

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KİL ZEMİNDE TBM YÖNTEMİYLE İNŞA EDİLEN TÜNELLERDE
ÇİMENTO STABİLİZASYONUNUN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Ayşe Gül ÇELİK

EKİM 2021
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KİL ZEMİNDE TBM YÖNTEMİYLE İNŞA EDİLEN TÜNELLERDE
ÇİMENTO STABİLİZASYONUNUN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

İnş. Müh. Ayşe Gül ÇELİK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01/09/2021
Tezin Savunma Tarihi : 20/10/2021**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca danışmanlığımı yapan, değerli bilgilerini ve tecrübelerini benimle paylaşarak bana yol gösteren, ilgisiyle, anlayışıyla daima bana destek olan çok kıymetli ve saygıdeğer hocam Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım süresince bugünlere gelmemde emeği geçen, bilgi ve birikimleri ile hayatıma dokunan, yol gösteren, destek olan bütün hocalarımı saygıyla anar, kendilerine çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca yardımlarını benden esirgemeyen, bilgi birikimlerini ve tecrübelerini benimle paylaşan Sayın Arş. Gör. Muhammet SARI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimimiz süresinde fikir alışverişinde bulunduğum kıymetli arkadaşım Oğulcan ŞAHİN'e; aynı zamanda iyi günümde ve kötü günümde yanımda olan çok değerli arkadaşlarım Fatih ESER, Rabia KARABIÇAK, Merve ÖZCAN ve ismini söyleyemediğim birçok arkadaşşıma teşekkür eder, minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Hayatım boyunca gerek eğitimim gerekse mesleğim adına atmış olduğum her adımda daima yanımda olan, desteklerini bir an olsun benden esirgemeyen, sevgilerini her an hissettiğim başta babam Hasan ÇELİK'e, annem Fatime ÇELİK'e ve kardeşlerime minnettar olduğumu belirtir, hazırlanan bu çalışmanın yeni çalışmalara ve Ülkemize yararlı olmasını temenni ederim.

Ayşe Gül ÇELİK
Trabzon, 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kil Zeminde TBM Yöntemiyle İnşa Edilen Tünellerde Çimento Stabilizasyonunun Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuvarı yaptığımı, analizleri ilgili programda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 20/10/2021

Ayşe Gül ÇELİK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tünel Tanımı ve Tünellerde Kullanılan Terimler.....	2
1.3. Tünellerin Tarihçesi ve Kullanım Amaçları	2
1.4. Tünellerin Sınıflandırılması	3
1.5. Tünellerin İnşa Edilmesi Sırasında Karşılaşılan Sorunlar	5
1.6. Tünel İnşa Yöntemleri	6
1.6.1. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi	6
1.6.1.1. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi Temel İlkeleri	7
1.6.1.2. NATM Yöntemine Göre Kaya Sınıfları	10
1.6.1.2.1. A Tipli Kaya Sınıfları	10
1.6.1.2.1.1. A1 Tipli Kaya Sınıfı.....	10
1.6.1.2.1.2. A2 Tipli Kaya Sınıfı.....	10
1.6.1.2.2. B Tipli Kaya Sınıfları.....	11
1.6.1.2.2.1. B1 Tipli Kaya Sınıfı.....	11
1.6.1.2.2.2. B2 Tipli Kaya Sınıfı.....	12
1.6.1.2.2.3. B3 Tipli Kaya Sınıfı.....	13
1.6.1.2.3. C Tipli Kaya Sınıfları.....	14
1.6.1.2.3.1. C1 Tipli Kaya Sınıfı.....	14
1.6.1.2.3.2. C2 Tipli Kaya Sınıfı.....	15
1.6.1.2.3.3. C3 Tipli Kaya Sınıfı.....	16
1.6.1.2.3.4. C4 Tipli Kaya Sınıfı.....	16
1.6.1.2.3.5. C5 Tipli Kaya Sınıfı.....	17

1.6.2.	TBM Genel Özellikleri	17
1.7.	Zeminlere Göre Tünel İnşası	19
1.7.1.	Kaya Zeminlerde Kazı Yöntemleri ve Tünel İnşası	19
1.7.2.	Yumuşak Zeminlerde Tünel İnşası	20
1.7.2.1.	Yumuşak Zeminlerde Destekleme Çalışmaları	21
1.8.	Tünellerde Kullanılan Kaplama Çeşitleri	22
1.8.1.	Dökme Beton Kaplama ile Oluşturulan Tüneller	23
1.8.2.	Püskürtme Beton Kaplama ile Oluşturulan Tüneller	23
1.8.3.	Prefabrike Kaplamalar ile Tünel İnşası.....	24
1.9.	Kaplamalara Etkiyen Yükler.....	24
1.9.1.	Zemin Yükleri.....	24
1.9.1.1.	Düşey Yüklerin Belirlenmesi.....	24
1.9.1.1.1.	Bierbaumer Teorisi	24
1.9.1.1.2.	Mailart Teorisi	26
1.9.1.1.3.	Eszto Teorisi	26
1.9.1.1.4.	Terzaghi Teorisi	28
1.9.1.1.5.	Balla Teorisi.....	33
1.9.1.1.6.	Suquet Teorisi	35
1.9.1.1.7.	Kommerell Teorisi	36
1.9.1.1.8.	Forchheimer Teorisi.....	37
1.9.1.1.9.	Ritter Teorisi	38
1.9.1.1.10.	Engesser Teorisi.....	39
1.9.1.1.11.	Protodyakonov Teorisi.....	40
1.9.1.2.	Yatay Yüklerin Belirlenmesi	41
1.9.1.3.	Tünel Yapılarında Taban Basınçları	42
1.9.1.4.	Tünel Yapılarında Yeraltı Suyunun Mevcut Olması Durumu	43
1.9.1.5.	Tünellerde Hareketli Yükler	43
1.10.	Kaplamaların Yapısal Çözümlemesinde Kullanılan Bazı Yöntemler	44
1.10.1.	Ampirik Yöntemler	44
1.10.1.1.	RSR Zemin Sınıflandırma Ölçütü.....	44
1.10.1.2.	RMR Zemin Sınıflandırma Ölçütü	46
1.10.1.3.	Q Zemin Sınıflandırma Ölçütü	47
1.10.2.	Analitik Yöntemler	49
1.10.2.1.	Kesiti Elemanlara Ayırma ile Çözümleme Yöntemi	49

1.10.2.1.1.	Tünel Tavan Kemerinin Yapısal Çözümlemesi.....	49
1.10.2.1.2.	Taban Kemerinin Yapısal Çözümlemesi	52
1.10.2.1.3.	Tünel Yan Duvarının Yapısal Çözümlemesi	54
1.10.2.2.	Kesiti Elemanlara Ayırmadan Çözümleme	58
1.10.2.2.1.	Düşey Yük Dikkate Alınarak Moment Dağılımının Hesaplanması	58
1.10.2.2.2.	Yatay Birim Yüke ($p_h=1$) Göre Moment Dağılımının Belirlenmesi.....	63
1.10.2.2.3.	Yatay Yer Değiştirmeler ve Yatay Yükün Belirlenmesi	66
1.10.2.3.	Birleşik Elemanlı Dairesel Kaplamaların Yapısal Çözümlemesi	68
1.11.	Tünel Tasarımı	77
1.12.	Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	78
1.13.	Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	79
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	93
2.1.	DeneySEL Çalışmalar	93
2.1.1.	Zeminin Fiziksel ve Kıvam Özelliklerinin Belirlenmesi	93
2.1.2.	Zeminin Konsolidasyonu	95
2.1.2.1.	Konsolidasyon Deneyi	95
2.1.3.	Kayma Direnci Parametrelerinin Belirlenmesi	97
2.1.3.1.	Üç Eksenli Basınç Deneyi	97
2.1.3.2.	Kesme Kutusu Deneyi	97
2.1.4.	Zeminlerde Stabilizasyon İşlemi.....	98
2.1.4.1.	Stabilizasyon İçin Numune Hazırlanması.....	99
2.2.	Nümerik Çalışmalar	102
2.2.1.	Kil Zeminde TBM ile Tünel Yapısının Modellenmesi.....	102
2.2.2.	Tünel Kaplamasının Etrafının Çimento ile Stabilizasyon Edilmesinin Ardından TBM ile Modelleme İşlemi.....	110
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER.....	114
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	137
5.	KAYNAKLAR	140
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KİL ZEMİNDE TBM YÖNTEMİYLE İNŞA EDİLEN TÜNELLERDE ÇİMENTO
STABİLİZASYONUNUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Ayşe Gül ÇELİK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU
2021, 144 Sayfa

Yeraltı yapılarından biri olan tünellerin tarihine bakıldığında, tünellerin insanların hayatında önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir. Geçmişten günümüze kadar insanlar çeşitli amaçlar doğrultusunda ihtiyaçlarını karşılayabilmek için tünelleri kullanmışlardır. Ülkemiz coğrafyası dikkate alındığında çok farklı zemin sınıfları ile karşılaşmak mümkündür. Bu nedenle tünel çalışmalarının öncesinde ve sonrasında gerekli incelemeler yapılmalıdır. Bu tez çalışması kapsamında hem deneysel çalışmalar hem de nümerik çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar ile zeminin fiziksel özellikleri, plastisite özellikleri ve konsolidasyonu belirlenmiştir. Zemine ait kayma direnci parametreleri de deneysel çalışmalar ile bulunmuştur. Deneysel çalışmalar ardından nümerik çalışmalar yapılmıştır. Nümerik çalışmalar sırasında tünel modeli oluşturulurken sonlu elemanlar yöntemi olan Plaxis 3D programı kullanılmıştır. Plaxis 3D programında kil zemin Hardening Soil Model olarak modellenmiştir. Bunun neden yapılacak modeli gerilme- şekil değiştirme davranışını gerçeğe en yakın şekilde oluşturmaktır. Modellemede tünel açılması sırasında TBM kullanılmıştır. Kil zeminde modelleme tamamlandıktan sonra tünel kaplaması etrafına farklı kalınlıklarda çimento ile stabilizasyon işlemi yapılmıştır. Tüm modelleme aşamaları bittikten sonra analizler yapılmıştır. Yapılan analizler ile birlikte meydana gelen yer değiştirmeler, asal gerilmeler ve kayma gerilmeleri belirlenmiştir. Tünel kaplaması etrafına farklı kalınlıklarda yapılan stabilizasyon çalışmaları ile kaplamanın etrafına stabilizasyon çalışması yapılmamış durum mukayese edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tünel, Kil Zemin, Stabilizasyon, Sonlu Elemanlar Yöntemi

Master Thesis

SUMMARY

FINITE ELEMENT METHOD ANALYSIS OF CEMENT STABILIZATION IN TUNNELS BUILT WITH THE TBM METHOD ON CLAY SOIL

Ayşe Gül ÇELİK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering, Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU
2021, 144 Pages

Looking at the history of tunnels, which is one of the underground structures, it is seen that tunnels have an important place in people's lives. From past to present, people have used tunnels to meet their needs for various purposes. Considering the geography of our country, it is possible to encounter many different soil classes. For this reason, necessary examinations should be made before and after tunnel works. Within the scope of this thesis, both experimental studies and numerical studies were carried out. The physical properties, plasticity properties and consolidation of the soil were determined by experimental studies. The slip resistance Parameters of the soil were also found by experimental studies. Numerical studies were carried out after the experimental studies. During the numerical studies, the Plaxis 3D program, which is a finite element method, was used while creating the tunnel model. Clay ground was modeled as Hardening Soil Model in Plaxis 3D program. The reason for this is to create the model of stress-strain behavior in the closest way to reality. TBM was used during tunneling in modelling. After the modelling was completed on the clay ground, the Stabilization process was performed Around the tunnel lining with different thickness of the cement. After all modeling stages were completed, analyzes were made. The displacements, principal stresses and shear stresses that occur with the analyzes are determined. Stabilization studies carried out in different thicknesses around the tunnel lining and the situation where no Stabilization study was carried out around the lining were compared.

Key Words: Tunnel, Clay Soil, Stabilization, Finite Elements Method

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Tünel yapısının elemanları	2
Şekil 1.2. Farklı şekillere sahip tünel enkesitleri.....	4
Şekil 1.3. Balla teorisi göz önüne alındığında zemin yükünün hesabı amacıyla dikkate alınan model	34
Şekil 1.4. Tünel tavan kısmına etki eden zemin basıncını sınırlayan parabol.....	36
Şekil 1.5. Tünel kaplama kısmına etki eden zemin yükünü sınırlayan parabol	40
Şekil 1.6. Tünel yapısının yan duvarlarına etki eden yükler	55
Şekil 1.7. Tünel kaplama kısmının kubbe çapı düzeyinde uygulanan $p_h=1$ yatay yüklemesi	63
Şekil 1.8. Dairesel kubbe çapı düzeyindeki $H=1$ birim yüklemesi	66
Şekil 1.9. Birleşik elemanlı daireli bir tünel kaplaması ve buna etki eden yükler	69
Şekil 2.1. Laboratuvarında kullanılan bazı deney aletleri	94
Şekil 2.2. Likit limit ve plastik limit deneyinde kullanılan aletler	95
Şekil 2.3. Konsolidasyon deneyi sırasında yapılan yüklemeler ve deformasyon saati.....	96
Şekil 2.4. Konsolidasyon deneyinden elde edilen gerilme- şekil değiştirme grafiği	96
Şekil 2.5. Üç eksenli deney sonucunda elde edilen gerilme- şekil değiştirme grafiği	97
Şekil 2.6. Kesme kutusu deneyinde kullanılan deney aletleri	98
Şekil 2.7. Numune hazırlama aşamaları	99
Şekil 2.8. Numunelerin hazırlandığı kalıplar	100
Şekil 2.9. Hazır hale getirilen numuneler	100
Şekil 2.10. Üç eksenli basınç sonucu çizilen gerilme-şekil değiştirme grafiği	101
Şekil 2.11. Plaxis 3D programında modelleme işlemi	102
Şekil 2.12. Plaxis 3D programında malzemelerin oluşturulması	104
Şekil 2.13. Tünel geometrisinin modellenmesi	104
Şekil 2.14. Plaxis 3D programında sonlu elemanlar ağı oluşturma	106
Şekil 2.15. Tünelin başlangıç aşaması.....	106
Şekil 2.16. Tünelde kullanılan TBM makinesinin başlangıç konumu	107
Şekil 2.17. TBM makinesinin başlangıç aşaması	107
Şekil 2.18. TBM makinesinin 1,5 metrelik ilerlemesi.....	108

Şekil 2.19.	TBM makinesinin 1,5 metrelik ilerlemesi-1	108
Şekil 2.20.	TBM ilerlemesi -2	109
Şekil 2.21.	TBM ilerlemesi -3	109
Şekil 2.22.	TBM ilerlemesi -4	110
Şekil 2.23.	Zemin iyileştirme sonrası oluşan sonlu elemanlar ağı	111
Şekil 2.24.	TBM konumu	111
Şekil 2.25.	TBM aşama-1	112
Şekil 2.26.	TBM aşama-2	112
Şekil 2.27.	TBM aşama-3	113
Şekil 2.28.	TBM aşama- 4	113
Şekil 3.1.	Kil zeminde oluşan toplam yer değiştirme	114
Şekil 3.2.	Zeminde oluşan toplam yer değiştirmeler	115
Şekil 3.3.	Kil zemindeki tüneldən alınan en kesit	115
Şekil 3.4.	Çimento ile stabilizasyon işleminin ardından alınan en kesit	116
Şekil 3.5.	Kil zemindeki tüneldən alınan boy kesit	116
Şekil 3.6.	Çimento ile stabilizasyon işleminin ardından alınan boy kesit	117
Şekil 3.7.	Stabilizasyon işleminden sonra zeminde oluşan toplam yer değiştirmeler	117
Şekil 3.8.	Stabilizasyon işleminden sonra zeminde oluşan toplam yer değiştirmeler	118
Şekil 3.9.	Stabilizasyon işleminden sonra zeminde oluşan toplam yer değiştirmeler	118
Şekil 3.10.	Stabilizasyon işleminden sonra zeminde oluşan toplam yer değiştirmeler	119
Şekil 3.11.	Stabilizasyon işleminden sonra zeminde oluşan toplam yer değiştirmeler	119
Şekil 3.12.	Zeminde meydana gelen toplam asal gerilmeler	120
Şekil 3.13.	Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen toplam asal gerilmeler	121
Şekil 3.14.	Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen toplam asal gerilmeler	121
Şekil 3.15.	Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen toplam asal gerilmeler	122
Şekil 3.16.	Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen toplam asal gerilmeler	122
Şekil 3.17.	Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen toplam asal gerilmeler	123
Şekil 3.18.	Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen toplam asal gerilmeler	123
Şekil 3.19.	Zeminde meydana gelen maksimum kayma gerilmesi	124
Şekil 3.20.	Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen maksimum kayma gerilmesi	124

Şekil 3.21.	Kil zemindeki tünelden alınan en kesit	125
Şekil 3.22.	Çimento ile stabilizasyon işleminin ardından alınan en kesit	125
Şekil 3.23.	Kil zemindeki tünelden alınan en kesit	126
Şekil 3.24.	Çimento ile stabilizasyon işleminin ardından alınan en kesit	126
Şekil 3.25.	Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen maksimum kayma gerilmesi	127
Şekil 3.26.	Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen maksimum kayma gerilmesi	128
Şekil 3.27.	Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen maksimum kayma gerilmesi	128
Şekil 3.28.	Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen maksimum kayma gerilmesi	129
Şekil 3.29.	Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen maksimum kayma gerilmesi	129
Şekil 3.30.	Tünel kaplamasında meydana gelen yer değiştirme	130
Şekil 3.31.	Stabilizasyon çalışmasının ardından tünel kaplamasındaki yer değiştirme	130
Şekil 3.32.	Stabilizasyon çalışmasının ardından tünel kaplamasındaki yer değiştirme	131
Şekil 3.33.	Stabilizasyon çalışmasının ardından tünel kaplamasındaki yer değiştirme	131
Şekil 3.34.	Stabilizasyon çalışmasının ardından tünel kaplamasındaki yer değiştirme	131
Şekil 3.35.	Stabilizasyon çalışmasının ardından tünel kaplamasındaki yer değiştirme	132
Şekil 3.36.	Stabilizasyon çalışmasının ardından tünel kaplamasındaki yer değiştirme	132
Şekil 3.37.	Tünel kaplamasındaki normal gerilme	133
Şekil 3.38.	Stabilizasyon çalışmasından sonra tünel kaplamasındaki normal gerilme	133
Şekil 3.39.	Stabilizasyon çalışmasından sonra tünel kaplamasındaki normal gerilme	134
Şekil 3.40.	Stabilizasyon çalışmasından sonra tünel kaplamasındaki normal gerilme	134
Şekil 3.41.	Stabilizasyon çalışmasından sonra tünel kaplamasındaki normal gerilme	135
Şekil 3.42.	Stabilizasyon çalışmasından sonra tünel kaplamasındaki normal gerilme	135
Şekil 3.43.	Stabilizasyon çalışmasından sonra tünel kaplamasındaki normal gerilme	136

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Farklı zeminler için etkili zemin yükseklikleri	29
Tablo 1.2. Farklı zemin ve tünel yarıçapına göre etkili zemin örtü kalınlığı	30
Tablo 1.3. Terzaghi'ye göre tünel tavanına etkiyen zemin yükseklikleri	31
Tablo 1.4. Farklı tünel yarıçapları için örtü zemini kalınlıkları (h).....	31
Tablo 1.5. Farklı zemin sınıflarına göre hesaplanan $\tan \phi / \beta$ değerleri.....	33
Tablo 1.6. Seçilen $\tan \phi / \beta$ değerleri ve H/R'nin değerlerine göre hesaplanan α değerleri.....	33
Tablo 1.7. İçsel sürtünme açısına bağlı F_H, F_B, F_C katsayıları.....	34
Tablo 1.8. Farklı zeminlere göre yaklaşık gevşeme katsayıları	37
Tablo 1.9. A parametresi	45
Tablo 1.10. B parametresi.....	45
Tablo 1.11. C parametresi.....	46
Tablo 1.12. RMR ölçütüne göre zemin sınıfları ve zemin sınıflarının yorumu	47
Tablo 1.13. Zeminin Q değerleri ve sınıfları	48
Tablo 1.14. Kazı tipine göre kazı destek oranı	49
Tablo 1.15. Kemer yüksekliğinin açıklığına oranına bağlı olarak kemerin çeşitli kesitlerindeki katsayıları	51
Tablo 1.16. Dış yüklerden kaynaklanan kesit etkileri dağılımı.....	71
Tablo 2.1. Deney sonuçlarına göre zeminin temel özellikleri	93
Tablo 2.2. Zemin numuneleri üzerinde yapılan deneylerin sonuçları	94
Tablo 2.3. Zeminin kayma direnci parametreleri	98
Tablo 2.4. Zemin parametreleri	101
Tablo 2.5. Zemin tabakasının genel bilgileri	103
Tablo 2.6. Modelleme sırasında kullanılan zemin parametreleri	103
Tablo 2.7. Kaplamada kullanılan betonun genel ve parametrik özellikleri.....	105
Tablo 2.8. Modelleme sırasında kullanılan TBM makinesinin genel özellikleri	105
Tablo 3.1. Analiz sonuçlarına göre zemindeki yer değiştirmeler ve gerilmeler.....	129

SEMBOLLER DİZİNİ

B	: Tünel üzerine etki eden düşey basıncın genişliği
b	: Tünel genişliği
c	: Zemin kohezyonu
E	: Elastisite modülü
E_{50}^{ref}	: Referans sekant rijitliği
E_{ur}^{ref}	: Boşaltma referans rijitliği
E_{oed}^{ref}	: Referans tanjant rijitliği
f	: Zemin sürtünme katsayısı
H	: Tünel üzerindeki zemin örtü kalınlığı
h	: Tünel üzerindeki etkili zemin örtü kalınlığı
R	: Tünel yarıçapı
t	: Kaplama kalınlığı
c_f	: Tünele ilişkin elastik merkezin anahtar kesitine uzaklığı
f_r	: Kayaç basınç dayanımı
f_l	: Kaplama dayanımı
G_k	: Tünel kemerinin ağırlığı
H_H	: Yatay yükten oluşan yatay kuvvet
H_T	: Toplam yatay kuvvet
H_V	: Düşey yükten oluşan yatay kuvvet
h_t	: Tünel yüksekliği
J_a	: Eklem ayrışma katsayısı
J_n	: Eklem takımı katsayısı
J_r	: Eklem pürüzlülük katsayısı
J_w	: Eklem suyu indirgeme katsayısı
K_a	: Aktif zemin yatay basınç katsayısı

k_s	: Zemin yatak katsayısı
K_θ	: Mafsal Rijitlikleri
M_H	: Yatay yükten oluşan moment
M_h^I	: Yatay yükleme için tünelin dairesel kubbe kısmında moment dağılımı
M_h^{II}	: Yatay yükleme için tünelin daire yayı şeklindeki duvarında oluşan moment
M_T	: Toplam moment
M_V	: Düşey yükten oluşan moment
M_V^I	: Düşey yükleme için tünelin dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı
M_V^{II}	: Yatay yükleme için tünelin daire yayı şeklindeki duvarında oluşan moment dağılımı
M_0^{VI}	: Düşey ($X=0$) yüklemesi için tünelin dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı
M_0^{VII}	: Düşey ($X=0$) yüklemesi için tünelin daire yayı şeklindeki duvarında oluşan moment dağılımı
M_0^{hI}	: Yatay ($X=0$) yüklemesi için tünelin dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı
M_0^{hII}	: Düşey ($X=0$) yüklemesi için tünelin daire yayı şeklindeki duvarında oluşan moment dağılımı
M_1	: $X_1=1$ yüklemesi için moment dağılımı
M_2	: $X_2=1$ yüklemesi için moment dağılımı
P_f	: Sürtünme kuvveti
k_s	: Zemin yatak katsayısı
K_θ	: Mafsal Rijitlikleri
M_H	: Yatay yükten oluşan moment
M_h^I	: Yatay yükleme için tünelin dairesel kubbe kısmında moment dağılımı
M_h^{II}	: Yatay yükleme için tünelin daire yayı şeklindeki duvarında oluşan moment
M_T	: Toplam moment

M_v	: Düşey yükten oluşan moment
M_v^I	: Düşey yükleme için tünelin dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı
M_v^{II}	: Yatay yükleme için tünelin daire yayı şeklindeki duvarında oluşan moment dağılımı
M_0^{vI}	: Düşey ($X=0$) yüklemesi için tünelin dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı
M_0^{vII}	: Düşey ($X=0$) yüklemesi için tünelin daire yayı şeklindeki duvarında oluşan moment dağılımı
M_0^{hI}	: Yatay ($X=0$) yüklemesi için tünelin dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı
M_0^{hII}	: Düşey ($X=0$) yüklemesi için tünelin daire yayı şeklindeki duvarında oluşan moment dağılımı
M_1	: $X_1=1$ yüklemesi için moment dağılımı
M_2	: $X_2=1$ yüklemesi için moment dağılımı
P_f	: Sürtünme kuvveti
P_g	: Gevşeyen zemin kütlelerinin ağırlığı
P_h	: Yatay zemin basıncı
P_h	: Yatay zemin itkisi
P_{ha}	: Aktif zemin yatay basınçlarının bileşkesi
P_{hp}	: Pasif zemin yatay basınçlarının bileşkesi
P_v	: Düşey zemin basıncı
P_v	: Düşey zemin basınçlarının bileşkesi
V_H	: Yatay yükten oluşan düşey kuvvet
V_T	: Toplam düşey kuvvet
V_v	: Düşey yükten oluşan düşey kuvvet
X_1, X_2	: Hiperstatik bilinmeyenler
α_M, α_H	: Düşey yükler altında tünel kaplamasında oluşan kesit etkilerine ilişkin katsayılar

β_M, β_H : Yatay yükler altında tünel kaplamasında oluşan kesit etkilerine ilişkin katsayılar

γ_c : Betonun birim ağırlığı

σ_{ro} : Zeminin dairesel kesitli tünele radyal doğrultuda uyguladığı basınç gerilmesi

Not: Simgeler dizisinde yer verilmeyen simgeler metnin içerisinde bulundukları kısımlarda tanımlanmıştır.



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

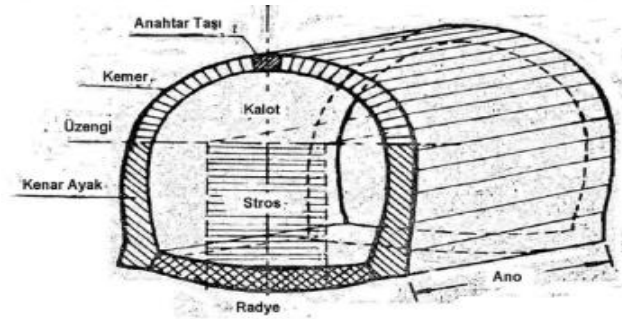
Tüneller hakkından geçmişten günümüze kadar bir inceleme yapıldığında, tünellerin insanların hayatında önemli bir yere sahip olduğu ve çeşitli amaçlar doğrultusunda insanlar tarafından sıkça kullanılan bir yapı olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda geçmişte tüneller insanların hayatlarını devam ettirebilmesi amacıyla barınak, tapınak olarak, savaş durumların da gelebilecek tehlikelere karşı sığınak olarak kullanılmış yapılardır. Zamanın ilerlemesiyle birlikte insanların ihtiyaçlarının artmasıyla da tüneller daha da önem kazanmıştır. Bu noktada çeşitli amaçlarla tüneller ortaya çıkmıştır. Bunlardan bazıları; karayolu, demiryolu, metro ve su yolu gibi ulaşım tünelleri; su iletim tünelleri, maden galerileri, kanalizasyon ve kamu hizmeti tünelleri örnek olarak verilebilir. Her geçen gün dünyadaki nüfus artmakta, şehirler hızla büyümekte ve teknoloji ilerlemektedir. Tüm bu gelişmeler karşında küreselleşen dünyamızda ve ülkemizde çeşitli sebeplerden dolayı her geçen gün köylerden kentlere, küçük şehirlerden büyük şehirlere yapılan göçler artmaktadır. Yapılan bu göçler sonucunda artan şehir nüfusları, şehirlerde çeşitli ihtiyaçları da hızla arttırmaktadır ve çözümlerinin de geçmiştekinden daha hızlı olması kaçınılmaz hale gelmektedir. Ayrıca ulaşım açısından zamandan tasarruf etme ve güvenli bir şekilde istenilen yere varma düşünceleri dikkate alındığında yine karayolları için tünellerin önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir.

Ülkemiz coğrafyası söz konusu olduğunda ise dağlık, engebeli ve dağların doğu-batı yönlü uzanış gösterdiği görülmektedir. Tüm bu şartlar dikkate alındığında kuzey-güney yönlü ulaşımı kolaylaştırarak dağları aşmak için tünel yapıları kullanılmaktadır ve her geçen gün tünel yapılarının önemi ülkemizde artmaktadır. Son yıllarda Türkiye’de yapılan çalışmalar göz önüne alındığında Ovit Dağı Tüneli ülkemiz için önemli bir yere sahiptir. Bunun yanında aynı zamanda ülkemizde boğaz, deniz gibi akarsuların altından yapılan çeşitli projeler ve metro yapıları ile birlikte karayollarında trafik yükü her geçen gün azaltılmaya çalışılmaktadır.

1.2. Tünel Tanımı ve Tünellerde Kullanılan Terimler

Artan trafik yükü ve araç sayısı ile doğru orantılı olarak insanların zamandan tasarruf ederek ulaşımı kolaylaştırmasında, suların iletilmesini sağlamada, madencilikte galeriler oluşturulmasında; elektrik, gaz, telefonların iletilmesinde kullanılan aynı zamanda oluşabilecek bir arıza durumunda arızanın bulunduğu noktaya ulaşımı kolaylaştırmak için inşa edilmiş tüm yapılara tünel adı verilir.

Tünelleri kısa özetlemek gerekirse çeşitli nedenlerden dolayı yerin altından yatay geçişi sağlayan, zeminin oyulması ile oluşturulan iki ucu açık yapılardır. Tünel inşası sırasında yapılan kazılar sonucunda çıkan malzemeye pasa, tünelin üzerinde yer alan zemine örtü ve zemin kalınlığına ise örtü kalınlığı denir. Tünel en kesiti dikkate alındığında tünelin üst kısmına tavan (kemer), alt kısmına taban (radye), yan kısımlarına ise ayak (duvar) adı verilir. Tünel kemerinin tünel ayakları ile birleştiği noktaya üzengi denilirken, üzengi noktaların birleştiren çizgiye ise üzengi çizgisi denilmektedir. Bu çizgi üzerinde kalan kısım kalot, bu çizgi altında kalan kısım ise strostur. Bir defa da açılan tünel uzunluğuna da ano adı verilmektedir (Osmanoğlu, 2007). Şekil 1.1’de tünel yapısı elemanları verilmiştir.



Şekil 1.1. Tünel yapısının elemanları (Bozkurt, 1997)

1.3. Tünellerin Tarihçesi ve Kullanım Amaçları

Geçmişte insanlar barınmak, korunmak, yiyeceklerini saklamak gibi çeşitli amaçlar doğrultusunda yeraltında tüneller inşa ederek yeraltı şehirleri oluşturmuşlardır. Geçmiş tarihimize bakıldığında ülkemizde Kapadokya, Kayseri, Kırşehir gibi çeşitli illerimizde yeraltı şehirlerine sıkça rastlanmaktadır. Ülkemiz sınırları içinde özellikle Kapadokya coğrafyasında inşa edilmiş olan yeraltı şehirleri aynı zamanda çıkan savaşlar esnasında

düşman ordularını şaşırtmak için kullanılmıştır. Türkler tarafından da sıkça kullanılan bu taktik zamanla geliştirilerek Osmanlı ordusunda “Lağımcılar” adı verilen sınıfın ortaya çıkmasında etkili olmuştur. İnsanlar kullandıkları bu mağara benzeri barınaklardan sonra yeraltı yapısı olarak ilk tapınakları inşa etmişlerdir.

İnsanoğlunun hayatını devam ettirebilmesi için gerekli unsurların başında gelen su; temin edilmesi, depolanması ve dağıtımı açısından her zaman önemli bir konu olmuştur. Bunu ilk çağların en mühim yerleşim yerlerinden biri olan Mezapotamya sınırları içinde bulunan su iletim yapılarının varlığından görmek mümkündür. İlk su iletim tüneli M.Ö. 6.yüzyılda Ege adalarından biri olan Samos’ta yapılmıştır (Beaver, 1972).

Bütün jeolojik zamanlara ait arazi ülkemizde mevcut olduğundan dolayı maden çeşitliliği fazladır. Eski zamanlardan günümüze kadar madencilik önemli gelişme gösteren bir alan olmuştur. Bu gelişme de tünellerin katkısı büyüktür. Madencilikte kullanılmak amacıyla oluşturulan tüneller yeraltında bulunan değerli maden çeşitlerini çıkarma da kullanılmaktadır. Açılan bu tüneller sayesinde madende çalışan işçiler ve diğer elemanlar değerli madenlerin bulunduğu noktaya kolayca ulaşabilmektedir.

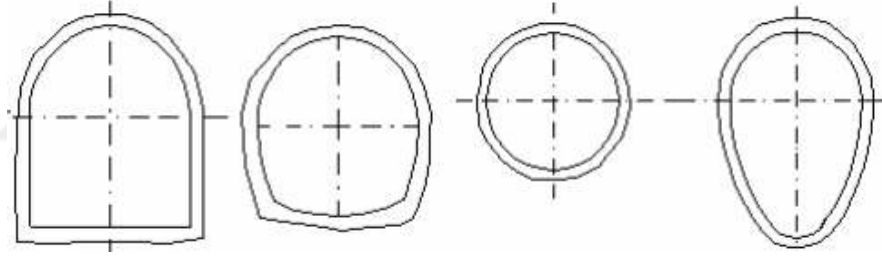
Kamu hizmeti gören tüneller yardımıyla su, kanalizasyon ya da gaz hatları bir yerden başka bir yere hizmet getirmeyi kolaylaştırmakla birlikte eskiden inşa edilen tünellerin su kaynakları bakımından zengin olan bölgelerden yoğun nüfuslu alanlara taşımak için yapıldığı bilinmektedir. Ayrıca yine bu bölgelerde kanalizasyon yapmak amacıyla kullanıldıkları da görülmüştür.

Dağlık, engebeli arazilerin geçilmesi ve güzergâhların kısaltılmak istenmesiyle birlikte ulaşım tünellerinin önemi her geçen gün daha da artmıştır. Tarihe bakıldığında M.Ö. XXII. yüzyılda ilk ulaşım tünelinin inşa edildiği görülmektedir. Babil’de Fırat nehri altında açılan bu tünel 900 metre uzunluğundadır. Otomobil sektörünün yıldan yıla gelişme göstermesi ile birlikte karayolu tünelleri de gelişme göstermiştir (Önalp, 1982).

1.4. Tünellerin Sınıflandırılması

Tünelleri işlevsel olarak; barınak ve tapınak tünelleri, karayolu, demiryolu, metro, ve su yolu gibi ulaşım tünelleri, su iletim tünelleri, madencilikte kullanılan tüneller, kanalizasyon tünelleri, kamu hizmet tünelleri, korunma amaçlı yapılan tüneller şeklinde sınıflandırmak mümkündür.

Tünel enkesitleri dikkate alındığında dairesel enkesitli tüneller, nal enkesitli tüneller, yumurta şeklindeki enkesitli tüneller, dikdörtgen enkesitli tüneller şeklinde sınıflandırma yapmak uygun olmaktadır. Enkesit şekillerine göre tünellerde karşılaştırma yapıldığında ise dairesel enkesitli tüneller teorik olarak oluşabilecek iç ve dış kuvvetleri daha iyi karşılamaktadır. Yumurta enkesitli tüneller karayollarında ve demiryollarında tercih edilmemektedir. Çünkü tabanları dardır. Daha çok birleşik kanalizasyon tünellerinde kullanılmaktadır. Nal enkesitli tünellerde ise tünel döşemesi oldukça düz olduğundan, eğrisel kenarları ve tabanı da kemer gibi çalıştığından dolayı dış kuvvetleri daha iyi karşılamaktadır. Bu nedenle tasarım mühendisleri ve yükleniciler tarafından fazlaca tercih edilmektedir. Dikdörtgen enkesitli tüneller kaplama zorluğundan dolayı kullanılmamaktadır. Aşağıda Şekil 1.2’de farklı şekillere sahip tünel enkesitlerine yer verilmiştir. Bununla birlikte aç-kapa yöntemi ile yapılanlarda ve su altı tünellerinde kullanılmaktadır (Beykont,1951).



Şekil 1.2. Farklı şekillere sahip tünel enkesitleri (Öztürk, 2007)

Tünelleri yapım şekillerine göre üç ana başlık altında incelemek mümkündür. Bunlar; kaya zemin tünelleri, yumuşak zemin tünelleri, su altı tünelleri şeklindedir. Kaya zeminler kendilerini taşıyabilecek güçtedirler. Bu özelliklerinden dolayı da bu tür zeminlerde inşa edilen tünellerde genellikle stabilite sorunu yaşanmamaktadır. Yumuşak zeminlerde tünel inşası kaya zeminlere göre daha zahmetli olmaktadır. Bu nedenle yumuşak zeminlerde tünel inşası sırasında çeşitli iyileştirme yöntemleri kullanılır. Bunlardan bazıları; boru sürme, şemsiyeleme, kalkan, aç-kapa gibi yöntemlerdir. Su altı tünellerin de ise tünel elemanları suya batırılır ve tabana yerleştirilir. Daha sonra üzerleri örtülür. Su altı tünelleri suda tabana yerleştirilmeden de yapılabilir (Öztürk, 2007).

1.5. Tünellerin İnşa Edilmesi Sırasında Karşılaşılan Sorunlar

Tüneller inşa edilirken birçok sorun ile karşılaşmaktadır. Tünel yapıları zeminin killi, siltli, kumlu ya da kaya gibi farklı yapılarda bulunmasına bağlı olarak değişik yöntemler ile açılabilir. Bu nedenle tünel açılmadan önce gerekli çalışmalar yapılarak tünelin açılacağı zeminin özellikleri detaylı olarak incelenmelidir. Zeminin zayıf bölgelerinden dolayı oluşabilecek olası çökmeler dikkate alınarak yük dağılımının dengeli bir şekilde olmasına özen gösterilmelidir. Yapılması düşünülen tünel yapısının geçeceği güzergâh üzerinde bulunan zeminlerde gerekli etüdler yapılmalıdır. Yapılan bu etüd çalışmaları dikkate alınarak projelendirme gerçekleştirilmelidir ve oluşabilecek olası sorunlara karşı hazır olunmalıdır. Bu sayede çalışma sırasında daha sorunla karşılaşılması mümkün olmaktadır (Kırbaş, 1995).

Killi ve siltli zeminler su içeriği fazla olan zeminlerdir. Bu tür zeminlerde tünel yapımı sırasında tünelin ayak adı verilen yan duvarlarının kendini tutamaması sonucunda açılan boşluğu doldurmasıyla birlikte akmalar meydana gelmektedir. Killi ve siltli zeminlerde bu akmalar çamur akması şeklinde meydana gelmektedir. Tünel yapımı gerçekleşen zeminde su içeriğinin az olması durumunda ise şişme ya da sıkışma gibi olaylarla karşılaşmaktadır. Bu durumda böyle zeminlerde açılan tüneller kısa bir süre desteksiz ayakta durabilmektedir. Bu nedenle bu tür zeminlerde tünel açılması sırasında destekleme çalışması yapılması gerekmektedir. Kaya ortamında tünel yapımı devam ederken farklı dirençlere sahip kayalara ve süreksizliklere yakın olan bölgelerde aşırı sökülme ya da kaya patlamaları meydana gelmektedir. Kaya patlaması tünelde kazı çalışması esnasında kazı türüne ve hızına göre, farklı boyutlardaki kayaların birden patlayarak tünelin içerisindeki boşluğa düşmesi sonucunda gerçekleşen olaydır. Küçük parçalar patlıyor ise bu olaya kaya fırlaması, büyük parçalar patlıyor ise bu olaya kapak atma adı verilir. Yine kaya zeminlerde tünel açılması esnasında karşılaşılması mümkün olan olaylardan biri de kemerlenmedir. Bu tür zeminlerde süreksizlikler nedeniyle gevşemiş şekilde bulunan bloklar mevcuttur. Bu bloklar tünel içi boşluğa hareket ederken birbirlerini stabil hale getirmesi olayına kemerlenme denilmektedir. Kazı çalışmaları esnasında çeşitli gazlar da açığa çıkmaktadır. Havalandırma yöntemi açığa çıkan bu gazların olumsuz etkilerini en aza indirmek ve güvenli bir çalışma ortamı sağlamak içinde kullanılan etkili bir yöntemdir. Açılacak olan tünelin su seviyesi altında olması durumunda da çeşitli sorunlar ile karşılaşmaktadır. Bu durumda çalışma sahası çalışanlar için güvenli olmaz, yapılan çalışmalar zorlaşır. Killi bir zeminin olması durumunda da

şışmeler ve akmalar görülebilmektedir. Bu durumda yaşanabilecek can ve mal kaybı riski ile birlikte maliyetinde de artmasına neden olabilmektedir (URL-1, 2020).

1.6. Tünel İnşa Yöntemleri

1.6.1. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi

19.yüzyılda yapılan tünel çalışmaları incelendiğinde tünel açma yöntemlerinin tümünde geçici iksa olarak ahşap, kalıcı iksa olarak ise tuğla malzemelerinin tercih edildiği görülmektedir. Beton yapılan tünel çalışmaları sırasında iksa olarak kullanılmamıştır. Çünkü beton dayanımını uzun sürede tamamlamaktadır. Bu noktada meydana gelebilecek bozulmalar dikkate alındığında betonun iksa için uygun olmadığı görülmektedir. Ahşap malzeme mevcut zemin durumuna bağlı olarak zamanla dayanım özelliğini kaybetmektedir. Dayanımda yaşanan bu düşmeler sonucunda tünel tavanında çeşitli boyutlarda bozulmalar ve tünel yapısında ani göçmeler meydana gelebilmektedir. Ayrıca ahşap malzemeler yapısı itibari ile kazı alanlarında önemli ölçüde yer kaplamaktadır. Bu da yine ahşap malzeme kullanımındaki dezavantajlarından biridir. Bu nedenlere bağlı olarak zamanla ahşap iksaların yerlerini çelik iksalar almıştır. Çünkü çelik iksalar ahşap iksalara kıyasla daha iyi özelliklere sahip olmakla birlikte daha kullanışlı malzeme özelliği göstermektedir. Çelik iksaların kullanılması ile birlikte tünel yapılarının inşasında önemli gelişmeler yaşanmıştır ve daha büyük açıklıklar tam kesit uygulanarak açılmıştır. Ayrıca kazı yapmak amacıyla ya da kazı işlemleri sonucunda oluşan pasa adı verilen malzemenin tünel içinden uzaklaştırılması için kullanılan iş makinelerinin tünel içine giriş çıkışı da kolaylaşmıştır (Şeker, 2008).

Kademeli olarak ilerleme yapılan bu NATM yönteminin temel amacı tünel etrafındaki zeminin gücünü harekete geçirerek mevcut zeminin taşıma gücünü arttırmaktır. Tünel çalışmaları sırasında olası durumlarda oluşabilecek oturmaları minimuma indirmek için mevcut zemin durumu dikkate alınarak gerekli olan destekleme ve iyileştirme çalışmalarının en doğru şekilde yapılması için çeşitli yöntemlerden yararlanılmaktadır. Ayrıca yapılan kaplama kazı çevresinde mümkün mertebede gerilme boşalmalarına imkân sağlamalıdır. Kesit tesirlerini en aza indirmek için belli bir rijitliğe sahip olmasına dikkat edilmelidir. Tünel çalışmaları boyunca projeyi gerçekleştirmek için yapılmış kabullerin doğruluğunu belirlemek, zemin şartları dikkate alınarak yapılmış destekleme ve zemin iyileştirme

yöntemlerinin uygun olup olmadığını belirlemek amacıyla gerekli gözlemler sürekli olarak yapılmaktadır (Osmanoğlu, 2007).

1.6.1.1. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi Temel İlkeleri

Yeni Avusturya Tünel Açma yönteminin temel ilkelerini 1978 yılında Müller yayınlamıştır. Bu temel ilkeler Vardar tarafından Türkçe çevirisi yapılmıştır (Ergin,1992).

Yeni Avusturya Tünel Açma yönteminin başlıca ilkeleri şöyledir:

- Bu yöntemde tünel iksa yapısının ana materyali olarak tüneli saran zemin kütlesi görülmektedir. Çalışmalar esnasında kullanılmakta olan yapay iksa elemanlarının ana görevi tünel etrafında yer alan zemin kütlesinin kendisini desteklemesine yardım etmekte ve aynı zamanda zeminin ilk durumdaki dayanımını korumaktadır.
- Tünel yapısını saran zeminin dayanımının düşmesine ve sabit yüklerin artmasına sebebiyet veren gevşemeler engellenmelidir.
- Yapılacak olan iksa çalışmalarına doğru zamanda başlanmasına, iksa sistemini meydana getiren yapının gerekli rijitliğe sahip olmasına çok dikkat edilmesi gerekmektedir.
- Kazı çalışmalarının ardından iksanın, büyük şekil değiştirmelerin ve gevşemelerin meydana gelmesinin düşünüldüğü durumlarda, boşluk yüzeyini bağlayacak bir şekilde olmasına özen gösterilmelidir.
- İksa, çelik hasır, bulon, püskürtme beton ve çelik bağlarla oluşturulmak şartıyla hem gerekli hem de yeterli dayanım kaplama kısmının kalınlaştırılmasıyla değil, tünelin kaplama kısmında gerekli ve yeterli esnekliği sağlayacak biçimde yapılmalıdır.
- Tünel yapısının etrafındaki ve tüneli saran zeminler içerisindeki şekil değiştirme ve gerilmelerin ölçülerek belirlenmesi, zeminin uygulama esnasındaki davranışını belli etmesi açısından son derece önemlidir. Yapılan varsayımlar doğrultusunda oluşturulan tasarım ile zemin kütlesinin içerisine girdikten sonra yapılması gereken tasarım çoğu zaman düşünülmemiş etmenlerin meydana gelmesine bağlı olarak birbirinden değişik olabilmektedir. Bu sebebiyetle tünel yapılarının tasarımlarında sürekli olarak değişikliği mecburi tutmaktadır. Buradan yola

çıkarak tünel mühendisliğinde bir tasarımdan bahsetmek yerine adım adım ve yer yer değişen bir tasarım düzeninden söz etmek mümkündür. Bu düzenin kendi arasındaki uyumu ve aynı zamanda zemin ortamına uygunluğunun sağlanabilmesi amacıyla gözlem, ölçme, araştırma ve arşivleme gibi pek çok çalışma özenli bir şekilde gerçekleştirilmelidir.

- Bir açıklığın taşıyabilir hale gelmesinin şartı taşıyıcı halkanın kapanmasıdır. Yay ve derzli halkanın stabilitesi daireye kıyasla daha az olmaktadır. Bu nedenle bu şartı sadece tam kesit kazıları takip eden dairesel kaplamalar yardımı ile sağlamak mümkündür. Fakat taban zemininin taşıma gücünün iyi olması halinde taban kısmının sağlamlaştırılması için sağlamlaştırma yayının halkaya tamamlanması şartı olmayabilir.
- İksadan oldukça fazla uzaklaşmış üst yarı kazı çalışmalarında, tünel tavan kısmının sağlamlaştırılması sonucunda meydana getirilen yay biçimindeki kaplama, tünel yapısının eksen doğrultusunda bir eğilme momenti oluşturulmaktadır. Buna bağlı olarak eğilmeye zorlanan tünel yapısının uç bölgesindeki üst yarı kaplamasının yan ayaklarında büyük derecede gerilmeler meydana gelmektedir. Bu nedenle üst yarı kazısının iksadan fazla miktarda uzaklaşmaması ve aynı zamanda tünel kaplama kısmının kısa bir zaman içerisinde bitirilmesi gerekmektedir.
- Tünel çalışmaları sırasında yapılan kazılar zeminin ilk baştaki gerilme durumunu bozarak yeni bir gerilme dağılımı meydana getirmektedir. Tünel boşluğunun şeklini ve büyüklüğünü değiştirmeye yönelik yapılan her yeni kazı, gerilmelerin yönünün, şiddetinin ve yerinin değişmesine sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak zeminin dokusunun zamanla gevşemesi nedeniyle zemin dayanımında azalmalar görülmektedir. Gerilmelerin boşalması esnasında meydana gelen şekil değiştirmeler süreksizlik yüzeylerini açmakta, aynı zamanda düzgün olmayan ötelenmeler ile birlikte zeminin dokusu örselenmektedir. Bu noktada bu gibi durumlarda su gelişinin artış göstermesi ve çatlakların mekanik davranışlarının değişmesi açısından da önem arz etmektedir. Zeminin en sağlam olduğu durum ise kazı işlemlerine başlanmadan önceki ilk durum olmaktadır. Bu mevcut durumun devam ettirilmesi için kazı işlemlerinin ardından gerilmelerin tek seferde meydana getirilmesi gerektiği bilinmektedir. Aksi taktirde yapılan kazılar, çalışmaları zorlaştırmakta ve doğal yapının giderek bozulmasına sebebiyet

vermektedir. Bu nedenle bu gibi durumların önüne geçebilmek için kazının tam kesit şeklinde yapılması mecburi olmaktadır.

- Yeraltı boşluğunun, enkesiti daire veya elips biçiminde olmalıdır. Aynı zamanda bu boşluklarda çıkıntı ve köşelerin olmaması gerekmektedir. Aksi takdirde tünel yapısının etrafında yer alan keskin çıkıntı ve köşeler, tünelin duvar kısmında ve zeminin içerisinde gerilme yığılmalarına sebebiyet vermektedir. Bu durumda bu bölgelerde kesit boyutlarının büyümesi gerekmekte, yapının hem stabilitesi hem de güvenliği tehlikeye girebilmektedir.
- Öniksa çalışmaları ile birlikte yapının stabilitesi sağlanarak iç kaplama kısmının yapılmasından önce şekil değiştirmeler durmuş, yani ikincil gerilme durumu dengeli son halini almış olması istenmektedir. İç kaplama kısmının görevi güvenliği sağlamak ve aynı zamanda estetik bakımdan düzgün bir yüzey oluşturmaktadır.
- Zemin- kaplama sisteminin yapım süresi içerisindeki karşılıklı etkileşimlerinin bilinmesi, şekil değiştirme ve yer değiştirmelerin sönümlenip sönümlenemediğinin belirlenmesi ve gerilmelerin yer, büyüklük ve türlerinin hesaplanması bakımından önemli olmaktadır. Bu etkileşimi irdelemek için zemin ve beton içerisine koyulan ölçme araç ve gereçleri, yapının bitirilmesinden sonra da denetim maksadı ile kullanılmaktadır.
- Yeraltı suyunun mevcut olması halinde yeraltında açılan her boşluk, bir drenaj yapısı gibi çalışmakta ve suyu kendisine doğru çekmektedir. Bu duruma bağlı olarak suyun akışı, süreksizliklerin mekanik özelliklerini değiştirmesi ve çalışma alanını zor şartlar altına sokması açısından istenilen bir durum değildir. Su boşaltımını sağlayan ağızların beton ile tıkalı hale gelmesi kaplamanın arka kısmında su basınçlarının büyük değerler almasına sebebiyet vermektedir. Su basıncının sistem üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaması için suyun drene edilmesini gerekli kılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda boşluk etrafına çoğunlukla drenaj borularının yerleştirilmesi uygun bir çözüm yolu olarak görülmektedir (Engin, 1992).

1.6.1.2. NATM Yöntemine Göre Kaya Sınıfları

NATM yönteminde kaya davranışları dikkate alınarak üç sınıf oluşturulmuştur. Oluşturulan her sınıf kendi içinde alt sınıflara ayrılmıştır. Bu kaya sınıfları A sınıfı, B sınıfı ve C sınıfından oluşmaktadır. Her bir sınıfın kendine has özellikleri bulunmaktadır. Tünel çalışmaları öncesinde ve sonrasında bu zemin sınıfları göz önünde bulundurularak gerekli önlemler en ince ayrıntısına kadar düşünülmelidir (Değirmenci, 2019).

1.6.1.2.1. A Tipli Kaya Sınıfları

Bu tipli kaya sınıfları sağlam-zamanla kırılğan davranış gösteren kayalardan oluşan sınıftır. A tipli kaya sınıfları tünel çalışmaları sırasında yapılan kazılar esnasında meydana gelen zorlamalar sonucunda kırılma göstermezler. A tipli kaya sınıfı kendi içerisinde A1 ve A2 şeklinde iki farklı sınıfa ayrılmaktadır (Değirmenci, 2019).

1.6.1.2.1.1. A1 Tipli Kaya Sınıfı

A1 tipli kaya sınıfı sağlam kayaçlardan oluşmaktadır. Bu tipli kaya sınıflarında az miktarda deformasyon görülmekle birlikte oluşan deformasyon boyutları da mm derecesindedir. Kazı işlemleri sonucunda oluşan serbest şekildeki malzemelerin güvenli bir şekilde temizlenmesinin ardından zeminde tekrardan herhangi bir sökülme ya da düşme oluşmaz. Bu tipli zeminlerde yapılan çalışmalar sırasında su etkisi ile karşılaşmamaktadır. Sağlam kayalardan oluşan bir zemin sınıfı olduğundan dolayı tünelin desteksiz bir şekilde uzun süre ayakta kalması mümkün olmaktadır. Sıralı kazılarda ve sürekli kazılarda destekleme yapılmamaktadır (Değirmenci, 2019).

1.6.1.2.1.2. A2 Tipli Kaya Sınıfı

A2 tipli kaya sınıfı zamanla kırılğan davranış gösteren kayaçlardan oluşmaktadır. Bu tipli kaya sınıflarında yenilme zonu bulunmamakla birlikte su etkileri de önemsiz olmaktadır. Tünel tavanı ve yan duvarların üst kısımları dikkate alındığında süreksizliklerin mevcut olduğu görülmektedir. Mevcut süreksizlikler dolayısıyla bu kısımlarda sıkı şekilde

sökülmeler meydana gelebilmektedir. Bu tipli kaya sınıflarında tünel yapısı minimum 4 gün maksimum 3 hafta desteksiz bir şekilde ayakta durabilmektedir. A2 tipli kaya sınıflarında sıralı kazılarda ve sürekli kazılarda gerekli görülen yerlerde destekleme çalışmaları yapılması gerekmektedir. Yapılan destekleme ve sağlamlaştırma ayna önünde yer alan ikinci çalışma bölgesinde gerçekleştirilmektedir. Ayrıca bu tipli kaya sınıflarında patlatma gerçekleştirilmesi durumunda mevcut şartlar göz önünde bulundurularak yumuşak bir patlatma yapılması uygun olmaktadır. Kazı adımları dikkate alındığında alt yarı da kazı adımlarının 4 metreyi üst yarıda ise kazı adımlarının 2,5-3,5 metre arasını geçmemesine özen gösterilmelidir (Değirmenci, 2019).

1.6.1.2.2. B Tipli Kaya Sınıfları

B tipli kaya sınıfı kırılğan özellikli davranış gösteren sınıftır. Bu tip kaya sınıfında süreksizlikler mevcuttur. Bu süreksizlikler sonucunda B tipli kaya sınıfları doku dayanımının ya da gerilme kemerlenmesinin yetersizliği sebebi ile gevşemeye meyilli ortamlar oluşturmaktadır. B tipli kaya sınıfı kendi içerisinde B1, B2 ve B3 şeklinde üç farklı sınıfa ayrılmaktadır (Değirmenci, 2019).

1.6.1.2.2.1. B1 Tipli Kaya Sınıfı

B1 tipli kaya sınıfı kırılğan kayaçlardan oluşmaktadır. Bu kaya sınıfında mevcut süreksizlikler nedeniyle dayanımda azalmalar meydana gelmektedir. Kullanılan patlatma yöntemi bu tipli zeminlerde gevşemelere sebep olmakla birlikte tünelin tavan kısmında ve üst omuz kısımlarında sökülmele sebebiyet vermektedir. B1 tipli kaya sınıfında oluşan deformasyonlar hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir ve sonrasında da sona ermektedir. Meydana gelen deformasyonlar 2 ila 3 cm arasında olmaktadır. Yapılması düşünülen patlatma yönteminde yumuşak patlatma yöntemi tercih edilmelidir. Bu tipli kaya sınıfında ilerleme adımları dikkate alındığında alt yarıdaki ve üst yarıdaki ilerleme adımları farklılık göstermektedir. Alt yarıdaki ilerleme adımları 4 metre ile sınırlı iken üst yarıdaki ilerleme adımları 2 ila 3 metre arasında sınırlandırılmaktadır. Bu tipli kaya sınıflarında su etkileri genellikle dikkate alınmamakla birlikte gerekli görülen durumlarda alt yarıda ve üst yarıda bulonlama çalışmaları yapılmaktadır (Değirmenci, 2019).

B1 tipli kaya sınıflarının tünel inşası sırasında tünelin desteksiz bir şekilde kendini tutma süresi 10 saat ile 4 gün arasında değişiklik göstermektedir. Sıralı kazı ya da sürekli kazılar bu kaya sınıflarında yapılabilmektedir. Sıralı kazı yapılması durumunda dar kapsamlı şekilde ve düzenli destekleme yapılmaktadır. İlerleme adımları sıralı kazı da çeşitli faktörlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu işlemler sırasında gerekli olması halinde destekleme çalışmaları yapılmaktadır. Sürekli kazı ise iki alt sınıf olarak incelenmektedir. Bunlar B1.1 ve B2.2 şeklindedir. B1.1 şeklinde olması durumunda yapılan makineli kazı çalışmalarına engel olmadan tünelin ayna öncesindeki ikinci çalışma bölgesinde destekleme yapılmaktadır. Yapılan bu destekleme çalışmaları dar kapsamlı olmakla beraber düzenli bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Desteksiz bir şekilde tünelin kendini tutma süresi ise 2 gün ile 4 gün arasında değişiklik göstermektedir. B1.2 şeklinde olması durumunda 1. ve 2. çalışma bölgelerinde destekleme çalışmaları yapılmaktadır. Bu destekleme çalışmaları tünel tavanında, omuz kısımlarında ve üst yanlarda gerçekleştirilmektedir. Yapılan destekleme çalışmaları düzenli ve dar kapsamlı şekilde olmaktadır. Destekleme çalışması yapılmadan tünelin kendini tutma süresi 10 saat ile 2 gün arasında değişiklik göstermektedir (Değirmenci, 2019).

1.6.1.2.2.2. B2 Tipli Kaya Sınıfı

Bu tipli kaya sınıfına çok kırılğan kayaçlar adı da verilmektedir. Bu sınıfa mensup olan kayalarda mevcut süreksizlikler nedeniyle dayanımda azalmalar görülmektedir. Bunun yanında düşük kemerlenme ve yüksek doku hareketliliği de belirgin şekilde oluşabilmektedir. Bu tipteki zeminlerde düşük deformasyonlar görülmekle birlikte oluşan bu deformasyonlar kısa süre içinde sona ermektedir. Tünel açılımı esnasında patlatma yönteminin tercih edilmesi durumunda destekleme çalışması yapılmayan bölgelerde ani parça kopmaları ile birlikte derinlere kadar ulaşabilen gevşemeler meydana gelebilmektedir. Doğru planlama ile birlikte yerinde ve zamanında yapılmış destekleme çalışmaları sonucunda meydana gelen deformasyonların 3 ile 5 santimetre civarında kalması mümkün olabilmektedir. Yapılacak olan bu patlatma sırasında yumuşak patlatmanın tercih edilmesi uygun olmaktadır. Tünel çalışması sırasında ilerleme adımlarının alt yarı için 3.5 metre, üst yarı için 2 ile 2.5 metreyi geçmemesine dikkat edilmelidir. B2 tipli kaya sınıflarında inşa edilen tünellerin desteksiz bir şekilde kendini tutma süreleri 2 saat ile 10 saat arasında değişiklik göstermektedir. Bu sürenin daha da kısa olması mümkündür. Su akışı nedeniyle

bu kaya sınıfında sınırlı yenilme bölgeleri meydana gelebilmektedir. Kazı çalışmaları sırasında sıralı kazı ya da sürekli kazılar yapılabilir. Sıralı kazı dikkate alındığında yapılacak olan destekleme çalışmaları geniş kapsamlı olmaktadır. Tünel tavanında, omuz kısmında ve yan kısımlarda düzenli olmakla birlikte çoğu zaman aynayı da kapsamaktadır. Parçalı kazı kesitleri olmalıdır. Bu tip kazılarda ilerleme adımları çeşitli sebepler doğrultusunda farklılık göstermektedir. Bu sebepler tünel yapısının desteksiz bir şekilde kendini tutabilme süresi ve serbest açıklık boyudur. Ayrıca ayna sürekli bir şekilde desteklenmektedir. Bu tipli kaya sınıfında sürekli kazılar dikkate alındığında sürekli kazıların kendi içerisinde B2.1 ve B2.2 şeklinde iki farklı sınıfa ayrıldığı görülmektedir. B2.1 olması durumunda kazı başından itibaren hemen ardından düzenli bir şekilde destekleme yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar ilerleme hızında etkili olmaktadır. Desteksiz bir şekilde tünelin kendini tutma süresi 5 saat ile 10 saat arasında değişiklik göstermektedir. B2.2 olması durumunda kazı başından itibaren hemen ardından ön çalışma bölgesi adı verilen 1. bölgeyi tamamen kapsayacak şekilde düzenli olarak destekleme yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar burada da ilerleme hızında etkili olmaktadır. Desteksiz bir şekilde tüneli kendini tutma süresi aynada destekleme olmadan 2 ile 5 saat civarındadır (Değirmenci, 2019).

1.6.1.2.2.3. B3 Tipli Kaya Sınıfı

Bu sınıf döküntülü kayalar grubu olarak da bilinmektedir. Kohezyonun ve kayacın dokusundaki kenetlenme azlığı ile birlikte suyun etkilerine bağlı olarak bu tipli kaya sınıflarında stabilite yetersizliği görülebilmektedir. Oluşan deformasyonların boyutları 10 santimetreyi bulabilmektedir. Patlatma yapılması durumunda yumuşak patlatma yöntemi tercih edilmelidir. Titreşime hassas kayaların bulunması durumunda mekanik kazı yöntemi kullanılmalıdır. Tünelde ilerleme adımlarının alt yarı için 3 metre, üst yarı için 1.5 ile 2 metre arasında olmasına ve bu sınırları geçilmemesine dikkat edilmelidir. Bu tipli kaya sınıflarında sıralı kazılar ve sürekli kazılar yapılabilir. Sıralı kazı yapılması durumunda tünelin ayna kısmına destekleme ön sürenler yardımıyla yapılabilir. Bu destekleme ile birlikte kayacın niteliği iyileştirilir ve stabilite artırılır. Böylece yapılacak olan çok parçalı kazılarda bile gerekli önlemler önceden alınmış olur. Aynayı da içine alacak şekilde düzenli ve yoğun olarak tüm tüneli saracak şekilde destekleme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Sürekli kazı yapılması durumunda tünelin desteksiz bir şekilde kendini tutma

süresi 2 saatten de olabilmektedir. Bu kazı çalışmaları sırasında ön sağlamlaştırma için özel önlemlerin alınması koşulu ile şiltsiz makinelerde kullanılabilir (Değirmenci, 2019).

1.6.1.2.3. C Tipli Kaya Sınıfları

Bu kaya sınıfına plastik davranış gösteren kayalar da denilmektedir. C tipli kaya sınıfında kaya patlaması, belirgin şişme ve kabarma davranışları görülmektedir. Ayrıca kaya dayanımının önemli derecede aşıldığı ortamlardan oluşmaktadır. Bu sınıf kendi içerisinde C1, C2, C3, C4 ve C5 olmak üzere beş farklı sınıfa ayrılmaktadır (Değirmenci, 2019).

1.6.1.2.3.1. C1 Tipli Kaya Sınıfı

C1 tipli kaya sınıfı kaya patlaması olan kaya kütlelerini tanımlamaktadır. Bu sınıfa kaya patlamalı kayalarda denilmektedir. Yoğun, sert ve kırılkan özellik gösteren kayalarda meydana gelen doğal gerilmeler elastik enerji olarak depolanmaktadır. Kazı çalışmaları esnasında depolanan bu enerji ani bir şekilde boşalmaktadır. Boşalan bu enerji kaya parçalarının koparak etrafa yayılmasına sebep olmaktadır. Bu tipli kaya sınıfında kazı işlemlerinde yumuşak patlatma ya da mekanik kazı tercih edilmelidir. Alt yarı için 3 metre, üst yarı için 1.5 ile 2 metreyi geçmeyecek şekilde ilerleme adımları oluşturulmalıdır. C1 tipli kaya sınıfında gerilme boşalmaları delgi ve boşalma patlamaları ile gerçekleştirilebilmektedir. Sık bir şekilde yerleştirilmiş kısa bulonlar ile de destekleme çalışmaları yapılabilir. Sıralı kazının yapılması durumunda belirli bölgelerde sık bir şekilde yerleştirilen kısa kaya bulonları ile destekleme yapılmaktadır. Gerekli görülmesi durumunda çelik hasırların kullanılması da uygun olmaktadır. Kayadaki mevcut gerilmelerin boşaltılması için farklı yöntemler kullanılabilir. Patlatma yapılar ya da gevşetme deliklerinin açılması ile gerilmelerin boşaltılması mümkün olmaktadır. Sürekli kazının yapılması durumunda ise 1. çalışma bölgesine sık bir şekilde yerleştirilmiş kısa kaya bulonları yardımıyla gerekli görülmesi durumunda çelik hasırlar kullanılarak destekleme yapılabilir (Değirmenci, 2019).

1.6.1.2.3.2. C2 Tipli Kaya Sınıfı

C2 tipli kaya sınıfı plastik davranış gösteren kayaçlardan oluşmaktadır. Oluşan deformasyonlar bu tür kaya sınıfında uzun bir süre içinde gerçekleşmekle birlikte ayrıca oluşan deformasyonlar çok yavaş olacak şekilde sona ermektedir. Meydana gelen deformasyonların miktarı ve hızları çeşitli faktörlere bağlı olmaktadır. Bu faktörleri jeolojik koşullar, arazi gerilmeleri, yeraltı su durumu, boşluk suyu basıncı, kaya kütle özellikleri şeklinde sıralamak mümkündür. Bu tipteki kaya sınıfında kaya kütlelerinde meydana gelen aşırı gerilmelere bağlı olarak kayanın kayma dayanımı geçilmektedir. Tünel kesiti etrafında geniş plastik zonlar oluşmaktadır. Ayrıca plastik ve yüksek kohezyon özelliği gösteren kayalarda yenilme mekanizmaları ile plastikleşme bölgeleri gelişmektedir. Bu tür kaya sınıfında sıralı kazı yapılması durumunda düzenli bir şekilde tünelin tüm kesitini içine alarak destekleme ve sağlamlaştırma çalışmaları yapılmaktadır. Aynada yapılacak olan kazı biçimi ve kazı kesiti için doğru tercih yapılmalıdır. Bu işlem sırasında stabilitenin korunmasına hatta artırılmasına özen gösterilmelidir. Sağlamlaştırma çalışmalarındaki amaç yenilme mekanizmalarını denetlemek ve kırılmaları sınırlandırmaktır. Aynadaki stabilite atım ilerleme boyunda etkili olmaktadır. Bu stabiliteye bağlı olarak atım ilerleme boyu belirlenmektedir. Sürekli kazı olması durumunda ise C2.1 ve C2.2 şeklinde iki farklı sınıf tanımlanmaktadır. C2.1’de tünel çalışmalarında yapılacak olan destekleme düzenli ve kapsamlı bir şekilde olmaktadır. Tünelde 1. ve 2. Çalışma bölgelerinde tavan kısmında, omuz kısımlarında ve yan kısımlarda kademeli olacak biçimde yapılmaktadır. Yapılacak olan bu çalışmaların makineli kazıyı engellememesi için gerekli önlemlerin önceden alınmasına özen gösterilmelidir. Bu kazı durumunda tünelin destek olmadan kendisini ayakta tutması 2 gün ile 10 saat arasında değişiklik göstermektedir. C2.2’de ise destekleme çalışmaları düzenli bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Yapılacak olan bu çalışmalar kazı kafasının hemen arkasından başlamaktadır. Yapılan çalışmalar doğrultusunda ilerleme hızı belirlenir. İlerleme parçalı kazı olarak yapılmaktadır. Tünel çalışmaları sırasında makinenin sıkışıp yapılacak olan diğer çalışmaları engellememesi için gerekli tedbirlerin alınması gerekir. . Bu kazı durumunda tünelin destek olmadan kendisini ayakta tutması 5 saat ile 10 saat arasındadır (Değirmenci, 2019).

1.6.1.2.3.3. C3 Tipli Kaya Sınıfı

Aşırı plastik davranış gösteren bir sınıf olmakla birlikte C3 tipli kaya sınıfında büyük deformasyonlar görülmektedir. Meydana gelen bu deformasyonların hızları başlangıç kısmında yüksek olmaktadır ve uzun süre sonunda yavaş bir şekilde sona ermektedir. Bu tipli kaya sınıflarında tünelin desteksiz bir şekilde kendini ayakta tutma süresi 2 saat ile 5 saat arasında değişiklik göstermektedir. Bu kaya sınıfında sıralı kazı yapılması durumunda mevcut halde bulunan serbest yüzeyler için destekleme ve sağlamlaştırma çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Tünel aynasının desteklenebilirliği göz önünde bulundurularak parçalı kazı kesitleri gerekmektedir. C3 tipli kaya sınıflarında sıralı kazı çalışmaları esnasında ayna sürekli olarak desteklenmelidir. Ayna stabilitesi ve meydana gelen deformasyon hızlarına bağlı olarak ilerleme adımları belirlenmektedir. C3 tipli kaya sınıfında sürekli kazı yapılması durumunda ise düzenli ve yoğun olacak şekilde destekleme çalışmaları yapılmalıdır. Yapılacak olan bu destekleme çalışmaları kazı kafasının hemen arkasından 1. çalışma bölgesini tamamen içine alacak şekilde gerçekleştirilir. Kazı çalışmaları sırasında tünel açma makinesinin sıkışmasını önlemek amacıyla gerekli tedbirlerin önceden alınmasına dikkat edilmelidir (Değirmenci, 2019).

1.6.1.2.3.4. C4 Tipli Kaya Sınıfı

Bu sınıf yumuşak kayalardan oluşmaktadır. İçsel parametrelerin yani kohezyon ve sürtünme açısının çok düşük olduğu durumlarda ayrıca yumuşak- plastik kıvamlı kayalarda destekleme yapılmaması durumunda yapılacak olan en küçük kazı kesitlerinde dahi zemin tünel içine doğru akar. C4 yumuşak kaya sınıfında sıralı kazı yapılması durumunda ortam niteliği göz önünde bulundurularak özel önlemler alınmalı ve bu doğrultuda iyileştirme, destekleme çalışmaları yapılmalıdır. Bu çalışmaların çok parçalı kazı da ilerlemeyi sağlayacak şekilde olmasına dikkat edilmelidir. Her bir parçada yapılacak olan destekleme, sağlamlaştırma çalışmaları düzenli ve yoğun olacak şekilde yapılmalıdır. Ayna ve kazı yüzeylerini tamamen saracak şekilde gerçekleştirilmelidir. Bu kaya sınıfında sürekli kazı yönteminin tercih edilmesi durumunda ise tünel desteksiz olarak 2 saatten daha az bir süre ayakta kalabilmektedir. Ön sağlamlaştırma şeklinde özel önlemlerin alınması durumunda kazı esnasında şiltsiz makineler kullanılabilmektedir (Değirmenci, 2019).

1.6.1.2.3.5. C5 Tipli Kaya Sınıfı

Bu sınıf şişen ve kabaran kayalardan oluşmaktadır. Bu tipli kaya sınıfından oluşan ortamlar üzerlerindeki mevcut yükün kalkması sonucu su alan şişen ya da kabaran killi, anhidritli ve tuzlu mineraller içermektedir. Bu gibi zeminlerde sıralı kazı yapılması durumunda uygun destekleme tipinin seçilmesi esnasında seçilecek olan desteklemenin şişme ve kabarma basınçlarını almasına dikkat edilmelidir. Bu destekleme çalışmaları ile birlikte meydana gelecek olan kabarma deformasyonları önlenebilir ya da en aza indirilebilmektedir. Sürekli kazı yapılması durumunda ise yine şişme-kabarma basınçlarını alabilen en uygun destekleme işleminin seçilmesine özen gösterilmektedir. Oluşabilecek kabarma deformasyonları önlenebilir ya da en az seviyeye düşürülmelidir. Çok özel ve yeterli önlemlerin alınması durumunda şiltsiz makinelerde kullanılabilir (Değirmenci, 2019).

1.6.2. TBM Genel Özellikleri

Teknolojinin gelişmesi sonucunda inşaat ve madencilik gibi alanlarda yeraltı yapılarının önemi her geçen gün artmaktadır. Yeraltı yapılarının inşası sırasında tercih edilecek olan kazı yönteminin çevreye ve yer üstündeki mevcut yapılara zarar vermemesi son derece önemlidir. Tam cepheli tünel açma makinesi olarak kullanılan TBM'ler ilk yatırım maliyetleri yüksek olmasına karşın daha sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışma avantajlarına sahip olmakla birlikte ayrıca yeraltı hareketlerini önleyebilme durumu nedeniyle günümüzde tercih edilmektedir.

Projeye başlamadan önce gerekli zemin etütleri yapılmalı ve zemin etüt raporları oluşturulmalıdır. Ayrıca gerekli sondaj çalışmaları da yapılmalıdır. Elde edilen tüm veriler dikkatli bir şekilde incelenmeli ve yapılan incelemeler doğrultusunda uygun TBM seçimi yapılmalıdır. TBM'ler farklı zemin şartları dikkate alınarak farklı çalışma prensiplerine ve kesici kafa tasarımlarına göre üretilmektedir (Dayanç, 2011).

Tünel açma makineleri olarak adlandırılan TBM'ler üç ana bölümden meydana gelmektedir. Bu bölümlerden birincisi, kazı işlemlerinin gerçekleştirileceği jeolojik formasyonlar dikkate alınarak tasarlanmış olan ve kazı çalışmalarını gerçekleştirecek olan kesici kafa bölümünden oluşmaktadır. TBM'in ikinci bölümü kesici kafanın dönmesinde ve

ilerlemesinde rol oynayan güç nakil ünitelerinden meydana gelmektedir. Üçüncü bölümde ise diğer yardımcı donanımlar yer almaktadır (Arıoğlu, 2010).

Tünel açma makinesi olarak kullanılan TBM'in çeşitli avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Aşağıda TBM'in avantajlarından bazıları maddeler verilmiştir.

- Çalışma şartları dikkate alındığında TBM ile çalışmak hem daha emniyetli hem de daha konforludur.
- Çalışan personel sayısı daha az olduğu için daha ekonomiktir.
- Aynı zemin koşulları dikkate alındığında TBM ile diğer kazı yöntemlerine göre daha fazla ilerleme kaydedilmektedir.
- TBM ile çalışırken oluşabilecek titreşim ve gürültü miktarı daha az olmaktadır.
- Kazı işlemlerinin hepsi mekanize ve bilgisayar destekli olarak gerçekleştirilmektedir.
- Nitelikli iş gücü ve yüksek bilgi birikimi sonucu kullanılan TBM'ler ile açılan tünel projeleri esnasında çevre emniyeti dikkate alındığında büyük riskler söz konusu olmamaktadır.
- TBM ile düzgün şekilli ve kesin bir ayna kesiti meydana getirilmektedir.

Aşağıda TBM'in dezavantajlarından bazıları maddeler halinde verilmiştir.

- Daha detaylı bir şekilde zemin incelemesi gerçekleştirilmelidir. Bu duruma bağlı olarak da bütçeden yapılacak olan bu incelemeler için daha fazla pay ayrılmalıdır.
- Tasarım ve projelendirme aşamaları daha fazla zaman almaktadır.
- Çok kısa mesafeli tüneller için (<2 km) ekonomik değildir.
- Nitelikli iş gücü ve çok iyi projelendirme gereklidir.
- TBM ile yapılan tünel çalışmalarında elektrik, su vb. gibi lojistik destek ihtiyacı fazladır.
- Aynı formasyon için tercih edilebilecek farklı tipteki TBM'lerin işletme maliyetleri arasında büyük farklılıklar mevcuttur.
- Tünel geometrik kesiti, tünel eğimi ve kurp çapları sınırlıdır.
- Çok değişken formasyonların söz konusu olduğu durumlarda TBM'in adaptasyon yeteneği sınırlıdır.
- Uzun ve büyük çapa sahip tünel projelerinde ilk yatırım maliyeti fazladır (Arıoğlu, 2010).

1.7. Zeminlere Göre Tünel İnşası

Tünel yapılarının yapım aşamaları oldukça karmaşık ve zordur. Tünellerde belirlenen güzergâh doğrultusunda kazı çalışmalarına başlanmaktadır. Yapılan bu kazı çalışmalarının ardından zeminlerin kendilerini desteksiz tutma süresi ve zeminlerin yapıları göz önünde bulundurularak sağlamlaştırma çalışmaları yapılmaktadır (Öztürk, 2013).

Tünel çalışmaları genel olarak incelendiğinde ilk adım da tünelin açılacağı zeminin mevcut durumu göz önünde bulundurulmaktadır ve gerekli olması halinde destekleme ya da iksa çalışmaları zemine uygulanmaktadır. Yapılan bu çalışmaların ardından kazı işlemleri gerçekleştirilmektedir. Kazı çalışmaları sonucunda çıkan pasa adı verilen malzemeler daha sonra tünel içinden dışarıya doğru taşınmaktadır. Bu işlemlerin ardından tünelin işlevselliğine önem verilerek kaplama, yalıtım, drenaj ve havalandırma çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Tünel çalışmalarının yapılacağı zeminler dikkate alındığında zeminlerin farklı yapıda ve özellikte olduğu görülmektedir. Bu nedenle tünelleri kaya zeminlerde inşa edilen tüneller ve yumuşak zeminlerde inşa edilen tüneller şeklinde iki sınıfa ayırmak uygun olmaktadır. Yapısı kaya olan zeminlerin taşıma gücü dikkate alındığında yumuşak zeminlerin taşıma gücünden daha fazla olduğu görülmektedir. Bunu yanında kaya zeminlerde yumuşak zeminlere kıyasla daha fazla gerilmeler meydana gelmektedir. Ayrıca oluşan bu gerilmelerin büyüklüğü örtü kalınlığına bağlı olarak artmakta ya da azalmaktadır. Tünel açılması esnasında karşılaşılan su problemleri incelendiğinde kaya zeminler de bu problemlerin genellikle geçici olduğu görülmektedir. Fakat yumuşak zeminlerde karşılaşılan su problemlerine karşı alınacak önlemlerin tüm tünel kazı çalışmaları boyunca devam etmesi mümkündür. Ayrıca kayaç zeminlerde tünel açılması esnasında genellikle daha az problem ile karşılaşılmaması nedeniyle yumuşak zeminlere göre daha kolay ve hızlı ilerlendiği görülmektedir. Bu iki farklı zemin de gerçekleştirilen çalışmaları maliyet açısından karşılaştırmak gerekirse kaya zeminlerde yapılan tüneller yumuşak zeminlerde yapılan tünellere göre daha ekonomik olmaktadır (Osmanoğlu, 2007).

1.7.1. Kaya Zeminlerde Kazı Yöntemleri ve Tünel İnşası

Kaya zemin türlerinde kazı şekline göre gelişmiş özel delgi araçları ya da klasik yöntem olarak da bilinen yöntemler kullanılmaktadır. Delme-patlatma yönteminde projeye göre önceden ayna üzerinde patlayıcı maddelerin yerleştirileceği noktalar planlanmaktadır.

Lağım delikleri adı verilen bu delikler jumbo isimli iş makinesi yardımıyla bu noktalarda açılır ve önceden hesaplaması yapılarak hesaplanmış patlayıcı maddeler bu deliklerin içerisine yerleştirilir. Patlayıcı maddelerin bulunduğu bu delikler güvenli ortam sağlandıktan sonra patlatılmaktadır. Patlatma yapıldıktan sonra tekrar güvenli bir ortam oluşturulmaktadır. Patlatma esnasında yeni açılan bölgeler bulunması durumunda bu kısımlara iksa uygulanır. Kayaçların düşme tehlikesi bulunduğu durumlarda ise bu kayaçlar düşürülmektedir. Çalışma alanının güvenliği böylece sağlanmaktadır (Kaya, 1983).

Teknolojik gelişmelerle birlikte tünel kazılarında kullanılan makinelerde gelişme göstermiştir ve tünel çalışmaları geleneksel yöntemlere göre hız kazanmıştır. Tünel kazı çalışmalarında kullanılan makineler dikkate alındığında tam kesitte tünel açma makinesinin önemi daha fazla olmaktadır. Tam kesitli tünel açma makinesi 12 ile 25 metre arasında değişen uzunluğa sahip olmakla birlikte silindirik şeklindedir. Ayrıca bu kazı makinesinde dönen başlıkta mevcuttur. Değişik birçok kesici uçlar bulunmaktadır ve bu uçlar bu makinenin ön yüzüne takılmaktadır. Bu tünel açma makinesi sayesinde 2 ile 12 metre arasında değişen farklı çaplarda kazı yapmak mümkün olmaktadır (Çakan, 2000).

Bu kesici uçlar sayesinde kazı işleminin yapılacağı kaya zeminler kolay ve daha hızlı bir şekilde öğütülebilmektedir. Öğütme işlemi sonucunda çıkan malzemeler makinede mevcut olan dönel bantlar sayesinde taşınmaktadır. Tam kesitli tünel açma makinesi ayrıca sahip olduğu kalkan sistemi ile birlikte kaya düşmelerine karşı ve iksa uygulaması sırasında güvenli bir ortam oluşturmaktadır (Öztürk, 2013).

Tünel kazısı sırasında kullanılan başka bir kazı makinesi de kollu tünel açma makinesidir. Makine bir kolun üzerine yerleştirilmiş olan dönel başlıktan oluşmaktadır. Kesici uçlar bu başlığa takılmaktadır ve böylece kaya zeminde öğütme işlemi gerçekleştirilmektedir. Kollu tünel açma makinesi farklı kesitlerde de kullanılmakta olup enerji olarak da daha az kapasiteye sahiptir. Maliyet olarak da daha ekonomiktir (Kırbaş, 1995).

1.7.2. Yumuşak Zeminlerde Tünel İnşası

Kaya gibi sağlam zeminlerin yanında çeşitli sebepler doğrultusunda yumuşak zeminlerde de tünel inşası gerçekleştirilmektedir. Yumuşak zeminler kaya zemin sınıfına göre suya doymun zeminler olmakla birlikte taşıma güçleri de düşük olan zeminlerdir. Bu nedenle tünel inşası öncesinde planlamanın iyi yapılması, daha sonra gerekli tedbirlerin

alınarak uygun iyileştirme metotlarının seçilerek uygulanması önemlidir. Bu tür zeminlerin özellikleri, mevcut yeraltı suyunun seviyesi ve bunların tünel yapısı üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Tünel açılması esnasında zemin özelliklerinin ya da yeraltı su seviyesinin konumu ayna ve etrafında sorun oluşturuyorsa gerekli önlemler alınmalı, zemin iyileştirme çalışmaları yapılarak gerekli stabilite sağlanmalı, yeraltı su seviyesi gerekli konuma indirilmeli ve denetim altına alınmalıdır (Öztürk, 2013).

Yumuşak zeminlerde zeminleri iyileştirmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu tür zeminlerin geçirimsizliğini, dayanımını, stabilitesini arttırmak amacıyla kullanılan yöntemlerden biri enjeksiyon yöntemidir. Bu yöntem ile birlikte zeminde bulunan mevcut boşluklara farklı kimyasal maddeler içeren çözeltiler verilmektedir (Bahar, 1994).

Bir başka yöntem zeminin dondurulmasıdır. Bu işlemin amacı stabilite çalışması yapılacak olan bölge etrafında bulunan zemine soğutma borularının yerleştirilerek donmuş bir bölge elde etmektir (Öztürk ve Durmuş, 2008).

Basınçlı hava kullanımı suya doymun halde bulunan zeminler için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile tünel içinde bulunan hava basıncı hidrostatik basınca eşitlenir. Böylece suyun tünel içerisine girişi önlenmektedir. Basıncın çalışan insanlar üzerindeki etkileri, pahalı ve uzun süren kurulum aşaması bu yöntemin fazla tercih edilmemesine neden olmaktadır (Öztürk, 2007).

1.7.2.1. Yumuşak Zeminlerde Destekleme Çalışmaları

Yumuşak zeminlerde tünel açılması sırasında mevcut zemin durumuna göre değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemleri boru kemer yöntemi (şemsiyeleme), aç-kapa yöntemi, boru sürme yöntemi, kalkan yöntemi şeklinde sıralamak mümkündür (Öztürk, 2007).

Boru kemer yönteminde destekleme elemanları adı verilen zemin çivileri kullanılmaktadır. Bu destekleme elemanları kullanılarak aynanın stabilitesi sağlanmaktadır. Destek elemanlarının zemin içerisine yerleştirilmesi amacıyla aynada daha önceden belirlenmiş noktalara delikler açılarak boru kemer yöntemi uygulanmaktadır. Açılmış olan bu deliklere yapılan planlamalara göre belirlenmiş olan çelik donatı veya çekme dayanımı açısından uygun olan cam lifleri yerleştirilir. Geriye kalan mevcut boşluklar ise çimento enjeksiyonu yardımıyla doldurulmaktadır. Bu uygulama sayesinde bir kemer sistemi oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu sistem ile birlikte kazı işlemleri ilerletilmektedir. Zemin

örtü kalınlığının 10 metreden az olması durumunda aç-kapa yöntemi tercih edilebilmektedir. Bu yöntemde yeterli genişlikte ve büyüklükte bir hendek açılmaktadır. Açılan bu hendekte daha sonra tünel kaplaması gerçekleştirilmektedir. Son adım olarak da üzeri kapatılmaktadır. Ayrıca bu yöntem maliyet ve uygulama açısından da avantajlı olmaktadır. Kalkan yardımıyla tünel açma sırasında iksa kullanmaya gerek olmamaktadır. Çünkü kalkan çelik malzemeden yapılmıştır ve silindirik şekline sahip olduğundan tünel içindeki boşluğu sarmakla birlikte tam kesit ilerlemeye de imkân sağlamaktadır. Bu sayede de zeminin kendisini tutmasına yardımcı olmaktadır. Kalkan kesici uç, gövde, kuyruk olmak üzere üç ana bölümden meydana gelmektedir. Kesici uçlar sayesinde kalkanın zemin içinde kolayca ilerlemesi sağlanmaktadır. Kalkanın gövde bölgesinde itici krikolar ve pompalar mevcuttur. Ayrıca kuyruk bölümünde ise kaplama yapımı sırasında kullanılması gereken ekipmanlar yer almaktadır. Yumuşak zeminlerde daha çok tercih edilen tamburlu otomatik kalkanlar olmaktadır. Suyu çok doygun ve ayrık taneli halde bulunan zeminlerde ise bentonitli otomatik kalkanlar daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yumuşak zeminlerde tünel inşası sırasında boru sürme yöntemi de mevcut duruma göre kullanılmaktadır. Yapılacak olan çalışmada planlamalar doğrultusunda ilk olarak iki adet kuyu açılmaktadır. Bu kuyulardan biri borunun döşenecek olduğu yerin girişine diğeri ise çıkışa olacak şekilde yapılmaktadır. Daha sonra giriş kuyusuna yan duvarlardan destek sağlanmasına dikkat edilerek krikolar yerleştirilmektedir. Bu aşamadan sonra borular kuyuya güvenli bir şekilde indirilmektedir. İndirme işleminin ardından borular zemine doğru itilmektedir. Boru sürme yönteminde yapılacak olan kazı işleri boruların itilmesinin ardından ya da bu işlem öncesinde gerçekleştirilmektedir (Öztürk, 2007).

1.8. Tünellerde Kullanılan Kaplama Çeşitleri

Tünel inşası için gerekli ve önemli aşamalardan biri de tünellerde yapılan kaplama çalışmalarıdır. Tarihte tünellerde kaplama amacıyla kullanılan ve fazlaca tercih edilen kaplama türünün kesme taş olduğunu söylemek mümkündür. Fakat bu kaplama türü günümüzde pek tercih edilmemektedir. Çünkü kesme taş kaplama çok fazla işçilik gerektirmektedir. Maliyet olarak düşünüldüğünde ise ekonomik olmadığı görülmektedir. Tuğla da yine tünellerde kaplama amaçlı kullanılmış bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Fakat tuğla mukavemeti düşük ve geçirimsizliği fazla olan bir malzemedir. Bu kaplama türlerinde hasarlarla karşılaşmaktadır. Zemin ile kemer dış yüzü arasındaki boşlukları

doldurmak için gerekli olan sıkı bir dolgu teminin zorluğu bu hasarların oluşmasındaki en önemli faktördür. Bu boşlukların giderilmesi yapı için önemli olmaktadır. Aksi bir durumda farklı yüklemeler sonucunda bu yapıdaki kaplamalar zarar görmektedir. Tüm bunlar göz önüne alındığında günümüzde kesme taş ve tuğlanın tünel kaplamaları için tercih edilmediği görülmektedir (Öztürk, 2007).

1.8.1. Dökme Beton Kaplama ile Oluşturulan Tüneller

Günümüzde tünel kaplamalarında önemli gelişmeler gösterilmiştir. Bu doğrultuda dökme beton kaplamalarda mevcut zemin durumuna göre farklı zemin sınıflarında fazla tercih edilen kaplama türlerindendir. Dökme beton plastik özellikte olmaktadır. Bu plastik özelliği sayesinde kalıp ile zemin arasındaki mevcut boşluklar kolayca doldurulabilmekte ve düzgün bir yüzey oluşmasına imkân vermektedir. Dökme beton kaplamalar pek çok yerde kullanılabilmektedir. Yumuşak zeminlerde tünel kaplaması sırasında dökme beton kaplamanın tercih edilmesi durumunda çalışmalar zorlaşmaktadır. Bunun nedeni işçiliklerin artmasıdır. Kaya zeminlerde ise dökme beton kaplamalar farklı seçeneklerin dikkate alınması ile gerçekleştirilmektedir. (Öztürk, 2007).

1.8.2. Püskürtme Beton Kaplama ile Oluşturulan Tüneller

Shotcrete olarak da adlandırılabilen püskürtme beton kaplamalar tünel çalışmaları esnasında kullanılan kaplama türlerinden biri olabilmektedir. Bu tür betonların varlığı 1950'lere kadar varabilmektedir. İlk zamanlarda kuru karışımlara iri agregaların karıştırılması ile elde edilmiş olsa da daha sonraki zamanlarda ıslak karışımlar ile de üretimi yapılmıştır. Tünel kazı çalışmaları esnasında yapılan kazı işlemleri sonucu mevcut zeminde gevşemeler, çatlaklar, boşluk oluşumları gibi bazı bozulmalar meydana gelebilmektedir. Bu noktada püskürtme beton önemli olmaktadır. Çünkü yapılacak olan püskürtme beton uygulaması ile oluşan bu bozulmalar giderilerek en aza indirilebilmektedir. Kazı çalışmaları sonucunda oluşan boşluklar, çatlaklar püskürtme betonu yardımıyla doldurulmaktadır. Böylece rijitlik ve dayanım gibi özellikleri arttırılmaktadır. Bu sayede zemin bir bütün gibi davranış gösterebilmekte ve kaya kütlelerinin yüklerini sabit şekilde durmakta olan zemine aktarabilmektedir. Bu yöntem ile tünel kaplamaları daha hızlı ve kolay bir şekilde

yapılabilmektedir. Püskürtme beton kaplamalar ile birlikte ayrıca havanın veya suyun meydana getirebileceği olası bozulmaların önüne de geçilebilmektedir (Öztürk, 2007).

1.8.3. Prefabrike Kaplamalar ile Tünel İnşası

Prefabrike kaplamalar yerleşim bölgelerinde gerçekleştirilen tünel yapıların da tünelin üst kısmında yer alan zemindeki oturmaları en aza indirebilmek açısından önemli olmaktadır. Bu kaplama türünde ilk olarak tünel içine kazı aygıtı yerleştirilmektedir. Ardından prefabrike elemanlar yardımıyla kapalı şekil oluşacak biçimde prefabrike elemanların bağlantı işlemleri sağlanmaktadır. Günümüzde birçok çeşit prefabrike kaplamalar mevcut olmakla birlikte en çok tercih edilenler betonarme ve lifli betondan üretilen prefabrike kaplamalardır (Öztürk, 2007).

1.9. Kaplamalara Etkiyen Yükler

1.9.1. Zemin Yükleri

1.9.1.1. Düşey Yüklerin Belirlenmesi

1.9.1.1.1. Bierbaumer Teorisi

Bu teoriye dikkate alındığında tünel kaplama kısmına etki eden düşey yük, H tünel üst kısmında yer alan zemin örtü kalınlığını, α bir katsayını belirtmek üzere yüksekliği $h=\alpha.H$ olan bir parabol yardımı ile sınırlandırılmış zeminin kütlesinin ağırlığı olarak ifade edilmektedir. α katsayısının bulunmasında tünele etki eden zemin kütlesi düşey yükünün bu yüke ters yönde olan sürtünme kuvvetiyle azaldığı varsayılmıştır. Tüm bunlar göz önüne alındığında; ϕ içsel sürtünme açısını, $f=\tan\phi$ sürtünme katsayısını, P_h yatay zemin itkisini ifade etmek üzere, sürtünme kuvveti:

$$P_f = 2f.P_h \rightarrow P_h = 2 \cdot \tan \phi \cdot \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \cdot \frac{H^2 \gamma}{2} \quad (1.1)$$

Bağıntısı ile b ve h_t ifadeleri sırasıyla tünel genişliğini ve yüksekliğini belirtirken bu P_v yükünün etkilediği genişlik;

$$B = b + 2.h_t \cdot \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1.2)$$

Bağıntısı yardımı ile birlikte hesaplanabilmektedir. Düşey yük ise aşağıdaki bağıntı ile bulunabilmektedir.

$$P_v = \gamma.H.B - P_f \quad (1.3)$$

Burada B ve P_f ifadeleri yerine yazılırsa aşağıda verilen bağıntı elde edilir.

$$P_v = H\gamma \left[b + 2h_t \cdot \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \right] - \tan \varphi \cdot \tan^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \cdot H^2\gamma \quad (1.4)$$

Burada α katsayısı $P_v = \alpha.H\gamma.B$ bağıntısından;

$$\alpha = \frac{P_v}{H.\gamma.B} \quad (1.5)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu ifadede B 'nin ve P_v 'nin bağıntıları yerine yazılırsa aşağıdaki formül bulunur.

$$\alpha = 1 - \frac{\tan \varphi \cdot \tan^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \cdot H}{b + 2h_t \cdot \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (1.6)$$

Burada yöntemin uygulanmasında $H \leq B$ için $\alpha=1,00$ ve $H \geq 5B$ için ise

$\alpha = \tan^4\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)$ alınacağı ifade edilmelidir. Diğer taraftan doğruluğu tam anlamıyla

denememiş bile olsa büyük derinliklerde ve içsel sürtünme açısının büyük olduğu durumlarda daha iyi sonuç alındığı belirtilmektedir (Szechy, 1970).

1.9.1.1.2. Mailart Teorisi

Bu teori Mailart tarafından geliştirilmiştir. Bu teoriye dikkate alındığında, büyük dağ kütlesi içerisinde açılımı yapılan tüneller nedeniyle zemin kütlelerinde başlangıçtaki gerilme dağılımının tümüyle değişmediği kabulü yapılmaktadır. Zira bunun nedeni olarak da açılan tünel hacminin dağ hacmine oranının çoğunlukla çok küçük olduğu belirtilmektedir. Bu teori göz önüne alındığında zeminin dairesel kesit olan tünele radyal yönde uyguladığı basınç gerilmesi (σ_{ro}); f_r tünel açılan kaya basınç dayanımı, k kaya cinsine bağlı olarak deneylerle bulunması gereken bir katsayı, R tünel çapı, f_l kaplamanın dayanımı olmak üzere:

$$\sigma_{ro} = \frac{(H\gamma)^2 - (f_r)^2}{k(10 + f_r)^2} \quad (1.7)$$

Şeklinde belirtilmiştir. Mailart'a göre ön boyutlandırma için kaplama kalınlığı;

$$t = R \frac{p_v}{f_l} \quad (1.8)$$

Bağıntısı yardımı ile bulunmaktadır (Szechy, 1970).

1.9.1.1.3. Eszto Teorisi

Tünel kazı çalışmalarının ardından kırılma yüzeylerinin yeryüzüne kadar vardığı Eszto tarafından gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda Eszto tünel genişliğini de göz önüne alan bir kaya basınç teorisi geliştirmiştir. Geliştirilen bu teoride kırılma yüzeylerini düzlem olmadığını ikinci derece parabol olduğu kabulünü yapmıştır. Bu kabul dikkate alındığında kırılma açısı β , tünel tavan kısmının köşesini örtü zemini yüzeyine birleştiren doğrunun eğim açısı olacak şekilde belirtilmiştir. Kesin bir şekilde bulunmasının güç olmasına karşın yine de zor olan bu açının pratik değeri aşağıdaki gibidir.

$$\beta = 45 + \frac{\phi}{2} \quad (1.10)$$

Bu teoride, H derinliğinde CD=b genişliğinde bir tünel çalışması yapıldığında bu tünelin CDAB prizmasıyla sınırlı zemin ağırlığını taşımadığını, bunun bir kısmının sürtünme ve kohezyon nedeniyle bitişik kütlelere aktarıldığı kabulü yapılmaktadır. Bu doğrultuda örtü zemininden alınan dh kalınlığındaki bir EF tabakasının ağırlığı $\gamma \cdot b \cdot dh$ olarak ifade edilmektedir. Bu ağırlık h derinliğinde CD bölgesine değil OH bölgesine yayılmaktadır. Diğer taraftan FH doğrusunun F noktasından geçen kırılma parabolünün normali olduğu ve düşeyde δ açısı yaptığı kabulü yapılmaktadır. Kalınlığı dh olan tabakanın h derinliği için meydana getirdiği dp gerilmesi tünel tavan kısmına etki etmekte ve $b+2h \cdot \tan \delta$ genişliğindeki düzleme yayılmaktadır. Buradan bir denge yazılmak istenirse aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\gamma \cdot b \cdot dh = (b + 2h \cdot \tan \delta) dp \quad (1.11)$$

Burada dp aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$dp = \frac{\gamma \cdot b \cdot dh}{b + 2h \cdot \tan \delta} \quad (1.12)$$

Bu bağıntı ile birlikte tünel tavan kısmına etki eden toplam yükü (1.12) ifadesinin tünel anahtarı ile örtü zemini üst yüzeyi arasında;

$$p_v = \int_0^H \frac{b \cdot \gamma \cdot dh}{b + 2h \cdot \tan \delta} \text{ entegresinden } b' = b \cdot \cot \beta \text{ olmak üzere;}$$

$$p_v = \gamma \frac{b'}{\left(1 - \frac{b'}{H}\right)^2} \left[\ln \frac{H}{b'} - 1 - \frac{b'}{H} \right] \quad (1.13)$$

olarak belirtilmektedir. Buna benzeyen işlemler açıklığın dairesel kemer şeklinde olması hali için yapılırsa aşağıdaki ifade elde edilmektedir.

$$p_v = \frac{R \cdot \cot \beta}{\left(1 - \frac{R}{H \cdot \tan \beta}\right)^3} \left[1 - \frac{R}{H \cdot \tan \beta} - \frac{R}{H \cdot \tan \beta} \ln \frac{H}{R} \tan \beta \right] \quad (1.14)$$

Bu teori pratik olmamasının yanı sıra tünel problemlerinin açıklanmasında fazlaca tercih edilmemektedir (Szechy, 1970).

1.9.1.1.4. Terzaghi Teorisi

Terzaghi'nin geliştirmiş olduğu teoride tünel üzerine etki eden yatay ve düşey basınçların aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanacağı belirtilmektedir.

$$p_h = \gamma R \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \left(1 + \frac{H}{R} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1.15)$$

Bağıntısı yardımıyla tünele etki eden yatay basınç hesaplanmaktadır.

$$p_v = \frac{\gamma B_1 - c}{\tan \varphi} \left[1 - \exp \left(- \frac{H}{B_1} \tan \varphi \right) \right] \quad (1.16)$$

bağıntısı yardımı ile tünel üzerine etki eden düşey basınç hesaplanmaktadır. Burada;

$R \rightarrow$ Tünel kesiti yarıçapı

$H \rightarrow$ Tünel üzerindeki mevcut zemin örtüsü kalınlığı

$c \rightarrow$ Mevcut zeminin kohezyonu

$$B_1 = R \left\{ \cos \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) + \left[1 + \sin \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right\} \text{ şeklindedir.}$$

Tünel üzerinde düşey basınç yapan etkili zemin yüksekliği $h = p/\gamma$ olması durumunda h aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$h = \frac{\gamma B_1 - c}{\gamma \tan \varphi} \left[1 - \exp \left(- \frac{H}{B_1} \tan \varphi \right) \right] \quad (1.17)$$

H değerinin yani tünel üzerindeki mevcut zemin örtü kalınlığının fazla olması durumunda ise tünele düşey basınç yapan etkili zemin yüksekliği aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$h = \frac{\gamma B_1 - c}{\gamma \tan \varphi} = \frac{\gamma R \beta - c}{\gamma \tan \varphi} \quad (1.18)$$

Burada β aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$\beta = \left\{ \cos \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) + \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \left[2.R.\sin \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \right\} \quad (1.19)$$

Aşağıda Tablo 1.1’de tünel boyutu dikkate alınarak h değerleri verilmiştir. Çizelgede mevcut (-) işaretli olan h ifadeleri çok küçük değerlerdir ve ihmal edilebilir düzeydedir. Böylece $h=\alpha H$ şeklinde belirtilebilir. Çizelgede ayrıca h ifadesindeki α değerlerinin de zemin türüne göre farklılık gösterdiği görülmektedir.

Tablo 1.1. Farklı zeminler için etkili zemin yükseklikleri

Zemin No	Zemin Türü	γ (kN/m ³)	φ (°)	c (MPa)	β	h (m)
1	Sıkı zemin	16.50	33	0.4	1.706	2.63R-0.37
2	Kumlu zemin	18.50	25	0.3	1.775	3.81R-0.35
3	Killi kum	18.50	22	0.7	1.801	4.46R-0.94
4	Marn	16	42	1	1.623	1.80R-0.69
5	Kuru kil	18	45	1	1.594	1.59R-0.56
6	Islak kil	20	18	3	1.835	5.65R-4.62
7	Şist	21	33	4	1.706	2.63R-2.93
8	Kalker	27	47	3.5	1.574	1.47R-1.21
9	Gre	23	50	3.5	1.543	1.29R-1.28
10	Gnays	27	35	4	1.688	2.41R-2.12
11	Granit	29	40	5	1.642	1.96R-2.05

Aşağıdaki Tablo 1.2’de farklı zemin ve farklı tünel yarıçaplarına göre h değerleri hesaplanmıştır. Burada ayrıca H/R oranı yani zemin örtü kalınlığının tünel yarıçapına oranı 1’den çok büyük olması durumu dikkate alındığında ikinci terimde birinci terime göre ihmal edilebilir. Bu durumda bağıntı 1.20’deki şekilde olur.

$$p_h = \gamma H \tan^2 \left(\frac{\Pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1.20)$$

H değerinin yani tünel üzerindeki mevcut zemin örtü kalınlığının tünel çapına oranının çok büyük olması durumunda bu bağıntı kullanılabilir.

Tablo 1.2. Farklı zemin ve tünel yarıçapına göre etkili zemin örtü kalınlığı

R (m)	Zemin Cinsi										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2.63	3.81	4.46	1.80	1.59	5.65	2.63	1.47	1.29	2.41	1.96
2	5.26	7.62	8.92	3.60	3.18	11.30	5.26	2.94	2.58	4.82	3.92
3	7.89	11.43	13.38	5.40	4.77	16.95	7.89	4.41	3.87	7.23	5.88
4	10.52	15.24	17.84	7.20	6.36	22.60	10.52	5.88	5.16	9.64	7.84
5	13.15	19.05	22.30	9	7.95	28.25	13.15	7.35	6.45	12.05	9.80
6	15.78	22.86	26.76	10.80	9.54	33.90	15.78	8.82	7.74	14.46	11.76
7	18.41	26.67	31.22	12.60	11.13	39.55	18.41	10.29	9.03	16.87	13.72
8	21.04	30.48	35.68	14.40	12.72	45.20	21.04	11.76	10.32	19.28	15.68
9	23.67	34.29	40.14	16.20	14.31	50.85	23.67	13.23	11.61	21.69	17.64
10	26.30	38.10	44.60	18	15.90	56.50	26.30	14.70	12.90	24.10	19.60

Aşağıdaki Tablo 1.3’de Terzaghi etkili zemin yüksekliğini kayaç türüne bağlı bir şekilde vermek koşulu ile teorisine ilişkin sonuçları basitçe belirtmiştir.

Tablo 1.3. Terzaghi'ye göre tünel tavanına etkiyen zemin yükseklikleri

Grup	Kayanın Özellikleri	Etkili Zemin Yüksekliği	Uyarılar
1	Sağlam ve dayanıklı	-	Taş düşmesi varsa hafif iksa gerektirebilir.
2	Sağlam tabakalı ve şistisel	0-0.5 (b)	Hafif kaplama gerektirir.
3	Eklemlili	0-0.25 (b)	Yük noktadan noktaya ani olarak değişebilir.
4	Orta hasarlı	0.25-0.35(b/2+h _t)	Yanal basınç olmaz.
5	Çokça hasarlı	0.35-1.1(b/2+h _t)	Yanal basınç az olur ya da hiç olmaz.
6	Tamamen ufalanmış ve kimyasal olarak parçalanmamış	1.1(b/2+h _t)	Önemli yan basınçlar oluşur. Sızan suların yumuşatıcı etkisi tabanda önemli önlemlerin alınmasını gerektirir.
7	Orta derinlikte sıkışan	(1.1-2.1)(b/2+h _t)	Enine elemanlı radyeler gerektiren büyük yanal basınçlar meydana gelir.
8	Çok derinlikte sıkışan	(2.1-4.5)(b/2+h _t)	

Terzaghi'ye göre tünel çapı dikkate alınarak sekiz zemin sınıfı için etkili zemin örtü kalınlığı da Tablo 1.4'te verilen değerleri almaktadır.

Tablo 1.4. Farklı tünel yarıçapları için örtü zemini kalınlıkları (h)

R (m)	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0-1.00	0-0.50	1.00-1.40	1.40-4.40	4.40	4.40-8.40	8.40-18.00
2	0	0-2.00	0-1.00	2.00-2.80	2.80-8.80	8.80	8.80-16.80	16.80-36.00
3	0	0-3.00	0-1.50	3.00-4.20	4.20-13.20	13.20	13.20-25.20	25.20-54.00
4	0	0-4.00	0-2.00	4.00-5.60	5.60-17.60	17.60	17.60-33.60	33.60-72.00
5	0	0-5.00	0-2.50	5.00-7.00	7.00-22.00	22.00	22.00-42.00	42.00-90.00
6	0	0-6.00	0-3.00	6.00-8.40	8.40-26.40	26.40	26.40-50.40	50.40-108
7	0	0-7.00	0-3.50	7.00-9.80	9.80-30.80	30.80	30.80-58.80	58.80-126
8	0	0-8.00	0-4.00	8.00-11.20	11.20-35.20	35.20	35.20-67.20	67.20-144
9	0	0-9.00	0-4.50	9.00-12.60	12.60-39.60	39.60	39.60-75.60	75.60-162
10	0	0-10.00	0-5.00	10.00-14.00	14.00-44.00	44.00	44.00-84.00	84.00-180

Terzaghi teorisi dikkate alınarak oluşturulan bu yöntem bu konu üzerinde geliştirilmiş diğer teorilerle karşılaştırıldığında daha kapsamlıdır. Geliştirilmiş bu yöntemde tünel üzerindeki örtü kalınlığı göz önüne alınmaktadır. Bu yöntem dikkate alındığında daha önceki

(1.16) bağıntısında yer alan $\frac{\gamma B_1 - c}{\tan \varphi}$ ifadesi yerine $2\Delta\gamma R$; $1 - \exp\left(-\frac{H}{B_1} \tan \varphi\right)$ ifadesi yerine yazılırsa aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$p_v = 2\Delta\gamma R\alpha \quad (1.21)$$

Bu bağıntıda yer alan Δ ifadesi kayaç zeminler için 2.5; diğer zeminler için 4 olmaktadır. Ayrıca $H \rightarrow \infty$ olması durumunda $\alpha=1$ olduğunda düşey basınç aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$p_v = 2\Delta\gamma R \quad (1.22)$$

H ifadesinde küçük değerler dikkate alındığında α azaltma katsayısı aşağıdaki hali alabilmektedir.

$$\alpha = 1 - \exp\left(-\frac{H}{R} \frac{\tan \varphi}{\beta}\right) \quad (1.23)$$

Bu dikkate alındığında Tablo 1.5’de farklı zemin sınıfları için hesaplanmış $\tan \varphi / \beta$ değerleri verilmiştir. Ayrıca bu çizelgedeki mevcut $\tan \varphi / \beta$ değerleri ile birlikte H/R ‘nin farklı değerlerine göre hesaplanan α değerleri de Tablo 1.6’da verilmiştir. (Guerrin, 1969).

Tablo 1.5. Farklı zemin sınıflarına göre hesaplanan $\tan \varphi / \beta$ değerleri

Zemin Cinsi	$\varphi(^{\circ})$	$\tan \varphi$	β	$\tan \varphi / \beta$
1	33	0.649	1.706	0.380
2	25	0.466	1.775	0.263
3	22	0.404	1.801	0.224
4	42	0.900	1.623	0.555
5	45	1	1.594	0.627
6	18	0.325	1.835	0.177
7	33	0.649	1.706	0.380
8	47	1.072	1.574	0.681
9	50	1.192	1.573	0.773
10	33	0.700	1.688	0.415
11	40	0.839	1.642	0.511

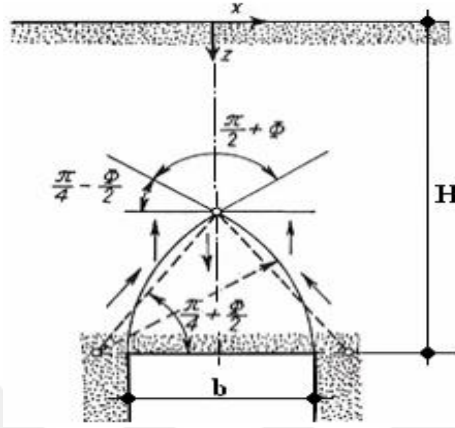
Tablo 1.6. Seçilen $\tan \varphi / \beta$ değerleri ve H/R'nin değerlerine göre hesaplanan α değerleri

H/R	Zemin Cinsi										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.316	0.231	0.200	0.425	0.465	0.162	0.316	0.493	0.538	0.339	0.400
2	0.532	0.409	0.361	0.670	0.714	0.298	0.532	0.743	0.786	0.564	0.640
4	0.680	0.545	0.489	0.810	0.847	0.412	0.680	0.870	0.901	0.712	0.784
5	0.781	0.650	0.591	0.891	0.918	0.507	0.781	0.934	0.954	0.809	0.870
6	0.850	0.731	0.673	0.937	0.956	0.587	0.850	0.966	0.979	0.874	0.922
10	0.897	0.793	0.739	0.964	0.976	0.654	0.897	0.983	0.990	0.917	0.953
100	0.977	0.927	0.893	0.996	0.998	0.829	0.977	0.998	0.999	0.984	0.994
∞	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

1.9.1.1.5. Balla Teorisi

Balla tünel inşası sırasında yapılan kazı çalışmalarının ardından tünel üzerinde kalan zeminin gevşemesi sonucu dökülmesi ile birlikte mevcut zeminde düşey hareketin oluştuğunu kabul etmektedir. Yapılan bu kabul sonucunda kayma dairesel düzlemler

boyunca oluşmaktadır. Meydana gelen bu kayma düzlemleri tünel yapısının üst köşe kısmından geçmekte olup ayrıca iki düzlem tünelin düşey ekseninde kesişmektedir. Aşağıda verilmiş olan Şekil 1.3'te Balla teorisi göz önüne alındığında zemin yükünün hesabı amacıyla dikkate alınan modele yer verilmiştir.



Şekil 1.3. Balla teorisi göz önüne alındığında zemin yükünün hesabı amacıyla dikkate alınan model (Öztürk, 2007)

Kayan zemine etki eden kuvvetlerin dengesinden tünel tavan kısmındaki üniform düşey yük aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$p_v = \gamma H \left[F_H + \frac{b}{H} F_B - \frac{c}{H\gamma} F_C \right] \quad (1.24)$$

Formülde yer alan F_H , F_B , F_C zemindeki içsel sürtünme açısına bağlı birer katsayıdır. Bu katsayılar Tablo 1.7'de yer almaktadır (Szechy, 1970).

Tablo 1.7. İçsel sürtünme açısına bağlı F_H , F_B , F_C katsayıları

ϕ	F_H	F_B	F_C
10°	0.6814	0.1502	1.8066
20°	0.4145	0.2577	1.6084
30°	0.2109	0.3277	1.3667
40°	0.0757	0.3671	1.1016
45°	0.0333	0.3774	0.9667

1.9.1.1.6. Suquet Teorisi

Bu teori Paris metrosunun inşası esnasında Suquet tarafından geliştirilmiştir. Bu teori dikkate alındığında tünel yapısı üzerine etki edene toplam düşey basınç aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$p_v = \frac{2\gamma}{H} \left[\frac{\frac{b}{2} \left(H + \frac{h_t}{3} \right)}{\tan \xi} + \frac{(H + h_t)^2}{2} \right] \quad (1.25)$$

Bağıntıda yer alan h_t ifadesinin H 'a göre ihmal edilebilecek kadar küçük olması durumunda toplam düşey basınç bağıntısı aşağıdaki gibidir.

$$p_v = 2\gamma \left(\frac{b}{2 \tan \xi} + \frac{H}{2} \right) \quad (1.26)$$

Ayrıca bu araştırmacı ön boyutlandırmalar da tünel tavanına etki eden basıncın aşağıda verilmiş olan bağıntı yardımıyla belirlenebileceğini savunmaktadır.

$$p_v = H(\gamma - \gamma') \quad (1.27)$$

Bu bağıntıda yer alan γ' aşağıdaki gibidir.

$$\gamma' = \frac{\frac{f_r}{b}}{\tan \varphi} + H \quad (1.28)$$

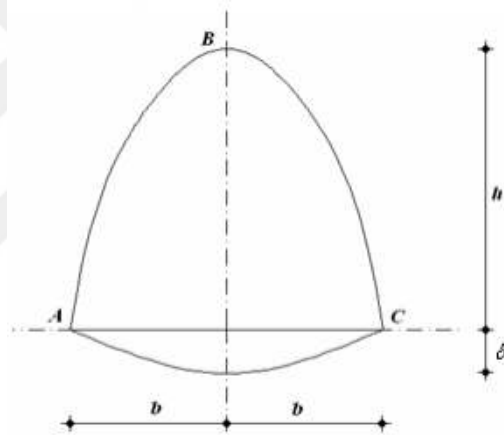
Bağıntıda yer alan f_r tünelin açıldığı kayadaki bir eksenli merkezi basınç dayanımını ifade ederken, b ise tünel açıklığını belirtmektedir (Szechy, 1970).

1.9.1.1.7. Kommerell Teorisi

En eski ve en çok bilinen teoriler arasında olan Kommerell teorisi ile birlikte tünel kaplamasına yük teşkil eden zemin yüksekliği ve iksanın yer değiştirmesine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Kommerell teorisi ile tünel kaplamasına aşağıda gösterilen Şekil 1.4’de yer alan ABC parabolü ile sınırlandırılmış olan zemin kütlesi sonucu ortaya çıkan yükün etki ettiği kabul edilmektedir. Şekil 1.4’te gösterilmiş olan ve zemin gevşemesinden kaynaklanan δ olarak ifade edilen tünel tavanına etki eden yük altında anahtar kesitinin yer değiştirmesi aşağıda verilmiş olan bağıntı ile belirlenebilmektedir.

$$\delta = h.\theta$$

(1.29)



Şekil 1.4. Tünel tavan kısmına etki eden zemin basıncını sınırlayan parabol (Öztürk, 2007)

1.29’deki bağıntıda yer alan θ tünel üzerine etki eden zemin kütlesinin gevşeme katsayısını belirtmektedir. Aşağıda verilmiş olan Tablo 1.8’de farklı zeminler için θ katsayısı değerleri gösterilmiştir.

Tablo 1.8. Farklı zeminlere göre yaklaşık gevşeme katsayıları (Dursun, 1971)

Zemin	Gevşeme (θ)
Gevşek Taneli (Kum)	% 1-3
Orta Derede Kohezyonlu (Kuru Kil)	% 3-5
Kohezyonlu (Marn, Çakıllı Kil)	% 5-8
Yumuşak Kayalar (Kum Taşı, Kireç Taşı)	% 8-12
Sert Kayalar	% 10-15

Buna göre tünel tavan kısmına etki eden toplam düşey yük aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$p_v = \frac{\pi}{2} \cdot \gamma \cdot \frac{b}{2} \cdot h = \frac{\pi}{2} \cdot \gamma \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{\delta}{\theta} \quad (1.30)$$

Tünel yapısının yumuşak zeminlerde yapılması halinde tünel kaplama kısımlarının tasarımında düşey basınçların yanında yatay basınçlar da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Kommerell teorisinde kayalarda gevşeme meydana gelmemesi halinde veya çok küçük derecede olması durumunda zeminin bu doğrultuda da anahtar kesiti yer değiştirmesi (δ) ile birlikte etkili zemin yüksekliği olan h değeri arasındaki $\delta = h \cdot \theta$ bağıntısının deneyler ile doğrulanamadığı belirtilmelidir (Öztürk, 2007).

1.9.1.1.8. Forchheimer Teorisi

Bir bidon tabanında bir boşluk açılarak ayırık taneli halde bulunan malzemelerin meydana getirdiği basınçlar Forchheimer tarafından incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda ortaya çıkan veriler değerlendirilmiştir. Açılan bu boşluğu açıp kapayan hareketli bir plakaya etki eden basınçların plaka üzerindeki kumun yüksekliğine bağlı olmadığı görülmüştür. Tüm bunlar dikkate alınarak b açıklığındaki bir tünelin tavanına etki eden basıncı aşağıda yer alan bağıntı yardımıyla hesaplamak mümkündür.

$$p_v = \frac{1}{4} \gamma \cdot b \frac{1 + 2 \tan^2 \varphi}{\tan \varphi} \quad (1.31)$$

Yukarıda verilmiş olan 1.31. bağıntısı ile teknik literatürde daha çok tünel ağız kısımlarındaki kesitler için uygun olduğu belirtilmektedir (Szechy, 1970).

1.9.1.1.9. Ritter Teorisi

Bu teoride tünel yapısının üst kısmına etki eden örtü zemini kütesini sınırlayan eğri boyunca sürtünme kuvvetinin etki ettiği düşünülmektedir. Bu doğrultuda tünel tavan bölümüne etki eden yük P_g olarak ifade edilen zemin kütesinin ağırlığından, P_f olarak ifade edilen sürtünme kuvvetinin çıkartılmasıyla bulunmaktadır. Bu noktada sürtünme kuvveti aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$P_f = \gamma z \int_0^b \frac{ds}{\cos \alpha} \quad (1.32)$$

Gevşeyen zemin kütesinin ağırlığı ise aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir.

$$P_g = \gamma \int_0^b y \cdot dx \quad (1.33)$$

Tüm bunlar dikkate alındığında düşey yük $P_v = P_g - P_f$ ifadesindeki eşitlikte sağ bölümdeki terimler yerine yukarıdaki ifadeler yazılırsa ve bağıntı tekrar düzenlenirse düşey yük aşağıdaki gibi olur (Szechy, 1970).

$$P_v = \gamma b \left(\frac{b^2}{48z} - z \right) \quad (1.34)$$

1.9.1.1.10. Engesser Teorisi

Zemin basınçlarının bulunması amacıyla Engesser tarafından geliştirilen bu teori ile kagir temellerdeki kemerleşme hareketidir. Bu noktadan yola çıkarak tünel üstüne dairesel bir zemin kütlesinin yük olarak etkidiği kabul edilmektedir. Tüm bunlar dikkate alındığında tünele etkileyen düşey basınç aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$p_v = 4b^2 \cdot \gamma \left[\frac{h \cdot \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)}{2h \cdot \tan \varphi + b \cdot \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)} + \frac{\tan \varphi}{6} \right] \quad (1.35)$$

Bu bağıntıda h etkili örtü kalınlığını, b tünel genişliğini, φ zeminin içsel sürtünme açısını, γ ise birim hacim ağırlığını ifade etmektedir. Eğer içsel sürtünme açısı çok küçük olmazsa ve tünel genişliği de çok büyük olmazsa bu durumda düşey basınç derinliğe bağlı olmaksızın aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$p_v = 4b^2 \cdot \gamma \left[\tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{\cot \varphi}{2} + \frac{\tan \varphi}{6} \right] \quad (1.36)$$

Araştırmacı yapmış olduğu deneysel çalışmalar doğrultusunda derinliğin genişliğin 1,5 katından büyük olması durumlarında teorik sonuçlar deneysel sonuçlara yaklaşıırken, küçük olması durumlarında ise sonuçların birbirinden uzaklaştığı göstermiştir. Tünel inşası sırasında yapılan kazı çalışmalarında kazının patlayıcı madde kullanılmasına bağlı olarak ateşlemeden dolayı gevşeme bölgesi oluşmaktadır. Oluşan bu bölgedeki zemin kütlesinin ağırlığı da tünel kaplamasına etki etmektedir. Bu doğrultuda x olarak ifade edilen gevşeme bölgesi yüksekliği aşağıdaki bağıntı yardımıyla bulunabilmektedir.

$$x = \frac{2h}{\tan \varphi} - \frac{b}{2} \tan \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) - h_t \quad (1.37)$$

Gevşeme bölgesi yüksekliği (B) ise aşağıdaki ifade ile gösterilmektedir.

Tünel kaplamasına etki eden düşey yükün ise aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanması mümkündür.

$$p_v = A \cdot \gamma = \frac{2}{3} b \cdot h \cdot \gamma \quad (1.41)$$

Yukarıdaki 1.41'deki bağıntıda h değeri $h = \frac{b}{2} \cdot \tan \varphi$ şeklinde yerine yazılırsa p_v ifadesi aşağıdaki şekli alır.

$$p_v = \frac{1}{3} \cdot \frac{b^2}{\tan \varphi} \cdot \gamma \quad (1.42)$$

Rusya'da yapılan uygulamalarda bu teoremin $\frac{b}{2 \cdot \tan \varphi} - \frac{b}{\tan \varphi}$ arasında iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir (Szechy, 1970; Dursun, 1971).

1.9.1.2. Yatay Yüklerin Belirlenmesi

Tüneller inşa edilirken tasarım aşamasında tünele etki eden düşey yüklerin yanında tünele etki eden yatay yüklerinde göz önünde tutulmasına önem verilmelidir. Tünel yapısına etki eden basınçlar çeşitli faktörlere bağlı olmaktadır. Bu faktörler arasında tünel enkesit şekli, tünel boyutları, tünelin açıldığı zeminin mekanik özellikleri, iksanın yatay kuvvetlere karşı dayanımı sayılabilmektedir. Tüm bunlar dikkate alındığında yatay basınçların hesabı düşey basınçların hesabına göre daha kompleks yapıda olmaktadır. Terzaghi teorisi dikkate alınarak geliştirilmiş olan yöntem doğrultusunda tünellere etkiyen yatay basınç aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$p_h = \gamma R \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \left(1 + \frac{H}{R} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1.43)$$

Zemin örtü kalınlığı olan H ile tünel yarıçapı olan R değerlerinin oranlanması sonucu 1'den çok büyük olması durumunda ikinci terim birinci terime göre ihmal edilebilmektedir. Bu durumda bağıntı aşağıdaki şekli alabilmektedir.

$$p_h = \gamma.H.\tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (1.44)$$

Bağıntıdan da anlaşılacağı gibi itki ifadesi klasik Rankine teorisinden elde edilen ifadedir. Bu ifadenin kullanabilmesi için tünel üzerindeki mevcut zemin örtü kalınlığının tünel çapına oranının çok büyük olamaması gerekmektedir (Guerrin, 1969; Szechy, 1970).

Aynı kaynakta tünel inşasının yapıldığı kayaç türünün sağlam zemin olması durumunda yatay basınç aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$p_h = \frac{v}{1-v} p_v \quad (1.45)$$

Rankine teorisi dikkate alındığında kohezyonlu zeminlerde tünel tavan seviyesindeki yatay basınç aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$p_{h1} = H.\gamma.\tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) - 2c\sqrt{\tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)} \quad (1.46)$$

Rankine teorisi dikkate alındığında kohezyonlu zeminlerde tünel taban seviyesindeki yatay basınç aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanabilmektedir (Öztürk, 2007).

$$p_{h2} = (H + h_t).\gamma.\tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) - 2c\sqrt{\tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)} \quad (1.47)$$

1.9.1.3. Tünel Yapılarında Taban Basınçları

Tünel yapılarına etki eden taban basınçları göz önüne alındığında genel itibari ile tavan kısmındaki yüklerin karşısı şeklinde belirtilmeleri mümkün olmaktadır. Taban basınçları ile

tavan basınçlarının karşılaştırılması durumunda taban basınçlarının tavan basınçlarına kıyasla daha küçük olmaktadır. Bu durumun nedeni tünel tavan kısmına gelen yüklerin bir miktarının yan duvar kısımlarına aktarılmasından kaynaklanmaktadır (Szechy, 1970).

1.9.1.4. Tünel Yapılarında Yeraltı Suyunun Mevcut Olması Durumu

Tünel yapıları farklı zemin şartları altında inşa edilebilmektedir. Bu şartlardan biri de tünel yapısının yeraltı su seviyesinin altında inşa edilmesidir. Böyle bir durumla karşılaştırılması durumunda tünel çalışmaları sırasında zemin basınçlarına ek olarak su basıncının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Ayrıca tünel kaplamasının drenajlı olup olmaması da önemlidir. Çünkü tünel kaplamasının drenajlı olması durumunda su seviyesinde düşmeler meydana gelmektedir (Szechy, 1970).

1.9.1.5. Tünellerde Hareketli Yükler

Tünellere etki eden çeşitli hareketli yükler bulunmaktadır. Bu yükleri tünel içinden etki eden yükler ve örtü yüzeyinden etki eden yükler şeklinde iki sınıfa ayırmak mümkündür. Tünel içinden geçen taşıtlar veya aktarılan çeşitli malzemeler, tünel yapısına dıştan etki eden zemin ve su basınçları tünel içinden etki eden hareketli yükler arasında sayılabilmektedir. Tünel yapılarında iç kısımdan etki eden hareketli yükler önemlidir ve dikkate alınması gerekmektedir. Çünkü iç kısımdan etki eden hareketli yükler ters yönde olduklarından dolayı dış yükleri azaltmaktadır. Tünele içten etki eden hareketli yükler bazı durumlarda elverişsiz olabilmektedir (Szechy, 1970).Aşağıda bazı elverişsiz durumlara yer verilmektedir.

- İnşa edilen tünelin kesitinin dikdörtgen kesitli betonarme olması durumunda taban düz olduğu için iç yüklerin oluşturduğu kesit tesirleri dış basınçlarındakinden daha büyük olabilmektedir.
- Tünelin hidroelektrik santrallerin basınçlı iletim ve kanalizasyon olması durumunda da iç basınçlar dış basınçlara göre daha büyük olabilmektedir. Böyle bir durum olması halinde tünelin hem iç basınçlı olması durumu hemde iç basıncı olmaması durumu göz önünde bulundurularak tasarlanması gerekmektedir.

- Tünel inşası yapılan zeminin çok yumuşak ve gevşek olması durumunda ise asimetrik yüklemelerden kaynaklı yerel momentler meydana gelebilmektedir. Bu durumda da iç yükler göz ardı edilmeden dikkate alınmalıdır.

Tünellere ayrıca örtü zemini yüzeyinden de etki eden yükler bulunmaktadır. Tünelin sığ tünel olması durumunda zemin örtüsü üzerinde bulunmakta olan yapılar ya da taşıtlar ek yük oluşturmaktadır. Teknik literatür incelendiğinde örtü zemini kalınlığının 8 metreden fazla olması halinde ek yüklerin ihmal edilmesi mümkün olamamaktadır (Szechy, 1970).

1.10. Kaplamaların Yapısal Çözümlemesinde Kullanılan Bazı Yöntemler

1.10.1. Ampirik Yöntemler

1.10.1.1. RSR Zemin Sınıflandırma Ölçütü

RSR sınıflandırma ölçütü 1972 yılında Wickham, Tiedemann ve Skinner tarafından geliştirilmiştir. Bu sınıflandırma ölçütünün amacı zemin kalitesini ve uygun iksa gereksinimini belirlemektir. RSR sınıflandırma ölçütü aşağıdaki gibidir.

$$RSR = A + B + C \quad (1.48)$$

Burada A, B ve C birer değişkendir (Hudson ve Harrison, 1997). Bu değişkenler şu şekilde tanımlanmaktadır.

A: Kayacın kökeni (magmatik, metamorfik, sedimenter), kayanın sertliği (sert, orta, yumuşak, ayrışmış), jeolojik yapısı (yekpare, az faylı ve kıvrımlı, orta derecede faylı veya kıvrımlı, çok faylı veya kıvrımlı) hakkında bilinenleri,

B: Tünel açım yönündeki süreksizlikler (eklem aralığı, eklem yönelimi) konusundaki bilgiler,

C: Su akımı miktarı (yaklaşık 30 cm uzunluğundaki tünelde dakikada litre olarak), eklem durumu (iyi, orta, zayıf), A ve B değişkenlerinin birlikte değerlendirilmesinden elde edilen bilgileri ifade etmektedir.

RSR ölçütünün belirlenmesinde kullanılan A, B ve C değişkenlerinin değerleri aşağıda Tablo 1.9, Tablo 1.10, Tablo 1.11’de verilmiştir.

Tablo 1.9. A parametresi

Ana Kaya Tipi				
	Sert	Orta	Yumuşak	Ayrışmış
Magmatik	1	2	3	4
Metamorfik	1	2	3	4
Tortul	2	3	4	4
Jeolojik Yapı				
	Masif	Az Faylı veya Kıvrımlı	Orta Dereceli Faylı veya Kıvrımlı	Çok Faylı veya Kıvrımlı
Tip 1	30	22	15	9
Tip 2	27	20	13	8
Tip 3	24	18	12	7
Tip 4	19	15	10	6

Tablo 1.10. B parametresi

	Eksene Dik					Eksene Paralel		
	Açma Yönü							
	Her İkisi	Eğim Yönünde		Eğimin Ters Yönde		Her İkisi		
	Önemli Eklemlerin Eğimi					Önemli Eklemlerin Eğimi		
	0°-20°	20°-50°	Düşey (50°-90°)	20°-50°	Düşey (50°-90°)	0°-20°	20°-50°	Düşey (50°-90°)
Çok Sık Eklemlili	9	11	13	10	12	9	9	7
Sık Eklemlili	13	16	19	15	17	14	14	11
Orta Derecede Eklemlili	23	24	28	19	22	23	23	19
Orta-Bloklı	30	32	36	25	28	30	28	24
Bloklı- Masif	36	38	40	33	35	36	34	28
Masif	40	43	45	37	40	40	38	34

Tablo 1.11. C parametresi

Beklenen Su Akımı Dakikada Litre (1000 ⁸)	A ve B Parametreleri Toplamı					
	13-44			45-75		
	Eklem Durumu			Eklem Durumu		
	İyi	Orta	Fena	İyi	Orta	Fena
Hiç Yok	22	18	12	25	22	18
Az (<756 Dakikada Litre	19	15	9	23	19	14
Orta (756-3780 Dakikada Litre)	16	11	7	21	16	12
Çok (>3780 Dakikada Litre	10	8	6	18	14	10

Teknik literatür dikkate alındığında RSR değerinin 19'dan küçük olması durumunda zeminlerin kuvvetli iksa, RSR değerinin 80 ya da daha fazla olması durumunda ise zeminlerin iksa gerektirmediği görülmektedir. RSR değeri yardımıyla farklı çaplardaki tüneller için gereken iksayı bulmak maksadı ile birtakım çizelgeler oluşturulmuştur (Öztürk, 2007).

1.10.1.2. RMR Zemin Sınıflandırma Ölçütü

Zemin kalitesinin bulunması amacıyla kullanılan bir sınıflandırma ölçütüdür. RMR zemin sınıflandırma ölçütünün bu özelliği dikkate alındığında tünel inşa çalışmaları sırasında en uygun iksa sisteminin seçilmesinde belirleyici rol oynamaktadır. RMR ölçütü değeri belirlenirken çeşitli faktörler göz önünde tutulmaktadır. Bu faktörler zemin kalitesi olarak da ifade edilen RQD, mevcut zemin dayanımı, yeraltı su seviyesinin konumu, çatlak özellikleri şeklindedir. RMR değeri mevcut olan her değişken için o değişkene denk gelen değerlendirme puanlarının toplanması sonucu hesaplanabilmektedir (Hunson ve Harrison, 1997; Öztürk, 2007).

$$RMR = \sum(\text{Sınıflandırma Değişkenleri}) + (\text{Süreksizlik Yönelimi}) \quad (1.49)$$

Aşağıdaki Tablo 1.12'de RMR ölçütüne göre hem zemin sınıflarına hemde bu zemin sınıflarının yorumlanmasına yer verilmiştir.

Tablo 1.12. RMR ölçütüne göre zemin sınıfları ve zemin sınıflarının yorumu

Toplam Puana Göre Tanımlanan Zemin Sınıfları					
Puanı	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Sınıf Numarası	I	II	III	VI	V
Tanımı	Çok İyi	İyi	Orta	Kötü	Çok Kötü
Zemin Sınıflarının Yorumu					
Ortalama Kemerlenme Süresi	15 m Çap İçin 20Yıl	10 m Çap İçin 1 Yıl	5 m Çap İçin 1 Hafta	2.5 m Çap İçin 10 Saat	1 m Çap İçin 30 Dakika
Zeminin Kohezyonu (KPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Zeminin Sürtünme Açısı(°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

1.10.1.3. Q Zemin Sınıflandırma Ölçütü

NGI sınıflandırma ölçütü olarakta bilinmekte olan Q zemin sınıflandırma ölçütü 1974 yılında Barton ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş bir ölçüttür.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (1.50)$$

J_n : Eklem takımı katsayısı

J_r : Eklem pürüzlülük katsayısı

J_a :Eklem ayrışma katsayısı

J_w : Eklem suyu indirgeme katsayısı

SRF: Gerilme indirgeme katsayısı

Aşağıda verilmiş olan Tablo 1.13 yardımıyla bu ölçüt kullanılarak zemin kalitesinin belirlenebilmektedir (Hudson ve Harrison, 1997).

Tablo 1.13. Zeminin Q değerleri ve sınıfları

Q Değeri	Zemin Sınıfı
1000-400	Son Derece İyi
400-100	Pek Çok İyi
100-40	Çok İyi
40-10	İyi
10-4	Orta
4-1	Zayıf
1-0,1	Çok Zayıf
0.1-0.01	Çok Fazla Zayıf
0.01-0.001	Son Derece Zayıf

Teknik literatür dikkate alındığında tünel tavan kısmına etki eden iksa basıcının aşağıda verilmiş olan bağıntı yardımı ile bulunabileceği belirtilmektedir.

$$p_v = \frac{2 \cdot \sqrt{J_n} Q^{\frac{1}{3}}}{3 \cdot J_r} \quad (1.51)$$

İksa sisteminin tercih edilmesinin istenmemesi durumunda ise en büyük açıklık değeri aşağıda verilmiş olan bağıntı ile bulunması mümkündür. İfadede yer alan ESR iksa oranını belirtmektedir.

$$\text{Açıklık} = 2 \cdot \text{ESR} \cdot Q^{0.4} \quad (1.52)$$

Bu ifadedeki ESR değerlerine aşağıda Tablo 1.14’de yer verilmiştir (Hoek ve Brown, 1990).

Tablo 1.14. Kazı tipine göre kazı destek oranı

Kazı Tipi	ESR
Geçici maden kazıları	3-5
Kalıcı maden kazıları, hidrolik enerji amaçlı su tünelleri (yüksek basınçlı cebri borular hariç), büyük kazılar için pilot tüneller, yarmalar ve aynalar gibi.	1.6
Depolar, su arıtma tesisleri, küçük yol ve demiryolu tünelleri, denge bacaları, yaklaşım tünelleri gibi.	1.3
Santral binaları, büyük yol ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları	1
Yeraltı nükleer santralleri, spor ve kamu tesisleri, fabrikalar	0.8

1.10.2. Analitik Yöntemler

1.10.2.1. Kesiti Elemanlara Ayırma ile Çözümleme Yöntemi

Analitik yöntemler arasında olan kesiti elemanlara ayırma ile çözümleme yönteminde tünel yapısının enkesiti dış yüklerin etkisi altında duvar, tavan ve taban kemeri olarak üç bölüme ayrılmaktadır (Öztürk, 2007).

1.10.2.1.1. Tünel Tavan Kemerinin Yapısal Çözümlemesi

Analitik yöntemlerden biri olan bu yöntemde p'_v olarak ifade edilen tavan kemerine etki eden toplam düşey basınç aşağıda verilen bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$p'_v = \frac{G_k + p'_{v1} \cdot b'_{kd} + P'_{v2}}{b'_k} \quad (1.53)$$

G_k : Tünel kemerinin kendi ağırlığı

p'_{v1} : Düşey zemin basıncı

b'_{kd} ve b'_k : Tünel kemer açıklıkları

P'_{v2} : Değişken zemin basınçlarının bileşkesi

Yatay zemin basınçları göz önüne alındığında ise zeminin kohezyonlu ve kohezyonsuz olmasına göre değişkenlik göstermektedir. Zeminin kohezyonlu olmasına bağlı olarak yatay zemin basınçları aşağıdaki bağıntılar ile birlikte hesaplanabilmektedir.

$$P_{ha1} = K_a \gamma h_1 - 2c\sqrt{K_a} \quad (1.54)$$

$$P_{ha2} = K_a \gamma h_2 - 2c\sqrt{K_a} \quad (1.55)$$

Zeminin kohezyonsuz olması durumunda ise yatay zemin basınçlarını hesaplamak için aşağıdaki bağıntılar kullanılmaktadır.

$$P_{ha1} = K_a \gamma h_1 \quad (1.56)$$

$$P_{ha2} = K_a \gamma h_2 \quad (1.57)$$

K_a : Aktif zemin basınç katsayısı

γ : Zemin birim ağırlığı

h_1 ve h_2 :Etkili örtü kalınlıkları

c : Zemin kohezyonu

Tüm bunlar dikkate alındığında tünel tavan kemerine etki eden P'_h olarak ifade edilen toplam yatay basınç aşağıda verilen bağıntı ile bulunmaktadır.

$$P'_h = \left(\frac{P_{ha1} + P_{ha2}}{2} \right) \frac{h'_{kd}}{h'_k} \quad (1.58)$$

h'_{kd} ve h'_k :Tünel kemerinin yükseklikleri

(h'_k/b'_k) şeklinde ifade edilen kemer yüksekliğinin açıklığa oranına bağlı olarak kemerin çeşitli kesitlerindeki α_M , α_H , β_M ve β_H katsayıları aşağıdaki Tablo 1.15'de verilmiştir.

Tablo 1.15. Kemer yüksekliğinin açıklığına oranına bağlı olarak kemerin çeşitli kesitlerindeki katsayıları

(h'_k/b'_k)	Moment					Kesme ve Normal Kuvvet	
	$\times p_v b_k^2$					$\times p_v b_k$	
	1 Kesiti		2 Kesiti	3 Kesiti		1 Kesiti	
	α_M	β_M	α_M	α_M	β_M	α_H	β_H
0,10	0,00120	-0,00120	-0,00042	0,00040	-0,00040	1,2750	0,0750
0,12	0,00167	-0,00167	-0,00047	0,00058	-0,00058	1,0390	0,0574
0,14	0,00224	-0,00224	-0,00066	0,00080	-0,00080	0,9045	0,0816
0,16	0,00292	-0,00292	-0,00087	0,00110	-0,00110	0,7950	0,0938
0,18	0,00296	-0,00296	-0,00111	0,00140	-0,00140	0,7075	0,1031
0,20	0,00452	-0,00452	-0,00138	0,00176	-0,00176	0,6335	0,1085
0,22	0,00550	-0,00550	-0,00168	0,00214	-0,00214	0,5800	0,1218
0,24	0,00653	-0,00653	-0,00200	0,00256	-0,00256	0,5335	0,1341
0,26	0,00765	-0,00765	-0,00239	0,00300	-0,00300	0,4995	0,1487
0,28	0,00885	-0,00885	-0,00280	0,00346	-0,00346	0,4685	0,1621
0,30	0,01010	-0,01010	-0,00324	0,00400	-0,00400	0,4415	0,1749
0,32	0,01145	-0,01145	-0,00372	0,00458	-0,00458	0,4135	0,1829
0,34	0,01285	-0,01285	-0,00424	0,00520	-0,00520	0,3920	0,1944
0,36	0,01434	-0,01434	-0,00479	0,00585	-0,00585	0,3725	0,2053
0,38	0,01589	-0,01589	-0,00540	0,00648	-0,00648	0,3540	0,2151
0,40	0,01748	-0,01748	-0,00603	0,00721	-0,00721	0,3385	0,2260
0,42	0,01920	-0,01920	-0,00672	0,00797	-0,00797	0,3247	0,2371
0,44	0,02105	-0,02105	-0,00744	0,00881	-0,00881	0,3120	0,2479
0,46	0,02296	-0,02296	-0,00821	0,00971	-0,00971	0,3000	0,2583
0,48	0,02478	-0,02478	-0,00902	0,01064	-0,01064	0,2895	0,2690
0,50	0,02668	-0,02668	-0,00987	0,01161	-0,01161	0,2801	0,2801

Yukarıda verilmiş olan Tablo 1.15'de katsayılar ile birlikte kaplamanın farklı noktalarında düşey yüklerin etkisi altında oluşan kesit etkileri aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$M'_v = \alpha_M \cdot p'_v \cdot b_k^2 \quad (1.59)$$

$$H'_v = \alpha_H \cdot p'_v \cdot b'_k \quad (1.60)$$

$$V'_v = p'_v \cdot \frac{b'_k}{2} \quad (1.61)$$

Yatay yüklerin etkisiyle oluşan kesit etkileri ise aşağıda verilmiştir.

$$M'_H = \beta_M \cdot p'_h \cdot b'_k{}^2 \quad (1.62)$$

$$H'_H = \beta_H \cdot p'_v \cdot b'_k \quad (1.63)$$

$$V'_H = 0 \quad (1.64)$$

Toplam kesit etkileri ise aşağıdaki bağıntılar yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$M'_T = M'_V + M'_H \quad (1.65)$$

$$H'_T = H'_V + H'_H \quad (1.66)$$

$$V'_T = V'_V + V'_H \quad (1.67)$$

Yukarıda verilmiş olan kesit etkileri dikkate alınarak tasarlanan kesit boyutlarının denetim altında olması gerekmektedir. Kesit yetersizliği halinde ise gerekli ve yeterli düzeltme yapılmalı ve tekrarlanmalıdır (Öztürk, 2007).

1.10.2.1.2. Taban Kemerinin Yapısal Çözümlemesi

Bu yapısal çözümleme yöntemine göre P_v^{Π} olarak ifade edilen toplam düşey taban basıncı aşağıda verilmiş olan bağıntı ile birlikte hesaplanabilmektedir.

$$p_v^{\text{II}} = p_{v1}^{\text{I}} + \frac{P_{v2}^{\text{I}} + 2P_{v3}^{\text{I}} - 2P_f}{b_k^{\text{II}}} \quad (1.68)$$

P_{v3} : Duvar üzerine etki eden zemin ağırlığı

$$P_{v3} = d_w^{\text{I}} \cdot h_{kd}^{\text{I}} \cdot \gamma \quad (1.69)$$

d_w^{I} : Duvar üst yüzeyinin genişliği

P_f olarak ifade edilen duvar arkasındaki sürtünme kuvveti ise aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir.

$$P_f = (P_{ha} + P_{hp}) \tan \varphi \quad (1.70)$$

P_{hp} : Zeminin pasif yatay basınç bileşkesi

P_{ha} : Zeminin aktif yatay basınç bileşkesi

φ : Zeminin içsel sürtünme açısı

p_h^{II} şeklinde ifade edilen taban kemerine etki eden toplam yatay basınç ise aşağıda verilmiş olan bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$p_h^{\text{II}} = \frac{p_{ha} + p_{ha4}}{2} \cdot \frac{h_{kd}^{\text{II}}}{h_k^{\text{II}}} \quad (1.71)$$

Düşey yükler nedeniyle oluşan kesit tesirlerinin hesaplanmasında kullanılan bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$M_v^{\text{II}} = \alpha_m \cdot p_v^{\text{II}} \cdot b_k^{\text{II}2} \quad (1.72)$$

$$H_v^{\text{II}} = \alpha_H \cdot p_v^{\text{II}} \cdot b_k^{\text{II}} \quad (1.73)$$

$$V_v^{\parallel} = \frac{p_v^{\parallel} \cdot b_k^{\parallel}}{2} \quad (1.74)$$

α_M , α_H , β_M ve β_H katsayıları (h'_k / b'_k) oranına bağlı olarak çizelgeden belirlenebilmektedir. Yatay yükler nedeniyle oluşan kesit tesirlerinin hesaplanmasında kullanılan bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$M_H^{\parallel} = \beta_m \cdot p_H^{\parallel} \cdot b_k^{\parallel 2} \quad (1.75)$$

$$H_H^{\parallel} = \beta_H \cdot p_H^{\parallel} \cdot b_k^{\parallel} \quad (1.76)$$

$$V_H^{\parallel} = 0 \quad (1.77)$$

Tüm bunlar dikkate alındığında taban kemerinin anılan kesitlerindeki toplam kesit etkilerinin hesaplanmasında kullanılan bağıntılar aşağıda belirtilmiştir (Öztürk, 2007).

$$M_T^{\parallel} = M_V^{\parallel} + M_H^{\parallel} \quad (1.78)$$

$$H_T^{\parallel} = H_V^{\parallel} + H_H^{\parallel} \quad (1.79)$$

$$V_T^{\parallel} = V_V^{\parallel} + V_H^{\parallel} \quad (1.80)$$

Taban kemeri için yapılan kesit denetimi, taban kemeri ön boyutları içinde yapılmalıdır.

1.10.2.1.3. Tünel Yan Duvarının Yapısal Çözümlemesi

Bu çözümleme yönteminde duvara etki eden toplam zemin yükü aşağıda verilmiş olan bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$P_{V3} = b_w^I (h_1 + h_{kd}^I) \gamma \quad (1.81)$$

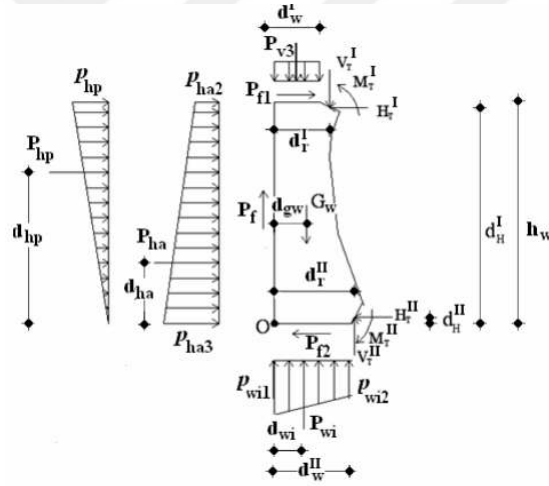
$$G_w = \frac{d_r^I + d_r^{II}}{2} \cdot h_w \cdot \gamma_c \quad (1.82)$$

G_w : Duvarın ağırlığı

d_r^I, d_r^{II}, h_w : Şekil 1.6'daki boyutlar

γ_c : Betonun birim ağırlığı

Aşağıda verilmiş olan Şekil 1.6'da tünel yapısının yan duvarlarına etki eden yükler gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Tünel yapısının yan duvarlarına etki eden yükler (Öztürk, 2007)

P_{wi} olarak ifade edilen duvar tabanına etki eden bileşke kuvvet hesaplanırken aşağıdaki bağıntı kullanılır.

$$P_{wi} = V_T^I + P_{V3}^I + G_w - P_f - V_T^{II} \quad (1.83)$$

P_f : Sürtünme kuvveti

$$P_f = (P_{ha} + P_{hp}) \tan \varphi \quad (1.84)$$

Duvar arkasındaki aktif ve pasif yatay zemin itkisi nedeniyle $P_f = (P_{ha} + P_{hp}) \tan \varphi$ şeklinde oluştuğu ve bilinmeyen P_f 'nin tahmin edilmesinin ardından denetlenmesinin yapılması gerekmektedir. Aktif yatay zemin itkisi hesaplanırken aşağıdaki bağıntıdan yararlanılır.

$$P_{ha} = \frac{p_{ha2} + p_{ha3}}{2} \cdot h_w \quad (1.85)$$

Bu noktada tatbik noktasının yüksekliği ise aşağıdaki bağıntı ile bulunabilmektedir.

$$d_{ha} = \frac{2p_{ha2} + p_{ha3}}{p_{ha2} + p_{ha3}} \cdot \frac{h_w}{3} \quad (1.86)$$

Denge koşullarının sağlanması amacıyla tünel yan duvar kısımlarına etki eden kuvvetlerin O noktasına göre momentleri toplamı aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$\begin{aligned} & P_{V3}^I \frac{b_w^I}{2} + P_{f1} \cdot h_w + V_T^I \cdot d_H^I - M_T^I - H_T^I \cdot d_H^I + G_w \cdot d_{gw} - H_T^{II} \cdot d_H^{II} - V_T^{II} \cdot d_H^{II} \\ & + M_T^{II} - P_{ha} \cdot d_{ha} + P_{hp} \cdot d_{hp} - P_{wi} \cdot d_{wi} = 0 \end{aligned} \quad (1.87)$$

Yukarı da verilmiş olan bağıntı 1.87'de M_o bilinmeyen terimlerin O noktasına göre momentlerinin toplamını ifade etmektedir. Bundan dolayı $M_o + P_{hp} \cdot d_{hp} - P_{wi} \cdot d_{wi} = 0$ olarak ifade edilebilmektedir. Burada bilinmeyenlerden zeminin pasif yatay itkisi aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$P_{hp} = \frac{P_{wi} \cdot b_w^{\Pi} - 2M_o}{\frac{4}{3}h_w + \frac{b_w^{\Pi 3}}{3h_w^2}} \quad (1.88)$$

Bu noktada hesaplanan P_{hp} ile P_f sürtünme kuvvetinin hesaplanarak daha önce yapılmış olan tahmin değerlerine yakın olup olmadığı araştırılmalıdır. Zeminin pasif yatay basıncının duvar üst seviyesindeki değeri aşağıda verilmiş olan bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$p_{hp} = \frac{2P_{hp}}{h_w} \quad (1.89)$$

Taban uç basınçları arasındaki fark ise aşağıda verilmiş olan bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta P_{wi} = p_{wi1} - p_{wi2} = p_{hp} \frac{b_w^{\Pi}}{h_w} \quad (1.90)$$

Bu noktada taban basınçları ise aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanmaktadır.

$$p_{wi1} = \frac{P_{wi}}{b_w^{\Pi}} + \frac{\Delta P_{wi}}{2} \quad (1.91)$$

$$p_{wi2} = \frac{P_{wi}}{b_w^{\Pi}} - \frac{\Delta P_{wi}}{2} \quad (1.92)$$

Taban gerilmeleri bileşkesinin O noktasına uzaklığında ise aşağıdaki 1.93 bağıntısı kullanılmaktadır.

$$d_{wi} = \frac{2p_{wi2} + p_{wi1}}{p_{wi1} + p_{wi2}} \cdot \frac{b_w^{\Pi}}{3} \quad (1.93)$$

Yatay kuvvetlerin dengesinden duvar tabanındaki sürtünme kuvveti ise aşağıdaki formül ile hesaplanabilmektedir.

$$P_{f2} = H_T^I + H_T^{II} - P_{f1} - P_{hp} - P_{ha} \quad (1.94)$$

Bu noktada tünelin kayma emniyeti için $P_{f2} = P_{wi} \cdot \tan \varphi$ bağıntısı yardımıyla hesaplanan φ içsel sürtünme açısının zeminin gerçek sürtünme açısından daha küçük olup olmadığı araştırılmalıdır (Szechy, 1970).

1.10.2.2. Kesiti Elemanlara Ayırmadan Çözümleme

Kesiti elemanlara ayırmadan çözümleme yöntemi Zurabov ve Bougayeva adlı kişiler tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem kesiti elemanlara ayırarak yapılan çözümleme ile karşılaştırıldığında verdiği sonucun daha iyi olduğu savunulmaktadır. Bunun nedeni incelendiğinde bu yöntem hem kesiti yekpare bir şekilde dikkate alır hemde tünel kaplamasını saran zemini de göz önünde bulundurarak hesaba katar (Szechy, 1970). Bu yöntemde grup yüklemeleri için sistemin elastik merkezinin hesabı aşağıdaki bağıntı yardımı ile yapılmaktadır.

$$y_g = \frac{\int y \cdot ds}{\int ds} \rightarrow y_g = \frac{R^2 \left(\frac{\pi}{2} + 3 + 2\theta_n - 4 \cdot \cos \theta_n \right)}{R \frac{\pi}{2} + 2R\theta_n} \quad (1.95)$$

R: Tünel yarıçapı θ_n : Anma açısı

1.10.2.2.1. Düşey Yük Dikkate Alınarak Moment Dağılımının Hesaplanması

Bu yöntem yardımıyla tünel yapısının kaplama bölümünün yapısal çözümlemesi kuvvet yöntemi yardımıyla yapılmaktadır. Bu noktada sistemin elastik merkezi daha önce verilmiş olan (1.95) bağıntısı ile hesaplanır ve ardından üçüncü dereceden hiperstatik halde

bulunan sistem izostatik esas sisteminin seçilmesi ile birlikte elastik merkeze X_1 , X_2 ve X_3 birim yüklemeleri uygulanmaktadır.

X_1 : Birim moment X_2 : Birim yatay yük X_3 : Birim düşey yük

Kesit ve düşey yük simetrik olması nedeniyle $X_3=0$ olarak alınabilmektedir.

Tüm bunlar dikkate alındığında birim yer değiştirme sabitlerine $(\delta_{11}, \delta_{12}, \delta_{11}, \delta_{21}, \delta_{22}, \delta_{10}, \delta_{20})$ göre süreklilik denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$\delta_{10} + \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 = 0 \quad (1.96)$$

$$\delta_{20} + \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 = 0 \quad (1.97)$$

Grup yüklemeleri nedeniyle $\delta_{12} = \delta_{21} = 0$ olduğu için yukarıda verilmiş olan denklemler aşağıdaki şekli almaktadır.

$$\delta_{10} + \delta_{11}X_1 = 0 \quad (1.98)$$

$$\delta_{20} + \delta_{22}X_2 = 0 \quad (1.99)$$

Bu denklemlerden X_1 , X_2 aşağıdaki şekli alır.

$$X_1 = -\frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} \quad (1.100)$$

$$X_2 = -\frac{\delta_{20}}{\delta_{22}} \quad (1.101)$$

Yukarıda verilmiş olan bağıntılardaki birim yer değiştirme sabitlerinin belirlenmesi için $X=0$, $X_1=1$ ve $X_2=1$ yüklemeleri altında izostatik sistemde oluşan moment

diyagramlarının bilinmesi gerekmektedir. $X=0$ için β açısına göre moment dağılımı ifadesi aşağıda verilmiş şekilde yazılabilmektedir.

$$M_0^{VI} = -p_v \frac{R^2}{2} \sin^2 \beta \quad (1.102)$$

β_1 , e bağlı olması halinde ise aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$M_0^{VII} = -p_v \frac{R^2}{2} + 2p_v R^2 (1 - \cos \beta_1) \quad (1.103)$$

$X_1=1$ yüklemesi ile birlikte kesitin her yerinde 1 birimlik moment meydana gelmektedir. $X_2 =1$ yüklemesinde ise β açısına bağlı olarak moment dağılımı aşağıdaki şekilde olmaktadır.

$$M_2^I = R - y_g - R \cdot \cos \beta \quad (1.104)$$

β_1 açısına bağlı olması durumunda ise moment dağılımı aşağıdaki şekli almaktadır.

$$M_2^{II} = R - y_g + 2R \cdot \sin \beta_1 \quad (1.105)$$

Buna göre birim yer değiştirme sabitleri aşağıda verilmiş olan bağıntılar yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\delta_{10}^v = \int \frac{M_0 \cdot M_1}{EI} ds \rightarrow \delta_{10}^v = \frac{1}{EI} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{2}} M_0^{VI} R \cdot d\beta + \int_0^{\theta_n} M_0^{VII} 2R \cdot d\beta_1 \right\} \rightarrow$$

$$\delta_{10}^v = \frac{1}{EI} \left\{ -\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{p_v R^2 \cdot \sin^2 \beta}{2} R d\beta + \int_0^{\theta_n} \left(-\frac{p_v R^2}{2} + 2p_v R^2 (1 - \cos \beta_1) \right) 2R \cdot d\beta_1 \right\} \rightarrow$$

$$\delta_{i_0}^v = \frac{1}{EI} \left\{ -\frac{1}{8} p_v R^3 \left[-2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + \pi \right] - R^3 p_v \left[-3\theta_n + 4 \cdot \sin(\theta_n) \right] \right\} \quad (1.106)$$



$$\begin{aligned}
\delta_{20}^v &= \int \frac{M_0^v \cdot M_2}{EI} ds \rightarrow \delta_{20}^v = \int_0^{\frac{\pi}{2}} M_0^{vI} \cdot M_2^I R \cdot d\beta + \int_0^{\theta_n} M_0^{vII} \cdot M_2^{II} 2R \cdot d\beta_1 \rightarrow \\
\delta_{20}^v &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(-p_v \frac{R^2}{2} \sin^2 \beta \right) (R - y_g - R \cdot \cos \beta) R \cdot d\beta \\
&+ \int_0^{\theta_n} \left(-\frac{p_v R^2}{2} + 2p_v R^2 (1 - \cos \beta_1) \right) (R - y_g + 2R \cdot \sin \beta_1) 2R d\beta_1 \rightarrow \\
\delta_{20}^v &= \frac{1}{EI} \left\{ \frac{1}{24} p_v R^3 \left[6R \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) - 3R\pi - 6y_g \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + 3y_g \pi + 4R \cdot \sin^3\left(\frac{\pi}{2}\right) \right] \right. \\
&\left[2p_v R^4 + 3p_v R^4 \theta_n - 3p_v R^3 y_g \theta_n - 6p_v R^4 \cdot \cos(\theta_n) \right. \\
&\left. \left. - 4p_v R^4 \sin(\theta_n) + 4p_v R^3 y_g \cdot \sin(\theta_n) + 4p_v R^4 \cos^2(\theta_n) \right] \right\} \quad (1.107)
\end{aligned}$$

$$\delta_{11} = \int \frac{M_1^2}{EI} ds \rightarrow \delta_{11} = \frac{1}{EI} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{2}} R d\beta + \int_0^{\theta_n} 2R d\beta_1 \right\} \rightarrow \delta_{11} = \frac{\pi}{2} R + 2R \theta_n \quad (1.108)$$

$$\begin{aligned}
\delta_{22} &= \int \frac{M_2^2}{EI} ds \rightarrow \delta_{22} = \frac{1}{EI} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{2}} (R - y_g - R \cdot \cos \beta)^2 R \cdot d\beta + \int_0^{\theta_n} (R - y_g + 2R \cdot \sin \beta_1)^2 2R d\beta_1 \right\} \rightarrow \\
\delta_{22} &= \frac{1}{EI} \left\{ \frac{1}{4} R \left[+2y_g^2 \pi - 4R \pi y_g + 8R y_g \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + 3R^2 \pi - 8R^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \right. \right. \\
&+ 2R^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \left. \right] + \left[-8R^3 + 8R^2 y_g - 6R^3 \theta_n - 4R^2 y_g \theta_n \right. \\
&\left. \left. + 8R^3 \cdot \cos(\theta_n) + 2R y_g^2 \theta_n + 8R^2 y_g \cdot \cos(\theta_n) - 4R^3 \cdot \cos(\theta_n) \cdot \sin(\theta_n) \right] \right\} \quad (1.109)
\end{aligned}$$

Yapılan hesaplar sonucunda bulunan bu yer değıştirmeler (2.96) ve (2.97) bağıntılar da yerine yazılırsa X_1^v ve X_2^v hiperstatik bilinmeyenleri bulunmaktadır. Dairesel kubbe kısmındaki moment dağılımı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

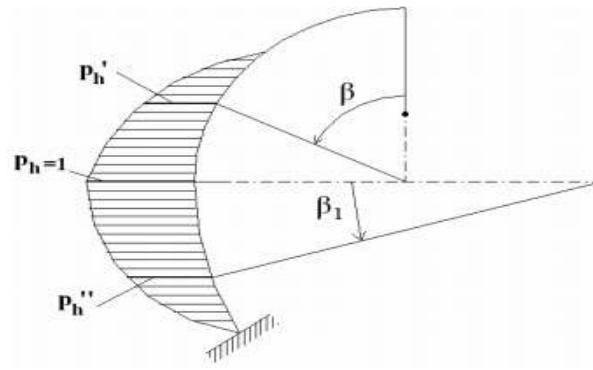
$$M_v^I = M_0^{vI} + X_1^v M_1^I + X_2^v M_2^I \quad (1.110)$$

Daire yayı şeklinde olan duvardaki moment dağılımı ise aşağıda verilmiş olan bağıntı yardımı ile hesaplanabilmektedir (Öztürk, 2007).

$$M_v^{\text{II}} = M_0^{\text{VII}} + X_1^v M_1^{\text{II}} + X_2^v M_2^{\text{II}} \quad (1.111)$$

1.10.2.2.2. Yatay Birim Yüke ($p_h=1$) Göre Moment Dağılımının Belirlenmesi

Aşağıda verilmiş olan Şekil 1.7’de yükler göz önüne alındığında dairesel kubbe kısmında kaplama bölümündeki yük dağılımı aşağıda verilmiş olan 1.112 bağıntısı ile hesaplanmaktadır.



Şekil 1.7. Tünel kaplama kısmının kubbe çapı düzeyinde uygulanan $p_h=1$ yatay yüklemesi (Öztürk, 2007)

$$p_h^{\text{I}} = 1 - 2\cos^2 \beta \quad (1.112)$$

Tünelin daire yayı şeklinde olan duvarlarında ise aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır.

$$p_h^{\text{II}} = 1 - \frac{\sin^2 \beta_1}{\sin^2 \theta_n} \quad (1.113)$$

$X=0$ durumu dikkate alındığında yük etkisinde izostatik esas sistemin dairesel kubbe bölümünde meydana gelen moment aşağıda verilmiş olan bağıntı ile birlikte ifade edilebilmektedir.

$$\begin{aligned}
M_0^{hl} &= - \int_{\alpha=\frac{\pi}{4}}^{\alpha=\beta} p_h^I \cdot R^2 \cdot \sin(\beta - \alpha) d\alpha \rightarrow M_0^{hl} = -R^2 \int_{\alpha=\frac{\pi}{4}}^{\alpha=\beta} (1 - 2 \cos^2 \alpha) \cdot \sin(\beta - \alpha) d\alpha \\
&\rightarrow M_0^{hl} = -\frac{R^2}{6} \cdot \cos\left(\beta - \frac{3\pi}{4}\right) + \frac{R^2}{2} \cos\left(\beta - \frac{\pi}{4}\right) - \frac{R^2}{3} \cos(2\beta)
\end{aligned} \tag{1.114}$$

Tünelin daire yayı şeklinde olan duvarındaki moment dağılımı ise aşağıdaki formüller ile birlikte hesaplanmaktadır.

$$H = \int_{\alpha=\frac{\pi}{4}}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} p_h^I \cdot \sin \alpha \cdot ds \rightarrow H = \int_{\alpha=\frac{\pi}{4}}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} (1 - 2 \cdot \cos^2 \alpha) R \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha \rightarrow H = 0,4714R \tag{1.115}$$

$$V = \int_{\alpha=\frac{\pi}{4}}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} p_h^I \cdot \cos \alpha \cdot ds \rightarrow V = \int_{\alpha=\frac{\pi}{4}}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} (1 - 2 \cdot \cos^2 \alpha) R \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \rightarrow V = 0,1381R \tag{1.116}$$

Moment değerinin $\beta = \frac{\pi}{2}$ olması ve $M_0^{hl} = -0,1381R^2$ olması ile birlikte bu değerler yerine yazıldığında gerekli düzenlemelerin yapılmasıyla birlikte ifade aşağıdaki hali almaktadır.

$$\begin{aligned}
M_0^{hII} &= \int_{\alpha=0}^{\alpha=\beta_1} p_h^{II} \cdot 4R^2 \cdot \sin(\beta_1 - \alpha) d\alpha + M_0^{hl} - H \cdot 2R \cdot \sin \beta_1 + V \cdot 2R \cdot (1 - \cos \beta_1) \\
M_0^{hII} &= \frac{4R^2 (3 \cos \beta_1 \cdot \cos^2 \theta_n - \cos \beta_1 - 3 \cos^2 \theta_n + 2 - \cos^2 \beta_1)}{3(-1 + \cos^2 \theta_n)} + R^2 (-0,1381 \\
&\quad - 0,9428 \cdot \sin \beta_1 + 0,2762(1 - \cos \beta_1))
\end{aligned} \tag{1.117}$$

Bu yükleme için kullanılan δ_{10}^h ve δ_{20}^h birim yer değiştirme sabitleri ise sırası ile aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanabilmektedir.

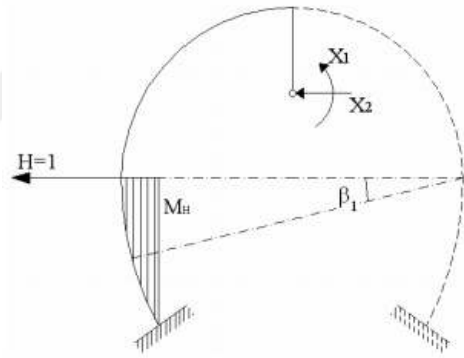
$$\begin{aligned}
\delta_{10}^h &= \int \frac{M_0^h \cdot M_1}{EI} ds \rightarrow \delta_{10}^h = \frac{1}{EI} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{2}} M_0^{hl} R d\beta + \int_0^{\theta_n} M_0^{hll} 2R d\beta_1 \right\} \rightarrow \\
\delta_{10}^h &= \frac{1}{EI} \left[-\frac{R^3}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + \frac{R^3}{6} \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) + \frac{R^3}{2} \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) - \frac{R^3}{6} \sin(\pi) \right] \\
&+ \frac{1}{EI} \left\{ -\frac{1}{\sin^2(\theta_n)} \left[0,000067R^3 (28284 - 28284 \cos^2(\theta_n)) \right. \right. \\
&+ 1,11714 \cdot 10^5 \cdot \cos^2(\theta_n) \cdot \sin(\theta_n) - 1,15857 \cdot 10^5 \cdot \cos^2(\theta_n) \cdot \theta_n \\
&- 31714 \cdot \sin(\theta_n) + 55857 \cdot \theta_n - 20000 \cdot \cos(\theta_n) \cdot \sin(\theta_n) - 28284 \cdot \cos(\theta_n) \\
&\left. \left. + 28284 \cdot \cos^3(\theta_n) \right] \right\} \tag{1.118}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\delta_{20}^h &= \int \frac{M_0^h \cdot M_2}{EI} ds \rightarrow \delta_{20}^h = \int_0^{\frac{\pi}{2}} M_0^{hl} M_2^I \cdot R \cdot d\beta + \int_0^{\theta_n} M_0^{hll} M_2^{II} \cdot 2R \cdot d\beta_1 \rightarrow \\
\delta_{20}^h &= \frac{1}{EI} \left[-\frac{1}{3} R^4 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{2} R^3 \cdot y_g \sin\left(\frac{\pi}{20}\right) + \frac{1}{12} R^4 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{48} R^4 \pi \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{4}\right) \right. \\
&- \frac{1}{16} R^4 \pi \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + \frac{41}{72} R^4 \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) - \frac{1}{6} R^3 \cdot y_g \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - \frac{1}{2} R^3 \cdot y_g \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) \\
&- \frac{1}{6} R^4 \sin(\pi) + \frac{1}{6} R^3 \cdot y_g \sin(\pi) - \frac{1}{8} R^4 \sin\left(\frac{5\pi}{4}\right) + \frac{1}{18} R^4 \sin\left(\frac{3\pi}{2}\right) \left. \right] \\
&+ \frac{1}{EI} \left\{ -\frac{0,000022}{\sin^2 \theta_n} R^3 \left[364852R - 349710R \cos^2(\theta_n) - 84852 \cdot y_g \right. \right. \\
&+ 84852 \cdot y_g \cdot \cos^2(\theta_n) + 252420R \theta_n - 167570 y_g \theta_n - 335142 y_g \sin \theta_n \cdot \cos^2(\theta_n) \\
&+ 84852 \cdot y_g \cos \theta_n - 84852 y_g \cos^3(\theta_n) - 432423R \theta_n \cos^2 \theta_n \\
&- 144852R \cos \theta_n \cdot \sin \theta_n + 335142R \cos^2(\theta_n) \cdot \sin \theta_n + 60000 \cdot y_g \cos \theta_n \cdot \sin \theta_n \\
&+ 84857R \cos^3 \theta_n \sin \theta_n - 335142R \cos^4(\theta_n) - 95142R \sin \theta_n + 95142 y_g \sin \theta_n \\
&\left. \left. + 859994R \cos^3(\theta_n) + 347571 y_g \theta_n \cos^2(\theta_n) - 539994R \cos \theta_n \right] \right\} \tag{1.119}
\end{aligned}$$

Verilmiş olan bu birim yer değıştirme sabitleri δ_{10}^h ve δ_{20}^h için hiperstatik bilinmeyenler X_1^h ve X_2^h 1.100 ve 1.101’de verilmiş olan bağıntılar yardımıyla bulunmaktadır (Öztürk, 2007).

1.10.2.2.3. Yatay Yer Değıştirmeler ve Yatay Yüğü Belirlenmesi

Düşey yüğüten kaynaklanan δ_h^v olarak ifade edilen yatay yer değıştirmenin bulunabilmesi için δ_0^v, δ_1 ve δ_2 sırasıyla P_v düşey yüğüden $X_1=1$ ve $X_2=1$ yüklemeleri nedeniyle oluşan yer değıştirmeler bilinmelidir. Bu noktada $H=1$ rölatif yüğü içinde tünel enkesitin de moment dağılımı belirlenmelidir. Aşağıdaki Şekil 1.8’de dairesel kubbe çapı düzeyindeki $H=1$ birim yükleme gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Dairesel kubbe çapı düzeyindeki $H=1$ birim yükleme (Öztürk, 2007)

Bu yükleme dikkate alındığında $M_H = 2R \cdot \sin \beta_1$ olacak şekilde ifade edilmektedir. Bu doğrultu da δ_0^v, δ_1 ve δ_2 sırasıyla aşağıda verilmiş olan bağıntılar yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$\delta_0^v = \int \frac{M_H \cdot M_0^{vII}}{EI} ds \rightarrow \delta_0^v = \frac{1}{EI} (2p_v R^4 - 6p_v R^4 \cos \theta_n + 4p_v R^4 \cos^2 \theta_n) \quad (1.120)$$

$$\delta_1 = \int \frac{M_H \cdot M_I}{EI} ds \rightarrow \delta_1 = \frac{1}{EI} (4R^2 - 4R^2 \cos \theta_n) \quad (1.121)$$

$$\delta_2 = \int \frac{M_H \cdot M_2}{EI} ds \rightarrow \delta_2 = \frac{1}{EI} (4R^3 - 4R^2 y_g - 4R^3 \cos \theta_n + 4R^2 y_g \cos \theta_n \sin \theta_n + 4R^3 \theta_n) \quad (1.122)$$

Tüm bunlar dikkate alındığında düşey yük etkisi altında oluşan yatay yer değiştirme aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\delta_h^v = \delta_0^v + \delta_1 \cdot X_1^v + \delta_2 \cdot X_2^v \quad (1.123)$$

Aynı şekilde yatay yükten oluşan yatay yer değiştirme δ_h^h yukarıda verilmiş olan (1.120) bağıntısı ile olan δ_0^v bağıntısında gerekli düzenlemelerin yapılmasının ardında aşağıdaki şekli almaktadır.

$$\delta_0^h = \frac{1}{EI} \left\{ \frac{R^4}{22500 \sin^2 \theta_n} \left[1,32429 \cdot 10^5 \cos^2 \theta_n - 1,4 \cdot 10^5 + 1,67571 \cdot 10^5 \cos^4 \theta_n \right. \right. \\ \left. \left. - 42426 \cos^3 \theta_n \sin \theta_n - 3,87571 \cdot 10^5 \cos^3 \theta_n - 42426 \theta_n + 2,27571 \cdot 10^5 \cos^2 \theta_n \right. \right. \\ \left. \left. + 42426 \theta_n \cos^2 \theta_n + 42426 \cos \theta_n \sin \theta_n \right] \right\} \quad (1.124)$$

$$\delta_h^h = \delta_0^h + \delta_1 \cdot X_1^h + \delta_2 \cdot X_2^h \quad (1.125)$$

Yatay yük hesaplanırken aşağıda verilmiş olan bağıntı kullanılır.

$$p_h = \frac{\delta_h^v}{\frac{1}{k_s} - \delta_h^h} \quad (1.126)$$

Bu ifade de k_s zeminin yatak katsayısını ifade etmektedir. Tüm yatay ve düşey yüklerin dikkate alınması ile birlikte oluşan toplam yükten oluşan hiperstatik bilinmeyenler aşağıdaki gibidir.

$$X_1 = X_1^v + p_h \cdot X_1^h \quad (1.127)$$

$$X_2 = X_2^v + p_h \cdot X_2^h \quad (1.128)$$

Bu ifadelerin bulunmasının ardından $M_0 = M_0^v + M_0^h$ olan tünel enkesitinin moment dağılım ifadesi aşağıdaki bağıntı ile belirlenmiştir.

$$M = M_0 + M_1 X_1 + M_2 X_2 \quad (1.129)$$

Bu bağıntıdan sonra dairesel kubbe kısmındaki moment aşağıda ifade edilmektedir.

$$M^I = \left\{ \left(-p_v^I \frac{R^2}{2} \sin^2 \beta \right) + p_h^I \left[-\frac{R^2}{6} \cos \left(\beta - \frac{3\pi}{4} \right) + \frac{R^2}{2} \cos \left(\beta + \frac{\pi}{4} \right) - \frac{R^2}{2} \cos(2\beta) \right] \right\} + X + X_2 (R - y_g - R \cdot \cos \beta) \quad (1.130)$$

Daire yayı şeklinde olan duvar bölümlerinde ise moment aşağıda ifade edilmektedir (Öztürk, 2007).

$$M^{II} = \left\{ p_h^I \left[\frac{4R (3 \cos \beta_1 \cdot \cos^2 \theta_n - \cos \beta_1 - 3 \cos^2 \theta_n + 2 - 3 \cos^2 \beta_1)}{3(-1 + \cos^2 \theta_n)} \right] + R^2 (-0,1381 - 0,9428 \cdot \sin \beta_1 + 0,2762(1 - \cos \beta_1)) \right\} + \left[-p_v^I \frac{R^2}{2} + 2p_v^I R^2 (1 - \cos \beta_1) \right] + X_1 + X_2 (R - y_g + 2R \cdot \sin \beta_1) \quad (1.131)$$

1.10.2.3. Birleşik Elemanlı Dairesel Kaplamaların Yapısal Çözümlemesi

Bu yöntemde tünel kaplaması ve tünel kaplamasına etki eden yükler Şekil 1.9'da gösterilmektedir. Verilmiş olan bu yüklerden P_h aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$p_h = k_s \cdot \delta_h \quad (1.132)$$

k_s : Zemin yatak katsayısı

δ_h :Kaplama düzeyindeki yatay yer değiştirme

P_1 : Düşey zemin basıncı

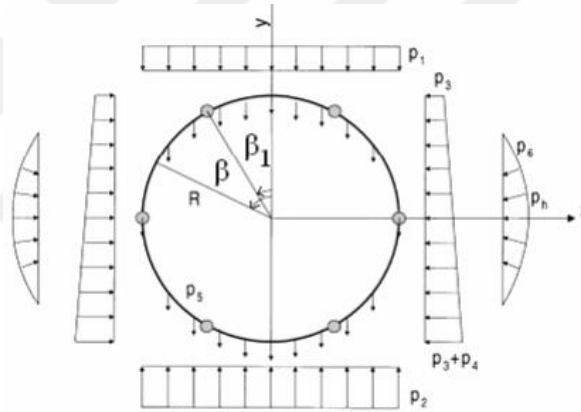
P_2 : Taban basıncı

P_3 : Kemer bölümü tepe düzeyindeki yatay basınç

P_4 : Tabanda P_3 'e etki eklenen yatay zemin basıncı

P_5 : Tünel kaplamasının kendi ağırlığı

$p_6 \rightarrow 45^\circ \leq \beta \leq 135^\circ$ şeklinde olmak üzere $p_6 = p_h (1.2 \cos^2 \beta)$ fonksiyonuna bağlı olarak değişmekte olan zemin basıncıdır (Lee ve diğ, 2001).



Şekil 1.9. Birleşik elemanlı dairesel bir tünel kaplaması ve buna etki eden yükler (Öztürk, 2007)

Verilmiş olan şekildeki kesitin tepe ve taban kısımlarında yatay yer değiştirme ve dönmenin mevcut olmadığı kabul edilirse ikinci dereceden hiperstatik sistemin süreklilik denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir. Burada δ_{ij} birim yer değiştirme sabitleridir.

$$\delta_{11} \cdot X_1 + \delta_{12} \cdot X_2 + \delta_{10} = 0 \quad (1.133)$$

$$\delta_{21} \cdot X_1 + \delta_{22} \cdot X_2 + \delta_{20} = 0 \quad (1.134)$$

Bu bağıntıda yer alan hiperstatik bilinmeyenler aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$X_1 = \frac{\delta_{12}\delta_{20} - \delta_{22}\delta_{10}}{\delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}\delta_{21}} \quad (1.135)$$

$$X_2 = \frac{\delta_{21}\delta_{10} - \delta_{11}\delta_{20}}{\delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}\delta_{21}} \quad (1.136)$$

$X_1 = 1$ ve $X_2 = 1$ yüklemeleri için hesaplanacak olan kesit etkileri moment (M), normal kuvvet (N) ve kesme kuvveti (V) bağıntıları aşağıda verilmiştir.

$$M_1 = 1 \quad N_1 = 0 \quad V_1 = 0 \quad (1.137)$$

$$M_2 = R(1 - \cos \beta) \quad N_2 = \cos \beta \quad V_2 = -\sin \beta \quad (1.138)$$

Küçük olan normal kuvvet ve kesme kuvvetinin ihmal edilmesi durumunda birim yer değiştirme sabitleri aşağıda verilmiş olan bağıntılar yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\delta_{11} = \int \frac{M_1^2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_1^{(i)} M_1^{(i)} = \frac{R\pi}{EI} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \quad (1.139)$$

$$\delta_{12} = \int \frac{M_1 M_2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_1^{(i)} M_2^{(i)} = \frac{R^2 \pi}{EI} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i) \quad (1.140)$$

$$\delta_{22} = \int \frac{M_2^2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_2^{(i)} M_2^{(i)} = \frac{3R^3 \pi}{2EI} + R^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^2 \quad (1.141)$$

Bağıntılarda geçmekte olan i kaplamadaki i 'nci bileşeni ifade ederken n ise düşey çapa göre kaplamanın yarısındaki bileşim sayısını ifade etmektedir. Aşağıdaki Tablo 1.16'da $X=0$ yüklemesi için birbirinden farklı olarak altı yükleme etkisi altındaki kesit etkileri verilmektedir.

Tablo 1.16. Dış yüklerden kaynaklanan kesit etkileri dağılımı

Yüklemeler	Kesit Etkilerinin Dağılımları
1 Yükleme (p_1)	$M_0^1 = -\frac{1}{2} p_1 R^2 \sin^2 \beta$ $N_0^1 = p_1 R^2 \sin^2 \beta$ $V_0^1 = p_1 R^2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta$ $(0 \leq \beta \leq \pi)$
2 Yükleme (p_2)	$M_0^2 = -\frac{1}{2} (p_2 - p_1) R^2 (1 - \sin^2 \beta)$ $N_0^2 = -(p_2 - p_1) R (1 - \sin \beta) \sin \beta$ $V_0^2 = -(p_2 - p_1) R (1 - \sin \beta) \cos \beta$ $\left(\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \pi \right)$
3 Yükleme (p_3)	$M_0^3 = -\frac{1}{2} p_3 R^2 (1 - \cos \beta)^2$ $N_0^3 = -p_3 R (1 - \cos \beta) \cos \beta$ $V_0^3 = p_3 R (1 - \cos \beta) \sin \beta$ $(0 \leq \beta \leq \pi)$
4 Yükleme (p_4)	$M_0^4 = -\frac{1}{12} p_4 R^2 (1 - \cos \beta)^3$ $N_0^4 = -\frac{1}{4} p_4 R (1 - \cos \beta)^2 \cos \beta$ $V_0^4 = \frac{1}{4} p_4 R (1 - \cos \beta)^2 \sin \beta$ $(0 \leq \beta \leq \pi)$
5 Yükleme (p_5)	$M_0^5 = -p_5 R^2 (\cos \beta + \beta \sin \beta - 1)$ $N_0^5 = p_5 R \beta \sin \beta$ $V_0^5 = p_5 R \beta \cos \beta$ $(0 \leq \beta \leq \pi)$
6 Yükleme (p_6)	$M_0^6 = -\frac{p_h R^2}{3} \left[\cos 2\beta - 2 \cos \left(\beta + \frac{\pi}{4} \right) \right]$ $N_0^6 = \frac{p_h R}{3} \left[\cos 2\beta - 2 \cos \left(\beta + \frac{\pi}{4} \right) \right]$ $V_0^6 = -\frac{2 p_h R^2}{3} \left[\sin 2\beta - 2 \sin \left(\beta + \frac{\pi}{4} \right) \right]$ $\left(\frac{\pi}{4} \leq \beta \leq \frac{3\pi}{4} \right)$ $M_0^6 = \frac{2\sqrt{2} p_h R^2}{3} \cos \beta$ $N_0^6 = -\frac{2\sqrt{2} p_h R}{3} \cos \beta$ $V_0^6 = \frac{2\sqrt{2} p_h R}{3} \sin \beta$ $\left(\frac{3\pi}{4} \leq \beta \leq \pi \right)$

Tablo 1.16'daki kesit etkilerinin de dikkate alınarak birleştirilmesi sonucu elde edilen toplam kesit etkileri aşağıdaki bağıntılarla ifade edilmektedir.

$$M_0 = \sum_{j=1}^6 M_0^j \quad N_0 = \sum_{j=1}^6 N_0^j \quad V_0 = \sum_{j=1}^6 V_0^j \quad (1.142)$$

Birim yer değıştirme sabitleri için ise aşağıdaki bağıntılar kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} \delta_{10} &= \int \frac{M_1 \cdot M_0}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} M_1^{(i)} M_0^{(i)} \\ &\rightarrow \sum_{j=1}^6 \left(\int \frac{M_1 \cdot M_0}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} M_1^{(i)} M_0^{j(i)} \right) = \sum_{j=1}^6 \delta_{10}^j \end{aligned} \quad (1.143)$$

$$\begin{aligned} \delta_{20} &= \int \frac{M_2 \cdot M_0}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} M_2^{(i)} M_0^{(i)} \\ &\rightarrow \sum_{j=1}^6 \left(\int \frac{M_2 \cdot M_0}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} M_2^{(i)} M_0^{j(i)} \right) = \sum_{j=1}^6 \delta_{20}^j \end{aligned} \quad (1.144)$$

X=0 yüklemesi için altı farklı yükleme altında oluşan δ_{i0} ($i=1,2$) aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\delta_{10}^1 = -\frac{\pi p_1 R^3}{4EI} - \frac{1}{2} p_1 R^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \sin^2 \beta_i \quad (1.145)$$

$$\delta_{10}^2 = -\frac{(p_2 - p_1) R^3}{2EI} \left(\frac{3\pi}{4} - 2 \right) - \frac{(p_2 - p_1) R^2}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \sin \beta_i)^2 \quad (1.146)$$

$$\delta_{10}^3 = -\frac{3\pi p_3 R^3}{4EI} - \frac{p_3 R^2}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^2 \quad (1.147)$$

$$\delta_{10}^4 = -\frac{5\pi p_4 R^3}{24EI} - \frac{p_4 R^2}{12} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^3 \quad (1.148)$$

$$\delta_{10}^5 = -p_5 R^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (\cos \beta_i + \beta_i \sin \beta_i - 1) \quad (1.149)$$

$$\delta_{10}^6 = -\frac{p_h R^3}{EI} - \frac{p_h R^2}{3} \sum_{i=n_1+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \left[\cos 2\beta_i - \cos \left(\beta_i + \frac{\pi}{4} \right) \right] + \frac{2\sqrt{2}p_h R^2}{3} \sum_{i=n-n_4+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \cos \beta_i \quad (1.150)$$

$$\delta_{20}^1 = -\frac{\pi p_1 R^4}{4EI} - \frac{1}{2} p_1 R^3 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \beta_i) \sin^2 \beta_i \quad (1.151)$$

$$\delta_{20}^2 = -\frac{(p_2 - p_1) R^4}{2EI} \left(\frac{3\pi}{4} - \frac{5}{3} \right) - \frac{(p_2 - p_1) R^3}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \beta_i) (1 - \sin \beta_i)^2 \quad (1.152)$$

$$\delta_{20}^3 = -\frac{5\pi p_3 R^4}{4EI} - \frac{p_3 R^3}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^3 \quad (1.153)$$

$$\delta_{20}^4 = -\frac{35\pi p_4 R^4}{96EI} - \frac{p_4 R^3}{12} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^4 \quad (1.154)$$

$$\delta_{20}^5 = \frac{\pi p_5 R^4}{4EI} - p_5 R^3 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \beta_i) (\cos \beta_i + \beta_i \sin \beta_i - 1) \quad (1.155)$$

$$\delta_{20}^6 = -\frac{p_h R^4}{3EI} \left(3 + \frac{\pi\sqrt{2}}{2} \right) - \frac{p_h R^3}{3} \sum_{i=n_1+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \left[\cos 2\beta_i - 2 \cos \left(\beta_i + \frac{\pi}{4} \right) \right] (1 - \cos \beta_i) + \frac{2\sqrt{2}p_h R^3}{3} \sum_{i=n-n_4+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \cos \beta_i (1 - \cos \beta_i) \quad (1.156)$$

Daha önce (2.132) ve (2.133) bağıntılarında verilmiş olan hiperstatik bilinmeyenler kullanılarak hesaplanan kesit etkileri dağılımlarının bağıntıları aşağıda verilmiştir.

$$M = M_1 X_1 + M_2 X_2 + M_0 \quad (1.157)$$

$$N = N_1 X_1 + N_2 X_2 + N_0 \quad (1.158)$$

$$V = V_1 X_1 + V_2 X_2 + V_0 \quad (1.159)$$

Kaplama kısmının tepe noktasında (δ_v) olarak ifade edilmekte olan düşey yer değiştirme ve yan duvarlardaki (δ_h) olarak ifade edilmekte olan yatay yer değiştirmenin bulunabilmesi amacıyla sisteme $H_1 = 1$ ve $H_2 = 1$ birim yüklemeleri yapılmaktadır. Bu yüklemeler sonucunda meydana gelen eğilme momentleri M_{H1} ve M_{H2} aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanabilmektedir.

$$M_{H1} = -R \sin \beta \quad (0 \leq \beta \leq \pi) \quad (1.160)$$

$$M_{H2} = -R \cos \beta \quad \left(\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \pi \right) \quad (1.161)$$

Kaplamanın yan duvarlarında ve tepe noktasındaki yer değiştirmelerin hesabı için kullanılan birim yüklemelerin hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \delta_{v1} &= \int \frac{M_{H1} M_I X_1}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} M_{H1}^{(i)} M_I^{(i)} X_1 \rightarrow \\ &= -\frac{2R^2 X_1}{EI} - R X_1 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \sin \beta_i \end{aligned} \quad (1.162)$$

$$\begin{aligned} \delta_{v2} &= \int \frac{M_{H1} M_2 X_2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} M_{H1}^{(i)} M_2^{(i)} X_2 \rightarrow \\ &= -\frac{2R^3 X_2}{EI} - R^2 X_2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \sin \beta_i (1 - \cos \beta_i) \end{aligned} \quad (1.163)$$

$$\delta_{v3} \text{ için ise altı farklı yükleme durumu bulunmaktadır.} \quad \delta_{v3} = \sum_{j=1}^6 \delta_{v3}^j$$

$$\delta_{v3}^1 = \frac{2p_1 R^4}{3EI} + \frac{p_1 R^3}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \sin^3 \beta_i \quad (1.164)$$

$$\delta_{v3}^2 = \frac{(p_2 - p_1)R^4}{2EI} \left(\frac{5}{3} - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{(p_2 - p_1)R^3}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \sin \beta_i (1 - \sin \beta_i)^2 \quad (1.165)$$

$$\delta_{v3}^3 = \frac{4p_3R^4}{3EI} + \frac{p_3R^3}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^2 \sin \beta_i \quad (1.166)$$

$$\delta_{v3}^4 = \frac{p_4R^4}{3EI} + \frac{p_4R^3}{12} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^3 \sin \beta_i \quad (1.167)$$

$$\delta_{v3}^5 = \frac{p_5R^4}{EI} \left(\frac{\pi^2}{4} - 2 \right) + p_5R^3 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (\cos \beta_i + \beta_i \sin \beta_i - 1) \sin \beta_i \quad (1.168)$$

$$\begin{aligned} \delta_{v3}^6 &= \frac{\sqrt{2}p_hR^4}{3EI} \left(\frac{1}{3} + \frac{\pi}{4} \right) + \frac{p_hR^3}{3} \sum_{i=n_1+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_0^{(i)}} \left[\cos 2\beta_i - 2 \cos \left(\beta_i + \frac{\pi}{4} \right) \right] \sin \beta_i \\ &- \frac{2\sqrt{2}p_hR^3}{3} \sum_{i=n-n_4+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos \beta_i \sin \beta_i \end{aligned} \quad (1.169)$$

$$\begin{aligned} \delta_{v3} &= \int \frac{M_{H1}M_0}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H1}^{(i)} M_0^{(i)} \\ &= \sum_{j=1}^6 \left(\int \frac{M_{H1}M_0^j}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H1}^{(i)} M_0^{(i)} \right) = \sum_{j=1}^6 \left(\delta_{v3} = \sum_{j=1}^6 \delta_{v3}^j \right) \end{aligned} \quad (1.170)$$

Kaplamanın tepe noktasındaki düşey yer değiştirme aşağıda verilmiş olan bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$\delta_v = \int \frac{M_{H1}M}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H1}^{(i)} M^{(i)} = \delta_{v1} + \delta_{v2} + \delta_{v3} \quad (1.171)$$

$$\delta_{h1} = \int \frac{M_{H2}M_1X_1}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H2}^{(i)} M_1^{(i)} X_1 = \frac{R^2X_1}{EI} - RX_1 \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos \beta_i \quad (1.172)$$

$$\delta_{h2} = \int \frac{M_{H2} M_2 X_2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H2}^{(i)} M_2^{(i)} X_2 = \frac{R^3 X_2}{EI} \left(1 + \frac{\pi}{4} \right) - R^2 X_2 \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos \beta_i (1 - \cos \beta_i) \quad (1.173)$$

δ_{h3} için de altı farklı yükleme durumu mevcuttur. $\left(\delta_{h3} = \sum_{j=1}^6 \delta_{h3}^j \right)$

$$\delta_{h3}^1 = -\frac{p_1 R^4}{6EI} + \frac{p_1 R^3}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \sin^2 \beta_i \cos \beta_i \quad (1.174)$$

$$\delta_{h3}^2 = -\frac{(p_2 - p_1) R^4}{6EI} + \frac{(p_2 - p_1) R^3}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos \beta_i (1 - \sin \beta_i)^2 \quad (1.175)$$

$$\delta_{h3}^3 = -\frac{p_3 R^4}{2EI} \left(\frac{5}{3} + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{p_3 R^3}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^2 \cos \beta_i \quad (1.176)$$

$$\delta_{h3}^4 = -\frac{p_4 R^4}{4EI} \left(1 + \frac{5\pi}{16} \right) + \frac{p_4 R^3}{12} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (1 - \cos \beta_i)^3 \cos \beta_i \quad (1.177)$$

$$\delta_{h3}^5 = -\frac{p_5 R^4}{6EI} \left(\frac{\pi}{8} - 1 \right) + p_5 R^3 \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} (\cos \beta_i + \beta_i \sin \beta_i - 1) \cos \beta_i$$

$$\delta_{h3}^6 = -\frac{p_h R^4}{3EI} \left(\frac{\sqrt{2}}{6} + \frac{3\sqrt{2}\pi}{8} + \frac{1}{3} \right) + \frac{p_h R^3}{3} \sum_{i=n_1+n_2+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_0^{(i)}} \left[\cos 2\beta_i - 2 \cos \left(\beta_i + \frac{\pi}{4} \right) \right] \cos \beta_i$$

$$-\frac{2\sqrt{2}p_h R^3}{3} \sum_{i=n-n_4+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_0^{(i)}} \cos^2 \beta_i \quad (1.178)$$

$$\begin{aligned}
\delta_{h3} &= \int \frac{M_{H2} M_0}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H2}^{(i)} M_0^{(i)} \\
&= \sum_{j=1}^6 \left(\int \frac{M_{H2} M_0^j}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H2}^{(i)} M_0^{j(i)} \right) = \sum_{j=1}^6 \left(\delta_{h3} = \sum_{j=1}^6 \delta_{h3}^j \right)
\end{aligned} \tag{1.179}$$

Yan duvardaki yer değiştirme aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanabilmektedir (Öztürk, 2007).

$$\delta_h = \int \frac{M_{H2} M}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_0^{(i)}} M_{H2}^{(i)} M^{(i)} = \delta_{h1} + \delta_{h2} + \delta_{h3} \tag{1.180}$$

1.11. Tünel Tasarımı

Tünel yapılarının inşası oldukça zor ve karmaşık olmakla birlikte günümüzde önemli mühendislik yapılarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Tünel inşa edilirken gerekli ve yeterli dayanım, dayanıklılık koşulları göz önünde bulundurulmalıdır, bu koşullar dikkate alınarak uygun çalışmalar gerçekteştirilmelidir. Bu doğrultuda tünel tasarımları yapılırken birçok mühendislik disiplinlerinin bir arada çalışması gerektiğini söylemek mümkün olmaktadır. Tünelin tasarımı ve yapımı sırasında temel çalışmalar dikkate alınmalıdır. İlk olarak tünel inşasının yapılacağı bölgede jeolojik ve jeofizik incelemeler yapılmalıdır. Ardından hidrojeolojik ve geoteknik incelemeler gerçekteştirilir. Yapılacak olan bu incelemeler tünel yapıları için önemli olmaktadır. Bunun nedeni tüeller inşa edilirken kazı çalışmaları yapılmakta ve mevcut zeminin doğal dengesi bozulmaktadır. Bozulan bu denge durumunu yeniden sağlamak ortamdaki gerilme dağılımının değişmesi ile mümkün olmaktadır. Zeminin jeolojik geçmişi ve geoteknik özellikleri bu yeni gerilme dağılımı üzerinde etkilidir. Bu doğrultuda tünel tasarım çalışmaları yapılmadan önce mevcut zeminin jeolojik ve geoteknik özellikleri iyi bir şekilde araştırılmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır. Yapılan bu incelemeler göz önünde bulundurularak uygun güzergâh seçilmeli, en kesit ve boy kesit tasarımları yapılmalıdır. Bu aşamaların gerçekteştirilmesinin ardından kazı için uygun yöntem seçilmeli, uygulanacak iksa tasarımı belirlenmelidir. Arazi ölçümleri ile birlikte tünelin yerinde izlenmesi için program geliştirilir. Tünelin kaplamalı ve kaplamasız gerilme ve şekil değiştirme ilişkilerinin belirlenmesinin ardından tünel kaplaması

boyutlandırılır. Su yalıtımı ve drenaj ile ilgili uygun tasarımlar yapılır. Kazı esnasında ve kazı sonrasında tünelin yapısal güvenliği sağlanır ve zemin etkileri ile ilgili arazi ölçümleri yapılır. Bir problem ile karşılaşılması durumunda bu problemleri açıklayan raporlar hazırlanır (Öztürk, 2007).

1.12. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Değişen ve gelişen teknoloji ile birlikte bilgisayarların kullanım alanları günümüzde artış göstermektedir. Bu doğrultu da sayısal çözüm yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar yönteminin kullanım alanları da hızla artmıştır. İlk etapta bilgisayarların sadece yapı analizleri ile sınırlı olmaktadır. Ancak günümüzde bütün mühendislik alanlarında kullanılmaktadır. Çünkü dayandığı prensipler ve çalışma yöntemlerinin uygunluğu bütün mühendislik alanlarına çalışmaları için elverişli alanlar açmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, sürekli halde bulunan bir ortamın boyutlarının sınırlandırılıp aynı zamanda geometrik olarak tanımlanıp sonlu elemanlar şeklinde ele alınması ile birlikte sonlu elemanların parçalar halinde ayrılmasını esas almaktadır. Burada süreksizliklerde ayrıca modellenmektedir. Sonlu elemanlar birbirlerine köşe noktalarından bağlanmaktadır. Bu köşe noktalarına düğüm noktaları da denilmektedir. Eleman içindeki mevcut bir noktada oluşan yer değiştirme belirlenmiş olan fonksiyonlar ile birlikte elemanın düğüm noktasındaki değerler kullanılarak hesaplanmaktadır (Değirmenci, 2019).

Geoteknik mühendisliği çok karmaşık ve değişken zemin tabakaları gibi konuları ele aldığından dolayı geleneksel yöntem ile çözülemeyen birçok problemlerin hesaplanmasında artık daha çok sonlu elemanlar yöntemini tercih etmektedir. Bu noktada özellikle tünel inşaatlarında sonlu elemanlar yönteminin kullanılması önemli olmaktadır. Çünkü tünel yapıları oldukça zor ve karmaşık yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır. İnşaat kademeleri, zemin koşulları, değişken zemin tabakaları, zeminin elasto-plastik özellikleri, zemin ile kaplama ilişkileri gibi pek çok özellik göz önüne alındığında sonlu elemanlar yöntemi oldukça avantajlı olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi birçok karmaşık problemlerin çözüme kavuşturulması yanında inşa edilecek yapının boyutları ile ilgili olarak son kararın verilmesinde, ölçüm teknikleri sonucunda elde edilen gözlemsel davranışların incelenip değerlendirilmesinde, başka yöntemlerin kullanılması ile yapılmış tasarımların güçlendirilmesi gibi başka yerlerde de tercih edilen etkili bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yönteminde zemin çoğu zaman sürekli ortam olarak modellenmektedir ve mevcut

süreksizliklerde ayrıca eklenmektedir. Mevcut zeminin gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi uygun yapısal denklemler ile ifade edilmektedir. Önceden belirlenmiş gerilme, şekil değiştirme ve yer değiştirmeler tünel kazısı sonucu oluşmaktadır. Yeraltında modelleme yapılırken dikkat edilmesi gereken noktalar bulunmaktadır. Çünkü yeraltı modellemelerinde sonlu elemanlar ağının seçimi, yapılacak çözümlemenin doğruluğu ve yakınsaklığının sağlanması önemlidir. Bunun içinde çözümün yakınsaklığını en iyi şekilde belirleyecek sonlu eleman tipi ve boyutlarının tercih edilmesi gerekmektedir (Değirmenci, 2019).

1.13. Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Ak (2005), yapmış olduğu çalışmada kaya malzeme içerisinde kazı çalışmaları gerçekleştirmiştir. Geçici destek sistemi olarak tercih edilen püskürtme beton ve kalıcı destekleme sistemi olarak kullanılmakta olan beton kaplama ile silindirik kesitli tünel oluşturmuştur. Yapılan çalışma esnasında kazı çapı 9 m olarak belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında kazı ve destekleme çalışmaları farklı aşamalar şeklinde modellenmiştir. Tünelin iç ve dış basınç olarak iki farklı yükleme yapılmıştır. Modelleme bu çalışmada iki boyutlu ve üç boyutlu olarak iki şekilde yapılmıştır. Dış yüklü model sonuçları dikkate alındığında kazı yüzeyinin gecikme olmaksızın geçici destek sistemleri ile korunması ya da kazı işlemlerinin çok kademeli olacak şekilde gerçekleştirilmesinin uygun olduğu görülmüştür. İç yükleme durumunda ise 40 kPa'lık bir iç yüklemeye 40 cm kalınlığında beton kaplamanın yeterli olduğu görülmüştür.

Bulut (2007), yapmış olduğu çalışma kapsamında yapı-zemin etkileşimi problemini incelemek için daha önceden belirlenmiş olan bir örnek ele almıştır. Bu örnekteki yapı, bölgede yapılan tünel kazı çalışmaları esnasında bazı yapısal deformasyonlara maruz kalmıştır ve boşaltılarak mühürlenmiştir. Bu yapıda tünel kazı işlemleri sonucunda meydana gelen ilave yer değiştirmeler ya da gerilmeleri belirlemek için üç boyutlu olacak şekilde zemin ve yapısal analizler yapılmıştır. Bunun yanı sıra bu çalışmada tünel açılması sırasında yapıda oluşabilecek hasarları araştırmıştır ve bu hasarlar üzerinde durmuştur. Yapılan çalışma sırasında zemin modeli Plaxis 3D programı ile oluşturmuştur. Yapı yükleri sonucunda meydana gelen zemin oturmaları da Plaxis 3D programı ile belirlemiştir. Üst yapı analizlerinde ise ETABS programını tercih ederek yapıdaki yer değiştirmeleri hesaplamış ve aletsel okumalar ile karşılaştırmıştır. Üst yapıdaki yer değiştirmelere bağlı olarak yapıdaki hasar durumunu belirlemiş ve yapının hasar tespiti yapmıştır.

Öztürk (2007), yapmış olduğu çalışmada tüneller hakkında bir sentez çalışması hazırlamıştır. Bu sentez çalışması doğrultusunda teknik literatür de bilinen ve yer alan bazı tasarım yöntemlerini aynı simgeleri kullanılarak sistematik olarak açıklamıştır. Bilgisayar programı geliştirilerek bu yöntemlerin doğru çalıştığını sayısal uygulamalar yardımıyla göstermiştir.

Çeçen (2007), yapmış olduğu çalışma kapsamında tünel inşaatlarında uygulanan ‘şemsiye-kemer’ ve ‘ayna donatılama’ yöntemlerinin tünel iç kısmında ve yüzeyde meydana getirdikleri iyileşmenin etkisini farklı tipteki sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelemeyi amaçlamıştır. Şemsiye- kemer boruları ve ayna donatılandırılmasının tünel inşaatı üzerindeki etkilerinin büyüklük ve kapsamlarının araştırılması için yapılan parametrik çalışmalar için iki boyutta sonlu elemanlar yöntemi (FEM) prensibi doğrultusunda çalışan Plaxis yazılımını kullanmayı tercih ederek analizlerini gerçekleştirmiştir.

Osmanoğlu (2007), yapmış olduğu çalışma esnasında sonlu elemanlar yöntemi olarak kullanılan Plaxis programını tercih etmiştir ve bu programı kullanarak farklı kesitte tünel analizleri gerçekleştirmiştir. Yapmış olduğu çalışma kapsamında altı farklı örnek üzerinde incelemeler yapmıştır. Bu incelemeler neticesinde Plaxis programı kullanarak ilk olarak mevcut durumun geometrisi oluşturmuştur ve mevcut problemi göz önüne alarak sanal ortamda canlandırmalar yapmıştır. Bu çalışmaların ardından elde ettiği verilere dayanarak gerekli çözümler üzerinde çalışmalar yapmıştır.

Çeçen (2007), yapmış olduğu çalışma kapsamında İstanbul Metrosu Koska tünellerinde daha önceden elde edilmiş veriler ışığında Koska Bölgesi tünellerinin deformasyon grafiklerini oluşturmuştur. Pek çok farklı etkeni göz önünde bulundurarak karşılaştırmalı analizler gerçekleştirmiştir. Bunun yanı sıra bir tünel kazısının başka bir tünelin iç kısmında ve yüzey deformasyonlarına etkisi üzerinde incelemeler yapmıştır. Son adımda ampirik-yarı teorik bağıntılar yardımı ile farklı iki kesit için tahmini deformasyon grafikleri oluşturmuştur. Maksimum teorik oturmalar ile gerçek oturmaları mukayese etmiştir ve bir doğruluk değeri belirlemiştir. Bu değeri dikkate alarak gerçek oturmaların kritik derecede olup olmadığı konusunda incelemeler yapmıştır.

İlyasoğlu (2008), yapmış olduğu çalışmada tünel yaklaşımı sırasında oluşturulan portal şevlerin planlanması ve projelendirilmesinin ilke ve temelleri üzerinde durmuş ve incelemeler yapmıştır. Bu doğrultuda güncel uygulama olan İstanbul Kağıthane-Piyalepaşa tünellerinde, Kağıthane portal kazıları üzerinde yapılan uygulanma çalışmasını bu tez

kapsamında kullanmıştır. İlk olarak deneysel çalışmalara yer vermiştir. Analizlerde daha gerçekçi sonuçlar elde etmek amacıyla GeoSlope ve Plaxis programları tercih etmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır ve şevlerin olması gereken minimum tasarım ilkeleri belirlemiştir.

Hajebi (2008), yapmış olduğu çalışma ile daha önceden yapılmış olan ikiz tünellerin çevresinde, göz önüne alınan tünel güzergâhı boyunca herhangi bir önemli geoteknik sorun ile karşılaşmadığını belirlemek amacı ile çalışmalar yapmıştır. Elde edilen bu sonuç üzerinde durmuştur. Yapmış olduğu araştırmalar neticesinde buna sebep olan etkenlerin zemin arazi profilinin sıkı kum ve çakıllı katı kil tabakalarından meydana gelmesi ve TBM tünel kazı yönteminin tercih edilmesinin önemli olduğunu görmüştür.

Aktaş (2009), yapmış olduğu çalışma sırasında ‘Kağıthane-PiyalePaşa Tünelleri’ incelemiştir. Tünel güzergâhını jeolojik ve geoteknik açılardan dikkatli bir şekilde incelemiştir, yapılan sondaj ve deneysel çalışmalar ile birlikte kaya dayanım parametrelerini belirlemiştir. Yeni Avusturya Tünel Açma metodu esasları göz önüne alarak inşa edilen bu tünellerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerini gerçekleştirmiştir. Değişik değişkenlerin tünel ve etrafına etkilerini incelemek için oluşturulan modeller üzerinde Plaxis 3D Tunnel sonlu elemanlar programı ile yapılan analizleri değerlendirmiş ve tünellerin güvenli olarak açılmasında önemli olan parametrelerin olası etkilerini belirlemek amacıyla çalışmalar yapmıştır.

Doğruoğlu (2009), yapmış olduğu çalışma ile tünellerin açılmasından kaynaklanan yüzey deplasmanlarını değerlendirmek amacıyla üç yöntemin kullanılmasını uygun görerek gerekli çalışmaları yapmıştır. Birinci yöntem ile Chow (1994)’a göre; kazı sebebine bağlı olarak zemin kaybını tünel doğrultusu boyunca çizgisel yük olarak kabul edip nokta yükten uzakta meydana gelen düşey deplasmanların yüzey deplasman dağılımlarının elde etmiştir. İkinci yöntem olan Gauss Oturma Eğrisi ile oturma dağılımları hesaplamıştır. Üçüncü yaklaşım olan Plaxis 2D sonlu elemanlar metodu ile incelemiş olduğu kesitler için sayısal analizler gerçekleştirmiştir. Elde etmiş olduğu bu analiz sonuçlarından gerçekleşen deplasmanlara en yakın olan deplasman değerlerini veren hacim kaybı oranları belirlemiştir.

Şeker (2008), yapmış olduğu çalışma ile Cezayir’de olan Doğu Batı Otoyolu Projesi bünyesinde açılmakta olan ve iki tüpten oluşan Bouina Karayolu tüneli uygulamasını incelemiştir. Yapmış olduğu incelemeler ve araştırmalar doğrultusunda elde ettiği veriler yardımı ile sonlu elemanlar yöntemi olan Plaxis 2D programı ile tünel tasarımları yapmıştır. Tünel yapılarının farklı aşamalarda inşalarını modellemiş, tünel kaplamalarında ve zemin

yüzeyinde meydana getirdiği etkileri anlamaya çalışmıştır. Tünellerin birbiri üzerinde yapmış oldukları etkileri araştırmıştır. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi prensiplerine uygun olarak yapılan tünel tasarımı ve uygulamalarının deneyi ile birlikte sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan tasarımlar tünelin üzerine gelebilecek olası etkilerin saptanmasında yararlı olabileceğini belirlemiştir.

Yıldırım (2009), yapmış olduğu çalışma kapsamında kötü zemin türü olarak bilinen şişen killerde tünel açılması üzerine incelemeler gerçekleştirmiştir. Bu amaç doğrultusunda İstanbul ve Ankara’ da bulunan bazı tünel uygulamalarını dikkate alarak hem normal durumdaki zemin için hemde iyileştirilmiş zemin durumdaki zemin için toplam yedi adet analiz yapmıştır. Analizler sırasında sonlu elemanlar yöntemi olarak Plaxis programını tercih etmiştir. Elde etmiş olduğu analiz sonuçlarını kildeki değişimleri dikkate alarak değerlendirmiştir. Yapmış olduğu çalışmalar doğrultusunda, analizler sonuçlarına ve grafiklere bağlı olarak tüneldeki kemerlenmenin çabuk bir şekilde sağlanması gerekliliği, tünel taşıyıcı tabakasına olan orta duvar ve nihai kaplama boyutlarının dışarıdan gelen basınca ve yük dağılımına karşı dayanımının ne kadar önemli olduğunu ortaya koymuştur.

Karamanlı (2009), yapmış olduğu çalışma ile tünel açılması sırasında yapılan uygulama aşamaları ve tünel kaplaması üzerinde meydana gelen gerilme dağılımlarının belirlenmesine bağlı olarak üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analizler yapmıştır. Yapmış olduğu bu tez çalışması ile tünel açılmasına bağlı olarak meydana gelen yüzey oturmalarının ve tünel kaplaması üstündeki yüklerin tahmini için kullanılan yöntemleri incelemiş ve bu yöntemlerin verdiği tahminler, sayısal analizler sonucunda elde edilmiş sonuçlar ile karşılaştırmalar yapmıştır. Mevcut yöntemlerin sonuçları arasındaki farklılıkların sebepleri üzerinde durmuştur ve yöntemlerdeki kısıtlamaların sonuçlar arasındaki farklılıkların temel nedeni olarak ortaya çıkarmıştır.

Karademir (2010), yapmış olduğu çalışma ile paralel tünel etkileşimi üzerinde durmuştur ve bir parametrik çalışma yapmıştır. Bu doğrultuda sonlu elemanlar yöntemi olan Plaxis 3D programı kullanarak analizler gerçekleştirmiştir. Analizler sırasında ilk olarak bir tünelin inşaatının bitmesinin ardından ikinci tüneli birinci tünelin inşaat aşamalarının sona ermesinin hemen ardından modellemiştir. Analiz sonuçlarına bağlı olarak deformasyon ve moment davranışlarının daha çok zemin elastisite modülüne ve tüneller arasında bırakılan mesafeye göre etkilendiği sonucunu saptamıştır. Ayrıca analizler doğrultusunda deformasyon ve moment davranışı üzerinde tüneller arası bırakılan mesafe zeminin elastisite modülüne göre daha etki rol oynadığı sonucunu da çıkarmıştır. Analiz sonuçlarına göre elde

edilen diğerk bir sonuç da ortalama bir zeminin elastisite modülü için tüneller arasında mesafenin yaklaşık 2,5-3D (D= tünel çapı) mesafe olması durumunda etkileşimin elimine edilebileceğidir.

Atasoy (2010), yapmış olduğu çalışma bu çalışma sırasında ağırlıklı bir şekilde NATM hakkında detaylı bilgiler vermiştir. Bu doğrultuda NATM yönteminin ilkeleri, uygulamadaki başlıca fikirler, istasyonlar, şaft ve tünel inşaatları ile destekleme elemanlarını incelemiştir. Daha sonra farklı destekleme sistemleri, jeoloji, kazı aşamaları, destekleme elemanları, kazı hızları, metrajlar ve maliyetler bakımından mukayeseler yapmıştır.

Üçer (2012), yapmış olduğu çalışma ile önceden meydana gelmiş depremler sırasında zarar görmüş tünellerin gerçek deprem hasar bilgilerinden faydalanarak tünellerdeki sismik hasar değerlendirmesinde kullanılmak üzere yeni hasar görebilirlik eğrilerinin çıkarılmasını amaçlamıştır. Bu doğrultuda Bolu Tnellerine ait önemli hasar bilgilerini bu çalışma kapsamında örnek bir uygulama olarak kullanmıştır. Tünellerin sismik davranışını analitik, yarı-statik ve tam-dinamik analiz yöntemleri ile birlikte değerlendirmiştir.

Öztürk (2013), yapmış olduğu çalışma ile birlikte aç-kapa yöntemiyle oluşturulan dikdörtgen enkesitli betonarme sığ tünellerin tasarımlarının minimum maliyetle sağlanmasını Yapay Arı Koloni ve Genetik Algoritma gerçekleştirmeyi amaçlamıştır. Yapmış olduğu çalışmalar ve elde ettiği veriler ışığında aç-kapa yöntemi ile inşa edilen dikdörtgen kesitli betonarme sığ tünellerinin düşük maliyet ile optimum tasarımlarının Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritma ile gerçekleştirilebileceği ve ayrıca bu algoritmalarla geleneksel yönleme kıyasla daha ekonomik tasarımların yapılabileceği sonucuna varmıştır.

Kaşıkçı (2014), yapmış olduğu çalışma ile metro tünelleri- üstyapı etkileşimi üzerinde durmuştur. Yapılan bu çalışma ile ayrıca yapım aşamaları süren metro tünelleri inşaatının üstyapı da oluşturduğu etkileri ve üstyapı da oluşabilecek olan hasarların hasar seviyeleri düzeylerini incelemeyi amaçlamıştır. Bu doğrultuda zemin, tünel ve temsili üstyapı modellemelerini sonlu elemanlar yöntemi olan Plaxis programını kullanarak modelleme işlemini yapmıştır. Metro tüneli-üstyapı etkileşimini açıklamak amacıyla tünel tiplerini, zemin tabakalarını ve binaları farklı tipte kullanmayı uygun görmüştür. Elde etmiş olduğu analiz sonuçları doğrultusunda binaların temel seviyesinde hesaplanmış olan maksimum düşey deformasyon değerleri ve maksimum açısıl dönme değerlerinin izin verilebilir değerlerin altında olup olmadığını belirlemiştir.

Türkoğlu (2013) yapmış olduğu çalışma ile olumsuz zemin koşullarında açılmış tünel göçüğünün iki boyutlu sayısal analizini yapmıştır. Bu amaç doğrultusunda Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi kapsamında BT24 Tünelinin çökmesinin altında yatan sebeplerin anlaşılması için araştırmalar yapmıştır. Bunun için hem tünel davranışını hemde çökme mekanizmasının anlaşılabilmesi için inşaat aşamaları yapım sırası iki boyutlu düzlemsel birim deformasyon ve aksisimetrik sonlu eleman modelleri ile birlikte modellemiştir. Analizleri de püskürtme beton kaplamalı invert kapanmalı ve kapanmasız olarak iki farklı şekilde yapmıştır. Oluşabilecek olası olumsuz zemin şartlarının tünel davranışı üzerinde meydana getirebileceği etkileri modelleyerek iki durum için de değişik fay senaryoları ve sünme etkilerini de ayrıca göz önünde bulundurmıştır. Sonuç olarak öngörülme-yen zemin koşullarının deformasyonları büyük oranda arttırmış olabileceği ve invertteki birincil kaplamada halka kapanması uygulanmamış olmasının çökmede anahtar rol oynadığı sonucuna varmıştır.

Svoboda vd. (2010), yaptıkları çalışmada kentsel bir bölge için NATM tünel açma yöntemi tercih edilerek inşa edilen tünelin A sınıfı tahminlerinde hipoplastik bir model çalışmasının uygulanması üzerinde durmuşlardır. Çalışmada sert bir kil zeminde kazı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tünel genişliği 14 m iken örtü kalınlığı 6 m ila 21 m arasında değişkenlik göstermektedir. Çalışma sırasında oluşturulan model laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen veriler kullanılarak kalibre edilmiştir. kullanılan parametreler ise keşifsel bir sapmadan bulunan izleme verileri yardımıyla optimize edilmiştir. tünel kazı çalışmalarının ardından oluşturulan modelin yüzey oturmalarının, yüzeyde meydana gelebilecek yatay ve düşey yer değiştirmelerinin derinlik ile dağılımının doğru tahmin edildiği görülmüştür. Yapılan çalışmalar neticesinde taneler arası gerinim kavramı kullanılarak geliştirilmiş kil zeminler için hipoplastik modelin yüzey oturması, yüzeyde meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmelerin derinlik ile dağılımının doğru tahminler verdiği sonucuna varılmıştır.

Burjus (2015), yapmış olduğu çalışma ile killi zeminlerdeki tünel inşaatlarında meydana gelen yüzey deformasyonlarının tahmini üzerinde durmuştur. Bu doğrultuda sonlu elemanlar metodu olarak kullanılan Plaxis programını tercih ederek zayıf bir zeminde tünel inşa çalışmaları esnasında meydana gelebilecek oturmalar ve yer değiştirmeleri önceden tahmin etmek amaçlanmıştır. Çalışmada kullanmış olduğu zemin özellikleri için gerçek verilerden yararlanmıştır. Bu verileri sayısal analizlerde kullanmıştır. Yapmış olduğu

çalışmanın son kısmında ise bir yapıyı temsil eden modelin bir yüzey yükünün yerini değiştirerek tünel üzerinde bıraktığı etkileri araştırmıştır.

Salman (2014), yapmış olduğu çalışma ile tünel kazısı sonucunda meydana gelen zemin oturmaların ve bu oturmaların mevcut yapılara olan etkilerinin incelenmesi üzerine araştırmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışması kapsamında Üsküdar Ümraniye Çekmeköy Metro Projesi'nde Çekmeköy ilçesinde NATM yöntemi kullanılarak kazılan geniş hacimli bir makas tüneline mevcut üst yapılara olan etkiler üzerinde durmuştur ve Burland yöntemini tercih ederek bu yöntem ile birlikte bina hasar değerlendirmesi yapmıştır.

Huang vd. (2015), yaptıkları çalışmada geoteknik parametrelerin boylamsal olarak değişimini göz önüne alarak kalkan tünellerin boylamsal performansını analiz etmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemine bağlı olarak basitleştirilmiş bir prosedür geliştirmişlerdir. Bu doğrultuda tünel yapısının alt kısmında yer alan zeminin zemin özelliklerinin mekânsal değişimini irdelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çözümün geçerliliğini analitik çözümler ve çeşitli varsayımlar ile birlikte model testleri kullanarak teyit etmişlerdir. Yapılan çalışmada basitleştirilmiş sonlu eleman yöntemi prosedürünün uzamsal zemin değişkenliği ile bir kalkan tünel yapısının uzunlamasına performansını analiz ederek kapasitesini belirlemek amacı doğrultusunda varsayım olarak bir örnek vermişlerdir. Çalışmalara bağlı olarak elde edilmiş sonuçlar doğrultusunda tünel yapısının genel oturmasının ana etkeni olarak zemin özelliklerinden etkilendiği, tünel diferansiyel oturmasının ise mevcut zemin özelliklerinin dalgalanmasının varyasyonu ve ölçeğinden fazlaca etkilendiği görülmüştür.

Cingöz (2013), yapmış olduğu çalışma ile tünellerin inşa edilmesi sırasında tercih edilen NATM ve TBM yöntemlerinin deneysel olarak maliyet ve süre kriterleri ile karşılaştırılmasını amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda tünel yapımı sırasında tercih edilmekte olan NATM ve TBM olan iki önemli yöntem kıyaslanarak süre performansına yapmış oldukları etkileri maliyet açısından incelemiştir. Çalışma esnasında metro tünellerinin inşası esnasında tespit edilen veriler dikkate alınarak hangi metodun hangi şartlar altında kullanılmasının metro inşaatları için daha iyi olacağı üzerinde durmuştur. Yapmış olduğu analizler ve çalışmalar sonucunda yeterli miktarda shaft ve farklı kesitlerde tünellerin mevcut olması durumunda özenli bir planlama ve yeterli sayıda kaynaklarla birlikte NATM yöntemi uygulanarak yapılacak olan işin TBM yöntemi uygulanarak yapılacak olan işe kıyasla süre olarak daha erken tamamlanacağı sonucuna varmıştır.

Ertürk (2014), yapmış olduğu çalışma ile Suruç mevkiinde bulunan su tüneli üzerinde geoteknik araştırmalar gerçekleştirmiştir. Bu doğrultuda Suruç ovasının sulanması için yapılmış olan Şanlıurfa tüneli güzergâhında yer alan geoteknik çalışmaları ve tünel destek tasarımı üzerine incelemeler gerçekleştirmiştir. Bunun için saha çalışmaları, laboratuvar çalışmaları, süreksizlik ölçümleri ve kinematik analizleri vb. gibi pek çok çalışmaları yapmıştır. Tünel basınçları, yenilme zonu sınırları ve destek tasarımları görgül, analitik ve sayısal yöntemler olmak üzere üç şekilde belirlemiştir. Bunların doğruluklarının tespit edilmesinde ise convergence-confinement yöntemi ve Plaxis yazılımının kullanılmasını tercih etmiştir. Yapmış olduğu analiz sonuçlarına göre önerilen destek sistemleri sayesinde yer değiştirmeler ve yenilme bölgesinin sınırı azaltılmıştır. Yer değiştirmeler de ve plastik zonunun yayılımında en fazla azalmanın prekast beton kaplama destek sistemi ile elde edildiği sonucunu görmüştür.

Akın (2015), yapmış olduğu çalışma ile Üçkuyular ve Poligon Metro İstasyonu inşaatında diyafram duvar uygulamasını inceleyerek sonlu elemanlar yöntemi olan Plaxis programında analizlerini gerçekleştirmiştir. Bu doğrultuda Fahrettin Atay ve Poligon İstasyonları için iki boyutlu sonlu elemanlar ile statik analizleri yaparken, dinamik zemin davranışı analizleri için ise bir boyutlu olacak şekilde analizleri gerçekleştirmiştir. Elde edilen analiz sonuçları ışığında iki metro istasyonunda simetrik ve simetrik olmayan yükleme koşulları sebebiyle farklı deformasyon davranışları ve gerilme dağılımlarının oluştuğunu görmüştür. Her iki istasyonda dikkate alındığında oluşabilecek maksimum yer değiştirmelerin simetrik olmayan yükleme koşullarındaki Fahrettin Atay İstasyonunda meydana geldiği sonucuna varmıştır.

Özel (2016), yapmış olduğu çalışma ile tünel çalışmalarında kullanılmakta olan delme-patlatma yöntemleri üzerinde durarak uygun bir tünel modeli için patlatma simülasyonları sonucunda meydana gelebilecek titreşimler ile bu titreşimlerin yapılara etkilerini araştırmıştır. Bunun için patlatma yükünün tasarımında yeni bir yaklaşım türü olan Eşdeğer Elastik Sınır Yöntemi yardımı ile belirlenen patlatma yükü sonlu eleman yöntemini kullanan ANSYS Workbench üzerindeki çeşitli noktalardan Workbench yazılımı ile birlikte yapılan hesaplar yardımı ile maksimum parçacık hızını belirlemiş, geleneksel kontrol yöntemi Ölçekli Mesafe bağıntısı yardımı ile de ulaşılan sonuçların doğruluğunu teyit etmiştir. Son olarak da patlayıcı nedeniyle oluşan sarsıntıların tarihi yapı modeli üzerindeki etkilerini araştırmıştır.

Alper (2016), yapmış olduğu çalışma ile kapanma- sınırlama yönteminin kaya ortamda yer alan derin bir tünel yapısı için uygulanabilirliği üzerinde durmuştur. Bu doğrultuda çalışmasında convergence-confinement (kapanma-sınırlama) yöntemini bir derin tünel tasarım örneği üzerinde inceleyerek bu yöntemin daha iyi bir şekilde anlaşılmasına yardımcı olmaya çalışmıştır.

Sarikaya (2018), yapmış olduğu çalışma ile tünel- yapı- zemin etkileşiminin zemin büyütmesine etkilerinin nümerik olarak incelenmesi üzerinde durmuştur. Bu doğrultuda olası bir depremin meydana gelmesi halinde tünel, yapı ve zemin etkileşiminin zemin büyütmesine olan etkilerinin araştırılması üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu amaca bağlı olarak nümerik analizler için Plaxis 2D sonlu elemanlar yöntemi kullanmayı yoğun görerek analiz çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Yapmış olduğu çalışmalar ve bu çalışmalardan elde etmiş olduğu analiz sonuçlarına bağlı olarak tünelin yapıya daha uzak mesafede olması halinde yüzeyde depremden etkilenen bölgelerin daha geniş bir yere sahip olduğu sonucuna varmıştır.

Değirmenci (2019), yapmış olduğu çalışma doğrultusunda Oruçlu Tüneli Göçük Bölgesinin Şemsiye Kemer Yöntemi ile desteklenmesi konusu üzerinde durmuştur. Bu çalışma kapsamında ‘Oruçlu Tüneli Göçük Bölgesi’ üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu amaçla birlikte arazi incelemeleri, sondaj çalışmaları, jeofizik incelemeler, laboratuvar deneyleri gibi pek çok çalışmayı gerçekleştirmiştir. Yeni Avusturya Metodu prensiplerine uygun olarak yapılan tünelin analizlerini, sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapmıştır. Yapmış olduğu analiz sonuçlarına göre incelenen tünelin hem yeraltında hemde yerüstünde meydana getirmesi beklenen yer değiştirmelerin izin verilen sınırlar içerisinde olduğu, hiçbir göçme olasılığı bulunmadığı ve önerilen desteklemelerin yeterli olduğu sonuçlarına varmıştır.

Araz (2019), yapmış olduğu çalışma ile metro projelerinde yer alan tünellerde ikinci kaplama betonu olarak donatılı püskürtme beton kullanımının proje maliyetine ve süresinde meydana getireceği etkilerin analizi üzerinde durmuştur. Bu çalışmanın amacı donatılı püskürtme betonun tercih edilmesi durumunda metro projelerine etkisi üzerine incelemeler yapmaktır. Bunun için iki farklı tünel belirlemiş ve bu tüneller üzerinde hem tünel kaplama süreleri hemde maliyetlerin proje yönetimindeki önemi ve projenin tamamlanması için yapmış olduğu etkileri belirlemeye çalışmıştır. Ayrıca ikinci kaplama olarak dökme beton ile püskürtme beton kullanılması durumunda hem proje süresi hemde maliyetler açısından karşılaştırma yapmıştır. Bu doğrultuda analizler gerçekleştirmiştir. Yapılmış olduğu analiz

sonuçları neticesinde donatılı püskürtme beton ile tünelin ikinci kaplamasının yapılması halinde klasik dökme beton ile yapılan tünelin ikinci kaplamaya oranla hem süre olarak hem de maliyet olarak daha çok avantaj sağladığını görmüştür.

Aslan (2018), yapmış olduğu çalışma ile ikiz tünel kazılarına bağlı olarak oluşan yüzey oturmalarının tahmini üzerinde durmuştur. Yapılan bu çalışmanın amacı İkiz tünel kazısına bağlı olarak meydana gelen tasmanların hem ampirik hemde sayısal yöntemlerden yararlanarak tahin edilmesi ve aynı zamanda öngörülen enine yüzey oturma profillerinin aletsel gözlem sonucu neticesine göre oturma değerleri ile karşılaştırarak yöntemler arasındaki yakınlığın araştırılmasıdır. Bu çalışma sırasında sayısal analizleri yapmak için sonlu elemanlar programı olan Plaxis 2D uygulamasını tercih etmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde kaya kütlelerinin elastisite modülünün tünel davranışına önemli bir etkisi olmadığını, rijitlik azalırken oturma miktarının artması ve diğer parametrelerin yüzey oturma formunda önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varmıştır. Ayrıca zemine ait olan gevşeme katsayısı değerinde meydana gelen artışın tasman miktarında önemli bir etki yaratmadığını da görmüştür.

Ukritchon vd. (2017), yaptıkları çalışma kapsamında derinlemesine doğrusal bir şekilde artan kesme dayanımına sahip olan kil bir zeminde drenajsız tünel yüzü stabilitesini üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi yardımı ile birlikte analiz ederek irdelemişlerdir. Çalışma sırasında üç adet parametrik çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bunun amacı örtü derinliği oranı, aşırı yük stres faktörü ve lineer dayanım gradyan oranının drenajsız tünel yüzü stabilitesinin yük faktörü üzerinde meydana getireceği etkileri irdelemektir. Yapmış oldukları çalışmalar doğrultusunda doğrusal dayanım gradyan oranının, drenajsız yüzey stabilitesinin tahmin edilen kırılma mekanizmasında meydan getirmiş olduğu etkileri tartışarak incelemeler yapmışlardır. Elde edilen verilere bağlı olarak derinlik ile birlikte sabit ya da lineer bir şekilde artan kesme mukavemeti profillerine sahip olan kil zeminlerde üç boyutlu drenajsız tünel yüzü stabilitesi için yaklaşık bir kapalı form çözümü önermişlerdir.

Koca (2017), yapmış olduğu çalışma ile metro tünelleri- zemin- temel etkileşiminde öge rijitliklerinin rolü üzerinde durmuştur. Bu çalışmada sonlu eleman yöntemi ile birlikte TBM ile beraber yapılan tünel kazı işleminin mevcut halde bulunan bina temelinde meydana getirebileceği deformasyonlar, tünel hattı üzerinde yapılacak olan binaların tünelde meydan getirdiği deformasyonlara etkiyen parametrelerin hassaslık analizi ile bulunması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalar kapsamında oluşturulan modeller için sonlu eleman

yazılımını tercih etmiştir ve analizleri yapmıştır. Sistem özelliklerinde değişiklikler yaparak olumsuz koşullar oluşturulmuş ve bu doğrultuda incelemeleri gerçekleştirmiştir.

Uğuz (2019), yapmış olduğu çalışma ile demiryolu tünellerinde güvenli tünellerin dizaynı üzerinde durmuştur. Bu doğrultuda çalışması kapsamında Yüksek Hızlı Demiryolu Tünellerinde meydana gelebilecek olası risk, tehlike, kaza vb. durumlara karşı Uluslararası Demiryolu Birliği tarafından önerilmiş olan güvenlik tedbirlerini göz önünde bulundurarak, Ankara- İstanbul Yüksek Hızlı Tren Güzergâhı tünellerinde yapım aşaması devam etmekte olan güvenlik tünellerini diğer bir tabir ile kaçış tünellerini irdelemiştir. Çalışma sırasında destek sistemlerinin performanslarını incelemek için Phase 2 V8.014 bilgisayar programından yararlanmıştır. Yapılan araştırmalar ve incelemeler neticesinde süreksizlik etkisinin olmadığı veya az olduğu kaya koşullarının sayısal analizler ile tahmin edilebilir olduğunu görmüştür. Aynı zamanda süreksizliklerin sondaj ve yüzey gözlemleri yardımı ile belirlenmesi halinde tünelin sayısal analizler ile birlikte tahmin edilmesi durumunda eksik verilerden kaynaklı sorunlar yaşandığını da ortaya çıkarmıştır.

Birincioğlu (2017), yapmış olduğu çalışma ile tünel kazı- desteklemeleri ve hasır çelik yerine sentetik fiber donatı kullanımı üzerinde durmuştur. Bu doğrultuda çalışması kapsamında zeminin jeolojik ve geoteknik yapısını belirlemek için araştırmalar yapmış, tünel açılması için gerekli kaya kütle sınıflandırmasını, iksa yöntemini belirlemiş B1, B2, B3 zemin sınıflarında belirlenen hasır çelik yerine sentetik fiber kullanımı için yapısal tasarımını yaparak uygulamasını oluşturmuştur. Yapmış olduğu çalışmalardan elde etmiş olduğu yapısal tasarım neticesinde B1, B2, B3 zemin sınıflarında meydana gelebilecek gerilmeleri sentetik fiber kullanarak karşılamıştır. Yapmış olduğu çalışmalar ve elde ettiği sonuçlar ışığında uygun zeminlerde püskürtme betonda meydana gelebilecek kesit tesirlerine cevap verebilecek sentetik lifli fiber donatı dozajının belirlenmesi durumunda hasır çelik olmaksızın püskürtme beton da oluşabilecek kesit tesirlerinin sentetik lifli fiber donatının giderilebileceği sonucunu görmüştür.

Gedik (2018), yapmış olduğu çalışma ile tünel çevresindeki kaya parametrelerinin metasezgisel tabanlı geri hesaplanması üzerinde durmuştur. Bu çalışma ile birlikte betimsel tavlama ve sürü optimizasyonu yöntemleri yardımı ile sonlu elemanlara dayanmakta olan geri hesaplama yöntemi geliştirilmesi üzerinde çalışmalar yapmıştır. Üzerinde çalışma yapılarak geliştirilen geri hesaplama platformu Ankara- İstanbul Hızlı Tren Projesi içerisinde yer alarak inşa edilen aynı zamanda Yeni Avusturya Metodu kullanılarak açılan T26 Tüneli çalışmaları esnasında ölçülen deformasyon verilerini kullanarak test etmiştir.

Ayrıca tünel çevresinde mevcut olan gerilmelerin de geri hesaplanmasını sağlamıştır. Yapılan bu çalışma ile tüneller için kullanılan geri hesaplama yöntemlerinden metasezgisel optimizasyon algoritmalarını ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak doğru parametrelerin daha hızlı ve daha yakın şekilde elde edilmesini mümkün kılmıştır.

Bulut (2018), yapmış olduğu çalışma ile örnek bir NATM tüneline kazı derinliğinin deformasyonlara etkisinin araştırılması üzerinde durmuştur. Bu doğrultuda çalışması kapsamında tünel inşaatlarında tercih edilen ve kullanılan yöntemler ile birlikte deformasyon konusu üzerinde durmuştur, aynı zamanda Kocaeli bölgesinde NATM ile inşa edilmesi düşünülen bir metro projesinin verileri yardımı ile sonlu elemanlar yöntemi olarak kullanılan Plaxis 2D programında modelleme yapmıştır. Yapılması düşünülen tünelin mevcut zeminin, yüzey seviyesinden olan derinliğinin deformasyonlara olan etkilerini ve güvenlik sınırını belirlemeye çalışmıştır.

Hadley (2018), yapmış olduğu çalışma kapsamında derin tünel aynalarının sismik stabilitesi üzerine eksenel simetrik sonlu elemanlar yöntemiyle bir inceleme yapmıştır. Yapmış olduğu bu çalışma ile birlikte sismik yüklerin ayna stabilitesinde meydana getireceği etkilerin anlaşılmasını ve aynı zamanda tasarım sırasında kullanılabilecek faktörlerin önerilmesini sağlamayı amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda eksenel simetrik sonlu elemanlar metodu yardımı ile sismik yüklerin etkisi altında ayna stabilitesini inceleyerek elde etmiş olduğu sonuçlar ile literatür de mevcut olan limit analizi ölçümleri arasında kıyaslama yapmıştır. Yapmış olduğu çalışmalar neticesinde tünel ayna kısmında artan sismik yüklerin etkisi altında stabilitenin korunabilmesi amacıyla aynanın üstündeki destek basıncının artırılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Saçar (2019), yapmış olduğu çalışma ile alüvyal ve sıvılaşılabilen zeminlerde tünellerin deprem risk analizi üzerinde durmuştur ve uygulama örneği olarak da Adapazarı örneğini dikkate almıştır. Bu doğrultuda çalışmasında tünel yapılarındaki sismik performansın değerlendirilmesi amacıyla nümerik analizler gerçekleştirerek sıvılaşma ve oturma parametrelerinin neden olduğu hasarlar dikkate alarak gerekli çalışmalar yapmıştır. Çalışmada Adapazarı zeminlerini dikkate alarak bu tür zeminlerde yapılacak bir tünel için farklı derinlik, çap ve kalınlık değerlerinin sıvılaşma eğilimine, maksimum yer ivmesine ve zemin deformasyonlarına olan etkileri üzerinde durmuştur. Yapmış olduğu çalışmalar neticesinde Adapazarı zeminlerinde inşa edilebilecek tünel için derinlik, çap ve kalınlık için öneriler sunmuştur.

Dönder (2019), yapmış olduğu çalışma ile Topçam tüneli deformasyonlarının rastgele küme sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması üzerinde durmuştur. Bu doğrultuda çalışması kapsamında rastgele küme sonlu elemanlar yöntemini kullanarak elde etmiş olduğu tünel deformasyon sonuçlarının arazi ölçümleri ile mukayese edilmesi için çalışmalar yapmıştır. Bu çalışma için Ordu şehrinin bir ilçesinde yer alan Topçam tünelinin bir kesiti uygun görmüştür. Modelleme işlemini 2 boyutlu olarak gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmalar ve analizler ile birlikte Topçam tüneli için sahada yapılan deformasyon ölçümleri ile olasılıksal grafiğinden elde edilen verileri mukayese etmiştir. Bu mukayese sonucunda olasılıksal dağılım grafiğindeki maksimum ve minimum aralıkların saha ölçümlerinin içerdiği sonucunu ortaya çıkarmıştır.

Akın (2019), yapmış olduğu çalışma ile killi zeminlerde NATM ile açılan tünellerin deformasyon tahmini üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışma kapsamında İstanbul ilinde yer alan Çekmeköy ile Üsküdar mevkileri arasında bulunan yapım aşamalarının sona erdiği tünel güzergâhında killi zeminde Yeni Avusturya Yöntemi kullanılarak yapılan makas ve peron tünelleri araştırılmıştır. İlk olarak tünel güzergâhının ilgili kesimleri jeolojik ve geoteknik incelemelerin gerçekleştirilmesi için ele alınmıştır. Yeni Avusturya Metodu ilkelerine dikkat edilerek oluşturulan bu tünellerin inşası geoteknik ölçümler ile yapılmış, tünel iç kısmı ve zemin yüzeyinde meydana gelen hareketler irdelenmiştir. Yapılan analizler neticesinde tünel inşası esnasında yüzeyde oluşabilecek oturmaların pratik amaçlar doğrultusunda tahmini için bir bağıntı elde edilmiş ve önceki yapılan çalışmalarla mukayese edilmiştir. Kontrol ölçümleri dikkate alınarak yüzeyde oluşabilecek oturmaların tahmini için yeni bağıntılar oluşturulmaya çalışılmıştır.

Alan (2019), yapmış olduğu çalışma ile tünelden kaynaklanan yüzey oturmalarının sayısal analizler ile incelenmesi üzerinde araştırmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışma ile son zamanlarda tünel inşalarında, özellikle kent içinde yer alan tünellerdeki deformasyon ve stabilite problemlerine sebebiyet vermemek amacı ile kullanılan TBM ile yapılan tünel inşalarında oluşabilecek yüzey oturmaları ve deformasyonlar üzerinde araştırmalar gerçekleştirmiştir. Bu amaç doğrultusunda çeşitli sayısal analizler yapmıştır. Yapmış olduğu sayısal analizler neticesinde elde ettiği verileri, literatürdeki mevcut ampirik bağıntılar ile mukayese etmiştir. Bu mukayeseler sonucunda TBM etkisinde yüzeyde meydana gelen oturma ve deformasyonlarla ilgili değerlendirmeler yapmıştır.

Patemesi vd. (2017), yaptıkları çalışma kapsamında üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirilen analizleri donatılı ve donatısız tünel kazı yüzeylerinin

sayısal bir çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaya bağlı olarak elde edilen sonuçlar, geleneksel limit denge yönteminin sonuçları ve daha önceki sayısal çalışmalara dayalı bir şekilde analitik bir çözüm ile mukayese edilmiştir. Son olarak da deformasyon tepkileri değerlendirilmiştir. Çalışma sırasında ayrıca yüzey takviyelerinin faydaları üzerinde de durulmuştur.

Zhang vd. (2020), yapmış oldukları çalışma kapsamında Norveç Geoteknik Enstitüsü (NGI) tarafından Aktif- Doğru- Kayma- Pasif kavramına (NGI- ADP modeli) bağlı olarak geliştirilen anizotropik bir zemin modelini sonlu elemanlar metodunu kullanarak analiz etmişlerdir. Bu çalışmada da 682 vaka modellenmiştir. Bunun sebebi gömme derinliği, tünel merkezden merkeze uzaklık, toprak mukavemeti, rijitlik oranı ve anizotropi derecesi şeklinde sıralanan beş temel parametrenin çift tünel yapısal kuvvetleri üzerinde meydana getirdiği etkilerin analiz etmektir. Bu beş temel parametre ikiz tünel düzenlemelerini ve yeraltı toprak özelliklerini kapsamaktadır. Tünel kaplamalarında eğilme momentine ve itme kuvvetine etki eden önemli faktörleri sırası ile belirtmek gerekirse tünel mesafesi ve tünelin üzerinde yer alan zemin derinliğidir. Yapılan çalışmalar neticesinde ikiz tünel inşaatının simülasyonu sırasında tüneli çevreleyen zeminin anizotropi derecesinin çok önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Zemin anizotropisinin dikkate alınmaması durumunda ise ciddi tasarım hatalarının meydana gelebileceği anlaşılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilen tahmin modeli yardımı ile birlikte projelerin belirli hedef güvenilirlik endesklerini karşılamak amacıyla mühendislerin ikiz tünellerin yapısal tepkisini daha doğru tahmin etmelerine olanak sağlamaktadır.

Güneş (2021), yaptığı çalışmada sorunlu zemin koşullarında tünel açılımının sayısal değerlendirilmesi yapılarak bir vaka örneği incelenmiştir. Sahadan elde edilmiş konverjans ölçümlerinin olumsuz zemin şartları altında TBM ve NATM metotları ile tünel açılımını değerlendirmektir. Yapmış olduğu çalışmalar esnasında saha performansı ve sayısal analiz sonuçlarını, tasarımsal çözümlerin etkinliği ile birlikte kıyaslama yaparak irdelenmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Deneysel Çalışmalar

2.1.1. Zeminin Fiziksel ve Kıvam Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu tez kapsamında laboratuvar deneyleri TS 1900-1 ve TS 1900-2 dikkate alınarak yapılmıştır. Zeminin temel fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla araziden örselenmemiş numuneler alındı ve laboratuvara getirildi. Laboratuvara getirilen bu örselenmemiş numuneler üzerinde doğal birim hacim ağırlık deneyi, su muhtevası deneyi, özgül ağırlık deneyleri sırasıyla yapılmıştır. Deneylerin yapılmasının ardından gerekli hesaplamalar yapılarak zemine ait boşluk oranı, porozite, doygunluk derecesi, doygun birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Zeminin temel özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmış olan deneylerden elde edilen veriler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalara bağlı olarak elde edilen bulgulara Tablo 2.1’de yer verilmiştir. Aşağıda Şekil 2.1’de yapılan deneyler sırasında kullanılan bazı deney aletlerine yer verilmiştir.

Tablo 2.1. Deney sonuçlarına göre zeminin temel özellikleri

Numune Adı \ Temel Özellikler	Doygun Birim Hacim Ağırlık γ_d (kN/m ³)	Boşluk Oranı e (%)	Porozite n (%)	Doygunluk Derecesi S_r (%)
A-1	19,15	94,8	48,7	94,9
A-2	19,1	85,2	46	96,4
A-3	19,7	78,4	43,9	94,6
A-4	19,00	72,3	42	100
A-5	19,8	70,4	41,3	95,3
A-6	20,1	71,2	41,6	64,5

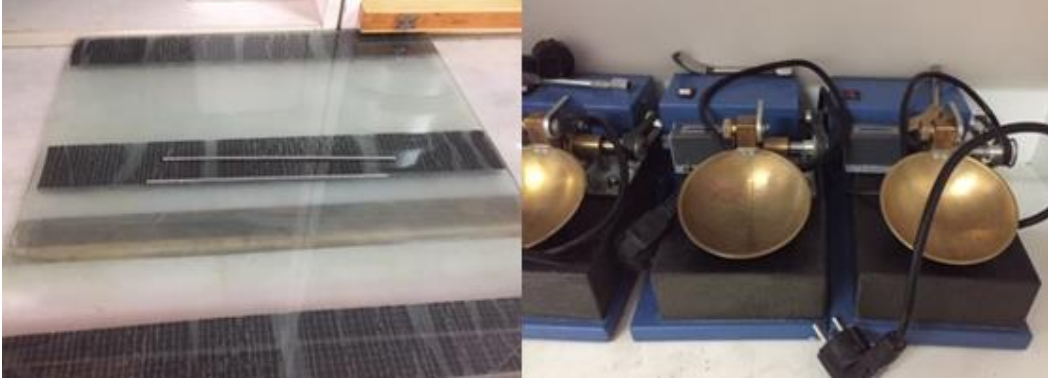


Şekil 2.1. Laboratuvarda kullanılan bazı deney aletleri

Zemin numuneleri üzerinde doğal birim hacim ağırlık deneyi, su muhtevası deneyi, özgül ağırlık deneyi yapılmıştır. Zeminin plastisite özelliklerini belirlemek amacıyla likit limit deneyi ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda plastisite indisi hesaplanmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda Tablo 2.2’de verilmiştir. Şekil 2.2’de likit limit ve plastik limit deneyinde kullanılan deney aletlerine yer verilmiştir.

Tablo 2.2. Zemin numuneleri üzerinde yapılan deneylerin sonuçları

Deneyler Numune	Doğal Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	Su Muhtevası (%)	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Likit Limit (%)	Plastik Limit	Plastisite İndisi (PI) (%)
A-1	18,904	32,007	2,782	58,716	0,332	25,516
A-2	18,926	30,615	2,684	68,043	0,344	33,643
A-3	19,485	26,049	2,734	78,311	0,300	48,311
A-4	19,206	29,500	2,556	72,671	0,366	36,071
A-5	19,592	25,136	2,666	74,029	0,344	39,629
A-6	18,615	16,5	2,728	66,319	0,314	34,919



Şekil 2.2. Likit limit ve plastik limit deneyinde kullanılan aletler

Zemin numunesi üzerinde organik madde tayini yapılmıştır. Bu deney sırasında zeminin etüvde kurutulmuş ve kurutulmamış hali üzerinde iki tane likit limit deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır ve zeminin inorganik olduğu belirlenmiştir.

$$\frac{\text{Likit Limit (Etüvde Kurutulmuş)}}{\text{Likit Limit (Kurutulmamış)}} = \frac{65,722}{61,538} = 1,068 > 0,75$$

2.1.2. Zeminin Konsolidasyonu

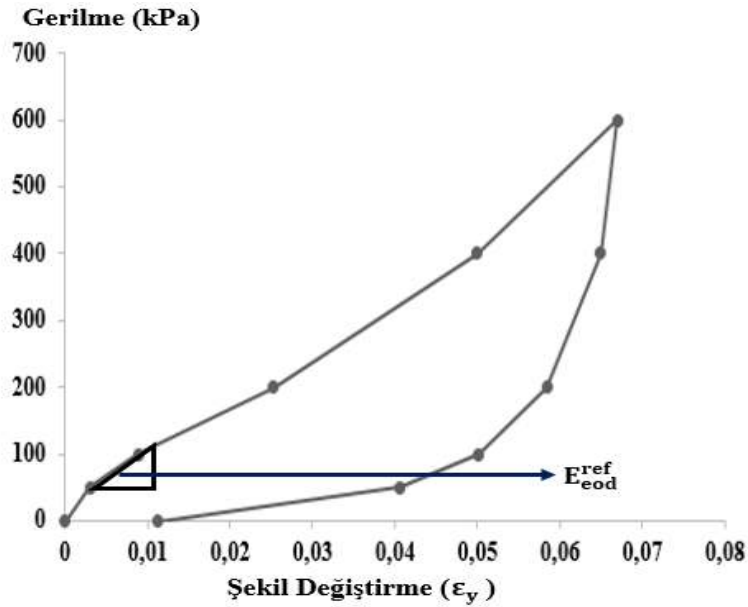
2.1.2.1. Konsolidasyon Deneyi

Konsolidasyon deneyinin amacı, mevcut zeminde meydana gelen oturmaların, oturma oranlarının, permeabilitenin ve sıkışma katsayılarının hesaplanarak belirlenmesidir. Aşağıda Şekil 2.3'te deney sırasında kullanılan aletlere yer verilmiştir.



Şekil 2.3. Konsolidasyon deneyi sırasında yapılan yüklemeler ve deformasyon saati

Konsolidasyon deneyinde yapılan yüklemelerin ardından tam boşaltma yapılmıştır. Konsolidasyon deneyinden elde edilen veriler doğrultusunda gerilme- deformasyon grafiği çizilmiştir. Bu gerilme- deformasyon grafiğinde yüklemenin yapıldığı kısma çizilen teğetin eğiminden E_{oed}^{ref} şeklinde ifade edilen referans tanjant rijitliği belirlenmiştir. Aşağıda Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

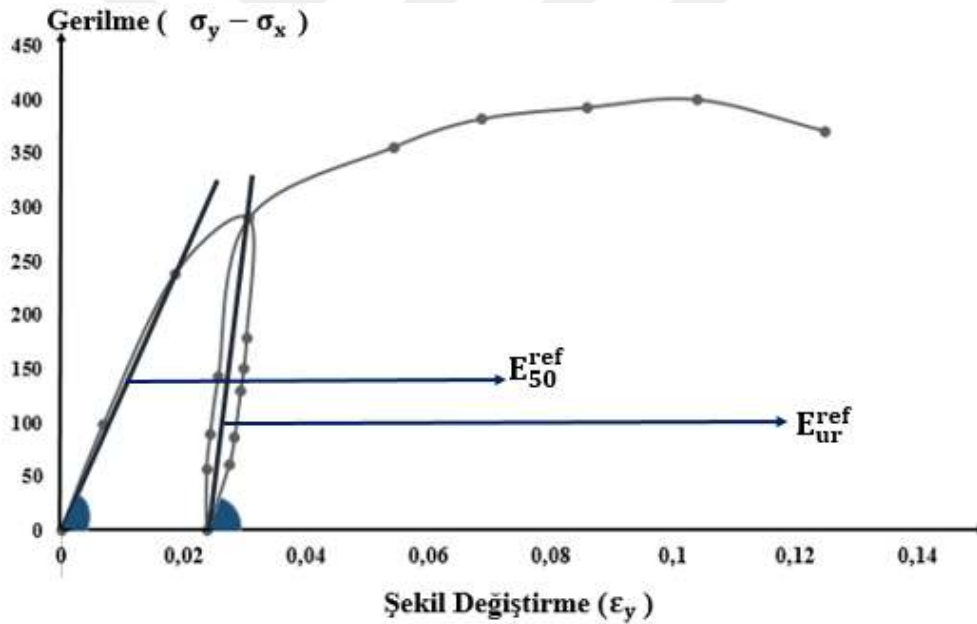


Şekil 2.4. Konsolidasyon deneyinden elde edilen gerilme- şekil değişirme grafiği

2.1.3. Kayma Direnci Parametrelerinin Belirlenmesi

2.1.3.1. Üç Eksenli Basınç Deneyi

Üç eksenli basınç deneyi zemin parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan bir deneydir. Üç eksenli deney sırasında zemin numunesi üzerinde mümkün olduğunca arazi koşulları oluşturulmaya dikkat edilir. Üç eksenli basınç deneyinden elde edilen verilerden de Hardening Soil modelin parametrelerinin belirlenmesinde yararlanılmıştır. Deney sonuçları dikkate alınarak elde edilen aşağıda verilmiş Şekil 3.2'deki grafikten E_{50}^{ref} (üç eksenli deneyden referans sekant rijitliği) ve E_{ur}^{ref} (üç eksenli deneyden referans boşaltma sertliği) belirlenmiştir. Aşağıda Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Üç eksenli deney sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiği

2.1.3.2. Kesme Kutusu Deneyi

Kesme kutusu deneyinin amacı zeminin kayma direnci parametreleri olan kohezyon ve kayma mukavemeti açısının belirlenmesidir. Kesme kutusu deneyi sabit düşey yük altında kare ya da silindir şeklindeki numunelerin ortadan kesilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Deney sırasında kullanılan deney aleti Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Kesme kutusu deneyinde kullanılan deney aletleri

Kesme kutusu deneyinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda zeminin kayma direnci parametreleri belirlenmiştir. Tablo 2.3’de kesme kutusu deneyinden elde edilen zemine ait kayma direnci parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.3. Zeminin kayma direnci parametreleri

Kohezyon (c)
0,487 (kgf/cm ²)- 47,73 kPa
Kayma Mukavemeti Açısı (Φ)
13,5°

2.1.4. Zeminlerde Stabilizasyon İşlemi

Zeminlerin iyileştirilmesi mevcut zeminin özelliklerini farklı fiziksel, kimyasal ya da biyolojik yöntemler yardımı ile güçlendirilmesi esasına dayanmaktadır. Zemin oturma ve taşıma gücü bakımından yetersiz ise bu durumda zemin içerisinde yer alan boşluklar mekanik araçlar kullanılarak azaltılabilir, farklı karışımlar yardımı ile doldurulabilir, yer altı su seviyesi düşürülebilir ya da mevcut zeminin su içeriği azaltılabilir (Ayan, 2009).

Zeminlerin stabilizasyonu sırasında iki farklı seçenek kullanılabilmektedir. Bunlardan biri zemine kireç, bentonit, çimento, mermer tozu gibi herhangi bir katkı maddesi ilave edilmesi sonucu zeminde kimyasal reaksiyon meydana getirerek zeminin güçlendirilmesidir. Bu şekilde yapılmış olan zemin stabilizasyon işlemine kimyasal stabilizasyon denilmektedir. Diğer seçenek ise mevcut zemin içerisine herhangi bir katkı maddesi ilave edilmeden

zeminde kimyasal reaksiyon meydana getirmeden zemini güçlendirir. Bu şekilde yapılmış olan zemin stabilizasyon işlemine de mekanik stabilizasyon denilmektedir (Gücek, 2011).

Zemin iyileştirme çalışmaları taşıma gücü yetersiz olan zeminlerin taşıma gücünü arttırmak, zemin geçirimliliğini azaltmak, zeminde meydana gelebilecek şişme ve kabarma gibi etkileri azaltmak, oluşabilecek oturma miktarını ve deformasyonu azaltmak gibi pek çok amaç doğrultusunda gerçekleştirilebilmektedir. Zemin stabilizasyon çalışmaları doğrultusunda mevcut zeminin mukavemeti artar, sıvılaşma riski azalır, geçirimliliği azalır, sıkışabilirlik azalır, permeabilitesi azalır. Zemin iyileştirme çalışmaları sonucunda kumlu zeminlerde sıkılık, killi zeminlerde ise kıvam iyileşmektedir (Çınar, 2014).

2.1.4.1. Stabilizasyon İçin Numune Hazırlanması

Bu tez çalışmasında kil zeminde yer alacak olan tünel yapısının kaplaması etrafına farklı kalınlıklarda stabilizasyon yöntemi ile iyileştirme yapılmıştır. Zemin stabilizasyonu sırasında katkı maddesi olarak çimento kullanılmıştır. Kil zeminin çimento ile stabilizasyonu için dört tane numune hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanması sırasında kullanılan kalıpların çapı 50 mm, yüksekliği ise 121 mm'dir. Kalıpların hacminden yararlanarak kullanılması gereken zemin çimento ve su miktarları hesaplanmıştır. Şekil 2.7'de numune hazırlanması aşamaları gösterilmiştir. Şekil 2.8'de numunelerin hazırlandığı kalıplara yer verilmiştir.



Şekil 2.7. Numune hazırlama aşamaları



Şekil 2.8. Numunelerin hazırlandığı kalıplar

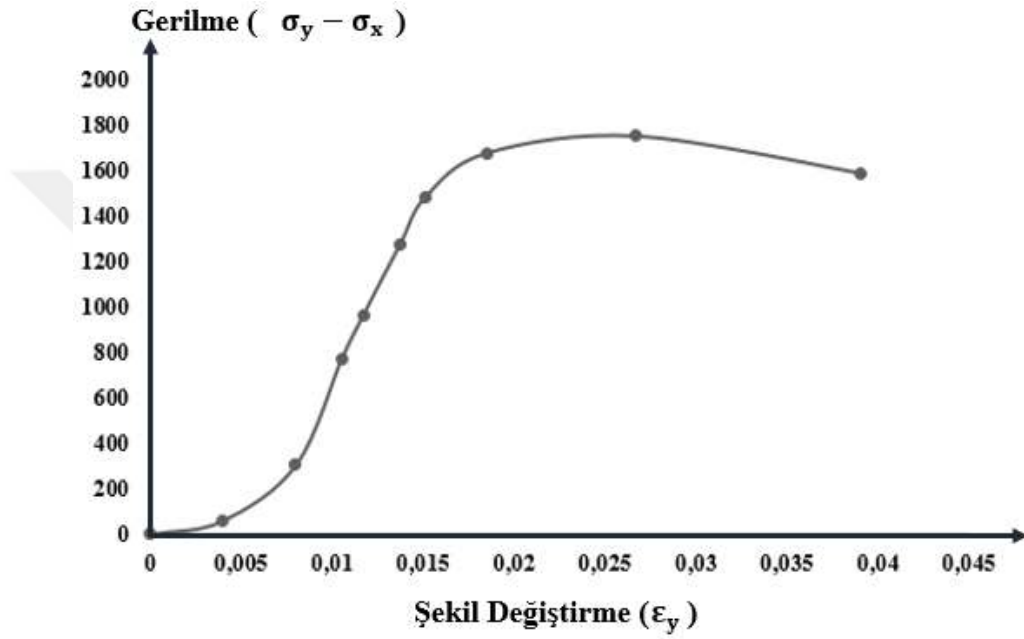
Kil zeminin çimento ile stabilizasyonu için gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar doğrultusunda dört adet numune hazırlanmıştır. Bu numuneler dikkatli bir şekilde desikatöre yerleştirilmiştir. Dört adet numunenin ikisi üzerinde yedi gün sonunda, diğer ikisi üzerinde ise 28 gün sonunda üç eksenli basınç deneyleri yapılmak üzere desikatör de bekletilmeye bırakılmıştır. Şekil 2.9’da desikatörde kür amacıyla bekletilmeye bırakılan numuneler gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Hazır hale getirilen numuneler

Kil zemin 400 dozaj çimento kullanılarak stabilize edilmiştir. Stabilize edilmiş kil zeminde modelleme işlemi sırasında Mohr-Coulomb modeli tercih edilmiştir. Yapılacak olan bu modelleme sırasında zemine ait kayma direnci parametrelerini belirlemek amacıyla üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Bu deney sırasında daha önceden hazırlanıp desikatörde

kür amacıyla 7 gün ve 28 gün bekletilmiş numuneler kullanılmıştır. Nümerik çalışmalar sırasında 7 gün kürde bekletilmiş olan numunelerin deney sonuçları kullanılmıştır. Günlük yaşamda tüneller inşa edilirken 28 gün beklemek inşaat süresini ve yapılacak çalışmaları olumsuz şekilde etkileyeceğinden 7 gün kürde bekletilmiş olan numuneler kullanılmıştır. Deney sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda gerilme-şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Çizilen gerilme-şekil değiştirme grafiği aşağıda Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10. Üç eksenli basınç sonucu çizilen gerilme-şekil değiştirme grafiği

Deneyden elde edilen sonuçlar doğrultusunda zemine ait kohezyon ve kayma mukavemeti açısı değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler hesaplanırken aşağıda verilen bağıntıdan yararlanılmıştır. Tablo 2.4'de zemin parametrelerine yer verilmiştir.

Tablo 2.4. Zemin parametreleri

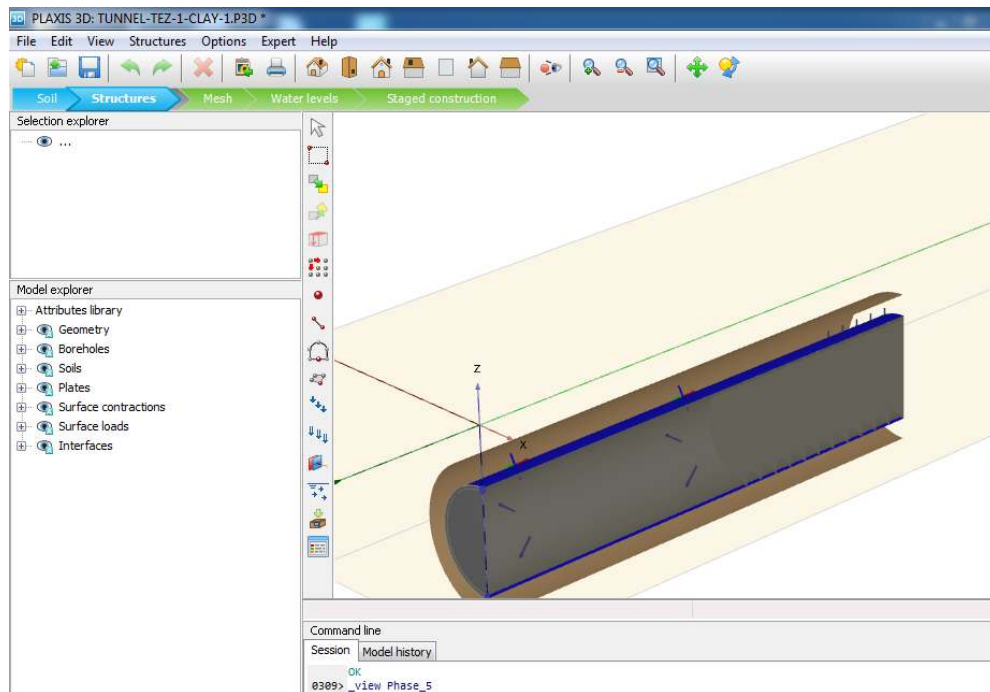
Kohezyon (c) (kN/m ²)
120,26
Kayma Mukavemeti Açısı (Φ)
57,44°

2.2. Nümerik Çalışmalar

2.2.1. Kil Zeminde TBM ile Tünel Yapısının Modellenmesi

Tünel çalışmaları esnasında kullanılan tünel delme makinesi içerisine taşınan ve birbirine civatalanabilen prefabrike beton halkalar, tünel yapılarında çoğunlukla kalkan tünel kaplamasını oluşturmak için kullanılmaktadır.

Yapılan bu çalışmada tünel açma makinesi olarak TBM tercih edilmiştir. Tünel kazısı sırasında kullanılan TBM makinesi 9 m uzunluğuna ve 8,5 m çapa sahiptir. Tünellerde kaplama çalışmaları esnasında tünel açma makinesi (TBM) sabit kalmaktadır. Tünel çalışması sırasından bir tünel kaplama halkası tamamen oluşturulduktan sonra bir sonraki tünel kaplamasını oluşturmak için öncelikle zeminde yeterince kazı işlemi gerçekleştirilmektedir. Tünel yapısında genel olarak inşaat süreci yaklaşık olarak 1,5 m uzunluğunda bir tünel halkası uzunluğu ile tünelin inşa çalışmaları aşamalara ayrılabilir. Tünel geometrisi oluşturulurken tünel yapısı yarım simetrik olarak modellenmiştir. Tünel modeli x eksenini doğrultusunda 20 m genişliğinde, y eksenini doğrultusunda 80 m genişliğinde ve 18 m derinlikte olacak şekilde oluşturulmuştur. Şekil 2.11’de Plaxis 3D programında modelleme işlemi gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Plaxis 3D programında modelleme işlemi

Zemin modellemesi sırasında tek bir zemin kullanılmıştır. Modelleme kil zeminde gerçekleştirilmiştir. Kil zemin Hardening soil olarak modellenmiştir.

Hardening Soil Model pekleşen zemin modeli olarak da adlandırılmaktadır. Bu model ile birlikte özellikle gerilmeye bağlı olarak rijitlik artışı, üç farklı rijitlik parametresi ile birlikte yükleme- boşaltma ve elastik- plastik ayrımının dikkate alınması ile birlikte yapılacak modelin gerilme- şekil değiştirme davranışı gerçeğe en yakın sonucu verecek şekilde oluşturulur (Şengün, 2013). Bu modelleme yöntemi hem kohezyonlu hemde kohezyonsuz zeminler için kullanılabilir. Ancak aşırı derecede konsolide olmuş killerin davranışlarının modellenmesinde dikkat edilmelidir. Bunun nedeni bu tarz zeminlerin davranışları çok karmaşık olmakla birlikte bu davranışları etkileyen birçok faktörün mevcut olmasıdır (URL- 6).

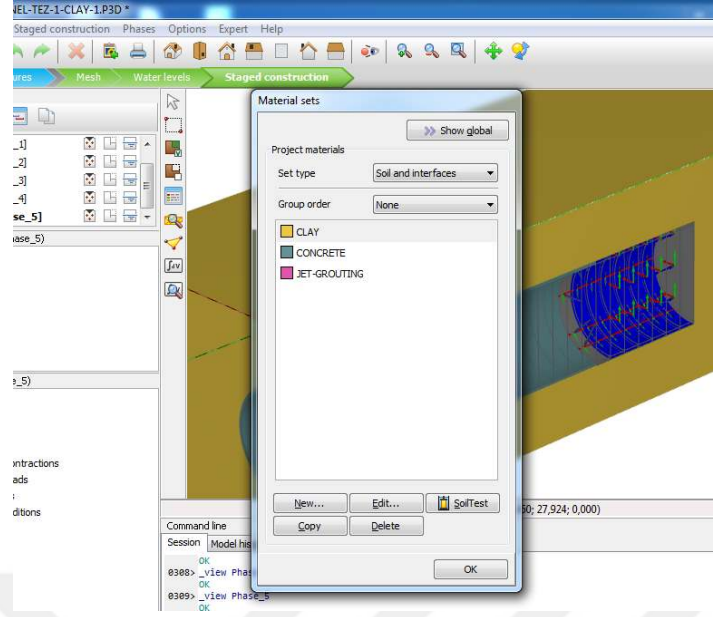
Zemine ait genel bilgiler ve zemin parametreleri Tablo 2.5. ve Tablo 2.6'da verilmiştir. Şekil 2.12'de Plaxis 3D programında malzemelerin oluşturulması gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Zemin tabakasının genel bilgileri

Genel	
Malzeme modeli	Hardening Soil
Drenaj tipi	Drenajlı
γ_{unsat} (kN / m ²)	15
γ_{sat} (kN / m ²)	19

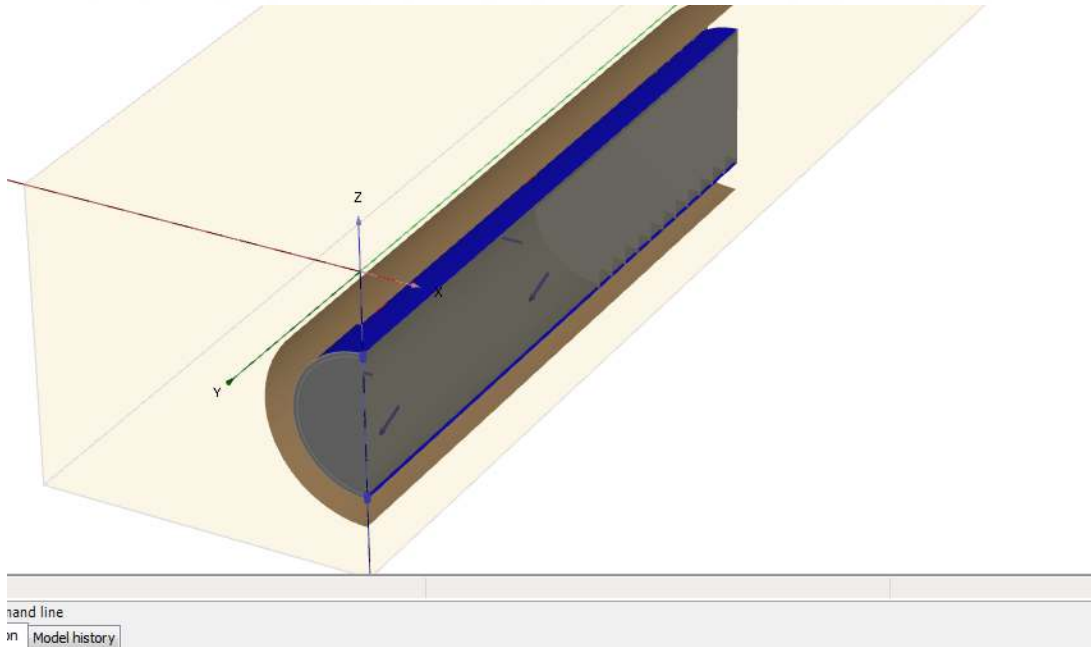
Tablo 2.6. Modelleme sırasında kullanılan zemin parametreleri

Zemin Parametreleri	Parametre Değerleri
E_{50}^{ref} (kPa)	10625
E_{oed}^{ref} (kPa)	15200
E_{ur}^{ref} (kPa)	33710
c (kPa)	48
ϕ	13,5
ν	0,20



Şekil 2.12. Plaxis 3D programında malzemelerin oluşturulması

Modelleme sırasında tünel iç çapı 4 m, tünel dış çapı ise 4,25 m olarak modellenmiştir. Şekil 2.13’de Plaxis 3D programı ile oluşturulan tünel geometrisine yer verilmiştir.



Şekil 2.13. Tünel geometrisinin modellenmesi

Tünel kaplamasında kullanılan beton malzeme özellikleri Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.7. Kaplamada kullanılan betonun genel ve parametrik özellikleri

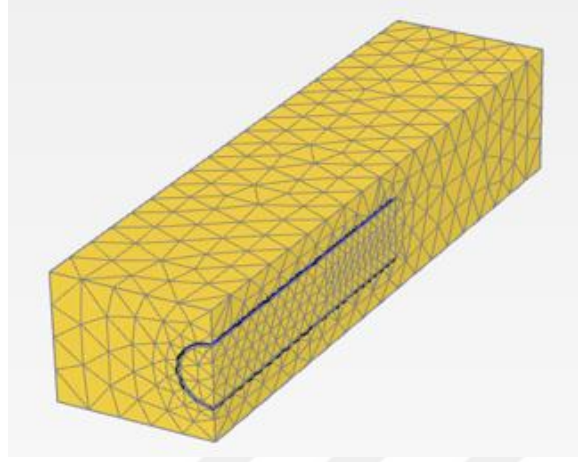
Genel	
Malzeme modeli	Linear elastic
Drenaj tipi	Non-porous
γ_{unsat} (kN / m ³)	27
γ_{sat}	—
Parametreler	
E' (kN / m ²)	3,1.10 ⁷
ν'	0,1
c'_{ref}	—
ϕ'	—

Tünel çalışması sırasında kullanılan TBM makinesinin özellikleri Tablo 2.8’de verilmiştir.

Tablo 2.8. Modelleme sırasında kullanılan TBM makinesinin genel özellikleri

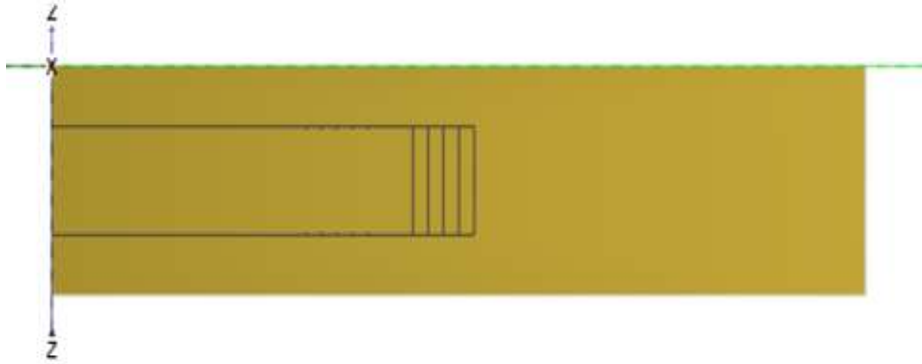
Parametreler	TBM
d (m)	0,35
γ (kN / m ³)	120
Malzeme davranışı	Linear; Isotropic
E ₁ (kN / m ²)	23.10 ⁶
ν_{12}	0
G ₁₂ (kN / m ²)	11,5.10 ⁶

Şekil 2.14’de Plaxis 3D programında oluşturulan sonlu elemanlar ağına yer verilmiştir.



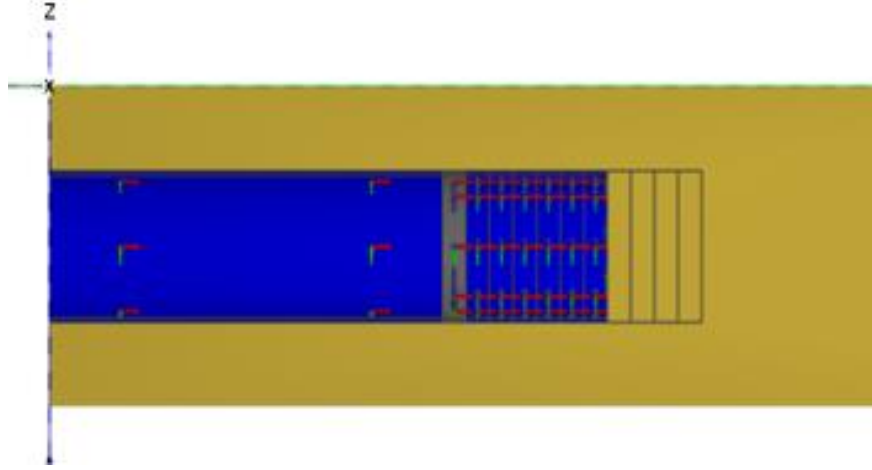
Şekil 2.14. Plaxis 3D programında sonlu elemanlar ağı oluşturma

Modelleme işleminde ağ oluşturulduktan sonra su seviyesi sabit kalacağından su seviyeleri modu atlanmıştır. Tünelin başlangıç aşamasının tamamlanmasının ardından sırasıyla diğer aşamalara geçilmiştir. Şekil 2.15’de tünelin başlangıç aşamasına yer verilmiştir.

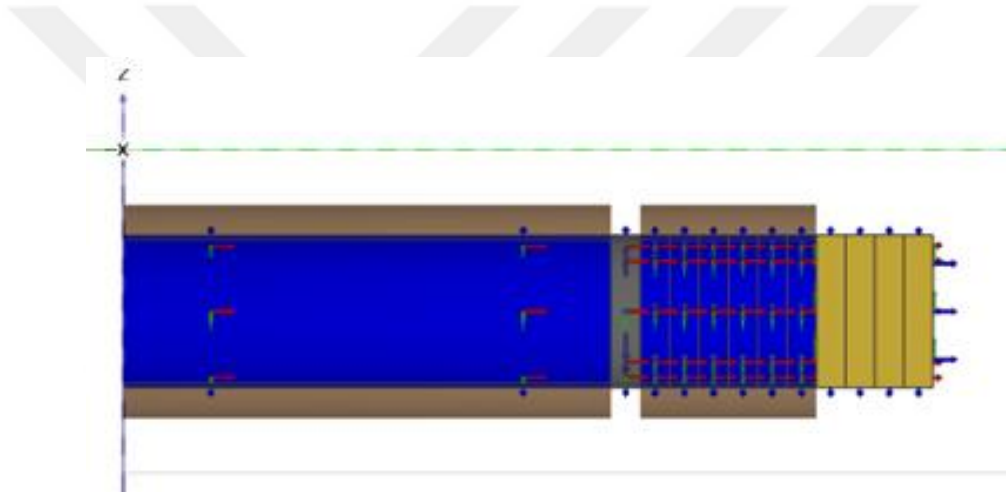


Şekil 2.15. Tünelin başlangıç aşaması

Birinci aşamada TBM makinesinin başlangıç konumu belirlenmiştir. Bu aşamada tünel inşaatında kullanılan TBM makinesinin 25 m ilerlediği varsayılmıştır. Aşağıda Şekil 2.16’da ve Şekil 2.17’de tünel yapısındaki TBM makinesinin başlangıç konumu gösterilmiştir.

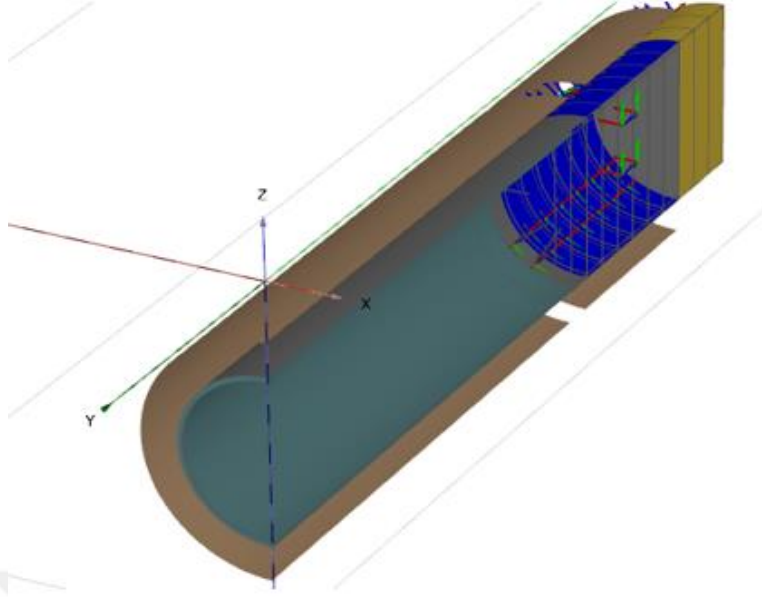


Şekil 2.16. Tünelde kullanılan TBM makinesinin başlangıç konumu

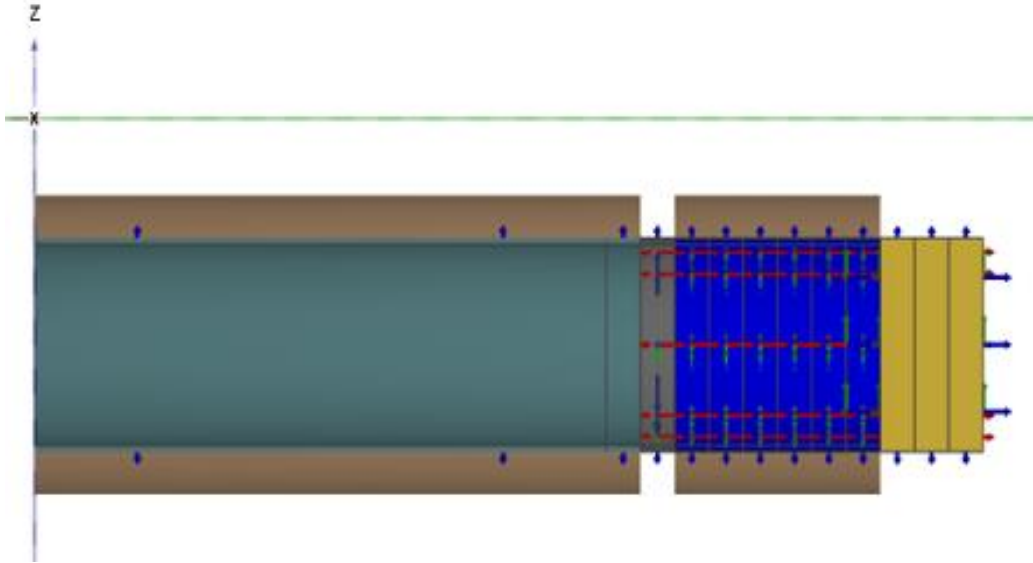


Şekil 2.17. TBM makinesinin başlangıç aşaması

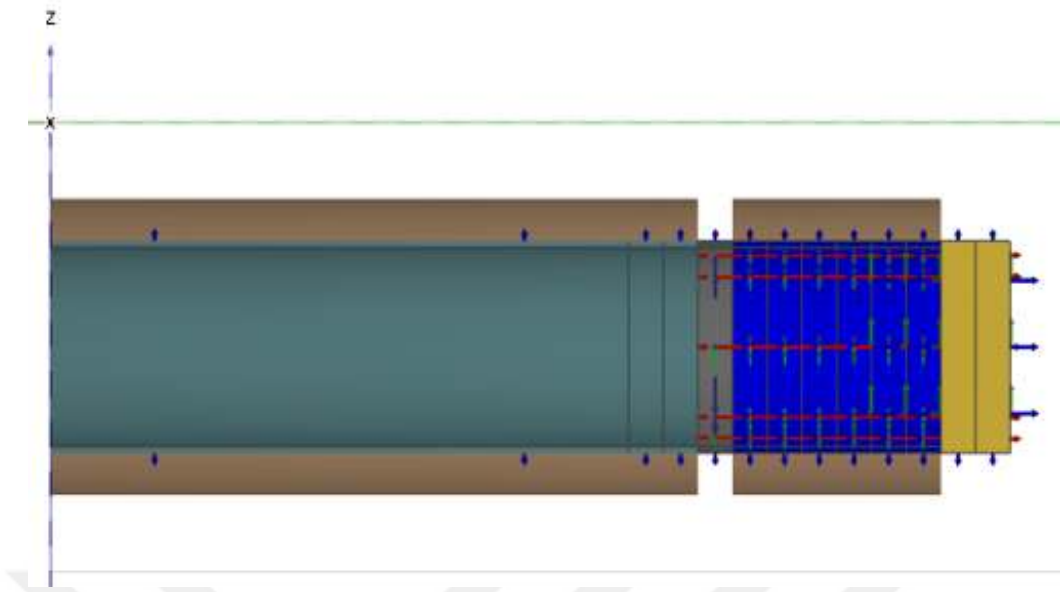
Tünelde TBM makinesinin başlangıç konumu belirlendikten sonra yeni bir aşamaya geçilmiştir. Bu aşamada ve daha sonraki aşamalarda sırasıyla TBM makinesinin 1,5 m'lik ilerlemesi modellenmiştir. Şekil 2.18, Şekil 2.19, Şekil 2.20, Şekil 2.21, Şekil 2.22'de de TBM makinesinin 1,5 metrelik ilerlemelerine yer verilmiştir.



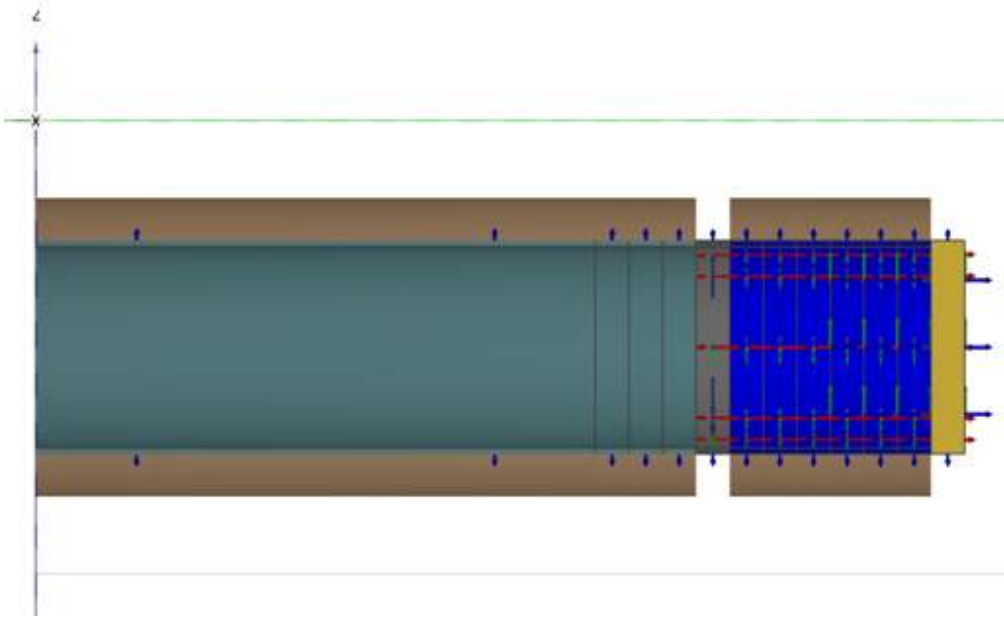
Şekil 2.18. TBM makinesinin 1,5 metrelik ilerlemesi



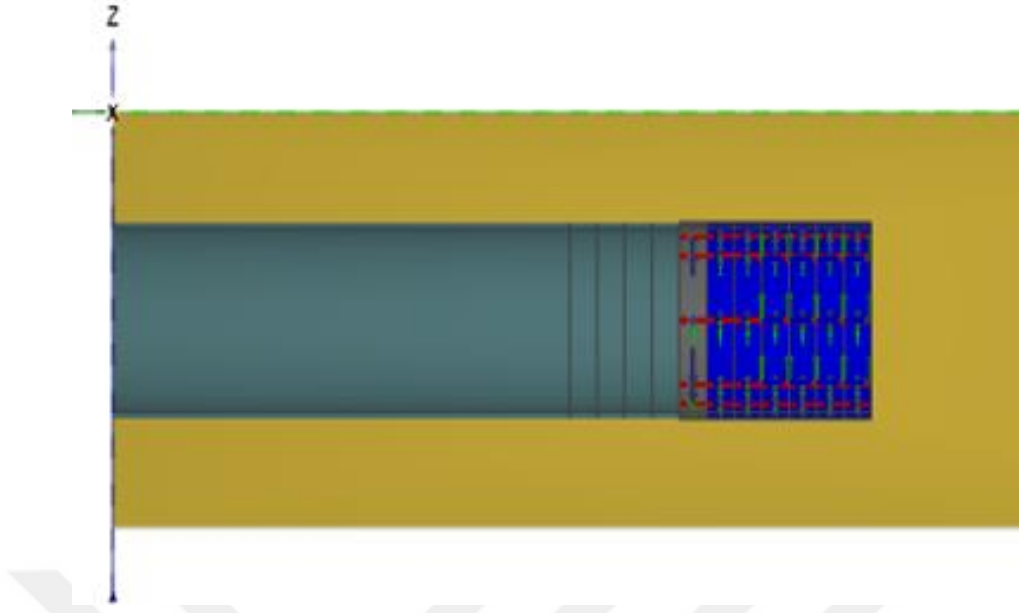
Şekil 2.19. TBM makinesinin 1,5 metrelik ilerlemesi-1



Şekil 2.20. TBM ilerlemesi -2



Şekil 2.21. TBM ilerlemesi -3

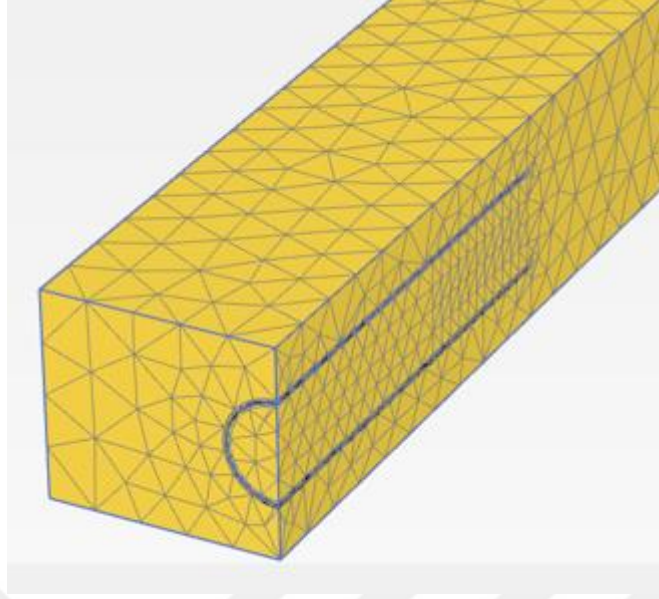


Şekil 2.22. TBM ilerlemesi -4

Tünel yapısının TBM ile modellenmesinin ardından Plaxis 3D programı olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ile birlikte analizler gerçekleştirilmiştir.

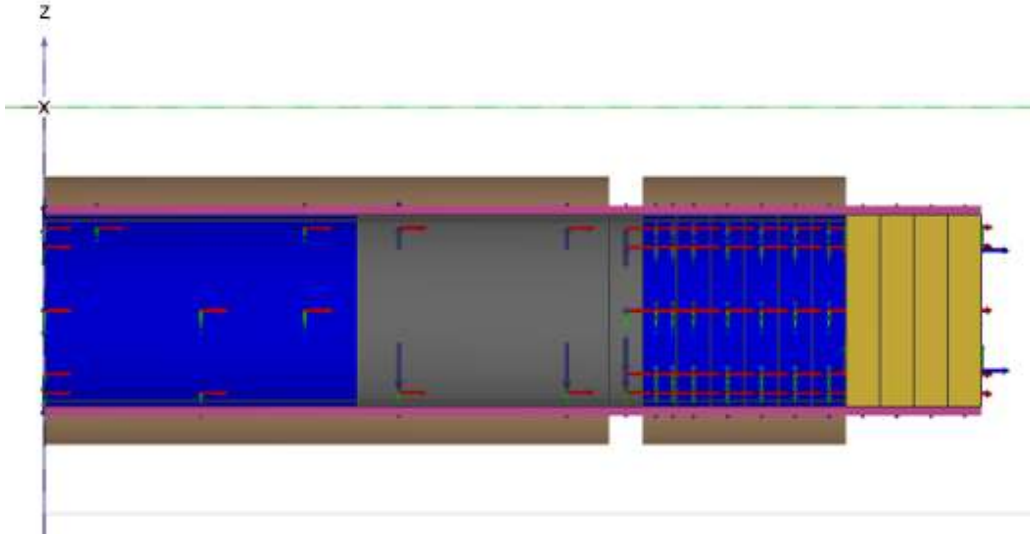
2.2.2. Tünel Kaplamasının Etrafının Çimento ile Stabilizasyon Edilmesinin Ardından TBM ile Modelleme İşlemi

Bu aşamada çimento ile stabilizasyon işlemi yapılan zemin Plaxis 3D programında tekrar modelleme yapılırken tünel kaplama kısmının etrafına farklı kalınlıklarda tabaka olarak tanımlanmıştır. Zemine uygulanan bu yöntem ile birlikte zeminin taşıma gücü arttırılmaktadır. Bu yöntem ile birlikte daha rijit bir zemin oluşturulmaya çalışılmıştır. Kullanılan bu yöntem ile oluşturulan zemin sıvılaşma, oturma ve sismik tehlikelere karşı daha dayanıklı hale getirilmiştir. TBM ile modellenen tünel yapısının uzunluğu 41,5 m olarak belirlenmiştir. Çimento stabilizasyon işlemi ile oluşturulan tabaka tünel uzunluğu dikkate alınarak 13,833 m olarak belirlenmiştir ve üç aşama halinde uygulanmıştır. Tünel kaplama kısmının etrafına ilk olarak yapılan çimento ile stabilizasyon işleminin kalınlığı 40 cm'dir. Şekil 2.23'de çimento ile stabilizasyon çalışmasının ardından oluşturulan sonlu elemanlar ağı gösterilmiştir.

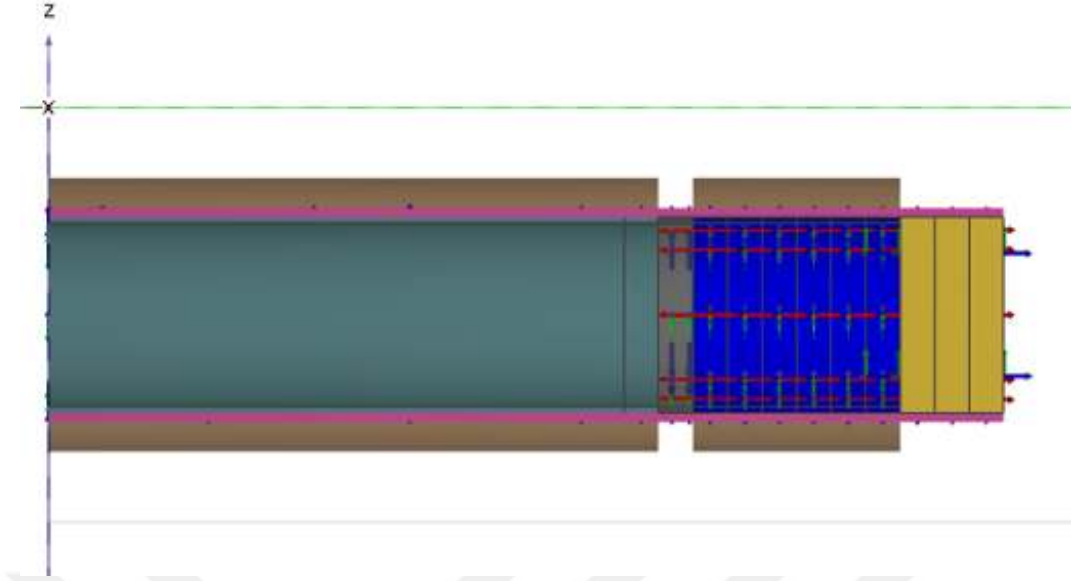


Şekil 2.23. Zemin iyileştirme sonrası oluşan sonlu elemanlar ağı

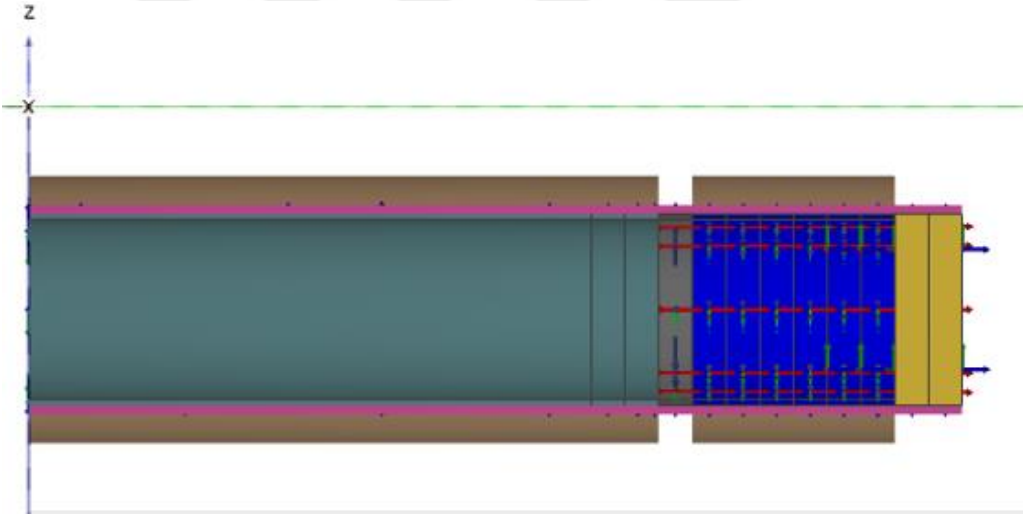
Aşağıda Şekil 2.24, Şekil 2.25, Şekil 2.26, Şekil 2.27 ve Şekil 2.28’de sırasıyla TBM makinesinin konumu ile ilerleme aşamaları gösterilmiştir.



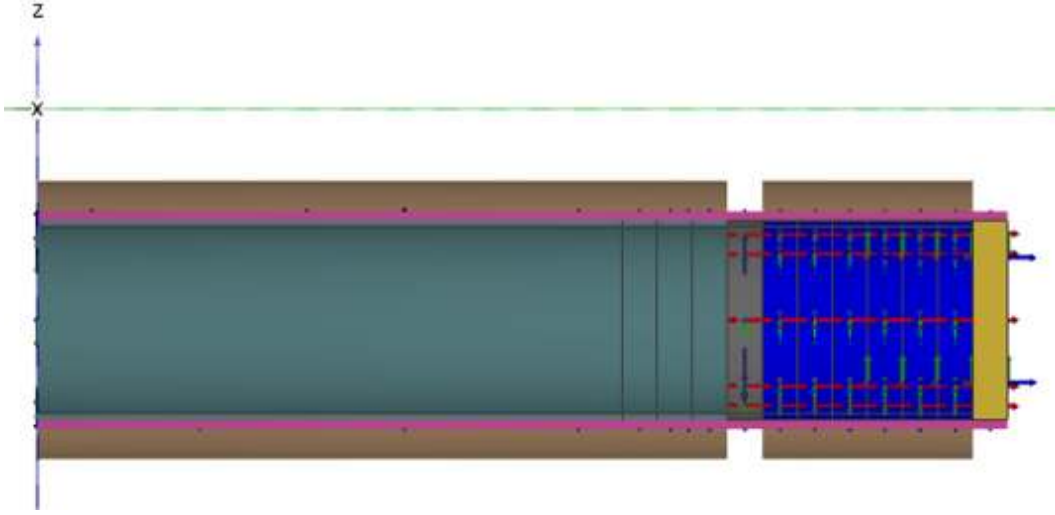
Şekil 2.24. TBM konumu



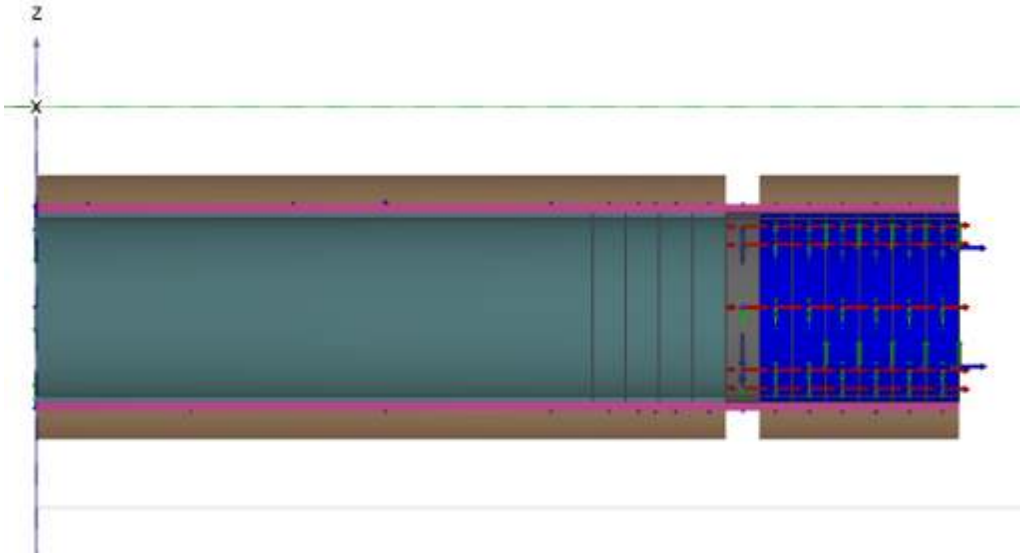
Şekil 2.25. TBM aşama-1



Şekil 2.26. TBM aşama-2



Şekil 2.27. TBM aşama-3

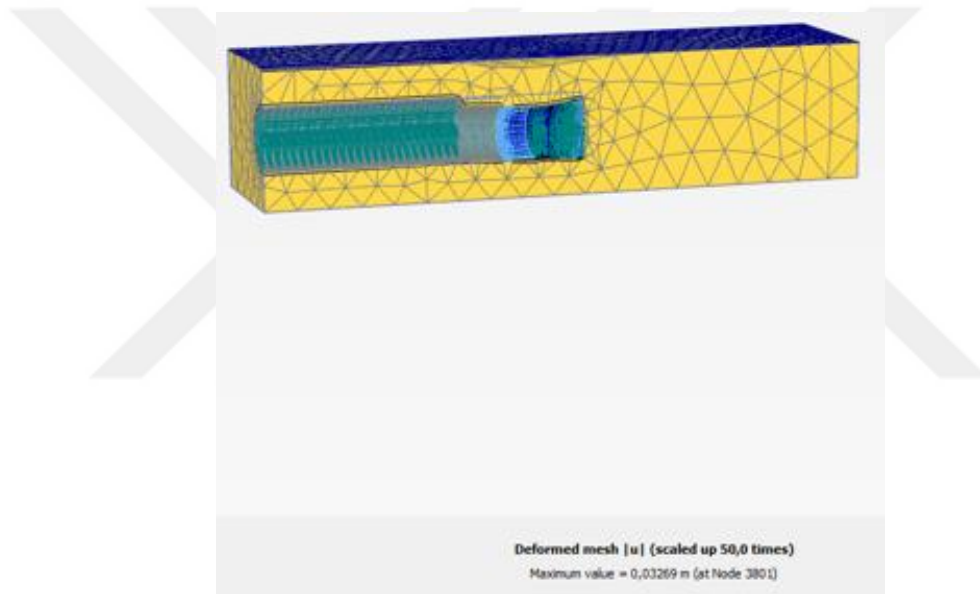


Şekil 2.28. TBM aşama- 4

Tünel kaplama kısmının etrafına 40 cm kalınlığında yapılan çimento ile stabilizasyon işleminin ardından Plaxis 3D sonlu elemanlar programında analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarına bağlı olarak zeminde meydana gelen yer değiştirmeler, zeminde oluşan asal gerilmeler, kayma gerilmeleri elde edilmiştir. Tünel kaplaması etrafında tekrar aynı şekilde 50 cm, 80 cm, 100 cm, 120 cm ve 160 cm kalınlıklarında modelleme işlemi yapılmıştır. Modelleme işleminin ardından analizler yapılarak elde edilen analiz sonuçlarına bağlı olarak tekrar zeminde meydana gelen yer değiştirmeler, zeminde oluşan asal gerilmeler ve kayma gerilmeleri hesaplanmıştır.

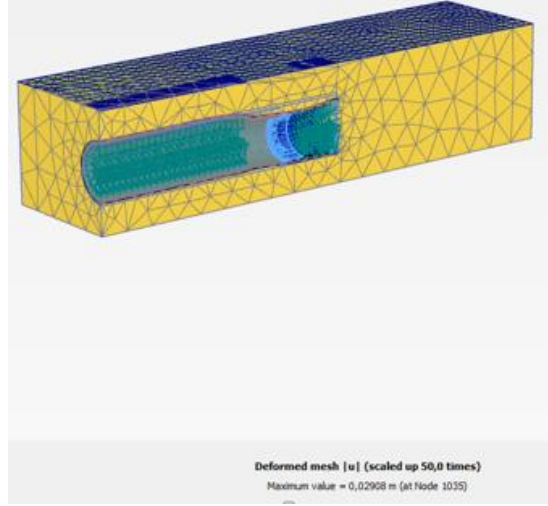
3. BULGULAR VE İRDELEMELER

Kil zeminde ve kil zeminin çimento ile stabilizasyon çalışmalarının ardından modelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Modelleme aşamalarından sonra analiz çalışmaları yapılmıştır. Kil zeminde yapılan modelleme çalışmalarının ardından gerçekleştirilen analizlere bağlı olarak zemin yüzeyinde meydana gelen toplam yer değiştirme ise 32,69 mm olarak ifade etmek mümkündür. Aşağıda Şekil 3.1’de zemin yüzeyinde meydana gelen toplam yer değiştirmeye yer verilmiştir.



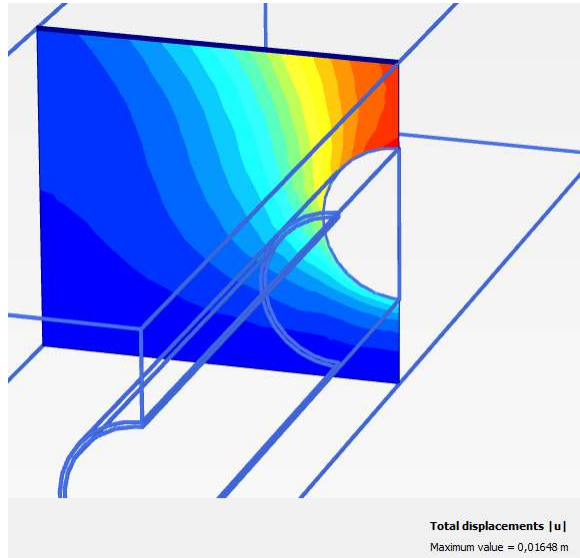
Şekil 3.1. Kil zeminde oluşan toplam yer değiştirme

Kil zeminde ilk olarak tünel kaplama kısmının etrafına yapılan 40 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon çalışmalarının ardından tekrar analizler yapılmıştır. Bu analiz çalışmalarında elde edilen zemin yüzeyindeki toplam yer değiştirme ise 29,08 mm olarak belirlenmiştir. Bu iki sonucu mukayese etmek gerekirse zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmelerin yapılan çimento ile stabilizasyon işlemine bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuca bağlı olarak kil zeminde tünel inşası sırasında tünel kaplama kısmının etrafına çimento ile stabilizasyon işleminin yapılması avantaj sağlamaktadır. Aşağıda Şekil 3.2’de çimento ile stabilizasyon işlemine bağlı olarak zemin yüzeyinde meydana gelen toplam yer değiştirme gösterilmiştir.

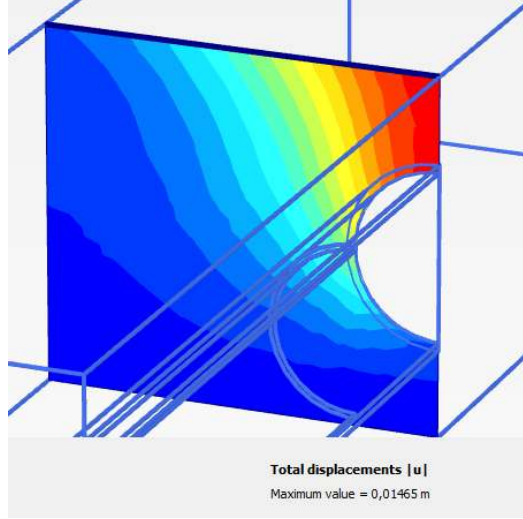


Şekil 3.2. Zeminde oluşan toplam yer değiştirmeler

Şekil 3.3’de kil zeminde modellenen tünel yapısının analiz sonuçlarından elde edilen en kesitte oluşan yer değiştirme gösterilmiştir. Analiz sonuçlarından alınan bu en kesitte zeminde oluşan yer değiştirme 16,48 mm’dir. Şekil 3.4’de ise kil zeminde inşa edilen tünelin kaplama kısmının etrafına 40 cm kalınlığında çimento ile yapılmış olan stabilizasyon işleminin ardından elde edilmiş yer değiştirme miktarı 14,65 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.3’de ve Şekil 3.4’deki en kesitler tünel yapısının aynı noktalarından alınan en kesitlerdir. Bu iki en kesitte meydana gelen yer değiştirmeler mukayese edilecek olursa zeminde meydana gelen yer değiştirmelerde azalmalar olduğu sonucuna varılabilir.

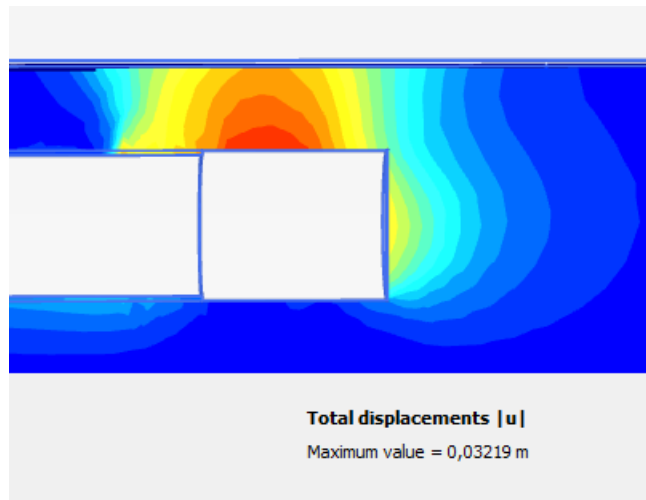


Şekil 3.3. Kil zemindeki tünelden alınan en kesit

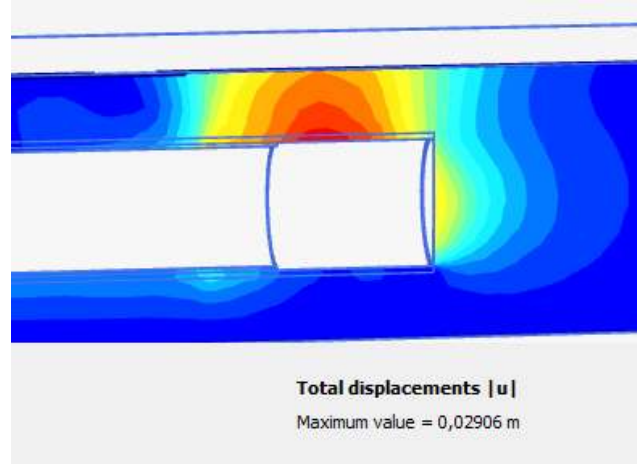


Şekil 3.4. Çimento ile stabilizasyon işleminin ardından alınan en kesit

Şekil 3.5’de kil zeminde modellenen tünel yapısının analiz sonuçları boy kesitte meydana gelen yer değiştirme gösterilmiştir. Analiz sonuçlarından alınan bu boy kesitte zeminde oluşan yer değiştirme 32,19 mm’dir. Şekil 3.6’da ise kil zeminde inşa edilen tünelin kaplama kısmının etrafına 40 cm kalınlığında çimento ile yapılmış olan stabilizasyon işleminin ardından elde edilmiş yer değiştirme miktarı 29,06 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.5’de ve Şekil 3.6’daki boy kesitler tünel yapısının aynı noktalarından alınan boy kesitlerdir. Bu iki boy kesitte meydana gelen yer değiştirmeler mukayese edilecek olursa zeminde meydana gelen yer değiştirmelerde azalmalar olduğu sonucuna varılabilir.

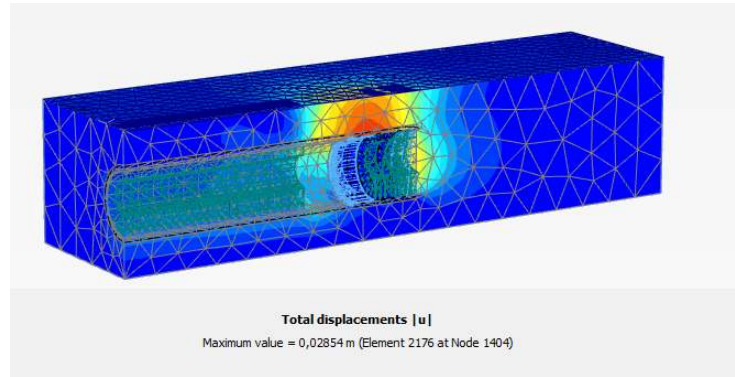


Şekil 3.5. Kil zemindeki tünelden alınan boy kesit



Şekil 3.6. Çimento ile stabilizasyon işleminin ardından alınan boy kesit

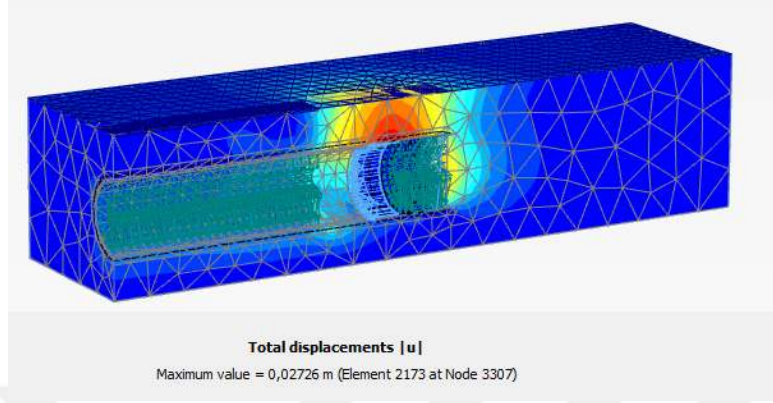
Aşağıda Şekil 3.7’de tünel kaplamasının etrafına 50 cm kalınlığında yapılan çimento ile stabilizasyon çalışmasının analizinden elde edilen yer değiştirme gösterilmiştir. Yapılan analiz sonucunda zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirme 28,54 mm’dir. Tünel kaplaması etrafına 50 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon çalışması yapılması durumunda zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmelerde azalma daha fazla görülmektedir.



Şekil 3.7. Stabilizasyon işleminden sonra zeminde oluşan toplam yer değiştirmeler

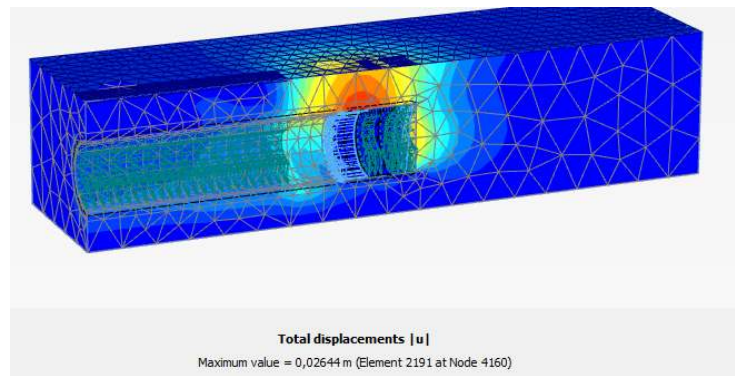
Aşağıda Şekil 3.8’de tünel kaplamasının etrafına 80 cm kalınlığında yapılan çimento ile stabilizasyon çalışmasının analizinden elde edilen yer değiştirme gösterilmiştir. Yapılan analiz sonucunda zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirme 27,26 mm’dir. Tünel kaplaması etrafına 80 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon çalışması yapılması

durumunda zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmelerde azalma daha fazla görülmektedir.



Şekil 3.8. Stabilizasyon işleminden sonra zeminde oluşan toplam yer değiştirmeler

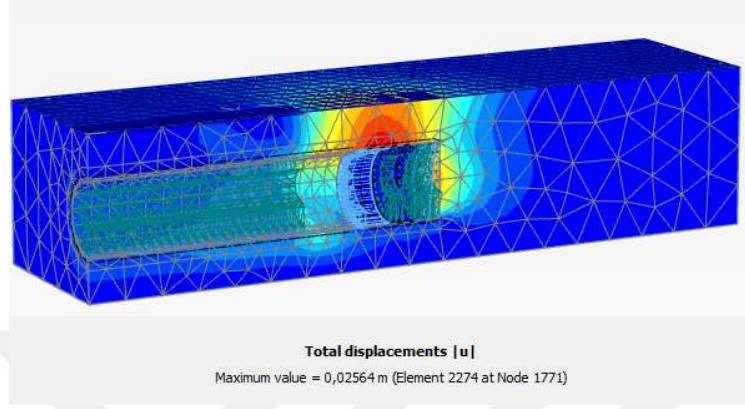
Aşağıda Şekil 3.9’da tünel kaplamasının etrafına 100 cm kalınlığında yapılan çimento ile stabilizasyon çalışmasının analizinden elde edilen yer değiştirme gösterilmiştir. Yapılan analiz sonucunda zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirme 26,44 mm’dir. Tünel kaplaması etrafına 100 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon çalışması yapılması durumunda zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmelerde azalma görülmektedir.



Şekil 3.9. Stabilizasyon işleminden sonra zeminde oluşan toplam yer değiştirmeler

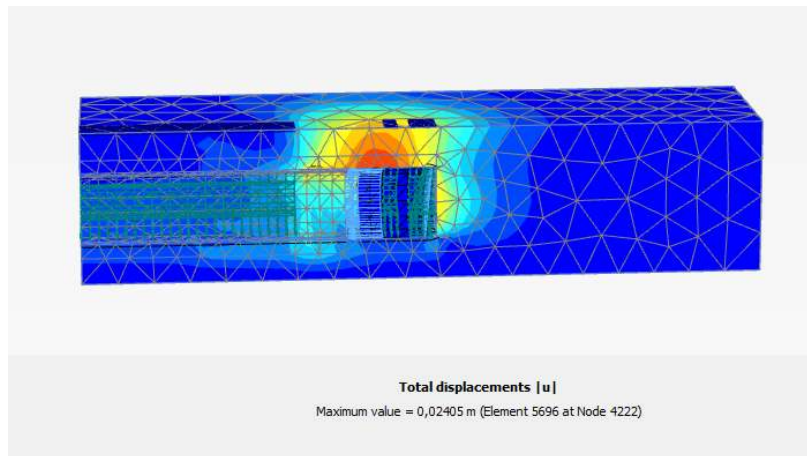
Şekil 3.10’da tünel kaplamasının etrafına 120 cm kalınlığında yapılan çimento ile stabilizasyon çalışmasının analizinden elde edilen yer değiştirme gösterilmiştir. Yapılan

analiz sonucunda zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirme 25,64 mm'dir. Tünel kaplaması etrafına 120 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon çalışmasının ardından zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmelerde azalma görülmektedir.



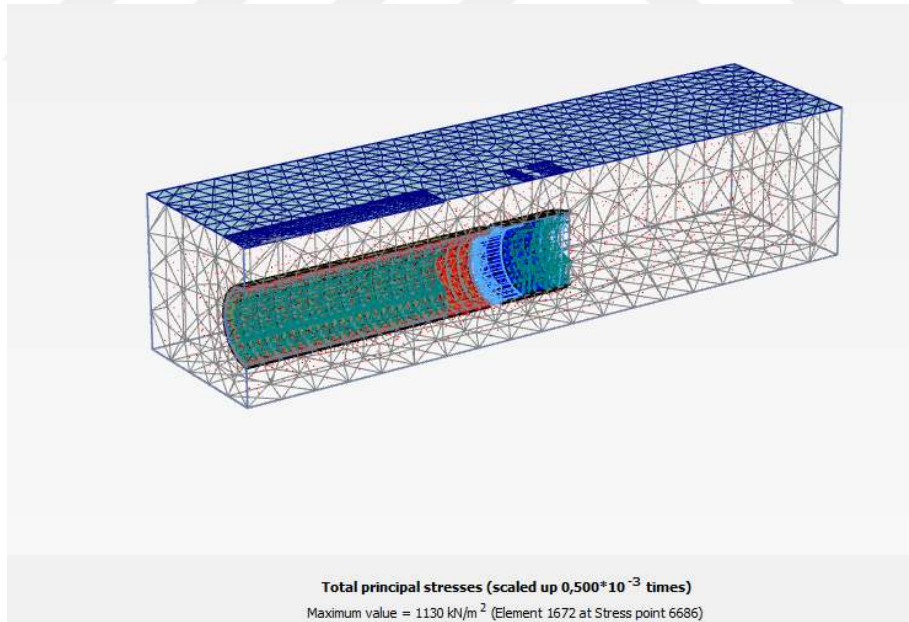
Şekil 3.10. Stabilizasyon işleminden sonra zeminde oluşan toplam yer değiştirmeler

Şekil 3.11'de tünel kaplamasının etrafına 160 cm kalınlığında yapılan çimento ile stabilizasyon çalışmasının analizinden elde edilen yer değiştirme gösterilmiştir. Yapılan analiz sonucunda zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirme 24,05 mm'dir. Tünel kaplaması etrafına 160 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon çalışmasının ardından zemin yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmelerde azalma görülmektedir.

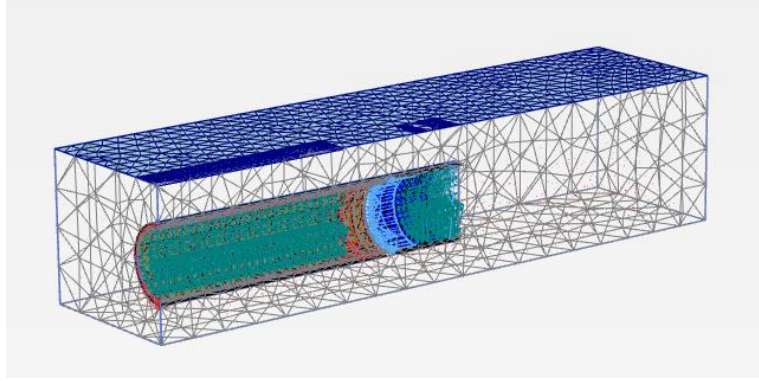


Şekil 3.11. Stabilizasyon işleminden sonra zeminde oluşan toplam yer değiştirmeler

Normal (toplam) gerilme (σ_n), bir düzleme dik olan gerilme bileşenidir. Derinlik arttıkça normal gerilmede artmaktadır. Aşağıda Şekil 3.12.'de kil zeminde yapılmış olan modellenmeye bağlı olarak zeminde meydana gelen toplam asal gerilme değerinin 1130 kN/m^2 olduğu gösterilmiştir. Şekil 3.13'de ise kil zeminde inşa edilen tünelin kaplama kısmının etrafına 40 cm kalınlığında çimento ile yapılmış olan stabilizasyon işleminin ardından zeminde meydana gelen toplam asal gerilme değerini 1414 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'deki her iki durum karşılaştırılacak olursa analiz sonuçlarına bağlı olarak asal gerilmelerde artışlar meydana geldiği görülmektedir. Asal gerilmeler de meydana gelen bu artışlar tünel kaplamanın etrafına yapılmış olan 40 cm kalınlığındaki çimento ile stabilizasyon işleminden kaynaklanmaktadır. Tünel kaplama kısmına gelen yükler artık bu kısım ile karşılandığı için asal gerilmelerde artışlar meydana gelmiştir. Yapılan çalışmalara bağlı olarak kil zeminlerde tünel inşa edilirken tünel kaplamasının etrafına belirli kalınlıkta çimento ile stabilizasyon uygulaması yapmak avantaj sağlamaktadır.

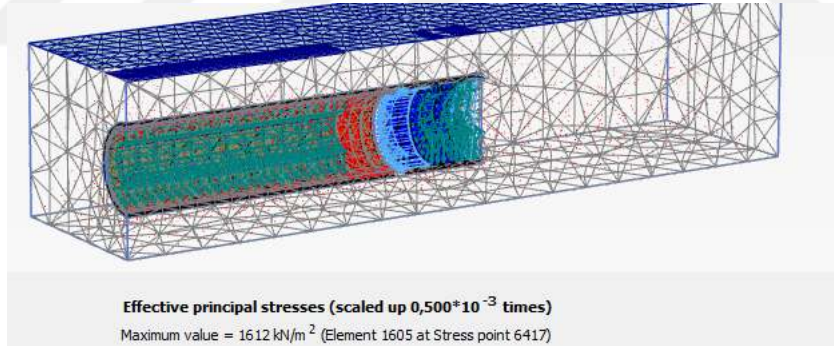


Şekil 3.12. Zeminde meydana gelen toplam asal gerilmeler



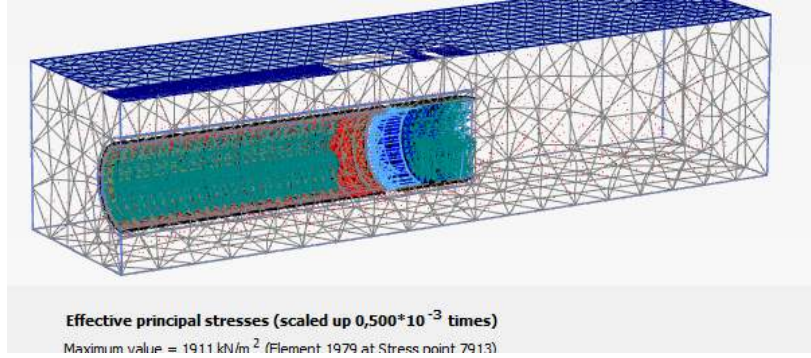
Şekil 3.13. Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen toplam asal gerilmeler

Şekil 3.14’de tünel kaplaması etrafına yapılan 50 cm kalınlığındaki çimento ile stabilizasyon işlemine bağlı olarak elde edilen analiz sonucuna yer verilmiştir. Analiz sonucuna göre zeminde oluşan asal gerilme değeri 1612 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Kil zeminden elde edilen asal gerilme değerine göre artma meydana gelmiştir. Bu da tünel kaplama kısmına gelen yüklerin artık bu tabaka ile karşılanmasından kaynaklanmaktadır.



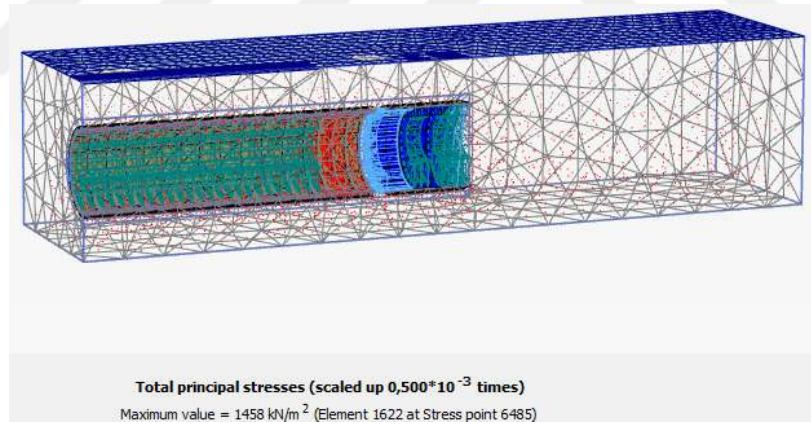
Şekil 3.14. Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen toplam asal gerilmeler

Şekil 3.15’de tünel kaplaması etrafına yapılan 80 cm kalınlığındaki çimento ile stabilizasyon işlemine bağlı olarak elde edilen analiz sonucuna yer verilmiştir. Analiz sonucuna göre zeminde oluşan asal gerilme değeri 1911 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Kil zeminden elde edilen asal gerilme değerine göre artma meydana gelmiştir. Bu da tünel kaplama kısmına gelen yüklerin artık bu tabaka ile karşılanmasından kaynaklanmaktadır.



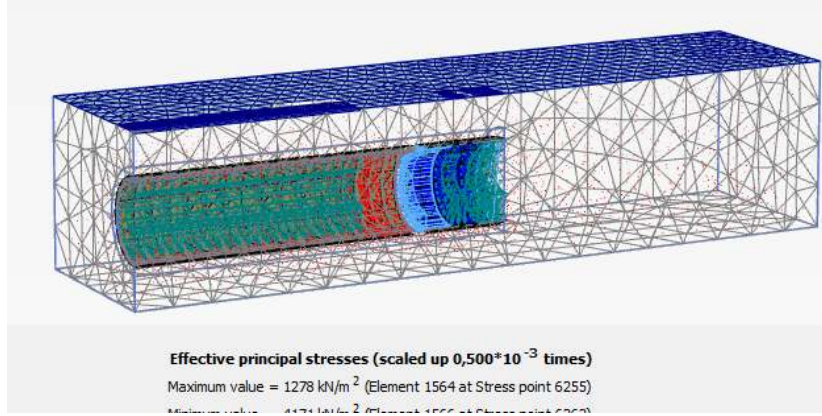
Şekil 3.15. Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen toplam asal gerilmeler

Aşağıda Şekil 3.16’da tünel kaplaması etrafına yapılan 100 cm kalınlığındaki çimento ile stabilizasyon işlemine bağlı olarak elde edilen analiz sonucu gösterilmektedir. Analiz sonucuna göre zeminde oluşan asal gerilme değeri 1458 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Kil zeminden elde edilen asal gerilme değerine göre artma meydana gelmiştir. Bu da tünel kaplama kısmına gelen yüklerin artık bu tabaka ile karşılanmasından kaynaklanmaktadır.



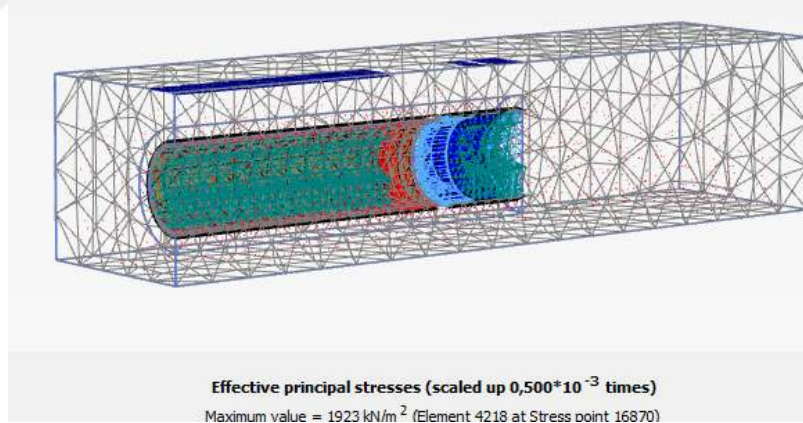
Şekil 3.16. Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen toplam asal gerilmeler

Aşağıda verilmiş olan Şekil 3.17’de tünel kaplaması etrafına yapılan 120 cm kalınlığındaki çimento ile stabilizasyon işlemine bağlı olarak elde edilen analiz sonucu gösterilmektedir. Analiz sonucuna göre zeminde oluşan asal gerilme değeri 1278 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Kil zeminden elde edilen asal gerilme değerine göre artma meydana gelmiştir. Bu da tünel kaplama kısmına gelen yüklerin artık bu tabaka ile karşılanmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.17. Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen toplam asal gerilmeler

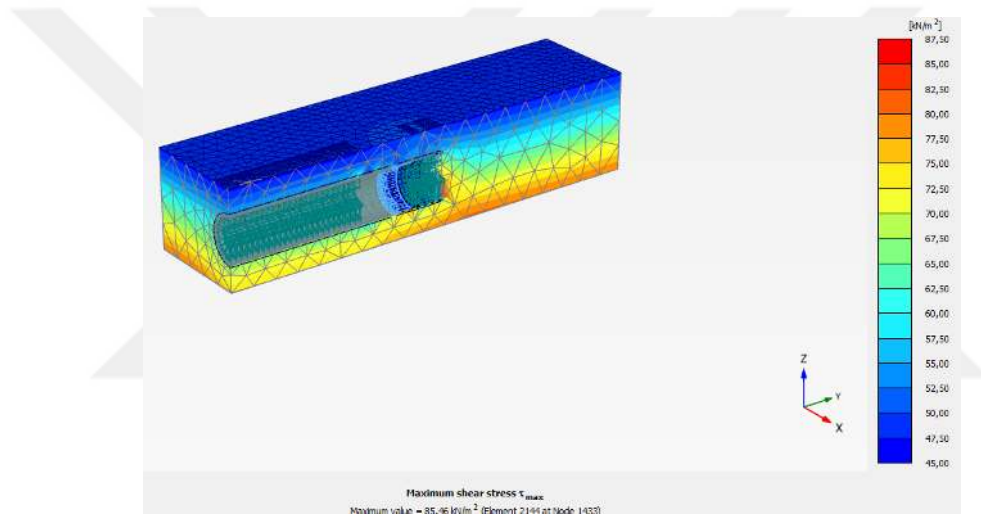
Şekil 3.18’de tünel kaplaması etrafına yapılan 160 cm kalınlığındaki çimento ile stabilizasyon işlemine bağlı olarak elde edilen analiz sonucuna yer verilmiştir. Analiz sonucuna göre zeminde oluşan asal gerilme değeri 1923 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Kil zeminden elde edilen asal gerilme değerine göre artma meydana gelmiştir. Bu da tünel kaplama kısmına gelen yüklerin artık bu tabaka ile karşılanmasından kaynaklanmaktadır.



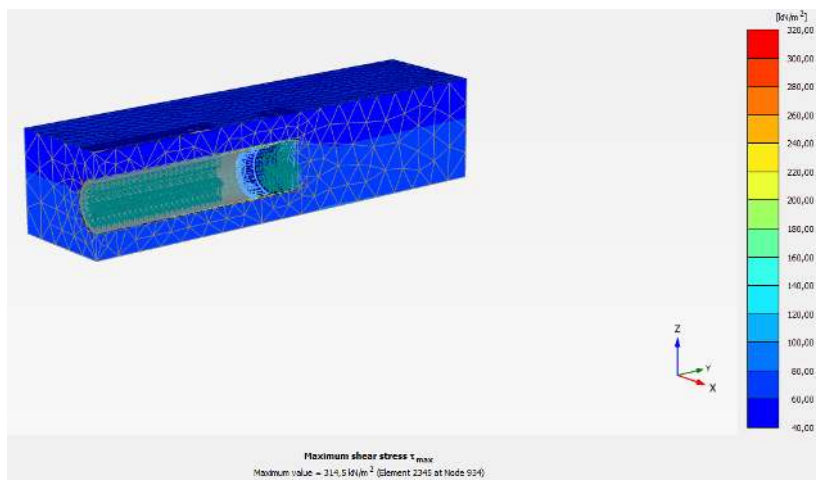
Şekil 3.18. Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen toplam asal gerilmeler

Aşağıda Şekil 3.19.’da kil zeminde yapılmış olan modelleme ve modellenmeye bağlı olarak zeminde meydana gelen maksimum kayma gerilmesi yer almaktadır. Şekil 3.19’da gösterilmiş olan analiz sonuçlarından elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerini $85,46 \text{ kN/m}^2$ şeklinde ifade etmek mümkündür. Şekil 3.20’de ise kil zeminde inşa edilen tünelin kaplama kısmının etrafına 40 cm kalınlığında çimento ile yapılmış olan stabilizasyon

işleminin ardından elde edilmiş analiz sonucuna yer verilmiştir. Analiz sonucu neticesinde zeminde meydana gelen maksimum kayma gerilmesi değerini $314,5 \text{ kN/m}^2$ şeklinde ifade etmek mümkündür. Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’deki her iki durum karşılaştırılacak olursa analiz sonuçlarına bağlı olarak maksimum kayma gerilmelerinde artışlar meydana geldiği görülmektedir. Bu durumu da tünel kaplaması etrafına yapılan çimento ile stabilizasyon çalışmasına bağlamak mümkündür. Tünel kaplama kısmına gelen yükler ikinci aşamada yapılan 40 cm kalınlığındaki çimento ile stabilizasyon uygulaması tarafından karşılandığı için kayma gerilmesinde artışlar meydana gelmiştir. Bu durumda yine güvenlik açısından avantajlı olmaktadır.

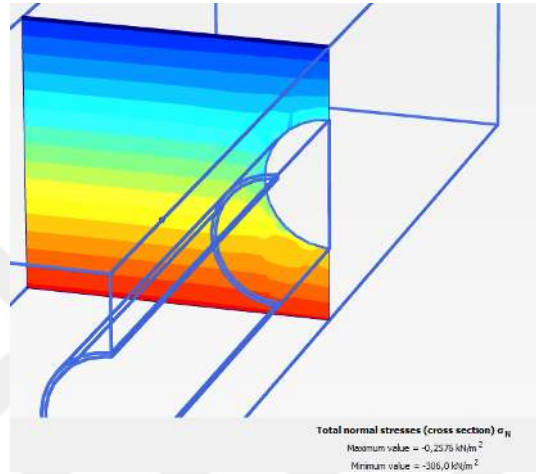


Şekil 3.19. Zeminde meydana gelen maksimum kayma gerilmesi

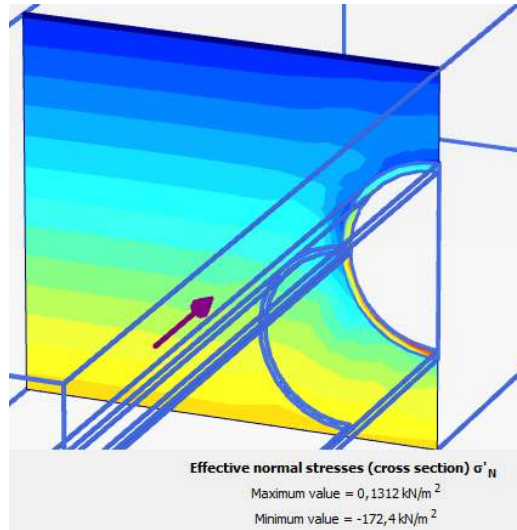


Şekil 3.20. Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen maksimum kayma gerilmesi

Aşağıda verilmiş olan Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de tünel yapısının aynı en kesitinden alınmış analiz sonucuna yer verilmiştir. Her iki durumu karşılaştırmak gerekirse çimento ile stabilizasyon işlemine bağlı olarak asal gerilmelerde artışlar meydana geldiği görülmektedir. Asal gerilmeler de meydana gelen bu artışları yine tünel kaplamanın etrafına yapılmış olan 40 cm kalınlığındaki çimento ile stabilizasyon işlemine bağlanabilir. Tünel kaplama kısmına gelen yükler artık bu kısım ile karşılandığı için asal gerilmelerde artışlar meydana gelmiştir.

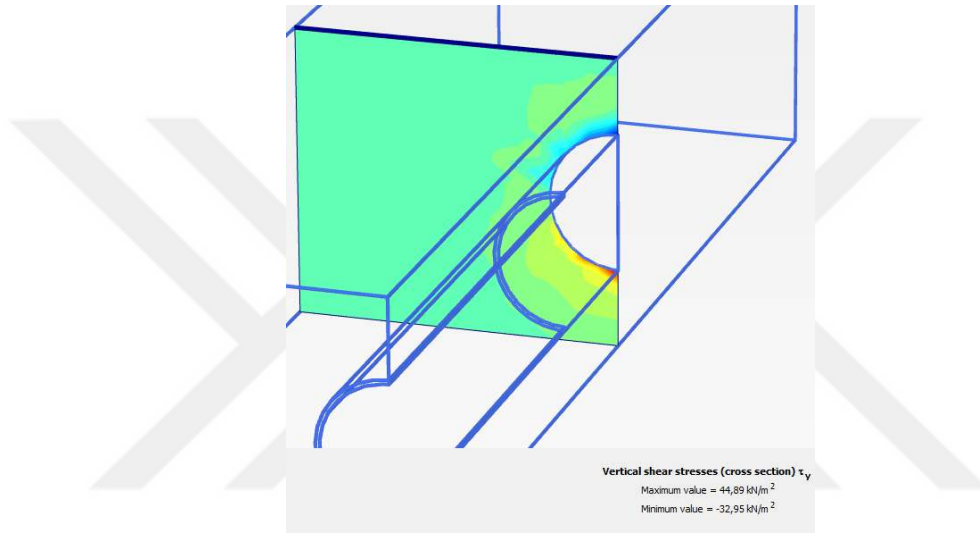


Şekil 3.21. Kil zemindeki tünelden alınan en kesit

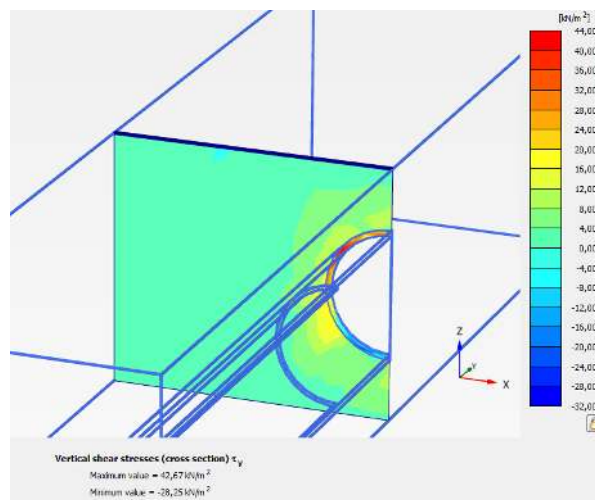


Şekil 3.22. Çimento ile stabilizasyon işleminin ardından alınan en kesit

Aşağıda verilmiş olan Şekil 3.23 ve Şekil 3.24’de tünel yapısının aynı boy kesitinden alınmış analiz sonucuna yer verilmiştir. Her iki durumu karşılaştırmak gerekirse çimento ile stabilizasyon işlemine bağlı olarak kayma gerilmelerinde artışlar meydana geldiği görülmektedir. Kayma gerilmelerin de meydana gelen bu artışları yine tünel kaplamanın etrafına yapılmış olan 40 cm kalınlığındaki çimento ile stabilizasyon işlemine bağlanabilir. Tünel kaplama kısmına gelen yükler artık bu kısım ile karşılandığı için kayma gerilmelerinde artışlar meydana gelmiştir.

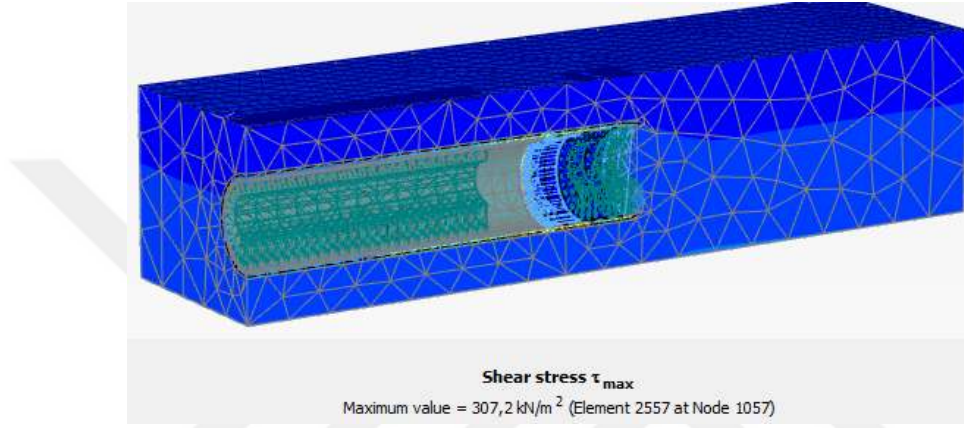


Şekil 3.23. Kil zemindeki tünelden alınan en kesit



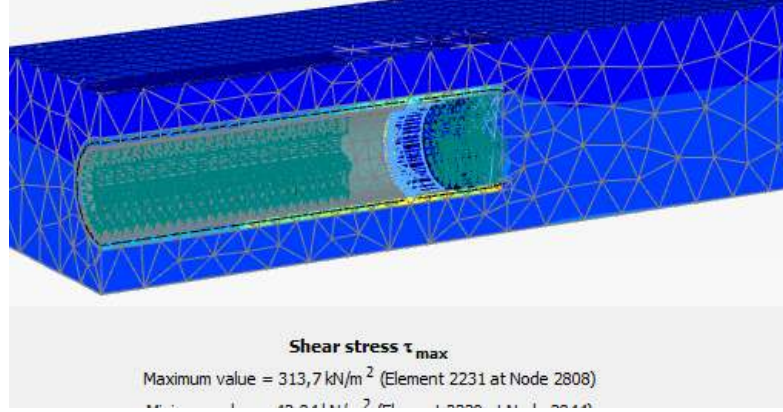
Şekil 3.24. Çimento ile stabilizasyon işleminin ardından alınan en kesit

Şekil 3.25’ de yer alan analiz sonucuna göre tünel kaplamasının etrafına 50 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon işleminin yapılması sonucunda elde edilen maksimum kayma gerilmesi değeri $307,2 \text{ kN/m}^2$ ’dir. Stabilizasyon çalışması yapılmamış durum dikkate alındığında meydana gelen maksimum kayma gerilmesinde artış gözlemlenmiştir. Bu durumu tünel kaplamasının etrafına yapılmış olan çimento ile stabilizasyon işlemine bağlamak mümkündür.



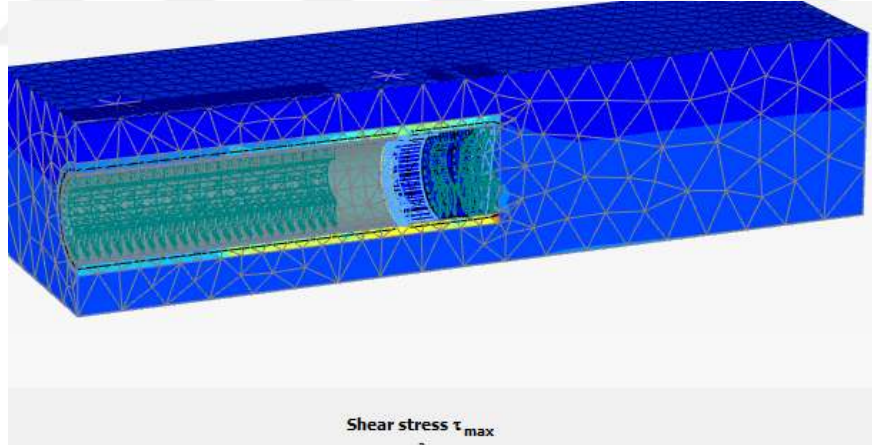
Şekil 3.25. Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen maksimum kayma gerilmesi

Şekil 3.26’da yer alan analiz sonucuna göre tünel kaplamasının etrafına 80 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon işleminin yapılması sonucunda elde edilen maksimum kayma gerilmesi değeri $313,7 \text{ kN/m}^2$ ’dir. Stabilizasyon çalışması yapılmamış durum dikkate alındığında meydana gelen maksimum kayma gerilmesinde artış gözlemlenmiştir. Bu durumu tünel kaplamasının etrafına yapılmış olan çimento ile stabilizasyon işlemine bağlamak mümkündür.

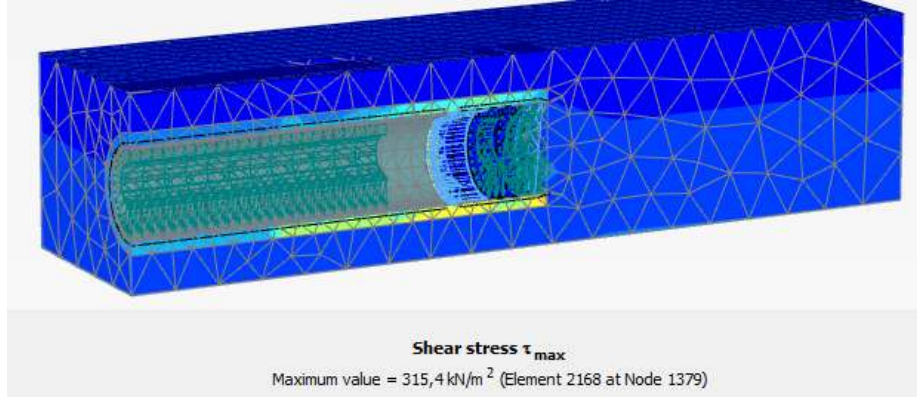


Şekil 3.26. Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen maksimum kayma gerilmesi

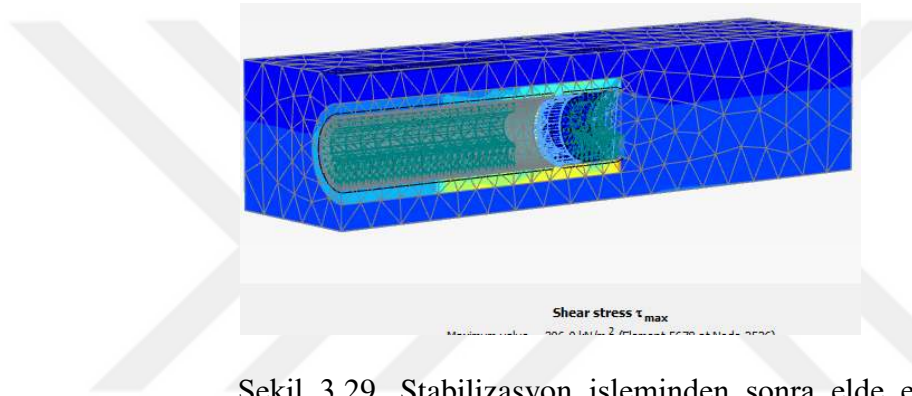
Şekil 3.27, Şekil 3.28 ve Şekil 3.29’ da sırası ile tünel kaplamasının etrafına yapılan 100 cm, 120 cm ve 160 cm kalınlıklarında çimento ile stabilizasyon işlemlerinden elde edilen analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda stabilizasyon çalışması yapılmamış duruma göre maksimum kayma gerilmesinde artışlar gözlemlenmiştir.



Şekil 3.27. Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen maksimum kayma gerilmesi



Şekil 3.28. Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen maksimum kayma gerilmesi



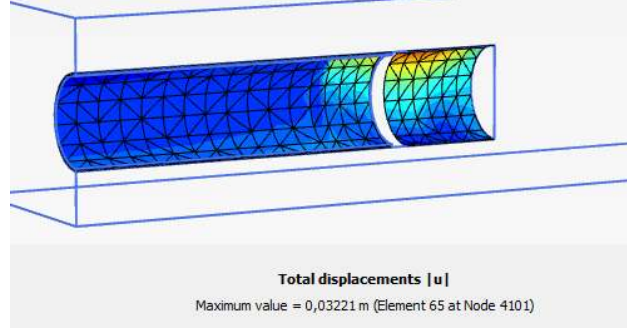
Şekil 3.29. Stabilizasyon işleminden sonra elde edilen maksimum kayma gerilmesi

Aşağıdaki Tablo 3.1’de analiz sonuçlarından elde edilen zeminde meydana gelen yer değiştirmeler ve gerilmeler tablo halinde verilmiştir.

Tablo 3.1. Analiz sonuçlarına göre zemindeki yer değiştirmeler ve gerilmeler

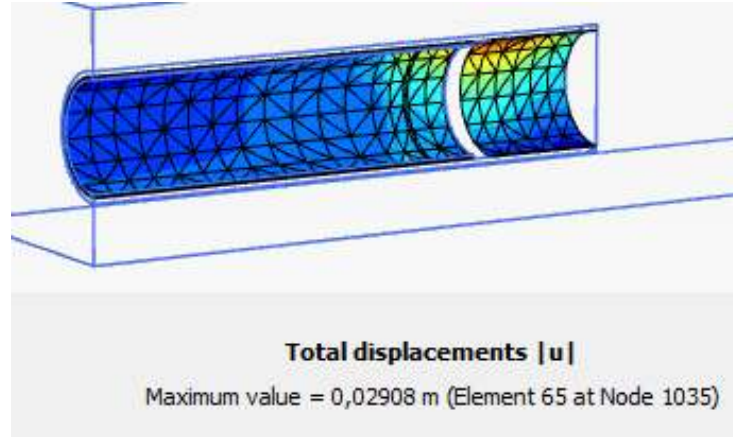
Model	Yer Değiştirme (mm)	Asal Gerilmeler (kN / m ²)	Maksimum Kayma Gerilmesi (kN / m ²)
Kil zemin	32,69	1130	85,46
40 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon işlemi	29,08	1414	314,5
50 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon işlemi	28,54	1612	307,2
80 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon işlemi	27,26	1911	313,7
100 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon işlemi	26,44	1458	298,3
120 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon işlemi	25,64	1278	315,4
160 cm kalınlığında çimento ile stabilizasyon işlemi	24,05	1923	306,0

Aşağıda verilmiş olan Şekil 3.30'da kil zeminde modellenen tünel kaplamasında meydana gelen yer değiştirme gösterilmiştir.

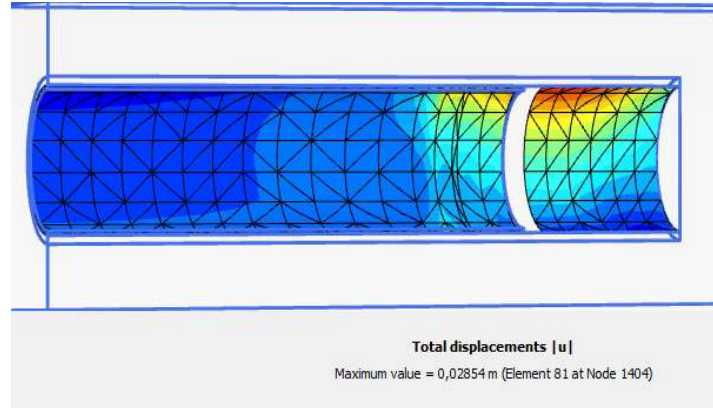


Şekil 3.30. Tünel kaplamasında meydana gelen yer değiştirme

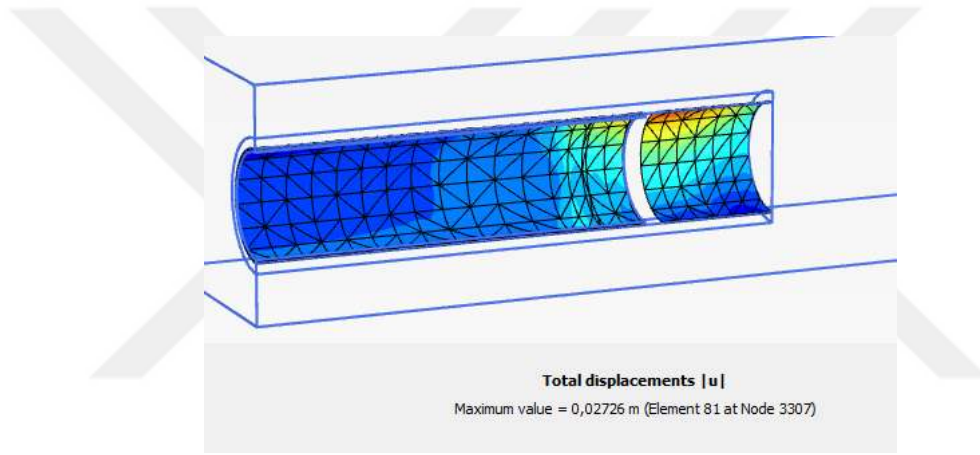
Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33, Şekil 3.34, Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da sırasıyla 40, 50, 80, 100, 120 ve 160 cm kalınlıklarında tünel kaplaması etrafına yapılan çimento ile stabilizasyon işlemine bağlı olarak tünel kaplamasında meydana gelen yer değiştirmelere yer verilmiştir. Analiz sonuçları dikkate alındığında çimento ile stabilizasyon çalışmalarına bağlı olarak tünel kaplamasındaki yer değiştirmelerin azaldığı görülmüştür.



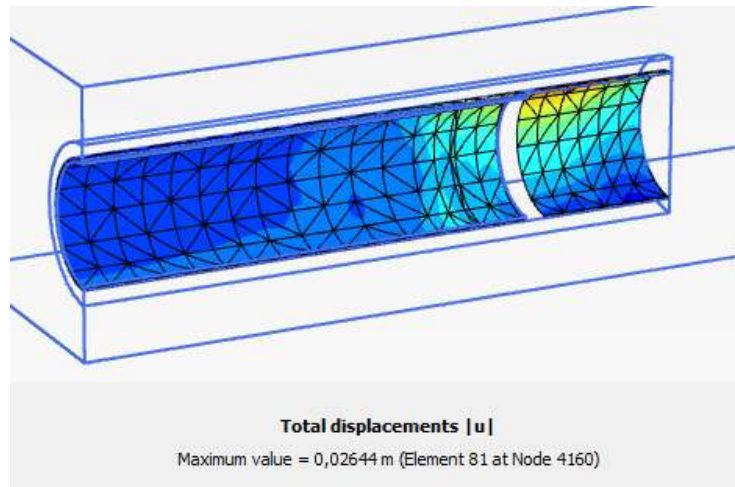
Şekil 3.31. Stabilizasyon çalışmasının ardından tünel kaplamasındaki yer değiştirme



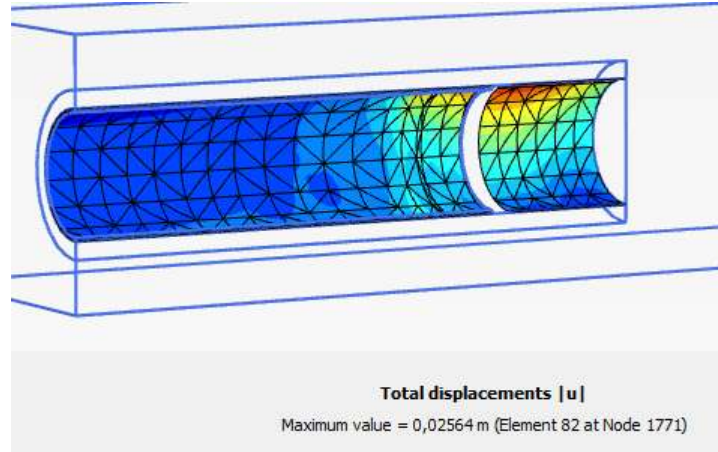
Şekil 3.32. Stabilizasyon çalışmasının ardından tünel kaplamasındaki yer değiştirme



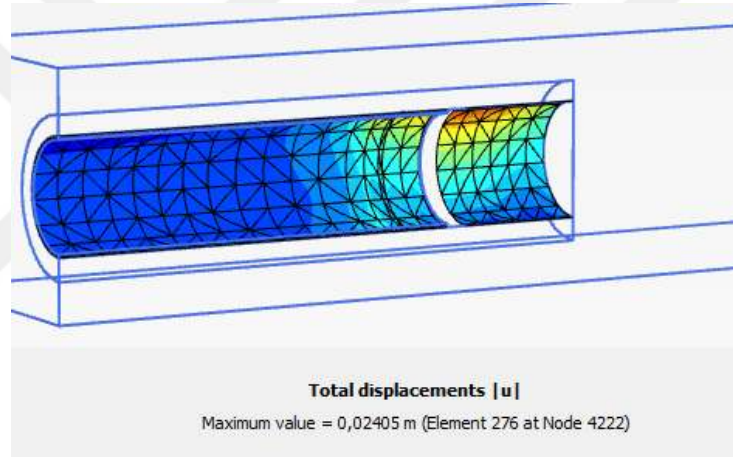
Şekil 3.33. Stabilizasyon çalışmasının ardından tünel kaplamasındaki yer değiştirme



Şekil 3.34. Stabilizasyon çalışmasının ardından tünel kaplamasındaki yer değiştirme

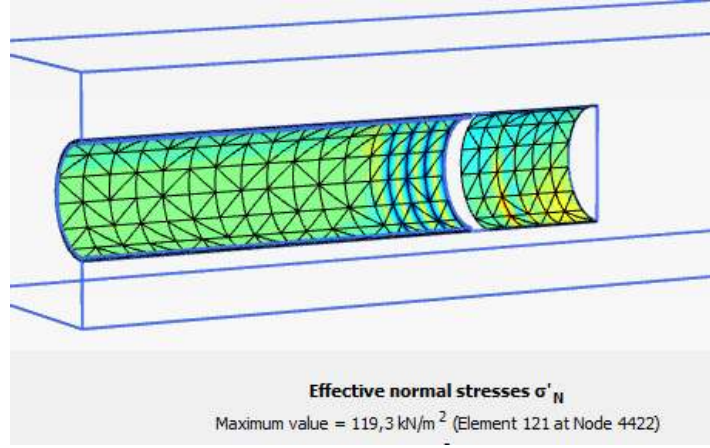


Şekil 3.35. Stabilizasyon çalışmasının ardından tünel kaplamasındaki yer değiştirme



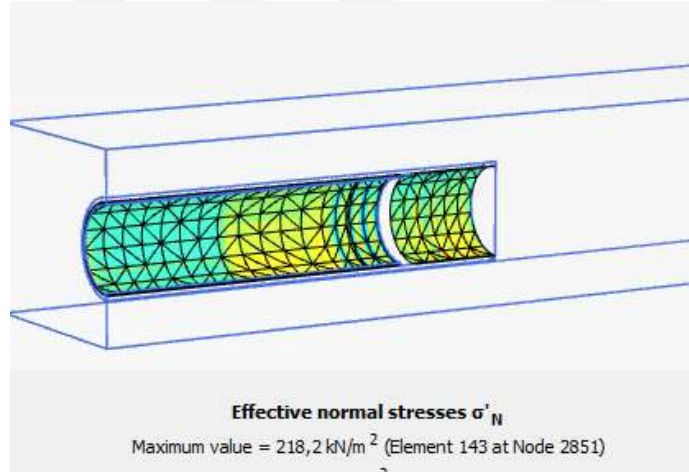
Şekil 3.36. Stabilizasyon çalışmasının ardından tünel kaplamasındaki yer değiştirme

Şekil 3.37’de kil zeminde stabilizasyon çalışması yapılmadan öncedeki model analizine yer verilmiştir. Bu analiz sonucuna göre tünel kaplamasında oluşan normal gerilme gösterilmiştir.

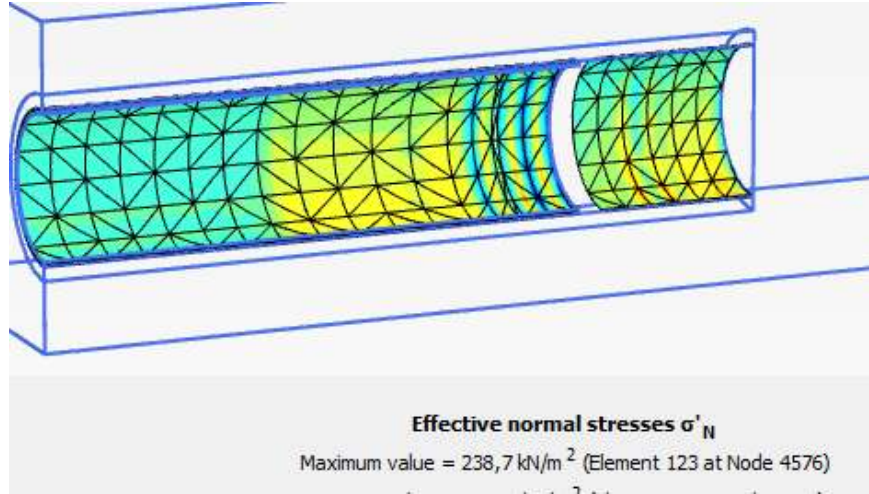


Şekil 3.37. Tünel kaplamasındaki normal gerilme

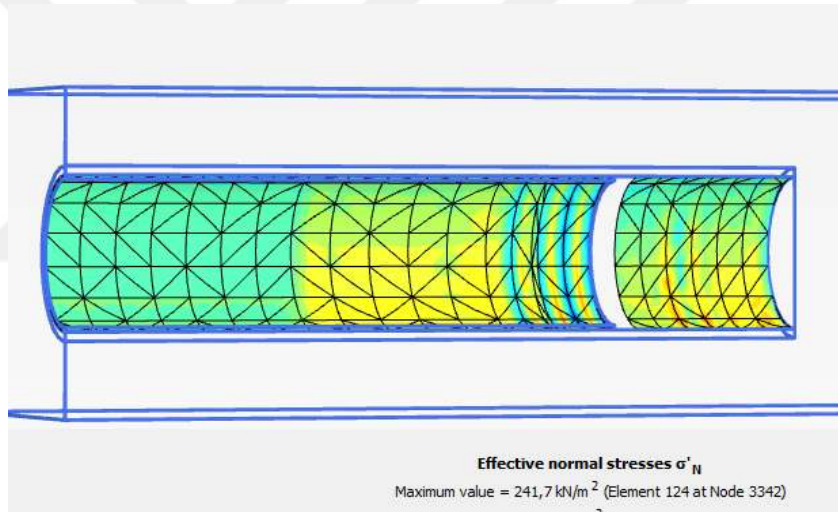
Aşağıda Şekil 3.38, Şekil 3.39, Şekil 3.40, Şekil 3.41, Şekil 3.42. ve Şekil 3.43’de sırasıyla 40, 50, 80, 100, 120 ve 160 cm kalınlıklarında yapılmış çimento ile stabilizasyon çalışmalarından elde edilen analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre normal gerilmelerde artışlar gözlemlenmiştir.



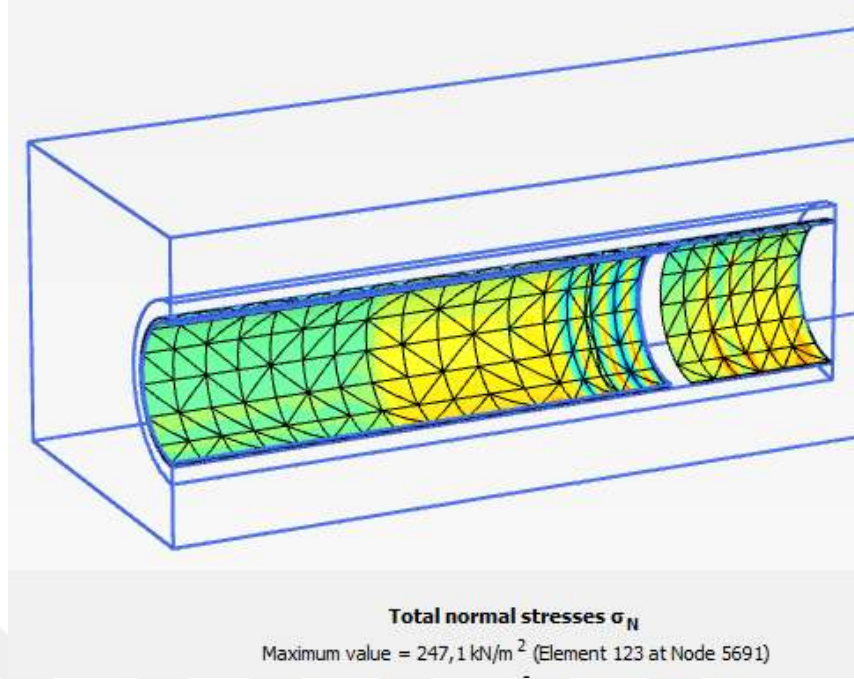
Şekil 3.38. Stabilizasyon çalışmasından sonra tünel kaplamasındaki normal gerilme



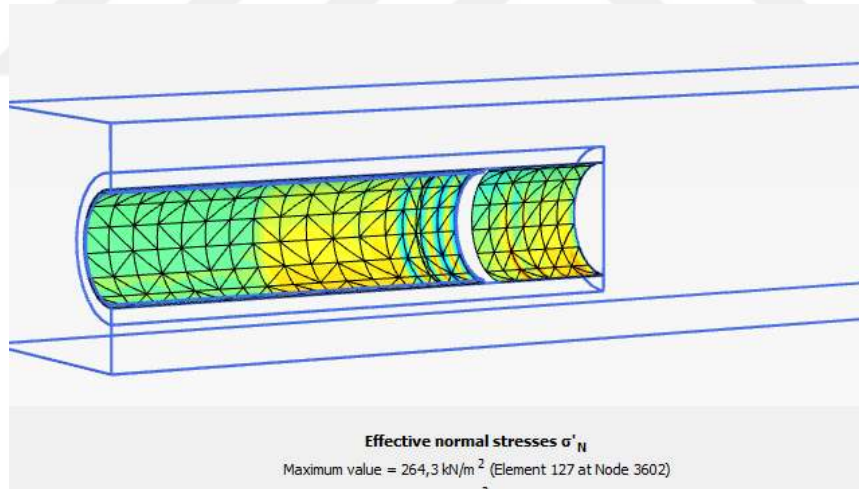
Şekil 3.39. Stabilizasyon çalışmasından sonra tünel kaplamasındaki normal gerilme



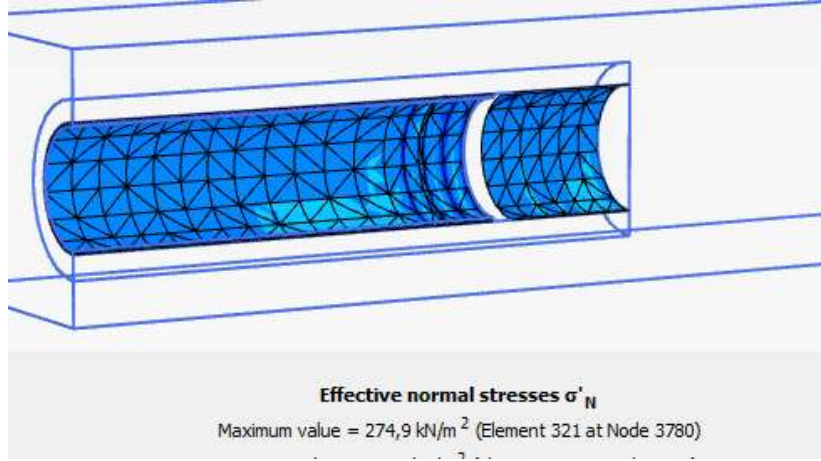
Şekil 3.40. Stabilizasyon çalışmasından sonra tünel kaplamasındaki normal gerilme



Şekil 3.41. Stabilizasyon çalışmasından sonra tünel kaplamasındaki normal gerilme



Şekil 3.42. Stabilizasyon çalışmasından sonra tünel kaplamasındaki normal gerilme



Şekil 3.43. Stabilizasyon çalışmasından sonra tünel kaplamasındaki normal gerilme

Yapılan çalışmalara bağlı olarak tünel yapısının kil zeminde inşa edilmesi durumunda hem zemin yüzeyinde hem de tünel yapısının kaplama kısmında deformasyonların olduğu görülmüştür. İlk olarak kil zemin üzerinde laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler doğrultusunda sonlu elemanlar yöntemi olarak kullanılan Plaxis 3D programında modelleme işlemi gerçekleştirilerek analizler yapılmıştır. İlk aşamada kil zeminde herhangi bir zemin iyileştirmesi söz konusu değildir ve zemin profilinde tek tabaka olarak sadece bir kil zemin yer almaktadır. İkinci aşamada mevcut kil zeminde inşa edilen tünelin kaplama kısmının etrafına farklı kalınlıklarda 400 dozaj çimento ile stabilizasyon işlemi yapılmıştır. Bu esnada tekrar laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler doğrultusunda tekrar Plaxis 3D programında modelleme işlemi yapılmıştır ve daha sonra analizlere geçilmiştir. Her aşamada yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler üzerinde durulmuştur. Farklı yönlerden analiz sonuçları irdelenmeye çalışılmıştır. Analiz sonuçlarından elde edilen yer değiştirmeler, asal gerilmeler, kayma gerilmeleri farklı durumlar içinde ele alınmıştır. Analiz sonuçlarına göre tünel kaplamasının etrafına yapılan çimento stabilizasyon işlemleri sonucunda hem zeminde hemde kaplamada meydana gelen yer değiştirmelerde azalmalar olduğu görülmüştür. Gerilmeler de ise artışlar meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Gerilmelerde meydana gelen bu artışlar yüklerin tünel kaplaması etrafına yapılan stabilizasyon çalışmalarından kaynaklanmaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında her geçen gün önemi daha da artmakta olan tünel yapıları üzerinde durulmuştur. Bu doğrultuda tüneller ve tünel çeşitlerinden detaylı bir şekilde bahsedilmiş; farklı zemin koşulları göz önünde bulundurularak tünel yapılarının inşa edilmesi sırasında karşılaşılabilecek problemler anlatılmıştır. Yapılan çalışmada, tünel inşası için gerekli ve önemli aşamalardan biri olan kaplama çalışmaları içinde en uygun kaplama çeşidinin seçilebilmesi amacıyla emniyet, maliyet ve estetik açıdan kaplama çeşitlerine yer verilmiştir. Tünel kaplamasına etki eden yatay ve düşey yükler farklı teoriler dikkate alınarak anlaşılma çalışılmıştır ve tünel kaplama kısımlarının yapısal çözümlemesinde kullanılmakta olan bazı yöntemler üzerinde durulmuştur. Tünellerin inşa edilmesi sırasında kullanılan NATM (Yeni Avusturya Metodu) hakkında NATM ilkelerine de uygun olarak bilgiler verilmiştir.

Tünel yapılarının inşası oldukça zor ve karmaşık olmakla birlikte günümüzde önemli mühendislik yapılarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Gerekli ve yeterli dayanım, dayanıklılık koşulları göz önünde bulundurularak tünel tasarımları yapılmalıdır. Bu doğrultuda yapılan bu çalışmada araziden alınan zemin örneği laboratuvara getirilmiştir. Laboratuvarda birçok deney yapılarak zemine ait fiziksel özellikler ve kayma direnci parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler sonlu elemanlar yöntemi olan Plaxis 3D programında kullanılmıştır. Bu çalışmada tünelin modelleme işlemleri ve analizler sonlu elemanlar yöntemi olan Plaxis 3D programında gerçekleştirilmiştir. Plaxis 3D programının tercih edilmesinin sebebi bu sonlu elemanlar yönteminin nümerik analiz yöntemleri arasında bilgisayar yazılımı için en iyi özellikleri içermesidir. Yapılan çalışmanın ilk kısmında kullanılan kil zemin üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen veriler Plaxis 3D programında kullanılarak kil zeminde tünel modellemesi yapılmıştır. Kil zemin Plaxis 3D programında modellenirken tünel açma metodu olarak TBM tercih edilmiştir. Yeraltı yapıları inşa edilirken en uygun kazı biçiminin seçilmesi önemlidir. Çevreye ve yerüstünde yer alan yapılara en az hasarı verecek kazı biçimi tercih edilmelidir. TBM yöntemi de bu nokta da daha sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışma avantajlarına sahiptir. Mevcut zeminde herhangi bir iyileştirme yapmaksızın Plaxis 3D programında modellemenin ardından analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarından zemin yüzeyinde ve tünel kaplamasında meydana gelen

deformasyonlar ve gerilmeler gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar ve analizlerden elde edilen veriler doğrultusunda zeminde ve tünel kaplamasında meydana gelen deformasyonlarda hata görülmemiştir. Yapılan çalışmanın ikinci kısmında ise mevcut kil zeminde inşa edilen tünelin kaplama kısmının etrafına farklı kalınlıklarda çimento ile stabilizasyon işlemi yapılmıştır. Kil zeminde yapılan stabilizasyon işleminin ardından sonlu elemanlar yöntemi olan Plaxis 3D programında tekrar tünel çalışmaları modellenmiştir. Modelleme sırasında ilk kısımda kullanılan tünel açma metodu olan TBM tercih edilmiştir. Tünelin modelleme işleminin ardından tekrar analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarından zemin yüzeyinde ve tünel kaplamasında meydana gelen deformasyonlar ve gerilmeler gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar ve analizler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Kil zeminde yapılan TBM ile tünel modellemesinin ardından gerçekleştirilen analizlere bağlı olarak meydana gelen toplam yer değiştirme miktarı 32,69 mm olarak belirlenmiştir. Kil zeminde tünel kaplama kısmının etrafına farklı kalınlıklarda çimento ile stabilizasyon çalışması yapıldığında zeminde meydana gelen toplam yer değiştirmelerde azalmalar olduğu belirlenmiştir. Tünel kaplama kısmının etrafına farklı kalınlıklarda çimento ile stabilizasyon işleminin yapılması durumunda zeminde meydana gelen toplam yer değiştirme miktarlarında azalmalar gözlemlenmiştir. Bu durumda kil zeminlerde inşa edilecek tüneller için zeminde meydana gelebilecek yer değiştirmeleri tünel kaplama kısmına belirli kalınlıkta çimento ile stabilizasyon işlemi yaparak azaltmak mümkündür.
- Kil zeminde yapılmış olan modelleme ve modellemeye bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları neticesinde zeminde meydana gelen toplam asal gerilme değeri 1130 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Kil zeminde tünel kaplama kısmının etrafına farklı kalınlıklarda çimento ile stabilizasyon çalışması yapıldığında ise zeminde ve tünel kaplama kısmında meydana gelen toplam asal gerilme değerlerinde artışlar meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durumu tünel kaplama kısmının etrafına yapılmış olan farklı kalınlıklardaki çimento ile stabilizasyon işlemine bağlamak mümkündür. Tünel kaplama kısmına gelen yükler artık bu kısım ile karşılandığı için asal gerilmelerde artışlar meydana gelmiştir. Asal gerilmelerdeki bu artış ilave bir güvenlik sağlamaktadır. Yapılan çalışmalara bağlı olarak kil zeminlerde tünel inşa edilirken tünel kaplamasının etrafına belirli kalınlıkta çimento ile stabilizasyon uygulaması yapmak avantaj sağlamaktadır.

- Kil zeminde TBM ile tünel inşasının modellenmesinin ardından yapılan analiz çalışmaları neticesinde zeminde meydana gelen maksimum kayma gerilmesi $85,46 \text{ kN/m}^2$ iken, tünel kaplama kısmının etrafına farklı kalınlıklarda çimento ile stabilizasyon işlemi uygulanmasının ardından meydana gelen maksimum kayma gerilmelerinde artışlar meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durumu da tünel kaplaması etrafına yapılan çimento ile stabilizasyon çalışmasına bağlamak mümkündür. Tünel kaplama kısmına gelen yükler ikinci aşamada yapılan farklı kalınlıklardaki çimento ile stabilizasyon uygulaması tarafından karşılandığı için kayma gerilmesinde artışlar meydana gelmiştir. Bu durumda yine güvenlik açısından avantajlı olmaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde kil zeminde tünel inşa çalışmalarında kaplama kısmının etrafına belirli kalınlıkta çimento ile stabilizasyon çalışması yapmak faydalı olmaktadır.

Bu tez çalışmasını farklı yöntemler ve farklı analizler kullanarak geliştirmek mümkündür. Bu yöntemlerden bazıları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Bu çalışmada nümerik çalışmalar sırasında tek bir zemin kullanılmıştır. Birden fazla zemin kullanılarak bu tez çalışmasının geliştirilmesi mümkündür.
- Bu tez çalışması kapsamında statik analizler üzerinde durulmuştur. Dinamik analizler yapılarak tez çalışması geliştirilebilir.
- Bu tez kapsamında yapılan stabilizasyon çalışmaları sırasında katkı maddesi olarak çimento kullanılmıştır. Farklı katkı maddeleri kullanılarak statik ve dinamik analizler yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Alper, C., 2016. An Investigation on The Applicability of The Convergence Confinement Method To A Deep Rock Tunnel For Different Conditions, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ak, E., 2005. Tünel Tasarımında Sonlu Eleman Metodu ile Gerilme ve Deformasyon Analizleri- Destek Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Akın, G., 2015. Üçkuyular ve Poligon Metro İstasyonu İnşaatında Diyafram Duvar Uygulamasının İncelenerek Plaxis Programında Analiz Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Akın, M., 2019. Killi Zeminlerde NATM ile Açılan Tünellerin Deformasyon Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aktaş, S. Ş., 2009. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi ile İnşa Edilen Bir Tünelin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Analizi ve Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alan, Z. S., 2019. Tünelden Kaynaklanan Yüzey Oturmalarının Sayısal Analizler ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Araz, İ., 2019. Metro Projelerindeki Tünellerde İkinci Kaplama Betonu Olarak Donatılı Püskürtme Beton Kullanımının Proje Maliyetine ve Süresine Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arioğlu, S. E., 2010. Tünel Açma Makinelerinin (TBM) Performansına Etki Eden Etkenler ve Kadıköy Kontrol Tünelinde Kullanılan TBM'in Performansının Arazi Penetrasyon İndisi İle Kestirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aslan, Z., 2018. İkiz Tünel Kazılarına Bağlı Oluşan Yüzey Oturmalarının Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Atasoy, A., 2010. İstanbul Metrosu III. Aşama Tünellerinde Kullanılan Destekleme Tipleri ve Maliyetlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ayan, E., 2009. Derin İyileştirme Örnekleri ve Uygulamadan Örnekler, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Bahar, M. A., 1994. Tünellerde Ön Araştırma Zemin İyileştirmesi ve Stabilitate Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Beaver, P., 1972. A History of Tunnels, P. Davies, London, 155 s.
- Beykont, A.Z., 1951. Pratik Tünel Açma, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayını, İstanbul, 463 s.
- Birincioğlu, A., 2017. Tünel Kazı-Destekleme ve Hasır Çelik Yerine Sentetik Fiber Donatı Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bozkurt, A., 1997. Analysis, Design and Construction Criteria of Submerged Tunnels, Yüksek Lisans, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bulut, A., 2007. Tünel Kazısı Nedeniyle Meydana Gelen Zemin Oturmaları ve Bunların Mevcut Bir Yapıya Olan Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bulut, M., 2018. Örnek Bir NATM Tünelinde Kazı Derinliğinin Deformasyonlara Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Burjus, A. B. M. B., 2015. Prediction of The Settlements Induced By Tunneling in Clayey Soil, Yüksek Lisans Tezi, Fatih Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cingöz, A. C., 2013. NATM ve TBM Yöntemlerinin Deneysel Olarak Maliyet ve Süre Kriterleriyle Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çakan, A. G., 2000. Analysis of Tunnel Advance in Soft Ground Using Finite Element Method, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çeçen, E. E., 2007. Kent İçi Tünellerde Uygulanan Şemsiye- Kemer ve Ayna Donatılama Tekniklerinin Gerilme-Deformasyon Üzerine Etkilerinin Sayısal Analizi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çeçen, Ö., 2007. İstanbul Metrosu Koca Tünelleri Yüzey Deformasyon Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çınar, H., 2014. Zemin İyileştirmesinde Jet Grout Yöntemi ve Uygulamaya Yönelik Proje Çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Dayanç, C., 2011. Pasa Basıncılı Tünel Açma Makinesinin (EPB) Risk Analizi ile Performans Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Değirmenci, S., 2019. Tünellerde Şemsiye Kemer Yöntemi (Umbrella Arch) ile Destekleme Yapılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Doğruoğlu, M. T., 2009. TBM Metodu ile Açılan İkiz Tüneller Meydana Gelebilecek Deformasyonların Sonlu Elemanlar Metodu ve Nümerik Hesaplarla Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dönder, G., 2019. Topçam Tüneli Deformasyonlarının Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dursun, C., 1971. Tünel Kaplamalarına Gelen Yüklerin Hesap Metotları, Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Yayın No:192, Ankara, 87 s.
- Engin, K., 1992. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Tünel Kaplaması Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ertürk, S., 2014. Suruç Tünelindeki Geoteknik Çalışmalar, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Gedik, G., 2018. Metaheuristic Based Backcalculation of Rock Mass Parameters Around Tunnels, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Guerrin, A., 1969. Traite de Beton Armé Contruction Diverses, Dunode, Paris, 411 s.
- Gücek, S., 2011. Mermer Tozu ve Uçucu Külün Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Güneş, A., 2021. Numerical Assessment of Tunnel Advancement in Problematic Soil Conditions: A Case Study, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Hajebi, D., 2008. TBM ile Açılan İkiz Tüneller Çevresinde Gözlenen Oturma ve Deformasyonlar, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hadley, H. E., 2018. An Investigation of Seismic Face Stability of Deep Tunnels By Using An Axisymmetric Finite Element Model, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Hoek, E. ve Brown, E. T., 1990. Underground Excavation in Rock, Institution of Mining And Metalurgy, London, 532 s.
- Hudson, J. A. ve Harrison, J. P., 1997. Engineering Rock Mechanics, Elsevier Science Ltd. Oxford, 444 s.
- Huang, H., Gong, W., Khoshnevison, S., Juang, C., H., Zhang, D. ve Wang L., 2015. Simplified Procedure For Finite Element Analysis of The Longitudinal Performance of Shield Tunnels Considering Spatial Soil Variability in Longitudinal Direction, Computers and Geotechnics, 64, 132-145.

- İlyasoğlu, E., 2008. Tünel Giriş Yapılarında Şev Stabilite Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kaşıkcı, B., 2014. Metro Tünelleri- Üstyapı Etkileşimleri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karademir, S. M., 2010. A Parametric Study On Three Dimensional Modeling of Paralel Tunnel Interactions, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Karamanlı, Ö., 2009. Assessment of The Ground Subsidence And Lining Forces Due To Tunnel Advancement, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kaya, H., 1983. Patlayıcı Maddelerin Tanımlanması ve Tünellerde Patlayıcı Maddelerin Optimumda Kullanılması, Tünelcilik Semineri, Ankara, Bildiriler Kitabı, 85-142.
- Kırbaş, T., 1995. Tünel Açma İşlemleri, Karşılaşılan Sorunlar Ve Uygulanan Çözüm Yolları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Koca, N., 2017. Metro Tüneli-Zemin-Temel Etkileşimi Öge Rijitliklerinin Rolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lee, M. K., Hou X. Y., Ge X. W. ve Tang Y., 2001. An Analytical Solution for a Jointed Shield-Driven Tunnel Lining, International Journal For Numerical and Analytical Methods In Geomechanics, 25, 365-390.
- Patemesi, A., Schweiger, H., F. ve Scarpelli, G., 2017. Numerical Analyses of Stability and Deformation Behavior Of Reinforced And Undreinforced Tunnel Forces, Computers and Geotechnics, 88, 256-266.
- Osmanoğlu, D., 2007. Tünellerde Zemin İyileştirilmesi ve Stabilitenin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Plaxis Programında Analiz Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Önalp, A., 1982. İnşaat Mühendisliğinde Geoteknik Bilgisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayını, No. 187, Trabzon, 1225 s.
- Özel, M., 2016. Patlatma Kaynaklı Yer Sarsıntısının Sonlu Eleman Yöntemiyle Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Öztürk, H., T., 2007. Tüneller ve Tasarım İlkeleri, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Öztürk, H., T., 2013. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Betonarme Sığ Tünellerin Yapay Arı Koloni Algoritması ve Genetik Algoritmayla Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Öztürk, H., T. ve Durmuş, A., 2008. Tünellere Toplu Bir Bakış ve Savunma Tünellerinin Türkiye İçin Önemi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Aylık Yayın Organı, 96, 11-17.
- Saçar, A., 2019. Alüvyal ve Sıvılaşılabilen Zeminlerde Tünellerin Deprem Risk Analizi: Adapazarı Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
- Sarıkaya, O., 2018. Tünel-Yapı-Zemin Etkileşiminin Zemin Büyütmesine Etkilerinin Nümerik Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Selman, H. G., 2014. Tünel Kazı Sebebiyle Meydana Gelen Zemin Oturmaları ve Mevcut Yapılara Olan Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Szechy, K., 1970. The Art of Tunnelling, Akademiai Kiado, Budapest, 891 s.
- Svoboda, T., Mašin, D. ve Boháč, J., 2010. Class A Predictions of A NATM Tunnel In Stiff Clay, Computers and Geotechnics, 37, 817-825.
- Şeker, Ö., 2008. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi Prensiplerine Göre Tünel Kaplama Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Şengün, E., 2013. Oyuk Genişlemesi Probleminin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İki Boyutlu Sayısal Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uğuz, Ş., 2019. Demiryolu Tünellerinde Güvenlik Tünellerinin Dizaynı, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Anadolu Üniversitesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Ukritchon, B., Yingchaloenkitkhajorn, K. ve Keawsawasvong, S., 2017. Three-dimensional Undrained Tunnel Face Stability in Clay With A Linearly Increasing Shear Strength With Depth, Computers and Geotechnics, 88, 146-151.
- Üçer, S., 2012. Seismic Response and Vulnerability Assessment of Tunnels: A Case Study On Bolu Tunnels, Doktora Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Türkoğlu, M., 2013. Two-Dimensional Numerical Analysis of Tunnel Collapse Driven in Poor Ground Conditions, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yıldırım, Ü. E., 2009. Şişen Killer ve Tünel Tasarımına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zhang, W., Li, Y., Wu, C., Li, H., Goh, ATC ve Liu H., Prediction of Lining Response For Twin Tunnels Constructed In Anisotropic Clay Using Machine Learning Techniques, Underground Space, <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2020.02.007>

URL-1, file:///C:/Users/hp/Downloads/12.tüneller%20(7).pdf 14 Mart 2021.

URL-2, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/> 20 Ağustos 2021.

URL-3, <https://www.sciencedirect.com> 20 Ağustos 2021.

URL-4, <http://depo.osmaniye.edu.tr/dosyalar/Dosyalar/TS%201900-1%281%29.pdf> 20 Ağustos 2021.

URL-5, <http://depo.osmaniye.edu.tr/dosyalar/insaat/Dosyalar/TS%201900-2.pdf> 20 Ağustos 2021.

URL-6, https://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/18164_55_49.pdf 22 Ekim 2021.



ÖZGEÇMİŞ

İlköğretimi, 2002-2010 yılları arasında Cudibey İlköğretim Okulu'nda, ortaöğretimi ise 2010-2014 yılları arasında Akçaabat Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Mezun olduğu yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. Bir yıl İngilizce Hazırlık eğitimi de alarak 2019 yılında mezun oldu. Mezun olduğu yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 'Yüksek Lisans' eğitimine başladı.

