

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ DEPREM MÜHENDİSLİĞİ VE AFET  
YÖNETİMİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜNEL TASARIMINA ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Onur Efe HEPBOSTANCI**

**Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Anabilim Dalı**

**Deprem Mühendisliği Programı**

**MART 2017**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ DEPREM MÜHENDİSLİĞİ VE AFET  
YÖNETİMİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜNEL TASARIMINA ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Onur Efe HEPBOSTANCI  
(501091273)**

**Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Anabilim Dalı**

**Deprem Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Turgut ÖZTÜRK**

**MART 2017**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501091273 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Onur Efe HEPBOSTANCI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "TÜNEL TASARIMINA ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Turgut ÖZTÜRK** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Doç. Dr. Mustafa GENÇOĞLU** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Sıddık ŞENER** .....  
Bilgi Üniversitesi

**Teslim Tarihi**      : 27 Mart 2017  
**Savunma Tarihi**    : 13 Nisan 2017





*Oğluma,*





## **ÖNSÖZ**

Yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını esirgemeyip bilgi ve deneyimleri ile her konuda destek olan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Turgut Öztürk'e teşekkür ederim.

Mart 2017

Onur Efe HEPBOSTANCI  
(İnşaat Mühendisi)





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
SEMBOLLER .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY .....	xxvii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	4
1.2 Yararlanılan Yayınlar.....	4
<b>2. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>7</b>
2.1 Delme ve Patlatma Yöntemi .....	7
2.2 Aç-Kapa Yöntemi .....	8
2.3 Makine Kazısı .....	8
2.4 Diğer Yöntemler .....	13
<b>3. TÜNELLERİN HESAP YÖNTEMLERİ .....</b>	<b>15</b>
3.1 Kaya Yüğü Sınıflandırmaları .....	16
3.1.1 Terzaghi Sınıflandırması.....	17
3.1.2 RQD Sistemi (Kaya Kalite Tayini).....	17
3.1.3 Q sistemi .....	18
3.1.4 RMR (Rock Mass Rating) Kaya Kütle Sınıflandırması.....	24
3.2 Sınıflandırma Yöntemlerinin Değerlendirilmesi ve Tasarım.....	26
3.3 Ampirik Yöntemler .....	28
3.4 Analitik Yöntemler .....	31
3.5 Sayısal Yöntemler .....	36
3.6 Depremin Tünele Etkileri.....	42
<b>4. TÜNEL HASARLARI VE ONARIM .....</b>	<b>47</b>
4.1 Hasarların İncelenmesi.....	47
4.2 Hasar Tipleri .....	55
4.3 Enjeksiyon ile Onarım .....	59
4.4 Hasarların Sınıflandırılması ve Onarım Önerileri.....	65
<b>5. TÜNEL ZEMİN YAPI ETKİLEŞİMİ .....</b>	<b>67</b>
5.1 Plaxis Programı ve Hesap Modelinin Kurulması.....	67
5.2 Modelleme parametreleri ve hesap aşamaları .....	73
5.3 Hesap sonuçları .....	80
<b>6. SONUÇLAR .....</b>	<b>113</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>117</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>121</b>



## KISALTMALAR

<b>FHWA</b>	: Federal Highway Association
<b>WMATA</b>	: Washington Metropolitan Area Transit Authority
<b>NATM</b>	: New Austrian Tunneling Method
<b>RQD</b>	: Rock Quality Designation
<b>RMR</b>	: Rock Mass Rating
<b>RSR</b>	: Rock Structure Rating
<b>ESR</b>	: Excavation Support Ratio
<b>SRF</b>	: Stress Reduction Factor
<b>ÖNORM-B</b>	: Österreichische Normen
<b>TBM</b>	: Tunnel Boring Machine
<b>GSI</b>	: Geological Strength Index
<b>(DL)</b>	: Zati Yükler (Dead load)
<b>(LL)</b>	: Hareketli Yükler (Live load)
<b>(I)</b>	: Çarpma Yüğü (Impact)
<b>(CF)</b>	: Merkezkaç Kuvveti (Centrifugal force)
<b>(RF)</b>	: Demeraj Kuvveti (Rolling force)
<b>(LF)</b>	: Fren Kuvveti (Longitudinal braking and tractive force)
<b>(B)</b>	: Yeraltı Suyunun Kaldırma Etkisi (Buoyancy)
<b>(FL)</b>	: Taşkınlar (Flood)
<b>(S)</b>	: Büzülme Etkileri (Shrinkage force)
<b>(T)</b>	: Isı Etkileri (Thermal force)
<b>(E)</b>	: Yatay Toprak Basıncı (Horizontal earth pressure)
<b>(EQ)</b>	: Deprem Kuvvetleri (Earthquake force)



## SEMBOLLER

<b>t</b>	: Zaman.
<b>u</b>	: Yer değiştirme vektörü bileşenleri.
<b><math>\alpha</math></b>	: Asal gerilme doğrultusundan sapma açısı.
<b><math>\rho</math></b>	: Yoğunluk.
<b><math>\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}</math></b>	: Kabuk iç gerilmeleri.
<b>E</b>	: Elastisite modülü (GPa).
<b><math>\nu</math></b>	: Poisson oranı.
<b><math>P_{cr}</math></b>	: Kritik destek basıncı.
<b><math>P_0</math></b>	: Hidrostatik basınç
<b><math>\sigma_v</math></b>	: Düşey basınç gerilmesi (MPa).
<b><math>\sigma_h</math></b>	: Yatay basınç gerilmesi (MPa).
<b><math>\sigma_{cm}</math></b>	: Kaya kütesinin tek eksenli basınç dayanımı.
<b><math>\phi</math></b>	: Kaya kütesinin içsel sürtünme açısı.
<b><math>GSI_r</math></b>	: Artık jeolojik dayanım indeksi.
<b><math>\sigma_{ci}</math></b>	: Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa).
<b><math>\beta</math></b>	: Lineer ısı genleşme katsayısı ( $8 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ).
<b>G</b>	: Jeotermik gradyan ( $0.024 \text{ }^{\circ}C/m$ ).
<b><math>\mu</math></b>	: Kaya kütesinin poisson oranı.
<b>H</b>	: Örtü yükü kalınlığı (m).
<b><math>E_m</math></b>	: Kaya kütesinin deformasyon modülü (GPa).
<b>GSI</b>	: Jeolojik dayanım indeksi.
<b>D</b>	: Örselenme faktörü.
<b><math>M_i</math></b>	: Kaya malzemesi sabiti.
<b><math>\gamma</math></b>	: Zeminin birim hacim ağırlığı $kN/m^3$ .
<b>M</b>	: Moment $kNm/m$
<b>N</b>	: Normal Kuvvet $kN/m$
<b>Q</b>	: Kesme Kuvveti $kN/m$ .





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3.1 : Terzaghi'nin Kaya Kütle Sınıflandırması .....	17
Çizelge 3.2 : Q sisteminde RQD parametresinin sınıflandırması [8]. .....	18
Çizelge 3.3 : Q sisteminde $J_n$ parametresinin sınıflandırması [8]. .....	19
Çizelge 3.4 : Q sisteminde $J_r$ parametresinin sınıflandırması [8]. .....	19
Çizelge 3.5 : Q sisteminde $J_a$ parametresinin sınıflandırması [8]. .....	20
Çizelge 3.6 : Q sisteminde $J_w$ parametresinin sınıflandırması [8]. .....	21
Çizelge 3.7 : Q sisteminde a. durumu için SRF parametresinin sınıflandırması [8].	21
Çizelge 3.8 : Q sisteminde b durumu için SRF parametresinin sınıflandırması [8].	22
Çizelge 3.9 : Q sisteminde ESR değeri [8]. .....	23
Çizelge 3.10 : RMR sınıflandırma parametreleri ve dereceleri (A) [2]. .....	25
Çizelge 3.11 : RMR sınıflamasında süreksizlik yönelimleri için düzeltmeler (B)[2]	26
Çizelge 3.12 : (A) ve (B)'den elde edilen RMR değerleri ve kaya sınıfları [2]. .....	26
Çizelge 3.13 : Destek Sistemleri İçin İterasyon Tablosu [27]. .....	26
Çizelge 3.14 : Terzaghi'nin kaya yükü sınıflandırmasına göre kaya yükleri. ....	29
Çizelge 3.15 : RMR destek tasarımı çizelgesi [2] .....	30
Çizelge 3.16 : Jeolojik dayanım indeksi (GSI) [2]. .....	38
Çizelge 3.17 : Kaya kütlelerinin deformasyon modülü formülleri [27]. .....	38
Çizelge 4.1 : Halka enjeksiyonu karışım içeriği. ....	61
Çizelge 4.2 : Halka Enjeksiyonu deney parametreleri. ....	61
Çizelge 4.3 : Muhtemel hasarlar ve onarım yöntemleri. ....	66
Çizelge 5.1 : Modellerde tanımlanan zemin parametreleri. ....	75
Çizelge 5.2 : Modellerde tanımlanan betonarme kaplama ve temel malzemeleri. ....	76



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: Ülkemizdeki karayolu tünelleri [19].	2
Şekil 1.2: Tünel Kesitleri [24].	3
Şekil 2.1: Del patlat yöntemi delgi işlemi [27].	7
Şekil 2.2: Aç Kapa yönteminde kazı aşamaları [14].	8
Şekil 2.3: Toprak basınç dengeli kalkan (EPB) tipi bir TBM diyagramı [25].	9
Şekil 2.4: Sert Kaya İçin tasarlanmış TBM [25].	10
Şekil 2.5: Sert kırıklı kaya için tasarlanmış TBM [25].	10
Şekil 2.6: Kesici disk [25].	10
Şekil 2.7: Yumuşak Zemin için geliştirilmiş TBM, kazıcı kol ve ayarlanabilir parmak yüzü kalkan [25].	11
Şekil 2.8: Karışık yüzü TBM [25].	11
Şekil 2.9: İngiliz kanalı yapımında kullanılan TBM'in çift kalkandan toprak dengeli basınç kalkanına (EPB) dönüşümü [25].	12
Şekil 2.10: Yumuşak Zemin TBM'inin kesici kafası [25].	12
Şekil 2.11: Tünel açma yöntemlerinin maliyet-uzunluk grafiği [12].	13
Şekil 2.12: Baker yamacında çoklu geçiş ile açılan otoyol tüneli en kesiti [25].	14
Şekil 3.1: Destek sistemi değerlendirilmesi [14].	24
Şekil 3.2: Avrasya tüneli tasarım detayları [6].	27
Şekil 3.3: Terzaghi'nin kaya yükü kavramı (Terzaghi, 1946) [5].	28
Şekil 3.4: Destek yapısı-zemin etkileşimi [15].	31
Şekil 3.5: Aç kapa yöntemi ile açılan tünelde durağan zemin yükleri [5].	35
Şekil 3.6: Boru şeklinde bir kesitte ortaya çıkan kesit zorları [5].	36
Şekil 3.7: ITA alternatif düzlem gerilim modeli [17].	39
Şekil 3.8: Sonlu Eleman Yöntemi ile desteksiz tünel açıklığı etrafında gelişecek en büyük asal gerime dağılımlarının belirlenmesi [3].	40
Şekil 3.9: Sonlu Eleman Yönteminde 2 boyutlu ve 3 boyutlu elemanlar [26].	40
Şekil 3.10: Plaxis programında kullanılan 2 boyutlu elemanlar [23].	41
Şekil 3.11: Cisim ve yüzey dalgalarının oluşturduğu birim yer değiştirmeler [4].	43
Şekil 3.12: Cisim ve yüzey dalgalarının oluşturduğu eğrilik [4].	43
Şekil 3.13: Deprem dalgaları ve zeminde oluşturduğu etkiler [4].	44
Şekil 3.14: Deprem dalgalarının oluşturduğu birim yer değiştirmeler [22].	45
Şekil 4.1: Betonarme prekast bölütlerin taşıyıcıya yüklenmesi [22].	47
Şekil 4.2: Betonarme prekast bölütlerin yüklenmesi sırasında ortaya çıkan hasar...	48
Şekil 4.3: Yapım aşamasında sıralanmış bölüt üzerinde ortaya çıkan çatlaklar [13].	48
Şekil 4.4: Yapım aşamasında sıralanmış bölüt üzerinde ortaya çıkan çatlakların analizi [13].	49
Şekil 4.5: Tünellerde deprem nedeniyle ortaya çıkan hasarlar [4].	50
Şekil 4.6: a) Wenchuan depreminde gözlenen ters jeolojiden kaynaklı tünel hasarı b) hasar mekanizması [30].	51
Şekil 4.7: a) Wenchuan depreminde gözlenen portal hasarı b) hasar mekanizması [30].	51
Şekil 4.8: a) Wenchuan depreminde şevde kaya düşmesi, b) kaya kayması [30].	52

<b>Şekil 4.9:</b> a) Wenchuan depreminde fay düzleminde kayma nedeniyle oluşan hasarlar, b) hasar mekanizması [30].	52
<b>Şekil 4.10:</b> Bolu Tüneli'nde fay geçiş bölgesinde sismik bağlantı detayı [28].	53
<b>Şekil 4.11:</b> Wenchuan depremi sonrası Longxi Tünel'inde ortaya çıkan çatlaklar ve kırıklar [28].	53
<b>Şekil 4.12:</b> Wenchuan depreminde Longxi tünel portalında ortaya çıkan çatlaklar ve kırıkların yük mekanizması [28].	54
<b>Şekil 4.13:</b> Wenchuan depreminde Longxi tünel tabanında yükselmenin oluşması ve numerik modeli [28].	54
<b>Şekil 4.14:</b> Sıvılaşma durumu için kuvvet gösterimi	55
<b>Şekil 4.15:</b> Destek yapısı üzerinde oluşan hasar tipleri	56
<b>Şekil 4.16:</b> Kimyasal enjeksiyon için kullanılan enjektör.	57
<b>Şekil 4.17:</b> Çatlak üzerine yerleştirilen enjektörler.	57
<b>Şekil 4.18:</b> Onarılması gereken köşe kırığı örneği.	58
<b>Şekil 4.19:</b> Köşe kırığının onarım aşamaları.	58
<b>Şekil 4.20:</b> Halka enjeksiyonu gösterimi.	59
<b>Şekil 4.21:</b> Betonarme prekast parça A22 ve A62 üzerinden birim şekil değiştirmelerin klasik enjeksiyonlu ve sıkışabilir enjeksiyonlu durumlar için ölçümlerinin karşılaştırması. [31]	60
<b>Şekil 4.22:</b> 5x5 küp numuneleri ( 2 adet 1 günlük, 2 adet 28 günlük, 2 adet yedek).	61
<b>Şekil 4.23:</b> Karot başlığı ile halka içinden alınan enjeksiyon ve beton örnek.	62
<b>Şekil 4.24:</b> 40 mm çaplı Enjektör yerleştirilen yerlerden biri.	63
<b>Şekil 4.25:</b> Dolgu enjeksiyonunun uygulanması.	64
<b>Şekil 4.26:</b> Öncül enjeksiyon uygulaması gösterimi.	64
<b>Şekil 5.1:</b> Plaxis programında kullanılan giriş elemanlar [23].	68
<b>Şekil 5.2:</b> Plaxis programı Project Properties menüsü.	69
<b>Şekil 5.3:</b> Plaxis programı Boreholes menüsü.	71
<b>Şekil 5.4:</b> Plaxis 2d programı Input modülünün modelleme aşamaları.	71
<b>Şekil 5.5:</b> Oluşturulan modelin mesh elemanlarının kalitesi.	72
<b>Şekil 5.6:</b> Phases menüsünün görünümü.	73
<b>Şekil 5.7:</b> a) Tünel kesitinin CAD modeli. b) Tünel kesitinin geometrik detayları.	76
<b>Şekil 5.8:</b> Tünel 5 metre derinliğinden geçmesi durumu için ağ eleman modeli.	77
<b>Şekil 5.9:</b> Tünel 5 m derinliğinden geçmesi durumu 1.aşama-kazı aşaması.	79
<b>Şekil 5.10:</b> Tünel 5 m derinliğinden geçmesi durumu 7.aşama-Temel ve 15 katlı bina yapımı aşaması.	80
<b>Şekil 5.11:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 5.aşamada ağ modeli.	81
<b>Şekil 5.12:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 5.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.	81
<b>Şekil 5.13:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 6.aşamada oluşan ağ modeli.	82
<b>Şekil 5.14:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 6.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.	82
<b>Şekil 5.15:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7.aşamada oluşan ağ modeli.	83
<b>Şekil 5.16:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.	83
<b>Şekil 5.17:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 5.aşamada ağ modeli.	84

<b>Şekil 5.18:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 5.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.....	<b>84</b>
<b>Şekil 5.19:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 6.aşamada ağ modeli. ....	<b>85</b>
<b>Şekil 5.20:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 6.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.....	<b>85</b>
<b>Şekil 5.21:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7.aşamada ağ modeli. ....	<b>86</b>
<b>Şekil 5.22:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.....	<b>86</b>
<b>Şekil 5.23:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 5.aşamada ağ modeli. ....	<b>87</b>
<b>Şekil 5.24:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 5.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.....	<b>87</b>
<b>Şekil 5.25:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 6.aşamada ağ modeli. ....	<b>88</b>
<b>Şekil 5.26:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 6.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.....	<b>88</b>
<b>Şekil 5.27:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7.aşamada ağ modeli. ....	<b>89</b>
<b>Şekil 5.28:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.....	<b>89</b>
<b>Şekil 5.29:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 5.aşamada ağ modeli. ....	<b>90</b>
<b>Şekil 5.30:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 5.aşamada düşey yer değiştirmeler. ....	<b>90</b>
<b>Şekil 5.31:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 6.aşamada ağ modeli. ....	<b>91</b>
<b>Şekil 5.32:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 6.aşamada düşey yer değiştirmeler. ....	<b>91</b>
<b>Şekil 5.33:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7.aşamada ağ modeli. ....	<b>92</b>
<b>Şekil 5.34:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7.aşamada düşey yer değiştirmeler. ....	<b>92</b>
<b>Şekil 5.35:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 5.aşamada ağ modeli. ....	<b>93</b>
<b>Şekil 5.36:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 5.aşamada düşey yer değiştirmeler.....	<b>93</b>
<b>Şekil 5.37:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 6.aşamada ağ modeli. ....	<b>94</b>
<b>Şekil 5.38:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 6.aşamada düşey yer değiştirmeler.....	<b>94</b>
<b>Şekil 5.39:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7.aşamada ağ modeli. ....	<b>95</b>
<b>Şekil 5.40:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7.aşamada düşey yer değiştirmeler.....	<b>95</b>
<b>Şekil 5.41:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 5.aşamada ağ modeli. ....	<b>96</b>
<b>Şekil 5.42:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 5.aşamada düşey yer değiştirmeler.....	<b>96</b>

<b>Şekil 5.43:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 6.aşamada ağ modeli. ....	<b>97</b>
<b>Şekil 5.44:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 6.aşamada düşey yer değiştirmeler.....	<b>97</b>
<b>Şekil 5.45:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7.aşamada ağ modeli. ....	<b>98</b>
<b>Şekil 5.46:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7.aşamada düşey yer değiştirmeler.....	<b>98</b>
<b>Şekil 5.47:</b> Grovak parçalı kil zeminde A ve B ray üstü noktalarında oluşan düşey yer değiştirmeler. ....	<b>99</b>
<b>Şekil 5.48:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde A ve B ray üstü noktalarında oluşan düşey yer değiştirmeler. ....	<b>100</b>
<b>Şekil 5.49:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri. ....	<b>103</b>
<b>Şekil 5.50:</b> Tünel kesitini tarayan $\theta$ açısının gösterimi.....	<b>103</b>
<b>Şekil 5.51:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri. ....	<b>104</b>
<b>Şekil 5.52:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan normal kuvvet değerleri. ....	<b>104</b>
<b>Şekil 5.53:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan kesme kuvveti değerleri.....	<b>105</b>
<b>Şekil 5.54:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri. ....	<b>105</b>
<b>Şekil 5.55:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan normal kuvvet değerleri.....	<b>106</b>
<b>Şekil 5.56:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan kesme kuvveti değerleri.....	<b>106</b>
<b>Şekil 5.57:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri. ....	<b>107</b>
<b>Şekil 5.58:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan normal kuvvet değerleri.....	<b>107</b>
<b>Şekil 5.59:</b> Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan kesme kuvveti değerleri.....	<b>108</b>
<b>Şekil 5.60:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri. ....	<b>108</b>
<b>Şekil 5.61:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan normal kuvvet değerleri.....	<b>109</b>
<b>Şekil 5.62:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan kesme kuvveti değerleri.....	<b>109</b>
<b>Şekil 5.63:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri. ....	<b>110</b>
<b>Şekil 5.64:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan normal kuvvet değerleri. ....	<b>110</b>
<b>Şekil 5.65:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan kesme kuvveti değerleri.....	<b>111</b>
<b>Şekil 5.66:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri. ....	<b>111</b>
<b>Şekil 5.67:</b> Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan normal kuvvet değerleri.....	<b>112</b>

**Şekil 5.68:** Az ayrıışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan kesme kuvveti değerleri..... **112**







## TÜNEL TASARIMINA ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ

### ÖZET

Tünellerin tasarımı için zemin koşullarına, kullanım amacına ve imalat tekniklerine bağlı olarak ortaya çıkabilecek faktörler göz önünde bulundurularak farklı yaklaşımlar ve yöntemler geliştirilmiştir. Bunları kullanarak ülkemizde ve dünyada toplumsal refah seviyesini arttıracak yapılar inşa edilmiş ve devreye alınmıştır. Dünya nüfusunun hızla artışı göz önüne alındığında bu yapılara olan ihtiyacın günden güne artacağı kolayca tahmin edilecektir. Tünellerin tasarımının daha doğru olarak gerçekleştirilmesi için tasarımda göz önünde bulundurulması gereken faktörlerin gerçeğe yakın bir şekilde ele alınması, yapının inşa edileceği zemin hakkında yeterli araştırma yapılması büyük önem taşımaktadır.

Tünellerin yapımında kullanılan betonarme elemanların geometrisi ve üretim yöntemleri tünel açma yöntemlerine göre değişiklikler göstermektedir. Ekonomik koşullar dikkate alınarak bu yöntemlere tasarımcı tarafından karar verilmektedir. Fakat yapım aşamaları içerisinde dikkate alınmayan sebepler ile hem yapım süresi gecikmekte hem de onarım masrafları ortaya çıkmaktadır. Yapıda onarım yapmak zorunda kalınmaktadır ve onarılmış bir yapı doğru yapılmış bir yapıdan daha maliyetli ve daha güvensiz olmaktadır. Hataların en aza indirilmesi amacıyla tasarım süreci yapımın tamamını kapsamalı, tüm parametrelerin doğru değerlerle ele alınması gerekmektedir. Bu amaçla bu yayında tasarım aşamaları, bu aşamaların yürütülmesi, ortaya çıkabilecek hatalar üzerinden değerlendirmeler sunulmaya çalışılmıştır. Tüneller metro yapıları olarak yaygınlaştıkça şehirlerde yapı tünel etkileşimli problemler de artmaktadır. Hesap aşamasında tünel üzerine yapılacak bir yapının tünelde meydana getireceği etkiler incelenecektir.

Birinci bölümde tünellerin kullanım amaçları, ülkemizde yapılan tüneller incelenmiştir. Tünel açma yöntemlerine ve kullanım amacına göre değişen tünel kesitleri verilmiştir. Tünel tasarımı konusunda günümüze kadar yapılmış ulusal ve uluslararası başlıca çalışmalar incelenmiştir. İkinci bölümde farklı tünel açma yöntemlerine göre tasarım ve üretimin nasıl şekillendiği özetlenmiştir. Bu bölümde del patlat yöntemi, aç kapa yöntemi, mekanize tünel açma yöntemleri ve diğer yöntemlerden bahsedilmiştir. Tünellerin yapım amaçlarına göre hangi yöntemin daha uygun olacağına dair fikirlere yer verilmiştir. Farklı zemin koşullarında tünel açılması amacıyla üretilmiş tünel açma makinelerinden örneklerle yer verilmiştir. Üçüncü bölümde ise tasarımın konusu olan destek yapısı hesabının hangi yöntemler ile yapıldığı, hesap aşamasında gerekli olan bilgiler ortaya konulmuştur. Tünel projesinin oluşturulması ve yapım aşamasında tasarımın gözden geçirilmesi amacıyla yapılması gereken proje adımlarından bahsedilmiştir. Günümüze kadar olan süreçte kullanılan sınıflandırma yöntemleri incelenmiş ve bu yöntemlere ait sınıflandırma tabloları verilmiştir. Sınıflandırma tablolarından elde edilen parametreler ile destek yapısının belirlenmesine ait çalışmalar verilmiştir. Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi açıklanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan örnek çalışmalar ve modeller incelenmiştir. Bu modellerde oluşan destekli ve desteksiz tünel açma aşamalarının

hesap sonuçlarındaki yük dağılımları ortaya konulmuştur. Dördüncü bölümde Makine kazısı sırasında ortaya çıkmış kafes (truss) kuvvetinin sebebiyet verdiği destek yapısı hasarları incelenmiştir. Yapım aşamasında ortaya çıkan hasarlardan bahsedilmiştir. Hesaplarda tünel zemin modeli haricinde dikkate alınması gereken ve hasarların oluşmasına sebebiyet veren yapım aşamalarından bahsedilmiştir. Deprem durumuna bir örnek olan Wenchuan depreminin meydana getirdiği hasarlar incelenmiştir. Tünelde ortaya çıkması muhtemel hasarlar ve bu hasarlar için uygulanabilecek onarım yöntemleri verilmiştir. Tünel kaplamasında meydana gelebilecek hasarlar destek yapısının beton hasarları, kullanımı etkileyen hasarlar, taban yüzeyinin hasarları gibi çeşitli kusurlar olarak oluşabilmektedir. Gözlemler sonucunda, destek yapılarında çeşitli çatlakların meydana geldiği tespit edilmiştir. Türk Standardında [TS500] bu çatlaklar 0.3mm'de sınırlandırılmıştır. Fakat belirtilen mertebenin tünel destek yapısında elde edilebilmesi için dış basıncın tüm tünel yapısına dağılımı ve denge durumunun sağlanması gerekmektedir. Bu durumun çeşitli nedenlerle sağlanamadığı, zeminin değişken yapısı ve yapım yöntemlerinin etkisi gözlemlenmiştir. Kaplamalarda üretim, taşıma, yerleştirme ve diğer yapım aşamalarında dahi çatlakların oluşabildiği gözlemlenmiştir. Günümüzde hasarların giderilmesi amacıyla kimyasal ürünler ile çözümler üretilmektedir. Bu ürünlerin uygulanması için yapılması gerekenler ve nerelerde uygulanabileceğine dair öneriler sunulmuştur. Yapım aşamasında olan bir tünelde yapılan enjeksiyon ve onarım uygulaması verilmiştir. Tünel yapısını destekleyebilecek ve tünel açılmasında zemin koşullarını iyileştirerek daha uygun koşullarda tünel açılmasına müsaade edecek olan öncül enjeksiyon yöntemi incelenmiştir.

5. bölümde Plaxis programından yararlanılarak zemin içerisine mevcut tünel olması durumunda yüzeyde yapılan yapının tünelin konumuna dayalı olarak ve farklı zemin koşullarında tünel içerisinde meydana getireceği taban deformasyonu değişimi irdelenmiştir. Trakya formasyonuna ait olan grovak parçalı kil ve az ayrılmış grovak zeminlerde, tünel örtü kalınlığının 5, 10 ve 15 metre olduğu yapıyı tamamlanmış, Kartal –Kadıköy metro hattı projelerinde A1 kesiti ile verilen mekanize açılmış tünel üzerine yapılan 5, 10 ve 15 katlı bir yapının tünel kaplamasında oluşturacağı etkiler hesaplanmıştır. Hesaplarda ray üstü düşey yer değiştirmeleri ve tünel kaplaması kesit tesirleri elde edilerek elde edilen değerler irdelenmiştir. Tünel örtü kalınlığına bağlı olarak iki farklı zemin tipinde yapı yapılması durumunda ortaya çıkacak düşey yer değiştirmelere ait bağıntılar elde edilmiştir. Bu bağıntıların hesabı için ray üstü noktalarında elde edilen meydana gelecek düşey deformasyonun sonuçları yapım zamanı ile ilişkilendirilerek eğriselleştirilmiştir. Hesaplar 7 aşamada gerçekleştirilmiştir. 5. aşama, 6. aşama ve 7. aşamalar tünel-yapı etkileşimini ele almaktadır. Bu aşamalarda üçer adet nokta olmak üzere iki hesap için toplam 6 adet nokta tespit edilmiştir. Bu noktaların birbiriyle ilişkili olan her üçünden geçen eğrinin bağıntısı yazılarak grovak parçalı kil zemin ve az ayrılmış grovak zeminde 5 metre ile 15 metre arasında iki adet bağıntı önerilmiştir. Fakat düşey yer değiştirmelerin belirlenmesi için kesin hesap yapılması gerekmektedir.

Sonuçlar kısmında, tünel tasarımının yapılması sırasında ek kazı yükleri, elemanların taşınması sırasında oluşan yükler gibi ön koşulların da iyi bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu durumlara özgün, bölütlerin korunmasını amaçlayan donatım sistemlerinin ve ek detayların düşünülmesi gerekmekte olduğu belirtilmiştir. Yapım aşamalarının detaylı bir şekilde ele alınarak her aşamada kullanılacak olan makine, donanım ve diğer etkenlerin tünel kaplamasına olan etkisi değerlendirilmelidir. Tasarım aşamasının tünel yapımı boyunca devam etmesi gerektiği ortaya konulmuştur.

Ortaya çıkabilecek hasarların önlenmesi özellikle zeminin farklı yüklerinin tünel kaplaması üzerinde ortaya çıkaracağı farklı yük ve yer değiştirmelerin tünele etkisinin azaltılması ile mümkün olmaktadır. Bu amaçla tünel kaplaması arkasına yapılacak enjeksiyon harcının sıkışabilir tipte olmasının faydalı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tünel destek yapısı ile zemin arasına enjeksiyon uygulanarak zeminin kendi içinde kenetlenmesi ve farklı yük dağılımlarının engellenmesi sağlanarak tünel iç yüzeyinde meydana gelecek hasarlar önemli ölçüde azaltabilir. Tünel kaplaması arkasından gelen suyun engellenmesi için sırasıyla enjeksiyon harcı ve daha sonra kimyasal birleşimler kullanılması önerilmiştir. Tünel-yapı etkileşimi incelendiğinde grovak parçalı kil zeminlerde, az ayrılmış grovak zemine oranla daha yüksek kesit tesirleri ve ray üstü yer değiştirmeleri meydana geldiği görülmüştür. Tünel örtüsünün 10 metreden daha az olması durumunda ray üstü yer değiştirmeleri 1 cm değerini geçmektedir. Tünel örtüsü arttıkça düşey yer değiştirmelerin azalması eğrilerden elde edilen eğimler incelendiğinde 5 metre örtü kalınlığına sahip iken grovak parçalı kil zeminde kat sayısı ile orantılı olarak negatif yönde arttığı elde edilmiştir. Aynı zeminde 10 metre ve 15 metre örtü kalınlıklarında düşey deformasyonun eğiminin kat sayısına bağlı olarak negatif yönde azaldığı tespit edilmiştir. Az ayrılmış grovak zeminde 5 metre örtü kalınlığında düşey yer değiştirmelerin yapının yapım sürecinde eğiminin arttığı gözlenirken 10 metre ve 15 metre örtü kalınlıklarında artış azalışların çok daha düşük değerlerde meydana geldiği gözlenmiştir.



# **INVESTIGATION OF THE FACTORS AFFECTING DESIGN OF TUNNEL STRUCTURES**

## **SUMMARY**

In many places of the world tunnels are playing an essential role. Tunnels can connect two points directly under the ground. This feature makes tunnels unique. If we generalize the main uses of tunnel structure, tunnels can be designed for Electrical-mechanical works, transportation, irrigation, drainage, service or military purposes etc. Design methods of tunnel structures vary. New approaches are including more information about the geological details and the effective forces. Many structures have been designed by using these methods.

This study will investigate the different methods and the details of the design impact and how it is getting addressed in the design. Tunnel lining damages, the possible causes and damage mechanisms are investigated. The precautions and advices are explained. Tunnel structure resists to earth and water pressure, also the excavation machine pressure and vibrations. During the transportation to destination tunnel parts can be damaged. These damages or cracks can be visible or invisible but under loading conditions it has been observed that damages are getting more visible.

To prevent damage mechanisms precautions must be unique for tunnel design. Loading on the segment plate's start at early stages and the compaction injection plays key role to minimize any damage.

The geometry and production methods of the reinforced concrete elements used in the construction of tunnels vary according to the tunneling methods. The designer considering the economic conditions decides these methods. However, due to reasons not considered during the construction phases, the construction period is delayed and repair costs arise. It is forced to make repairs in the structure and a repaired structure is more costly and unsafe than a properly constructed structure. To minimize errors, design process should cover all parameters with correct values. For this purpose, in this publication, the design phases, the execution of these phases, the evaluations based on the errors that can occur are tried to be presented. As tunnels become more prevalent as subway structures, problems related to building tunnel interactions are also increasing in cities. In the last part, the effects that will be on the tunnel will be examined.

In the first part, the purpose of the tunnels and the tunnel made in our country are examined. Tunneling methods and tunnel sections varying according to the purpose of use are given. The main national and international studies on tunnel design have been studied up to date. The second section summarizes how the design and production are shaped according to different tunneling methods. In this section, drill and blast method, open cover method, mechanical opening method and other methods are mentioned. Some ideas about which method would be more suitable for the purposes of production of the tunnels are given. Examples of the tunneling machines that produced for tunneling under different ground conditions are given. In the third part, the support

structure account which is the subject of the design is provided with the necessary information in the account phase. The project steps that must be done to create the tunnel project and visualize the design during construction phases are mentioned. Classification methods used in the process up to the sun are examined and classification tables of these methods are given. The parameters obtained from the classification tables and studies on the determination of support structure are given. This section describes the finite element method. Model studies and model studies with finite element method have been investigated. The load distributions of the results of calculations of supported and unsupported tunnel opening stages in these models are presented. In the fourth chapter, damage of supporting structure caused by truss caused by machine excavation is investigated. Damage that occurred during the construction phase is mentioned. The calculations mention the construction steps that should be considered except for the tunnel floor model and which cause damage to occur. Damage caused by Wenchang earthquake, an example of an earthquake, has been investigated. Possible damages to be found in the tunnels and repair methods which can be applied for these damages are given. Damage that may occur in tunnel walls may be caused by various defects such as concrete damage, damage affecting the use, damage to the floor surface. Because of observations, it has been found that various cracks occur in support structures. In the Turkish Reinforced Concrete Code [TS500] these cracks are limited to 0.3mm. However, to be able to obtain the specified order at the tunnel support structure, it is necessary to distribute the external pressure to the entire tunnel structure and to provide the equilibrium state. The effect of the variable structure of the ground and the construction methods, which this condition cannot be achieved for various reasons, has been observed. It has been observed that cracks can occur in the linings even during production, transportation, installation and other construction stages. Nowadays chemical products and solutions are being produced to eliminate the damages. Suggestions on how to apply these products and where to apply them are presented. Injection and repairs were made in a tunnel in construction phase. The ground an injection body is built up in front of the tunnel face using injection drills through the cutter head and the shield method which can support the tunnel construction. This method will allow the tunnels to be opened in more favorable conditions by improving the ground conditions.

In the fifth section, using the Plaxis program, in case of existing tunnel inside the soil, the change of the base deformation due to the construction of the tunnel based on the position of the tunnel and in the tunnel under different soil conditions is examined. Tunnel cover thickness of 5, 10 and 15 meters was completed in the greywacke clay and lowly dispersed greywacke soils belonging to the Trakya formation. Tunnels of 5, 10 and 15 stories made on the tunnel opened by the A1 section of Kartal-Kadıköy metro project. The effects that will occur in the lining are calculated. In the calculations, the values obtained by obtaining the vertical deformation on the rail and the sectioning effects of the tunnel lining were examined. According to the tunnel cover thickness, the correlations of the vertical deformations that would occur in case of construction in two different soil types were obtained. The results of the vertical deformation on the rafts obtained at the rail points for these relational accounts are curved in relation to the construction time. The calculations were carried out in 7 stages. Phase 5, Phase 6 and Phase 7 address the tunnel-structure interaction. At these stages, a total of 6 points were determined for the two accounts, including three points. The relationship of these three points to each other is suggested, and two correlations between 5 meters and 15 meters are proposed in the greywacke clay soil and the slightly separated greywacke soil. However, a precise calculation is required to

determine vertical deformations. In the conclusion, preliminary conditions such as additional excavation loads during loading of the elements, loads during the movement of the elements should be evaluated well in the tunnel design. In these cases, it is stated that the original equipment, the equipment systems aiming to protect the seats and additional details should be considered. The effects of the machinery, equipment and other factors to be used at each stage on the tunnel lining should be evaluated, considering the construction steps in detail. It has been demonstrated that the design phase should continue throughout the tunnel construction. Prevention of damage that may occur is possible by reducing the tunneling effect of different loads and deformations, which will occur especially on the tunnel lining of different loads of the soil. For this purpose, it has been determined that it is beneficial for the injection mortar to be made of a compressible type behind the tunnel lining. In addition, by injecting between the tunnel support structure and the soil, the soil can be clamped and different load distributions can be prevented, which can significantly reduce damages on the inner surface of the tunnel. It has been proposed to use injection mortar and then chemical compounding to prevent excessive water behind the tunnel lining, respectively. When the tunnel-structure interaction is examined, it is seen that in clay soils with greywacke fragments, higher cross-sectional effects and over-rail deformations occur compared to less-diffused greywacke floors. If the tunnel cover is less than 10 meters, the on-rail deformations exceed 1 cm. As the tunnel cover increases, the vertical deformation decreases. When the slopes obtained from the curves are examined, it has a cover thickness of 5 meters, whereas the clay layer with greywacke clay has increased in the negative direction in proportion to the number of floors. It has been found that the vertical slope of 10 m and 15 m of cover thickness decreases in the negative direction due to the number of coats of the same slope. It was observed that the vertical slope of the 5-meter cover thickness of the greywacke soil was slightly increased, while the increase in the 10-meter and 15-meter cover thicknesses occurred at much lower values.





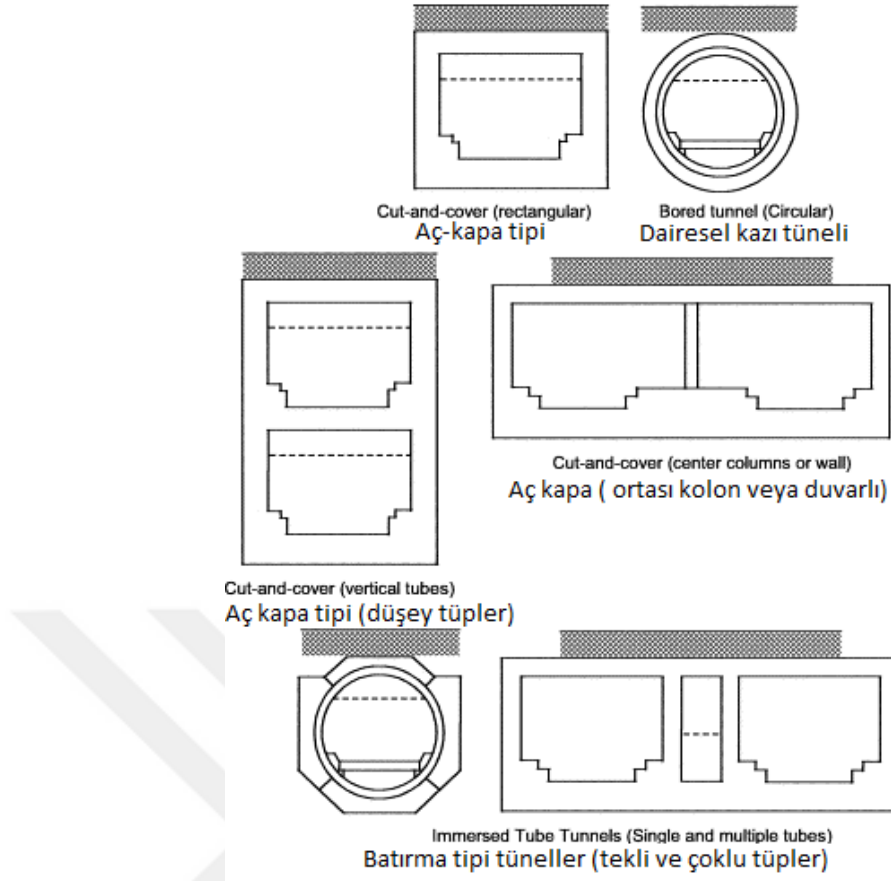
## 1. GİRİŞ

Tüneller geçmişten günümüze medeniyetlerin refah seviyesini artırma konusunda önemli rol oynayan yapılardır. Kullanım amaçları ulaşım, su getirme ya da götürme, sığınak, depo gibi farklılıklar gösterebilmektedir. Tüneller iki bölgeyi birbirine dış etkenlerden izole bir yapı ile bağlar ve bu bağlama yapısı içerisinde farklı madde, taşıt veya insan transferinin sağlanmasına olanak tanır. Yapım yöntemleri boyutlar, ekonomik ve çevresel faktörler göz önüne alındığında farklılıklar göstermektedir. Kazı yöntemlerini aç-kapa, del-patlat, makine ile tünel açma olarak sıralayabiliriz. Bu yöntemlere yönelik tünel destek yapıları değişiklik göstermekle beraber ihtiyaç duyulan detaylar ve üretim akışı değişmektedir. Bu yöntemlerde ortaya çıkacak sınır kuvvetler, çevresel etkenler tarafından belirlenmektedir. Bu etkenleri sıralayacak olursak sismik etkenler, ısı etkenler, yapı yerleşimi ve kazı bölgesine olan uzaklıkları, zemin rejiminin taşıyıcılığı, yeraltı su seviyesi, tünel yapım sürecinde meydana gelen hasarlar ve tasarım hataları akla gelmektedir. Bu tezin amacı tasarıma etkili faktörleri inceleyerek tünellerin tasarımında çeşitli unsurların ne kadar etken olduğunu ve sınır durumların belirlenmesini incelemek ve ortaya çıkacak hasarların nasıl minimize edilebileceğini ele almaktır. Tüneller karayolu, yaya yolu, kanal metro gibi yol veya hatların bir kısmı veya tamamının yerüstünden geçmesinin mümkün olmadığı veya ekonomik bulunmadığı durumlarda yapılan sanat yapılarıdır [8]. Türkiye’de metro, baraj yapıları, karayolları ve demiryollarının bağlanması gibi çeşitli amaçlara hizmet eden birçok tünel yapılmıştır. Ülkemizdeki karayolları üzerinde bulunan tünellerin haritası Şekil 1.1’de verilmiştir. Günden güne yeni tünel projeleri de hayata geçirilmektedir. En son yapılan tünellere Avrasya Tüneli bir örnektir. Günümüzde tünel yapılarının tasarımları yapılırken sayısal modellemelerden yararlanılarak hesaplamalar yapılırken, tünel güzergâhının jeolojik yapısı göz önünde bulundurulmaktadır. Tünele etkiyecek zemin etkileri yıllardır süregelen çalışmalar ile ele alınmaktadır. Zemin yapısının değerlendirilmesi geçmişten günümüze elde edilen tecrübeler ve birtakım kabullere dayanmaktadır.



**Şekil 1.1:** Ülkemizdeki karayolu tünelleri [19].

Tünel kesitleri yapım yöntemi ve ihtiyaçlara göre değişmektedir. Bunları gösteren kesitler Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Tünel kesitinin değişmesine bağlı olarak zemin içerisindeki yapısal davranış farklılık göstermektedir. Bu farklılıklara bağlı olarak tünel çeperlerindeki tepki basıncı dağılımı değişecek şekil değiştirme mekanizması değişecektir. Tünel kesitinin yanı sıra tünel yapısının içinde bulunduğu zeminin sertliği ve göçme mekanizması da bu davranış biçiminde etken bir yapı oluşturur. Bu yapılar ilerdeki bölümlerde değinilecektir. Genel olarak zemin içerisinde kenetlenme oluşması esas ile tünellerin açıldığı söylenebilir. Bu esas sağlamayan zemin koşullarında tünel yapım yöntemleri ve destek mekanizmaları oldukça farklılık gösterdiği gibi yapım maliyetleri de bunlara göre değişmektedir. Aç kapa tipi kesitlerde yapım aşamasının sıralı olmasından dolayı kutu tipi kesitler tercih edilirken mekanize kazılarda kazıcı makinenin şekline bağlı olarak daha çok dairesel kesitler tercih edilmektedir. Öte yandan del patlat, YATAY-yeni Avusturya tünel açma yöntemi gibi yöntemlerde kullanım amacına ve zemin yapısına bağlı olarak farklı kesitler kullanılabilir. Marmaray projesinde olduğu gibi deniz tabanına batırma tüp yöntemiyle yerleştirilen tünellerde kesit detayları yapım yönteminin gereksinimlerine bağlı olarak değişebilmektedir. Tünellerin açılma yöntemleri tünel projesinin uzunluğuna zeminin yapısına göre değerlendirilir. Proje koşullarına en uygun yöntemin seçilmesi durumunda yapım süresi ve toplam maliyetler ciddi ölçülerde azaltılabilir. Zemin içinde öngörülemeyen durumlar da ortaya çıkabilir, bu durumlarda problemin çözümü amacıyla tünel açma yöntemi ve tünel kesitleri değiştirilebilir.



**Şekil 1.2:** Tünel Kesitleri [24].

Ülkemizde karayolu, demiryolu ve su tünelleri olmak üzere çeşitli tüneller yer almaktadır. Aktif olarak hepimiz tüneller ile karşılaşmaktayız. Tüneller günlük hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olmuştur ve olmaya devam edecektir. Ulaşım amacı ile kullandığımız tüneller gibi atık suyun uzaklaştırılması, mekanik ve elektriksel bağlantıların yapılması gibi nedenler ile tüneller yapılmaktadır. İşletme amacına bağlı olarak tünel yapılarındaki gereksinimler değişmekte ve buna göre yapısal tasarım parametreleri çeşitlenmektedir. Tünel tasarımına etki eden her türlü istenmeyen durum hasar olarak nitelendirilebilir. Bu duruma örnek verecek olursa tünelin su almasını söyleyebiliriz. Tünel tasarımına etki eden bu faktörlerin ve tünel için öngörülen tasarım yöntemlerini ele alarak ortaya çıkmış hasarları incelenerek hasarların onarılma yöntemlerinden bahsedilecektir. Hesap aşamasında tünel yapı zemin etkileşimi incelenerek farklı zemin tiplerinde tünel üzerine yapı yapılması sonucu tünel üzerinde meydana gelecek etkiler incelenecektir. Tüneller günümüzde şehir içinde önemli bir ulaşım ağı olan metro olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu metro hatları ağlar halinde tüm şehre yayılmakta dolayısıyla yapılaşma olan bölgelerde etkileşim önem kazanmaktadır.

## 1.1 Tezin Amacı

Bu tez kapsamında tünellerde sınır koşullarının oluşmasında etkili olan durumları gözden geçirmek suretiyle ortaya çıkan kapasite aşımı durumları için getirilebilecek önlemlerin belirlenmesi ve tünellerin yapı etkileşiminin örnek bir hesap ile incelenmesidir. Tünellerin yapı ve tasarım yöntemleri incelenecek, yapı ve servis süresinde ortaya çıkan hasarlar değerlendirilecek muhtemel hasarlar belirlenerek onarım yöntemleri önerilecektir. Tezin amacı tasarıma etki eden faktörlerin ortaya çıkmış hasarlar ve nedenleri üzerinden değerlendirilmesi ve farklı teoriler ile yapılmış yaklaşımlardan günümüzde kullanılan yazılımlara kadar yapılan modellemelerin esaslarının incelenmesidir. Tünellerin yapı ve sonrasında ortaya çıkması muhtemel hasarların belirlenmesi ve bu hasarlar için kullanılacak onarım ve güçlendirme yöntemlerinin önerilmesidir. Ayrıca bu tez kapsamında gevrek zemin içerisinde farklı derinliklerden geçmekte olan tip kesitli bir tünellerin örneklerinden yararlanılarak ortaya çıkacak deformasyon ve tünellerin kaplamasının içsel kuvvetleri hesaplanacaktır. Hesabın amacı elde edilecek verilerin karşılaştırılarak aynı zemin içerisinde oluşacak yer değiştirmelerin değişimine ait bir bağıntı elde edilmesidir. Buradan hareketle tünellerin zemin yapı etkileşiminin incelenerek tüneller üzerine yapılacak yapıların tünellerle olan etkilerinin incelenmesidir.

## 1.2 Yararlanılan Yayınlar

Tezin hazırlanması sırasında Arıoğlu, E.'nin TMMOB tarafından yayınlanan Arıoğlu, E., Yılmaz, A. O. (2006) "Yeraltı Mühendislik Yapılarına Deprem Etkileri" [4] ve Arıoğlu, E., Yılmaz, A. O. (2000) "Çözümlü Problemlerle Tüneller/Galerilerin –Sismik Analizi" [5] kitaplarından hem örnek olarak hem de sismik analiz konusunda yararlanılmıştır ve Arıoğlu, E. (2015) YTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü Tüneller Dersi, "Bölüm 6' Tünellerin Sismik Tasarımına Giriş" [28] ders notlarından sismik tasarım ve deprem etkileri konusunda yararlanılmıştır. Bu yayınlarda tünellerde sismik etkilerin incelenmesi ve yayınlarda bahsi geçen tünellerin tasarımına etki eden faktörler incelenmiştir. Tünellerin tasarımının uluslararası normlara göre kriterlerinin ele alınmasında FHWA ve ITA şartnamelerinden yararlanılmıştır. Tünellerin hesaplanmasına ait formüller ve kabullerde Hoek, E. & Marinos, P. (2007) yayınından yararlanılmıştır [16]. Tüneller-zemin etkileşimine örnek hesap çalışması olarak, Alemdağ, S., Kaya, A., Karadağ, M., Gürocak, Z., & Bulut, F. (2013) yayınından

yararlanılmıştır [3]. Arıoğlu, B., Gökçe, H. B., Malcıoğlu, F. S., Arıoğlu, E. (2016) yayınında detayları verilen Avrasya TBM Tüneli örneği incelenmiştir, tünel kaplamasına ait tasarım kriterlerine tezde yer verilmiştir [6]. Bamford, W.E. (1987) çalışmasında kaya zemin parametrelerinin elde edilmesiyle ilgili inceleme yapılmıştır [7]. Tezde bu yayında bahsedilen TBM seçiminde dikkate alınacak parametrelere yer verilmiştir. Barton N., Lien R., Lunde J. (1974) kaya kütle sınıflandırması ve kalite tayini incelenmiştir [8]. Bu yayında bahsedilen tünel destek sisteminin seçimi için kullanılan kalite tayini yöntemine tezde yer verilmiştir. Bieniawski, Z. T. (1989) yayınında kaya kütle tayini sistemi anlatılmıştır. Yayında yer alan kaya kütle tayinin ile ilgili çizelgeler tezde kullanılmıştır ve kaya kütle tayininden bahsedilmiştir [9]. Focaracci, A. (1998) kazı yüklemelerinden ve yapım aşamasında oluşan çatlaklarla ilgili araştırmalar incelenmiştir [13]. Tezde yapım aşamasında oluşan hasara ait yapılan sonlu eleman hesabına yer verilmiştir. Grimstad, E., & Barton, N. (1993)'de Q sistemi ile ilgili bilgiler incelenmiştir [14]. Sistemin güncellemesi niteliğinde olan değerler bu yayından alınmıştır. Hoek, E., & Marinos, P. (2007) ile Hoek tarafından ortaya atılan kırılma kriteri formüllerinin gelişimi incelenmiştir [16]. Bu yayında Hoek, E. tarafından kaya kırılma kriteri formüllerinin yapılan yayınlara göre tarihsel evrimi verilmiştir. Hoek, E. (1999) Destek yapısının tayini ile ilgili araştırma incelenmiştir [15]. Bu yayında bahsedilen tünel-zemin etkileşiminde tünel yapısının davranış modeli ve kritik basıncın hesabına tezde yer verilmiştir. Ptilakis, K. & Tsinidis, G. (2013) yayınından sismik analiz ve örnek hesaplar konusunda incelemeler yapılmıştır [22]. Deprem nedeniyle tünelde oluşması öngörülen birim yer değiştirmelerin verildiği modele tezde yer verilmiştir. Power, M.S., Rosidi, D., Kaneshiro, J. (1996) Tünel kesitleri ve tünel tasarımının gelişimi konusunda incelemeler yapılmıştır [24]. Bu yayında verilen tünel kesiti örneklerine tezde yer verilmiştir. Sinha, R. S. (1991) Underground Structures: Design and Construction, kitabından hem tünel açma yöntemleri hem de kullanılan hesap yöntemleri ile ilgili incelemeler yapılmıştır [25]. Tezde bu yayında bahsedilen tünel açma yöntemleri, bu yöntemlerin karşılaştırılması ve mekanize tünel yöntemlerinde kullanılan makineler hakkında açıklamalara ve şekillere yer verilmiştir. U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration (2009). Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements yayınından tünel tasarımıyla ilgili konular incelenmiştir [27]. Tezde bu yayında bahsedilen tünel açma yöntemleri, tasarım yöntemlerinin açıklamalarına yer verilmiştir. Wang, Z. Z., Zhang, Z. (2012)

yayınında verilmiş Longhxi tüneline meydana gelen hasar mekanizmaları incelenmiştir [30]. Tezde bu yayında incelenen hasarlara, bu hasarların oluşma mekanizmalarına yer verilmiştir. Wang, J.-N. (1993) yayında sismik tasarım ve yük kombinasyonları incelenmiştir [29]. Tezde bu yayında bahsedilen esneklik katsayısına deprem durumunda öngörülen yükleme kombinasyonlarına yer verilmiştir. Zghondi, J., Carraretto, S., Noiret, A., & Armand, G. (2015) yayında kazı boşluğuna uygulanan enjeksiyonun erken yükleme evresinde tünel kaplaması üzerinde oluşturduğu etkileri incelenmiştir [31]. Tezde yayında yapılan ölçümlerden elde edilen birim yer değiştirmelerin değerlerine yer verilmiştir. Ayrıca tezde yapılan hesaplarda Plaxis 2d 2016 programı kullanılmıştır. Programın kullanılmasında ve tezde hesapların açıklanmasında Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., & Swolfs, W. M. (2014). Plaxis 2014 yayından yararlanılmıştır [23].

## 2. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

Tünellerin açılmasında günümüze kadar farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerin zemin ile etkileşimi sonucunda yapım aşamaları ve ilerleme süreleri değişiklik göstermektedir. Tünel açma yöntemleri incelenirken sıklıkla uygulanan yöntemler ele alınmıştır. Zemin koşullarına bağlı olarak farklı yöntemler geliştirilmeye, kullanılan makine ve ekipmanlar kazı yöntemine ait parametreler hakkındaki bilgilerin artmasıyla daha pratik, daha etkili tasarlanmaktadır. Bu da yöntemleri daha etkili hale getirmektedir.

### 2.1 Delme ve Patlatma Yöntemi

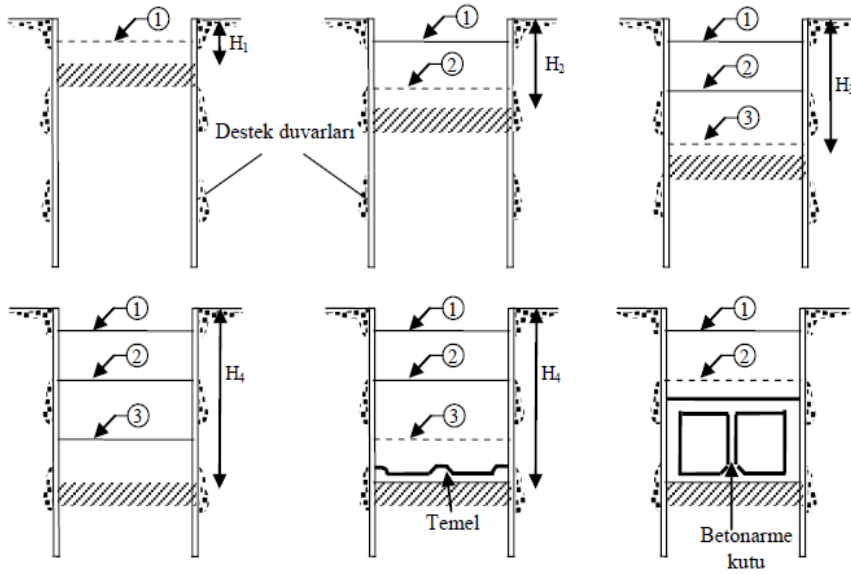
Teknolojik gelişmeler ile oldukça gelişmiş ve kayalık zeminlerin açılmasında oldukça etkili bir yöntemdir [25]. Küçük kesitli tünellerde bütün yüz bir adımda patlatma ile geçileceği gibi kaya zemin koşullarına bağlı olarak kazı aynası kademelere ayrılarak geçilebilmektedir. Bu yöntemin temel adımları delme, yükleme, patlatma ve havalandırma, boyutlandırma ve güçlendirme olarak özetlenebilir. Tünel delinmesi delici makinalar ile yapılabilmektedir, örnek bir yerleştirme Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1: Del patlat yöntemi delgi işlemi [27].

## 2.2 Aç-Kapa Yöntemi

Aç-kapa (Cut and Cover) yöntemi tünelin yumuşak zeminde hendek kazısı yapılmak suretiyle yapımı gerçekleştirilmesinden sonra kapatılması olarak düşünülebilir [25]. Aç kapa yönteminde tünelin yapılacağı bölgede yerleşim olamaması durumunda yatırım maliyetinin düşüklüğüne göre düşünülebilir. Karma zeminlerde kazı stabilitesi ihtiyacına göre destek yapıları gerekebilir. Bu durumlarda enjeksiyon uygulamaları, zemin güçlendirme çalışmalarına başvurulabilmektedir. Kazı aşamaları Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2: Aç Kapa yönteminde kazı aşamaları [14].

## 2.3 Makine Kazısı

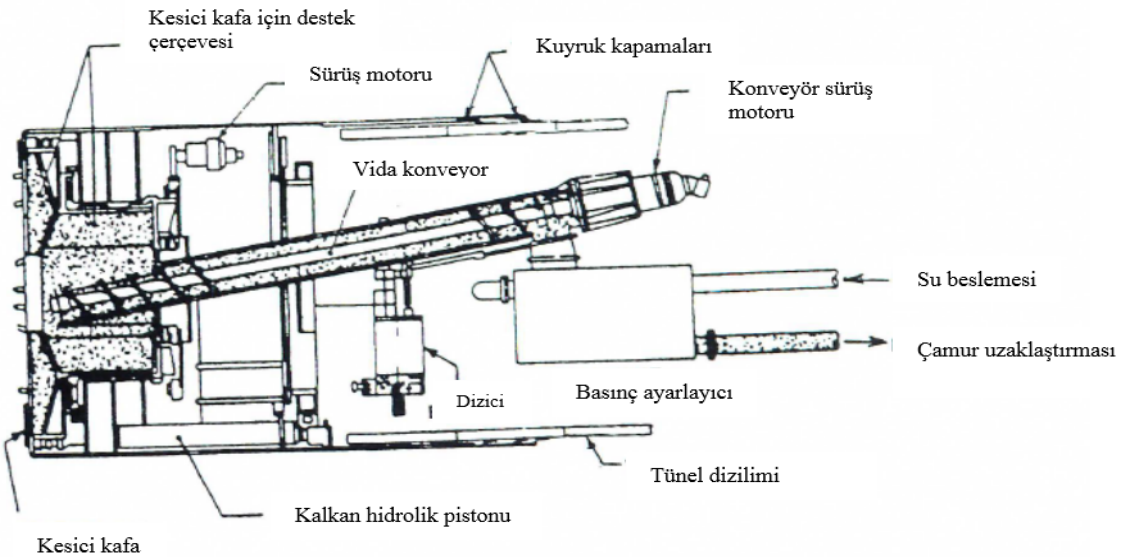
Tünel açmada mekanize kazı sistemlerinin kullanılmasıdır. İlk yatırım maliyetinin yüksek olmasına karşın tünel boyuna bağlı olarak ekonomik olmaktadır. Tünel kazma makineleri TBM (Tunnel Boring Machine) olarak adlandırılırlar. Makine seçimi zemin formasyonu, kesit geometrisine, maliyet analizlerine dayanır. Tam cepheli makineler kullanıldığı gibi kısmi cepheli makinelerde kullanılabilir. Tünel açma makinesinin tasarımı ve kesici kafa seçimi zemine tünel kesitine göre değişiklik gösterir.



Tünel açılacak formasyona uygun makine tasarımı olmaması durumunda makinenin tünelden çıkarıldığı, performans düşüklüğünün ortaya çıkmasından dolayı yüklenici ve işveren arasında hukuki anlaşmazlıkların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir [12].

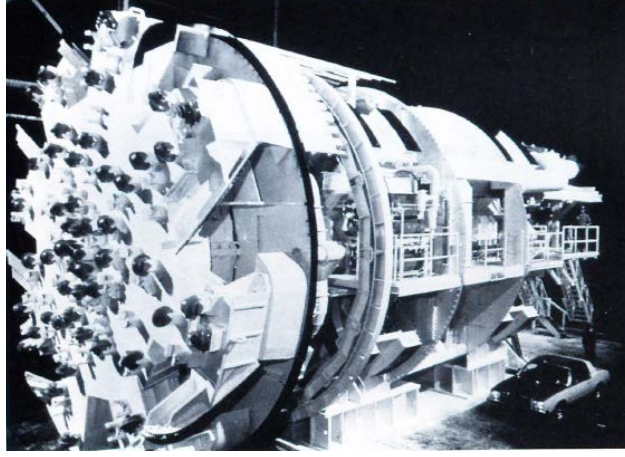
Tünel açma makinesinin seçiminde dikkat edilecek kriterleri Uluslararası Kaya Mekaniği Cemiyeti ISRM şöyle tanımlamıştır [7]. a) Kayaçların basınç, çekme ve kesme dayanım özellikleri. b) Kayaçların aşındırıcılık özellikleri. c) Kırılgenlik ve dayanım özellikleri. d) Yerinde yapılan kazılabilirlik deneyleri. e) Laboratuvarda yapılan kesme deneyleri. Bu kriterlerdeki amaç zeminin kesilmesi ve pasa oluşumu için öngörülerde bulunarak formasyona uygun tasarımın yapılmasıdır.

TBM'ler belli kısımlardan oluşmaktadır. Bu kısımların her biri farklı görevler üstlenir. TBM kısımlarının diyagram biçiminde Şekil 2.3'de verilmiştir [25].

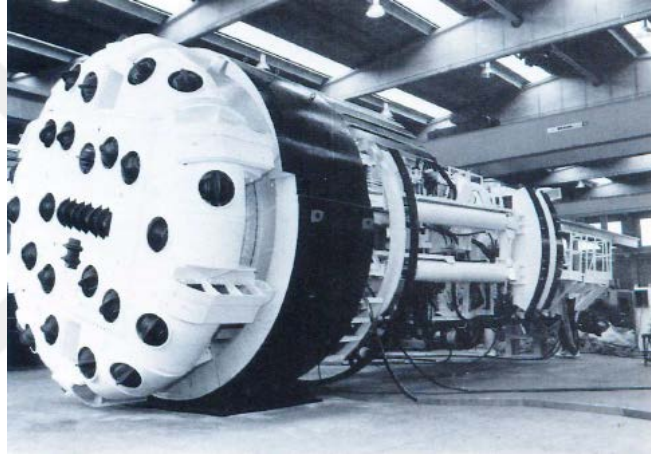


**Şekil 2.3:** Toprak basınç dengeli kalkan (EPB) tipi bir TBM diyagramı [25].

TBM önündeki kısma kesici kafa ismi verilir burada zemin kesme ve toplama işlemleri yapılarak kafa içerisinden kazı artıkları uzaklaştırılır. Bu bölümde güçlü motorlar ile dönme sağlanarak zemin kazma işlemi gerçekleştirilirken ilerleme için gerekli olan itki kaplama üzerine basan itici pistonlar ile sağlanır. Bu işlemler kazının ilerleme hızı ile doğrudan ilişkili olduğundan maliyetler buradaki kuvvet sistemiyle ilişkilidir. Kazı yapılacak zemin tiplerine göre farklı tasarımda TBM'ler üretilmektedir. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'de Sert Kaya için üretilmiş olan TBM fotoğrafları verilmiştir.

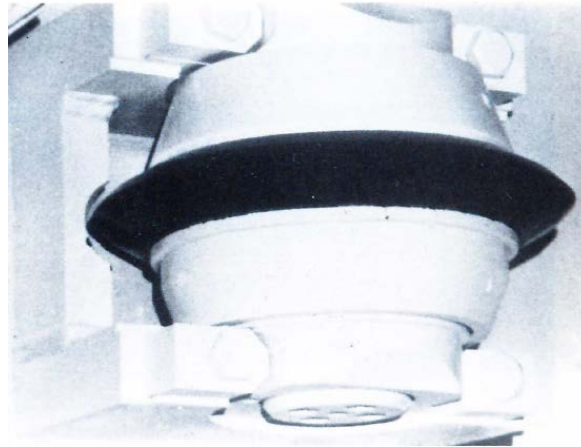


**Şekil 2.4:** Sert Kaya İçin tasarlanmış TBM [25].



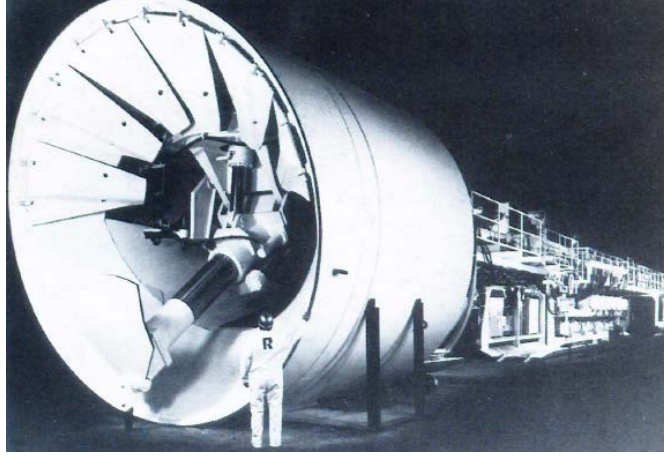
**Şekil 2.5:** Sert kırıklı kaya için tasarlanmış TBM [25].

TBM kesici kafasında zeminin kesilerek kazı aynasından indirilmesinin sağlayan USNC/TT tarafından üretilmiş bir kesici disk'e ait fotoğraf Şekil 2.6'da verilmiştir.

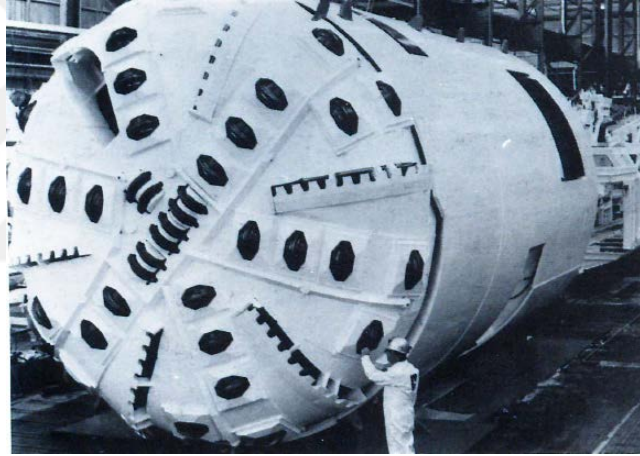


**Şekil 2.6:** Kesici disk [25].

Şekil 2.7’de yumuşak zemin için geliştirilmiş, Şekil 2.8’de karma zemin için geliştirilmiş TBM fotoğrafları verilmiştir.

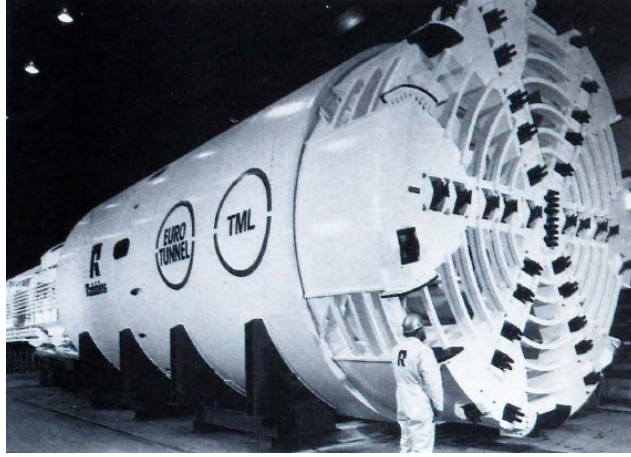


**Şekil 2.7:** Yumuşak Zemin için geliştirilmiş TBM, kazıcı kol ve ayarlanabilir parmak yüzü kalkan [25].

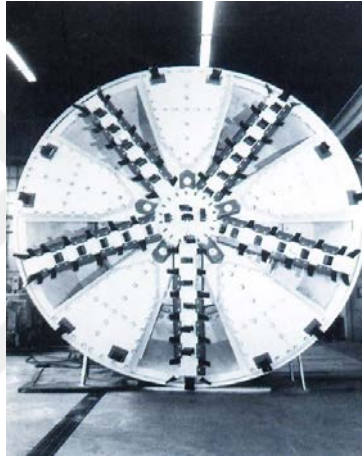


**Şekil 2.8:** Karışık yüzü TBM [25].

İngiliz kanalının açılmasında kullanılan çift kalkanlı TBM’in The Robins şirketi tarafından yapılmış dönüşüm işlemine ait fotoğraf Şekil 2.9’da verilmiştir. Şekil 2.10’da yumuşak zeminlerde kazı yapmak için geliştirilmiş TBM fotoğrafı verilmiştir.



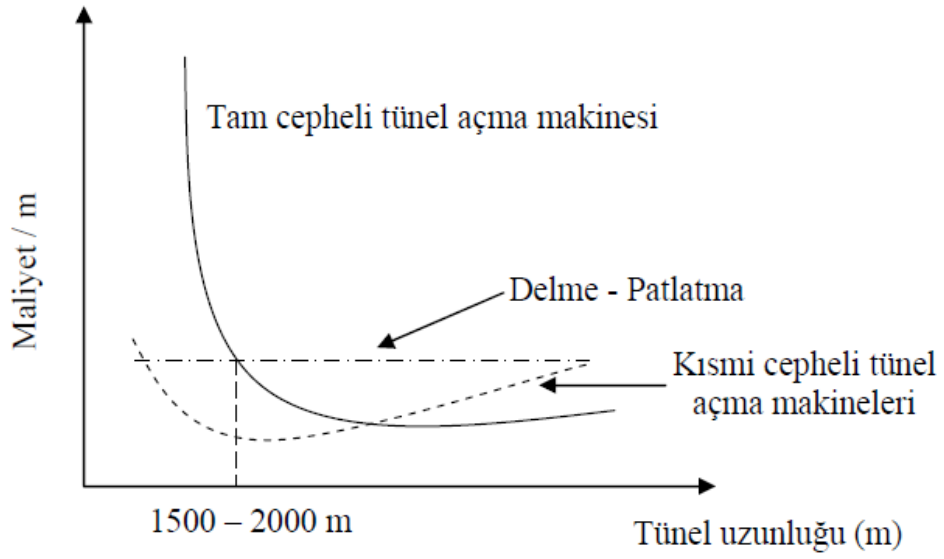
**Şekil 2.9:** İngiliz kanalı yapımında kullanılan TBM'in çift kalkandan toprak dengeli basınç kalkanına (EPB) dönüşümü [25].



**Şekil 2.10:** Yumuşak Zemin TBM'inin kesici kafası [25].

TBM çeşitleri zeminin cinsine göre değiştiği gibi kullanılan destek yapısının tasarımı, kenetlenme mekanizması da değişiklik gösterecektir. Ayrıca zemin kazısına bağlı olarak kesici kafanın oluşturacağı kuvvetlerde değişecektir. Burada önem arz eden bir konu tünel dizilimine kuvvet aktaracak mekanizmanın homojen kuvvet aktarımını sağlayacak bir biçimde tasarlanmasıdır. Aksi takdirde düzlem dışı kuvvet aktarımı tünel destek yapısının hasar görmesine neden olabilir.

Tünel kazısının makine tasarımı karşısında maliyet açısından değerlendirilmesi, tünel açma makinelerinin maliyet analizine göre delme-patlatma yöntemi ile karşılaştırılması Şekil 2.11'de verilmiştir.



**Şekil 2.11:** Tünel açma yöntemlerinin maliyet-uzunluk grafiği [12].

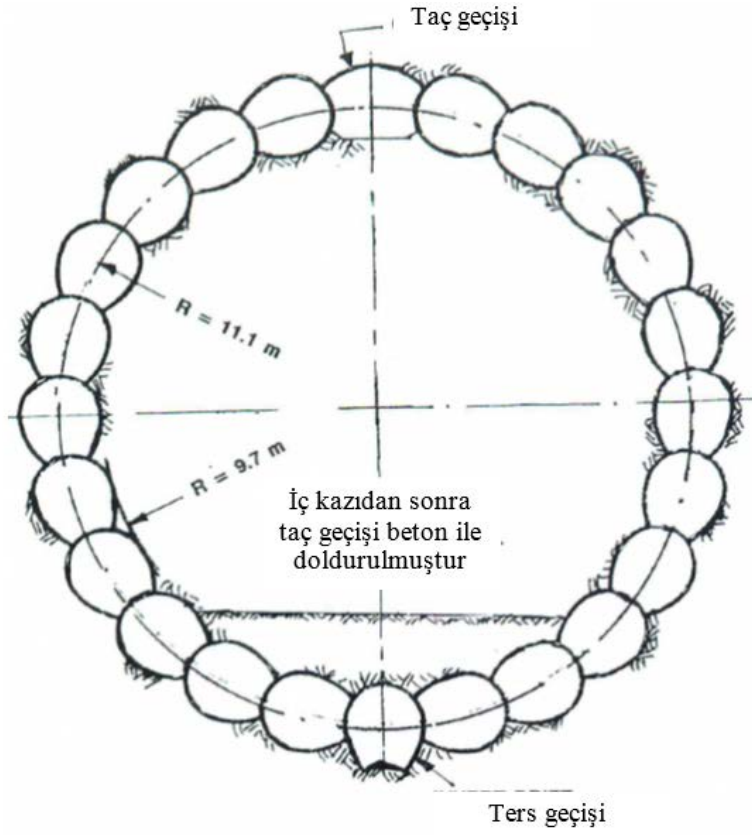
Tünel açma makinelere kesici dizilimleri, sayısı ve kova (bucket) arası mesafelerine zeminin cinsine göre karar verilir. Ayrıca tünel açılmasında dış ortam basıncına göre farklı yöntemler uygulanır. Yer altı suyunun tünel kazısının ilerlemesine mani olacak bir basınç ortaya getirdiği durumlarda pistonlara gelen basıncın azaltılması amacıyla kafaya basınçlı hava verilmesi buna örnektir. Kazı yapılacak ortamın basınç, sıcaklık, nem oranı değerleri çeşitli yöntemlerle kontrol altında tutularak kazının uygun koşullarda yapılması sağlanmaya çalışılır.

#### 2.4 Diğer Yöntemler

Tünel yapılarının oluşturulması için zeminin kazılması, desteklenmesi ilkelerinin sağlandığı farklı yöntemler izlenebilmektedir. Bu yöntemler NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi), batırma tıp yöntemi, multi drift (çoklu geçiş), slurry shield (basınçlı çamur verilmesi yöntemi), earth pressure balance shield (EPB olarak bilinen kafanın basınç izolasyonu ilkesine dayanır), compressed air (basınçlı hava marifetine dayanır), heading and bench tunnelling (parçalı kazı esasına dayanır), earth boring and pipe jacking (kaz ve destekle olarak bilinen) olarak belirtilebilir.

Tünel açılmasının zor olduğu, zemin taşıma kapasitesinin düşük olduğu durumlarda tünel yapısının oluşturulmasında farklı yöntemler uygulanmıştır. Amerika'daki Baker Yamacı Otoyol Tüneli'nde yapılmış bir uygulama buna örnektir. Tünel kesiti etrafında

açılan tüneller beton ile doldurularak tünel etrafında destek sağlanmıştır. Şekil 2.12’de çoklu geçiş yöntemi (multi drift) ile açılan tünel kesiti verilmiştir.



Şekil 2.12: Baker yamacında çoklu geçiş ile açılan otoyol tüneli en kesiti [25].

### 3. TÜNELLERİN HESAP YÖNTEMLERİ

Tünellere gelen yüklerin ele alınmasında kaya mekaniğine dayalı ampirik yöntemlerin yanında gözleme ve analitik tasarım mantığına göre yöntemler de vardır. Tasarım yöntemleri bu bağlamda ele alınacak olunursa;

Ampirik tasarım yöntemleri, Kaya yükü sınıflandırması (Terzaghi), Stini, Rabcewicz ve Lauffer sınıflamaları, Deere'nin kaya kalitesi sınıflandırması, RSR (Kaya Yapısı Oranı) içeriği, Geomekanik sınıflandırma (RMR sistemi), Q Sistemi'dir.

Gözleme dayalı tasarım yöntemleri, Kaya gözlem teknikleri, YATAY (NATM), Birleşme-Hapsetme yöntemidir (Convergence-Confinement Method).

Bütünleyici tasarımlar, Alman kömür madenciliği için tabaka kontrol sistemleri, Destek sistemleri tasarımıdır.

Rehbere dayalı tasarımlar, Destek tasarımı için genel düşünülenler, Tünel tavan destek ve kömür madenciliğinde tavan destek tasarımıdır [18].

Ele alınan tasarım yöntemlerinin geliştirilmesi ve kullanılmasında multidisipliner bir çalışma gerekmektedir. Bu çalışmaya en azından, jeoloji, geoteknik mühendisliği, kazı teknolojileri (Makine Mühendisliği), destek yapılarının tasarımı ve malzemelerin uzun süreli dayanımlarının incelenmesi, kontrat ve hukuk dalları katılması gerekmektedir. Tasarım çalışmaları sonucunda oluşturulacak raporlar şu bilgileri kapsamalıdır: Jeolojik ve jeofiziksel araştırma sonuçlarını içeren jeolojik ve hidrojeolojik rapor. Saha ve laboratuvar testlerinin tünel sürecine göre yorumlamalarını, zemin ve kaya sınıflandırmaları gibi bilgileri içeren saha araştırmalarına dayalı geoteknik rapor. Güzergâh bilgisi, kesiti, drenaj, yapısal elemanların zamana dayalı çevresel etkileşimlerini içeren bilgiler. Farklı zemin koşulları ve kesitler için kazı veya delgi prosedürünün tanımlanması, yapım planı. Kazı yöntemleri için ve uygulanması düşünülen tünel destekleri için yapılan tasarımların dokümanları (Zemin ankraj sayıları ve tipleri, püskürtme beton örtüsü dayanımı, kapanma uzunluğu gibi). Tünelin yapım aşamasında izlenmesi için yapılacak saha ölçüm programı. Gerilme ve yer değiştirme analizi ve (sırasız, tek sıralı veya çift sıralı tüneller için) orta faz ve son sıraları için tünel desteğinin boyutlandırılması, su yalıtımı ve drenajının tasarımları ve

tünel elemanlarının detaylandırılmasını içeren son tasarım projesi. Kazı süresince ve kazı sonrasında yapılan ölçüm sonuçları. Tünelin yapısal güvenliği ve zemin davranışı açısından yorumları, kazı sırasında karşılaşılan problemler ve bunlara alınan önlemler, gözlem sonuçlarına göre yapılan güçlendirmeler veya destek yapısının değiştirilmesi gibi izlenen yöntemler [17].

Bu gereklilikler ışığında tünel tasarımında izlenecek yol şu şekilde belirlenebilir. İlk aşama, jeoloji aşamasıdır. Saha incelemesi, güzergâh ve yerleşimin belirlenmesi gerçekleştirilecektir. İkinci aşama geoteknik incelemeler aşamasıdır. Zeminin karakteristik değerleri belirlenecektir. Düzenlilik, gerilmeler, dayanım, su, fissür, anizotropi gibi parametreler belirlenecektir. Üçüncü aşama tecrübe ve kestirme aşamasıdır. Bu aşamada kazı yöntemi, yapısal elemanlar belirlenecektir. Dördüncü aşama mekanik modelin oluşturulması aşamasıdır. Bu aşamada statik sistem analizi yapılacaktır. Beşinci aşama güvenlik kavramı ve başarısızlık hipotezi aşamasıdır. Bu aşamada tasarım kıstasları belirlenecektir. Bu kıstaslar karşılanmaz ise bu aşamada kazım yöntemi ve yapısal elemanlar değiştirilerek dördüncü ve beşinci adımların tahkiki yapılacaktır. Altıncı aşama risk analizi aşaması olup, bu aşamada kontrata yönlendirilerek tasarım aşaması yansıtılacaktır. Altıncı aşamanın sonunda tünel kazısı başlayacak ve son aşama olan yedinci aşamaya geçilecektir. Bu aşamada Saha ölçümleri aşamasıdır. Saha ölçüm ve gözlemleri sonucunda tünel içi yer değiştirmeleri ve yüzey yer değiştirmeleri takip edilecektir. Eğer deformasyon gözlenmiyorsa tasarım güvenli kabul edilecek, aksi takdirde geoteknik inceleme aşaması olan ikinci aşamaya dönülerek sıralı aşamalar tekrarlanacaktır. Analitik tasarımın alternatifi olan kaya stabilitesini göz önünde bulundurarak destek yapısı hesabının yapıldığı kaya kütlelerinin sınıflandırılma yöntemleri alt bölümlerde özetlenmiştir.

### **3.1 Kaya Yüğü Sınıflandırmaları**

Kaya yükleri sınıflandırma şeması Dr. Karl Terzaghi tarafından 1946 yılında önerilmiştir ve diğer bilim adamları bu sınıflandırmanın ardından yeni sınıflandırmalar geliştirmiştir. Bunlardan. RQD, Q sistemi, RMR ve GSI sınıflandırmaları en yaygın kullanılanlardır. Önümüzdeki kısımlarda bu sınıflandırma sistemleri ve değerlendirilme yöntemleri açıklanacaktır.



### 3.1.1 Terzaghi Sınıflandırması

Kaya kütlelerinin sahip oldukları özellikler bakımından sınıflandırılmış ve gözlemsel olarak tablolaştırılmıştır. Çizelge 3.1’de Terzaghi’nin kaya kütle sınıflandırma sistemi tablosu verilmiştir.

**Çizelge 3.1 : Terzaghi’nin Kaya Kütle Sınıflandırması.**

<b>Kaya durumu</b>	<b>Tanımı</b>
Bozulmamış kaya	Eklem ya da ince çatlaklar barındırmaz. Kırılma Düzgün kaya üzerinden gerçekleşir. Patlatma ile kayaya zarar verildiğinde zarar görmüş patlak parçaların çatı üzerine dökülmesi saatler veya günler alabilir. Sert, bozulmamış kaya patlamış halinde diğer kaya tabakalarının üstten veya yanlardan ayrışmaları gözlenebilir.
Tabakalı kaya	Tabakalar içerir. Tabakalar arası ayrışmada dirençsiz olabilir. Enine eklemlerden dolayı tabakalar güçsüzleşme gösterebilir. Bu tip kayalarda patlama tipi dökülmeler oldukça olağandır.
Orta eklemli kaya	Eklemleri ve çatlakları vardır. Bloklar halinde katmanlar birlikte geliştiği için dikey duvarlaşmalarında yatay destek gerektirmezler. Patlama ve dökülme gözlenir.
Parçalı ve çirkin kaya	Kimyasal bozulmamış veya bozulmamış fakat tamamen birbirinden ayrılmış kayalar içerebilir. Gelişi güzel kenetlenmeler gözlenebilir. Düşey duvarlarında yatay destek gerebilir.
Kırılmış ama kimyasal bozulmamış kaya	Kırma taş benzeri karaktere sahiptir. Kum taneciği kadar ince parçalar içerse de çimentolaşma, birleşme göstermez. Su tabliyesi altında ıslak kum karakteri gözlemlenir.
Sıkışan kaya	Tünel içine algılanabilir bir hacim artışı gözlenmeden yavaşça ilerleme eğilimindedir. Sıkışma talebi düşük, şişmeli mikamsı, kil minerallerinin, mikroskobik veya mikroskop altı parçacıkların yüksek yüzdeli olmasına dayalıdır.
Şişen kaya	Hızlı bir şekilde tünel içine ilerler. Şişme kapasitesi kil içerikli kayalar tarafından sınırlandırılmış gibi görünür. Montmorillonit bunlara örnektir.

### 3.1.2 RQD Sistemi (Kaya Kalite Tayini)

1966 yılında Deere ve Miller RQD sistemini (Rock Quality Designation) geliştirmiştir [11]. Bu tayin yöntemi yapılan delgi numunelerinin kayıtlarına dayanmaktadır. Deere’ye göre RQD şu şekilde tanımlanmıştır. Bozulmamış düzgün numunenin boyca yüzdesi, bozulmamış numune kabul edilebilmesi için düzgün numune en az 10 cm boyunda veya daha uzun olacaktır. RQD kullanılarak çeşitli yöntemler geliştirilmiştir

ancak en yaygın ve bilindik olarak RQD değeri Q yönteminde ve RMR kaya kütle sınıflandırma yönteminde kullanılır [27].

### 3.1.3 Q sistemi

Barton ve diğerleri tarafından 1974 yılında Norveç Geoteknik Enstitüsünde birçok tarihi kazı değerlendirilerek kaya kütle karakterinin belirlenmesi ve destek yapısının belirlenmesi amacıyla Tünel Kalite Gösterimi (Q) önerilmiştir [8].

Q değerinin hesaplanması sonucunda uygulanacak püskürtme beton, kaya bulunuş kombinasyonu seçimi yapılabilir. Barton, 2002'ye göre logaritmik Q değeri 0.001'den 1000'e kadar aldığı değerlerin hesabı 3.1 bağıntısı ile şöyle ifade edilir [27].

$$Q = \left[ \frac{RQD}{J_n} \right] \times \left[ \frac{J_r}{J_a} \right] \times \left[ \frac{J_w}{SRF} \right] \quad (3.1)$$

RQD, kaya kalite tayini Çizelge 3.2'de verilmiştir.  $J_n$ , eklem kurulum sayısı Çizelge 3.3'de verilmiştir.  $J_r$ , eklem pürüzlülüğü sayısı Çizelge 3.4'de verilmiştir.  $J_a$ , eklem artım sayısı Çizelge 3.5'de verilmiştir.  $J_w$ , eklem su azaltma faktörü Çizelge 3.6'da verilmiştir. SRF, gerilim azaltma faktörü Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Parametrelerin bağıntıdaki anlamlı değerleri  $\frac{RQD}{J_n}$  blok boyutu ölçüsü,  $\frac{J_r}{J_a}$  eklem sürtünme dayanımı,  $\frac{J_w}{SRF}$  eklem gerilim ölçüsü ve çizelgede bahsedilen  $\phi_r$  parametresi artık sürtünme açısı şeklinde belirtilmiştir [27]. Q sisteminde bu anlamlı değerleri elde etmek için zemin yapısının incelenmesi, zeminden karot numunesi alınması gereklidir. Çalışmalar sonucunda elde edilen numuneler çizelgelerde belirtilen değerler bulunmak suretiyle sayısallaştırılmaktadır.

**Çizelge 3.2 : Q sisteminde RQD parametresinin sınıflandırması [8].**

TANIM	DEĞER	AÇIKLAMA
<b>KAYA KALİTE TAYİNİ</b>	<b>RQD</b>	
A. Çok zayıf	0-25	1. RQD'nin 0 dahil 10'dan küçük değerleri için hesaplarda 10 değeri kullanılacaktır.
B. Zayıf	25-50	
C. Orta	50-75	2. RQD değerinin hesabında 5 hassasiyet ile alınması yeterli olacaktır. 100, 95, 90 gibi.
D. İyi	75-90	
E. Mükemmel	90-100	

**Çizelge 3.3 :** Q sisteminde  $J_n$  parametresinin sınıflandırması [8].

TANIM	DEĞER	AÇIKLAMA
<b>EKLEM KURULUM SAYISI</b>	<b><math>J_n</math></b>	
A. Yekpare, eklemsiz veya az eklemli	0,5-1	
B. Tek eklem kurulumu	2	1. Enkesitlerde $3 \times J_n$ değeri alınacaktır.
C. Rastgele tek eklem kurulumu	3	
D. İki eklem kurulumu	4	
E. Rastgele iki eklem kurulumu	6	2. Portallarda $2 \times J_n$ değeri alınacaktır.
F. Üç eklem kurulumu	9	
G. Rastgele üç eklem kurulumu	12	
H. Dört veya daha fazla eklem olduğu kurulumlar, rastgele, aşırı eklemli, küp şeker görünümlü vb.	15	
I. Kırma taş, toprak biçimli	20	

**Çizelge 3.4 :** Q sisteminde  $J_r$  parametresinin sınıflandırması [8].

TANIM	DEĞER	AÇIKLAMA
<b>EKLEM PÜRÜZLÜLÜK SAYISI</b>	<b><math>J_r</math></b>	
<b>a) Kaya duvar teması durumu.</b>		1. Eklem kurulumu arası ortalama 3m'den fazla ise değere 1,0 eklenecek.
<b>b) Kaya duvar temasından 10cm geride kesme durumu.</b>		
A. Devamsız eklem	4	
B. Pürüzlü ve düzensiz, ondülasyonlu.	3	
C. Pürüzsüz ondülasyonlu	2	
D. Cilalı ondülasyonlu	1.5	
E. Pürüzlü ve düzensiz, düzlemsel.	1.5	
F. Pürüzsüz düzlemsel.	1.5	2. Düzlemsel, cilalı yüzeyler üzerinde dayanımı düşürecek şekilde çizgilenmeler bulunması halinde $J_r = 0.5$ alınarak kullanılabilir.
G. Cilalı düzlemsel.	1,0	
J. Kesilmede kaya duvarı teması yok.	0.5	
K. Kaya duvarların temasını önleyecek ölçüde kalın kil mineralleri içeren bölgeler.	1.0	
J. Kaya duvarların temasını önleyecek ölçüde kalın kumlu, mıcırlı veya kırma taş içeren bölgeler.	1.0	

**Çizelge 3.5 : Q sisteminde J<sub>a</sub> parametresinin sınıflandırması [8].**

TANIM	DEĞER	
	Ja	φ <sub>r</sub>
<b>a) Kaya duvar teması</b>		
A) İyice iyileşmiş, sert, yumuşamaz geçirimsiz dolgu.	0.75	25 <sup>0</sup> -35 <sup>0</sup>
B) Sadece yüzeyleri izli değişmemiş eklem duvarları.	1.0	25 <sup>0</sup> - 35 <sup>0</sup>
C) Az değişmiş eklem duvarları, yumuşamayan mineral kaplama, kumlu parçacıklar, kilsiz, parçalanmış kaya benzeri.	2.0	25 <sup>0</sup> -35 <sup>0</sup>
D) Yumuşamayan siltli, kumlu kil kaplama, küçük kil çatlakları.	3.0	20 <sup>0</sup> -25 <sup>0</sup>
E) Yumuşayan veya düşük sürtünmeli kil mineral kaplama örneğin; kaolinit, mika, klorit, talk, jips, grafit, az miktarda şişen killer ve benzeri.	4.0	8 <sup>0</sup> -16 <sup>0</sup>
<b>Açıklama : φ<sub>r</sub> değerleri ile değişim ürünlerinin mineralojik değerlerine mümkün olduğu takdirde yaklaşık bir rehberlik sağlaması amaçlanmıştır.</b>		
F) Kumlu parçacıklar, kilsiz parçalanmış kaya benzeri.	4.0	25 <sup>0</sup> -30 <sup>0</sup>
G) Sürekli ve 5 mm'den az, kuvvetli aşırı konsolide, yumuşamayan kil mineral dolgular.	6.0	16 <sup>0</sup> -24 <sup>0</sup>
H) Sürekli ve 5 mm'den az, orta veya düşük aşırı konsolide yumuşamayan kil mineral dolgular.	8.0	12 <sup>0</sup> -16 <sup>0</sup>
I) Sürekli ve 5 mm'den az, şişen kil dolgular örneğin; Montmorillonit. Değeri şişen kil içeriğine ve suyun ulaşımında bağlıdır.	8.0-12.0	6 <sup>0</sup> -12 <sup>0</sup>
J) Parçalanmış veya kırılmış bölgeler.	6.0	
K) (G, H ve I maddeleri değerlendirilerek.) Kaya ve kil.	8.0 -12.0	6 <sup>0</sup> -24 <sup>0</sup>
L) Yumuşamayan, silt veya kumlu kil, küçük kil çatlakları.	5.0	
M) Kalın, sürekli killi bölgeler.	10.0-13.0	
N) Kil içeren bölgelerde G, H ve I maddelerindeki gibi.	6.0-24.0	

**Çizelge 3.6 :** Q sisteminde  $J_w$  parametresinin sınıflandırması [8].

TANIM	DEĞER		AÇIKLAMA
	$J_w$	(kgf/cm <sup>2</sup> ) : Yaklaşık su basıncı	
A. Kuru kazılar veya yer yer az su, lokal olarak 5lt/dakika.	1	< 1	1. C ve F' deki faktörler gözlemlenerek kabaca tahmin edilir. Drenaj sağlanırsa $J_w$ artırılmalıdır.
B. Orta miktar su, veya su basıncı, dolgu yer yer su ile yıkanıp akarak boşalabilir.	0,66	1-2,5	
C. Kendi kendini tutabilen kayalarda dolgunsuz çatlardan çok miktarda su geliri veya basıncı.	0,5	2,5-10	2. Suyun donması, buz oluşumu gibi özel problemler dikkate alınmamıştır.
D. Çok miktarda su geliri veya basıncı, dolgu tümüyle yıkanarak akmış.	0,33	2,5-10	
E. Patlama ile ortaya çıkıp zamanla azalan çok aşırı su geliri veya basıncı.	0,2-0,1	> 10	
F. Zamanla azalmayan çok aşırı su.	0,1-0,05	> 10	

**Çizelge 3.7 :** Q sisteminde a. durumu için SRF parametresinin sınıflandırması [8].

TANIM	DEĞER	AÇIKLAMA
GERİLİM AZALTMA FAKTÖRÜ	SRF	
<b>a. Tünel kazıldığında kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek, kazı ile kesişen zayıf alanlar.</b>		
A. Kil içeren veya kimyasal ayrışmaya uğramış birden fazla zayıflık zonu, çok gevşemiş kaya kütleleri.	10	1. Makaslama zonlarının kazıyı kesmediği fakat etkilediği durumlarda SRF değerleri %25-50 oranında azaltılacaktır.
B. Kimyasal ayrışmaya uğramış kaya veya kil içeren tek zayıflık zonu (kazı derinliği < 50 m).	5	
C. Kimyasal ayrışmaya uğramış kaya veya kil içeren tek zayıflık zonu.	2,5	
D. Kendi kendini tutabilen ve kil içermeyen kayada birden fazla makaslama zonu, kaya kütlelerinde gevşeme (herhangi bir derinlikte).	7,5	2. Anizotropik, kararsız yük almaya müsait bölgelerde $\sigma_1/\sigma_3$ değeri 5 ile 10 arasında yer aldığı takdirde $\sigma_c$ ve $\sigma_t$ değeri 0,8 ile çarpılacaktır, $\sigma_1/\sigma_3$ 'ün 10'dan büyük olduğu durumlarda 0,6 ile çarpılacaktır.
E. Kendi kendini tutabilen ve kil içermeyen kayada birden fazla makaslama zonu.	5	
F. Kendi kendini tutabilen ve kil içermeyen kayada tek makaslama zonu (kazı derinliği > 50 m).	2,5	3. Yüzey ile tünel tavanının tünel genişliğinden az olduğu yerlerde SRF değeri 2.5 'den 5'e yükseltilecektir.
G. Gevşek, açık (dolgunsuz) çatlaklar, çok çatlaklı veya küp şeker (herhangi bir derinlikte).	5	

**Çizelge 3.8 :** Q sisteminde b durumu için SRF parametresinin sınıflandırması [8].

TANIM	DEĞER		
	$\sigma_c / \sigma_1$	$\sigma_t / \sigma_1$	SRF
<b>b. Sağlam kayada kaya gerilmesi problemleri.</b>			
H. Düşük gerilme, yüzeye yakın.	>200	< 0,01	2,5
I. Orta gerilme.	200-10	0,01-0,3	1
J. Yüksek gerilme, çok sıkı yapısal unsurlar, gerilme koşulları genellikle elverişli, fakat duvarlarda stabilite problemleri oluşabilir.	10-5	0,3-0,4	0,5-2
K. Masif kayada orta derecede kabuk şeklinde kaya parçası ayrılması.	5-3	0,5-0,65	5-10
L. Masif kayada kazıdan hemen sonraki dakikalarda aşırı derecede, kabuk şeklinde parça ayrılması veya kaya patlaması oluşumu.	3-2	>1	10-20
M. Masif kayada şiddetli kaya patlaması ve ani dinamik yer değiştirmeler.	<2	>1	200-400
<b>c. Sıkışan kaya; kendi kendini tutamayan kayanın yüksek gerilme altında plastik akma deformasyonu.</b>			
N. Sıkışan kayada orta derecede gerilme koşulları.		1,5	5-10
O. Sıkışan kayada aşırı gerilme koşulları.			10-20
P. Şişen kayada orta derecede gerilme koşulları.		>5	5-10
R. Şişen kayada aşırı gerilme koşulları.			10-15

Kaya kütle kalitesi (Q) belirlenirken, eğer sondaj numuneleri bulunmuyorsa RQD birim hacimdeki eklem sayısından çıkarılabilmektedir. Birim metredeki eklem sayısı

dikkate alınacaktır. Kilsiz zeminlerde RQD'nin hesaplanması 3.2 bağıntısı ile yapılmaktadır.

$$RQD = 115 - 3J_v \quad (3.2)$$

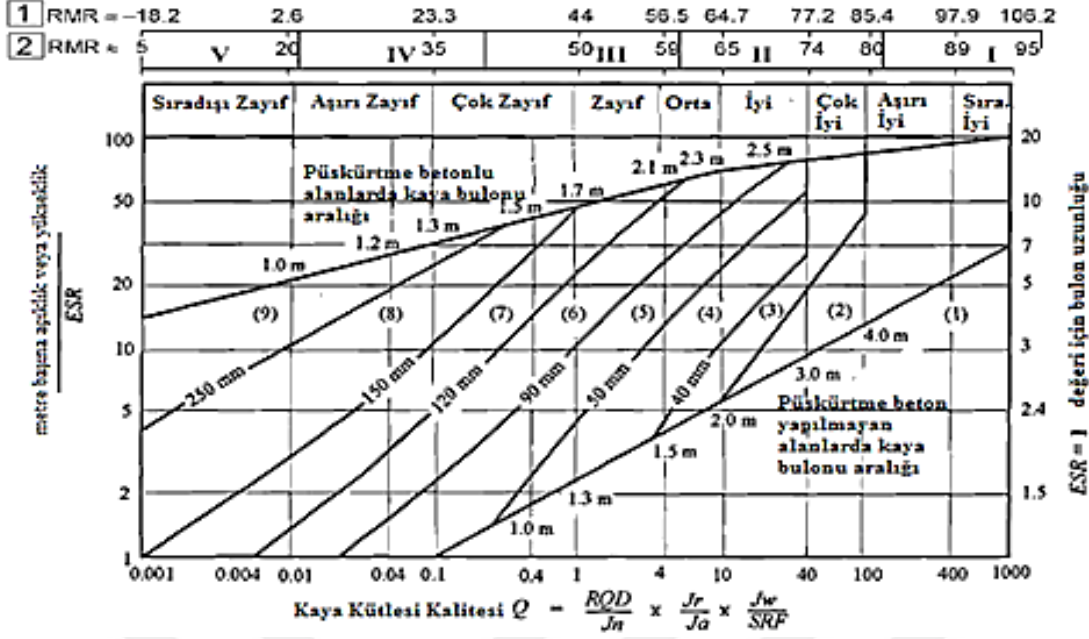
$J_v$  : metreküpteki bileşim sayısı 4,5-35 arası değerleri için RQD 0-100 arası değerler olacaktır. Kaya kütlelerinin kil içermesi durumunda SRF gevşeme yüklerine göre hesap edilecektir. Bu tip durumlarda  $\sigma_t$  ve  $\sigma_c$  değerleri suya doygun sağlam kaya örnekleri üzerinden hesaplanacaktır. Hesaplarda  $\sigma_t$  çekme dayanımı (nokta yükleme),  $\sigma_c$  serbest basınç dayanımı,  $\sigma_1$  esas majör basınç dayanımı,  $\sigma_3$  esas minör basınç dayanımı olarak alınmaktadır.

ESR değeri kazı destek oranı (excavation support ratio) Çizelge 3.9'da verilmiştir. Bu değer kazı tipine göre seçilen boyutsuz bir katsayıdır.

**Çizelge 3.9 : Q sisteminde ESR değeri [8].**

Kazı tipi	ESR
A. Geçici maden kazıları	3-5
B. Sürekli maden kazılan, hidrolik enerji amaç su tünelleri (yüksek basınç cebri boyutlar hariç), büyük kazılar için pilot tüneller, yarmalar ve aynalar vs.	1,6
C. Depolar, su tasfiye tesisleri, küçük yol ve demiryolu tünelleri, denge bacaları, yaklaşım tünelleri vs.	1,3
D. Santral binaları, büyük yol ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları	1
E. Yer altı nükleer santralleri, fabrikalar, spor ve kamu tesisleri	0,8

Q sistemi ile hesaplanan değerlerin destek yapısı seçimine aktarılmasında, Şekil 3.1'deki veriler kullanılacaktır [27].



Şekil 3.1: Destek sistemi değerlendirilmesi [14].

Güçlendirme-destek kategorileri, (1) Desteksiz. (2) Rastgele bulonlama. (3) Sistematik bulonlama. (4) Sistematik bulonlama ve 40-100mm donatısız püskürtme beton. (5) Fiber donatılı püskürtme beton 50-90mm kalınlığında, bulonlama. (6) Fiber donatılı püskürtme beton 90-120mm kalınlığında, bulonlama. (7) Fiber donatılı püskürtme beton 120-150mm kalınlığında, bulonlama. (8) Fiber donatılı püskürtme beton 150mm'den kalın ve çelik profiller, bulonlama. (9) Betonarme kaplama, olarak destek sistemleri parantez içindeki rakamlarla şekilde temsil edilmektedir.

### 3.1.4 RMR (Rock Mass Rating) Kaya Kütle Sınıflandırması

Z.T. Bieniawski (1989) RMR sistemini Q sistemine paralel bir şekilde geliştirmiştir [9]. RMR sisteminde 6 parametre kullanılmaktadır. Sağlam kaya numunesinin tek eksenli basınç direnci, sondaj karotlarından elde edilen RQD değeri, eklem sıklığı, eklemlerin durumu, yeraltı suyu, eklemlerin yönelimidir.

RMR değeri ile Q değeri arasındaki en uygun ilişkilendirme 3.3 bağıntısıyla verilmiştir.

$$Q = 10^{\frac{RMR-50}{15}} \quad (3.3)$$



RMR çizelgesi üzerinde belirtilen değerler kaya kütlelerinin özelliklerine göre değerlendirilir. Çizelge 3.10 (A) ve Çizelge 3.11 (B) üzerinden elde edilen derecelendirme sayıları toplanarak Çizelge 3.12’de verilen sınıflandırmalar bulunur.

**Çizelge 3.10 : RMR sınıflandırma parametreleri ve dereceleri (A) [2].**

1	Sağlam kayanın mukavemeti	Uç-yük mukavemet indeksi	> 8 MPa	4-8 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Tek eksenli basınç dayanımı deneyine göre			
		Tek eksenli basınç dayanımı	> 200 MPa	100-200 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	10-25 MPa	3-10 MPa	1-3 MPa	
	Derecelendirme	15	12	7	4	2	1	0		
2	RQD		%90-100	%75-90	%50-75	%25-50	<%25			
	Derecelendirme		20	17	13	8	3			
3	Eklem sıklığı		>3m	1-3m	0.3-1m	50-300m	<50mm			
	Derecelendirme		30	25	20	10	5			
4	Eklem durumu		Çok kaba yüzey, sürekli değil ayrılma yok eklemli sert kaya	Az kaba yüzeyler <1mm açıklıklı Eklemli sert kaya	Az kaba yüzeyler <1 mm açıklıklı Eklemli yumuşak kaya	Sürtünme izli yüzey veya fay kili<5mm veya 1-5mm açık eklemli sürekli eklemli	Yumuşak fay kili>5mm kalın veya açık eklemli >5mm sürekli eklemli			
	Derecelendirme		25	20	12	6	0			
5	Yeraltı suyu	Tünelin 10m'lik kısmından gelen su	Yok		<25 litre/dak.	25-125 litre/dak	>125 litre/dak			
		Oran	Eklemdeki su basıncı	0		0.0-0.2	0.2-0.5	>0.5		
			Ana asal gerilme	0		0.0-0.2	0.2-0.5	>0.5		
	Genel koşullar	Tamamen kuru		Yalnızca nemli (kırıklardaki su)	Orta basınç altında su	Önemli su problemleri				
Derecelendirme		10		7	4	0				

**Çizelge 3.11 :** RMR sınıflamasında süreksizlik yönelimleri için düzeltmeler (B) [2].

Eklemlerin Doğrultu ve Eğim Yönleri		Çok Uygun	Uygun	Orta	Uygun Değil	Hiç Uygun değil
Dereceleme	Tüneller	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Şevler	0	-5	-25	-50	-60

**Çizelge 3.12 :** (A) ve (B)'den elde edilen RMR değerleri ve kaya sınıfları [2].

Derece toplam (RMR)	81-100	61-80	41-60	21-40	<20
Kaya sınıfı	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya

### 3.2 Sınıflandırma Yöntemlerinin Değerlendirilmesi ve Tasarım

Tünel destek yapılarının tasarımında farklı yaklaşımlar uygulanmış olup, günümüzde tünel içi destek yapıları ahşap veya çelik desteklerden, kaya bulonlarına, püskürtme betonlara, betonarme plak sistemlerine, çelik kabuk yapılarına doğru değişmektedir. Bütün bu yapıların amacı tünel kazısında oluşan boşluğun etrafındaki zeminden kaynaklanan ölü yükleri taşımak ve zemin içerisindeki yapının bütünlüğünü koruyarak, doğal kenetlenmeyi sağlamaktır. Günümüzde TBM kullanılarak yapılan kazılarda halka sistemi ile projeler gerçekleştirilmekte olup bu halkalar parça parça prekast fabrikalarında üretilmektedir. Tünel desteğinin tasarımı ve tünel desteğinin sağladığı basınç dayanımı ve tipinin belirlenmesi öngörülerini barındıran iteratif bir işlemdir. Farklı zeminlere göre destek sistemlerinin seçiminde TRB 2006'da FHWA tarafından hazırlanan Çizelge 3.13 etkileşim ve iterasyon için kullanılabilir.

**Çizelge 3.13 :** Destek Sistemleri İçin İterasyon Tablosu [27].

Zemin	Kaya bulonu	Kaya bulonu ve hasır çelik	Kaya Bulonu ve püskürtme beton	Püskürtme beton ilave çelik kafes ve makaslar	Yerinde döküm betonarme	Betonarme halka ve parçalı sistem
Sağlam Kaya	O	O				
		O	O			
Orta Kaya		O	O	O		
			O	O	O	
Yumuşak Kaya				O	O	O
				O	O	O
Yumuşak Zemin				O	O	O

Tasarlanan destek yapılarının performansının belirlenmesi geçmiş yapılardaki tecrübeler ve yapım aşamasındaki gözlemlere dayanır. Verilen çizelge ile bu gözlemler kısaca özetlenmiştir. TBM ile açılan tünellerde kullanılmış halka parçalarının istiflenmiş haline bir örnek Şekil 3.2’de verilmiştir.



Üretici	Yapı Merkezi Prefabrication
Halka Çapı	Outer=13.2 m, Inner=12.0 m
Parça Uzunluğu	2 m
Parça Kalınlığı	0.6 m
Halka Düzeni	* Universal (8 + 1 keystone)
Parça Ağırlığı	~ 15 t
Halka Ağırlığı	~ 127 t
28 günlük Basınç Dayanımı	* ERQ Limit: 50 MPa * Average: 72 MPa
Hızlı Klor Geçirimsizliği	* ERQ Limit: 1000 Coulomb * Average: 280 Coulomb
Servis Ömrü	* ERQ Limit: 100 years * Minimum: 127 years

Şekil 3.2: Avrasya tüneli tasarım detayları [6].

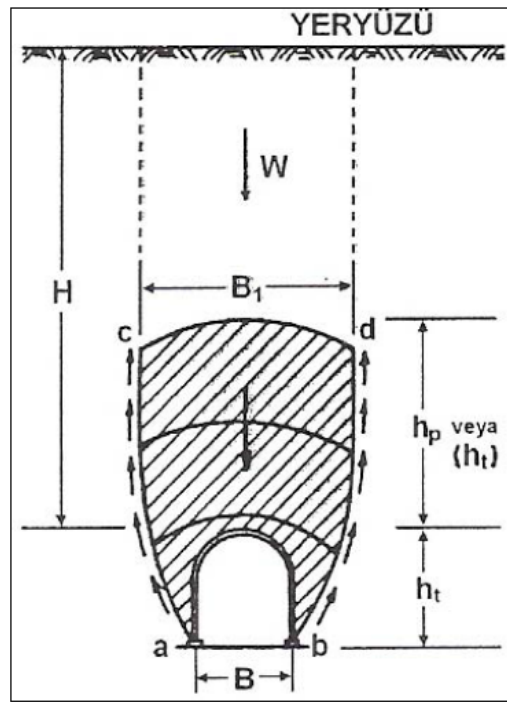
İstifte bulunan bölütler tünel kaplamasını oluşturmaktadır. Yumuşak kaya ve yumuşak zemin için önerilen sisteme örnek olarak verilmiştir. Tünel projesine ait değerler tabloda belirtilmiştir. Burada belirtildiği üzere Avrasya tüneline verilen kesit 8 normal bölüt ve 1 kilit taşından oluşmaktadır yani 9 parçalıdır. Her parça 2 metre uzunluğundadır. Kaplama halka kurulduğunda İç çapı 12 metre dış çapı 13.2 metre olmaktadır. Bölüt kalınlığı 60 santimetredir. Bu bölümün devamında ampirik yöntemler ile elde edilen verilerin değerlendirilmesi, analitik ve numerik tasarım yöntemleri ele alınacaktır. Beton dayanımı ortalama 72 MPa olarak verilmiştir. Avrasya tüneline kaplamasının tasarım servis ömrü 127 sene olarak verilmiştir. Böyle bir destek yapısının tasarlanması için sınıflandırma yöntemleri sistemin seçim aşamasında ve modelleme için gereken zemin parametrelerinin belirlenmesinde yardımcı olmaktadır. Hesapların yapılması birleşimler farklı yüklem durumları portallarda yüklem indirmelerin yapılması. Kazı yapan makineden gelen yükler. Zemin suyu basınçları gibi her durumun ayrıca incelenerek detaylı hesap yöntemlerinden yararlanılması gerekmektedir. Tünel kazma makinesinin hesabı yapılan destek yapısını kaldıracağı sistemin bile buna göre uyumlu çalışması ve

bölütlere zarar vermeden rahatça yerine yerleştirebilmesi bütünüyle tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır.

### 3.3 Ampirik Yöntemler

Terzaghi tarafından 1946 yılında geliştirilen kabule dayanarak tünel içine gelecek olan kaya yükü tünel kesitinin derinliğine ve kayanın ağırlığına göre hesaplanmıştır. Bu şekilde gösterildiği üzere kazı yapılırken açıklığın üzerinde ve yanlarındaki kaya kütlelerinde gevşemeler meydana gelmesi beklenecektir.

Etkili alan (abcd) taralı bölgesinde belirtilmiştir. ( $B_1$ ) etkili alan genişliği tünel genişliği ( $B$ ) ve tünel yüksekliğine ( $h_t$ ) bağlıdır. Zemin bu etkili alandan tünel açıklığına doğru hareket etme eğilimi gösterecektir. Arazi yükü ( $W$ ) ise tünel yan yüzlerindeki kaya kütlelerine aktarılacaktır. Tünel tavanının ve yan yüzlerinin artık kaya yükünü ( $h_p$ ) karşılaması gerekecektir. Bu kabul Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3: Terzaghi'nin kaya yükü kavramı (Terzaghi, 1946) [5].

Çizelge 3.1'de sunulan Terzaghi'nin kaya kütle sınıflandırmasına bağlı olarak yapılacak destek yapısı tasarım çizelgesi Çizelge 3.14'de verilmiştir.

**Çizelge 3.14 : Terzaghi'nin kaya yükü sınıflandırmasına göre kaya yükleri.**

<b>KAYA DURUMU</b>	<b>KAYA YÜKÜ (ft=03048m)</b>	<b>AÇIKLAMALAR</b>
Bozulmamış kaya	Sıfır	Dökülme ve patlamaları engelleme amaçlı hafif kaplama.
Sert tabakalı veya şistozitesi iyi kayalar	0 'dan 0.5 B 'ye	Hafif destek, noktasal olarak kararsız yük değişimleri olabilir.
Orta eklemli kaya	0 'dan 0.25 B 'ye	
Parçalı ve çirkin kaya	0.25B 'den 0.35 (B + Ht) 'ye	Yanal basınç yok.
Çok parçalı ve çirkin kaya	(0.35-1.10) (B + Ht)	Yanal basınç yok ya da hafif.
Kırılmış ama kimyasal bozulmamış kaya	1.10 (B + Ht)	Kayda değer yanal basınç vardır. Su sızıntısı tünelin alt kısmında yumuşama etkisi yaratabileceği için çelik kuşak bitimlerine sürekli destek ya da sürekli çelik kuşak kullanılmalıdır.
Sıkışan kaya, orta derinlikte	(1.10-2.10) (B + Ht)	Ağır yanal basınç durumu vardır, tünel içi destek payanda gereklidir. Sürekli dairesel çelik kuşak önerilir.
Sıkışan kaya, çok derin	(2.10-4.50) (B + Ht)	
Şişen kaya	250ft.'e kadar = 76,2m	

Yaygın olarak kullanılan tasarım yöntemleri RMR ve Q sistemidir [8]. Q sistemine ait Şekil 3.1'de verilen şekil ilk olarak 1974 yılında Barton ve diğerleri tarafından destek sayısı şeklinde önerilmiş. 1993 yılında Grimstad ve Barton bu şekli geliştirmiştir [14]. RMR yöntemi ile şekil Çizelge 3.12'de elde edilen değerlere ilişkin destek tasarımı çizelgesi Çizelge 3.15'de verilmiştir.

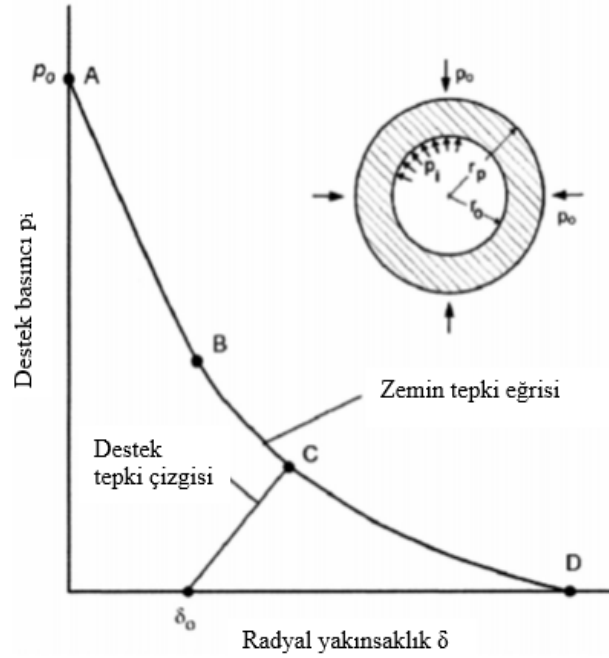
**Çizelge 3.15 : RMR destek tasarımı çizelgesi [2].**

Kaya kütlesi sınıfı	Kazı şekli	Destek Yapısı		
		Kaya bulonu	Püskürtme beton	Çelik iksa
I Çok sağlam kaya (RMR:100-81)	Tam cephe kazı, 3m ilerleme	Genel olarak destekleme gereksiz. Gerektiğinde yerel bulonlama		
II Sağlam kaya (RMR:80-61)	Tam cephe kazı, 1-1,5m ilerleme. Kazı aynasından 20m geride tüm destekleme yapılmalıdır	Tavanda yerel bulonlama. Bulon uzunlukları 3m, aralıkları 2,5m olmalı, nadiren çelik hasırla	Gerektiğinde tavan kısmında 50mm kalınlıkta	Gerekmez
III Orta sağlam kaya (RMR:60-41)	Üst ve alt yarı ayrı ayrı kazılır. 1,5-3m'lik ilerleme. Her patlatmanın ardından destekleme elemanı yerleştirilir. Kazı aynasından 10m geride tüm destekleme yapılmalıdır.	4m uzunluk ve 1,5-2m aralıklı tavan ve yanlarda çelik hasırla birlikte	Tavanda 50-100mm yanlarda 30mm kalınlıkta	Gerekmez
IV Zayıf kaya (RMR:40-21)	Üst ve alt yarı ayrı ayrı kazılır. 1-1,5m'lik ilerleme. Kazı aynasından 10m geride kazıya paralel olarak destekleme yapılmalıdır.	4-5m uzunlukta 1-1,5m aralıklarla çelik hasırla birlikte. Tavan ve yanlarda	Tavanda 100-150mm kenarlarda 100 mm kalınlıkta	Gerekliyorsa 1,5m aralıklarla hafif iksa
V Çok zayıf kaya (RMR:20-0)	Küçük kesitli kazılarla. 0,5-1,5m'lik ilerleme. Kazıya paralel olarak destekleme yapılır. Patlatmanın hemen ardından püskürtme beton uygulanmalıdır.	5-6 uzunluk, 1-1,5m aralıklarla ve çelik hasırla birlikte sistematik bulonlama. Tabana bulon yerleştirilir.	Tavana 150-200mm yanlara 150mm ve kazı arına 50mm kalınlıkta	Çelik fırçalarla desteklenen 0,75 m aralıklı orta ve ağır iksa. Tabana ters kemer yerleştirilir.

Ampirik yöntemler kullanılarak birçok tünel yapılmıştır ve geçmişten günümüze işletmeleri devam etmektedir [27]. Q sistemi kullanılarak İskandinavya'da 1000'in üzerinde tünel çoğunlukla del-patlat yöntemi ile yapılmıştır. TBM ile yapılacak kazıların del-patlat yöntemine göre daha az sarsıntı yaratacağı tahmin edilebilir. Bu nedenle del-patlat yönteminde kazı aşamasında ortaya çıkması beklenen yukarı yönlü yer değiştirmeler daha fazla olacaktır.

### 3.4 Analitik Yöntemler

Tünel yapıları zemin içerisinde bulunması nedeniyle, zemin parametrelerine bağımlı bir taşıma sistemi oluşturmaktadırlar. Tünel içerisinde kullanım amacına bağlı olarak bazı yüklemeler de tünel içi yüklemeleri oluşturmaktadır. Tüm bu etkiler modeller ile açıklanmaya çalışılmıştır. Analitik yöntemler kavramsal modellerin bağıntılarla ifadesini içerir. Modellemeler yapılırken kavramsal modelleme, fiziksel dereceleme modelleri, sayısal ve matematiksel yöntemler olmak üzere üç ana yaklaşım kullanılabilir. Hoek (1999)'a göre tünel destek yapısı ve kazılan zeminin etkisi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4: Destek yapısı-zemin etkileşimi [15].

Şekil 3.4'e göre A ve B noktaları arasında tünel destek yapısı elastik davranış gösterir. B noktası basıncı kritik basıncı gösterir. Burada  $P_{cr}$  3.4 ve 3.5 numaralı bağıntılar ile hesaplanmaktadır [15].

$$P_{cr} = \frac{2P_0 - \sigma_{cm}}{1 + k} \quad (3.4)$$

$$k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3.5)$$

$P_{cr}$ , kritik destek basıncıdır.  $P_0$  hidrostatik basınçtır.  $\sigma_{cm}$  kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımıdır.  $\phi$  kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısıdır.

Tünellerin modellenmesinde kaplama üzerindeki yükler büyük önem taşımaktadır. Yüklerin belirlenmesi konusuna Güldağlı O. (2015)'de bahsedilmiştir bunlar ele alındığında tünellere etkileyen yüklerin önemli ölçüde kapsamakta olduğu değerlendirilebilir ayrıca bu yüklerin hesaplanmalarında proje ortamının özellikleri ek olarak dikkate alınmalı asıl sonuçlar kesin hesap ile belirlenmelidir [21]. Yeraltı yapılarına etki eden yüklerin hesabında kullanılacak değerler American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) tarafından belirtilen şekilde kısa açıklamalarıyla verilecek olursa,

Zati Yükler (Dead load) (DL): Yeraltı yapısının kendi ağırlığıyla beraber, kullanılan kaplama malzemelerinin ağırlıklarının toplamıdır. Zeminden aktarılacak toprak yükünün yapının zemine gömülme durumuna bağlı olarak  $1.92 \text{ t/m}^3$  ile  $2.09 \text{ t/m}^3$  aralığında alınması uygun olmaktadır. Yüzeğe yakın yapılarda, inşa aşamasında güzergâh üzerine veya tünel içine ek olarak yükleme yapılacaksa bunlar dikkate alınmalıdır.

Hareketli Yükler (Live load) (LL): Yeraltı yapılarındaki hareketli yükler araç ve insan trafiğinden kaynaklanmaktadır. Kapasiteye ve kullanıma bağlı olarak en yoğun trafik koşullarında oluşacak değerler dikkate alınır. Buna ek olarak çarpma, merkezkaç ve fren kuvvetleri dikkate alınmalıdır.

Çarpma Yüğü (Impact) (I): Çarpma yüğü hesabında çarpma faktörü ile statik araç yüğü çarpılarak hesaba alınır. Ray durumuna göre bu katsayılar değişebilir. Eğer bilinen ray kusurları söz konusu ise bu bölgeler ayrıca dikkate alınmalıdır. I katsayısı ile ifade edilir. Sürekli kaynaklı ray için 1.10, ray ek yerlerinde 1.3 olarak alınacaktır. Ayrıca yüzeğe yakın yapılarda yüzeğdeki hareketli yük eğer 1 m'den derinde değil ise çarpma yüğü ile birlikte hesaba katılır. Aksi bir durum söz konusu olmadıkça yüzeğe yakınlığı 0-1 m aralığında %30 ile 0 arasında lineer olarak azaltılabilir.

Merkezkaç Kuvveti (Centrifugal force) (CF): Metrolarda araç yükünün bir fonksiyonu olarak kurlarda tasarım hızına ve kurb çapına bağlı olarak ağırlık merkezinden aracın enine olacak şekilde hesaba katılır.



Demeraj Kuvveti (Rolling force) (RF): Raylara etkiyen ve tekerleklerin yuvarlanma esnasında meydana gelen bir kuvvettir. Raylardan birine düşey yukarı doğrultuda diğerine düşey aşağı doğrultuda olacak şekilde uygulanır. Tekerlekler tarafından uygulandığı için ray üzerindeki tekerlek sayısına bölünerek araç ağırlığının %10'u olacak şekilde hesaba katılır.

Fren Kuvveti (Longitudinal braking and tractive force) (LF): Aracın fren yapmasıyla ortaya çıkacak kuvvettir. CF, RF ve LF yükleri doğrudan yapının tabanına etkiyen yükler olduğu için çok katlı yeraltı yapılarında önem kazanmaktadırlar.

Yeraltı Suyunun Kaldırma Etkisi (Buoyancy) (B): Yeraltı su seviyesi yapının zemin seviyesinin üzerindeyse yukarı yönde kaldırma kuvveti hesaba katılır. Yapı üzerindeki zemin ve yapının ağırlığı kaldırma kuvvetinden büyük olmalıdır.

Taşkınlar (Flood) (FL): Yapı içerisinde su baskını oluşması durumunda veya yapının kullanım amacına bağlı olarak oluşabilecek su baskınlarının etkisidir. Özellikle yapım aşamasında ortaya çıkması muhtemel kuvvetler hesaba katılmalıdır.

Büzülme Etkileri (Shrinkage force) (S): Destek yapısının birleşim yerlerinde rötre sonucu ortaya çıkan kuvvetlerdir. Yapı malzemesine bağlı olarak sünmede meydana gelebilir. Bu etkiler sonucunda Normal kuvvetler ortaya çıkabilir. Birim uzama ve ısı değişim değerleri göz önünde bulundurularak hesaplanır. Birleşim yerlerinde kullanılacak elastik malzemeler ile giderilebilir.

Isı Etkileri (Thermal force) (T): Yapının dönemsel olarak göreceği ısıl değişimler sonucu ortaya çıkabilecek kuvvetlerdir. Çerçeve analizinde etkisi göz önüne alınmayabilir.

Yatay Toprak Basıncı (Horizontal earth pressure) (E): Toprak ve yeraltı suyunun etkisiyle oluşan yatay kuvvettir. Sürşarj yükleri ile birlikte hesaba katılır. Bunlar çevredeki yapıların temel yükleri, yüzeydeki diğer ek yüklemeler olabilir. Yeraltı suyunun mevsimsel değişimleri de dikkate alınarak hesap edilmelidir. Geoteknik raporda detaylı olarak dikkate alınmalıdır. Düşey efektif gerilmeden az olmamak koşulu ile yatay toprak basıncının zemin birleşeni  $K_0$  katsayısı ile çarpılarak hesaba katılır.

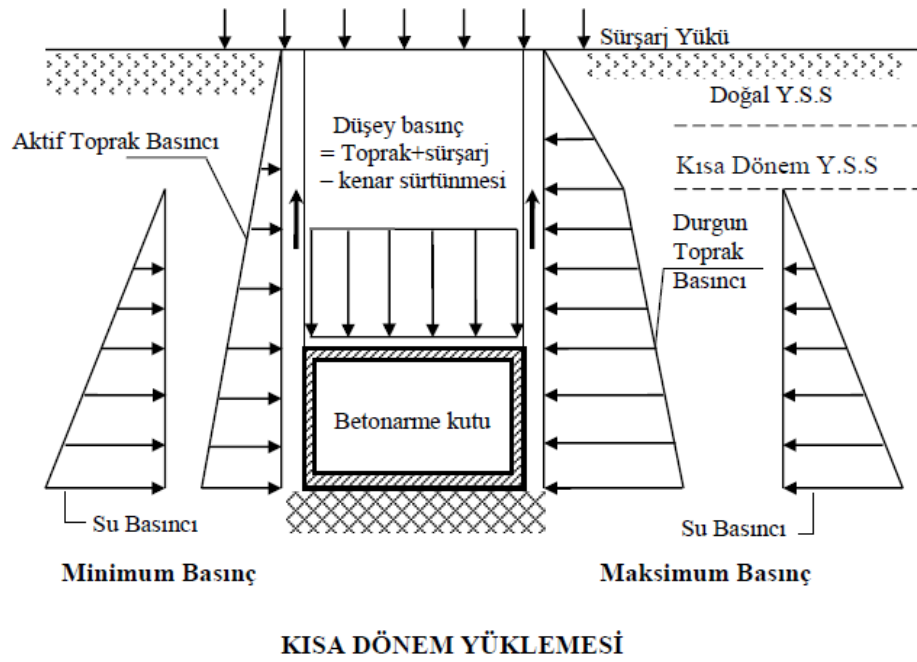
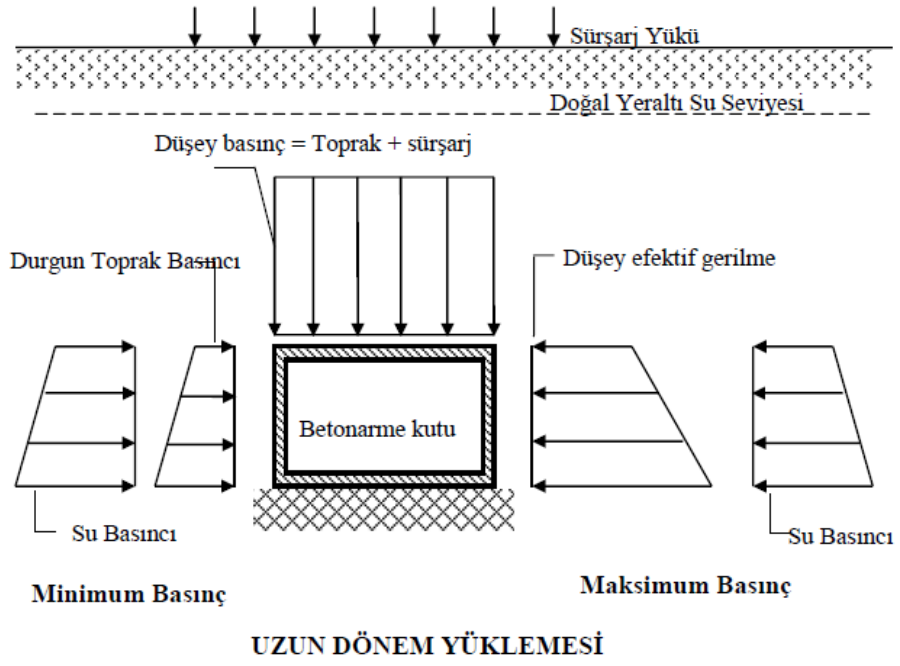
Deprem Kuvvetleri (Earthquake force) (EQ): Yeraltı yapısının zemin içerisinde deprem karşısında yerüstü yapıları kadar etkilenmeyeceği varsayılır. Çünkü yapının rijitliği yeraltında oluşabilecek kuvvetlere dayanımı sağlaması amacıyla yüksektir.

Deprem etkisiyle meydana gelen dalgalarının yapı üzerinde oluşturacağı kuvvetler ve muhtemel hasar mekanizmaları Longxhi tüneli örneği üzerinden örneklerle incelenecektir.

Durağan zeminde aç kapa bir tünel yapısına etki edecek yükleri Washington Metropolitan Area Transit Authority (WMATA) tarafından Şekil 3.5 gösterimine göre uzun dönem ve kısa dönem yükleme biçimi şeklinde gösterilmiştir. Burada maksimum yatay zemin basıncının toprak birleşeni, efektif düşey toprak basıncına eşit alınmamıştır. Bunun nedeni Washington D.C. bölgesindeki metro yapısının titreşim meydana getirmesi ve dışa doğru deformasyon meydana getirmesidir.

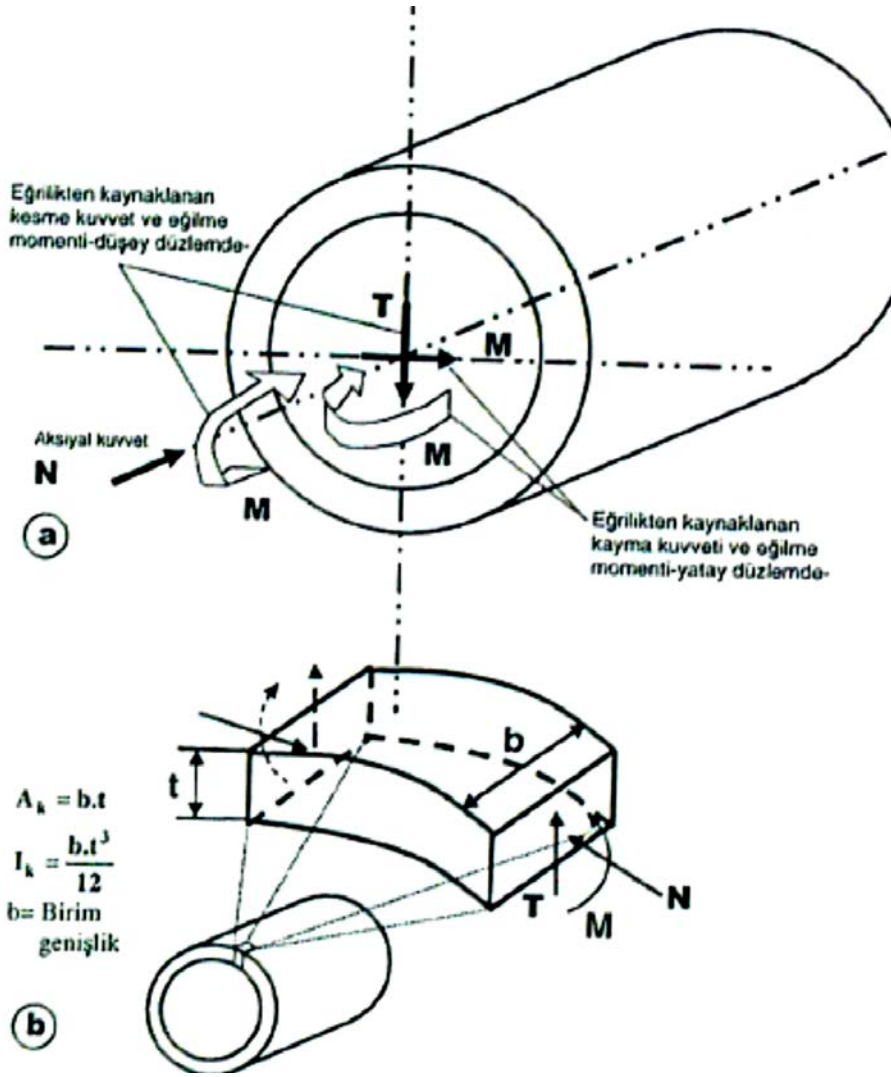
Daha önce belirtilen Terzaghi kemerlenme modeline, kritik basınç esasına ve WMATA yükleme değerlerine göre tünel sisteminin zeminden ve içsel koşullarından gelen yükleme durumları tek tek değerlendirilerek kombinasyonlar elde edilebilir. Bunlardan en kritik yükleme değerleri karşılaştırılır. Belirtilen yükleme değerlerine ek yükler kazı sırasında yöntemle bağlı olarak da ortaya çıkabilir bu durumları değerlendirmek gerekir.

Kısa ve uzun vadeli yükleme modellerinde gösterilen zemin yüklerini dikkate alırken  $K_0$  sükûnetteki toprak basıncı katsayısı hesaba katılacak olsaydı daha düşük bir yük dikkate alınabilirdi. Fakat dış deformasyon öngörüsünden dolayı daha güvenli tarafta kalındığı söylenebilir. Bir diğer konu ise aç-kapa yöntemi kullanılarak yapılan yapılarda kullanılan kutu kesite ait deformasyon karakteridir. Bu kesitlerde ovalleşme şeklinde değil yan duvarlarda ötelenmeler meydana gelmektedir. Bu durum sonucunda zaman içerisinde zemin-yapı arasında boşluklar meydana gelmekte ve homojen yüklemeler de oluşmamaktadır.



**Şekil 3.5:** Aç kapa yöntemi ile açılan tünelde durağan zemin yükleri [5].

Belirtilen yükler altında tünel destek yapısının geometrisine göre kesit zorları ortaya çıkacaktır. Şekil 3.6'da tüp şeklindeki tünel kesitinde ortaya çıkan kesit zorları gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Boru şeklinde bir kesitte ortaya çıkan kesit zorları [5].

Kirsch kapalı elastik teorisi ile tünel plağının hesabı yapılabilir [27]. Bu yöntem numerik analiz yöntemlerinin doğruluğunun kontrolünde iyi bir yöntemdir.

### 3.5 Sayısal Yöntemler

Tünel yapılarının hesabında sonlu eleman hesap programlarından yaygın bir şekilde yararlanılmaktadır. Bu süreçlerde programlarda sistemin modellenmesinin yapılması süreci ilk adımı oluşturmaktadır. Bu sayısal modelleme için devamlı ve devamsız yaklaşım olmak üzere iki yaklaşım tanımlanmaktadır. Devamlı yaklaşım diferansiyel ve integral modeller olmak üzere ikiye ayrılır. Diferansiyel modeller, sonlu eleman ve sonlu fark yöntemlerini içerirler. Bu yöntemler çalışılan bölgenin tamamını karakterize eder. Sonlu eleman yöntemi, sadece yeterli miktarda değer elde edilmesinde kullanılır. İntegral modellerde ise iç ve dış sınırlar boyunca devamsızlık

esastır [18]. Devamsız modeller parçalar ve blokların hareket eşitlikleri kullanılır. Bağımsız kaya bloklarının hareketleri özel olarak tanımlanmalıdır. Tünellerin sonlu eleman analizinde kullanılacak parametrelerin belirlenmesinde kaya kırılmasının değerlendirilmesi önemli rol oynamaktadır. Kazı yapılacak bölge etrafında oluşacak zayıf bölge için kriterizasyonlar geliştirilmiştir. Bu bağlamda sonlu eleman yöntemi ile analiz yapan programlar Hoek-Brown kriterizasyonu kaynak parametre formülleri olarak kullanılmaktadır [16]. Aşağıda ilk haliyle kusursuz eklemli geçişmiş sert kaya için oluşturulmuş, Mohr Zarfının istatistiksel eğri uydurma yöntemi uygulanarak elde edilen 3.5 bağıntısı verilmiştir. Daha sonra kriterizasyona ek olarak 3.6, 3.7 ve 3.8 bağıntıları verilmiştir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s} \quad (3.5)$$







$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (3.6)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{2}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (3.7)$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (3.8)$$

Burada  $m$ ,  $a$  ve  $s$  kayaç malzeme sabitleri olup,  $\sigma_{ci}$  kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa), GSI Jeolojik dayanım indeksi,  $D$  örselenme faktörüdür. Hoek-Brown formüllerinde belirtilen Örselenme faktörü kazı tipine göre değişmekte olup 0-1 arası değerler alabilmektedir. GSI parametresi için Hoek tarafından hazırlanan indeks çizelgesi Çizelge 3.16'da verilmiştir. Buradaki değerler sayesinde zemin içerisinde oluşacak gerilme ve şekil değiştirmeler elde edilerek malzeme parametrelerinin belirlenmesinde kullanılır. Hesap aşamalarında kullanılan modeller bu kabullere göre tanımlanmaktadır.

**Çizelge 3.16 :** Jeolojik dayanım indeksi (GSI) [2].

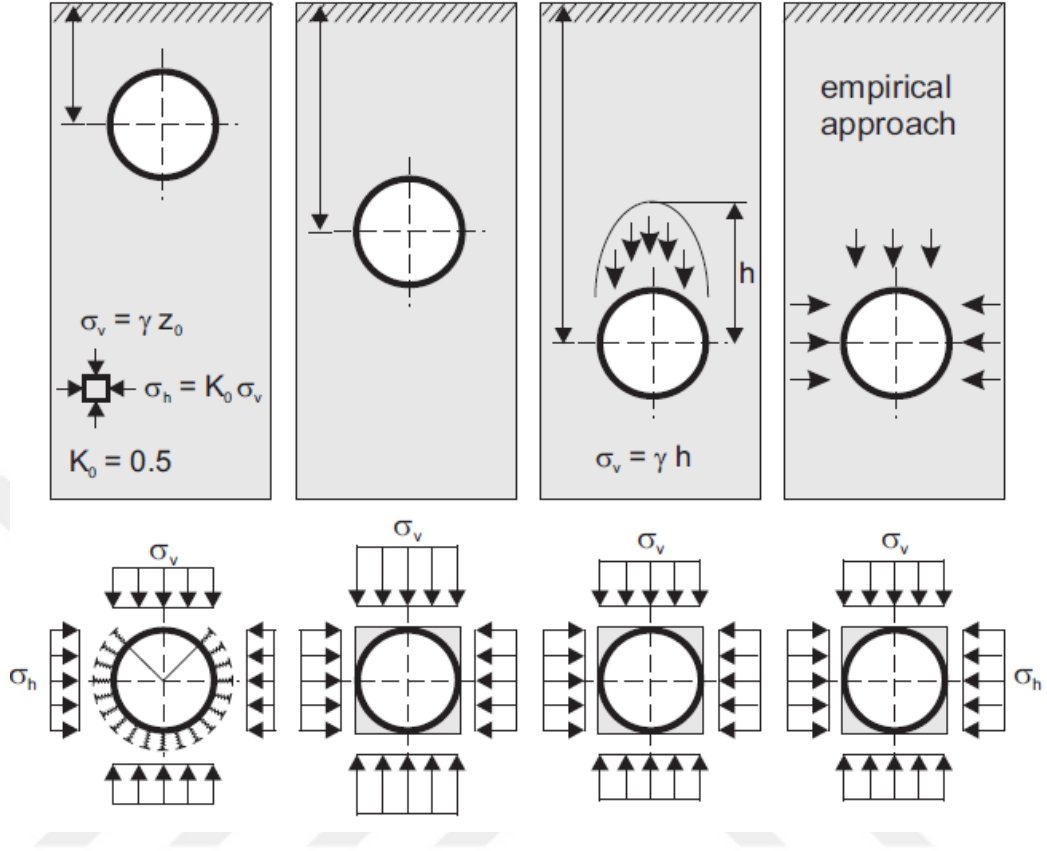
	YÜZEY KOŞULLARI				
	çok iyi	iyi	orta	zayıf	çok zayıf
	Kötüleşen Arazi Koşulları →				
 MASİF - MONOLİT	90	80		N/A	N/A
 PARÇALI 3 Eklm Takımı		70	60		
 PARÇALI 4 veya daha fazla eklm takımı			50		
 BLOKLU-PARÇALI kırınlanmalara sahip, şistozite etkili			40	30	
 UFALANMIŞ KAYAÇ				20	
 KESME DÜZLEMLERİ	N/A	N/A			10

Kaya kütleinin elastisite modülünün belirlenmesinde ortaya koyulan formüller Çizelge 3.17’de şöyle verilmiştir.

**Çizelge 3.17 :** Kaya kütleinin deformasyon modülü formülleri [27].

Kaya Kütleinin Deformasyon Modülü (MPa)	Referans
$E_m = 10^{\frac{(RMR-10)}{40}}$	Serafim ve Peretra (1983)
$E_m = 25 \log_{10} Q$	Barton ve diğerleri (1980, 1992), Grimstad ve Barton (1993)
$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right) *}$	Hoek ve Brown (1998)
$E_m = 100000 \left[ \frac{1-D/2}{1+e^{\left(\frac{75+25D-GSI}{11}\right)}} \right]^{**}$	Hoek ve Diederichs (2006)
$E_m = 2RMR - 100$ for $RMR \geq 50$	Bieniawski (1978)
$E_m = E_i / 100 \left[ 0.0028RMR^2 + 0.9 \exp(RMR / 22.82) \right]$ , $E_i = 50GPa$	Nicholson ve Bieniawski (1990)
$E_m = 0.1(RMR/10)^3$	Read ve diğerleri (1999)

$E_m$  Kaya kütlesinin deformasyon modülüdür (GPa). ITA (1988) çalışmasına göre alternatif model üzerinde etkili kuvvetler Şekil 3.7’de verildiği gibidir.



Şekil 3.7: ITA alternatif düzlem gerilim modeli [17].

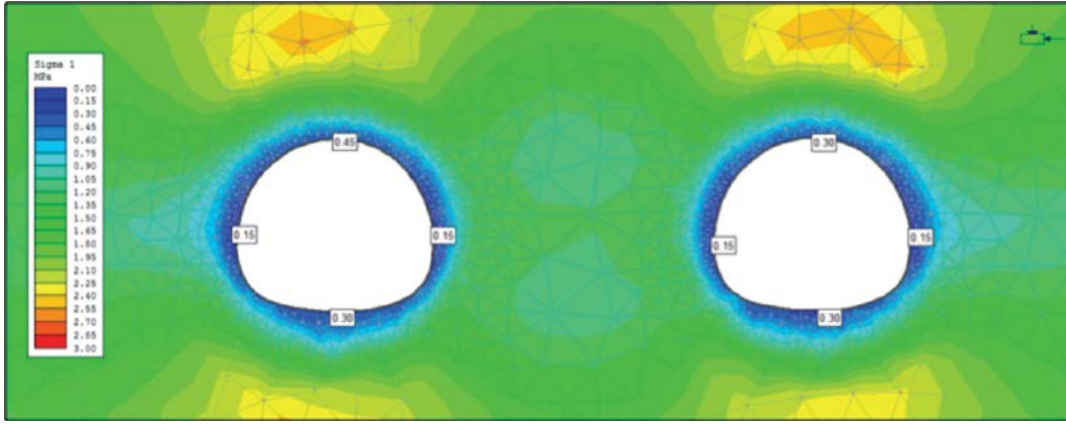
Burada  $\sigma_v$  düşey basınç gerilmesidir (MPa).  $\sigma_h$  yatay basınç gerilmesidir (MPa).  $K_0$  sükûnetteki toprak basıncı için belirtildiği gibi azaltma faktörüdür.  $\gamma$  zeminin birim hacim ağırlığı olarak göze alınmıştır. Modelde gerilmeler 3.9 ve 3.10’da verilen bağıntılar ile ilişkilendirilmiştir.

$$\sigma_v = \gamma H \quad (3.9)$$

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_v + \frac{\beta E_m G}{1-\mu} (H + 1000) \quad (3.10)$$

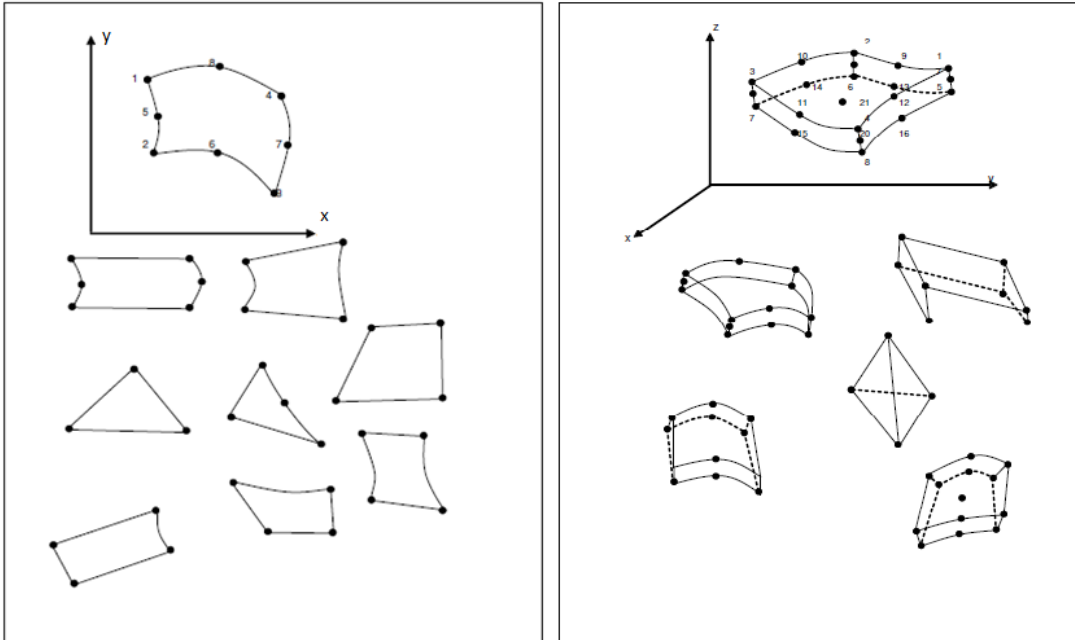
Burada  $\beta$  lineer ısı genleşme katsayısıdır ( $8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ).  $G$  Jeotermik gradyandır ( $0.024^\circ\text{C}/\text{m}$ ).  $\mu$  Kaya kütlesinin poisson oranıdır.  $H$  örtü yükü kalınlığıdır (m). Sonlu eleman yöntemi ile Phase<sup>2</sup> analiz programı kullanılarak yapılmış örnek çalışma sonucunda Şekil 3.8’deki grafik elde edilmiştir [3]. Bu çalışmada destek yapısı olmaksızın zeminde meydana gelecek kuvvetler gözlenmektedir. Ortaya çıkan asal

gerilmelerin büyüklüğü renklendirilerek sonuç kısmında program tarafından sunulmaktadır. Mavi ile gösterilen bölgeler düşük gerilmeleri kırmızı renk ise yüksek gerilme değerlerini belirtmektedir.



**Şekil 3.8:** Sonlu Eleman Yöntemi ile desteksiz tünel açıklığı etrafında gelişecek en büyük asal gerime dağılımlarının belirlenmesi [3].

Sayısal analizde bilgisayar programlarından yararlanılmaktadır bu amaçla Plaxis programından da yararlanılabilir. Hesap kısmında Plaxis ile hesap yapılması ve örnek hesaplara değinilecektir. Sonlu eleman modellerinde eleman tipleri değişebilmektedir. Fakat eleman tipinin değişmesi hesap sırasında artışa neden olacaktır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılan elemanların yapısı Şekil 3.9’da verilmiştir.

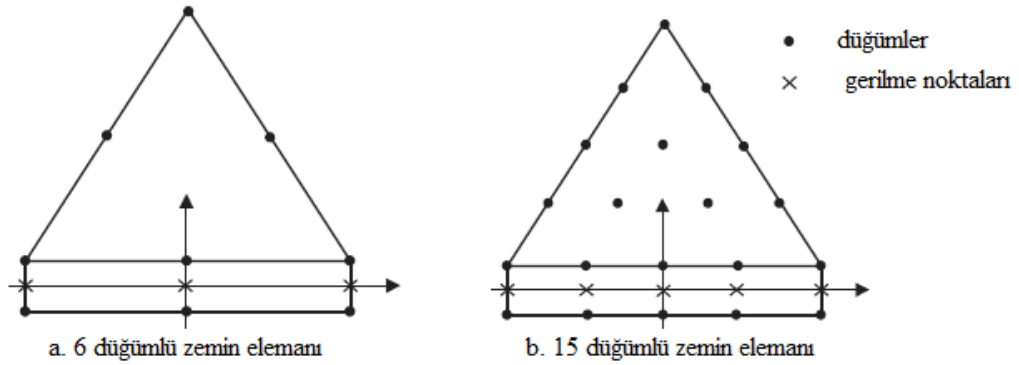


**Şekil 3.9:** Sonlu Eleman Yönteminde 2 boyutlu ve 3 boyutlu elemanlar [26].



Zemin ve içinde bulunan elemanlar küçük elemanlara bölünerek düğüm noktalarından kuvvet ve yer değiştirme aktardığı esasına göre hesap edilirler. Yer değiştirmelerden kuvvetlere ve kuvvetlerden yer değiştirmelere geçiş yapılır [1]. Plaxis programında bu düzlem gerilme olarak tanımlanmış ve kullanılan elemanlar Şekil 3.10'da verilmiştir. Plaxis programında 6 ve 15 düğüm noktalı 2 farklı sonlu eleman kullanma imkânı vardır. Bu noktalar arasındaki değerleri program orantı yaparak hesaplamaktadır. Burada amaç elemanın şekil değiştirme sonucu tek nokta haline gerek diğer elemanlarla bağlantısız hale gelmesini engellemektir.

15 noktalı modelle arasında düğüm noktası ve gerilme noktası sayısı farkı vardır. Plaxis programında her hesap aşaması için mesh adı verilen elemanların kalitesini kontrol etmek mümkündür.



**Şekil 3.10:** Plaxis programında kullanılan 2 boyutlu elemanlar [23].

Ayrıca zemin ile yapı etkileşimi söz konusu olduğunda ciddi rijitlik farklarının meydana gelmesinden köşe noktalarda bu eleman düğümlerinin birleşmesi sorun teşkil edebilmektedir. Bu birleşimlerde Plaxis programı çoklu köşe düğüm noktalarını kullanarak hata oranını azaltmaktadır. Malzeme özelliklerinin dikkate alınması düzlem-birim yer değiştirme modeli deformasyon şartları 3.11 bağıntısı ile tanımlanır.

$$D = \frac{E/(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu/(1-\nu) & 0 \\ \nu/(1-\nu) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/(2(1-\nu)) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Burada [D] malzeme matrisi olmaktadır. [k] Rijitlik matrisinin kurulmasında, [B] elemanların birim yer değiştirme-deformasyon matrisi ile birlikte hesaba katılacaktır. Genel matrisin bağıntısı 3.12 ile verilmiştir.

$$k = \int_v B^t D B dv \quad (3.12)$$

Sistemin rijitlik matrisi yazıldıktan sonra doğrusal denklemler oluşturularak bilinmeyen değerler olan kuvvet ve yer değiştirmelere ulaşılır. Bu bağıntı 3.13'de verilmiştir.

$$[k]\{\delta\} = \{Q\} \quad (3.13)$$

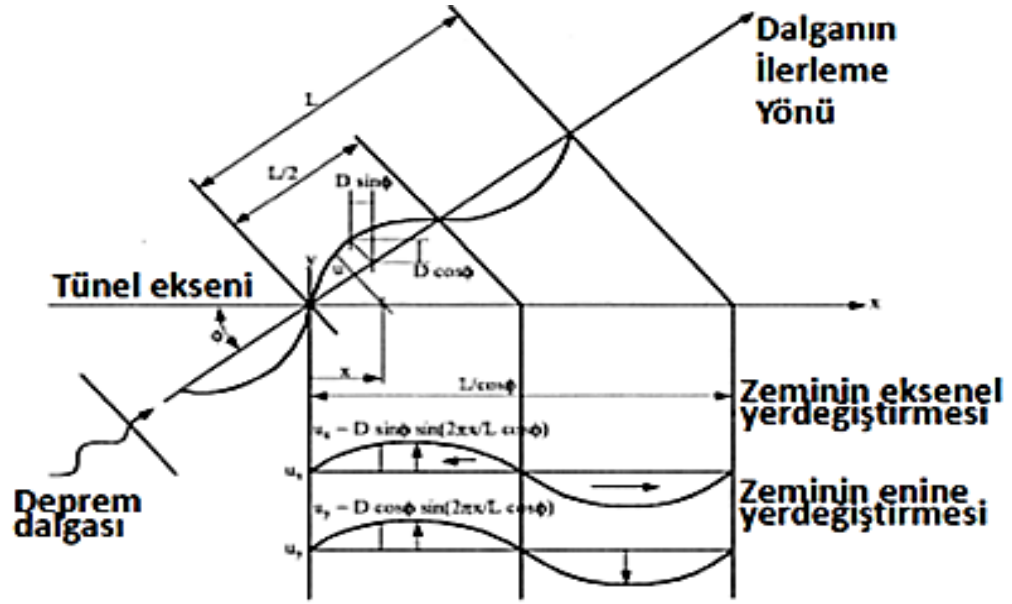
Elemana ait yer değiştirme matrisleri bağıntının çözümüyle bulunarak, elemana ait birim yer değiştirme-birim deformasyon matrisi ile çarpıldığında elemanda oluşacak birim yer değiştirmelere ait matris  $\{\mathcal{E}\}$  elde edilir. Buradan hareketle birim deformasyon matrisi ile malzeme matrisi  $[D]$  çarpıldığında eleman gerilmeleri  $\{\sigma\}$  elde edilecektir. Bu esasa dayanarak elemanlar arasındaki değerler hesaplanmaktadır.

### 3.6 Depremın Tünel Etkileri

Yer kabuğunda oluşan yırtılmalar ile meydana gelen enerji boşalması yer üstü yapılarını etkilediği gibi yer altı yapılarına da etki eder. Tüneller aksel yönde oldukça rijittir açıklık boyunca tüp şeklinde bir kesite sahip olduklarından kesit rijitlikleri düşey yönlerine oranla yüksektir. Meydana gelecek hareketin sonucunda beklenmesi en muhtemel durumlar elemanlar arasındaki bağlantılarda açılmalar olmasıdır. Bu bağlantı teşkillerinin elastiklikleri oranında meydana gelecek açılmalar ve bağlantı elemanlarının kalıcı şekil değiştirmeleri sonucunda tünel destek bölütlerinde düzensizlikler meydana gelebilir. Ayrıca zemin içerisinde meydana gelen hareketin sonucunda yüklerde artış meydana gelebilir. Bu durumun ölçülmesi amacıyla kaplama üzerindeki eleman yer değiştirmelerinin ölçülmesi daha detaylı sonuç verebilir. Deprem durumunda önemli olan durum kaplama ile zeminin birlikte hareket edebilmesidir. Tünel ile yer hareketi arasındaki uyum F esneklik kat sayısı ile tanımlanır. Esneklik katsayısı için Wang (1993) yayınında 3.14 bağıntısı verilmiştir [29].

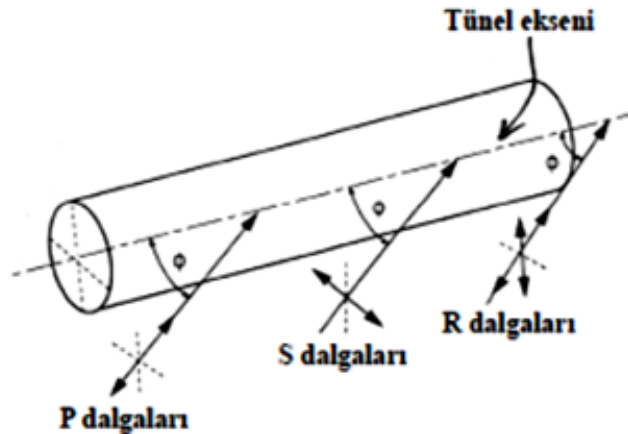
$$F = \frac{G_m \times W}{S \times H} \quad (3.14)$$

$G_m$  kaya kütlesi/zeminin kayma modülü,  $W$  tünel açıklığı,  $H$  tünel yüksekliği ve  $S$  yatay yönde birim öteleme için gerekli kuvvettir. Deprem sonucu ortaya çıkan dalgalar tünel eksenini kestiği noktalarda tünel destek yapısına etki ederler, bu etkiler Arıoğlu ve Yılmaz (2006)'da Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 ile açıklanmıştır [4]. Enerji dalgalar halinde yayılırken tünel yapısında bu dalgalardan birim yer değiştirmeler meydana gelecektir. Enerji dalgaları Şekil 3.13'de gösterilmiştir.

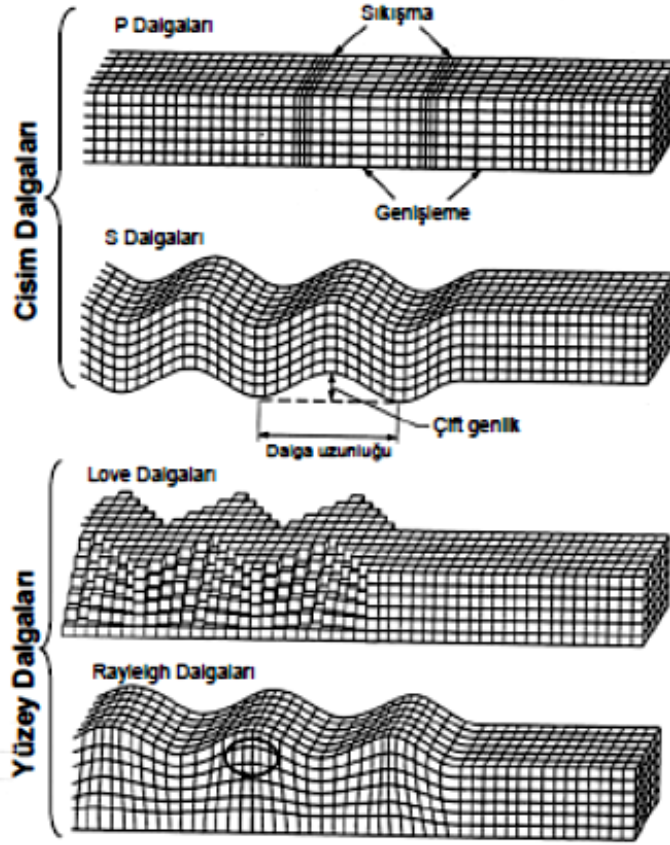


Şekil 3.11: Cisim ve yüzey dalgalarından oluşan birim yer değiştirmeler [4].

Tünel eksenine  $\phi$  açısı yapan basit harmonik sinüs dalgasının zeminde oluşturduğu  $u_x$  boyuna ve  $u_y$  enine yer değiştirmeler ve  $L$  dalga boyudur. Şekil 3.12'de tünelde boyuna ve enine eğilmeye yol açan tünel eksenine  $\phi$  açısı yapan P,S,R dalgaları verilmiştir.



Şekil 3.12: Cisim ve yüzey dalgalarının oluşturduğu eğrilik [4].



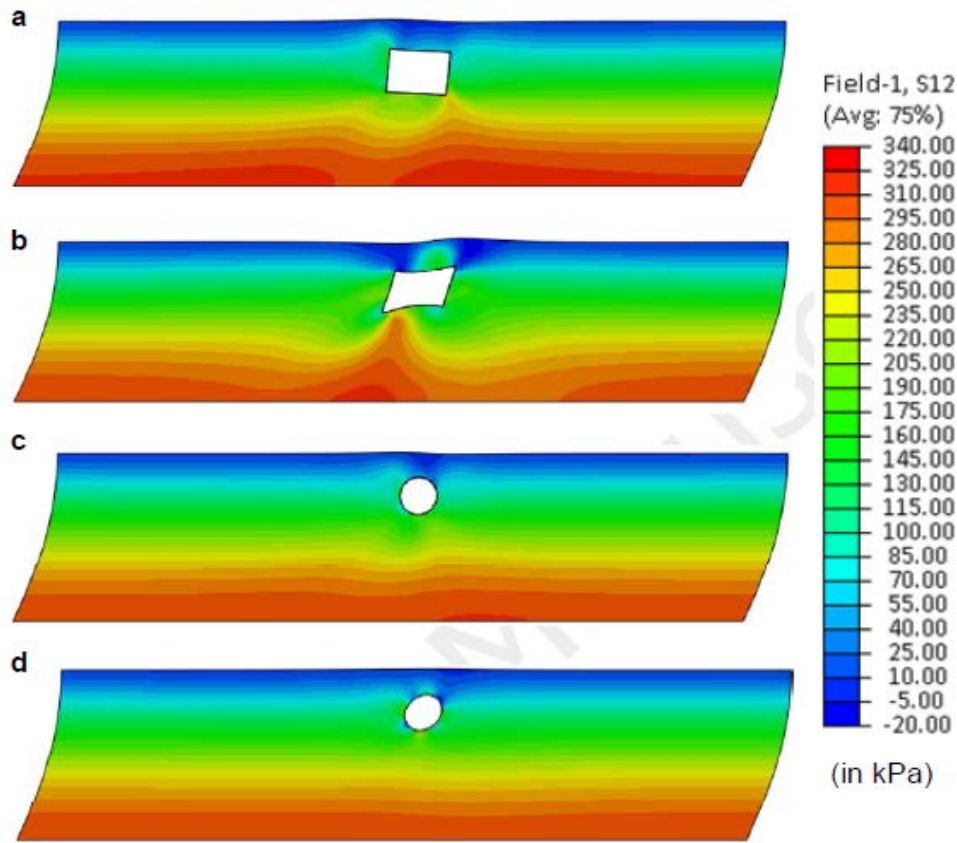
Deprem Dalgası		Özellikleri
Cisim dalgaları	"P" Dalgaları	P dalgaları yayılma sırasında kayaları ileri-geri itip-çekerek dalgaların ilerleyiş yönüne paralel hareketler yaparlar. Tıpkı bir ucu sabit olan bir spiral yayı gerip de bıraktığımızdaki salınımı gibi hareket ederler. Yayılma hızları saniyede yaklaşık 8 km'dir. Deprem ölçüm merkezine en önce gelen bu dalgaların en önemli özelliklerinden birisi de her türlü ortamda -katı, sıvı ve gaz- ilerleyebilmeleridir
	"S" Dalgaları	Deprem istasyonuna ikinci sırada ulaşan dalgalar olup, hızları saniyede yaklaşık 4.5 km kadardır. Gerek P gerekse S dalgaları-nın yayılma hızları geçtikleri jeolojik birimlerin özellikleri ile-katman kalınlığı, çatlak yapıları, porozite vb-yakından ilişkilidir.Bu dalgalar sadece katı ortamlarda ilerleyebilmekte ve cisimleri aşağıya-yukarıya ve sağa-sola doğru hareket ettirmektedir. Dalgaların arasında en "tahripkar" olanıdır.
Yüzey dalgaları	Love Dalgaları	Yüzey dalgalarını en hızlısı olup, yeri sadece yatay düzlemde hareket ettirir .
	Rayleigh dalgası	Bir göl veya denizin üzerinde yuvarlanan dalga salınımı gibi yer üzerinde hareket eder. Deprem sırasında hissedilen sallantıların çoğu, diğer dalgalardan çok daha büyük genlikli olan bu dalgalardan kaynaklanmaktadır.

Şekil 3.13: Deprem dalgaları ve zeminde oluşturduğu etkiler [4].

Deprem dalgaları P, S, Love ve Rayleigh Dalgaları olmak üzere tünel boyunca farklı etkiler ortaya çıkarmaktadır. Yer içerisinde ilerleyen P ve S dalgaları tünel aksı boyunca çekme ve basınç bölgeleri oluştururlar.

Zemin içerisinde tünelin kesme kirişi gibi hareket edeceği düşünülebilir. Pitilakis ve Tsisnidis, 2013'te kurulan modele göre zemin içerisinde tünellerde meydana gelecek yer değiştirmeler Şekil 3.14'de verilmiştir [22].

Burada tünel yapısı deprem dalgaları sonucunda boyuna eğilme, aksenal sıkışma ve açılma, ovalleşme etkileri altındadır. Modelin 2 boyutlu olması nedeniyle ovalleşme durumu gözlemlenmektedir. Ovalleşme durumunda b ve d şekillerinde kutu ve dairesel kesitin deformasyonu görülmektedir.



**Şekil 3.14:** Deprem dalgalarının oluşturduğu birim yer değiştirmeler [22].

Deprem etkisi altında tünel yapılarının hesabında kullanılacak yükleme kombinasyonları Wang (1993) yayınında aç kapa yöntemi için 3.15 ve 3.16 bağıntılarıyla verilmiştir. Diğer yöntemler için ise 3.17 ve 3.18 bağıntılarıyla verilmiştir [29].

$$U = D + L + E_1 + E_2 + EQ \{MDE\} \quad (3.15)$$

$$U = 1.05 \times D + 1.3 \times L + \beta_1 (E_1 + E_2) + 1.3 \times EQ \{ODE\} \quad (3.16)$$

$$U = D + L + E_x + H + EQ \{MDE\} \quad (3.17)$$

$$U = 1.05 \times D + 1.3 \times L + \beta_2 (E_x + H) + 1.3 \times EQ \{ODE\} \quad (3.18)$$

Bu bağıntılarda U gerekli yapısal güç kapasitesidir. D zati yüklerdir. L canlı yüklerdir. E<sub>1</sub> düşey zemin yüküdür. E<sub>2</sub> yatay zemin yüküdür. E<sub>x</sub> kazıdan kaynaklı yüklerdir. H hidrostatik yüklerden kaynaklanan etkilerdir. EQ tasarım depreminden meydana gelen yüklerdir. β<sub>1</sub> boyutsuz yükseltgenme katsayısı olup, 1.05 alınır. E<sub>1</sub> ve E<sub>2</sub> belirsizliği olduğu durumlar için 1.3 olacaktır. β<sub>2</sub> Boyutsuz yükseltgenme katsayısı olup, 1.05 alınır. E<sub>x</sub> ve H belirsizliği olduğu durumlar için 1.3 olacaktır. MDE maksimum tasarım depremidir. ODE işletme tasarım depremidir.

Deprem dalgalarının meydana getirdiği birim şekil değiştirmeler sonucu tünel üzerinde ortaya hasarlar çıkması beklenebilir. Tünel zemin içerisinde bulunması nedeniyle yer değiştirmelere hassas tepkiler verecektir. Bu etkilerden kaynaklanan hasarları Bölüm 4'te inceleyeceğiz.

#### 4. TÜNEL HASARLARI VE ONARIM

Tünellerde yapım aşamasında ve yapım aşamasından sonra zemin basınçlarından, oturmalarından, su seviyesinin yükselmesinden, kazı çalışmaları ve titreşimden, yangından ve araç kazalarından kaynaklı hasarlar meydana gelebilir. Bu hasarlar çatlaklar ve kırıklar ile ortaya çıkabileceği gibi destek yapısında ve portallarda ayrışma, göçmeler ve şev kaymaları şeklinde görülebilir.

Bu kısımda tünellerde oluşabilecek hasarların mekanizmalarını özetlenerek neden sonuç ilişkisi kurulacaktır. Yapım ve işletme sırasında hasarlar meydana gelebilecek hasar tipleri değerlendirilecektir.

##### 4.1 Hasarların İncelenmesi

**Yapım sırasında oluşacak hasarlar:** TBM ile açılan tüneller için üretilen bölütler (parça) TBM'e ulaşıncaya kadar taşıma işlemlerine maruz kalırlar bu taşımalar sırasında yığın şeklinde depolanırlar. Bu yığınların arasında yük aktarımı takozlar vasıtasıyla sağlanır. Yerleşimi destek noktaları ile çakışmadığı takdirde bölütler erken yüklemelere maruz kalabilir. Şekil 4.1'de yükleme işlemi gösterilmiştir.



**Şekil 4.1:** Betonarme prekast bölütlerin taşıyıcıya yüklenmesi [22].

Şekil 4.2'de yükleme sırasında kaldırma aparatının temas ettiği yüzeyde ortaya çıkan çatlak görülmektedir. Kaldırma işlemleri sırasında kırılmaların ve çatlamların ortaya çıkmasının önüne geçilmesi amacıyla dış yüzlerde yanak mesafesinin, conta dışı beton

kalınlığının yeterliliği önemli olmaktadır. Ayrıca kaldırma noktaları ilgili kaldırma aparatının şekline bağlı olarak güçlendirilebilir.



**Şekil 4.2:** Betonarme prekast bölütlerin yüklenmesi sırasında ortaya çıkan hasar.

Tünel yapımı aşamasında kullanılan makine ve ekipmanların, kazı yöntemlerine göre farklılaşması sonucunda tünel destek yapısı üzerine farklı yükler ve titreşimler uygulanabilmektedir. Bu durumları ele alacak olursak, TBM kazılarında, bölüt blokları arasında farklı hareketler meydana getirerek hasar meydana getirebilir. Bunlar yükleme mekanizmasına bağlı olarak kırıklar ve çatlaklar şeklinde ortaya çıkar. Yapım aşamasında ortaya çıkan çatlaklar Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

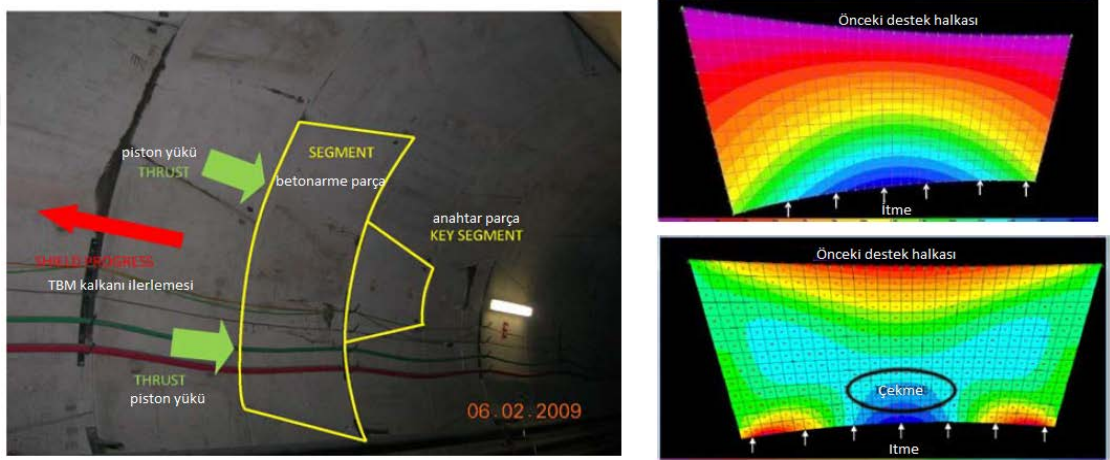


**Şekil 4.3:** Yapım aşamasında sıralanmış bölüt üzerinde ortaya çıkan çatlaklar [13].

Çatlakların TBM kazısı esnasında oluşmasına etki eden faktörler plakların yeterince dayanımını almadan örselenmesi olabilmektedir. TBM kazıları süresince prekast



fabrikasından kalıptan alma, stoklama, kamyonla yüklenme safta indirilmesi ve TBM'e taşınması gibi birçok evreden geçen parçalar yerine monte edildikten sonra TBM kazısı ilerleyip içsel yük dağılımı sağlanıncaya kadar bulonlar ile birbirine tutturulmaktadır. TBM kazısı sırasında kazıcı kafaya tahriki sağlayan ana pistonlar üzerinden kazı yükleri bölütlere tünel aksı doğrultusunda aktarılmaktadır. Şekilde görülen çatlakların oluşmasının ana nedeni bu olmakla beraber, halka arkasındaki enjeksiyon tabakası da bu konuda büyük rol oynamaktadır. Piston yerleşiminin etkisiyle ortaya çıkan çatlaklar için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Focaracci, A. (1998) yayınında yapılan hesap Şekil 4.4'te verilmiştir.



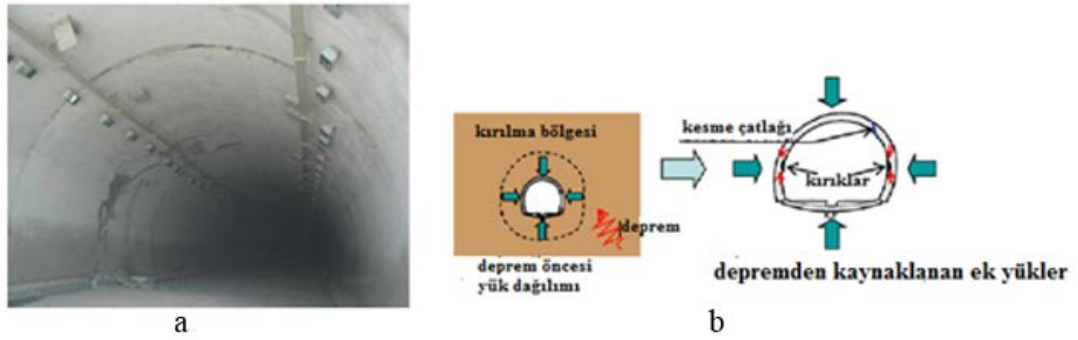
**Şekil 4.4:** Yapım aşamasında sıralanmış bölüt üzerinde ortaya çıkan çatlakların analizi [13].

**Deprem hasarları:** Eksenel şekil değiştirme, tünel eksenine paralel meydana gelecek olan şekil değiştirmelerdir. Şekil 4.5'te deprem sırasında oluşacak hasar mekanizmaları özetlenmiştir. Sıkışma durumunda yapısal çatlak ve kırıklar oluşabileceği gibi göçmeler de meydana getirebilir. Açılma durumunda ise boşluklar, ayrılmalar, halka yapılarının göçmesi meydana gelebilir. Boyuna eğilmeler ve ovalleşmeler aksi yer değiştirmeler sismik dalga bileşenleri tarafından ortaya çıkmaktadır. Eğilme yer değiştirmeleri diğer yer değiştirmelerin oluşmasından farklı olarak, sismik dalgaların tünel aksına dik parça hareketi yapan bileşenleri tarafından meydana gelmektedir.

Eksenel sıkışma ve açılma	<p>(a) Sıkışma - açılma</p> <p>(b) Tünel kesitinin sıkışması</p>
	<p>Tünelde eksenel şekil değiştirme: Tünel/galeri eksenine paralel doğrultudaki dalga yayılımlarının yol açtığı şekil değiştirmelerdir. Bunlar kaya kütlelerinin kılınmasına (basınç), uzamasına (çekme) neden olur. Kaya kütlelerinin özellikle çekme gerilmesi altındaki dayanımı çok düşük olduğu dikkate alınır, sarsıntı tünel cidarında kaya parçalarının (kavlaklar) dökülmesine yol açarlar. Şiddetli ve uzun süren sarsıntı durumunda cidarlardaki süreksizliklerin çekme gerilmesi altında açılmaları beklenmelidir.</p>
Boyuna eğilme	<p>(c) Boyuna eğilme</p> <p>(d) Diyagonal dalga yayılımı</p>
Boyuna eğilme	<p>Tünel ekseninin kıvrılınması: Tünel/galeri ekseninde paralel ilerleyen dalgaların tünel eksenini kıvrılınmaya zorlamasıdır. Şekilden görüleceği üzere negatif kıvrılınmaya maruz kalan bölgede tünelin üst kısmı çekme gerilmesine çalışırken alt kısmı basınç gerilmesine maruzdur. Özellikle çekme gerilmesine maruz bölgelerde kırılmalar-yenilmeler gözlenir. Basınç gerilmesine maruz kalan bölgelerde ise aşırı ölçüde basınç gerilmesi yoğunluğu söz konusudur. Gerilme yoğunluğu düzeyine ve çatlaklılık parametrelerine bağlı olarak kaya kütlelerinde ve destek sisteminde yenilmeler-göçmeler beklenmelidir.</p>
Ovalleşme / Ötelenme	<p>(e) Tünel kesitinin ovalleşmesi</p> <p>(f) Tünel kesitinin ötelenmesi</p>
	<p>Ovalleşme ve ötelenme: Kayma dalgası tünel eksenine normal ya da normale yakın şekilde yayıldığında, tünel kesiti dairesel tünellerde ovalleşme şeklinde, dikdörtgen kesitli tünellerde ötelenme şeklinde bir şekil değiştirme durumu meydana gelmektedir.</p>

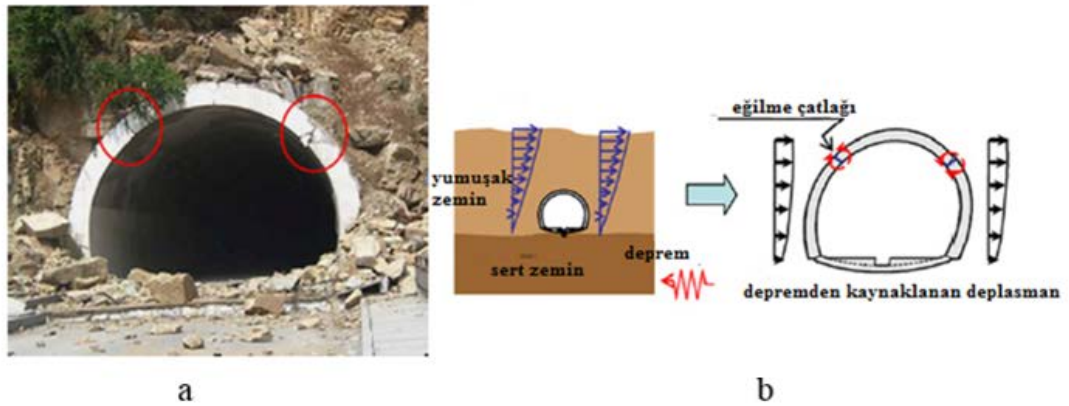
Şekil 4.5: Tünelde deprem nedeniyle ortaya çıkan hasarlar [4].

Tünellerde deprem durumu dışında da hasarlar meydana gelebilmektedir. Fakat deprem durumunun göz önünde bulundurulması için Wenchuan depreminde hasar gören Longxi Tüneli incelenmiştir. Ovalleşme yer değiştirmeleri kesme dalgalarının tünel aksına dik veya dike yakın yayılması sırasında ortaya çıkmaktadır. Yayılım sırasında tünel kesitinde bozulmalar meydana gelebilir ve kutu kesitlerde ötelenmeler oluşabilir. Wenchuan depremi nedeniyle ortaya çıkmış hasarlar aşağıda Şekil 4.6 ve Şekil 4.13 arasında mekanizmalarına göre incelenmiştir. Ters jeoloji durumu; bu durumda tünele gelen yük dağılımı jeolojik yapının farklı olduğu kısımlarda deprem sonrasında değişmiştir. Portal bölgesinde meydana gelen hasarlar kesme çatlakları ve kırıklar şeklinde olmuştur. Durumun özeti Şekil 4.6’de verilmiştir.



**Şekil 4.6:** a) Wenchuan depreminde gözlenen ters jeolojiden kaynaklı tünel hasarı b) hasar mekanizması [30].

Portal 'da ovalleşme nedeniyle meydana gelen eğilme çatlakları. Tünel zemini sert olması ve içinde bulunduğu zeminin yumuşak olması ve deprem dalgaları nedeniyle ortaya çıkan yük dağılımı Şekil 4.7’de verilmiştir.



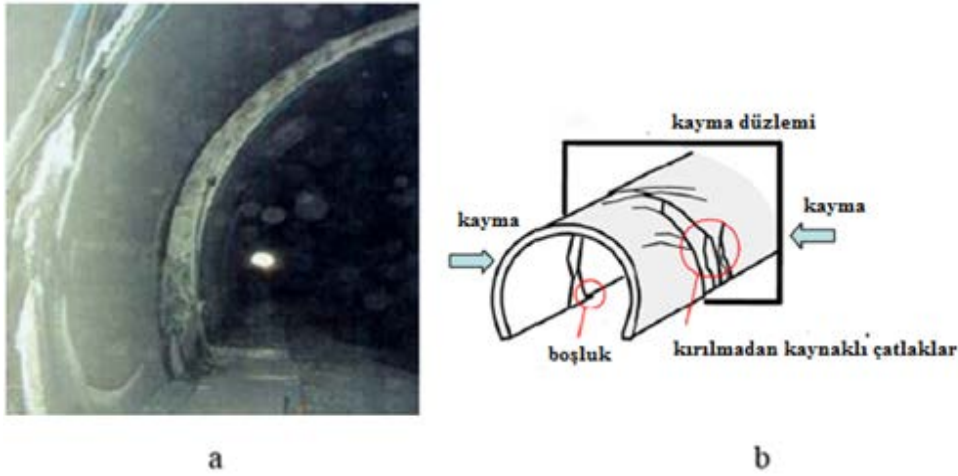
**Şekil 4.7:** a) Wenchuan depreminde gözlenen portal hasarı b) hasar mekanizması [30].

Kaya düşmeleri, tünel girişi çıkışları servis alanlarında şevlerin stabil olmayışına bağlı olarak kaya düşmeleri ve şev göçmeleri meydana gelebilmektedir. Şekil 4.8’de kayma ve kaya düşmesi olan kısımlara ait fotoğraflar verilmiştir.



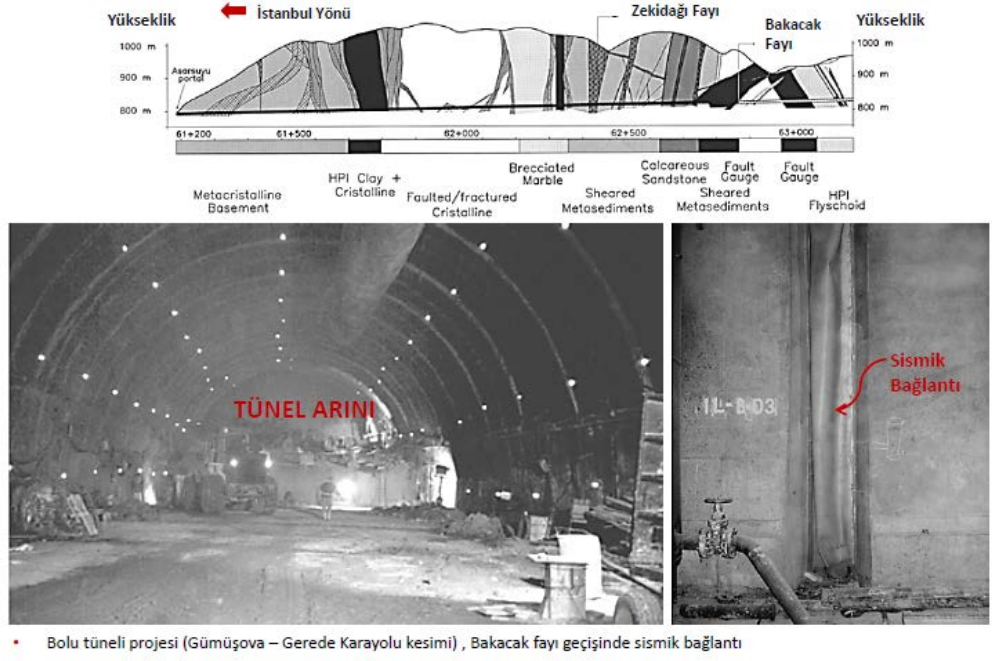
Şekil 4.8: a) Wenchuan depreminde şevde kaya düşmesi, b) kaya kayması [30].

Fay düzleminin de kayma nedeniyle oluşan hasarlar, Şekil 4.9’de Longxi tüneline oluşan kayma görülmektedir. Benzer bir durum Bolu tüneline de söz konusu olmuştur.



Şekil 4.9: a) Wenchuan depreminde fay düzleminde kayma nedeniyle oluşan hasarlar, b) hasar mekanizması [30].

Bolu Tüneli’nde fay geçiş bölgesinde bu amaçla sismik bağlantı uygulanmıştır. Şekil 4.10’da uygulama fotoğrafları verilmiştir. Fay geçiş bölgelerinde birleşim bölgelerinde açılmalar yüksek miktarlarda ortaya çıkabilir. Tünel içerisinde bulunan ray veya yola zarar verebilir. Bu noktalarda dilatasyonlar uygulandığı takdirde deprem sırasında malzeme hasarlarından ortaya çıkabilecek zararlar önlenir. Buna dair uygulama örneğini Bolu Tüneli’nde görebiliriz.



• Bolu tüneli projesi (Gümüşova – Gerede Karayolu kesimi) , Bakacak fayı geçişinde sismik bağlantı

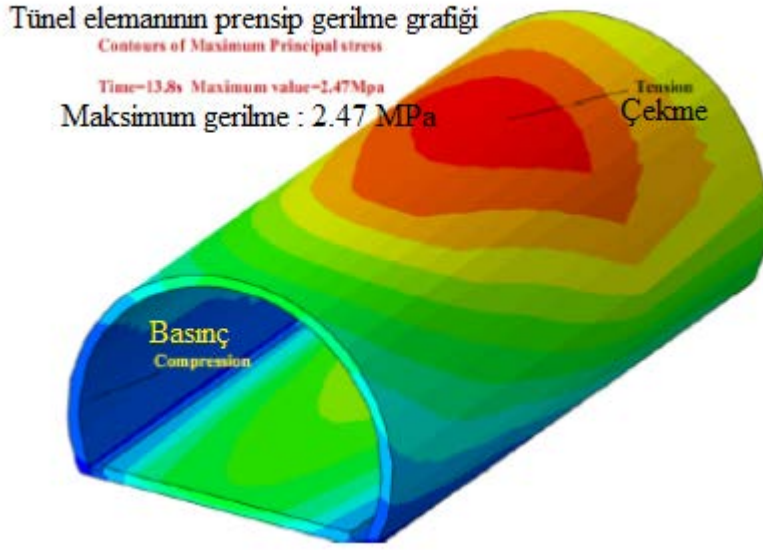
**Şekil 4.10:** Bolu Tüneli’nde fay geçiş bölgesinde sismik bağlantı detayı [28].

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de Wenchuan depreminde Longhxi Tünel’inin portalında ortaya çıkan çatlaklar ve bu bölgeye ait yük dağılımı gösterilmiştir.



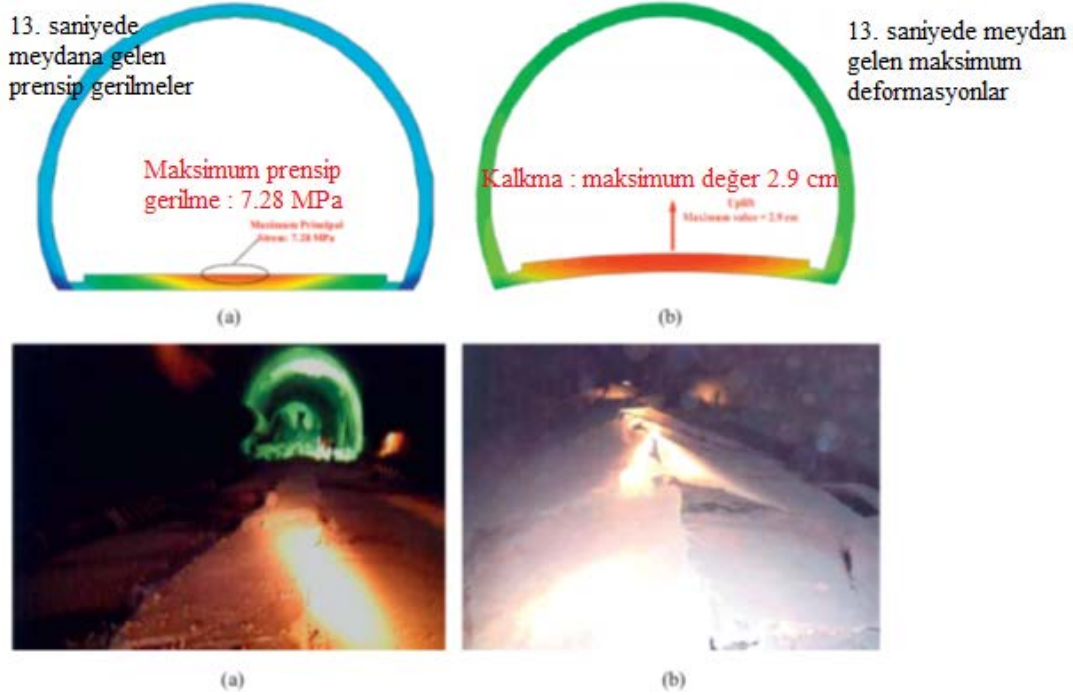
**Şekil 4.11:** Wenchuan depremi sonrası Longhxi Tünel’inde ortaya çıkan çatlaklar ve kırıklar [28].

Model üzerinde çekme ve basınç bölgeleri gösterilmiştir. Bu bölgeler etrafında oluşan kırıklar ve çatlak bölgeleri görünmektedir. Tünellerde destek yapısının kapasitesinin aşılması durumunda derin çatlaklar ve kırıkların gözlenmesi beklenen bir durumdur. Şekil 4.12’de portalda meydana gelen çatlakların hesap sonuçları verilmiştir.



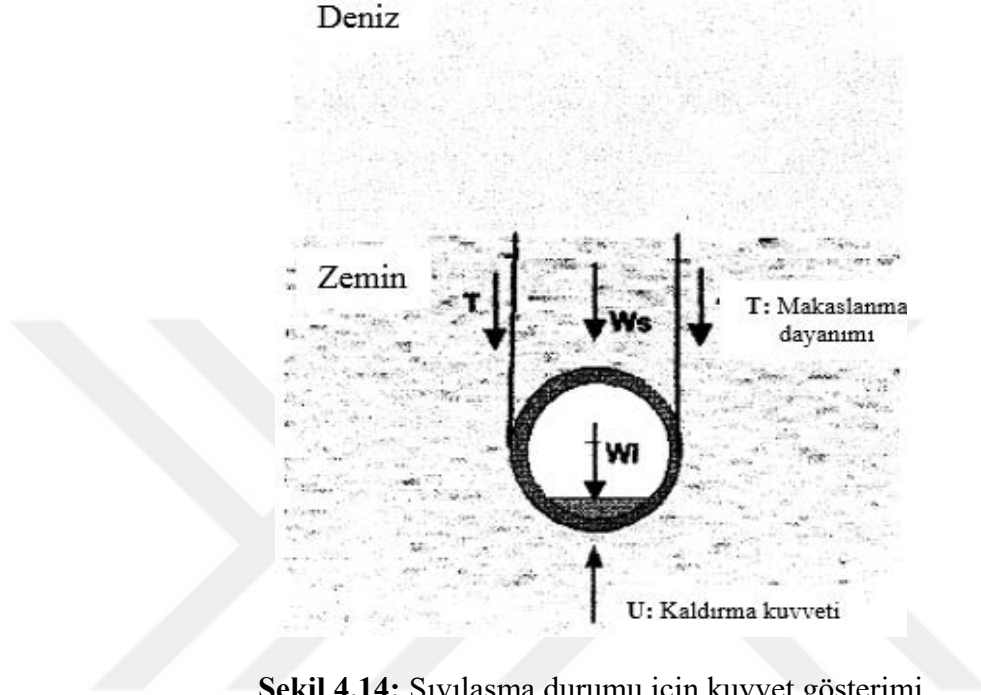
Şekil 4.12: Wenchuan depreminde Longxi tünel portalında ortaya çıkan çatlaklar ve kırıkların yük mekanizması [28].

Tünelde çatlaklar ve kırılmalar meydana gelmiştir. Bu çatlak mekanizmaları incelendiğinde betonarme destek sistemlerinde meydana gelecek yer değiştirmeler altında yapıda derin çatlaklar oluştuğu gözlenmektedir. Ayrıca tünelde sıvılaşma durumu da ortaya çıkmıştır. Tünel içinde sıvılaşma sonucu ortaya çıkan kalkma durumu Şekil 4.13’de incelenmiştir.



Şekil 4.13: Wenchuan depreminde Longxi tünel tabanında yükselmenin oluşması ve numerik modeli [28].

Sıvılaşma etkisi, deprem sırasında zemin kohezyonsuz ise efektif gerilme azalması ile zeminin sıvı gibi davranmasıdır. Şekil 4.13’de verilen analiz sonuçları incelendiğinde tabanda yükselme meydana geldiği anlaşılmaktadır. 2.9 cm tabanda yükselme olduğu belirtilmiştir. Yükselme bölgelerinde çatlaklar ve kırıklar oluşmuştur. Şekil 4.14’de sıvılaşma durumu için kuvvet gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.14: Sıvılaşma durumu için kuvvet gösterimi

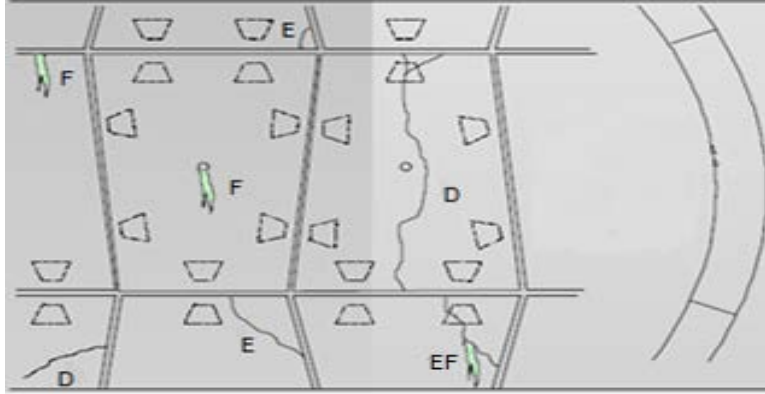
T makaslanma dayanımı,  $W_s$  tünel üzerindeki zemin ağırlığı ve  $W_i$  tünel kaplamasının ağırlığıdır. Tünel tabanında oluşan “U” kaldırma kuvveti Longxi Tünel’inde zeminin deformasyonuna neden olmuştur.

## 4.2 Hasar Tipleri

Destek yapısı kapasitesinin aşıldığı bölgelerde kırık ve çatlaklar meydana gelmektedir. Tünel kaplamasında oluşabilecek hasar tipleri Şekil 4.15’de verilmiştir. Burada D çatlaklar, E kırıklar, F su sızıntılarıdır. Bu hasar tiplerinin giderilmesinde iki aşamalı bir güçlendirme izlenmesi uygun görülmüştür.

İlk aşamada tünel içerisinde su sızıntıları ve destek parçalarında gözlenebilir yer değiştirmeler olmuş ise bu bölgelerde zeminin güçlendirilmesi amacıyla enjeksiyon uygulanması yapılmasıdır. Onarım amacıyla uygulanacak olan enjeksiyon zeminin yıkama durumuna göre değerlendirilmelidir. Yıkama durumunda zemin içerisinde su

akımı olması nedeniyle yapılan halka enjeksiyonun veya dolgu enjeksiyonun yıkanmasına, enjeksiyon harcının ortamdaki uzaklaşmasına yol açacaktır.



**Şekil 4.15:** Destek yapısı üzerinde oluşan hasar tipleri

Bu durumda ortamda enjeksiyon kalmayacağı gibi, tasarım değerlerine de bağlı olarak, enjeksiyon harcı su akımının olduğu boşlukları belki dolduramaz ve yapılan işlem bir sonuç vermeyebilir. İkinci aşama tünel destek yapısının yerel hasarının giderilmesi olacaktır. Lokal onarımın yapılmasında kimyasal enjeksiyon malzemelerinden yararlanılması, ufak çaplı su sızıntılarının durdurulması için uygun bir yöntemdir. Fakat malzeme teknolojilerinin gelişmesi ile daha kolay yöntemler de uygulanabilir hale gelmektedir. Hasarların önlenmesi için enjeksiyon ile zemin iyileştirilmesi destek yapılarının onarımı için kısa süreli tedbir olabilir. Uzun süreli tedbir tasarımı, üretim aşamalarındaki aşırı yükleri düzgün dağılmasını sağlayacak ek detayların teşkil edilerek hasar oluşumunun önlenmesidir. Su sızıntılı hasarlarda öncelikle kimyasal enjeksiyon ile su kesilerek, ortam çatlak ve kırıklar sistemine dönüşecektir. Daha sonra destek yapısı için uygun onarım yöntemleri şu şekilde ele alınabilir.

Çatlakların onarılması için epoksi enjeksiyonu ile çatlak yüzeyleri arasında bağlanma sağlanmalıdır. Çatlak içlerinin iyi bir şekilde doldurulmasını sağlamak amacıyla gerekli basınç ve sıklık tutturulmalıdır. Çatlak derinliği ile enjekte edilmesi gereken miktar artacağından ve kılcallanma olacağından malzemenin viskozitesine bağlı olarak gerekli basınç yükselebilir.

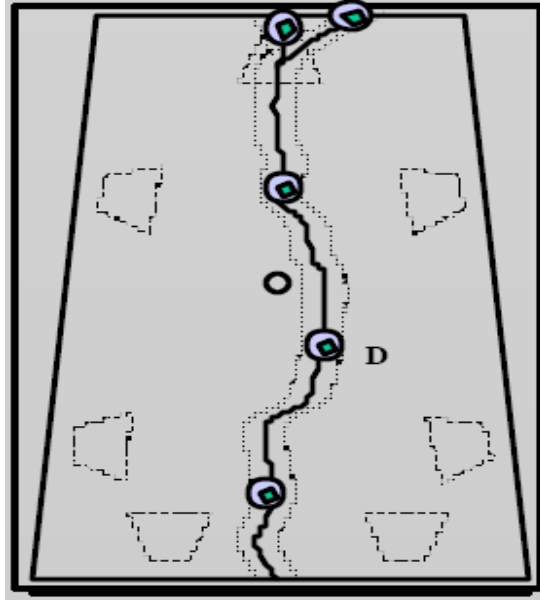
Epoksi ve Poliüretan malzemeleri lokal olarak çatlakların onarımında kullanılırken çatlak etrafında veya üzerinde açılan deliklere kimyasal enjeksiyona uygun enjektörler yerleştirilmekte ve sabitlenmektedir. Basınçlı uygulama yapılacak bu bölgelerde enjektörün deliğe yerleştirilmesi ve sızdırmazlığı oldukça önemlidir Şekil 4.16'da kimyasal maddenin enjeksiyonu için kullanılan enjektörün resmi verilmiştir.





**Şekil 4.16:** Kimyasal enjeksiyon için kullanılan enjektör.

Uygulanacak olan kimyasal maddenin amacına ve yayılma özelliğine göre enjektör yerleşimi yapılır. Örneğin suyun durdurulması amacıyla su ile şişen Poliüretan köpük maddelerin uygulanması için destek yapısı kesit boyunca delinir ve çatlak ya da su gelen bölge arkasına kimyasal enjeksiyonu yapılarak suyun kesilmesi izlenir. Fakat epoksi enjeksiyonu bundan çok daha farklıdır. Şekil 4.17’de çatlak üzerinde enjektör yerleştirilme şeması verilmiştir.



**Şekil 4.17:** Çatlak üzerine yerleştirilen enjektörler.

Epoksi enjeksiyonu yapılacak olan çatlak yüzeyleri kuru olmalıdır. Eğer bir dayanım beklentisi yoksa yalıtımının sağlanması için başka yöntemler de uygulanabilmektedir.

Kırıkların onarılması edilmesi için yüzey suya doymun kuru olmalı, serbest maddelerden arındırılmış olmalı. Betonarme yüzeye tam ve boşluksuz şekilde, yapısal dayanım kriterlerini sağlayan onarım maddeleri uygulanmalıdır. Uygulama için kullanılan malzemenin üretici talimatlarına uyulmalıdır.

Şekil 4.18’de onarılması gereken bir köşe kırığı verilmiştir. Köşe kırıkları aşırı şekil değiştirmelerden oluşabileceği gibi yerleştirme hatalarından da oluşabilir.



**Şekil 4.18:** Onarılması gereken köşe kırığı örneği.

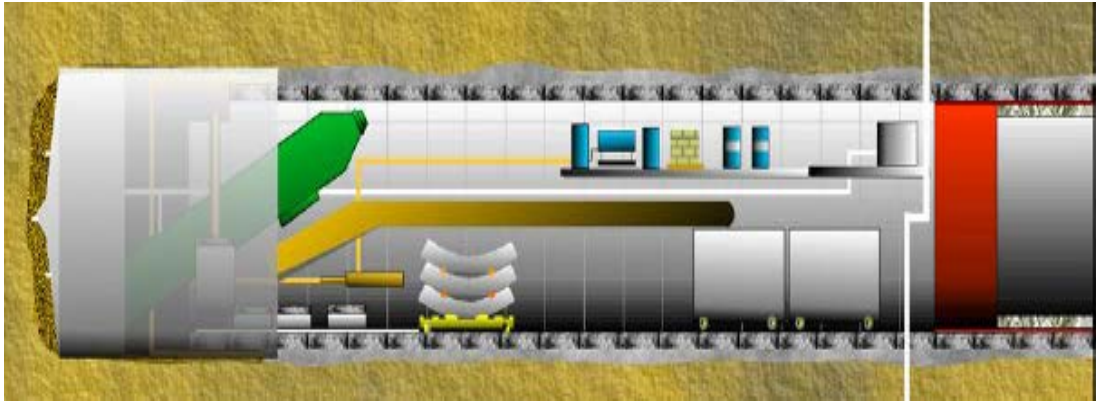
Köşe kırıklarının onarım uygulamasına ait örnek verilmiştir. Burada uygulama onarım harcının uygulama esasına göre değişkenlik gösterebilir. Fakat onarım sırasında üretici tarafından önerilen uygulama kalınlığı aşılmamalıdır. Su gelen noktalarda onarım işlemi yapılmamalıdır. Onarım malzemesinin normal beton ile buluştuğu yerler Düzgün kesilmiş ve temiz olmalıdır. Şekil 4.19’da kademe kademe onarılması gösterilmiştir.



**Şekil 4.19:** Köşe kırığının onarım aşamaları.

### 4.3 Enjeksiyon ile Onarım

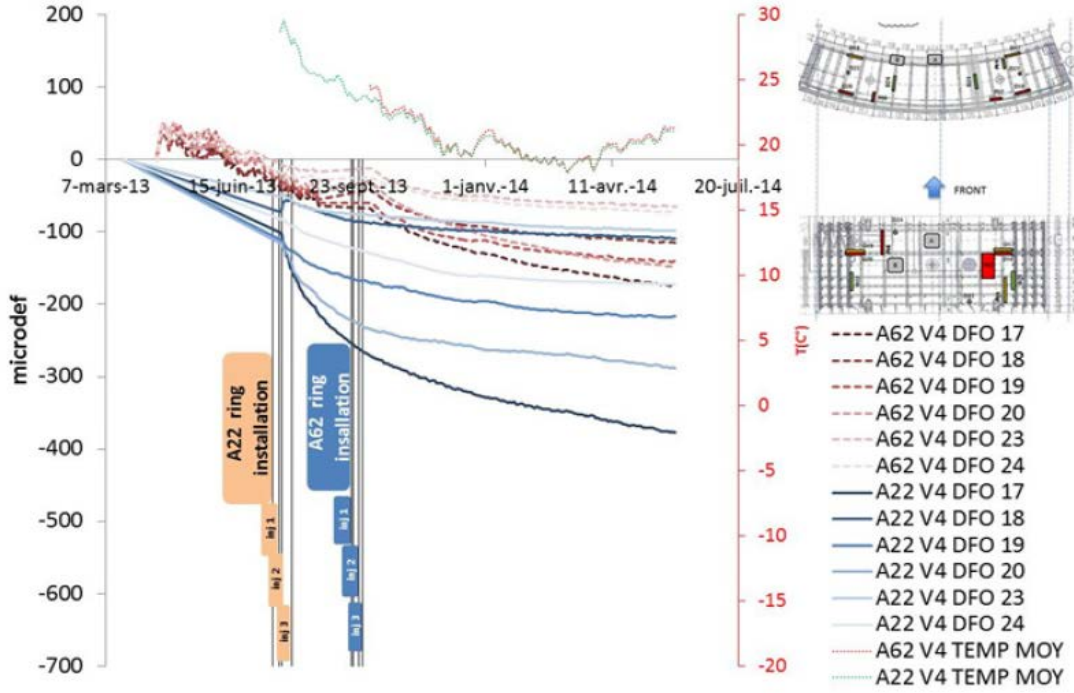
Tünel yapılarında zeminin stabilitesinin önemi oldukça yüksektir. Zeminde boşluklar olması, su basıncı, zemin cinsinin yumuşak olması nedenleriyle tünel açma ve işletme süresince yapıda hasarlar olabileceği anlaşılmıştır. Bu durumların etkisinin azaltılması amacıyla tünel destek yapısı etrafında zeminin güçlendirilmesini sağlamak amacıyla enjeksiyon yapılır. Enjeksiyon sistemlerini sınıflandıracak olursak, Çimento-kum dolgu enjeksiyonu, çift bileşenli, hızlandırıcı katkılı enjeksiyonlar, kimyasal enjeksiyon olarak sınıflandırabiliriz. TBM kazıları sırasında kazıcı kafa ile koruyucu kalkan arasında belirli bir boşluk vardır, bu boşluğa halka döşenerek lining (hizalama) yapılır. Hizalama yapılan bölge zemin ile temas etmeden önce enjeksiyon ile doldurulur. Bu işleme Annulus Grouting (halka enjeksiyonu) denir. Burada amaç farklı yük dağılımlarını engellemek ve yerleşmekte olan halkanın etkilenmesini azaltmaktır. Şekil 4.20’de TBM kazısı ve zemin içinde halka enjeksiyonu kalkan arkasına uygulanması gösterilmiştir.



**Şekil 4.20:** Halka enjeksiyonu gösterimi.

Halkaların kurulundan sonra son pozisyonuna gelmesi yük dağılımının homojenleşmesi için belirli bir süre geçmesi gerekir. Bu süre zarfında halka yapısındaki farklı yer değiştirmelerin tepkileri sonucunda yüksek kuvvetler aktarmayan yatak formasyonu oluşturacak yumuşak enjeksiyonlar tercih edilmektedir. Bu enjeksiyon karışımının dayanım gereksinimi kazıyı çevreleyen zeminin kesme dayanımının az miktarda üzerinde olması yeterli olmaktadır.

Halka üzerinden yapılan ölçümler ile bölüt yer değiştirmeleri Zghondi, J. ve diğerleri tarafından ölçülmüştür [31]. Şekil 4.21 ‘de bu ölçüme ait grafik elde edilmiştir.



**Şekil 4.21:** Betonarme prekast parça A22 ve A62 üzerinden birim şekil değiştirmelerin klasik enjeksiyonlu ve sıkışabilir enjeksiyonlu durumlar için ölçümlerinin karşılaştırması. [31]

Şekil 4.21 'de yapılan deformasyon ölçümlerinde A22'de klasik enjeksiyon ve A62'de sıkışabilir enjeksiyon uygulanmıştır. Bölütün iç yüzey ve dış yüzey ölçümleri halka parçalarının erken evrelerden itibaren aşırı birim şekil değiştirmelere ve bunları meydana getiren kuvvetlere maruz kaldıkları görülmektedir. Fakat enjeksiyon uygulamasının bu birim şekil değiştirmelere büyük oranda etkili olması tünel parçaları üzerinde ortaya çıkabilecek erken hasarların önlenmesinde etkili olmaktadır.

Birincil halkada enjeksiyonun yeterli ve doğru miktarda yapılması, zemin durumuna göre tasarımının doğru yapılması tünel destek yapısının yapım sürecindeki erken dayanımını artırır. Halka parçalarının yerinden oynamasını engeller. Halka kurulumu çevresindeki ilk yükleri alır. Özellikle kohezyonsuz zeminlerde oturmaları azaltır. Halkalar arası hizalama farklarını önler. Yerel onarım öncesi oluşabilecek su sızıntılarını azaltır.

Halka enjeksiyonunda kullanılan malzemeler şu şekildedir. Çimento, ince agrega, su, PFA (uçucu kül), kireç taşı tozu, yüksek fırın cürufu, bentonit, koloidal silika, katkılar. EFNARC 2001'e göre halka enjeksiyonu 3 gruba ayrılmıştır. Bunlar; hareketli çimento miktarı  $> 300\text{kg/m}^3$ , yarı hareketsiz çimento  $< 100\text{kg/m}^3$  ve hareketsiz kireç ve/veya uçucu küllü, çimentosuzdur. Burada ayrıma konu olan hareketliliğe kazı

sonrası zeminin durumuna göre karar verilmektedir. Tünel halka enjeksiyonu ve dolgu için yapılan enjeksiyon uygulamasında kullanılan destek arkası enjeksiyonu iki bileşenli olarak laboratuvar ve saha deneyleri gerçekleştirilmiştir. 1 metreküplük enjeksiyon karışımı içeriği Çizelge 4.1’de verildiği gibi seçilmiştir.

**Çizelge 4.1 : Halka enjeksiyonu karışım içeriği.**

<b>Çimento</b>	<b>Su</b>	<b>Süper akışkanlaştırıcı</b>	<b>Bentonit</b>
340 kg CEM II.	825 kg.	5 kg	34 kg.

Uygulanan enjeksiyon harcına ait saha deneylerinin normal değerleri Çizelge 4.2’de verilen şekilde sonuçlanmıştır.

**Çizelge 4.2 : Halka Enjeksiyonu deney parametreleri.**

<b>VİSKOZİTE</b> Marsh Hunisi	<b>YOĞUNLUK</b> Min.	<b>ÇÖKELME</b> Maks.	<b>JELLEŞME</b> SÜRESİ	<b>BASINÇ</b> <b>DAYANIMI</b> (5 X 5 CM KÜP DAYANIMI)
30 sn.(± 3.5)	1.22 g/cm <sup>3</sup>	5 %	5-15 sn.	1. gün: 0.5 MPa 28.gün: 2 MPa

Alınan küp numunelerine ait fotoğraf Şekil 4.22’de verilmiştir. Küp numuneleri 1 günlük ve 28 günlük olarak kırımları gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.22: 5x5 küp numuneleri ( 2 adet 1 günlük, 2 adet 28 günlük, 2 adet yedek).**

Minimum değerleri sağladığı gözlemlenmiştir. Bentonit ile hazırlanan enjeksiyon harçlarında gözlemlenen önemli noktalar karışımın hazırlanması sırasında bentonitin yeterli ölçüde su ile karışması olmuştur. Bentonit karışımda çökelmeyi önleyici bir etki yapmaktadır. Fakat bunun elde edilebilmesi için çimentodan önce su ile iyi bir şekilde karıştırılması oldukça önemlidir. Tünel içinde su akışımın olduğu, çatlakların fazlaştığı noktalarda inceleme amaçlı karot delgileri yapılmıştır. Bu bölgelerde güçlendirme amacıyla tekrar enjeksiyon uygulaması yapılmıştır. Bu uygulamalar ikincil kimyasal enjeksiyon uygulamasının daha az malzeme ile gerçekleşmesini sağlamıştır. şekil 4.23’de alınan numune rneği görülmektedir. rnekte görüldüğü üzere enjeksiyon toz haline gelmiştir. Buna sebep yeraltı suyunun yıkma etkisi olabilir.



**şekil 4.23:** Karot başlığı ile halka içinden alınan enjeksiyon ve beton rnek.

Enjeksiyon hazırlanması için kullanılan suyun etkisi araştırılmıştır. Su muhtevasında buluna askıda katı oranının yükselmesi ile çökelme arasında doğru orantı vardır. Dolayısı ile enjeksiyon harcının hazırlanması ve elde edilecek parametreler bu değerlere bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Karışım tasarımları uygulanacak bölgenin boşluk yapısına göre kum ile kalınlaştırılabilir. Bu kalınlaştırma için viskozite değerleri pompalanabilir seviyede tutulmalıdır.

Enjeksiyon karışımının uygulanması yapılacak yerler onarım gereksinimine ve yer altı suyunun akışına göre belirlenmiştir. Şekil 4.24’de bu bölgelerden birine ait fotoğraf verilmiştir.

Daha sonra buralarda basınç ve debi ölçer kullanarak uygulama yapılmış, enjeksiyon yapılan malzeme debisi, basıncı ve toplam miktarları kayıt altında tutulmuştur. Uygulama yapılmasında önemli bir nokta halka arkasında oluşacak basıncın halka taşıma kapasitesine ulaşmaması ve/veya halka üzerine ek bir yük oluşturmamasıdır. Bu amaç ile halka arkası hacmin yarısına kadar uygulama yapılmış ve hat kayıpları üzerinde bir basınç görülmediği durumlarda bu bölgelere daha kalın bir enjeksiyon uygulaması yapılmıştır.



**Şekil 4.24:** 40 mm çaplı Enjektör yerleştirilen yerlerden biri.

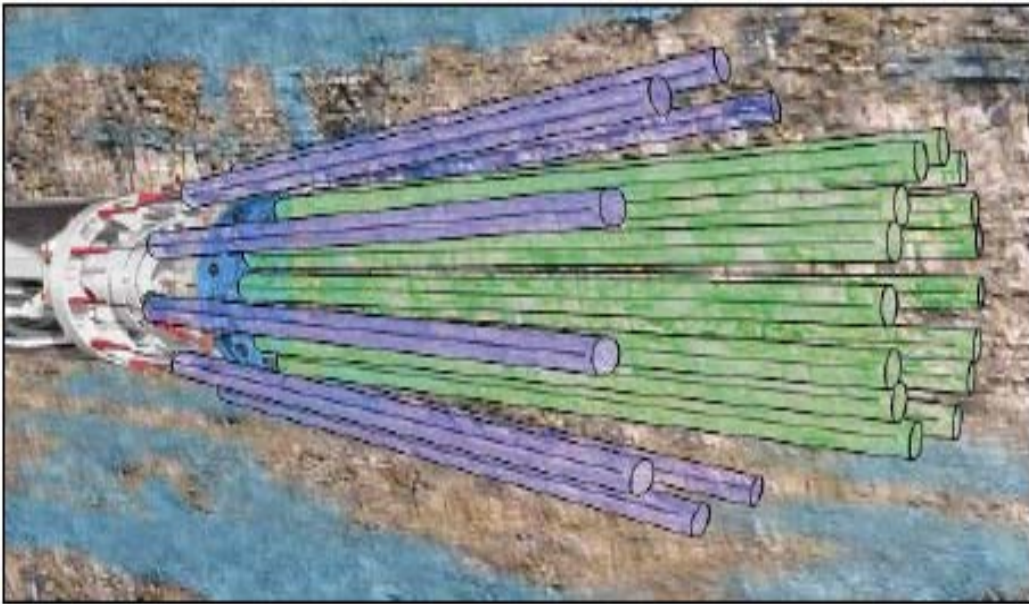
Şekil 4.25’de enjeksiyon uygulamasına ait fotoğraf yer almaktadır. Uygulamada hedeflenen basınç değerine veya hacimce limit değere ulaşılması sonrasında enjektör üzerindeki vana kapatılarak basınç sabitlenir ve daha fazla enjeksiyon yapılamayacağı kabul edilir.

Paker enjeksiyonun 24 saatlik dayanımını almadan sökülmemiştir. Yapılan uygulamalar enjektörün sökülmesi sonrasında, su akışının kuyu ağzında dahi tamamen kesildiği birleşimlerde ise büyük ölçüde azaldığını teyit etmiştir.



**Şekil 4.25:** Dolgu enjeksiyonunun uygulanması.

FHWA 2009’da enjeksiyon harçları 4 grupta ele alınmıştır. Bunlar, permeasyon, kompaksiyon, kompansiyon ve jet harçlarıdır. Genel olarak harçlar zeminin iyileştirilmesi için kullanılırlar. Bunlara ek olarak öncü enjeksiyon yöntemi de uygulanmaktadır. Kazı öncesi zeminin geçirimsizliğinin artırılması ve kazının kolaylaştırılması amacıyla bu enjeksiyon yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 4.26’da TBM öncül enjeksiyon gösterimi verilmiştir.



**Şekil 4.26:** Öncül enjeksiyon uygulaması gösterimi.



#### 4.4 Hasarların Sınıflandırılması ve Onarım Önerileri

Tünellerde oluşacak hasarlar çeşitlilik göstermektedir. Muhtemel hasarların onarım yöntemleri hasarın tipine ve konumuna göre çeşitlenmektedir. Muhtemel hasarlar, taban seviyesinde oluşacak hasarlar, düşey hasarlar, yatay hasarlar, kaplama sistemi hasarları, yapısal hasarlar, taban betonu hasarları, beton yerleşmemesi-boşluk hasarları, köşe kırıkları, kaplama-halka bölütlerinde oynama veya düzensiz yerleşim, birleşimlerden veya çatlaklardan su sızması olarak belirlenebilir. Muhtemel hasarların önerilen onarım yöntemlerine göre sınıflandırılması Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelgede verilen her malzemenin uygulanması öncesinde üretici tarafından verilen teknik kılavuzuna uygun olarak yüzeyin hazırlanması gerekir. Uygulama için kılavuzda belirtilen şartların sağlanması büyük önem taşır. Uygulanan onarım malzemeleri kimyasal bileşenler içerdiğinden her bileşen için karışım oranları üretici tarafından belirtildiği ölçülerde uygulanmalıdır.

Genel olarak onarım malzemeleri, onarım harçları, kendinden yerleşen onarım groutları-harçları, epoksi yapıştırıcı kimyasallar, Polimer katkılı kimyasal enjeksiyon malzemeleri, iki bileşenli epoksi macunları, olarak sınıflandırılabilir. Her onarım malzemesinin yerleşim özelliği farklıdır ve hasarlara özel olarak üretilmiştir. Epoksi yapıştırıcı kimyasalları yapısal çatlakların içine enjekte edilmek suretiyle çatlak iki yüzey arasında yapışma sağlayarak hasarı gidermektedir. Bu kimyasalların dayanımları çok yüksektir. Uygulaması önceki bölümlerde gösterildiği gibi kimyasal enjektörleri ile ve kimyasal madde pompası ile yapılır. Onarım harçları kendinden yerleşen ve dolgu harçları olarak sınıflandırılabilir. Bu harçların özelliği büzüşme yapmadan gerekli dayanımı elde etmeleri ve hasarlı yüzeye sıkıca yapışmalarıdır. İki bileşenli epoksi macunlarda sürülebilir onarım malzemeleridir. Yüzeysel kalan çatlakların doldurulmasında kullanılırlar. Polimer katkılı kimyasal enjeksiyon malzemeleri genelde bölgesel suyun kesilmesinde kullanılır. Tünel içerisinde su gelen bölgelere kimyasal enjektörleri ile tünel kaplaması arkasındaki boşluğa uygulanırlar. Su ile temasları halinde şişmeye başlarlar. Su gelen bölgede şişerek, suya da karışmak suretiyle, boşlukları doldurarak su akışının kesilmesinde rol oynarlar.

**Çizelge 4.3 : Muhtemel hasarlar ve onarım yöntemleri.**

<b>Uygulama</b>	<b>Kendinden yerleşen onarım harcı</b>	<b>Polimer katkı onarım harcı</b>	<b>Çift bileşenli epoksi macun</b>	<b>Polimer katkı beton</b>	<b>Enjeksiyon ile kimyasal birleşim</b>
<b>Taban seviyesinde oluşacak hasarlar</b>	Önerilir	Önerilir	Önerilir	Önerilir	Önerilir
<b>Düşey hasarlar</b>	Önerilmez	Önerilir	Önerilir	Önerilir	Önerilir
<b>Yatay hasarlar</b>	Önerilir	Önerilir	Önerilir	Önerilir	Önerilir
<b>Kaplama sistemi hasarları</b>	Önerilir	Önerilir	Önerilir	Önerilmez	Önerilmez
<b>Yapısal hasarlar</b>	Önerilir	Önerilir	Önerilir	Önerilir	Önerilir
<b>Taban betonu hasarları</b>	Önerilir	Önerilir	Önerilmez	Önerilir	Önerilmez
<b>Beton yerleşmemesi-boşluk hasarları,</b>	Önerilir	Önerilir	Önerilir	Önerilir	Önerilmez
<b>Köşe kırıkları</b>	Önerilir	Önerilir	Önerilmez	Önerilmez	Önerilmez
<b>Kaplama-halka bölütlerinde oynama veya düzensiz yerleşim</b>	Önerilmez	Önerilmez	Önerilmez	Önerilmez	Önerilir
<b>Birleşimlerden veya çatlaklardan su sızması</b>	Suyun kesilmesi ardından önerilir.	Suyun kesilmesi ardından önerilir.	Suyun kesilmesi ardından önerilir.	Önerilmez	Önerilir

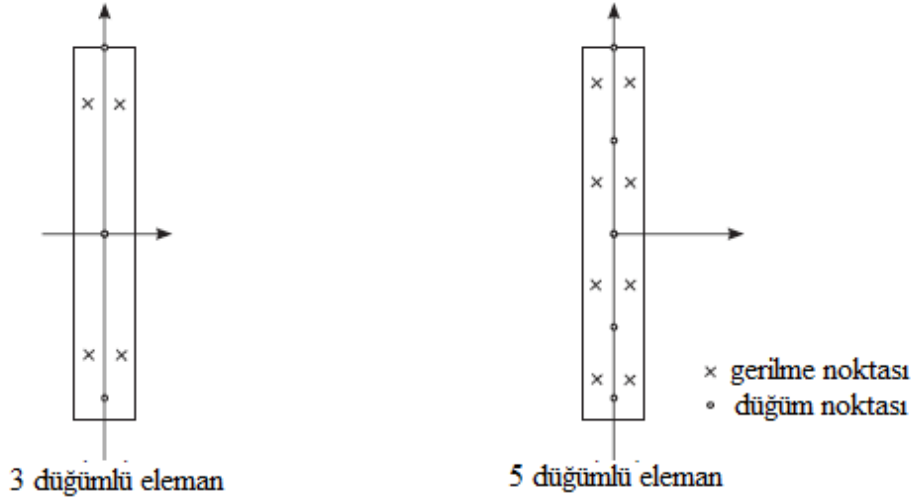
## 5. TÜNEL ZEMİN YAPI ETKİLEŞİMİ

Tünel güzergâhları günümüzde gittikçe şehir içinde yayılmakta olduğundan tünellerin geçtiği güzergâhlarda yapılacak yapıların tünelde zarar vermeden yapılması gerekir. Bu amaçla tünel üzerine yapılacak bir yapının tünelde meydana getireceği yer değiştirilmelerin hesaplanması amaçlanmıştır. Bu etkilerin tünel örtü tabakasının kalınlığına ve yapı yüklerine bağlı olarak değişimi hesaplanmaya çalışılmıştır.

Hesaplarda yüzeysel radye temelli 5 katlı, 10 katlı ve 15 katlı yapının yapılması durumu farklı örtü kalınlıklarında mevcut olan ve farklı zeminlerden geçen dairesel kesitli tünelin kesit tesirleri ve ray üstü noktalarındaki düşey yer değiştirmeler elde edilerek yapı-tünel arasındaki etkilenme durumu değerlendirilecektir.

### 5.1 Plaxis Programı ve Hesap Modelinin Kurulması

Hesapların yapılmasında 2016.1 sürümlü Plaxis 2d 2016 sonlu eleman analiz programı kullanılmıştır. Plaxis yer değiştirme, stabilite ve akış analizlerinin farklı geoteknik özelliklerde hesaplanması özel amacıyla yazılmış iki boyutlu sonlu elemanlar paket programıdır [23]. Program iki alt programdan oluşmaktadır. İlk program “input” programı ve ikincisi “output” programıdır. Input programında model özellikleri öncelikle sisteme tanımlanır bu amaçla sisteme ilk aşamada proje özellikleri tanımlanır. Burada hesaplarımızda kullanılan proje özellikleri tanımlanmıştır. Bunlar, modelimiz düzlem-birim uzama modelidir. Sonlu elemanlar yöntemi tarifinde 3.11 bağıntısı ile verilen şekilde bahsedilen şekilde malzeme matrisi oluşturulacak anlamına gelmektedir. Sonlu eleman tipleri 2 çeşittir bunlar Şekil 3.10’da gösterilmiştir. Güvenli tarafta kalmak adına 15 düğüm noktalı eleman seçilmiştir. Bu elemanlar “mesh” olarak adlandırılırlar. Plaxis programı mesh-ağ elemanların haricinde kiriş elemanlar, geogrid elemanlar ve ara yüz elemanları kullanmaktadır. Kiriş elemanlar, plak, temel, istinat duvarları gibi zemin içinde ve zemin üzerinde tanımlanabilen dikdörtgen yapıli elemanlardır. Bu elemanlar sisteme tanıtılırken birim genişlikte EA ve EI değerleri sisteme tanıtılmalıdır. Şekil 5.1’de plaxis programının kullandığı kiriş elemanlar verilmiştir.



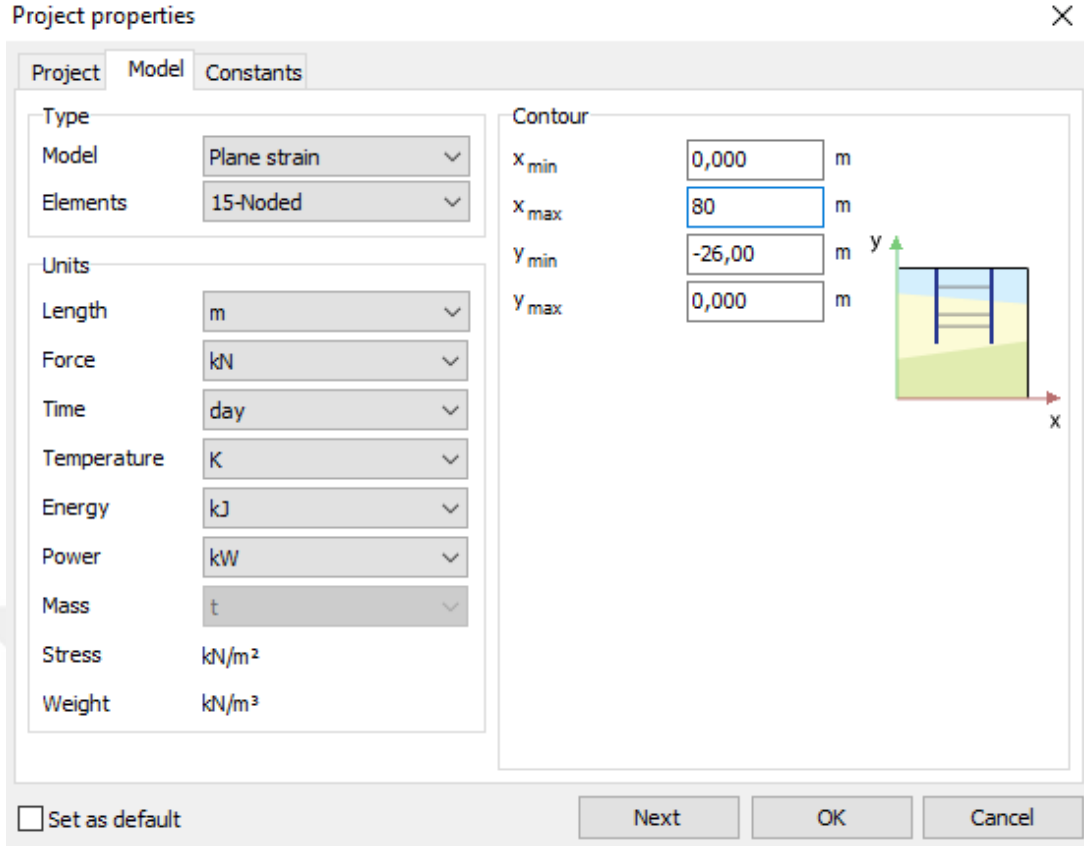
**Şekil 5.1:** Plaxis programında kullanılan kiriş elemanlar [23].

Bunun haricinde geogrid elemanlar bulunmaktadır. Bu elemanlar da 3 ve 5 düğüm noktalı olarak sisteme tanımlıdır fakat bu elemanlar mesh-ağ elemanlar arasında uzanırlar. Gerilme aktaran elemanlardır. Ara yüz elemanlar zemin içerisindeki hareket ile yüksek rijitlikli yapısal elemanlar arasında tanımlanırlar. Bunlarda mesh- ağ elemanlar arasında yer alırlar. Görevleri zemin rijitliğinin bu bölgelerde düşürülmesidir. + ve - yönlü olarak tanımlanırlar. Bu yönler elemana göre iç ve dış yönü bildirir.

Bunun yanında hesap yapılırken uzunluk metre m, kuvvet kilo Newton kN, zaman gün day olarak belirlenmiştir. Başka parametreler de belirlenebilir fakat hesaplarda bunlar kullanılacaktır. Hesapta kullanılacak diğer parametreler programın kendi atadığı değerlerdir. Yapılan seçim değerleri Şekil 5.2’de verilmiştir. Hesaba ait parametreler model kısmında anlatılacaktır.

Program içerisinde proje özelliklerinin tanımlanmasının ardından “soil” kısmı gelmektedir. Burada “boreholes” kısmından zemin aralığı, yer altı suyu yüksekliği “head” gibi bilgiler girilerek zemin modeli oluşturulur. Burada geometrik modelin yanında malzeme tanımlanmasında yapılabilir.

Plaxis tarafından kullanılan malzeme modelleri, Mohr–Coulomb, Jointed Rock, Hardening Soil, Hardening Soil model with small strains, Soft Soil, Soft Soil Creep, Modified Cam-Clay, The Sekiguch-Ohta, The NGI-ADP modelleridir [23]. Bu modellerde kullanılan parametreler şu şekildedir. Mohr Coulomb modelinde E young (elastisite) modülü,  $\nu$  poisson oranı, c kohezyon,  $\phi$  içsel sürtünme açısı,  $\psi$  dilatasyon açısı ile hesap yapılır. Zemin deformasyonu için kullanılır [23].



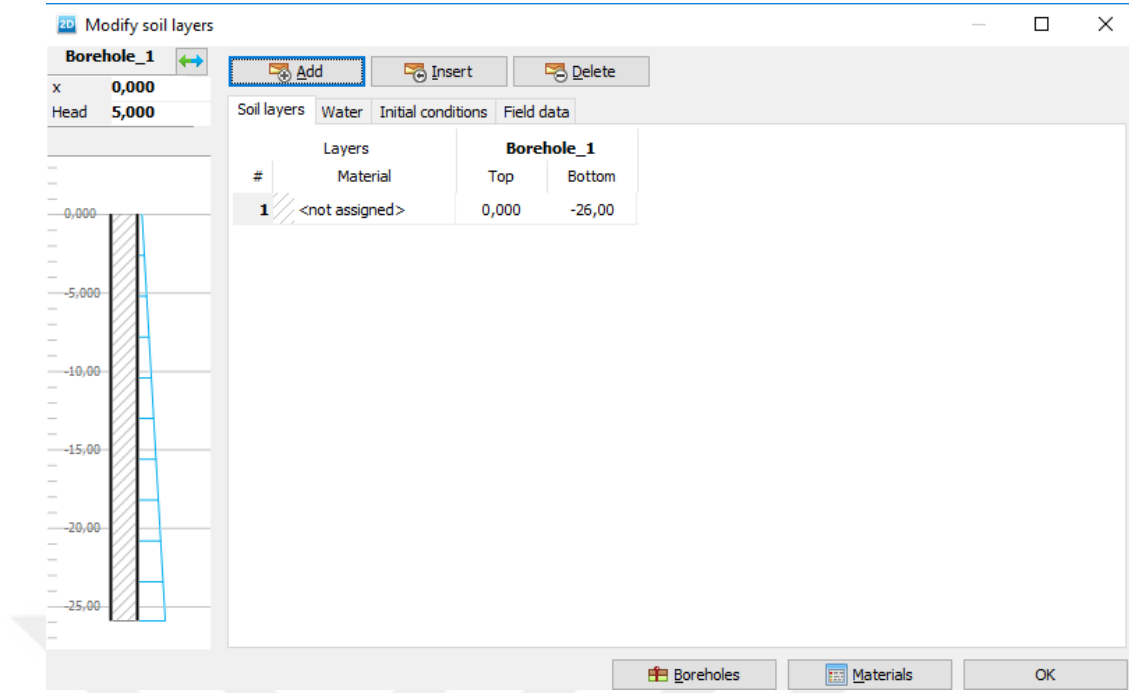
**Şekil 5.2:** Plaxis programı Project Properties menüsü.

Jointed Rock Model’inde anizotropik elasto-plastik model olarak plastik kaymanın sınır kayma doğuracağı kabulüne dayanır. Birleşik kayaların ve tabakalanmış kaya zeminlerin modellenmesinde kullanılır. Bu modelde  $E$  young (elastisite) modülü,  $\nu$  poisson oranı,  $c$  kohezyon,  $\phi$  içsel sürtünme açısı,  $\psi$  dilatasyon açısı ile hesap yapılır. Hardening Soil Model, Mohr Coulomb modelinden daha gelişmiş bir modeldir. Sert ve yumuşak zeminlerde kullanılır. Model oluşturulmasında  $m$  gerilme bağımlı rijitlik, birincil deviatörük yükleme  $E_{50}^{ref}$ , birincil sıkışma  $E_{oed}^{ref}$ , Elastik boşaltma yükleme  $E_{ur}^{ref}$ ,  $\nu_{ur}$ ,  $c$  kohezyon,  $\phi$  içsel sürtünme açısı,  $\psi$  dilatasyon açısı ile hesap yapılır [23]. HS small modelinde  $G_0$  küçük uzama kesme modülü ve kesme uzama seviyesi  $\gamma_{0,7}$  eklenmektedir. Soft Soil modelinde Killer ve turba zeminler hesaplanır. Bu modelde  $E$  young (elastisite) modülü,  $\nu$  poisson oranı,  $c$  kohezyon,  $\phi$  içsel sürtünme açısı,  $\psi$  dilatasyon açısı, modifiye sıkışma  $1^*$  ve şişme indeksi  $k^*$  değerleri dikkate alınır.

Soft Soil Creep modelinde, soft soil modeline ek olarak modifiye sünme indeksi  $m^*$  değerleri dikkate alınır.

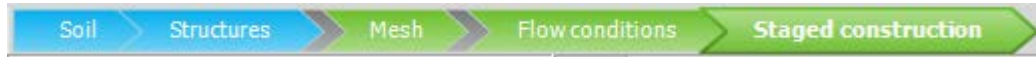
Bunun dışında Hoek-Brown ile daha önce bahsettiğimiz  $V$  poisson oranı,  $\sigma_{ci}$  kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa), “ $E_m$ ” Kaya kütlesinin deformasyon modülü (GPa), GSI Jeolojik dayanım indeksi,  $m_i$  kaya malzemesi sabiti,  $D$  örselenme faktörü değerleri ile hesap yapılır. Bu modellerin haricinde diğer modellerde farklı yaklaşımlara yer verilmiştir. Programda modellere ait parametreler Boreholes menüsünde “Materials” kısmından tanımlanmaktadır. Burada seçilecek malzemeye ait değerler girilir. Yeni malzeme “cluster” oluşturulur ve saklanır. Burada show global kısmına geçildiğinde Plaxis tarafından verilmiş ön tanımlı malzeme kitaplığı görülebilir. Buraya tanımlanan malzemelerin eklenmesiyle daha sonraki hesaplarda parametre değerleri otomatik olarak alınacaktır. Malzeme modeline ek değerler de burada bulunur bunlar,  $\gamma_{sat}$  suya doymun dane birim hacim ağırlığı,  $\gamma_{unsat}$  kuru dane birim hacim ağırlığı,  $R_{int}$  rijitlik azaltma, “OCR” aşırı pekiştirme ve “ $K_0$ ” sükûnette toprak basıncı azaltma katsayıları olmak üzere malzemeye göre değişmektedir. Ayrıca Plaxis üzerinde user defined seçeneğinden .dll uzantılı dosyasıyla malzeme değerleri daha detaylı girilebilmektedir.

Şekil 5.3’te boreholes menüsü yer almaktadır. Buradan zemin modellemesi yapılarak structures aşamasına geçilir. Boreholes sekmesinde yapılan tanımlamaların ardından program kullanıcıya “Structures” aşamasında CAD-bilgisayar destekli tasarım Ara yüzü sunmaktadır. Burada model üzerine yerleştirilecek temel veya duvar gibi yapılar ayrıca girilebilir. Plaka ve geogrid elemanlar tanımlanabilir. Yükler uygulanacak bölgelere yerleştirilebilir. Yüklerin değerleri tanımlanabilir. “Structures” aşamasında zemin üzerine eklenen tüm elemanları ve malzemeleri tanımlamak mümkün olduğu gibi zemin malzemesi de yine değiştirilebilmektedir. Sol kısımda bulunan “selection explorer” ve “model explorer” kısımlarından kolay seçim yapılarak eleman özellikleri görüntülenebilir. Bu aşamada “Create Tunnel” ara yüz tuşuyla “Tunnel Designer” kısmına girilir bunun için tünelin yerleştirileceği orijin CAD üzerinden seçilir. “Tunnel designer” Autocad programından dosya almaya imkân sunmaktadır.



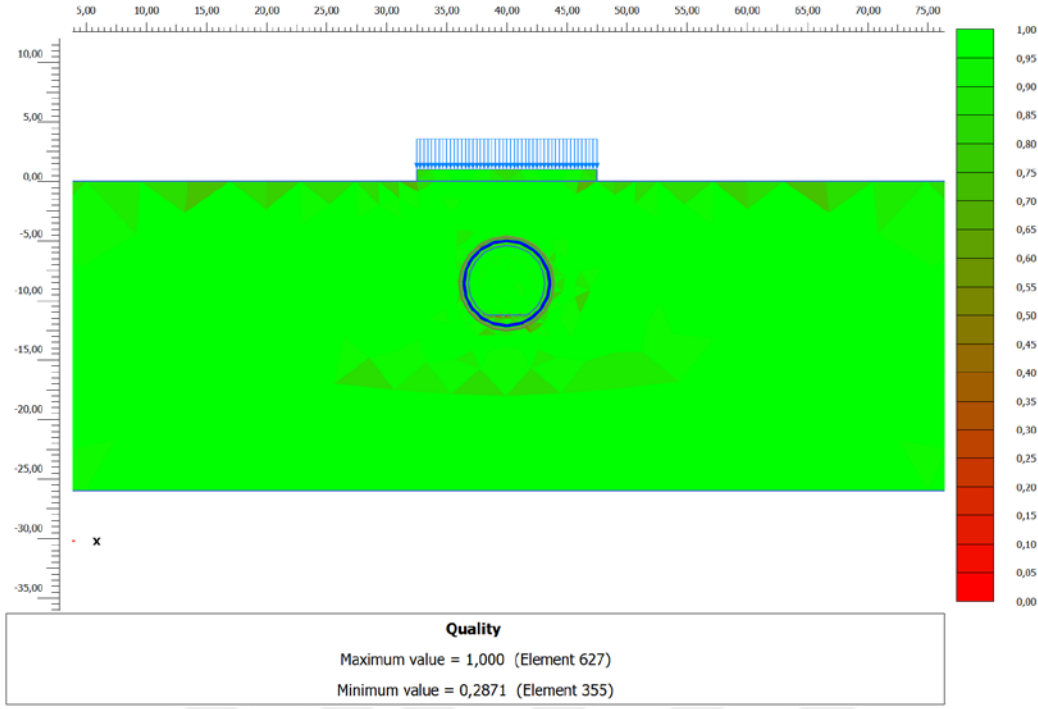
**Şekil 5.3:** Plaxis programı Boreholes menüsü.

Bu sayede tünel kesitlerimizi tanımlamamız mümkün olmaktadır. Şekil 5.4’te verilen aşamalar arasında geçiş yapılabilir. “Structures” aşamasından sonra program modelimizin ağ eleman yapısını oluşturmamızı isteyecektir. Bu amaçla mesh aşamasına girilir. Mesh aşamasında model üzerindeki her bölge için “selection explorer” üzerinden kalınlık seçilebilir. Bu seçim coarseness factor sayısı ile yapılır. Bu sayı ne kadar küçülürse mesh elemanlarda o kadar küçük oluşturulacaktır.



**Şekil 5.4:** Plaxis 2d programı Input modülünün modelleme aşamaları.

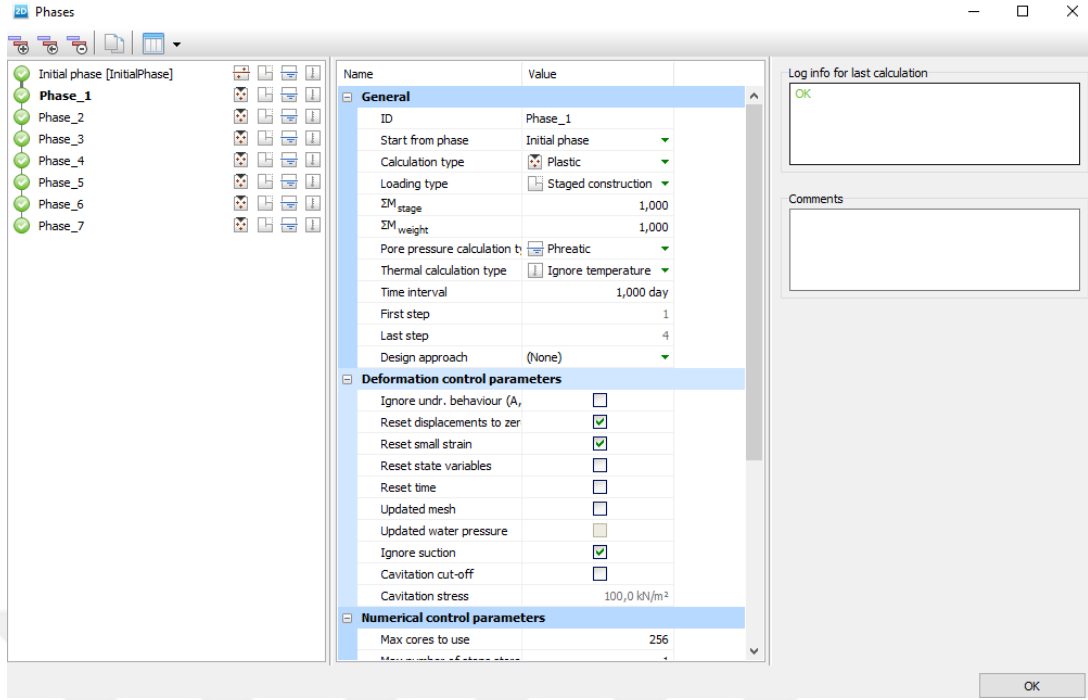
Mesh elemanlar oluşturulduktan sonra elemanların görüntülenmesi için “output” modülü açılmaktadır. Burada mesh seçeneği üzerinden oluşturulan ağ model görüntülenebilir. “Quality” seçeneği işaretlenerek elemanların bağlanma durumuna göre kontrolü yapılmasına olanak sağlanmaktadır. Şekil 5.5’te oluşturulan modelin mesh eleman kalitesi ve bağlanma durumu görülebilir. Burada ağ modelin çalışması quality değeri ile program analiz etmektedir. Burada tünel içinde daha küçük mesh elemanları seçilerek eleman kalitesi düzenlenmiştir. Kaplama kısmının girildiği bölümde “coarseness factor” 0.77 olarak belirlenmiştir.



**Şekil 5.5:** Oluşturulan modelin mesh elemanlarının kalitesi.

Plaxis bu aşamada belirli noktalara ait değerleri bilgisayar hafızasında tutabilmek amacıyla seçim yapılmasına imkân tanımaktadır. Burada biz hesabımızda ray üstü düşey yer değiştirmelerinin hafızada tutulması için tünel kesitimize uygun olarak 2 nokta belirleyerek sisteme tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında 3 adet grovak parçalı kil zemin için, 3 adet az parçalı grovak zemin için model oluşturulmuştur. Her zemin için oluşturulan modellerde tünelin taç kısmının zemin üst kotundan -5.00, -10.00, -15.00 metre derinden geçeceği şekilde belirlenmiştir. Tünel kesiti ve alınan değerlerden model parametreleri kısmında söz edilecektir. Mesh kısmında model elemanları oluşturulduktan sonra “flow condititions” ve “staged construction” kısımları yer almaktadır. “Flow conditions” bölümünde su seviyesi ve modelin su ile ilgili tanımlamaları yapılabilir. Bu çalışmanın modellenmesinde ortamı drenajlı zemin olarak değerlendirdiğimiz için bu aşamada bir değer kullanmadık. “Staged construction” kısmında model üzerindeki aktiflik-pasiflik durumları ve bölümlere farklı malzemeler girmek suretiyle sol tarafta bulunan “phases explorer” üzerinden “add phase”, “insert phase”, “delete phase” tuşları ile her phase içerisinde modelin hangi durumlardan geçeceği “time interval” değeri girmek suretiyle aşamaları sıralandırmak mümkündür. Şekil 5.6’da phases menüsü verilmiştir. Burada aşamalara verilen değerler istenilen şekilde değiştirilmesine olanak sağlanmaktadır.





**Şekil 5.6:** Phases menüsünün görünümü.

Yapım aşamaları programa tanımlandıktan sonra hesaplatma “staged construction” kısmında sol tarafta bulunan calculate tuşu seçilerek yaptırılır. Burada sistem her bir eleman için yapılan döngü sayısını her aşamada toplam kaç döngü yapıldığını belirtir. Ayrıca tamamlanan aşamalar “phases explorer” üzerinde yeşile dönerek aşama hesabının tamamlandığını belirtir. Tekrar hesaplanmak için burada phase mavi konuma getirilerek calculate tekrar seçilebilir. Hesaplama sonuçlandığında tüm phase kısımları yeşil olacaktır. Buradan “view calculation results” seçilerek “output” modülüne geçilerek hesaplanan iç kuvvetler, yer değiştirmeler, yapısal kuvvetler görüntülenebilir. Değerler, seçilen noktaların her şamada aldığı değerler veri dosyası olarak kaydedilebilir.

## 5.2 Modelleme Parametreleri ve Hesap Aşamaları

Hesabın yapılmasında 2 farklı zemin için toplam 6 adet model hazırlanmıştır. Bu modellerin her birinde zemin geometrik modülü Şekil 5.2 ‘de verilen project properties menüsünden  $X_{max} = 80.00$  m,  $X_{min} = 0$ ,  $Y_{max} = 0$ ,  $Y_{min} = -26.00$  m olarak seçilmiştir. Modelde 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar kullanılmıştır. Malzeme değerlerine referans olarak Çınar A. (2010) yüksek lisans tezinde bulunan 2 nolu çalışmasında laboratuvar ve saha deneyleri gözetilerek elde edilen değerler dikkate alınmıştır [10]. Çizelge 5.1’de verilen değerler malzeme değerleri olarak sisteme tanımlanmıştır.

İstanbul maslak bölgesinde görülen Trakya Formasyonuna ait zemin tipleri kullanılarak her zemin tipi için 3 ayrı model hazırlanmıştır. Modellerde 2 şer nokta belirlenerek ray üstü yer değiştirmeler hesaplanmıştır. 6 modele ait tünel üzerine 5. aşamada 5 katlı bina yapılması, 6. aşamada 10 katlı bina yapılması ve 7. aşamada 15 katlı bina yapılması göz önünde bulundurulmuştur. Kaşıkçı B. (2014) yüksek lisans tezinde tünel-yapı etkileşimi için ele alınan model kriterleri ve kullanılan model parametreleri incelenmiştir. Çalışmada tünel-üst yapı etkileşimi için hardening soil modeli kullanılmıştır [20]. Programda zemin özelliklerine malzeme özelliği tanıtılmıştır. Grovak parçalı killi zemin 1 nolu hesap olarak ve Az ayrışmış grovak zemin için yapılan hesap 2 nolu hesap olarak anılacaktır.

Zemin modelleri oluşturulurken “Head” – 5.00m olarak girilmiştir, boşluk suyu basıncı hesaba katılmamaktadır. Fakat su yüksekliği dane birim hacim ağırlığı parametresini etkilemektedir. Zamanla değişen su seviyesi nedeniyle üst katmanlarda sıklık ve birim hacim ağırlığı parametresinin azalacağı düşünüldüğünden hesapta bu şekilde dikkate alınmıştır. Her zemin için tanımlanan modelde aynı zamanda kaplama ve temel için betonarme temel ve kaplama malzemesi özellikleri, TBM için ise koruyucu kalkan çelik kesiti için plate eleman özellikleri tanımlanmıştır.

Zemin özellikleri soil aşamasında tanımlandıktan sonra structures aşamasına geçilerek temel geometrisi sisteme girilir. Burada temel için “Soil polygon” ara yüz tuşu vasıtasıyla dikdörtgen biçimli yüzeysel tabaka tanımlanmıştır. Bu tabaka noktasının koordinatları şu şekildedir  $\{(32.5, 1), (32.5, 0), (47.5, 1), (47.5, 0)\}$ . Burada zemin 1 metre kalınlığında seçilmiştir. Betonarme eleman özellikler 6 model için sabit olarak alınmıştır. Kaplama özellikleri her modelde sabittir fakat temelden farklı olarak kaplama malzemesi elastik olarak seçilmiştir. Bunun nedeni ise kaplama malzemesinin elastisite modülünün 28 gün sonunda gelişeceği varsayılmıştır.

**Çizelge 5.1 : Modellerde tanımlanan zemin parametreleri.**

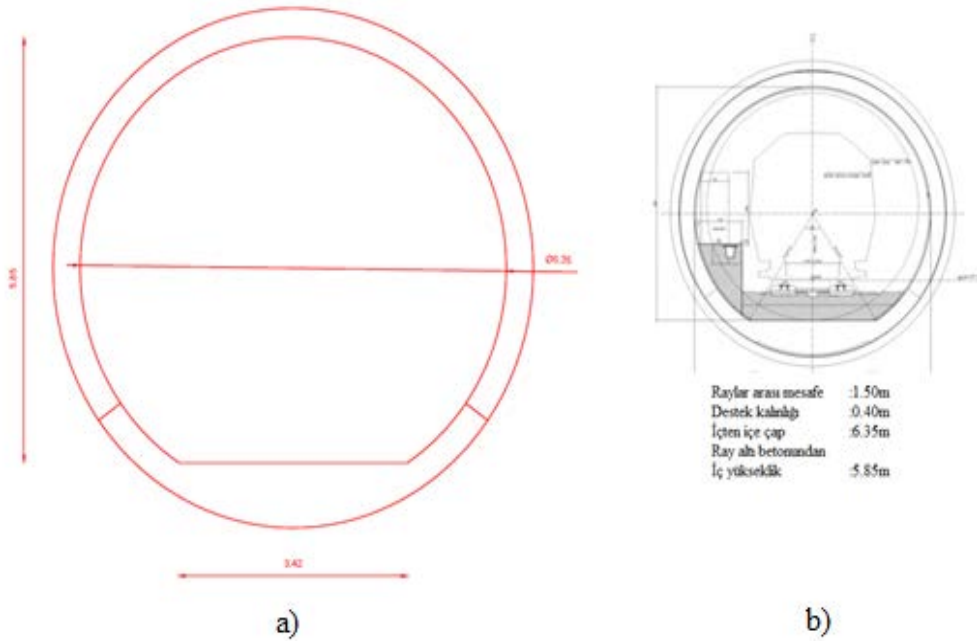
Parametreler		Grovak parçalı kil	Az ayrılmış grovak
Malzeme modeli, Davranış tipi		HS small, Drained	HS small, Drained
Kuru birim hacim ağırlığı ( $\gamma_{unsat}$ ) kN/m <sup>3</sup>		16.30	17.30
Islak birim hacim ağırlığı ( $\gamma_{sat}$ ) kN/m <sup>3</sup>		19.30	20.30
Young modülü kN/m <sup>2</sup>	$E_{50}^{ref}$	35000	40000
	$E_{oed}^{ref}$	35000	40000
	$E_{ur}^{ref}$	105000	120000
Power (üs) m		1.00	1.00
Kohezyon ( $c'_{ref}$ ) kN/m <sup>2</sup>		1.00	1.00
İçsel sürtünme ( $\varphi'$ ) <sup>0</sup>		32.00	38.00
Dilatasyon açısı ( $\psi$ ) <sup>0</sup>		2.00	4.00
Eşik birim şekil değiştirme kayma modülü ( $G_0^{ref}$ ) kN/m <sup>2</sup>		10000	100000
Sükûnetteki yatay toprak basıncı katsayısı $K_0$		0.4701	0.3843
Ara yüzey mukavemet azaltma katsayısı $R_{inter}$		0.5	0.5
Aşırı konsolidasyon oranı OCR		1.00	1.00

Burada kullanılan “power m” zeminin gerilme bağımlı sertliğini ifade etmektedir. Herhangi bir azaltma olmadığı varsayılarak “1.00” değeri alınmıştır. Gerçeğe daha yakın sonuçların elde edilmesi amacıyla zeminin gerilme bağımlılığı göz önüne alınmıştır. Betonarme kaplama ve temel malzemeleri için kullanılan değerler Çizelge 5.2’de verilmiştir.

**Çizelge 5.2 :** Modellerde tanımlanan betonarme kaplama ve temel malzemeleri.

Parametre	Sembol	Temel	Kaplama
Malzeme modeli	Model	Linear elastic	Linear elastic
Davranış tipi	Drainage type	Non-porous	Non-porous
Kuru birim hacim ağırlığı	$(\gamma_{unsat}) \text{ kN/m}^3$	24	24
Young modülü	$(E') \text{ kN/m}^2$	$25.00 \times 10^6$	$5.00 \times 10^6$
Poisson oranı	$\nu'$	0.2	0.2

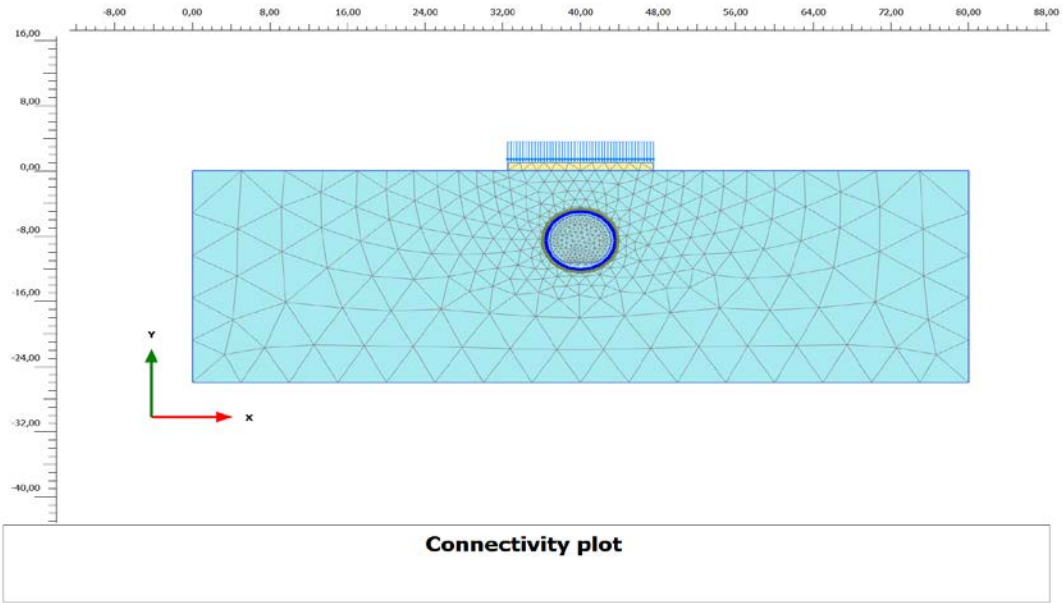
Betonarme malzemelerin tanımlanmasında sonra tünel tanımlanmasına geçilmiştir. Burada 1 nolu çalışma için 3 modelde tünel koordinatları değişmektedir. 2 nolu çalışmada ise zemin malzemesi değiştirilerek az ayrışmış grovak malzeme tanımı cluster'ı geometrik modele atanarak türetilmiştir. Tünel kesiti Kadıköy-Kartal metro hattı A1 kesiti örnek alınarak Autocad programında çizilerek modele aktarılmıştır. Tünel kesiti ile ilgili detaylar Şekil 5.7'de verilmiştir.



**Şekil 5.7:** a) Tünel kesitinin CAD modeli. b) Tünel kesitinin geometrik detayları.

Tünel kesitinin iç çapı 6.35 m ve kalınlığı 0.40 m'dir. Tünel kesitinin tanımlanmasıyla tunnel designer menüsünden properties kısmına geçilir. Burada TBM geçişinin

modellenmesi için sistem tarafından tanınmış polycurve çizgilerinin en dış çeperdekileri seçilerek. Add line contraction, add plate, add negative interface seçilmiştir. Burada polycurve geometrik elemanları plate eleman olarak tanımlanarak line contraction = %0.4 tanımlanacaktır. Bu TBM kafası ile kalkan kısmı arasında meydana gelen boşluğun modellenmesi için kullanılacaktır. Burada tünel için seçilen merkez koordinatları sırasıyla 5, 10 ve 15 metre derinliği için (40, -8.575), (40, -13.575) ve (40, -18,575) olarak işaretlenmiştir. Buradan sonra temel üzerinde point load tuşu ile çizgisel yayılı yük tanımlanmıştır. Mesh kısmına geçilmiştir. Burada geometrik modellemede belirtilen mesh-ağ eleman oluşturma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.8’de görülen ilk modelde 990 eleman ve 8197 düğüm noktası bulunmaktadır. 10 metre derinlikten geçen tünel için kurulan eleman modelinde 1368 eleman ve 11281 düğüm noktası bulunmaktadır. 15 metre derinlikten geçen tünel için kurulan ağ eleman modelinde 1298 eleman ve 10721 düğüm noktası bulunmaktadır.



**Şekil 5.8:** Tünel 5 metre derinliğinden geçmesi durumu için ağ eleman modeli.

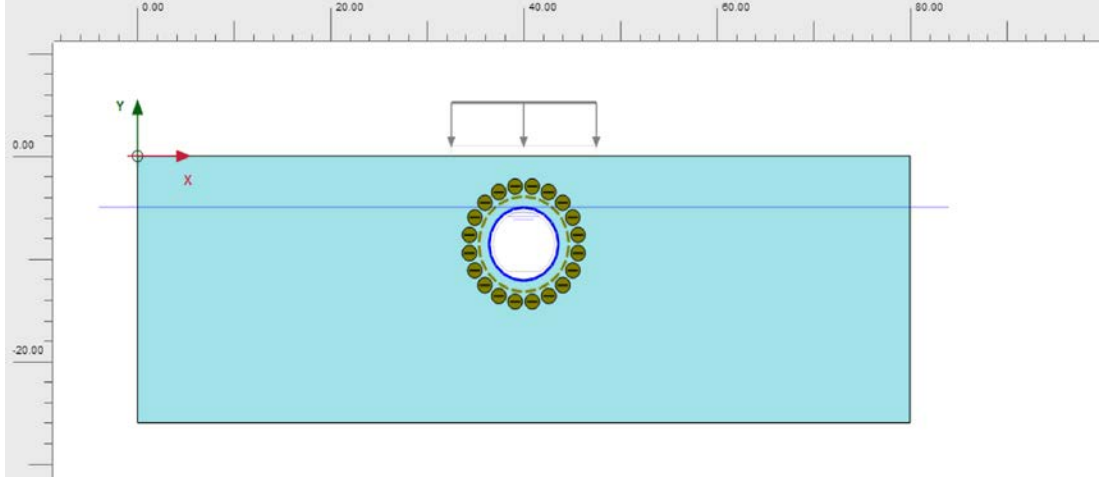
Bu işlem her 6 modelde anlatılan şekilde tekrarlanarak ray geçiş noktaları seçilmiştir. Grovak parçalı kil zemin 5 metre derinlikte tünel bulunması için seçilen noktalar; N4739 A ve N4902 B’dir. Grovak parçalı kil zemin 10 metre derinlikte tünel bulunması için seçilen noktalar; N5131 A ve N5158 B’dir. Grovak parçalı kil zemin 15 metre derinlikte tünel bulunması için seçilen noktalar; N6506 A ve N7203 B’dir. Az ayrılmış grovak zemin 5 metre derinlikte tünel bulunması için seçilen noktalar;

N4739 A ve N4902 B'dir. Az ayrıışmış grovak zemin 10 metre derinlikte tünel bulunması için seçilen noktalar; N6305 A ve N6338 B'dir. Az ayrıışmış grovak zemin 15 metre derinlikte tünel bulunması için seçilen noktalar; N5915 A ve N6194 B'dir. Bu noktalar seçilirken ray düzlemlerinin geçtiği  $y_1 = 39.25$  ve  $y_2 = 40.75$  akslarının tünel alt kısım-invert betonu yüzeyini kestiği en yakın noktalar seçilmiştir. TBM için plate eleman malzeme parametreleri seçilmiş ve tünelin birim genişliğinde EA ve EI değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar 5.1 ve 5.2 bağıntılarıyla verildiği şekilde bulunmuştur.

$$EA = E(hxb) \quad (5.1)$$

$$EI = E \frac{h^3 b}{12} \quad (5.2)$$

Burada h destek sisteminin kalınlığı 0.4 m ve b birim genişlik yani 1m alınmıştır. E elastisite modülü  $37 \times 10^6$  kN/m<sup>2</sup> olarak alınmıştır. Bunun sebebi kesit kaplama cidarı boyunda hesap edilmesidir. Betonarme kesiti boyunca hesaplandığı içindir, yeterli alınmıştır. Plate materials altında tanımlanmıştır ve elastic seçilmiştir. EA değeri  $14.8 \times 10^6$  kN/m'dir. EI değeri  $197,33 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>/m'dir. Ağırlık w değeri 5 kN/m/m'dir. Poisson oranı  $\nu$  "0" alınmıştır. Stages construction kısmı input modülünde veri girilecek son kısımdır. Burada hesaba konu olan yapım aşamaları girilmiştir. Aşamalar her bir hesap için aynı olmaktadır. Başlangıç aşaması, bu aşama sistem tarafından "initial phase" olarak "phase explorer" kısmında otomatik olarak atanmaktadır. Burada hesap tipi K<sub>0</sub> olarak seçilmektedir. Bu aşamada temel ve üzerindeki yayılı yük, tüneli oluşturun plate elemanlar deactive durumdadır, hesaba sadece zemin katılmaktadır. Buradan sonra "add phase" ara yüz komutu ile 1. Aşamada kazı aşaması tanımlanmıştır. 1. aşamada hesap tipi plastic olarak seçilmiştir. Time interval değeri 1 gündür. Yani kazının tamamlanması 1 gün alacaktır. TBM plate elemanları arasında kalan zemin deactive durumdadır. TBM plate elemanları active durumdadır. Negative interface selection explorer'dan işaretlenerek active duruma getirilmiştir. Selection explorer'da plate elemanlar içinde kalan zemin seçilerek "water conditions" dry olarak seçilmiştir. Burada amaç zemin kazılsa da sistem zemin içindeki suyu hesaba alarak burada su uzaklaşmamış gibi düşünmektedir. Kazı yapılan zemine ait tüm malzeme parametreleri böylece kaldırılır. Şekil 5.9'da 1. Aşama modeli verilmiştir.

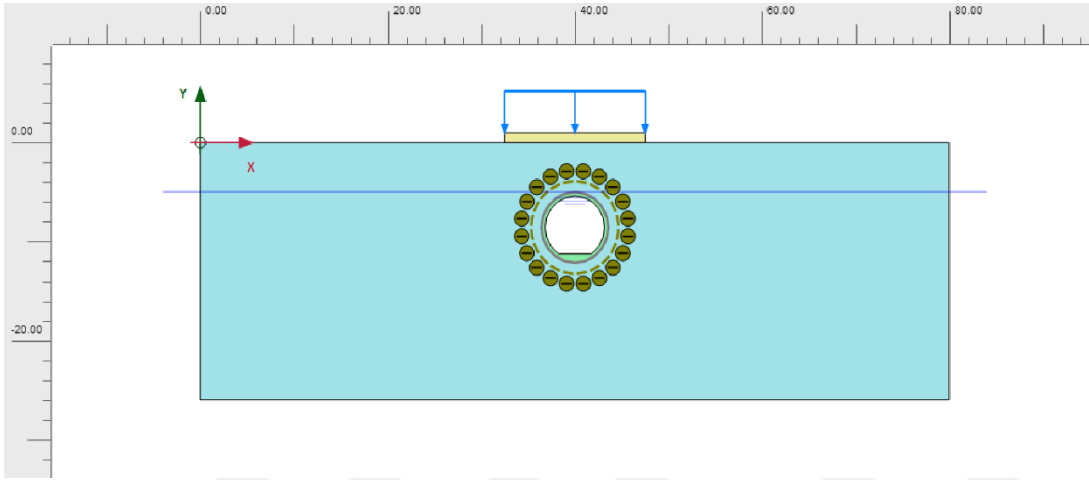


**Şekil 5.9:** Tünel 5 m derinliğinden geçmesi durumu 1.aşama-kazı aşaması.

Tekrar add phase ara yüz tuşu ile 2. aşamada TBM geçişi aşaması eklenir. Bu aşamada ek olarak plate elemanlar seçilerek selection explorer kısmından “line contraction” kutusu işaretlenir ve değeri %0.4 alınır. Böylece TBM kazıcı kafası ile kalkan kısmı geçişi sisteme tanımlanır. Bu aşamada hesap tipi plastik ve time interval 2.5 gündür.

Add phase ile 3. Aşamada kuyruk boşluğundan enjeksiyon yapılması aşaması tanımlanır. Bu aşamada time interval 1.5 gündür ve hesap tipi plastic seçilir. Bu aşamada kaplama yapılacak plate elemanların iç yüzünde kalan kısım seçilerek selection Explorer kısmından “water conditions” kısmı user defined olarak işaretlenir. Buraya  $\gamma_{ref} = -5m$ ,  $P_{ref} = -50 \text{ kN/m}^2$ ,  $P_{inc} = -14\text{kN/m}^2/\text{m}$  olarak seçilir. Bu değerler enjeksiyonu buraya bastığımızda zemin içinde oluşacak parametrelerin belirlenmesinde kullanılacaktır.  $50\text{kN/m}^2$ ’lik bir kuvvetle  $14\text{kN/m}^2$  çizgisel yük oluşturacak şekilde enjeksiyon yapıldığı varsayılmıştır. Add phase ile 4. aşamada tünel kaplamasının yapılması aşaması tanımlanır. Bu aşamada time interval 2.5 gündür ve hesap tipi plastic olarak seçilir. Bu aşamada kaplama yapılacak kısım active duruma getirilir. TBM plate elemanlara deactive duruma getirilir. Plate elemanlarda negative interface elemanlar active durumda bırakılır. Kaplama malzemesi kaplamanın yapılacağı bölgeye tanımlanarak water conditions kısmı dry olarak seçilir. Add phase ile 5. aşamada Temel ve 5 katlı bina yapımı aşaması eklenir. Bu aşamada hesap tipi plastic seçilir. Bu aşamada ek olarak phase menüsünde “reset displacements to zero” seçenek kutusu işaretlenir çünkü biz hesaplarımızda binanın yapımından kaynaklanan tünel ray üstü düşey yer değiştirmelerin bulmak istendiğinden önceki yer değiştirmeler sıfırlanacaktır. “Time interval” değeri 1 gün olarak seçilir. Bu aşamada temel active duruma getirilir ve temel üstündeki yayılı yük active duruma getirilerek yayılı yük

değeri  $q_y = -75.00 \text{ kN/m}^2/\text{m}$  olarak girilir. Bu değer her katta ortalama  $15 \text{ kN/m}^2$  yayılı yük olduğu durumu varsayılarak etkilmiştir. Add phase ile 6. aşamada temel ve 10 katlı bina yapımı aşaması eklenir. Bu aşamada hesap tipi plastic seçilir. “Reset displacements to zero” yapılmaz. Time interval 1 gün olarak seçilir. Yayılı yük değeri  $q_y = -150.00 \text{ kN/m}^2/\text{m}$  değerine yükseltilir. Add phase ile 7. aşamada temel ve 15 katlı bina yapımı aşaması eklenir. Bu aşamada hesap tipi plastic seçilir. “Time interval” 1 gün olarak seçilir. Çizgisel yayılı yük değeri  $q_y = -225.00 \text{ kN/m}^2/\text{m}$  değerine yükseltilir. Şekil 5.10’da 7. Aşamaya ait model görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 5.10:** Tünel 5 m derinliğinden geçmesi durumu 7.aşama-Temel ve 15 katlı bina yapımı aşaması.

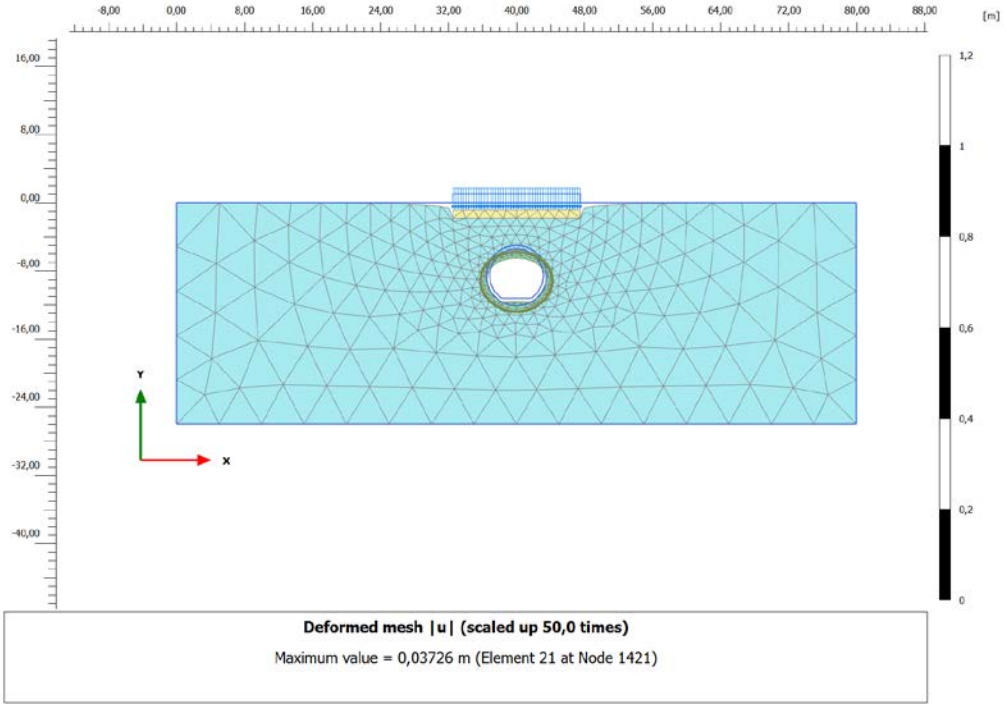
Proje toplam günü 10.5 gün olmuştur. Aşamaların gerçekleşme günleri şu şekildedir.

1. aşama 1.gün. 2. aşama 3.5 gün. 3. aşama 5.gün. 4. aşama 7.5 gün. 5. aşama 8.5 gün.
6. aşama 9.5 gün. 7. aşama 10.5 gündür.

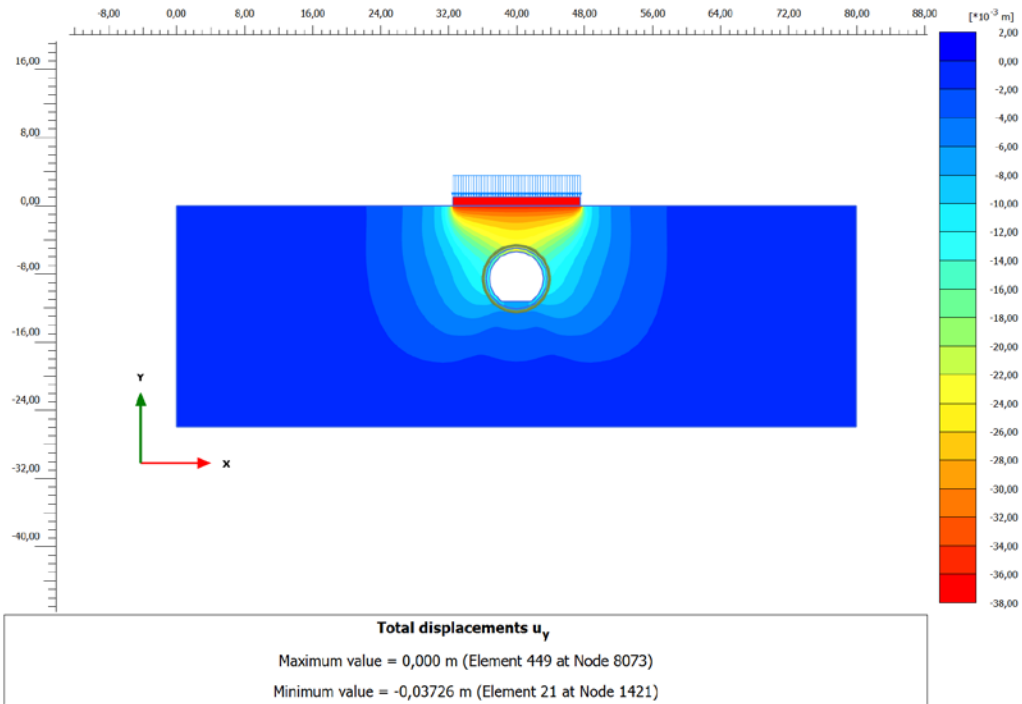
### 5.3 Hesap Sonuçları

Hesaplar sonucunda ağ modelinin yer değişmeler neticesinde deforme olmuş şekilleri ve yer değiştirmelerin değerleri oranında renklendirilmiş şekilleri elde edilmiştir. Şekillerinde yer değiştirme miktarları şeklin sağ kısmında bulunan ölçeğe bağlıdır. Yapılan hesap sonuçlarından elde edilen değerler ray üstü düşey yer değiştirmelerinin karşılaştırılması amacıyla programa kaydedilmiştir. Bu noktalara ve yer değiştirme değerlerine ait şekillere yer verilmiştir. 1 nolu grovak parçalı killi zeminde yapılan çalışmada tünel örtü kalınlığı 5 metre iken 5. aşama 5 katlı bina yapılması durumunda ağ model Şekil 5.11’de verilmiştir. 1 nolu hesapta 5. aşamaya ait düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli Şekil 5.12’de verilmiştir.



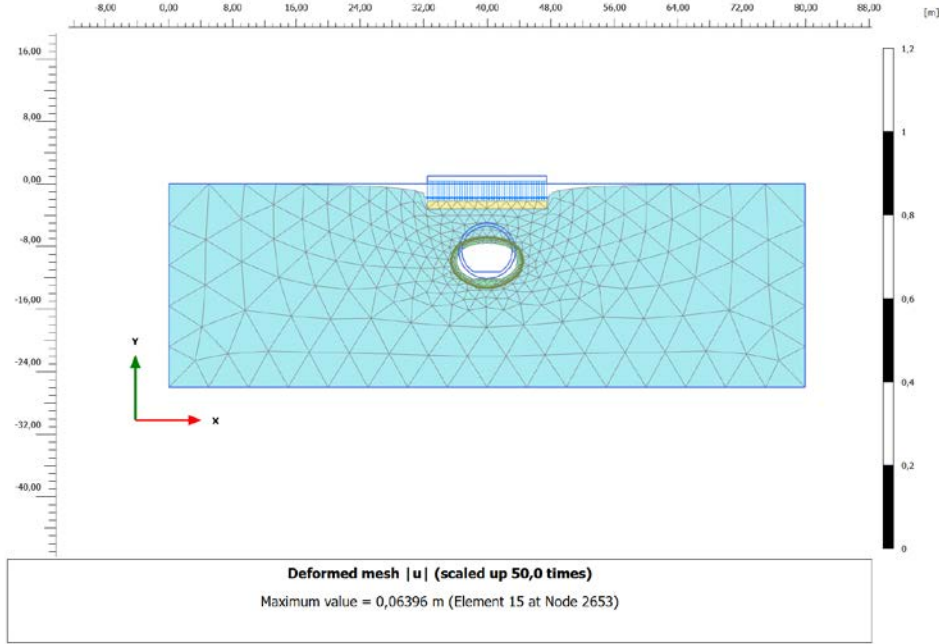


Şekil 5.11: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 5.aşamada ağ modeli.

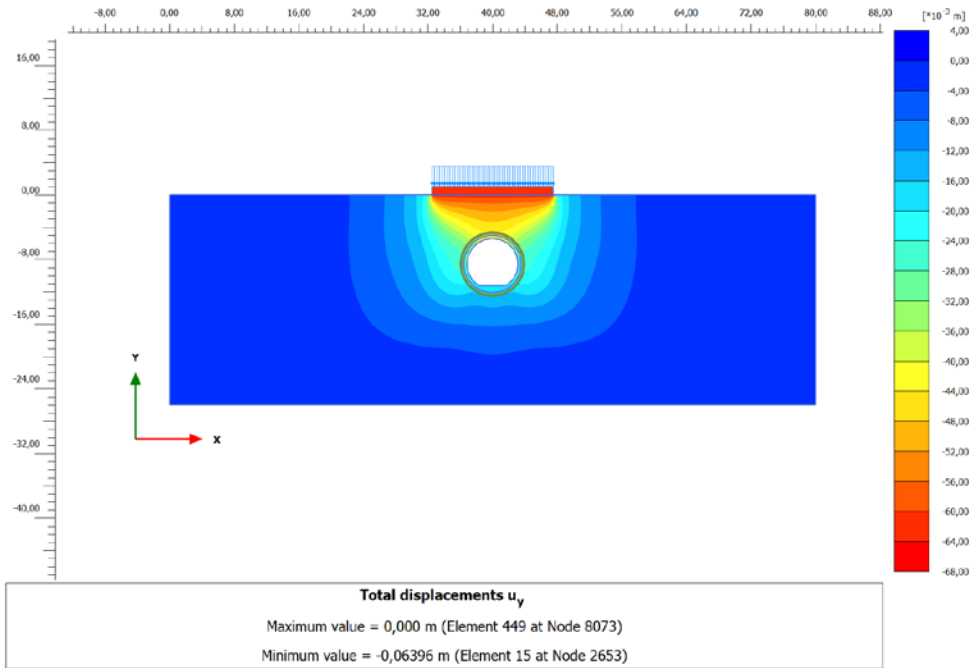


Şekil 5.12: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 5.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.

Grovak parçalı killi zeminde tünel örtü kalınlığı 5 metre iken 6. aşamada 10 katlı bina yapılması durumunda ağ model Şekil 5.13’de verilmiştir. Bu aşamaya ait düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli Şekil 5.14’de verilmiştir.

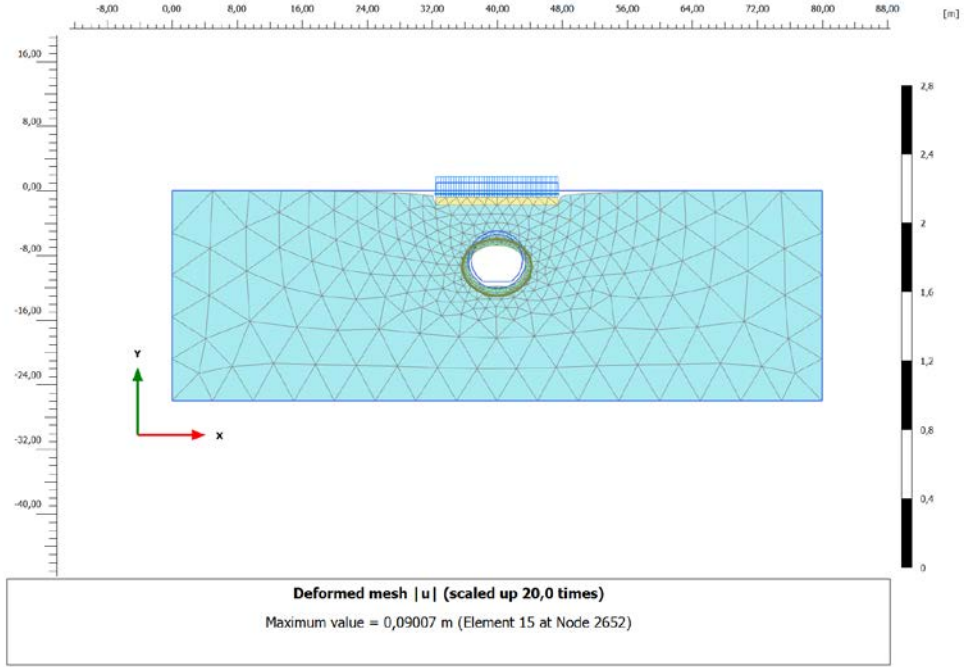


**Şekil 5.13:** Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 6.aşamada oluşan ağ modeli.

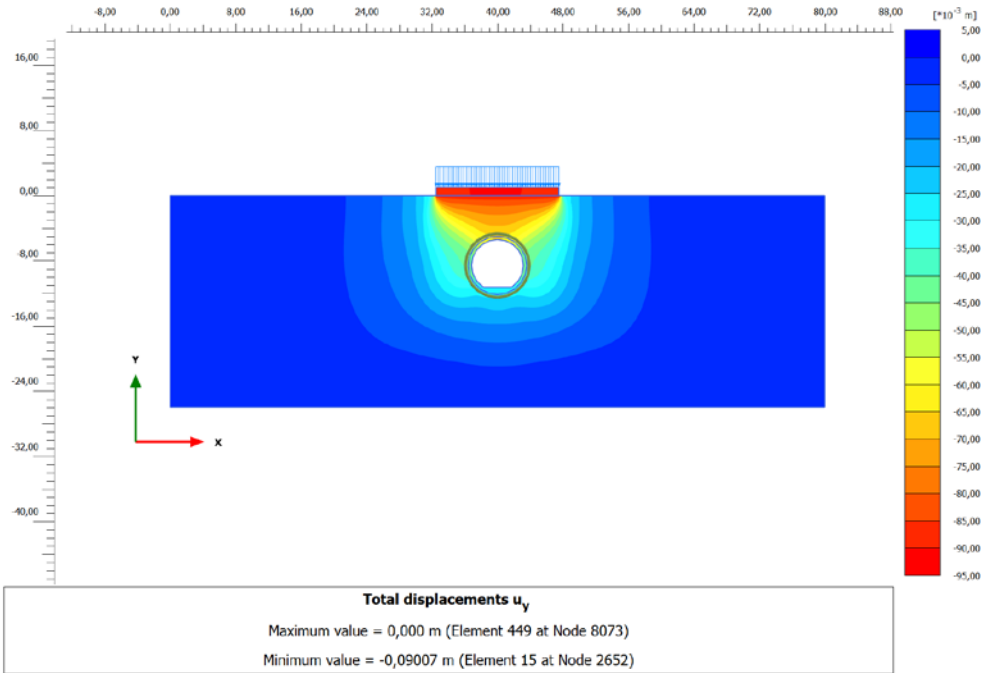


**Şekil 5.14:** Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 6.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.

Grovak parçalı killi zeminde hesabın son aşamasını oluşturan 7. aşamada 15 katlı bina yapılması durumunda ağ model Şekil 5.15’de verilmiştir. Bu aşamaya ait düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli Şekil 5.16’da verilmiştir.

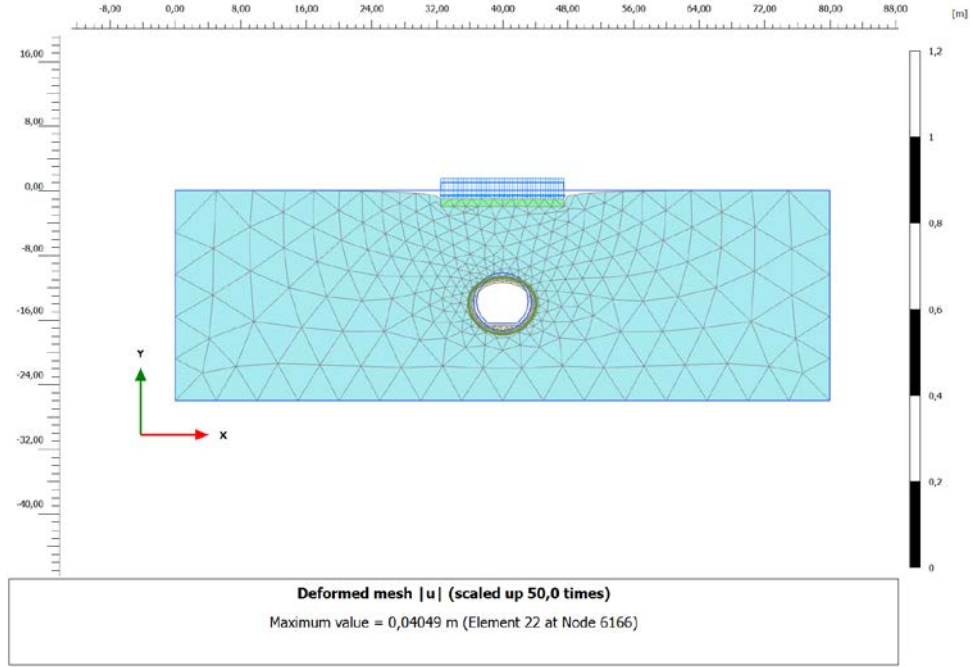


Şekil 5.15: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşamada oluşan ağ modeli.

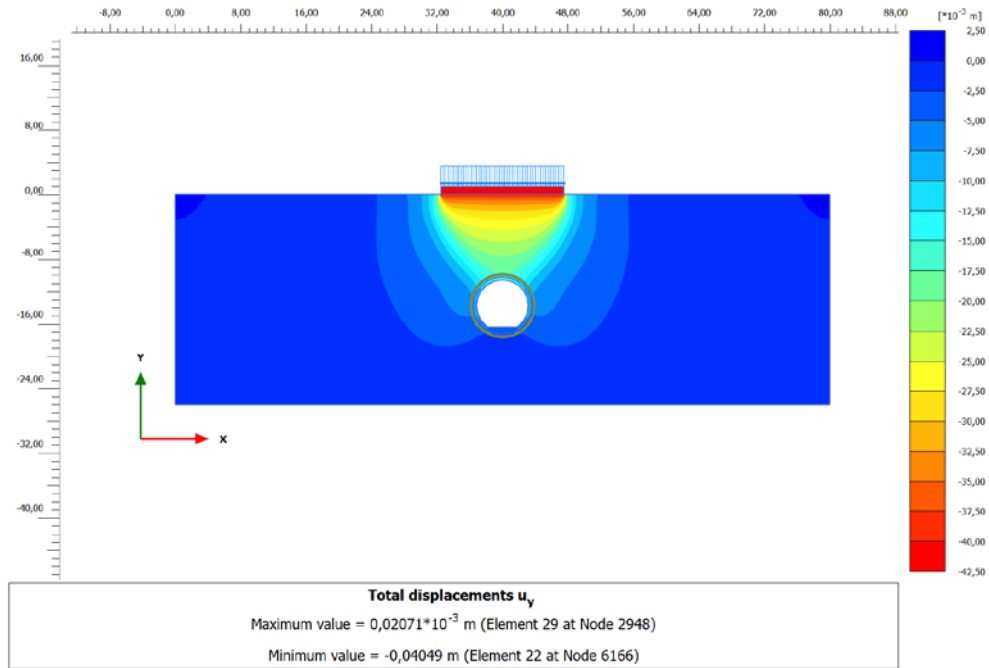


Şekil 5.16: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.

Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığının 10 metre olması durumunda meydana gelen 5. Aşama ağ modeli Şekil 5.17’de verilmiştir. Bu duruma ait düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.18’de verilmiştir.

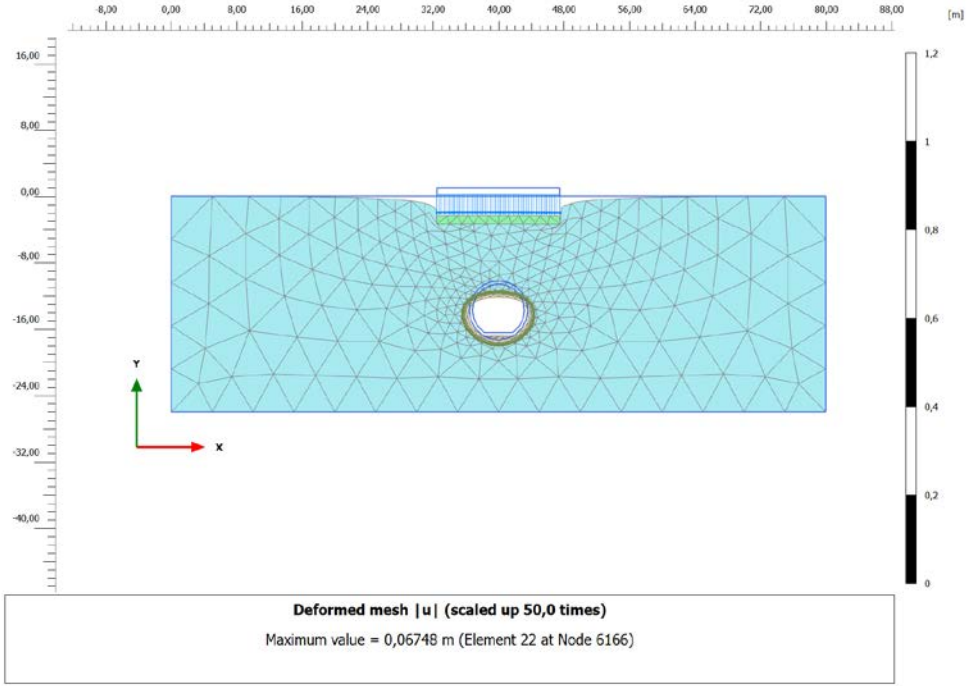


Şekil 5.17: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 5. aşamada ağ modeli.

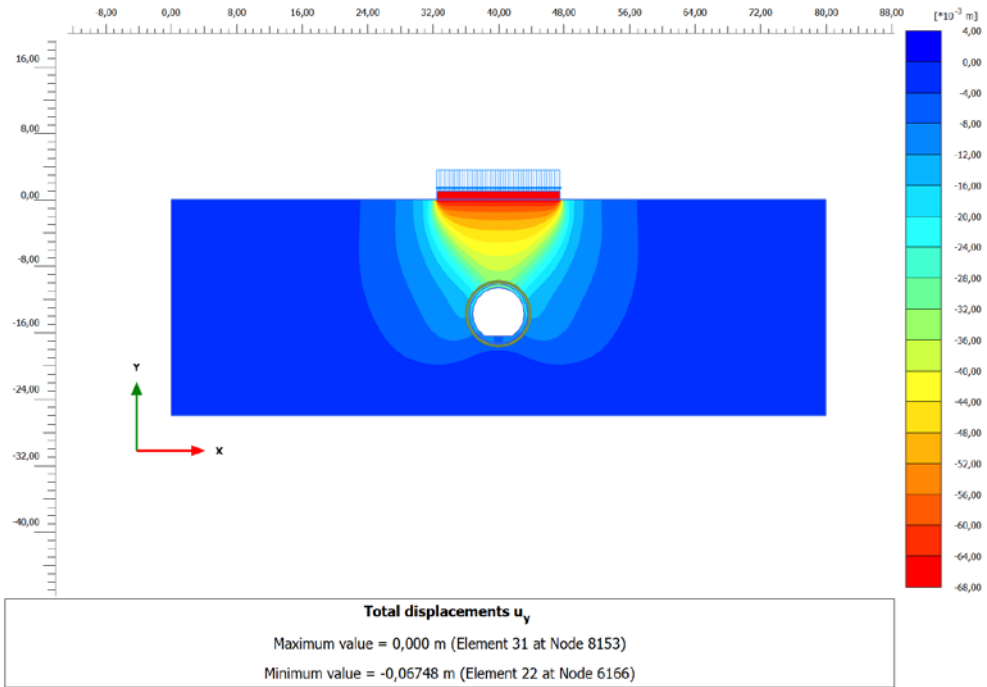


Şekil 5.18: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 5. aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.

6. Aşamaya ait ağ modeli Şekil 5.19’da ve düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.20’de verilmiştir.

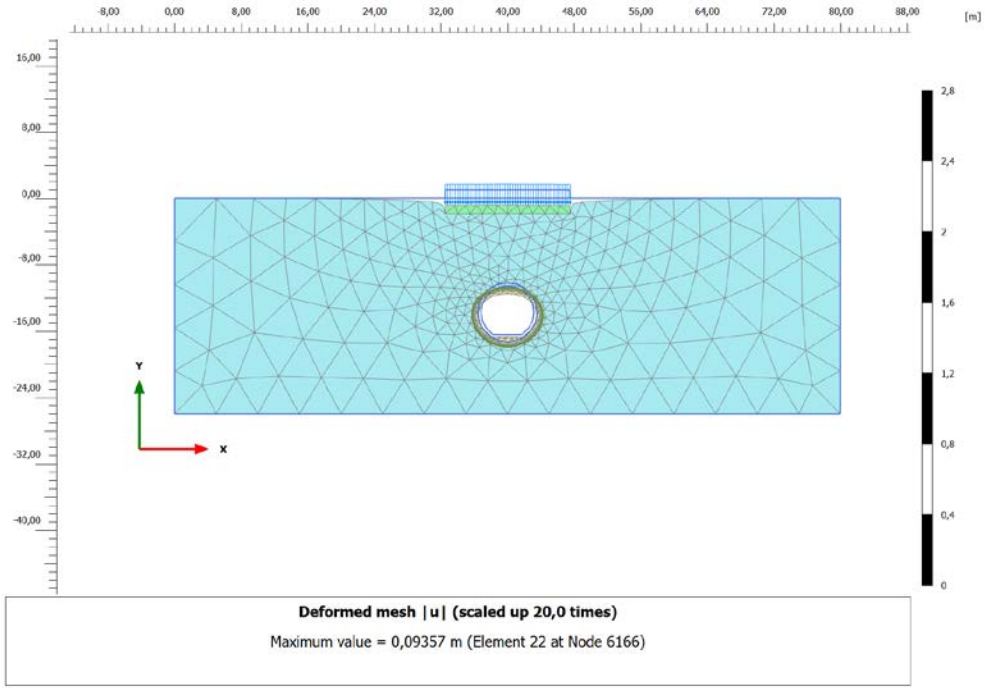


Şekil 5.19: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 6.aşamada ağ modeli.

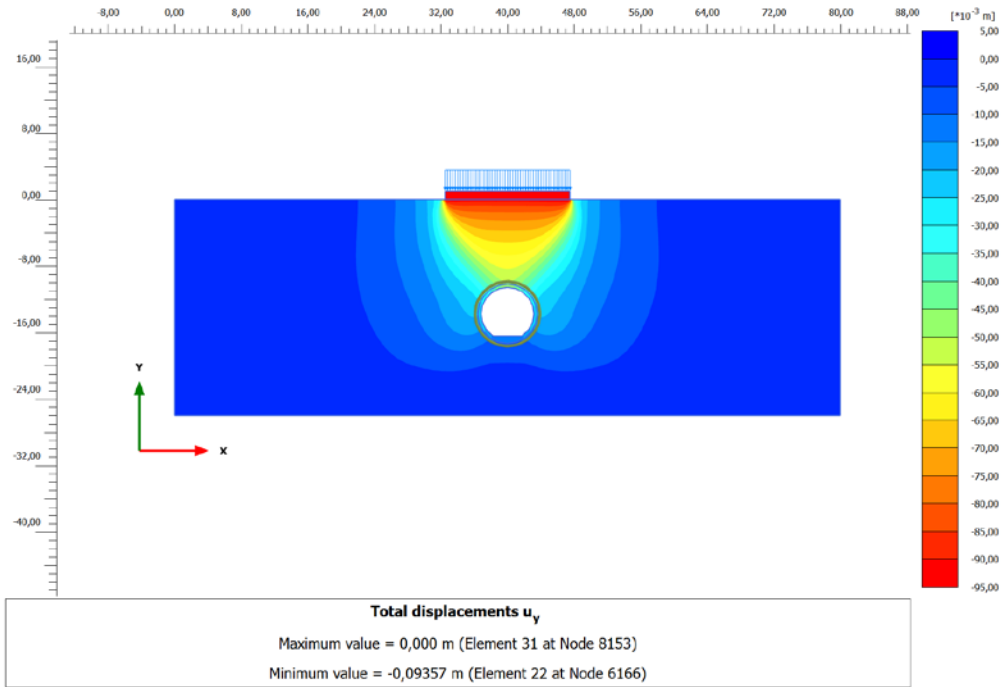


Şekil 5.20: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 6.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.

Hesabın 7. Aşamasında elde edilen ağ modeli 5.21’de ve düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.22’de verilmiştir.

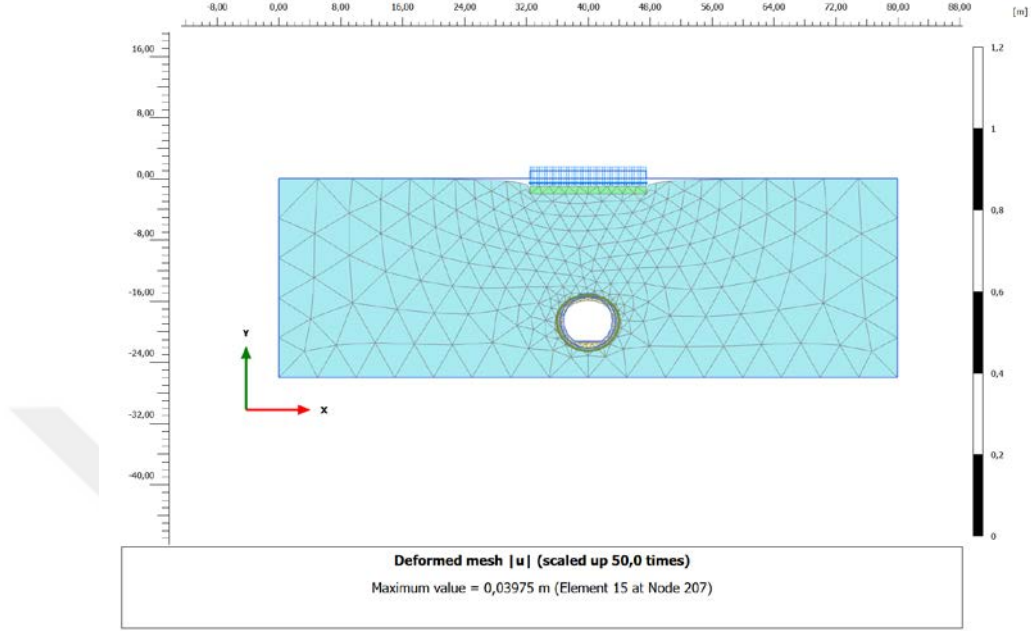


Şekil 5.21: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7.aşamada ağ modeli.

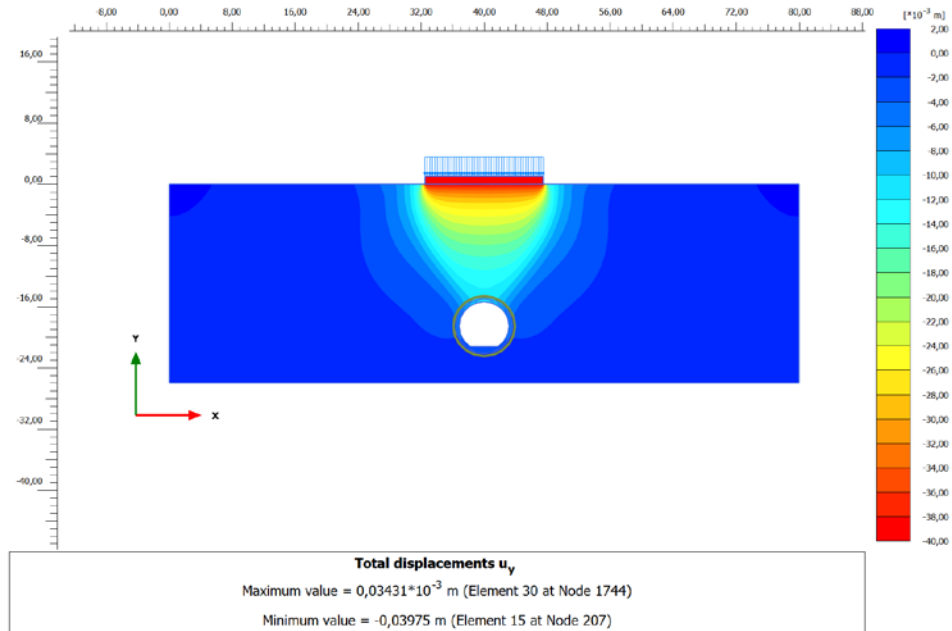


Şekil 5.22: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.

Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığının 15 metre olması durumunda meydana gelen 5. Aşama ağ modeli Şekil 5.23’de verilmiştir. Bu duruma ait düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.24’de verilmiştir.

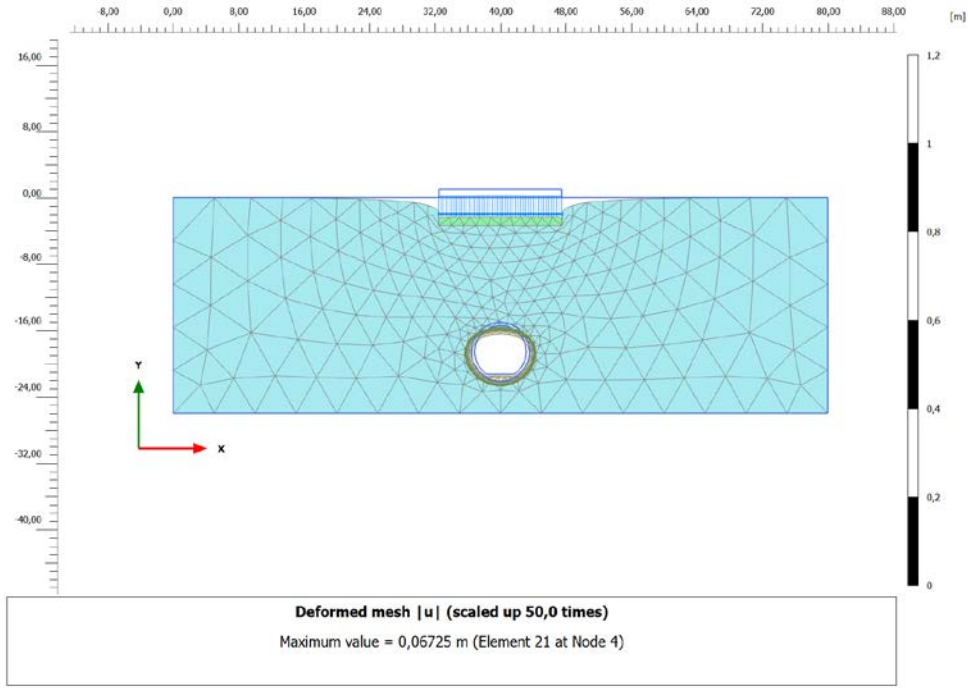


Şekil 5.23: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 5.aşamada ağ modeli.

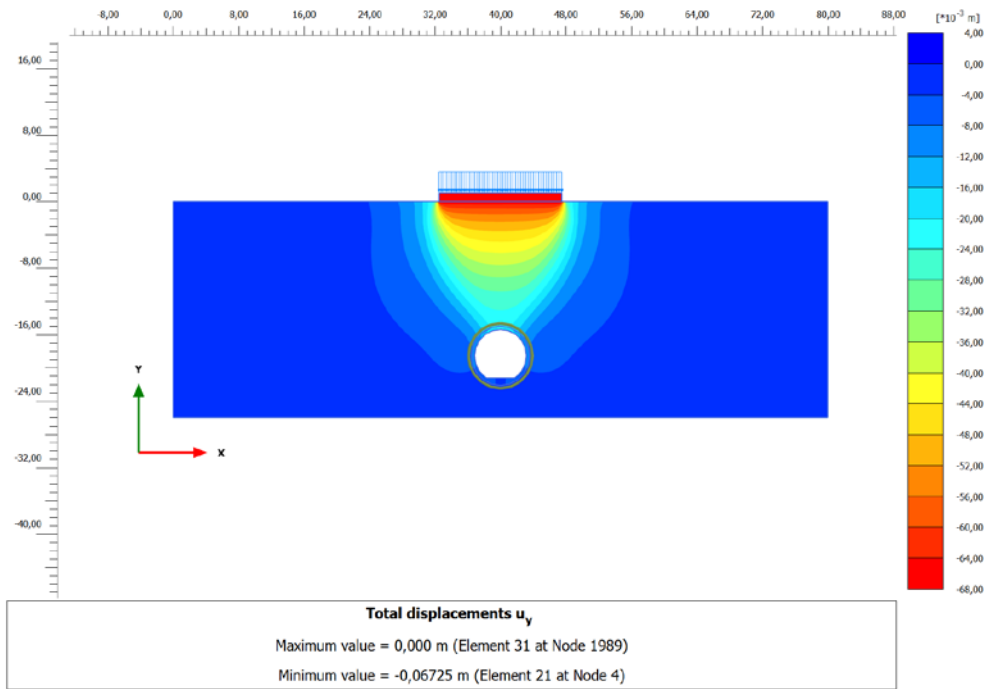


Şekil 5.24: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 5.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.

6. Aşamaya ait ağ modeli Şekil 5.25’de ve düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.26’da verilmiştir.



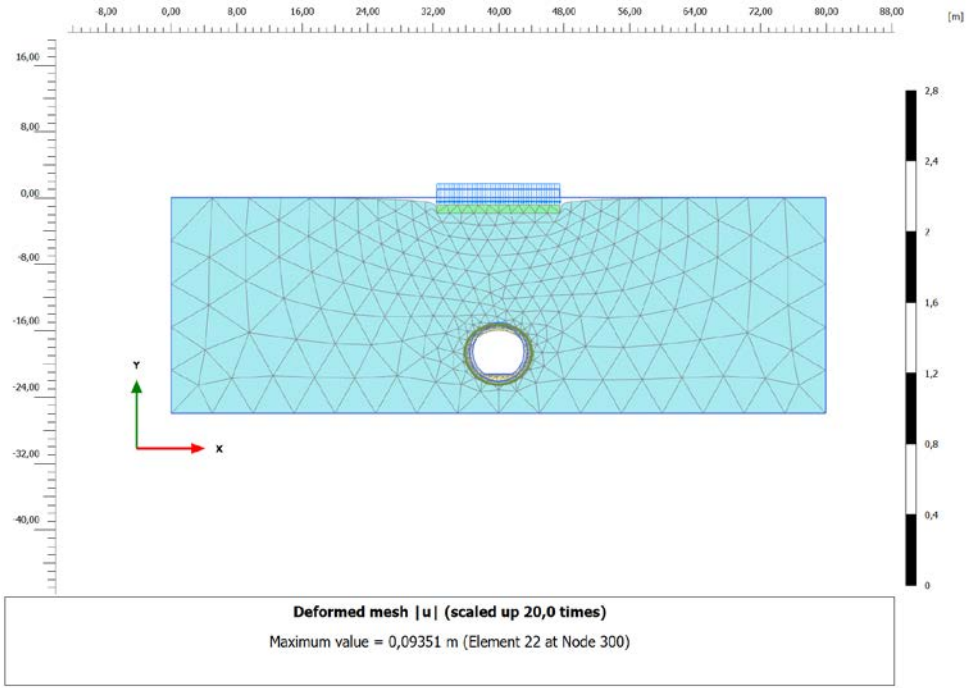
Şekil 5.25: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 6.aşamada ağ modeli.



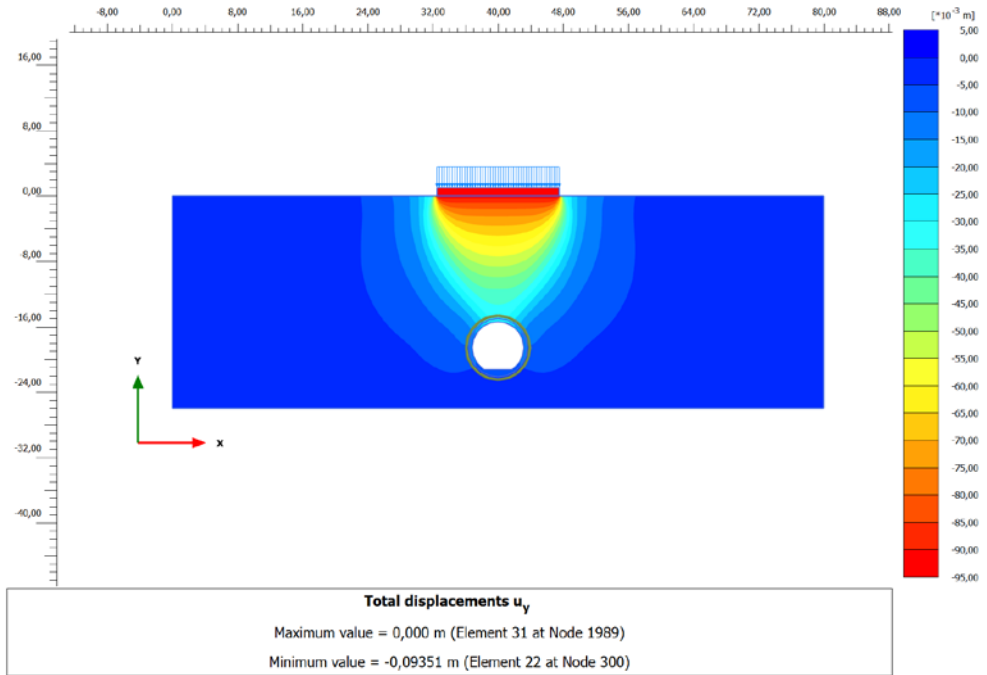
Şekil 5.26: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 6.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.



Hesabın 7. Aşamasında elde edilen ağ modeli 5.27’de ve düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.28’de verilmiştir.

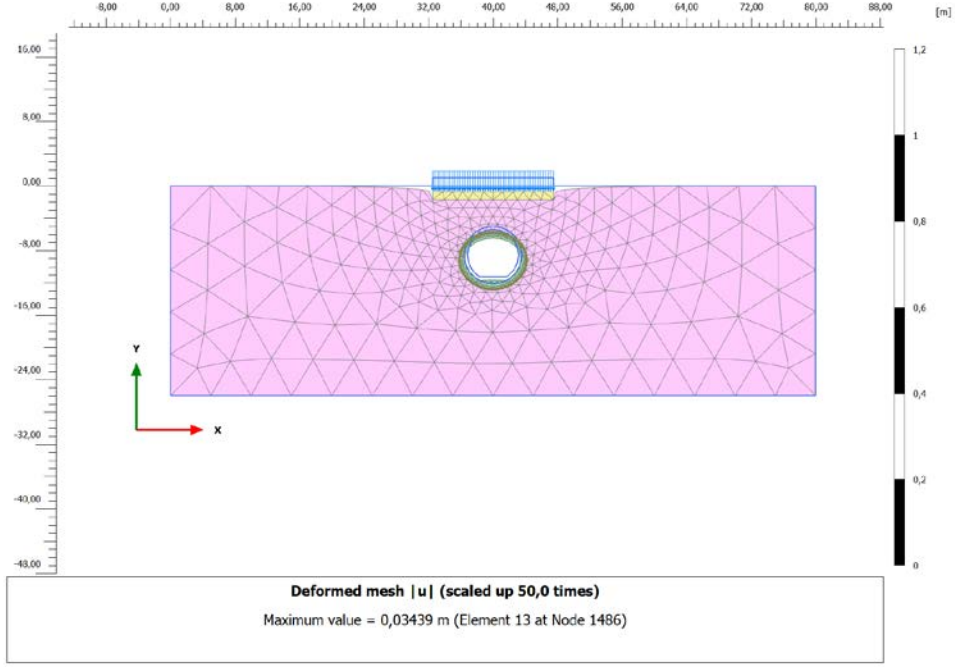


Şekil 5.27: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7.aşamada ağ modeli.

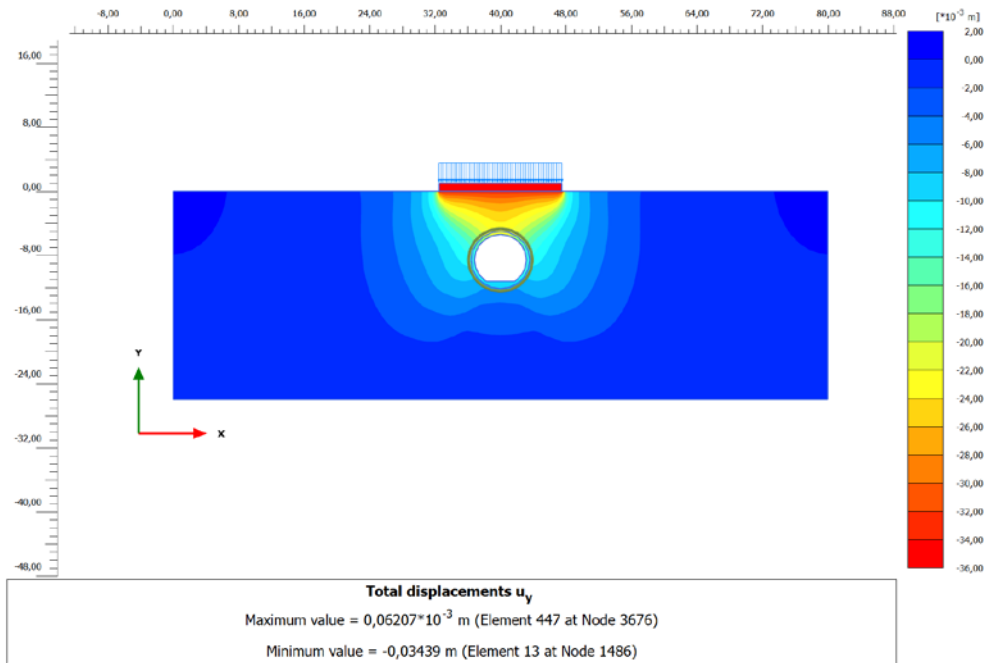


Şekil 5.28: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7.aşamada oluşan düşey yer değiştirmeler.

2 nolu çalışmada az ayrılmış grovak zeminde tünel örtü kalınlığı 5 metre iken 5. Aşama 5 katlı bina yapılması durumunda ağ model Şekil 5.29'da verilmiştir. Bu aşamaya ait düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş hali Şekil 5.30'da verilmiştir.

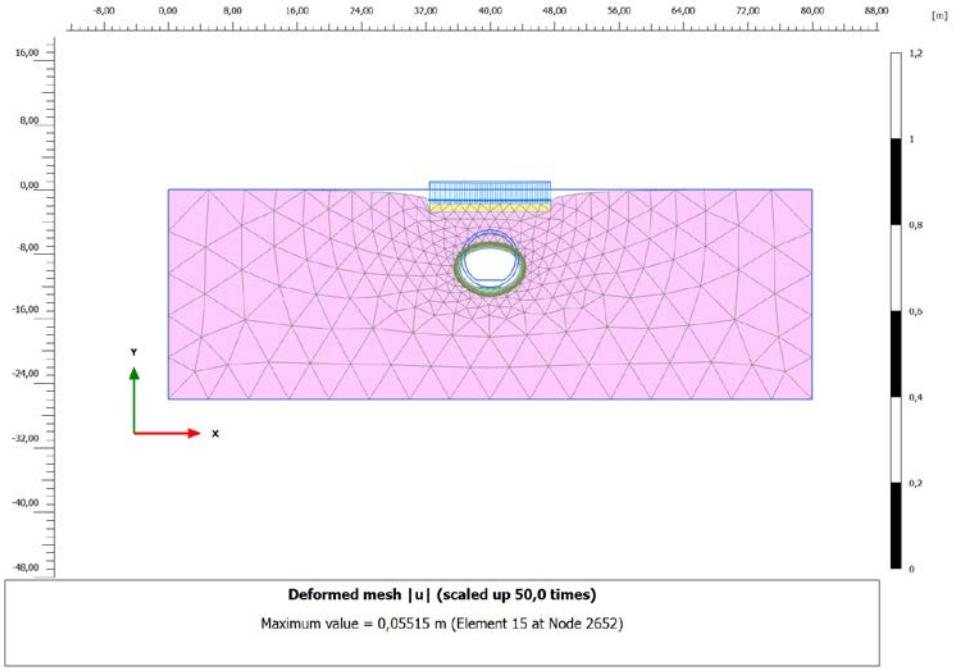


Şekil 5.29: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 5. aşamada ağ modeli.

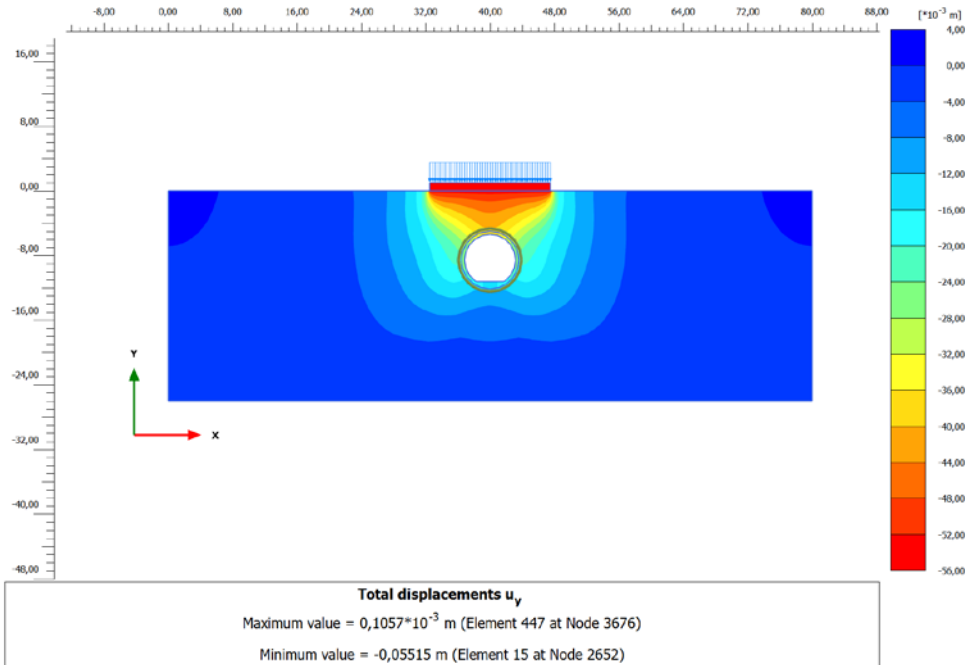


Şekil 5.30: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 5. aşamada düşey yer değiştirmeler.

Hesabın 6. Aşamasında elde edilen ağ modeli 5.31’de ve düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.32’de verilmiştir.

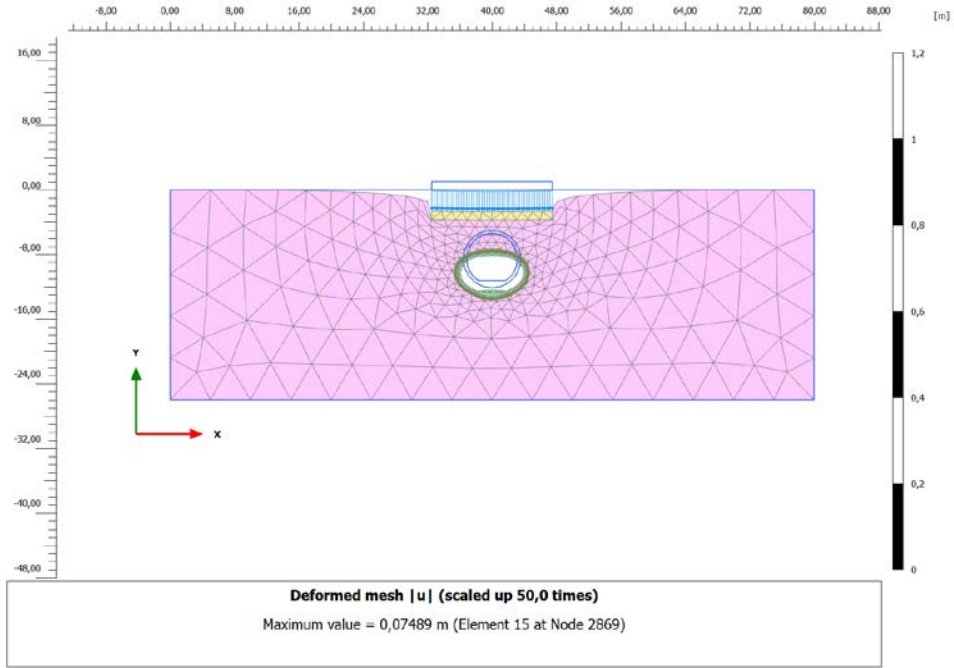


Şekil 5.31: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 6.aşamada ağ modeli.

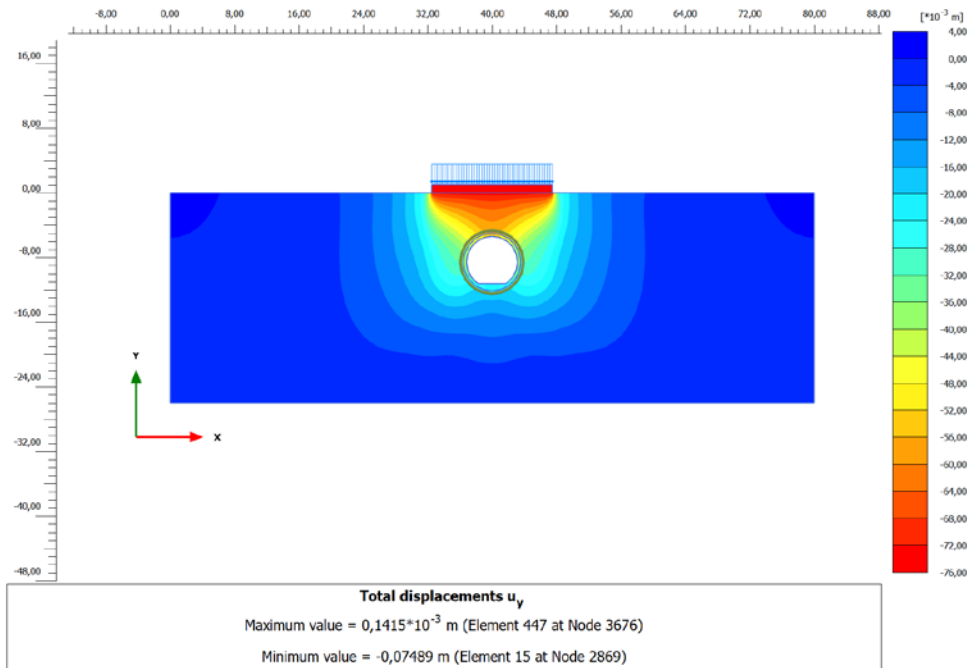


Şekil 5.32: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 6.aşamada düşey yer değiştirmeler.

Hesabın 7. Aşamasında elde edilen ağ modeli 5.33'de ve düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.34'de verilmiştir.

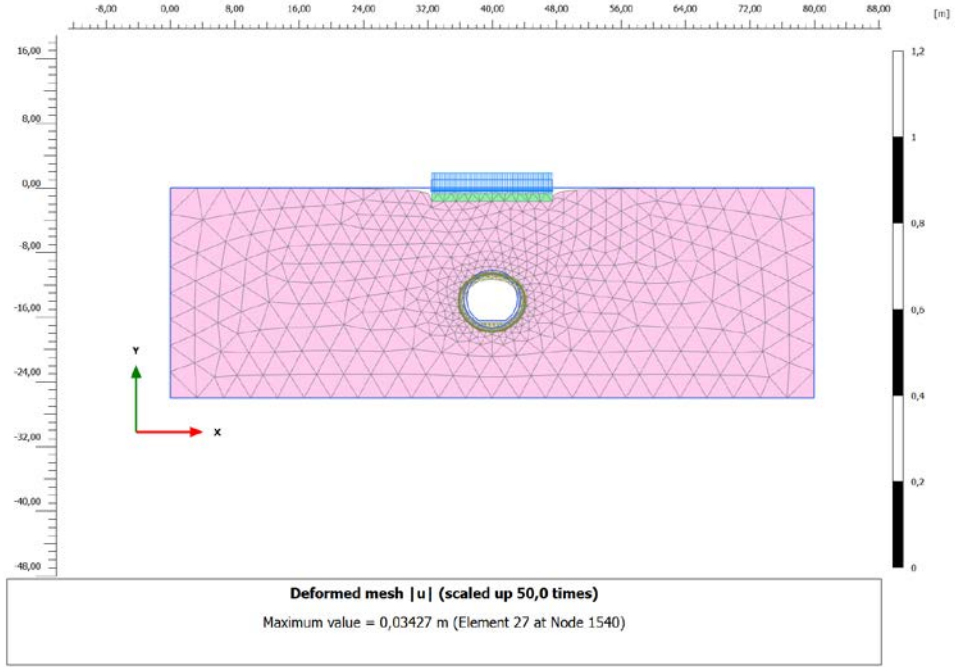


Şekil 5.33: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7.aşamada ağ modeli.

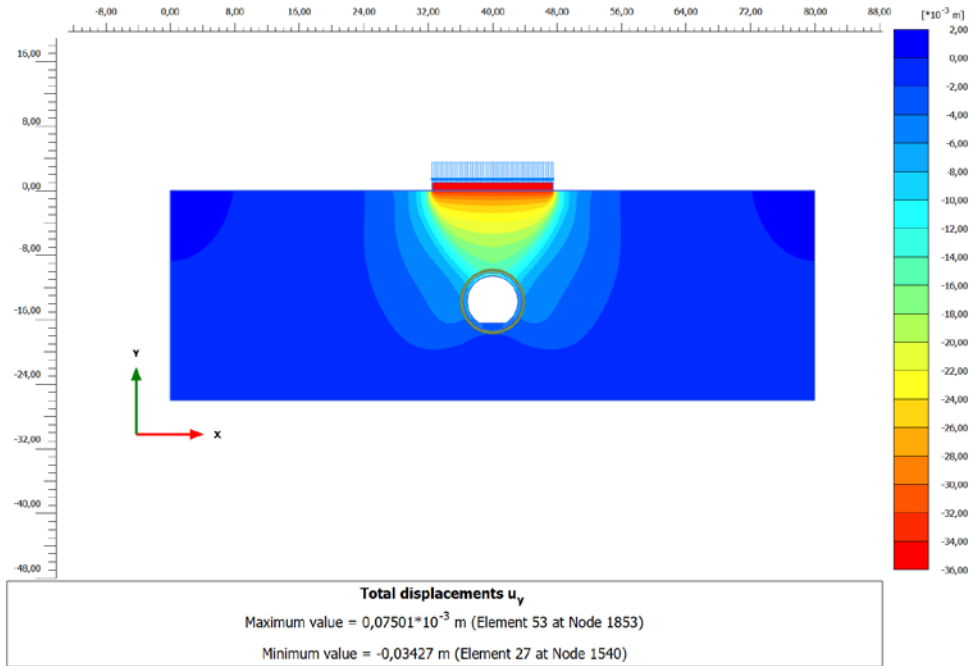


Şekil 5.34: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7.aşamada düşey yer değiştirmeler.

Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığının 10 metre olması durumunda meydana gelen 5. Aşama ağ modeli Şekil 5.35’de verilmiştir. Bu duruma ait düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.36’da verilmiştir.

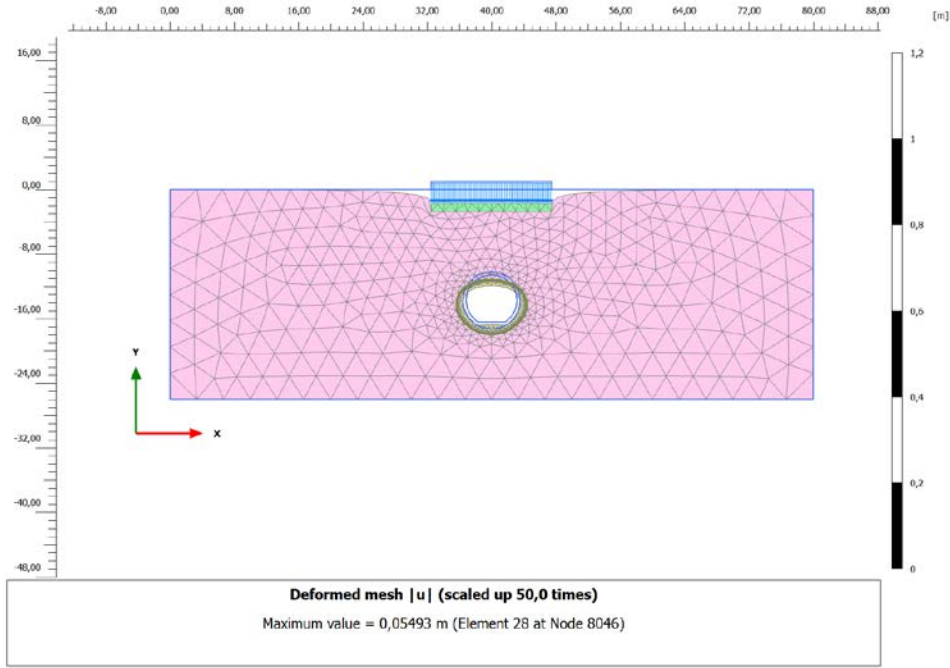


Şekil 5.35: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 5. aşamada ağ modeli.

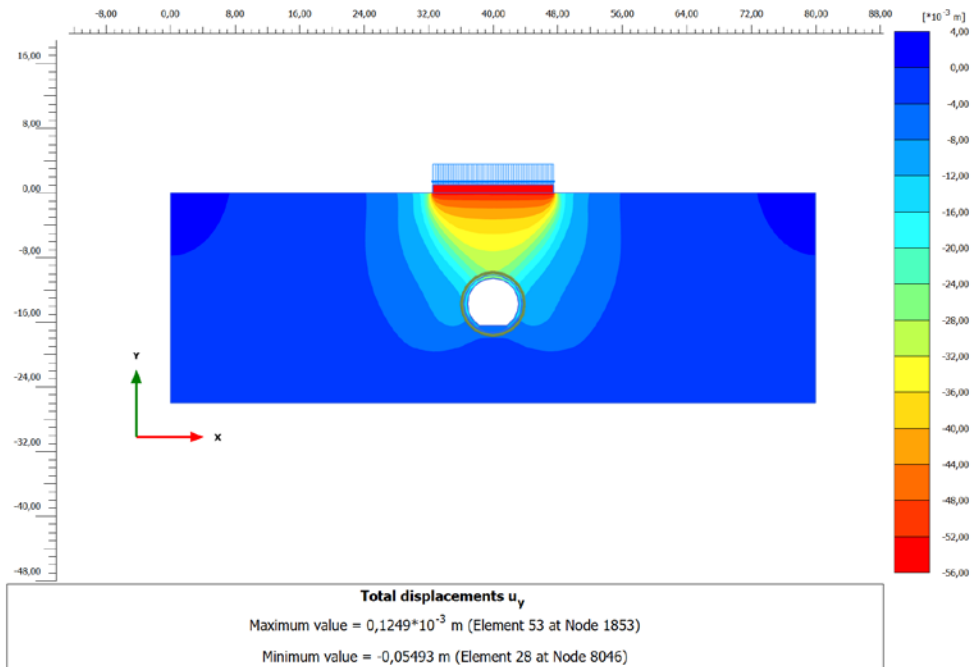


Şekil 5.36: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 5. aşamada düşey yer değiştirmeler.

Hesabın 6. Aşamasında elde edilen ağ modeli 5.37’de ve düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.38’de verilmiştir.

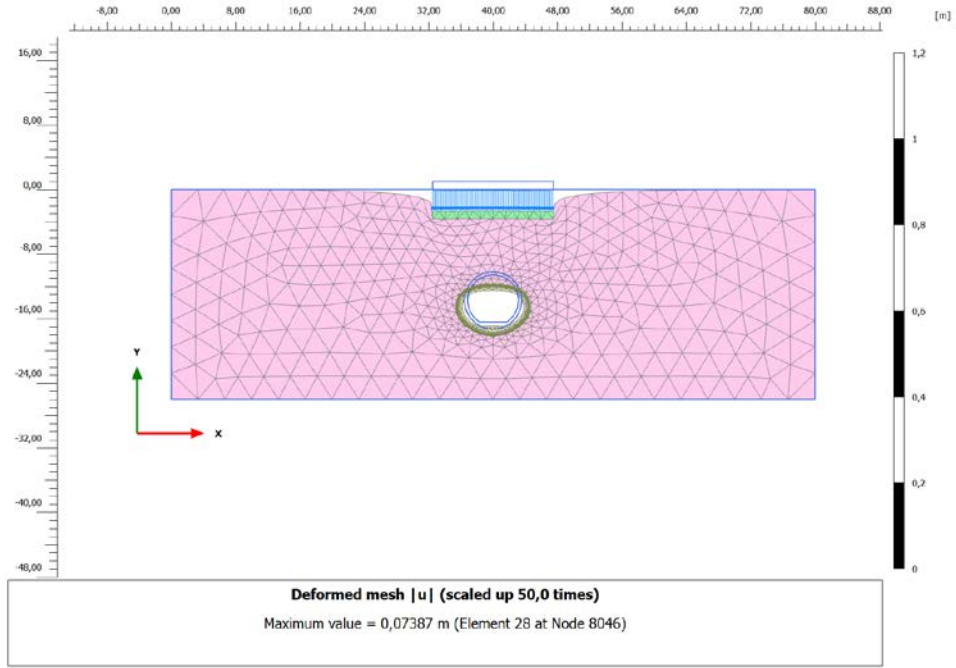


Şekil 5.37: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 6.aşamada ağ modeli.

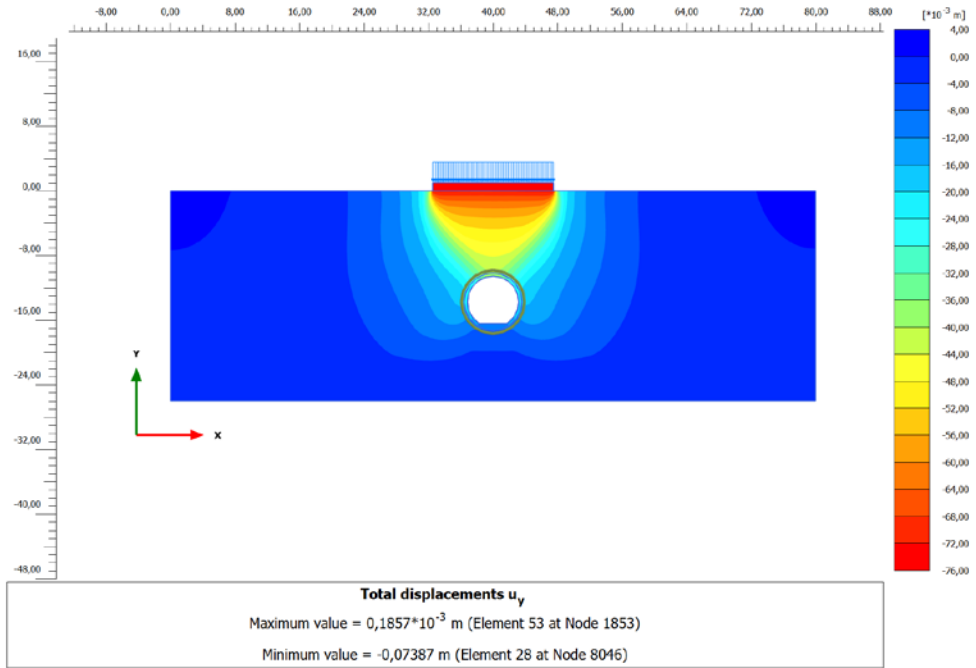


Şekil 5.38: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 6.aşamada düşey yer değiştirmeler.

Hesabın 7. Aşamasında elde edilen ağ modeli 5.39'de ve düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.40'da verilmiştir.

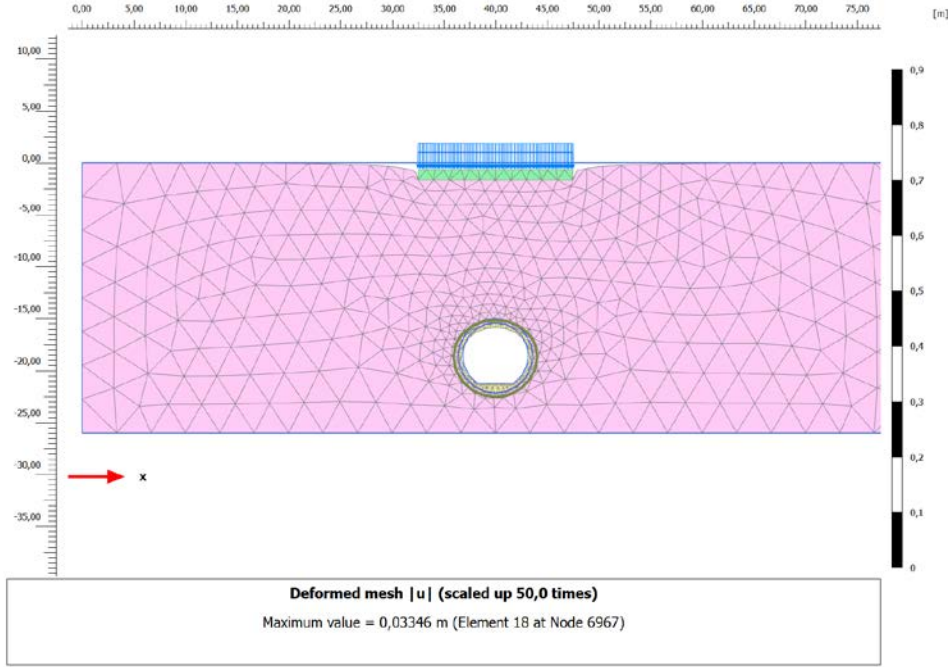


Şekil 5.39: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7.aşamada ağ modeli.

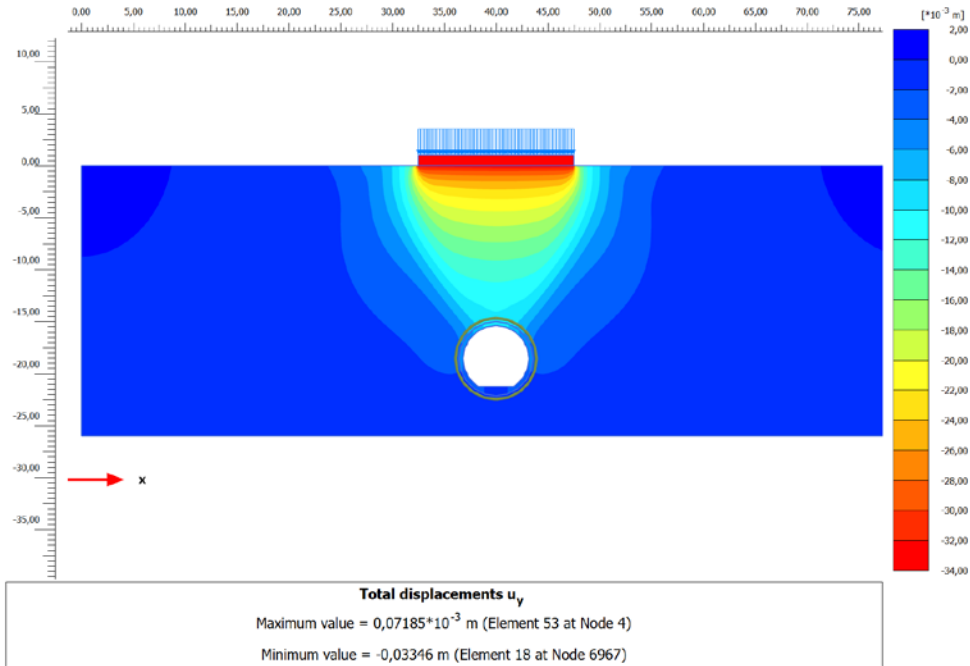


Şekil 5.40: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7.aşamada düşey yer değiştirmeler.

Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığının 15 metre olması durumunda meydana gelen 5. Aşama ağ modeli Şekil 5.41’de verilmiştir. Bu duruma ait düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.42’da verilmiştir.



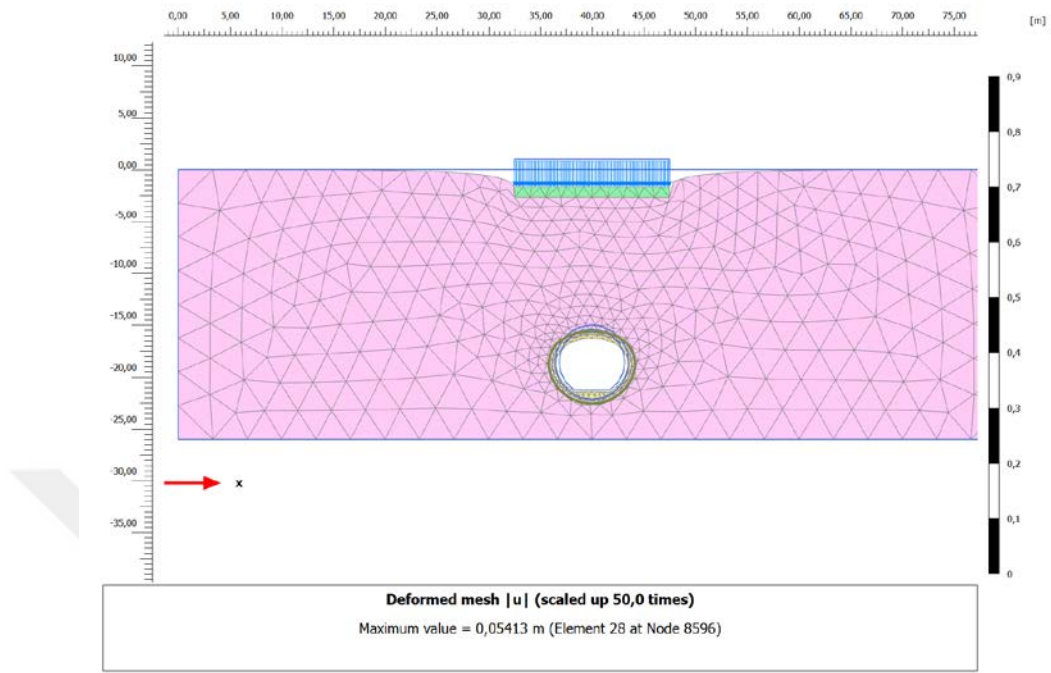
Şekil 5.41: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 5.aşamada ağ modeli.



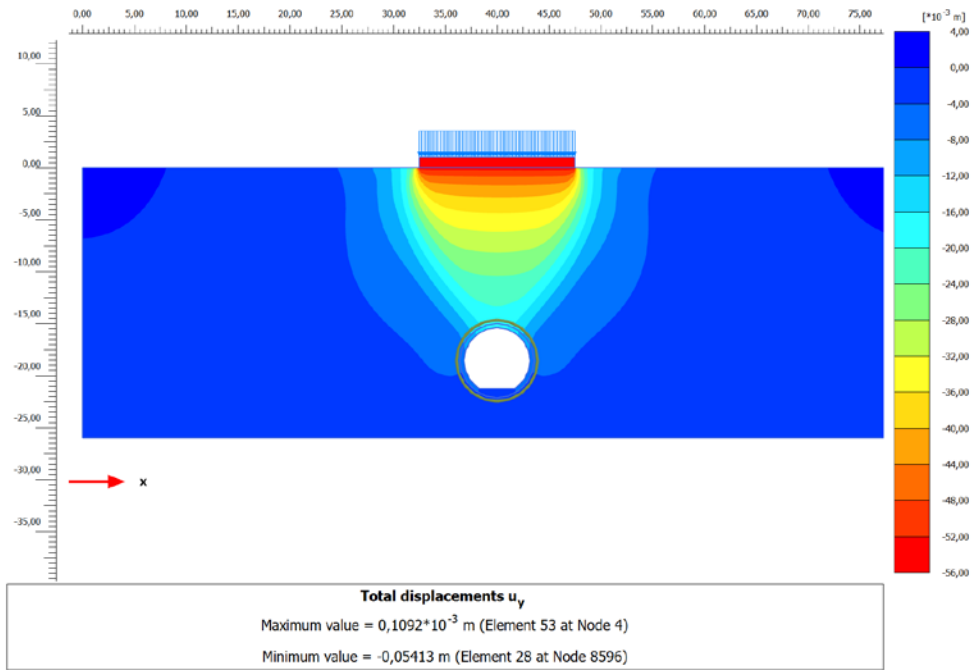
Şekil 5.42: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 5.aşamada düşey yer değiştirmeler.



Hesabın 6. Aşamasında elde edilen ağ modeli 5.43’de ve düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.44’de verilmiştir.

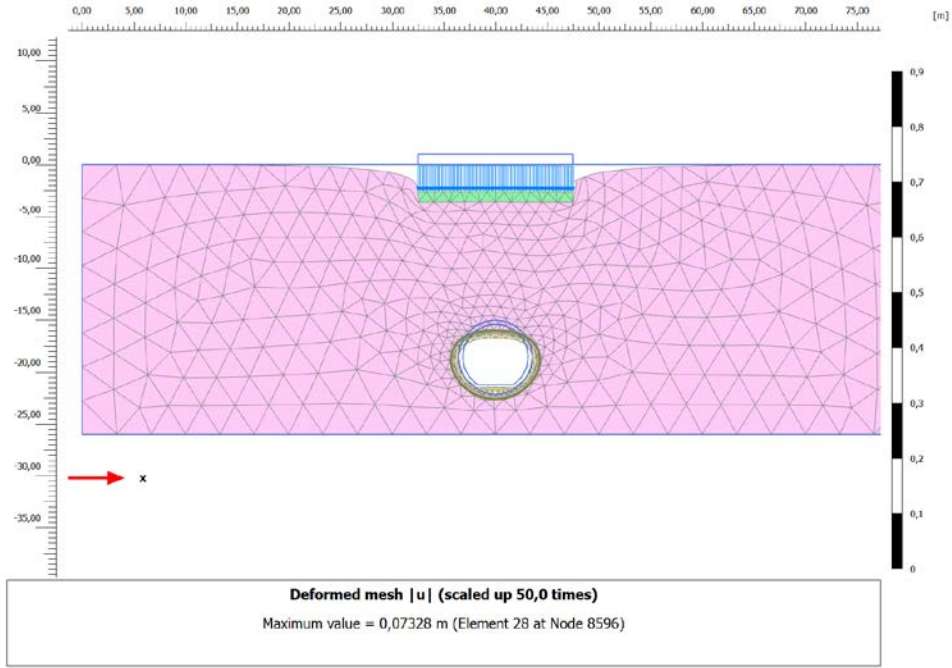


Şekil 5.43: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 6.aşamada ağ modeli.

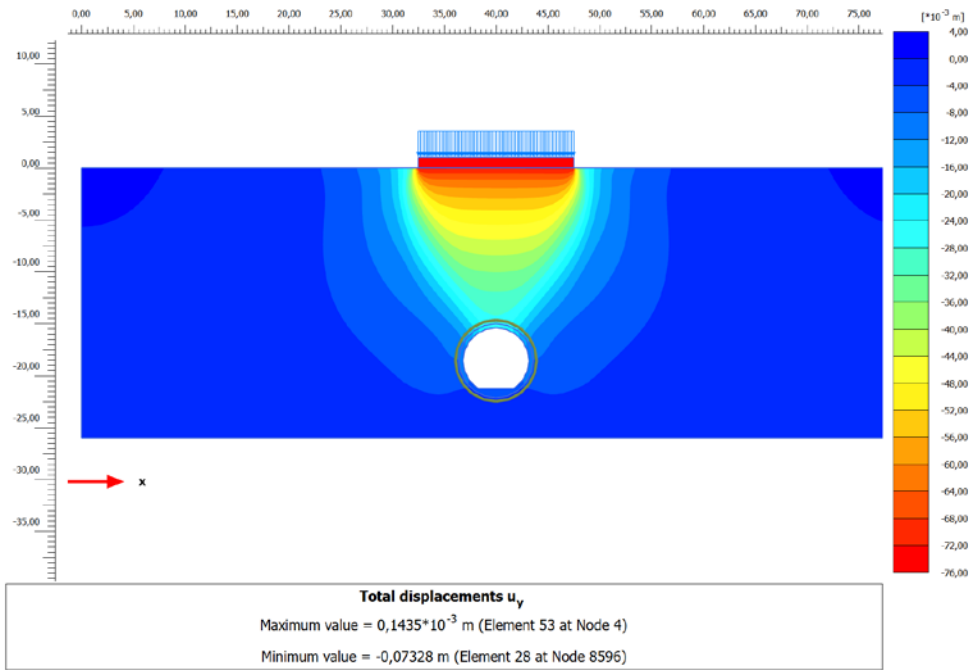


Şekil 5.44: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 6.aşamada düşey yer değiştirmeler.

Hesabın 7. Aşamasında elde edilen ağ modeli 5.45’de ve düşey yer değiştirmelerin renklendirilmiş şekli 5.46’da verilmiştir.

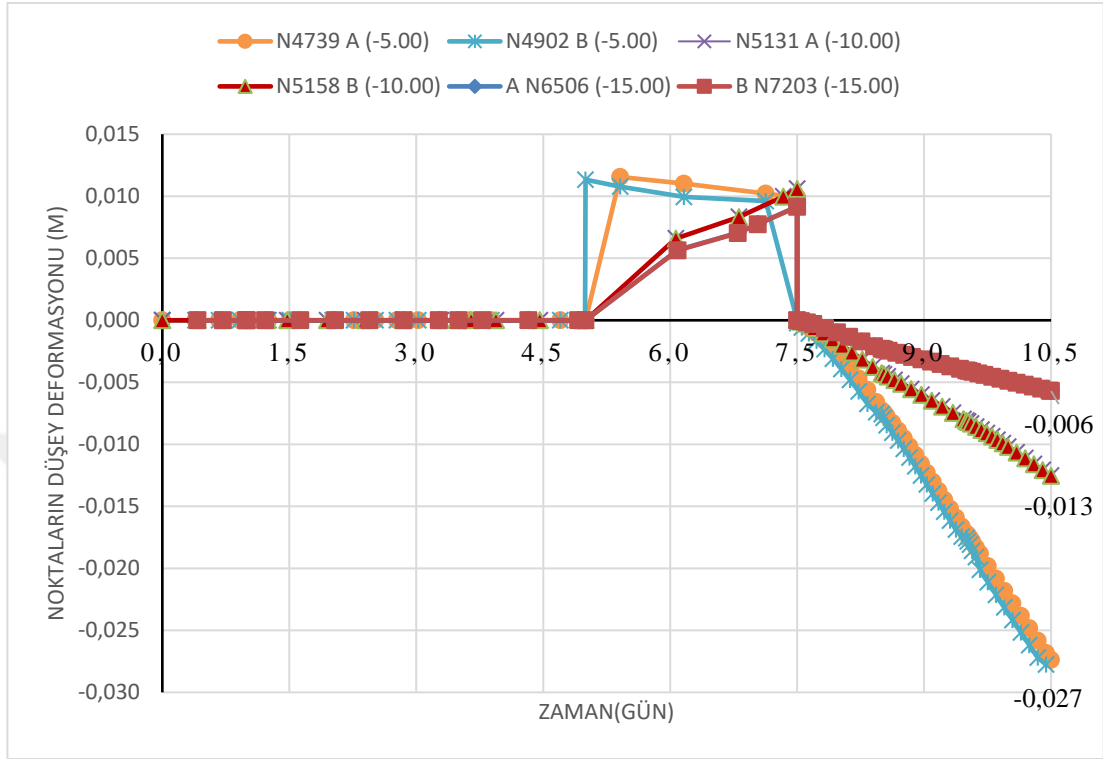


Şekil 5.45: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşamada ağ modeli.



Şekil 5.46: Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşamada düşey yer değiştirmeler.

1. nolu hesap sonucunda model yer değiştirmeleri şekillerde gösterildiği gibi oluşurken grovak parçalı kil zemin için ray üstü yer değiştirme değerleri proje süresine göre şekil 5.47’de verildiği gibi bulunmuştur.



**şekil 5.47:** Grovak parçalı kil zeminde A ve B ray üstü noktalarında oluşan dőy yer değiştirmeler.

N6506 A ve N7203 B noktalarında mutlak değerce en düşük yer değiştirmeler oluşurken, N4739 A ve N4902 B noktalarında mutlak değerce en büyük dőy yer değiştirmeler oluşmuştur.

15 metre derinlikte A1 kesitli TBM tüneli mevcut olma durumunda 5 katlı bina yapımı sonucunda A ve B noktalarında oluşan dőy yer değiştirme -0.00230 m, 10 katlı bina yapımı sonucunda -0.00404 m ve 15 katlı bina için -0.00570 m ile sınırlı kalmıştır.

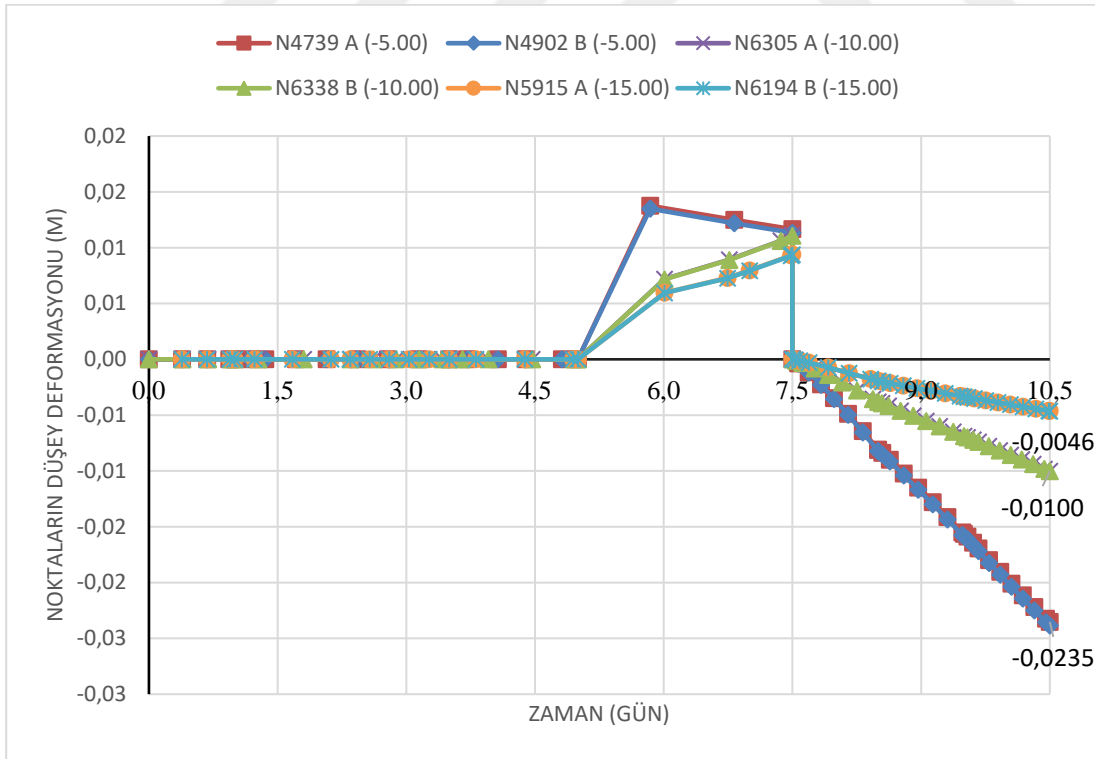
10 metre derinlikte A1 kesitli tünel var iken yapılan 5 katlı bina, 10 katlı bina ve 15 katlı bina için A ve B noktalarının dőy yer değiştirmeleri sırasıyla, -0.00427 m, -0.00810 m ve -0.01254 m olmuştur.

5 metre derinliğinde tünel varken 5 katlı, 10 katlı ve 15 katlı bina yapılması durumunda tünel içi ray üstü noktaları olan A ve B’de oluşan dőy yer değiştirmeler sırasıyla -0.00742 m, -0.01744 m ve -0.02775 m olarak sınırlı kalmıştır. A ve B noktalarında oluşan değerler sistemin simetrik oluşundan dolayı çakışmaktadır. Dőy yer

değişikliklerin ölçüldüğü A, B eğrilerinin eğimleri 15 metre tünel örtü kalınlığına sahip model için 0 ile 5 kat bina yapımı arasında -0.00218 m/gün olmuştur. 5 kat ile 10 katlı bina yapımı arasında -0.00175 m/gün olmuştur. 10 kat ile 15 katlı bina yapım süreleri arasında -0.00157 m/gün olup azalan eğimli bir hale doğru değiştiği görülmüştür. 10 metre örtü kalınlığı için bu eğrinin eğimi 0-5 katlı bina yapımı, 5-10 katlı bina yapımı ve 10-15 katlı bina yapımı süresi arasında -0.00405, -0.00383, -0.00417 m/gün şeklinde değişmektedir.

Düşey deformasyon eğrilerinin eğimleri 10 metre ve 15 metre örtü kalınlıkları için 10. Katın yapına kadar olan sürede azalırken, 10.katın yapımından sonra arttığı elde edilmiştir. 5 metre örtü kalınlığı için bu eğrinin eğimi 0-5 katlı bina yapımı, 5-10 katlı bina yapımı ve 10-15 katlı bina yapımı arasında 0.00729, -0.00984, -0.01016 m/gün olup artan eğimli bir hale doğru değiştiği görülmüştür. Eğimin birimi metre / gün olmaktadır. Eğim bize günlük çökme oranını vermektedir.

2.Nolu hesap sonucunda model yer değişiklikleri bu şekilde oluşurken az ayrılmış grovak zemin için ray üstü deformasyon değerleri proje süresine göre Şekil 5.48'de verildiği gibi bulunmuştur.



**Şekil 5.48:** Az ayrılmış grovak zeminde A ve B ray üstü noktalarında oluşan düşey yer değişiklikleri.

N5915 A ve N6149 B noktalarında mutlak deęerce en dūşük yer deęiřtirmeler oluřurken, N4739 A ve N4902 B noktalarında mutlak deęerce en bŸyŸk dūřey yer deęiřtirmeler oluřmuřtur.

15 metre derinlikte A1 kesitli TBM tŸneli mevcut olma durumunda 5 katlı bina yapımı sonucunda A ve B noktalarında oluşan dūřey deformasyon -0.00193 m, 10 katlı bina yapımı sonucunda -0.00334 m ve 15 katlı bina için -0.00462 m ile sınırlı kalmıştır.

10 metre derinlikte A1 kesitli tŸnel var iken yapılan 5 katlı bina, 10 katlı bina ve 15 katlı bina için A ve B noktalarının dūřey yer değiştirmeleri sırasıyla, -0.00380 m, -0.00687 m ve -0.01002 m olmuştur.

5 metre derinliğinde tŸnel varken 5 katlı, 10 katlı ve 15 katlı bina yapılması durumunda tŸnel içi ray ŸstŸ deformasyon noktaları olan A ve B noktalarında oluşan dūřey yer değiştirmeler sırasıyla -0.00823 m, -0.01586 m ve -0.02383 m olarak sınırlı kalmıştır.

A ve B noktalarında oluşan değerler sistemin simetrik oluşundan dolayı çakışmaktadır. Dūřey yer değiştirmelerin ŸlŸldŸęŸ A, B eğrilerinin eğimleri 15 metre tŸnel ŸrtŸ kalınlığına sahip model için 0 ile 5 kat bina yapımı arasında -0.001772 m/gŸn olmuştur. 5 kat ile 10 katlı bina yapımı arasında -0.00140 m/gŸn olmuştur. 10 kat ile 15 katlı bina yapım sŸreleri arasında -0.00128 m/gŸn olup daha az eğimli bir hale doğru değiştiği gŸrŸlmŸřtŸr. 10 metre ŸrtŸ kalınlığı için bu eğrinin eğimi 0-5 katlı bina yapımı, 5-10 katlı bina yapımı ve 10-15 katlı bina yapımı arasında -0.00358, -0.00307, -0.00313 m/gŸn şeklinde değişmektedir. 5 metre ŸrtŸ kalınlığı için bu eğrinin eğimi 0-5 katlı bina yapımı, 5-10 katlı bina yapımı ve 10-15 katlı bina yapımı arasında -0.00800, -0.00727, -0.00769 m/gŸn şeklinde değişmektedir. Eęimin birimi metre/gŸn olmaktadır. Eęim gŸnlŸk Ÿkme oranını vermektedir. Burada 10 metre ve 5 metre ŸrtŸ kalınlıkları için 10. katın yapımına kadar olan sŸrede eęim Ÿkme oranı azalırken 10. katın yapımından sonra arttığı elde edilmiştir. şekil 4.47 ve şekil 4.48'de 5 ve 7.5 gŸnleri arasında yukarı yŸnlŸ yer değiştirmelerin olduğu gŸrŸlmektedir. Bu gŸnler arasında tŸnel kaplamasının yapılması olan 4. aşama gerçekleşmektedir. Bu aşamadan sonra yer değiştirmeler sıfırlanmıştır. ŸnkŸ kaplama yapılması ardından rayların dŸzeltildięi varsayılmaktadır. Elde ettiğimiz hesap sonucu dūřey yer değiştirmeleri tŸnel ŸrtŸ kalınlığına bağlı olarak ifade edersek. Grovak parçalı kil zemin için ŸrtŸ kalınlığı 5 m iken dūřey deformasyon -0.02775 m elde edilen nokta (5, -0.02775), ŸrtŸ kalınlığı 10 m iken dūřey deformasyon -0.01254 m elde edilen nokta (10, -0.01254), ŸrtŸ kalınlığı 15 m iken dūřey deformasyon -0.00570 m elde edilen nokta (15,

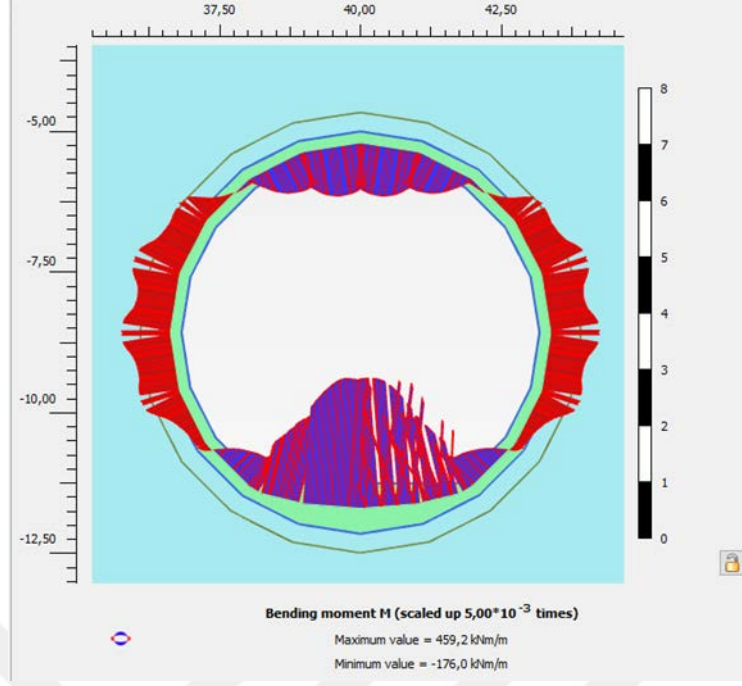
-0.00570) olmaktadır. Bu noktalar kullanarak örtü kalınlığı ile tünel içinde meydana gelecek düşey deformasyon arasında 5.3’de verilen bağıntı elde edilir. Burada D örtü kalınlığının 5 metre ile 15 metre arasında aldığı değerler için 15 katlı yapının grovak parçalı kil zeminde oluşturduğu  $u_y$  ray üstü düşey yer değiştirmeleri bağıntısı elde edilmiştir.

$$u_y = -1.674 \times 10^{-4} D^2 + 5.53 \times 10^{-3} D - 5.133 \times 10^{-2} \quad (5.3)$$

Az ayrıışmış grovak zeminde yapılan hesap sonucu elde ettiğimiz örtü kalınlığı 5 m iken düşey deformasyon -0.02383 m elde edilen nokta (5, -0.02383), örtü kalınlığı 10 m iken düşey deformasyon -0.01002 m elde edilen nokta (10, -0.01002), örtü kalınlığı 15 m iken düşey deformasyon -0.00462 m elde edilen nokta (15, -0.00462) olmaktadır. Bu noktalar kullanarak örtü kalınlığı ile tünel içinde meydana gelecek düşey deformasyon arasında 5.4’de verilen bağıntı elde edilir.

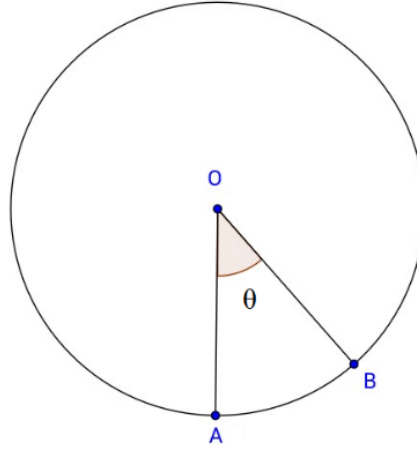
$$u_y = -1.682 \times 10^{-4} D^2 + 5.285 \times 10^{-3} D - 4.605 \times 10^{-2} \quad (5.3)$$

Bu aşamaların sonucunda maksimum düşey yer değiştirmeler temel altı bölgesinde meydana gelirken tünelde oluşan ovalleşme durumu gözlenmektedir. Burada tünelin ovalleştiği ve tünel kesitinde düşeyde çökme olduğu söylenebilir. Hesapların sonucunda grovak parçalı kil zeminde ve az ayrıışmış grovak zeminde kesit tesirleri elde edilmiştir. Şekil 5.49’da Plaxis programından elde edilmiş grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığının 5 metre olması durumu 7. Aşamada tünel kesitinin moment gösterimi verilmiştir. Maksimum moment 459.2 kNm/m, minimum moment ise -176 kNm/m olarak elde edilmiştir. Değerlerin şekle aktarılmasında dairesel tünel kesitini tarayan açının saat yönünün tersine doğru artarak başlangıç noktasına kadar 360<sup>0</sup> lik açıyı taradığını ve her  $\theta$  açısına denk gelen B noktasındaki kesit tesiri değerinin eğriye işlenerek kesit tesiri şekilleri oluşturulmuştur. Şekillerde kullanılan değerler plaxis programında oluşturulan 1 nolu ve 2 nolu hesaplardaki modellerin her örtü kalınlığı için 5., 6. ve 7. aşamaların sonundaki değerler kaydedilerek oluşturulmuştur. Fakat bu değerlerin maksimum ve minimum olduğu her hesabın 7. Aşamasında belirlendiğinden. 1 nolu ve 2 nolu hesabın 7. Aşamalarındaki değerlerden elde edilen şekillere yer verilmiştir.



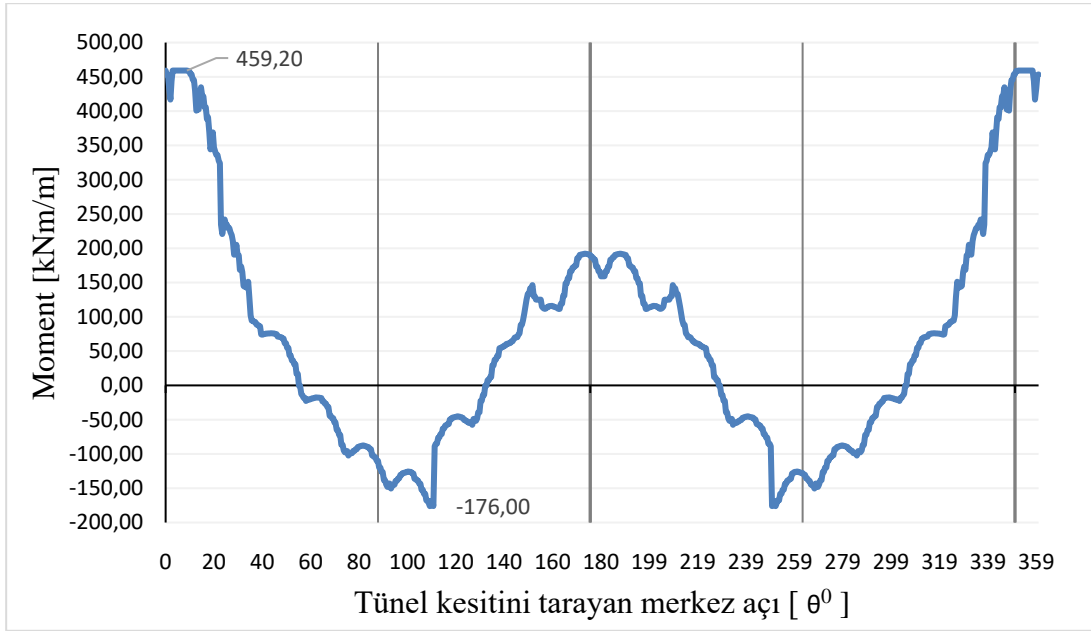
**Şekil 5.49:** Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri.

Şekillerde tesir diyagramları kesiti tarayan  $\theta$  açısının  $0$ 'da A noktasından yay kolunun gördüğü her B noktası için eğri olarak verilmiştir. Şekil 5.50'da  $\theta$  açısının gösterimi verilmiştir. Tünelin en alt noktası ( $\theta = 0$ ) A başlangıç noktasıdır.



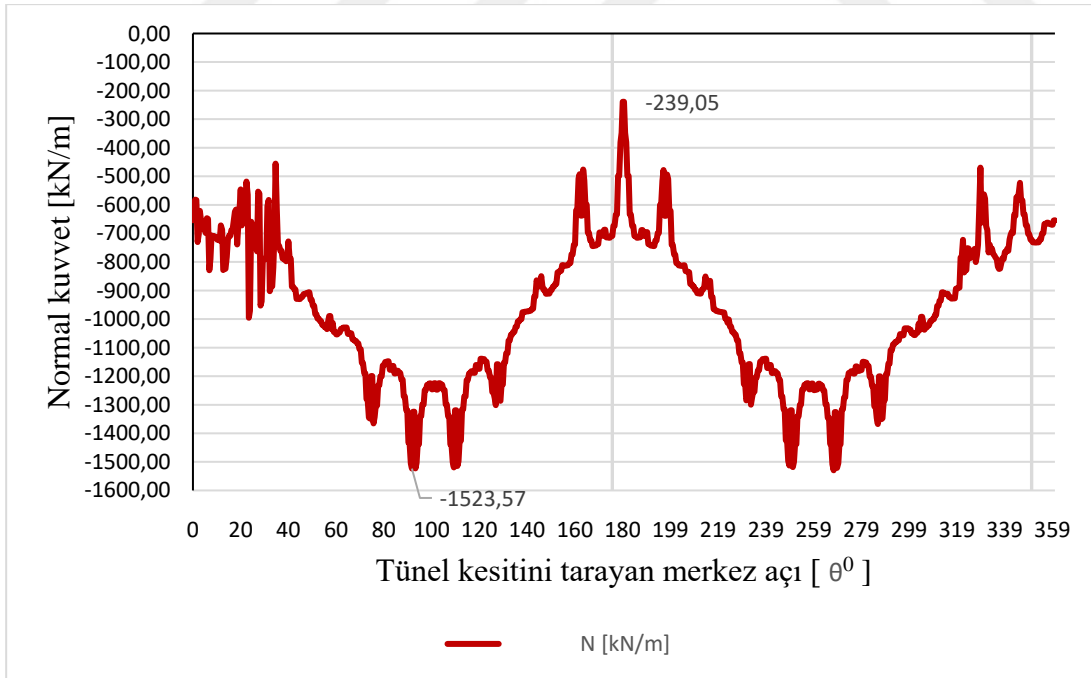
**Şekil 5.50:** Tünel kesitini tarayan  $\theta$  açısının gösterimi.

Grovak parçalı kil zeminde tünel örtü kalınlığı 5 metre iken 15 katlı binanın yapılması sonucu kesitlerde ortaya çıkacak moment Şekil 5.51'da verilmiştir.



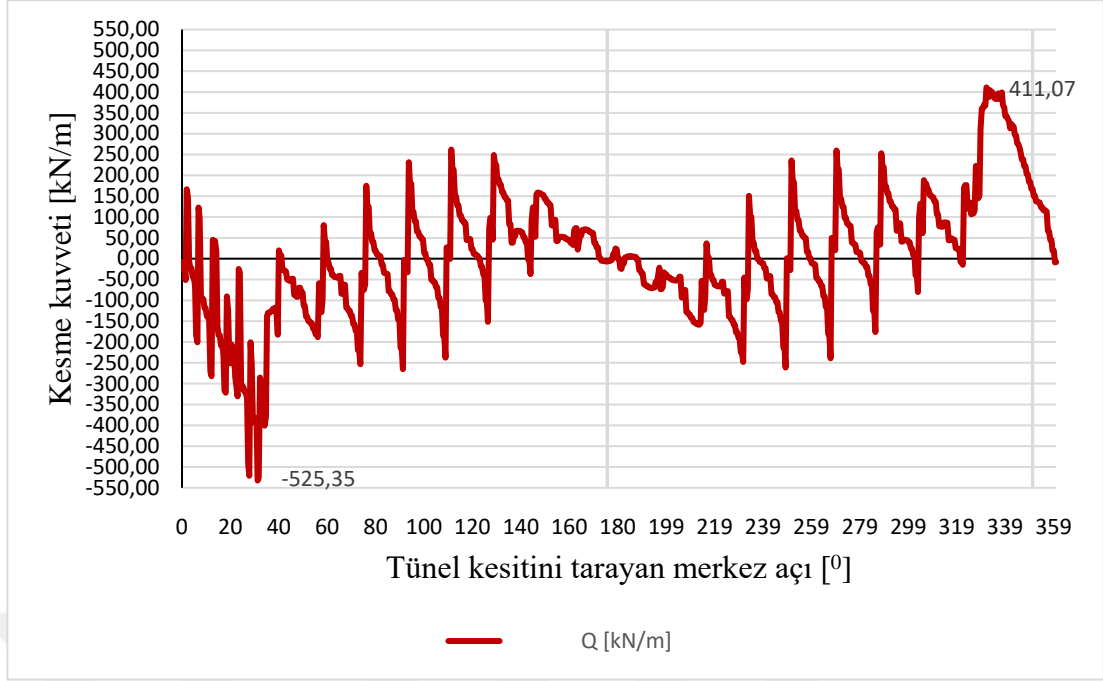
**Şekil 5.51:** Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri.

1 nolu hesap sonucu örtü kalınlığının 5 metre olması durumunda tünel kesitinde elde edilen normal kuvvet değerleri Şekil 5.52’de, kesme kuvveti değerleri Şekil 5.53’de verilmiştir.



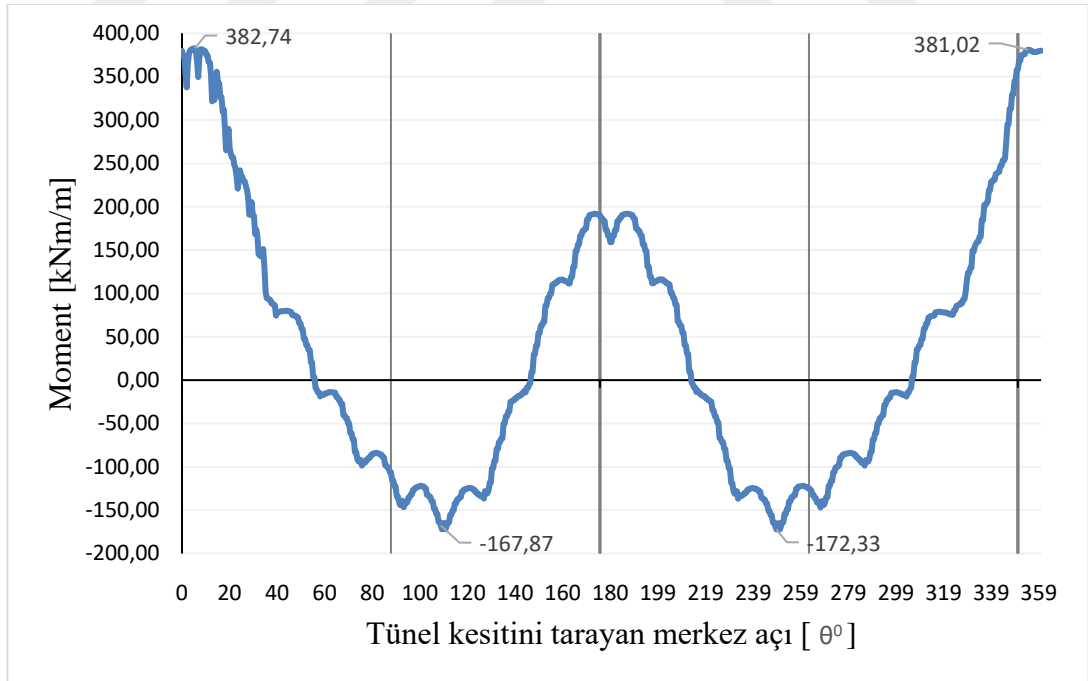
**Şekil 5.52:** Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan normal kuvvet değerleri.





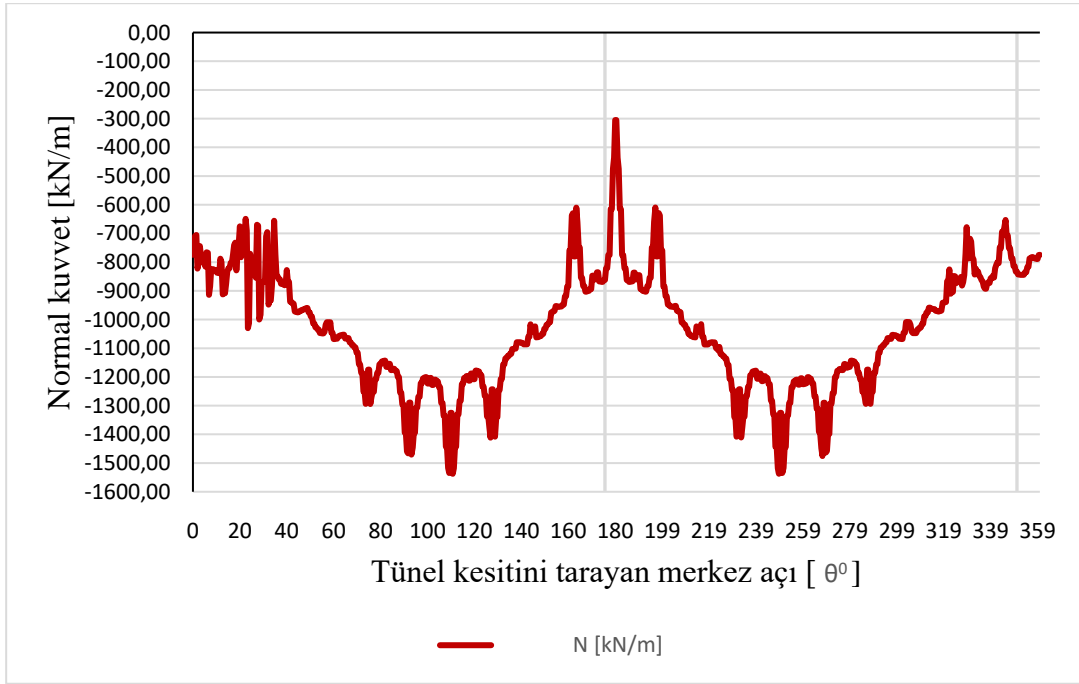
**Şekil 5.53:** Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan kesme kuvveti değerleri.

Grovak parçalı kil zeminde tünel örtü kalınlığı 10 metre iken 15 katlı binanın yapılması sonucu kesitlerde ortaya çıkacak moment Şekil 5.54’de verilmiştir.

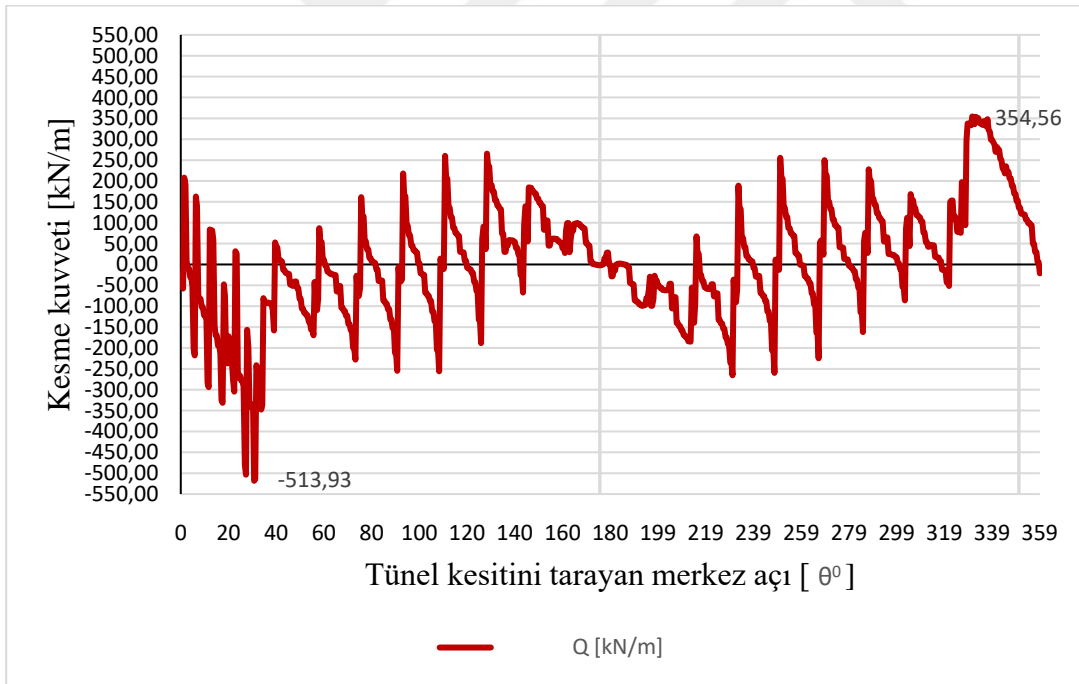


**Şekil 5.54:** Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri.

Örtü kalınlığı 10 metre iken 15 katlı binanın yapılması sonucu kesitlerdeki normal kuvvet ve kesme kuvvet değerleri Şekil 5.55 ve Şekil 5.56’da verilmiştir.

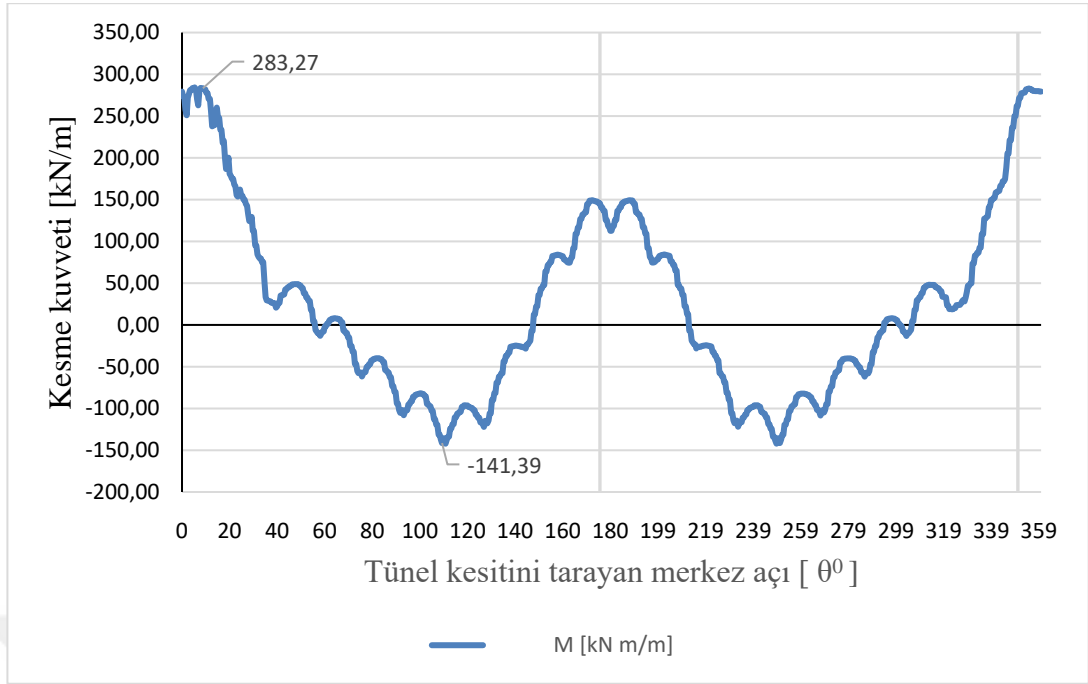


**Şekil 5.55:** Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan normal kuvvet değerleri.



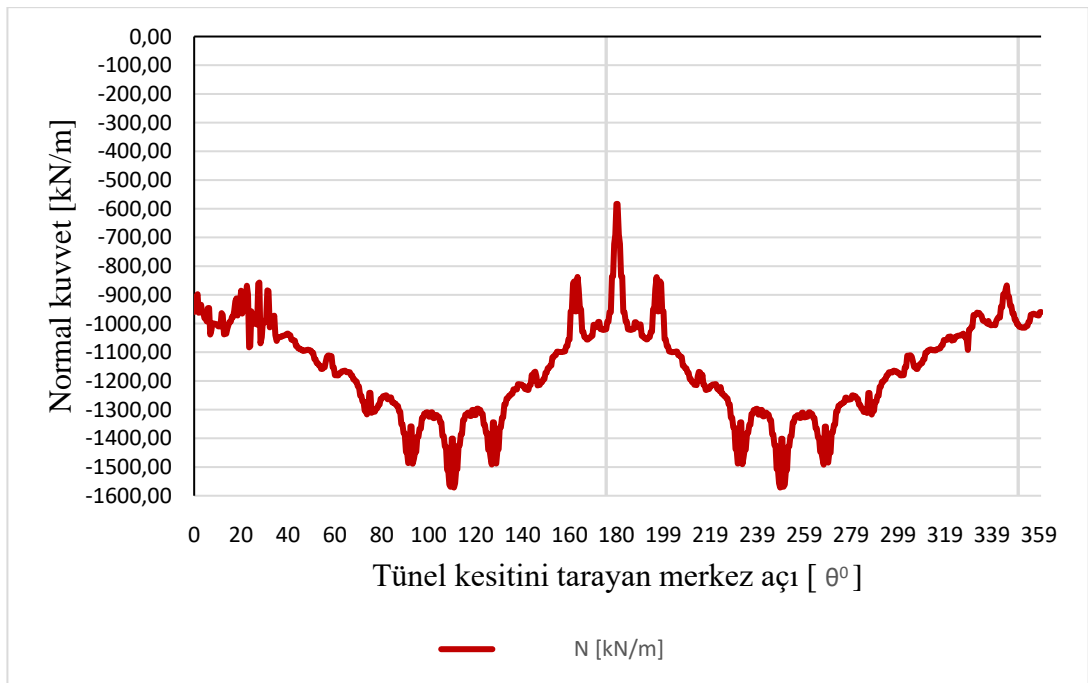
**Şekil 5.56:** Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan kesme kuvveti değerleri.

Grovak parçalı kil zeminde tünel örtü kalınlığı 15 metre iken 15 katlı binanın yapılması sonucu kesitlerde ortaya çıkacak moment değerleri Şekil 5.57’de verilmiştir.

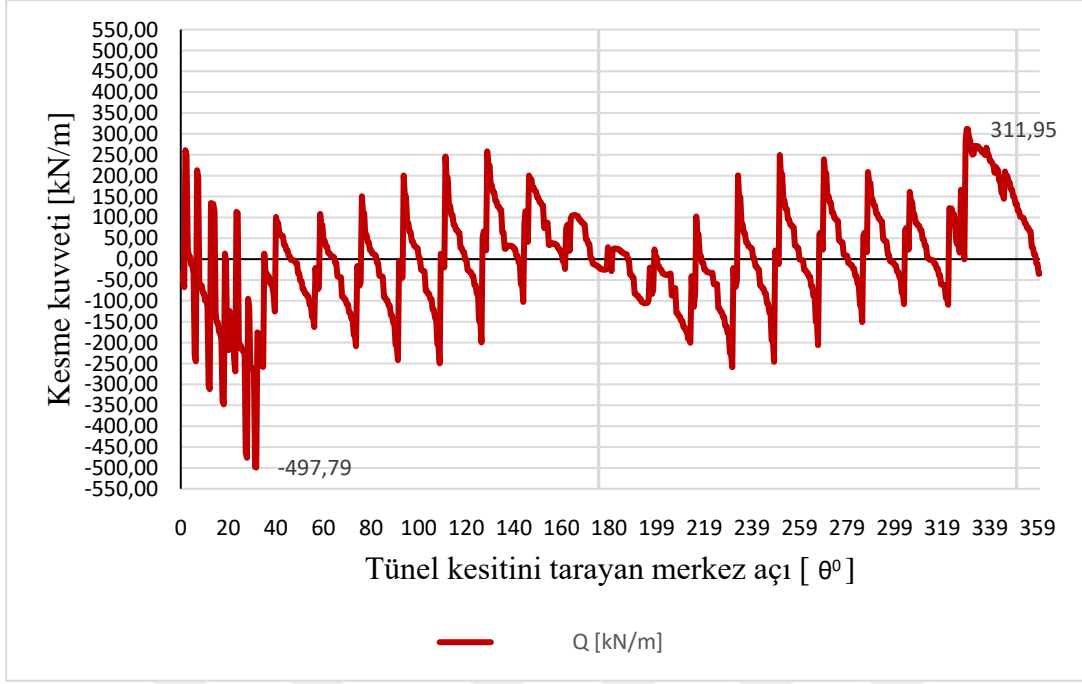


Şekil 5.57: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri.

1 nolu hesapta örtü kalınlığı 15 metre iken 15 katlı binanın yapılması sonucu kesitlerde ortaya çıkacak normal kuvvet ve kesme kuvvet değerleri Şekil 5.58 ve Şekil 5.59'da verilmiştir.

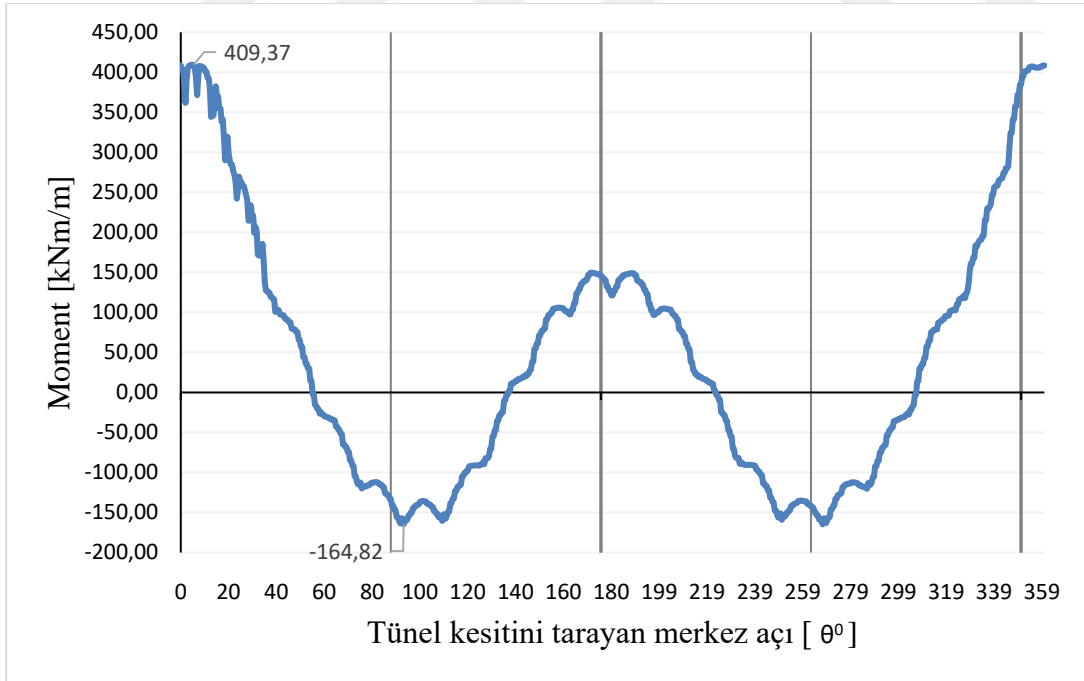


Şekil 5.58: Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan normal kuvvet değerleri.



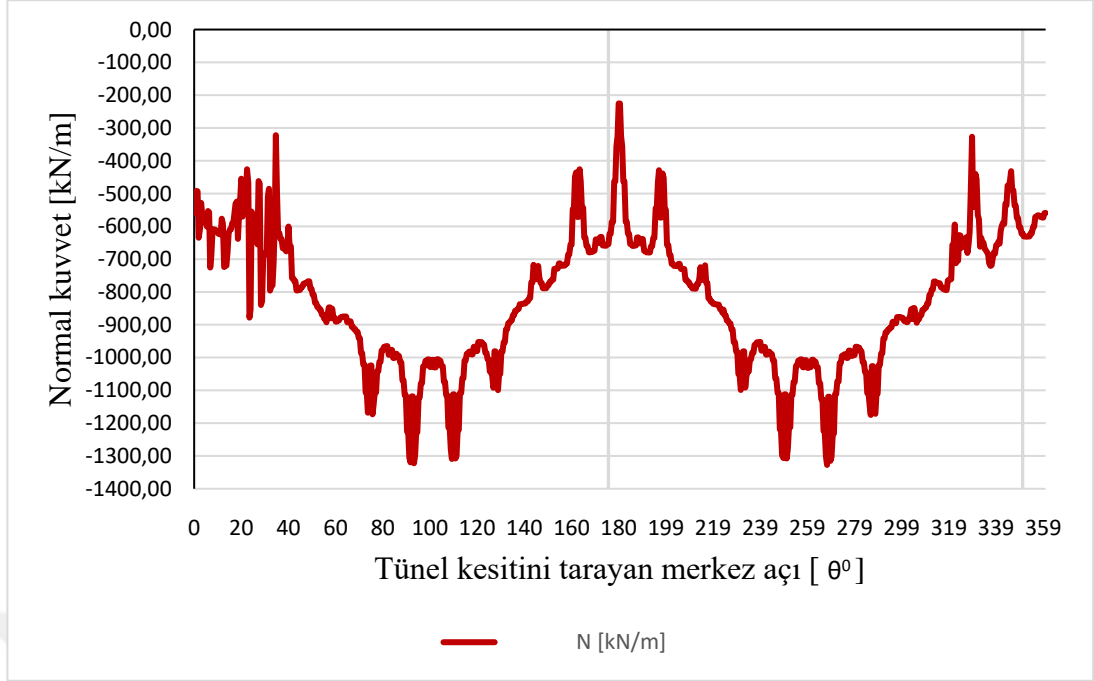
**Şekil 5.59:** Grovak parçalı kil zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan kesme kuvveti değerleri.

Az ayrılmış grovak zeminde tünel örtü kalınlığı 5 metre iken 15 katlı binanın yapılması sonucu kesitlerde ortaya çıkacak moment değerleri Şekil 5.60'da verilmiştir.



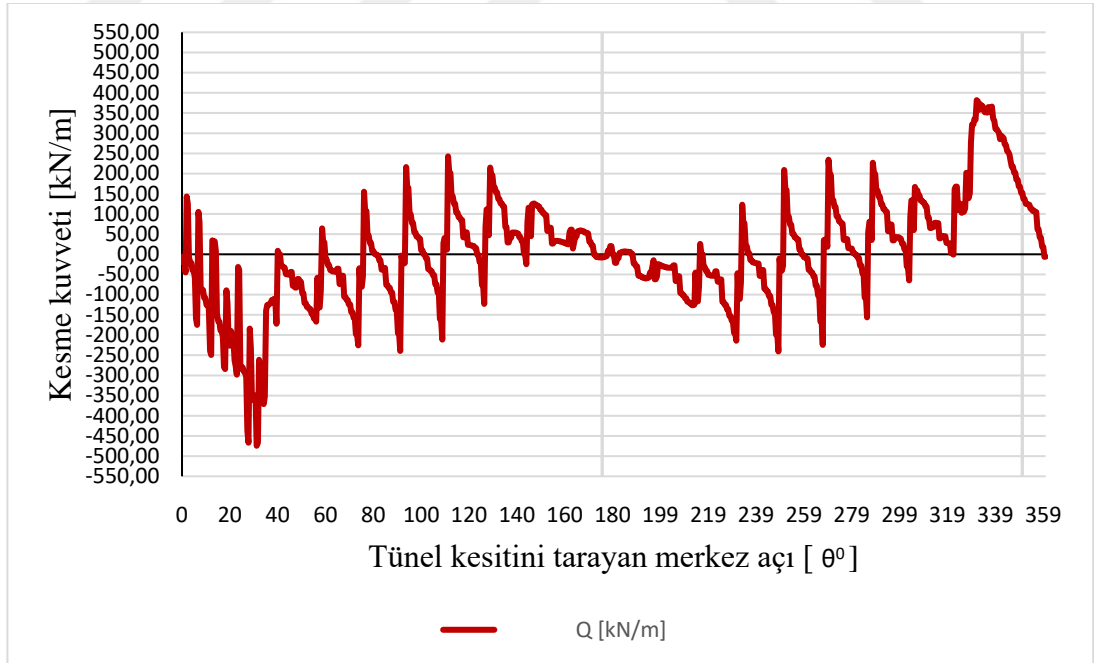
**Şekil 5.60:** Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri.

2 nolu hesapta örtü kalınlığı 5 metre iken 15 katlı binanın yapılması sonucu kesitlerde ortaya çıkacak normal kuvvet değerleri Şekil 5.61'de verilmiştir.



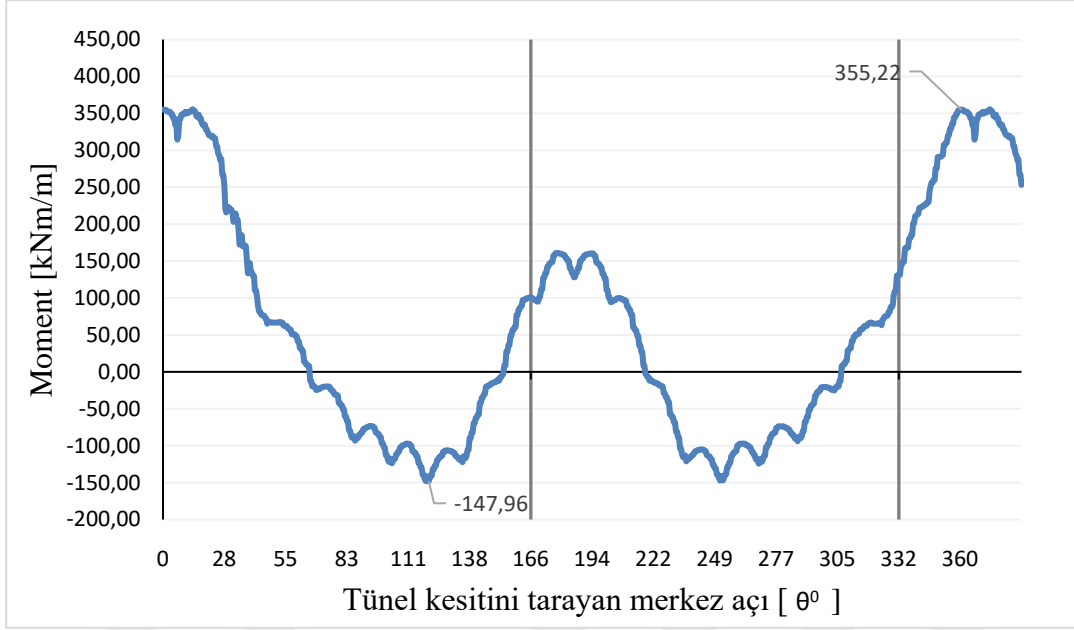
**Şekil 5.61:** Az ayrışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan normal kuvvet değerleri.

2 nolu hesapta örtü kalınlığı 5 metre iken 15 katlı binanın yapılması sonucu kesitlerdeki kesme kuvvetleri Şekil 5.62’de verilmiştir.



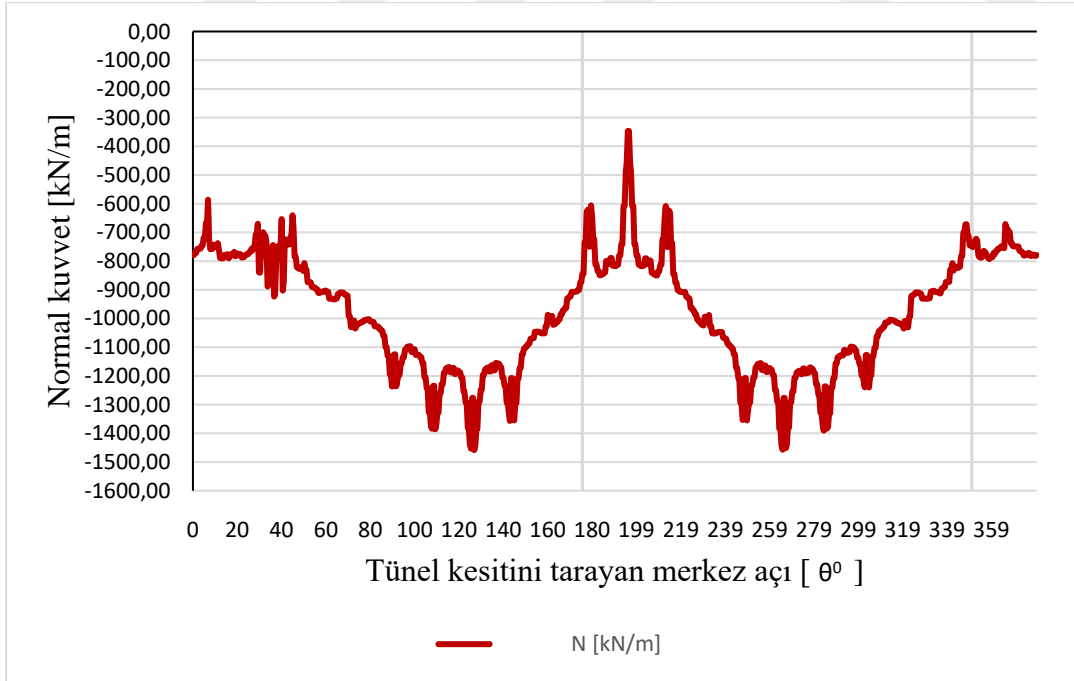
**Şekil 5.62:** Az ayrışmış grovak zeminde örtü kalınlığı 5 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan kesme kuvveti değerleri.

2 nolu hesapta örtü kalınlığı 10 metre iken 15 katlı binanın yapılması sonucu tünel kesitlerindeki moment değerleri Şekil 5.63’te verilmiştir.

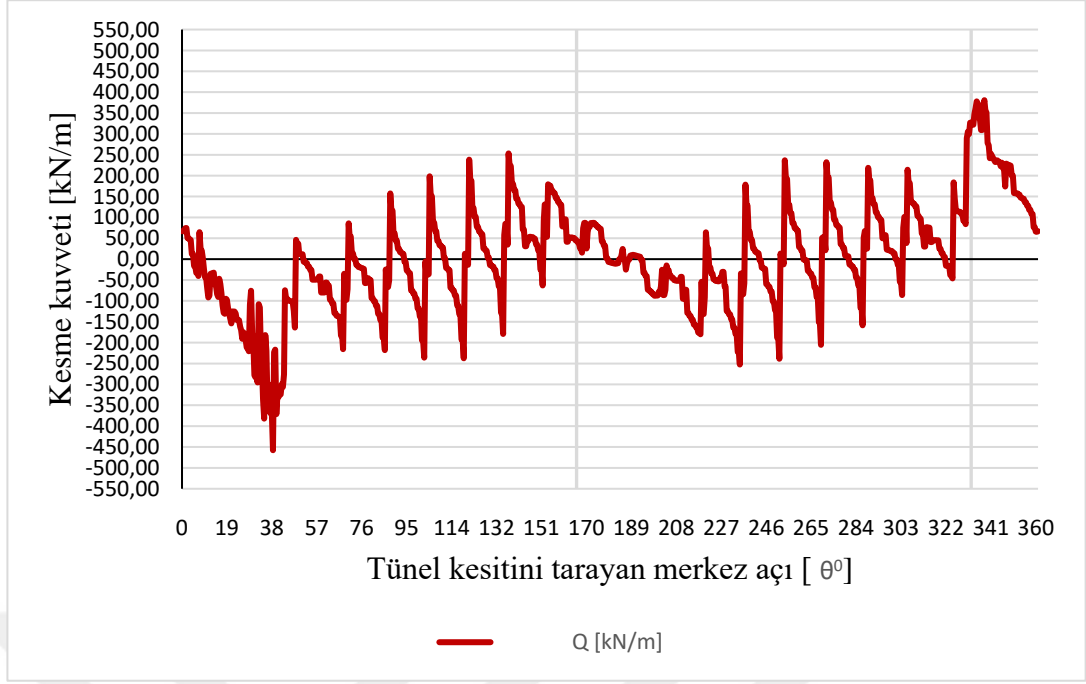


**Şekil 5.63:** Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri.

2 nolu hesapta örtü kalınlığı 10 metre iken 15 katlı binanın yapılması sonucu tünel kesitlerindeki normal kuvvet değerleri Şekil 5.64'te verilmiştir. Bu hesapta elde edilen kesme kuvvetleri Şekil 5.65'te verilmiştir.

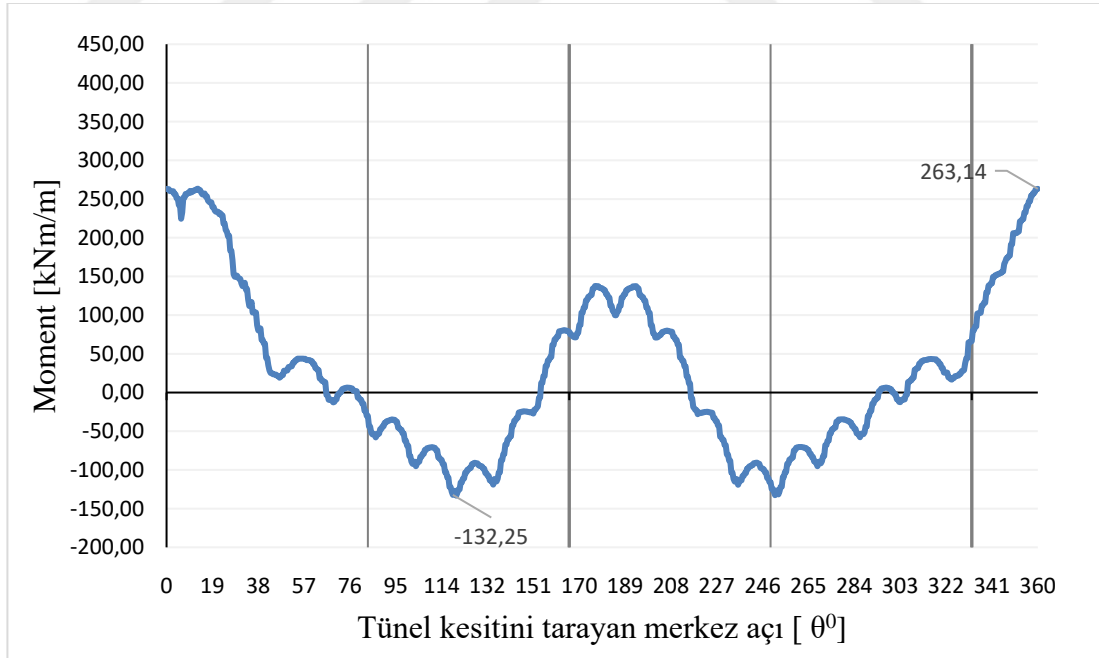


**Şekil 5.64:** Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan normal kuvvet değerleri.



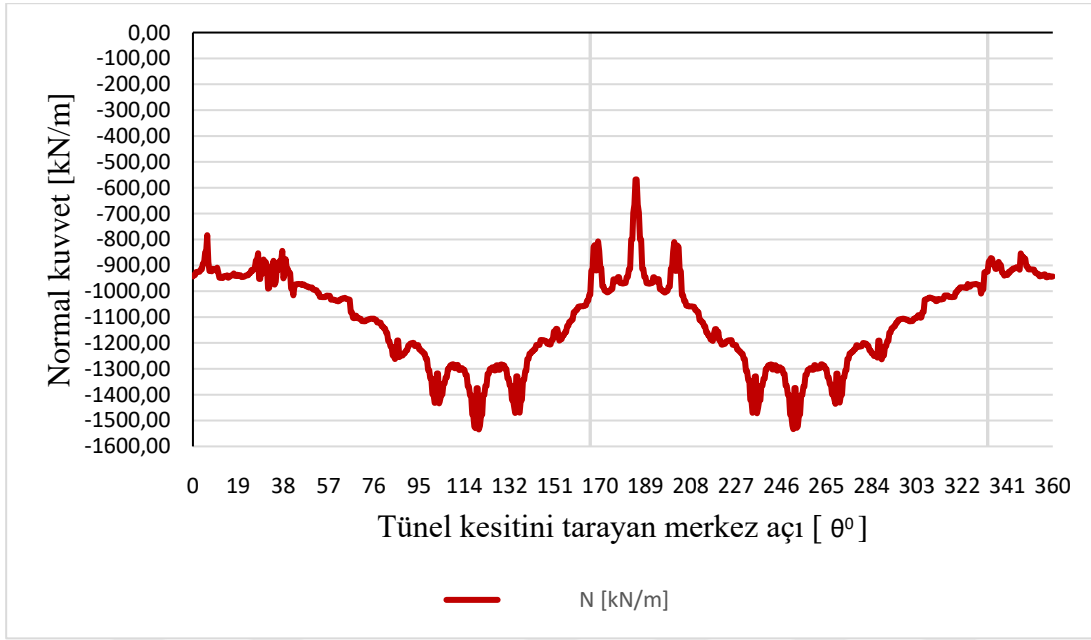
**Şekil 5.65:** Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 10 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan kesme kuvveti değerleri.

2 nolu hesapta örtü kalınlığı 15 metre iken 15 katlı binanın yapılması sonucu tünel kesitlerindeki moment değerleri Şekil 5.66'da verilmiştir.

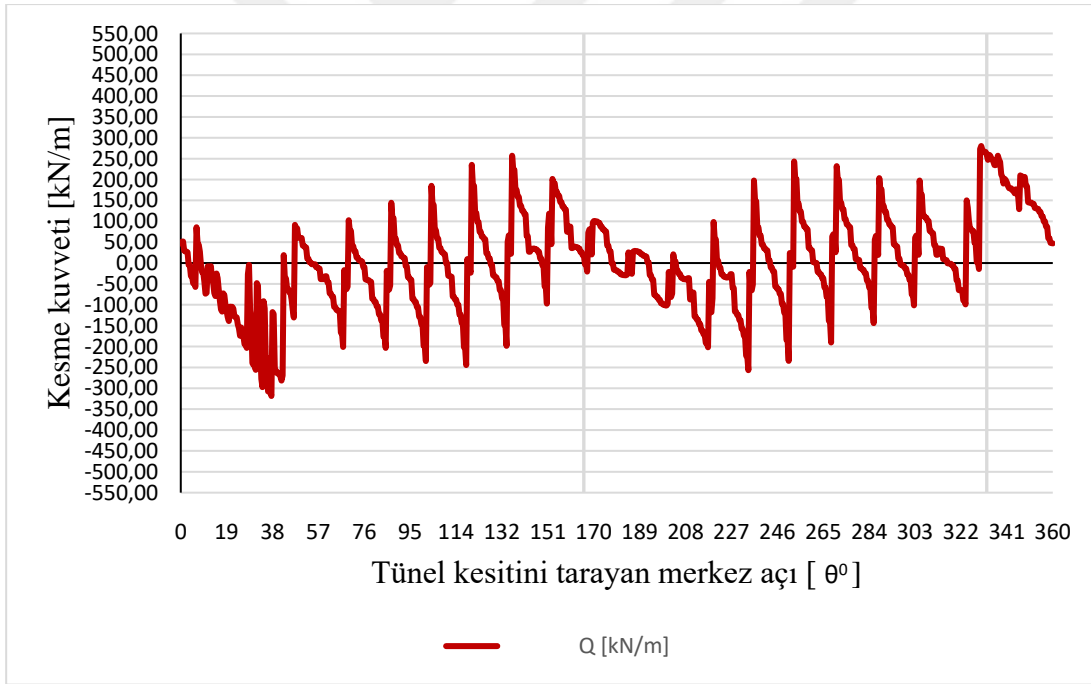


**Şekil 5.66:** Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan moment değerleri.

Bu hesap sonucu oluşan tünel kesitlerindeki normal kuvvet değerleri Şekil 5.67'de ve kesme kuvveti değerleri Şekil 5.68'de verilmiştir.



**Şekil 5.67:** Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan normal kuvvet değerleri.



**Şekil 5.68:** Az ayrılmış grovak zeminde örtü kalınlığı 15 metre iken 7. aşama sonucu tünel kesitinde oluşan kesme kuvveti değerleri.

Hesap sonucunda elde edilen eğrilerin tünel kesitinin çok parçalı olarak modellenmesinden ötürü birleşim noktalarında farklı kuvvet aktarımları olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler ile maksimum ve minimum kesit değerlerinin 1 nolu hesapta örtü kalınlığının 5 metre olması durumu 7. aşamasında elde edildiği görülmüştür.



## 6. SONUÇLAR

Günümüzde şehirlerin genişlemesiyle, yapılaşma artmaktadır. Artan yapılaşma sonucu geniş metro ağları ile ulaşım sorunlarının çözülmesine çalışılırken, su getirme yapıları barajlar ve altyapılar gibi birçok alanda tüneller yapılmaktadır. Yapılan tünellerin yaygınlaşması üst yapılaşmanın genişlemesiyle yapı-zemin-tünel etkileşimini meydana getirmektedir. Tünellerin yapım yöntemleri, tünel kaplamalarının hesaplanması, tünellerde meydana gelen hasarlar bu etkileşimde önemli bir rol oynamaktadır.

- Çalışmada tünel açma yöntemleri incelenmiştir. Zeminin davranış biçimiyle, kazı yöntemleri arasında, yöntemin maliyetler ve süre üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Makine ile kazı yapılmasının güç olduğu oluşacak zemin ayrışması sonucunda kazma işleminin yapılmasını güçleşebileceği değerlendirilerek kaya tip zeminlerde del-patlat yöntemi, kazı hacminin düşük olduğu sığ tünellerde aç kapa yöntemi, çoklu katmanlardan oluşmayan uzun tünellerin açılmasında mekanize tünel açma yöntemleri önerilmiştir.

- Tünel kaplaması üzerine etkileyen yüklerin karşılanması ve kaplamanın hesabı için kullanılan tasarım yöntemleri incelenmiştir. Buna göre önerilen yöntemlerin geçerli ve doğru olabilmesi için tünel güzergâhının çok iyi etüt edilmesinin önemi görülmektedir. Kaplama sisteminin maruz kalacağı tüm yükleme koşulları detayla ele alınmalıdır. Tünel güzergâhı üzerinde bulunan faylar, boşluklar, kazı güzergâhının değişmesine neden olabilmektedir. Hesap yöntemlerinde tünel kaplamasının hesabına etki eden faktörlerin fazlalığı sebebiyle, daha gerçeğe yakın modelleme imkânı sunan sonlu elemanlar yönteminin uygulanması önerilmektedir. Özellikle zeminin iyi bilinmesiyle, etkileri en iyi yansıtacak zemin modelinin kullanılmasıyla doğru sonuçlar elde edilir.

- Yapım aşamasında ve sonrasında tünel kaplamasında meydana gelen hasarların neler olabileceği incelenmiştir. Meydana getiren etkenler incelenmiştir. Zemin düzensizlikleri nedeniyle, deprem sonucunda meydana gelen hasarlar örneklendirilmiştir. Hasarlar kaplama üzerinde oluşan çatlaklar, kırıklar, beton

boşlukları gibi meydana gelme nedenlerine göre ve zemine bağlı olarak portallarda şev göçmesi, ters jeoloji ve sıvılaşma nedeniyle meydana gelebilecek hasarlar, taşıma sırasında oluşan hasarlar, kazı sırasında oluşan hasarlar şeklinde gruplandırılmıştır.

- Zeminden kaynaklanan, tespit edilmesi güç düzensizlikler nedeniyle kazı süresince zemin iyileştirmesi ve enjeksiyon yapılması gerektiği sonuçlardan biridir. Wenchuan depremindeki hasarlanma mekanizmalarının incelenmesi sonucunda deprem bölgelerinde meydana gelecek yer hareketlerinden tünelde ağır hasarları oluşturan nedenler incelenmiştir. Tünelin hasar mekanizmalarından etkilenmesinin en aza indirilmesi için şev stabilitesine, jeolojik değişimlere, sıvılaşmaya özel olarak yaklaşılmalıdır. Fay hatları gibi, deprem kuvvetlerinin yoğun olması muhtemel bölgelerde dayanımı yüksek kesitler, elastikliği arttıracak kaplama detaylarının tasarımı önerilmiştir. Bolu tüneline uygulanan uygulama incelenerek tünel güzergâhı fay üzerinden geçiyor ise burada elastik birleşimlerin teşkil edilmesi önerilmektedir. Tünel kesiti çok parçalı ise birleşimlerde bulonlu birleşim yöntemlerinin yerine elastik deprem derzi uygulanması gerektiği gözlemlenmiştir. Bu birleşimlerin detaylandırılması için bir öneri sunulmamıştır. Kaplama hasarının yapım sürecinde oluşabileceği belirtilmiştir. Özellikle mekanize kazı yöntemlerinde halka pozisyonuna bağlı olarak çatlakların oluştuğu belirlenmiştir. Çatlakların azaltılması amacıyla tünel kaplamasının yüzeyinin güçlendirilmesi için fiber kullanımı önerilebilir. TBM ile kazılan tünellerde meydana gelebilecek farklı yüklenme hasarlarının önlenmesi için halka parçalarının kazı yönünde ön yüze ek donatılar konularak sağlamlaştırılması gerekir. Tünel hasarlarının giderilmesi için sırasıyla zemin stabil değil ise zemin sağlamlaştırma yöntemlerinin, su varsa suyun durdurulmasının daha sonra onarımların yapılması gerektiği anlaşılmaktadır. Onarım yöntemleri hasarın tipine ve konumuna göre kullanılacak yöntemler tablo şeklinde önerilmiştir. Hasarların onarılmasında hasar tiplerine uygun olarak kendi yerleşen onarım harçları, sürülebilir onarım harçları, çift bileşenli epoksi macun, polimer katkılı beton, enjeksiyon ile kimyasal birleşen malzemelerin uygulanması yöntemleri önerilmiştir.

Çimentolu harç enjeksiyonunun tünel kaplamasının taşıma kapasitesine katkı sağladığı gibi bu bölgele oluşabilecek sıvılaşma etkisinde azaltır, homojen yük dağılımını sağlar. Fakat sıkışabilen enjeksiyon karışımları zeminden aktarılan farklı yüklerin daha düzgün dağılmasını sağlayarak meydana gelebilecek hasarları önemli ölçüde azaltır. Ayrıca harç boşlukları doldurarak zemin içerisinde su taşınmasını da

önleyecektir. Tünel destek yapısının tasarımında yapım aşamaları iyi irdelenerek doğru eleman detaylarının teşkili meydana gelecek hasarları önemli ölçüde azaltır ayrıca dolgu enjeksiyonu yapılması için enjektör yerleştirilecek bölgelerde uygun detaylandırma yapılması önerilir. Tünel destek yapısının delinmesi betonarme yapıya zarar verecektir fakat önceden bırakılması daha sağlıklı olacaktır. TBM tünellerinde prekast yapıların fabrika ortamında yapılıyor olması tasarımda detay teşkil edilmesine daha fazla imkân sağlamaktadır. Bu durum diğer yöntemlere göre bir avantaj olarak kabul edilebilir. Hangi yöntem uygulanırsa uygulansın zemin içerisinde aşırı su olan bölgelerde geçirimsizliğin sağlanması, kazı için uygun ortamın oluşturulması gerekecektir. Bu amaçla enjeksiyon uygulaması yapılmalıdır.

İncelemeler sonucunda tünel yapısına etki eden yüklerin koşullara bağlı olarak değişebileceğini söyleyebiliriz. Su seviyesinin değişmesi dahi etkili yükleri değiştir, deprem etkisi ile mekanizmalar meydana gelebilir. Bu nedenle tünellerde sürekli suretle izleme ve denetimlerin yapılması herhangi bir hasar oluşması durumunda kayıt tutulması ve hasarlara müdahale edilmesi gereklidir. Yapım esnasında da tasarımcının yapım sürecinde tünelden elde edilecek bilgileri değerlendirerek tasarım parametrelerine gerekli müdahalelerde bulunması gerekebilir.

Hesapta grovak parçalı kil zeminde ve az ayrılmış grovak zeminde 6 adet farklı model ile yapı-tünel etkileşimi incelenmiştir. Her modelde 7 aşamaya yer verilmiştir. Tünel-yapı etkileşimi için 5 katlı, 10 katlı ve 15 katlı bina yapımı 3 farklı aşamayla her modelde değerlendirilmiştir. Bu inceleme sonucunda tünel kaplama kesitlerinde meydana gelen kesit tesirlerinin maksimum ve minimum değerleri 1 nolu hesapta tünel örtü kalınlığının 5 metre olması durumunda en kritik değerleri vermiştir.

- Moment değeri 1 nolu grovak parçalı kil zeminde yapılan hesapta tünel örtü kalınlığının 5 metre olması durumunda 459.2 kN/m/m maksimum  $\theta$  açısının  $0^0$  değerinde, -176 kN/m/m minimum moment ise  $\theta$  açısının  $120^0$  ve  $240^0$  değerinde oluşmaktadır. Diğer modellerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde maksimum ve minimum moment değerlerinin, kesitlerde meydana geldiği yerlerin sabit olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu sonuca göre en yüksek değerler kaplama tabanında oluşmaktadır. En büyük moment değeri tabanda oluşmaktadır. Longxhi tünelineki durumda tabanda kalkma oluşması buradaki davranış hakkında fikir vermektedir.

- Normal kuvvet için maksimum değer 1 nolu grovak parçalı kil zeminde yapılan hesapta tünel örtü kalınlığının 5 metre olması durumunda -1523,57 kN/m ile  $\theta$  açısının

90<sup>0</sup> ve 270<sup>0</sup> değerinde meydana gelmektedir. Kesme kuvvetinin maksimum 280.38 kN/m, 330<sup>0</sup>'de ve minimum değeri -318.49 kN/m 40<sup>0</sup>'de meydana gelmektedir. Tüm sonuçlar bize tünel tepe noktasında normal kuvvetin en düşük değer aldığını göstermektedir. Kesit tesir Şekilleri tüm modellerde benzer Şekilde yerleşim göstermektedir.

- Tabanda tünel içi araç geçişlerinin sağlanması için teşkil edilen kesit birleşim noktalarında en büyük kesme kuvvetleri meydana gelmektedir. Bu noktalar  $\theta$  açısının 30<sup>0</sup> ve 330<sup>0</sup> 'yi gördüğü kesitlerdir. Elde edilen en büyük kesme kuvveti değerleri sırasıyla -525.35 kN/m ve 411 kN/m olmaktadır.

- Hesaplarda seçilen metro tüneli için ray üstü deformasyon noktaları olan A ve B noktalarından elde edilen düşey deformasyon değerleri de kesit tesiri sonuçlarına benzer olarak en kritik değerleri grovak parçalı kil zeminde, 5 metre örtü kalınlığı için vermiştir. Kritik durumda 5 katlı, 10 katlı ve 15 katlı bina yapılması için sırasıyla düşey deformasyon değerleri -0.00742 m, -0.01744 m ve -0.02775 m olarak elde edilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde zeminin kötüleşmesi ve yapı ile tünel arasındaki mesafenin azalmasıyla tünelde meydana gelecek kesit tesirleri ve düşey yer değiştirme artarak tüneli etkilemektedir. Ray st düşey yer değiştirmealarının ulaşıım güvenliğini nispeten az etkileyeceği durumlar Tünel genişliği  $B = 7.15$  m değerinin 2.1 katından itibaren elde edileceği sonucuna ulaşılmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Ak, E. (2005). *Tünel Tasarımında Sonlu Eleman Metodu İle Gerilme Ve Deformasyon Analizleri - Destek Tasarımı* (Yüksek lisans tezi) Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [2] Aktaş, S. Ş. (2009). *Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi İle İnşa Edilen Bir Tünelin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Analizi Ve Değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi) Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] Alemdağ, S., Kaya, A., Karadağ, M., Gürocak, Z., & Bulut, F. (2013). Utilization of limit equilibrium method for the stability analysis of debris: an example of the Kalebasi District (Gumushane). *Cumhur Earth Sci J*, 30(2), 49-62.
- [4] Arıoğlu, E., Yılmaz, A. O. (2006). *Yeraltı Mühendislik Yapılarına Depremin Etkileri*, İstanbul: TMMOB Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi.
- [5] Arıoğlu, E., Yılmaz, A. O. (2000). *Çözümlü Problemlerle Tünel/Galerilerin – Sismik Analizi*, İstanbul: TMMOB Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi.
- [6] Arıoğlu, B., Gökçe, H. B., Malcıoğlu, F. S., Arıoğlu, E. (2016), TBM Tunnel under the Bosphorus for the Istanbul Strait Road Crossing Project *Geomechanics and Tunnelling* 9 No. 4 pp. 303-309
- [7] Bamford, W.E. (1987). Cuttability and drillability of rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 24/1, February, 22-25.
- [8] Barton N., Lien R., Lunde J. (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech Journal* 6: 189–236.
- [9] Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- [10] Çınar, A. (2010). *Trakya Formasyonunda Yapılan Öngermeli Ankrajlı Derin Kazıların Sonlu Elemanlar İle Modellenmesi* (Yüksek lisans tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Deere, D. U., & Miller, R. P. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*. Illinois University at Urbana Department of Civil Engineering.
- [12] Feridunoğlu, O. C. (2009). *Kayaç kazılabilirliğinin tayini için taşınabilir kayaç kesme deney aletinin geliştirilmesi* (Doktora tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul

- [13] **Focaracci, A.** (1998). Analysis of Cracking in Tunnel Lining Segments. *WebSitenin Adı*. prometeoengineering 11, 2016, <http://prometeoengineering.it>
- [14] **Grimstad, E., & Barton, N.** (1993). Updating the Q-system for NMT. In *Proc. int. symp. on sprayed concrete-modern use of wet mix sprayed concrete for underground support* (pp. 46-66).
- [15] **Hoek, E.** (1999). Support for very weak rock associated with faults and shear zones. In *Rock support and reinforcement practice in mining*. (Villaescusa, E., Windsor, C.R. and Thompson, A.G. eds.). Rotterdam: Balkema. 19-32.
- [16] **Hoek, E., & Marinos, P.** (2007). A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. *Soils and rocks*, 2, 1-8
- [17] **ITA Working Group on General Approaches to the Design of Tunnels** (1988). Guidelines for the Design of Tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 3, No. 3. pp. 237-249. Great Britain
- [18] **Karaoğlan, H.** (2002). *Kaya Zeminde Tünel Tasarımı* (Yüksek lisans tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] **Karayolları Genel Müdürlüğü.** (2016). Retrieved November 21, 2016, from <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionImages/KGMImages/Haritalar/tunneller>.
- [20] **Kaşıkcı, B.** (2014). *Metro Tünelleri – Üst Yapı Etkileşimleri* (Yüksek lisans tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] **Güldağlı, O.** (2015). *Yeraltı Yapılarının Tasarımı ve Sismik Analizi* (Doktora tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- [22] **Pitilakis, K. & Tsinidis, G.** (2013). Performance and seismic design of underground structures, *Researchgate Chapter December 2013*, doi: 10.1007/978-3-319-03182-8\_11.
- [23] **Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., & Swolfs, W. M.** (2014). Plaxis 2014. *PLAXIS bv, The Netherlands*.
- [24] **Power, M.S., Rosidi, D., Kaneshiro, J.** (1996). Vol. III Strawman: screening, evaluation, and retrofit design of tunnels. Report Draft. National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
- [25] **Sinha, R. S.** (1991). *Underground Structures: Design and Construction*, Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo: Elsevier.
- [26] **Tosun, H.** (1991), Tünel tasarımında sonlu eleman metodunun kullanımı. *Su mühendisliğinde bilgisayar uygulamaları semineri bildiriler kitabı*, (s.1-28). Şanlıurfa, 7-11 Ekim.
- [27] **U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration** (2009). *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements* (Rapor No: FHWA-NHI-10-034). New York: National Highway Institute.
- [28] **YTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü Tünel Dersi, Arıoğlu, E.** (2015). *Bölüm 6' Tünellerin Sismik Tasarımına Giriş* [PDF slides]. Retrieved from

[http://www.yildiz.edu.tr/~sahin/tuneller/YTU%20Ders%206\\_Tunellerin\\_Sismik\\_Tasarimina\\_Giris.pdf](http://www.yildiz.edu.tr/~sahin/tuneller/YTU%20Ders%206_Tunellerin_Sismik_Tasarimina_Giris.pdf)

- [29] **Wang, J.-N.** (1993) *Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach*, Monograph, monograph 7, Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc, New York
- [30] **Wang, Z. Z., Zhang, Z.** (2012). Seismic damage classification and risk assesment of mountain tunnel with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 45 (2013) 45–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.11.002>.
- [31] **Zghondi, J., Carraretto, S., Noiret, A., & Armand, G.** (2015). Monitoring and Behavior of an Instrumented Concrete Lining Segment of a TBM Excavation Experiment at the Meuse Haute-Marne Underground Research Laboratory (France). In *CONCREEP 10* (pp. 1430-1439).







## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Onur Efe HEPBOSTANCI

**Doğum Tarihi ve Yeri** : 01/01/1988, Patnos

**E-posta** : onurefes@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği.
- **Yüksek lisans** : İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, Deprem Mühendisliği.

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2010-2011 yılları arasında Namık Kemal Üniversitesi Çorlu'da Araştırma Görevlisi olarak çalıştı.
- 2011-2016 Yılları arasında Özel sektörde Kalite Mühendisi olarak çalıştı.