulunmaktadır.

2.1.1 Kaolinit Grubu Kil Mineralleri

Kaolin, mika ve feldispat içeriği yüksek magmatik kayalarda ve asidik ($\text{pH} < 7$) ortamda kolayca oluşur. Şekil 2.1’de kaolinitin atomik yapısı gösterilmektedir. Kaolinin temel yapısı üst üste gelmiş birer alümina:silika tabakasından oluştuğundan bu mineral ortamda alüminanın bol, buna karşın silikanın az olduğu durumlarda daha rahat oluşur. Böyle ortam ise elektrolit içeriği ve pH’nın düşük ve magnezyum, kalsiyum ve demir gibi iyonların suyla sistem dışına yıkıldığı durumlarda sağlanır. Şekil 2.3’de tropik iklimde kil minerallerinin oluşmasında yağışın pH’a etkisi görülmektedir. Yağışın sürekli olması kaolin (K) gelişimini önemli ölçüde artırmaktadır. Kaolinitin yapısal formülü $(\text{OH})_8 \text{Si}_4 \text{Al}_4 \text{O}_{10}$ dur.

Başlıca iki şekilde oluşurlar;

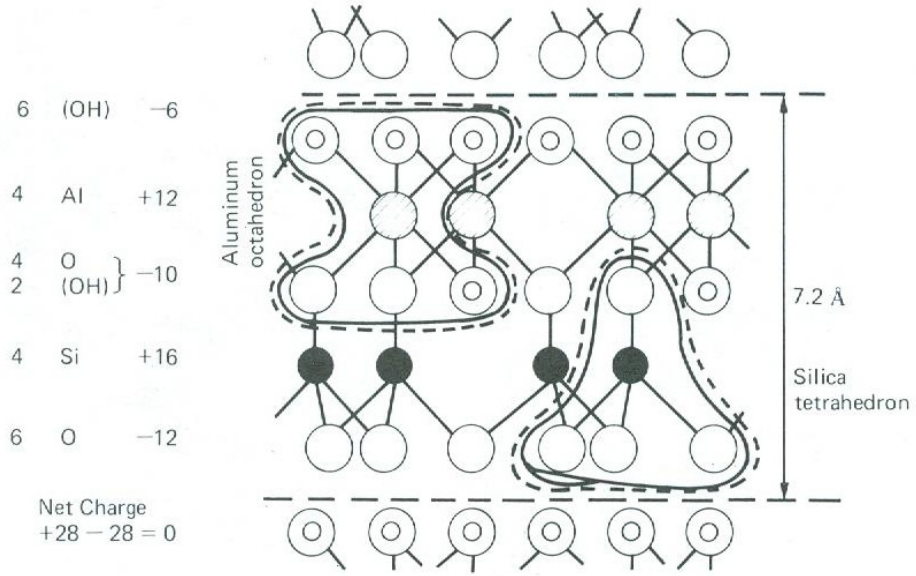
- Smektitin bulunduğu ortama yeterli miktarda Mg^{++} gelirse brunitin içerdiği aratabaka suyunun yerini bir kation olarak klorite dönüşüm sağlanır.
- Magmatik ve başkalaşım kayadaki biyotit ayrışmaya uğrayarak trioktahedral klorit ve klorit-vermikülit karışık tabakalı mineralini oluşturur.



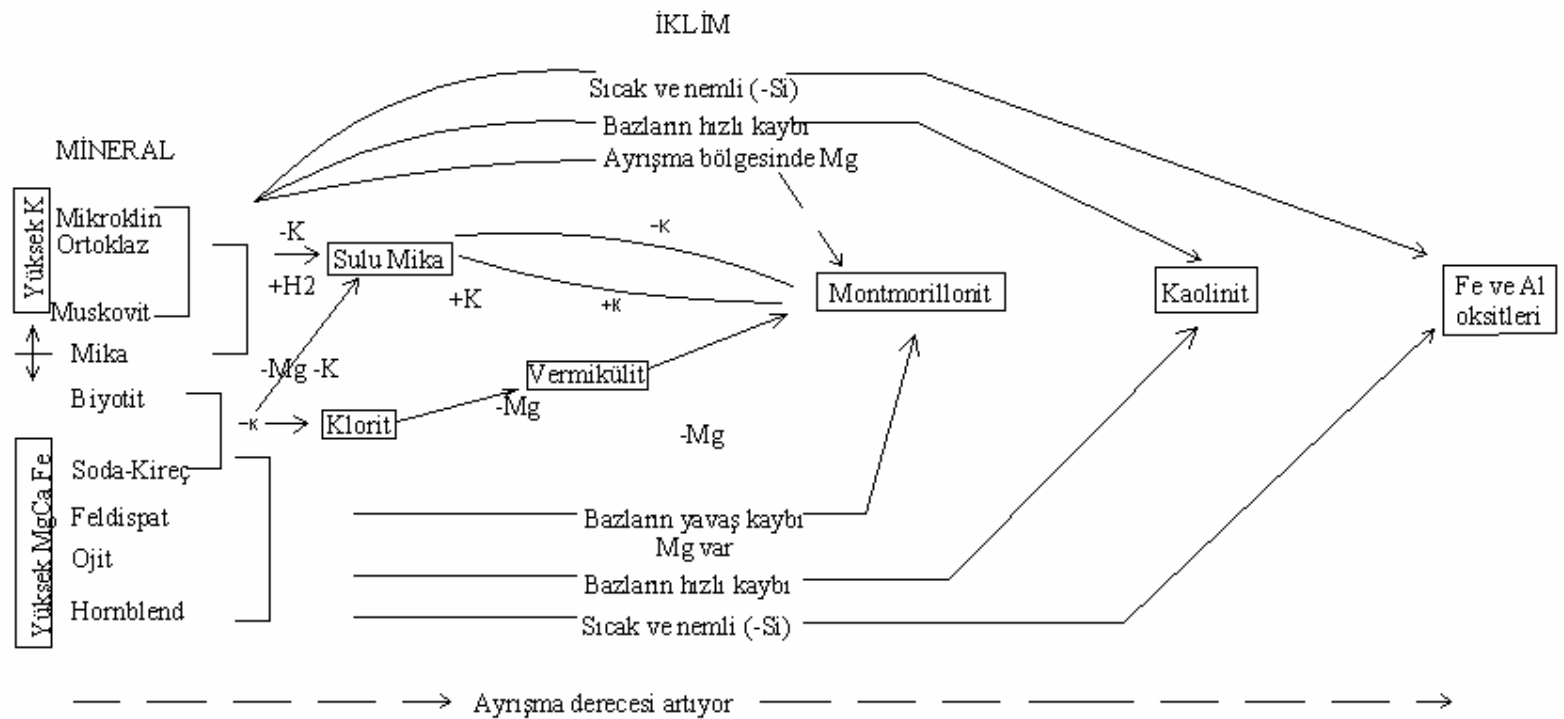
Şekil 2.1 : Kaolinitin atomik yapısı [12]

Kaolinitin ve serpentinin mineral partikülleri, kohezyon yönünde kümelenen temel tabakalardan oluşurlar. Ardışık tabakalar arasındaki bağ, hidrojen bağlarıdır. Bu bağ, orta tabakada genleşme özelliği yoksa yeterli bir dayanımdır.

Tetrahedral ve oktahedral tabakalardaki oksijen- oksijen aralığındaki küçük değişikliklerden dolayı, ideal hegzagonal tetrahedral ağda bazı bozulmalar olur. Yukarı doğru yönelmiş Si – O bağı oktahedranın üzerini kapatacak şekilde hafifçe eğilir. Bu yüzden, zemin danesinin en önemli ögesi olan kaolinit minerali, monoklinik yerine trikliniklidir.



Şekil 2.2 : Kaolinitin yük dağılımı [30]

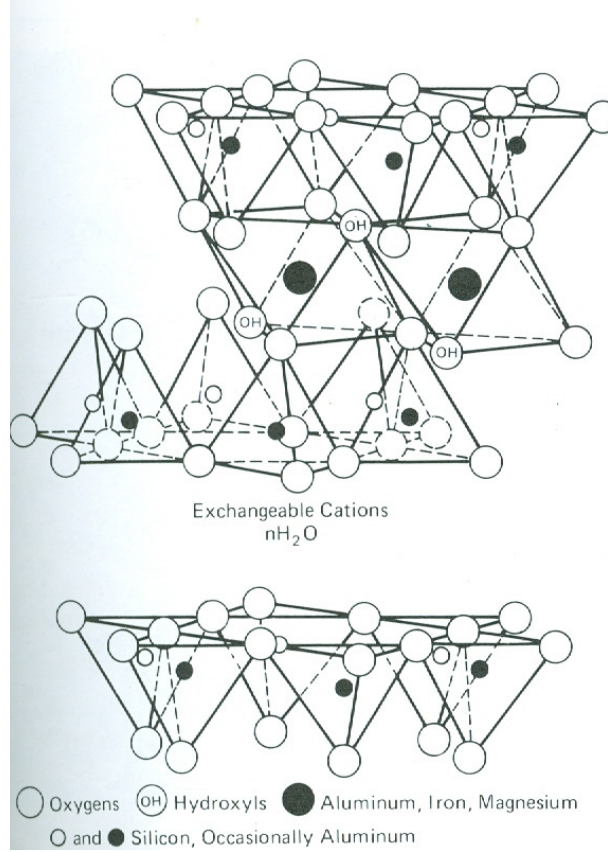


Şekil 2.3 : Killeşme akış diyagramı [32]

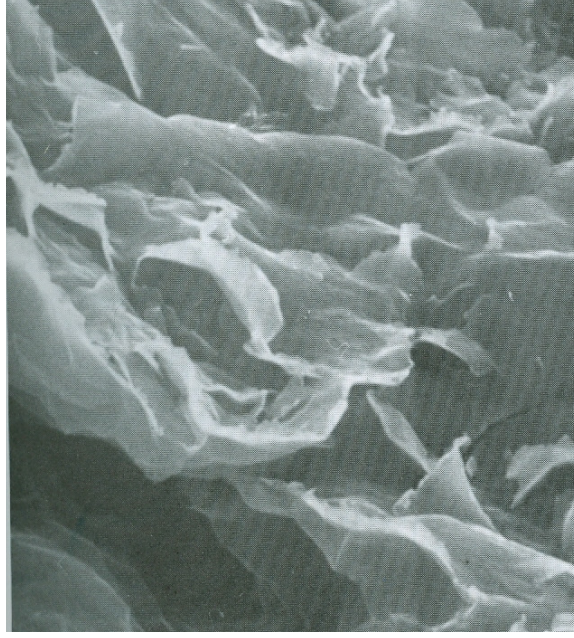
2.1.2 Smektit Grubu Kil Mineralleri

Silikanın bol olduğu ortamlarda gelişirler. Smektitler buharlaşmanın yağış düzeyini geçtiği, böylece yıkanmanın yetersiz olduğu yarı kurak ve kurak iklimlerin tipik mineralleridir. Herhangi bir nedenle yıkanma etkinlik kazanırsa smektitler kolayca kaolinite dönüşebilir.

Montmorillonit , üç katmanlı, eş boyutlu smektit grubu killerdendir. İllitle benzer yapıya sahiptir. Montmorillonit, sekiz yüzeyli alüminyumda, demirin yerini magnezyumun almasıyla oluşan isomorf (eşyapılı) yapıya sahiptir. Birim hücredeki montmorillonit formülü $(OH)_4Si_8(Al_{3.34}Mg_{0.66})O_{20}$ dir. Şekil 2.4'te montmorillonitin atomik yapısı gösterilmektedir. Genellikle çok ince eşboyutlu kabuk (Şekil 2.5) gibi meydana gelir.



Şekil 2.4 : Montmorillonitin atomik yapısı [30]



Şekil 2.5 : Montmorillonitin elektron mikroskobundan görünüşü [30]

2.1.3 İllit ve Vermikülitler Grubu Kil Mineralleri

Montmorillonitin oluştuğu koşullarda oluşurlar. Ana kation potasyumdur. Vermikülit, mika ve kloritle karışık tabakalı killer de oluşturabilir. İllit düzgün bir kristal yapıya sahip olduğundan rezidüel zeminlerde olduğu gibi çökellerde de bulunur. Deniz ve okyanus sedimentlerinde bol miktarda illit olduğu gibi, deniz suyunda yoğun potasyum iyonu bulunduğu montmorillonitler de illite dönüşebilir.

İllit, mikadan farklı olarak aşağıdaki şekilde oluşur;

- İllitte, az miktarda Si^{4+} nın yerini Al^{3+} alır.
- Tabaka dizilişlerinde bazı gelişigüzel durumlar vardır.
- İllitte oldukça az potasyum vardır. Düzgün dizilişli illit % 9 – 10 oranında K_2O içerir.
- İllit partiküllerinin boyutları doğal olarak çok küçüktür.

Bazı illit mineralleri, oktahedral katmanında alüminyumla birlikte magnezyum ve demir içerebilirler.

Vermikülit nemli ve ılıman iklimlerde daha sık görülür. Vermikülit yapısı, biyotit mika tabakaları ve çift su molekül tabakalarının düzenli sıralanmasıyla oluşur. Magnezyum ve kalsiyum varsa, çift su tabakası oluşur.

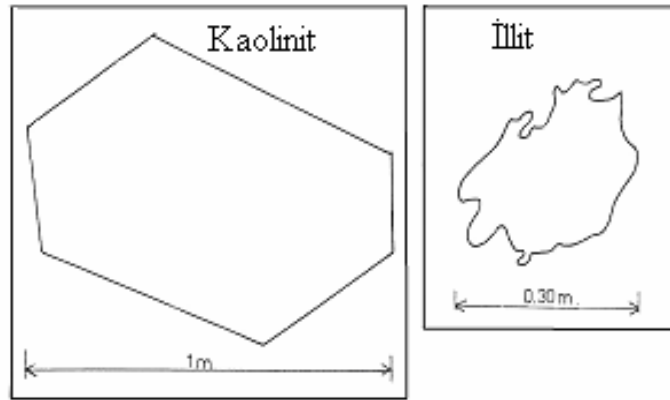
Vermikülit için genel formülü $(OH)_4 (Mg Ca)_x (Si_{8-x} Al_x) (Mg.Fe)_6 O_{20y} H_2 O$ olmakla birlikte burada; $x = 1 \sim 1.4$ ve $y = 8$ dir.

2.1.4 Klorit Grubu Kil Mineralleri

Başlıca iki şekilde oluşurlar; birincisi smektitin bulunduğu ortama yeterli miktarda Mg^{++} gelirse brusitin içerdiği aratabaka suyunun yerini bir kation olarak klorite dönüşüm sağlanır. İkincisi ise kor ve başkalaşım kayaçtaki biyotit ayrışmaya uğrayarak trioktahedral klorit ve klorit-vermikülit tabakalı mineralini oluşturur.

2.2 Kil Danesinin Özellikleri

Killer için dane şekli elektron mikroskoplarla saptandığı gibi plaka biçimindedir. Bu plakaların genişlik, uzunluk ve kalınlık oranları mineral yapılarına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Şekil 2.6’da görülen bilhassa bazı illit grubu killer gibi, çubuk biçiminde de kil danecikleri olan killer tabiatta vardır.



Şekil 2.6 : Kaolinit ve İllit dane şekilleri

Kaolin danelerinin yüzeylerinin 10^{-8} m(=100 Å) mertebesinde düz olduğu ve en küçük kil daneciklerinden biri olan montmorillonit grubu killerin de plaka kalınlığı yaklaşık 10^{-9} m (10 Å) olduğu ve yüzeyin ise 10^{-10} m (=1 Å) mertebesinde düz sayılması mümkündür.

İnce daneli zeminlerde atomların yapısı, yerleşimi ve birleşimi; permeabilite, sıkışabilirlik, kayma mukavemeti ve gerilmelerin aktarılması bakımından önemli etkilere sahiptir.

Killer metal oksitlerle birlikte bulunduklarında doğal olarak renklenmelerinin yanında organik maddeler de ihtiva ederler. Kil, saf durumda beyaz renklidir ve

kaolen adını alır. Kilin rengi, içinde bulunan maddeler hakkında fikir vermektedir. Örneğin; sarı, pembe, kırmızımsı, mavimsi, gri, yeşil ve siyahımsı olabilir.

Kilde;

- Limonit bulunması halinde rengi esmerdir.
- Demir peroksit bulunması halinde rengi kırmızıdır.
- Manganez bioksit bulunması halinde rengi siyahtır.
- Organik maddeler bulunması halinde rengi pembedir.

2.2.1 Kilin Yüzey Alanı

Kil mineralinin yüzey alanı, dış yüzey alanlarıyla çözelti halindeki iyonların geçebilecekleri iç boşlukların yüzey alanlarının toplamıdır. Dane çapı veya boyutu küçüldükçe, kilin yüzey alanı çok ileri düzeyde büyüme göstermektedir. Kil danelerinin boyutları ve spesifik yüzeyleri mineral yapısına bağlı olarak büyük farklılıklar göstermektedir.

Spesifik (Özgül) Yüzey = Yüzey alanı/hacim formülü ile bulunur. Örneğin; çakıl danesini 1 cm kenarlı küp kabul edersek; hacmi $V = 1 \text{ cm}^3$, yüzey alanı $A = 6(1 \times 1) = 6 \text{ cm}^2$ ve yüzey alanı-hacim oranı $A/V = 6$ olmaktadır. Aynı hacme, 1 mikron boyutlu 10^{12} kil danesi sığabildiğinden yüzey alanı 60000 cm^2 , A/V oranı da 60000 olacaktır. Bunun sonucunda; silt ve daha iri danelerin özgül yüzeyleri $1 \text{ m}^2/\text{gr}$ iken, killerde aynı oran, 10-800 değerleri olmaktadır.

Çizelge 2.1’de tabii zeminlerde yaygın olarak rastlanılan kil minerallerinden oluşan danelerin ortalama boyutları ve spesifik yüzeyleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 Danelerin ortalama boyutları ve spesifik yüzeyleri

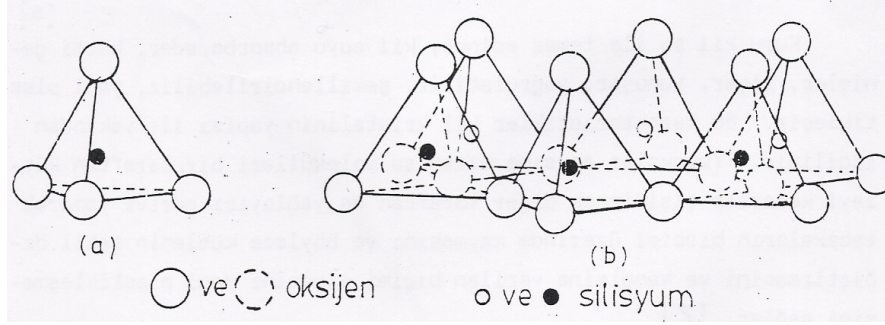
	Dane Kalınlığı	Dane Çapı	Spesifik Yüzey
Kil Minerali	($\times 10^{-6}$ mm)	($\times 10^{-6}$ mm)	(m^2/gr)
Kaolin	50-2000	300-4000	15000
Klorit	30	10000	800000
İllit	30	10000	800000
Montmorillonit	3	100-1000	8000000

İnce daneli zeminleri oluşturan danelerin mineral yapısı, boyutları ve biçimleri ile çok yüksek spesifik yüzeye sahip olmaları, onların mühendislik özelliklerini ve zemin içindeki su ile etkileşimini kontrol eden çok önemli unsurlar olmaktadır.

2.3 Killerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Killer çapları 0.002 mm'den daha ince olan zemin cinsidir. Çapları 0.001 mm'den daha küçük olanlara kolloidal kil adı verilir. Kil zemin genellikle amorf bir görünüşe sahip olduğu halde kil mineralleri kristal bir yapıya sahiptirler. Kristal olmayan danelerin zeminin plastik özellikleri üzerinde tesiri yok denecek kadar azdır. Kuartz gibi kristal bünyeye sahip bazı minerallerde çapları 2 mikrondan ufak olmalarına rağmen zemine plastisite veya kohezyon özellikleri vermezler. Kil minerallerinin kimyasal bileşeni alüminyum silikat hidrattır. Genel kimyasal formülleri ($m \text{ Al}_2 \text{ O}_3$, $n \text{ SiO}_2$, $p \text{ H}_2\text{O}$) şeklinde olup m,n,p katsayıları sisteme katılan alüminyum oksidin, silisyum oksidin ve suyun oranlarını ifade etmektedir. Alüminyum yerine, bazı hallerde demir ve magnezyum hatta arı kilde hidrojen gelebilir. Ayrıca, potasyum, kalsiyum ve magnezyum, kil minerallerinin levhaları arasına girebilir. Alüminyum, silis ve suyun farklı şekillerde birleşmesinden meydana gelen kil mineralleri genellikle yaprak şeklindedir. Kil minerallerinin iç yapısı, kafes yapı şeklinde olup atomlar birbirlerini takip eden levhalar üzerine yerleşmiştir. Levhalar arasında kimyasal bir bağ mevcut değildir. Levhaların temas yüzeyleri boyunca mineraller kolaylıkla ayrılabilir. Oksijen atomları veya hidroksil ile birleşmiş silisyum, alüminyum, magnezyum veya demir atomlarından oluşmuş bu levhalar SiO_2 veya Al_2O_3 'den olabilir.

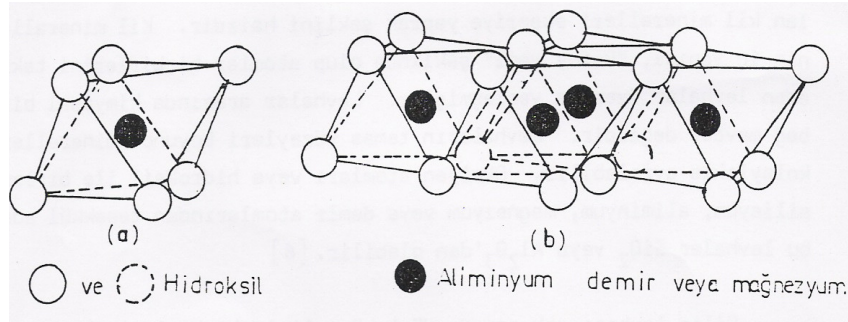
Silis levhası çok sayıda dört yüzeylinin birbirleri ile birleşmesinden meydana gelir. Bir dört yüzeylinin 4 köşesinde eşit aralıklarla yerleşmiş oksijen atomları, merkezde bu atomlardan eşit uzaklıkta silisyum atomu bulunur. Kil mineral yapısının iki ana birimi olan silis levhası ve alüminyum veya magnezyum levhaları Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 : Kil minerallerindeki silis levhasının ana ünitesi

Çeşitli kil minerallerini oluşturan silikat tabakalarının sınıflandırması üç kritere bağlıdır; birim hücrenin yüksekliği veya tabakanın kalınlığı, birleşim tabakanın iyonik içeriği ve iki sekizyüzlü veya üç sekizyüzlü arasındaki bağ, tabaka sırasının kümelenmesi ve kümelenmenin düzen derecesi.

Alüminyum veya magnezyum levhası ise altı oksijen veya hidroksil ile çevrelenmiş alüminyum veya magnezyum iyonlu sekiz yüzlüdür. Şekil 2.8’de gösterildiği gibi; alüminyum, demir veya magnezyum atomları merkezde hidroksiller veya oksijenler ise sekiz yüzeylinin köşelerinde bulunmaktadır.



Şekil 2.8 : Kil minerallerindeki alüminyum veya magnezyum levhasının ana ünitesi

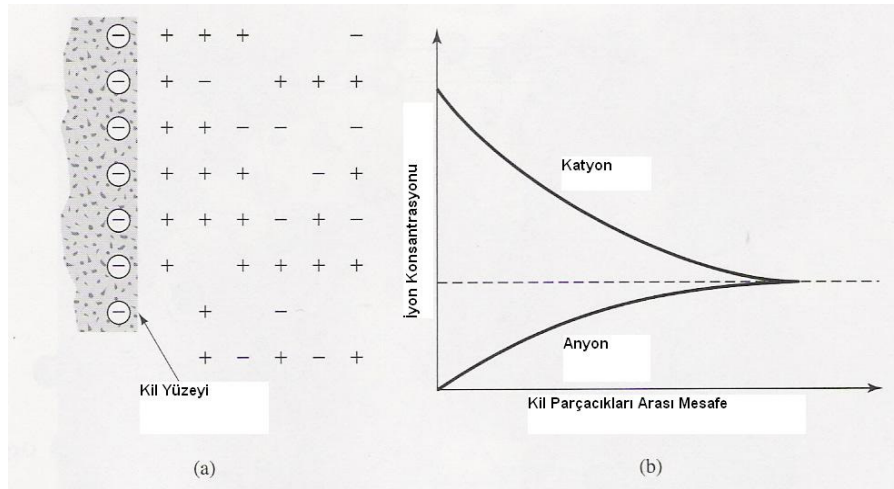
Kuru kil su ile temas edince, suyu absorbe eder, hacmi genişler, şişer, yumuşar, yoğrulabilir, şekillendirilebilir yani plastikleşir. Bu karakteristikler kil kristalinin yapısıyla yakından ilgilidir. Tabakalar arasına sızan su molekülleri bir taraftan kütleyi kapatıp şişirirken diğer taraftan da yağlayıcı görevi yaparak tabakaların birbirini üzerinde kaymasını ve böylece kütlenin şekil değiştirmesini ve kendisine verilen biçimi almasını yani plastikleşmesini sağlar.

Strüktür şemasının incelenmesinde görüldüğü gibi su molekülleri ile dört yüzlerin tepelerindeki oksijen atomları arasında meydana gelen bu olay kilin cinsi ve su miktarı ile yakından ilgilidir.

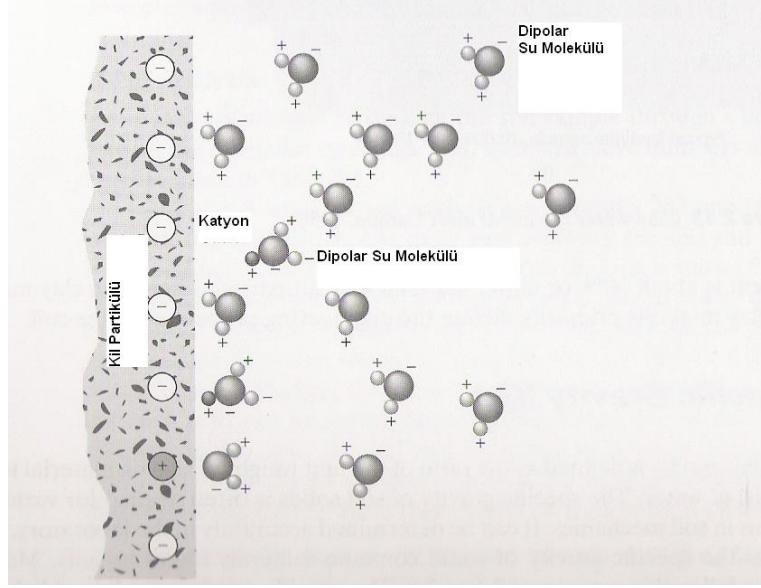
Normal şartlar altında su muhtevası düşük killer bünyelerine su çekerler ve hacimleri de bu ölçüde genişler. Suyun etkisi ile meydana gelen bu şişme ve kayganlıktan faydalanarak kilin bünyesine bazı katkı maddeleri katmak ve bu karışıma istenilen yapıyı vermek mümkündür. Bu olay zemin mekaniğinde baz değişimi olarak adlandırılır. Kil kurumaya bırakıldığı zaman su kaybı ile birlikte boyutlarında küçülmeler olur. Malzemede kalan su, birbirlerine değen zerrelere aralarındaki boşluklarda tutulmaktadır. Bu anda su, kilin bünyesinden ayrılrsa bile numunede boy küçülmesi olmamaktadır.

2.3.1 Kıvam ve Kıvam Limitleri

Su muhtevası zeminlerin mühendislik davranışlarını etkileyen en önemli unsurdur. Killer ve kil içeren kuru karışımlar suyla yoğrulduklarında toz görünümünden çamura, su miktarı daha da arttırılırsa sıvıya dönüşürler. Bu değişime kıvam denir. Killi bir zeminin kıvamı, yalnızca içerdiği su miktarı arttırılarak, çok katı bir kıvamdan viskoz kıvama kadar geniş bir aralık içinde değiştirilebilmektedir. Su muhtevasına bağlı olarak meydana gelen değişiklikler, daneleri oluşturan minerallerin kristal yapısına, zeminin arazideki çökelme koşullarına ve boşluklardaki zemin suyunun kimyasal özelliklerine bağlı olmaktadır. Bu yüzden su muhtevasından kaynaklanan değişimler çok farklılık oluşturmaktadır.



Şekil 2.9 : Çift katman dağılımı [12]



Şekil 2.10 : Çift katmanda dipolar moleküllerin çekimi [12]

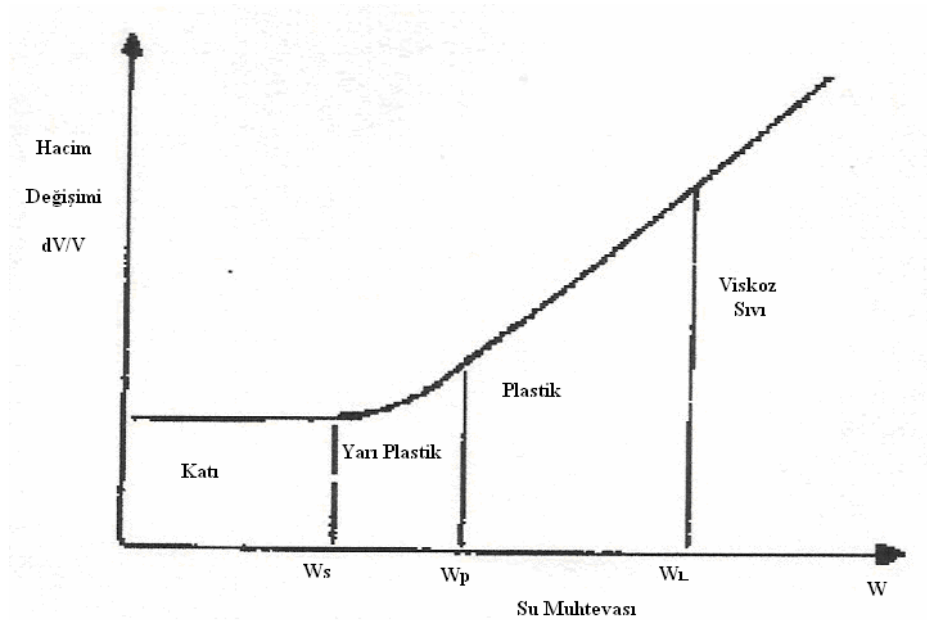
Plaka şeklindeki kil danelerinin yüzeylerinde negatif elektrik şarjları, kenarlarında ise negatif veya pozitif elektrik şarjları bulunmaktadır. Su molekülleri ise bir ucu negatif, bir ucu pozitif elektrik yüklü çift polariteli bir karaktere sahiptir. Ayrıca, zemin suyu içinde bulunabilecek kimyasal maddeler negatif (kasyonlar) veya pozitif (anyonlar) elektrik yüklü olabilmektedir. Kil danelerinin yüzeyinde ve su molekülleri ile kimyasal maddelerde birbirinden farklı elektrik yüklerinin mevcut olması sonucu aralarında elektriksel çekim ve itki kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Bu kuvvetlerin şiddeti büyük oranda danelerin mineral yapısına bağlı olmaktadır. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10’da bu durum özetlenmektedir. Elektriksel çekim kuvvetleri sonucu su molekülleri kil danelerinin yüzeyine yapışmakta ve absorbe su olarak nitelendirilen bir su tabakası ile kaplanmasına yol açmaktadır. Absorbe su, yüksek viskoziteye ve yoğunluğa sahip olmakla beraber dane yüzeyinden uzaklaştıkça elektriksel kuvvetlerin şiddeti uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak azaldığı için, özellikleri değişmekte ve belli bir uzaklıktan sonra boşluklardaki serbest suya dönüşmektedir. Zeminin düşük su muhtevalarına sahip olduğu durumlarda daneler arasında absorbe su ile temas meydana gelmekte ve bu su tabakasının sahip olduğu yüksek viskoziteden dolayı danelerin birbirine göre hareketi zorlaşmaktadır (zemin katı kıvamdadır). Zeminin su muhtevası arttıkça, daneler birbirinden uzaklaştığı için absorbe su tabakaları arasında temas kaybolmakta, daneler birbirine göre daha kolay hareket edebilmekte ve zemine istenen şeklin verilmesi kolaylaşmaktadır. Zemin

plastik kıvama gelmiş olmaktadır. Su muhtevasının çok yüksek değerlerinde ise çok küçük olan kil daneleri su içinde bir süspansiyon haline gelmektedir.

Killerin kıvamında su muhtevasına bağlı olarak meydana gelen değişimleri deneysel olarak saptayabilmek için bazı sınır su muhtevası değerleri tanımlanmıştır. Kıvam limitleri olarak bilinen bu su muhtevası değerlerini belirlemek için kullanılan deney yöntemleri Atterberg (1911) tarafından geliştirilmiştir. Başlıca üç kıvam limiti (Atterberg Limiti) tanımı kullanılmaktadır;

- Likit Limit (w_L) : Zeminin viskoz bir sıvıdan plastik bir kıvama dönüştüğü su muhtevası.
- Plastik Limit (w_P) : Zeminin plastik bir malzemeden yarı plastik bir malzemeye dönüştüğü su muhtevası.
- Büzülme (Rötre) Limiti (w_S) : Zeminin yarı plastik bir malzemeden katı bir malzemeye dönüştüğü su muhtevası.

Su muhtevasına bağlı olarak zeminin hacminde meydana gelen değişimlerin kıvam limitleriyle ilişkisi Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



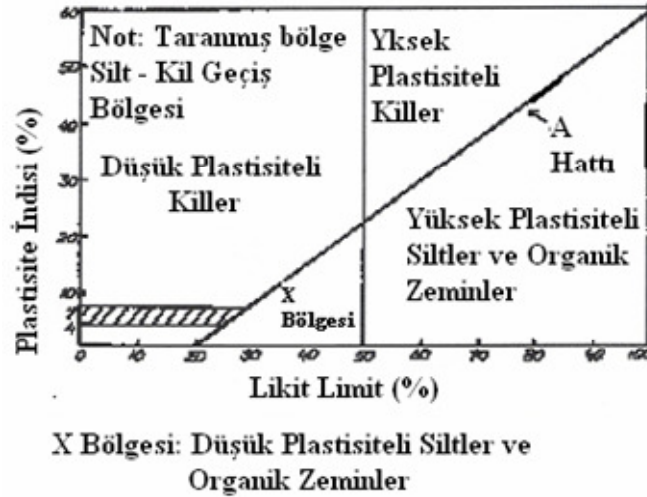
Şekil 2.11 : Zeminlerde su muhtevası-hacim değişimi davranışı ve kıvam limitlerinin tanımlanması [32]

Likit limit değerine kadar su muhtevası değişimleri ile hacim değişimi arasında doğrusal bir ilişki varken likit limit ile plastik limit arasında bu ilişki doğrusal

olmaktan uzaklaşmakta, büzülme limiti değerinden sonra ise zeminin hacmi sabit kalmaktadır. Likit limit ile plastik limit arasında kalan su muhtevalarında zemin plastik davranış gösterdiği için bu iki limitin farkı plastisite indisi (I_p)

$$I_p = (w_L - w_p) \quad (2.1)$$

olarak tanımlanmaktadır. Plastisite indisi, zeminin plastik davranış gösterdiği su muhtevaları aralığının genişliğini göstermektedir. Likit limit ve plastisite indisinin birlikte değerlendirilmesi zeminin plastisitesinin bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.12 de gösterilen Casagrande plastisite kartında, $w_L = \% 50$ 'den geçen düşey doğru ile A-hattı olarak bilinen eğik doğrunun ayırdığı dört bölge bulunmaktadır. Yüksek plastisiteli zeminlerin bu doğrunun solunda yer aldığı kabul edilirken, A-hattının üstündeki zeminler killeri, altındaki zeminler ise siltleri oluşturmaktadır. Casagrande plastisite kartında bulunan taralı alan; düşük plastisiteli siltler ile killeri arasındaki geçiş bölgesini oluşturduğu kabul edilir.



Şekil 2.12 : Casagrande plastisite kartı [32]

2.3.2 Kıvam Limitlerinin Mühendislikte Kullanımı

Kıvam limitleri, ince daneli zeminlerin değişik su muhtevalarındaki mukavemetlerinin bir göstergesidir. Zeminin tabii su muhtevasının kıvam limitleri ile karşılaştırılması bize o zeminin mukavemeti hakkında fikir verir. Zeminin plastisite indisi arttıkça, sıkışma ve şişme potansiyeli artmakta, su geçirgenliği azalmakta, arazi kazı ve dolgu işlemleri sırasında zorluklarla karşılaşmaktadır. İnce daneli

zeminlerin plastisite indisinin kil yüzdesine oranı zeminin aktivite katsayısı olarak tanımlanır.

Çizelge 2.2’de gösterildiği üzere; aktivite katsayısı zemin içindeki kil minerallerinin cinsi hakkında fikir vermektedir.

Çizelge 2.2 Kil cinsine göre aktivite katsayısı

Kil cinsi	A _c (Aktivite katsayısı)
Kaolin	0,38
İllit	0,90
Montmorillonit	7,20

Aktivite katsayısı 0,75’den küçük olan killer aktif olmayan killer; 0,75–1,25 arasında olanlar normal killer; 1,25’den büyük olanlar ise aktif killer olarak kabul edilmektedir.

2.4 Tabii Killerin Kıvamı

Tabii killerin arazi koşullarındaki kıvamı yumuşak, orta katı ve sert terimlerle ifade edilir. Zemin kıvamı genellikle serbest basınç mukavemeti ile tanımlanır. Kıvamı ile serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişki Çizelge 2.3'te verilmektedir.

Çizelge 2.3 İnce daneli zeminlerin kıvamı

Serbest Basınç Mukavemeti (q_u (kN/m ²))	Kıvamı
< 25	Çok yumuşak
25–50	Yumuşak
50–100	Orta katı
100–200	Katı
200–400	Çok katı
>400	Sert

3. ŞİŞEN KİLLERİN ÖZELLİKLERİ

Bazı zeminler, suyla karıştırıldıklarında gösterdikleri olağanüstü değişiklikler nedeniyle diğerlerinden ayrılırlar. Genelde yüksek plastisiteli zeminler mineral yapısı, dane dizilişleri, doğal su muhtevası, boşluk suyu özellikleri ve içinde bulundukları çevre basıncına bağlı olarak aşırı hacim azalması veya artışı, hareketli veya durağan suda dengelerini kaybetme gibi çok özel fakat olumsuz davranışlar gösterirler. Bu tür zeminlere “problem zeminler” denir.

Zeminde buhar halinde bulunan mevcut nemin termal akımla hareket ederek daha serin bölgelerde yoğunlaşması ya da yol, havaalanı, boru hatları v.b. yapıların altındaki şişebilen kuru zemin tabakasının çeşitli sebeplerle su muhtevasının artması kil zeminin şişmesine yol açar. Kilin mineralojisi, orijini, başlangıç fiziksel durumu, su muhtevası, kil plakalarının yerleşimi, birim hacim ağırlığı v.b. ise şişmeye etki eden faktörlerin başında gelir. Şişmeye etki eden çevresel faktörler aşağıda sıralandığı gibidir;

- Su muhtevası
- Yoğunluk
- Dış basınç
- Sıcaklık
- Yapı
- Suyu erişebilirlik

Hacimdeki artış, yukarıda sıralanan çevresel nedenlerden dolayı, kilin kendi özellikleriyle birlikte, zemindeki gerilme dağılımının değişmesine paralel olarak gelişmektedir. Ara tabaka bağları ile kil yapısında bir karşılaştırma yapıldığında; montmorillonit ve vermikülitlerin, kuruma ve nemlenme sırasında, kaolinit ve sulu mikaya oranla çok daha fazla hacim değişimine maruz kalırlar. Hacim değişiminin yaşanabileceği zemin koşullarında yapıların maruz kaldıkları etkiyi belirlemek için, bazı tanımlamalar yapılmalıdır. Bunlar öncelikle kilin tanımlanması, davranışlarının belirlenmesidir.

3.1 Şişen Zeminler

Şişen zeminler (expansive-swelling) yarı kurak ve kurak iklimlerde oluşmuş, suyla karıştıklarında gösterdikleri hacim değişimleri nedeniyle üstteki hafif yapılara ve kazı destek sistemlerine zarar veren killerdir. Killerin şişme özellikleri şişme potansiyeli kavramı ile ifade edilmektedir. Şişme potansiyeli (ŞP), kilin 7 kPa basınç altında ilk boyutunun yüzdesi türünden gösterdiği bir boyutlu şişme olarak ifade edilir.

Şişme potansiyelini belirlemek için;

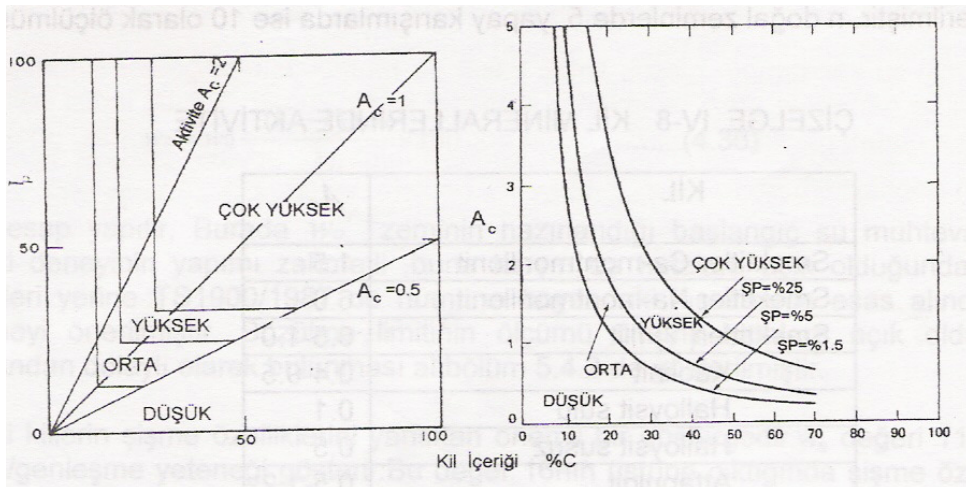
$$\text{ŞP} = 3.6 \times 10^{-5} A_c^{2.44} C^{3.44} \quad (3.1)$$

$$\text{ŞP} = 2.16 \times 10^{-3} I_p^{2.44} \quad (3.2)$$

bağıntıları ve

$$I_s = w_L - w_s \quad (3.3)$$

Şişme indisi kullanılabilir [32]. Şekil 3.1 de zemin şişme potansiyeli düşük ($\text{ŞP} < 1.5$), orta ($1.5 < \text{ŞP} < 5$), yüksek ($5 < \text{ŞP} < 25$) ve çok yüksek ($\text{ŞP} > 25$) olarak verilen sınıflandırmalar gösterilmektedir. Şişme özelliğinin montmorillonit ve illit tipi killere özgü bir olay olduğu söylenebilir. Bazı durumlarda killer tek, bazılarında ise üç boyutta şişme özelliği göstermektedir. Bazen de zeminlerde yanal şişme basıncı düşey yöndeki değerinin iki katına çıkabilmektedir.



Şekil 3.1 : Killerde şişme potansiyeli [32]

Killerin şişmesi birincil olarak elektriksel çift tabakaya bağlıdır. Kil-su sistemindeki değişebilen katyonlar kil üzerinde yer almayıp, yüzeyde farklı uzaklıkta yer alabilirler. Pozitif yüklü iyonlar ve negatif yüklü kil yüzeyi arasındaki elektriksel kuvvet, katyonları yüzeye çeker, fakat termal enerjileri onları yüzeyden uzağa dağıtır. Elektriksel çekme ve termal dağıtma arasındaki denge yüzeydeki yüksek konsantrasyonlu ve yüzeyden düşük uzaklıktaki katyonları dağıtmayı sağlar. Bitişik danelerin dağılmış iyon tabakalarının birbirleri ile etkileşimi şişme özelliğini açıklayıcı bilgi verir.

Çizelge 3.1: Şişme potansiyeli sınıflandırması [24]

Likit Limit	Plastisite İndisi	Şişme Potansiyeli	Şişme Potansiyeli Sınıflaması
<50	<25	<0.5	Düşük
50–60	25–35	0.5–1.5	Orta
>60	>35	>1.5	Yüksek
Şişme Potansiyeli=Örtü basıncına eşit basınç altındaki düşey şişme			

Kil zeminlerde şişmeyi daneler arası ve daneler içi olmak üzere ikiye ayırmıştır. Daneler arası şişme, kilin mineralojik kompozisyonundan bağımsız olarak herhangi bir kil zeminde meydana gelebilir. Nispeten kuru olan killerde daneler, kapiler kuvvetlerden kaynaklanan çekimle bir arada tutulurlar. İslanma meydana geldiğinde ise kapiler kuvvetlerin etkisi azalır ve kil zemin genişler. Başka bir deyişle, suyun dıştaki kristal yüzeylere çıkması engellenip, kristallerin arasındaki boşluğu doldurduğunda şişme meydana gelir. Öte yandan daneler içi şişme, montmorillonit mineralinin karakteristik özelliğidir. Bir montmorillonit kristalini oluşturan ayrı ayrı molekül tabakaları zayıf bir şekilde birbirlerine bağlıdırlar. Dolayısıyla ıslanma meydana geldiğinde su sadece kristallerin arasına değil, kristalleri de kapsayan birim tabakaların arasına girer. Örneğin; Na montmorillonit esas hacminin %2000 katına kadar genişleyebilir ve kil jel kıvamına gelir.

Kaolinit, kil mineralleri arasında en düşük şişme kapasitesine sahip kildir. İllit % 15, İllit-montmorillonit karışımı % 60 - % 100 oranında şişme gösterebilmektedir. Ca montmorillonit Na'dan daha az şişme göstererek %50 - %100 aralığında değişmektedir.

şişme yüzdesi ile plastisite indisi, kil fraksiyonu ve arazideki su muhtevası arasındaki ilişkiyi gösteren bir bağıntı geliştirilmiştir. Aynı şartlarda sıkıştırılmış zemin numuneleri üzerinde yapılan deneylerin korelasyon analizleri sonucunda aşağıdaki bağıntıyı bulunmuştur.

$$S_p = (0.00229 \text{ PI}) \times (1.45 C) W_o + 6.38 \quad (3.4)$$

Formülde; S_p : Şişme yüzdesi,

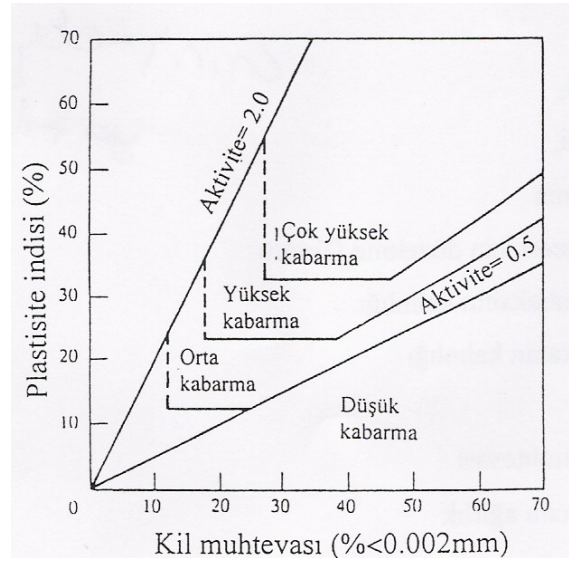
PI : Plastisite indisi,

C : Kil yüzdesi,

W : Başlangıç su muhtevasıdır.

Su muhtevasına göre şişme potansiyeli sınıflaması Çizelge 3.1’de verilmektedir

Şişme potansiyelinin tahmininde kullanılan bir yöntem de aktivite katsayısıdır. Şişme yüzdesinin tahmini için Şekil 3.2’deki abak önerilmiştir.



Şekil 3.2: Şişme yüzdesi tahmini [24]

Şişmenin tahmin edilebilmesi için başka birçok formüller geliştirilmiştir. Bunlar Çizelge 3.2’de sıralanmaktadır.

Çizelge 3.2: Şişme potansiyeli formülleri

Referans	Bağıntı
Seed ve diğ. (1962) **	$S = 2.16 \times 10^{-3} (PI)^{2.44}$
Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973) ***	$\log S_p = 1/12 (0.44 LL - W_o + 5.5)$
Brackly (1980) ***	$\text{Şişme (\%)} = [(PI - 10)/10] \log S/p$
Van Der Merwe	$\Delta H = F \times e^{-0.377 D} \times (e^{-0.377 H} - 1)$
Vijayvergiya ve Sullivan	$\log S_p = 0.0526 \gamma_d + 0.033 LL - 6.8$
Schneider ve Poor	$\log S_p = 0.9 (PI / W_o) - 1.19$
Johnson	$PI > 40, S_p = 23.82 + 0.7346 PI + 0.1458 H - 1.7 W_o - 0.00884 PI H$
Johnson	$PI < 40, S_p = -9.18 + 1.5546 PI + 0.08424 H + 0.1 W_o - 0.0432 PI W_o - 0.01215$
Komornik ve David	$\log P_s = -2.132 + 0.0208 LL - 0.000665 \gamma_d - 0.0269 W_o$
Nayak	$P_s = (3.58 \times 10^{-2}) PI^{1.12} C^2 / w_o^2 + 3.79$

Tabii zemin numunelerinde 50 kN/m² yük altında yapılan deney sonucunda, SPT değerleri ve index özelliklerine göre aşağıdaki çizelge (Çizelge 3.3) oluşmuştur.

* : %8 ile %65 kil muhtevasına sahip zeminler için.

** : Ödometre deneyi sonucu elde edilen formüldür.

*** : Üzerinde yapı bulunan kabaran bir zeminin şişmeden kaynaklanan maksimum hareketini ifade eden formüldür.

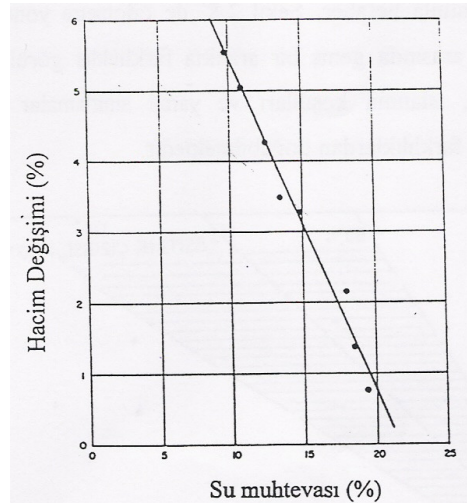
Çizelge 3.3: Şişen killerde muhtemel hacim değişikliği verileri [24]

200 no'lu elekten geçen yüzde	Likit Limit (%)	Standart Penetrasyon Darbe Sayısı	Toplam Hacmin Yüzdesi Olarak Muhtemel Şişme	Şişme Basıncı (kN/m ²)	Şişme Derecesi
> 35	>60	<30	>10	>1000	Çok yüksek
60-90	40-60	20-30	3-10	250-1000	yüksek
30-60	30-40	10-20	1-5	150-250	orta
<30	<30	>30	<1	50	düşük

3.2 Şişmeye Etki Eden Faktörler

3.2.1 Başlangıç Su Muhtevası

Sabit su muhtevasına sahip kilde, yüksek şişme potansiyeli hesaba katılmadan, kilin su muhtevası değişmezse hacim değişimi olmaz. Tabii su muhtevası % 15'in altında olan çok kuru killer tehlikelidir. Bu tür killer kolaylıkla % 35 su muhtevasına kadar su emebilir ve şişerek yapılara zarar verir. % 30 su muhtevasının üzerindeki killer şişmenin büyük oranda gerçekleştiğini ve daha fazla şişmenin çok az olacağını gösterir. Bununla beraber; yeraltı su seviyesinin altındaki killer, su seviyesinin düşmesi ve ya fiziksel boşluklardaki değişimler yüzünden kuruyabilir. Tekrar suya doymaları halinde şişme potansiyeli yeniden ortaya çıkar. Chen, su muhtevasının hacim değişimine olan etkisini Şekil 3.3'te gösterildiği gibi ifade etmiştir.



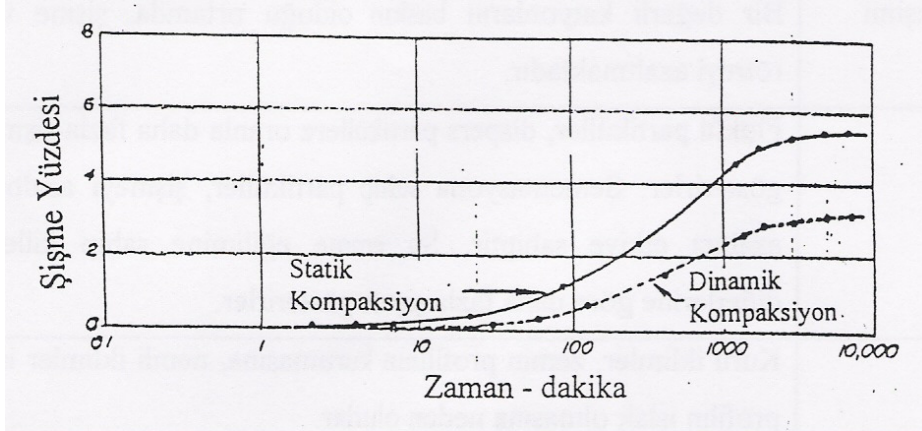
Şekil 3.3: Su muhtevasının hacim değişimine etkisi [24]

3.2.2 Kuru Birim Hacim Ağırlık

Şişme parametreleri üzerinde, başlangıç su muhtevası ile birlikte en etkili faktörlerdendir. Aynı su muhtevasındaki numunelerin başlangıç kuru birim hacim ağırlığı arttıkça şişme basıncının arttığı birçok araştırmacı tarafından tespit edilmiştir. Kuru birim hacim ağırlık ne kadar büyükse, bu o kilin partikülleri arasındaki mesafenin azaldığını gösterir. Başlangıç kompaksiyon koşulları, örselenmiş numuneler için son derece önemlidir.

3.2.3 Kompaksiyon Yöntemi

Sıkıştırılmış dolgu zeminin su muhtevasının artmasıyla oluşabilecek şişme miktarı, zeminin sıkıştırma kuru birim hacim ağırlığı, su muhtevası ve kompaksiyon yöntemine bağlıdır. Optimum su muhtevasının üzerindeki su muhtevalarında şişme miktarının, Kompaksiyon derecesinden bağımsız olarak, önemsiz derecede az olduğu belirtilmiştir. Aynı şişme potansiyeline sahip iki zeminin farklı yöntemlerle sıkıştırılmaları sonucu farklı miktarlarda şişme değerleri elde edilmiştir. Bu durum, Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Kompaksiyon yönteminin şişmeye olan etkisi [24]

3.2.4 Şişmeye Etki Eden Diğer Faktörler

Fiziksel koşullardaki değişimlerin etkisiyle nemlilik derecesi azalan killi zeminler tekrar kapiler su emdiklerinde, sahip oldukları şişme potansiyeline yeniden kavuşurlar. Ancak, kuruma ve ıslanmanın her çevrimi için zeminin şişme davranışında bir yorulma gözlenir. Kurutma ve ıslatma işlemlerinin tekrarlanması halinde ilk çevrimde oluşan şişmenin sonrakilerden fark edilir derecede büyük olduğu yapılan incelemelerle gözlenmiştir. Şişen zeminlerin bu özelliğine şişme yorulması denmektedir.

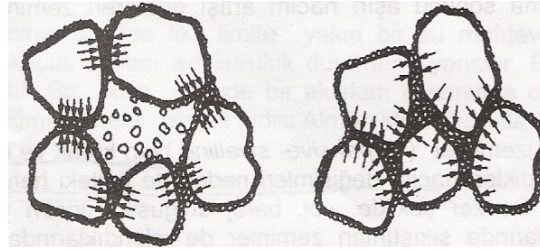
3.3 Killerde Nem Etkileşimi

Toplam su içeriği ve su tutma enerjisi killerin, tüm özelliklerini etkileyen en önemli iki faktördür. Su içeriği; kıvam, dayanım ve yoğunluk, su tutma enerjisi ise hacimsel değişim, konsolidasyon ve hidrolik iletkenlik gibi temel özellikleri etkiler.

Killer üzerindeki mühendislik uygulamalarının hemen hepsi kildeki doğal su içeriğini bozar. Kil üzerine uygulanan gerilmeler, doğal ve yapay yükler kilin yapısında nem hareketine neden olur ve killerdeki hacimsel değişimler genellikle bu nem hareketi ile kontrol edilir. Killerde nem hareketi, kil-su sistemi içerisinde içsel eğimden kaynaklanan kuvvetlerle oluşur. İçsel eğim, sıcaklık değişmesi, doymunluğun artması ve kimyasal bileşimdeki değişimlerden kaynaklanır. Killerde kuruma sonucu büzülme, su emme sonucu şişme gibi istenmeyen sonuçlar nem hareketlerinden dolayı oluşur.

3.4 Göçebilen Zeminler

Bazı zeminler ıslandıklarında veya yük altına girdiklerinde yapılarındaki ani göçme sonucu önemli hacim azalmaları gösterirler. Bunun nedeni kurak iklim şartlarında oluşmuş ve oluşumlarını izleyerek daneleri kılcallık veya bir bağlayıcı ile tutturulmuş doygun olmayan zeminlerde ıslanma sonucu bu bağlayıcı kuvvetler yitirildiğinde boşluk oranında büyük azalmalar oluşmasıdır. Siltler, lős, granit kökenli kalıntı toprakları ve jips ile zayıf çimentolanmış zeminler göçme özelliği gösterirler ve dünyanın birçok yerinde bulunurlar.



Şekil 3.5: Casagrande'ye göre yüklü zeminde göçme mekanizması [32]

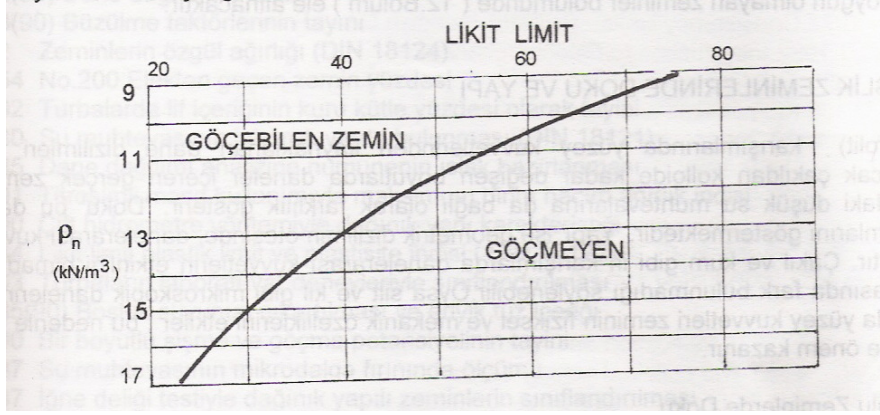
Bir zeminin göçme potansiyeli (GP); ödometrede kuru durumda uygulanmış 215 kPa basınçta dengeye geldikten sonra aniden su verildiğinde belirecek boşluk oranı azalması olarak tarif edilir.

$$GP = \frac{\Delta e}{1 + e_o} \quad (3.5)$$

Oran %1 in altında ise zeminde göçme özelliği yoktur. 1-5 arasında orta, 5-10 arasında ciddi, 10-20 arasında çok ciddi göçme sorunları çıkabileceği anlaşılmalıdır. Göçme potansiyelinin %20 den büyük olması konunun özel olarak değerlendirilmesi gereğini gösterir. Yapılan araştırmalar, göçme potansiyelinin zeminin üniformluluk sayısı C_u , doğal su muhtevası w_n , birim hacim ağırlığı ρ_n ve ıslanma sırasında beliren emme gerilmesi p_c nin fonksiyonu olduğunu göstermiştir.

$$GP = 48.5 + 0.102C_u + 0.46w_n + 3.53\rho_d + 2.8\ln(p_c) \quad (3.6)$$

Şekil 3.6'da gösterilen abak, birim hacim ağırlık ve likit limite göre göçme mekanizması olan ve olmayan zeminleri ayırt etmemizi sağlamaktadır.



Şekil 3.6: Zeminlerde göçebilirlik sınıflandırması [32]

3.5 Dağınık Yapılı Killer

Killi zeminlerden bazıları suyla karıştıklarında yapılarına bağlı olarak dengesizlik belirtileri gösterirler. Bazı zeminlerin yağışta çok kolay erozyona uğramaları örnek olarak gösterilebilir. Buna karşılık, bazıları da suyla bir arada bulundukları halde etkilenmemektedirler. Dağınık yapılı zeminlerin özelliği boşluk suyunun içerdiği sodyum katyonlarının diğerlerine oranla çok daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Dağınık yapı ya da sodyum adsorpsiyon katsayısı (SAR) katyonların mili eşdeğer/lit türünden ölçümüyle ifade edilir.

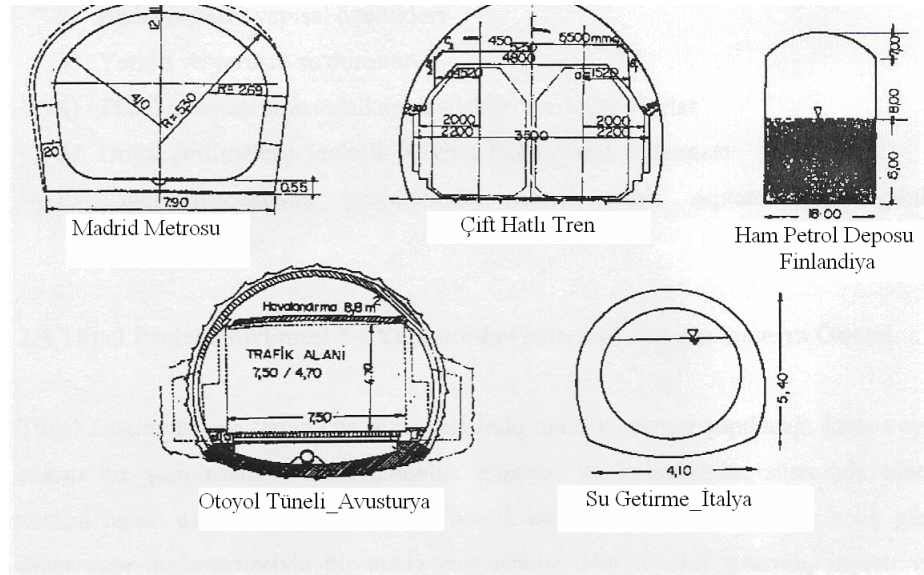
$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{0.5(Ca + Mg)}} \quad (3.7)$$

Dağınık yağılı zemin sınıflandırma girebilmek için SAR'ın tayini gerekmektedir.

4. TÜNEL İNŞAATI

Yeraltında oluşturulan iki ucu açık, boyu eninden fazla, eğimi 30° den az, kazı hacmi boşluk duvarından etkilenme sınırına kadar ulaşan ve ana malzemesi genelde kaya olan çok kalın cidarlı, silindirik yeraltı yapılarına tünel denir.

İlk insanlar, sıcak-soğuk ve yağıştan koruduğu için olanak bulduklarında doğal mağaralarda barınmışlardır. Avustralya’da M.Ö. XI. yy da kullanıldığı saptanmış mağaralar vardır. Günümüzde bu tür hacımlar mantar tarımı, gıda ve içecek maddeleri depolanması gibi özel nem, sıcaklık ve ışık rejimi isteyen amaçlar için kullanılmaktadır. Şekil 4.1’de inşaat mühendisliği ilgi alanına giren çeşitli yer altı yapıları gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Çeşitli yer altı yapıları [39]

4.1 Tünellerin Tarihçesi

Toplu taşıma adına inşa edilen raylı sistemlerin en fazla 150 yıllık geçmişi bulunmaktadır. Bugün, bu sistemleri gelişen teknoloji ile işleten 162 şehir bulunmaktadır. Günümüzde Tokyo, Londra, New York, Paris, Moskova, Seul, Madrid, Mexico City, San Fransisco, Washington, Osaka-Kobe-Kyoto, 200 km nin üzerinde metro sistemlerine sahip şehirler olup, nüfuslarına oranla kabul edilebilir ve genellikle de ortalamanın üzerinde ulaşım açısından rahatlık sağlayabilmektedirler.

Dünyada bilinen ilk tünel, Babil’de saray ile tapınak arasında insanların geçmesi için kazılmış olan tüneldir. 1 km uzunluğunda 3.5 x 4.5 m ebatlarındaki tünel Fırat nehri altından geçmektedir.

M.Ö. 3500 yıllarında Karadeniz – Hazar Denizi arasında, maden cevheri üretimi için ilk yeraltı kazısı yapılmıştır. Aztek, İnka, Hindistan, İran, Mısırlılar değerli madenler aramak için tüneller açmışlardır.

Romalıların tarihi kayıtlarında, anayol ve tünel inşaatlarını planlayan mühendisler olduğu belirtilmektedir.

İlk tünel açma makinesi, Fransız Mühendis Brunel tarafından 1824–1842 yılları arasında Thames nehri altından açılan tünel inşaatında kullanılmıştır. Bu tünel, 4.20 m ve 4.80 m çaplarında ikiz tünel olup halen kullanılmaktadır.

İlk demiryolu tünelleri 1825 yılında Fransa’da Raonne – Andressieux ve 1826–29 yılları arasında İngiltere’de Liverpool-Manchester arasında açılmıştır.

Hidrolik (hava basınçlı delgi) kuvvetten yararlanılarak açılmış ilk tünel 1857 yılında Fransa – İtalya arasında 13.7 km uzunluğundaki çift hatlı Mont Cenis tüneldir.

1893 yılında, İtalya-İsviçre arasında, o güne kadar yapılmış en büyük tünel olan 19.8 km uzunluğundaki Simplon tüneli inşa edilmiştir.

Şehirlerde yapılması zorunluluk haline gelen metrolardan, Londra metrosu 1863 te, Budapeşte metrosu 1896 da, Paris metrosu 1900 de, New York metrosu 1904 te, Moskova metrosu 1930 da, Münih metrosu 1972 de hizmete girmiştir. Bununla birlikte şehir içindeki kanalizasyon tünelleri de boyutları bakımından küçümsenmeyecek kadar önemli gelişme göstermiştir.

1890 yılında, New York – New Jersey arasında Hudson Nehri altında hidrolik sistemle silt zeminde açılmış demiryolu tüneli mevcuttur.

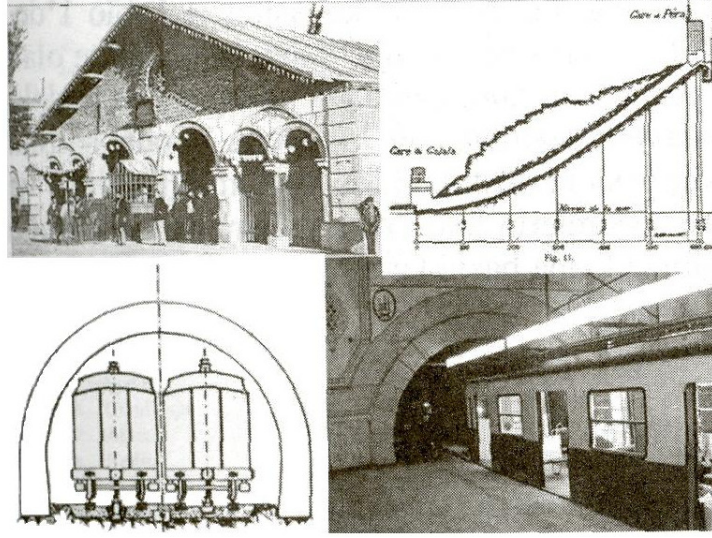
Yakın tarihlerde, dünyada zor zemin koşullarında pek çok tünel açılmıştır. 1988 yılında Japonya’da hizmete açılan iki adayı birleştiren Seikan Tüneli 53,85 km uzunluğunda olup bunun 23.3 km si okyanusun altındadır. 1994 yılında hizmete açılan Channel Tunnel İngiltere – Fransa arasındaki bağlantıyı sağlamaktadır. Seikan Tüneli’nden sonra dünyada deniz altındaki en uzun tünel yapısı olan Channel Tunnel 50.5 km uzunluğundadır. Volkanik kaya içerisinde açılan Seikan Tüneli’nin aksine Channel Tunnel marn zeminde açılmıştır.

2007 yılında İsviçre’de 34.5 km uzunluğundaki Lötschberg tüneli, İspanya’da ise 28.4 km uzunluğundaki Guadarrama tüneli hizmete açılmıştır.

Ülkemizde, M.Ö. 300 yıllarında Silifke’nin kuzeydoğusunda inşa edilen Aksıfat galerisi su getirmek amacıyla yapılmıştır. 45 km uzunluğundaki bu galerinin 11 km’si tünel şeklindedir ve günümüzde de aynı amaç için kullanılmaktadır. Aynı bölgede 25 km uzunluğundaki Kızıl geçit galerisinden de yararlanılarak köylere su götürülmektedir.

Oymapınar baraj gölü altında, kaynak sularını Side’ye taşıyan tünel kalıntılarına rastlanmıştır.

Roma devrinde, İstanbul’da tarihi yarımada altında kaçış amaçlı sayısız tünel inşa edilmiştir. Osmanlı döneminde, 2. Abdülhamit devrinde Galata ve Beyoğlu arasındaki ilk demiryolu tüneli 1874 tarihinde Fransız Mühendis Eugene Henri Gavand tarafından inşa edilmiştir. Fakat Şeyhülislam tarafından çıkarılan “toprak altından insan taşınmaz” fetvası ile işlevini ilk başlarda yerine getirememiş sadece hayvan ve yük taşımacılığında kullanılmıştır, daha sonra bu fetva kaldırılmış ve tünel insan taşımacılığı için kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 4.2: Sol üstte 1902 de Tünel (Beyoğlu) giriş kapısı. Sağ üstte boy ve sol altta en kesiti (Gavand, 1876), sağ altta Karaköy Tüneli işletme aşaması [40]

Osmanlı döneminde, demiryolu yapımı ile birlikte (1871’de İstanbul – İzmit, 1903 ‘te Konya – Bağdat) çok sayıda tünel açılmıştır. Daha sonra, hidroelektrik santral inşaatları, karayolu inşaatları, savunma sanayi depo yapıları ile tünel sayısı gün geçtikçe artmıştır.

Yapımı 14 yıl süren 25.5 km uzunluğundaki Bolu Dağı geçişinin 2.9 km uzunluğundaki Bolu Dağı Tüneli 2007 yılında hizmete açılmıştır.

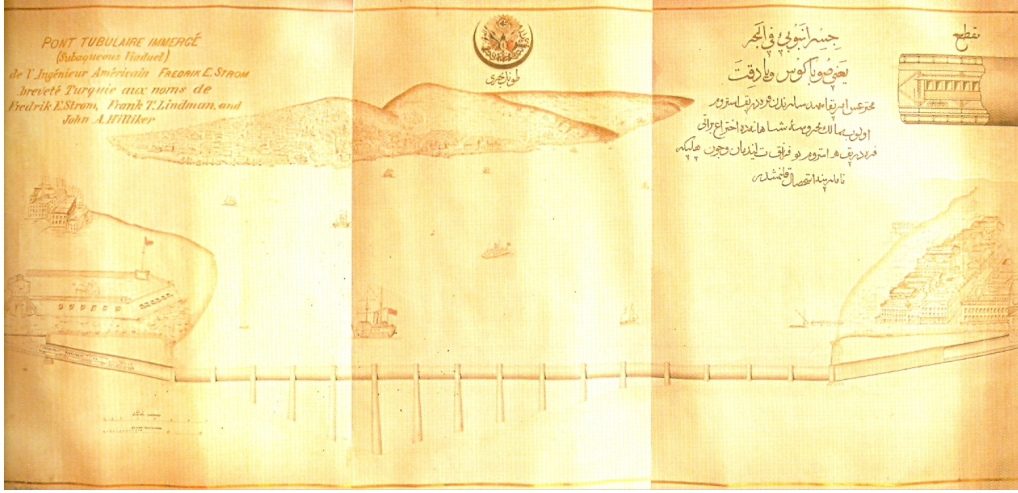
Karadeniz Sahilyolu projesi kapsamında 3.778 km uzunluğu ile Türkiye’nin en uzun karayolu tüneli olarak inşa edilen Nefise Akçelik tüneli 2006 yılının sonunda hizmete açılmıştır.

İstanbul’da hat uzunluğu 20 km’leri bulan uygulama veya proje aşamasında olan bir çok metro tüneli yer almaktadır.

- TCDD Banlıyö Trenleri
suburban trains by Turkish State Railways
- Metro
underground trains
- Hafif Metro
light rail
- Çağdaş Tramvay
modern tramway
- Nostaljik Tramvay / Moda Tramvay
historic tramway / tramway loop
- Tünel / Füniküler Kabataş – Taksim
funiculars
- Teleferik
aerial tramway



İstanbul Boğazının altından geçecek bir demiryolu tüneli ile ilgili düşünce, ilk olarak 1860 yılında ortaya atılmıştır. Fakat İstanbul Boğazının altından geçirilmesi planlanan tünelin Boğazın en derin bölümlerinden geçeceği yerlerde, modası geçmiş ve eski teknikler kullanılarak, tünelin deniz dibinin üzerinde veya altında inşa edilmesi mümkün olmayacaktı ve bu nedenle bu tünel, tasarım kapsamında deniz dibi üzerine inşa edilen sütunlar üzerine yerleştirilen “yüzer” tip bir tünel olarak planlanmıştır.



Şekil 4.4: Boğaz Geçiş Projesi [25]

Bu tür fikirler ve düşünceler, izleyen yirmi-otuz yıllık dönem içerisinde daha ileri düzeyde değerlendirildi ve 1902 yılında benzer bir tasarım geliştirildi; bu tasarımda da İstanbul Boğazının altından geçen bir demiryolu tüneli öngörülmüştür; fakat bu tasarımda, deniz dibi üzerine yerleştirilen bir tünelden bahsedilmiştir. O zamandan bu yana, çok farklı fikir ve düşünceler denenmiş ve yeni teknolojiler, tasarıma daha çok özgürlük kazandırmıştır.

Marmaray Projesi çerçevesinde, İstanbul Boğazının geçilmesinde kullanılacak olan teknik – batırma tüp tünel tekniği – 19. yüzyılın sonlarından itibaren geliştirilmiştir. İnşa edilen ilk batırma tüp tünel, 1894 yılında kanalizasyon amaçları için Kuzey Amerika’da inşa edilmiştir. Trafik amaçları için bu teknik kullanılarak yapılan ilk tüneller de Birleşik Devletlerde inşa edilmiştir. Bunlardan ilki, 1906–1910 yıllarında inşa edilen Michigan Merkezi Demiryolları tünelidir. Avrupa’da, bu tekniği ilk uygulayan ülke Hollanda olmuştur; ve Rotterdam’da inşa edilen Maas Tüneli 1942 yılında hizmete açılmıştır. Asya’da bu tekniği ilk uygulayan ülke Japonya olmuştur ve Osaka’da inşa edilen iki tüplü karayolu tüneli (Aji Nehri Tüneli) 1944 yılında

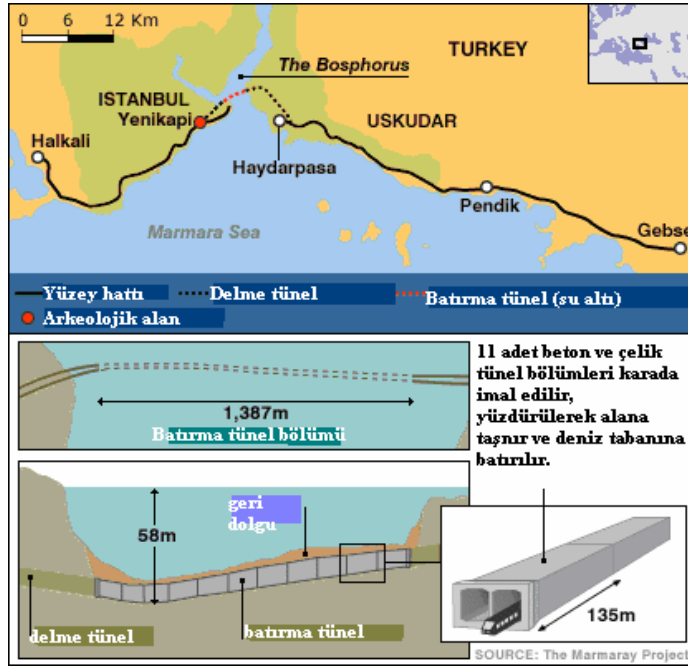
hizmete açılmıştır. Buna karşılık bu tünellerin sayısı, 1950li yıllarda sağlam ve etkisi kanıtlanmış bir endüstriyel teknik geliştirilene kadar sınırlı düzeyde kalmıştır; bu tekniğin geliştirilmesinden sonra ise birçok ülkede geniş ölçekli projelerin yapımına başlanabilmektedir.

İstanbul’da doğu ile batı arasında uzanan ve İstanbul Boğazının altından geçen bir demiryolu toplu ulaşım bağlantısının inşa edilmesine yönelik istek, 1980li yılların başlarında giderek tırmanmaya başlamış ve bunun sonucunda 1987 yılında ilk geniş kapsamlı fizibilite etüdü gerçekleştirilmiş ve raporlanmıştır. Bu çalışma sonucunda, bu tür bir bağlantının uygulanabilir ve maliyet açısından etkili olduğu belirlenmiş ve Şekil 4.5’ te görülen güzergah, bir dizi güzergâh arasından en iyisi olarak seçilmiştir.

Batırma tüp tünelin maksimum derinliği 56 m olmakla birlikte genel özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Proje Genel Özellikleri

Bölüm	Uzunluk (km)
Toplam uzunluk	76.3
Avrupa yakası	19.3
Asya yakası	43.4
Batırma tüp tünel	1.4
Delme tünel	9.8
Aç – kapa ve açık kazı	2.4

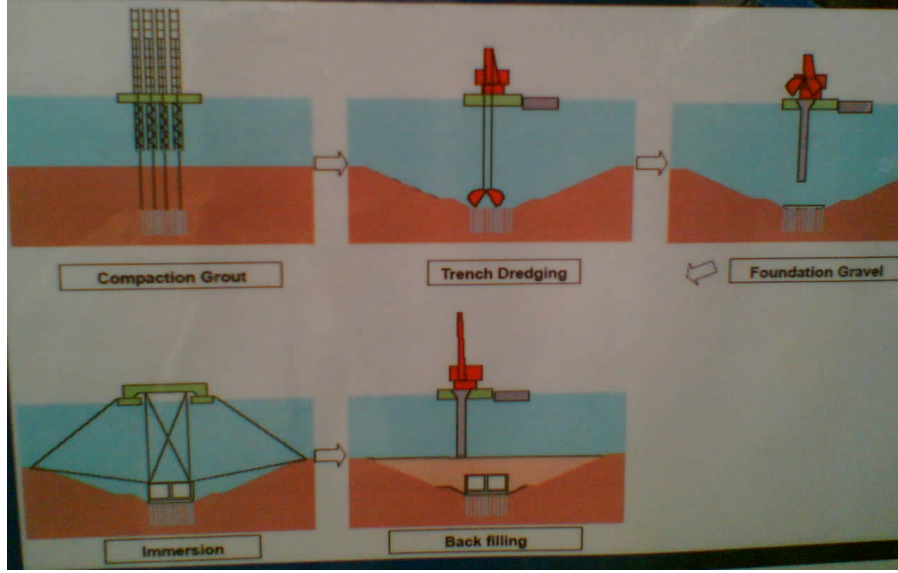


Şekil 4.5: Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi güzergah ve kesiti [48]

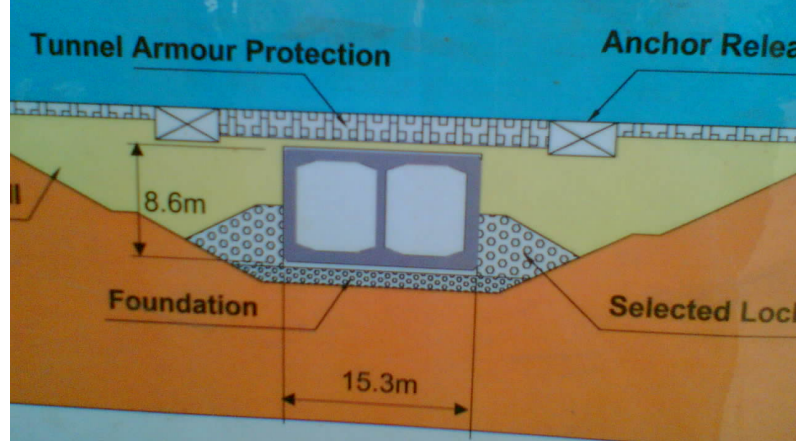


Şekil 4.6: Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi bitiş durumu simülasyonu [48]

Marmaray Boğaz Tüp Geçiş projesinin en önemli adımı denizde yapılan batırma tüp tünel inşaatıdır. Batırma tünel için ilk önce güzergâh üzerinde zemin iyileştirmesi yapılır. Tüp tünelin ineceği kota kadar zemin sıyrılır. Tüp tünelin oturduğu tünel için temel tabakası oluşturulur. Bu aşamadan sonra havuzlarda inşa edilen tüp tünel hazırlanan temel tabakasının üzerine oturtulur. Batırılan tüpün üzeri dolgu tabakasıyla tamamen doldurulur. Dolgu üzerinde ise bölgeyi korumak amacıyla bir zırh tabakası oluşturulur. İnşaat aşamaları Şekil 4.7’de özetlenmektedir. Nihai yerleşim şekli ise Şekil 4.8’de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.7: Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi inşaat aşamaları



Şekil 4.8: Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi batırma tüp nihai durum gösterimi

Şekil 4.9'daki gibi tüp tüneller, boş havuz içinde betonarme ve çelik birlikte kullanılarak imal edilir. İnşa aşaması bitince Şekil 4.11'de görülen havuzun kapağı açılır ve içerisi su ile dolar. Tüp tüneller, deniz motorları ile çekilerek yerleştirileceği bölgeye götürülürler.

Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi kapsamında su altındaki bölüm dışında kalan kara tünelleri TBM makinesi kullanılarak açılmaktadır.



Şekil 4.9: Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi batırma tüpün havuzlarda imalatı



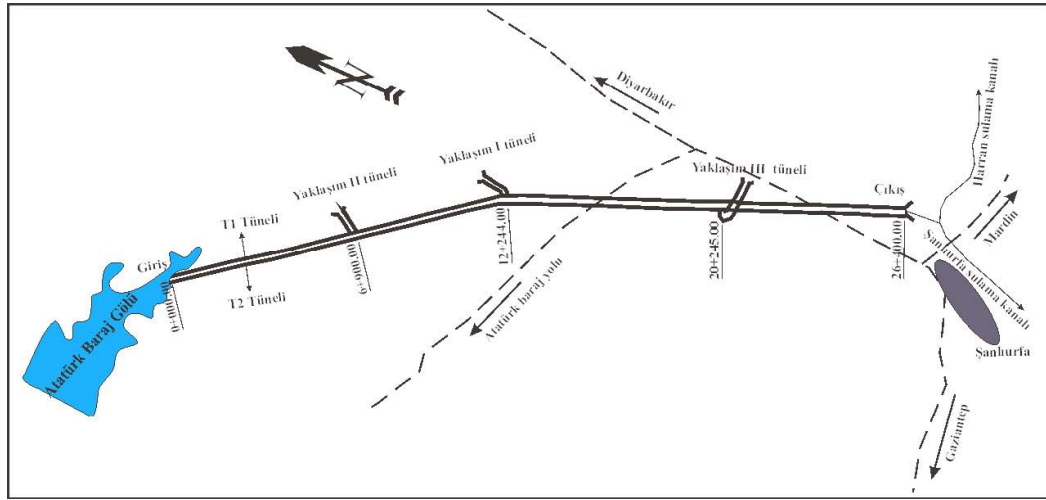
Şekil 4.10: Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi batırma tüpün havuzlarda imalatı

Tünel uçları, iinin su dolmaması için Şekil 4.10'da görülen kapaklarla kapatılır. Tüpler birbirine monte edildikten sonra iki tp arasındaki bölgede yer alan su boşaltılır ve kapaklar açılarak tünelin sürekliliği sağlanır.



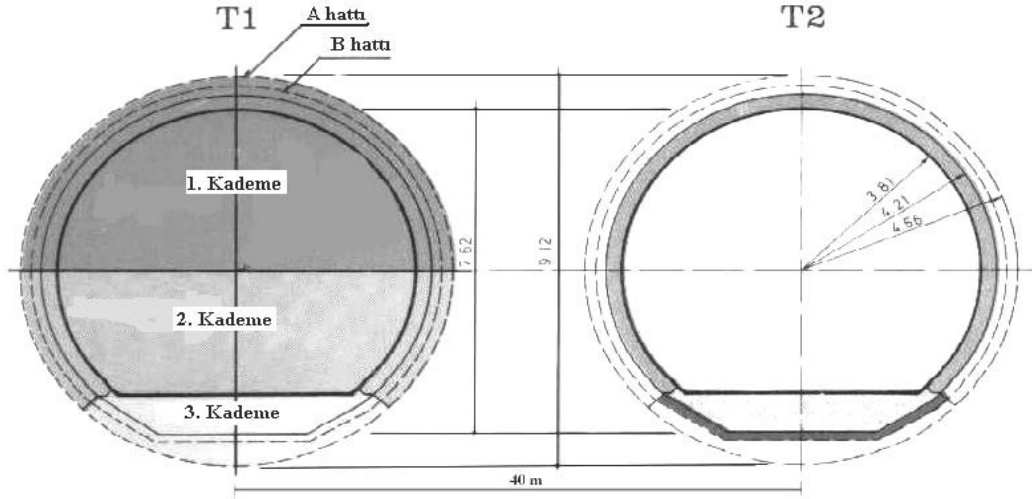
Şekil 4.11: Marmaray Boğaz Tüp Geçiş Projesi batırma tüpün havuz çıkışı

1977 yılında açılmaya başlanan Şanlıurfa Tünelleri, Güneydoğu Anadolu Projesinin kilit yapılarından biridir.



Şekil 4.12: Şanlıurfa Tünelleri Genel Vaziyet Planı [38]

Tüneller sistemi, Şekil 4.13'teki gibi her biri 7.62 m çapında ve 26.4 km uzunluğunda iki adet dairesel kesitli, beton kaplamalı tünelden oluşmaktadır.



Şekil 4.13: Şanlıurfa Tünelleri Kesiti – Kazı Aşamaları [38]

Şekil 4.12'deki vaziyet planından görüleceği üzere; tünellerin toplam uzunluğu, ulaşım ve bağlantı tünelleri dâhil 57.8 km'dir. Atatürk Barajı gölünden tüneller vasıtasıyla alınan 328 m³/s miktarındaki suyu Harran ve Mardin ovalarına iletilecek şekilde tasarlanmıştır. 1995 yılından itibaren Haran Ovasında sulama başlamıştır.

Türkiye'de yürütülen bir başka proje de; Konya Ovası Sulama Projesi kapsamında 2007 yılında temeli atılan Mavi Tüneldir. Bu tünel, 4 m iç çapında ve 17 km uzunluğundadır. Türkiye'nin, Şanlıurfa tünellerinden sonraki en büyük tüneldir.

4.2 Tünel Açılmasını Etkileyen Faktörler

- Tünel güzergâhının jeolojik ve hidrojeolojik durumu
- Tünel desteklemesi ve destek türü
- Tünelin yüzeyden derinliği
- Tünelin çapı ve şekli
- Tünelin uzunluğu
- İşçilik
- Çalışılan günler
- Makine arızaları

Yukarıda sıralanan ilk iki madde tamamen jeolojik verilere dayanır. Bu verilerin doğru olarak araştırılması ve saptanması çok önemlidir. İşin uzaması, proje ve

güzergâh değiştirilmesi, jeolojik çalışmaların yeteri kadar yapılmamış olmasından kaynaklanır. Bu nedenle proje mühendisi tarafından tünel projesi ve maliyet analizleri yapılırken bir takım verilerin sayısal değerlerle ifade edilmesi istenir.

Bunlar;

- Tünel güzergâhının yakın çevresindeki kayaçların türü
- Bu kayaçların yapısal özellikleri
- Yeraltı ve yerüstü su durumu
- Tünel açılması sırasında karşılaşılabilecek doğal olaylar
- Doğal gerilmelerin jeolojik olaylara bağlı olarak değişmesidir.

Bu sayısal değerler, tünel destekleme projelerinde;

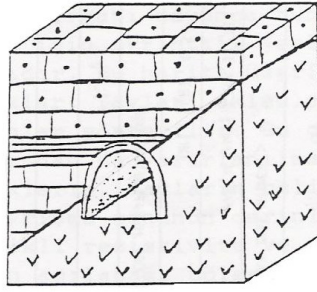
- Tünel seviyesinin ve istikametinin belirlenmesi
- Giriş ve şaftlar için uygun yerlerin seçilmesi
- Tünel kaplamasının dizaynı
- Basıncılı hava, zemin sağlamlaştırma gibi özel tekniklere gereksinim olup olmadığının tespiti
- Kazı ve inşaat yöntemlerinin saptanması
- Önerilen kazı ve inşaat yöntemleri ile ilgili olarak, ilerleme hızının, aşırı sökülmenin, tünele gelebilecek su miktarının tahmin edilmesi

gibi verilerin saptanmasında etkili parametrelerdir.

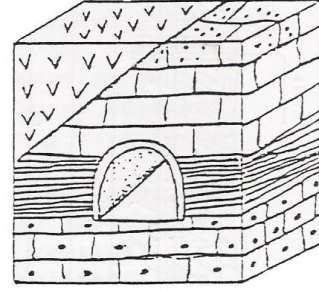
Jeolojik etkilere geçmeden önce bu parametrelerin belirlenmesindeki sosyal unsurlara da yer vermek gerekmektedir. Ulaşım amaçlı şehir içinde açılan tünellerde, tünel güzergâhı, insan trafiği yoğun olan bölgelerde, iki nokta arasında, ulaşım birleşim noktaları veya ulaşılmak istenen bölgelere en kısa sürede ve rahat ulaşılmasını sağlayacak istasyonlar yapılacak şekilde seçilmelidir. Bu yüzden, yolcu trafiğinin fizibilitesi büyük önem arz etmektedir. Hedeflenen bölgeye en kısa sürede ulaşmak, sosyal hayatın döngüsü ile zaman, üretim.. vs her yönden ekonomiklik sağlamaktadır. Şehir içi ulaşım için proje yapılırken ilk önce bu hususlar dikkate alınmalıdır.

Giriş ve şaftlar için uygun yerler seçilirken kazı sisteminin belirlenmesi önemlidir. Mobilizasyon, tünel inşaat süresinin en büyük etkenlerindendir. Eğer yeteri kadar şaft yeri seçilemiyor veya çok derin bir tünel hattı projelendiriliyorsa burada NATM ve TBM arasında seçim yapılmalıdır. Toplam inşaat süresi, jeolojik koşulların buna etkisi, kazı şekli, destekleme süresi, mobilizasyon ve maliyeti göz önünde bulundurulmalıdır.

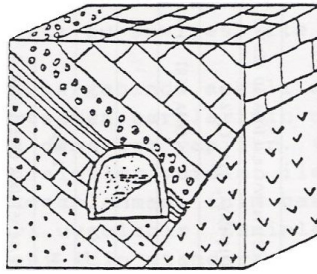
Tünel tasarımcısı ve yapımcısı için tünel kazısının yapılacağı kaya veya zemin bir yapı malzemesidir. Tünelin açılması ve kullanılması sürecinde zemin (kaya), inşaat sırasında kullanılan ahşap, beton ve çelik gibi diğer yapı malzemeleriyle bir arada çalışacaktır. Her bir tünelin tasarımı, inşaatı ve kullanılması süreçlerinde geniş kapsamlı bir araştırma ve izleme programı uygulanmalıdır. Diğer mühendislik yapılarında olduğu gibi tünel inşaatında karşılaşılabilecek problemler önceden bilindiğinde ve tünel tasarımında elverişsiz, problemli zemin koşulları ve potansiyel problemler dikkate alındığında, tünel inşaatı sırasında oluşabilecek gecikmeler ve tünelin yeniden projelendirilmesi gibi sorunlar ortadan kalkacaktır. Tünel destekleme projeleri oluşturulurken, Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 de gösterilen değişik koşullarda zemin davranış biçimleri göz önünde bulundurulmalıdır. Bu davranış biçimleri, yukarıda sıralanan verilerin ve parametrelerin değerlendirilmesi sonucunda tünelin hangi yapıda nasıl inşa edileceğini göstermektedir. İnşaat teknikleri oluşturulurken bu değerlendirmeler esas alınır.



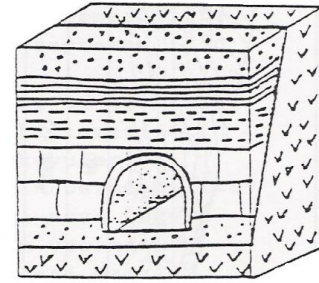
a) Uygun değil



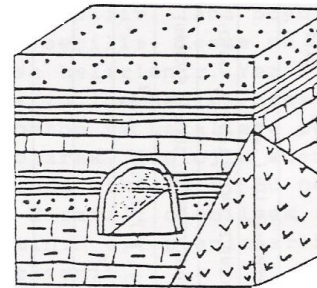
b) Uygun



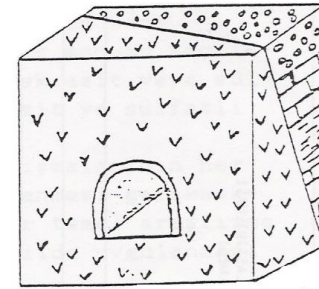
c) Uygun



d) Uygun değil



e) Uygun



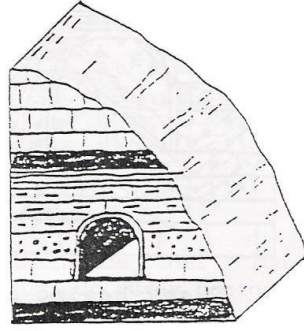
f) Uygun değil

Şekil 4.14: Fay Düzlemini Kesen Tünelin Değişik Pozisyonları [13]

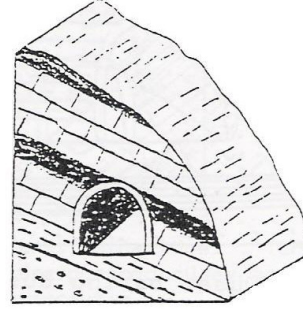
Fay düzlemlerinin, tünel güzergâhından mümkün olduğunca uzak olması, tünel çevresindeki zeminin kemerlenmesi açısından tercih sebebidir. Fay düzlemini kesen tünelde, kazı ve destekleme sırasında ezik zonla karşılaşılacağından destekleme sisteminin süre kaybetmeden oluşturulması gerekmektedir.

Tünel ilerleme mesafesi kısa tutulmalı, tünel cidarı da mümkün olduğunca çabuk oluşturulmalıdır. Bütün bu etkenler, tünel inşa süresi ve ekonomik açıdan projeyi geciktirebilecek sonuçlar doğurmaktadır. Şekil 4.14, fay düzlemi ile tünel ilişkisinin nasıl nitelendiği ve bu sonuca göre nasıl hareket etmemiz gerektiği konusunda bize

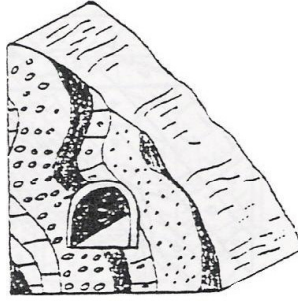
fikir vermektedir. Zira şehir içinde açılan ulaşım tünellerinin, özellikle İstanbul gibi periyodik olarak deprem geçirmiş eski yerleşim bölgelerinde aktif /ölü fay düzlemini kesmemesi çok düşük bir ihtimaldir. Bu yüzden fay düzlemi tünel projelendirmesi açısından yapılacak destekleme sistemlerine etki etmektedir.



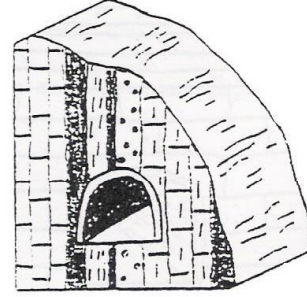
a) Duraylı



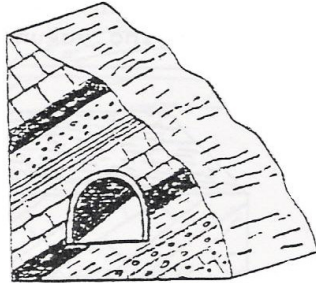
b) Duraysız



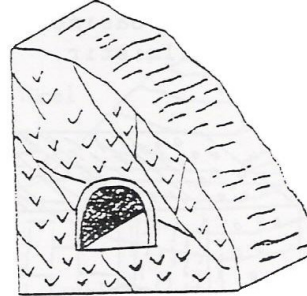
c) Duraysız



d) Duraylı

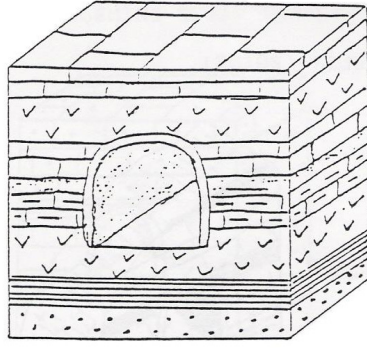


e) Duraylı

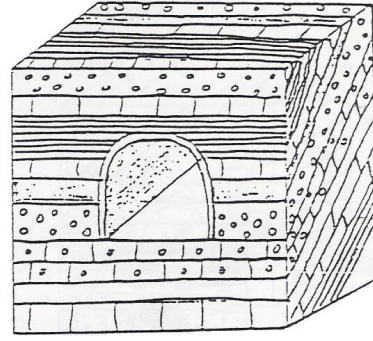


f) Kılcal çatlaklardan dolayı duraysız

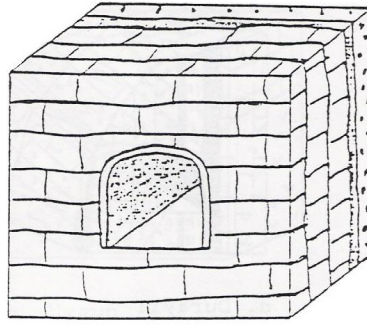
Şekil 4.15: Dik Yamaca Yakın Tüneller [13]



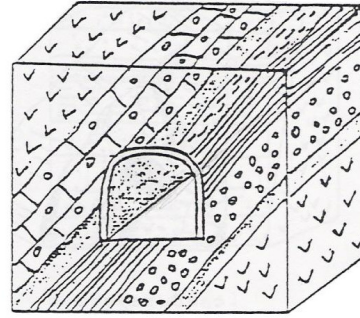
a) Düşey basınç düzgün dağılmıştır



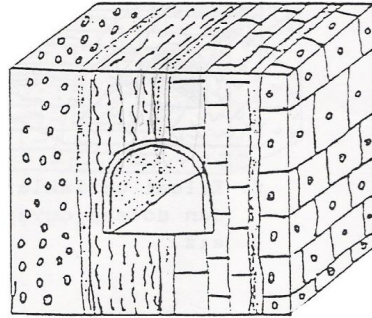
b) Düşey basınç düzgün dağılmıştır



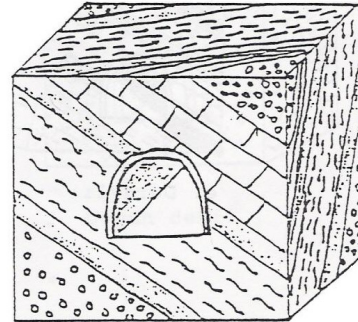
c) Düşey basınç düzgün dağılmıştır



d) Tünelin bir tarafında basınç yoğunlaşmıştır



e) Kemerin üst noktasında basınç büyüktür

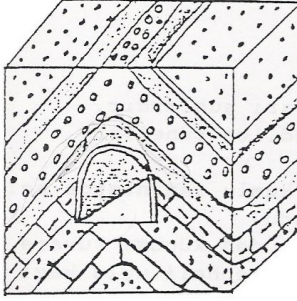


f) Tünelin bir tarafında basınç yoğunlaşmıştır

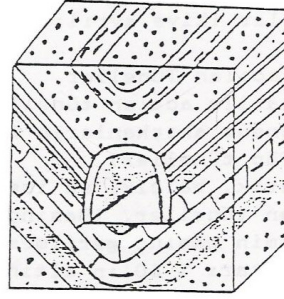
Şekil 4.16: Tünel Güzergahında Tabakalanmanın Etkisi [13]

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 da tünel cidarına gelen basınçların zemin katmanlarına göre dağılımı ve zemin duraylılığı gösterilmektedir. Dik yamaca yakın bölge zeminlerinde tabakalanma farklılık gösterdiğinden bu tabakalanmanın tünel cidarını nasıl kestiği de önemlidir. Nitekim tabakalanmanın tünel üzerine getirdiği basınç yükü Şekil 4.16 da özetlenmeye çalışılmıştır. Basınç farklılıkları, tünel ilerleme mesafesini düşürmekte, destekleme sisteminde artış gerektirmekte ve kemerlenmenin fazla

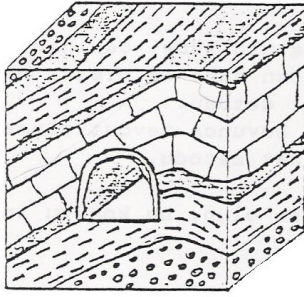
sürmeyeceğini işaret etmekle birlikte, NATM gibi tünelin kendi kendini taşıyabilme süresini (kemerlenme süresi) öngören bir sistemde önem arz etmektedir. Tünel inşaatı sırasında ayna stabilitesinde bu tür problemler zemin iyileştirmesinin yapılmasını sorunlu kılmaktadır.



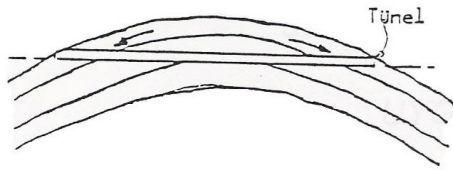
a. Antiklinalde Tünel: Tünel güzergahında düşey basınç hafifleyecektir



b. Senklinalde Tünel: Tünel güzergahında düşey basınç artacaktır.

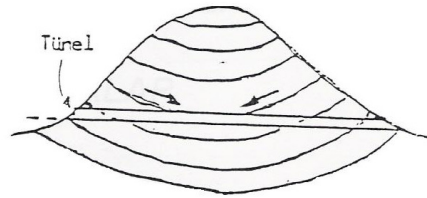


c. Antiklinal ve senklinalden geçen tünel



a.1. Tünel üzerindeki yanal basınç portallerde daha büyüktür.

a.2. Eğer tünel, su taşıyan tabakalar içerisinde yerleştirilmişse su tünel güzergahından dışarı doğru akma eğilimindedir.



b.1. Yanal basınç ortada daha büyüktür.

b.2. Eğer tünel, su taşıyan tabakalar içerisinde yerleştirilmişse, su tünele akma eğilimindedir.

Şekil 4.17: Tünel Güzergâhında Tabakalanmanın Etkisi [13]

Sayılan etkenler düşünüldüğünde zeminin tanımlanmasının tünel projelendirilmesi üzerindeki önemi ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de ifade edilmeye çalışılan durumlar önceden bilinirse, mobilizasyon önceden

sağlanabilmektedir. Böylece, karşılaşılan olumsuz koşullara çok kısa bir sürede müdahale edilerek tünel güvenli bir şekilde açılmaktadır.

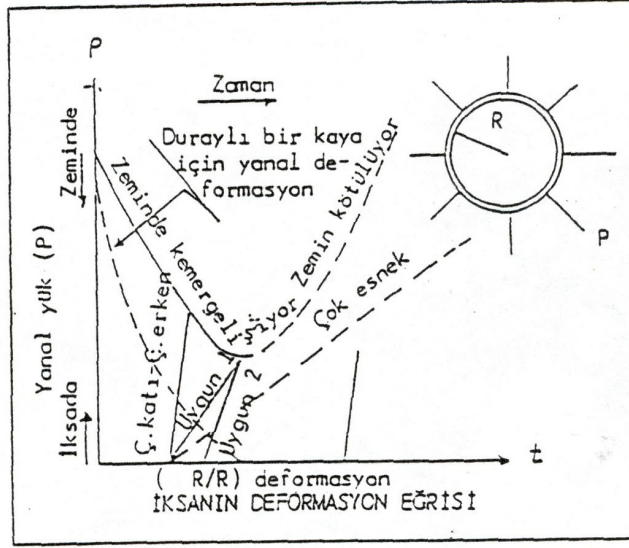
4.3 Tünel Açma Yöntemleri

Jeolojik veriler, mobilizasyon süresi, iş hızları, ihtiyaç duyulan şaft vb alanların temin edilebilirliği, toplam iş süresi ve maliyet gibi unsurlar karşılaştırılarak tünel açma yöntemi belirlenir. İnşaat metodu, makineli (TBM) ve elle açılan tüneller olmak üzere iki gruba ayrılır. Başlıcaları aşağıda sıralandığı gibidir;

- Sonsuz akışkanların içinde açılan tüneller (tüp tüneller),
- Su içeriği yüksek kumlu, killi zeminlerde açılan tüneller (basıncılı hava metodu),
- Zemin (kaya) tek eksenli basınç gerilmesi $\sigma_c < 90 \text{ MN/m}^2$ den küçük, kuvars miktarı %60'ın altında ise, kısmi cepheli uçlu kazı makinası ile sheeldli (kalkanlı), segment kaplamalı tünel açma methodu,
- $90 \text{ MN/m}^2 < \sigma_c < 200 \text{ MN/m}^2$ arasında veya $\sigma_c < 200 \text{ MN/m}^2$ ve kuvars miktarı % 60 'ın altında ise, tam kesit (full face) tünel açma methodu,
- $\sigma_c > 200 \text{ MN/m}^2$ ise klasik method denilen, delme patlatma sistemi ile tünel açma metodu,
- Tünelin üzerindeki zemin kalınlığının tünel çapının veya tünel yüksekliğinin üç katından daha az olması halinde (cut and cover) aç – kapa methodu,
- Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM).

4.3.1 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)

Tünel açmada, deneysel tecrübeler sonucu ortaya çıkmış olan bu metodun amacı, zemini kendisine taşıttırarak, tünel çevresindeki zeminde kendini destekleyen genişçe bir halka oluşturmaktır.



Şekil 4.18: Tünelde yük – deformasyon eğrisi [13]

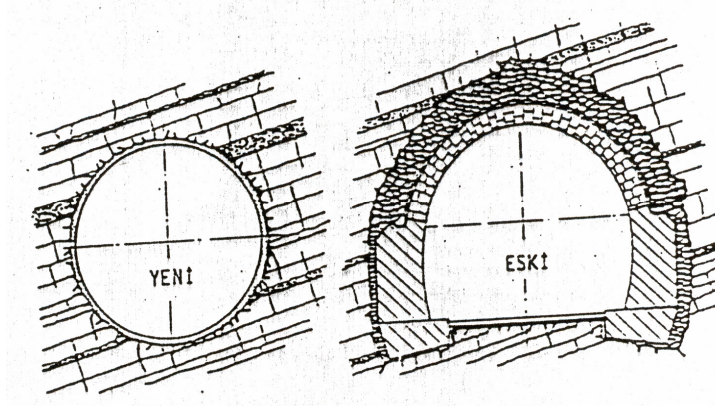
Taşıyıcı halka oluşturulurken deformasyona yol açmayacak şekilde oluşturulmalı deformasyonlar sürekli gözlenmelidir.

Tünel deformasyonunun tayini için yapılan yaklaşımlarda iki parametre vardır;

- Tünel yarıçapı ve kazı hacmi
- Kaya ortamının dayanım ve deformasyon özellikleri (içsel sürtünme açısı, kohezyon ve elastisite modülü)

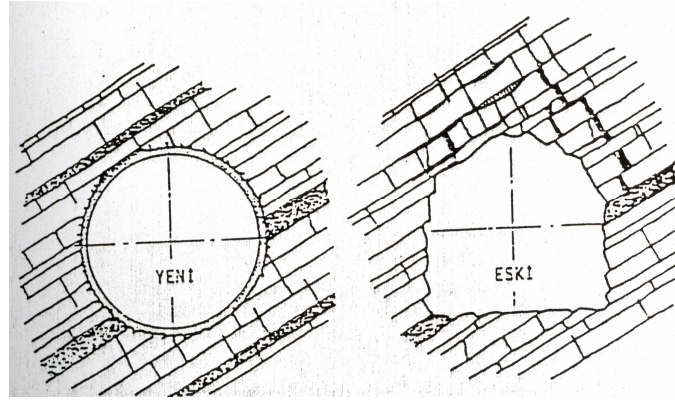
NATM metodunun temel ilkeleri aşağıda sıralandığı gibidir;

- Kaya Kütlelerinin Dayanımının Harekete Geçirilmesi: Tünele dayanak olan ana unsur, çevre kaya kütlelerinin dayanımıdır. Ana iksa mekanizması, kayanın kendi kendini taşımasını sağlayacak şekilde yönlendirilmektedir. Bunun sonucu olarak, Şekil 4.18’de gösterildiği gibi iksanın uygun yük – deformasyon özelliklerine sahip olması ve doğru zamanda yerine konması gerekmektedir. Bu arada, kayanın taşıma direncini azaltan gevşemelerin önüne geçilmelidir.



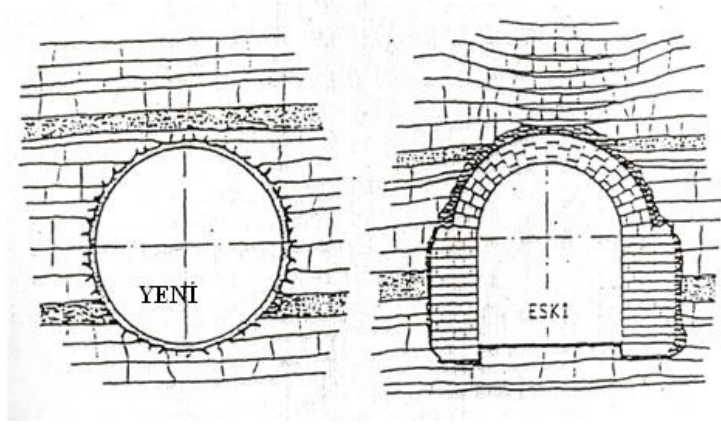
Şekil 4.19: Tüneli çevreleyen ana kayanın durumu [13]

Teknolojinin ilerlemesiyle daha çabuk imalatlar yapılması ve tünel etrafında oluşturulan destekleme tabakasının kalınlığı azalmıştır. Eski teknoloji ile metro anahat tüneli için yapılan kazı miktarı ile destekleme sistemin oluşturulması zaman, ekonomi ve kullanılabilirlik açısından zorluklar taşımaktaydı. Bu durum, çevreye en az zararlı, en ekonomik sonucu doğuracak sistemlerin gelişmesiyle ortadan kaldırılmış oldu. Şekil 4.19 bu sonucu özetlemektedir. Teknolojinin ilerlemesiyle, tünel etrafındaki tabakadaki gerilme değişimleri de en düşük değerlerde tutulmaya başlandı.



Şekil 4.20: Kayanın başlangıçtaki sağlamlığının korunması [13]

Tünel inşaatı sırasında, dışarıdaki zemin karakteristiklerini ve hareketini değiştirmeden imalat yapmak, inşaatı bittiğinde zeminin bir parçasıymış gibi davranacak yapımızın stabilitesi için önemlidir. Kayanın (zeminin) başlangıç koşullarını koruması, inşaat sırasında ve sonrasında yapı stabilitesi ve çevre güvenliği için gereklidir. Yeni yöntemlerle Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de gösterildiği gibi bu tür durumların önüne geçilmiştir.

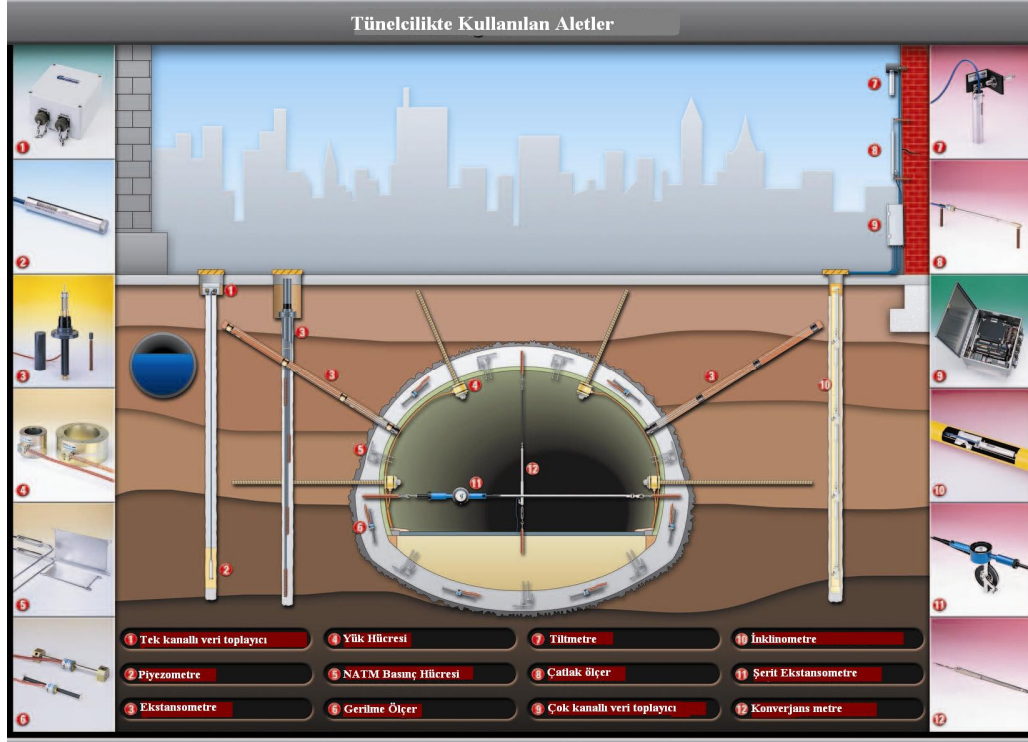


Şekil 4.21: Tünel açılması ile kayada oluşan gevşeme durumu [13]

- Püskürtme Beton Koruması: Kaya kütlesinin yük taşıma kapasitesinin korunabilmesi için, gevşemenin ve aşırı kaya deformasyonlarının minimuma indirilmesi gerekmektedir. Bu, kaya yüzeyi açığa çıkar çıkmaz ince bir püskürtme beton tabakası uygulanması, bazen de uygun bir bulonlama sistemi de kullanılması suretiyle gerçekleştirilir.

- Ölçüm: NATM, kazıdaki deformasyonların ve tahkimat sisteminde oluşan gerilmelerin ölçülmesi için, ilk püskürtme beton tabakası uygulandığı sırada gelişmiş ölçme aygıtlarının monte edilmesini gerektirmektedir. Böylece, tüknelin stabilitesi hakkında bilgi sağlanmış ve kaya tabakasının yükünü taşıyacak çember iksanın en uygun şekilde oluşturulması mümkün olur.

Deformasyon ölçümleri tüknel inşaatının en önemli unsurudur. Özellikle şehir içi tüknel çalışmalarında, çevre ve yeraltında açılan boşluğun güvenliği açısından sürekli kontrol edilmelidir. NATM'in ana unsuru olan deformasyon kontrolü tüknel içinde konverjans noktaları, yüzeyde ise yatay-düşey eğimölçerler, bina deformasyon okumaları, yüzey deformasyon okumaları, nivo okumaları gibi ölçümlerle sağlanır. İnşaat süresince ve nihai kaplama yapıldıktan sonra tekrar kontrol amaçlı deformasyon ölçümleri yapılmalıdır. Zira, meydana gelebilecek olumsuz koşullara müdahale edilebilmesi amacıyla ölçümlerin periyodik olarak yapılması gerekmektedir. Şekil 4.22'de tüknelcilikte kullanılan aletler gösterilmiştir.



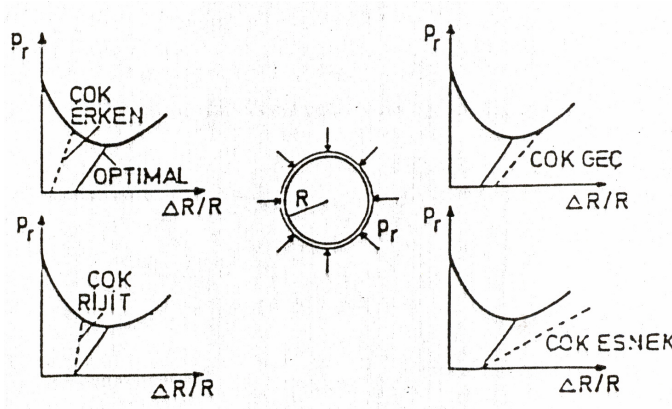
Şekil 4.22: Tünelcilikte kullanılan aletler [40]

- Esnek İksa: NATM, rijit yerine esnek iksa kullanılan çok yönlü pratik bir uygulama olarak tanımlanmaktadır. Böylelikle, pasif yerine aktif bir iksa savunulmakta ve dayanım, kalın bir beton kaplama ile değil, kaya bulonları, çelik hasır ve çelik iksaların değişken bir kombinasyonu sayesinde arttırılmaktadır. Ana iksa, kısmen veya tamamen gerekli olan tüm iksayı temsil eder ve ikincil (kalıcı) iksanın boyutlarının seçimi, yapılan ölçümlerin sonuçlarına dayanır.

- Radyenin ve Tünel Tabanının Kapanması: Tünel, kalın kenarlı bir nevi tüp olduğundan kaya kütlelerinin yükünü taşıyan bir çember oluşturacak şekilde mutlaka tünel tabanı (invert) kapanmalıdır. Bu özellikle yumuşak zeminde tünel kazılırken çok önemlidir ve radyenin ve tünel tabanının derhal kapanması ve kazılmış olan zemin yüzeyinin hiçbir yerinin geçici de olsa iksasız bırakılmaması gerekir. Ancak, kayada açılan tünellerde iksanın çok erken konması gerekir, ilk anda kaya kütlelerinin yük taşıma kapasitesi henüz tam olarak harekete geçirilmiş olmaz. Şekil 4.15 de iksanın konma zamanına göre gerilme durumlarının karşılaştırılması gösterilmektedir. İksa, optimum süreden erken konulduğu zaman, gereğinden fazla tahkimat yapılmış olur. İksa, optimum süreden geç konulduğunda ise istenmeyen deformasyonlar oluşmakta, iksa, zemin (kaya) hareketlerine karşı koyamaz hale

gelmektedir. Kaya tünellerinde, iksanın tam olarak etkinlik kazanmasından önce kayanın yeteri kadar şekil değiştirmesine müsaade edilmelidir.

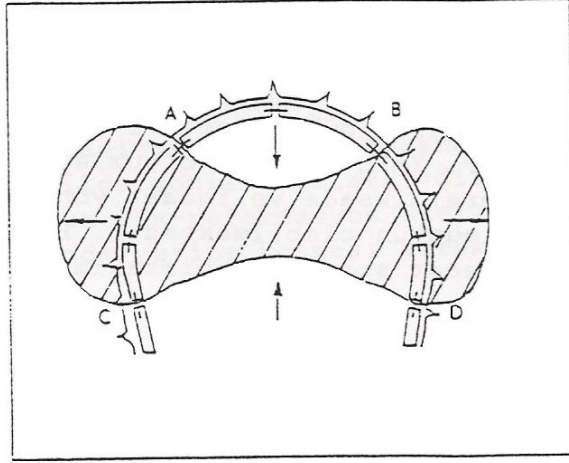
Şekil 4.23’de yukarıda saydığımız aşamaların grafik hali gösterilmektedir. Kısacası, eğer erken destekleme yapılırsa çok rijit ve ekonomik olmayan bir imalat, eğer, destekleme imalat süresi optimum zamanı aşarsa istenmeyen göçme durumlarıyla karşılaşılabilir. Ayrıca, erken konan rijit iksa, tünelin zeminin bir parçasıymış gibi davranmasını engellemektedir.



Şekil 4.23: Fenner-Pacher Konverjans Eğrilerine göre Zeminle İksanın Karşılıklı Etkileşimi [20]

4.4 Zeminlerde Tünel Açılması Esnasında Karşılaşılan Sorunlar

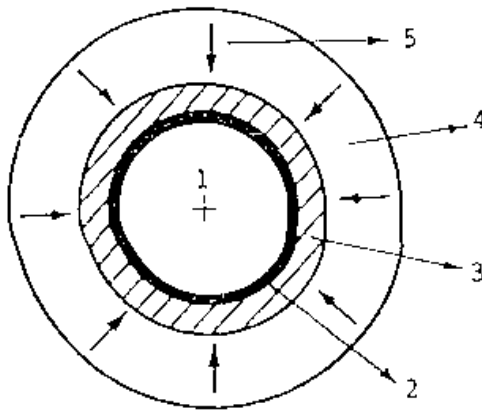
Kayaçların ayrışması, aşınması, taşınması ve uygun ortamlarda birikmesiyle meydana gelen zeminlerde tünel açılmasında karşılaşılan olaylar zemini oluşturan malzeme türü ile yakından ilgilidir. Tünel açma işlemi başlayınca genellikle tavan ve yan duvarlar kendini tutamaz, açılan tünel boşluğuna akarlar. Bu tür zeminler daha çok toprak, moloz, çakıl ve kumlardan oluşmuştur. Akıcı ve çok hızlı akıcı zeminler olarak isimlendirilirler. Su içeriği fazla olan killi ve siltli zeminlerde akma özelliği gösterir ve akma daha çok çamur akması şeklinde görülür. Eğer killi ve siltli zeminlerin su içeriği az ise bu halde akma görülmez fakat buna karşılık sıkışma, şişme, kabarma ve kıvrılma türü olaylar görülür. Olayın türüne göre de sıkışan, şişen zeminler adı verilir. Bu tür zeminler basınç altında kırılmazlar, plastik sınırda olduklarından kabarır, kıvrılırlar. Zeminlerde açılan tünellerin bozulmadan durma süreleri diğer bir deyişle kemerlenme süresi (desteksiz durma süreleri) yok denecek kadar azdır. Bazı sert killerde bu değer 1-2 gün kadardır.



Şekil 4.24: Yumuşak zeminde moment alanı [20]

Şekil 4.24’de gösterildiği gibi, yumuşak zeminlerde, tünelin üstü ve altı basınca, yanlar çekmeye çalışır. Bu durum tünel stabilitesini etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Destek sisteminin zamanında yapılması ile moment karşılanabilmektedir.

Zeminlerde tünel açılarken meydana gelen olaylarda en büyük rolü yeraltı suyu oynar. Bu nedenle tünel açılırken yeraltı su seviyesinin çeşitli yöntemlerle tünel seviyesi altına indirilmesi, çalışma ortamından uzaklaştırılması gerekir. Bu tür şişen, kabaran zeminlerde açılacak tünellerde gerilmelerin dağılımı göz önüne alındığında tünel kesitlerinin dairesel olması önerilir. Şekil 4.25’de şişen zeminlerde açılan tünellerde çeşitli kısımlar gösterilmektedir.



Şekil 4.25: Şişen zeminlerde tünel kesiti; 1- kazılan kısım, 2- destek, 3- şişen kısım

4- basınçlı bölge, 5- su akım yönü [40]

Akıcı ve çok hızlı akıcı zeminlerde tünel duvar ve tavanının desteklenmesi gerekir. Destekleme, kazı sırasında ahşap, çelik kiriş ya da çelik levhalarla yapılır ve kazı ile birlikte bunlar da ilerletilir. Su içeriği çok düşük kil ve çimentolu kumtaşlarının yeteri kadar kesme ve basınç dirençlerine sahip olmaları, hemen desteklenmelerini gerektirmez. Bununla beraber emniyet açısından destekleme yapılabilir.

Zeminin destekleme ile yükü taşıyamayacağı durumlarda ortamın şartlarının iyileştirilmesi yoluna başvurulur. Bu aşamada birçok yöntem kullanılır. Bunlar, ortamın ne kadar stabil olduğu ile ilgilidir.

4.4.1 Zemin Basınçları: Sebep ve Oluşumları

Yeryüzünde veya yüzeyin altında bulunan bir tabaka, bu tabakanın ağırlığı ve bu tabakanın üstünde bulunan yüzeye kadar olan tüm tabakaların toplamı olan bir etkinin altındadır. Tabakanın zemin içinde bulunuşu nedeni ile tabaka kütlesi hareket edemez. Tabaka üç eksenli gerilme etkisi altındadır. Yeraltında açılan veya yaratılan bir boşluk, bu gerilme dengesini bozar ve tek eksenli gerilme haline sebep olur. Kayanın ezilme mukavemetinin üstüne çıkmış olan bu gerilmeler nedeni ile, zemin deformasyon imkanı bulursa derhal tünelin veya yaratılan boşluğun içine doğru akmaya başlar. İşte boşluğun tavanında veya duvarlarında oluşan bu hareketleri önlemek veya belirli seviyelerde tutmak için destek yapıları kullanılır. İksaların üzerine etki eden kuvvetlere “zemin basınçları” denir. Yani zemin basınçları, bir kazıda kohezyonsuz veya plastik kütlelerin zeminin kendisine karşı konulmuş olan iksa ya da kaplama üzerinde açığa vurabildiği basınçlardır. Buna göre zemin basıncı, zemini oluşturan kayaların karakteristiklerinden değildir. Gerçekten zeminin hareketine karşı koyan iksa, direnmenin fonksiyonu olarak kendini belli eder. Eğer bir zeminin, tünel içine doğru hareketine karşı konulmazsa, orada zemin hareketi olabilir, deformasyonlar gelişebilir. Fakat artık zemin basıncından bahsedilemez. (Terzaghi’ye göre tünel tavanındaki belirli yükseklikteki kaya kütlesi tünele doğru düşmek ister. Bu kütlenin ağırlığı ise kaya basıncıdır.)

Zemin basınçları üç kategoriye ayrılır;

- Mukavemet tepkileri
- Yüzey mukavemeti
- İtkiler

Mukavemet Tepkileri: Büyük yüklerin üzerine dayanması istendiği zaman kayanın karşı koyabilmesi durumundaki reaksiyonlardır. Bir iksa veya kaplama zemininden ileri gelen destek tepkileri üzerinde taşıyabilir. Bu durum kaplamaya içeriden yük tatbik edildiği veya ilkel gerilmeli olduğu yahut iksa veya kaplamayı önemli bir kaya kütlesi hareketinin, blokaja kadar sıkıştırılması zamanki halidir. Belli bir reaksiyon şiddetine kadar, kaplamanın kâfi derecede sağlam olduğu düşünülürse, bunun ötesinde kaya kendini bırakır. Orada örselenme meydana gelir. Örselenme esnasındaki deformasyon katsayısı, kırılma altındaki deformasyon katsayısıdır. Sonuç olarak, bir tünelin cidarları için, taşıma kapasitesi limiti ve zemin basıncı limiti vardır. Asal eğri bu limiti mükemmel tayin etme imkânını verir.

Yüzey Mukavemeti: Zeminde birinci genleşme periyodundan sonra, az çok ortaya çıkmış olan her deformasyonun sonsuz olarak durmasını sağlayan basınçlardır. İksa yahut kaplama tarafından kayaya tatbik edilen bu basınçlar, ani veya gecikmiş bir stabilizasyon sağlayabilirler. Basınç, kazıdan kısa bir müddet sonra tatbik edildiği ve bütün kırılmayı önlemek için kafi derecede büyük olduğu zaman stabilizasyon ani (yahut tam)dır. Gecikmiş stabilizasyon yer altı yapısının çevresinde az veya çok derin halka şeklinde bir bölgeyi gevşemeye bırakır. Taşıyıcı halkanın yarıçapı bu denge haline erişinceye kadar büyür.

İtkiler: Hareket halindeki zemin tarafından çerçeveler üzerine etki ettirilen ve çerçeveler tarafından emniyete alınmış olan deplasmanların karşı tarafına bağlı kuvvetler olup iki çeşittir;

Aktif İtkiler (Şişme İtkileri):

- Kimyasal İtkiler: Hidroliz suretiyle anhidritin jipse dönüşmesi gibi olayların sebep olduğu itkilidir.
- Fiziko-Kimyasal İtkiler: Hidratasyon yoluyla bazı killerin şişerek bünyesine su dolmasının sebep olduğu itkilidir.
- Fiziksel İtkiler: Parçalanmış bir zeminin yuvarlanması gibi olaylardır.

Aktif itkiler, pasif itkiler haline dönüşebilir. Örneğin, anhidrat, aktif itki verebilir, onun dönüşümünden meydana gelen jips, pasif itki verebilir. En şiddetli itkiler, killi zeminlerde meydana gelir. Sıkıştırılmış kilin gevşemesi, kaybolan basıncın tekrar meydana gelmesine yarayan bir su emme olayına müsaade eder. (Bazen 16 kg/cm^2 veya 160 ton/m^2 ye varan itkilere neden olabilir.)

Pasif İtkiler: Bu itkiler iksanın rijitliğine ve kayanın cinsine ve tünelin derinliğine bağlı olurlar. Kazılarla geçilen ortamları Rabcewicz üç sınıfa ayırmıştır;

i) Kompakt (Solid Rocks) : Cidarlardaki gevşeme önemsizdir. Çevredeki gerilmelerin dağılışı, elastisite teorisinde belirtilene yakındır. İksa, eğer parça düşmesini önlemek için kullanılıyorsa gereksizdir.

ii) Orta Sıkılık (Pseudo – Solid) : Galerilerin çevresinde kalınlığı metre mertebesinde kısmen gevşemiş, fakat kohezyonu kararsız bir stabilite sağlamaya kafi bir bölge gösterirler. İksanın yerini gevşemiş bölge ağırlığını taşıyacak basit bir destek alır. Bu halde, üzerinde taşıma itkileri, ancak çalışmalar dolayısı ile kısmen veya tamamen ayrılmış, ölü zemin halkası ağırlığının taşınması suretiyle meydana gelir. Bu itkiler, trompeter bölgesi denilen bölgenin yayılışı ile orantılıdır. Buna rağmen, gevşeme yüzölçümü eşit olan iki kayada, farklı yük taşıma itkileri verir. İtkiler zeminin içsel sürtünme katsayısı ile bağlantılıdır.

iii) Gevşek veya Plastik (Loose Rocks) : Gevşeme yarıçapı hızla büyür ve gevşeme stabilizasyonunu kısmen veya tamamen sağlayabilen iksanın bulunmayışı halinde tehlikeli bir şekilde ilerler. Bu iksa, gecikmeksizin yerine konulmalıdır. Kırılma ve bunu takip eden gevşemiş bölge kalınlığı artmaya bırakıldığı zaman, eğer taşınması pratik olarak imkânsız değilse, lüzumsuz bir külfet olan önemli pasif itkilerin ortaya çıktığı görülür. Kazılmış olan şeklin sağlam olarak muhafaza edilmesi gerektiği zaman stabilizasyon özellikle gereklidir.

4.4.2 Zayıf Kohezyonsuz Zeminler: Su ve Duraysızlık Problemleri

Birçok tünel operasyonlarında genel olan problemlerden biri, bekleme süresi çok kısa olan geçirimli kumlar ve çakıllar veya çok fazla çatlaklı kayalar gibi zayıf kohezyonsuz zeminlerde inşa yapmaktır. Bu tür zemin koşulları, klasik kaplanmış tünellerin tünel yüzeyinden uzak destek oluşturma problemlerinde veya klasik sürülmüş ve kemerlenmiş tünellerin her ikisinde birden yüzey duraysızlığından dolayı tünel işlem problemlerinde meydana gelebilir.

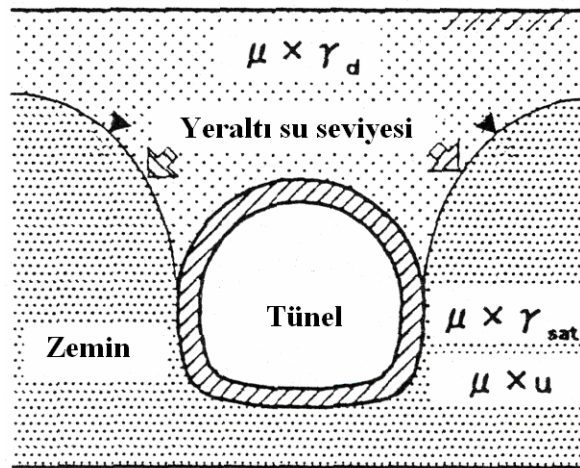
Duraylılığa etki eden faktörler aşağıda sıralandığı gibidir;

- Zemin (kaya) kayma direnci
- Gerilme/Deformasyon ilişkisi
- Örtü basıncı

- Tünelin şekli
- Direncin zamanla değişmesi
- Deformasyon kabiliyeti
- Dane boyutu
- Geçirimsizlik
- Zemindeki su durumu

Duraylılığın iyi saptanması; tünel açma metodu, iksa metodu, iyileştirme metodu (gerekliyorsa) seçimine esas teşkil eder.

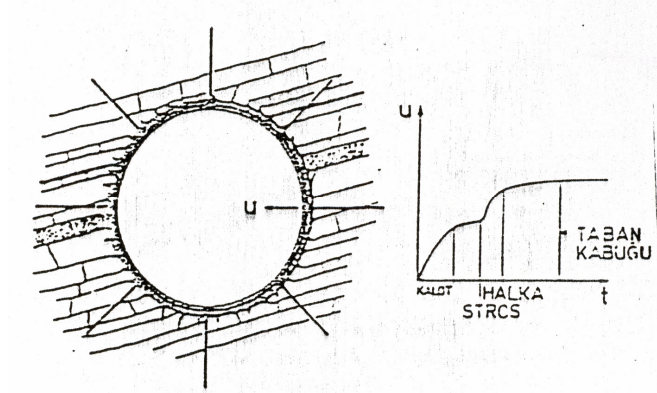
Kum, çakıl, çimentolaşmış silt gibi kohezyonsuz malzemelerin duraylılığı olmadığından, yeraltı su seviyesinin üstünde bu malzeme kendini tutamaz ve akar. Bu dökülme önlem alınmaz ise tünel etrafında büyük tehlikelere sebep olur. Yeraltı su seviyesi altında boşluk suyu basıncıyla akışkan hale geçen kohezyonsuz malzemeler, tünel açılmasına büyük engel teşkil etmektedirler. Bu tür zeminlerde tünel açılmadan, suyun bölgeden uzaklaştırılması, dondurma, enjeksiyonla bölge ıslahı, tünel çevresinde geçirimsizlik tabakaları oluşturulması (yatay jet grout vb.) gibi zemin iyileştirme yöntemleri kullanılması gerekmektedir. Aksi takdirde yeraltı suyu, tüneli bir drenaj kanalına dönüştürebilmektedir.



Şekil 4.26: Boşluk hacmi sırasında suyun davranışı [33]

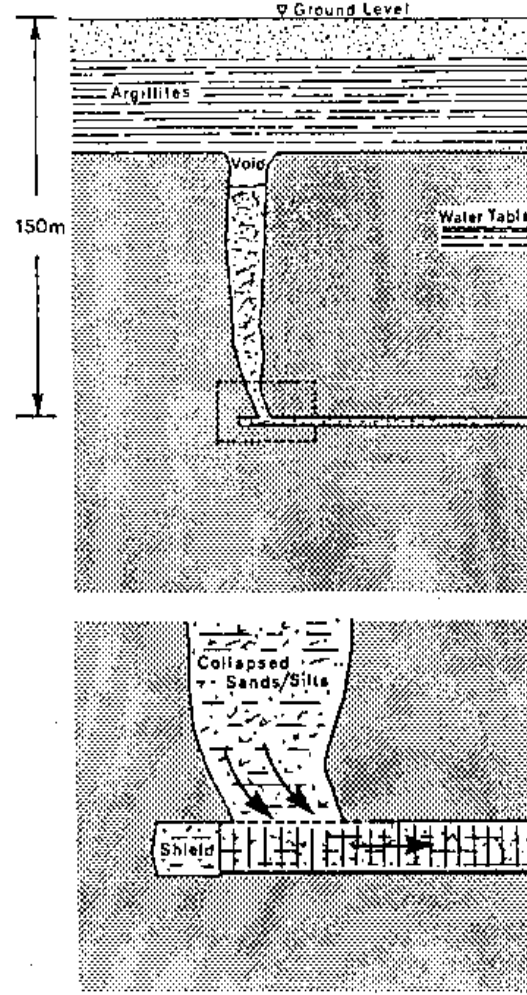
Kil ve diğer kohezyonlu zeminlerde aynanın duraylılığı, malzemenin direnajsız kayma mukavemetine bağlıdır. Bu gibi zeminlerde tünel kazısı yeterli derecede hızlı oluyorsa, ayna duraylı olabilir. Eğer zeminin mukavemeti yeterli değilse bunu

sağlamak için basınçlı hava kullanılır. Genellikle kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler karışım halinde bulunur. Bu durumda zayıf zemin dikkate alınır. Fakat bu tür zeminlerde de yüksek su seviyesi ve/veya su basıncı tünelin tasarım ve kazı aşamasında yüksek risk taşır. Şekil 4.27 da boşluk suyu basıncının üç aşamalı (kalot – stross- taban) olarak açılan tünel kesitine, her bir aşamadaki etkisinin değişimini göstermektedir. İmalat tamamlandığında (tünel cidarı tamamen kapandığında) ise basınç ulaştığı değerde sabit kalmaktadır.



Şekil 4.27: Yeraltı suyunun tünelin açılan kısmına etkisi [13]

Uzun vadeli stabilite problemleri, tünel tacının üzerindeki kırılmış materyallerden kaynaklanan tünel desteklemesinin yüksek yerçekimi yüklemesinden dolayı olabilir. Yüksek yerçekimi yüklemesiyle oluşan son problemin bir örneği, tünel içine doğru akan 6000 m^3 gevşek kumlu siltli materyal bulunan İtalya'da Potenza yakınındaki Agri Sauro Tüneli'nde meydana geldi. Bu, tünelin beton kaplamasının yetersizliği ile birleşip meydana gelmiştir. Şekil 4.28, bu ani boşalmayı anlatan detayları göstermektedir. Meydana gelen iyileştirici çalışmalar, yüksek su baskınlarına karşı tüneli güvence altına alır ve malzemenin yerinden oynamasını engeller. Gerçekten, ekstra ödemeler ve inşaatın gecikmesi gibi sonuçlar doğurur.



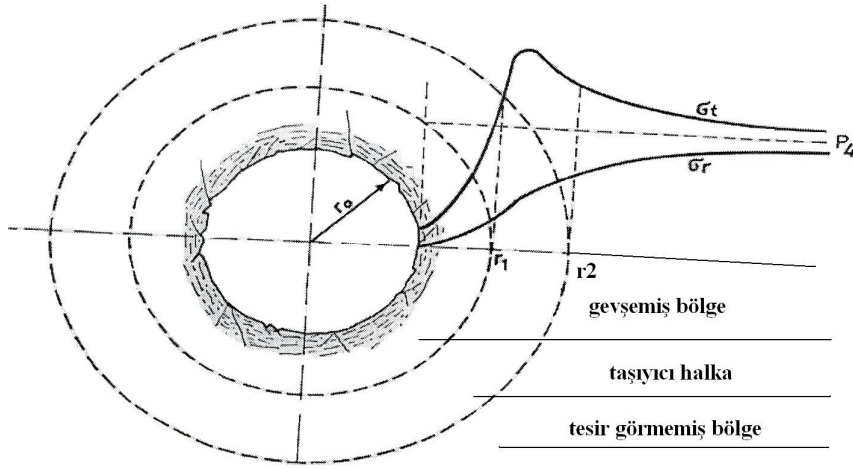
Şekil 4.28: Agri Sauro Tüneli'nin 2.63 km sinde göçük karakterlerinin değişimini gösteren sistematik diyagram [39]

5. TÜNELLERİN PROJELENDİRİLMESİNDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Tünel ve galeri gibi yeraltı boşluklarının açılması sırasında sıkça karşılaşılan yumuşak formasyonlar önceki bölümlerde sıralandığı üzere birçok stabilite problemleri ile karşı karşıya kalınmasına neden olmaktadır. Genelde kil mineralleri içeren bu formasyonlar, içerdikleri kil minerali türüne bağlı olarak yeraltı boşluğunun yapımı sırasında birincil ve ikincil gerilmelere ek olarak üçüncül (tersiyer) gerilmelerin ortaya çıkmasına neden olmakta ve yüksek deformasyonlar ve gerilme artışları meydana gelmektedir. Bu tür formasyonlarda açılan yer altı boşluklarının dizaynında ampirik hesaplama yöntemlerinin yanısıra sayısal (nümerik) yöntemler de kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı diferansiyel yöntem grubunda olan “sonlu elemanlar” analiz yöntemidir. Yöntemin tercih sebebi, değişik yük koşullarında anizotropik özellik gösteren formasyonlarda bu yöntemle analiz yapıldığında gerçeğe daha yakın gerilme ve konverjans değerleri elde edilebilmesidir. Sonlu elemanlar ile yapılan analizlerde değişik şekildeki yeraltı boşluklarında değişik yük koşullarında analiz yapmak mümkün olmaktadır.

5.1 Elasto – Plastik Analiz Yöntemi Teorik Temeli

Herhangi bir malzemeye yükleme yapıldığında belirli bir yüklemekten sonra malzeme deformasyona uğrar, yükleme kalktıktan sonra malzemede kalıcı (plastik) deformasyonların olması durumunda bu malzeme elasto – plastik malzeme olarak sınıflandırılır. Kayaçlar içerisinde açılan galeri, tünel gibi açıklıklarda, boşluk hacminin oluşturulması sonucu oluşan basınç ve gerilme artışıyla oluşan kalıcı deformasyon bölgesine “plastik zon” denmektedir. Elastik – ideal plastik malzemelerin deformasyon ve gerilme davranışlarını tarif eden en temel kural Hooke Yasasıdır. Bu yasanın temelinde izotropik malzemeler için iki parametre, anizotropik malzemeler için 21 parametre gerekmektedir. Kayaçlarda yenilme koşullarını genel geoteknik uygulamalarda Coulomb yenilme koşulları ile açıklamak mümkündür.



Şekil 5.1 : Yumuşak formasyonlarda açıklık etrafında oluşan halka ve gerilmeler [39]

Tahkimatsız bir yer altı yapısı ancak yüksek kohezyonun varlığı halinde stabil olabilmektedir. Kohezyon yeterli olmadığı ve yer altı açıklığının cidarına uygulanan P_1 stabilizasyon basıncı çok zayıf olması durumunda r_1 gevşemiş bölge yarıçapı çok büyümektedir. Özellikle killi formasyonlarda r_1 'in büyüme hızı günde 0.5 ile 5 cm'ye varabilmektedir. Teorik çalışmalar kazı çevresinde üç ayrı bölge bulunduğunu göstermektedir. Bu bölgeler;

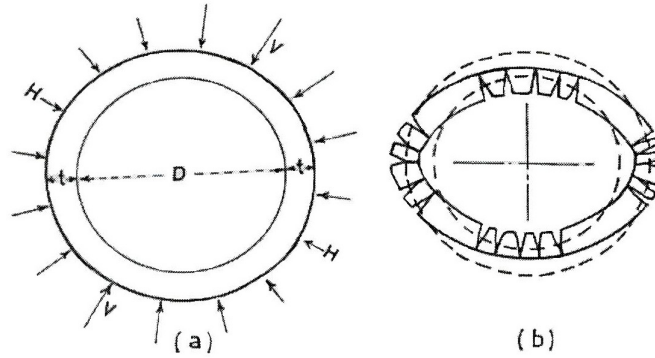
- Gevşemiş veya örselenmiş zemin bölgesi,
- Şiddetli basınçlar veya taşıyıcı halka bölgesi,
- Doğal basınçlar veya tesirsiz bölgedir.

Kuru veya ıslak, akıcı zemin ve çok plastik killer kısmen hidrostatik basınç kanunlarına uymaktadırlar. Çünkü sürşarj kalınlığı daha fazla olacağından yatay ve düşey itkilerin ikisi de artmaktadır. Eğer içinde yeraltı açıklığının yapıldığı zemin doğrudan doğruya hidrostatik kanunlara uyuyorsa, bu durumda düşey itkiler yatay itkilere eşit olup kaplama kalınlığının tespit edilmesi kolay bir hal almaktadır. Bunun dışında beton tahkimat her taraftan sıkışmaya maruz kalmaktadır. Gerçekte yatay itki düşey itkidenden her zaman az ve genellikle düşey itki ile sürşarj kalınlığı arasında doğrudan doğruya bir oran bulunmaktadır. Düşey itki ile yatay itki arasında 1/3 oranında dairesel bir kaplamaya gelen birim yükler Şekil 5.2.a'da gösterildiği gibi olmaktadır. Düzensiz şekilde yüklenme durumunda belirli noktalardaki gerilme artışlarıyla kaplamayı bir yumurta şeklinde çevirmeye çalışmaktadır. Açıklığın yan duvarlarındaki pasif mukavemeti yatay basınçların birkaç katına eşit olmakta ve

zemin ile kaplama arasında boşluk oluşması sonucunda kaplamada çatlamlar meydana gelebilmektedir (Şekil 5.2.b). Çizelge 5.1 de değişik formasyonlarda düşey itki (V) ile yatay itki (H) arasındaki oranlar verilmektedir (K_0).

Çizelge 5.1 Değişik formasyonlarda düşey itki (V) ile yatay itki (H) arasındaki oranlar

Formasyon	$K_0=V/H$ Oranı
Yumuşak kil	0.67
Plastik sarı killi kumtaşı	0.70
Plastik mavi kil	0.75



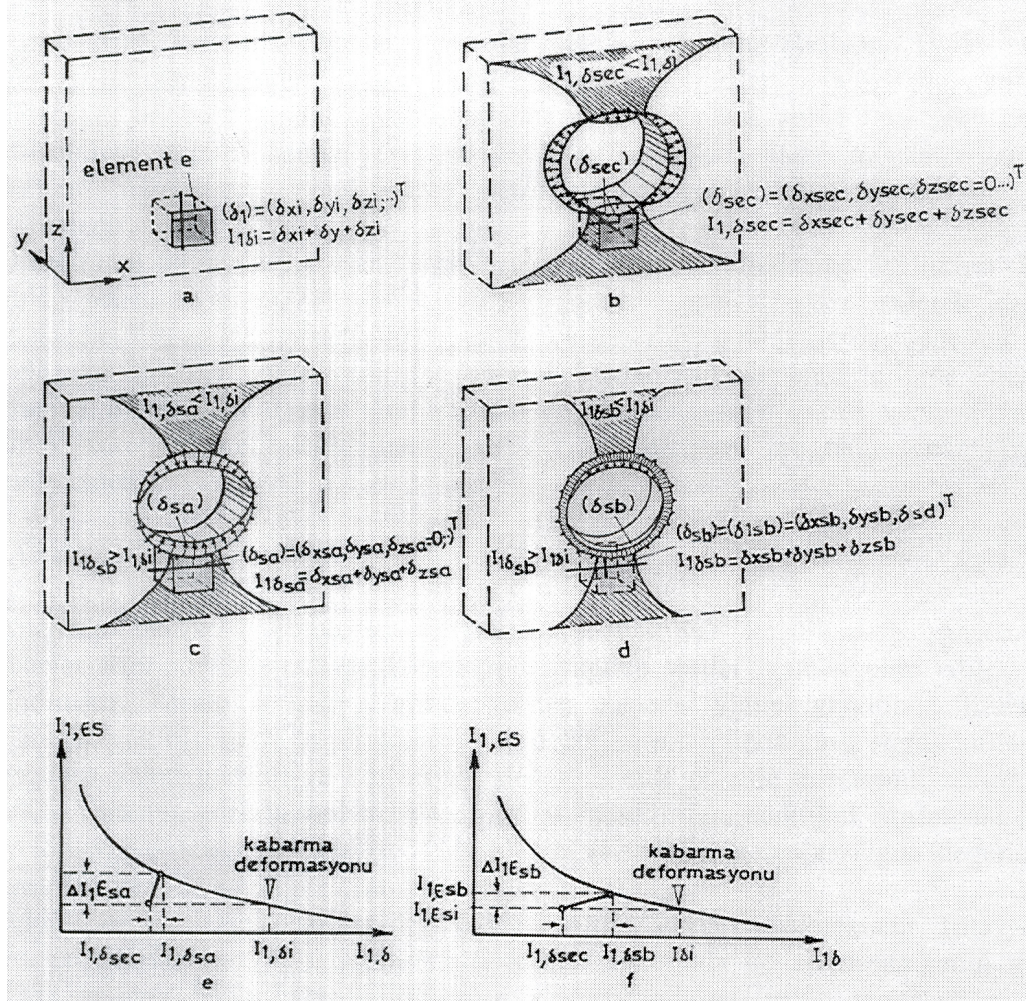
Şekil 5.2 : Yumuşak zemin tünellerinin kaplaması üzerindeki basınçlar ve kaplamanın yanlardaki pasif itkiler sonucu çatlaması olayı [20]

5.2 Yeraltı Açıklığının Açılımı Süresinde Kabarma Olayının Teorisi

Yeraltı açıklıklarının açılımı sırasında, boşluğun açıldığı zemin ile kurulan tahkimat sisteminin etkileşimi söz konusu olmaktadır. İyi bir tahkimat sisteminin görevi, aşırı deformasyona uğramadığından, oluşan konverjansı kontrol etmektir. Kurulan tahkimat sisteminde reaksiyon başladıktan sonra meydana gelen deformasyonlar yüzünden, tahkimat sisteminde reaksiyon kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Reaksiyon kuvvetinin büyüklüğü, tahkimat sisteminin rijitlik katsayısı olan (k) ile orantılıdır. Tahkimat sisteminde kırılma oluncaya kadar, sistemin elastik davranış gösterdiği kabul edilmektedir.

Şekil 5.3'te şişme özelliğine sahip bir kayaç yapısında, başlangıçtan itibaren boşluğun açılması ve tahkimatın kurulması sürecinde şişme basınçlarının oluşumu ve

deformasyonlar verilmektedir. Şekil 5.3.a'da şişme özelliğine haiz bir kayaç içerisinde belli derinlikte alınan “e” elemanından hiçbir girişim olmama durumundaki in-situ gerilme durumu görülmektedir. Bu gerilmeye birincil gerilme durumu denir (σ_i). Bu örnekte, kayaç yapısında en belirgin durum oluşan düşey gerilmelerin yatay gerilmeye oranının 1'in altında olması durumudur. ($K_0 < 1$). Başlangıç durumundaki gerilme durumu ayrıca Şekil 5.3.e ve 5.3.f'de verilmektedir (I_{1,σ_i}). Yeraltı açıklığının açılması ile birlikte başlangıçtaki in-situ gerilme (σ_i) durumu ikincil gerilme durumuna dönüşmektedir (σ_{sec}). İkincil gerilme durumuyla oluşan deformasyon (δ_{sec}) Şekil 5.3.b'de gösterilmektedir. Açıklığı yumurta şeklinde deforme eden ikincil gerilme durumu, başlangıç gerilme durumu değerinden küçük bir değer almaktadır ($I_1, \sigma_{sec} < I_1, \sigma_i$). Ancak, şekilde de görüldüğü gibi açıklığın tavanında ve tabanında deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu deformasyonlar tavan inmesi ve taban kabarması şeklinde karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 5.3 : Yumuşak zeminde açılan yeraltı açıklığı sonucu kabarma olayının ve gerilme durumunun zamana bağlı olarak gelişimi, (a) başlangıç durumu, (b) tünel kazısı, ikincil durum (sec), (c) tahkimatsız kabarma deformasyonu, üçüncül durum (sa), (d) tahkimatlı kabarma deformasyonu, üçüncü durum (sb), (e) üçüncül durumda tahkimatsız kabarma deformasyonu, (sa) gerilme artışı ilişkisi, (f) üçüncül durumda tahkimatlı kabarma – gerilme ilişkisi [20]

5.3 Sonlu Elemanlar Analizi

Herhangi bir gerilme (stress) analiz probleminin çözümü, ilgili diferansiyel eşitliklerin kurulmasını veya bir ya da daha fazla sayıda sınır koşullarının (boundary conditions) belirlenmesini gerektirmektedir. Sayısal analizlerin büyük çoğunluğu ise yeraltı açıklıkları gibi düzensiz şekilli yapılarla ilişkilendirilmiş eşitliklerin çözümü için elverişli değildir. Sonlu elemanlar analiz yönteminde pratik boyutlarda seçilen çalışma alanı bir örgü (mesh) oluşturacak şekilde, iki boyutlu problemlerde genellikle üçgen veya dörtgen elemanlara bölünmektedir.

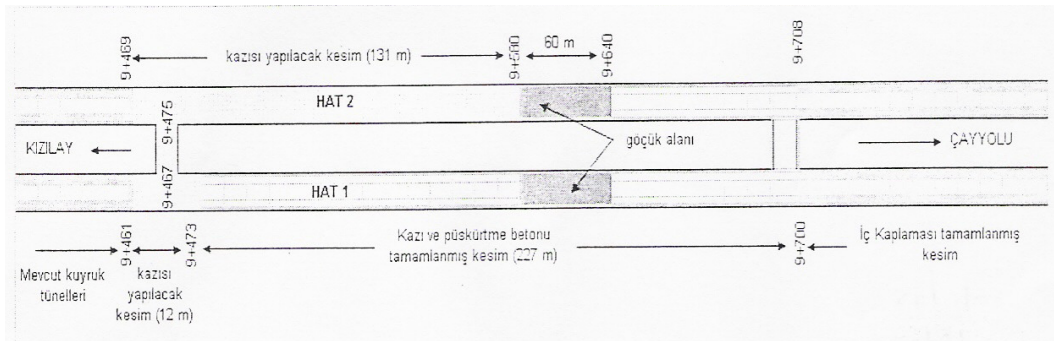
6. KİLLERİN TASARIMA ETKİSİ – PLAXIS ANALİZİ

Tünel tasarımı sırasında birçok program kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygını Plaxis sonlu elemanlar yazılımıdır. Programda yapılan analizler sonucunda; meydana gelen gerilme ve deformasyonlar bulunabilmektedir. Tez çalışmasının bu aşamasında Ankara Metrosu inşaatının Ümitköy – Çayyolu kesimi, İstanbul Metrosu Taksim-Yenikapı Metro İnşaatı Süleymaniye ve Yenikapı bölgelerinde, tünellerde meydana gelen ve gerçekleşmesi beklenen durumları inceleyeceğiz. Böylelikle, kil zeminlerin değişkenliğine göre türetilen yeni yöntemleri karşılaştırmış olacağız.

6.1 Ümitköy-Çayyolu Arası Metro Tüneli İnşaatı

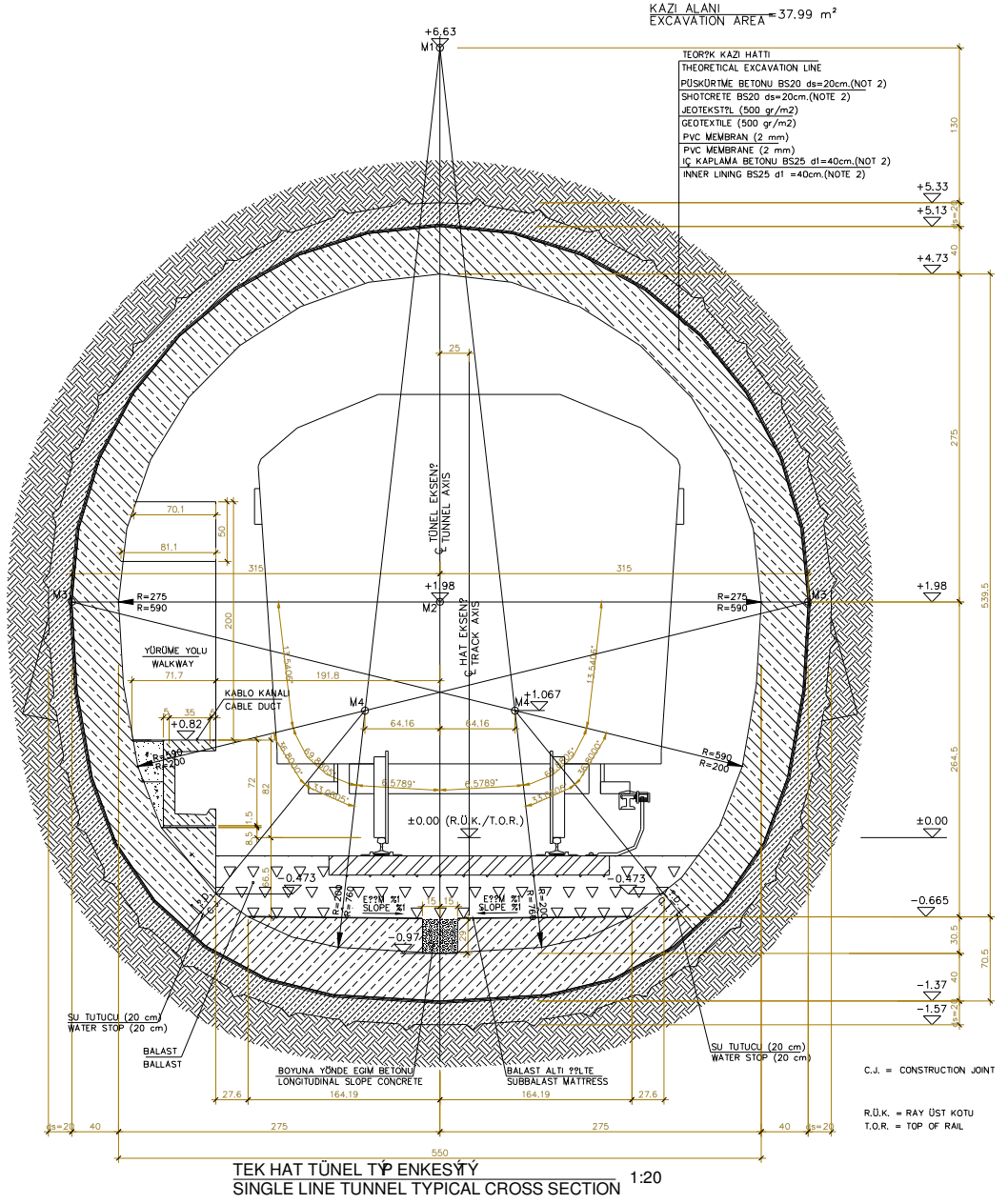
Ümitköy – Çayyolu Metro hattının Km: 10+380 ile Km: 9+474 arasında 900 m lik kesim iki tüplü delme tünel olarak projelendirilmiş ve inşaatına başlanmıştır.

Hat 1 Tüneli inşaatları 21 Nisan 2006 tarihine kadar sorunsuz olarak devam etmiş, tünelin koruyucu kaplamasının (ilk destek sistemi) tamamlanmasına 15 m kalmıştır. Hat 2 tüneli inşaatlarında ise Km: 9+650 ye kadar koruyucu kaplama, geriden ise kalıcı tünel kaplaması inşası devam etmiştir.



Şekil 6.1 : Ümitköy-Çayyolu arası metro inşaatı göçük bölgesi [3]

Tünel inşaatı sorunsuz devam ederken 21 Nisan 2006 tarihinde Hat 2 tüneline Km:9+640 da aniden deplasmanlar oluşmaya başlamış ve bunu takiben Km:9+640 ile Km:9+600 arasında göçme meydana gelmiştir. Aynı anda koruyucu kaplaması göçükten 45 gün önce tamamlanmış olan Hat 1 tüneline, aynı Km ler arasında yırtılmalar ve hasarlar meydana gelmiştir. Tünel güzergâhı üzerinde bulunan Eskişehir karayolunun hasar görmemesi amacıyla Hat 1 tüneline bir bölümü betonla doldurulmuş ve göçük olayını incelemek üzere araştırmalar başlatılmıştır.



Şekil 6.2 : Tünel enkesiti [3]

6.1.1 Tünel İnşaatı

Bölgenin, yapılan sondajlar sonucunda ayrıışmış kireçtaşı ve marn birimlerinden oluştuğı belirlenmiştir. Tünel etrafını saran zemin marn olmakla birlikte yapılan araştırmalarda ayrışma derecesinin çok olduğı ve killeşme özelliğı gösterdiği belirlenmiştir. Bölgedeki zemin tanımlaması Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Bölgedeki aşırı ayrıışmış/killeşmiş marn biriminde tünel dış kaplamasının bu yüke karşılık verip vermediğı incelenmiştir.

Yan yana olan iki anahat (A Tipi) tünelinin olduğı bu alanda NATM yöntemiyle yapılan tünel inşaatında püskürtme beton atılmış kısımda göçük meydana gelmiştir. Kullanılan anahat tünel kesiti Şekil 6.2 de gösterilmektedir. Meydana gelen göçük sonrasında, bölgenin enjeksiyon ve betonlama işlemlerini takiben araştırmalar sonucunda tünel stabilitesini sağlamak amacıyla tahkimatlar yapılmaya başlanmıştır.

6.1.2 İlave Önlemler

Tünelin yeniden inşasına geçilmeden önce daha fazla deformasyona engel olabilmek amacıyla her iki tünel de tamamen doldurulmaya çalışılmıştır. Kaplamanın hasar gördüğü sol tüpte doldurma işlemi yapılamamıştır. Sert kilden oluşan bölge zemininde kilin aralarda boşluklar bırakabilecek seviyede parçalar oluşturma olasılığına karşı, göçük bölgesinde basınçlı enjeksiyon uygulaması yapılmıştır. Bu sayede tam kesit tünel açma yöntemi, ayna stabilitesinin sağlanmasıyla kullanılabilmiştir.

Tünel açılırken dikkat edilmesi gereken hususlar arasında tünel tavanının stabilitesinin sağlanabilmesidir. Aktif araç yolunun altında açılan boşluk hacminin güvenliğini sağlamak gerekmektedir. Bu amaçla, tünel tacı bölgesinde şemsiye boru süren imalatı yapılarak kazı güvenliği sağlanmıştır.

6.1.3 Plaxis Analizi

Plaxis sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak inşaat süresince meydana gelebilecek deformasyonlar hesaplanmıştır. Bu analiz sırasında, ilk tahkimat elemanlarının tanıtlama işlemi, plaxis programının özelliğinden dolayı yapılamamıştır. Uygulama aşamalarının programa tanıtlama işlemi aşağıdaki gibi gerçekleşmiştir.

1. Aşama:Sağ tüp kazısı yapılmış püskürtme beton elemanları yerleştirilmiştir. Üç boyutlu modellemenin etkisini vermek amacıyla zemine gevşetme uygulanmıştır.
2. Aşama:Sağ tüpte nihai beton kaplama aşamasına geçilmiştir.
3. Aşama:Sol tüp kazısı yapılmış püskürtme betonu elemanları yerleştirilmiştir. Üç boyutlu modellemenin etkisini vermek amacıyla zemine gevşetme uygulanmıştır.
4. Aşama:Sol tüpte nihai beton kaplamasına geçilmiştir.

6.1.3.1 Kullanılan Parametreler

Bölgede mevcut olan aşırı ayrışmış/killeşmiş şişme özelliği gösteren marn tabakası ilk kullanılan verilerde kireçtaşı gibi alınmıştır. Bununla beraber rezidüel olmayan alandaki kireçtaşı özelliği gösteren marnın özellikleri ile birlikte Çizelge 6.1’de verilmektedir. Kullanılan kaplama özellikleri ise Çizelge 6.2’de verilmektedir.

Çizelge 6.1: Zemin özellikleri

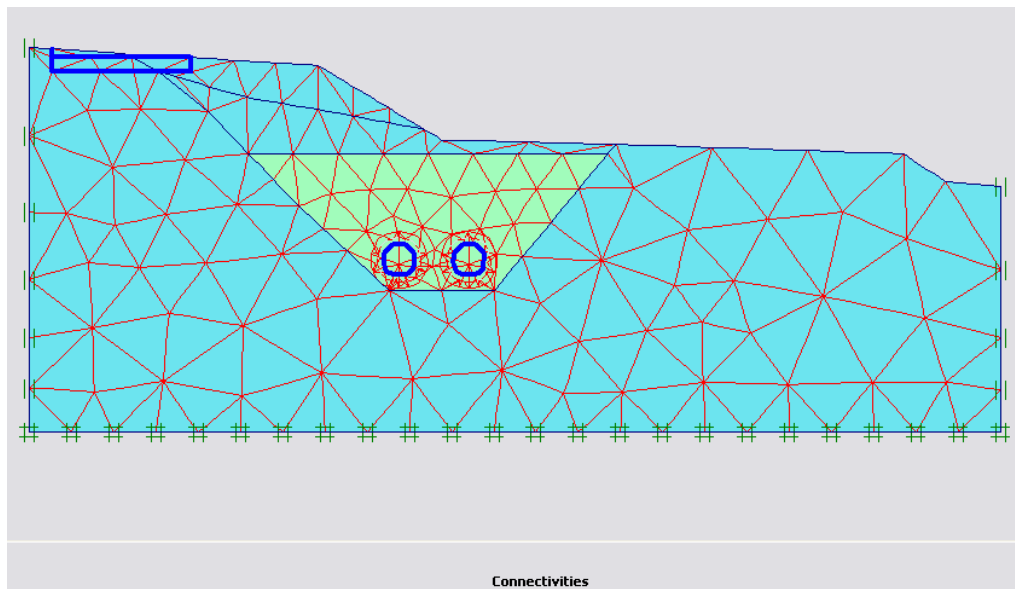
Hardening Soil		Marn	Marn (Rez.)
Type		Drained	Drained
γ_{unsat}	kN/m ³	22,00	22,00
γ_{sat}	kN/m ³	22,00	22,00
k_x	m/day	0,00	0,00
k_y	m/day	0,00	0,00
e_{init}	-	0,50	0,50
e_{min}	-	0,00	0,00
e_{max}	-	999,0	999,0
E_{50}^{ref}	kN/m ²	35000,0	20000,0
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	35000,0	20000,0
Power(m)	-	0,50	0,50
c_{ref}	kN/m ²	25,0	0,10
ϕ	°	25,0	15,0
ψ	°	0,00	0,00
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	105000,00	60000,00
$v_{\text{ur}}^{(\text{nu})}$	-	0,200	0,200
p^{ref}	kN/m ²	100,00	100,00
$c_{\text{increment}}$	kN/m ²	0,00	0,00
y_{ref}	m	0,00	0,00
R_f	-	0,90	0,90
T_{str}	kN/m ²	0,00	0,00
R_{inter}	-	0,64	0,66
δ_{inter}	m	0,00	0,00
Interface permeability		neutral	neutral

Cizelge 6.2: Tünel Kaplaması Özellikler

No	Identification	EA kN/m ²	EI kNm ² /m	w kN/m/m	v -	Mp kNm/m	Np kN/m
1	Shotocrete (t=35 cm) (yumuşak)	3,5E6	35729,0	4,90	0,00	1E15	1E15
2	Shotocrete (t=35 cm) (katı)	9,975E6	1,0183E5	4,90	0,00	1E15	1E15
3	İç kaplama (t=50 cm)	1,425E7	2,9688E5	7,00	0,00	1E15	1E15
4	Radye (t=50 cm)	1,425E7	2,9688E5	0,00	0,00	1E15	1E15

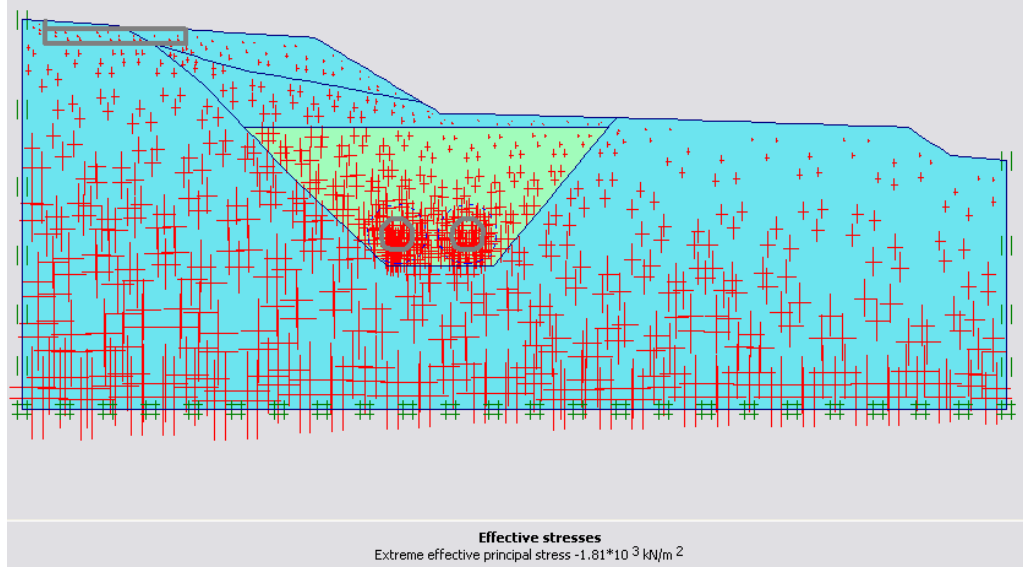
6.1.3.2 Analiz Sonuçları

Yapılan analiz sonuçları aşamaları ile birlikte aşağıda gösterilmektedir.



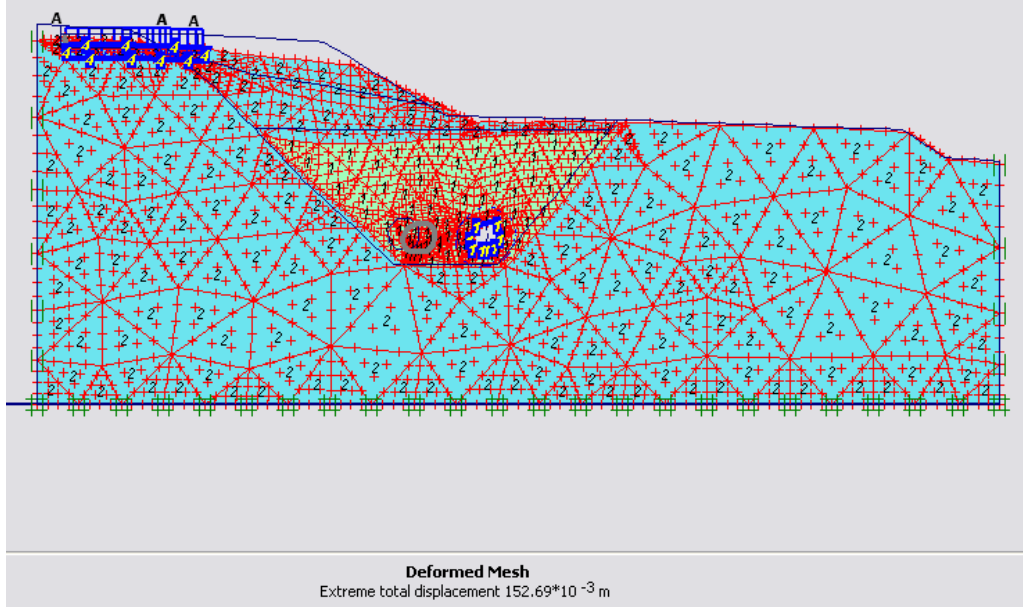
Şekil 6.3 : Analiz öncesi gerilme durumu

Doğadaki gerilmelerin, oluşturulan boşluk hacmiyle dengesi bozulur. Yeniden dengeye gelebilmek için oluşturulan bu rahatsızlığın sönümlenmesi gerekmektedir. Şekil 6.3'te anahat tünelleri açılmadan önceki arazi gerilme durumu ve zemin profili gösterilmektedir.



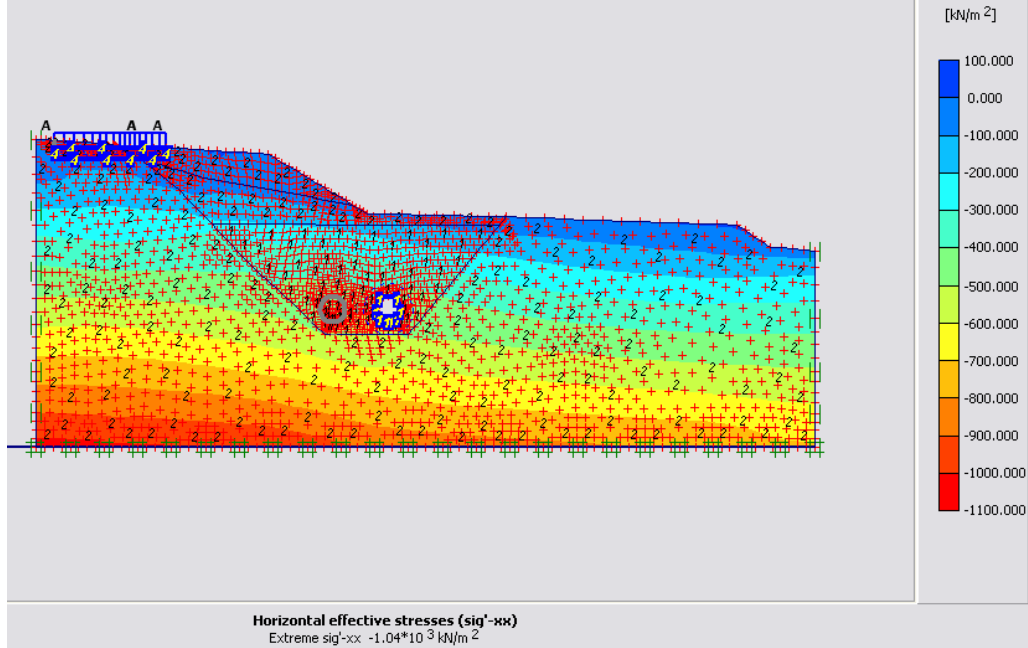
Şekil 6.4 : Efektif gerilmeler

Şekil 6.4, derinlik arttıkça efektif gerilmelerin hangi düzeye geldiğini ve tünel etrafındaki rezidüel kısımdaki gerilme durumunu göstermektedir. Derinlikle artan gerilme noktaları tünel kısımları tanımlandığı için o bölgede de yoğunluk göstermektedir.

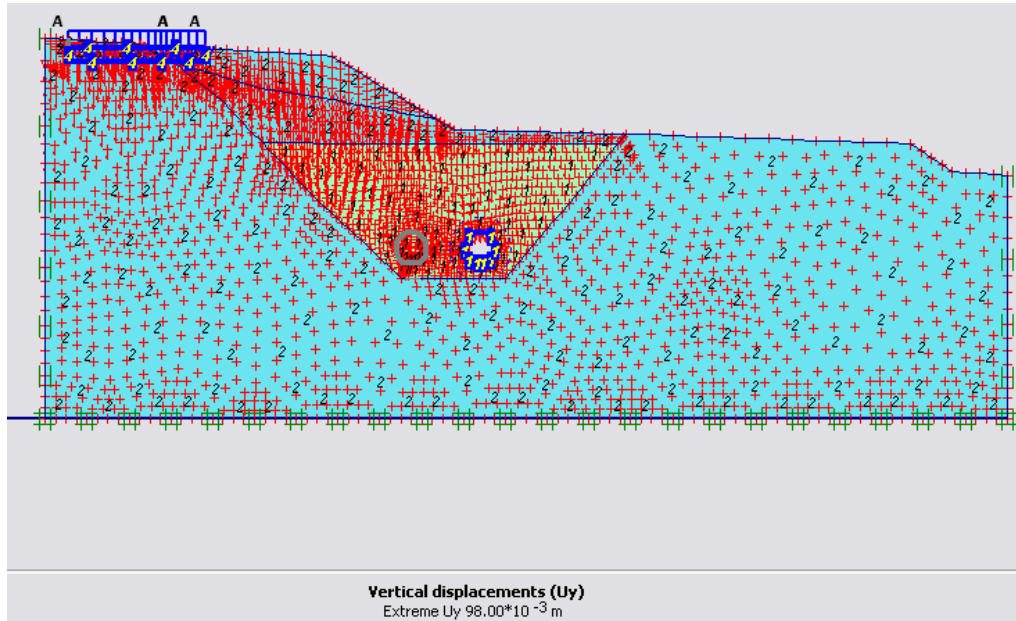


Şekil 6.5 : İlk tüp açılımı sonrası şekil değiştirme diyagramı

Bölgede ilk önce Hat 1 tüneli açılmış ve betonla kaplanmıştır. Bu aşama sonucunda Şekil 6.5'teki analiz sonucu, alanda 152 mm deformasyon oluştuğunu göstermektedir.

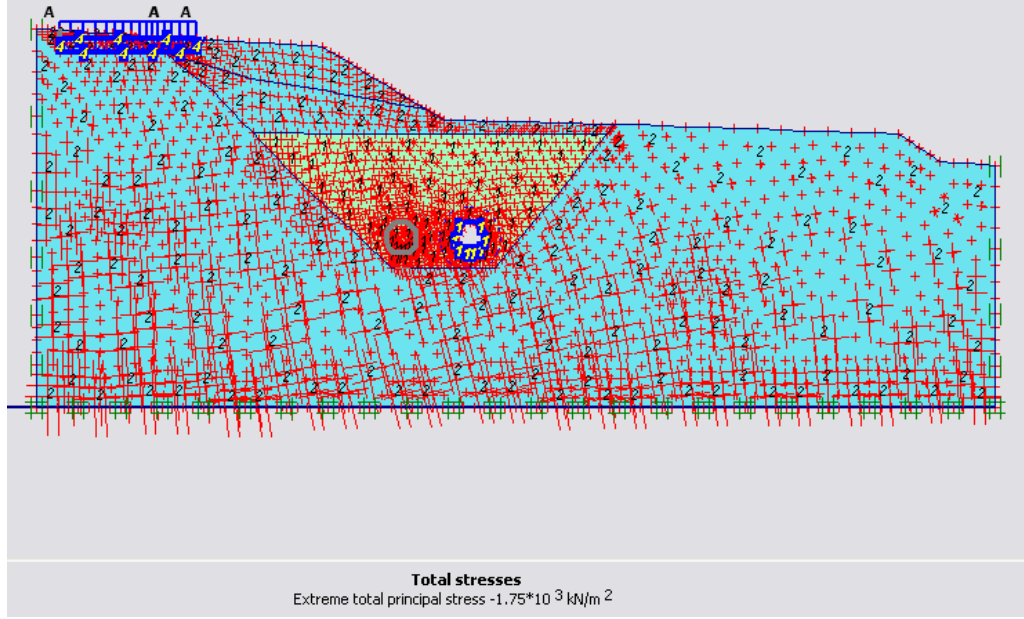


Şekil 6.6 : İlk tüp açılımı sonrası yatay efektif gerilmeler



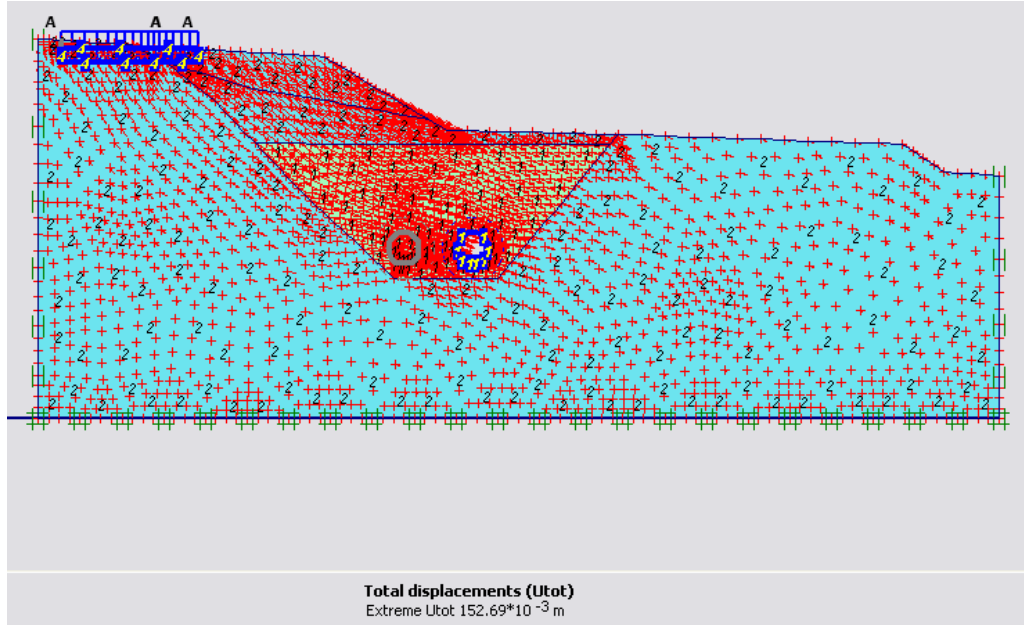
Şekil 6.7 : İlk tüp açılımı sonrası düşey yer değiştirmeler

Hat – 1 tüneli inşaatının nihai beton kaplaması da uygulanarak yapılan analiz sonucunda alanda meydana gelen düşey yer değiştirme Şekil 6.7’de gösterildiği gibi 98 mm bulunmuştur.



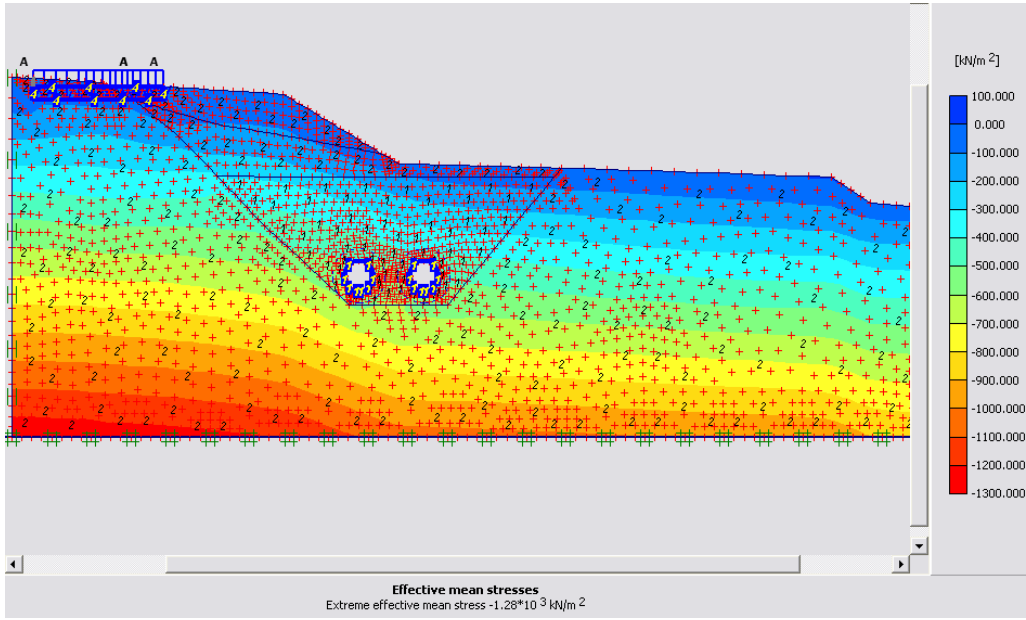
Şekil 6.8 : İlk tüp açılımı sonrası toplam gerilmeler

Şekil 6.8’de gösterilen bölgedeki toplam gerilmeler $-1.75 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$ mertebesine ulaşmıştır.

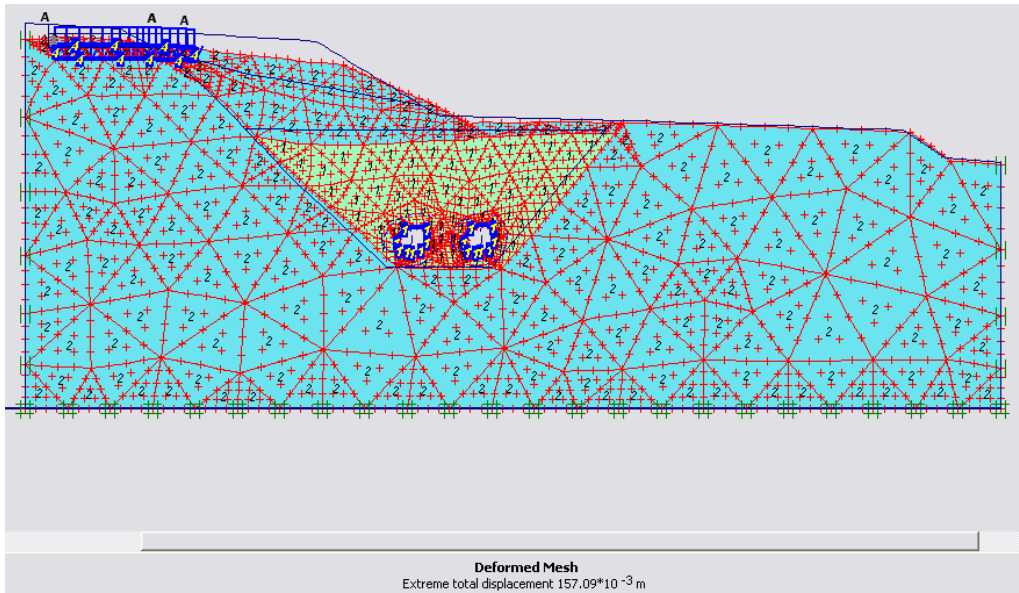


Şekil 6.9 : İlk tüp açılımı sonrası toplam yer değiştirme

Hat – 1 tüneli inşaatı sonrası bölgede oluşan toplam yer değiştirme miktarı Şekil 6.10’ da görüldüğü üzere 152.69 mm ye ulaşmıştır.

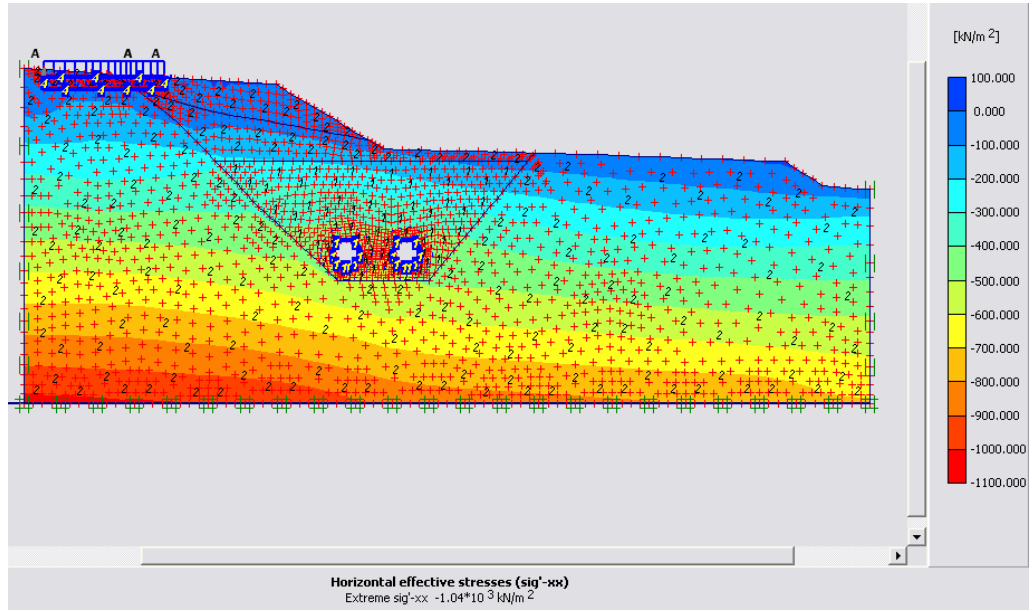


Şekil 6.10 : Tünel inşaatı sonrası efektif gerilmeler

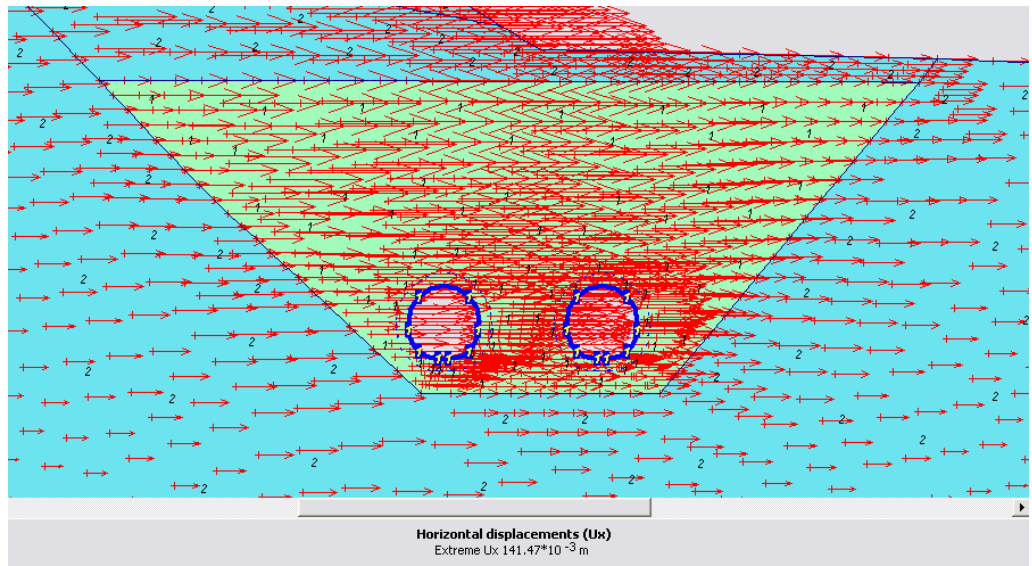


Şekil 6.11 : Tünel inşaatı sonrası şekil değiştirme diyagramı

Hat – 1 ve Hat – 2 tüneli inşaatı bitiminde deformasyon Şekil 6.11’de gösterilen analiz sonucuna göre 157 mm ye ulaşmaktadır.

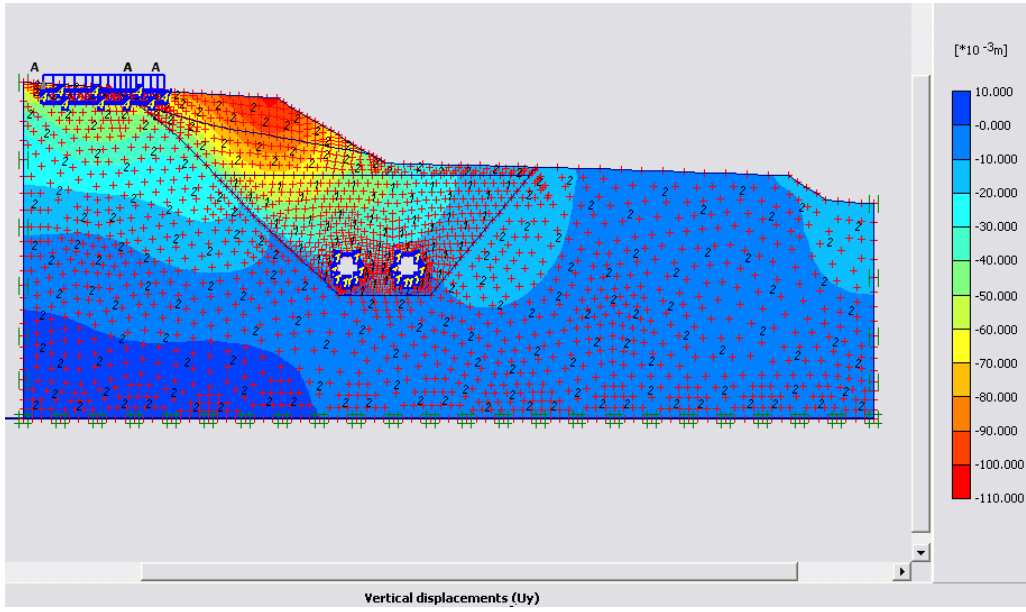


Şekil 6.12 : Tünel inşaatı sonrası yatay efektif gerilmeler



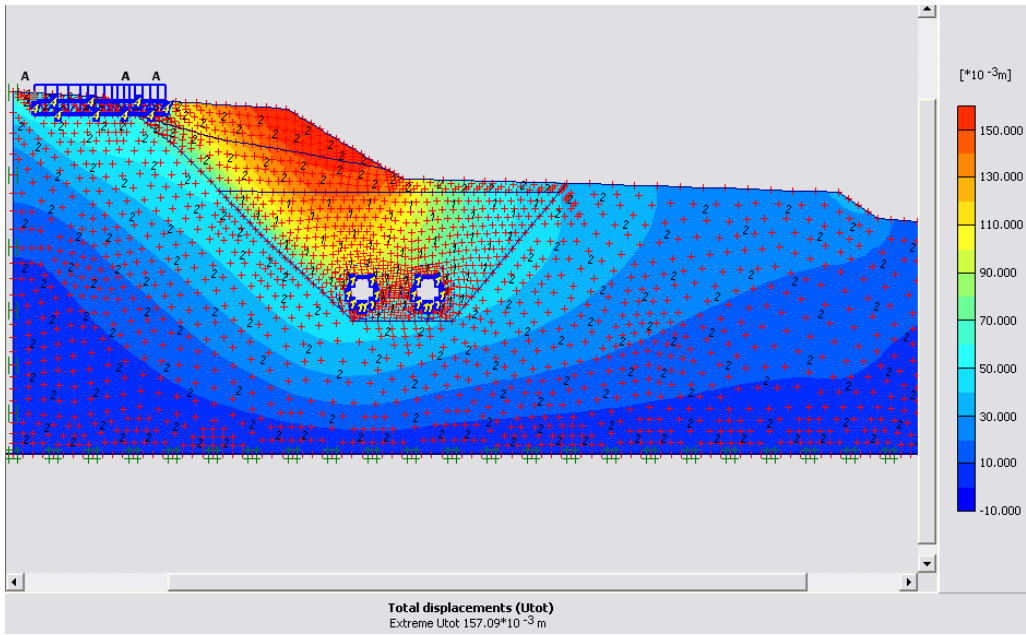
Şekil 6.13 : Tünel inşaatı sonrası yatay yer değiştirmeler

Her iki hattın tamamlanması sonrası bölgede oluşan toplam yatay yer değiştirme 141.47 mm ye ulaşmaktadır. Analiz sonucu Şekil 6.14'te, bölge yatay efektif efektif gerilmeler ise Şekil 6.13'te gösterilmektedir.



Şekil 6.14 : Tünel inşaatı sonrası düşey yer değiştirme

Hat – 1 ve Hat – 2 tünelleri inşaatı sonrası alanda oluşan düşey yer değiştirmelerin bölgesel dağılımı Şekil 6.14’te gösterilmektedir.



Şekil 6.15 : Tünel inşaatı sonrası toplam yer değiştirme

Her iki tünelin tamamlanmasının ardından toplam yer değiştirme miktarı Şekil 6.15 da gösterildiği üzere 157.09 mm mertebesine ulaşmaktadır.

6.1.4 Değişen Koşullar

İlk hazırlanan rapor koşullarına göre normal gözüken bu alanda yapılan analizler tünel stabilitesinin bozulmadığını göstermektedir. Fakat tünel inşaatı sırasında farklı zemin koşullarıyla karşılaşmış olup tünelde hasar meydana gelmiştir. Yeni duruma göre analiz yapılmış olup, zeminin şişme özelliğinden dolayı sağ tüp açıldıktan sonra tünelde göçme meydana gelmiştir. Zemin, açılan boşluğu hızla doldurmuştur.

Yapılan 2. analizde, rezidüel olan bölge şişme özelliği olan marn olarak tanımlanmıştır. Geri kalan kısım, normal durumuyla tanımlanmış olup, analizler bu seviyede gerçekleştirilmiştir.

Analiz aşamaları;

- 1.Aşama:Tünel açılmadan doğal durum.
- 2.Aşama:Sağ tüp açılımı. %10 gevşetme uygulanmıştır.
- 3.Aşama:Sağ tüpte birinci kat püskürtme beton atılması. %25 gevşetme uygulanmıştır.
- 4.Aşama:Sağ tüpte ikinci kat püskürtme beton atılması.
- 5.Aşama:Sağ tüpte nihai beton kaplaması yapılması.
- 6.Aşama:Sol tüp açılımı. %10 gevşetme uygulanmıştır.
- 7.Aşama:Sol tüpte birinci kat püskürtme beton atılması. %10 gevşetme uygulanmıştır.
- 8.Aşama:Sol tüpte ikinci kat püskürtme beton atılması. %25 gevşetme uygulanmıştır.
9. Aşama:Sol tüpte nihai beton kaplaması yapılması.

6.1.4.1 Kullanılan Parametreler

İlk analizdeki rezidüel olmayan bölgenin özellikleri olduğu gibi kullanılmıştır. Fakat tünel etrafındaki şişme özelliği gösteren marnın ise yapılan yarıntılı araştırmadan sonra Çizelge 6.3'teki gibi bulunmuş ve analiz bu veriler kullanılarak yapılmıştır. Tünelde kaplama malzemeleri özellikleri ise Çizelge 6.4'te verilmektedir.

Çizelge 6.3: Zemin Özellikleri

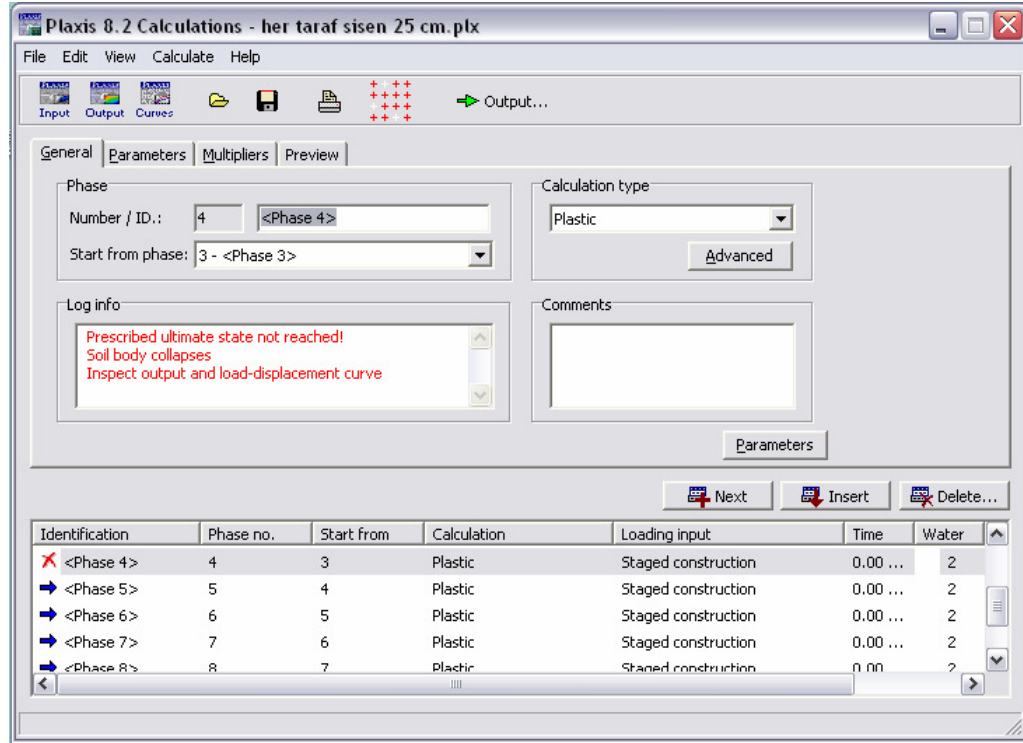
Soft Soil		Marn
Type		Drained
γ_{unsat}	kN/m ³	22,00
γ_{sat}	kN/m ³	22,00
k_x	m/day	0,00
k_y	m/day	0,00
e_{init}	-	0,50
e_{min}	-	0,00
e_{max}	-	999,0
λ	-	0.10
κ	-	0.02
c	kN/m ²	25,0
ϕ	°	25,0
ψ	°	0,00
$v_{\text{ur}}^{(\text{nu})}$	-	0,150
K_o^{nc}	-	0.577
R_{inter}	-	0,66
δ_{inter}	m	0,00
Interface permeability		neutral

Çizelge 6.4: Tünel Kaplaması Özellikleri

No	Identification	EA kN/m ²	EI kNm ² /m	w kN/m/m	ν -	Mp kNm/m	Np kN/m
1	Shotocrete (t=35 cm) (yumuşak)	3,5E6	35729,0	4,90	0,00	1E15	1E15
2	Shotocrete (t=35 cm) (katı)	9,975E6	1,0183E5	4,90	0,00	1E15	1E15
3	İç kaplama (t=50 cm)	1,425E7	2,9688E5	7,00	0,00	1E15	1E15
4	Radye (t=50 cm)	1,425E7	2,9688E5	0,00	0,00	1E15	1E15

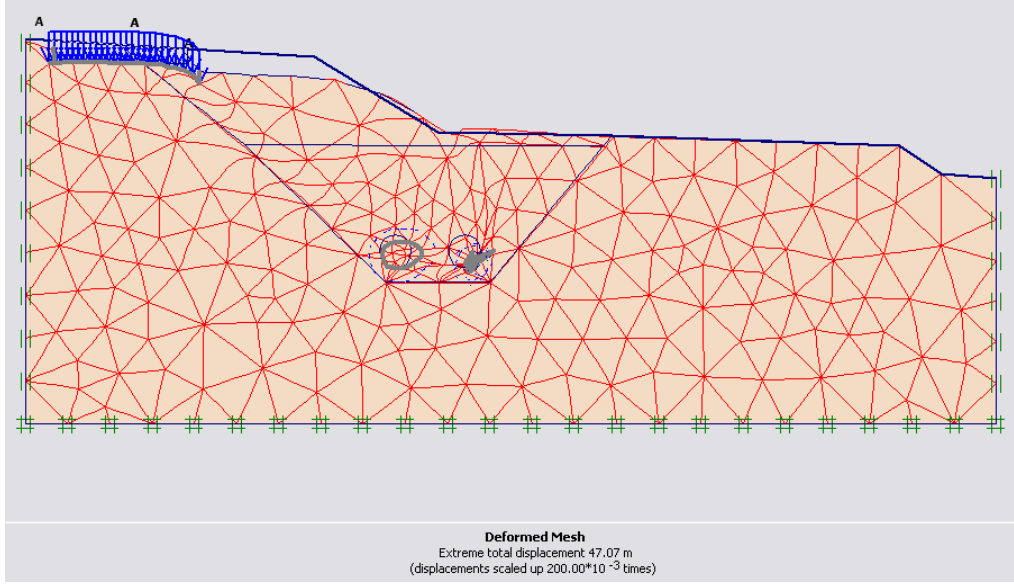
6.1.4.2 Analiz Sonuçları

Yapılan analiz sonuçları aşağıda gösterilmektedir.



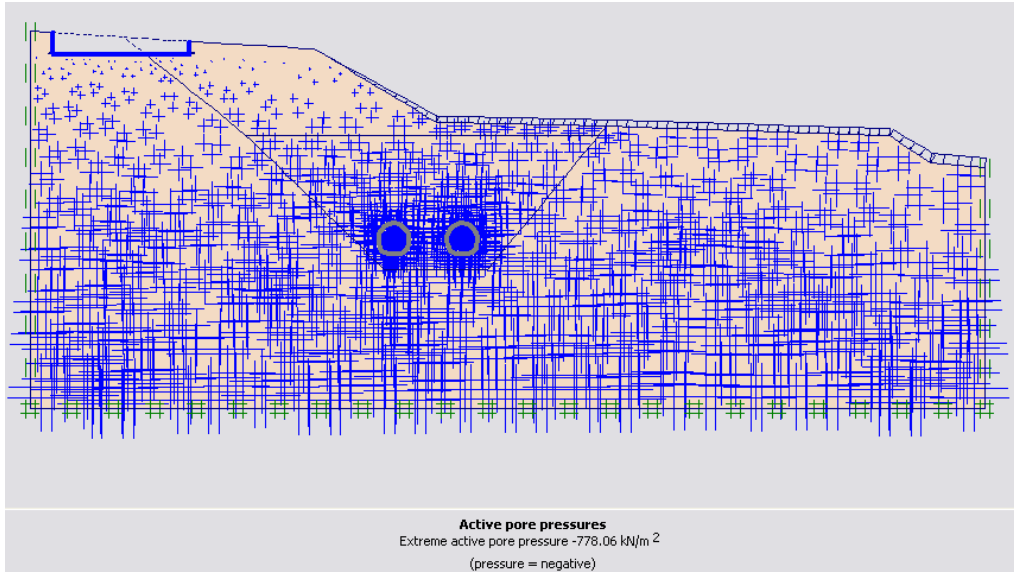
Şekil 6.16 : 2.kat püskürtme beton atıldıktan sonra zemin göçme durumu

Tünelde, 2. kat püskürtme beton atıldıktan sonra, geçici kaplama zemin basıncına karşı koyamamış ve göçme durumuna gelmiştir. Meydana gelen bu durum, yapılan plaxis analizine Şekil 6.16'daki gibi yansımıştır.



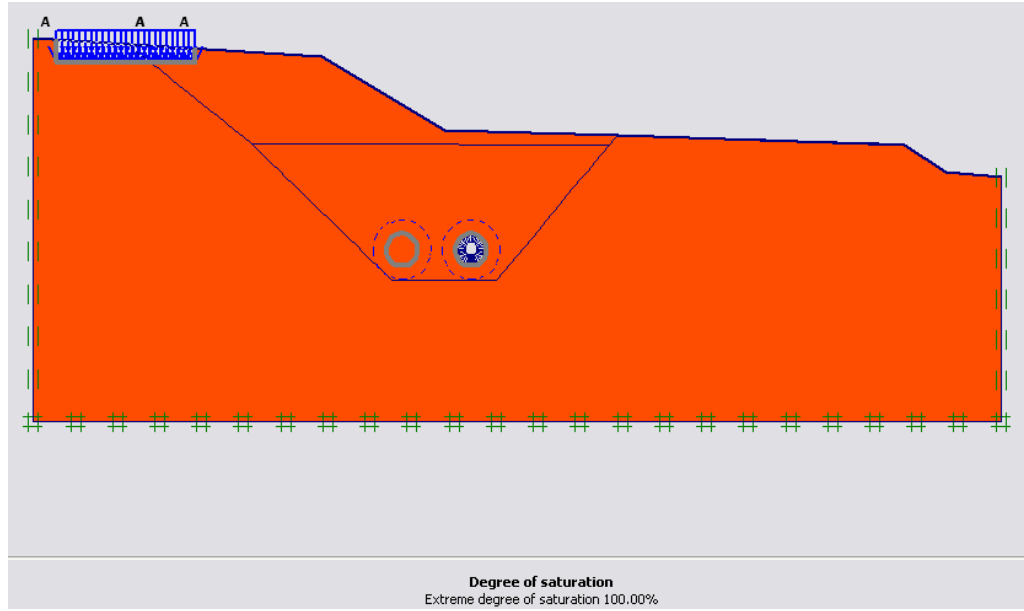
Şekil 6.17 : Deformasyon diyagramı

Tünel inşaatı sırasında 2. kat püskürtme beton atılırken, açılan boşluk şişme basıncına dayanamamış ve açılan boşluğu doldurmuştur. Bu sırada toplam yer değiştirme Şekil 6.17’deki gibi 47.07 m mertebesine çıkmıştır.



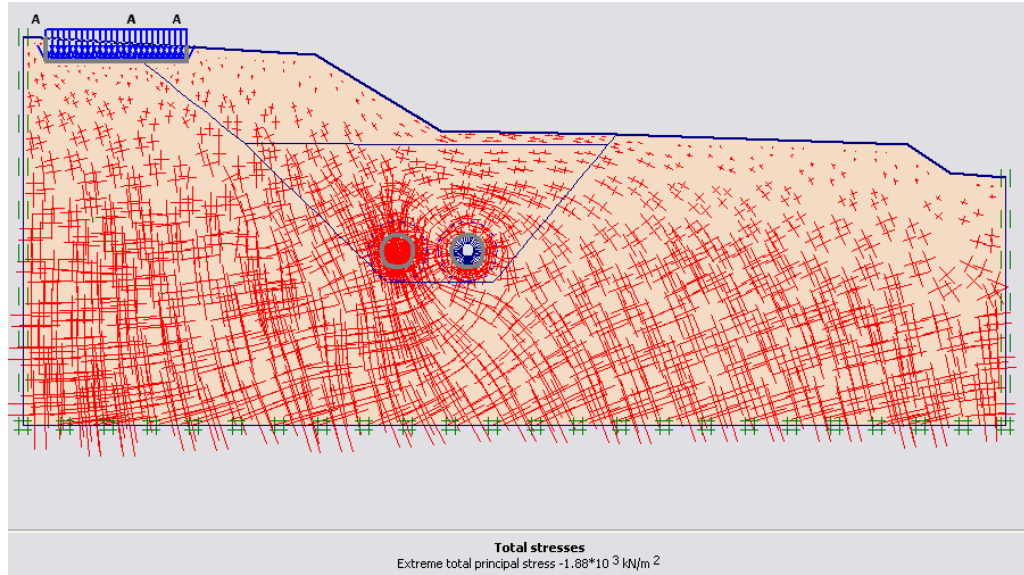
Şekil 6.18 : Aktif boşluk suyu basıncı

Bölge su altında tanımlanmış olup aktif boşluk suyu basıncı Şekil 6.19’da gösterildiği gibi 778.06 kN/m^2 olarak hesap edilmiştir. Bu değer, tünel etrafındaki basıncın ne denli fazla olduğunu göstermektedir. Şekil 6.18’de bu yoğunluk açık bir şekilde görülmektedir.



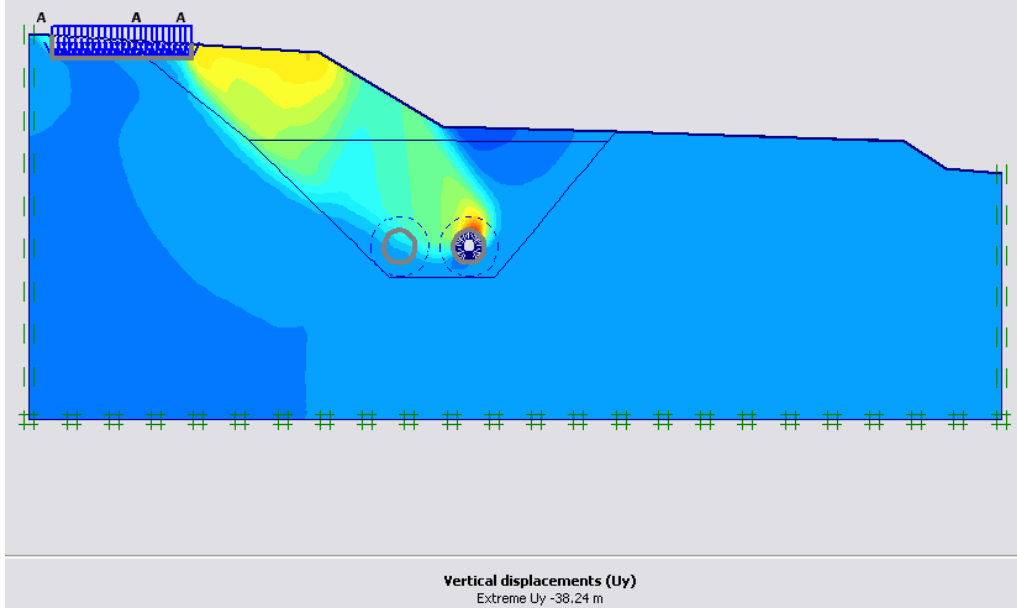
Şekil 6.19 : Doygunluk derecesi %100

Boşluk suyu basıncının Şekil 6.19 daki gibi tanımlanmasının ardından doygunluk derecesi programda % 100 olarak hesaplanmıştır.

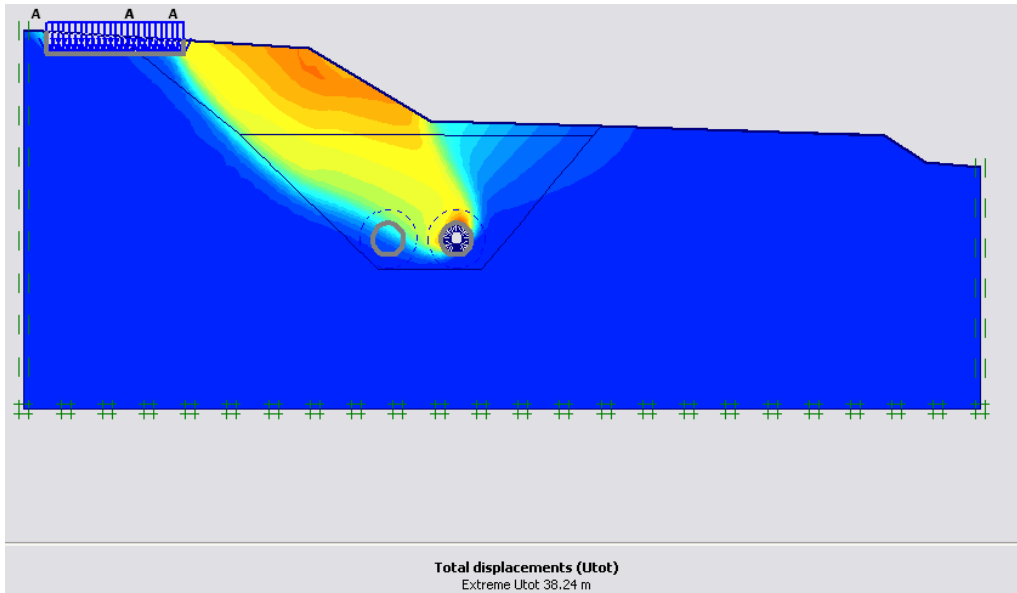


Şekil 6.20 : Toplam gerilme diyagramı

Şekil 6.20’de gösterilen toplam gerilme diyagramında efektif toplam gerilme değerinin $-1.88 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$ mertebesinde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.21 : Düşey yerdeğıştirmeler



Şekil 6.22 : Toplam yerdeğıştirmeler

Şekil 6.21 ve Şekil 6.22'den, toplam yer değıştirmenin düşey yer değıştirmeye eşit olduğu görölmektedir. Bu durum, açılan boşluğun, zemin basıncına dayanamayıp direk kapandığını göstermektedir. Toplam yer değıştirme değeri 38.24 m olarak hesap edilmiştir.

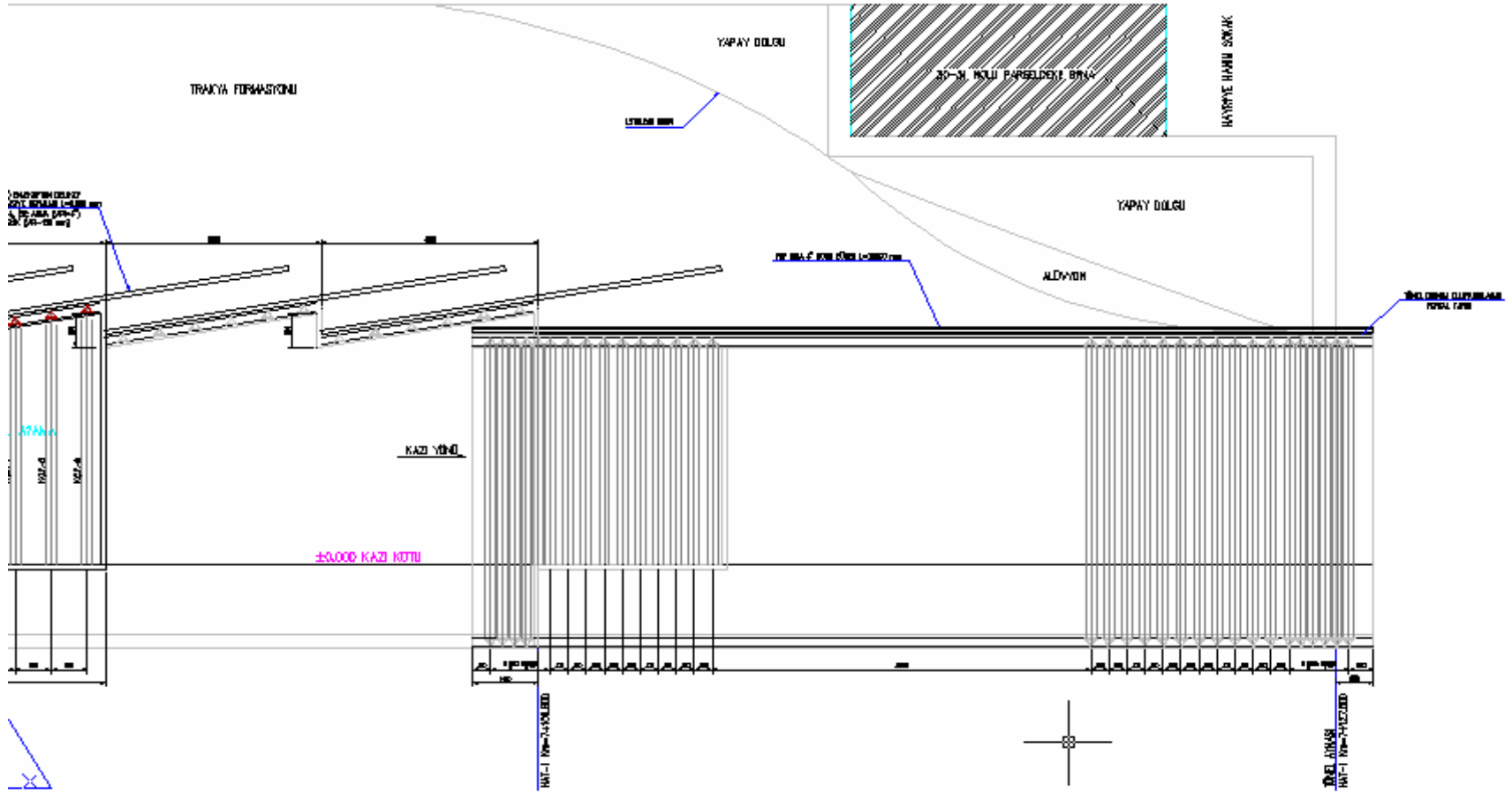
6.2 İstanbul Metrosu Unkapanı-Yenikapı Arası Metro İnşaatı

6.2.1 Süleymaniye Bölgesi

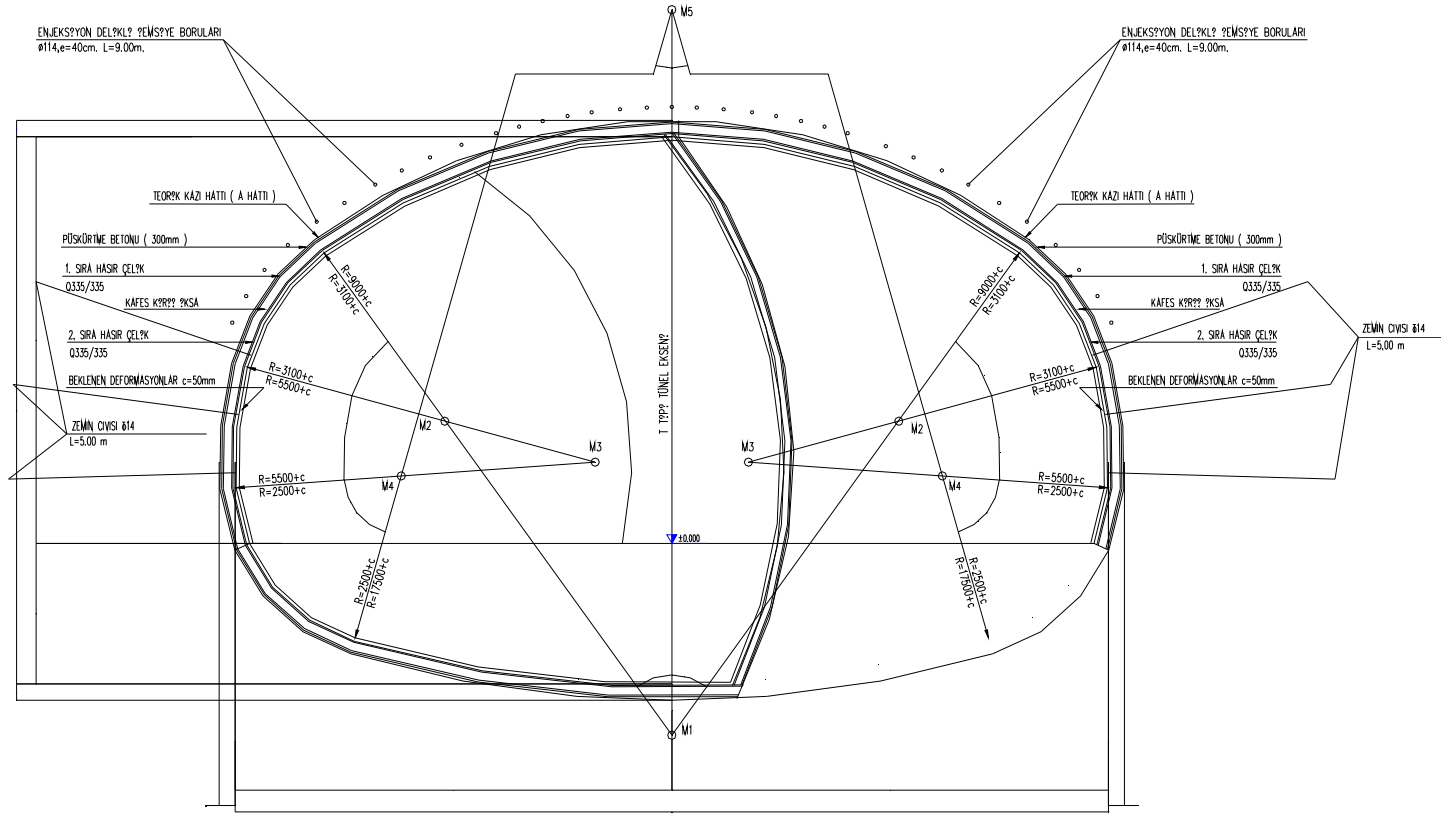
Tarihi yarımada içinde bulunan bu bölgede yapılacak olan tünel inşaatı sırasında yüzeyde hiçbir deformasyona izin verilmeyecek seviyede dikkatli kazı yapmak gerekmektedir. Sondaj ve arazi verilerine göre, yüzeyde değişken kalınlıkta yapay dolgu, kil içerikli Süleymaniye Formasyonu ve kumtaşı-kiltaşı içerikli Trakya Formasyonu bulunmaktadır.

Unkapanı-Yenikapı Arası Metro İnşaatı Km: 7+051–7+127.5 arasında bölge koşullarının geniş kesitli tünel yapmaya elverişli olmaması nedeniyle ayrı bir tasarım seçilmiş olup uygulamaya geçilmiştir. Bu tünel inşaatı tekniği, 3 tünel kesitinin birlikte inşa edilmesi ile oluşmuştur. Yan tünellerden gelen yükleri rahatlıkla karşılaması açısından orta tünel aksında betonarme duvar imal edilmektedir.

Şekil 6.23'te kesiti verilen bölgenin en elverişsiz zemin kesiti alınarak analiz yapılmıştır. Tünel çıkış aynasında yer alan elverişsiz zemin koşulları ile tarihi binalar sebebiyle alınan önlemler ve seçilen güçlendirme çalışmaları bölgeye has bir durum oluşturmuştur. Tünel, çıkış portaline doğru kazılmıştır. Son 18 m lik kısımda farklı bir teknik kullanılarak kazı yapılmış Şekil 6.24'teki kesit devam ettirilmiştir. Makas tüneline sonradan inşa edilen bu kesit yüzeye doğru olan 76 m lik kısmı kapsamaktadır. Son 18 m ye gelene kadar pilot tünel NATM yöntemiyle inşa edilmiştir. Son 18 m lik bölümde ise tünel tavanında çift sıra 18 m umrella arch çakılarak çatı oluşturulmuştur. Yüzeye çıkışta herhangi bir problemle karşılaşmamak için tek parça halinde rijit bir bölüm oluşturulmuştur. Tünel kazı stili ve aşaması değişmemiştir. Pilot tüneline imalatından sonra geniş kesitli tünelde ana taşıyıcı olarak orta duvar yapılmıştır. Orta duvar imalatı bitince genişletme kazılarıyla tünel kesiti tamamlanmıştır.



Şekil 6.23 : Süleymaniye Bölgesi Tünel Boykesit



ÖLÇEK : 1/100

Şekil 6.25 : T Tipi Tünel Kesiti

6.2.1.1 Tünel İnşaatı

Bölgede uygulanan tünel kesiti Şekil 6.24'te verildiği gibi kesişen tip tünel kesitidir. Yüzeyde herhangi bir deformasyona izin vermemek açısından geniş çaplı tünel kesitinin yol açacağı gerilmelere izin vermemek amacıyla kesişen tip tünel kesitine geçilmiştir.

İnşaat aşaması aşağıdaki gibidir;

1. Aşama:Orta tünel, üstyarı ve altyarı olmak üzere iki aşamada açılıp püskürtme beton imalatı yapılmaktadır.
2. Aşama: Orta tünel aksında betonarme duvar imalatı yapılmaktadır.
3. Aşama: Sol tüp üstyarı ve altyarı olmak üzere iki aşamada açılıp püskürtme beton imalatı yapılmaktadır.
4. Aşama: Sağ tüp üstyarı ve altyarı olmak üzere iki aşamada açılıp püskürtme beton imalatı yapılmaktadır.
5. Aşama: Tüm tünel kesiti nihai beton kaplamasıyla kaplanmıştır.

Tünel kazıları sırasında, kazıyı açıkta bekletmeden anında kaplama yapılmıştır. Üç boyutlu gevşeme etkilerini modelleyebilmek açısından zemine, cinsine göre gevşetme uygulanmıştır.

Yüzeyde herhangi bir deformasyona izin vermemek amacıyla üstteki dolgu tabakası ve Süleymaniye formasyonu tabakasına tünelin yüzeye çıkış bölgesinden enjeksiyon yapılmıştır. Bu enjeksiyon, zemin parametrelerinin betona yakın değerler tanımlanmasıyla tamamlanmıştır.

6.2.1.2 Plaxis Analizi

Tünel kesiti yukarıda sıralanan aşamaların programa tanıtılmasıyla tamamlanmıştır.

Kullanılan Parametreler:Yüzeye en yakın bölge en kritik kesim olduğu için bu kesit kullanılarak analiz yapılmıştır. Bölge zemin parametreleri Çizelge 6.5'te, tünel kaplama özellikleri ise Çizelge 6.6'da verildiği gibi kullanılmıştır.

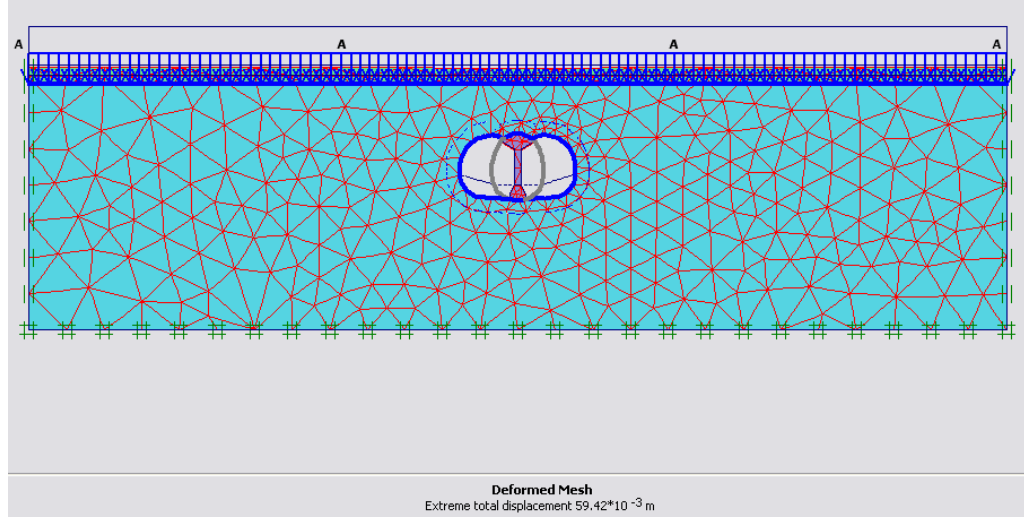
Çizelge 6.5: Kullanılan Zemin Parametreleri

Hardening Soil		Yapay Dolgu	Süleymaniye Formasyonu	Trakya Formasyonu
Type		Drained	Drained	Drained
γ_{unsat}	kN/m ³	18,00	20,00	26,00
γ_{sat}	kN/m ³	18,00	20,00	26,00
k_x	m/day	0,00	0,00	0,00
k_y	m/day	0,00	0,00	0,00
e_{init}	-	0,500	0,500	0,500
e_{min}	-	0,00	0,00	0,00
e_{max}	-	0,999	0,999	0,999
E_{50}^{ref}	kN/m ²	1.000E+04	5.000E+04	4.950E+05
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	1.000E+04	5.000E+04	4.735E+05
Power(m)	-	0,500	0,500	0,500
c_{ref}	kN/m ²	1,00	20,00	25,00
ϕ	°	23	25,00	35,00
ψ	°	0,00	0,00	0,00
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	3.000E+04	1.500E+05	1.485E+06
$\nu_{\text{ur}}^{(\text{nu})}$	-	0,35	0,35	0,250
p^{ref}	kN/m ²	100.000	100,00	100,00
$c_{\text{increment}}$	kN/m ²	0,00	0,00	0,00
y_{ref}	m	0,00	0,00	0,00
R_f	-	0,900	0,900	0,900
T_{str}	kN/m ²	0,00	0,00	0,00
R_{inter}	-	0,64	0,64	0,580
δ_{inter}	m	0,00	0,00	0,00
Interface permeability		neutral	neutral	neutral

Çizelge 6.6: Tünel Kaplaması Özellikleri

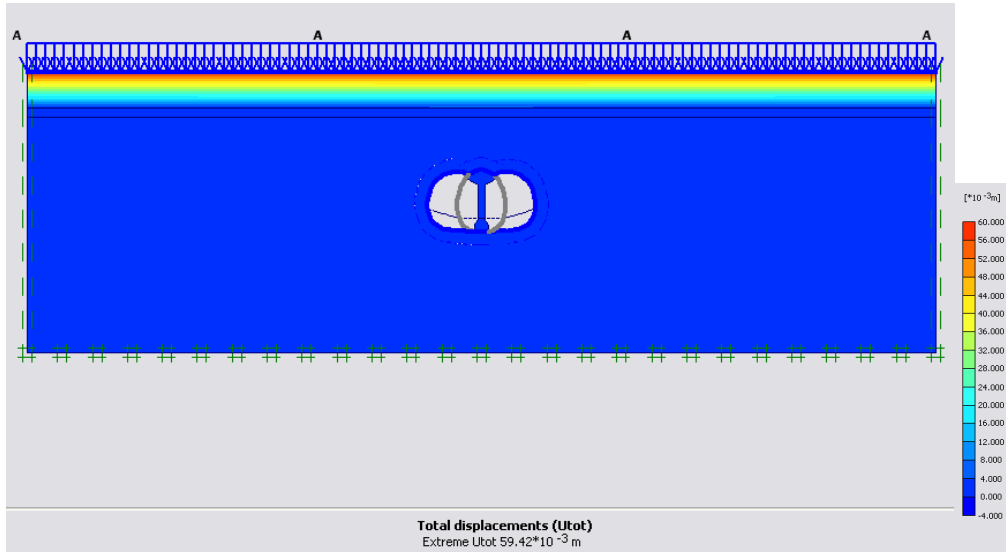
N o	Identification	EA kN/m ²	EI kNm ² /m	w kN/m/m	v -	Mp kNm/m	Np kN/m
1	Shotocrete (t=30 cm) (yumuşak)	3.000E+06	2.250E +04	4.050	0,00	1E15	1E15
2	Shotocrete (t=30 cm) (katı)	8.550E+06	6.413E +04	4.050	0,00	1E15	1E15
3	Radye (t=50 cm)	1,425E7	2,9688E5	7,00	0,00	1E15	1E15
4	İç Kaplama (t=50 cm)	1,425E7	2,9688E5	6.75	0,00	1E15	1E15

Bölge Zemini İyileştirilmeden Önce (Enjeksiyondan İşleminden Önce); En üstte bulunan dolgu tabakası ile Süleymaniye Formasyonu tabakasının iyileştirilmemiş (enjeksiyon verilmemiş) durumu analiz yapılarak enjeksiyon uygulanmış durumunun analiziyle karşılaştırılacaktır. Bu amaçla zemindeki çeşitlilik ve zemin türünün tünel kesitine nasıl etkidiğini hesap edeceğiz.

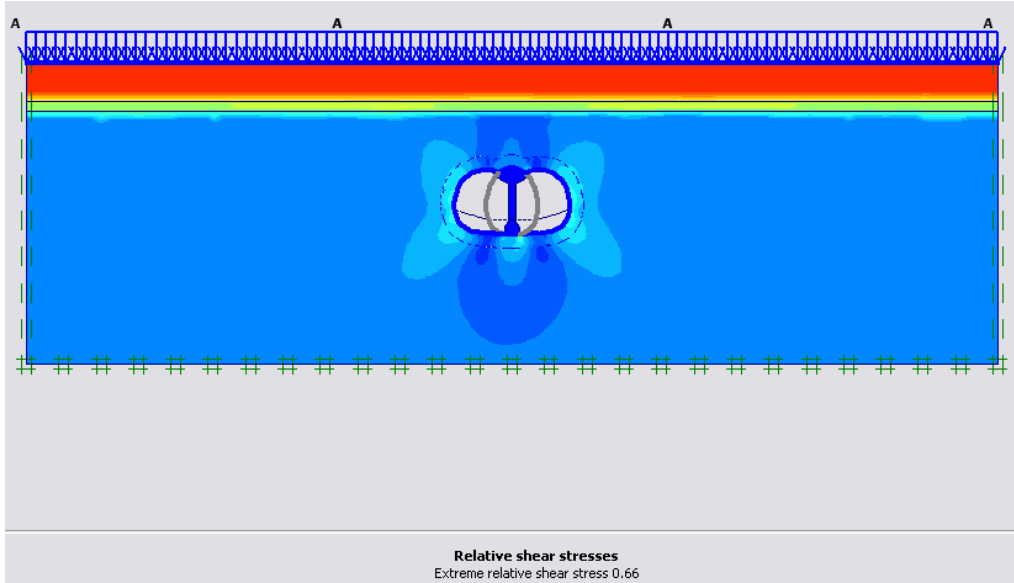


Şekil 6.26 : C1 tipi tünel inşaatı şekil değiştirme diyagramı

Yapılan analiz sonucunda, ortaya çıkan diyagramda toplam 59.42 mm deformasyon olduğu görülmektedir. Şekil 6.26’da görüldüğü üzere oluşan deformasyon yüzeydeki tabakada etkili olmuştur.

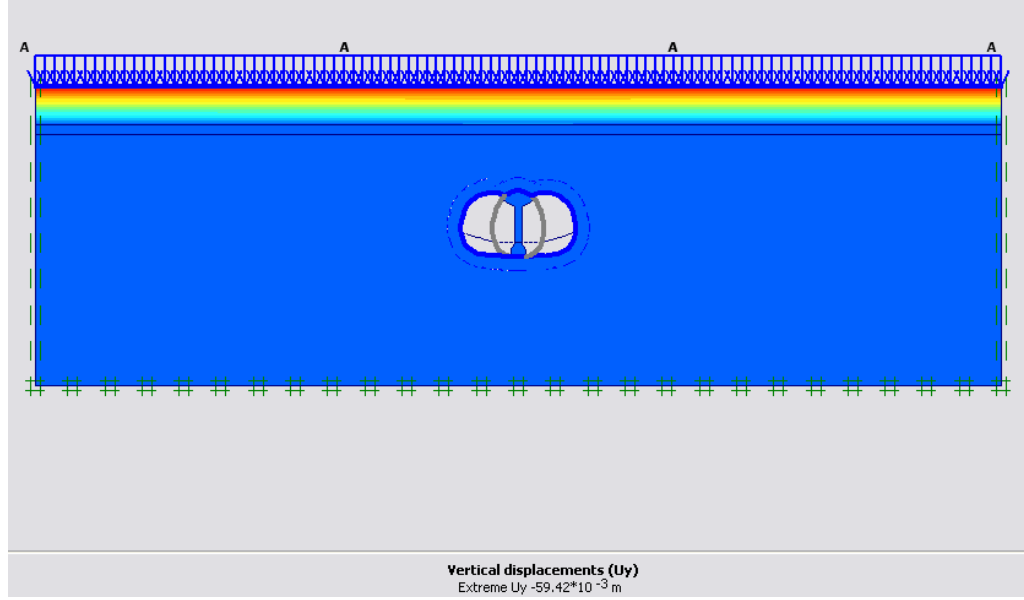


Şekil 6.27 : C1 tipi tünel inşaatı sonrası toplam yer değıştirme

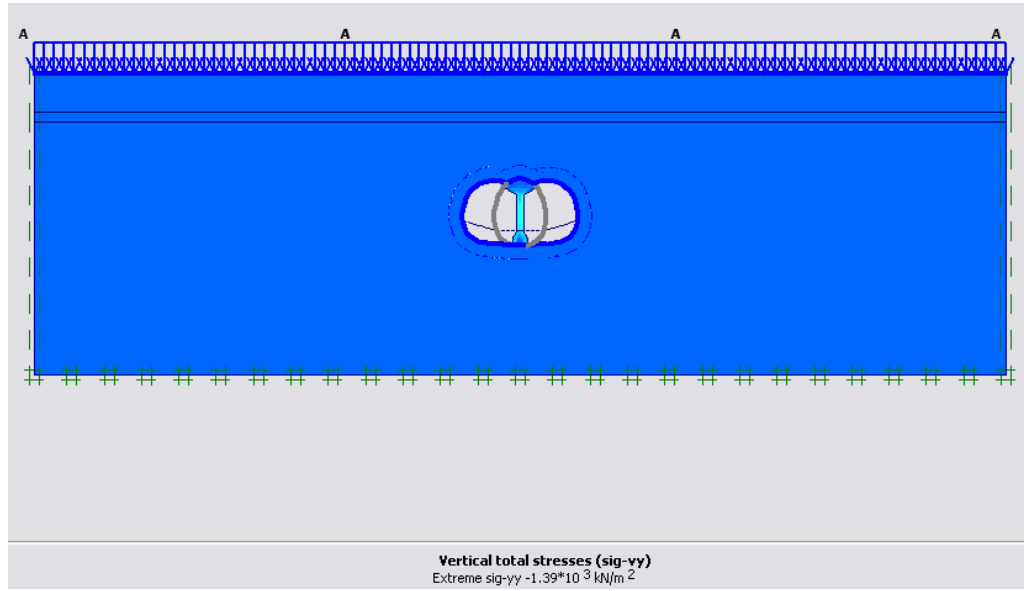


Şekil 6.28 : C1 tipi tünel inşaatı rölatif kesme gerilmesi

C1 tüneli etrafında oluşan gerilmelerin dağılımı, Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’de yer alan analiz sonuçlarında tünelin hemen üstünde değil yüzeydeki tabakalarda oluşmaktadır. Tünelin etrafındaki kesme gerilmesinin değeri 0.66 olarak ölçülmüş analize bu şekilde yansımıştır. Arazideki toplam yer değıştirme değeri Şekil 6.29’da 59.42 mm olarak gösterilmektedir.

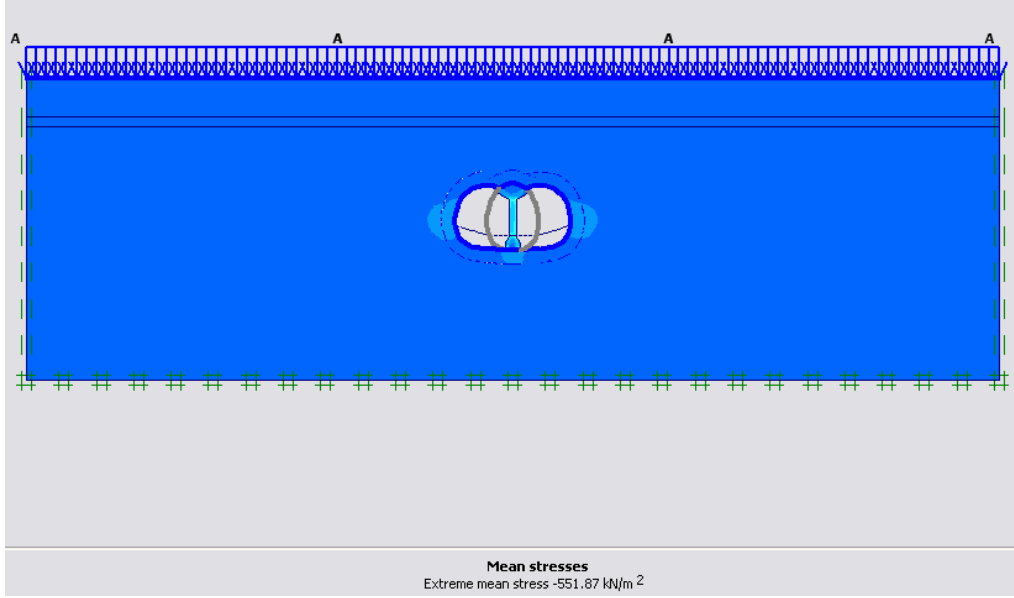


Şekil 6.29 : C1 tipi tünel düşey yer değiştirme



Şekil 6.30 : C1 tipi tünel düşey toplam gerilme

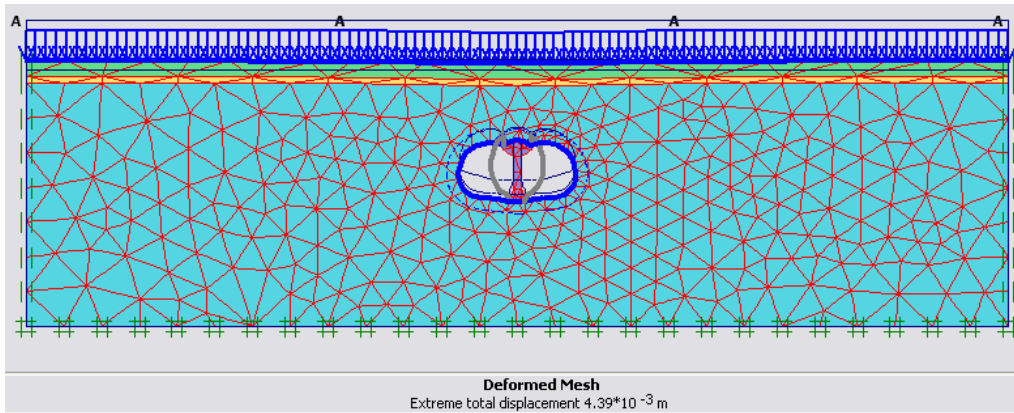
Şekil 6.29’da yer alan analiz sonucunda düşey yer değiştirmenin $-59.42 \cdot 10^{-3}$ m mertebesine geldiği görülmektedir. Şekil 6.30’de ise toplam düşey gerilme değerinin $-1.39 \cdot 10^{-3}$ kN/m² değerinde olduğu verilmektedir.



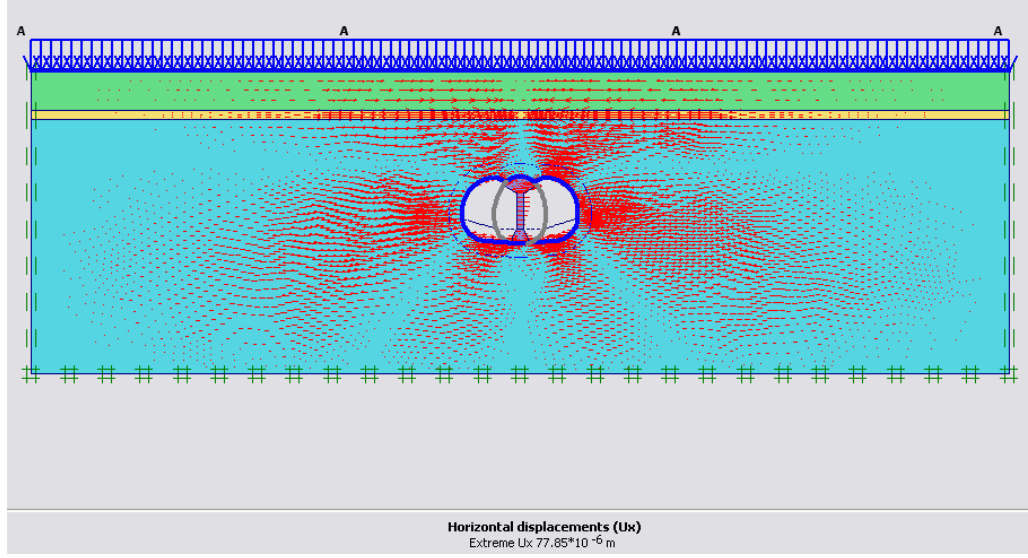
Şekil 6.31 : C1 tipi tünel toplam gerilme

Tünelin yüzeye çıkış bölgesinden enjeksiyon yapılmadan önce, toplam yer değiştirme değeri 59.42 m, düşey toplam gerilme is $1.39 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$ olarak bulunmuştur. Bu değerler bize tünelimizi güvenli bir şekilde açamayacağımızı göstermektedir.

Zemin İyileştiresi Yapıldıktan Sonra (Enjeksiyondan İşleminde Sonra); Zemin profilinde üst katmanda bulunan dolgu tabakası ile kil tabakasına enjeksiyon yöntemi kullanılarak iyileştirme çalışması yapılmıştır. Bu çalışma, yüzeyde mevcut bulunan tarihi binaları kazı sırasında meydana gelebilecek deformasyonlardan korumak için yapılmıştır.

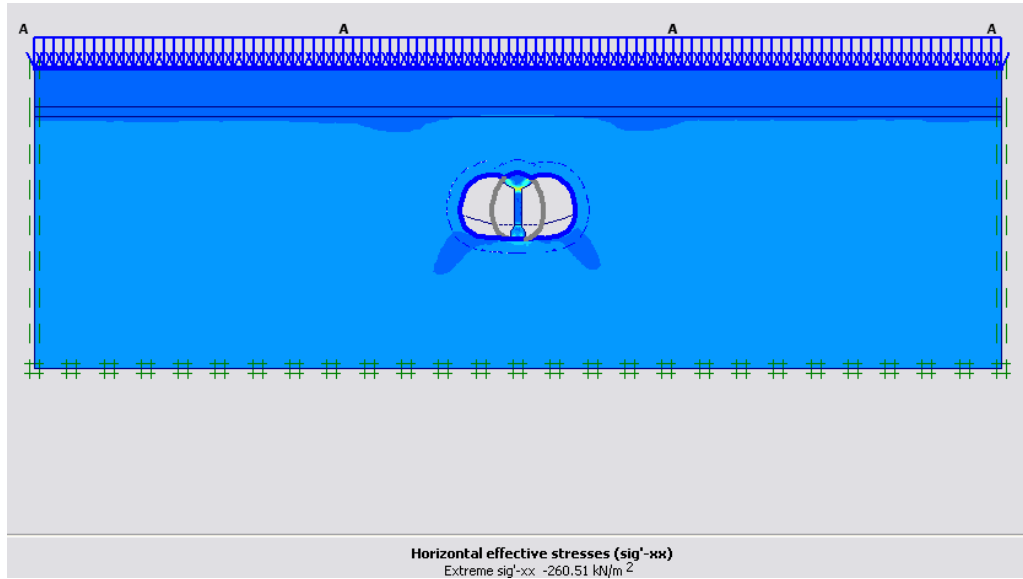


Şekil 6.32 : C1 tipi tünel toplam şekil değiştirme

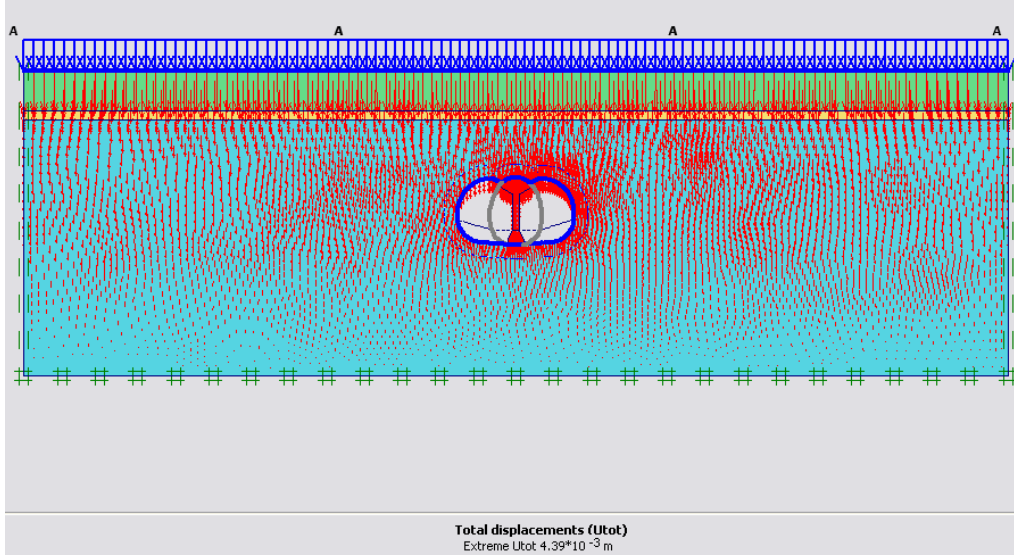


Şekil 6.33 : C1 tipi tünel yatay yer değiştirme

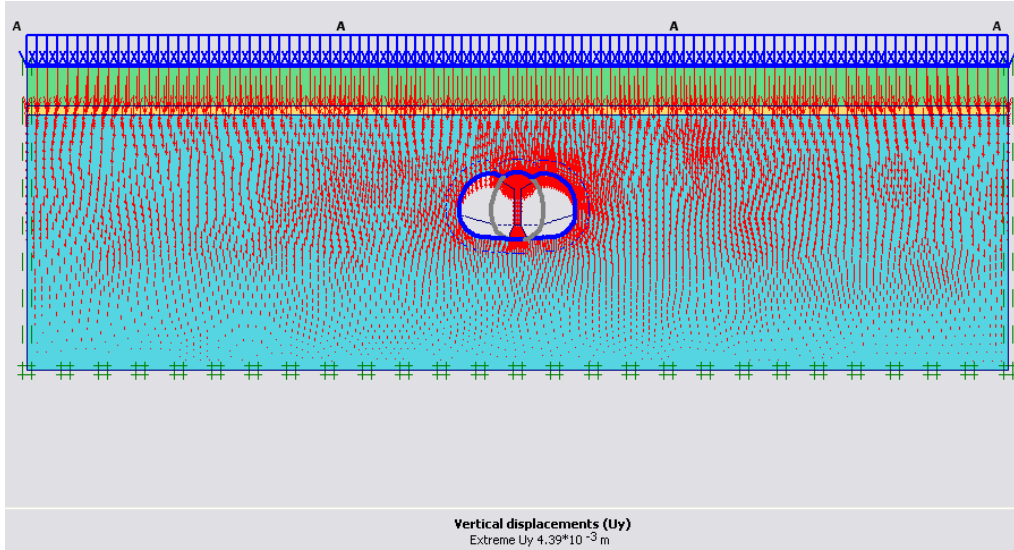
Üstteki dolgu tabakası kısmen beton gibi davrandığından özellikleri iyileştirilmiş ve analiz bu şekilde yapılmıştır. Şekil 6.32’te toplam şekil değiştirme $4.39 \cdot 10^{-3}$ m olarak görülmektedir. Şekil 6.33’te görüldüğü gibi yatay yer değiştirme değeri $77.85 \cdot 10^{-6}$ m olarak hesap edilmiştir. Yatay efektif gerilme değeri ise Şekil 6.34’te görüldüğü gibi -260.51 kN/m^2 mertebesinde.



Şekil 6.34 : C1 tipi tünel yatay efektif gerilme

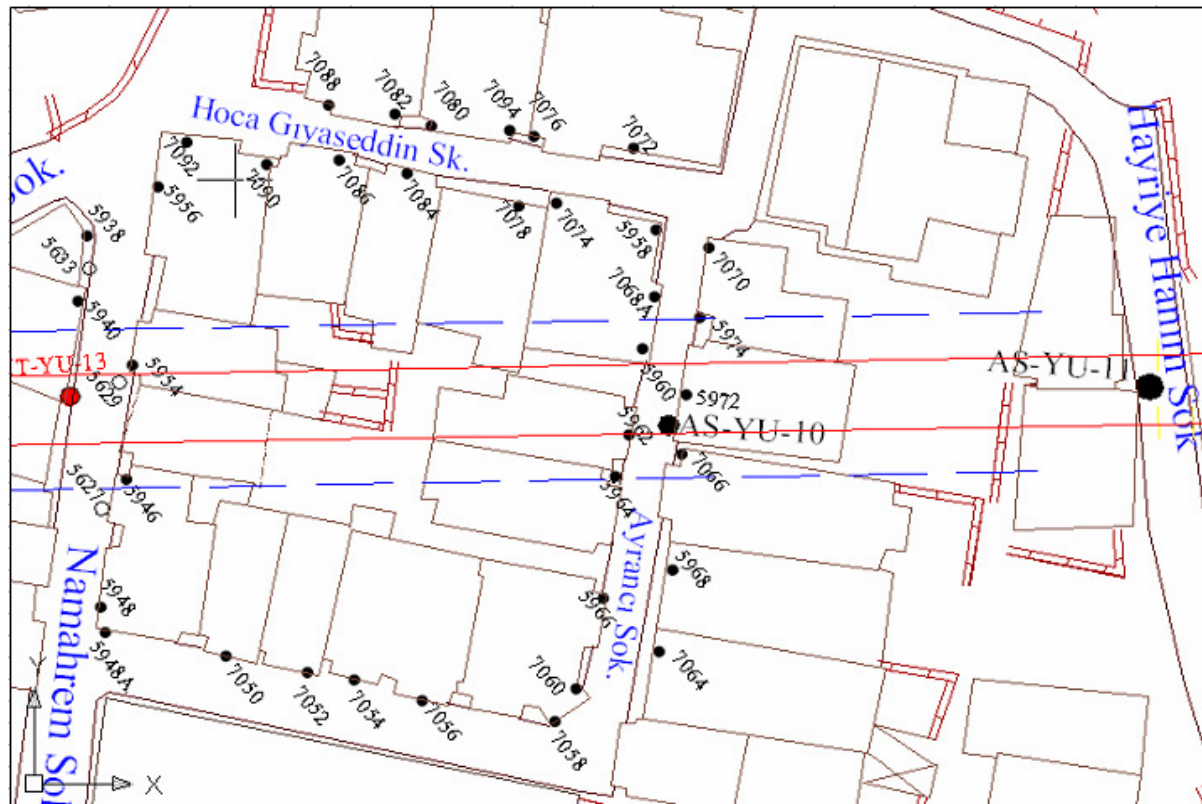


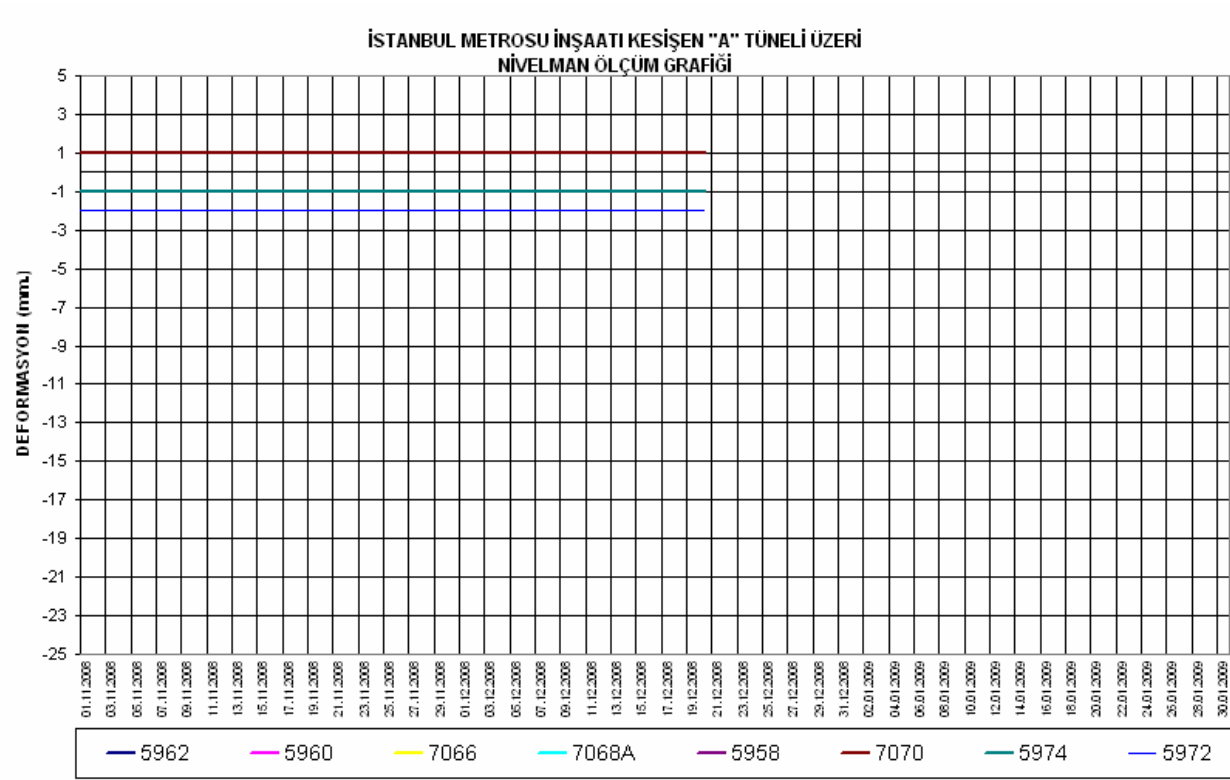
Şekil 6.35 : C1 tipi tünel toplam yer değiştirme



Şekil 6.36 : C1 tipi tünel düşey yer değiştirme

Tünelin en hassas bölümü, 6 m et kalınlığındaki yüzeye çıkış bölgesidir. Bu alandan enjeksiyon yapılarak bölge emniyetli hale getirilmiş, Süleymaniye Formasyonu'na ve dolgu tabakasına ait davranışların oluşması ortadan kaldırılmıştır. Analiz sonuçlarından da görüleceği üzere düşey yer değiştirme 4.39 mm düzeyinde kalmıştır. Bu durum, deformasyon ölçümleriyle hemen hemen aynı değerin elde edildiğini göstermektedir. Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da bu değerler okunabilmektedir.





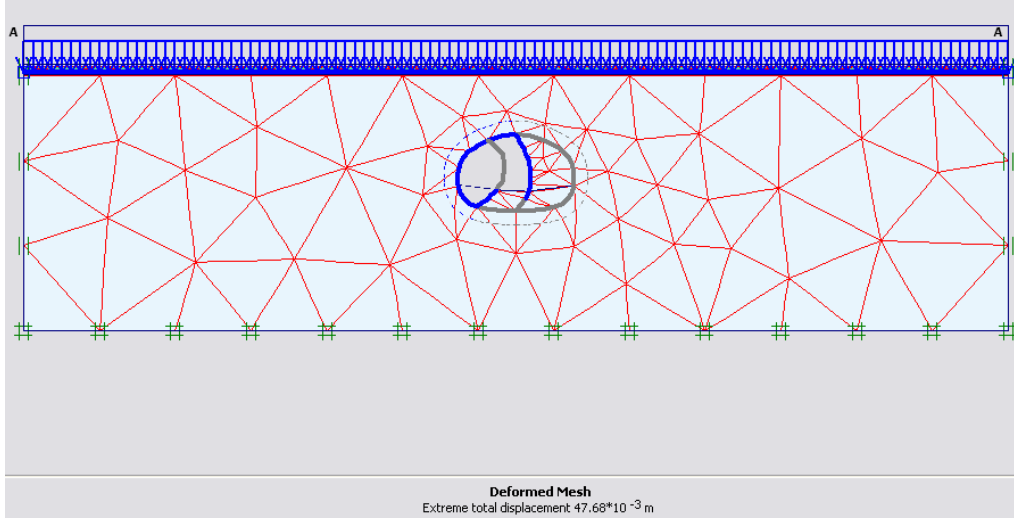
Şekil 6.38 : Nivelman ölçüm değerleri

Şekil 6.37’de tünel üstünde yüzeyde oluşturulan deformasyon noktaları görülmekle birlikte, inşaat sırasında alınan maksimum deformasyon değerleri Şekil 6.38’da verilmektedir. Aynı zamanda tünel içinden yapılan konverjans ölçümlerinden alınan sonuçlardan maksimum olan değeri Şekil 6.39’da verilmektedir.

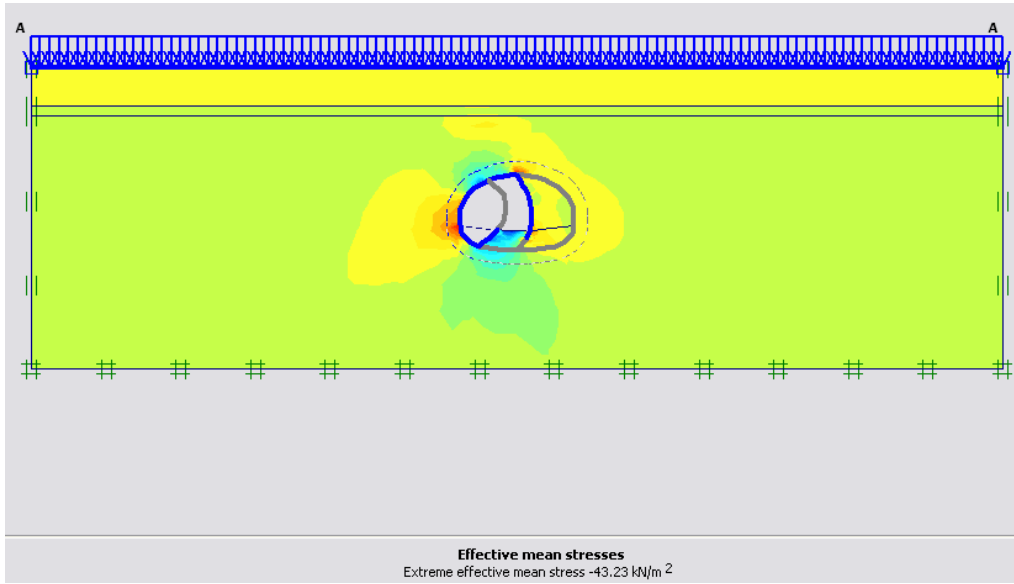
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
1	İSTANBUL BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ												1	
2	İSTANBUL METROSU YENİKAPI-UNIKAPANI ARASI İNŞAATI													
3	TÜNEL İÇİ KONVERJANS ÖLÇÜMLER GÜNLÜK RAPORU													
4	TÜNEL			TÜNEL : SUKA				KİLOMETRE 7+092,35			SAYFA NO 1	2-	-3	
5														
6	TARİH	KONVERJANS OKUMALARI					DEFORMASYONLAR (MM)							
7		1-2	1-3	1-4	1-5	2-3	4-5	1-2	1-3	1-4	1-5	2-3	4-5	
8	İLK OKUMA					.86140		İLK OKUMA TARİHİ : 08.11.2007						
9	08.11.2007					.86140		0.00	0.00			0.00		
10	26.11.2007					.85865						2.75		
11	28.11.2007					.85825						3.15		
12	03.12.2007					.85780						3.60		
13	05.12.2007					.85775						3.65		
14	11.12.2007					.85745						3.95		
15	16.12.2007					.85715						4.25		
16	28.12.2007					.85760						3.80		
17	03.01.2008					.85730						4.10		
18	05.01.2008					.85755						3.85		
19	10.01.2008					.85770						3.70		
20	17.01.2008					.85740						4.00		
21	22.01.2008					.85785						3.55		
22	24.01.2008					.85790						3.50		
23	05.02.2008					.85770						3.70		
24	11.02.2008					.85765						3.75		
25	18.02.2008					.85780						3.60		
26	27.02.2008					.85760						3.80		
27														
28														
29														
30														
31														
32														
33														
34						UYGULAMA				ONAY				
35														
36														

Şekil 6.39 : Süleymaniye Bölgesi tünel içi konverjans ölçümleri sonucu gerçekleşen maksimum deformasyon 4.25 mm olarak ölçülmüştür.

Aynı Bölgeye T Tipi Tünel Kesiti Uygulaması: Tünelin yüzeye ulaştığı bölge olan analiz ettiğimiz bu alanda farklı tünel kesitlerinden nasıl bir sonuç elde edileceğini kontrol etmek amacıyla, aynı kesite T tipi tünel inşaatı uygulaması analiz edilmiştir.

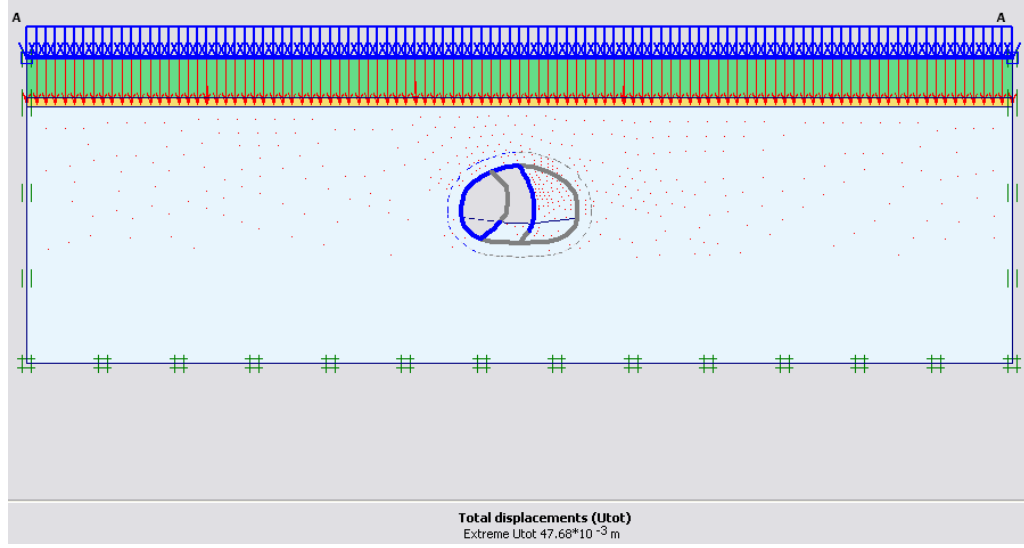


Şekil 6.40 : T tipi tünel ikinci bölüm kazısı deformasyonu

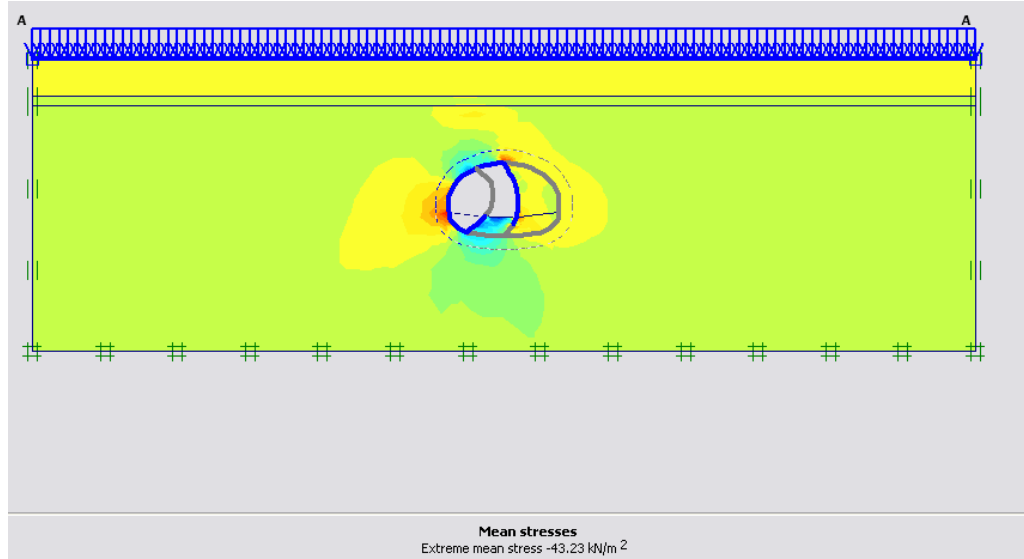


Şekil 6.41 : T tipi tünel ikinci bölüm kazısı efektif gerilme

Şekil 6.40'da üç parçalı olarak kazılan tünelin ikinci bölüm kazısı sırasında deformasyonun $47.68 \cdot 10^{-3}$ mertebesine ulaştığı görülmektedir. Efektif gerilme ise Şekil 6.41'de verilen analiz sonucuna göre -43.23 kN/m^2 mertebesine ulaşmıştır.

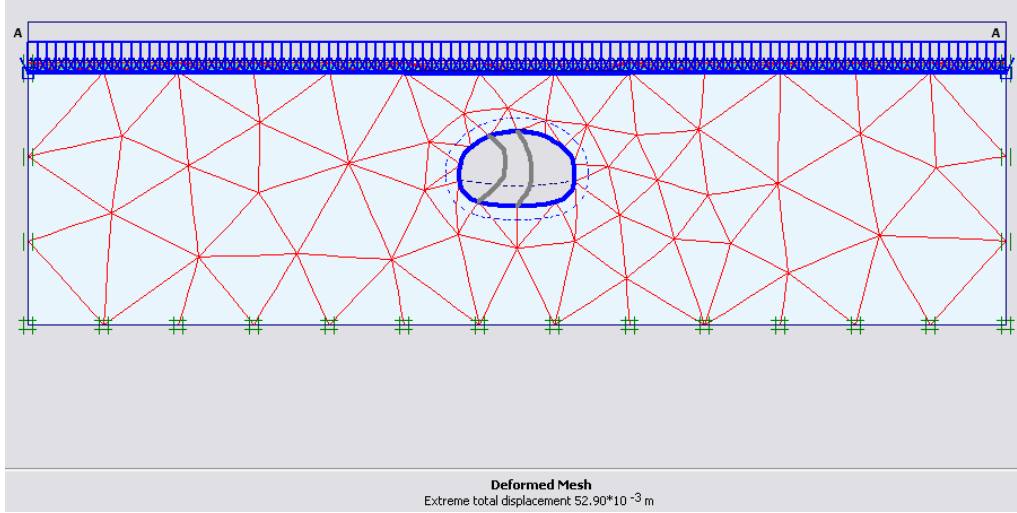


Şekil 6.42 : T tipi tünel ikinci bölüm kazısı toplam yer değıştirme

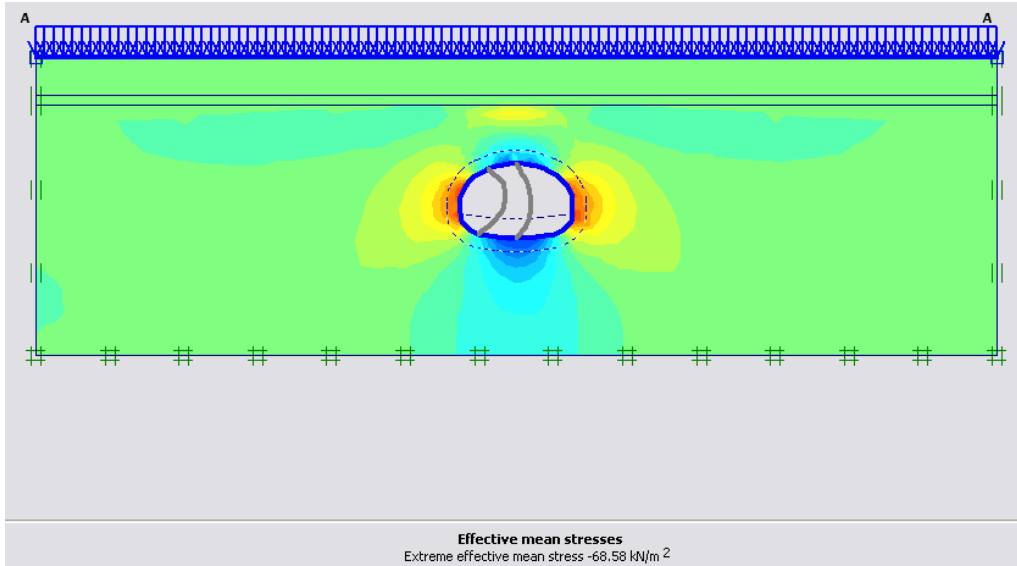


Şekil 6.43 : T tipi tünel ilk bölüm kazısı toplam gerilme

Tünelin ikinci kademesi inşaatı sırasında toplam yer değıştirme değeri ulaştığı nokta $47.68 \cdot 10^{-3}$ m mertebesidir. Geçici kaplamanın en zayıf hali olan ikinci kademe inşaatında ringin bir an önce tamamlanması gerekmektedir. Şekil 6.43 ise ikinci kademe kazısındaki toplam gerilmeyi göstermekle birlikte bu mertebe -43.23 kN/m^2 dir.

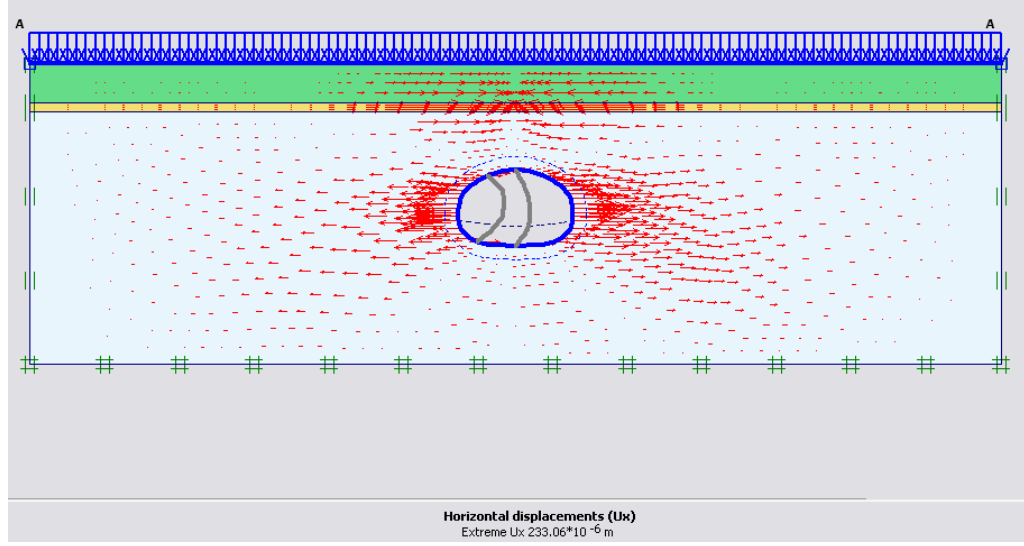


Şekil 6.44 : T tipi tünel tamamlanmış kazı deformasyon diyagramı

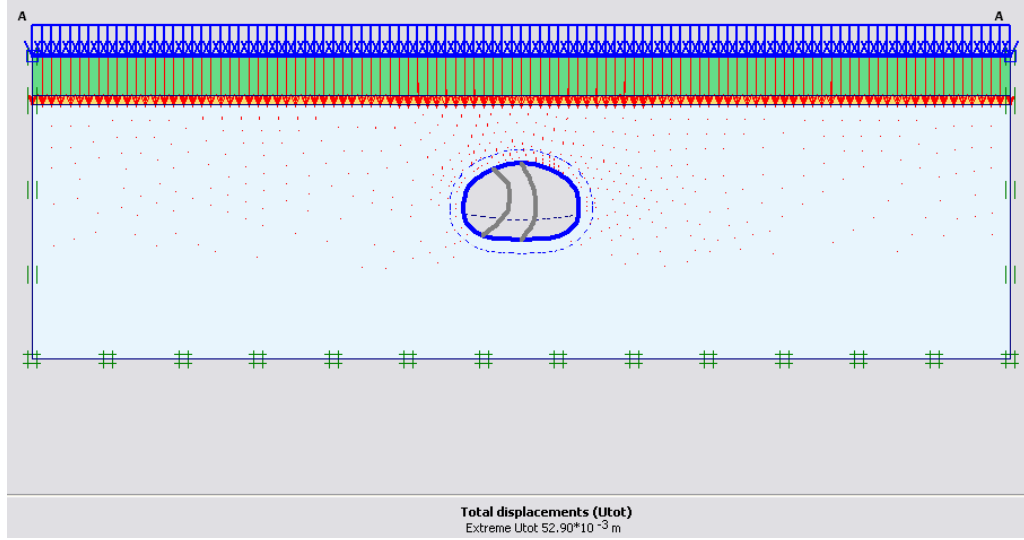


Şekil 6.45 : T tipi tünel tamamlanmış kazı efektif gerilme

T tipi tünel ringi tamamlandıktan sonra oluşan deformasyon ve efektif gerilme değerleri Şekil 6.44 ve Şekil 6.45’de görülmektedir. Bu değerler ile Şekil 6.40 ve Şekil 6.41’deki değerler karşılaştırıldığında deformasyonun önemli bir kısmının ikinci kademe kazı sırasında oluştuğu görülmektedir.

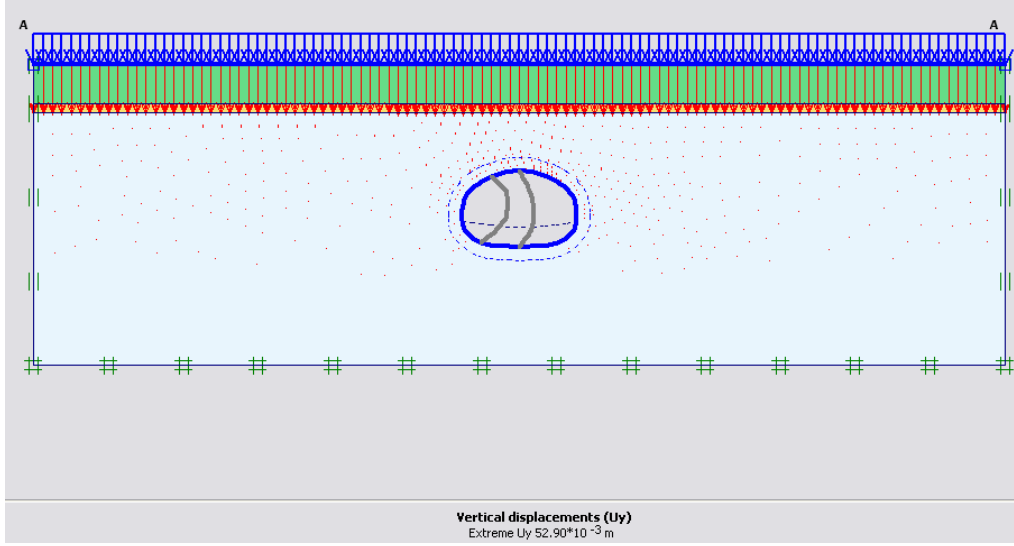


Şekil 6.46 : T tipi tünel tamamlanmış kazı yatay yer değiştirme



Şekil 6.47 : T tipi tünel tamamlanmış kazı toplam yer değiştirme

T tipi tünel ringi tamamlandığında yatay yer değiştirme değeri Şekil 6.46'daki analiz sonucunda verilmektedir. Şekil 6.47'de ise toplam yer değiştirme değerinin $52.90 \cdot 10^{-3}$ m mertebesinde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.48 : T tipi tünel tamamlanmış kazı düşey yer değiştirme

Geniş kesitli tünel, parçalı kazıya dönüştürülürken seçilen yöntem, sonucu da etkilemektedir. Aynı bölgede parçalı da olsa T tipi tünelin uygulanması sonucu deformasyon ve gerilme değerleri çok yüksek çıkmaktadır. Düşey yer değiştirme 52.9 mm ye varan değere çıkmaktadır.

6.2.2 Yenikapı Bölgesi Tünel Uygulaması

Tarihi yarımada bulunan bu bölgede tünel inşaatı, şehir tünelciliğinin getirdiği zorlukların da katılmasıyla daha da zorlaşmış durumdadır. Bölgenin yapısı ve kazı çalışmaları sonucunda, bu alanın yüzyıllar öncesinde liman olduğu, denize doğru oluşan yer hareketleri ve birikmeler sonucunda bölgenin oluştuğu anlaşılmaktadır.

Metro tünelleri bu bölgede, kilaşı-silttaşı ve kumtaşı aralanmasından oluşan Trakya Formasyonu ile bunların üzerine uyumsuz olarak gelen değişik kalınlıktaki Güngören Formasyonu içerisinde yer almaktadır. Güngören Formasyonu, katı-çok katı kıvamdaki plastik killerle bunlar arasındaki geçirimli kum-çakıl mercekleri ve ince kireçtaşı tabakalarından oluşmaktadır. Güngören Formasyonu ve üzerindeki alüvyon ile yapay dolgu gevşek yapılı ve geçirgen niteliktedir.

Tünel üzerindeki örtü kalınlığı 11 m kadardır. Aşağıdan yukarıya doğru kil, çakıllı denizel alüvyon ve yapay dolgudan oluşmaktadır. Kilin kalınlığı 3 – 5 m, alüvyonun 3 – 4 m arasındadır. Tabanda, Trakya Formasyonunun ayrılmış kilaşı – siltli kumtaşlarına girilmektedir.

Bundan dolayı bölgede yapılan sondaj verileri kullanılarak çıkarılmış zemin kesidine, aç-kapa olarak inşa edilen tünel bölgesinin T tipi halinde inşaatı Plaxis analizinde işlenmiştir. Analizde, kilin su almadan önceki davranış ve stabilitesiyle, su altında kaldıktan sonraki davranışı modellenmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

Bölgede yapılan sondajlar neticesinde; LL=99, PL=25 ve $I_p=74$ olarak bulunmuştur. Bölüm 3'te yer alan;

$$\dot{S}P=2.16 \times 10^{-3} I_p^{2.44} \quad (3.2)$$

formülünden yararlanarak bu bölgedeki kilin şişme potansiyeli $\dot{S}P= \% 79$ bulunmaktadır. Bu değer Çizelge 3.3. verilerine bakıldığında şişme derecesinin çok yüksek olduğunu göstermektedir.

Aç-kapa olarak inşa edilen tünelin normal geniş kesitli tünel olarak inşasının mümkün olabilirliğini araştırmak için Plaxis sonlu elemanlar programında modellenmiştir.

Bölge kili, suya doymuş ve kuru olmak üzere iki şekilde modellenmiştir. Bu analiz bize, aynı bölgede, yeraltı su seviyesi altında kilin nasıl davrandığı ve tünel inşaatına nasıl etki ettiğini gösterecektir.

6.2.2.1 Kullanılan Parametreler

Yenikapı bölgesinde bulunan kilin şişme özelliklerinin programa tanıtılabilmesi için soft soil modeli seçilerek analiz yapılmıştır. Bölgedeki marn zemin için kullanılan parametreler Çizelge 6.7'de verilmektedir.

Çizelge 6.7: Kullanılan Zemin Parametreleri (Süleymaniye Formasyonu)

Soft Soil		Marn
Type		Drained
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
k_x	m/day	0,00
k_y	m/day	0,00
e_{init}	-	0,50
e_{min}	-	0,00
e_{max}	-	999,0
λ	-	0.10
κ	-	0.02
c	kN/m ²	20,0
ϕ	°	20,0
ψ	°	0,00
$v_{\text{ur}}^{(\text{nu})}$	-	0,150
K_o^{nc}	-	0.577
R_{inter}	-	0,64
δ_{inter}	m	0,00
Interface permeability		neutral

Tünel inşaatının olduğu alanda bulunan zemin kesidindeki diğer zemin çeşitlerinin malzeme özellikleri Çizelge 6.8’de verildiği gibi kullanılmıştır. Ayrıca, tünel kaplaması özellikleri de Çizelge 6.9’da yer aldığı gibi alınmıştır.

Çizelge 6.8: Kullanılan Zemin Parametreleri

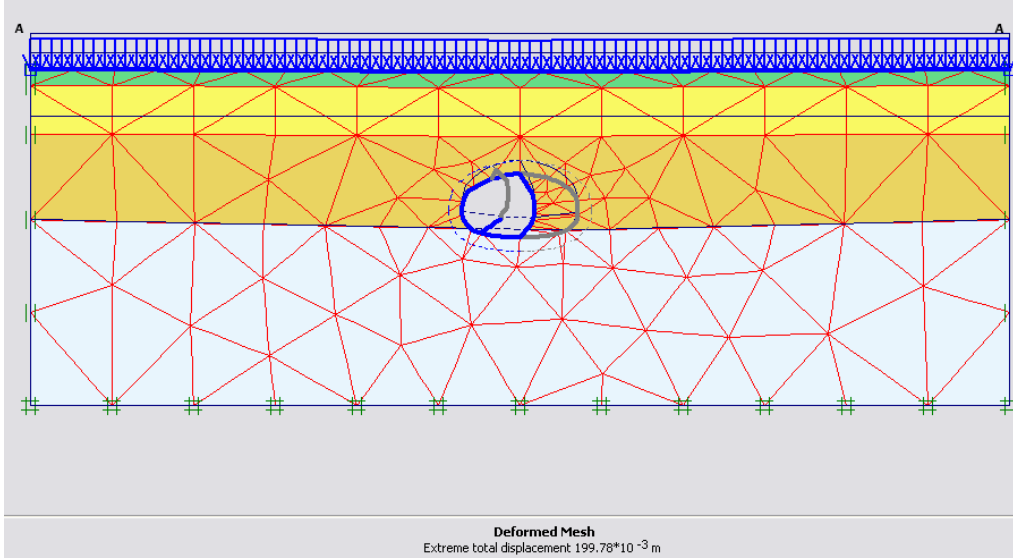
Hardening Soil		Yapay Dolgu	Aşırı Derecede Ayırılmış Kum-Kıltaşı İçerikli Trakya Formasyonu	Trakya Formasyonu
Type		Drained	Drained	Drained
γ_{unsat}	kN/m ³	18,00	20,00	25,00
γ_{sat}	kN/m ³	18,00	20,00	25,00
k_x	m/day	0,00	0,00	0,00
k_y	m/day	0,00	0,00	0,00
e_{init}	-	0,500	0,500	0,500
e_{min}	-	0,00	0,00	0,00
e_{max}	-	0,999	0,999	0,999
E_{50}^{ref}	kN/m ²	1.000E+04	1.000E+04	1.800E+05
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	1.000E+04	1.000E+04	1.800E+05
Power(m)	-	0,500	0,500	0,500
c_{ref}	kN/m ²	1,00	0,00	50,00
ϕ	°	23	25,00	35,00
ψ	°	0,00	0,00	0,00
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	3.000E+04	3.000E+04	5.400E+05
$\nu_{\text{ur}}^{(\text{nu})}$	-	0,35	0,35	0,200
p^{ref}	kN/m ²	100.000	100,00	100,00
$c_{\text{increment}}$	kN/m ²	0,00	0,00	0,00
y_{ref}	m	0,00	0,00	0,00
R_f	-	0,900	0,900	0,900
T_{str}	kN/m ²	0,00	0,00	0,00
R_{inter}	-	0,64	0,64	1,00
δ_{inter}	m	0,00	0,00	0,00
Interface permeability		neutral	neutral	neutral

Çizelge 6.9: Tünel Kaplaması Özellikleri

No	Identification	EA kN/m ²	EI kNm ² /m	w kN/m/m	ν -	Mp kNm/m	Np kN/m
1	Shotcrete (t=30 cm)(yumuşak)	3.000E+06	2.250E+04	4.050	0,00	1E15	1E15
2	Shotcrete (t=30 cm) (katı)	8.550E+06	6.413E+04	4.050	0,00	1E15	1E15
3	İç kaplama (t=50 cm)	1,425E7	2,9688E5	6.750	0,00	1E15	1E15
4	Radye (t=50 cm)	1,425E7	2,9688E5	7,00	0,00	1E15	1E15

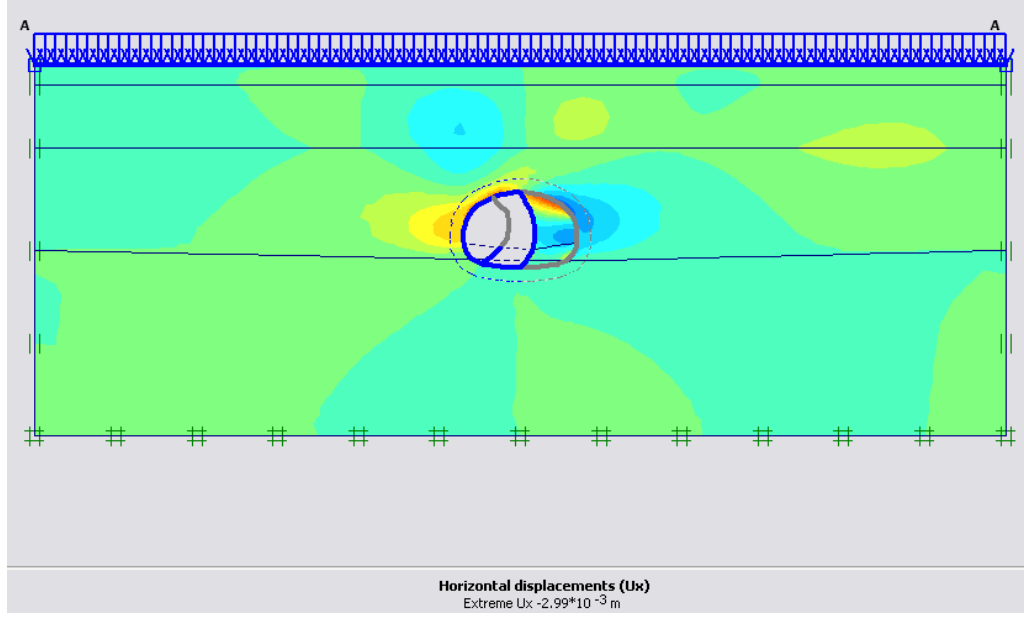
6.2.2.2 Yer Altı Su Seviyesi Bulunmaksızın Yapılan Analiz (Kuru Durum)

Bölgedeki marnın suyla etkileşime girdiğinde verdiği tepkimeleri değerlendirebilmek adına bölge ilk önce su olmadan analiz programına tanımlanmıştır. Bu durumun incelenmesi sonucunda aşağıda gösterilen sonuçlar alınmıştır.



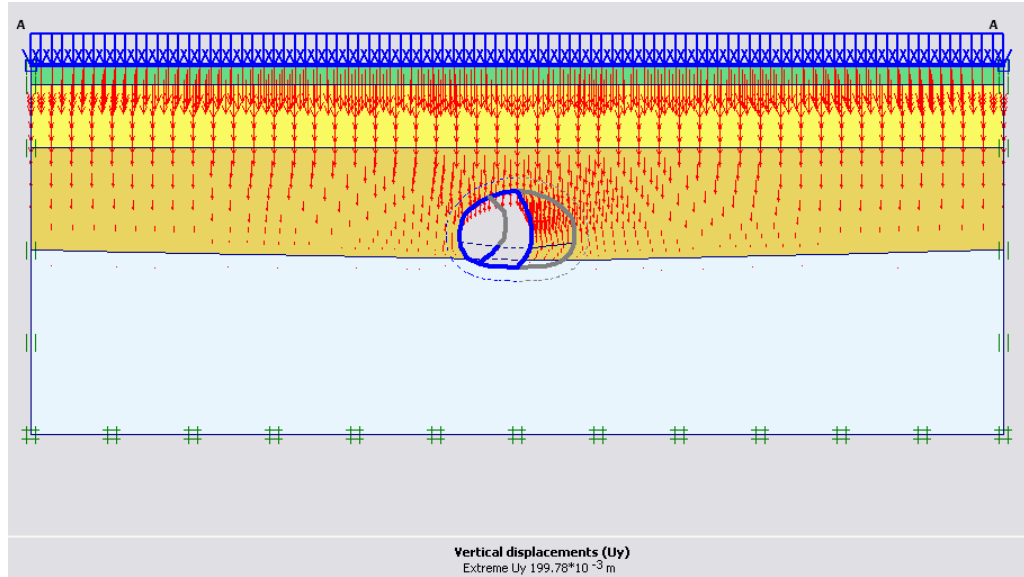
Şekil 6.49 : T tipi tünel ikinci bölüm kazısı deformasyon diyagramı

T tipi tünel ikinci bölüm kazısı sırasında alınan deformasyon değerinin $199.78 \cdot 10^{-3}$ m mertebesine ulaştığı Şekil 6.49’da yer alan analiz sonucunda görülmektedir.

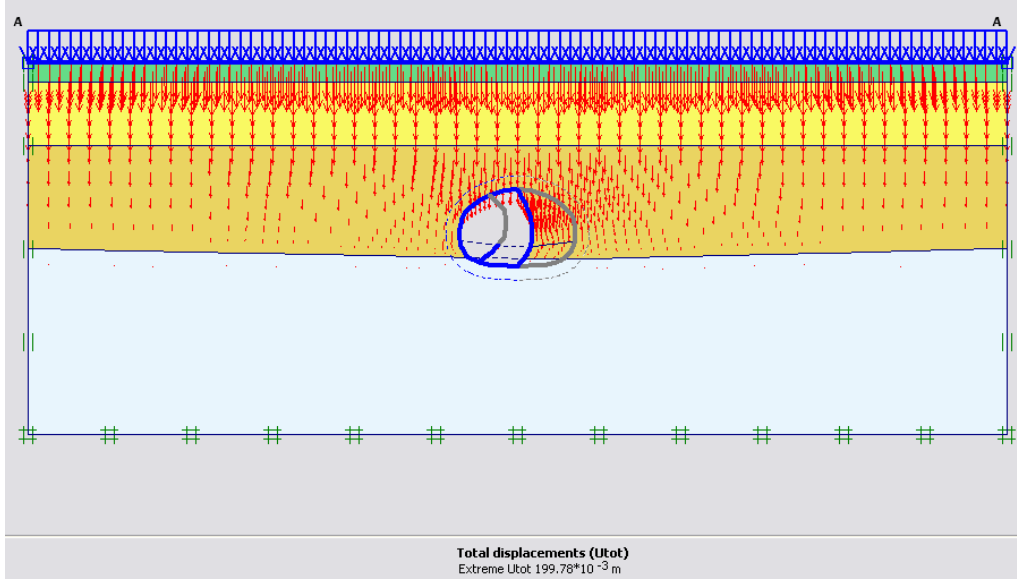


Şekil 6.50 : T tipi tünel ikinci bölüm kazısı yatay yer değiştirme

Şekil 6.50’den görüldüğü üzere ikinci bölüm kazısı sırasında yatay yer değiştirme oranı $-2.99 \cdot 10^{-3}$ değerine ulaşmıştır. Düşey yer değiştirme değeri ise Şekil 6.51 verilmekte olup $199.78 \cdot 10^{-3}$ m mertebesinde yani toplam yer değiştirmeye aynı değerdedir.

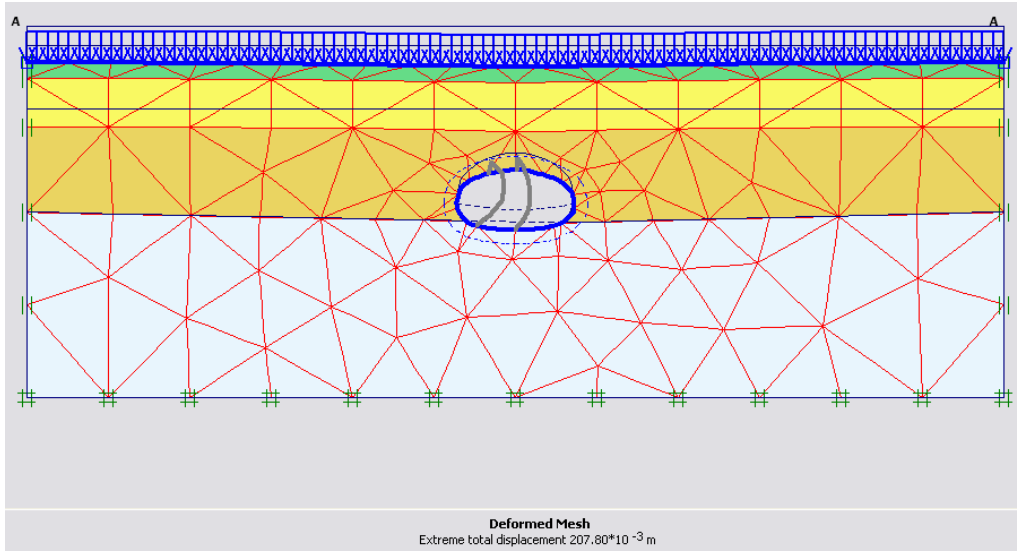


Şekil 6.51 : T tipi tünel ilk bölüm kazısı düşey yer değiştirme

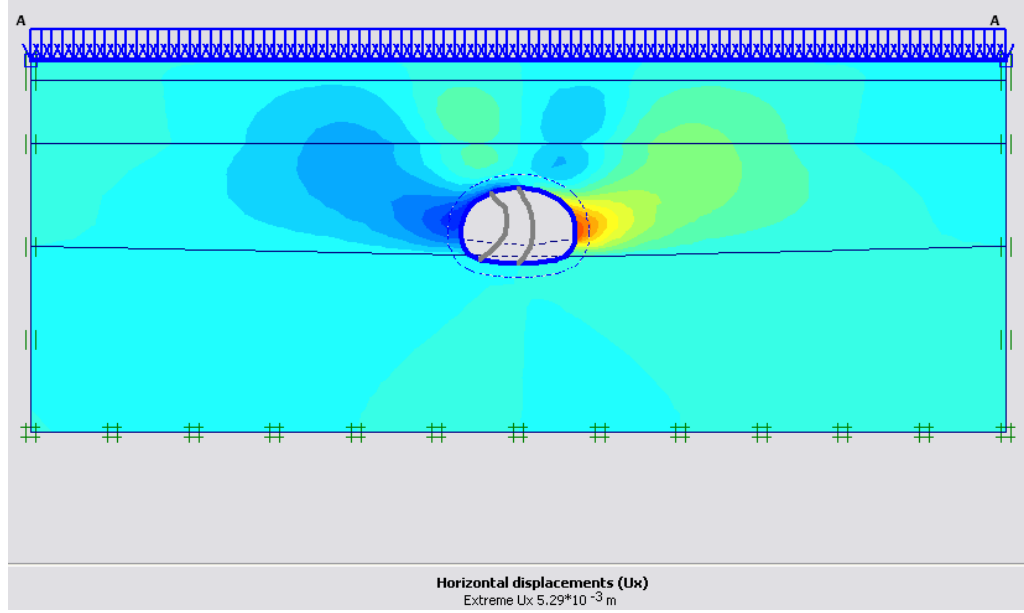


Şekil 6.52 : T tipi tünel ikinci bölüm kazı toplam yer değıştirme

İlgili alanda parçalı kazı yapılarak gerilmeler azaltılmaya çalışılmıştır. İkinci bölüm püskürtme beton tabakası tamamlandıktan sonra toplam yer değıştirme değeri 199.78 m mertebesine çıkmıştır. Bu durum Şekil 6.53'deki analiz sonucunda görüldüğü gibi açılan tünel boşluğuna doğrudur.

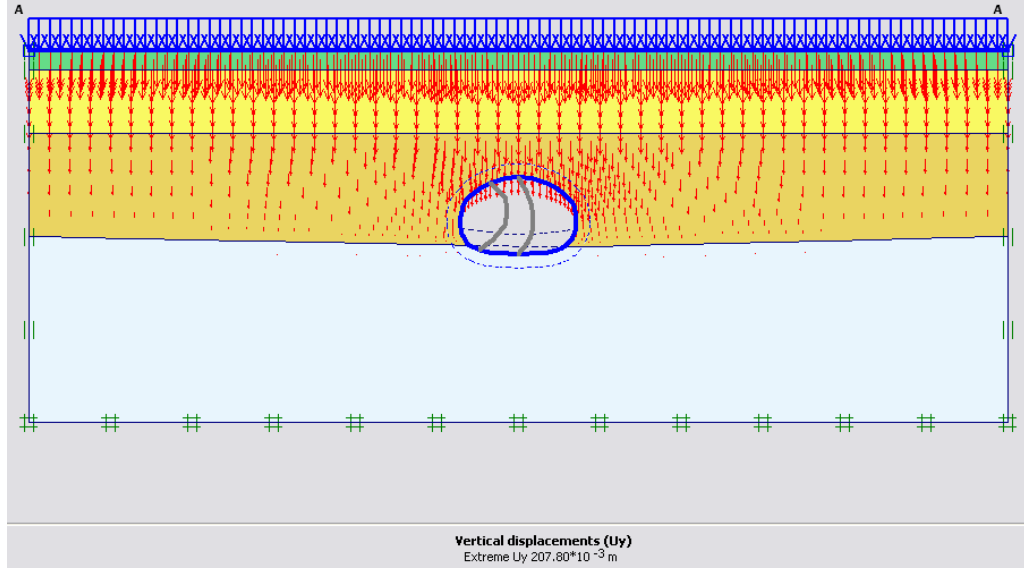


Şekil 6.53 : T tipi tünel tam kesit deformasyon diyagramı

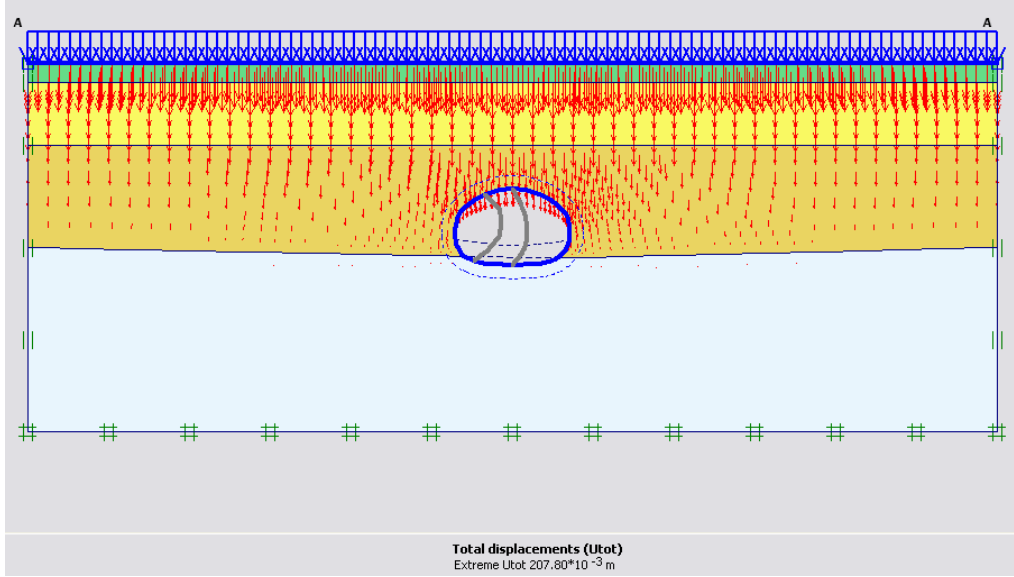


Şekil 6.54 : T tipi tünel tam kesit yatay yer değiştirme

T tipi tünel kesitinde meydana gelen yatay yer değiştirme değerinin $5.29 \cdot 10^{-3}$ m olduğu Şekil 6.54'deki analiz sonucunda verilmektedir. Düşey yer değiştirmenin ise Şekil 6.55'deki analiz sonucuna göre $207.80 \cdot 10^{-3}$ m olduğu görülmektedir



Şekil 6.55 : T tipi tünel tam kesit düşey yer değiştirme

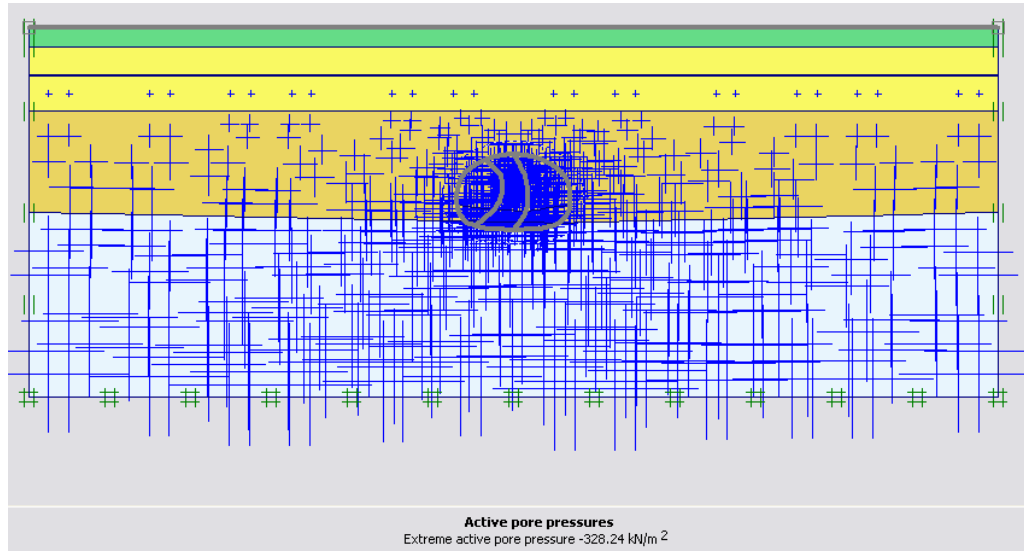


Şekil 6.56 : T tipi tünel tam kesit toplam yer değiştirme

Yenikapı bölgesinde mevcut olan killi şişme özelliğine sahiptirler. Bölgenin tamamen kuru olması durumunda proje kesitleri üzerinden yapılan analiz sonucunda Şekil 6.56’da da görüldüğü gibi toplam yer değiştirme değeri 207.80 m değerine ulaşmaktadır.

6.2.2.3 Yer Altı Su Seviyesi Varlığı Altında Davranış

Bölge zemininin şişme özelliğindeki marn olması sebebiyle suyla tepkimeye girdiğinde oluşan basınç ve tünel boşluğuna olan etkisini görmek amacıyla su seviyesi verilerek arazi normal koşullarına getirilmiştir. Bu durumda şişme basıncıyla meydana gelen değişim ve tünel kesitine ve kazı aşamalarına olan etkisi gözlenmiştir. Elde edilen veriler analiz sonuçları olarak aşağıda gösterilmektedir. Programa tanıtılan su seviyesi ve aktif boşluk suyu basıncı Şekil 6.57’de görülmektedir. Kazı aşamaları ve malzeme özellikleri bir önceki su etkisi olmadan yapılan analizdekinin aynısı olarak alınmıştır.



Şekil 6.57 : Aktif boşluk suyu basıncı diyagramı

File Edit View Calculate Help

Input Output Curves

General Parameters Multipliers Preview

Phase
Number / ID.: 9 <Phase 9>
Start from phase: 8 - <Phase 8>

Calculation type
Plastic
Advanced

Log info
Prescribed ultimate state not reached!
Soil body collapses
Inspect output and load-displacement curve

Comments

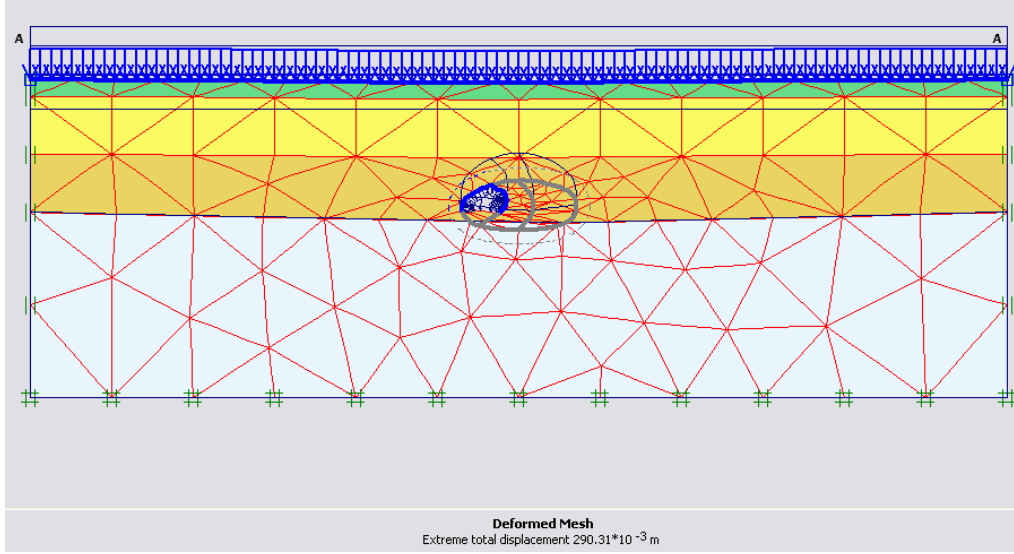
Parameters

Next Insert Delete...

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water
✗ <Phase 9>	9	8	Plastic	Staged construction	0.00 ...	9
➔ <Phase 10>	10	9	Plastic	Staged construction	0.00 ...	10
➔ <Phase 11>	11	10	Plastic	Staged construction	0.00 ...	11
➔ <Phase 12>	12	11	Plastic	Staged construction	0.00 ...	12
➔ <Phase 13>	13	12	Plastic	Staged construction	0.00 ...	13

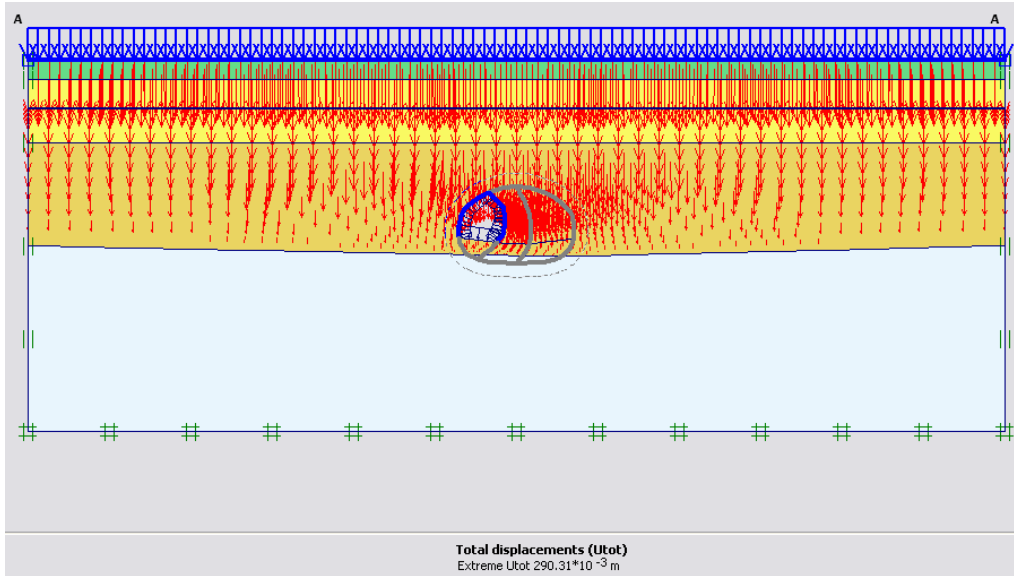
Şekil 6.58 : İnşaat aşamaları tanımlamalarında göçme durumu ve aşaması

Marn zeminde oluşan şişme basıncı, tünel kazısı ikinci aşamadayken etkisini daha fazla göstermiş ve tünel göçme durumuna gelmiştir. Şekil 6.58’de bu göçme durumunun olduğu kazı adımı gösterilmektedir.

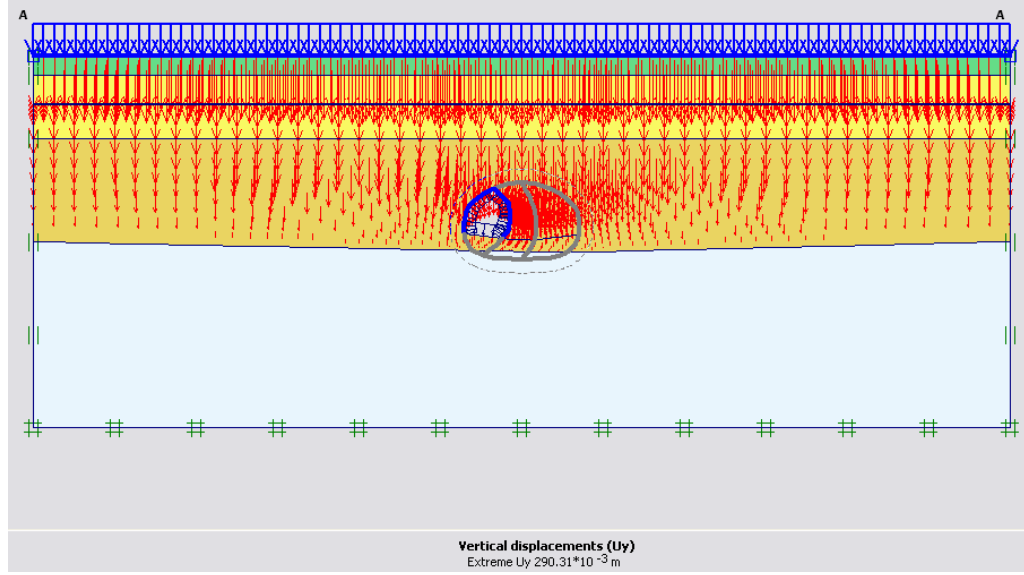


Şekil 6.59 : Göçme öncesi son deformasyon durumu

Şekil 6.58’de gösterilen göçmenin yaşandığı kazı adımından önce tünelde meydana gelen göçme öncesi deformasyon miktarı Şekil 6.59’daki analiz sonucunda verildiği gibi $290.31 \cdot 10^{-3}$ m ye ulaşmıştır. Toplam yer değiştirme değeri Şekil 6.60’da, toplam düşey yer değiştirme değeri Şekil 6.61’de verilmekte olup aynı değerdedir.

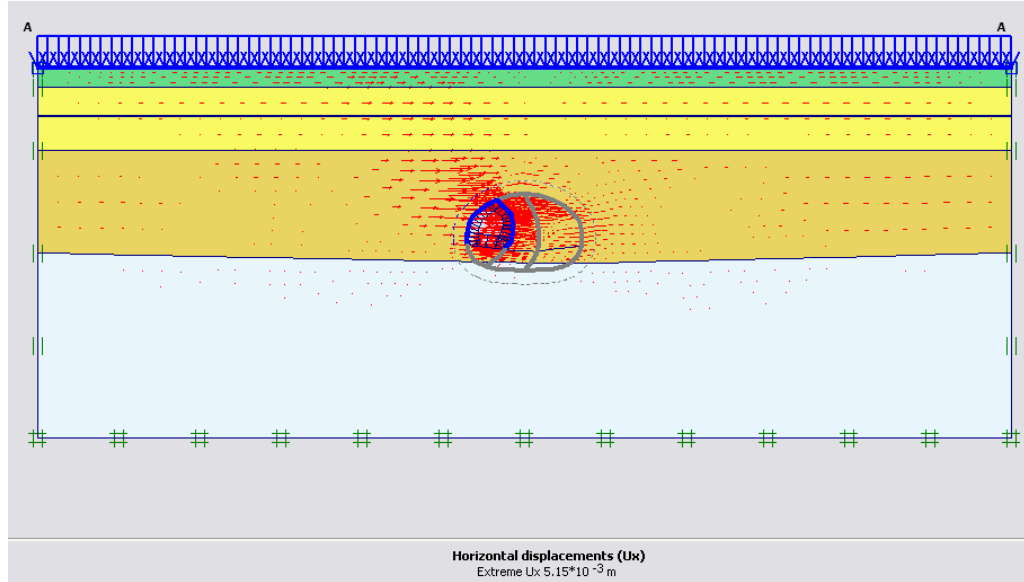


Şekil 6.60 : Göçme öncesi toplam yer değiştirme

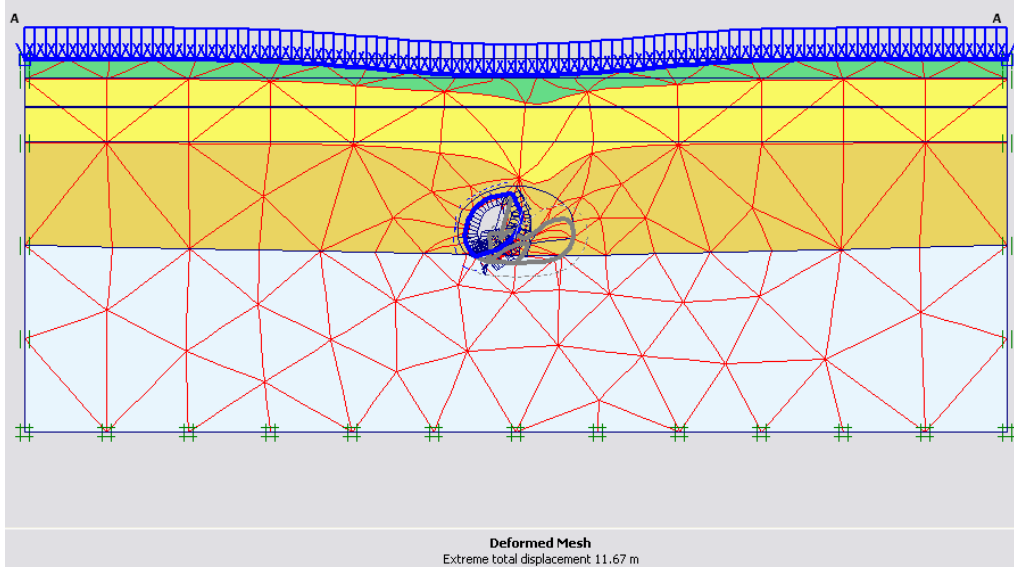


Şekil 6.61 : Göçme öncesi düşey yer değiştirme

Tünelde meydana gelen göçme olayı öncesindeki yatay yer değiştirme değeri ise Şekil 6.62’te verildiği gibi $5.15 \cdot 10^{-3}$ m mertebesindedir.

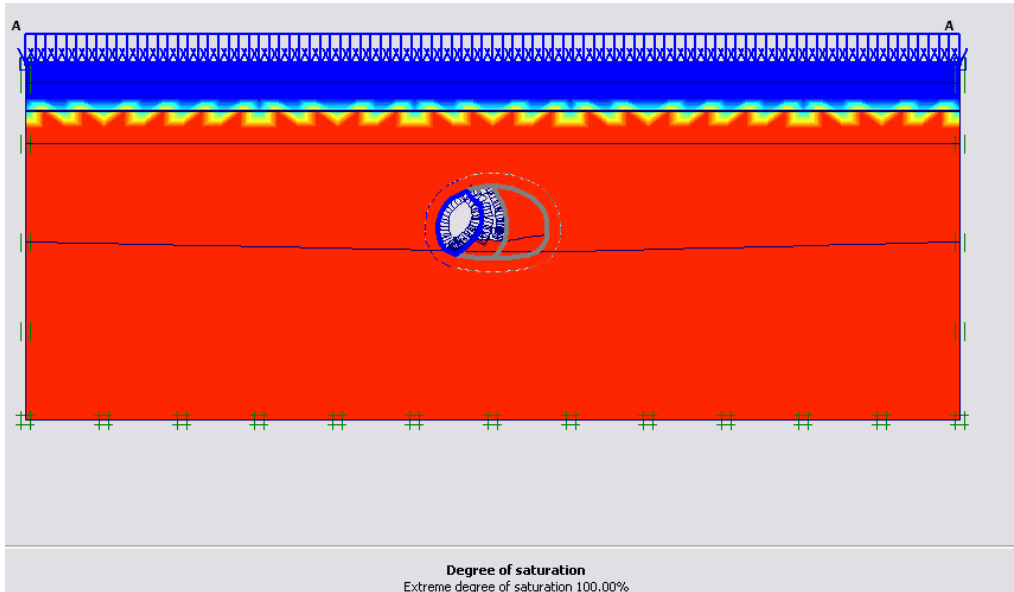


Şekil 6.62 : Göçme öncesi yatay yer değiştirme

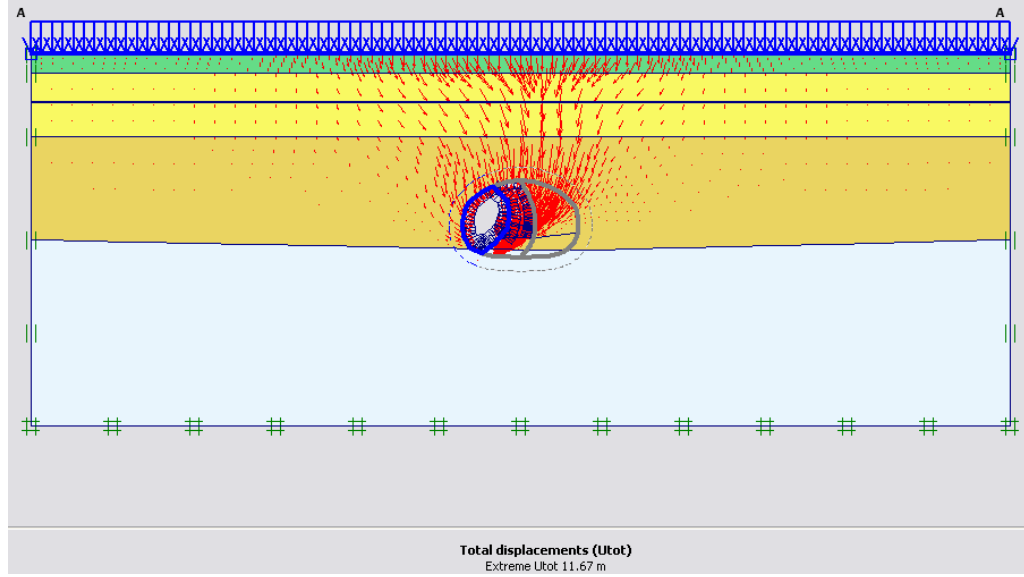


Şekil 6.63 : YASS altında tünel boşluğuna akan kil bölümü-göçük oluşumu
deformasyon diyagramı

Kazı adımları tanımlanan analizde göçme durumunu gösteren Şekil 6.63'te deformasyon değerinin 11.67 m olduğu görülmektedir. Zemin tünel boşluğuna akmış, oluşan tünel hacmini kapatmıştır. Analizde doygunluk derecesi Şekil 6.64'te verildiği üzere %100 dür.

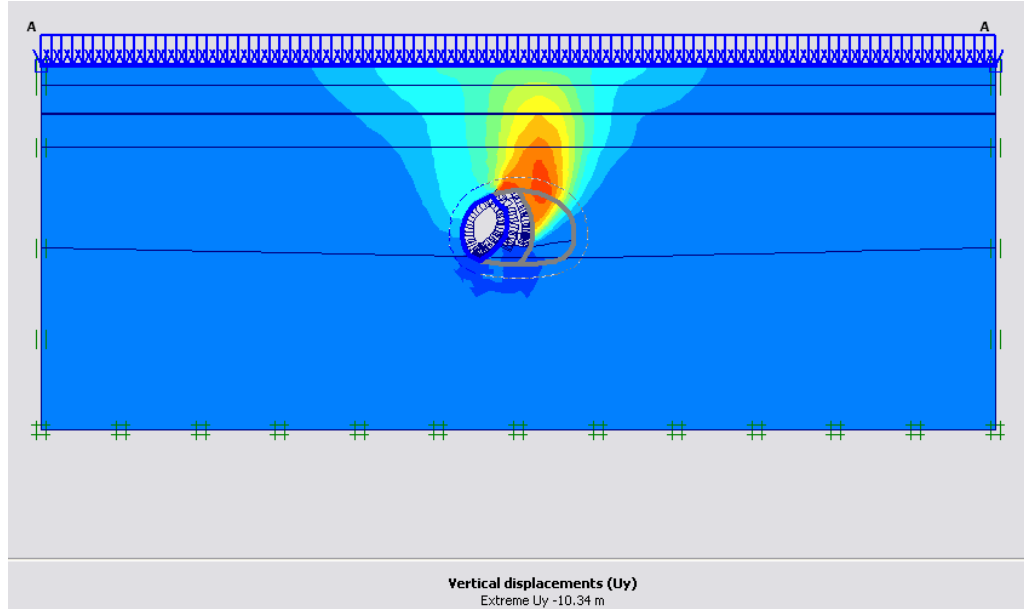


Şekil 6.64 : Doygunluk derecesi (% 100)



Şekil 6.65 : Göçme durumu toplam yer değiştirme

Yapılan analizde, meydana gelen göçük olayında toplam yer değiştirme değeri Şekil 6.65’da verildiği gibi 11.67 m dir.



Şekil 6.66 : Göçme durumu düşey yer değiştirme

Yeraltı suyu varlığında bölge kilinin şişme özelliğinden dolayı ikinci aşama inşaatı yapılırken tünel stabilitesi, şişen kilin basıncına yenilerek göçme meydana gelmiştir. Şekil 6.66’da, bölgedeki düşey yer değiştirme miktarı verilmekte olup, bu değer - 10.34 m mertebesindedir.

6.3 Plaxis Analizi Sonuçları

Plaxis analizi sonucunda elde edilen bilgiler farklı zemin koşullarında karşılaşılabilecek durumlar hakkında bize yönlendirici bilgiler vermektedir. Karşılaşılan problemler, genellikle zayıf zemin koşullarında tünel açılımının tehlike boyutlarını, şekil değiştirmelerin yüzeye etkilerini gösterirken alınması gereken ilave tedbirleri de beraberinde getirmektedir.

Çizelge 6.10: Plaxis analizi sonuçlarının karşılaştırılması

	Ankara (Çift Tüp)		İstanbul				
			Süleymaniye			Yenikapı	
			Kesişen A1		T	T (YASS yokken)	T (YASS varken)
	Normal durum	İyileştirilmiş hal	Normal hal	İyileştirilmiş hal			
Deformasyon (m)	130.32 *10 ⁻³	22.49 *10 ⁻³	59.42 *10 ⁻³	4.39*10 ⁻³	52.9 *10 ⁻³	207.8 *10 ⁻³	11.67
Toplam yerdeğiştirme (m)	130.32 *10 ⁻³	22.49 *10 ⁻³	59.42 *10 ⁻³	4.39*10 ⁻³	52.9 *10 ⁻³	207.8 *10 ⁻³	11.67
Düşey yerdeğiştirme (m)	96.34 *10 ⁻³	15.82 *10 ⁻³	59.42 *10 ⁻³	4.39*10 ⁻³	52.9 *10 ⁻³	207.8 *10 ⁻³	10.34
Yatay yerdeğiştirme (m)	123.74 *10 ⁻³	20.92 *10 ⁻³	107.09 *10 ⁻³	77.85*10 ⁻³	233*10 ⁻³	5.29 *10 ⁻³	8.82

Çizelge 6.10’da, yapılan Plaxis analizleri sonucunda farklı özelliklere sahip kil zeminlerde açılan tünellerde meydana gelen deformasyonlar görülmektedir. Tünel açım teknikleri göz önüne alındığında, akıcı ve su ile karşılaştığında hacim büyümesi gösteren kil zeminlerde şehir içi tünelticiliğinde aç-kapa yapıları yapmak tünel çevresindeki yapılara zarar verilebilme olasılığı yüksek olan yerlerde daha uygundur. Şişme özelliği göstermeyen kil zeminlerde ise çok parçalı kazılar yapılarak, tünel yüzeyinde meydana gelen gerilmeler absorbe edilerek tünel açılabilir.

Önceki bölümlerde analizi yapılan Süleymaniye Bölgesi’nde tarihi yapıların altından metro tüneli inşa edebilmek için, bölge ve zemin koşulları göz önüne alındığında geniş kesitli tünelden vazgeçilmiş, orta duvar ile taşıyıcılığı sağlanan kesişen tip tünel kesitine geçilmiştir. Yapılan analiz, metro tünelinin yüzeye çıktığı bölgenin kesiti olduğundan ayna ve şev desteklemesi ilave önlem olarak yapılmalıdır. Ayrıca, analiz sonucunda tünel kesitinde tehlikeli bir duruma rastlanmamış olup yüzeyde bulunan yapay dolguda düşük değerlerde deformasyonlar gözlenmiştir.

Bölgedeki kil içerikli alüvyon tabakada oluşan şekil değiştirmeyi önlemek amacıyla zemine basınçlı enjeksiyon uygulaması yapılmalıdır. Ayrıca, şev desteklemesi sırasında aynayı koruyabilmek amacıyla zemin çivisi kullanılmalıdır. Böylelikle bölge koruma altına alınmaktadır.

Ankara'da bulunan Ümitköy-Çayyolu arasında yapılan metro inşaatı sırasında yaşanan göçük olayı, bölgedeki ayrışmış zemin koşulları ve nihai beton imalatının zamanında yapılmamasının sonucudur. Geçici destek sistemleri, üzerindeki zemin ve yol yükünü taşıyamamış olup yapılan analiz sonucu büyük çaplı deformasyona uğradığı görülmektedir.

Tünel inşaatı yapılırken kesitin tam kesite döndürülmesi, üstyarı ve altyarı kazıları sırasında daha fazla deformasyona izin vermeden kesiti kendine taşımak amaçlıdır. Böylelikle zeminde oluşan gerilmeler tünel kesiti etrafında dağılacaktır. Ayrıca tünel açılırken tünel tacı bölgesi şemsiye boru sürenlerle desteklenerek kazı sırasında ayna stabilitesi sağlanmaktadır. Tünelde geçici destek sistemleri içerisinde uygulanan tünel içi ankraj uygulaması, tünel yüzeyinde oluşan gerilmeleri zemine aktarabilmektedir.

Yüzeye zarar vermemek ve tünel inşaatının sağlıklı gerçekleştirilebilmesi amacıyla zemin iyileştirmesi yapılmıştır. Bölgede uygulanan enjeksiyon neticesinde zeminin taşıma gücü arttırılmıştır.

Yenikapı bölgesindeki kil tabaka, şişme özelliğinden dolayı açılan tünel boşluğunu inşaat aşaması sırasında kapatmıştır. Bölgede su varlığını göz önünde bulundurmadan yapılan analizde deformasyonlar yüksek değerlerde çıkmıştır. Su varlığında göçme, susuz ortamda yüksek deformasyonlar açığa çıkması, zeminin stabilitesinin çok düşük olması ve şişme özelliğinden kaynaklanmaktadır.

7. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Şişme özelliğine sahip problem zeminlerde, inşaat aşamasında bölge koşulları da dikkate alınarak seçilen tünel inşaatı tekniğine göre farklı önlemler alınmalıdır. Bu tür zemin koşullarında bölgede var olan gerilmeler, yeraltında oluşturduğumuz boşluk hacminin kapanmasına, bu da üst yapılarda hasara (şehir içi tünelciliği), inşaat süresinin uzamasına, maliyetin artmasına ve en önemlisi can kaybına yol açabilir.

7.1 Sonuçlar

Farklı kesitlerin değişik koşullarda nasıl davrandığının analiz sonuçları Bölüm 6'da verilmiştir. Bu sonuçlar, şehir içi tünelciliği düşünüldüğünde kazı ve kesit tipinin planlama aşamasında ve sonrasında ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Kil zeminlerin tünel tavanına yaptığı basınç ve sebep olduğu yer değiştirme hareketleri, tünel inşaatına engel çıkarmakla birlikte yüzeyde kalıcı hasarlara neden olmaktadır. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar ve grafikleri, tünel kesitinde kemerlenmenin hızlıca sağlanması gerektiğini, tünel taşıyıcı tabakasının (orta duvar, nihai kaplama) boyutlarının dışarıdan gelen basınca ve yük dağılımına karşı dayanımının ne kadar önemli olduğunu göstermiştir.

Tünel açılırken zemin içindeki gerilmelerin değiştirilmeye çalışılması, özellikle şişen killer gibi hareket etme kabiliyeti yüksek olan zeminlerde ilave tedbirler alınması gerekmektedir. Yenikapı örneği, kalın bir kil katmanındaki tünelin, destekleme sistemi sırasında nasıl zarar gördüğünü açık bir şekilde göstermektedir. Bunun yanında Çizelge 6.1, bulunan deformasyonların karşılaştırılması bakımından bölge koşulları ve tünel kesitleriyle ilgili yol göstermektedir.

Makas tüneli (T tipi tünel) gibi geniş kesitli tüneller açılırken açma yöntemi de sonuca etki etmektedir. Bu durumla ilgili karşılaştırma Süleymaniye Bölgesi ile ilgili analizde gösterilmiştir. T tipi tünelde oluşan basınç dağılımı, kesişen A tipi tünele göre daha fazladır. Yani, daha geniş bir alandaki zeminin doğal koşullarını etkilemektedir. Bu bölgedeki analiz sonuçları da göstermiştir ki, kil koşullarında hareket, etki alanı genişliği de göz önünde bulundurulduğunda her bir yük dağılımında yeniden değişmektedir.

Şişme potansiyeli, tünelin açılacağı zemin koşullarındaki en istenmeyen durumdur. Hareket kabiliyeti yüksek ve basınç etkisi fazla olan şişme etkisine sahip kil zeminler, inşaat amacını engelleyici durumlar oluşturmaktadır. Nitekim analiz sonuçlarından da görüldüğü gibi ilave tedbirlerin alınmasının gerektiği bu tür durumlarda, sürpriz zemin hareketleriyle karşılaşmamak için önceki bölümlerde anlatıldığı üzere bölge koşullarının iyi belirlenmesi ve analiz edilmesi gerekmektedir. Analiz sonuçlarına binaen ne tür bir tünel kesiti ve inşaat yönteminin seçileceği kararlaştırılmalıdır. Alınacak tedbirler ve kullanılan yöntemler, faydalı sonuçlar vermesi bakımından belirleyicidir.

7.2 Öneriler

Şişen zeminlerde kazı yapılacak ise aşağıda sıralanan önlemlere başvurulmalıdır;

- Şişmenin zararlı etkisini minimuma indirebilmek için şişme miktarı ve şişme potansiyelini önceden tahmin etmek gerekmektedir.
- Zemin Değiştirilmesi: Eğer bölge şartları elverişli ise şişen zeminler kaldırılıp yerine stabil malzeme koyulmalıdır. Bu yönteme, aç – kapa yöntemiyle yapılan inşaatlarda arazi uygunluğuna göre başvurulur.
- Şişen zeminlerin yapısının değiştirilmesi;
 - Kompaksiyon: şişen zeminlerin kabarma miktarı, yüksek su içeriğinde (mümkün olduğunda % 3-4 ten fazla), düşük birim hacim ağırlığında sıkıştırılması ile düşer.
 - Ön Nemlendirme: inşaat aşamasından önce, zemin nemlendirilerek şişmesi sağlanır. Daha sonra zemine % 4-5 oranında sönmüş kireç enjekte edilerek plastisite düşürülür. Böylelikle zemin daha duraylı hale gelir.

- Nemli Bariyerlerle Düzenlenmesi: Zemin içindeki farklı kabarmaların etkisi,zeminin su içeriğinin kontrol altına alınması ile azaltılabilir. Aç-kapa türü kazılarda, kazı sınırı etrafında nem bariyerleri inşa edilir. Bu nem bariyerleri, inşa edilen hendeklerin çakıl, yağsız çimento veya geçirimsiz membranla doldurulması ile oluşur.
- Zemin Stabilizasyonu: Kireç ve çimento yardımı ile kimyasal stabilizasyon uygulanması zemin içerisinde yapılan kazının duraylılığını artırır. Kireç veya çimentonun zemine enjekte edilmesi, zeminin likit limit, plastisite indisi ve şişme özelliğini düşürür. Basıncılı kireç enjeksiyonundan başka, kireç-uçucu kül karışımı da şişen zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilir.
- Su İçeriğinin Kontrolü: Şişme özelliğine sahip bölge bizim inşaat alanı sınırlarında kalıyor ve çevresindeki zemin şişme özelliği göstermiyorsa, bu bölgede belirli aralıklarla su toplama kuyuları ve yüzey drenajı yapılarak yer altı suyunun tünel bölgesine ulaşması engellenebilir.
- Et kalınlığı fazla olan bölgelerdeki kazı sırasında karşılaşılan şişme olayı, tünel inşaatını imkânsız kılmaktadır. Bu tür bölgelerde, aç – kapa inşaat yapımı mümkün olmadığından, tünelde şişmeye izin verip şişen bölgeyi tekrar kazmak gerekmektedir. Aksi takdirde, beton kalınlığının arttırılarak tünel kesidinin üzerindeki yükü taşıması sağlanmalıdır.
- Çok parçalı kazı yapılması zemindeki gerilmeleri yavaş yavaş dağıtacağından kritik bölgelerde zemin iyileştirmesi sonucu uygulanmalıdır. Bu durum, öngörülmeleyen zemin davranışlarının belirlenmesine de imkân tanımaktadır. Bu aşamada destekleme sistemleri değişen koşullara göre revize edilmelidir.

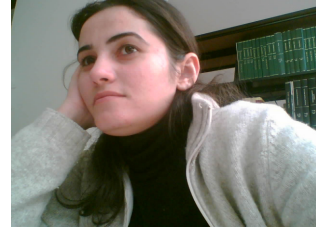
KAYNAKLAR

- [1] **Akıncı, Ö.**, 1968. Seramik Killeri ve Jeolojisi, Ankara
- [2] **Alonso, E.E., Berdugo, I.R., Tarrago, D., Ramon, A.**, 2007. Tunnelling in Sulphate Claystones, *14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, İspanya
- [3] Ümitköy – Çayyolu İstasyonları Arası Göçük Bölgesi Delme Tünel Tasarımı Raporu, 2006, Ankara Büyükşehir Belediyesi, Ankara
- [4] **Ansal,A., Yıldırım,H., Keskin, N.**, 1992. Killi Zeminlerde Yanal Şişme Davranışları, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi*, İstanbul
- [5] **Anşın, H.**, 1995.Normal ve Aşırı Konsolide Killerin Kırılmadaki Davranışları, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ
- [6] **Arıoğlu, E.**, 1991. Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Tanıtılması ve Kritiği, İstanbul
- [7] **Arman, H.**, 2003. Tünel Mühendisliği Ders Notları, Sakarya
- [8] **Aydan, Ö.**, 2001. İstanbul Boğazı Denizaltı Geçişi için Tip Tünel ile Kalkan Tünelin Uygunluğunun Karşılaştırılması, İstanbul
- [9] **Badendererde, S.**, 1980. Application of the New Austrian Tunnelling Method for Metro Construction in the Federal Republic of Germany, Eurotunnel'80, İsviçre
- [10] **Bekaert**, 1996. Tunnelling the World, Belçika
- [11] **Çinicioğlu, F., Ünal, G.Y.**,1992. Killi Zemin Davranışında Organik İçeriğin Etkisi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi*, İstanbul
- [12] **Das, B.M.**, 2002. Principles of Geotechnical Engineering, Fifth Edition
- [13] **Erdoğan, E.**, 1993. Yeni Avusturya Tünel İnşaat Methodu, İstanbul
- [14] **Ergun, U.**, 1986. Zayıf Formasyonlarda Açılan Tüneller ve Yeni Avusturya Yöntemi, *Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşası Semineri* , Adana
- [15] **Fotieva, N., Antziferov, S., Sammal, A.**, 2007. Design of Parallel Circular Tunnel Linings Constructed in Urban Areas, *14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, İspanya
- [16] **Garbulewski, K., Skutnik, Z. & Lendo-Siwicka, M.**, 2007. Unloading/Swelling Behaviour of Unsaturated Clay in Warsaw, *14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, İspanya
- [17] **Geoconsult**, 1994. NATM Uygulamalı Yeraltı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi, Avusturya

- [18] **Grim, R.E.**, 1953. McGraw-Hill Series In The Geological Sciences – Clay Mineralogy, New York
- [19] **Hassan, M. M., Lojander, M. & Ravaska, O.**, 2007. Utilization of Soft Clay in Construction, *14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, İspanya
- [20] **İncecik, M.**, 1986. Yeni Avusturya Tünel İnşaa Yöntemine Uygun Kaplama Hesapları, *Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşası Semineri* , Adana
- [21] İstanbul Metrosu, Yenikapı İstasyonu Sondaj Raporları, 2001. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul
- [22] İstanbul Metrosu, Yenikapı–Unkapanı Arası Delme Tünel Hesap Raporu ,2007. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul
- [23] **Kaşer, H.**, 2006. Şişen Killerin Yapılarda Yarattığı Sorunlar
- [24] **Kaya, Z.**, 1997. Kil Zeminlerin Şişme Karakteristiklerinin ASTM Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ
- [25] **Kocabaş, U.**, 2008. Yenikapı Batıkları, Cilt 1, İstanbul
- [26] **Komishi, S. & Ono, T., Kitagawa, T., Iida, H. & Isogai, A., Matsunaga, T.**, 2005. Effect of Ground Water on Tunnel Face Stability in the Soft Ground, *ITA-AITES World Tunnel Congress*, İstanbul
- [27] **Köksal, M.D.**, 2007. Dünya’da ve Türkiye’de Ulaşım Amaçlı Yer altı Mühendislik Yapıları – Tarihsel Bir Bakış, 2. *Ulaşımında Yer altı Kazıları Sempozyumu*, İstanbul
- [28] **Kuntsche, K.**, 2007. Deep Excavations and Slopes in Urban Areas, *14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, İspanya
- [29] **Kuruoğlu, Ö.**, 2008. Kişisel Görüşme
- [30] **Mitchell, J. K.**, 1976. Fundamentals of Soil Behaviour, USA
- [31] **Onargan, T.**, 2000. Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemlerinde Kayaç Şişme Özelliğinin Deformasyonlar ve Gerilmeler Üzerindeki Etkisi, DEÜ Fen ve Mühendislik Dergisi, **Cilt:2, Sayı:2**, İzmir
- [32] **Önalp, A.**, 2002. Geoteknik Bilgisi I, İstanbul
- [33] **Resendiz, D., Romo, M.P.**, 1981. Soft Ground Tunneling, Hollanda
- [34] **Sağlam, A., Vardar, M., Yüzer, E.**, 2001. İstanbul Metrosu Yenikapı Kesimi 19 Eylül 2001 Tarihli Tünel Göçmesi Teknik Değerlendirme ve Görüş Raporu, İstanbul
- [35] **Soteras, M., Moya, N & Orfila, T.**, 2007. Ground Deformation and Surface Effects Due to Large Diameter Tunnelling, *14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, İspanya
- [36] **Türedi, H.**, 2007. Şehir İçi NATM Uygulamaları, 2. *Ulaşımında Yer altı Kazıları Sempozyumu*, İstanbul

- [37] **Ülkü, D.**, 1998. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (Y.A.T.A.Y.) ve Tünel İçi Konverjans Ölçümleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ
- [38] **Yeşilçınar, M. İ.**, 2005. Şanlıurfa Tünellerinde Enjeksiyon Çalışmaları, DSI Teknik Bülteni, **Sayı:100**, Ankara
- [39] **Yıldırım, Ü.E.**, 2004. Tünelcilikte Zemin İyileştirmesi, Bitirme Ödevi, Sakarya
- [40] **Yıldırım, Ü.E.**, 2003. Ulaştırma Staj Notları, Sakarya
- [41] **Yılmaz, I., Karacan, E.**, 1998. Zeminlerin Şişme Özellikleri, Sivas
- [42] **Yılmaz, Ö., Murat, H., Demirok, D.**, 2007. Cezayir Demiryolları Tizi-Ouzou T3 Tünelinde Yaşanan Sorunlar ve Uygulanan Çözüm Teknikleri, 2. *Ulaşımında Yer altı Kazıları Sempozyumu*, İstanbul
- [43] **Weaver, C.E.**, 1989. Clays, Muds and Shales, Atlanta
- [44] **Url-1** <<http://tr.wikipedia.org>>
- [45] **Url-2** <www.dsi.gov.tr>
- [46] **Url-3** <www.frmtr.com>
- [47] **Url-4** <www.galleries.com>
- [48] **Url-5** <www.marmaray.com.tr>

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ülkü Ebru YILDIRIM

Doğum Yeri ve Tarihi: Geyve-SAKARYA / 27.06.1982

Adres: İnönü Mah. Çamoluk Sok. No:7/5 Ataşehir, İSTANBUL

Lisans Üniversitesi: Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği

Yayın Listesi:

- EYİĞÜN, Y., YILDIRIM, Ü.E., KOÇAK, S., 2009: Tunnel Construction in Historical Peninsula of İstanbul. *ITA-AITES World Tunnel Congress*, Mayıs 23-28, 2009 Budapeşte, Macaristan.