

**TÜNELLERDE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE
STABİLİTENİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ
İLE PLAXIS PROGRAMINDA ANALİZ EDİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Derya OSMANOĞLU**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

**Programı : ZEMİN MEKANİĞİ VE GEOTEKNİK
MÜHENDİSLİĞİ**

OCAK 2007

**TÜNELLERDE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE
STABİLİTENİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ
İLE PLAXIS PROGRAMINDA ANALİZ EDİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Derya OSMANOĞLU
(501021279)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Şubat 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ocak 2007**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mete İNCECİK (İ.T.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri: Doç.Dr. Recep İYİSAN (İ.T.Ü.)

Doç.Dr. Ayşe EDİNÇLİLER BAYKAL (B.Ü.)

OCAK 2007

ÖNSÖZ

Bu çalışmada tüneller sayısal analiz yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar programı Plaxis yardımı ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi son yıllarda mühendislik problemlerinin analiz edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem çözümün hızlı ve gerçeğe yakın değerlerde elde edilmesine olanak vermektedir. Yapılan bu çalışmanın tünelin mevcut olduğu zeminlerde sağlıklı olarak bir binanın yapılıp yapılamayacağını bilmesi ve tünel kaplamasında meydana gelen deformasyonların bulunması konusunda faydalı olacağı düşüncesindeyim.

Yüksek Lisans Tezi'min hazırlanması süresince bilgisini ve desteğini esirgemeyen sevgili hocam Sn. Prof. Dr. Mete İNCECİK'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Beni maddi ve manevi her şekilde destekleyen, yanımda olan sevgili annem Nihal OSMANOĞLU'na, sevgili babam Haydar OSMANOĞLU'na ve çalışmam sırasında gösterdiği anlayış ve yardımları için nişanlım Mehmet BOZKURT'a teşekkür etmeyi borç bilirim.

Aralık 2006

İnş. Müh. Derya OSMANOĞLU

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vii
TABLO LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
2. TÜNELLER	3
2.1. Tünel ile İlgili Bazı Tanımlar	3
2.2. Tünel Çeşitleri	4
2.2.1. Demiryolu Tünelleri	4
2.2.2. Yol Tünelleri	4
2.2.3. Yaya Tünelleri	5
2.2.4. Kanal Tünelleri	5
2.2.5. Metropolitan Tünelleri	5
2.3. Tünel Güzergahı Seçimi ve Tünel İnşasına Kadar Yapılan Araştırmalar	6
2.3.1. Ön İnceleme Safhası	7
2.3.2. Fizibilite	7
2.3.3. Proje Safhası	8
2.4. Tünel Zemini Şartları	8
2.4.1. İyi Tünel Zemini	9
2.4.2. Kesit Büyüklüğü	9
2.4.3. Tünelin Doğrultusu	9
2.4.4. İksanın Uygunluğu	10
2.4.5. Çok Zor Tehlikeli Tüneller	10
2.5. Yüzey ve Yeraltı Çalışmaları	11
2.5.1. Jeofizik Araştırmalar	11
2.5.2. Mekanik Araştırmalar	11

2.5.3. Tünel Güzergahı Boyunca Açılan Sondajlar	11
2.5.4. Pilot Tüneller	12
2.5.5. Kaya Kalitesinin Saptanması	12
2.5.6. Yerinde Deneyler	16
2.5.7 Laboratuvar Deneyleri	17
3. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ	18
3.1. Gene	18
3.2. Kayada Tünelcilik	19
3.3. Yumuşak Zeminde Tünelcilik	23
4. TÜNEL İNŞA YÖNTEMLERİ	24
4.1 Genel	24
4.2 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi	24
4.2.1 Yeni Avusturya Tünel Açma Metodunda Tünel Tasarımı	26
4.2.2 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin Esasları	30
4.3 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde İksa Yapılması	31
4.3.1 Genel	31
4.3.2 Birincil ve İkincil Desteklemeler	32
4.3.3 Çelik Kaburgalı Destekleme Sistemi	33
4.3.4 Kaya Bulonları ve Bulon Tipleri	33
4.3.5 Püskürtme Beton	35
4.3.6 Tünel İnşaatında Göz Önüne Alınması Gereken Önlemler	35
4.4 Tünel İnşası İçin Kullanılan Diğer Yöntemler	36
5. SAYISAL YÖNTEMLER İLE YENİ AVUSTURYA TÜNEL İNŞA YÖNTEMİNE UYGUN KAPLAMA BOYUTLANDIRILMASI	38
5.1 Sayısal Yöntemler	38
5.1.1 Fenner-Pacher Konverjans Eğrisinin Yardımı ile Boyutlandırılması	38
5.1.2 Kırılma Teorisine Göre Kesiti Boyutlandırma	40
5.1.3 Taşıyıcı Ringi, Elastik Yataklanmış Bir Çerçeve Olarak Kabul Eden Model	40
5.1.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi	41
5.1.4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Tünel Kaplamalarının Hesabı	44
5.1.4.2 Plaxis Sonlu Elemanlar Programı	44

6. TÜNELCİLİKTE ZEMİN İYİLEŞTİRME	50
6.1. Genel	50
6.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri	51
6.3. Zemin Suyu Seviyesini Düşürme	53
6.3.1. Yüzeysel Pompalama	53
6.3.2. Derin Kuyular	54
6.3.3. Noktasal Kuyu İşleminin Yüzeye Olan Etkileri	55
6.3.4. Askıdaki Su Tabakaları	55
6.3.5. Tünelde Seviye Düşürme	55
6.4. Elektro Osmoz	57
6.5. Zemin Dondurulması	58
6.5.1. Dondurmanın Uygulama Alanları	59
6.5.1.1. Şaftlar, Tünel Bacaları	59
6.5.1.2. Tünel İnşaatında Dondurma	59
6.5.2. Dondurmada Önemli Faktörler	61
6.5.3. Dondurma Süresi	61
6.5.4. Donmuş Zeminin Basınç Dayanımı	62
6.5.5. Dondurulmuş Zeminin Krip Davranışı	63
6.5.6. Dondurulmuş Zeminin Mukavemetinin Zamanla Değişimi	64
6.5.7. Tünel İnşaatında Dondurma Yönteminin Uygulanması ve Sonuçları	64
6.5.8. Tünelcilikte Dondurma Yönteminin Amaçları	65
6.6. Zeminin Enjeksiyonlanması	65
6.6.1. Enjeksiyon Teknikleri	66
6.6.2. Emdirme (Permeasyon) Enjeksiyonu	67
6.6.3. Kompaksiyon Enjeksiyonu	71
6.6.4. Çatlatma Enjeksiyonu	73
6.6.5. Jet Enjeksiyonu	74
6.7. Enjeksiyon Sistemlerinin Tasarımı	76
7.PLAXIS SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE UYGULAMALAR	78
7.1 Kil Zemin İçinde NATM Yöntemi ile İnşa Edilmiş Olan Tünel Uygulaması	78
7.2 NATM Tünel İnşa Yöntemi ile Yapılmış Olan Tünel Uygulaması	87
7.3 NATM Tünel İnşa Yöntemi ile Yapılmış olan Tünel Üzerine Bina İnşa Edilmesi	96

7.4 NATM Tünel İnşa Yöntemi ile Yapılmış olan Tünel İnşaatında Zemin Yüzeyinde Deformasyonları Küçültmek Amacı ile Geogrid Kullanılması	100
7.5 NATM Tünel İnşa Yöntemi ile Yapılmış olan Tünel İnşaatında Zemin Yüzeyinde Deformasyonları Küçültmek Amacı ile 2 m Zemin Enjeksiyonu Uygulaması	105
7.6 NATM Tünel İnşa Yöntemi ile Yapılmış olan Tünel İnşaatında Zemine Tünelin Üst Kısımına Gelecek Şekilde 2 Bodrum Katlı Bina İnşa Edilmesi	109
8. SONUÇ	114
KAYNAKLAR	118
ÖZGEÇMİŞ	121

KISALTMALAR

RQD	: Kaya Kalitesi Tayini, Rock Quality Designation
RSR	: Kayanın Yapısal Değerlendirilmesi, Rock Structure Rating
BST	: Basıncılı Su Testleri
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
TBM	: Tünel Açma Makinesi, Tunnel Boring Machine
SEM	: Aşamalı Kazı Yöntemi, Sequential Excavation Method
NATM	: Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi, New Austrian Tunneling Method
YASS	: Yeraltı Su Seviyesi
ASCE	: American Society of Civil Engineers
CPT	: Koni (Cone) Penetrasyon Testi
FE	: Sonlu Elemanlar Yöntemi, Finite Element Method
SE	: Sonlu Elemanlar
AKO	: Aşırı Konsolidasyon Oranı

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Tünelciliğin Son 100 Yılda Gelişmesini En Fazla Etkileyen Unsurlar	2
Tablo 2.1. Stini'ye Göre Beklenilen Dağ Basıncı.....	13
Tablo 2.2. Rabcewicz, L.V.'e Göre Kaya Sınıflandırması.....	14
Tablo 6.1. Tünel Zemin İyileştirme Uygulama Sınırları.....	52
Tablo 6.2. Enjeksiyon Malzemelerinin Sınıflandırılması.....	68
Tablo 6.3. Kompaksiyon Enjeksiyonu Karışımındaki Kum için Öngörülen Dane Çapının Dağılımı.....	72
Tablo 7.1. Zemin Parametreleri.....	79
Tablo 7.2. Tünel Kaplaması Parametreleri.....	79
Tablo 7.3. Zeminlerin Parametreleri.....	88
Tablo 7.4. Dolgu ve Kum Şilte Parametreleri.....	101
Tablo 7.5. Döşeme Malzeme Özellikleri.....	110
Tablo 7.6. Düşey Duvar Malzeme Özellikleri.....	110
Tablo 8.1. Uygulama Sonuçları	115

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 :Tünel Enkesiti.....	3
Şekil 2.2 :Tünel Tip Kesitleri.....	6
Şekil 2.3 :Lauffer Grafiği.....	15
Şekil 2.4 :Ayakta Kalma Zamanı ile Lauffer Diayagramı Arasındaki İlişki..	15
Şekil 3.1 :Tünel Açma Makinesi (TBM).....	21
Şekil 3.2 :TBM Makinesini Oluşturan Bölümler.....	21
Şekil 4.1 :NATM Kazı Aşamaları.....	25
Şekil 4.2 :NATM Tünel Kesiti.....	26
Şekil 4.3 :NATM Yönteminde Tünelin Kazı Aşaması.....	27
Şekil 4.4 :NATM Tünel İnşa Yönteminde İksa Yapılması.....	28
Şekil 4.5 :NATM Tünel İnşa Yönteminde Püskürtme Beton Yapılması.....	28
Şekil 4.6 :NATM Tünel İnşa Yönteminde Çelik Hasır Kaplama Yapılması.	29
Şekil 4.7 :NATM Tünel İnşa Yönteminde Son Kat Beton Kaplaması Yapılması.....	29
Şekil 5.1 :Fenner-Pacher Konverjans Eğrilerine göre Zeminle İksanın Karşılıklı Etkileşimi.....	39
Şekil 5.2 :Analizde Kullanılan Elemanlar, Düğüm Noktaları ve Gerilme Noktaları.....	44
Şekil 5.3 :Feder'in Kırılma Teorisine Göre (1982) Tünel Tavanına Etkiyen Yükler.....	48
Şekil 6.1 :Tipik Derin Kuyu Kesidi.....	54
Şekil 6.2 :Düşürülmüş Y.A.S.S.'nin Kuyu Civarındaki Durumu.....	56
Şekil 6.3 :Elektro Ozmoz Yöntemi ile Seviye Düşürme.....	57
Şekil 6.4 :Dondurma Yöntemleri.....	58
Şekil 6.5 :Donmuş Zeminden Yararlanma Biçimi.....	59
Şekil 6.6 :Düşey Dondurma.....	60
Şekil 6.7 :Yatay Dondurma.....	60
Şekil 6.8 :Donma Süresini Etkileyen Faktörler.....	62
Şekil 6.9 : Isı Derecesine Bağlı Basınç Dayanımı.....	63
Şekil 6.10 : Reolojik Davranış.....	63
Şekil 6.11 : Zamanla Mukavemetin Azalması.....	64
Şekil 6.12 : Enjeksiyon Tekniklerinin Şematik Gösterimi.....	67
Şekil 6.13 : Kademeli Enjeksiyon İşlemi.....	69
Şekil 6.14 :Tube'a Manchette Sisteminin Detayı.....	70
Şekil 6.15 :Kompaksiyon Enjeksiyonunun Şematik Gösterimi.....	71
Şekil 6.16 :Düşey Yönde Çatlakların Oluşumu ve Yatay Sıkıştırma.....	73
Şekil 6.17 :Jet Enjeksiyonu İşlemi.....	75
Şekil 6.18 :Süper Jet Kolonlar.....	76
Şekil 7.1 :Problem Geometrisi.....	78
Şekil 7.2 :Yeraltı Su Seviyesi.....	80

Şekil 7.3	:Zeminde Oluşan Boşluk Suyu Basıncı.....	80
Şekil 7.4	:Başlangıç Koşulları Geometrisi.....	81
Şekil 7.5	:Efektif Gerilmeler.....	81
Şekil 7.6	:Hesap Aşamaları.....	82
Şekil 7.7	:Zemin Yüzeyinde Meydana Gelen Deformasyon.....	83
Şekil 7.8	:Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Deformasyon.....	83
Şekil 7.9	:Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Burulma Momenti.....	84
Şekil 7.10	:Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Eksenel Kuvvet.....	84
Şekil 7.11	:2. Hesap Aşamasında Zemin Yüzeyinde Meydana Gelen Deformasyon.....	85
Şekil 7.12	:2. Hesap Aşamasında Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Deformasyon.....	85
Şekil 7.13	:2. Hesap Aşamasında Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Burulma Momenti.....	86
Şekil 7.14	:2. Hesap Aşamasında Tünel Kaplamasına Gelen Eksenel Kuvvet.....	86
Şekil 7.15	:Problem Geometrisi.....	87
Şekil 7.16	:Zemin Su Seviyesi.....	89
Şekil 7.17	:Zeminde Oluşan Boşluk Suyu Basıncı.....	89
Şekil 7.18	:Başlangıç Koşullarında Tünel Kaplamasının Deaktive Edilmesi..	90
Şekil 7.19	:Efektif Gerilmeler.....	90
Şekil 7.20	:Uygulama Hesap Aşamaları.....	91
Şekil 7.21	:Sonlu Elarmanlar Ağında Meydana Gelen Deformasyon.....	92
Şekil 7.22	:Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Deformasyon.....	93
Şekil 7.23	:Tünel Kaplamasında Oluşan Burulma Momenti.....	93
Şekil 7.24	:Tünel Kaplamasında Oluşan Eksenel Kuvvet Değeri.....	94
Şekil 7.25	:Son Hesap Aşamasında Zemin Yüzeyinde Meydana Gelen Deformasyon.....	94
Şekil 7.26	:Son Hesap Aşamasında Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Deformasyon.....	95
Şekil 7.27	:Son Hesap Aşamasında Tünel Kaplamasında Oluşan Burulma Momenti.....	95
Şekil 7.28	:Son Hesap Aşamasında Tünel Kaplamasına Gelen Eksenel Kuvvet.....	96
Şekil 7.29	:Tünel İnşaat Sahasına BinaYükü Uygulanması.....	97
Şekil 7.30	:Tünelin İnşa Edildiği Alana Bina Yükü Uygulanması Hesap Aşamaları.....	97
Şekil 7.31	:Bina Yükü Olması Durumunda Zemi Yüzeyinde Meydana Gelen Deformasyon.....	98
Şekil 7.32	:Son Hesap Aşamasında Bina Yükü Yüklenmesi Durumunda Tünel Kaplamasında MeydanaGelen Toplam Deformasyon.....	99
Şekil 7.33	:Son Hesap Aşamasında Bina Yükü Yüklenmesi Durumunda Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Burulma Momenti.....	99
Şekil 7.34	:Son Hesap Aşamasında Bina Yükü Yüklenmesi Durumunda Tünel Kaplamasına Gelen Eksenel Kuvvet.....	100
Şekil 7.35	:Tünel Örneğinde Geogridlerin Yerleşimi.....	101
Şekil 7.36	:Bina İnşa Edilmeden Geogrid uygulamasında Hesap Aşamaları..	102
Şekil 7.37	:Geogrid Uygulanması urumunda Zemin Yüzeyinde Meydana Gelen Toplam Deformasyon.....	103
Şekil 7.38	:Geogrid Uygulanması Durumunda Son Aşamada Tünel	

	Kaplamasında Meydana Gelen Deformasyon.....	103
Şekil 7.39	:Geogrid Uygulanması Durumunda Son Aşamada Tünel Kaplamasında Son Aşamada Tünel Kaplamasında Oluşan Burulma Momenti.....	104
Şekil 7.40	:Geogrid Uygulanması Durumunda Son Aşamada Tünel Kaplamasına Gelen Eksenel Kuvvet.....	104
Şekil 7.41	:Tünel Örneğinde Enjeksiyon Uygulaması.....	105
Şekil 7.42	:Enjeksiyon Uygulamasında Hesap Aşamaları.....	106
Şekil 7.43	:Enjeksiyon Uygulanması Durumunda Zemin Yüzeyinde Meydana Gelen Deformasyon.....	107
Şekil 7.44	:Enjeksiyon Uygulanması Durumunda Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Deformasyon.....	107
Şekil 7.45	:Enjeksiyon Uygulanması Durumunda Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Burulma Momenti.....	108
Şekil 7.46	:Enjeksiyon Uygulanması Durumunda Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Eksenel Kuvvet.....	108
Şekil 7.47	:2 kat Bodrumlu Bina İnşa Edilmesi Durumunda Problem Geometrisi.....	109
Şekil 7.48	:2 kat Bodrumlu Bina İnşa Edilmesi Halinde Plaxis Hesap Aşamaları.....	110
Şekil 7.49	:2 kat Bodrumlu Bina İnşa Edilmesi Durumunda Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Toplam Deformasyon.....	111
Şekil 7.50	:2 kat Bodrumlu Bina İnşa Edilmesi Durumunda Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Burulma Momenti.....	111
Şekil 7.51	: 2 Kat Bodrumlu Bina İnşa Edilmesi Durumunda Tünel Kaplamasına Gelen Eksenel Kuvvet.....	112

SEMBOL LİSTESİ

B	: Akifer Kalınlığı
c	: Kohezyon
c_i	: Toplam Çarpan Hesaplanmasında Zemin özellikleri tanımlanırkenki içsel sürtünme açısı değeri
c_r	: Toplam Çarpan Hesaplanırken analizlerde kullanılan kohezyon değeri
d	: Duvar kalınlığı
E	: Young modülü
E_{50}^{ref}	: Drenajlı Üç eksenli basınç deneyinde sekant rijitliği
E_{oed}^{ref}	: Başlangıç ödometre yüklemesi için tanjant rijitliği
E_{ur}^{ref}	: Yükleme boşaltma için rijitlik
EA	: Normal Rijitlik
EI	: Eğilme Rijitliği
F_{max}	: Maksimum Kuvvet
H	: Tünel Üzerindeki yeraltı suyu tabakasının kalınlığı
h	: En fazla düşmenin olduğu noktaya tünelden olan yükseklik
h	: Enjeksiyon ilerleme mesafesi
k	: Permeabilite (geçirimsizlik)
k_x	: Yatay geçirimsizlik
k_y	: Düşey Geçirimsizlik
K*	: Modifiye şişme indisi
K_0^{NC}	: Normal konsolide durum için sükunetteki toprak basıncı katsayısı
L_s	: Destek Aralığı
m	: Gerilme seviyesine bağlı malzeme katsayısı
M	: K_0^{NC} parametresi
N	: Enjeksiyon viskozitesinin suyunkine oranı
p^{ref}	: Rijitlikler için Poisson Oranı
Q	: Enjeksiyon hızı
Q_u = Q_c	: Kuyudan akış miktarı
r	: Enjeksiyon balonu yarıçapı
r_o	: Enjeksiyon borusu yarıçapı
r_o	: Seviye düşürmenin etki yarıçapı
R_f	: Göçme oranı
S_s	: Özgül Yüzey
T	: Zaman
V	: Zemin hacmi
W	: Su muhtevası
w	: Eleman ağırlığı
γ_{dry}	: Kuru birim hacim ağırlığı

γ_{wet}	: Islak birim hacim ağırlığı
λ^*	: Modifiye sıkışma
ΔR_o	: Tünel boşluğunda iksa başlayıncaya kadar meydana gelen ön deformasyon
ν	: Poisson oranı
ν_{ur}	: Yükleme boşaltma için poisson oranı
σ	: Normal gerilme
$\sigma_{increment}$	: Derinlikle kohezyon artışı
$\sigma_{tension}$	: Çekme gerilmesi
$\sum M_{sf}$	: Toplam çarpan
Φ_i	: Toplam çarpan hesaplanırken zemin özelliklerini tanımlarken girilen İçsel Sürtünme Açısı
Φ_r	: Toplam çarpan hesaplanırken analizlerde kullanılmış azaltılmış İçsel Sürtünme Açısı
Φ	: İçsel sürtünme açısı
Ψ	: Dilatansi, genleşme açısı

TÜNELLERDE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE STABİLİTENİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE PLAXIS PROGRAMINDA ANALİZ EDİLMESİ

ÖZET

Tüneller, doğal güçlükler ve tehlikeler içeren bölgelerden, ulaşım kolaylığı sağlamak için çeşitli kütlelerin içinde yapılan iki tarafı açık kazılara denir. Tünelcilikte zemin iyileştirmesinin amacı, kazı programının güvenli ve aksamadan gerçekleşmesi için zeminde yeterli iyileşmeyi sağlamaktır. İnşaatin emniyetli ve ekonomik olması için, mevcut şartlara göre toprak işleri ile iksa ve kaplama işlerinin en uygun biçimde planlanması ve gerçekleştirilmesinde gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında tüneller ve çeşitleri tanıtılmış, tünel inşasına kadar yapılan araştırmalar, yüzey ve yeraltı çalışmaları, tünel açma, inşa ve iksa yöntemlerine yer verilmiştir. Planlama ve tasarım aşamalarında sonlu elemanlar yöntemi gerçeğe yakın güvenilir sonuçlar vermektedir. Tez kapsamında geoteknik problemlerin analizinde kullanılan sayısal yöntemler ele alınmış ve zemin inşa yöntemlerinden NATM (Yeni Avusturya Metodu)'e detaylı olarak değinilmiştir.

Bu çalışmada ayrıca tünellerin geçtiği bölgelerde yapılması planlanan yapılardan dolayı zemin yüzeyinde ve tünel kaplamasında meydana gelebilecek deformasyonlar sonlu elemanlar programı olan Plaxis'de analiz edilmiş ve elde edilen sonuçları ile meydana gelen deformasyonları kabul edilebilir sınırlar içinde tutmak için çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri uygulanmıştır.

ANALYSIS OF SOIL IMPROVEMENT AND SOIL STABILITY FOR TUNNEL CONSTRUCTION BY USING PLAXIS SOFTWARE AND FINITE ELEMENTS METHOD

SUMMARY

Tunnels are civil structures that are built through masses that don't carry the satisfactory surface conditions required for other ground transportation structures. Soil improvement is a helpful methodology for tunneling as it reduces the risk associated with weak soil conditions. Stable soil structure is a must for a safe, successful and ongoing tunnel construction. For a tunnel, project to be safe and economically sufficient, a preliminary design of the support system and planning of soil excavation method is required.

This thesis focuses on the discussion of numeric methods that are used for analyzing geotechnical problems and their improvement while giving information about types of tunnels, surveys that are made till the start of tunnel construction, surface and underground operations and support systems. As a tunnel construction method, NATM (New Austrian Tunneling Method) is explained in detail.

Also in this study, deformations appearing both over the tunnel facing and ground surface are examined by PLAXIS software which uses finite element method for the calculation of stress and strain data. Soil conditions are improved for the situations that the deformation and vertical displacement values are out of the required boundaries. Improvements are changed till the desired values are reached and the results are shown in detail with graphics at the end of the thesis.

1. GİRİŞ

1.1 Genel

Tüneller, doğal jeolojik tehlikeler ve riskler içeren bölgelerde, ulaşım kolaylığı sağlamak için çeşitli kütlelerin içinde yapılan iki tarafı açık kazılara denir.

Tünelcilikte geçen 3000 yıldaki gelişmeler gözardı edilemez boyuttadır. Sandstrom, tünelciliğin, toplumun gelişip kültürel ilerlemesini ve teknik ve ekonomik büyümeyi pozitif yönde etkilediğini söylemiştir [1].

Yeryüzünde ilk tünelin M.Ö. 4000 yıllarında, Babil şehri civarlarında Fırat Nehri altında açıldığı bilinmektedir. Bundan sonra, dünyanın birçok yerinde insan gücü ile pek çok tünel açılmıştır. 1679 da barutun keşfinden sonra, kayaları parçalayarak tünel açma gelişmiştir. 1807’de Thames nehri altında açılmaya başlanan ilk su altı tüneline birçok zorlukla karşılaştığı için açma işlemi yarım bırakılmış, ancak tamamlanması zaman içinde tünelcilik alanında gelişmeler ile 1842 yılında mümkün olmuştur. Karada ilk demiryolu tüneli 1826 da Fransada Raonne – Andressieux ve 1826 – 29 da da İngiltere’de Liverpool – Manchester arasında açılmıştır. 1857’de ilk defa Mont Cenis Tünel’i bölgede bulunan kayaların hidrolik kuvvetler ile delinmesi yoluyla inşa edilmiştir

Ülkemizde, çok eskiden, özellikle su getirmek için açılmış uzun tüneller ve galeriler bulunmaktadır. Doğu ve Güney Anadolu’dan, İstanbul civarlarından su getirmek amacı ile tarihi dönemlerden bu zamana kadar yapılmış galeri ve tüneller örnek vermek mümkündür. Silifkenin Kuzeydoğusunda milattan 300 yıl önce yapıldığı söylenen 0.80 x 1.50 – 2.00 m çapında ve 45 km uzunluğundaki Aksıfat galerisinden bugünde köylerde su iletmede faydalanılmaktadır [2].

Tünel inşaatlarında projelendirilmenin önemi ve yapım metodunun belirtilmesi işine ilk olarak Romalılar dikkat çekmiştir. Tünel mühendisliği bununla beraber en büyük atılımını son 200 yılda kazı, destekleme, çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve en

uygun projenin yapılması ile yapmıştır. Tünelciliğin gelişmesini etkileyen faktörler Tablo 1.1’de incelenmiştir.

Tablo 1.1: Tünelciliğin Son 100 Yılda Gelişmesini En Fazla Etkileyen Unsurlar [3]

	Ana Etkenler
Kazı (Hafriyat)	1 - Sondajlardan gelen sonuçlar
	2 - Geliştirilmiş patlayıcılar ve patlatma teknikleri
	3 - Elektriksel ve basınçlı havanın güç olarak kullanılması
İksa (Destekleme)	1 - Geliştirilmiş kaplama; beton ve kalıp demiri
	2 - Basınçlı enjeksiyon ile yapılan zemin iyileştirmesi
	3 - Tünel aynasında zemin kontrolünü sağlayan kalkan
Çalışma Ortamı	1 - Havalandırma
	2 - Aydınlatma
	3 - Pompalar ile zemin suyunun kontrol edilebilmesi
	4 - Tünel aynasında basınçlı hava yastıkları oluşturarak tünele su akışının engellenmesi

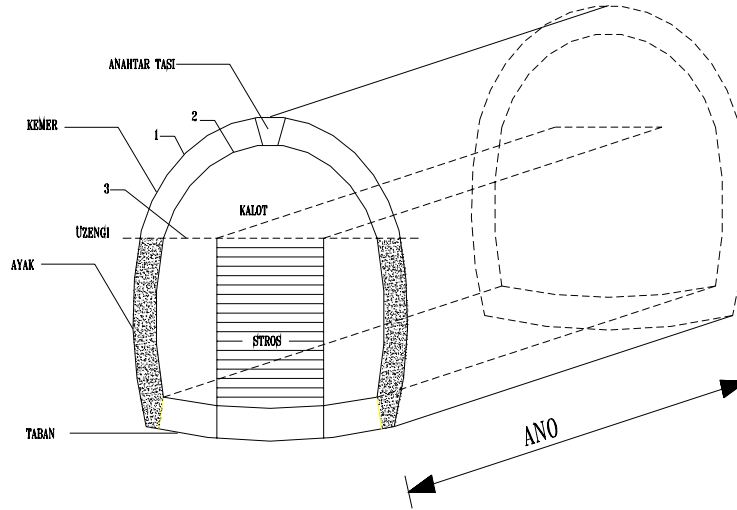
Yukarıda belirtilen faktörlerin dışında tünelciliğin gelişmesine etki eden diğer faktörler tünel inşasından önce ve inşası sırasında göz önünde bulundurulması gereken; jeolojik, jeofizik, hidrojeolojik ve içlerinde en önemlisi olan geoteknik araştırmalara verilen önemdir.

Bu çalışmada tüneli inşa ederken tünel hakkında bilinmesi gereken temel bilgiler, inşaat sırasında uygulanacak zemin iyileştirilme yöntemleri ve NATM ile inşa edilmiş bir tünel örneği incelenmiş ve deformasyonların sonlu sayısal yöntemi Plaxis yardımı ile analiz edilmesine yer verilmiştir.

2. TÜNELLER

2.1 Tünel ile İlgili Bazı Tanımlamalar

Yeraltında yatay veya eğik olarak yapılan iki ucu açık boşluklara Tünel, bir tarafı açık olana “Galeri”, dik olarak yapılan kazılara “Baca” (şaft), aşağıya eğimli olanlara “Baş aşağı”, yukarıya doğru olanlara “Baş yukarı”, geniş daire ve buna yakın şekillerde olanlara “Oda”, (Bekletme ya da dinlenme odası), tünelin üstünde bulunan zemine “Örtü” ve bunun kalınlığınca “Örtü Kalınlığı” adı verilir.



Şekil 2.1: Tünel Enkesiti [2]

Şekildeki tünel enkesitinde gösterildiği gibi; tünelin ilerlediği boşluğun alt kısmına “Taban” ya da “Radye”, yan kısımlarına “Yan”, “Ayak” ya da “Duvar”, üst kısmınada “Tavan” ya da “Kemer” denir. Kemerin ayaklarla birleştiği noktaya “Üzenge ve Üzenge Seviyesi”, üzenginin üstünde kalan kısmına ”Kalot” üzenge seviyesinin altında kalan kısmınada “Stros”, “Orta kısım” ismi verilir.

Tünel kazılmasında tünelden çıkarılan kütlelere “Pasa” denir. Herhangi bir metodun uygulanmasında, bir işlemin yapıldığı parçaya “Ano” adı verilir. Bunu uzunluğu uygulanan metoda göre 1,5 m ile 9 m arasında olabilir.

Tüneller sağlam, çatlaklı ve çatlaksız kayada açılabilirdiği gibi kum-çakıl, kum, su içeren killer gibi konsolide olmamış zeminlerde de açılabilirler.

Tüneller ister kayada açılsın ister konsolide olmamış zeminlerde açılsın; inşaat esnasında ve inşaatı tamamlandıktan sonra, amacı için kullanım sürecinde Jeolojik ve Geoteknik bilinmeyenler tam olarak ortadan kaldırılmadığı takdirde, özel problemler ortaya çıkarır.

2.2 Tünel Çeşitleri

Yolun cinsine göre tünelleri; demiryolu, yol, metro, kanal ve yaya tünelleri olmak üzere 5 şekilde inceleyebiliriz.

2.2.1 Demiryolu Tünelleri

Tek hatlı demiryollarında 4,5 ila 6 m genişlikte, çift hatlı demiryollarda ise 8 ila 9 m lik bir genişlikte açılırlar. Yükseklikler havalandırma tesisleri bakımından elverişli, arabaların üzerinde en az 1,20 m bir boşluk kalacak biçimde, kurbalarda dış ray, alinyimanlarda ray seviyesinde olmak üzere ray hizasından en az 4,0 m, anahtar taşı altına kadar en az 6 m olmalıdır. Tek hatlı demiryollarında daha çok sepet kulbu şekli, çift hatlarda ise tam kemer şekli uygulanır. Buna karşılık satha çok yakın olarak geçilmesi durumunda dikdörtgen şekline de gidilmiştir [4].

2.2.2 Yol Tünelleri

Şehirler arası yol tünellerinde genel olarak 6 m’lik bir otoyolu ile yan taraflarda 1’er m’lik iki yaya yolu bulunur. Kemer yüksekliği, bordür üstünden anahtar taşı altına kadar 4.30 m’den az olmamak üzere 5 ila 6 m’dir.

Şehir içlerinde olduğu gibi, trafiği fazla olan tüneller daha geniş olur. Bu tüneller yalnız bir yöndeki trafiğe, bazen de gidiş ve geliş olmak üzere her iki yöndeki trafiğide barındırabilir. Genel olarak otoyol aynı yönde iki şerit içeriyor ise genişliği en az 6 m yüksekliği ise anahtar taşı altına kadar 4 m ila 4.30 m’dir. Eğer bir şerit gidiş diğer şerit geliş olacak ise 6 m’lik genişlik biraz daha arttırılır.

Tüneller genel olarak tam kemer, sepet kulbu veya elips şeklinde olup nehir altından geçtikleri takdirde çok defa bukliye ile açıldıklarından daire şeklinde olurlar. Eğer tünel satha çok yakın ise o zaman dikdörtgen kesit tercih edilerek üzeri betonarme döşeme ile kapatılır.

Büyük aksı yatay olan elips şekli kazı hacmini azaltır. Fakat zemin itkisinin büyük olması dolayısı ile deformasyon tehlikesi varsa büyük aksı düşey olan elips şekli seçilir. Eğer tünelin havalandırması büyük kesit gerektiriyorsa tam kesit tercih edilir [4].

2.2.3 Yaya Tünelleri

Yaya tünelleri genişliği 3 m'den, yüksekliği ise insana ezilme hissi vermemesi bakımından 2.50 m'den daha küçük tutulmamalıdır. Şekilleri ise dikdörtgen veya tercihen kemerli veya daire şeklinde olabilir. Bu tünellerde bazen bisikletliler için ayrı bir şerit de yapılabilir [4].

2.2.4 Kanal Tünelleri

Kanal tünelleri için en kesit şekli geçecek olan teknelerin cinsine göre değişir. Örneğin Fransa'daki Oise-Aisne kanalı üzerindeki Braye-en-Laonnois tüneli tam kemer şeklinde olup, genişliği 8m yüksekliği ise 8.50 m dir. Yine Marsilya civarındaki Rove tüneli ise sepet kulbu şeklinde yapılmış olup genişliği ise 22 m, yüksekliğide su üstünde kalan kısmı 9.90 m olmak üzere, 15.40 m'dir [4].

2.2.5 Metropolitan Tünelleri

Bunlara ait şekil ve boyutlar şehirlere göre birbirinden farklılık gösterdiğinden, bir fikir vermek üzere Paris ve Londra tünellerinden örnekler verilmiştir.

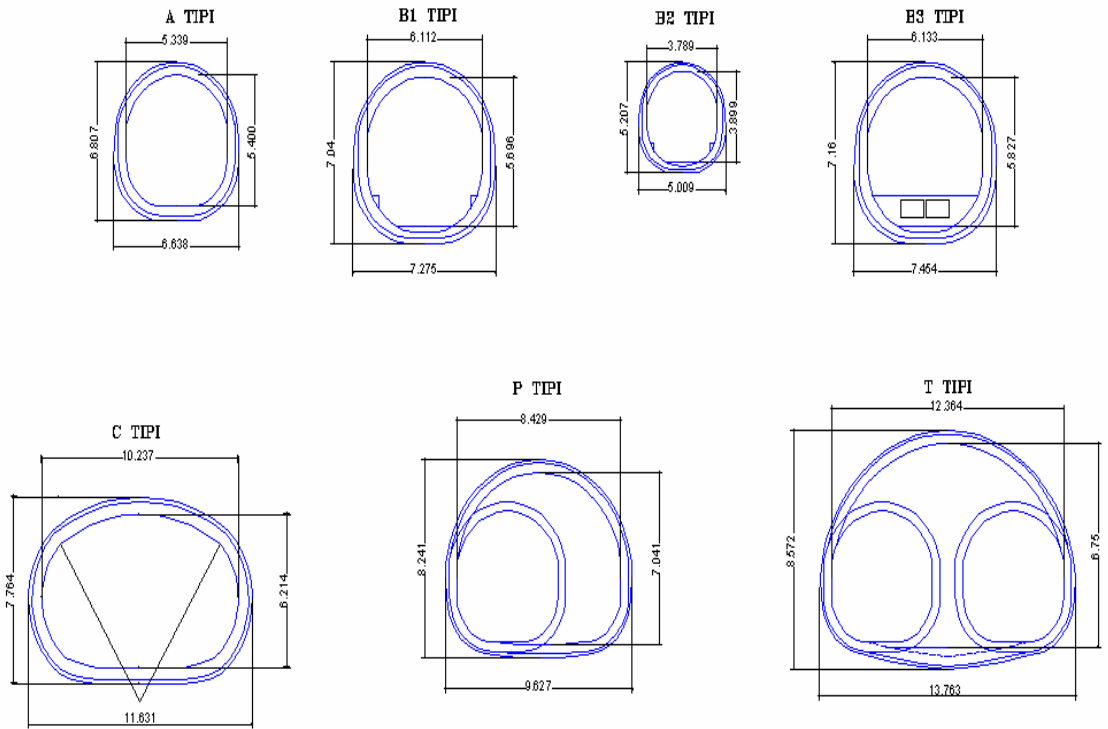
Paris'deki metro tünelleri genel olarak kemerli ve çift hatlıdır. Bunun yanında bir, üç ve dört hatlı kısımlarda vardır. Tek hatlı olanlarda genişlik 4.30 m dir. Yükseklik ise 4.70 m olup 2.15 m yarıçaplı tam kemer şeklinde yapılmışlardır.

Çift hatlılarda genişlik 7.10 m iken yükseklik 5 m dir. Kemer elips şeklinde olup, bunun yüksekliğide 2.07 m dir. Üç ve dört hatlılar ise sırası ile 10 m ve 12.90 m genişliktedirler. Kemerler genellikle üç merkezli sepet kulbu şeklindedir.

İstasyonlar genel olarak kemerli ve iki hatlıdır. Fakat bir, üç, dört ve beş hatlı olanları da vardır. Bunların bir kısmı kemerli bir kısımda çelik veya betonarme

döşeme ile kapatılmışlardır. İki hatlı kemerli istasyonlar 14.14 m genişlikte, 5.90 m yükseklikte olup uzunlukları 75 ila 105 m'dir. Tek hatlı istasyonlarda genişlik en az 7,30 m olup, üç-dört hatlılarda ise 22.50 m'yi bulmaktadır. Nehir altındaki bukliye tünelleri ise daire kesitli olup, genel olarak çift hatlı ve çapları dışta 7.78 m'dir.

Londra'daki tüp şeklindeki tüneller de bukliye ile açılmış olup, daire çapları 3.30 m ila 3.70 m arasındadır. Fakat bu genişlik çok az olup havalandırma, kanalizasyon ve bakım personeli için hiç pay bırakmamaktadır. İstasyonlar ise yine bukliye ile açılmış olup tek hatlıdır ve dış çap 6.50 m istasyon uzunlukları ise 106 m'dir [4]. Demiryolu, yol, yaya, kanal veya metropoliten tünelleri için tip kesitler aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Tünel Tip Kesitleri

2.3 Tünel Güzergahı Seçimi ve Tünel İnşasına Kadar Yapılan Araştırmalar

Bir tünelin başarılı olarak açılabilmesi için itinalı ve eksiksiz bir geoteknik araştırma programının uygulanması gerekmektedir. Bu proram 3 safhadan oluşmaktadır.

- Ön inceleme safhası
- Fizibilite Safhası

- Proje Safhası

Şimdi sırası ile bu safhalarda yapılması gereken araştırmaları inceleyelim.

2.3.1 Ön İnceleme Safhası

Bu safhada elde mevcut bilgilerden (bölgesel jeolojik haritalar ve yayınlar, hava fotoğrafları, yeraltı suyu araştırmaları, sondaj kuyusu logları, arazideki mostroların incelenmesi, bölgede daha önce açılmış olan tünellere ilişkin inşaat kayıtları, çevrede varsa taş ocağı veya maden işletmesi gibi yerlerin incelenmesi vb. gibi) azami ölçüde faydalanılmalıdır. Bu safhada araştırma sondajları yapılmasında bazı özel hallerde örneğin örtü kalınlığının bilinmesi, yeraltı su derinliğinin öğrenilmesi veya özel jeolojik sorunun çözülmesi amacı ile birkaç sondaj kuyusu açılabilir.

Düşünülen alternatif güzergahlar ayrı ayrı incelenir. Bilindiği gibi büyük fay zonları, ayrıışmış kayalar, karstik kireçtaşları ve alçı taşları, ayrıışmış serpantin, yeraltı su seviyesinin altında bulunan suya doymuş kumlar, şişme özelliği gösteren kayalar tünel açımı sırasında büyük zorluklara neden olmaktadır. Bu nedenle bu gibi zorluklar göz önüne alınarak bir veya birkaç alternatif güzergah daha sonra ki fizibilite safhasında incelenmek üzere seçilir. Alternatif güzergahlar diğerlerine oranla daha uzun olsalar da incelenmeli ve mukayese edilmelidirler. Bazı hallerde direk güzergahın en kısa olmasına karşın inşaat yönünden zorluklar oluşturduğu, büyük ölçüde iksayı gerektirdiği ve bunların sonucunda da gerek inşaat süresinin uzadığı gerekse toplam maliyetin arttığı görülmüştür.

Tünel üzerindeki örtü kısmı da önemlidir. Metrolar ve metro istasyonları yüzeye yakın olarak inşa edilirler ve bunlar genellikle yüzeyin 15–30 m altındadırlar. Böyle hallerde yer altı su derinliği ile zemin-kaya sınırı dikkate alınmalı ve öğrenilmelidir. Tünelin zemin-kaya sınırında ilerlemesinden kaçınılmalı, ilerleme tümü ile ya kayada ya da zeminde yapılmalıdır [8].

2.3.2 Fizibilite

Bu safha jeolojik harita alımı, ön sondajlar, muayene çukurları ve diğer gerekli jeolojik çalışmaları kapsar. Bu safhada jeoloğunun görevleri şu ana başlıklar altında toplanabilir:

- Tünel güzergahı dolayının ayrıntılı jeolojik haritası hazırlanmak

- Tünel merkezi çizgisi boyunca ayrıntılı bir jeolojik profil hazırlamak
- Karşılaşmalı muhtemel tünel zemini koşullarını inşaat mühendisinin veya müteahhitin aşına olduğu terimlerle açıklamak
- Projeciye şartnameler vermek ve maliyetin tespitinde yardımcı olmak

Bu safhada ön maliyet ve seçilen alternatifler tekrar gözden geçirilerek en ekonomik güzergah seçilir. Bundan sonraki proje safhası için önerilerde bulunulur [8].

2.3.3 Proje Safhası

Bu safha nihai Jeolojik harita alımı çalışmalarını, sondaj araştırmalarını ve yerinde deneyler ile laboratuvar deneylerini kapsamaktadır. Bu safhada Jeolojik profil daha ayrıntılı hale getirilir ve teknik rapor yazılır. Projenin ayrıntılı olarak maliyetinin hesaplanmasının yapılmasında projeyi yapana yardımcı olunur.

Bu hesaplamanın yapılmasında ve planlamanın yapılması şu şekilde gerçekleştirilir:

- Tünel seviyesi ve istikametinin belirlenmesi,
- Giriş ve şaftlar için uygun yerlerin saptanması,
- Tünel kaplamasının tasarımı,
- Özel tekniklere gereksinim olup olmadığının tespiti,
- Kazı ve inşaat yöntemleri ile ilgili önerilerde bulunması,
- Önerilen kazı ve inşaat yöntemleri ile ilgili ilerleme hızı, aşırı sökme miktarları ve tünel içerisine gelmesi muhtemel su miktarları belirlenir.

2.4 Tünel Zemini Şartları

Tünel zeminlerini üç ana bölümde genellemek mümkündür:

- İyi tünel zemini
- Orta zorlukta tünel zemini
- Çok zorluklu ve tehlikeli tünel zemin

2.4.1 İyi Tünel Zemini

Bu grupta yeralan zeminler genelde sert kayalardır ve orta derecede eklemlidir. Eklemler kapalı, altere olmamış, devamsız ve düzensizdir. Bu tip zeminlerde tüneller iksasız olarak açılabilirler veya bazı hallerde yer yer bulonlar gerekir.

2.4.2 Kesit Büyüklüğü

Bloklu, damarlı ve yer yer kayada küçük kesitli bir tünel açılması halinde iksa ile ilgili sorunlar fazla değildir. Gerekğinde kaya bulonları, ince püskürtme betonu veya hafif çelik kaburgalar kullanılır. Böyle bir tünelin açılışı sırasında büyük göçük veya dökülmeler nedeni ile ilerleme hızında bir yavaşlama olmayacaktır. Diğer taraftan geniş kesitli bir tünelin açılması halinde ise önemli stabilite sorunları ortaya çıkacaktır.

2.4.3 Tünelin Doğrultusu

Kaya kütlelerinin çoğunda genellikle 3 veya 4 eklem takımı gelişmiştir. Bu eklemlerin tünel genişliği, patlayıcı faktörü, aşırı sökme, hafredilen duvarın ve tavanın şekli ve kaya bulonlarının aralıkları üzerine bazı etkileri vardır.

Bir eklem takımının hakim olması ve özellikle eklem yüzeylerinin ayrışmış ve alterasyon nedeni ile zayıflamış olması halinde doğrultu durumu önem kazanır.

Tünelin hakim bir düşey veya düşeye yakın zayıflık düzlemine paralel veya hafif verev gitmesi halinde yan duvarlarda dökülmeler ve aşırı sökme görülecektir. Fazla eğimli iki eklem kesilmesi sonucunda tavanda büyük kaya kamalamaları gelişir. Bu kamalar zayıflayarak aniden düşebilir veya çelik iksanın bozulmasına neden olabilirler. Böyle zayıflık zonlarının dik olarak kesilmesi halinde az bir etki görülür. Zayıflık düzlemlerinin yatay veya düşey olması halinde aşırı sökme ortalama olarak 30–50 cm kadar gelişecektir.

Zayıflık düzleminin iyi gelişmiş ve uzanımının devamlı olması halinde doğrultu durumunun büyük sorunlar yarattığı görülecektir. Zayıflık zonunun doğrultusu ile tünel doğrultusu arasındaki açıya bağlı olarak zayıf kaya koşulları yüzlerce metre devam edebilir. Yüzlerce çelik iksaya veya büyük miktarlarda püskürtme betonu ile bulonlara gereksinme duyulabilir.

Özetle söylenebilir ki; izotrop koşullarda fazla önemi olmayan doğrultu durumu zayıflıkların mevcut olduğu anizotrop ortamlarda büyük önem kazanır.

2.4.4 İksanın Uygunluğu

İkinci kategoride “ortadan-zora” yeralan kaya koşullarında tünelciliğin zorluk derecesi büyük ölçüde tünel kesitinin büyüklüğüne ve tünelin doğrultusuna bağlıdır. Burada önemli bir hususta mevcut kaya koşullarına uygun iksanın seçip seçilmediğidir.

Kayada karşılaşılan sorunlar eğer uygun tünelcilik yöntemleri seçilmiş ise makul sınırlar içerisinde kalan ilerleme miktarları ve maliyetlerle önlenebilir.

Mühendislik jeoloğunun önemli görevlerinden birisi de uygun iksanın seçiminde yardımcı olmak ve ilerleme sırasında hangi jeolojik sorunlarla karşılaşabileceğini önceden söyleyebilmektir.

2.4.5 Çok Zor Tehlikeli Tünel Zemini

Bu gruba giren zeminlerle genellikle tünel inşaatının az bir bölümünde karşılaşılır. Bazı hallerde daha geniş bölgelerde de bu tip zeminlerle karşılaşılır ve böyle durumlarda tünelin maliyeti çok artar.

Bu tip zeminlerle karşılaşılacağı önceden bilinse dahi tünel açımı yinede zor olacak ve tünel inşaatının maliyeti de yüksek olacaktır. Eğer bu tip zeminlerle beklenmedik bir şekilde karşılaşılırsa sonuçlar felakete dönüşebilir. Bu tip zeminleri oluşturan jeolojik şartları şu şekilde sıralayabiliriz;

- Islak, çok eklemlili kaya
- Büyük basınçlar altında sıkışmış zemin
- Yüksek su basınçları
- Büyük miktarda su baskınları
- Çok yüksek gerilme altında bulunan kaya

Yukarıda belirtilen ilk 4 hal faylarla ilgili olabilir. Islak, çok eklemlili kayalar genellikle fay zonları yakınında bulunurlar.

2.5 Yüzey ve Yeraltı Çalışmaları

2.5.1 Jeofizik Araştırmalar

Gerek rezistivite ve gerekse sismik çalışmalar fayların belirlenmesi, yeraltı su seviyesinin, ayrıışmış zonun deliklerinin saptanmasında son derece yardımcı olmaktadır. Bu yöntemler hızlı ve ucuz olmaları nedeni ile araştırma programının vazgeçilemezlerindendir.

2.5.2 Mekanik Araştırmalar

Tünelin içerisinde açılacağı zeminin araştırılmasında muayene çukurları, yarmalar, sondajlar ve tünellerden de yararlanılmaktadır. Bunlar arasında en uygun olan yöntem veya yöntemlerin seçimi jeolojik yapı, araştırma safhası, örtü kalınlığı, uygulanacak deneyler gözönünde bulundurularak yapılır [5].

2.5.3 Tünel Güzergahı Boyunca Açılan Sondajlar

Kaya kalitesi, kırıkların durumu, alterasyon, permeabilite ve yer altı su seviyesi ile ilgili bilgilerin toplanması amacı ile tünel güzergahı boyunca sondajlar açılabilir. Eğer sondajların tam tünel merkez çizgisi üzerinde açılma zorunluluğu var ise terkedilmeden önce çimento solusyonu ile doldurulmaları gerekir. Bu şekilde hareket edilmemesi halinde tünel açımı sırasında bu kuyulardan tünel içerisine yeraltı suyu gelebilir ve sorunlar yaratabilir.

Her tünel güzergahında en az 5 adet sondaj kuyusu açılmalıdır. Bunlardan ikisi tünelin her iki giriş ağzında diğer üçüde tünel çizgisi boyunca açılırlar. Diğer taraftan yapılmış olan jeolojik incelemeler önemli bir fay zonunun tüneli keseceğini gösterebilir. Tünel açımı sırasında bu fay zone neden ile büyük sorunlar oluşabileceğinden sondaj yerleri bu sorunlara açıklık getirecek şekilde seçilmelidir. Bu 5 adet sondaj kuyusunun iki safhada açılması planlanabilir. Bu şekilde ilk safha sondajları tamamlandığında ikinci safha sondajlarının yapıp yapılmayacağına karar verilir. Bugün yeraltı araştırmalarında genellikle rotari sondaj tipi kullanılmaktadır. Tünelin heriki ağzında açılacak yatay sondajlar genellikle sorunlarla karşılaşılın bu kısımlar hakkında yararlı bilgiler sağlarlar [5].

Yeraltı jeolojisinin şekillendirilmesi için sondajlarda saptanan eklemler, yapraklanmalar ve faylar gibi yapısal şekillerin korele edilmesi gerekmektedir. Bu

değerlendirmeler sırasında kuyu içi fotoğraf alma, sondaj kuyusu televizyonu veya yönlü karot alma aleti gibi tekniklerden de yararlanılmaktadır.

2.5.4 Pilot Tüneller

Jeolojik koşulların kritik olduğu yerlerde tünel güzergahının bir pilot tünelle araştırılması fayda sağlayan yöntemlerden biridir. Pilot tüneller bir kişinin içinde rahatlıkla çalışabileceği boyutlarda (1.25 m genişlik, 2 m yükseklik) açılmalıdır.

Muhakkakki pilot tünelle araştırma, maliyet zaman ve emek yönünden kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle diğer yöntemler elemine edildikten sonra pilot tünel yöntemine gidilmelidir. Eğer zemin koşulları pilot tünel ile ıslah edilebiliyorsa araştırma, maliyet ve zaman kayıpları göze alınabilir [5].

2.5.5 Kaya Kalitesinin Saptanması

Geçmişte kaya sınıflandırması için Terzaghi sınıflaması kullanılmakta idi. Bu sınıflandırmaya göre kayalar 9 gruba ayrılmaktadır.

- Sert ve çatlaksız
- Sert, tabakalı veya şist
- Masif, orta derecede eklemlili
- Orta derecede bloklu ve damarlı
- Çok bloklu ve damarlı
- Tamamı örselenmiş fakat kimyasal olarak bozulmamış
- Sıkışan kaya, orta derinlikte
- Sıkışan kaya, çok derinde
- Şişen Kaya

Bu yöntem bugün belli bir ölçüde kullanılmakta ise de yeni yöntemlerin daha kolay belirlenir olmaları nedeni ile giderek daha az kullanılmaktadır.

Stini (1950), tünelcilikte ve kaya mekaniğinin babası olarak kabul edilir. Stini, kaya kütlelerindeki yapısal kusurların önemini vurgulamıştır. Bu tabloyu Tablo 2.1’de görebilirsiniz. Rabewicz (1958), kimyasal bakımdan ayrışma durumuna bağlı olarak, kayanın kendini tutma süresi ve gerekli sağlamlaştırma türünü ortaya koymuştur.

Tablo 2.1: Stini'ye Göre Beklenilen Dağ Basıncı [6]

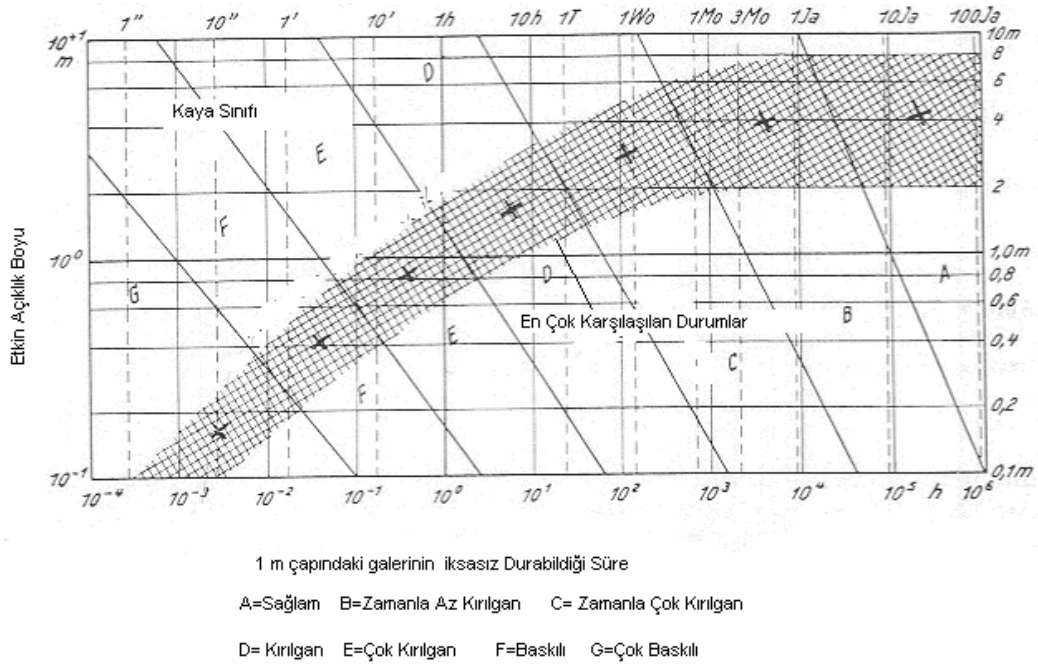
Basınca göre Sınıflandırma	Kayaç Cinsi	Oluşan Çatlak Boyu (m)
9 Çok Baskılı Kayaçlar	Şistler, kırılğan marnlar ezilmiş kayaçlar, aşırı parçalanmış zonlar	40~60
8 Orta Baskılı Kayaçlar	Kırılğan, ince tabakalı şistler, fillitler yumuşak marnlar, grafitik şistler, ıslak kilitaşı	24~40
7 Hafif Baskılı Kayaçlar	Kilitaşı, az deformasyonlu şistler mikalı kuvars şistler, kısa aralıkla bol killi, sert kayaçlar, orta derceli milonit zonları, killi marnlar, dopal nemli mil, ıslak taban morenleri	15~25
6 Çok Kırılğan Kayaçlar	İnce tabakalı, çok marnlı kum taşları, mikalı fillitler, bazı sert marnlar, kalkerli killeri, şistler, sahil morenleri	10~15
5 Kırılğan Kayaçlar	Killi marnlar, bazı ince tabakalı, kırılğan kum taşları, tektonik oluşumlu dolomitler	4~10
4 Orta Kırılğan Kayaçlar	Çok parçalanmış dolomitler	2~4
3 Az Kırılğan Kayaçlar	Fazla deformasyona uğramış, iyice parçalanmış kuvars fillitleri, kloritli şistler, mikalı ince kalker tabakalı şistler	1~2
2 Yeterince Sağlam Kayaçlar	Mikalı şistler, ince klivajlı gnayslar	0,5~1
1 Sağlam Kayaçlar		0~0,5

Tablo 2.2: Rabcewicz, L.V.'e Göre Kaya Sınıflandırması [6]

Dağ Türü			Kendini Tutma Süresi (gün)	Sağlamlaştırma Türü		
				Geçici		Kalıcı
				Çelik Beton Beton içinde Ankraj	Çelik bağ	
1	Sağlam Som Kaya	Kimyasal Bakımdan Bozulmamış	Hiçbir sağlamlaştırma önlemine gerek yok.			
2	Tabakalı, klivajlı Sağlam Kaya		0~24	Çelik Ankraj		Püskürtme beton ankraj beton kaplama
3	Çok çatlaklı, kırıklı kaya		24~1			
4	Tümüyle paralanmış kaya		0		Çelik Bağ	Beton
5	Psöde (yalancı) kaya	Kimyasal bakımdan bozulmuş	Jeolojik koşullara ve su gelişine bağlı olarak birkaç günden bir kaç saate kadar	Püskürtme Beton ,ankraj, çelik hasır ve püskürtme beton ve ankrajlar	Çelik Bağ	
6	Yüzeye yakın az baskılı kaya					
7	Derindeki çok baskılı kaya					
8	Kabarma-şişme basınçlı kaya					
9	Silt, kil					
10	Kum, çakıl moloz kohezyonsuz ayrık kayaç	Kimyasal olarak sağlam	0	yetersiz bilgi	Çelik Bağ	Çelik beton kaplama

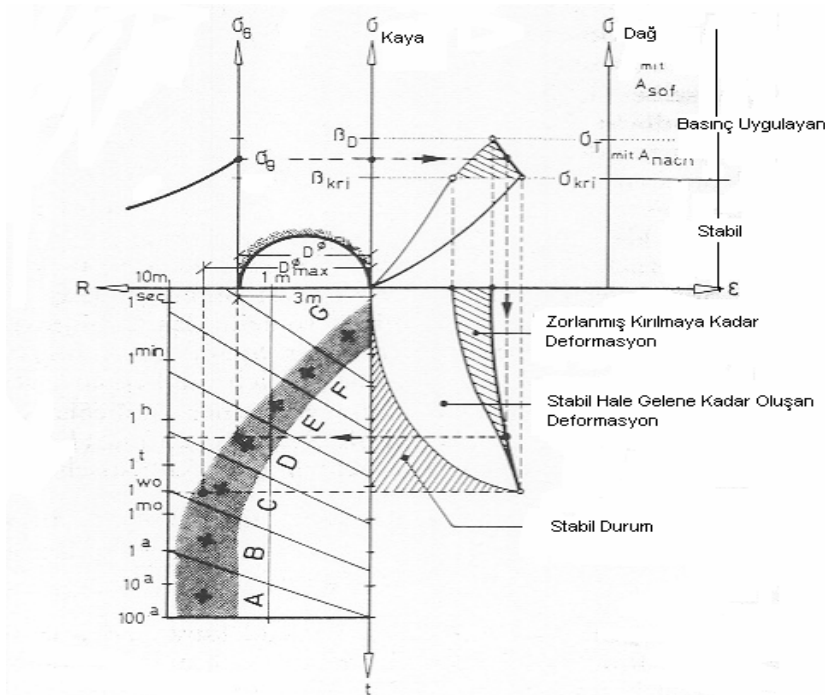
Lauffer (1958), herhangi bir aktif iksasız kaya genişliği için tünelin ayakta kalma zamanını değişik kaya kütleleri sınıfları ile ilişkili olduğunu düşünmüştür. Bir aktif iksasız genişlik, tünelin genişliği ya da iksadan aynaya kadar olan uzaklıktır. (eğer bu uzaklık tünel genişliğinden küçük ise) Tünelin ayakta kalma zamanı, kazıdan sonra tünelin iksasız olarak ayakta kalabileceği zaman aralığıdır.

Aşağıdaki Şekil 2.3’de kaya kütlesi içinde açılmış olan 1 m çapındaki galerinin iksasız olarak durabildiği zaman kaya gücü arasındaki ilişkiyi gösteren Lauffer Diagramını gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Lauffer Grafiği [7]

Şekil 2.4’de ise Lauffer Grafiğinin galerinin iksasız ayakta kalma zamanı arasındaki ilişkiyi gösteren grafiği görülmektedir.



Şekil 2.4: Ayakta Kalma Zamanı ile Lauffer Diayagramı Arasındaki İlişki [7]

Kaya sınıflandırma sistemlerinin ilklerinden biri RQD (rock quality designation-kaya kalitesi tayini) sistemidir ve bugüne dek birçok projede kullanılmıştır. Bu sistem tünelcilik yönünden kaya kalitesi RQD değerleri ile şu şekilde sınıflandırılır:

0–25 Çok kötü

25–50 Kötü

50–75 Orta

75–90 İyi

90–100 Çok iyi

Wickham, Tiedeman ve Skinner ise RSR (Rock Structure Rating-Kayanın Yapısal Değerlendirilmesi) sistemini önermişlerdir ki bu sistemde kayanın cinsi, jeolojik yapı, tünel doğrultusu ile eklemlerin konumu arasındaki ilgi, eklemlerin durumu, beklenebilecek yeraltı suyu olasılığı ve miktarı gibi özellikler gözönüne alınmaktadır. RSR derğerleri 25 (en kötü) ile 100 (en iyi) arasında değişmektedir. Bu sistemlerden herhangi biri veya bunlara benzer bir sistem kullanılarak tünelin hangi kategorilerdeki kayalarda hangi oranlarda ilerleyeceğinin söylenebilmesi gereklidir.

Bazı hallerde sondajların olmaması veya jeolojinin karmaşık olması nedeni ile bu söylenenler bir tahminden ileriye gidemez.

2.5.6 Yerinde Deneyler

Laboratuvar deneyleri ile saptanamayan zemin özellikleri için yerinde deney tekniği uygulanır. Örneğin, yeraltı suyu koşullarının belirlenebilmesi için bölgenin jeolojik yapısı ile ilgili bilgilere ilave olarak yeraltı su durumunun da bilinmesi gerekmektedir. Bazı sondaj kuyularına takılan standpipe ve piezometrelerle yeraltı suyunun seviyeleri ve basınçları ölçülür. Bu ölçme düzenli olarak inşaat tamamlanıncaya kadar sürer.

Sızma deneyleri zeminin permeabilitesinin hesaplanmasında ise basınçlı su testleri (BST) veya Lugeon testleri uygulanır. Permeabilite değerleri hesaplanırken zeminin homojen olduğu kabul edilir. Herhangi bir geçirimsiz seviyenin açık bir çatlağın veya bir boşluğun olması halinde ise gerçeği yansıtmayan sonuçlarında ortaya

ıkacağı aşıktardır. İki ya da üç farklı yöntemin aynı yerde uygulanması sonuçların kontrolünü sağlayacaktır.

Zeminlerin mukavemetinin yerinde ölçülmesinde uygulanan en etkili ve en fazla bilinen yöntem Standart Penetrasyon Testidir (SPT). Zeminin yerinde deformasyonu ve mukavemeti ya plaka yükleme veya Menard Pressiyometre deneyi uygulanarak bulunur. Deney nihai taşıma gücünün hesaplanmasını sağlayan limit basıncı tayin etmektedir. Bu test bundan başka deformasyon modülünü de vermektedir. Bu değerler tünel kaplamasının dizaynında ve tünelin sebep olacağı oturmaların önceden hesaplanmasında kullanılmaktadır. Gerilme durumunun ölçümü derin tünel veya yeraltı hafriyatları için istenir. Örtü kalınlığından gerilmelerin kabaca bulunması mümkün ise bunların aletlerle kontrol edilmesi gereklidir.

2.5.7 Laboratuvar Deneyleri

Sınıflandırma deneyleri su muhtevası, özgül ağırlık, likit ve plastik limitler ile tane boyu derecelenmesini belirlemek için yapılır. Elek analizlerinden çıkan sonuçlar en uygun kazı yönteminin belirlenmesinde ve zemin ıslahı ile basınçlı havanın etkinliğinin öğrenilmesinde kullanılır.

Kesme deneyleri ve üç eksenli deneylerden iksa analizlerinden yararlanılmaktadır. Yeraltı suyu numunelerinden yüksek asitlik veya sülfat muhtevası olup olmadığı araştırılır. Bilindiği gibi asitliği yüksek olan ve sülfat ihtiva eden sular beton ve metallere zararlıdır.

Sondajla delinebilme veya makine ile açılabilme durumunu saptayabilmek için kayanın mukavemeti (strength) ve sertliği (hardness) deneye tabi tutulur.

Tünel açma makineleri (TBM) için kesme hızları ve disk maliyetleri çeşitli kaya sertlik ve mukavemet testleri ile bulunur [8].

3. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

3.1 Genel

Tünel açılması genel olarak aşağıdaki 4 işlemin beraber ve birbirleriyle uyumlu olarak yürütüldüğü çok yönlü bir çalışmadır;

- Tünelin kazılması
- Gerekiyorsa iksa ya da destek uygulanması
- Pasanın taşınması
- Kaplama, izolasyon, drenaj ve havalandırma

Herhangi bir yerde tünel açılırken bu 4 işlemin ne şekilde uygulanacağı, hangi yöntemlerin benimseneceği esas olarak Jeolojik şartlara, Hidrolojik şartlara, tünelin şekil ve genişliğine ve tünelin ne amaçla kullanılacağına bağlı olarak belirlenir. Bununla beraber tünelcilik, tünelin içinde açıldığı malzemeye bağlı olarak kayada tünelcilik ve yumuşak zeminde (toprakta) tünelcilik olmak üzere 2 gruba ayrılır. Bu iki malzemede tünelcilik birbirinden çok farklıdır. Bu farklılık kaya ve toprağın mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Başlıca farklılıklar;

- Kayada gerilmeler toprağa göre daha fazladır. Bununla beraber kayada gerilmeler büyük ölçüde örtü kalınlığına bağlıdır. Örtü kalınlığı arttıkça gerilmelerde artar. Kayanın taşıma kapasitesi tabii ki toprağa göre daha fazladır. Bu nedenle yumuşak zeminde açılan tünellerde en büyük sorun aynada ve tünel çevresinde duraylılığın sağlanmasıdır.
- Kayada açılan tünellerde tehlikeli su akımları genellikle geçici bir sorundur ve ilerleme esnasında bir su taşıyıcı seviyenin geçilmesi ile ilgilidir. Yumuşak zeminde kazılan tünellerde ise su ile mücadele bütün zemin boyunca gerekli olabilir.

- Bununla beraber kaya tüneltiliği genellikle daha az masraflı, daha az zorluklar sunan daha hızlı bir tünelticiliktir.

3.2 Kayada Tünelticilik

Bir tünelt güzergahı boyunca yeraltındaki jeolojik şartların değışiklikler göstermesi olağandır. Jeolojik şartlardaki değışimler ilerleme hızını az veya çok etkiler. Açma yönteminde düzenlemeler yapmayı gerektirebilir. Bazı durumlarda ise tünelticilik yönteminin tamamı ile değışmesi gerekebilir. Bu durumlar su taşıyan bir eklem veya tabakaya ya da geniş ezilme zonlu bir faya rastlanması ile ortaya çıkabilir. Suyun çok aniden patlaması durumunda enjeksiyon güçleşebilir. Geniş ezilme zonlarında şartlar yumuşak zemin tünelticiliğini gerektirebilir. Kayada tünelt açımı, uygulanan ilerleme şekline göre ikiye ayrılır;

- 1- Delme Patlatma yöntemi ile tünelt açımı
- 2- Makine ile tünelt açımı

Patlatma yönteminde en az patlayıcı madde ve en az delikle en fazla verimin yanısıra;

- Pasanın kolay taşınabilir büyüklükte olması
- Zemin titreşiminin, hava patlamasının ve gürültünün en az olması
- Tüneltin tamamlanan kısmına, çevreye ve yüzeye en az hasar yapılması ve böylece çevrenin korunması
- Patlatma alanı çevresindeki kayanın mümkün olduğu kadar az zayıflaması ve böylece gerekebilecek iksanın en az düzeyde tutulması
- Tünelt yüzeyinin özellikle su isalesi için yapılan kaplamasız tünellerde olabildiğince pürüzsüz olması istenir. Bir patlatmada alınacak derinlik tünelt genişliği ve kayanın durumuna bağıdır. Genel olarak bu tünelt genişliğini geçmez.

Delme ve Patlatma yönteminin yıllardan beri uygulanmış olmasının verdiği tecrübe, gerekli ilk malzeme, tehzatının ucuzluğu ve hertürlü kaya şartlarına uygulanabilmesi avantajları arasında yer almaktadır. Her türlü kaya şartlarına uygun olması kaya şartlarının tünelt güzergahı boyunca aşağı yukarı değışmediği durumlarda önemli olmayabilir. Fakat kaya şartlarının tünelt güzergahı boyunca

değiştirdiği durumlarda veya yüksek mukavemetli kayalarda uygulanabilecek tek yol olabilir.

Dezavantajı ise uzun zaman alıyor olmasıdır. Bunun yanısıra aşırı sökmenin önüne geçilemediğinde tünel çapını ve şeklini aynen sağlanması mümkün değildir. Ne kadar hassasiyet gösterilse gösterilsin patlamanın, sebep olduğu gevşemelerden kaçınılamaz.

50’li yıllardan itibaren tünel açma makinelerinin geliştirilmesi ve kullanılmaya başlanması ile tünel açımında yeni bir devir açılmış oldu. İşçi maliyetlerinin giderek artması ve daha hızlı bir tünel açımına gerek duyulması tünel açma makinalarının geliştirilmesinin esas sebepleridir.

Tünel açma makineleri 2 ayrı türde olup tünel açımında bu şekilde ikiye ayrılır:

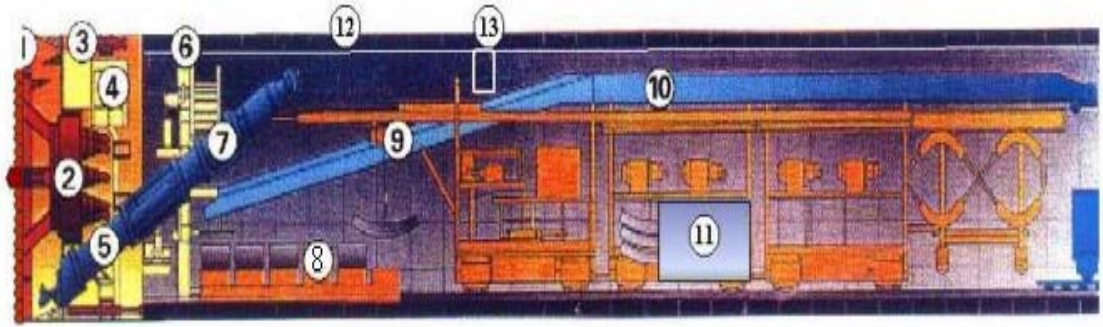
- 1- Tam kesit tünel açma makineleri
- 2- Yarım kesit tünel açma makineler

Tam kesit tünel açma makineleri için “TBM” veya “Fullface Tunnelling Machine” deyimleri kullanılabilir. Şekil 3.1 ve 3.2’de TBM ve bölümleri gösterilmektedir. TBM, tünel açma teknolojisi son dönemlerde çok önemli teknik gelişmeler kaydetmiştir. Sistem; inşa edilmesi tasarlanan boyutta dairesel bir silindirik formu olan ring içerisinde tünel yapımı için gerekli teknolojiyi barındıran bir tünel yapı makinasıdır. TBM makinalarının tasarımı; tünel iç kaplama cinsi, zemin ve proje koşullarına göre belirlenmektedir.

Sistemin baş kısmında kazılması planlanan zemin koşullarına göre tasarlanmış bir kazıcı kafa ile kazılan malzemenin dışarıya taşınmasını sağlayan bir sistem mevcuttur. Makinanın silindirik formu kazılan zemini ayakta tutarak zemin stabilitesini korur. Kazıcı kafanın ilerlemesiyle ön kısmın stabiliteside hemen gerisindeki çok sayıda pistonlar aracılığıyla yerleştirilen segmentlere basarak ve kötü zemin koşulları için tasarlanmış ise ayna basıncı uygulayarak sağlanır. Lojistik lokomotif aracılığıyla içeri taşınan segment parçaları makinanın erektör sistemi ile kazısı tamamlanan bölümde yerleştirilir. Bu arada sistemin tüm mekanik parametrelerini gösteren bir bilgisayar ile makinanın yeraltında yönlendirme ve iç kaplama yerleşiminin yönetildiği bir ölçme bilgisayarı mevcuttur [9].



Şekil 3.1: Tünel Açma Makinesi (TBM) [10]



1-Kazıcı Kafa, 2-İtme Ünitesi, 3-Piston, 4-Basınç Ünitesi, 5-Burgu Konveyör, 6-Ring Montaj Kolu, 7-Burgu Konveyör, 8-Segment Besleme Ünitesi, 9-Segment Vinci, 10-Çamur Nakil Bandı, 11-Kontrol Kabini, 12-Segment İç Yüzeyi, 13-TBM Yönlendirme Lazer İstasyonu

Şekil 3.2: TBM Makinesini Oluşturan Bölümler [9]

Jeolojik şartların uygun olması durumunda makine ile tünel açılmasının üstünlükleri;

- 1- Düzgün, pürüzsüz bir yüzey elde edilir. Bu şekilde bir kesit en yüksek duyarlılığı ve gerilmelerin tünel etrafında en uygun dağılımını sağlar.
- 2- Patlatma tahribatı olmadığından tünel etrafındaki kaya ilk kaya hali ile kalır. Bunun sonucu olarak daha az bir iksa gerekir.
- 3- Yerleşme ve sanayi alanlarının yakınında veya içindeki sık tüneller, tahribata sebep olabileceğinden patlatma ile açma yerine, ekonomik olup olmadığına bakılmaksızın makine ile açma işlemi uygulanır.
- 4- Daha az insan gücüne ihtiyaç duyulmasıdır.

TBM nin kullanımını sınırlayan durumlar ise aşağıda sıralanmıştır;

- 1- Başlangıçta yatırılacak para, makinenin maliyeti dolayısı ile çok fazladır. Bu nedenle kısa tünellerde ve orta uzunlukta olan çok geniş tünellerde kullanışlı değildir.
- 2- Kayanın yumuşak kesiminde tünel doğrultu ve eğiminin kontrolü zor olabilir.
- 3- Aynada çalışılabilecek olan genişlik çok sınırlıdır.
- 4- Kaya şartlarının değişmesi durumunda gerekli teknik ve malzeme ayarlamaları daha zordur.
- 5- Çok sert kayalarda makine ile tünel açımının maliyeti yüksektir.
- 6- TBM'lerinin hareket kabiliyeti alışagelmış tünelcilikte kullanılan ekipmanlara göre daha azdır. Bu tür hareket kabiliyetini, küçük çaplı dönüşler olması halinde veya baca ile açılan tünellerde önemli bir sakınca olabilir.
- 7- Çok sert kaya ile yumuşak kayanın beraber olması durumunda veya şişen, sıkışan, akan zemin içeren aşırı ayrışmış ve kırıklı kaya zonlarında tünel açma makinelerinin kullanım alanı çok azdır.
- 8- Çok değişken zemin profili durumunda TBM'ler kullanılamaz.

Yarım kesit tünel açma makinelerine “Roadheader” veya “Partial Face Machine” denilmektedir. Bu makinelerin üstünlükleri TBM'ler gibi; delme patlatma yöntemine göre daha az işçiye ihtiyaç gösterdiğinden kaza oranı aynı oranda azaltılmıştır. Nisbeten düzgün yüzeyler elde edilir, tüneli çevreleyen kayada gevşeme olmaz ve dolayısı ile iksa gereksinimi daha az olur. TBM'ler kadar dar bir jeolojik sınır içinde çalışmaz ve daha kötü kaya şartlarına uyum sağlayabilir. Çünkü aynaya yaklaşmak her zaman mümkün olduğundan gerektiğinde iksa yapmak mümkündür. TBM'lerden daha düşük enerjiye ve maliyete ihtiyaç gösterir.

3.3 Yumuşak Zeminde Tünelcilik

Özellikle şehirleşmenin gelişmesi yeraltı yaya yolları, yeraltı geçitleri ve yeraltı tünelleri yanında yeraltı depoları, garajlar ve park yerleri ile şehir içme suyu ve kanalizasyon tünellerinin de açılmasını gerektirmiştir.

Tüm bu yeraltı yapılarının ortak özellikleri genellikle çok sığ derinliklerde ve yumuşak zeminde yani toprakta açılmış olmalarıdır. Bu cins inşaatta esas zorluk zemini düşük taşıma güçlü, düşük mukavemetli ve kolay deforme olmasından ileri gelir. Buna ilave olarak yüzeyde bulunduğu için, bu malzeme çoğu kez suya doymun olabilmekte, buda ilave bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Zeminin bu mekanik özellikleri, kazı yönteminin, tünel içindeki duyarlılığın, tünel inşaatının çevreye olan etkisinin ve tünel kaplamasının belirlenmesinde en büyük etkindir [5].

4. TÜNEL İNŞA YÖNTEMLERİ

4.1 Genel

İnşaatin emniyetli ve ekonomik olması için, mevcut şartlara göre toprak işler ile iksa ve kaplama işlerinin en uygun biçimde yapılması gerekmektedir.

Zemin inşa yöntemleri aşağıda anlatılan 4 yöntemle uygulanmaktadır. Burada en çok NATM'a (Yeni Avusturya Metodu) değinilecektir.

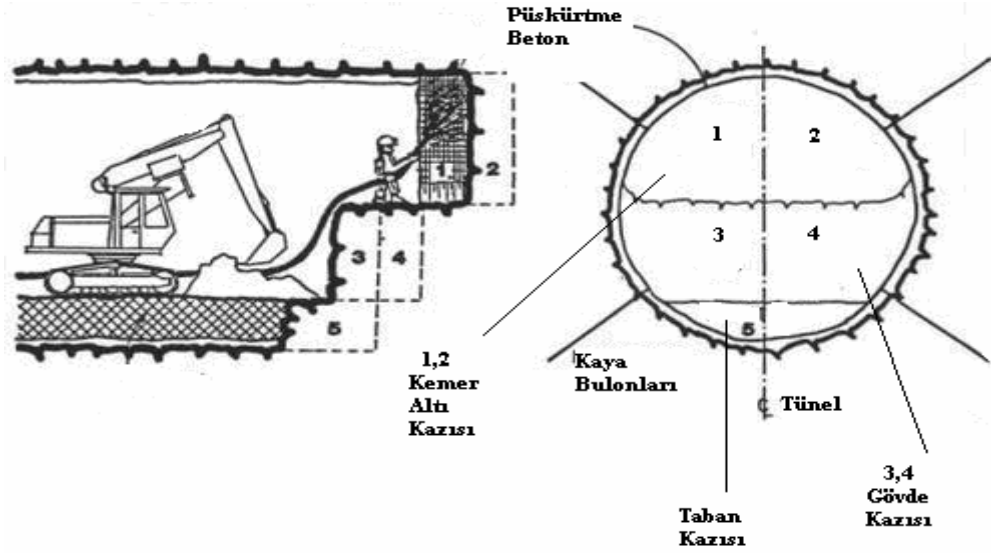
- a) Yeni Avusturya Metodu (NATM)
- b) İngiliz Metodu
- c) Alman Metodu
- d) Belçika Metodu

4.2 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi

Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu diğer bir deyimle Ardışık Kazı Metodu (Sequential Excavation Method-SEM) olarak da anılır. Bu yöntem ilk olarak 1950'li yıllarda Avusturyada Runserau Hidroelektrik Güç Projesi sırasında keşfedildi. Sonraki yıllarda bu metod teorik ve pratik açıdan geliştirildi ve hemen hemen tüm zemin koşullarında kullanılabilir hale geldi. Amerikada bu yöntem 1980'li yıllarda ilk Pittsburg ve Washington D.C. şehirlerinde uygulandı.

NATM prensip olarak, tüneli çevreleyen toprağın gücünü mobilize ederek kayanın veya zeminin taşıma gücü kapasitesini arttırmaya dayanır. Tünel kazısı bu yöntemde bölüm bölüm, aşama aşama yapılır. Şekil 4.1 ve 4.2'de kazı aşamaları ve genel prensipleri gösterilmektedir. Her kazı aşamasında yapılacak kaplama kazı etrafında, izin verilebilir gerilme boşalmalarına, kesit tesirlerini minimuma indirmek için belli bir rijitliğe sahip olmalıdır. Buna ek olarak tünelin stabilitesi, güvenliği ve yüzeydeki oturmaların minimum olması için çeşitli zemin destekleri, ayna destekleme sistemleri ve zemin iyileştirme için yapılan ölçümlerden ve

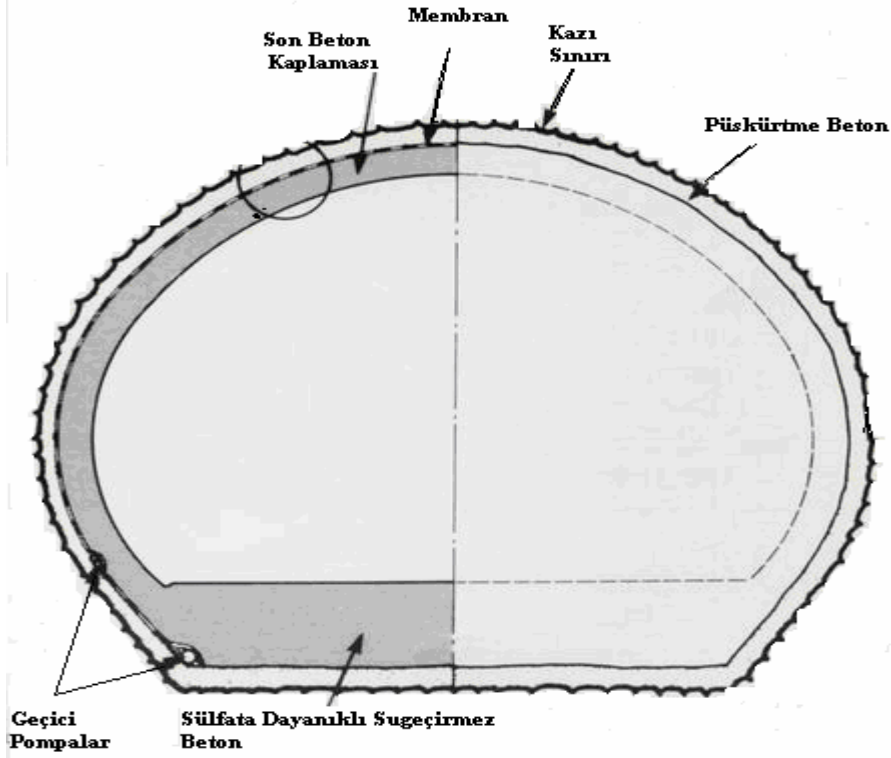
yöntemlerden faydalanılır. Çok ekstrem zor zemin şartlarında özel yöntemler olan zemin dondurma ya da basınçlı hava ile kazı metodlarına başvurulur.



Şekil 4.1: NATM Kazı Aşamaları

Kazı süresince, tasarım kabullerinin doğruluğunu teyit etmek, stabiliteyi kontrol etmek ve kazının sırasını (bölümlerini) ve destekleme elemanlarının uygunluğunu belirlemek amacı ile tünelin içindeki ve üzerinde meydana gelebilecek deformasyonlar devamlı olarak kaydedilir ve monitörler ile izlenir.

Kazı tamamlandıktan ve ilk destekleme yapıldıktan sonra su geçirmezliği sağlayacak olan membran ve geotekstil ilk kaplama ile son kaplama arasına oluşabilecek sızıntıları engellemek üzere yerleştirilir. Daha sonraki aşamada ise zemin yüklerine, hidrostatik ve sismik yüklere karşı dayanımlı olacak şekilde dizayn edilmiş son kaplamanın yapılmasına gelir. Bu kaplama tünelin uzunluğuna ve enine kesitlerin çeşitliliğine göre donatılı, yerinde dökme beton ya da püskürtme beton kullanılarak yapılır. Aşağıdaki şekilde NATM tünel kesiti görülmektedir.



Şekil 4.2: NATM Tünel Kesiti [11]

4.2.1 Yeni Avusturya Tünel İnşaatında Tünel Tasarımı

Tünel dizaynı, yukarıda anlatılmış olan prensiplere, büyük oranda mühendisin tecrübelerine ve uygun kazı aşamalarını ve bunlarla beraber destekleme sistemlerini belirlemek için geliştirilmiş olan Sonlu Elemanlar Yöntemi araçlarına dayanır.

Tünel tasarımı sırasında gözönüne alınması gereken esaslar aşağıdaki gibidir:

1. Gerilme yoğunlaşmalarını engellemek için kazı sırasında aynadaki kesit şeklinin kubbe şeklinde olmamasına ve yumuşak zeminde kazı tabanının yuvarlak olamamasına özen gösterilmemelidir.
2. Zeminin parçalanmaması ve dağılmaması için ve tünel çevresinde ve aynasında devamlı ve düzgün destek sisteminin oluşması için uygun olan zamanda shotcrete kaplamaları yapılmalıdır.
3. Kazıyı her aşamasında kontrol etmek ve stabil olmasını sağlamak için aynada kazı üst (Heading), orta (bench) ve alt kısım (invert) olarak üzere bir kaç bölümde yapılır.

4. Karşılaşılabak zemin koşullarına göre sahada gerekli ayarlama ve düzenlemeler yapılmalıdır.

Zeminde karşılaşılabak zemin koşullarını inşaat boyunca yapılan ölçümler, tünel aynasının ve kazının stabilitesini korumak amacı ile yapılır. Bu ölçümler aşağıdaki gibidir;

- Destekleme öncesi ölçümler
- Ayna stabilizasyonu için yapılan ölçümler
- Halka şeklinde yapılacak olan ölçümler
- Zemin iyileştirme için yapılacak olan ölçümler

Bu ölçümler inşaat süresi boyunca esnekliğı ve bütün zemin koşullarını kontrol etmeye ve bunun sonucunda NATM sisteminin risklerini büyük ölçüde azaltmaktadır [12]. Aşağıda NATM inşa yöntemi ile inşa edilen bir tünel görölmektedir [10].



şekil 4.3: NATM Yönteminde Tünenlin Kazılması [10]



Şekil 4.4: NATM Tünel İnşaYönteminde İksa Yapılması [10]



Şekil 4.5: NATM Tünel İnşa Yönteminde Püskürtme Beton Yapılması [10]



Şekil 4.6: NATM Tünel İnşa Yönteminde Çelik Hasır Kaplama Yapılması [10]



Şekil 4.7: NATM Tünel İnşa Yönteminde Son Kat Beton Kaplaması Yapılması [10]

4.2.2 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin Esasları

Yeni Avusturya yöntemiyle bugün yalnız derin tüneller değil, aynı zamanda şehir içlerinde sığ metro tünelleri ve kavernler inşa etmek mümkün olmaktadır. Bu yöntem Leopold Müller'in (1979) belirttiği şu esaslara dayanmaktadır:

- Dağ veya zemin esas taşıyıcı sistem olarak kabul edilir ve bunun için gerekli önlemler alınır.
- Tünel cidarının bir miktar deformasyon yapmasına izin verilir. Bu deformasyon miktarı, iksanın yapılma zamanı ve rijitliği ile ayarlanır. Uygun kazı yöntemi de önemlidir. İksa genelde püskürtme betonu, hasır çelik, çelik kemer ve ankrajla yapılmaktadır.
- Genelde kapalama üzerine birincil gerilmenin küçük bir oranı gelmektedir. Fakat güvenlik açısından bazı durumlarda göz önüne alınıp, taşıma gücü biraz daha yüksek iksa yapılabilir. Genelde kayalarda bir gevşeme bekleniyorsa bunun ankrajlarla önlenmesi tercih edilir.
- Kaplama mümkün olduğu kadar fleksible olmalı ve bir basınç çemberi olarak çalışmalıdır. İksa kaplaması öyle teşkil edilmelidir ki, çevresindeki kayaçla birlikte kompozit bir sistem olarak çalışabilsin.
- İnşaat sırasında kontrol ölçümleri buna bağlı olarak yeniden boyutlandırma ile kazı ve iksa zamanlamasının kontrolü, bu husus Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin en önemli husularından biri olmasına rağmen, Türkiye'de inşaat mühendisliğinde genelde kontrol ölçümleri yapmak yerleşmediği için, tünel inşaatlarında da uygulaması sınırlı kalmaktadır.

Tünel inşaatında başarı için uygun hesap yönteminin yanında Yeni Avusturya Tünel prensiplerinin diğer esasları olan kazı ve iksanın doğru kombinasyonu, gerilme şekil değiştirme değişimlerinin devamlı kontrolü, tabanda ringin kapatılması yerine getirilmelidir [13].

4.3 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde İksa Yapılması

4.3.1 Genel

Gerek tünelin açılışı sırasında, gerekse bittikten sonra, duraylılık ve güvenlik, geçici veya sürekli destek yöntemlerine göre hesaplar yapmak sureti ile hesaplanır. Bu yöntemlere göre yapılan destekler, çelik kaburgalı, bulonlu, püskürtme betonlu sistemleri tek tek veya birkaçının birlikte yapılması ile sağlanır.

Tünellerde destekler, sadece duraylılığı değil, yanı sıra biten tünelin güvenli kullanımını sağlar. Tünellerdeki destek ve destekleme işlemlerinin tünel inşa hızı ile tünel toplam maliyetine etkisi açısından çok büyük önem taşımaktadır. Bu etkin ve çok önemli faktör tünel inşasında birinci derecede rol oynamaktadır.

Çeşitli araştırmalarda, açılmış olan tünellerin toplam maliyetleri içindeki destek paylarının, sağlam kaya kütlesi için %15–40 arasında olduğunu göstermişlerdir. Bu oran zayıf kayalarda ve patlatma ile açılan sistemlerde %50'ye kadar çıkabilmektedir. Ayrıca makine ile açılarda maliyetin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Püskürtme beton kullanımı destekleme sağlanan tünellerde maliyet oranında %5–10 kadar azalma olabileceği de belirtilmiştir.

Son yıllarda geliştirilen püskürtme betonlu ve bulonlu sistemlerin kullanılmaya başlaması ile maliyette önemli ölçüde düşüşlerin gözlenmesi raslantı olmayıp, desteklemenin maliyetteki oranının düşürülmesine ilişkin teknolojik gelişmeler olarak kabul edilmelidir.

Tünellerin desteklenmesinde etkin faktörler sırası ile kaya kütlesindeki süreksizliklerin özellikleri, kazı destekleme arası süre, kazı yöntemine ilişkin kayanın bozulması, destek sisteminin esneklik özellikleridir. Kaya kütlesi üzerindeki süreksizlikler, uygulanabilecek destek ve destekleme yönteminin tayininde önemli rol oynarlar. Destek sistemine gelen yük miktar ve değişimi üzerinde de tam bir etkiye sahiptirler.

Kazının hemen sonrasında açıklık etrafındaki kayada, kendini tutabilme süresi içinde gevşeme başlar. Bu gevşeme kayalarda tünel açıklığı, dağılan ve gevşeyen bloklarla dolana kadar, sağlam kayalarda ise kemerlenme gelişene kadar sürer. Destekler bu sürenin bitiminden önce ve optimum noktada yerleştirilmelidirler. Yükler ve deformasyon destek konulana kadar geçecek sürede de artacağından,

destek üzerine gelen yüklerin sınırlanması için, iksa elemanları kaya yüzüne mümkün olduğu kadar yakın konulmalıdırlar. Bu destek maliyetin düşürülmesinde çok büyük etkindir.

Tünel civar kayasının, kendini tutabilme süresi için, kayada yerinde yapılan deney sonuçları dışında bir ön tahminde bulunmak zordur.

Her süreksizlik düzlemleri ile bloklara bölünmüş olan kaya kütleleri, bloklar arası kitlenme ve kemerlenme nedeni ile belli bir dirence sahiptir. Duraylılık açısından bu direnç yeterli olmadığında, destekler kullanmak sureti ile kaya kütlelerinin kendiliğinden sağlayamadığı yük taşıma kapasitesini oluşturmaya yardımcı olunur. Seçilecek olan destekler, kemerlemenin gelişmesinde duvarların yeterli hareketine müsaade edecek esneklikte olmalı; kayanın kendiliğinden taşıyamayacağı, tutamayacağı yükü taşıyabilecek ve ayrıca tünel inşasının bitiminden sonraki deformasyonları da karşılayabilecek derecede kuvvetli olmalıdır. Bu nedenlerle destek projelendirmelerinde yeterli esnekliğe ek olarak kaya yükünün azaltılması ve bu yüklerin daha homojen dağılması sonucu projenin daha ekonomik olmasına çalışılır.

4.3.2 Dış ve İç Kaplama

Tünel aynasının hemen gerisinde, kayayı geçici olarak destekleyen “Dış Kaplama” olarak, daha sonra ki safhada yapılan ve uzun süre duraylılığı sağlayacak şekilde projelendirilen destek sistemi ise “İç Kaplama” olarak tanımlanırlar. Dış destekleme en çok çelik elemanlarla temin edilir. İç kaplama ise betondan yapılır.

Halen sürekli veya özel şartlar altında dış kaplamada, çelik kaburgalı sistemler, bulonlar ve püskürtme beton olup; bunların bir veya birkaçının birlikte kullanılması ile destekleme projeleri yapılmaktadır. İç kaplama ise genellikle beton ile yapılır. Beton desteklemede nispeten rijit bir destek elemanı söz konusudur. Dış kaplama sırasında oluşan deformasyonlar, iç kaplamanın yapılması ile en az seviyeye indirgenir.

Hidrostatik basınca maruz kalacak tünellerde, iç kaplamalar, bu basınçlar gözönüne alınarak projelendirilir.

4.3.3 Çelik Kaburgalı Destekleme Sistemi

Kayanın süreksizliklerle bloklara bölündüğü ortamlarda, araları ahşap malzeme ile kapatılmış çelik kaburgalı destek takımları eskiden beri kullanılmaktadır. Günümüzde zayıf kayalar hala aynı yöntemle desteklenmekteyse de kaya bulonlu, püskürtme betonlu iksalama yöntemlerinin lehine gelişen görüşlerle bu yöntemin kullanımı azalmıştır. İki tip çelik kaburgalı destek uygulanabilmektedir.

Devamlı Kaburgalı Destek Tipi; genellikle montaj hızı açısından birbirine bağlanan iki eş çelik putrelden oluşur. Özel amaçlara göre üç veya dört parçalıda olabilir. Tam kesitli tünel açma yöntemlerinde kullanılır.

Tam dairesel destek tipi ise üç veya daha fazla eğri çelik putrelin birbirine bağlanması ile oluşurlar. Bu tipler, makine ile açılan tünellerde, sıkışan kabaran ezilmiş veya büyük ölçüde yan basınçlar veren kayalar içinde, tavan basıncını tabana taşıma olanağı bulunmayan koşullarda ve sert kaya içindeki yumuşak zonlarda kullanılır.

Burada sıkıştırıcı ahşap kamaların elle ve çok dikkatli şekilde yerleştirilmeleri gerekliliği tünelin ilerlemesi açısından zaman kaybına neden olmaktadır. Bu durum özellikle makine ile açılan tüneller için geçerlidir. Diğer bir dezavantaj ise desteklemede ahşap malzeme kullanımından ileri glemektedir. Bunlar zamanla bozulacaklarından sürekli dayanak alamaz ve ikincil desteklere gereksinim oluşturmaktadır. Ayrıca çelik kaburgalı destekleri yerleştirmek için tünelin projelendirilen çapının 15–30 cm arttırılması gerekecek, ahşap elemanlarının kullanılması nedeni ile ikincil desteklemelere de ihtiyaç duyulacağından çapın bir kere daha arttırılması kaçınılmazdır. Bu çap artımı ile orantılı olarak kazı miktarıda artacak ve buda maliyette artışlara neden olacaktır.

4.3.4 Kaya Bulonları ve Bulon Tipleri

Kaya bulonları, açıklığın civarındaki kaya kütleindeki eksikliği kısmen tamamlayarak, desteklenmeyi temin ederler. Bulonlar tünelin tavan ve duvarlarının desteklenmemesi halinde, düşecek kaya bloklarının duraylılığının sağlanmasında kullanılırlar.

Bulonlar 1,3–4,0 cm çaplı ve uzunlukları tünel açıklığına göre değişebilen çelik çubuklardır. Tünel tavan ve duvarlarına delinen duvarlar içine yerleştirilirler. Çimento enjeksiyonu yapılarak veya alt ucundan kayaya bağlanarak ve her iki halde de kaya yüzünde bir plakanın somun vasıtası ile kayaya doğru itilip sıkıştırılmasıyla, delik içinde kaya ile teması ve gerdirilmesi sağlanır. Bulonlar tünel civar kayasının gerekli duraylılığını sağlamak üzere bir modele uygun şekilde yerleştirilerek, sağlamlaştırılmış sürekli kaya kemerlerini oluştururlar. Uygun kemer biçiminin oluşması için bulon araları, kaya kalitesi ve tünel boyutunun bir fonksiyonu olarak seçilir. Bulonlar genelde gerilmesiz, mekanik gerilmeli, uçtan yapışan olarak üç ana tipe ayrılır. Gerilmesiz bulonlar, enjeksiyonlu ve sürtünmeli tip olarak ikiye ayrılırlar. Enjeksiyonlu bulonlar, deliğe yerleştildikten sonra kaya ile ilişkisi enjeksiyon ile sağlanan yani çubuk ile kaya arası çimento şerbeti ile doldurulan tiplerdir. Sürtünmeli tipler ise delik içinde bulunan mekanik olarak sıkışması esasına dayanır.

Gerilmesiz bulonlar açıklık civar kayasında oluşan deformasyonların etkisi ile sadece yükü alabilirler. Mekanik gerilmeli bulonlar ise mekanik işlemler ile kayaya sıkıca tutturulurlar ve bulonlara çubuğun yenilme direncine yakın gerilme verilir. Gerektiğinde bulon ve delik cidarı arası çimento şerbeti ile doldurulur. İstenen gerilme ancak iyi nitelikli kayalarda sağlanabilir. Niteliği kötü olan kütlelerde, bulon gerdirilirken bağlantı noktasında kayanın ezilip paralanması sonucu bulon delikten dışarı kayarak, fonksiyonunu yerine getiremez.

Kötü nitelikli kayalarda mekanik gerilmeli bulonların başarılı olarak bağlanıp gerdirilememesi nedeni ile “Uçtan Yapışan” tipler geliştirilmiştir. Bulonun yerleştirilmesi, sosise benzer arı kapsüller içindeki resin ve katalizörün ayrı ayrı delik içine sokulduktan sonra burulan çelik çubuğun kapsülleri kırması ve karışmasını temin ederek donan bileşimin çelik çubuğu kayaya bağlaması esasına dayanır. Resinin çabuk donması ve kuvvetli bağlantı yapması, bu işlemde hemen birkaç dakika sonra gerdirme işlemine olanak verir.

Bulonla destekleme yapmanın başlıca yararı kolayca yerleştirilmeleridir. Bulonların kaya yüzeyine çok yakın konuluyor olması ve ciddi gevşemelere neden olan ilk gerilmelerden önce yerleştirilmesi, kaya kütlelerinin hemen hemen tam direncinden yararlanmaya olanak verir. Bulonlar enjeksiyon yapılarak korozyona karşı korunurlar. Bu yararlar yanında devamsızlıkları nedeni ile yinede bazı blok

düşmelerini önleyememektedirler. Bu olumsuz yan tünel tavanın kafes tel ve püskürtme beton ile kaplanması ile önlenabilir. Kaya bulonlarının uzunlukları tünel genişliğinin 1/3 ünden daha fazla olmalıdırlar. Bulon araları, daima tasarlanan bulon uzunluğundan daha az olmalıdır. Bulon aralıkları 90–250 cm arasında değişir. Bulonlar aynaya mümkün olduğu kadar yakın ve çabuk yerleştirilmelidir ve en yüksek verimi elde edebilmek için gerilmelidirler.

4.3.5 Püskürtme Beton

Kaya yüzeyine püskürtmek sureti ile uygulanan ve yüzeyde bir tabaka oluşturan beton ve betona “Püskürtme Betonu” denir. Islak ve kuru karışım olmak üzere ikiye ayrılırlar. Islak karışım daha az sıçrama ve tozlanma sağlar. Kuru karışım ise değişen şartlara kolay uyum sağlar ve küçük çaplı tünellerde kullanılırlar ve su içeren kayalarda da kullanılır. Püskürtme betonun niteliği büyük ölçüde karışım oranlarına aynen beton gibi bağlıdır. Kullanılan agreganın daha iyi pompalanabilmesi için yuvarlak ve doğal olanı tercih edilir. En büyük dane boyutu 19 mm ve % 2’den fazla 200 No’lu elekten geçmemeli (0.075 mm) ve içinde alkali malzemeler bulunmamalıdır. İri agreganın optimum oranda seçilmesi, kompaksiyonun iyileşmesini, yoğunluğun artmasını, büzülmenin azalmasını ve bağlanmanın kuvvetlenmesini sağlar. Ancak betona oranla daha az su miktarı ile karışım yapılmaktadır. Buna bağlı olarak daha yüksek basınç direnci gösterirler. En olumlu yönü kaya bulonu yeterli olmadığında, beraber kullanılabilmesi, her cins kayaya uygulanabilmesi ve ekonomik olmasıdır [14].

4.3.6 Tünel İnşaatında Göz Önüne Alınması Gereken Genel Esaslar

- 1) Jeolojik ve geoteknik dataların kontrol edilmeli, katmanların yapıları, kopma kırılma özellikleri, çatlak yüzeyleri, yönleri eğimleri boy kesitlerin üzerine yazılarak belirtilmelidir. Bu çalışmaların sonucu olarak kazı miktarı, kazının nerede olacağı ve ankraj boyları da bu bilgilere göre tesbit edilir.
- 2) Convergence topoğrafik olarak aletlerle gözlenmelidir. Tünelin her bölümünün gerilme kabarma davranışları tespit edilmelidir. Günlük ilerleme zemin koşullara bağlı olarak değişmektedir.

- 3) Tünelin inşası sırasında karşılaşılan problemler jeolojik, geoteknik araştırmalar ve sondajlarla çözülebilir. Tünelin içine makine sürerken suyun drenajında özellikle havalandırma, kazılan materyalin taşınmasında, tünelin aydınlatılmasında koordineli ve kontrollu bir çalışma gerekmektedir. Kaza riskinin çok yüksek olduğu yerde iş güvenliği ile ilgili olarak tecrübeli teknik elemanlara danışılmalıdır.
- 4) Tünelde yapılacak son kat kaplama işi toprağın zayıf olduğu veya sismik hareketlenmenin fazla olduğu yerlerde özel bir programa göre kontrol edilmelidir. Eğer tünel zayıf zeminde kazılıyorsa tüneli geçici kaplama elemanı ile uzun zaman bırakmak sakıncalıdır [15].

4.4 Tünel İnşası İçin Kullanılan Diğer Yöntemler

NATM'nin dışında genelde kullanımı az olan diğer yöntemler ise İngiliz, Alman ve Belçika yöntemleridir.

İngiliz yönteminde bir ano 1,5 m ile 6 m arasında geçilir. Burada önce tünel ekseninde tabanında bir galeri açılır. Bunun amacı tünele yön vermek, sızan suların atılması, zemin cins ve itkilerini tayin etmektir. Buarada tavan galerisi açılır, her iki galeri birleştirilir ve genişletilmiş olan tavan kısmının tahkimatı yapıldıktan sonra geri kalan kesit kazılarak alınır. Geri kalan cephenin kazısında tahkimat malzemesi bir önceki anonun radyesine dayatılarak desteklenir. İngiliz metodu geçmişte yaygın olarak kullanılmasına rağmen günümüzde pek kullanılmamaktadır.

Alman yönteminde ise, kenar ayaklarda birer kılavuz galeri açılarak bir ano boyu kadar ilerletilir. Bunları takiben tavanda bir galeri açılır ve burada ayakların betonla desteklenmesi tamamlanarak tavan galerisi genişletilir. Üst kısmın kazılmasından sonra betonlama işlemine geçilir. Bu aşamadan sonra ortadaki çekirdek kısım kazılarak alınır, radye betonu atılır ve tünel tamamlanmış olur. Bu sistemde ano boyları 3–6 m arasında değişmektedir. Birbirini takip eden anolar aynı anda çalıştırılarak 21–48 m gibi büyük boyutlarda bir çalışma sahası yaratılabilir. Böylece büyük ilerleme hızları elde edilir.

Belçika yöntemi tek ve çift kılavuz galerili sistemler olarak iki şekilde inceleyebiliriz. Birinci sistem, genellikle kısa ve su geliri az olan kuru zemin

şartlarında uygulanır. İlk olarak tavan galerisi açılarak genişletilir ve st kısmın kazısı bitirilerek tahkimat yapılır. Daha sonra tünelin yan tarafları, bu tahkimatın desteklenmesi amacı ile topuk olarak bakılır ve orta kısmın kazısı yapılır. Daha sonra sırayla yan topuklar karşılıklı gelmeyecek şekilde, 2.50–3.0 m gerisinde tavan galerisi açılarak tünel İngiliz metodu gibi bitirilir.

Belçika metodu kuru ve orta basınç dayanımına sahip formasyonların bulunduğu çok uzun olmayan tüneller için ideal bir sistem olarak kullanılmıştır.

5. SAYISAL YÖNTEMLER İLE YENİ AVUSTURYA TÜNEL İNŞA YÖNTEMİNE UYGUN KAPLAMA BOYUTLANDIRILMASI

5.1 Sayısal Yöntemler

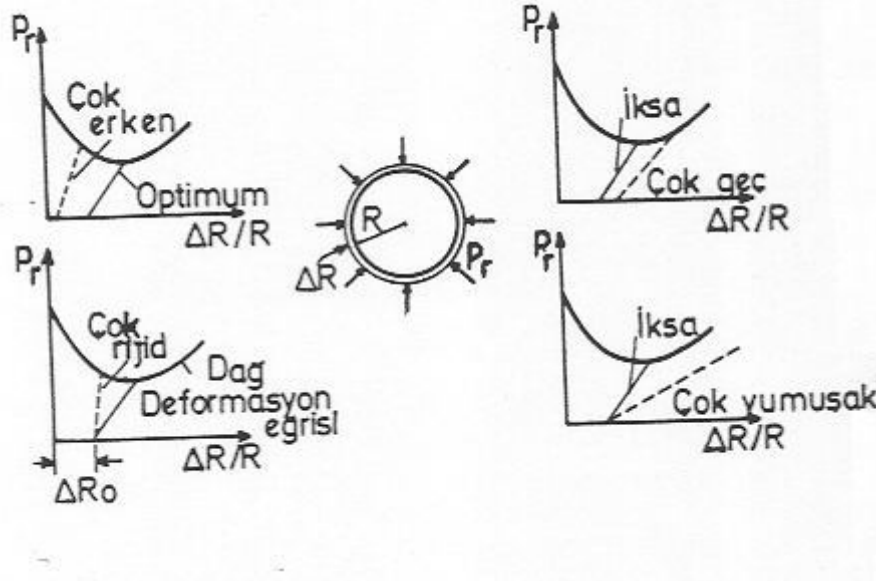
Zemin davranışını analizinde, ortamın karmaşık oluşu ve davranışın çok çeşitli etkenlere bağlı olması nedeni ile genellikle ampirik bağıntılardan yararlanılmaktadır. Bu durum, nümerik yöntemlerin ve bilgisayar kullanımının yaygın olmadığı zamanlarda daha yaygın yöntemdi. Geoteknik mühendisliği uygulamaları sırasında geliştirilen bu bağıntılarla yapılan analizler genelde yaklaşık sonuçlar vermenin yanı sıra bazen çok sağlıklı, gerçek değerden çok uzak sonuçlar verebilmektedir.

Geoteknik problemlerin çözümünde aynı anda birden fazla özelliği bir arada göz önünde bulundurmak zordur. Bu nedenle jeolojik ortamlar sürekli ortam gibi düşünülerek çeşitli etkiler karşısındaki davranışı için fiziksel temellere dayanan teoriler öne sürülmüştür. Bu teoriler genelde matematiksel diferansiyel denklemlerden meydana geldiğinden kapalı çözüme ulaşmak için basit kabuller yapılması gerekmektedir. Bu yaklaşım çoğu pratik durumlar için çözüm olmasına karşın jeolojik ortamların homojen olmaması, içerisindeki süreksizlikler, gelişmiş güzel geometrisi v.s. karmaşık özelliklerinden dolayı problemlerin gerçekçi çözümlere ulaşmasına olanak vermemektedir. Bu nedenle geomekanik problemlerin analizinde yukarıda belirtilmiş olan etkenlerin birçoğunu aynı anda gözönüne alan nümerik yöntemler geliştirilmiştir. Tabii nümerik yöntemlerin geliştirilmesi bilgisayarların geliştirilmesine bağlı olarak gerçekleşmiştir.

5.1.1 Fenner-Pacher Konverjans Eğrisinin Yardımı ile Boyutlandırma

Bu yöntemde esas prensip tünel boşluğunda iksa imalatına başlanıncaya kadar meydana gelen deformasyonu ve iksa rijitleştiği zaman doğacak basıncı önceden belirlemeye dayanır. Kazıdan sonra belirlenen zamanda iksaya başlanırsa, Fenner-Bacher eğrisine göre iksada önceden tahmin edilen bir basıncın doğacağı kabul edilmektedir.

Bu durumda Avusturya Tünel Yöntemine göre inşa edilen tünellerin kaplamalarını Fenner-Bacher dağ konverjans eğrilerinden faydalanarak boyutlandırmak çok uygun gözükmele beraber şu hussuların mutlak bilinmesi gerekmektedir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Fenner-Pacher Konverjans Eğrilerine göre Zeminle İksanın Karşılıklı Etkileşimi [13]

- Dağın deformasyon eğrisi (Fenner Bacher konverjans eğrisi)
- İksanın rijitleşme eğrisi
- Tünel boşluğunda iksa başlayıncaya kadar meydana gelen ön deformasyon (ΔR_0)

Ayrıca bu yöntemle boyutlandırılan yeraltı yapılarının aşağıdaki özellikleri göstermesi gerekir.

- 1- Dairesel kesit
- 2- Yeterli derinliğe sahip olması
- 3- İksanın bütün kesit çevresi boyunca üniform olması
- 4- Süreksizlikler ve anizotropi mevcut değil.

Yukarıdaki koşulları sağlamayan tünellerde çok değişik sonuçlar alınabilmektedir. Bu nedenle bu yöntem sınırlı olarak kullanılabilmektedir [13].

Tabii bu modelinde kusursuz olduğu söylenemez. İçinden çıkarıldığı ortamın (dağın) sınır şartları genellikle dış yükler ve yatak katsayısı ile temsil edilebilmektedir ki, bu katsayıları seçmek her zaman kolay olmamaktadır. Anizotropi durumları, süreksizlikler, ayrıışmış zonlar hesapta gözönüne alınmamaktadır. Bu nedenlerle bu hesap modelinin daha çok ön projelerde veya derinliği az ve nispeten yumuşak zeminlerde açılan tünellerde kullanılması tavsiye edilmektedir (Duddeck 1979) [13].

5.1.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar nümerik analiz yöntemi, Zeinkiezwicz (1977), tarafından matematiksel ifadelerle tanımlanan sürekli problemlerin genel çözüm yöntemi olarak tanımlanmıştır. Geoteknik problemler için matematiksel ifadeler, su akışı (boşluk suyu basıncını içeren problemler), denge eşitlikleri, sınır durumların ve deformasyonların uygunluğu ile gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi tanımlayan eşitliklerdir.

Sonlu elemanlar yöntemi nümerik analiz yöntemleri arasında bilgisayar yazılımı için en uygun formülasyona sahiptir. Bunun nedeni, karmaşık sınır koşulları ve non-lineer malzeme davranışı, homojen olmayan malzemeler gibi zor ve karmaşık problemlerin çözümünde sistematik bir programlamaya izin vermesidir. Diğer yandan bu yöntem mühendisliğin çok geniş bir alanında sınır değer problemlerine uygulanabilmektedir[16]. (katı cisim mekaniği, termoelastisite, termodinamik, akışkanlar mekaniği, magnetizma v.b.)

Sonlu elemanlar yöntemi sürekli bir sistemi bir problemin karakterine uygun elemalara ayırarak, bu elemanlar üzerinde iç ve dış kuvvetlerin minimum olması ve daha sonra bu elemanların birleştirilmesi biçiminde bir yöntem uygulamaktadır. Bu yöntemin diğer bir avantajı ise sınır şartlarının problemin çözüm sırasına göre başlangıçta hesaplara dahil edilmesidir. Böylelikle çeşitli sınır şartlarını probleme uygularken başlangıçtaki yoğun hesapların tekrarına gerek kalmamaktadır. Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasına 1996 yılında başlanmıştır. Cloung ve Woodward (1967), dolguda gerilmeleri, yanal ve düşey hareketleri belirlemek amacı ile Reyes ve Deene (1996), yeraltında kayada kazı uygulamasında bu yöntemi kullanmıştır.

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılan sonlu elemanlar analizlerinde modellemeyi gerçek duruma yakın yapabilmek için aşamalı yükleme, aşamalı kazı yapılmaktadır.

Geoteknik mühendisliği problemlerinde sonlu elemanlar analizleri yardımı ile gerilmeler, yanal ve düşey yer değiştirmeler, boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akışı v.b. belirlenmektedir. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı non-lineer olduğundan geoteknik mühendisliği sonlu elemanlar analizinde bu davranışın modellenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapımdan önceki başlangıç gerilme durumu, zeminin nonlinear gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri ile yükleme aşamaları arasındaki bekleme süreleri analizde gerçek duruma yakın olarak belirlenmelidir [17].

Sonlu elemanlar ağı tünel yapılarının tasarımında ve modellenmesinde önemli bir araçtır. Klasik anlamda taşıyıcı sistemler, belirli sayıda elemanın gene belirli sayıdaki düğüm noktalarından birbirleriyle bağlanması sureti ile oluşmakta ve her elemanın kuvvet deformasyon özelliğinden hareket edilerek tüm sistemin statik karakteristikleri belirlenmektedir.

Sürekli ortamda ise, rakamsal çözümü zorlaştıran sonsuz sayıda düğüm noktası mevcuttur. FE-Metodu böyle bir ortamın (bütünün) belirli sayıda düğüm noktaları ile birbirine bağlanan birim elemanlara bölünebileceği varsayımından hareket eder. Birim elemanların kenarları boyunca etkiyen gerilmeler “fiktif kuvvet” olarak düğüm noktalarına bindirilirlir. Bu şekilde sürekli bir ortamı nümerik yoldan ifade etme imkanı sağlanır.

FE- Modeli ile kaplama ve zeminin tüm karakteristikleri dikkate alındığı için, böyle bir hesap metodunun en büyük avantajı, kaplama ve zeminin birbirlerini etkileyiş tarzını gerçeğe yakın bir tarzda ifade etmek mümkün oluyor. Zemin ve kaplama sisteminin özelliklerine bağlı olarak, kompozit sistemde her elemanın aldığı yük, hesap akışının tabii bir neticesi olarak belirlenmektedir. Böylece, zeminde oluşabilecek kemerlenmeleri, yük ve aktarmalarını, yüklerin akışını FE-Modelinde takibetmek ve inşai tedbirleri yönlendirmek mümkün olmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminde Analiz Adımları aşağıda sıralandığı gibidir;

- Eleman seçimi ve ortamı elemanlara ayırma
- Yaklaşım Modeli (veya fonksiyonun) seçimi

- Malzeme bünye davranışı
- Eleman denklemlerinin elde edilmesi
- Eleman denklemlerinin birleştirilerek sistem denklemlerinin elde edilmesi
- Sistem denklemlerinin çözülerek birinci dereceden bilinmeyenlerin bulunması
- Birincil bilinmeyenlerden ikincil bilinmeyenlerin hesaplanması
- Sonuçların yorumu

Sonlu elemanlar yönteminin avantajları;

- Bilgisayar yardımı ile çözülebilir. (Hız + Optimizasyon olanağı)
- Geliştirilen SE Formülasyonu birçok probleme uygulanabilir.
- Karmaşık yükleme durumları, yükleme, sınır koşulları ve malzeme durumu dikkate alınabilir.
- Seçilen birincil bilinmeyenler (yer değiştirme, akım potansiyeli vs) ile bunlara bağımlı ikincil bilinmeyenler (gerilme, şekil değiştirme, akım miktarı, hız v.s.) hesaplanır.

Dezavantajları;

- Bilgisayar yardımı ile çözülebilir. (bellek ve bilgisayara bağımlılık)
- Yaklaşık bir yöntem, yeterli eleman ile gerçek çözüme çok yakın sonuçlar verir[18].

FE-Metodu ile mühendise tünel sektöründe karşılaşacağı hemen hemen her hali analitik yoldan ifade etme imkanı verilmiştir. Şöyleki;

- Tünel kesiti her türlü geometrik şekilde olabilir.
- Çeşitli tünel kesitleri belirli gruplarla ifade edilebilir.
- Zemin sathı her türlü topoğrafyaya uyabilir.
- Zemin çeşitli tabakalardan oluşabilir, tabakalar sürekli veya yerel olabilir.
- Zemindeki tabii yapı (çatlaklar, fay hatları, anizotropi v.s.) tanımlanabilir.
- Zeminin elastik/elastoplastik özellikleri dikkate alınabilir.
- İnşaat tarzına göre çeşitli kademeler ifade edilebilir.

- İnşaatın ilerleyişi paralelinde değişen zemin karakteristikleri dikkate alınabilir [19].

Bu çalışmada tünel inşaatı sırasında zeminde meydana gelebilecek deformasyonlar, zemin iyileştirmeleri ve çevrede mevcut yapı olması durumu sonlu elemanlar analizinde geoteknik mühendisliği problemlerinin çözümü için geliştirilmiş olan Plaxis programı kullanılarak incelenmiştir.

5.1.4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Tünel Kaplamalarının Hesabı

Son yıllarda sonlu elemanlar yöntemi teorik gelişmeler ve uygulama alanları açısından büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Dış etkiler altında bir yapının gerçeğe en yakın davranışını bulmayı amaçlayan yapı mühendisliği alanında da sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Mühendisler, yöntemin matematiksel kanıtlara dayanarak değil, sezgisel nedenler ile ve ihtiyaçlarına göre yönetim güç ve potansiyelini kullanmaktadırlar.

Yeni geliştirilen tünel inşa yöntemlerine de uygun olan sonlu elemanlar yöntemi tünel hesabında yaygın olarak kullanılmaktadır [20].

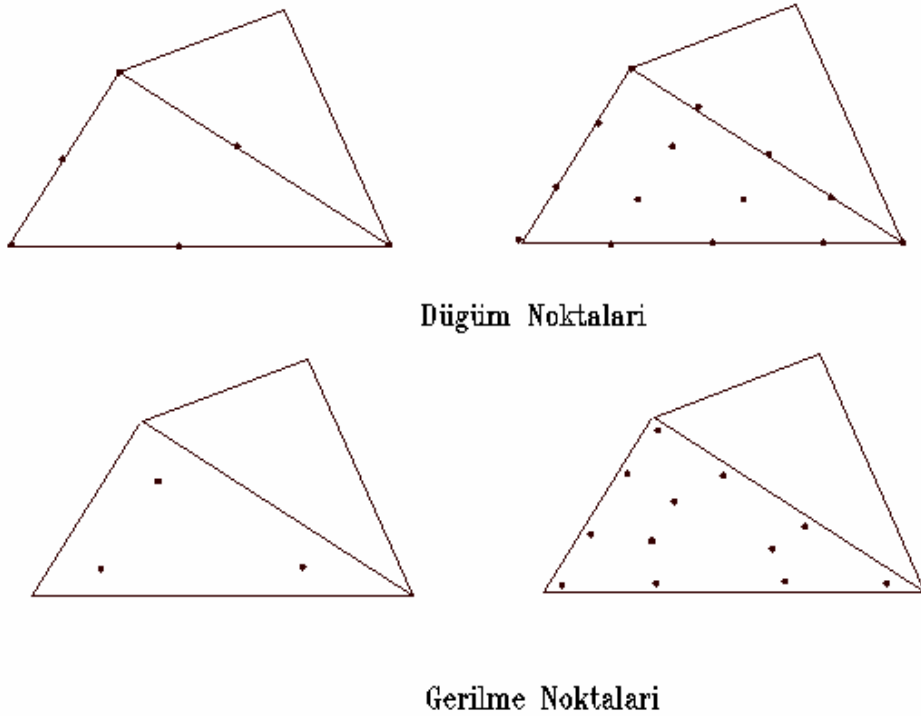
5.1.4.2 Plaxis Sonlu Elemanlar Programı

Sonlu elemanlar programı olan Plaxis Geoteknik mühendisliği problemlerinin nümerik analizi için geliştirilmiş bir programdır. Program, bilgi girişine olanak veren giriş (input) programı, analizlerin gerçekleştirildiği hesap (calculation) programı, analiz sonuçlarını grafik olarak sergileyen (output) programı ve elde edilen sonuçlar ile istenilen grafiğin oluşturulmasını sağlayan eğri (curve) programından oluşmaktadır. Bu program, projelerin tasarımında ihtiyaç duyulan deformasyon ve stabilize analizleri, zemin yapı etkileşimi, gerilme-şekildeğiştirme, yükleme durumları, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği konularında ve malzemenin çeşitli olduğu durumlarda kullanılmaktadır ve hemen hemen gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir.

Uygulanan sonlu elemanlar formülasyonunda deplasman yöntemi kullanılmış, yani deplasmanlar esas bilinmeyen olarak kabul edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemine göre, bir sürekli ortam birçok elemana ayrılır ve her bir eleman üzerindeki düğüm noktaları bir serbestlik derecesine sahiptir.

Plaxis programında sonlu elemanlar ağının oluşturulması sırasında hücreler üçgen elemanlara ayrılırlar. Plaxis'te bu üçgen elemanlar 6 veya 15 düğüm noktalı olarak seçilebilmektedirler. Gerilmelerin ve göçme yüzeylerinin gerçeğe daha yakın hesaplanabilmeleri için 15 düğüm noktalı elemanın seçilmesi daha doğrudur fakat kullanıcı bunun daha fazla zaman aldığını bilmelidir. Sonlu elemanlar hesabı sırasında deplasmanlar düğüm noktalarında hesaplanır. Düğüm noktalarını üçgen elemanlar üzerindeki dağılımı aşağıdaki şekilde gibidir.

Problemlerin analizinde yer değiştirmeler düğüm noktalarında gerilmeler ise gerilme noktalarında hesaplanmaktadır. Düğüm noktaları yük deplasman eğrilerini oluşturmak için daha önceden belirlenebilir. 6 düğüm noktalı elemanın 3 gerilme noktası, 15 düğüm noktalı üçgen elemanda ise 12 gerilme noktası vardır. Gerilme noktaları gerilme izlerini veya gerilme şekil değiştirme eğrilerini oluşturmak için önceden seçilebilir. Burada 15 düğüm noktalı elemanlar tercih edilmiştir. Bu noktalar Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.2: Plaxis ile Analizde Kullanılan Elemanlar, Düğüm Noktaları ve Gerilme Noktaları

Programda öncelikle geometrinin oluşturulması gerekmektedir. Burada Lines komutu ile çizgiler çizilir ve çalışma alanının sınırları belirlenir. Birden fazla tabakalı zemin profili üzerinde çalışılacağı zaman yine bu çizgisel elemanlar yardımı ile arazi istenilen noktalardan ayrılarak farklı zemin bölgeleri tanımlanabilir. Geometrinin belirlenmesinden sonra projede kullanılacak yapısal elemanlar (temel, palplanş, yatay destek, ankraj, geotekstil) yerine göre Beam, Geotextile, Node to Node Anchor ve Fixed End Anchor komutları ile modellenir.

Tünel hesapları için ayrı bir komut olan Tunnel komutu kullanılmaktadır. Tünel hesaplarında tüneli üç farklı şekilde tanımlamak mümkündür (sol yarım tünel kesiti, sağ yarım tünel kesiti ve tam tünel kesiti). Bu komut Beam komutunun farklı bir kullanımı olduğundan, palplanş ve temel hesaplarında kullanılanların aynısıdır.

Tünel geometrisini belirlemek için Tunnel Designer komutu kullanılır. Burada tünelin yarıçapı ve her dilim için merkez açısı belirlenir. Dairesel tünellerde bu açılar bütün dilimler için aynı olurken değişik kesitli tüneller için bu açılar değiştirilerek farklı geometriler elde edilebilir. Ayrıca bu komut altında tünel etrafındaki kaplama malzemesi ve zemin yapı etkileşimin hesaba katmak ara yüzey elemanlarla (Interface Elements) tariflenebilir. Buna ilave olarak, flexible yapılar için gerekli olan şekil değiştirebilme yüzdesi yine bu komut yardımı ile tünele atanabilir.

Plaxis sonlu elemanlar programında önceden belirlenmiş yer değiştirmeleri, noktasal ve yayılı yükleride tanımlamamıza olanak sağlar. Bu amaçla Prescribed Displacements, Point Forces ve Traction Loads komutları kullanılabilir.

Plaxisde Material Sets ana başlığı altında Zemin ve yapısal elemanların özellikleri (Soil & Interface, Beam, Anchor ve Geotextile) tanımlanabilir. Bunlar Plaxis programında arşivlenip daha başka uygulamalarda da zemin ve yapısal eleman özelliği olarak atanabilir.

Çubuk elemanlar için (Beam Element); Normal Rijitlik (EA), Eğilme Rijitlik (EI), duvar kalınlığı (d), eleman ağırlığı (w), Poisson Oranı (ν), ankraj ve destek elemanlarını tanımlamakta kullanılan Node to Node Anchor komutu için Normal Rijitlik (EA), Destek Aralığı (L_s), Maximum kuvvet (F_{max}) değerleri; ankraj kökü ve geotekstil malzemesini tanımlamak için kullanılan Geotextile komutu için ise Normal Rijitlik (EA) değerleri program girdileri kısmında tanımlanmalıdır.

Plaxis programında zemin özelliklerini belirlemek amacı ile zemin mekaniği problemlerinin analizinde çok kullanılan Mohr-Coulomb (MC), kum, çakıl gibi kohezyonsuz zeminlerde ve çok aşırı konsolide kohezyonlu zeminlerde kullanılan Pekleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model-HS), Geoteknik problemlerin analizinde sıkça kullanılan efektif gerilmelere göre analiz yapan ve yumuşak zeminlerin davranışını daha iyi modelleyebilen Yumuşak Zemin Modeli (Soft Soil Creep Model-SSC) ve Lineer Elastic Model olmak üzere dört farklı zemin modeli kullanılabilmektedir. Bir zemin modeli gerilme artışları ve şekil değiştirmeler artışları arasındaki ilişkinin matematiksel ifadesidir.

Mohr Coulomb Modelinde Young Modülü (E), Poisson Oranı (ν), İçsel Sürtünme Açısı (ϕ), Dilatansi (Genleşme) açısı (ψ), zeminin kuru ve ıslak birim hacim ağırlığı (γ_{dry} ve γ_{wet}) yatay ve düşey permeabilite katsayıları (k_x ve k_y) ve zeminin herhangi bir elemanla temasta olması durumunda ara yüzey elemanları tanımlanmaktadır. Ara yüzey elemanı için, dayanım, ara yüzey kalınlığı ve geçirimsizlik tanımlanır.

Pekleşen zemin modelinde kullanılan parametreler; (Mohr-Coulomb Parametreleri) c: efektif kohezyon, ϕ : efektif içsel sürtünme açısı, ψ : Dilatansi Açısı, (zemin rijitliği için temel parametreler) E_{50}^{ref} : Drenajlı üç eksenli basınç deneyinde sekant rijitliği, E_{oed}^{ref} : Başlangıç ödometre yüklemesi için tanjant rijitliği, m: gerilme seviyesine bağlı malzeme katsayısı, (İleri düzey malzeme parametreleri) E_{ur}^{ref} : Yükleme boşaltma için rijitlik $E_{ur}^{ref} = 3 E_{oed}^{ref}$, ν_{ur} : Yükleme boşaltma için poisson oranı, P^{ref} : Rijitlikler için Poisson oranı, K_0^{NC} : Normal konsolide durum için sükunetteki toprak basıncı katsayısı, R_f : Göçme oranı, $\sigma_{tension}$: Çekme gerilmesi ve $\sigma_{increment}$: Derinlikle kohezyon artışıdır.

Yumuşak zemin modeli ise aşırı konsolidasyon oranı AKO 2 den küçük olan zeminlerin davranışını modellemek için geliştirilmiş izotropik, elasto-plastik, şekil değiştirme pekleşmeli bir modeldir. Bu modeli tanımlamak için parametreler; λ^* : Modifiye sıkışma indisi, K^* : Modifiye şişme indisi, c: kohezyon, ϕ : İçsel sürtünme açısı, ψ : Dilatansi Açısı, ν_{ur} : Yükleme boşaltma için poisson oranı, K_0^{NC} : Normal konsolide durum için sükunetteki toprak basıncı katsayısı ve M: K_0^{NC} parametresidir [21].

M-C Modelinin avantajları;

- Basit ve açık bir modeldir.
- Genelde zemin davranışının birinci mertebede yaklaşımıdır.
- Çoğu pratik probleme uygulanabilir.
- Sınırlı sayıda ve açık parametrelere sahiptir.
- Göçme davranışını iyi temsil eder.
- Dilatansi içerebilir.

Dezavantajları;

- İzotrop ve Homojen davranış
- Göçmeye kadar lineer elastik davranış
- Gerilmeden bağımsız rijitlik
- Ön yükleme ve boşaltma veya yeniden yükleme arasında ayırım yok
- Dilatansi devam eder (kritik boşluk oranı yok)
- Drenajsız davranış gerçekçi değil
- Anizotropi yoksa zaman bağımlılıkta yok [18].

Tüm malzeme parametreleri belirlendikten ve atandıktan sonra her bir malzeme ilgili ortama atandıktan sonra sonlu elemanlar ağının oluşturulması safhasına geçilir.

Sonlu elemanlar ağı Mesh komutu ile oluşturulmaktadır. Normalde programda sonlu elemanlar ağı çok ince olarak oluşturulmaz, fakat istenildiği taktide tüm zemin ortamı ya da sadece istenilen kısım için daha ince bir sonlu elemanlar ağı oluşturulabilir.

Sonlu elemanlar ağıda oluşturulduktan sonra başlangıç koşullarını belirlemek amacı ile Initial Conditions komutuna basılır. Burada eğer mevcut ise yeraltı su seviyesi çizilir ve boşluk suyu basıncı hesaplanır. Daha sonra zemin, üzerinde herhangi bir yapısal eleman olmadığı ilk hale getirilir ve efektif gerilmeler bulunur.

Bundan sonraki adımda Calculate komutuna basılarak hesaplama safhasına geçilir. Bu aşamada kademeli inşaat yapılması durumunda Staged Construction, tekil ya da yayılı yük uygulamasında ise Total Multipliers (Toplam Çarpanlar) komutu seçilir.

Programda ayrıca güvenlik faktörünün hesaplanması amacı ile geliştirilmiş Phi-c azaltma (Phi-c reduction) seceneğide vardır. Burada zemin parametreleri ϕ ve c kademeli olarak azaltılarak yapının göçtüğü an belirlenmekte ve yapının, herhangi bir inşaat safhası için göçmeye karşı güvenlik katsayısı belirlenebilmektedir. Analizin herhangi bir safhasında zemin dayanımı parametrelerinin belirlenmesinde toplam çarpan ΣM_{sf} kullanılmaktadır.

$$\Sigma M_{sf} = \frac{\tan \phi_i}{\tan \phi_r} = \frac{c_i}{c_r} \quad (5.1)$$

Burada parametrelerdeki i indisi malzeme özellikleri tanımlanırken girilen değerleri r indisi ise analizlerde kullanılan azaltılmış değerleri göstermektedir. Analizlerde başlangıçta toplam çarpan, $\Sigma M_{sf} = 1$ alınarak tüm malzeme parametreleri azaltılmış değerine getirilmektedir. Daha sonra ise $\tan \phi$ ve c değerleri kademeli olarak azaltılarak yapının göçme durumuna ulaşması sağlanmaktadır ve bu göçme anındaki güvenlik sayısı ise toplam çarpan ΣM_{sf} 'in göçme anındaki değerine eşit olmaktadır.

Tüm aşamalar tanımlanıp ortam son haline geldiğinde Calculate komutuna basılarak zemin ve yapısal elemanların bu koşullar altındaki davranışı belirlenir. İstenildiği takdirde Curves komutu ile istenilen grafikler çizilerek gerekli karşılaştırmalar yapılabilir [22].

6.TÜNELCİLİKTE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ

6.1 Genel

Tünelcilikte zemin iyileştirilmenin amacı, kazı programının güvenli ve aksamadan gerçekleşmesi için zeminde yeterli iyileşmeyi sağlamaktır. Bunun yanında yeterli derecede su ve kaya düşmesi ile bağlantılı zemin akmasını kontrol etmekte iyileşmenin amacıdır.

Tünelcilikte zemin iyileştirme operasyonları genellikle aşağıdakilerden bir ya da birkaçı ile beraber anılır:

- Kontrollü drenaj ile zemin suyu seviyesinin düşürülmesi
- Bir yüzeyaltı su kaynağının ya da tünel yakınındaki önemli bir akiferin seviyesinin düşürülmesi
- Basınçlı hava ile tünele su akmasının engellenmesi
- Enjeksiyon ya da dondurma yöntemi ile zemin stabilizasyonu

Tünel inşaatlarında kazı sürecinde genellikle zemin iyileştirilmesine ihtiyaç duyulur. Bu jeolojik bozukluktan ya da hidrojeolojik durumdaki belirgin değişmeden dolayı yapılmış bir zemin iyileştirilmesi olabilir. Su tutan kireçtaşı, tebeşir taşı veya yüksek geçirgenlikli kumtaşı formasyonlarında açılan tüneller gibi özel iyileştirme isteyen durumlarda geniş bir sahada iyileştirme yapılır [23].

Yapım masraflarının artmaması ve işte gecikme olmaması için tünel projesinde ilk aşamadan itibaren olarak zemin suyu kontrolüne gereken önem verilmelidir.

Kolay drenajlı kum ve çakıllarda ya da kendini tutamayan çok çatlaklı kayalarda, su ve dengesizlik problemleri görülebilir. Bu zemin koşulları geleneksel kaplamalı tünellerde tünel aynasından uzakta destek yapımı problemlerine aynanın kendini tutamamasından dolayı tünel açma problemlerine sebep olurlar. Dahası tünel tavanındaki çatlaklı malzemenin tünel desteklerine yüksek basınç uygulamasından

dolayı stabilite problemleri yaşanabilir. Buna örnek olarak İtalya’da Agri Sauro tüneline 6000 m³ kumlu siltli malzemenin, tünelin kaplamasının ani şekilde kırılması ile tünelin içine akması verilebilir. Bu olay sonucu tünel açım işine, bu malzemenin taşınması ve olası göçmelere karşı tünel güvenliğinin sağlanması işide eklenmiş, bu işlemde maliyetin artması ve işin uzamasına sebep olmuştur.

6.2 Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zemin suyunu kontrol etmeye ve zemini iyileştirmeye yarayan yöntemler:

- Well-point yöntemi ile seviye düşürme
- Elektro osmoz
- Zeminin Dondurulması
- Enjeksiyon

Zemin iyileştirme yöntemlerinin ortak özellikleri çok pahalı olmalarıdır. Bu sebepten mümkünse daha başlangıçta güzergahın değiştirilmesi yoluna gidilir. Yüksek maliyet, daha proje safhasında iken muhtemel sorunlar ve buna bağlı olarak zeminin iyileştirilip iyileştirilmeyeceği ortaya çıkarılabilirse oldukça sınırlı bir düzeyde tutulabilir. Böylece nerede ve nasıl bir iyileştirmenin gerekeceği bilinir ve hazırlıklı olunur. Eğer zemin şartlarındaki zorluklar inşaat öncesinde belirlenmemiş ise, uygulanmakta olan tünel açma yöntemi ve iksa kaplama cinsi ile zeminin iyileştirilmesi için gereken yöntem uygulamaya ihtimalide ortaya çıkabilir.

İyileştirme yöntemi uygulandığı yerlerdeki şartlara bağlı olarak yüzeyden ve aynadan yapılabilirdiği gibi, bütün tünel boyunca ya da kısa bir bölümü içinde yapılabilir.

Bu dört iyileştirme yöntemlerinden hangisinin kullanılacağı yönünde en iyi kılavuz aşağıdaki Tünel Zemin İyileştirme Yöntemleri Uygulama Sınırları tablosundan tesbit edebilirsiniz [5].

Bazı durumlarda zeminde meydana gelen problemi ortadan kaldırmak mümkün ya da tamamen gerekli olmayabilir. Kimi yöntemler tünel aynasına düşük basınçlı hava uygulamasıyla birlikte uygulanabilir.

Tünelciliğin, zemin iyileştirme yönteminin seçimi öncelikle arazi araştırmaları ve zeminaltı koşulları içeren durumlarda yapılmış test sonuçlarına dayandırılır.

Zemin derecelenme karakteristikleri (etkin dane çapı, vb.) ve zemin iyileştirme arasındaki ilişkiyi en güzel şekilde aşağıdaki şekil açıklamaktadır.

- 2) Zemin derecelenmesi zemine uygun görülen iyileştirme yöntemini etkileyen tek faktör değildir.
- 3) Su basıncının piki ve etkilenen tünel uzunluğu, iyileştirme yönteminin seçiminde etkili olacaktır.

6.3 Zemin Suyu Seviyesini Düşürme

Zeminin, tünel kazma işleminin başlamasından önce zemin suyu seviyesinin düşürülmesi ya da dreanjı çok kullanılan ekonomik bir su kontrol yöntemidir. Bu teknik, tasarlanan tünel hattının her iki tarafında sondaj delikleri açıp, suyun bu deliklerden yüzeysel veya dalgıç pompalar ile çekilip su seviyesinin yapay olarak düşürülmesini içerir. Bu işlemin esas amacı tünel düzlemi boyunca etkili olan su basıncının pikini düşürmek ya da yok etmektir.

Noktasal kuyulama (well point) yöntemi sadece çok sığ kazılarda ya da yeraltı suyu basınç yüksekliğinin düşük olduğu durumlarda yeraltı suyu düşürme yöntemi olarak kullanılır. Noktasal kuyulama yönteminin başlıca belirlenmesi gereken kriterler:

- 1) Kuru ağırlığı, derinliği ve istenen toplam pompalama kapasitesi
- 2) Yüzeysel ya da dalgıç pompaların kullanımı
- 3) Pompa ile ince tanelerin toplanması
- 4) Zemin çökmesi ve çevre yapılarda hasar riski
- 5) Askıda su tabakalarının iyileştirilmesi
- 6) Değişken zemin geçirgenlikleri

Tünel derinliği, suyun düşürülmek istenen seviyesi ve zemin permeabilitesi hangi çeşit ve kapasitede pompa kullanılması gerektiğini belirler. Yüzeysel pompaların kullanım alanı, dalgıç pompalarla karşılaştırıldığında düşük emişli başlıklardan dolayı daha kısıtlıdır. Bununla beraber dalgıç pompaların maliyeti yüksektir.

6.3.1 Yüzeysel Pompalama

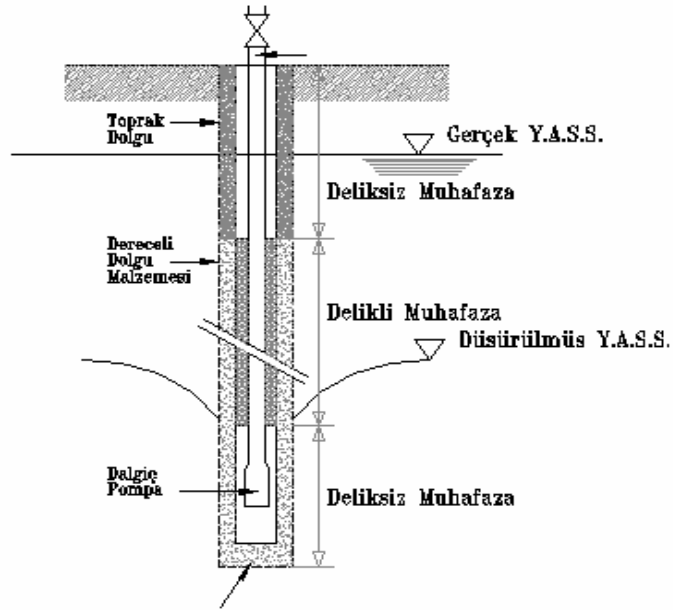
Sondaj delikleri, küçük düşüm yükseklikleri istenmesinden, yüzeysel pompaların kapasitelerindeki sınırlamalardan ve yüzeyden 5–6 m derinlikteki kumlu ve çakıllı zeminlerde verimli çalışmalarından dolayı, kısa aralıklarla yapılmaya meğillidirler.

Sonuç olarak yüzeysel pompalama, birçok kuyu noktalarının kullanımını gerektirdiğinden aç-kapa tünelciliğine, derin tünelcilikten daha uygundur.

6.3.2 Derin Kuyular

Dalgıç pompaların geniş aralıklı derin kuyularda kullanımı, yüzeysel pompalamaya göre daha büyük derinliklerde zemin suyu seviyesinin düşürülmesine olanak sağlar. Seviye düşürme, çatlaklı kayaç durumlarında olduğu kadar kumlu ve çakıllı zeminlerde uygundur. Dalgıç pompaların tünelcilikte kullanım sahası daha geniştir.

Zemin suyunda fazla miktarda ince malzeme bulunması pompalama sorunlarına sebep olabilir. Şekil 6.1 gösterildiği gibi kuyu, kum filtre ile çevrelenmiş akiferin içinde, delikli bir muhafaza ile kaplanmıştır. Pompalar ince malzemeler gibi aşındırıcı ortamı eleyecek şekilde dizayn edilmeli, buna karşılık süspansiyon içindeki ince malzemenin sebep olduğu yoğun çamuru karşılayacak kadar etkin pompalama kapasitesine sahip olmalıdır.



Şekil 6.1: Tipik Derin Kuyu Kesidi

6.3.3 Noktasal Kuyu İşleminin Yüzeye olan Etkileri

Noktasal kuyularla drenaj yeraltı su seviyesini düşürülürken bölgesel zemin kararlılığına ek olarak çevredeki yapıların temellerinide dikkate almak gerekir. Temellerdeki farklı oturmalar, çevredeki yapılarda çeşitli hasarlara sebep olabilirler. Bu etkiler, Amsterdam gibi, yeraltı suyu tabakasının yüzeyin 1–2 m altında olduğu ve su çekilmesi durumunda negatif yüzey sürtünme etkileri ile ağaç kazıkların çürümesinin fazla görüldüğü, kimi şehirlerin bazı bölgelerinde çok belirgindir. Diğer bir çözümde, tünel ile etkilenen binalar arasında boşaltma delikleri kullanmak ve suyu sirküle etmektir ki, bu şekilde dikleştirilmiş bir düşürme profili sayesinde yeraltı suyunun temeli destekleme kapasitesi devam ettirilmiş olur.

6.3.4 Askıdaki Su Tabakaları

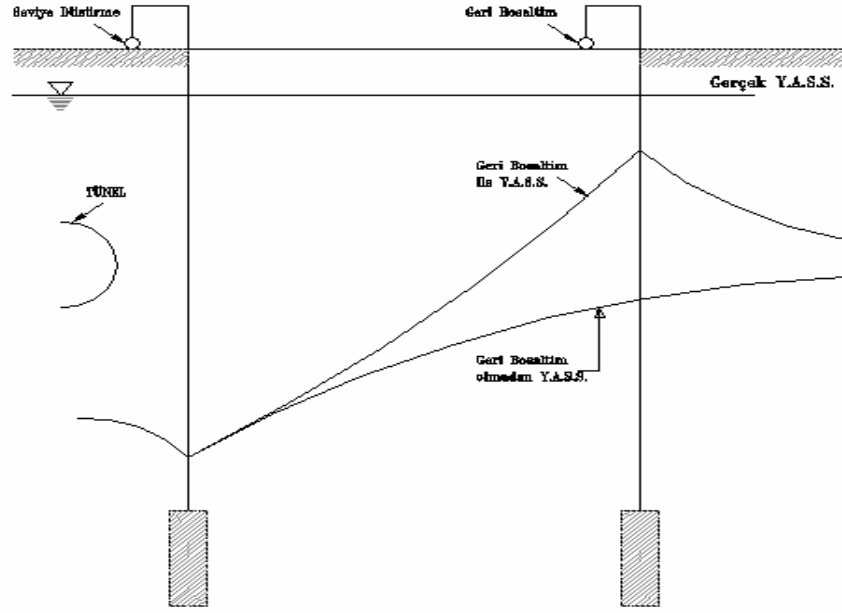
Bu terim geçirimsiz bir yatay tabaka üzerindeki yeraltı suyu durumlarını belirtir. Bunlar tünel projesi için sorun oluşturabileceklerinden, özel dikkat gerektiren durumlardır. Askıdaki su tabakaları için uygulanan standart teknik, geçirimsiz tabakaya doğru sondaj yapmak ve askıdaki su kitlesinin drene olmasını sağlamaktır.

Permeabiledaki bölgesel değişimler, sonuç düşme profilini etkileyeceği için dikkatli bir inceleme gerektirir. Uygun mesafe ve pompa kapasitelerinin belirlenmesi ile yeraltı suyu düşme profili ve pompalama kapasitesi doğru olarak tahmin ve elde edilir.

6.3.5 Tünelden Seviye Düşürme

Yüzeyde yapılan seviye düşürme işleminin su basınç yüksekliğini tam olarak düşüremediği durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Bu teknik oldukça basit ve düşük maliyetli olmasına rağmen, aynada sızıntı olduğu durumlarda denge problemlerine sebep olabilir. Genelde yüzeyden yapılan ana seviye düşürme işinden bağımsız olarak tünel içindeki küçük akıntıları kontrol etmek için kullanılır. Aşağıdaki şekilde düşürülmüş Y.A.S.S.'nin kuyu civarındaki durumu gösterilmektedir.

Hem sınırlı hem de açık akifer durumlarında istenilen düşürmeyi sağlamak amacı ile bir kuyudan basılması gereken su miktarını tahmin etmemize olanak veren nümerik denklemler mevcuttur. Bu tip denklemlerin birçoğu standart Theim denkleminden türetilmiştir.



Şekil 6.2: Düşürülmüş Y.A.S.S.'nin Kuyu Civarındaki Durumu

Seviye düşürme ve istenilen pompalama kapasitesini belirlemek için kullanılan değişkenleri göstermektedir ve bu değişkenler aşağıdaki denklemler ile ilişkilidir:

Sınırlı akifer durumu:

$$Q_c = \frac{\pi k(H^2 - h^2)}{2.30 \log(r_0 - r_w)} \quad (6.1)$$

Açık akifer durumu:

$$Q_c = \frac{\pi k(H^2 - h^2)}{2.30 \log(r_0 - r_w)} \quad (6.2)$$

Burada:

$Q_c = Q_u$ = Kuyudan akış miktarı

K = Permeabilite katsayısı

B = Akiferin kalınlığı

H = Tünel üzerindeki yeraltı suyu tabakasının kalınlığı

h = En fazla düşmenin olduğu noktaya tünelden olan yükseklik

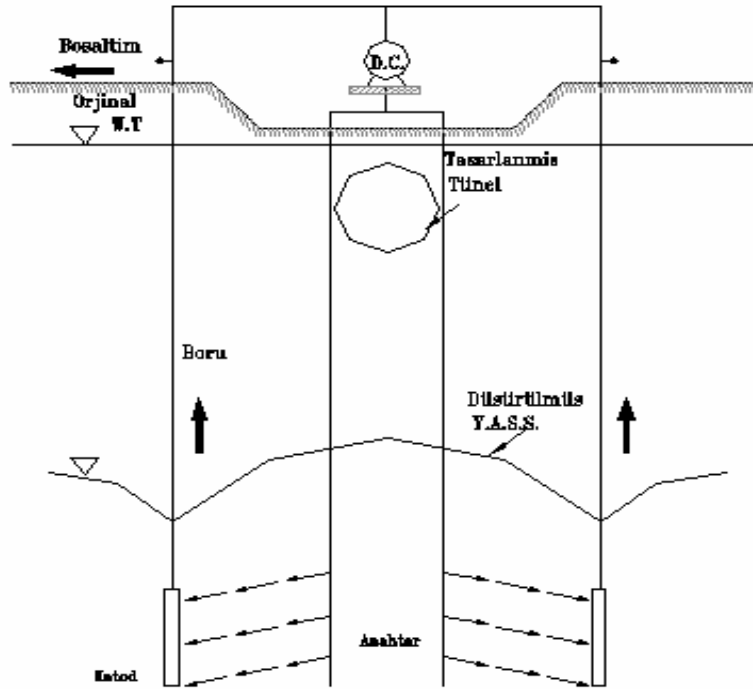
r_o = Seviye düşürmenin etki yarıçapı

r_w = Kuyu yarıçapı

Yukarıdaki denklemlerde dikkat edilmesi gereken iki nokta, bu denklemlerin teorik ideal ortamlar için geçerli olduğu ve bunların pratiğe uygularken gerekli özel araştırmaları yapmaktır.

6.4 Elektro Osmoz

Elektro osmoz alışılmış sistemlerle yer altı su seviyesinin düşürülmesi sırasında sorun çıkaran zeminlerin, özellikle killeri ve siltlerin stabilizasyonu için kullanılan seviye düşürme tekniğidir. Elektro ozmoz yöntemi ile seviye düşürme işlemi şekil 6.3'de görülmektedir. Bu teknik, üzerlerinden direk akım geçen iki elektrodun negatif elektrodun (katod) suyu toplaması ve suyun buradan pompalanması esasına dayanır. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında diğerlerine göre daha pahalı, alet gerektiren ve kazaların daha olası olduğu bir yöntemdir [24].

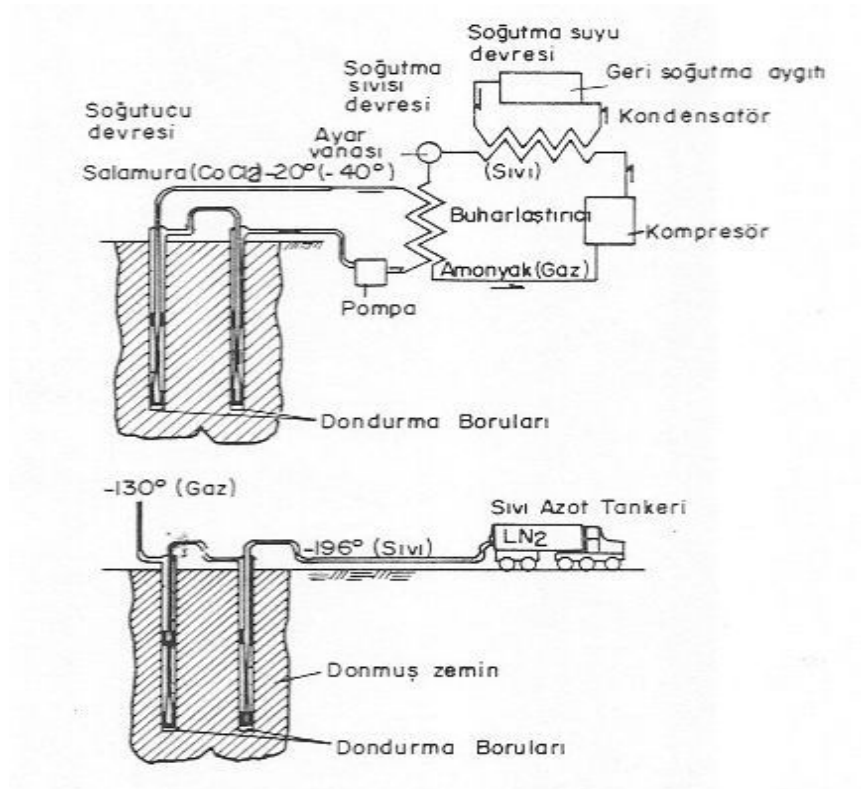


Şekil 6.3: Elektro Ozmoz Yöntemi ile Seviye Düşürme

6.5 Zemin Dondurulması

Genelde dondurma yöntemlerini iki ana grupta toparlamak mümkündür:

- 1- Klasik yöntemle, tuzlu su kullanılarak dondurma: Bu yöntemde tuzlu su şekil 6.4’de görüldüğü biçimde kapalı bir devrede dolaştırılarak soğutma sağlanabilmektedir. Zemin içinde, -20 ile -40 ° c soğukluğunda sıvının, borularla dolaştırılması ile de zemin içindeki boşluk suyu dondurulmaktadır.



Şekil 6.4: Dondurma Yöntemleri [25]

- 2- Dondurma tekniğinde oldukça yeni olan ikinci yöntemde ise, LN2 sıvı kullanılarak -196 °c de soğuk elde edilebilmektedir. Şekil 6.4 de görüldüğü gibi sıvı azot, şantiyeye hazır betona benzer biçimde kamyonla getirilmektedir. Sıvı azot kullanılarak sağlanan dondurmada: önce sıvı azot zemine verilir arkadanda bir havalandırma borusu ile gaz halinde havaya bırakılmaktadır. Çok düşük derecedeki soğukluk nedeni ile bu yolla çok kısa sürede donma sağlanmaktadır. Bu yöntem ayrıca her türlü soğutma techizatına olan gereksinmeyi ortadan kaldırmaktadır.

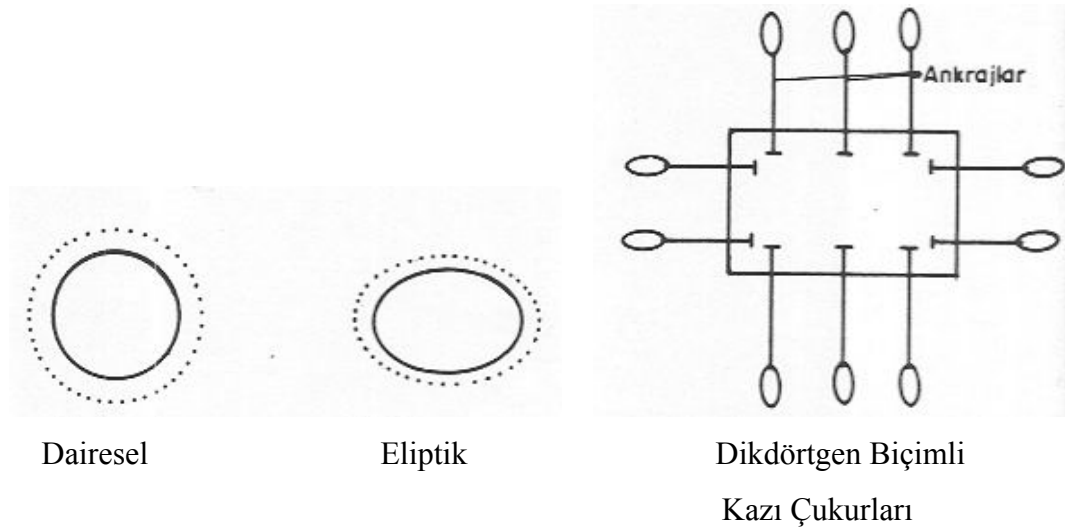
6.5.1 Dondurmanın Uygulama Alanları

Dondurmanın en çok kullanılan alanlar iki grupta toplanmıştır:

6.5.1.1 Şaftlar, Tünel Bacaları

Şaftlar aşağıdaki şekilde görüldüğü biçimde dairesel ya da eliptik kesitli olabilir. Gerek dairesel gerekse eliptik kesitli şaftlarda dondurulmuş zemin basınç gerilmelerine maruz kalmaktadır.

Şekilde 6.5’de görüldüğü biçimde dikdörtgen şeklinde bir inşaat kazısının tutlması amacı ile oluşturulan dondurulmuş zeminde ise basınç ve eğilme gerilmeleri mevcuttur.



Şekil 6.5: Donmuş Zeminden Yararlanma Biçimi [25]

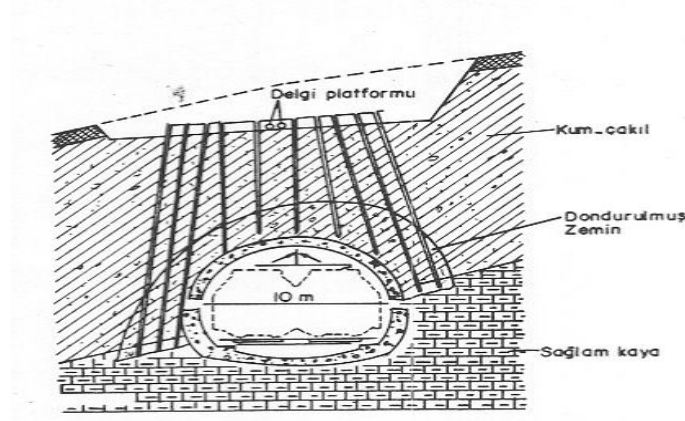
6.5.1.2 Tünel İnşaatında Dondurma

Bu işlem iki ayrı biçimde uygulanmaktadır. Bunlar:

- a) Düşey Dondurma
- b) Yatay Dondurma

Olarak iki ayrı prensipte verilebilir.

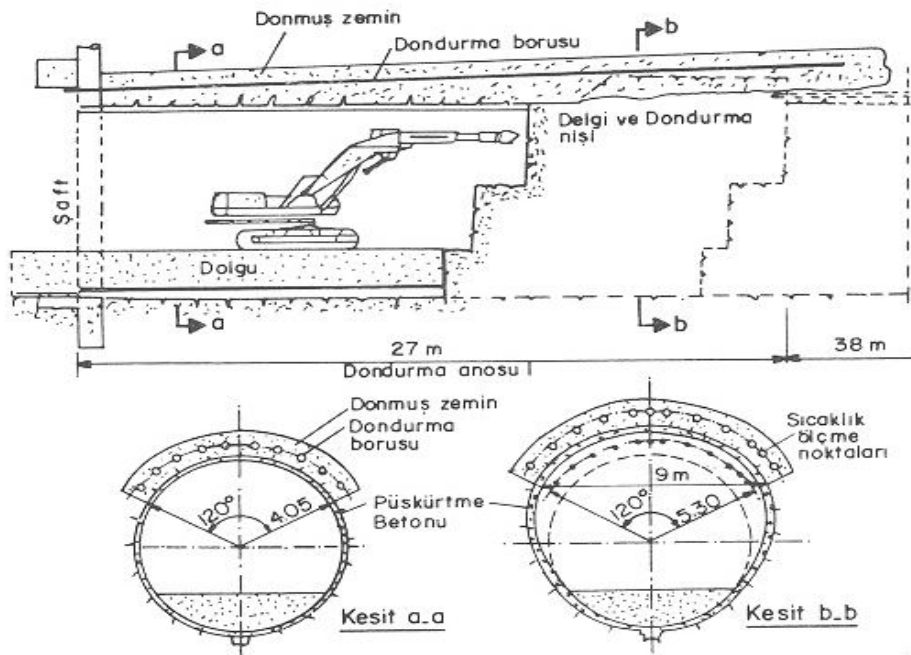
“Düşey Dondurma” ya örnek olarak şekil 6.6 de görülen İsviçreden bir tünel inşaatı verilecektir. Tünel üstü granül ve su altında, altta sağlam kayada olmak üzere 2 farklı nitelikteki formasyon içinde sürülmektedir. Tünel üstteki gevşek ve sulu zeminin dondurulması ile oluşan bir koruyucu kemer içinde açılmaktadır.



Şekil 6.6: Düşey Dondurma [25]

“Yatay Dondurma” ile ilgili örnek ise şekil 6.7 de görülmektedir. Klasik galeri inşaatlarına benzer biçimde dondurma boruları yanlardan ileri doğru sürülmektedir. Yatay dondurmanın en büyük avantajı dondurulacak zeminin hacminin düşeye göre çok daha az oluşudur.

Bu yolla ince bir dondurulmuş kabuk oluşturmak mümkündür. Delgi hassasiyetinin çok yüksek olması gereklidir. Günümüze kadar ki uygulamalarda istenilen hassasiyette 100 m ye varan delgiler gerçekleştirilmiştir. Yine bugüne kadarki uygulamalarda 15 m çapında tünellerin dondurma yöntemi ile gerçekleştirilmeleri mümkün olmuştur.



Şekil 6.7: Yatay Dondurma [25]

6.5.2 Dondurmada Önemli Faktörler

Dondurma yönteminin uygulanmasındaki önemli faktörler, “Yeraltı Şartları” ile “Projeye Bağlı Faktörler” olmak üzere 2 grupta özetlenebilir.

Yeraltı Şartları;

- 1) Boşlukların Hacmi
- 2) Su Muhtevası
- 3) Zeminin ısı iletme katsayısı
- 4) Zeminin başlangıçtaki ısı derecesi
- 5) Zeminde yeraltı suyunun hızından oluşur.

Projeye Bağlı Faktörler;

- 1) Dondurma borularının aralığı
- 2) Dondurma ya da soğutma borularının çapı
- 3) Soğutucu maddenin ısı derecesi
- 4) Suyu tam doygun olmayan zeminlerde su püskürtmek sebebi ile su muhtevasının arttırılması

gibi hususlardır. Burada yer altı şartları bir veri olarak alınmalı projeye bağlı faktörler bölümünde değinilen faktörler ise uygulanacak dondurma projesi mevcut ekipman ve zemin şartları gözönüne alınarak uygun biçimde seçilmelidir.

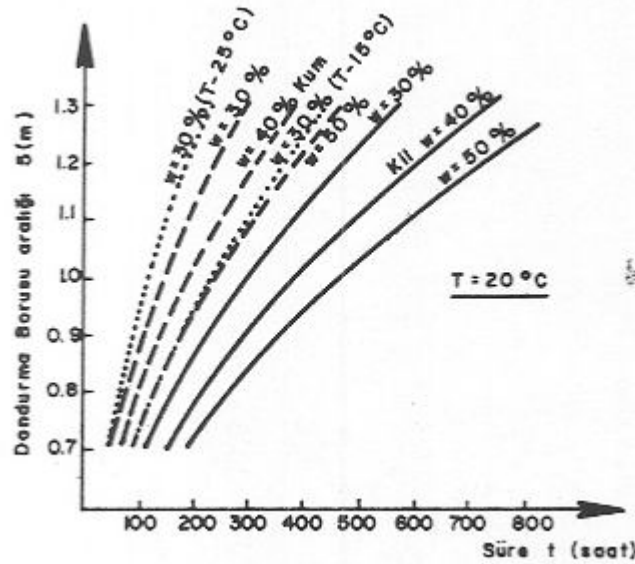
6.5.3 Dondurma Süresi

Aşağıdaki şekilde çeşitli zemin türlerinin dondurulabilmeleri için gerekli süre t, saat cinsinden verilmektedir.

Şekil 6.8’in incelemesinden aşağıdaki sonuçlar çıkmaktadır;

- 1) Dondurma borularının birbirine yakın seçilmeleriyle zeminin dondurulabilmesi için gerekli süre azalacaktır.
- 2) Kumun dondurulması, kile nazaran daha kısa sürede gerçekleştirilmektedir.
- 3) Zemindeki su muhtevasıda önemli bir faktördür.

%30 su muhtevasında bir zeminin ($w=30\%$), dondurulması %50 su içeren ($w=50\%$), bir zemine oranla daha uzun bir zaman almaktadır. %50 su muhtevastaki zeminin dondurulması için gerekli enerji miktarı , %30 su içerikli zemine göre daha fazladır.

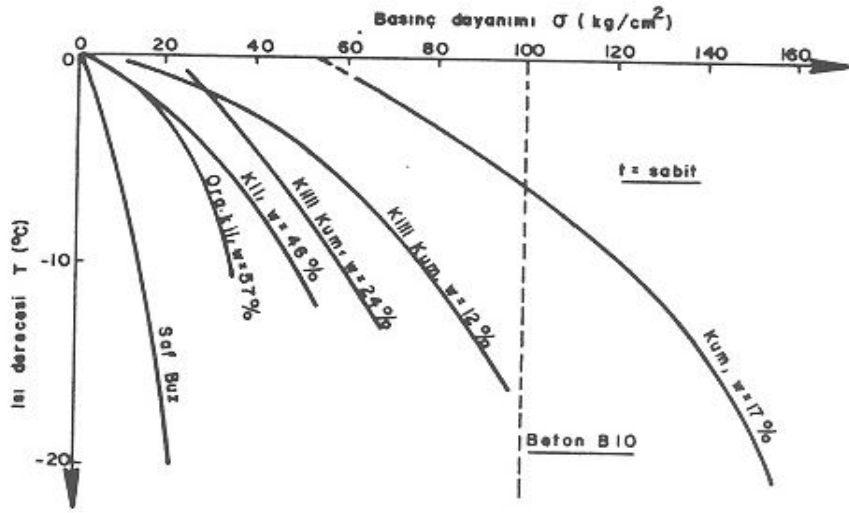


Şekil 6.8: Donma Süresini Etkileyen Faktörler [25]

6.5.4 Donmuş Zeminin Basınç Dayanımı

Donmuş zeminde basınç dayanımının ısıyla bağıntısı aşağıdaki şekilde verilmektedir. Şeklin incelenmesinden çıkan sonuçlar özetlendiğinde:

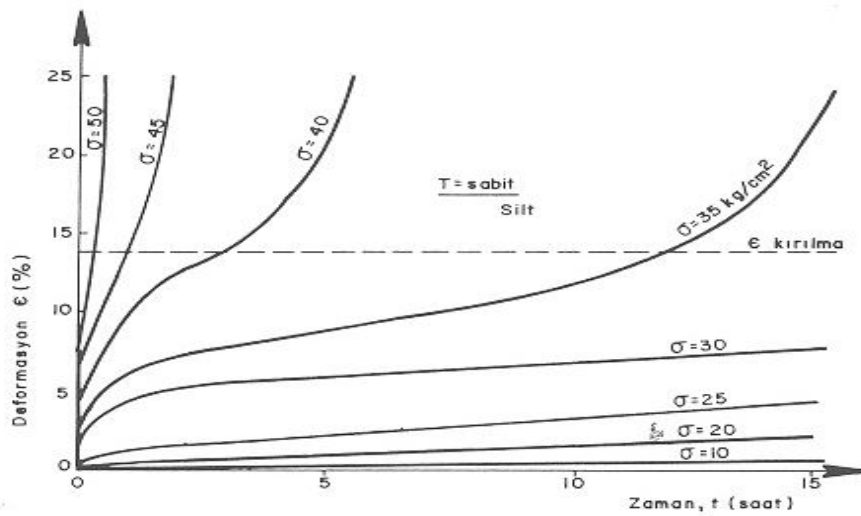
- 1) Dondurulmuş kumda 160 kg/cm^2 ye kadar basınç dayanımları elde etmek mümkün olduğu halde, ince daneli zeminlerde elde edilebilecek basınç dayanımları çok daha düşüktür.
- 2) Dondurulmuş zeminin ısısı, basınç dayanımlarıyla doğrudan ilişkilidir. Isı derecesi düştükçe dayanım artmaktadır.
- 3) Aşağıdaki şekilde dondurulmuş zemindeki basınç dayanımı, bir karşılaştırmaya imkan vermek üzere Saf Buz ve Betonun basınç dayanımları ile birlikte verilmektedir [25].



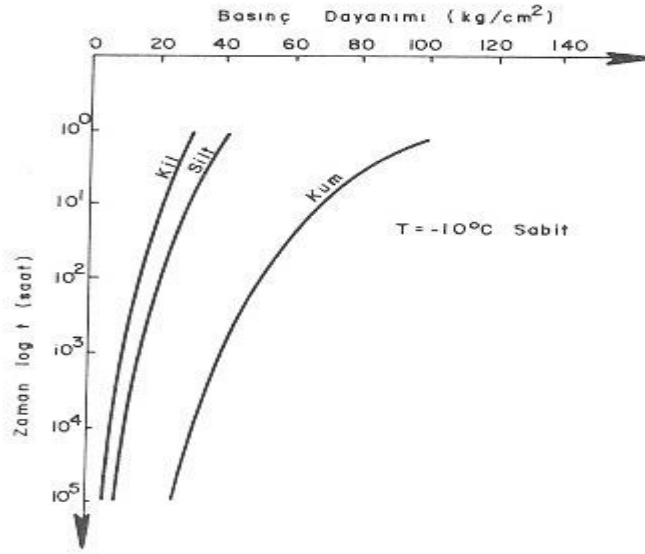
Şekil 6.9: Isı Derecesine Bağlı Basınç Dayanımı [25]

6.5.5 Dondurulmuş Zeminin Krip Davranışı

Şekil 6.10'da sabit bir ısı derecesinde dondurulmuş silt zeminin çeşitli basınç gerilmeleri altındaki deformasyon davranışı verilmektedir. Bu deneyler sırasında ısı derecesi sabit tutulmuştur. Küçük basınç gerilmeleri altında makul deformasyonlar gözlenmektedir. Basıncın belli bir değeri aşması veya kırılma deformasyonlarının aşılması durumunda, deformasyon eğrilerinde bir dönüm noktasına ulaşılmakta ve zemin kırılmaya başlamaktadır.



Şekil 6.10: Reolojik Davranış [25]



Şekil 6.11: Zamanla Mukavemetin Azalması [25]

6.5.6 Dondurulmuş Zemin Mukavemetinin Zamanla Değişimi

Zamanla basınç dayanımındaki düşme şekil 6.11’de, 3 değişik zemin cinsi için verilmektedir. Kil, silt ve kum zeminde deneyler sabit ısı derecesinde gerçekleştirilmiştir. Başlangıçtaki yüksek basınç dayanımları birkaç hafta içinde yarıya kadar düşebilmektedir. Dolayısı ile donmuş zeminin mukavemeti sadece zemin ve ısı derecesine değil, dondurulduktan sonra geçen süreyle de ilgilidir.

6.5.7 Tünel İnşaatında Dondurma Yönteminin Uygulanması ve Sonuçları

Yoğun yerleşim bölgelerinde açılan metro tünellerinde;

- 1) Donma sırasında zeminin kabarması
- 2) Tünel kazısı nedeni ile zeminin ferahlaması ve
- 3) Donun çözülmesi sırasındaki konsolidasyon

Nedeni ile yüzeyde, mevcut binalarda oluşacak deplasmanlar büyük önem taşımaktadır. Dondurulacak tünel, açılması sırasında yalnız tünel değil, yakın çevresindeki yapılarında dikkate alınması zorunludur [25].

6.5.8 Tünelcilikte Dondurma Yönteminin Avantajları

Yer altı su seviyesinin altında tünel açılmasında enjeksiyon ve basınçlı hava gibi yöntemlerin uygulanamadığı durumlarda da Dondurma Yöntemi başarı ile uygulanabilir.

Avantajları ise aşağıda belirtildiği gibidir:

- 1) Boşluk suyunun etkin olduğu zeminlerde etkili bir yöntemdir.
- 2) Tabakalanma ve geçirimliliğin değişiminden çok az etkilenir. Bu konu enjeksiyon uygulamalarında güçlükler neden olmaktadır.
- 3) İnce kum ve silt gibi enjeksiyon uygulamasının imkansız olan zeminlerde dondurma yöntemi uygulanabilir.
- 4) İşlem bittikten sonra zemin tekrar eski orijinal haline gelir.

6.6 Zeminin Enjeksiyonlanma ile İyileştirilmesi

Enjeksiyonlama, zemin veya kayaçtaki boşlukları ya da ve tünel kaplamaları arasındaki yapay boşluklara basınç altında, kimyasal ya da fiziksel olarak zamanla katılan bir sıvının enjekte edilmesi olarak tanımlanabilir [26]. Zemin enjeksiyonu, temel olarak akışkan malzemelerin basınç altında zemin içerisindeki boşluklara enjekte edilmesidir. Buradaki amaç zeminin ya da kaya kütlelerinin mühendislik özelliklerini iyileştirmektir. Nitekim bu iyileştirme zeminin gerilme-deformasyon ve dayanım gibi mekanik özellikleri ile geçirimlilik gibi hidrojeolojik özellikleri değiştirilerek elde edilir.

Tünelde enjeksiyonlama zemin ya da kayaçtaki boşlukları ve akış yollarını tıkayıp zemin suyunun bu boşluklardan tünel içine sızmasını engellemek ve tünelin zemin hareketlerinden etkilenmeden ilerleyebilmesi için zeminin tamamının dayanımını arttırmak ve tünel yapımının yüksek güvenlik içinde gelişmesini sağlamaktır. Dahası enjeksiyonlama yüzey oturumalarını engellemek ve yerleşim alanlarında bulunan yapıların alttan desteklenmesi tekniklerini sağlamak veya bu yapıları desteklemek için tünelcilikle birlikte kullanılır.

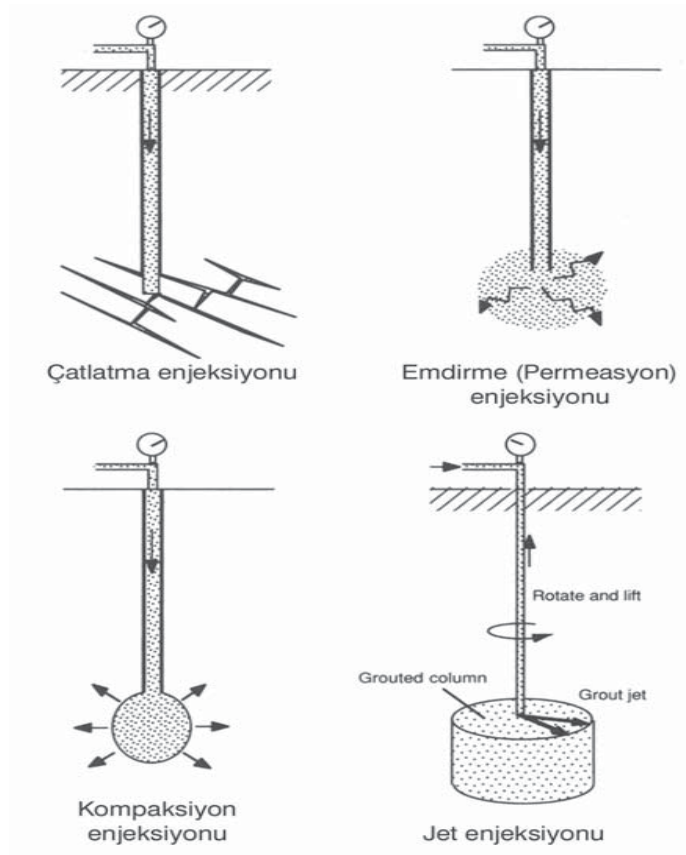
Enjeksiyon teknolojisinin kökeni diğer zemin iyileştirme teknikleri gibi eskiye dayanmakla beraber bu teknoloji hem yeni enjeksiyon malzemeleri hemde bu malzemelerin zemin içerisine nüfuz ettirilmesi bakımından sürekli bir gelişim içerisinde. Enjeksiyon tekniği, başlangıçta su sızıntılarını engellemek ve dayanım kontrolü için maden endüstrisinde ve baraj temellerinde sızdırmazlık perdesi oluşturulmasında uygulanmaya başlanmış, daha sonra inşaat mühendisliğinde de tünel kazımı esnasında zeminlerin ve parçalı kayaların stabilizasyonunda, sondaj ve numune alma esnasında su problemlerinin çözümünde, zemin içerisindeki boşlukların doldurularak aşırı oturmaların engellenmesinde, hem mevcut hemde yeni inşa edilecek yapıların zemin emniyet gerilmelerinin artırılmasında ve özellikle de son 10–15 yıllık bir süreç içerisinde tünel kazımı dolayısı ile yüzeydeki veya yakın çevredeki yapılarda meydana gelebilecek zararlı oturmaların engellenmesinde ve deprem esnasında sıvılaşabilecek gevşek, suya doymuş, granüler zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin azaltılmasında kullanılmıştır.

Burada dikkatle üzerinde durulması gereken nokta, bütün bu uygulamalar için aynı enjeksiyon malzemesinin ve enjeksiyon parametrelerinin kullanılmayacağıdır. Enjeksiyon malzemesi ve enjeksiyon parametreleri (enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, enjekte edilen hacim v.s.) zemin koşullarına (dane çapı dağılımı, relatif sıkılık, geostatik gerilmeler v.s.) ve uygulama amacına yönelik olarak tasarlanmalıdır.

6.6.1 Enjeksiyon Teknikleri

Enjeksiyon teknikleri enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine yerleştirilme biçimine bağlı olarak değişmektedir. Fakat enjeksiyon malzemesinin özelliğine bağlı olarak da (çimento enjesiyonu veya kimyasal enjeksiyon) bir ayrım yapılabilir.

Zemin içerisine yerleştirilmesine göre temel enjeksiyon teknikleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 6.12: Enjeksiyon Tekniklerinin Şematik Gösterimi [27]

6.6.2 Emdirme (Permeasyon) Enjeksiyonu

Bu enjeksiyon tekniğinde düşük viskoziteli enjeksiyon malzemesi, zemin içerisindeki boşluklara, düşük basınçlarda nüfuz etmekte dolayısı ile zeminin hacmi ve yapısında değişiklik meydana getirmemektedir. Zemin içerisine enjekte edilen malzeme zamanla sertleşmekte ve böylece zeminin mekanik ve hidrojeolojik özelliklerini değiştirmektedir.

Emdirme enjeksiyonunda hem süspansiyon türünde olan çimento şerbeti hem de koloit yapıdaki saf kimyasal çözeltiler kullanılabilir. Fakat zeminin geçirimliliği azaldıkça hem teknik hemde ekonomik zorluklar artmaktadır.

Tablo 6.2’de aşağıdaki faktörleri göz önüne alarak permeasyon enjeksiyonu için genel bir çerçeve oluşturmaktadır;

- Temel reolojik kategoriler ve enjeksiyon malzemesi türleri
- Enjekte edilecek zemine bağlı olarak uygulama alanları

- Geçirimsizlik katsayısı ve özgül dane yüzeyi cinsinden yaklaşık enjekte edilebilirlik sınırları
- Temel enjeksiyon teknikleri

Son yıllarda yeni çimento karışımları üzerinde çalışılmış ve normal Portland çimentoları ile permeasyon mümkün olmayan zeminler enjekte edilebilmeye başlanmıştır. Bu sayede daha ince daneli zeminlerinde iyileştirilebilmesi mümkün olmuş ve hem çevresel koruma hemde ekonomik açıdan olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6.2: Enjeksiyon Malzemelerinin Sınıflandırılması [28]

Reolojik Kategori	Partiküler Süspansiyonlar (Bingham Akışkanları)			Çözeltiler (Newton Akışkanları)			Gaz Emülsiyonları		
	Kararsız	Kararlı		Koloit Çözeltiler (Vizkozite zamanla artmakta)	Saf Çözeltiler (Vizkozite zamanla değişmemekte)				
Enjeksiyon Malzemelerinin Ana Türleri	Sadece çimento	Bentonit veya kil ile birlikte çimento	Topaklaşmamış bentonit	Kimyasal Enjeksiyon Malzemeleri			Şişebilen Enjeksiyon Malzemeleri		
				Sodyum Silikat bazlı		Organik Reçineler bazlı	Çimento bazlı	Organik Ürünler bazlı	
				Yüksek dayanımlı	Orta-Düşük dayanımlı				
Uygulama Alanları	Çatlaklı kaya ve duvar			Mikro fisürlü ve geçirimli kaya			Büyük boşluklar veya oyuklar	Boşluklar ve hızlı akan sızıntı suları	
		GRANÜLER ZEMİNLER							
		Çakıl	Kaba Kumlar	Orta-İnce Kum		İnce Siltli Kumlar (Kumlu Siltler)			
Geçirimsizlik Katsayısı, k, (m/s)		> 5.10 ⁻⁴	> 5.10 ⁻⁵	> 5.10 ⁻⁵	> 1.10 ⁻⁵	> 1.10 ⁻⁶			
Özgül Yüzey, S _{gs} , (m ² /N)		< 0.5	< 1.5	< 1.5	< 4	< 10			
Temel Enjeksiyon Tekniği	Yüksek Basınç	Kontrollü hacim ve basınç						Düşük basınç (Boşlukların doldurulması)	

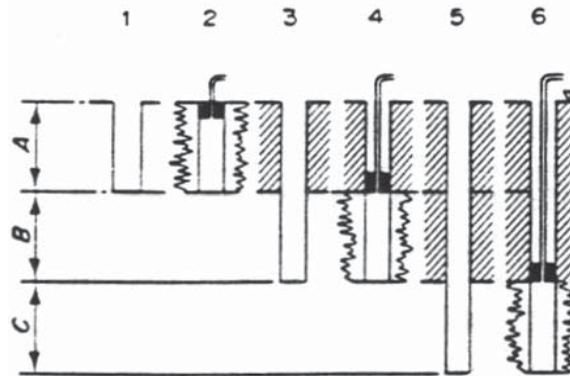
Yukarıda sözü edilen bu karışımlar çok ince daneli çimentolar (microfine cements) ve değişik katkı malzemeleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu sayede elde edilen karışımlar için segregasyon (karışım içerisindeki çimento veya katkı malzemesi danelerinin zamanla çökmesi ve karışım suyundan ayrılması) ve filtrasyon oranları (karışım içerisindeki danelerin zemin tanecikleri tarafından tutulması ve enjeksiyonun engellenmesi) çok daha az, vizkozite parametrelerinden olan akma değeri belli bir süre boyunca sabit ve daha düşük, uzun vadedeki dayanım daha yüksek ve geçirimsizlik daha azdır.

Silikat bazlı çözeltilerde de hem teknik hemde çevresel açıdan bakıldığında yüksek kararlılıkta ve kristal yapıda yeni tip karışımlar elde edilmiştir.

Son 10–15 yıllık literatür taraması yapıldığında enjeksiyon malzemelerin reolojik özellikleri (vizkozite ve zamanla değişimi, statik ve basınç altındaki segregasyon miktarı, filtrasyon oranı, ilk ve son priz zamanı), bu özelliklerin farklı dane çapı dağılımındaki zeminlere enjekte edilebilirliği nasıl etkilediği ve değişik pozolanik katkı maddelerinin bu özellikleri nasıl değiştirdiği hakkında bir çok çalışma olduğu görülecektir. Dolayısı ile kritik olan husus zeminin geoteknik özellikleri ile enjeksiyon malzemesinin reolojik özelliklerinin tam olarak belirlenmesi ve bu özelliklerin birbirleriyle uyumlu olarak biraraya getirilmesidir.

Yüzeysel derinliklerde enjeksiyon işlemi tek aşamada yapılabilir. Bu durumda enjeksiyon kuyusu tasarım derinliğine kadar açılır ve enjeksiyon borusu yardımı ile yukarıya doğru enjeksiyon işlemi gerçekleştirilir. Bu durum tasarım derinliğine kadar tekrar ettirilir.

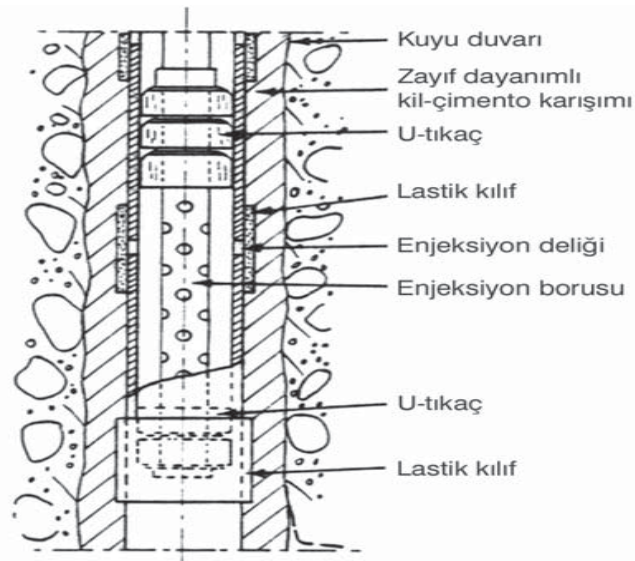
Kademeli enjeksiyon işlemi ise rölatif olarak yüksek enjeksiyon basınçlarının gerektiği daha derin zeminlerde ve daha efektif bir permeasyon için uygulanır. Burada enjeksiyon kuyusu belli bir derinliğe kadar açılır ve enjeksiyon yapılır. Enjeksiyon malzemesi sertleştikten sonra kuyu biraz daha derinleştirilir ve tekrar enjeksiyon yapılır. Kademeli enjeksiyon işi şekil 6.13’de görülmektedir. Kademeli enjeksiyon derinliğin artması, enjeksiyon basıncının arttırılmasını sağlar ve yüzeydeki sızıntıdan meydana gelebilecek enjeksiyon malzemesi kaybını engeller.



Şekil 6.13: Kademeli Enjeksiyon İşlemi [29]

Herhangi bir zemin enjeksiyonu uygulamasında ve özellikle tüneller için enjeksiyon işleminin enjekte edilen malzeme hacmi cinsinden zamana bağlı kontrolü büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla her ne kadar uzun zaman önce kullanılmaya başlansada Tube' a Manchette tipi enjeksiyon borusu hala en uygun sistem olarak görülmektedir.

Tube'a manchette, üzerinde yaklaşık 8 mm çaplı küçük deliklerin bulunduğu bölmelerden oluşan ve çapı 37,5 ve 62,5 mm arasında değişen çelik bir borudur. Delikli bölmeler yaklaşık 30 cm aralıklı olup tek yönlü vana gibi çalışan lastik kılıflarla kapatılmışlardır.

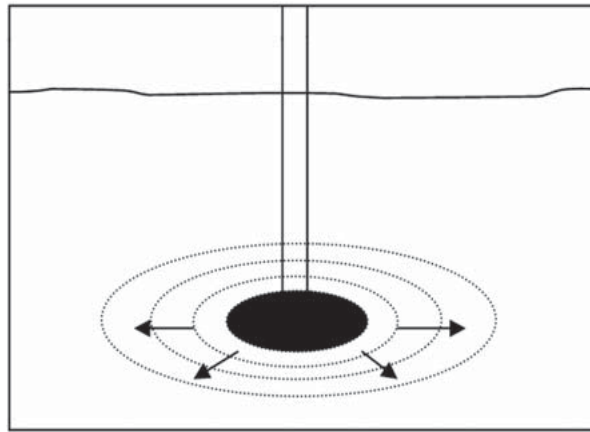


Şekil 6.14: Tube'a Manchette Sisteminin Detayı (Bell, 1993) [29]

Muhafaza borusu yardımı ile enjeksiyon kuyusu istenilen tasarım derinliğine kadar açıldıktan sonra tube'a manchette kuyu içerisine indirilir. Daha sonra muhafaza borusu yukarıya çekilir ve tube'a manchette ile kuyu duvarı arasındaki boşluk zayıf dayanımlı bir enjeksiyon malzemesi olan kil çimento veya bentonit karışımı ile doldurulur. Asıl enjeksiyon işlemi ise tube'a manchette içerisine uç kısmı delikli ve U-tıkaçlar ile kapalı olan küçük çaplı bir enjeksiyon borusu indirilerek gerçekleştirilir. Tıkaçlar tube'a manchette üzerindeki delikli bölmelerden herhangi biri üzerine merkezlenebilir. Enjeksiyon işleminin başlaması ile beraber lastik kılıf ve tube'a manchette ile kuyu duvarı arasındaki zayıf enjeksiyon malzemesi yırtılana kadar enjeksiyon basıncı artacaktır. Lastik kılıfların tek yönlü çalışması enjeksiyon malzemesinin tube'a manchette içerisine geri girmesini engelleyecek, tube'a

Tube'a mançette kullanımı, aynı enjeksiyon deliğinden birden fazla enjeksiyonun değişik enjeksiyon malzemeleri ile yapılabilmesini sağlamaktadır. Fakat yoğun şehir merkezlerinde veya çalışma alanı yetersizliğinde tube'a mançette sisteminin yer yüzeyinden, kuyulardan ve tünel yüzeylerinden kurulması uygun olmayabilir. Bu durumlarda tube'a mançette sisteminin yeni geliştirilen yatay yönlü foraj sistemi ile yerleştirilmesi söz konusudur.

1980 yılında toplanan ASCE Enjeksiyon komitesi, kompaksiyon enjeksiyonunu 25 mm'den daha az çökme değeri olan, yeterli plastisiteyi sağlayacak kadar silt ve içsel sürtünmeyi sağlayacak kadar da kum içeren katı enjeksiyon malzemesinin, zemin boşlukları içerisine girmeksizin enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen bir kütle oluşturacak ve bu sayede etrafındaki gevşek zeminleri sıkıştıracak şekilde yüksek basınçlarda enjekte edilmesi olarak tanımlamıştır. Kompaksiyon enjeksiyonu şekil 6.15'de gösterilmiştir.

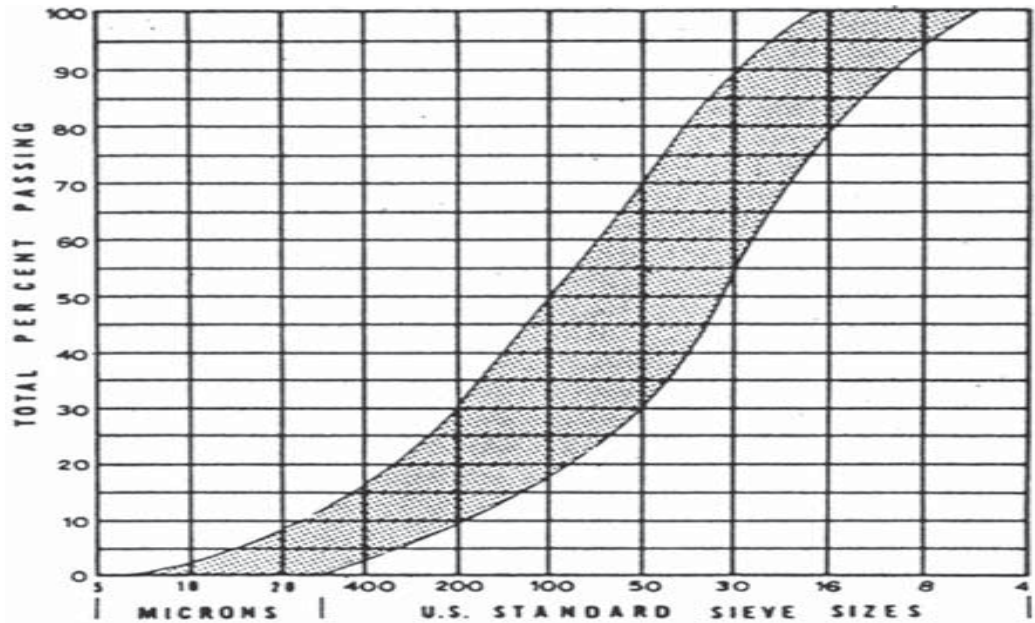


50 yıl kadar önce ABD’de uygulanmaya başlayan yöntem, çoğunlukla zayıf ve yumuşak zeminlerin sıkıştırılmasında, temel ve döşemelerin alttan desteklenmesinde, yapı oturmalarının kontrol edilmesinde, farklı oturmalar gösteren yapı temellerinin rehabilitasyonunda ve tekrar eski seviyelerine yükseltilmesinde kullanılmıştır.

Kompaksiyon enjeksiyonu ile perameasyon enjeksiyonu arasında hem enjeksiyon parametreleri hem de uygulanabilecek zeminler arasında büyük farklar vardır. Kompaksiyon enjeksiyonunda çok katı bir enjeksiyon malzemesi ve çok yüksek basınçlar (3.5 Mpa'a kadar) gerekmektedir. Dolayısı ile zeminin orijinal yapısı bozulmakta ve bu sayede radyal olarak sıkıştırılabilmektedir. Ayrıca kompaksiyon enjeksiyonu tüm zeminlerde uygulanabilirken, permeasyon enjeksiyonunun uygulanabilirliği, burada zemin içerisindeki boşluklara nüfuz etme söz konusu olduğunda, hem zeminin dane çapı dağılımı hemde enjeksiyon malzemesinin dane çapı dağılımı tarafından belirlenmektedir.

Kompaksiyon enjeksiyonunun başarılı sonuçlar vermesi enjeksiyon malzemesinin katı ve yüksek viskozitede olmasına bağlıdır. Bu yüzden karışımlarda plastisiteyi gereğinden fazla arttıracak silt ve gereğinden fazla mobilite sağlayacak bentonitin kullanılmaması öngörülmektedir. Karışımında kullanılacak kum için de tercih edilen dane çapı dağılım aralığı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6.3: Kompaksiyon Enjeksiyonu Karışımındaki Kum İçin Öngörülen Dane Çapı Dağılım Aralığı [30]



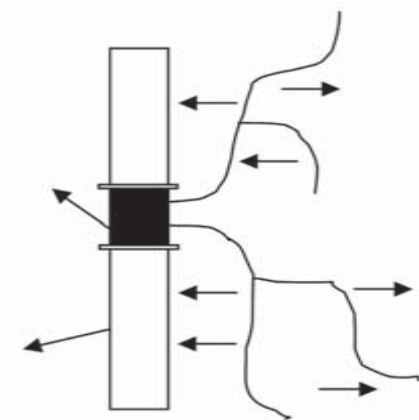
Kompaksiyon enjeksiyonunda son 10 yıllık bir süreç içerisinde sıvılaşmayı önleyici bir teknik olarak kullanılmaya başlandığında görmekteyiz. Gerçekten Boulanger ve Hayden (1995) kompaksiyon enjeksiyonunun sıvılaşmayı engellemek için kullanıldığı geniş bir vaka analizleri özeti hazırlamışlardır. Yapılan araştırmalarda

bu enjeksiyon tekniğinin siltli kumlarla siltli zeminlerin SPT ve CPT direnç değerlerini önemli ölçüde arttırdığı belirtilmiştir [31]. Fakat şu da unutulmamalıdır ki kompaksiyon enjeksiyonu sonucu zemin içerisinde oluşturulan kütlenin uzun vadede de yeterli dayanımda olması gerekir. Ayrıca bu tekniğin çok yumuşak killerde uygulanması ekstra boşluk suyu basınçları oluşturacak buda uzun vadede oturmalara yol açacaktır. Dolayısı ile bu hususların uygulama öncesinde enjeksiyon parametreleri ve enjeksiyon malzemelerinin tasarımı esnasında göz öünde bulundurulması gerekir.

6.6.4 Çatlatma Enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonu Avrupada ortaya çıkmakla beraber diğer enjeksiyon tekniklerinden daha yeni bir yöntemdir. Burada zeminin kontrollü bir şekilde, kararlı fakat düşük vizkoziteli çimento enjeksiyonu ile yüksek basınçlarda çatlatılması söz konusudur. Bu yöntem temel olarak permeasyon enjeksiyonunun mümkün olmadığı düşük geçirimliliğe sahip, ince daneli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmaktadır. Çatlatma enjeksiyonunun gelişim tünel veya kazı aktiviteleri esnasında meydana gelen oturmaları önleme çalışmalarına dayanmaktadır.

Çatlatma enjeksiyonu sonucunda zemin içerisinde ağaç dallarına benzer bir şekilde sertleşmiş çimento kanalları oluşmakta ve bu sayede zemin kontrollü bir şekilde ve bölgesel olarak sıkıştırılmaktadır. Çatlatma enjeksiyonunun şemtik gösterimi Şekil 6.16'da gösterilmiştir.



Şekil 6.16: Düşey Yönde Çatlakların Oluşumu ve Yatay Sıkıştırma [27]

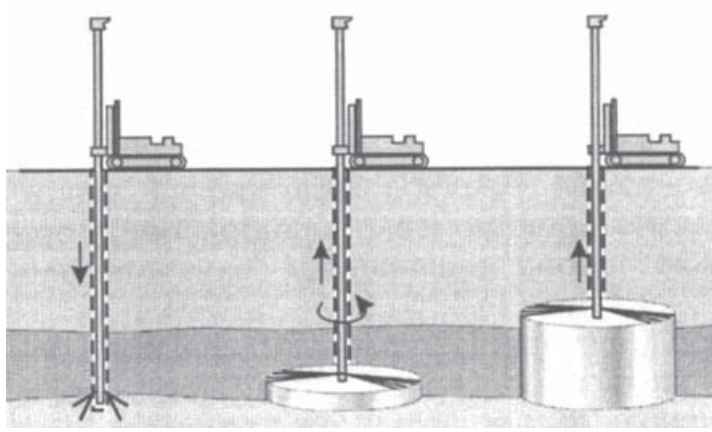
Çimento şerbeti başlangıçta yüksek basınçlarda enjekte edilmekte ve zeminin çatlaması ile beraber oluşan çatlaklar çimento ile doldurulmaktadır. Oluşan çatlakların boyu, genişliği ve hacmi enjeksiyon basıncına ve mevcut geostatik gerilmelere bağlıdır. Teorik olarak bakacak olursak, normal konsolide homojen bir zemin içerisinde meydana gelebilecek ilk çatlaklar düşey doğrultuda olacak, bu sayede yatay gerilmeleri arttıracak ve zemini sıkıştıracaktır (Raabe ve Esters, 1990) [32]. Eğer tube'a manchette sistemi ile aynı noktadan birden fazla enjeksiyon işlemi tekrarlanacak olursa asal gerilmelerin doğrultuları değişecek ve yatay yönde çatlaklar meydana gelmeye başlayacaktır. Buda sonuç olarak (bazen ani bir şekilde) yer yüzeyinde ya da üst yapılarda kabarmaya neden olacaktır. Fakat pratikte, meydana gelecek çatlakların yönü zemin içerisinde mevcut çatlaklara, zayıf bölgelere veya fisürlere bağlı olarak değişmektedir [33].

Bu tip enjeksiyon türünün uygulanmasında da tube'a manchette kullanılmakta ve örneğin tünel kazımı esnasında meydana gelen oturmalara bağlı olarak aynı noktadan birden fazla gerektiğinde farklı enjeksiyon malzemeleri ile enjeksiyon yapılabilmektedir.

Literatürdeki vaka analizleri incelendiğinde çatlatma enjeksiyonunda kullanılan çimento şerbetinin su/çimento oranlarının nispeten daha yüksek olduğu ve karışıma mobilite vermek için başta bentonit olmak üzere değişik katkı malzemelerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu açıdan kompaksiyon enjeksiyonundan ayrılmaktadır.

6.6.5 Jet Enjeksiyonu

Bu enjeksiyon türünde tasarım derinliğine kadar, su kullanılarak delgi yapılmakta ve delgi için kullanılan tijlerin ucundaki nozzlelerden yüksek basınçlarda çimento şerbeti zemine jetlenmektedir. Bu jetlenme esnasında tijlerde belirli bir hızla döndürülmekte ve yine belirli bir hızla da zemin içerisinde aşağıdan yukarıya doğru çekilmektedir. Böyle, belirli çapta ve boyda zemin içinde silindirik bir kolon oluşturulmaktadır. Jet enjeksiyon işlemi şekil 6.17'de gösterilmiştir.



Şekil 6.17: Jet Enjeksiyonu İşlemi

Jetleme esnasında kolon çapını arttırabilmek için çimento jeti yanında hava ve su jetleride kullanılabilir. Buradaki mekanizmadan anlaşılabilir gibi jet enjeksiyonu aslında bir enjeksiyon tekniği değil bir karıştırma yöntemidir. Sonuçta zemin içerisinde beton zemin karışımı yüksek dayanımlı ve geçirimsizliği düşük kolonlar elde edilmektedir. Bu yönüyle jet enjeksiyonu diğer enjeksiyon diğer enjeksiyon türlerinden kesin olarak ayrılmaktadır.

Jet enjeksiyonu sonucu zemin içerisinde oluşturulan kolonlar, temeller, döşemeler ve dolgular altında taşıma gücü ve oturma kontrolü için kullanılabilir gibi yumuşak zeminlerde açılan tünellerde tünel kesiti üzerinde taşıyıcı şemsiye, yine yumuşak killerdeki derin kazılarda kazı tabanı altında payanda elemanı olarakda kullanılabilir. Ayrıca Durgunoğlu (2004) bu enjeksiyon tekniğinin sıvılaşma riskini azaltılması amacı ile kullanımına ait bir metodoloji ve tasarım yöntemide göstermiştir [34].

Ülkemizde de yaygın olarak kullanılan jet enjeksiyonunun, bir zemin iyileştirme tekniği olarak dünyanın birçok bölgesinde, özellikle de Japonya, Avrupa ve ABD 'de uygulanıyor olmasına rağmen halen bir tasarım standardı bulunmamaktadır.

Uygulamanın maliyeti, jet enjeksiyonun devam eden gelişimini kısmen düşürmüştür. Fakat Japonya'da çok yüksek çapta (5 m'ye kadar) kolonlar oluşturulabilme metodu geliştirilmiş ve bu sayede enjeksiyon noktalarının sayısı azaltılarak maliyet düşürülmüştür. Bu teknoloji Japonya ve ABD Superjet Enjeksiyonu Şekil 6.18 Avrupada ise Soilcrete-DS (Toprakarme) Enjeksiyonu olarak bilinmektedir.



Şekil 6.18: Süper Jet Kolonlar

6.7 Enjeksiyon Sistemlerinin Tasarımı

Aşağıdaki faktörler enjeksiyonlamanın fizibilitesini ve araştırmanın bazı aşamalarını etkiler:

- 1) Sondaj yapmak, numune almak, piyozemetrik ölçüm ve yerinde deneylerle hidrojeolojik ve geoteknik araştırmalar yapmak.
- 2) Dane boyutu dağılımı gibi enjeksiyonlanabilmeyi etkileyecek zemin özelliklerinin laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi
- 3) En uygun enjeksiyon tipinin seçimi ve onunu özellikleri için laboratuvar deneyleri yapmak
- 4) Eğer gerekirse yerinde enjeksiyonlama deneyleri yapmak

Enjeksiyon balonunun zeminde dağılımı ile ilgili eşitlikler, homojen bir zeminde, enjeksiyonun boru ucundan itibaren enjeksiyonlanmış bir zemin balonu oluşturmak için radyal bir şekilde dışa doru yayılacağı kabulü ile ortaya konulmuştur [35].

Enjeksiyon akış hızı (Q), enjeksiyon ilerleme mesafesi ve zemin geçirgenliği ile ilgilidir. Aşağıdaki eşitlik teorik ideal koşullarda enjeksiyonun boru ucunda. Geçirgen bir ortama doğru akış hızının genel durumunu göstermektedir;

$$Q = 4 \pi k h / [N/r_0 - (N-1)/r] \quad (6.3)$$

Burada:

Q: Enjeksiyon akış hızı

k: Zeminin geçirgenliği

h: Enjeksiyon ilerleme mesafesi

N: Enjeksiyon viskozitesinin suyunkine oranı

r: Enjeksiyon balonu yarıçapı

r_0 : Enjeksiyon borusu yarıçapı

Eğer enjeksiyonun viskozitesi saf suyunkine eşitse ($N=1$) yukarıdaki eşitlik aşağıdaki şekle dönüşür:

$$Q = 4 \pi k h r_0 \quad (6.4)$$

Hacimsel akış hızı (Q), r yarıçaplı dairesel zemin hacminde birim zamanda dolan boşluk hacmini temsil eder.

$$Q = n V/t \quad (6.5)$$

$$Q = 4 \pi n r^3 / 3t \quad (6.6)$$

Buradan, n: Zemin porozitesi

t: Zaman

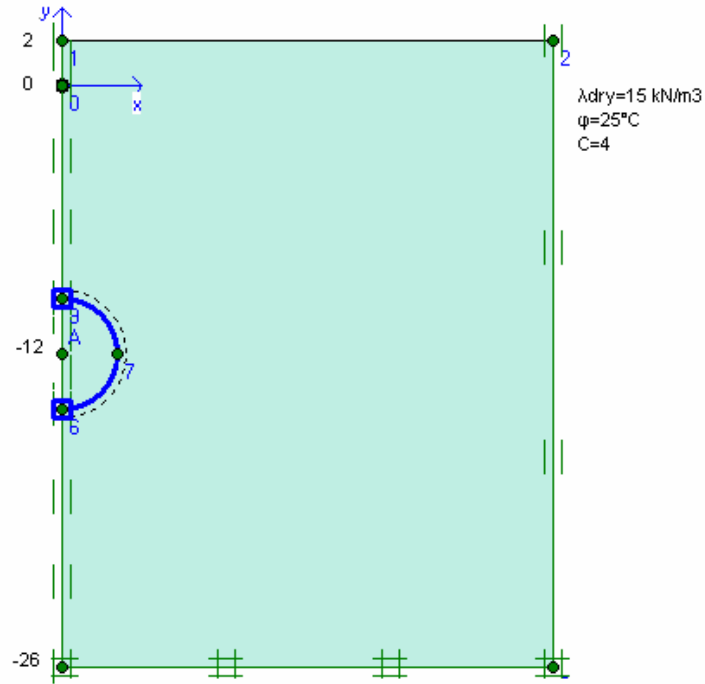
V: Zemin Hacmi

$$r = [3 k h t / n. \{n/ r_0 - (n -1)/ r \}]^{1/3} \quad (6.7)$$

7. PLAXIS SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE UYGULAMALAR

7.1 Kil Zemin İçinde NATM Yöntemi ile İnşa Edilmiş Olan Tünel Uygulaması

Bu örnekte kil yoğunluklu zeminin içine 2,5 metre yarıçapında tünel yerleştirilmesi öngörülmüştür. Problemin geometrisi Şekil 7.1’de gösterildiği gibidir.



Şekil 7.1: Problem Geometrisi

Zemin ve Tünel kaplaması ile ilgili parametreler aşağıdaki Tablo 7.1 ve 7.2’de gösterilmiştir.

Tablo 7.1: Zemin Parametreleri

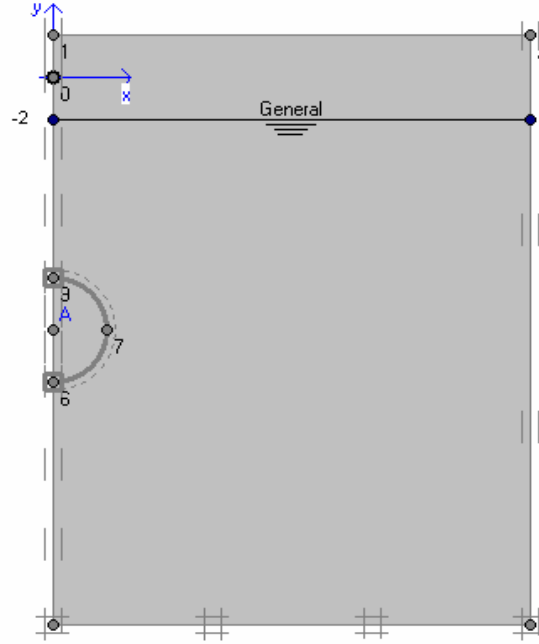
Parametre	Ad	Kil Tabakası
Malzeme Modeli	Model	MC
Malzeme Davranışı	Type	Drained
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	λ_{dry}	15
Islak Birim Hacim Ağırlığı	λ_{wet}	18
Yatay Geçirimsizlik	Kx	0,01
Düşey Geçirimsizlik	Ky	0,01
Young Modülü	E_{ref}	9500
Poisson Oranı	ν	0,33
Kohezyon	C_{ref}	4
Kayma Açısı	ϕ	25
Genleşme Açısı	ψ	0
Arayüzey Dayanımı	R_{int}	0,7
Arayüzey Geçirimsizliği	Perm	imperme

Tablo 7.2: Tünel Kaplaması Parametreleri

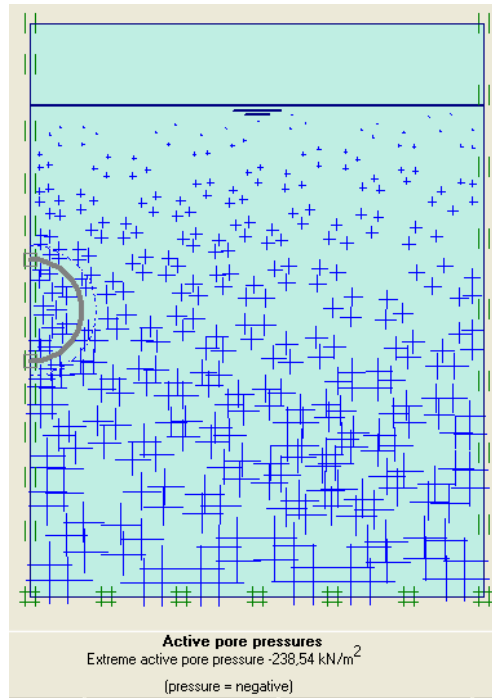
Parametre	Ad	Değer	Birim
Malzeme Davranışı	Malzeme Tipi	Elastic	
Elastik Rijitliği	EA	14000000	kN/m
Eğilme Rijitliği	EI	143000	kNm ² /m
Kalınlık	d	0,35	m
Ağırlık	w	8,4	kN/m/m
Poisson Oranı	ν	0,15	-

Bu örnekte kullanılmış olan tünel kaplaması parametre değerleri bundan sonra yapılmış olan bütün uygulamalarda aynı kabul edilmiştir. Bu malzeme özellikleri problemin geometrisi tanımlandıktan sonra “material sets” bölümünden programa girilir ve daha sonra sürükleyip bırakma işlemi ile zemin ve kaplamanın programa girilen parametre değerlerini alması sağlanır. Aşağıdaki Şekil 7.2’de zemin su seviyesinin -2 kotunda olduğu görülmektedir. Su seviyesi başlangıç koşullarında tariflenir. Daha sonra Şekil 7.3 de zemin suyu yüzünden oluşan boşluk suyu basıncı görülmektedir. Başlangıç koşulları geometrisi oluştururken tünelin başlangıçta olmadığını varsayarız ve bu yüzden programda başlangıç koşulları modunda Şekil 7.4’de görüldüğü üzere tüneli

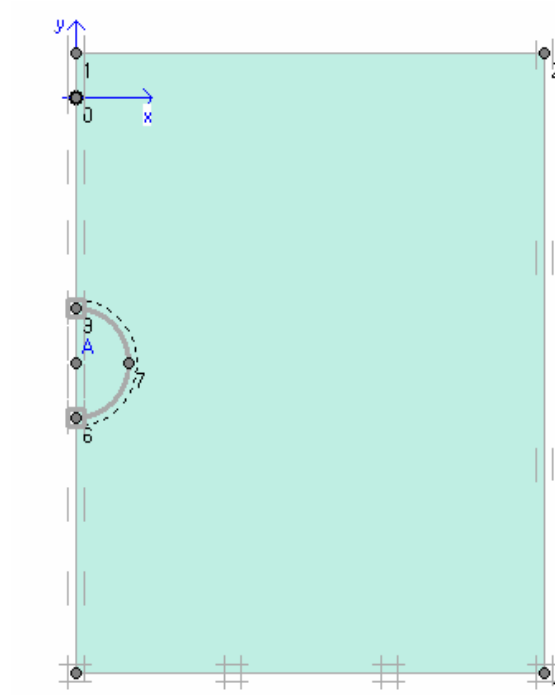
deaktive ederiz ve daha sonra Şekil 7.5’de gösterildiği gibi efektif gerilmeleri oluştururuz.



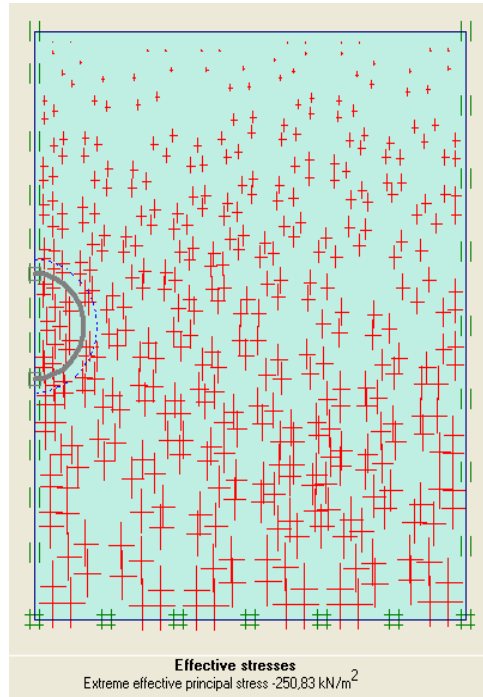
Şekil 7.2: Yeraltı Su Seviyesi



Şekil 7.3: Zeminde Oluşan Boşluk Suyu Basıncı

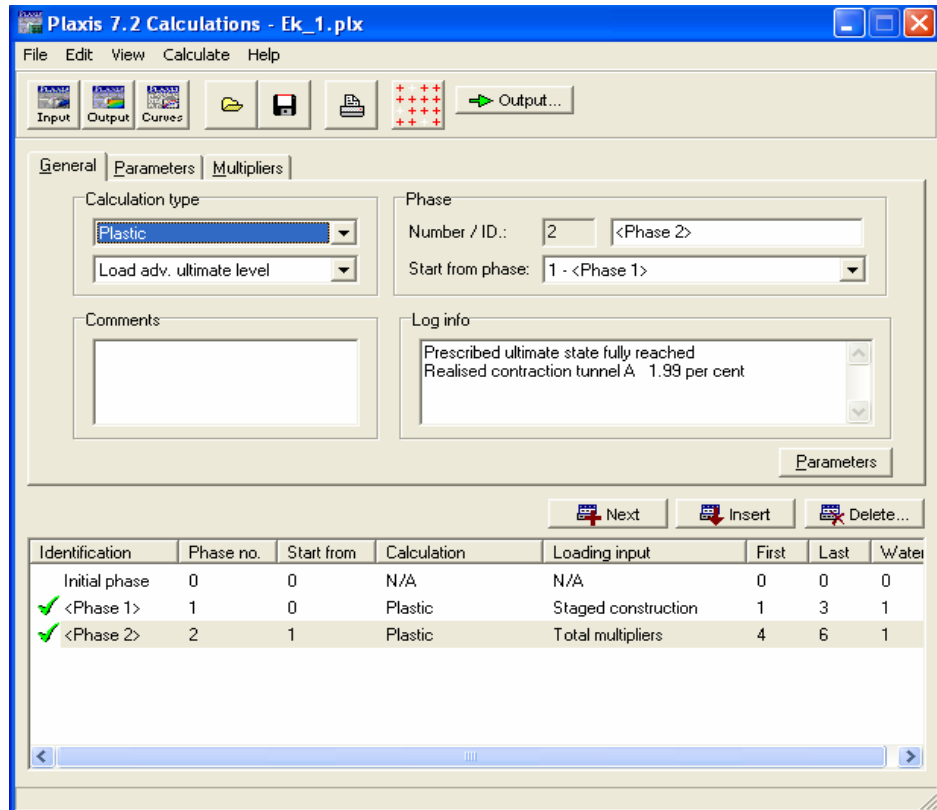


Şekil 7.4: Başlangıç Koşulları Geometrisi

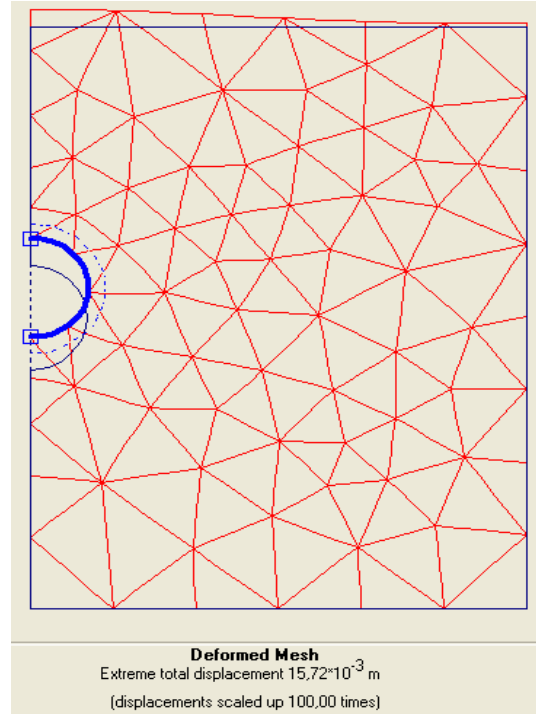


Şekil 7.5:Efektif Gerilmeler

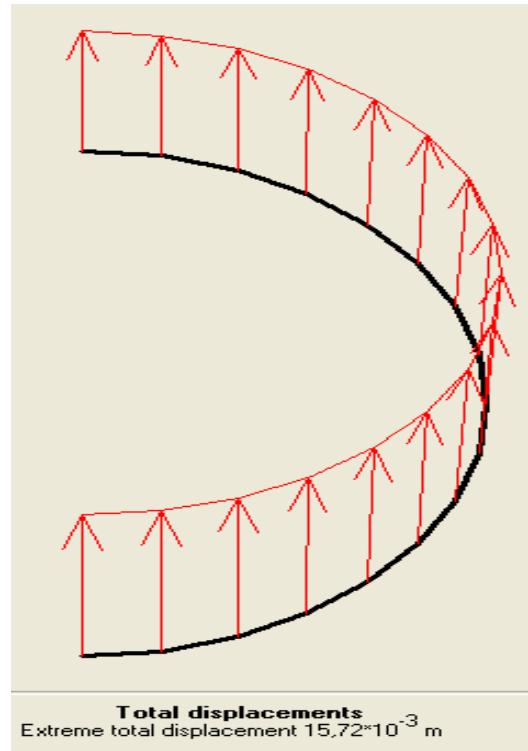
Bu aşamadan sonra hesap kısmına geçilir. Bu örnekte hesap 2 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada tünelin kazıldığı, kaplamanın aktif hale geldiği ve tünelin içindeki suyun boşaltıldığı tariflenmiştir. İkinci aşamada tünel kazılmasından dolayı oluşan hacim kaybını programda simule etmek için tünele %2 oranında büzülme değeri verilmiştir. Şekil 7.6'da hesap aşamaları gösterilmiştir. 1. hesap aşamasında zemin yüzeyinde oluşan deformasyon Şekil 7.7'de görüldüğü gibidir. Yalnız bu deformasyon değeri problemin sonucunda meydana gelen deformasyonu değeri değildir. Bu aşamayı göstermemizin nedeni ikinci aşamada meydana gelecek olan kemerlenmeyi anlatmak burulma momenti ve eksenel kuvvetlerde meydana gelen değişimleri göstermektir. 1. hesap aşaması için burulma momenti ve eksenel kuvvetlerin değerleri Şekil 7.9 ve 7.10'da gösterilmiştir.



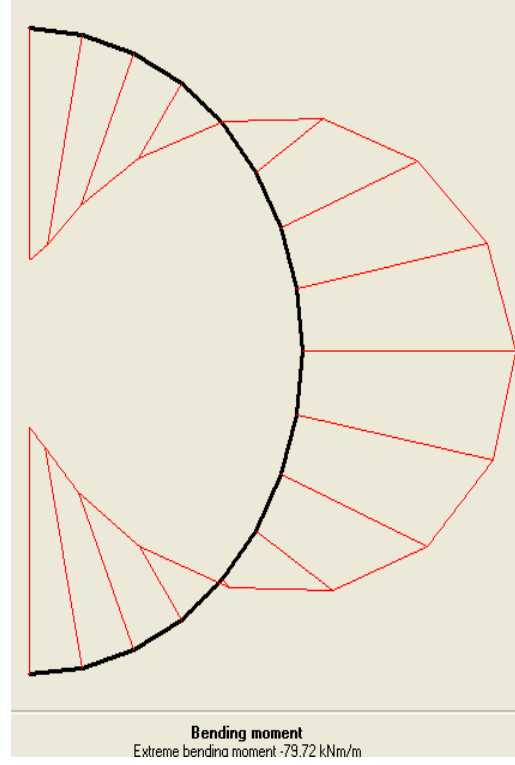
Şekil 7.6: Hesap Aşamaları



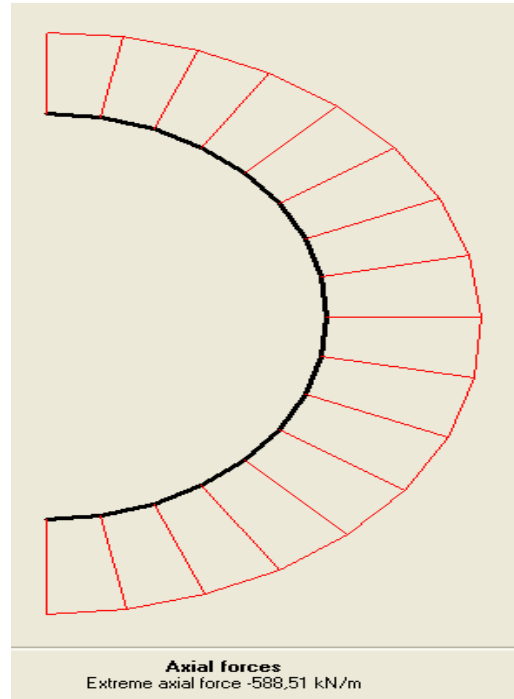
Şekil 7.7: Zemin Yüzeyinde Meydana Gelen Deformasyon



Şekil 7.8: Tünel Kaplamasında Meydana Deformasyon

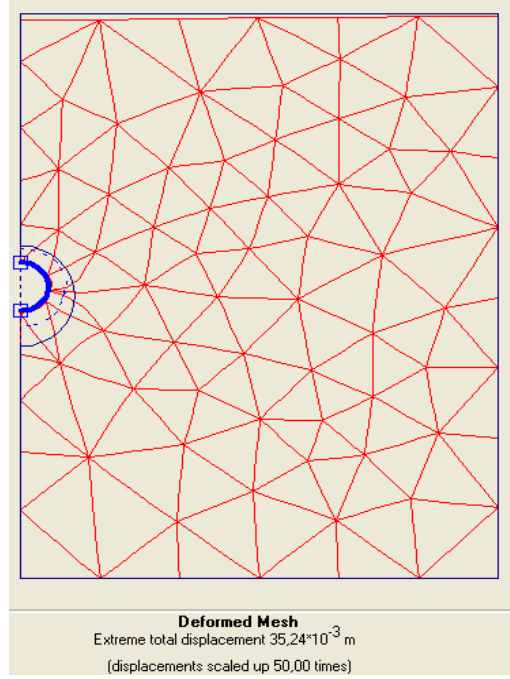


Şekil 7.9: Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Burulma Momenti

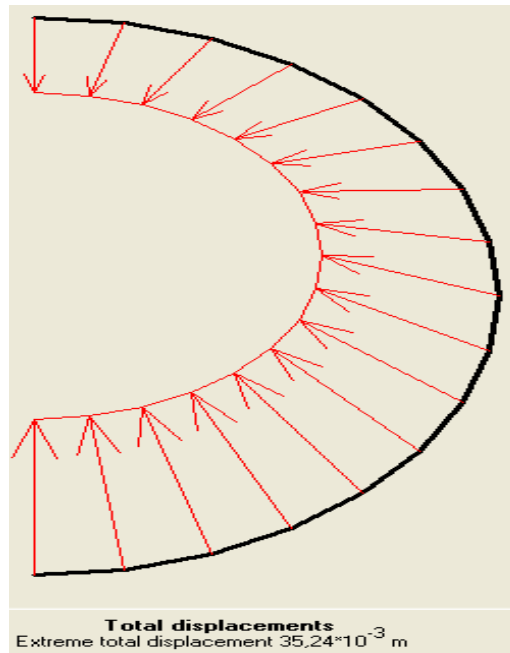


Şekil 7.10: Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Eksenel Kuvvet

İkinci hesap aşamasında problemin tanımlanması tamamlandıktan sonra zemin yüzeyinde ve tünel kaplamasında meydana gelen deformasyon değeri şekil 7.11 ve 7.12’de gösterilmiştir. Zemin yüzeyinde meydana gelen deformasyon değeri 35,24 mm’dir.

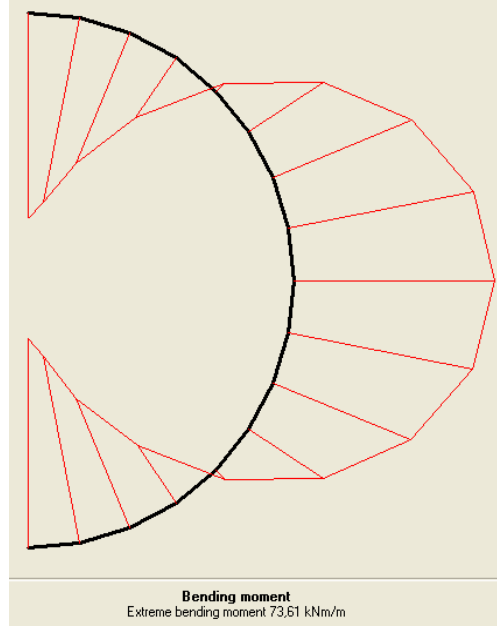


Şekil 7.11: 2. Hesap Aşamasında Zemin Yüzeyinde Meydana Gelen Deformasyon

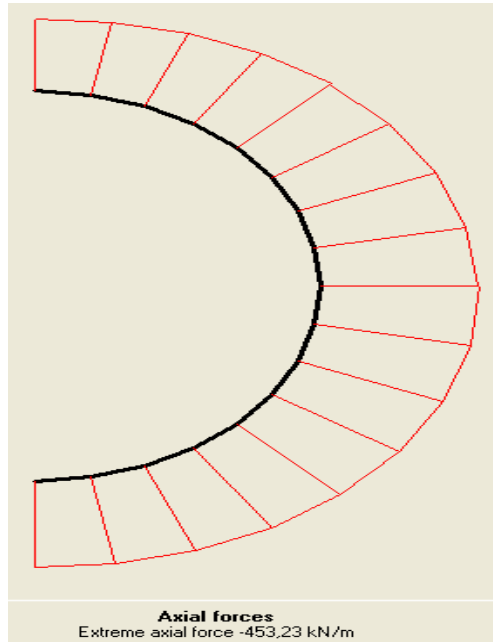


Şekil 7.12: 2. Hesap Aşamasında Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Deformasyon

Şekil 7.13 ve 7.14’de burulma momentlerinde ve eksenel kuvvetde meydana gelen değişimler görülmektedir. Bu değişimin sebebi oluşan kemerlenmeden kaynaklanmaktadır.



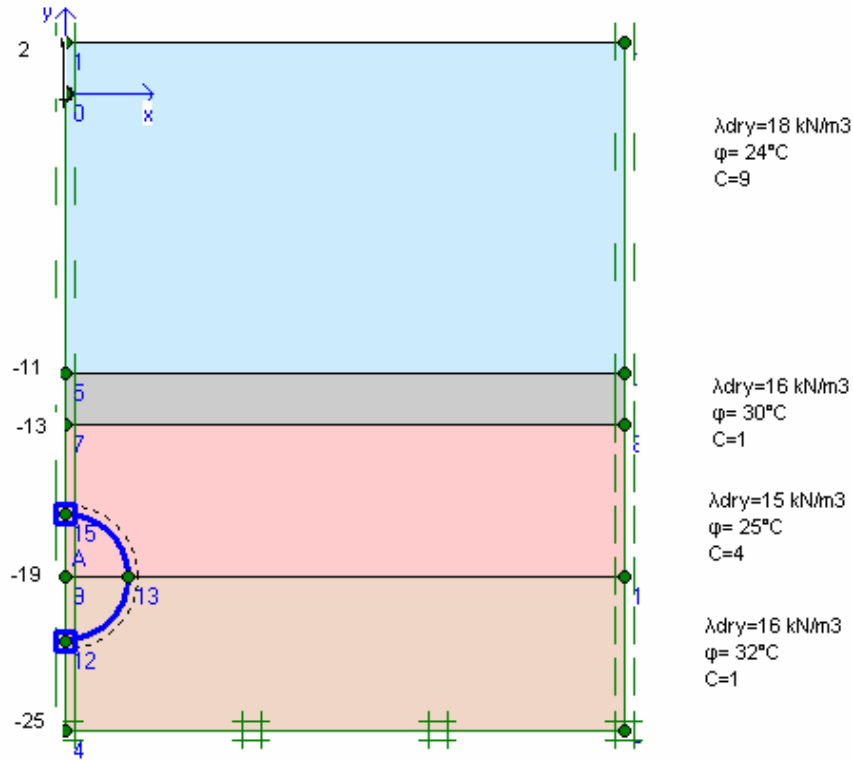
Şekil 7.13: 2.Hesap Aşamasında Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Burulma Momenti



Şekil 7.14: 2. Hesap Aşamasında Zemin Kaplamasında Meydana Gelen Eksenel Kuvvet

7.2 NATM Tünel İnşa Yöntemi ile Yapılmış olan Tünel

Aşağıdaki şekilde tünelin geçtiği bölgenin geometrisi görülmektedir. Plaxisde ilk olarak analiz edilecek durumun geometrisi oluşturulur. Zemin yüzeyi 0 kotundan 2 metre yukarıda bulunmaktadır. Zemin yüzeyinden 13 (-11.00 kotuna kadar) metre aşağıya kadar 1. kil tabakası, -11.00 ile -13.00 arası 1. kum tabakası, -13.00'den -19.00'a kadar ikinci kil tabakası ve son olarak -19.00'dan -25.00'e kadar 2. kum tabakası yer almaktadır. Profilde yer alan zeminlerin parametrelerini Şekil 7.15'de görebilirsiniz. Zeminlerin parametreleri Tablo 7.3'de görülmektedir.



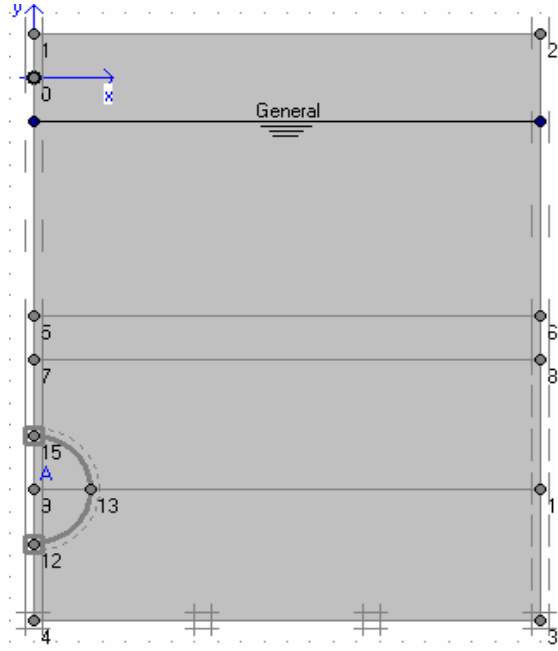
Şekil 7.15: Problem Geometrisi

Tablo 7.3: Zeminlerin Parametreleri

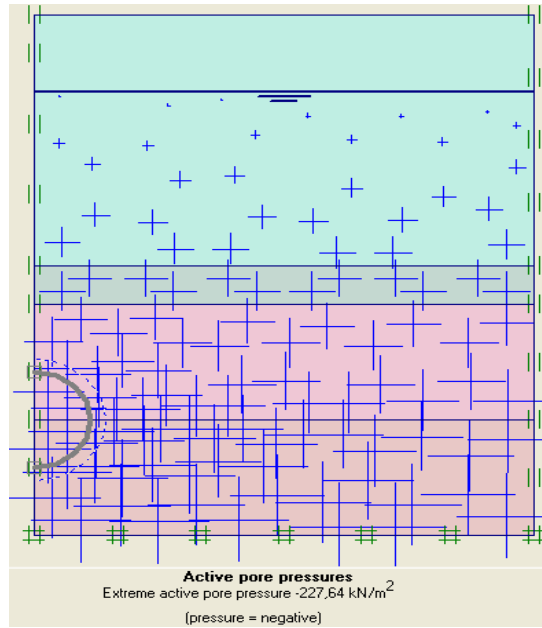
Parametre	Ad	1. Kil Tabakası	1.Kum Tabakası	2.Kil Tabakası	2.Kum Tabakası	Birim
Malzeme Modeli	Model	MC	MC	MC	MC	-
Malzeme Davranışı	Type	Drained	Drained	Drained	Drained	-
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	λ_{dry}	18	16	15	16	kN/m ³
Islak Birim Hacim Ağırlığı	λ_{wet}	20	19	18	20	kN/m ³
Yatay Geçirimsizlik	Kx	0,0001	1	0,01	0,5	m/day
Düşey Geçirimsizlik	Ky	0,0001	1	0,01	0,5	m/day
Young Modülü	E _{ref}	10000	60000	9500	115000	kN/m ²
Poisson Oranı	ν	0,3	0,3	0,33	0,3	
Kohezyon	C _{ref}	9	1	4	1	kN/m ²
Kayma Açısı	ϕ	24	30	25	32	o
Genleşme Açısı	ψ	0	1	0	3	o
Arayüzey Dayanımı	R _{int}	rigid	rigid	0,7	0,7	-
Arayüzey Geçirimsizliği	Perm	neutral	neutral	imperm	imperm	-

Bu zemin parametreleri ilk örnekte de söylediğimiz gibi Plaxis programında malzeme özellikleri kısmında tanımlandıktan sonra ilgili alanlara sürüklenerek bırakılır ve böylelikle zemin ve yapı elemanları tanımlanan özellikleri alır. Bundan sonraki bütün örneklerde de aynı zemin parametreleri dikkate alınmıştır.

Daha sonra zeminde suyun hangi seviyede olduğu başlangıç koşullarında belirtilir ve boşluk suyu basıncı oluşturulur. Zemin su seviyesi Şekil 7.16’de ve boşluk suyu basıncı Şekil 7.17’de gösterilmiştir.

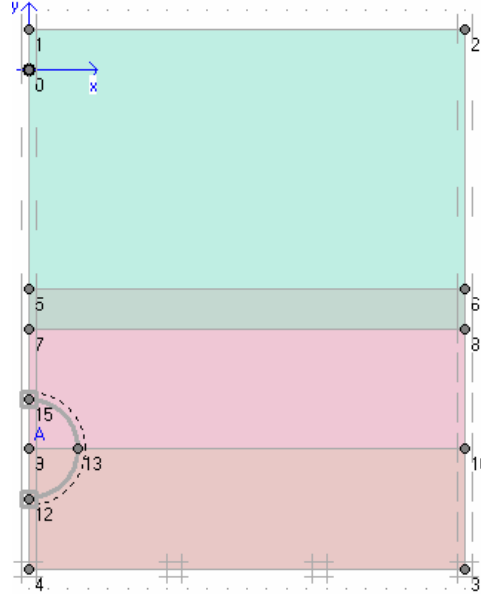


Şekil 7.16: Zemin Su Seviyesi

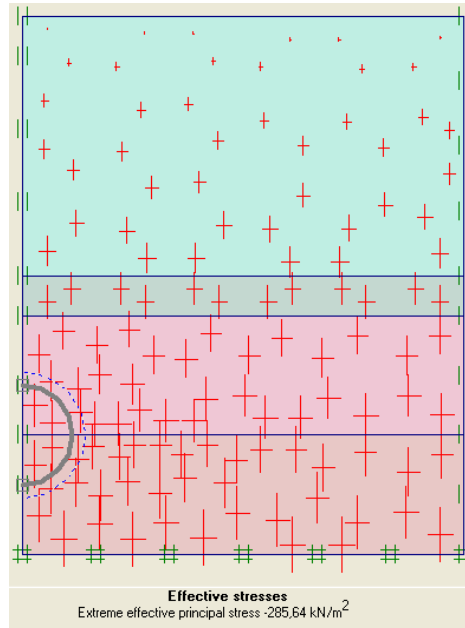


Şekil 7.17: Zeminde Oluşan Boşluk Suyu Basıncı

Başlangıç koşullarını oluştururken programın geometri sayfasına geçince başlangıçta tünelin var olmadığını düşünerek tünel kaplamasını Şekil 7.18 görüldüğü gibi deaktif ederiz ve bu şekilde efektif gerilmeleri oluştururuz. Oluşan efektif gerilmeler Şekil 7.19’da gösterilmiştir.



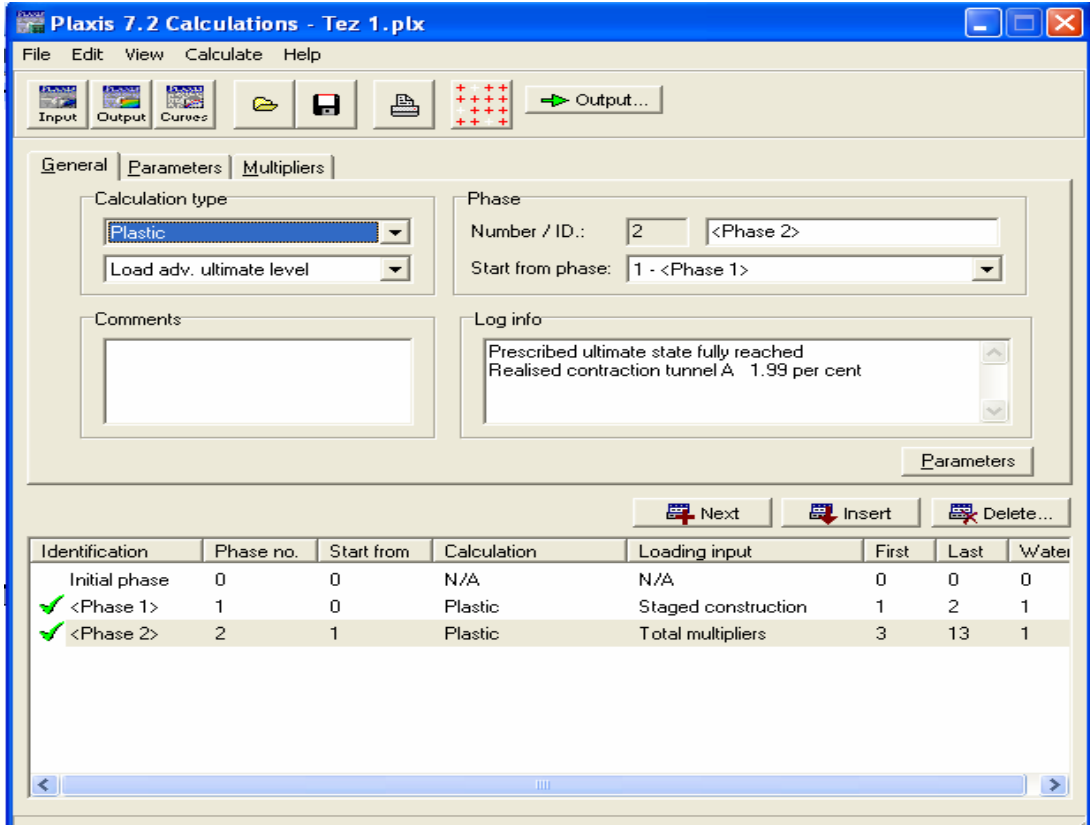
Şekil 7.18: Başlangıç Koşullarında Tünel Kaplamasının Deaktive Edilmesi



Şekil 7.19: Efektif Gerilmeler

Bu aşamada tamamlandıktan sonra hesap aşamasına geçilir. Hesap aşamaları Şekil 7.20’de gösterilmiştir. Hesap ilk örneğimizdeki gibi 2 aşamadan oluşmaktadır. 1. hesap aşaması; geometri modelinde tünelin kazılması ve tünel kaplamasının aktive edilmesinden ve tünelin içindeki suyun boşaltılmasından oluşmaktadır. 2. hesap

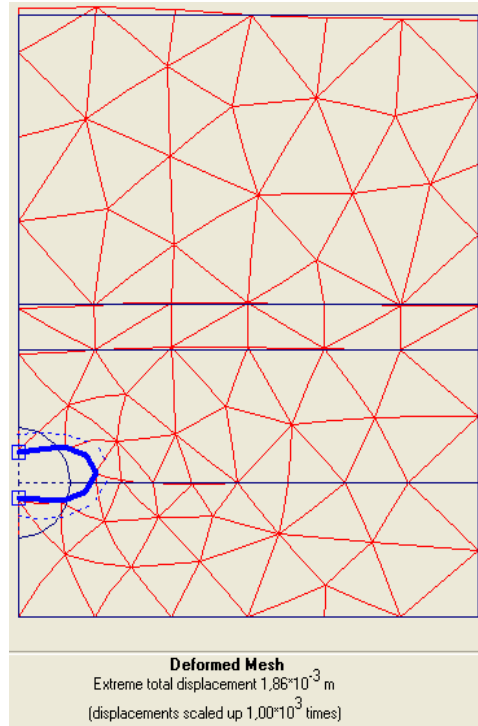
aşamasında ise tünel imalatından dolayı oluşan hacim kaybını, tünel kaplamasına bir büzülme oranı vererek simüle edilmektedir. Bu da hesap aşamasında parametreler sayfasında total multiplier seçeneği seçilip tanımlama kısmında Σ -Contra A değeri 2 girilerek aktif hale getirilir.



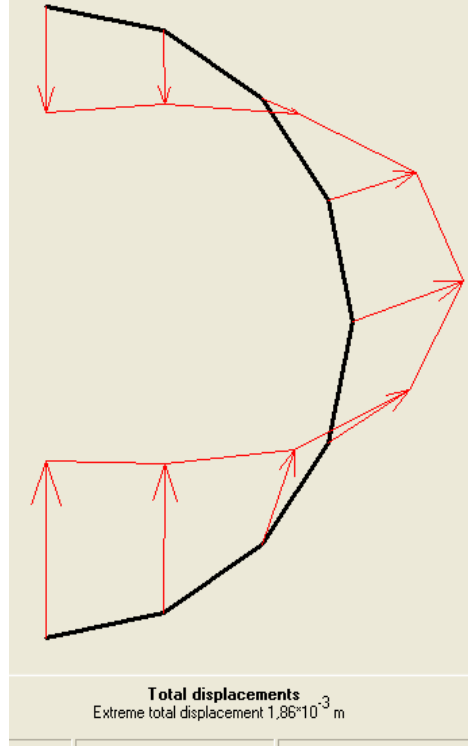
Şekil 7.20: Uygulama Hesap Aşamaları

Daha sonra deformasyonu nerede görmek istiyorsak o noktaları hesap aşamasında kırmızı artılı ikona basarak belirleyip hesap işlemi başlatılır. Hesap aşamalarında 1. aşama için output ikonuna bastığımızda toprak yükü altında tüneli kazıp suyunu boşaltıp, tünel kaplamasını aktive ettiğimizde sonlu elemanlar ağında meydana gelen deformasyon ve tünel kaplamasında meydana gelen toplam deformasyonda 1,86 mm'dir. Bu durum tünele büzülmenin henüz verilmediği durumdur. Şekil 7.21'de görüldüğü gibi problemin tam olarak tanımlanması yapılmadığından kabarma gözükmemektedir. Esas değerlendirilmesi gereken 2. hesap aşamasının sonuçları Şekil 7.25'de görülmektedir.

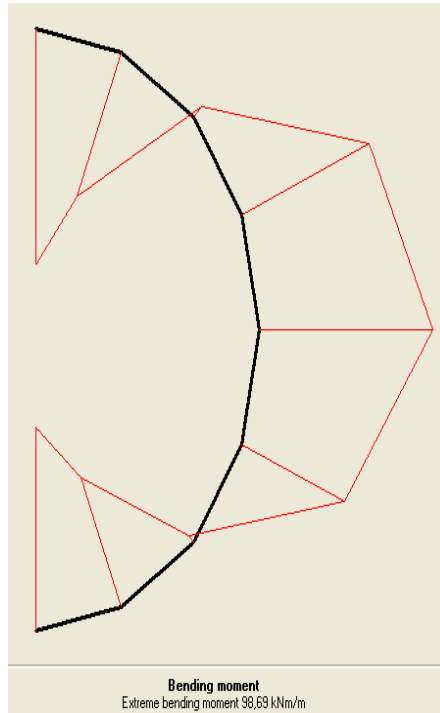
Tünel kaplamasına gelen burulma momenti ise 98.69 KNm/m, eksenel kuvvet değeri - 954.50 kN/m'dir. Bu değerlerin grafiksel gösterimi Şekil 7.23 ve 7.24'da gösterildiği gibidir. 2. hesap aşamasında hacim kaybını simule etmek için büzülme değeri girdiğimizde sonlu elemanlar ağında meydana gelen deformasyon değeri ve tünel yüzeyinde meydana gelen deformasyon değeri 50.92 mm'e çıkmaktadır. Zemin yüzeyinde ve tünel kaplamasında meydana gelen deformasyonlar Şekil 7.25 ve 7.26'de görülebilmektedir. Burada tünel çevresinde oluşan kemerlenme, tünelde meydana gelen gerilmeyi azaltmaktadır ve böylelikle oluşan burulma momenti değeri 136.15 kNm/m'ye artmakta ve eksenel kuvvet değeri -690.32 KN/m değerine gerilemektedir. Burulma momenti değerleri ve eksenel kuvvet değerleri Şekil 7.27 ve 7.28'de görülebilmektedir.



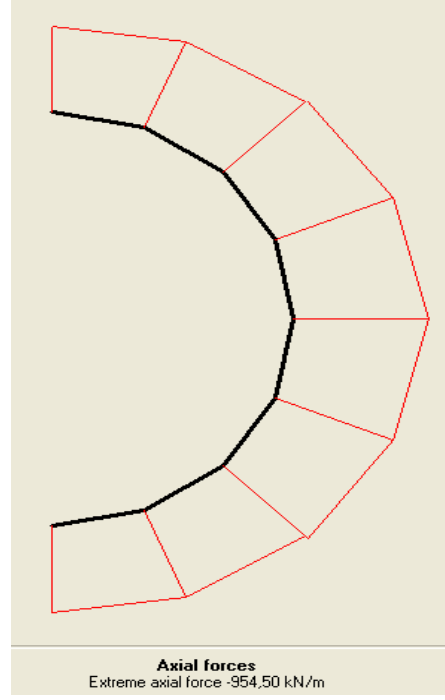
Şekil 7.21: Sonlu Elemanlar Ağında Meydana Gelen Deformasyon



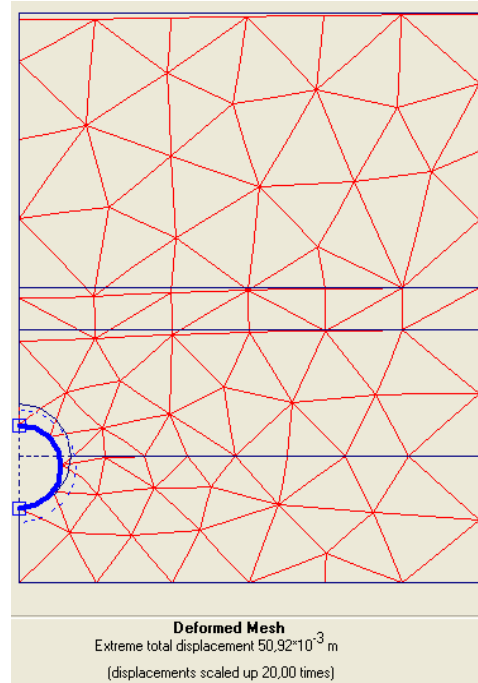
Şekil 7.22: Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Deformasyon



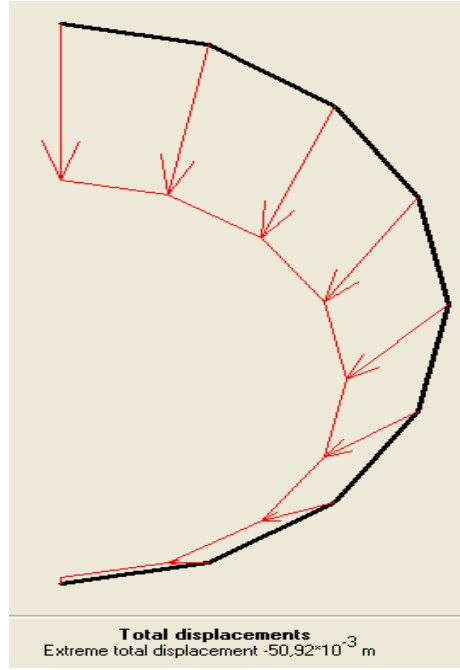
Şekil 7.23: Tünel Kaplamasına Oluşan Burulma Momenti



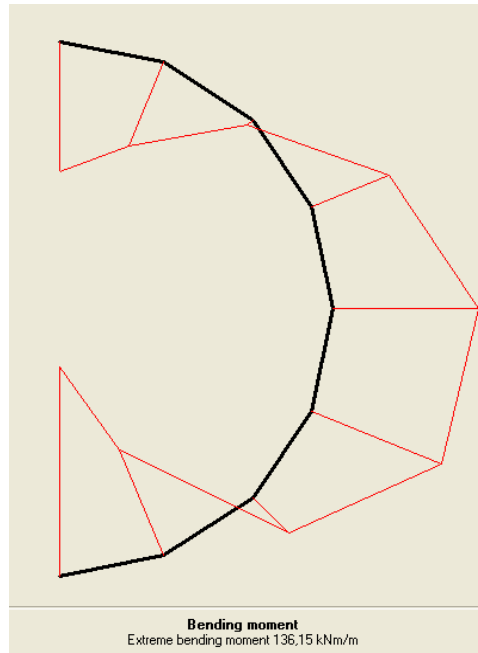
Şekil 7.24: Tünel Kaplamasında Oluşan Eksenel Kuvvet Değeri



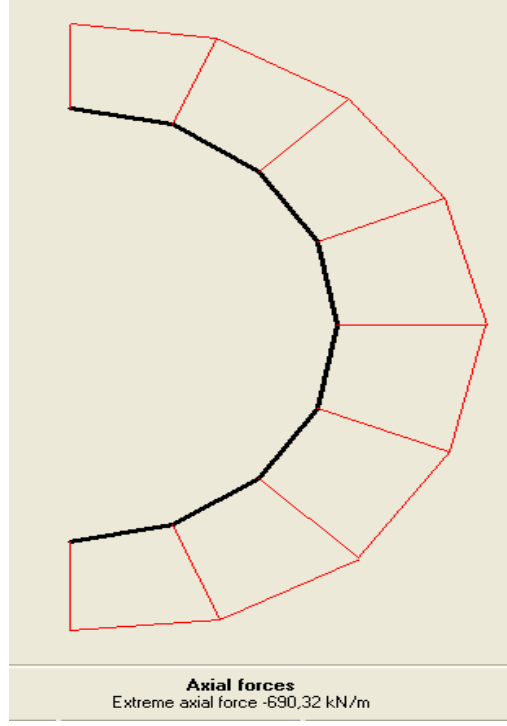
Şekil 7.25: Son Hesap Aşamasında Zemin Yüzeyinde Meydana Gelen Deformasyon



Şekil 7.26: Son Hesap Aşamasında Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Deformasyon



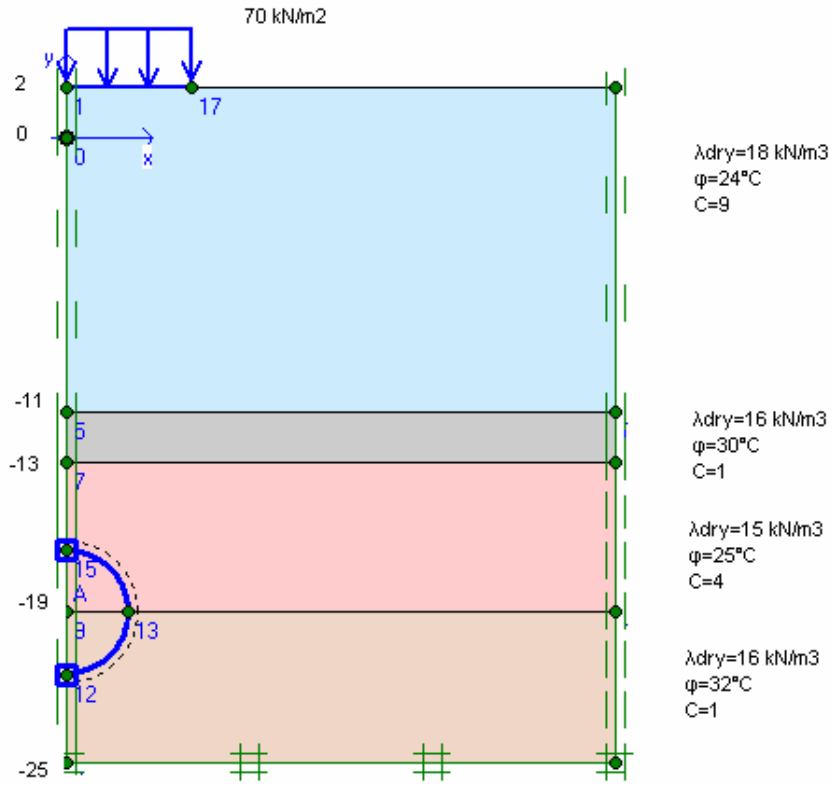
Şekil 7.27: Son Hesap Aşamasında Tünel Kaplamasında Oluşan Burulma Momenti



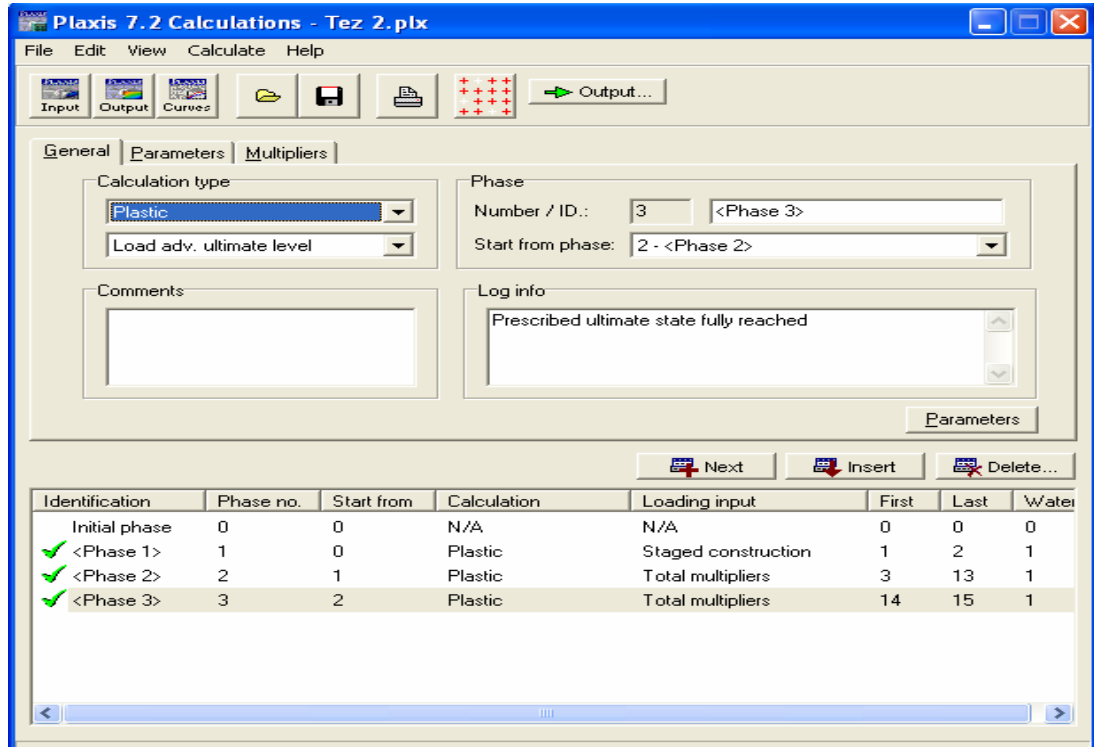
Şekil 7.28: Son Hesap Aşamasında Tünel Kaplamasına Gelen Eksenel Kuvvet

7.3 NATM Tünel İnşa Yöntemi ile Yapılmış olan Tünel Üzerindeki Sahada İnşa Edilen Binanın Etkisi

Bu örnekte ilk örnektaki tünel kaplama parametreleri ve 2. örnekteki aynı zemin koşulları kabul edilmiştir. Şekil 7.26’da hesap kademeleri gösterilmiş olan bu örnekte 3. hesap aşamasında 70 KN/m^2 bina yükü geldiği varsayılmıştır. Geometrisi Şekil 7.29’de gösterilmiş olan örnekte 1. ve 2. hesap aşamaların sonuçları tabi ki 2. örnekte bulduğumuz değerlerdir.

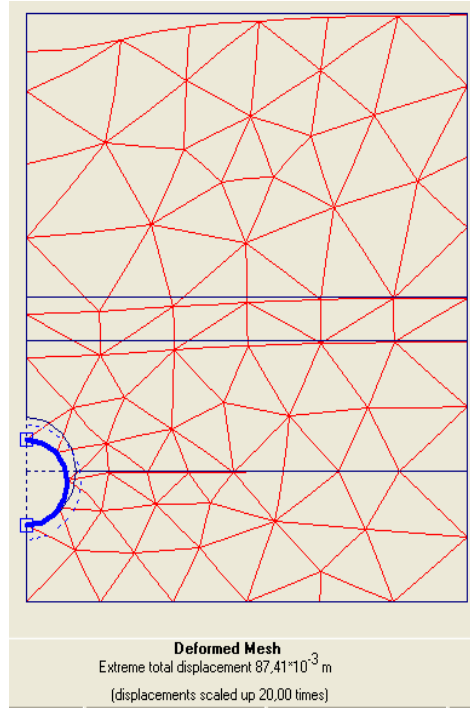


Şekil 7.29: Tünel İnşaatı Sahasına Bina Yüğü Uygulanması

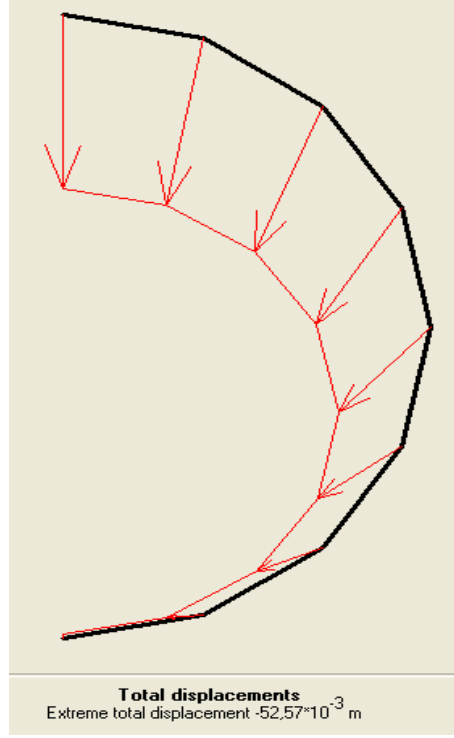


Şekil 7.30: Tünelin İnş Edildiği Alana Bina Yüğü Uygulanması Hesap Aşamaları

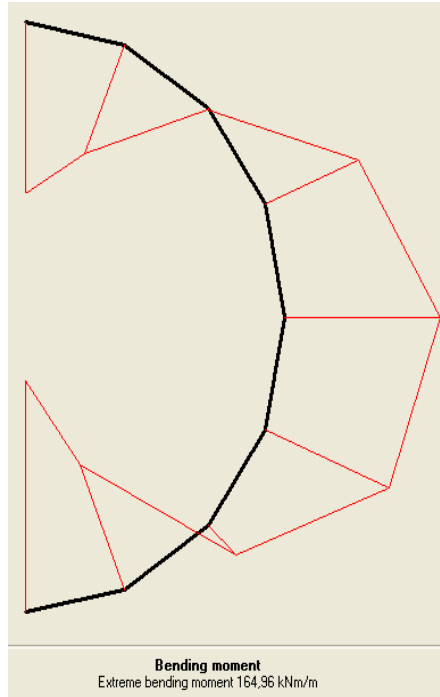
3. hesap aşamasında ise “Parametres” sayfasında “Total Multipliers” seçeneğinde Σ -Mload A değerini 70 olarak gireriz. Bu çarpan ile zemin yüzeyine 70 kN/m^2 lik bir yükün geldiği varsayılmıştır. 3. hesap aşamasında zemin yüzeyinde meydana gelen deformasyon değeri bina yükünden dolayı 87.41 mm değerine yükselmiştir. Şekil 7.31’de deformasyonlar gösterilmiştir. Tünel kaplamasında meydana gelen toplam deformasyon değeri Şekil 7.32’de 52.57 mm olarak gösterilmiştir. Şekil 8.33 ve 8.34’de burulma momenti 164.96 kNm/m ve eksenel kuvvet değeri -777.72 kN/m değerine yükseldiği görülmektedir.



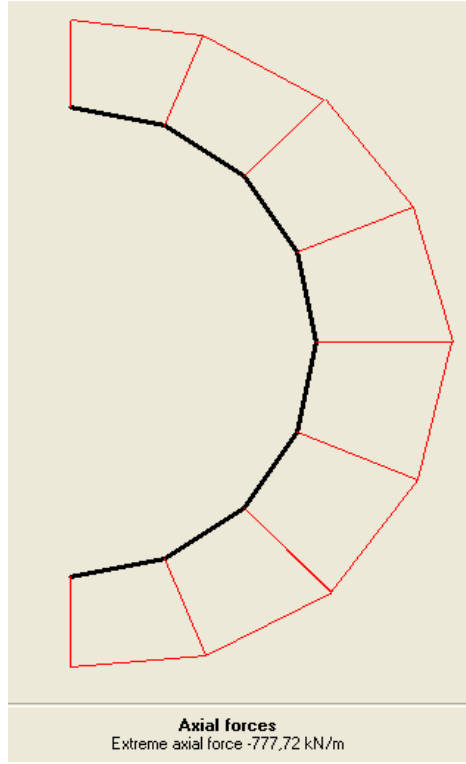
Şekil 7.31: Bina Yükü Olması Durumunda Zemin Yüzeyinde Meydana Gelen Deformasyon



Şekil 7.32: Son Hesap Aşamasında Bina Yüğü Yüklmesi Durumunda Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Toplam Deformasyon



Şekil 7.33: Son Hesap Aşamasında Bina Yüğü Yüklmesi Durumunda Tünel Kaplamasında Meydana Burulma Momenti

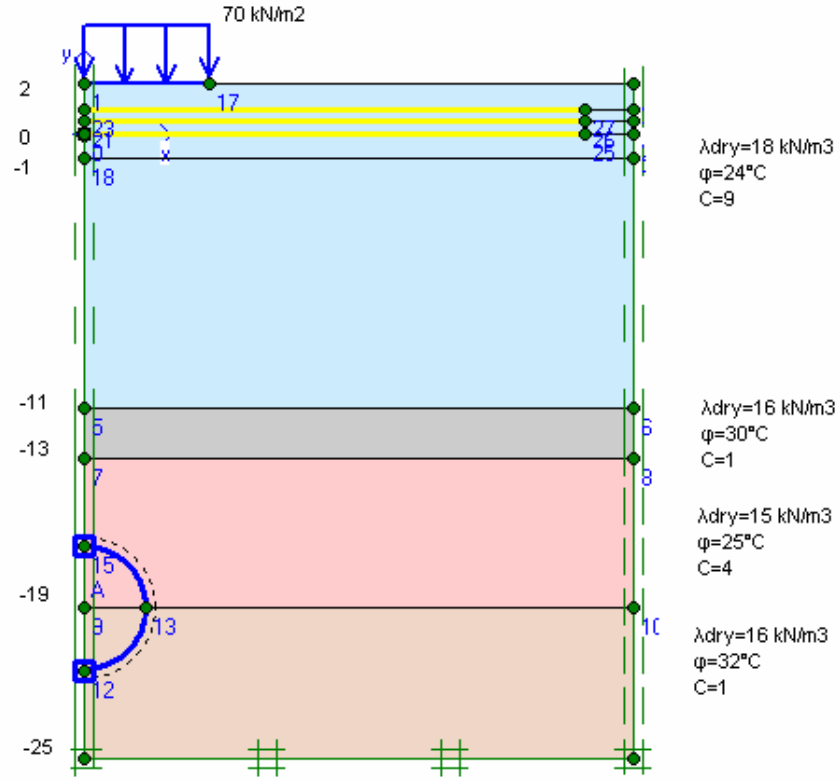


Şekil 7.34: Son Hesap Aşamasında Bina Yüğü Yükleneşü Durumunda Tünel Kaplamasına Gelen Eksenel Kuvvet

7.4 NATM Tünel İnşü Yöntemi ile Yapılmış olan Tünel İnşaatında Zemin Yüzeyinde Deformasyonları Küçültmek Amacı ile Geogrid Kullanılması

Bu örnekte 3. örneğe ek olarak zemine bina yüğü uygulamadan önce, kazı yapılarak kum şilte üzerine 50 cm ara ile 3 sıra geogrid serilecektir. Buradaki amaç bu iyileştirme yöntemi ile zemin yüzeyindeki deformasyon değeriinin azalmasını sağlamaktır.

Geogridler, birbirine dik iki grup polimer bazlı damarın kesişmesinden oluşur. Geogridin yüksek mukavemete sahip (üretim yönü) damarlar boyuna damar, bunun dik istikametindeki damarlar ise enine damar olarak nitelendirilir. Piyasada çok çeşitli geogrid tipleri kullanılmaktadır. Bunlar birbirinden geometrik ve mekanik farklarla ayrılırlar. Bu örnekte Elastik Rijitliği 2500 kN/m olan geogrid kullanılmıştır. Aşağıdaki Şekil 7.35'de geogridlerin yerleşimi görülebilmektedir.



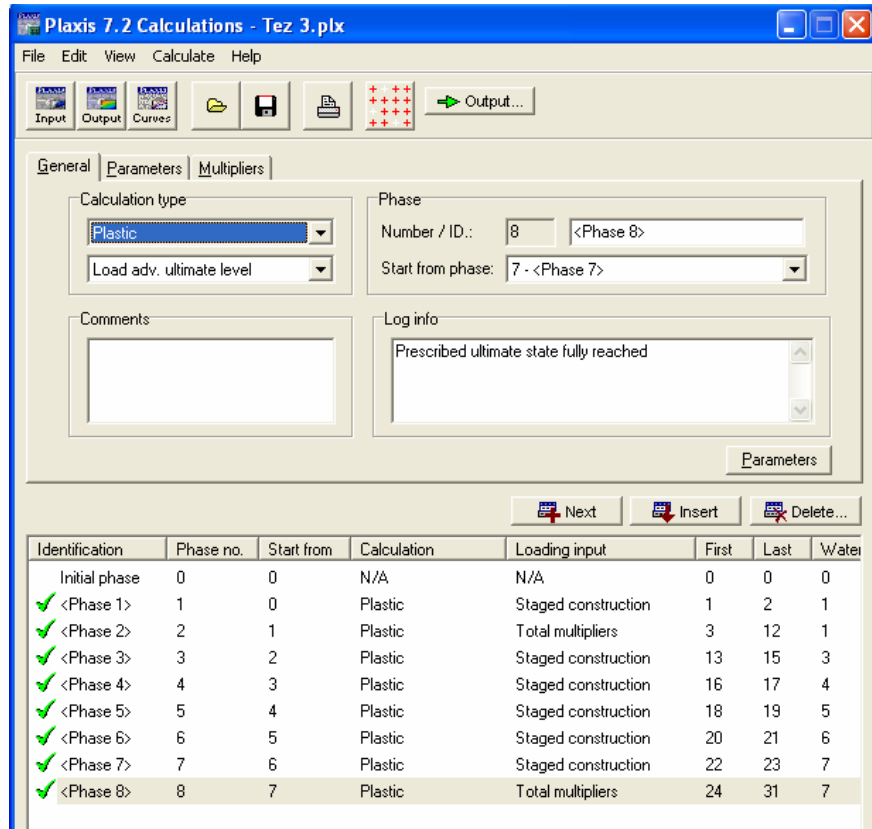
Şekil 7.35: Tünel Örneğinde Geogridlerin Yerleşimi

Bu örnekte Şekil 7.36’de gösterildiği gibi hesap aşamaları 8’e yükselmiştir. İlk iki adım ilk örnekte olduğu gibidir. Burada problemin tarifindeki ilk geometri aşamasında serilecek olan kum şilte, dolgu ve geogridin malzeme özellikleri “Material Sets” bölümünde tanımlanır ve geometride yerleri belirlenir. Dolgu ve kum şiltenin parametre değerleri Tablo 7.4’de gösterilmiştir. Geogridin malzeme özellikleri malzame üzerine sürüklenerek bu özelliklere sahip olması sağlanır. Tabi ki başlangıç koşulları oluşturulurken bu elemanların hiç birinin var olmadığı düşünülür. Hesap aşamalarında sırası geldikçe aktive edilirler.

Tablo 7.4: Dolgu ve Kum Şilte Parametreleri

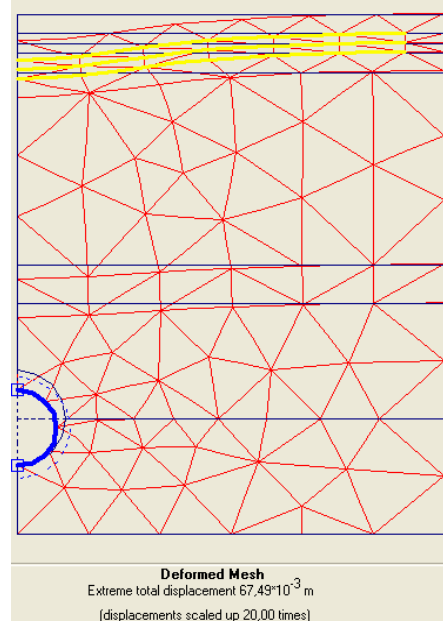
Malzeme Cinsi	E	γ	γ_k	K_x K_Y	ν	C	Φ	Ψ
Dolgu	60000	20	16	1.00 1.00	0,3	1	30	0
Kum Şilte	40000	20	16	1.00 1.00	0,3	1	30	0

İlk iki hesap aşaması daha önce söylediğimiz 2. örnekle ile aynıdır. Bu örnekte 3. aşamada zemin yüzeyinden itibaren 3 m kazılır. 4. aşamada kum şilte serilir. 5. aşamada ilk sıra geogrid ve dolgu serilir. Bu işlem hesap sırasında, “Staged Construction” seçeneğinden, geogridin ve kum şiltenin malzeme özelliklerini geometriye taşıyarak gerçekleşir. 5. aşama gibi 6. ve 7. aşamalarda diğer geogrid ve dolguların serilmesi şeklinde gerçekleştirilir. En son olan 8. aşamada ise zemine bina yükü uygulanmaktadır.

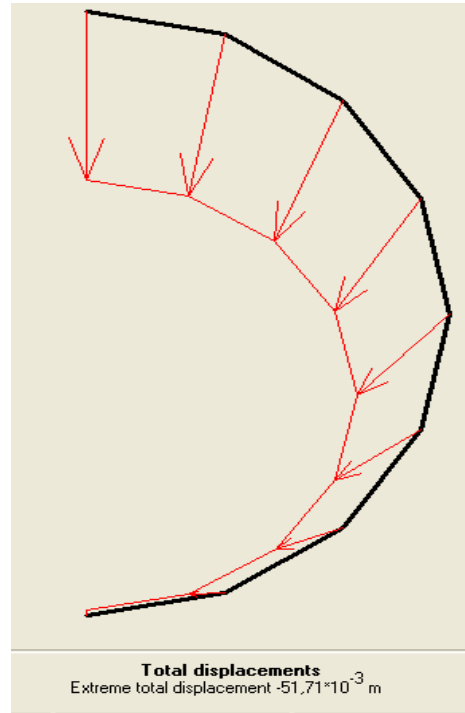


Şekil 7.36: Bina İnşa Edilmeden Geogrid Uygulamasında Hesap Aşamaları

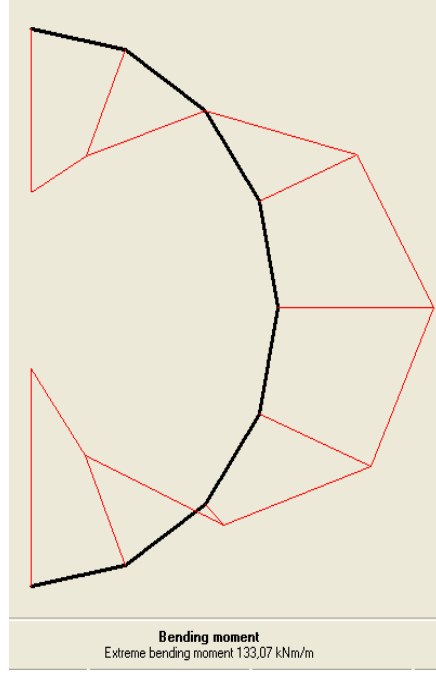
8. aşamada geogrid uygulamasından sonra binanın inşa edilmesi durumunda daha önce zemin yüzeyinde meydana 87.41 mm deformasyon değerinin 67.49 mm gerilediği görülmüştür. Deformasyon değeri Şekil 7.37’de gösterilmiştir. Tünel kaplamasında meydana gelen deformasyon Şekil 7.38’de gösterildiği gibi 51.71 mm dir. Tünel kaplamasındaki burulma momenti değeri 133.07 kNm/m ve eksenel kuvvet değeri - 785.08 kN/m dir. Burulma momenti ve eksenel kuvvet değeri Şekil 7.39 ve 7.40’da gösterilmiştir.



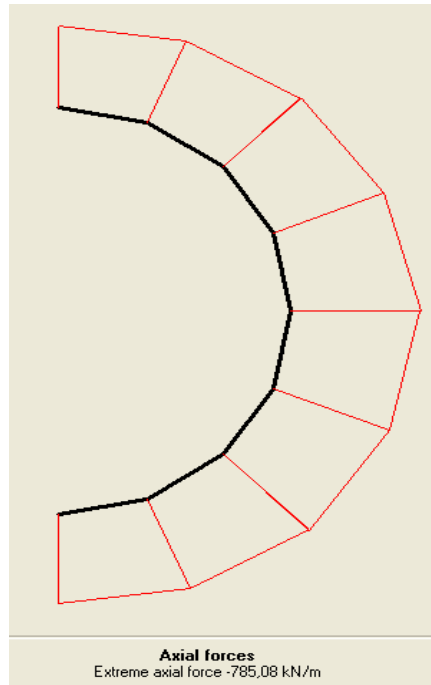
Şekil 7.37: Geogrid Uygulanması Durumunda Zemin Yüzeyinde Meydana Gelen Toplam Deformasyon



Şekil 7.38: Geogrid Uygulanması Durumunda Son Aşamada Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Deformasyon



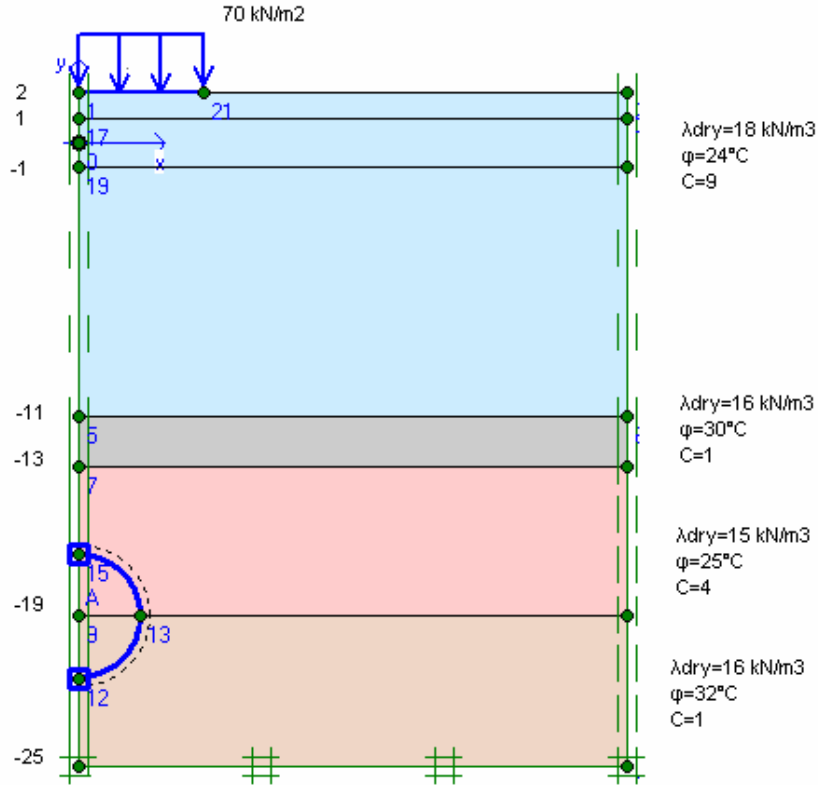
7.39: Geogrid Uygulanması Durumunda Son Aşamada Tünel Kaplamasında Oluşan Burulma Momenti



7.40: Geogrid Uygulanması Durumunda Son Aşamada Tünel Kaplamasına Gelen Eksenel Kuvvet

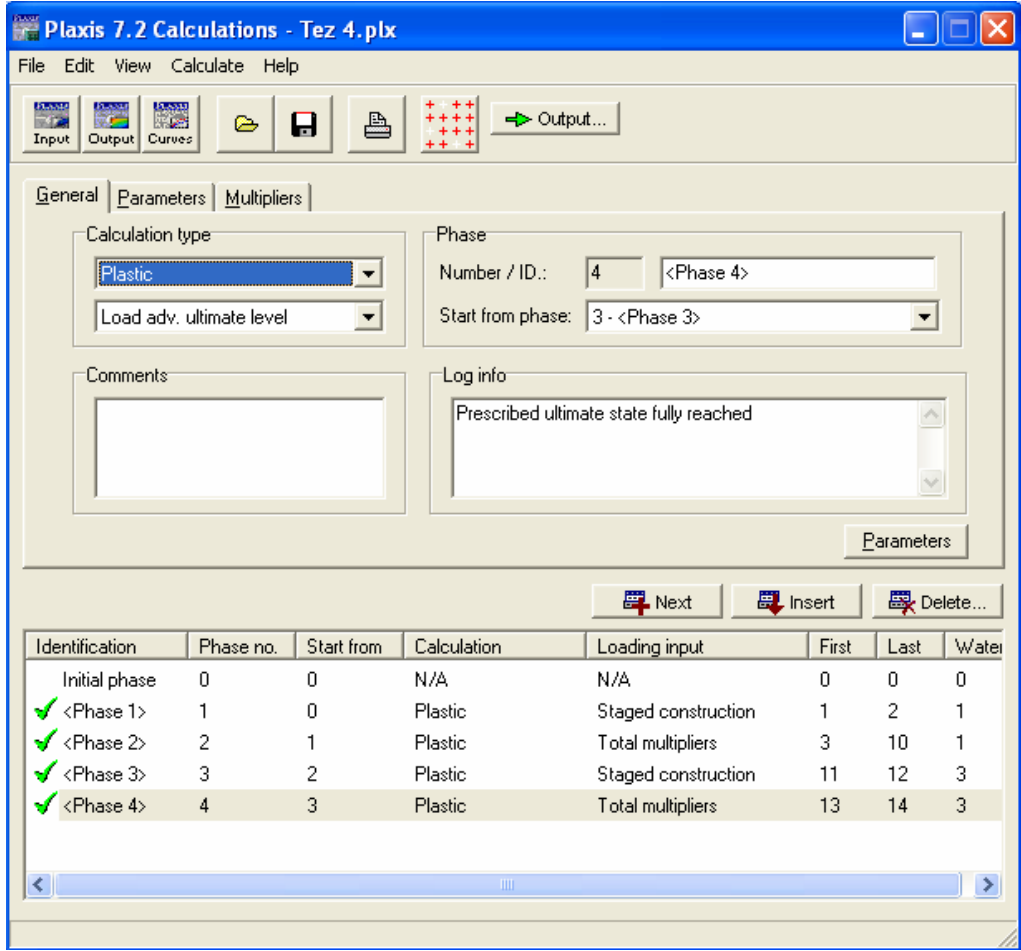
7.5 NATM Tünel İnşa Yöntemi ile Yapılmış olan Tünel İnşaatında Zemin Yüzeyinde Deformasyonları Küçültmek Amacı ile 2 metre Kalınlığında Zemin Enjeksiyonu Uygulaması

Bu örnekte bir önceki geogrid yerine zemine 2 m zemin enjeksiyonu uygulanmıştır. Problemin geometrisi Şekil 7.41’de gösterilmiştir.



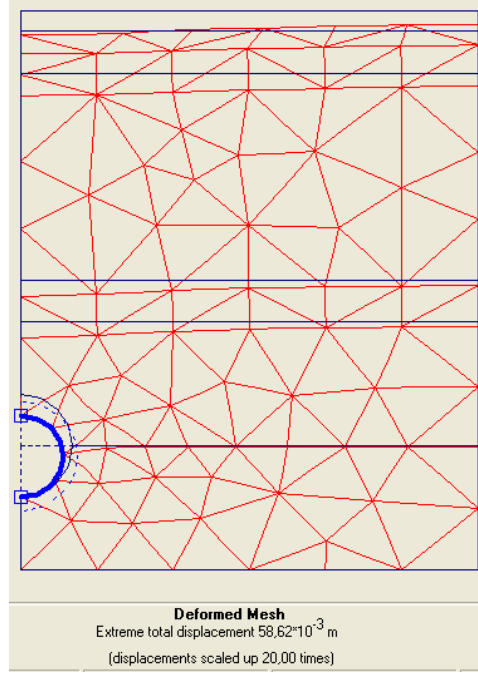
Şekil 7.41: Tünel Örneğinde Enjeksiyon Uygulaması

Bu örnekte ilk olarak jet grout malzemesinin geometrideki konumu ve parametrik özellikleri tanımlanır. Başlangıç koşullarında enjeksiyon ve bina yükü aktif değildir. Daha önceki örneklerde olduğu gibi efektif gerilmelerin başlangıç koşullarının tanımlanması sırasında tünel kaplaması deaktive edilir. Daha sonra hesap aşamasına geçilir. Bu analiz dört hesap aşamasından oluşmaktadır. Hesap aşamaları şekil 7.42’de gösterilmiştir. 1. ve 2. aşamalar yine 2. örnekte tanımlandığı gibidir ve sonuçlar ayanıdır. 3 aşamada zemin kazılmasında enjeksiyon malzemesi zemine enjekte edilip daha sonra 4. aşamada zemin profiline bina yükü uygulanmaktadır.

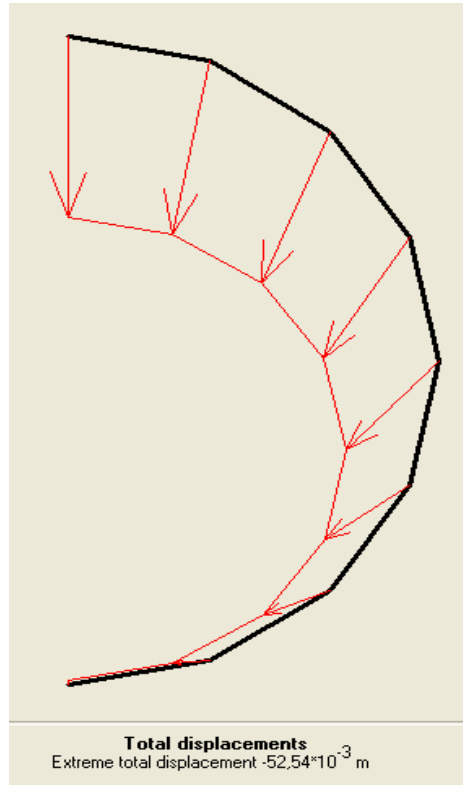


Şekil 7.42: Enjeksiyon Uygulamasında Hesap Aşamaları

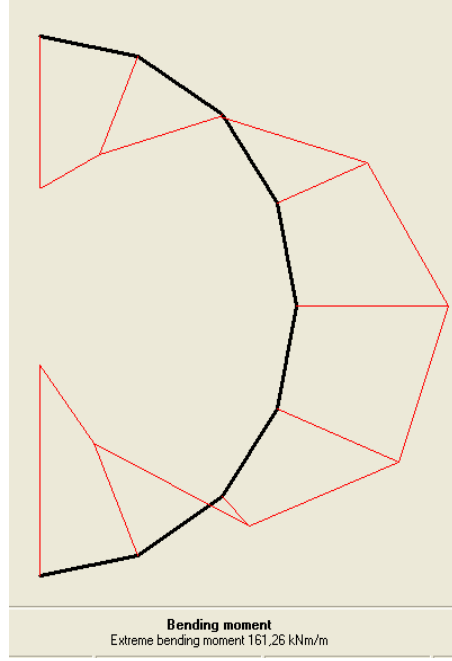
4. aşamada, enjeksiyon uygulamasından sonra binanın inşa edilmesi durumunda bir önceki örnekte (Geogrid kullanılması durumunda) zemin yüzeyinde meydana gelen deformasyon değerinin 67.49 mm den 58.62 mm ye gerilediği görülmüştür. Deformasyon değeri Şekil 7.43’da gösterilmiştir. Tünel kaplamasında meydana gelen deformasyon Şekil 7.44’da görüldüğü gibi 52.54 mm’dir ve tünel kaplamasında ki burulma momenti değeri 161.26 kNm/m ve kaplamaya gelen eksenel kuvvet değeri 787.09 kN/m dir. Şekil 7.45 ve 7.46’da bu değerler gösterilmiştir.



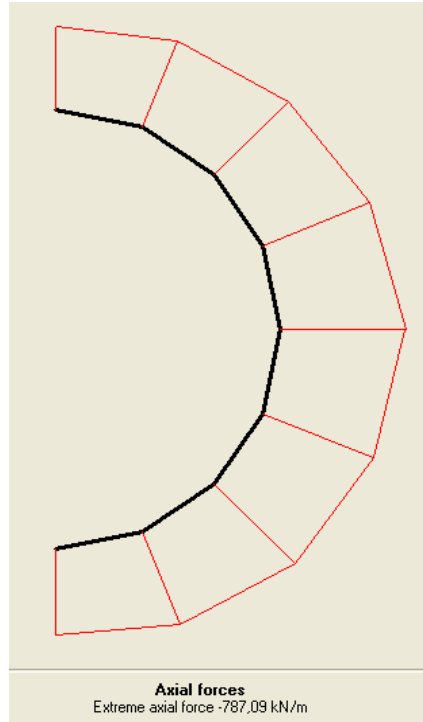
Şekil 7.43: Enjeksiyon Uygulanması Durumunda Zemin Yüzeyinde Meydana Gelen Deformasyon



Şekil 7.44: Enjeksiyon Uygulanması Durumunda Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Deformasyon



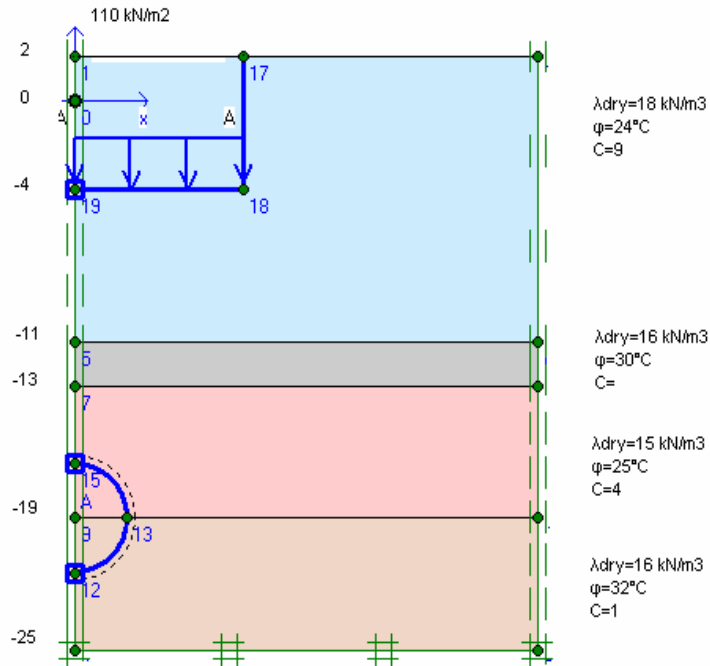
Şekil 7.45: Enjeksiyon Uygulaması Durumunda Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Burulma Momenti



Şekil 7.46: Enjeksiyon Uygulanması Durumunda Tünel Kaplamasına Gelen Eksenel Kuvvet

7.6 NATM Tünel İnşa Yöntemi ile Yapılmış olan Tünel İnşaatında Zemine Tünelin Üst Kısımına Gelecek Şekilde 2 Bodrum Katlı Bina İnşa Edilmesi

Bu örnekte mevcut tünel olan kesitte zemine 2 bodrum katlı bina inşa edilmesi planlanmış ve bu yapının mevcut tünele zarar verip vermediği araştırılmıştır. Şekil 8.47’ de problemin geometrisi görülmektedir. Burada bina yükü olarak 110 kN/m². Yapı elemanlarının parametre değerlerini Tablo 7.5 ve 7.6’de görebilirsiniz. Bu değerler geometri aşamasında “Material Sets” bölümünde tanımlanır. Başlangıç koşullarında tünel ve yapı elemanlarının hiç biri aktif değildir.



Şekil 7.47: 2 kat Bodrum İnşa Edilmesi Durumunda Problem Geometrisi

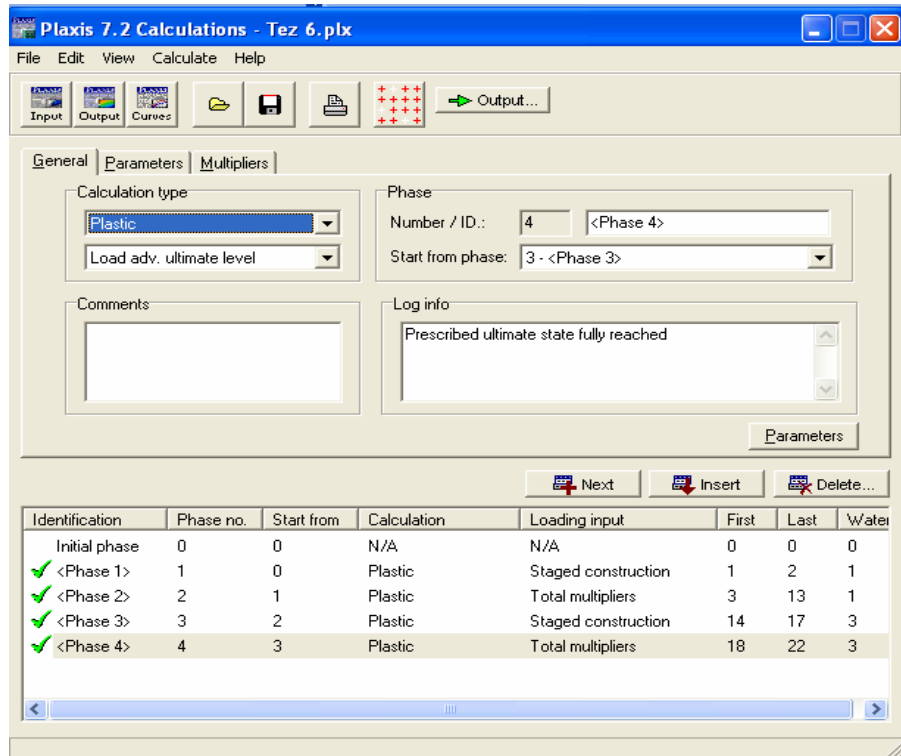
Başlangıç koşullarında tünel, bina ve yük bütün örneklerde olduğu gibi aktif değildir. Burada hesap Şekil 7.48 da görüldüğü gibi 4 aşamadan oluşmaktadır. İlk 2 aşama ve sonuçları aynıdır. 3. aşamada bina bodrumları için 6 m kazı yapılır yapı elemanları aktif hale getirilir ve suyu boşaltılır. 4. aşamada ise bina yükü “Staged Construction” seçeneğinden aktif hale getirilir. Zemin yüzeyinde ve tünel kaplamasında meydana gelen deformasyon Şekil 7.49’da görülebilmektedir.

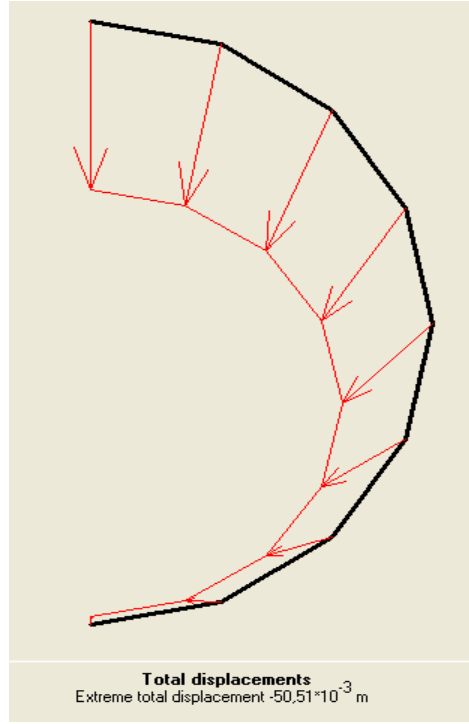
Tablo 7.5: Döşeme Malzeme Özellikleri

Parametre	Ad Malzeme	Değer	Birim
Malzeme Davranışı	Tipi	Elastic	
Elastik Rijitlik	EA	8000000	kN/m
Eğilme Rijitliği	EI	107000	kNm ² /m
Kalınlık	d	0,401	m
Ağırlık	w	6	kN/m/m
Poisson Oranı	v	0,2	-

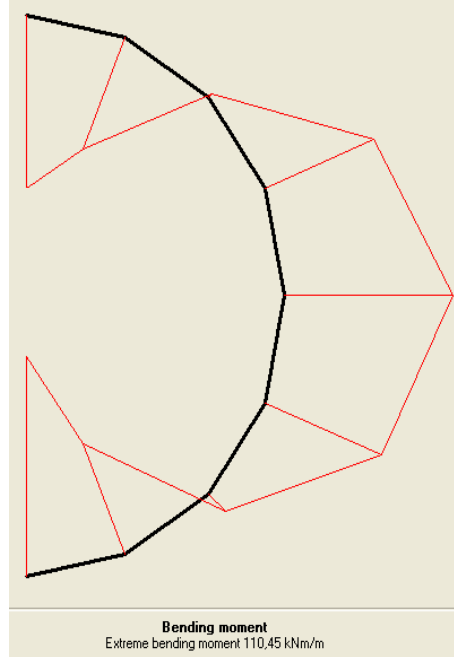
Tablo 7.6: Düşey Duvar Malzeme Özellikleri

Parametre	Ad Malzeme	Değer	Birim
Malzeme Davranışı	Tipi	Elastic	
Elastik Rijitlik	EA	6000000	kN/m
Eğilme Rijitliği	EI	13300	kNm ² /m
Kalınlık	d	0,163	m
Ağırlık	w	3	kN/m/m
Poisson Oranı	v	0,2	-

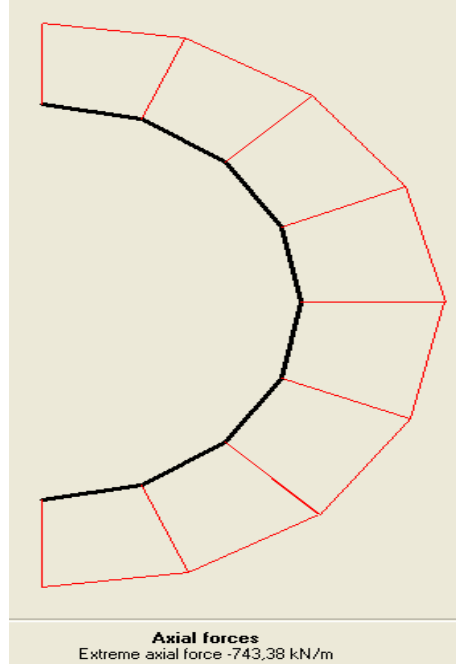
**Şekil 7.48:** 2 kat Bodrum İnşa Edilmesi Durumunda Plaxis Hesap Aşamaları



Şekil 7.49: 2 Kat Bodrumlu Bina İnşa Edilmesi Dururmunda Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Toplam Deformasyon



Şekil 7.50: 2 Kat Bodrumlu Bina İnşa Edilmesi Dururmunda Tünel Kaplamasında Meydana Gelen Burulma Momenti



Şekil 7.51: 2 Kat Bodrumlu Bina İnşa Edilmesi Dururunda Tünel Kaplamasına Gelen Eksenel Kuvvet

Görüldüğü üzere 2 bodrum katlı bir bina inşaatının 12 metre altındaki 2.5 m yarıçaplı tünele verdiği deformasyon kabul edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır. Bu değer Şekil 7.49'deki grafikte görüldüğü gibi 50.51 mm olarak bulunmuştur. Tünel kaplamasında meydana gelen burulma momenti 110.45 kNm/m ve eksenel kuvvet değeri -743.38 kN/m'dir. Bu değerler Şekil 7.50 ve 7.51'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Sonuç olarak tünel geçen bir zemin kesitinde bina inşa edilmesi durumunda zemin yüzeyinde ve tünel kaplamasında deformasyonlar meydana gelmektedir. Önemli olan bu deformasyonların binaya ve tünele zarar verecek seviyede olmamasıdır. İlk olarak yaptığımız örnekte bina yükü ve zemin iyileştirmesi olmadan zemin yüzeyinde meydana gelen deformasyon değeri 35,24 mm'dir. Zemin profili birinci örnekte yukarıdan aşağıya kil olduğu varsayılmıştır. İkinci örnekte bina yükü ve zemin iyileştirilmesi olamadan fakat ilk örneğe göre zemin profilinin yukarıdan aşağıya doğru değişken olduğu varsayılmıştır (kil ve kum). Bu durumda zemin yüzeyinde tünel

kaplamasındameydana gelen deformasyon değeri 50,92 mm'e yükselmiştir. Üçüncü örnekte uygulanan bina yükünün, zemin iyileştirmesi olmadan zemin yüzeyinde meydana getirdiği deformasyon değeri doğal olarak 87.41 mm'dir. Bu deformasyon değerini düşürmek amacı ile bina yükü uygulanmadan önce zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmuştur. Dördüncü örnekte zemin iyileştirme yöntemi olarak bina yükü uygulamasından önce zemin kazılarak kum şilte üzerine 3 kat geogrid ve dolgu malzemesi serilir. Bu aşamadan sonra bina yükü uygulandığında zemin yüzeyinde meydana gelen deformasyonların 87.41 mm'den 67.49 mm'e düşmektedir.

Beşinci örnekte ise ise iyileştirme yöntemi olarak enjeksiyon yöntemi uygulanmıştır. 2 m kalınlığında enjeksiyon uygulanması sonucunda meydana gelen deformasyon, 58.62 mm dir. Sonuç olarak enjeksiyon yöntemi geogrid serilmesine göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu çalışmalara ek olarak binanın sağlıklı olarak inşa edilebilmesi için farklı oturmaların olmaması gerekir. Tünel kaplamasına gelen kuvvetlerin çok fazla değişmediği görülmektedir.

Son olarak altıncı örnekte ise 2 bodrumlu 5 normal katlı binanın mevcut tünelin üzerine yapılması durumunda tünele gelecek etkiler incelenmiştir. Burada zemin yüzeyinde meydana gelen deformasyon değeri 50.51 mm'dir ve kabul edilebilir sınırlar içindedir.

8. SONUÇ

Bu tez çalışmasında tüneller ve çeşitleri tanıtılmış, tünel inşasına kadar yapılan araştırmalar, yüzey ve yeraltı çalışmaları, tünel açma inşa ve iksa yöntemlerine yer verilmiştir. Tünelcilikte zemin iyileştirmesinin amacı, kazı programının güvenli ve aksamadan gerçekleşmesi için zeminde yeterli iyileşmeyi sağlamaktır. İnşaatın emniyetli ve ekonomik olması için, mevcut şartlara göre toprak işleri ile iksa ve kaplama işlerinin en uygun biçimde planlanması ve gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Tez kapsamında geoteknik problemlerin analizinde kullanılan sayısal yöntemler ele alınmış ve zemin inşa yöntemlerinden NATM (Yeni Avusturya Metodu)'e detaylı olarak değinilmiştir.

NATM prensip olarak, tüneli çevreleyen ortamın gücünü mobilize ederek kayanın veya zeminin taşıma gücü kapasitesini arttırmaya dayanır. Tünel kazısı bu yöntemde bölüm bölüm, aşama aşama yapılır. Her kazı aşamasında yapılacak kaplama kazı etrafında izin verilebilir stres boşalmalarına ve kesit tesirlerini minimuma indirmek için belli bir rijitliğe sahip olmalıdır. Buna ek olarak tünelin stabilitesi, güvenliği ve yüzeydeki oturmaların minimum olması için çeşitli zemin iyileştirme yöntemlerinden faydalanılır.

Bu çalışmada bir sonlu elemanlar yöntemi olan Plaxis iletünel kesitlerinin analizi yapılmaktadır. Bu sonlu elemanlar yöntemi nümerik analiz yöntemleri arasında bilgisayar yazılımı için en uygun formülasyona sahiptir. Bunun nedeni, karmaşık sınır koşulları ve nonlinear malzeme davranışı, homojen olmayan malzemeler gibi zor ve karmaşık problemlerin çözümünde sistematik bir programlamaya izin vermesidir.

7. Bölümde 6 farklı örnek durum incelenmiştir. Sonlu elemanlara dayanan Plaxis programı ile yapılan uygulamalarda önce mevcut durumun geometrisi oluşturulup, projede kullanılacak yapısal elemanların (temel, geogrid) ve zeminin özellikleri girilmiştir. Ardından problem sanal ortamda canlandırılarak, çözüm ve alternatifler

üretilmiştir. Yapılan uygulamaların sonuçlarını Tablo 7.7’de özet olarak görülmektedir.

Tablo 8.1: Uygulama Sonuçları

Uygulamalar	Uyg. 7.1	Uyg. 7.2	Uyg. 7.3	Uyg. 7.4	Uyg. 7.5
Zemindeki Deformasyon (mm)	35,24	50,92	87,41	67,49	58,62
Tünel Kaplamasındaki Deformasyon (mm)	35,24	-50,92	-52,57	-51,71	-52,54
Burulma Momenti (kNm/m)	73,61	136,15	164,96	133,07	161,26
Eksenel Kuvvet (Kn/m)	-453,23	-690,32	-777,72	-785,08	-787,09

İlk uygulamada zeminin yukarıdan aşağıya kadar kil olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda problem 2 hesap aşaması ile gözülür. İlka aşamada tünel kazısı yapılır, kaplaması aktif hale getirilir ve tünelin içindeki su boşaltılır. Bu ilk aşamada zemin yüzeyinde ve tünel kaplamasında meydana gelen deformasyon değeri 15,72 mm’dir. Tabi bu değer problemin sonucundaki zemin ve tünel kaplamasında meydana gelen deformasyon değeri değildir. Esas değer ikinci aşamada tünelde hacim kaybını simule etmek için girilen büzülme oranını bulduğumuz zamanki değerdir. İkinci aşama sonucunda tünel apalamasında ve zemin yüzeyinde meydana gelen defomasyon 35,24 mm’dir. İki aşamadını gösterilmesinin sebebi kemerlenmeden oluşan burulma momenti ve eksenel kuvvet değişimlerini göstermektir.

İkinci uygulamada değişken zemin profilinde sadece tünelin var olduğu durum incelenmiştir. Burada ilk hesap aşamasında zemin yüzeyinde meydana gelen oturma 1,86 mm’dir. İkinci hesap aşaması tünel cidarındaki plastik deformasyonu simule etmektedir. Deformasyona uğramış sonlu elemanlar ağı ise zemin yüzeyindeki oturmayı göstermektedir. Zemin yüzeyinde meydana gelen deformasyon değeri 50.92 mm çıkmıştır. İkinci hesap aşamasında tünel çevresinde bir kemerlenme meydana gelmektedir. Bu kemerlenme tünel kaplamasına gelen gerilmeyi azaltmaktadır. Bunun sonucu olarak eksenel kuvvet birinci hesap aşamasına göre ikinci hesap aşamasında azalma, buna karşın burulma momentinin artma gösterir.

Tünel kaplamasındaki deformasyon değeri zemin yüzeyindeki deformasyon değeri ile aynı olup 50,92 mm'dir.

Üçüncü uygulamada ise geometriye (zemin iyileştirmesi olmadan) bina yükü uygulanmıştır. Doğal olarak zemin yüzeyine uygulanan ek bir kuvvet olduğundan zemin yüzeyinde meydana gelen deformasyon değeri 87.41 mm değerine yükselmektedir. Tünel kaplamasındaki deformasyon değeri bina yükünden dolayı bir önceki örnekteki değer 52.57 mm değerine artmıştır.

Dördüncü uygulamada bina yükü uygulamadan önce, ilk aşama olarak zemin kazıldıktan sonra kum şilte serildikten sonra üzerine kademe kademe geotekstil ve dolgu malzemesi yerleştirilmiştir. Bunun sonucunda zemin yüzeyinde meydana gelen deformasyon değeri iyileştirme yapılmadan önceki 87.41 mm değerinden 67.49 mm değerine gerilemiştir. Tünel kaplamasındaki deformasyon değeri bir önceki örnektene çok yakın değer olan 51.71 mm'dir.

Beşinci uygulamada zemin iyileştirme yöntemi olarak 2 m kalınlıkta zemin enjeksiyonlanması yöntemi uygulanmıştır. Bu uygulama sonucunda zemin yüzeyinde meydana gelen deformasyon değeri bir önceki örnekte 67.49 mm'den, 58.62 mm değerine gerilemiştir. Tünel kaplamasındaki deformasyon değeri 52.54 mm'dir.

Altıncı çalışmada zemine 2 bodrulu 5 katlı bina yapıldığı varsayılmıştır ve tünel kaplamasında meydana gelen deformasyon değeri 50.51 mm'dir.

Bu örneklerde gösterildiği gibi;

- Tünel inşasından sonra yapılması planlanan yeni yapıların hem tünele hemde mevcut yapılara zarar vermeden inşa edilebilmeleri için sonlu elemanlar yöntemi olan Plaxis'le tahkik edilmeli, olası sorunlar ve çözümleri analiz etmede önemli kolaylıklar sağladığı görülmektedir.
- Bina yükü uygulanmadan önce, zeminin özelliğine uygun biçimde iyileştirme yapılması durumunda, zemin yüzeyinde meydana gelen oturma değerleri daha küçük değerlere çekilebilmektedir.
- Tünel kaplamasına etkiyen kuvvetler, zemin iyileştirilmesi durumunda ve zemin iyileştirilmesi yapılmadan önceki durumdan çok farklılık göstermez.

- Bina yükünden dolayı oluşan deformasyonları azaltmak için zemin enjeksiyonu geogride göre daha etkilidir.
- Tünelin başarılı olarak Avusturya yöntemi ile inşa edilebilmesi için itinalı ve eksiksiz bir geoteknik ve jeolojik araştırma programının uygulanması gerekmektedir.
- Yeni Avusturya Tünel İnşa yöntemi değişen zemin koşullarına kolay adapteolan bir yöntemdir. Bu yöntemde tünel cidarının bir miktar deformasyon yapmasına müsaade edilir. Bu deformasyon iksanın yapılma zamanı ve rijitliği ile ayarlanır.
- Kaya kütleindeki süreksizlik, inşaat sırasında zeminin kendini tutabilmesi ve tünel tamamlandıktan sonra duraylılığın sağlanması iksa yöntemlerinin seçiminde etkin bir rol oynamaktadır. Bu destekleme işlemleri, tünel inşa hızı ile tünel toplam maliyetine etki açısından çok büyük önem taşımaktadır.
- Tünel projesinde ilk aşamadan itibaren, yapım masraflarının artmaması ve işte gecikme olmaması için zemin suyu kontrolüne gereken önem verilmelidir.
- Tünelin inşa edileceği yer, tünel inşaatının çevre yapılarda deformasyonlar meydana getirmeyeceği şekilde tayin edilmelidir. Bunun için inşaatın yapılacağı tehlikesiz mesafeler belirlenmeli, çalışmalar bu esaslar doğrultusunda yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Sandstrom, G.E.**, 1963. History of Tunnelling, Barrie and Rockliff, London
- [2] **Erguvanlı, K.**, 1984. Mühendislik Jeolojisi Ders Konuları ve Uygulamaları, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- [3] **Halcrow, W.J.**, 1941. History of Tunnelling, Proc. I. Mech. E., 146, 100-116
- [4] **Bozkurt, M.**, 1983. Tüneller Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul
- [5] **Taşlıca, H.**, 1983. Tünel Açma Yöntemleri, Tünelcilik Semineri, Ankara
- [6] **Ertunç, A.**, Tünellerde yapılan kaya sınıflandırmaları, Tünelcilik Semineri, s.164-205, Ankara
- [7] **Müller, L., Sauer, G., Vardar, V.**, 1978, Three-Dimensional Stress Rearrangement Process in the Area of a Working Face, Rock Mechanics, Suppl, 7, 67-68
- [8] **Bulutlar, E.**, 1983. Tünel Güzergahının Seçimi ve Tünel İnşasına Kadar Yapılan Araştırmalar, Tünelcilik Semineri, s.20-38, Ankara
- [9] **Ünlütepe, A. ve Messing, M.**, 2005. Tünel Ölçme Uygulamalarında Son Yenilikler, Harita ve Kadastro Müh. Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 2. Mühendislik Ölçmeleri Komisyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [10] **<http://marmaray.com.tr>**
- [11] **Sauer, G. ve Gold, H.**, 1989. NATM Ground Concepts and their effect on Contract practices, Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Los Angeles, USA
- [12] **http://dr-sauer.com/technical_info/natm.1st/natm_write-up.art**
- [13] **İncecik, M.**, 1986. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemine Uygun Kapalama Hesapları, Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşası semineri, Adana,
- [14] **Sümerman, K.**, 1983. Tünel Stabilitesi ve İksa Yöntemleri, 206-245, Ankara
- [15] **Remzi, Ü.**, 2002. Important points to be observed in tunnel design and construction, International Conference & Exhibition on Tunnelling & Ground Space use, p.99-107, İstanbul

- [16] **Berilgen, M.**, 1996. Ankrajlı Perdelerde Zemin Yapı Etkilerinin incelenmesi, *Doktora Tezi* Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [17] **Kılıç, H.**, 2000. Yumuşak Zeminler Üzerine Oturan Dolgu Barajlarda Deformasyonların Nümerik ve Deneysel Yöntemler ile Belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [18] **Geogrup İnşaat A.Ş.**, 2004. Plaxis ile Hesaplamalı Geoteknik Kursu, İstanbul
- [19] **Gallavresi, F.**, 1992. Grouting Improvement of Foundations Soil' Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Special Publication, ASCE, s,1-39
- [20] **Bell, F.G.**,1993. Engineering Treatment of Soils, E&FN SPON, London
- [21] **Warner, J., ve Brown, D.R.**, 1974. Planning and Performing Compaction Grouting, Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Cilt 100, No.GT6, S.653-666
- [22] **Özalay, M.**, 1997. Yumuşak Zemin üzerine inşa edilen Dolguların Geotekstil ile Güçlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [23] **Whittaker, B.N. ve Frith, R.C.**, **1990**. Tunneling Design Stability and Construction, PP.199-228
- [24] **Bahar, M.A.**, 1994, Tünellerde Ön Araştırma, Zemin İyileştirmesi ve Stabilitate Analizleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul
- [25] **Erdemgil, M.**, 1986. Tünelcilikte Dondurma Yöntemi, Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşası 11. Bölüm, Adana
- [26] **Ischy, E. Ve Glossop, R.**, 1962. An introduction to Alluvial Grouting, Proc. Inst.Civ.Engr., 21, pp. 449-474
- [27] **Tunçdemir, F.**, 2004. Temel Zeminlerinin Enjeksiyon Tekniği ile İyileştirilmesi, *Türkiye Mühendislik Haberleri* Sayı 430, Ankara
- [28] **Weissbach, G. Erdoğan A.**, 1986. İnşaat Yöntemlerine Bağlı olarak Sonlu Elemanlar Metodu ile Yapılan Tünel Hesapları, Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşası Semineri D.S.İ., Cilt II, 15, Adana
- [29] **Karadoğan, F. Ve Yasa B.**, 1986. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Tünel Hesabı, Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşası Semineri, D.S.İ., Cilt II 27, Adana
- [30] **Töremiş, İ.**, 2003. Geotekstiller ve Plaxis Sonlu Elemanlar Programı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

- [31] **Boulanger, R.W. ve Hayden R.F.**, 1995. Aspects of Compaction Grouting of Liquefiable Soil, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Cilt 106, No.GT7, S.803-815
- [32] **Raabe, E.W.**, Esters, K., 1990. Soil Fracturing Technics for Terminating Settlements and Restoring Levels of Buildings and Structures, Ground Engineering, s.33-45
- [33] **Rawlings, G.C.**, Helliwell, E.E. ve Kilkenny, W.M., 1998. CIRIA Report CP/56 Mart 1998- Grouting for Ground Engineering
- [34] **Durgunoğlu, H.T.**, 2004. Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul
- [35] **Rafle, J.F. ve Greenwood, D.A.**, 1961. The Relation Between The Rheological Characteristics of Grouts and Their Capacity to permeate soil, Proc.Int.Conf.on Soil Mech.and Field Eng., Vol 2, 289-293

ÖZGEÇMİŞ

Derya OSMANOĞLU 17 Ekim 1977’de İstanbul’da doğdu. 1995 yılında İstek Özel Uluğ Bey Lisesi’ni bitirdikten sonra 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü tamamlayarak İnşaat Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Ardından inşaat sektöründe çalışmaya başladı. 2003 yılından itibaren İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Yüksek Lisans Programında eğitim hayatına devam etmektedir.