İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİ AVUSTURYA TÜNEL İNŞA YÖNTEMİ PRENSİPLERİNE GÖRE TÜNEL KAPLAMA TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Müh. Ömür ŞEKER

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ZEMİN MEKANİĞİ VE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİ AVUSTURYA TÜNEL İNŞA YÖNTEMİ PRENSİPLERİNE GÖRE TÜNEL KAPLAMA TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Müh. Ömür ŞEKER
(501041317)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Nisan 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Mayıs 2008

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mete İNCECİK
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Recep İYİSAN
Doç.Dr. Mehmet BERİLGEN (Y.T.Ü.)

MAYIS 2008

ÖNSÖZ

Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi prensiplerine göre değişik kademeli tünelr tasarımlarının yapılan bu çalışmada tünellerin birbirine ve etrafınlarındaki yapılara olan etkilerini incelenmiştir. Gerek tez çalışmam gerekse tüm yüksek lisans öğrenimim boyunca bana her türlü desteği veren, yardımlarını bir an bile esirgemeyen danışmanım sayın Prof.Dr. Mete İNCECİK'e çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında tünelciliğe ait konularda destek olan sayın Prof.Dr. Mahir VARDAR'a, bana bir çok konuda destek olan sayın Doç.Dr Recep İYİSAN'a, hesaplamalarım sırasında bana yardımcı olan sayın Suat ÇETİN ve sayın Melih ALGAN'a, bana tez calışmalarım konusunda daima destek olan başta sayın Can İSKENDER olmak üzere tüm STFA Altyapı ve Tünel İnşaatı A.Ş. çalışanlarına Bouria Projesindeki tüm mühendis arkadaşlarıma, yaptığı yardımı hiç unutmayacak olduğum sayın Osman SARI'ya ve STFA Deniz İnşaat A.Ş. Merkez Ofis ve Manifa Projesi'ndeki tüm ağabey ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tüm yaşamında olduğu gibi bu tez çalışmalarım sırasında da bana manevi yönden destek olan babam Celal ŞEKER'e, annem Sabiha ŞEKER'e ve ablam Özlem ŞEKER'e, çok sevgili arkadaşlarım sayın Çağrı MUĞULKOÇ, sayın Aziz KABUKÇU, sayın Celal Ogün KARASU ve sayın Araş.Gör.Tolga ÖZÜDOĞRU'ya ve isminleri sayamadığım emeği geçen tüm dostlarıma teşekkür ederim.

Nisan, 2008 Ömür ŞEKER

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **xii**
ÖZET **xiii**
SUMMARY **xiv**

1. GİRİŞ **1**

2. TÜNELLERİN GELİŞİMİ VE SINIFLANDIRILMASI **3**
2.1 Tünelciliğin Tarihsel Gelişimi 4
2.2 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin Tarihsel Gelişimi 5
2.3 Tünellerin Sınıflandırılması. 8

3. YENİ AVUSTURYA TÜNEL İNŞA YÖNTEMİ **10**
3.1 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin Prensipleri 10
3.2 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin Kulanım Alanları 13
3.3 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin Üstünlükleri ve Zayıflıkları 15
3.4 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin Kazı Yöntemleri 15
3.5 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde Kullanılan Tünel Destek Sistemleri 20
3.5.1 Püskürtme Beton 21
3.5.2 Hasır Çelik 22
3.5.3 Çelik Destek Sistemleri 23
3.5.4 Kaya Ankrajları 24
3.6 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemleri 25
3.7 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde Tünel Kaplama Hesapları 26
3.7.1 Tünel Tasarım Yöntemleri 28
3.7.2 Yeni Avusturya Yönteminde Tünel Tasarımı 29

4. CEZAYİR BOUIRA' DA BULUNAN BOUIRA KARAYOLU TÜNELİ UYGULAMASI **38**
4.1 Projenin Tanımı 38
4.2 Bölgenin Jeolojik Yapısı 40
4.3 Yapım Yöntemi 44
4.3.1 A Sınıfı Geçici Kaplama Sistemi 47
4.3.2 B Sınıfı Geçici Kaplama Sistemi 48
4.3.3 C Sınıfı Geçici Kaplama Sistemi 50
4.3.4 D Sınıfı Geçici Kaplama Sistemi 52
4.3.5 E Sınıfı Geçici Kaplama Sistemi 54
4.3.6 Kalıcı Kaplama Sistemi 56

5. GEOTEKNİK MODELLEME VE HESAPLAMALAR **58**
5.1 Boyutlandırma ve Arazi Modellemesi 58
5.2 T1 Tünelinin 3 Aşamalı Açılması 63
5.3 T2 Tünelinin 3 Aşamalı Açılması 65
5.4 T2 Tünelinin 4 Aşamalı Açılması ve Kalota Geçici Radye İnşası 67
5.5 T2 Tünelinin 5 Aşamalı Açılması ve Kalota Geçici Radye İnşası 69
5.6 T2 Tünelinin 5 Aşamada Açılması ve Kalotla Strosa Geçici Radye İnşası 71
5.7 T2 Tünelinin 6 Aşamada Açılması ve Kalotla Strosa Geçici Radye İnşası 73
5.8 T2 Tünelinin T1 Tünelinden önce açılması 74
5.9 Tünel Kesitlerinin Statik Kontrolü 77

6. SONUÇLAR **81**

KAYNAKLAR **83**

EKLER **85**

ÖZGEÇMİŞ **134**

KISALTMALAR

GSI : Jeolojik dayanım indeksi
UCS : Serbest Basınç deneyi

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Son yüzyıldaki tünelciliğin gelişimi 5
Tablo 2.2: Yeni Avusturya Tünel İnşa metodunun tarihsel gelişimi 7
Tablo 2.3: Tünel Sınıflandırmaları 9
Tablo 3.1: Püskürtme beton dayanım değerleri 22
Tablo 3.2: Sayısal yöntemler 29
Tablo 4.1: Bouira Tüneli zemin özellikleri 43
Tablo 5.1: Analiz özeti 58
Tablo 5.2: Zemin malzeme parametreleri 60
Tablo 5.3: Püskürtme beton malzeme parametreleri 61
Tablo 5.4: Beton malzeme parametreleri 61
Tablo 5.5: Kaya bulonu malzeme parametreleri 61
Tablo 5.6: Tünel inşa aşamaları 62
Tablo 5.7: T1 Tüneli üç kademli kazı aşamaları 64
Tablo 5.8: T2 Tünelinin üç kademeli inşası aşamaları 66
Tablo 5.9: T2 Tüneli 4 kademede açma ve geçici radye uygulaması inşa aşamaları 68
Tablo 5.10: T2 Tüneli 5 kademede açma ve geçici radye uygulaması inşa aşamaları 70
Tablo 5.11: T2 Tüneli 5 kademede açma ve geçici kalot ve stros radyesi uygulaması inşa aşamaları 72
Tablo 5.12: T2 Tünelinin 6 kademede açılması inşa aşamaları 74
Tablo 5.13: T2 tünelinin daha sonra T1 tünelinin açılma durumu inşa aşamaları 75
Tablo 5.14. Tünellerin inşa sırasının oluşan deplasmanlara etkisi 76
Tablo 5.15: Tünel inşasının sonucu zemin yüzeyinde oluşan oturmaları 77
Tablo 5.16: Kesitlerin kesme kuvveti etkisindeki donatı kontrolleri 79

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Tünel terimleri 3
Şekil 2.2: Tarihi Tüneller. (a) Maden galerisi (Roma) (b) Kanalizasyon tüneli (Nineveh, Asurlular M.Ö 700) (c) Maden isleri (İspanya) (d) İçme suyu Tüneli (Samos, Yunanlılar M.Ö. 600) 4
Şekil 2.3: Lötschberg Tüneli Güney Rampasındaki ahşap iksa 6
Şekil 2.4: Nakliye yolu enkesiti 6
Şekil 2.5: Brunner'in almış olduğu püskürtme beton yönteminin patenti 7
Şekil 3.1: Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemindeki zemin iksa etkileşimi 11
Şekil 3.2: Esnek ve ince kaplamlar 11
Şekil 3.3:Yuvarlatılmış kesitler 11
Şekil 3.4: Kaplama yüzeyinin tamamen sarılması 12
Şekil 3.5: Püskürtme beton ve diğer kaplamalar 12
Şekil 3.6: Sistem deformasyon durumu 12
Şekil 3.7: Frankfurt Main Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi Uygulaması 13
Şekil 3.8: Merkez Arter Metro İstasyonu, Boston 14
Şekil 3.9: Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemiyle Açılmış Şaft Birmingham, İngiltere 14
Şekil 3.10: 3 Kademeli Kazı ve sağlamlaştırma işlemleri 16
Şekil 3.11: Roadheader 17
Şekil 3.12: Ters Kollu Ekskavatör 17
Şekil 3.13: Hidrolik Kırıcı 17
Şekil 3.14: Fresöz 18
Şekil 3.15: Değişik kademeli kazı çeşitleri 19
Şekil 3.16: Kademeli Kazı Yöntemi 20
Şekil 3.17: Kademeli Kazı Örneği, Bouira Tüneli 20
Şekil 3.18: Destekleme Prensibinin Açıklanması 21
Şekil 3.19: Yaş karışım püskürtme beton uygulaması 22
Şekil 3.20: U Profiller 23
Şekil 3.21: Kafes kirişler 24
Şekil 3.22: Mekanik ankrajlar 24
Şekil 3.23: Fiziksel Mekanik Ankraj 25
Şekil 3.24: Tünel ölçme sistemleri 26
Şekil 3.25: Tünel tasarım aşamaları 27
Şekil 3.26: Fenner-Pacher Konverjans Eğrisi 30
Şekil 3.27: Koruma zonunun dengeye katkısı -1 31
Şekil 3.28: Taşıyıcı Halkanın dengeye katkısını Mohr Dairesinde gösterimi 31
Şekil 3.29: 3 Boyutlu tünel ilerlemesinin 2 Boyutlu analizi (a) tünel aynasındaki gerçek durum (b) artan gerilme dağılımı ile yapılan hesap kabulü 34
Şekil 3.30: Tünel Aynasının 3 Boyutlu Durumu 35
Şekil 3.31: Gerilme Dağıtımı ve Rijitlik değişimi yöntemleri özeti 35
Şekil 3.32: Mohr Coulomb Akma Yüzeyleri 36

Şekil 3.33: Boşluk suyu basıncı ve hava basıncı 36
Şekil 3.34: Tünel tasarımındaki modeller (a) Elastik mesnetli kiriş eleman yöntemi (b) Sonlu elemanlar yöntemi 37
Şekil 4.1: Cezayir Doğu Batı Otoyolu 38
Şekil 4.2: Lakhdari Liason RN5 kısmı plan görünümü 39
Şekil 4.3: Bouira Tüneli'nin genel profil görünümü 39
Şekil 4.4: Bouira Tüneli Doğu Portali 40
Şekil 4.5: Tünelde karşılaşılan fay zonu 42
Şekil 4.6: Fay kili(solda), şeyl marl (Sağda) 42
Şekil 4.7 Tipik Tüneli Enkesiti 44
Şekil 4.8: Bouira Tüneli T1 ve T2 tüplerinin bitmiş hallerinin enkesiti 45
Şekil 4.9: Boru süren uygulaması, Bouira Tüneli 46
Şekil 4.10: Püskürtme Beton Uygulaması, Bouira Tüneli 46
Şekil 4.11: A Sınıfı geçici kaplama sistemi 47
Şekil 4.12: B Sınıfı geçici kaplama sistemi 49
Şekil 4.13: C Sınıfı geçici kaplama sistemi 51
Şekil 4.14: D Sınıfı geçici kaplama sistemi 53
Şekil 4.15: E sınıfı geçici kaplama sistemi 55
Şekil 4.16: Kalıcı beton kaplaması 57
Şekil 4.17: Kalıcı kaplama uygulaması, Bouira Tüneli 57
Şekil 5.1: Zemin Modellemesi. 59
Şekil 5.2: Sistemin programda geometrik modellemesi 59
Şekil 5.3: Tünellerin programdaki geometrik modellemesi 60
Şekil 5.4: Sonlu elemanlar ağı 62
Şekil 5.5: Tünel geometrisi ve deplasman değerlerinin incelendiği noktalar 63
Şekil 5.6: T1 Tüneli üç kademeli kazısı şematik gösterimi 63
Şekil 5.7: T1 Tüneli üç aşamalı açım durumu toplam deplasmanlar 64
Şekil 5.8: T1 Tünelinde ayrıntılı deplasmanlar 65
Şekil 5.9: T2 Tünelinin üç kademeli inşası şematik gösterimi 65
Şekil 5.10: T2 tüneli üç kademede açma durumu deplasmanlar 66
Şekil 5.11: T2 tüneli üç kademede açma durumu tünel deplasmanları 67
Şekil 5.12: T2 Tüneli 4 kademede açma ve geçici radye uygulaması inşa aşamaları şematik gösterimi 67
Şekil 5.13 : T2 Tüneli 4 kademede açma ve geçici radye uygulaması durumundaki deplasmanlar 68
Şekil 5.14: T2 Tüneli 4 kademede açma ve geçici radye uygulaması durumdaki tünel kaplamasındaki deplasmanlar 69
Şekil 5.15: T2 Tüneli 5 kademede açılması ve geçici radye uygulaması inşa aşamaları şematik gösterimi 69
Şekil 5.16: T2 Tüneli 5 kademede açma ve geçici radye uygulaması durumundaki deplasmanlar 70
Şekil 5.17: T2 Tüneli 5 kademede açma ve geçici radye uygulaması durumdaki tünel kaplamasındaki deplasmanlar 71
Şekil 5.18: T2 Tüneli 5 kademede açılması ve geçici kalot ve stros radyesi uygulaması inşa aşamaları şematik gösterimi 71
Şekil 5.19: T2 Tüneli 5 kademede açma ve kalot ve stros geçici radye uygulaması durumundaki deplasmanlar 72
Şekil 5.20: T2 Tüneli 5 kademede açma ve kalot ve stros geçici radye uygulaması durumundaki tünel kaplamasındaki deplasmanlar 73
Şekil 5.21: T2 Tünelinin 6 kademede açılması inşa aşamaları şematik gösterimi 73

Şekil 5.22: T2 Tünelinin 6 kademede inşası sonucu oluşan deplasmanlar. 74
Şekil 5.23: T2 Tünelinin inşası daha sonra T1 tünelinin inşası durumu deplasman değerleri 76
Şekil A.1: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, toplam deplasmanlar 87
Şekil A.2: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, yatay deplasmanlar 87
Şekil A.3: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, düşey deplasmanlar 88
Şekil A.4: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, kalot aşaması moment diyagramı 88
Şekil A.5: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, kalot aşaması kesme kuvvet diyagramı 89
Şekil A.6: T1 3 Tünelinin kademede açma durumu, kalot aşaması normal kuvvet diyagramı 89
Şekil A.7: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, stros aşaması moment diyagramı 90
Şekil A.8: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, stros aşaması kesme kuvveti diyagramı 90
Şekil A.9: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, stros aşaması normal kuvvet diyagramı 91
Şekil A.10: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, radye betonu aşaması moment diyagramı 91
Şekil A.11: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, radye betonu aşaması kesme kuvvet diyagramı 92
Şekil A.12: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, radye betonu aşaması normal kuvvet diyagramı 92
Şekil B.1: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, toplam deplasmanlar 94
Şekil B.2: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, yatay deplasmanlar 94
Şekil B.3: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, toplam deplasmanlar 95
Şekil B.4: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, kalot aşaması moment diyagramı 95
Şekil B.5: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, kalot aşaması kesme kuvvet diyagramı 96
Şekil B.6: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, kalot aşaması normal kuvvet diyagramı 96
Şekil B.7: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, stros aşaması moment diyagramı 97
Şekil B.8: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, stros aşaması kesme kuvveti diyagramı 97
Şekil B.9: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, stros aşaması normal kuvvet diyagramı 98
Şekil B.10: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, radye betonu aşaması moment diyagramı 98
Şekil B.11: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, radye betonu aşaması kesme kuvveti diyagramı 99
Şekil B.12: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, radye betonu aşaması normal kuvvet diyagramı 99
Şekil C.1: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, toplam deplasman grafiği 101
Şekil C.2: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, yatay deplasman grafiği 101

Şekil C.3: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, düşey deplasman grafiği 102
Şekil C.4: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması moment diyagramı 102
Şekil C.5: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması kesme kuvveti diyagramı 103
Şekil C.6: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması normal kuvvet 103
Şekil C.7: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması moment diyagramı 104
Şekil C.8: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması kesme kuvveti diyagramı 104
Şekil C.9: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması normal kuvvet diyagramı 105
Şekil C.10: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması radye betonu aşaması moment diyagramı 105
Şekil C.11: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması kesme kuvvet diyagramı 106
Şekil C.12: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması normal kuvvet diyagramı 106
Şekil D.1: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, toplam deplasman grafiği 108
Şekil D.2: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, yatay deplasman grafiği 108
Şekil D.3: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, düşey deplasman grafiği 109
Şekil D.4: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması moment diyagramı 109
Şekil D.5: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması kesme kuvveti diyagramı 110
Şekil D.6: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması normal kuvvet diyagramı 110
Şekil D.7: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması moment diyagramı 111
Şekil D.8: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması kesme kuvveti diyagramı 111
Şekil D.9: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması normal kuvvet diyagramı 112
Şekil D.10: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması moment diyagramı 112
Şekil D.11: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması kesme kuvveti diyagramı 113
Şekil D.12: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması normal kuvvet diyagramı 113
Şekil E.1: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, toplam deplasman grafiği 115
Şekil E.2: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, yatay deplasman grafiği 115
Şekil E.3: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, düşey deplasman grafiği 116

Şekil E.4: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması moment diyagramı 116
Şekil E.5: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması kesme kuvveti diyagramı 117
Şekil E.6: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması norma kuvvet diyagramı 117
Şekil E.7: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması moment diyagramı 118
Şekil E.8 : T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması kesme kuvveti diyagramı 118
Şekil E.9: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması normal kuvvet diyagramı 119
Şekil E.10: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması moment diyagramı 119
Şekil E.11: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması kesme kuvveti diyagramı ... 120
Şekil E.12: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması normal kuvvet diyagramı ... 120
Şekil F.1: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, toplam deplasman grafiği 122
Şekil F.2: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, yatay deplasman grafiği 122
Şekil F.3: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, düşey deplasman grafiği..... 123
Şekil F.4: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, kalot aşaması moment diyagramı 123
Şekil F.5: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, kalot aşaması kesme kuvveti diyagramı..... 124
Şekil F.6: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, kalot aşaması normal kuvvet diyagramı..... 124
Şekil F.7: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, stros aşaması moment diyagramı 125
Şekil F.8: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, stros aşaması kesme kuvveti diyagramı..... 125
Şekil F.9: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, stros aşaması normal kuvveti diyagramı..... 126
Şekil F.10: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, radye beton aşaması moment diyagramı 126
Şekil F.11: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, radye betonu aşaması kesme kuvveti diyagramı 127
Şekil F.12: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, radye betonu aşaması normal kuvvet diyagramı 127
Şekil G.1:T1 Tüneli toplam deplasman grafiği..... 129
Şekil G.2:T1 Tüneli yatay deplasman grafiği 129
Şekil G.3:T1 Tüneli düşey deplasman grafiği..... 130
Şekil G.4:T2 Tüneli toplam deplasman grafiği..... 130
Şekil G.5:T2 Tüneli yatay deplasman grafiği 131
Şekil G.6:T2 Tüneli düşey deplasman grafiği..... 131
Şekil H.1: Tünel açılması sonucu zemin yüzeyinde oluşan yatay oturmalar..... 133
Şekil H.2: Tünel açılması sonucu zemin yüzeyinde oluşan düşey oturmalar. 133

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{A_c}$	**:** Beton kesit alanı
$\mathbf{A_s}$	**:** Boyuna donatı alanı
$\mathbf{A_{sw}}$	**:** Kesme donatısı alanı
c	**:** Kohezyon
$\mathbf{f_{cd}}$	**:** Beton tasarım basınç dayanımı
$\mathbf{f_{ctd}}$	**:** Beton tasarım çekme dayanımı
$\mathbf{f_{ck}}$	**:** Beton karakteristik basınç dayanımı
$\mathbf{f_{yk}}$	**:** Donatı karakteristik çekme dayanımı
$\mathbf{f_{wyd}}$	**:** Kesme donatısı tasarım çekme dayanımı
R	**:** Koruyucu zon yarıçapı,
r	**:** Boşluk yarıçapı,
m, s	**:** kaya kütle karakteristiği sabitleridir
$\mathbf{m_i}$	**:** Bozulmamış malzeme sabiti
n	**:** Boyutsuz normal kuvvet
$\mathbf{N_d}$	**:** Tasarım normal kuvvet değeri
$\mathbf{P_i}$	**:** Yüzey dayanımı
S	**:** Kayanın makaslama direnci,
α, β	**:** En yüksek ve en düşük asal gerilme değerlerine bağlı büyüklüklerdir
ϕ	**:** Kayma mukavemeti açısı
$\boldsymbol{\sigma_0}$	**:** İlkel gerilme durumu
$\boldsymbol{\sigma_1}$, $\boldsymbol{\sigma_3}$	**:** En büyük ve en küçük asal gerilmeler
$\boldsymbol{\sigma_c}$	**:** Tek eksenli basınç dayanımı
$\boldsymbol{\sigma_r}$	**:** Radyal gerilme
$\boldsymbol{\tau^R}$	**:** Kayma direnci
$\boldsymbol{\tau_b}$, $\boldsymbol{\tau_s}$,	**:** Beton ve çelik iksanın makaslama dirençleri

YENİ AVUSTURYA TÜNEL İNŞA YÖNTEMİ PRENSİPLERİNE GÖRE TÜNEL KAPLAMA TASARIMI

ÖZET

Son yüzyıldaki teknolojik gelişmelerin hızlanmasına paralel olarak tünelcilikte de yeni yöntem arayışları ortaya çıkmıştır. Tünel inşası sırasında kullanılacak olan kazı ve destekleme yöntemleri önem taşımaktadır. Günümüzde kullanılan en yaygın tünel inşa yöntemlerinden birisi de Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi'dir. Yöntemin diğer yöntemlere göre en önemli üstünlüklerinden birisi, her türlü zemin koşulunda ve tünel geometrisinde uygulanabilmesidir. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemine göre tünelin esas taşıyıcı elemanı tünel etrafındaki zemindir. Tünel yüzeyine esnek kaplamalar uygulanması sonucu oluşacak deformasyonlar kontrol edilerek sisteme gelen yüklerin azalması sağlanmaktadır.

Bu çalışmada Cezayir'de bulunan Doğu Batı Otoyolu Projesi kapsamında açılmakta olan ve iki tüpten oluşan Bouira Karayolu Tüneli uygulaması incelenmiş, daha sonrasında ise tünellerden elde edilen verilerle Plaxis yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle tünel tasarımları yapılmıştır. Hesaplarda 2 boyutlu analizler kullanılmıştır. Tünellerin farklı kademelerde inşası modellenerek tünel kaplamalarında ve zemin yüzeyinde oluşacak etkiler anlaşılmaya çalışılmış ve tünellerin birbirlerine olan etkileri araştırılmıştır. Tünel kaplamaları etrafında oluşan kesit tesirleri gözlemlenerek tünel kaplaması statik olarak kontrol edilmiştir. Bu modelleme çalışması sonucunda tünellerin inşası sırasında Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemine uygun kademeli kazı yöntemlerinin uygulanmasıyla tünel etrafında oluşan deplasman değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kademeli kazılar sonrasında oluşan zemin oturmaları incelenmiştir. Tünellerin inşa sırasının değişmesi sonucunda oluşacak olan deplasman değerlerinin de değiştiği gözlemlenmiştir. Yapılan bu analizlerin sonucunda tünel kaplamasındaki ön boyutlandırmalar kontrol edilerek tekrar boyutlandırılmıştır.

TUNNEL LINING DESIGN ACCORDING TO THE PRINCIPLES OF NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD

SUMMARY

Parallel to technological developments in the last century, there is also a pursuit for new tunnelling methods. Excavation and supporting methods being used during the tunnel construction is very important. One of the most popular tunnel constructing methods is the New Austrian Tunnelling Method. One of the most important advantages of this method is its applicability to all soil conditions and tunnel geometry. The method is based on the principle that the main support element is the soil surrounding the tunnel. Controlled stress release is accomplished by controlling the deformations via applying flexible and thin lining to the tunnel surface.

In this study, East-West Highway Project, Bouira Tunnel located in Algeria which consists of twin tubes was investigated and using the data, tunnel design study was conducted by the help of Plaxis software which uses the finite element method. Tunnelling construction was modelled using staged construction in different excavation sequences and its effects on the tunnel lining and soil surface are investigated. 2D version of this software is prefered for this study.The interaction of twin tubes to each other is also analyzed. Tunnel lining was controlled statically by observing the internal forces on the lining elements. It is obtained that, using the convenient staged construction methods, displacements around the tunnel and ground settlements were decreased reasonably. It is also seen that, different excavation stages changes the displacements. Finally, the dimensioning of the tunnel lining is accomplished using the analysis results.

1 GİRİŞ

İnsanlık tarihinin başlamasından bu güne kadar insanlar ulaşım, güvenlik gibi birçok gereksinimlerini karşılayabilmek için yeraltı yapılarını inşa etmişlerdir. Bu yeraltı yapılarının en önemlilerinden biri olan tünel inşasının literatürde sanat olarak adlandırılmasının en önemli sebebi uzun yıllar insanların önceden bilinmeyen zemin koşulları içinde tünel inşa ederken birçok zorlukla mücadele etmesidir. Özellikle ikinci dünya savaşı sonrası hızlanan teknolojik ilerlemeler ve bunun sonucunda makinelerin gelişmesi bunlara ek olarak geoteknik bilimindeki ilerlemeler insanların tünel inşasını daha kolay ve hızlı bir hale dönüştürmüştür. Tünel inşası sırasında farklı kazı yöntemleri kullanılırken bunlar arasındaki en güncel olanı Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemidir. Yöntem özellikle her tür tünel geometrisine ve zemin koşuluna kalaylıkla adapte olabilmesi sebebiyle kısa sürede tüm dünyada yaygınlaşmıştır. Ülkemizde açılan Bolu Tünelleri gibi birçok karayolu tünel inşası projesinde de Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi kullanılmaktadır.

Yöntem bir tünel projesinin zemin etütlerinin yapılmasından başlanarak, tasarımının yapılması, tünel inşasının bitirilmesine kadar her aşamayı bir bütün olarak kabul etmektedir. Bu tezi kapsamında Cezayir'de bulunan ve çift tüpten oluşan Bouira Karayolu Tüneli dataları kullanılarak Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi prensiplerine uygun tünel kaplama tasarımı yapılması amaçlanmıştır.

Tünel inşası sırasında önceki projelerden edinilen deneyimlerin kullanılması çok önemli bir yer tutmaktadır. Buradan yola çıkarak öncelikle yoğun bir literatür taraması yapılmıştır. Çalışmaların birinci bölümünde tünelcilik ve tünel açma yöntemleri hakkında bilgi verilmiş ve tünelciliğin ve bununla paralel olarak kaplama sistemlerinin tarihsel gelişimi açıklanmıştır.

Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi hakkında detaylı bilgiler çalışmanın ikinci bölümünde yer almaktadır. Bu bölümde önce yöntemin prensipleri açıklanmış, yöntemde kullanılan kaplama tipleri anlatılıp her kaplama tipinin fiziksel özellikleri ve kullanım alanları anlatılmıştır. Yöntemde uygulanılan kazı ve destekleme şekilleri hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra tünel tasarımı kısmına geçilerek tünel tasarımında kullanılan yöntemler açıklanmıştır.

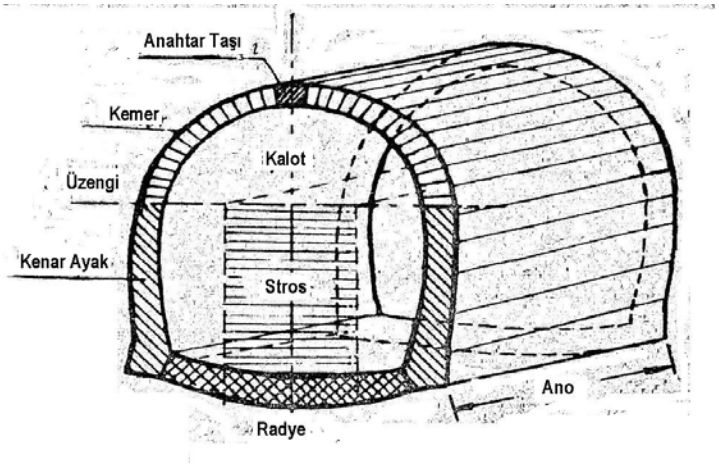
Bir sonraki bölümde Bouira Tüneli incelenmiş tünelin açıldığı zeminin özellikleri hakkında detaylı bilgi verilmiş ve bu tünelde kullanılan kaplama sınıfları açıklanarak genel uygulamalardan örnekler verilmiştir. Tünel üzerindeki bir bölüm seçilmiştir.

Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemin prensiplerine uygun olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak şeçilen bölümde tünel tasarımı yapılmıştır. Öncelikle tünel geometrisi ve zemin profili modellenmiştir. Daha sonra tünelin değişik sayı ve geometrideki kademelerde açılmasının tünel kaplamasında oluşacak deplasmanlara olan etkisi incelemiş, tünellerin açım sırasının değişmesi sonucu 2 tünelin birbirine olan etkisi araştırılmış, tünel açımı sonucu zemin yüzeyinde oluşması beklenen oturma miktarları gözlenmiştir. Daha sonra bu hesaplamalar sonucundaki kesit tesirleri kullanılarak tünel boyutlandırılması kontrol edilmiştir.

2 TÜNELLERİN GELİŞİMİ VE SINIFLANDIRILMASI

Doğal engeller veya maliyetin yüksek olması sebebiyle yer üstünden yapılamayan insan veya malzeme ulaşımının, yeraltından geçirilmesi için tünel adı verilen sanat yapıları kullanılmaktadır. İki ucu açık, boyu eninden fazla, eğimi 30º den az, kalınlığı boşluk duvarından etkilenme sınırına kadar ulaşan ve ana malzemesi kaya olan çok kalın cidarlı silindirik yeraltı yapılarına tünel denir (Vardar, 1985).

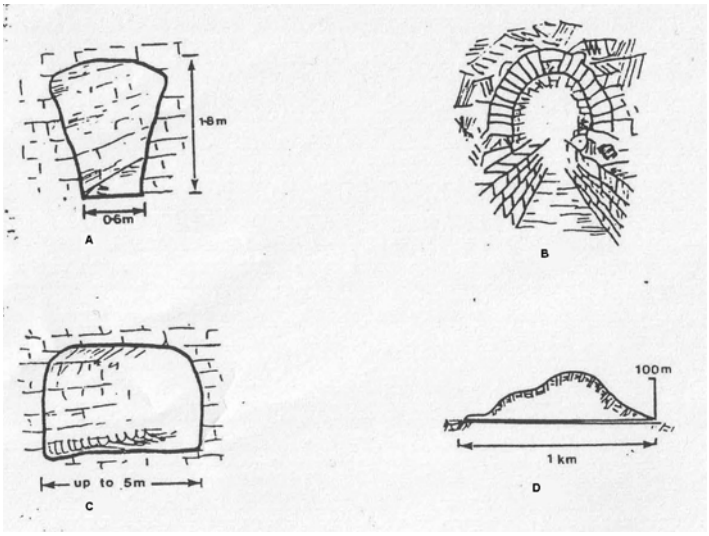
Tüneller hakkında bazı terimlerin açıklanmasında fayda vardır. Tünel inşaatı sırasında herhangi bir işlemin yapıldığı tünel parçasına ano adı verilir. Tünel açılması sebebiyle oluşan yüklerin temele aktarılması için yapılan ve genellikle ters kemer şeklinde olan tünelin taban kısmına gibi radye olarak isimlendirilir. Temelden üzengi seviyesine kadar olan yan duvarlara kenar ayak, kenar ayaklara oturan tavan kısmına kemer, kemerin kenar ayaklar oturduğu çizgiye ise üzengi çizgisi denir. Şekil 2.1 ‘de görüldüğü gibi üzengi çizgisinin üstünde kalan kısma kalot (üstyarı) altında kalan kısma ise stros (altyarı) denir (Bozkurt,1969).



Şekil 2.1: Tünel terimleri (Bozkurt,1969)

2.1 Tünelciliğin Tarihsel Gelişimi

Tünellerin tarihsel gelişimine bakmak için 3000 yıl kadar öncesine gitmek gerekir. İlk cağlardan bu yana insanlar doğa olaylarından veya düşmanlarından korunmak için dehlizler ve mağaralardan faydalanmaktadır. Bu çağlarda insanlar tüm işlerini1 elleri veya daha sert taşlar ile yapmaktaydılar. Ahşap iksa ile yapılan ilk tünel M.Ö 200 yıllarında Fırat nehri üzerinde yapılmış olup tuğla kaplamalı ve kemerli olan bu yapı 960 m uzunluğundadır. Daha sonra Mısırlılar, Romalılar ve Yunanlılar sulama ve maden çıkarma amaçlı tüneller yapmışlardır.Bu tarihi tünellerin şematit enkesitleri Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2: Tarihi Tüneller. (a) Maden galerisi (Roma) (b) Kanalizasyon tüneli (Nineveh, Asurlular M.Ö 700) (c) Maden isleri (İspanya) (d) İçme suyu Tüneli (Samos, Yunanlılar M.Ö. 600) (Whittaker ve Frith 1990)

Endüstri devriminin sonucunda ortaya çıkan ulaşım ve kaynak ihtiyacı tünellere verilen önemi arttırmıştır. 17. yüzyılda İngiltere ve Fransa'da birçok yeraltı su kanalları açılmıştır. Özellik Güney Afrika'da ise maden tünelleri açılmıştır. Bu dönemde Amerika'da da tüneller açılmıştır. 1823- 1845 yılları arasında açılan ikiz tüneller tünelcilik açısından önemli kilometre taşlarındandır. Bu tünelle Fransız mühendis Brunnel kalkan yönteminin patentini almıştır. Bir diğer önemli gelişme ise F. Beaumont tarafından bulunan ilk basınçlı hava makinesi ile 1880 yılında Manş denizinin altından keşif galerisi açılmasıdır. Demiryollarındaki ilerlemeler sonrasında bu yıllarda Fransa, İtalya, İsviçre'de demiryolu tünelleri açılmıştır. Son yüzyıldaki tünelciliğin gelişmesinde katkısı olan diğer faktörler Tablo 2.1'de verilmiştir (Whittaker ve Frith, 1990).

Tablo 2.1: Son yüzyıldaki tünelciliğin gelişimi (Whittaker ve Frith, 1990).

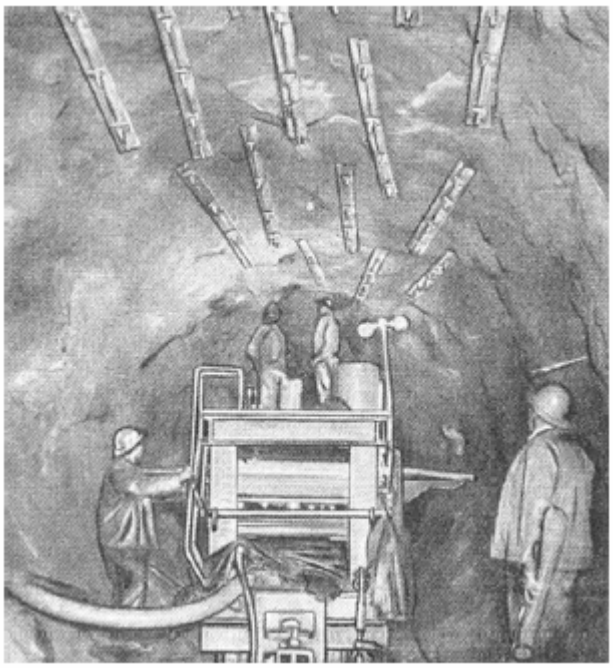
Tünel Elemanı	Ana etmenler
Kazı	1. Delmedeki gelişmeler: Güç ve ekipman
	2.Patlayıcı ve patlatma tekniklerindeki ilerlemeler
	3.Açıklıklardaki genişlemesi ve kazı malzemesinin yüklemesindeki ilerlemeler
	4. Enerji kullanımındaki gelişmeler: Elektrik ve sıkıştırılmış hava
Kaplamalar	1. Kaplamalardaki gelişmeler: Beton ve demir.
	2. Basınçlı enjeksiyonla zemin stabilitesinin daha kolay sağlanması
	3. Tünel kalkanlarının kullanılması ile aynada zemin stabilitesinin sağlanmasının kolaylaşması
Çalışma Ortamı	1. Havalandırmanın gelişmesi
	2. Işıklandırmanın gelişmesi
	3. Pompaların gelişmesiyle daha iyi yeraltı suyu kontrolü
	4. Sıkıştırılmış hava kilitleriyle su sızmasının azalması.

2.2 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin Tarihsel Gelişimi

Uzun yıllar tünelcilikte iksa olarak ahşap malzeme kullanılmıştır. Kalıcı iksa olarak ise genellikle tuğla kullanılmıştır. 19. yüzyılda uygulanan Alman (1803), Belçika (1828), İngiliz (1830), Avusturya (1839), Amerika (1854) ve İtalyan (1865) tünel açma yöntemlerinin hepsinde geçici iksa olarak ahşap, kalıcı iksa olarak ise tuğla kullanılmıştır. Beton mukavemetini geç alması ve bu sürede deformasyonların çok fazla olması nedeniyle tünel iksası olarak düşünülmemiştir. Ahşap malzemenin fiziksel özellikleri sebebiylede kazı alanının %30 unu kapladığı durumlar olmaktadır (Şekil 2.3). Böylece daha büyük kesitlerde kazı yapılması gerekmektedir. Kaya bulonlarının kullanılması durumumda 3m x 2m olan nakliye tüneli ahşap iksa kullanılması durumunda 3.50m x 3.00m gibi büyük kesitlere ulaşabilmektedir (Şekil 2.4). Ahşap iksalar genellikle geri çıkarılmamaktadır. Zamanla ahşabın özelliğini yitirmesi sonucu mukavemetinde düşmeler olmakta ve bunun sonucu olarak tünelde ani göçmeler veya 40 cm' ye varan tavan deplasmanları oluşmaktadır ve bu deplasmanlar yıllarca sürmektedir. 19. yüzyılın sonlarında fiziksel özellikleri çok daha iyi olan çelik iksaların ahşap iksaların yerini alması tünelcilikte yeni bir dönem açmıştır (Kovar,2002). Daha geniş açıklıklar tam kesitte açılmaya başlanmış bunun sonucunda kazı yapmak veya pasanın dışarı atılması için daha büyük makineler tünellere girmeye başlamıştır.



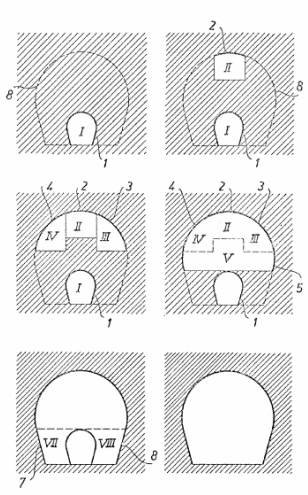
Şekil 2.3: Lötschberg Tüneli Güney Rampasındaki ahşap iksa (Kovari,2002)



Şekil 2.4: Nakliye yolu enkesiti (Kovari,2002)

Fiziksel özelliklerinin iyi olmasına rağmen çelik iksanın performansı iksa ile kaya arasındaki ara yüzeye bağlıdır. 1908 yılında Carl E. Akaley tarafından ilk onaylı püskürtme beton patenti alınmıştır. 1920 yılında Amerika da bazı tünlerde koruma tabakası olarak kullanılmaya başlanmıştır (Sauer ve Gold, 1989). Püskürtme beton 1930'lu yıllarda L. v. Rabcewicz tarafından Avrupa'daki tünellerde iksa olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1963 yılında Avusturyalı bilim adamı L. v. Rabcewicz ve arkadaşları tarafından Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemini dünyaya

duyurulmuştur. Daha sonra Avusturyalı Bilim adamları Rabcewicz, Müeller, Brunner (Şekil 2.5) ve Pacher tarafında geliştirilmiştir. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin gelişimi Tablo 2.2'de özetlenmektedir. (Whittaker ve Frith,1990). Yöntem 1969'te Frankfurt Metrosu'nda uygulanmış olup daha sonra Avrupa'da birçok tünel uygulamasında kullanılmıştır.Amerika'ya ise Avrupa'dan çok sonra girmiştir.



Şekil 2.5: Brunner'in almış olduğu püskürtme beton yönteminin patenti

Tablo 2.2: Yeni Avusturya Tünel İnşa metodunun tarihsel gelişimi (Whittaker ve Frith, 1990)

Yıl	Açıklama
1848–1920	Erken Priz alan harçların geliştirilmesi, Püskürtme Beton pompalarının patentinin alınması, İnşaat ve maden uygulamalarında kullanımıma başlanması
1948	Kontrollü kaya deformasyonu kavramının geliştirilmesi Şematik kaya Bulonu içeren kaplama sistemi Rabcewicz tarafından açıklandı
1954	Püskürtme betonunun kaplama elemanı olarak ilk olarak Avusturya'daki HEP projesinde Brunner tarafından kullanıldı.
1958	Brunner sıkışan zeminlerdeki tünel inşası için Püskürtme Beton Yöntemi olarak sistemin patentini aldı
1960	Mueller tünellerde fazla kaya yüklerinin önlenmesi için yük ve deformasyon ölçümlerinin tasarımın bir parçası olması gerektiğinin farkına vardı. Sistematik ölçümün tasarımın parçası olduğu bir yöntem geliştirdi
1962	Rabcewicz ilk olarak "Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi" terimini Salzburg'da bir toplantıda kullandı.
1964	Rabcewicz'in Water Power dergisinde yayınlanan makalelerinden sonra dünya "Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi" kabul etti. Tasarımında Mueller ve Rabcewicz in yol göstermesiyle yöntemin uygulaması Schwalkheim Tünelinde yapıldı
1964-…	Yöntem tünelcilikte yaygınlaşarak dünya genelinde birçok tünel inşaatında kullanılmaktadır

2.3 Tünellerin Sınıflandırılması

Tüneller derinliklerine, kullanım alanlarına, açıldıkları zemin türlerine, yapım yöntemlerine, kaplama tiplerine göre sınıflandırılabilirler. Tüneller açıldıkları derinliklere göre derin tüneller ve sığ tüneller olarak kendi içlerinde ayrılabilirler. Karayolu tünelleri, demiryolu tünelleri, yaya geçitleri, metro yapıları ulaştırma alanında tünellere örnek verilebilir. Pis ve temiz su iletim, enerji iletimi, rekreasyon ve savunma yapıları da tünellerin diğer kullanım alanlarıdır. Açıldıkları zemin durumuna göre sert zeminde açılan, yumuşak zeminde açılan ve karışık zeminlerde açılan tüneller olarak üçe ayrılabilirler. Tünellerin inşası sırasında kullanılan iç ve dış kaplama sistemleri tünel sınıflandırılmasında önemli bir faktördür. Dökme veya prekast beton kaplama kullanılan, çelik kaplama sistemi kullanılan, püskürtme beton kullanılan veya hiçbir kaplama kullanılmayan tüneller olabilmektedir. Tüneller ilerleme yönündeki eğimlerine göre düz, az eğimli ve dik tüneller olarak üçe ayrılırken, açıldıkları güzergahın durumuna göre düz veya kurpta tünler olarak ikiye ayrılabilir.Tablo 2.3 tünel sınıfladırılmaları görülmektedir. Tüneller genellikle kazı yöntemlerine göre mekanize kazı yöntemleri, klasik yöntemler, patlatmalı yöntemler, aç kapa tünel yöntemleri ve batırma tüp yöntemleri olarak sınıflandırılabilirler.

Mekanize kazı yöntemleri tam kesit çalışan ve parçalı kesit çalışan makinelerle açılan yöntemler olarak kendi içinde ikiye ayrılabilir. Burada tam kesit çalışan makineler köstebek adı verilen makinelerdir. Bu makineler kalkanlı olanlar veya olmayanlar olarak ta kendi içlerinde ikiye ayrılabilir. Eğer açılan zemin stabilitesi yüksek zemin ise kalkansız köstebekler kullanılırken stabilitesi düşük veya yoğun yeraltı suyunun geçişini olduğu zeminlerde kalkanlı makineler kullanılarak tünel açılmaktadır.

Del-patlat yöntemleri genellikle sağlam zemin olarak adlandırılan ve tünel makineleriyle açılması daha zor olan zeminlerde kullanılmaktadır. Bu yöntemde genellikle jumbo adı verilen makinelerle tünel aynasına açılan deliklere patlayıcı yerleştirerek patlatılması sonucu tünel açılmaktadır. Şehir içinde açılan ve yüzeye yakın tünellerde genellikle zemin yüzeyindeki sarsıntı ve bunun sonucunda yukarıdaki yapılarda oluşacak etkilerden dolayı patlatmalı sistemler seçilmemektedir.

Tünel üstündeki örtünün ince olduğu yani tünel tepe noktasını zemin yüzeyine yakın olduğu bölgelerde aç kapa tünel açma yöntemi uygulanabilir. Bu yöntemde tünel açılacak bölge kazılarak istinat sitemleriyle tünel kesiti oluşturulup daha sonra üst kısım tekrar kapanmaktadır.

Batırma tüp ile tünel inşası ise deniz veya nehir gibi su geçişlerinde kullanılmaktadır. Tünel kesitlerinin oluşturacak elemanların dışarıda kuruda döküldükten sonra tünel güzergahına yüzdürülerek getirilmesi ve daha sonra batırılması şeklinde tünel inşa edilmektedir.

Günümüzde yaygın şekilde kullanılan bir diğer tünel yapım yöntemi Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemidir. Bu yöntem bir sonraki kısımda detaylı olarak anlatılacaktır.

Tablo 2.3: Tünel Sınıflandırmaları (Sinha,1989)

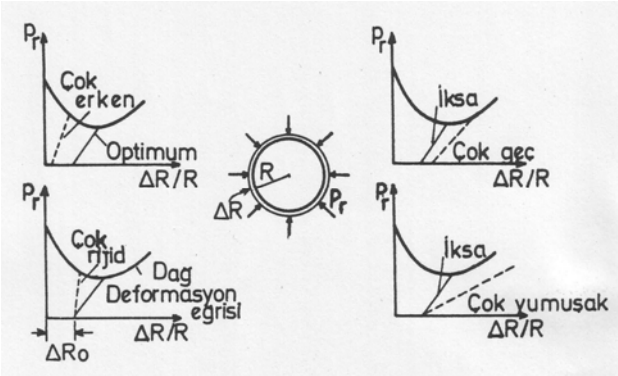
Sınıflandırma Türü	Tünel Tipleri		Sınıflandırma Türü	Tünel Tipleri
A. Derinlik	1-Sığ		D-Yapım Yöntemi	1-Klasik Yöntemler
	2-Derin			2-Del-Patlat
B. Kullanım Alanı				3-Köstebek
B.1 Ulaştırma	1-Yaya			3-Roadheader
	2-Karayolu			5-Aç Kapa
	3-Demiryolu			6- Batırma Tüp
	4-Metro			
B.2 Taşıma	1-Su temini		E-İç Kaplama	1-Dökme Beton Kaplama
	2-Kanalizasyon			2-Prekast Kaplama
	3-Su tahliye			3-Püskürtme Beton Kaplama
	4-Su Alma Ağızları			4- Çelik Kaplama
B.3 İletim	1- İletim hatları			5- Desteksiz
	1.a-Telefon		F-Dış Kaplama	1- Püskürtme Beton
	1.b-Kablo			2- Kaya Bulonu
	1.c-Elektrik Hatları			3- Çelik İksa
	1.d-Boru hatları		G-Akış Durumu	1-Serbest akım
B.4 Rekreasyon	1-Yüzme Havuzları			2-Basınçlı akım
	2-Oyun Merkezleri		H-Uzunluk	1-Uzun
	3-Yeraltı Kültür Merkezleri			2-Orta Uzunlukta
	4-Spor Salonları			3-Kısa
B.5 Madencilik	1-Ulaşma		I-Eğim	1-Düz
	2-Taşıma			2-Dik
B.6 Savunma	1- Sığınaklar			3-Az Eğimli
	2-Komuta Merkezleri		K-Güzergah	1-Düz
C-Zemin Durumu	1-Sert			2-Kurpta
	2-Yumuşak			
	3-Karışık			

3 YENİ AVUSTURYA TÜNEL İNŞA YÖNTEMİ

İkinci dünya savaşından sonra ulaştırma yatırımlarındaki artışa paralel olarak tünelcilikte de yeni yöntem arayışları ortaya çıkmıştır. Günümüzdeki en sık kullanılan tünelcilik yöntemlerinden biriside Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemidir. Diğer tünel açma yöntemlerinin tersine Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin tam bir açıklamasını bulmak gerçekten zordur. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi belirli bir ekipman kullanılarak açılan sabit bir yöntem olmayıp bir tünelcilik felsefesidir. Yöntemin her tür geometriye ve jeolojik duruma kolaylıkla uyum sağlaması sonucunda ekonomik tasarımlar ve kesintisiz ilerleyen tünel inşaatları ortaya çıkmıştır. Öncelikle kaya tünelleri için önerilmesine rağmen günümüzde genellikle kohezyonlu zeminlerde kullanılmaktadır. (Leca,1989). Genellikle püskürtme betonun dış kaplama olarak kullanıldığı bu yöntemde tünel iksa miktarı iksanın uygulama zamanının ayarlanmasıyla optimum seviyede tutulmaktadır. Aşağıda yöntemin ana prensipleri, kazı ve destekleme yöntemleri detaylı bir şekilde anlatılacak daha sonra ise tasarım yöntemleri hakkında bilgi verilecektir.

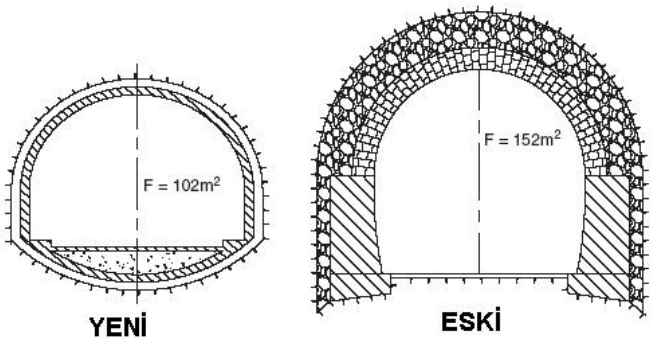
3.1 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin Prensipleri

Yöntem belirli bir kazı veya destek sistemine bağımlı değildir. Yöntemin esas amacı uygun kazı ve iksa yöntemlerinin seçilerek kazı sonrasında oluşacak olan ikincil gerilme ve deformasyonların, zemin yapısının stabilitesini bozmayacak şekilde kontrol edilmesi, yönlendirilmesi ve zeminin ilk sağlamlığının olabildiğince koruyarak boşluğu çevreleyen bölgenin kendi kendisini tutan ve taşıyan bir statik sitem oluşturmasını sağlamaktır (Vardar 1985). Yöntemin ana esasları 1978 yılında Müller tarafından 22 ana madde açıklanmıştır. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemine göre gerekli sağlamlaştırma işlemleri ne çok erken, ne çok geç başlamalı ve iksa direncini oluşturan yapı ne çok rijit ne de çok zayıf olmamalıdır B prensibi anlatan Fenner-Pacher eğrileri Şekil 3.1'de görülmektedir..

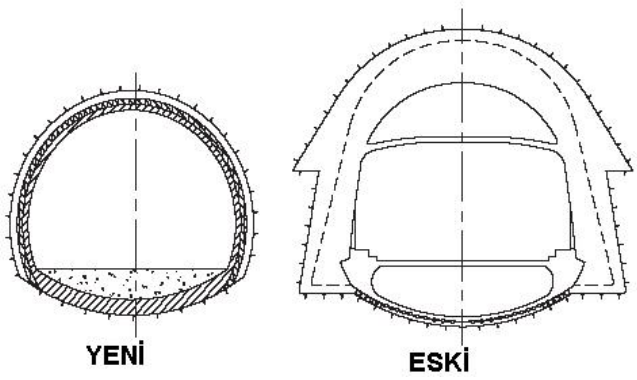


Şekil 3.1: Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemindeki zemin iksa etkileşimi (İncecik, 1986)

Rijit veya kalın kaplamalar yerine Şekil 3.2'de de görülen daha esnek ve ince kaplamalar kullanılmaktadır. Böylece sistemde oluşacak olan eğilme momentleri azaltılmış olacaktır. Tünelin enkesitinin Şekil 3.3'de görüldüğü gibi daire veya elips şeklide seçilmesi gerekmekte olup gerimle yoğunlaşmasına sebep olacak olan köşelerden kaçınılmalıdır. Kaplama inşa edilirken en kısa zamanda halka oluşturulmalıdır.

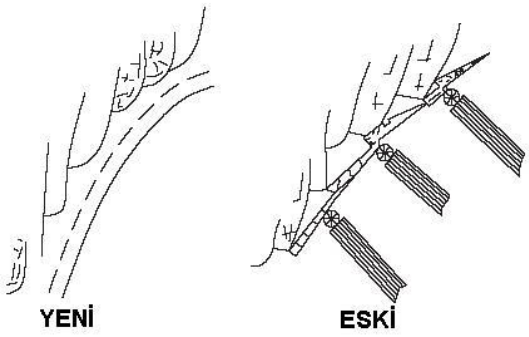


Şekil 3.2: Esnek ve ince kaplamlar (Singh ve Goel, 2006)

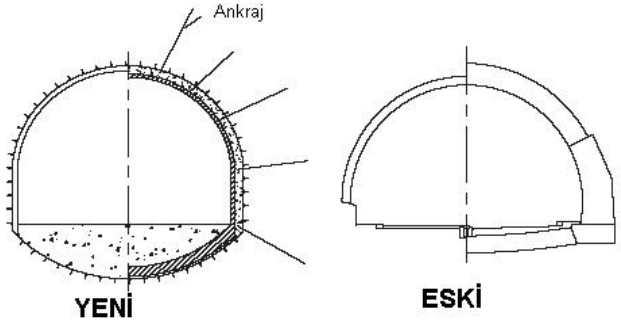


Şekil 3.3: Yuvarlatılmış kesitler (Singh ve Goel, 2006)

Yöntemde kazı sonrası uygulanacak iksa bağlayıcı olmalı ve çevresindeki kayaçla birlikte çalışmalıdır. Buna en uygun uygulama püskürtme betondur (Şekil 3.4). Püskürtme betonla birlikte kullanılacak olan diğer kaplamalar, kaplama toplam kalınlığını arttırmamalıdır. Püskürtme betona ek olarak Şekil 3.5'te görülen hasır çelik ve sistematik ankraj veya bulonların kullanılmasıyla sitemin ana taşıyıcı kaplamaları oluşturmaktadır.

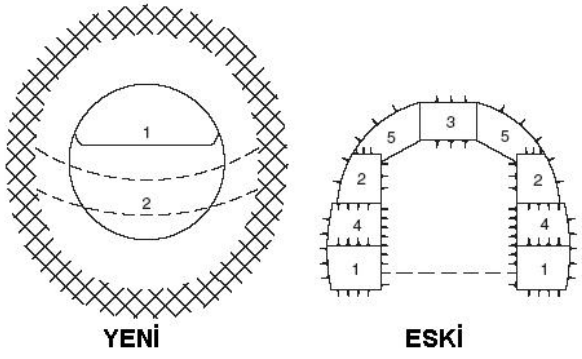


Şekil 3.4: Kaplama yüzeyinin tamamen sarılması (Singh ve Goel, 2006)



Şekil 3.5: Püskürtme beton ve diğer kaplamalar (Vardar, 1979)

Yöntemde sistemin ana malzemesi dağın kendisidir ve kazı yapılırken dağ olabildiğince az deforme edilmelidir Dağın daha çok deforme edildiği eski sistem Şekil 3.6'da görülmektedir



Şekil 3.6: Sistem deformasyon durumu (Singh ve Goel, 2006)

Tünel açımı ilerledikçe kaya ve iksa davranışının anlaşılması için sürekli ölçüm yapılmalıdır.

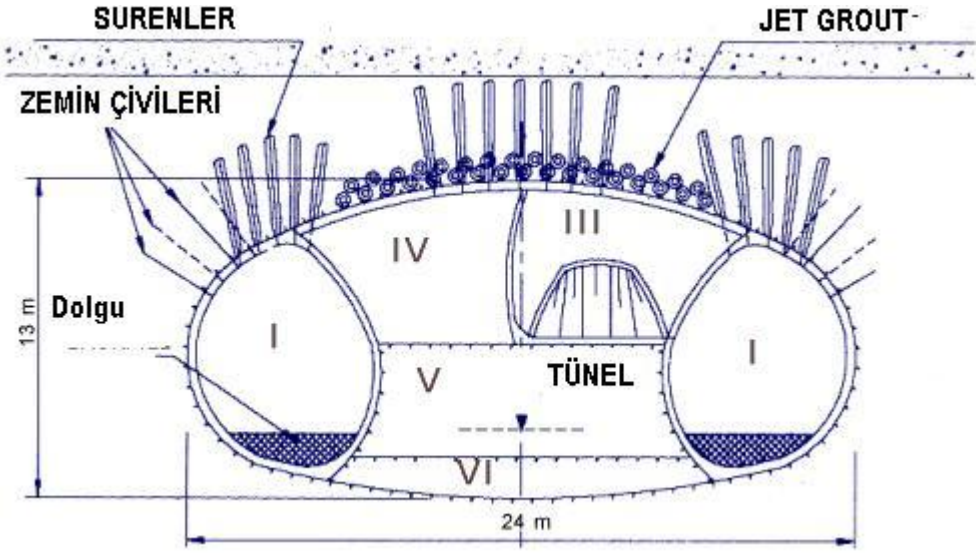
3.2 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin Kulanım Alanları

Yöntem ilk olarak Rabcewicz tarafından Alplerde bulunan kaya tünelleri için önerilmiştir ve yüksek kaya gerilmelerinin oluştuğu bu tünellerde uygulanmıştır. Daha sonraları genellikle zayıf zeminlerde açılan tünellerde kullanılmıştır. Kohezyonlu zeminlerde açılan tünellerde uygulanmasının yanı sıra açılması nispeten daha zor olan kohezyonsuz zeminlerde de açılan tünellerde uygulanmaktadır. İlk bakışta ayrışmamış sağlam kayada açılan tünellerde yöntemin uygulamasına gerek olmadığı düşünülse de yöntem zemin profillerinin değişken olduğu kaya tünellerinde sıkça uygulanmaktadır.

Yöntem şehir içinde açılan tünellerde ve metro uygulamalarında da kullanılmıştır. Şekil 3.7 de görülmekte olan Frankfurt mertrosunda , Münih, Viyana, Hong-Kong, Lyon, Washington ve İstanbul metrolarında başarıyla uygulanmıştır. Şekil 3.8 ‘de görülmekte olan kazı alanı 200 m² olan istasyon tünelleri ve şekil Şekil 3.9’ da örnekleri verilmiş olan geniş şaftlar bu yöntemle açılmıştır. Zayıf zeminlerde açılan geniş enkesitli karayolu ve demiryolu ve sulama tünellerinde başarıyla uygulanmıştır.



Şekil 3.7: Frankfurt Main Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi Uygulaması (Sauer,1990)



Şekil 3.8: Merkez Arter Metro İstasyonu, Boston (Sauer,1990)



Şekil 3.9: Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemiyle Açılmış Şaft Birmingham, İngiltere (Sauer,1990)

Son yıllarda açılan Avusturya'daki Tauren (6.40 km) ve Alberg karayolu tünelleri, Pakistan'daki Tarbela Hidroelektrik santrali projesi ile Almanya'daki şehir içi toplu taşıma tünellerinde Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi felsefesi başarısını kanıtlamıştır. Tauren tüneli çok yüksek kaya gerilmelerinde başarıyla açılmış olup, çok geniş çaplı (90–100 m²) Arbela tünellerinde de çok hızlı ilerlemeler kaydedilmiştir. Tarbela tünelinde çok zayıf ve değişen zemin koşullarında geniş çaplı (20-24m.) tüneller açılmıştır. Almanya'da ki şehir içi tünellerinde ise 3–4 metrelik

bir örtü kalınlığında ve yumuşak zeminlerde (kohezyonsuz çakıl) 10 mm. oturma limitiyle tüneller açılmıştır (Taşlıca, 1993) .

3.3 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin Üstünlükleri ve Zayıflıkları

Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin özellikle kalkanlı köstebekle tünel açma yöntemi gibi günümüzde kullanılan diğer yöntemlere göre birçok üstünlükleri vardır:

- Yöntemin en önemli özelliği olan her tür zemin koşulunda uygulanabilir olmasıdır. Bu özelliğinden dolayı değişen ve önceden bilinmeyen zeminlerde açılan tünellerde veya kazı enkesitinin değiştiği tünellerde rahatlıkla uygulanabilir.

- Özellikle şehir içinde zayıf zeminlerde açılan geniş enkesitli tünellerde Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemiyle açılan tüneller daha ekonomiktir ve bu açılan tünellerde daha geniş bir kazı alanında çalışılabilir.

- Yüksek boşluk suyu basınçlarının yenilmesi gereken ortamlarda bile membranların kullanılmasıyla tüneller kuru ortamlarda açılabilir.

- Optimum tasarım yapıldığı için kullanılan tünel kaplamaları daha ekonomiktir.

- Sadece bir adet ana makineye bağlı olarak çalışılmaz.

- Kalkanlı Köstebekle açılan kazılara göre genellikle daha az yüzey oturması görülür (Leca, 1989).

Diğer taraftan yöntemin bazı zayıflıkları da mevcuttur.

- Özellikle Amerika gibi bazı ülkelerde tünel kontrat prosedürleri Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemine göre hazırlanmamıştır (Leca, 1989),

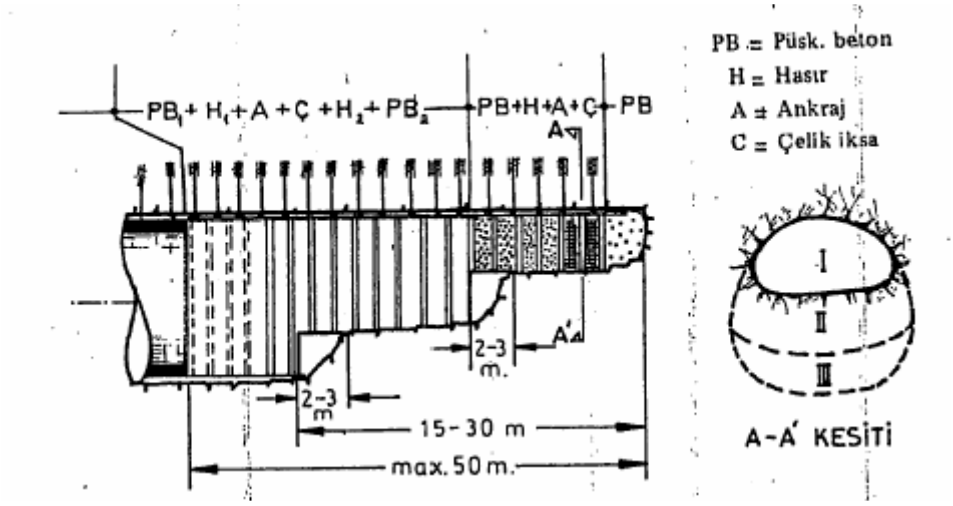
- Daha çok sayıda ve deneyimli personel ile çalışılması gereklidir.

3.4 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin Kazı Yöntemleri

Kazı ve destekleme sırasının belirlenmesi birçok parametreye bağlıdır. Tünel boyuttu ve geometrisi, kullanılacak destek elemanları ve karakteristikleri, zemin ve yeraltı suyu durumu, kazı malzemesinin taşınma şekli ve oturma limitleri kazı aşamalarını belirleyen etkenlerdir. Kazılar tam kesitte yapılabileceği gibi kaya stabilitesinin düşük olduğu zeminlerde kademeli olarak yapılabilir. Burada temel felsefe desteksiz

olarak kazılan bölge ne kadar küçük olursa bu bölgenin üstüne gelen yüklerinde o kadar küçük olacağı ve böylece deformasyonları ve yüzey oturmalarının da buna bağlı olarak az olacağıdır. Her kademenin ano uzunluğunun ve kazı kademeleri arasındaki aranın belirlenmesi gerekir. Kazıdan sonra kaplamanın zamanlaması da önemlidir. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemindeki zemin duraylılık süreleri Avusturya standartlarından ÖNORM B 2203/1994' de açıklanmıştır.

Kademeli kazılar kalot, stros ve radye olmak üzere 3 kademe de yapılabilir (Şekil 3.10).Yapım aşamaları genel olarak söyle sıralanabilir:



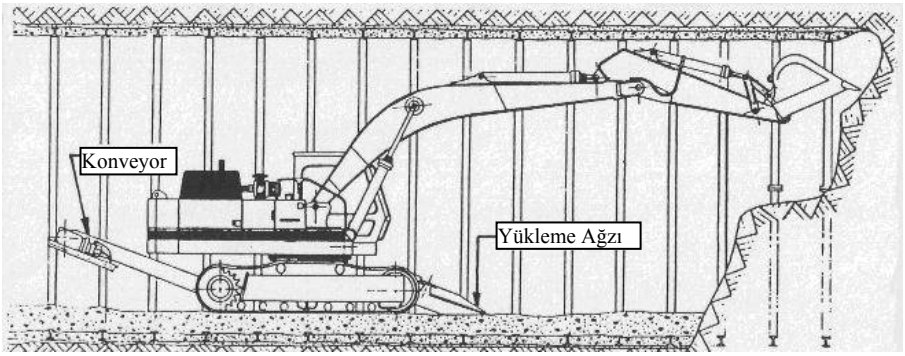
Şekil 3.10: 3 Kademeli Kazı ve sağlamlaştırma işlemleri (Vardar,1985)

- Gerekli ise kazılacak bölgenin zemin iyileştirilmesinin yapılması. Yatay jetgrout uygulaması, zemin enjeksiyonları, zemin dondurulması, süren uygulamaları, drenaj yapılması, zeminin donatılanması zemin iyileştirme yöntemleri arasında sayılabilir.

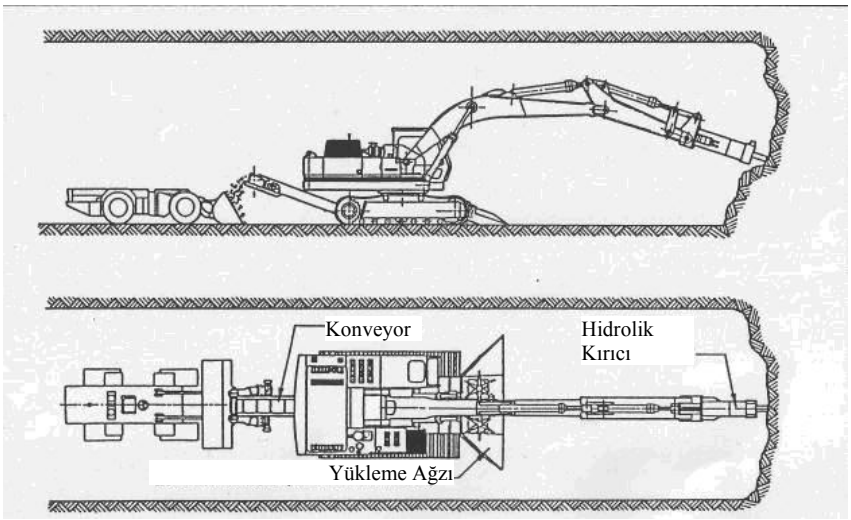
- Kalot kazısının yapılması. Kazı makinesinin seçimi birçok parametreye bağlı olmakla birlikte kullanılan kazı makinelerine roadheader (Şekil 3.11), ters kollu ekskavatör (Şekil 3.12), hidrolik kırıcı (Şekil 3.13), fresöz (Şekil 3.14) örnek olarak verilebilir.



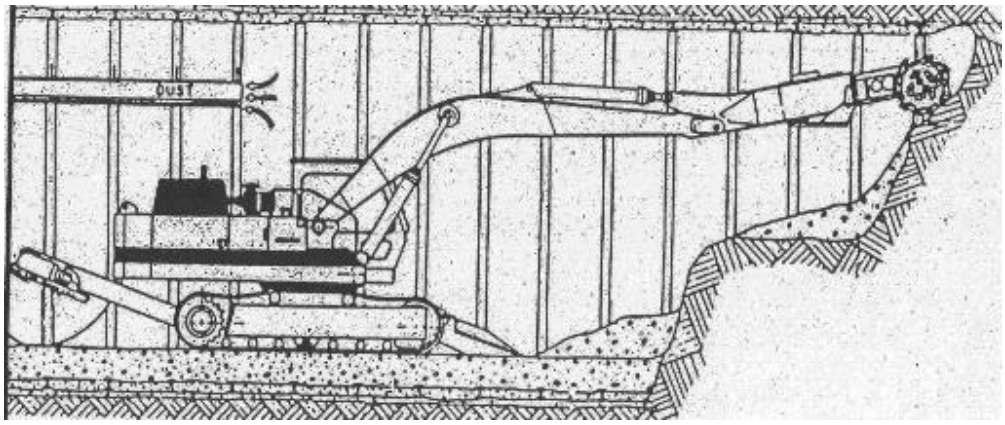
Şekil 3.11: Roadheader



Şekil 3.12: Ters Kollu Ekskavatör (Fulton ve diğ. 1995)



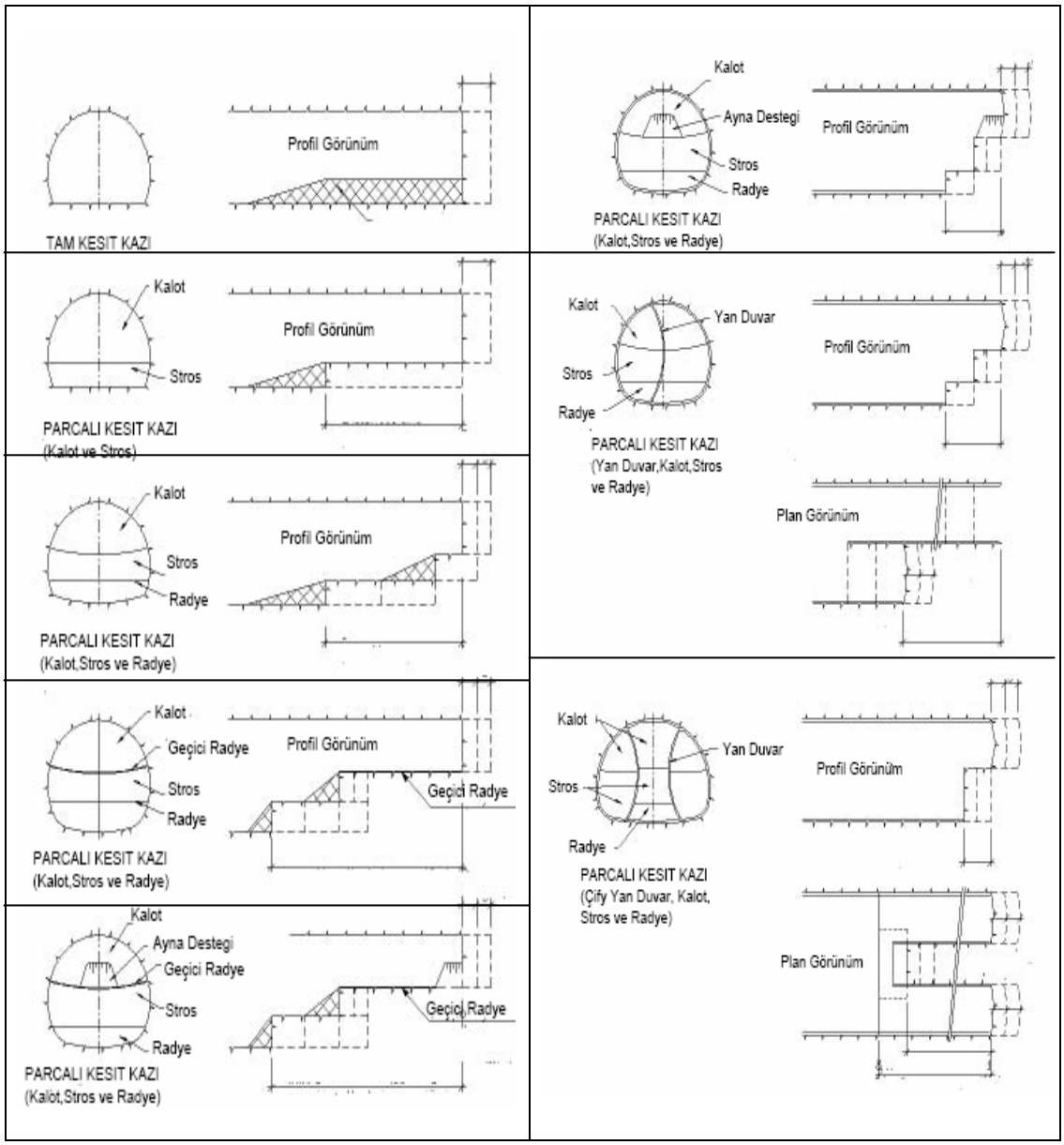
Şekil 3.13: Hidrolik Kırıcı (Fulton ve diğ. 1995).



Şekil 3.14: Fresöz (Fulton ve diğ. 1995)

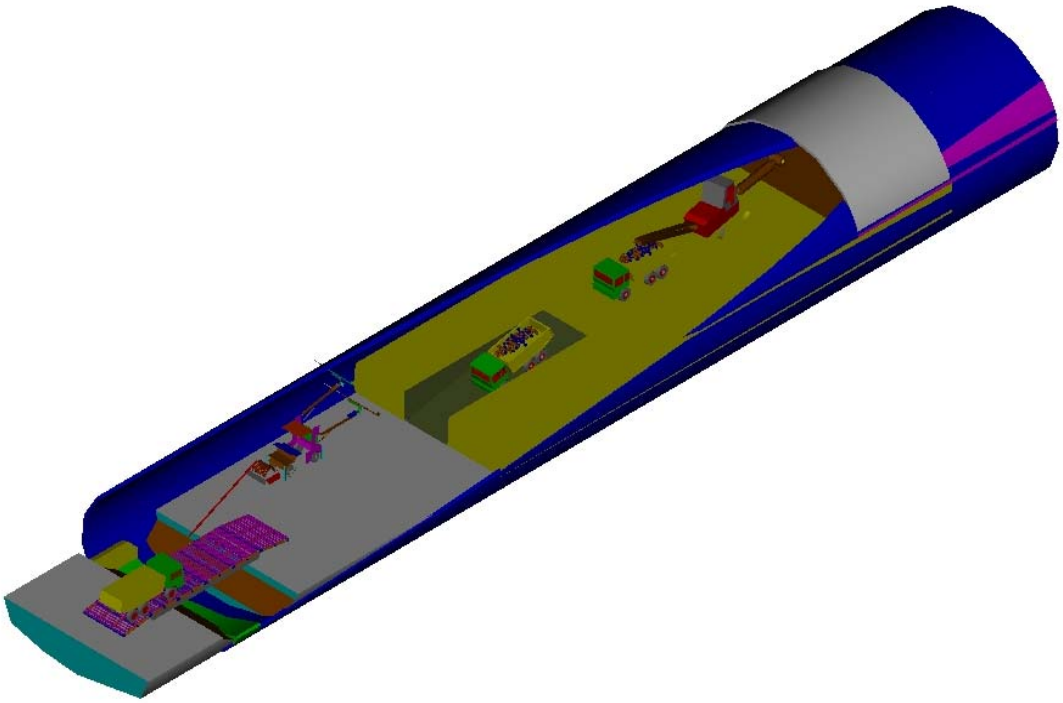
- Kalotun geçici tahkimatının yapılması. Geçici kaplama olarak Püskürtme Beton, hasır çelik, çelik iksa ve bulonlar kullanılmaktadır.
- Stros kazısının yapılması.
- Stros tahkimatını yapılması.
- Radye kazısının yapılması
- Radyenin gerekli ise geçici tahkimatının yapılması gerekli değilse radye betonunun dökülmesi.
- Kalıcı kaplamanın yapılması.

Üç kademeli kazı genel olarak anlatılmış olup kazı kademelerinin sayısı ve sırası çok değişik şekillerde olabilir. Stabilitesi çok iyi olan zeminlerde tam kesit kazı yapılırken, stabilitesi daha düşük olan zeminlerde katot ve stros kazısı olarak iki parçada yapılabilmektedir. Gerekli durumlarda yukarıda daha detaylı anlatıldığı gibi kazı kademeleri Kalot, stros ve radye olmak üzere 3-üç kademede yapılabileceği gibi kalot kazısından sonra taban geçici radye yapılabilir. Ayna stabilitesinin sağlanamadığı durumlarda kazı işlemleri tamamlandıktan sonra kalota stosa veya radyeye tekrar geçici dolgular yapılabilmektedir. Bazı durumlarda parçalı kazılar kalot, radye ve stros kazısı yerine tünelin sağ veya sol tarafından bir yaklaşım galerisi açılması şeklinde de yapılabilmektedir. Yeni Avusturya tünel İnşa Yönteminde kullanılan bu kazı yöntemlerini Şekil 3.15' te görülmektedir.



Şekil 3.15: Değişik kademeli kazı çeşitleri (Sauer,1990)

Parçalı kesitte yapılan kazılar aynı anda devam etmektedir. Kalotta kazı devam ederken arkadaki kısımlar için kalot iksa işlemleri, stros kazı ve iksa işlemleri ve radye kazısı betonu devam etmektedir. Burada kazılan malzemenin dışarıya nakli için geçici köprüler yapılabilmektedir. Böylece hızla kazılan malzeme dışarı çıkartılabilmektedir. Şekil 3.16 ve Şekil 3.17 da görüldüğü gibi tüm kazı ve iksa ve malzeme taşınması uygulamalarının aynı anda yapılması durumundan dolayı tünellerde çalışma alanının olabildiğince geniş olması gerekmektedir.



Şekil 3.16: Kademeli Kazı Yöntemi

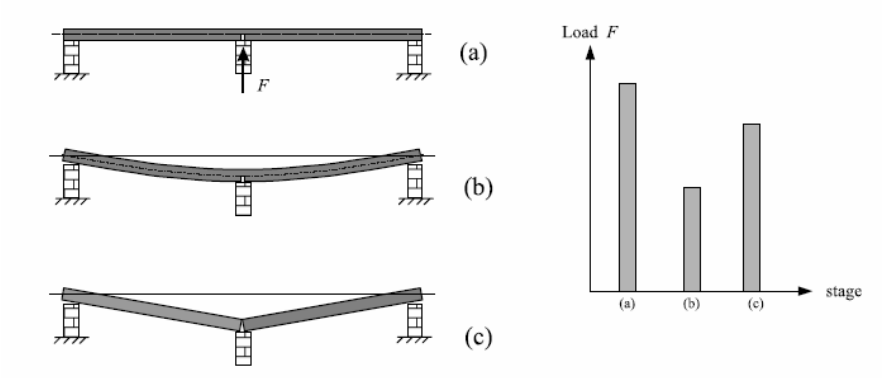


Şekil 3.17: Kademeli Kazı Örneği, Bouira Tüneli

3.5 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde Kullanılan Tünel Destek Sistemleri

Tünel açma sırasında zeminin açım öncesi ilk gerilme durumu değişerek yeni bir ikinci gerilme durumuna dönüşür. Tünelin etrafındaki bu ikincil gerilme durumu tünelin stabilitesini belirleyen ana etmendir (Vardar, 1985). Desteklemenin amacı kazılmış tünelin etrafında bir kemerlenme ile bir koruyucu zon oluşturarak zeminin ana taşıma elemanı olarak çalışmasını sağlamaktır. Destekleme sırasında

deformasyon kontrolü çok önemlidir. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemindeki destekleme prensibi Şekil 3.18 'da gösterilmiştir. Şekilde göçme sebebiyle yük artışı görülmektedir. Tünel sistemi etrafındaki zemin, püskürtme beton, ankraj, çelik iksa gibi destekleme elemanlarınlarından oluşan birleşik bir yapı şeklinde tasarlanmalıdır.



Şekil 3.18: Destekleme Prensibinin Açıklanması (Kolymbas, 2005)

Günümüz tünelciliğinde püskürtme beton, hasır çelik, kaya ankrajı, çelik iksa ana destekleme elemanlarıdır. Destek elemanlarının uygulanması zemin profiline, tünel enkesitinin büyüklüğüne ve birinci gerilme durumuna göre belirlenmektedir. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde tünel stabilitesi dış kaplama elemanlarıyla sağlanır. Daha sonra iç kaplamanın yapılmasıyla güvenlik sayısı büyür.

3.5.1 Püskürtme Beton

Püskürtme beton tünel etrafındaki zeminin gevşemesini önlemek veya kontrol etmek için kullanılır. Kaya çatlaklarının kaplayıp sıkıştırarak kırılmaları ve kaya düşmelerini önler. Püskürtme betonun zemin yüzeyine boşluksuz bir biçimde uygulanması ve yüzeyi tamamen kaplaması gerekmektedir. Bunu sağlamak için çelik hasır zemin yüzeyine çok yakın yerleştirilmeli, erken priz alması için uygun kimyasal hızlandırıcılar kullanılmalı ve uygun makine ile uygulanmalıdır. Püskürtme beton tek seferde değil tabakalar halinde yüzeye uygulanmalıdır.

Püskürtme beton çimento, agrega, su ve katkı maddelerinin karışımıdır. Dökme betondan en önemli farkı mukavemetini erken almasıdır. Aynı dökme beton gibi 28. güne kadar mukavemeti artar. Gerekli nemin sağlanması durumunda ise daha sonra da mukavemeti artar. 2 yılın sonunda mukavemeti %50 kadar daha artabilir. Erken priz alan püskürtme betonun mukavemet değerleri Tablo 3.1 de gösterilmektedir. Karışımdaki agrega büyüklüğü 16mm'yi geçmemelidir.

Tablo 3.1: Püskürtme beton dayanım değerleri (Kolymbas, 2005)

Zaman	Mukavemet (N/mm²)
6 dk.	0.20 - 0.50
1 sa.	0.50 - 1.00
24 sa.	8.00 - 20.00
7 gün	30.00 - 35.00

Püskürtme beton yüzeye yaş veya kuru şekilde olmak üzere iki şekilde uygulanabilir. Kuru karışımda kuru çimento ile agrega hava yoluyla karıştırıcıdan tabancaya iletilir ve burada suyla karıştırılarak yüzeye uygulanır. Yaş karışımda (Şekil 3.19) ise çimento, agrega ve su karıştırıcıda karıştırılarak hortuma iletilir ve tabancayla yüzeye uygulanır. Kuru karışımlarda daha uzun mesafeler daha kaliteli beton uygulanabilirken, ıslak karışımlarda uygulama sırasındaki toz daha az olmakta ve püskürtme sonucu sıçramadan oluşan kayıplar azalmaktadır. Gelişen beton teknojisi ile günümüzde çelik lif karışımlı püskürtme betonlar da uygulanmaya başlamıştır.



Şekil 3.19: Yaş karışım püskürtme beton uygulaması (Kolymbas, 2005)

3.5.2 Hasır Çelik

Püskürtme betonun statik ve konstruktif özelliklerini arttırmak için hasır çelik uygulamaları yapılmaktadır. Hasır çelik uygulamaları sayesinde:

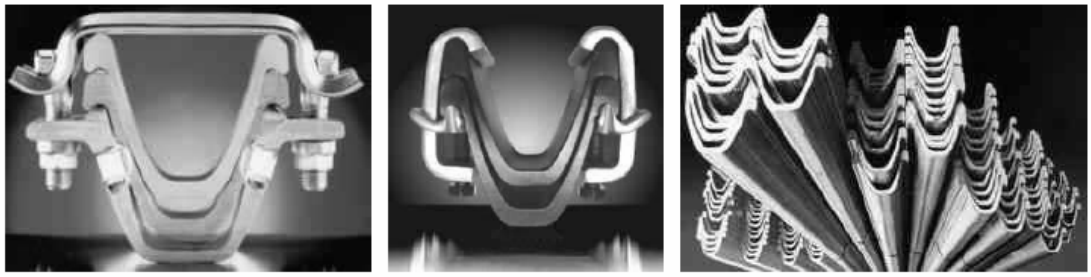
- Püskürtme beton tabakaları arasındaki aderans artmış olur.
- Püskürtme beton gerekli dayanıma ulaşıncaya kadar gerekli stabiliteyi ve dayanım sağlanmış olur

- Kesme kuvvetlerine karşı dayanım artmış olur.
- İnşaat derzleri arasındaki güçlendirme sağlanmış olur.
- Akma ve aşırı yüklenmeler sonucunda oluşan çatlaklar sınırlandırılmış olur. Olası çatlama sonucunda kopmalar önlenmiş olur.
- Boyuna doğrultuda güçlendirme yapılmış olur.

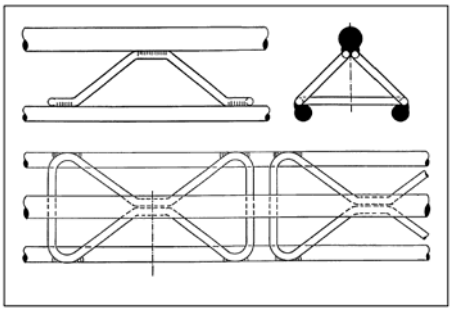
Hasır çelik uygulamaları genellikle yoğun işçilik gerektiren ve personelin küçük kaya düşmelerine maruz kalabileceği riskli uygulamalardır. Montaj kolaylığı olması ve sıçrama miktarının azaltılması için donatı açıklıkları 100 mm.' den küçük olmaz. Donatı çapı ise 10 mm.' den büyük olur.

3.5.3 Çelik Destek Sistemleri

19 yüzyılın sonunda tünelcilikte kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılma amaçları püskürme beton uygulanmadan veya dayanımına ulaşmadan önce tünel desteğini güçlendirmek ve tünele gelen yükleri dağıtmaktır. Bu sebepten dolayı genellikle püskürtme beton uygulamasından önce geçici iksa görevi yaparlar. Püskürtme beton tabakasının içinde kalırlar. Süren uygulaması yapılan durumlarda kullanılmaları zorunludur ve borulara destek görevi yaparlar. H profil, U profil (Şekil 3.20) veya kafes kiriş (Şekil 3.21) şeklinde olabilirler. Kafes kirişler profillere göre daha az yük taşımalarına rağmen daha hafiftirler ve daha kolay yerleştirilebilirler. Büyük deformasyonların beklendiği tünellerde kayan birleşim yapabilen U profiller seçilebilir.



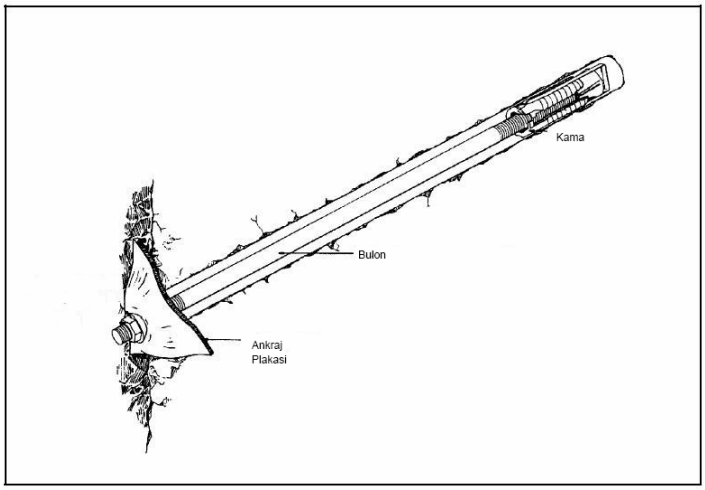
Şekil 3.20: U Profiller (Kolymbas, 2005)



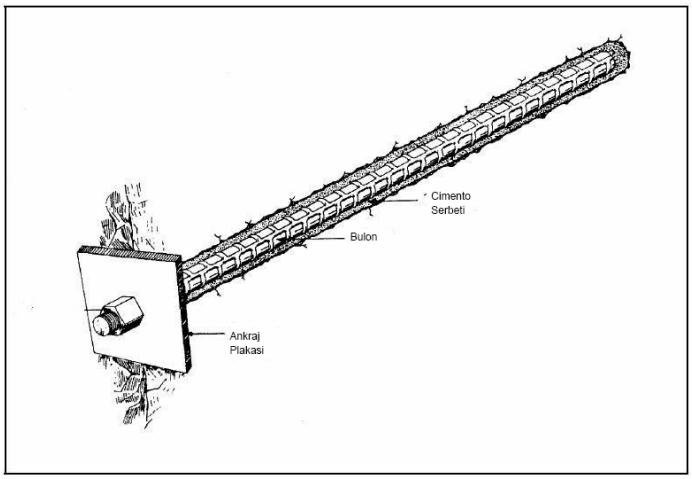
Şekil 3.21: Kafes kirişler (EM 1110-2-2901,1997)

3.5.4 Kaya Ankrajları

Kaya ankrajları kayayı çekme gerilmelerini taşıyabilecek şekilde sağlamlaştırmak, çekme gerilmelerini ana kayaya iletmek, süreksizliklerin sürtünme direncini arttırmak veya kayada 3-eksenli gerilme durumu oluşturmak için zeminin içine bağlanan çubuklardır. Ankrajlar bağlanma türlerine göre serbest hareketli uçdan bağlamalı ankrajlar ve tam yapışmalı enjeksiyon ankrajları olarak ikiye ayrılabilirler. (Vardar,1979). Ankrajlar yapım tekniğine göre de mekanik (Şekil 3.22) ve fiziksel-kimyasal etkili (Şekil 3.23) olmak üzere ikiye ayrılırlar (Önalp, 1983).



Şekil 3.22: Mekanik ankrajlar (EM 1110-2-2901,1997)

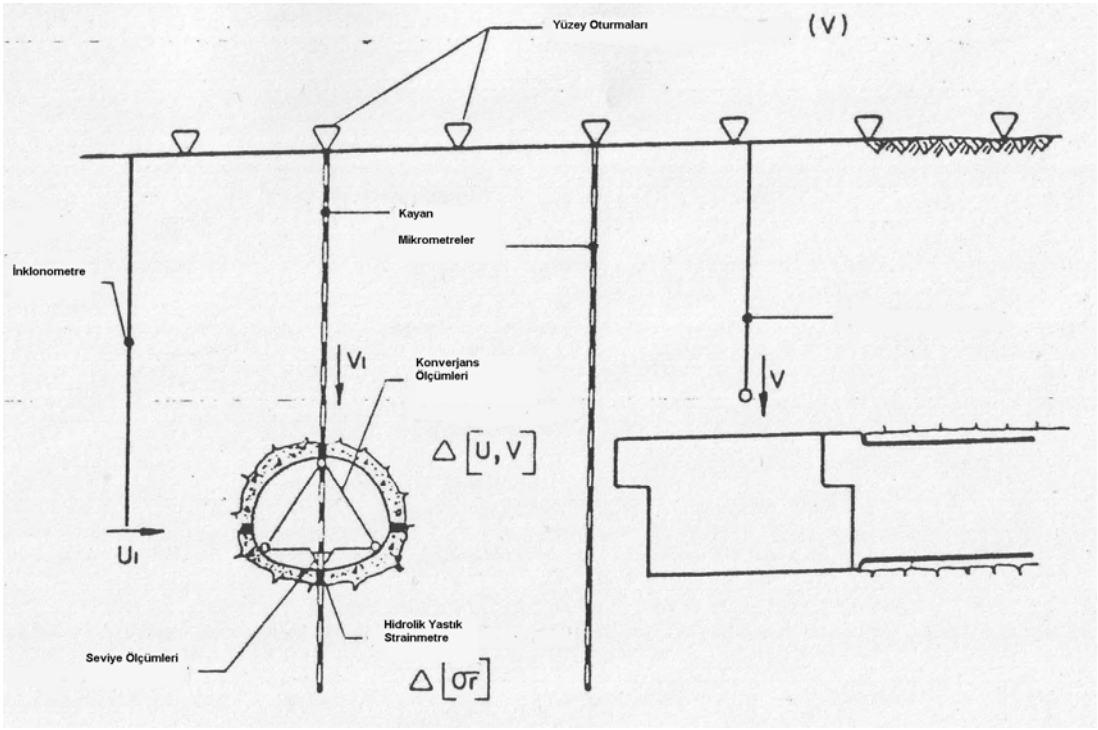


Şekil 3.23: Fiziksel Mekanik Ankraj (EM 1110-2-2901,1997)

Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde ankrajlar bir destek elemanı olarak sistematik bir şekilde kullanılırılar. Ankrajlar tünel yüzeyine dik ve şaşırtmalı olarak uygulanırlar. Ankrajların sayısı, uzunluğu, taşıma kapasitesi ve tasarımları zemin profiline, tünel enkesit alanının büyüklüğüne ve şekline, ano uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Püskürtme betonunun kaya bulonlarıyla birlikte kullanıldığı birçok zemin durumunda geçici kaplama olarak çok iyi performans gösterdiği görülmüştür.

3.6 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemleri

Deformasyon ve gerilme ölçümleri Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin ayrılmaz bir parçasıdır. Bu ölçümler sayesinde ön tasarımdan gelen destek boyutları kontrol edilir ve yeni boyutlandırmaya gerek olup olmadığına karar verilir. Böylece kabul edilebilir deformasyon limitleri ve diğer kriterlere uygun olan optimum destek sistemi boyutlandırabilir. Geoteknik zemin etüdündeki değerlerin doğruluğu da ölçümler sonucunda kontrol edilmektedir. Tavan ve radye seviyesinin düzenli ölçümünün yanı sıra, yan duvarlarında konverjans ölçümlerinin yapılması gerekmektedir. Düşey ve yatay ekstansometrelerle değişik zemin formasyonlarının deformasyonu kontrol edilirken tüm deformasyon karakteristiği de inklonometrelerle kontrol edilmelidir. Özellikle zayıf zeminlerde oturma ölçüleri de önemlidir. Püskürtme betonun içine yerleştirilen hidrolik yastıklar ve strainmetreler sayesinde kaplamada oluşan gerilme miktarları gözlenir. Tüm bu ölçme sistemleri Şekil 3.24' de gösterilmiştir.



Şekil 3.24: Tünel ölçme sistemleri (Heflin ve diğ, 1991)

3.7 Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde Tünel Kaplama Hesapları

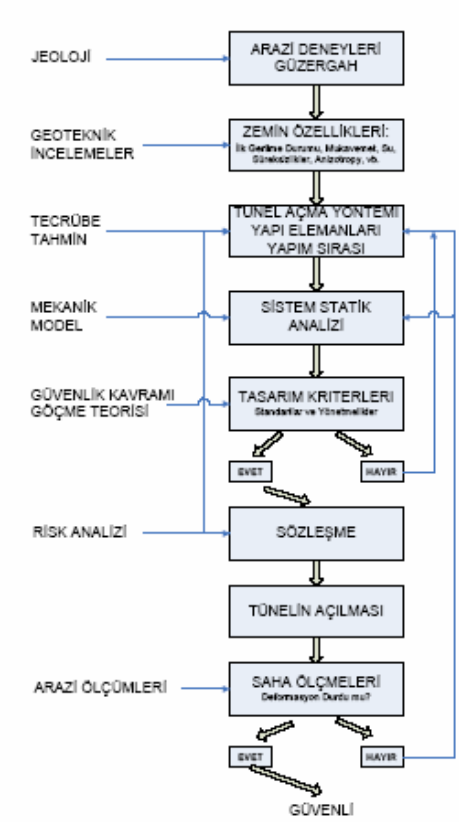
Tünel tasarımı yapılırken jeoloji, geoteknik mühendisliği, makine mühendisliği, tasarım mühendisliği, sözleşme takibi gibi birçok farklı disiplinin bir arada çalışması gerekmektedir. Bu disiplinlerin sayısı projenin özelliklerine göre çoğaltılabilir.

Tünel tasarımı aşağıda bulunan ana dokümanları içermelidir (Dudeck,1988).

- Jeolojik ve jeofiziksel incelemeleri içeren jeolojik rapor
- Hidrojeolojik rapor
- Arazi araştırmalarını içeren geoteknik rapor: Bu raporda arazı ve laboratuar deneylerinin sonuçlarının yorumlanması gerekmektedir.
- Güzergah, tünel enkesiti, drenaj vb tünel açımı sırasında etkilenmesi beklenen yapılar hakkında bilgiler.
- Kazı planları, açıklamaları veya tüm enkesitiler ve zemin durumları için kazı prosedürü
- Kazı metodu ve tünel destek sistemleriyle ilgili ayrıntılı tasarım dökümanları.

- Saha ölçümleriyle yapılacak olan gözlem programı.
- Gerilme ve deformasyon durumlarının analizleri.(kazı, birinci kaplama ve ikinci kaplama durumları için) ve tünel destek sistemlerinin boyutları.
- Drenaj veya su geçirimsizlik durumlarının tasarımı
- İç kaplamanın yapısal detayları.
- Kazı sırasında ve sonrasındaki arazi ölçümleri ve bu ölçümlerle tasarım değerlerinin yorumlanması.
- Kazı sırasında karşılaşılan sorunlar ve bunlar karşısında alınan önlemleri içeren rapor.

Tünel tasarımı yapılırken jeolojik kesitler incelenmeli ve zeminin özellikleri belirlenmelidir. Tünel enkesitleri belirlenirken kazı sırası ve seçilen makinenin özellikleri dikkate alınmalıdır. Kesinlikle kazı sonrasındaki sahadaki deformasyon ve gerilme ölçümlerinin izlenmesi gerekmektedir. Tünel tasarımı yapılırken uyulması gereken bu aşamalar Şekil 3.25 da gösterilmiştir.



Şekil 3.25: Tünel tasarım aşamaları (Duddeck,1988)

3.7.1 Tünel Tasarım Yöntemleri

Kaya ve zemin mekaniği problemleri ve tünel kaplamalarının tasarımı için 3 adet ana yöntem mevcuttur:

1. Ampirik Yöntemler
2. Analitik Yöntemler
3. Sayısal Yöntemler

Ampirik yöntemler daha önceki projelerden kazanılmış olan pratik deneyimlerin sonucunda çıkan değerlerin kullanılmasıyla ilişkilidir. Kaya sınıflandırmaları bu yöntemin belkemiğini oluşturmaktadır. Sınıflandırmaların sonucunda ortaya çıkan kaya indekslerine bağlı olarak destek tipleri ve duraylılık süreleri verilmektedir. Ampirik tasarım yöntemleri aşağıda belirtilmiştir.

1. Terzaghi'nin kaya sınıflandırmasına göre
2. Bienawski sistemine göre (RMR)
3. Barton sistemine göre(Q sistemi)
4. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi tasarımına göre

Zeminler homojen olmayan bazen plastik özellik gösteren bazen de elasto-plastik özellik gösteren yapıdadır. Kaya ankrajları, püskürtme beton gibi tünel elemanlarının da matematik modellemesi çok karmaşık ve birbirinden farklı yapıdadır. Bu karmaşıklık sonucunda bazı kabuller ve basitleştirmeler düşünülerek yapılan tasarım metotlarına analitik metotlar olarak adlandırılmaktadır.(Geoconsult,1994) Tünel hesaplarında kullanılan analitik yöntemler şunlardır.

1. Hoek ve Brown 'dan sonraki zemin destek etkileşim analizi yöntemi
2. Tünel kaplama analizi yöntemi
3. Feder'den sonraki analitik tasarım yöntemi

Karmaşık şekilli tünel açıklıklarının, tüneller ile şaftlar arasındaki kesişim bölgelerinin veya karmaşık zemin tabakalarının gerilme ve şekil değiştirme analizlerinin yapılması için bu şekillerin bölgelendirilmesi gerekmektedir. (Sinha,1989).Yukarda anlatılan yöntemlerde bölgelendirme işlemi kullanılmamaktadır. Bu işlem bir elemanı veya elemanlar arasındaki etkileşimi

tanımlamak için çok sayıda denklem takımına gerek duymaktadır. Sonuç olarak bu denklemleri çözmek için bilgisayarlar kullanılmaktadır. Bölgelendirilmiş problemlerin bilgisayar yardımıyla çözülmesini esasa alan yöntemler sayısal yöntemlerdir. Tünel tasarımında kullanılan sayısal yöntemler Tablo 3.2 gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Sayısal yöntemler (Gnilsen,1989)

Model	Yöntem
1-Süreklilik Modeli	1.1 Sonlu elemanlar yöntemi
	1.2 Sonlu farklar yöntemi
	1.3 Sınır elemanlar yöntemi
2-Süreksizlik Modeli	2.1 Ayrık elemanlar yöntemi
3-Yatak Katsayısı Modeli	3.1 Elastik mesnetli kiriş elemanlar yöntemi
	4 Hibrit yöntemler

3.7.2 Yeni Avusturya Yönteminde Tünel Tasarımı

Tünel tasarımının amacı olan tünelin planlanan süre boyunca görevini yapabilmesi, yapılan analizin ekonomik ve güvenli olmasıyla başarılabilir. Tünel tasarımdaki aşamalar Şekil 3.25' da açıklanmıştır. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi ampirik bir yöntem olduğu gibi aynı zamanda bir gözlem yöntemidir. Bundan dolayı yöntem sahada olan gerilme ve deformasyonların bilgilerinin izlenip yorumlanmasını da içerir. Önce ÖNORM 2203/1994 'e göre zemin sınıflandırılır ve güzergah boyunca kaya sınıflarının yüzde oranları belirlenir. Bir sonraki aşamada daha çok önceki tecrübelerle tüm zemin sınıfları için kaplama elemanlarının tasarımı ve inşa sıraları belirlenir. Bu aşamada nümerik veya analitik yöntemler kullanılabilir. Tüm zemin sınıfları için detaylı açıklamalar ihale dökümanları için sağlanır. Ölçme programı yapılarak ölçme tipi, sayısı, tipik kesitler belirlenir, gözlem ve veri analiz işlemleri belirlenir. Kazı sırasında aynada karşılaşılan zemin ile sözleşme dökümanlarında verilen zeminlerin özellikleri yeraltı suyu durumu ve desteklerin performanslarına bakılarak karşılaştırılır. Eğer gerekli ise destek ve inşa sırası tekrar düzenlenir.

3.7.2.1 Fener-Pacher konverjans eğrisinin yardımıyla boyutlandırma.

Bu yöntemde esas prensip, tünel boşluğunda iksa imalatına başlanıncaya kadar meydana gelen deformasyonu ve iksa rijitleştiği zaman doğacak basıncı önceden belirlemeye dayanır (İncecik, 1986).

Yöntem tünele gelen basınçların Fener-Talobre-Kastner denklemiyle ifade edilebileceğini kabul eder. P_i yüzey dayanımı, σ_0 ilkel gerilme durumu, φ kayma mukavemeti açısı, R koruyucu zon yarıçapı, r boşluk yarıçapı, c kohezyon olmak üzere

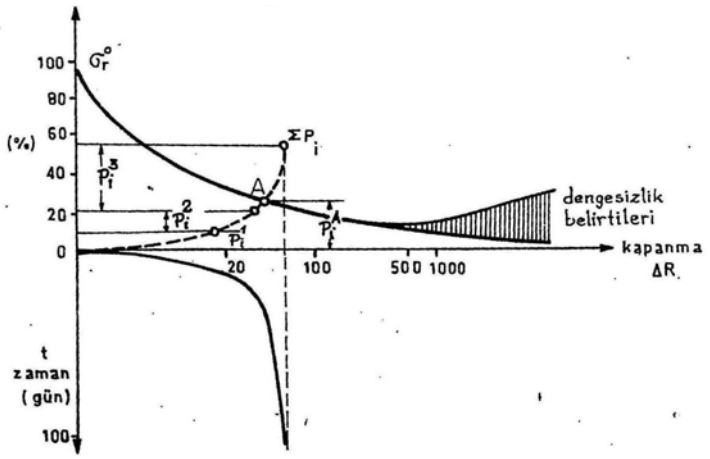
$$P_i = -c.\cot\phi + \left[c.\cot\phi + \sigma_0(1-\sin\phi)\right]\left(\frac{R}{a}\right)^{\frac{2\sin\phi}{1-\sin\phi}} \qquad (3.1)$$

Bu basınç iksa destek elemanları olan püskürtme beton, ankraj ve çelik iksalar tarafından karşılanacaktır.

Kazı sonucu oluşan plastik dengede tünel yüzünde $\Delta r = 0$ durumu için radyal gerilme (σ_r^0)

$$\sigma_r^0 = \frac{2\sigma_0 - (\frac{2c}{\tan(45-\phi/2)})}{\tan(45-\phi/2)+1} \qquad (3.2)$$

olacaktır. Yukarıdaki basıncı karşılamak için zeminin kemerlenerek eşdeğer P_i^a direncini sağlaması gerekmektedir. P_i^a aynı zamanda dış kaplamanın gerekli taşıma kapasitesidir.



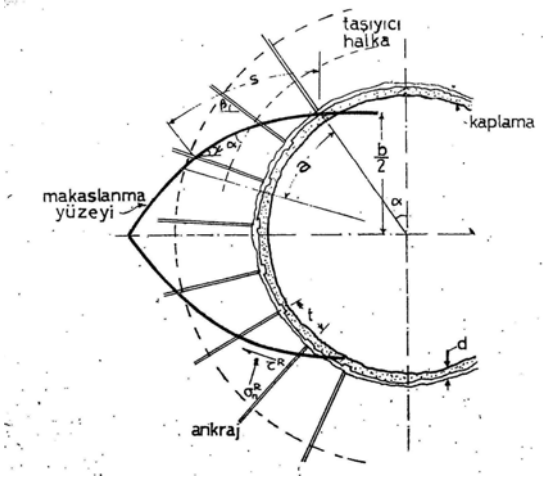
Şekil 3.26: Fenner-Pacher Konverjans Eğrisi (Önalp,1983)

Şekil 3.26' de desteklemenin sıfır yerine 2 cm den büyük deformasyonla yapılması durumunda σ_r^0 yerine çok küçük bir gerilme olacağı görülmektedir (Önalp,1983). Bu durumda P_i^1 basıncını sağlayacak püskürtme beton, olabilecek en büyük açıklıkta çelik iksa veya da bunların ikisinin birleşimi ile destek reaksiyon eğrisi oluşturulacak, daha sonra ankraj kuvvetleri sisteme eklenecek (P_i^2) ve bu sürede kapanma devam edecektir (P_i^3). Püskürtme betonun 2. ve 3 tabaka uygularında eğrinin yataylaşmasıyla stabilite sağlanmış olacaktır. Burada güvenlik sayısı (F):

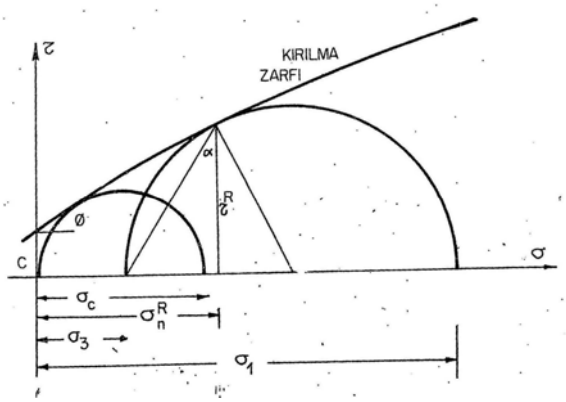
$$F = \frac{\sum P_i}{\sum P_i^a} \tag{3.3}$$

olarak gösterilir. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemindeki ana amaç Şekil 3.26'de eğrilerin kesişimi olan A noktasını olabildiğince sağa çekebilmektir fakat A plastik bölge başlangıç noktasının solunda kalması gerekmektedir (Önalp,1983).

Desteklenmiş kesimdeki durum Şekil 3.27' de gösterilmektedir. Şekil 3.28 da ise taşıyıcı halkadaki mohr daireleri görülmemektedir. Burada τ^R kayma direnci ve α kayma açısıdır.



Şekil 3.27: Koruma zonunun dengeye katkısı -1 (Önalp,1983)



Şekil 3.28: Taşıyıcı Halkanın dengeye katkısını Mohr Dairesinde gösterimi (Önalp,1983)

Burada t püskürtme beton kalınlığı ve $\tau_b - \tau_s$ beton ve çelik iksanın makaslama dirençleri, b tünel makaslama bölgesinin yüksekliği olmak üzere

Püskürtme beton veya beton malzeme dayanımı:

$$P_i^b = \frac{t.\tau_b}{\sin\alpha.0.5b} \tag{3.4}$$

Çelik iksa dayanımı:

$$P_i^s = \frac{A_s.\tau_s}{\sin\alpha.0.5b} \tag{3.5}$$

Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi bu eşitlikler sonucunda

$$\tau_s = 15\tau_b \tag{3.6}$$

bağlantısını önermektedir.

A_s ankraj kesit alanı ve σ_t^s çeliğin orantılık limiti olmak üzere ankrajların kaplama dayanımını:

$$P_i^A = \frac{P}{2} = \frac{A_s.\sigma_t^s}{a^2} \tag{3.7}$$

dir. Toplam kaplama dayanımı:

$$\sigma_3 = P_i^b + P_i^s + P_i^a \tag{3.8}$$

dir. Kaya kemerin taşıma kapasitesi yazılırsa:

$$P_i^R = \frac{l.s.\cos\phi}{b/2} = \frac{l\sin\phi}{b/2} \tag{3.9}$$

ve buna ankrajların dayanımında

$$P_i^a = \frac{e.A_s.\sigma_t^s.\cos\beta}{a^2.b/2} \tag{3.10}$$

olarak eklenir. Burada l makaslama bölgesinin uzunluğu, s kayanın makaslama direnci, ϕ kayma mukavemeti açısıdır. Buna göre dış kaplamanın toplam taşıma kapasitesi

$$P_i = P_i^b + P_i^S + P_i^A + P_i^R \tag{3.11}$$

dir.

Bu yöntem Yeni Avusturya Tünel İnşa yöntemine uygun olmakla birlikte yukarıda da anlatıldığı gibi dağın deformasyon eğrisinin, iksanın rijitleşme eğrisinin ve tünel boşluğunda destekleme işlemi başlayıncaya kadar meydana gelecek deformasyonun bilinmesi gerekmektedir.

Bu hesap yöntemiyle yapılan yapıların dairesel kesitli olması, yeterli derinliğe sahip olması, iksalarının bütün kesit çevresi boyunca üniform olması ve ortamında süreksizlik veya anizotropinin olmaması gerekmektedir (İncecik,1983).

3.7.2.2 Sonlu elemanlar yöntemiyle boyutlandırma

Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi geliştirilmesinden sonra yöntemle açılan yeraltı yapılarındaki karmaşık aşamalarını açıklamak ve çözümlemek için bilgisayar modelleri araştırılmıştır. Birçok analitik yöntem uygulanmış fakat bu yöntemlerden hiçbirisi yeraltı yapısının kazısını etkileyen aşağıdaki faktörleri tam olarak modelleyememiştir.

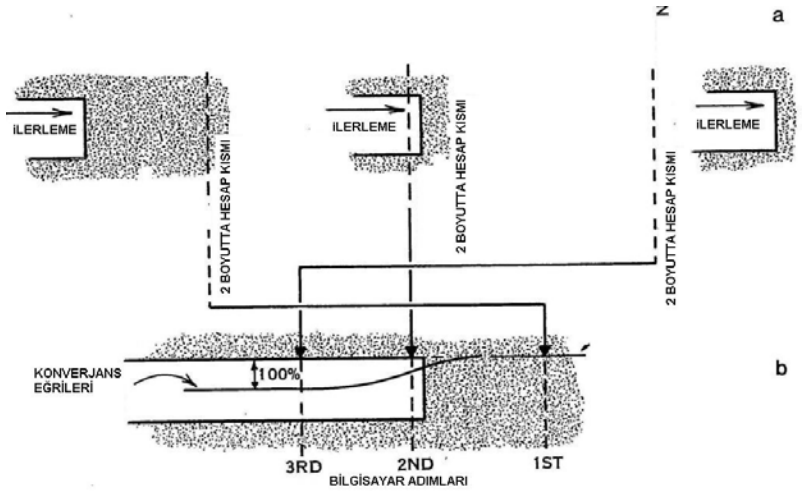
- İlkel gerilme durumu
- Kazı sonrası gerilme dağılımı
- Kontrollü deformasyonun etkileri
- İksa yerleştirilmesinin zamana bağlı yapılmasının etkileri.
- Kaya ve zemin özelliklerinin açıklanması
- Göçme durumu, göçmeden sonraki durumun özelliklerinin açıklanması

- Akma durumun açıklanması
- Püskürtme betonun malzeme özelliklerinin etkileri

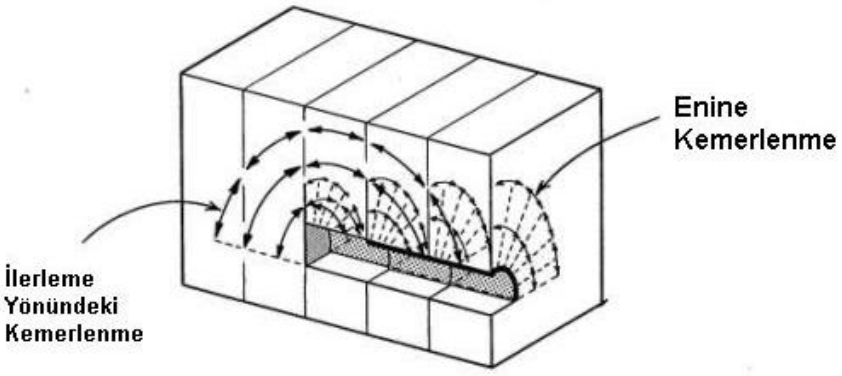
Analitik yöntemlerin kapsamadığı yukarıdaki faktörlerin sayısı daha da arttırılabilir. Yukarıdaki faktörler sadece sayısal yöntemlerin kullanmış olduğu bölgelendirme sayesinde sonlu elemanlar yöntemiyle rahatlıkla modellenebilmektedir.

Günümüzde yeraltı yapılarının tasarımında sonlu elemanlar yöntemi analitik yöntemlere göre daha yaygındır. Gerilme ve şekli değiştirme dağılımlarının hesaplanması, tünel açımı sırasında yakındaki yeraltı ve yerüstü yapılarındaki oluşacak olan etkiler ve tünel iksalarında oluşan mesnet tepkilerini bulmak için sonlu elemanlar yöntemiyle analizler kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde değişik zeminlerin olduğu, yeraltı su seviyesinin değiştiği, sürşarj yüklerinin değiştiği durumların analizleri de yapılabilmektedir.

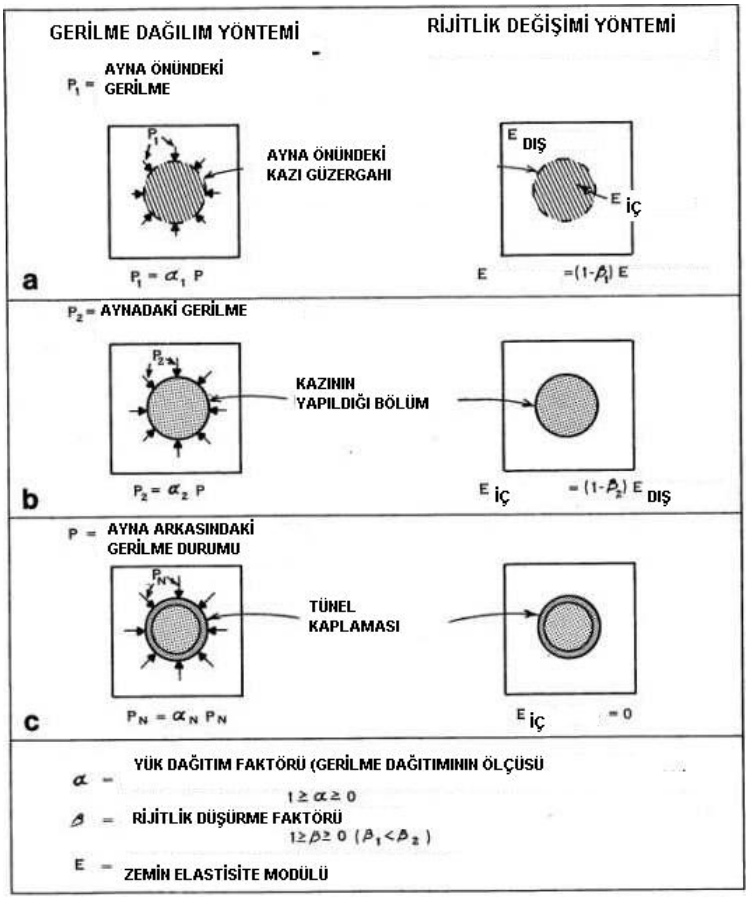
Genellikle iki boyutlu analizlerde düzlem birim şekil değiştirme kabulü zemin iksa etkileşimi ve kazı aşamalarını modellemede yeterli olabilmektedir. Değişik kazı aşamalarındaki gerçek 3 boyutlu gerilme durumu seri olarak iki boyutlu durumlar girilmesi şeklinde modellenmektedir (Şekil 3.29). 2 boyutlu analizlerde tünel ilerleme yönündeki kemerlenmeler gösterilemediği için (Şekil 3.30) bu durum genellikle bir azaltma katsayısıyla sistemde modellenir. Bu katsayı genellikle deneyimlerden faydalanılarak seçilir. Şekil 3.31 de 2 boyutlu sitemlerdeki gerilme dağılımları yöntemi ve rijitlik değişim yöntemleri özetlenmektedir. Tünellerin kesişme durumu veya çok detaylı ayna stabilite analizlerinin istendiği durumlarda üç boyutlu modellemenin yapılması daha faydalıdır.



Şekil 3.29: 3 Boyutlu tünel ilerlemesinin 2 Boyutlu analizi (a) tünel aynasındaki gerçek durum (b) artan gerilme dağılımı ile yapılan hesap kabulü (Gnilsen,1983)



Şekil 3.30: Tünel Aynasının 3 Boyutlu Durumu (Gnilsen,1983)



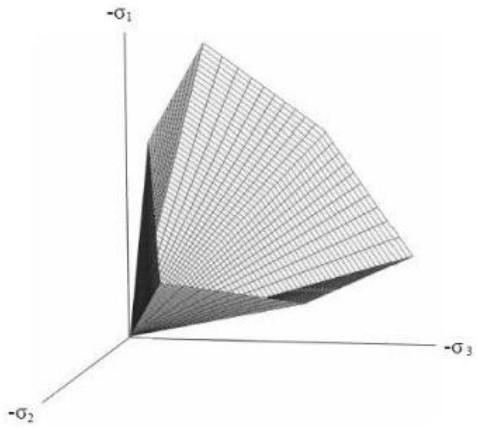
Şekil 3.31: Gerilme Dağıtımı ve Rijitlik değişimi yöntemleri özeti (Gnilsen,1983)

Zemin modellerinde ve iksa ile etkileşiminde süreklilik modelleri kullanmak uygundur. Bu sürekli modeller küçük parçalara bölünür ve düğüm noktalarıyla birbirlerine bağlanır. Her elemanın yer değiştirmesi elemanların düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin interpolasyonuyla olmaktadır. Sınırlardaki elemanlarında yer değiştirmeleri aynı şekilde olmaktadır. Bundan dolayı yöntemde yerel koordinat

sistemleri kullanılmaktadır. Genellikle zemin ve kaya formasyonları Mohr-Coulomb malzeme modeline göre modellenir. Mohr Coulomb akma fonksiyonu

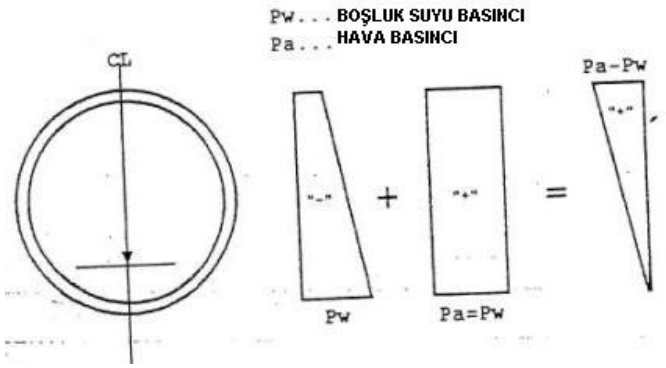
$$s_1 - s_3 = 2.c.\cos(f) + (s_1 + s_3)\sin(f) \tag{3.12}$$

şeklinde tanımlanmış olup c kohezyon ϕ kayma mukavemeti açısını göstermektedir. Gerilme alanındaki akma yüzeyleriyle oluşmuş akma kriteri Şekil 3.32 de gösterilmiştir. Akma düzlemlerinin içindeki gerilme durumları elastik durumdadır. Bazı projelerde su girişini engellemek için kullanılan basınçlı hava yöntemleri kullanılmaktadır. Boşluk suyu basıncı Şekil 3.33'te görüldüğü gibi derinlikle birlikte lineer olarak artarken, hava basıncı sabit kalmaktadır.



Şekil 3.32: Mohr Coulomb Akma Yüzeyleri (Brinkgreve ve Broere, 2004)

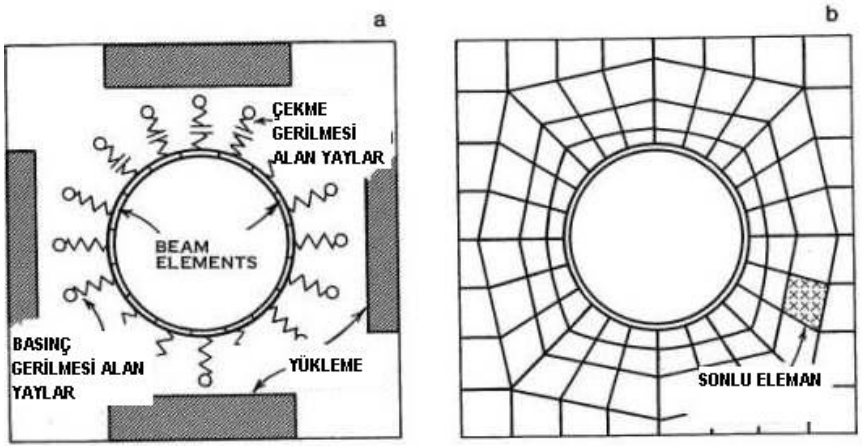
Sonlu elemanlarla yapılan analizler Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemine uygundur. Tünelin geometrik ve geomekanik şartlara iyi uyum sağladığını anlamak için yerinde yapılan ölçümlerle hesaplarda düzeltmeler yapılmalıdır (İncecik,1986).



Şekil 3.33: Boşluk suyu basıncı ve hava basıncı (Geoconsult,1994)

3.7.2.3 Elastik Mesnetli Kiriş Elemanlar Yöntemiyle Boyutlandırma

Bu yöntemde tünel kaplaması bir bütün halinde kiriş olarak modellenirken etrafındaki zemin yay olarak modellenmektedir. Bu modelleme Şekil 3.34'te görülmektedir. Yayların kaplamaya dik olanları normal gerilmeleri, teğet olanları ise kayma gerilmelerini modellemektedir (Gnilsen,1989). Birçok yapı programı bu yöntemi kullanmaktadır ve bu yöntemle hızlı ve basit hesap yapılabilmektedir. Zeminler yayların yatak katsayısı ile modellenmektedirler. Zemine uygun yatak katsayısının verilmesi gerçekten zordur ve zeminde anizotropi veya homojen olmayan zemin durumları hesaplarda göz önüne alınmamıştır. Bu yöntemin ön projelendirmede kullanılması daha uygundur.



Şekil 3.34: Tünel tasarımındaki modeller (a) Elastik mesnetli kiriş eleman yöntemi (b) Sonlu elemanlar yöntemi (Gnilsen, 1983)

4 CEZAYİR BOUIRA' DA BULUNAN BOUIRA KARAYOLU TÜNELİ UYGULAMASI

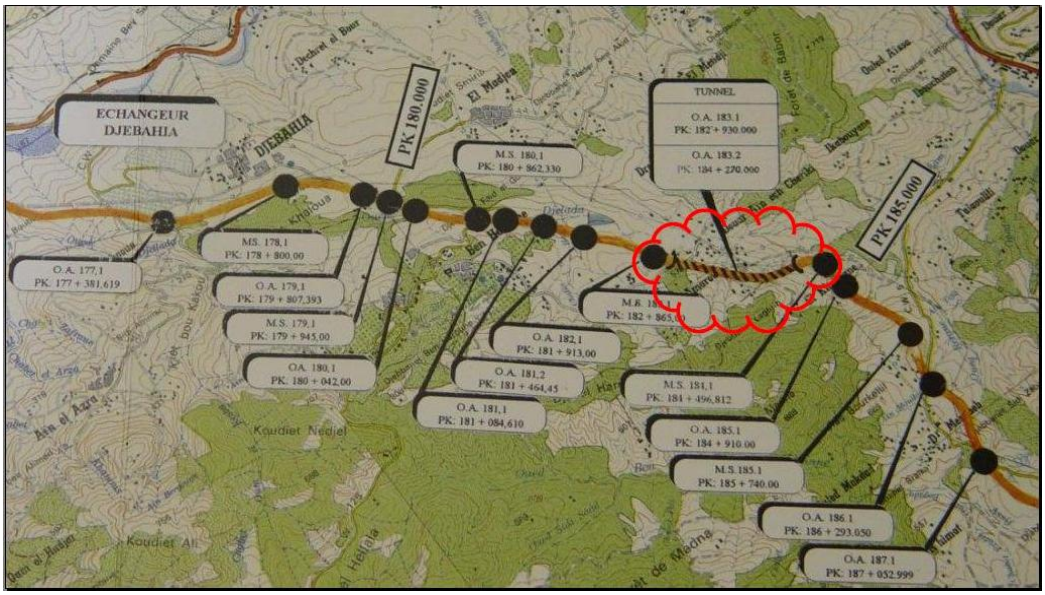
Kuzey Afrika ülkelerinden olan Cezayir'de son yıllarda birçok inşaat projeleri yapılmaktadır. Ülkenin doğusu ile batısını birleştiren ve kıyı şeridine paralel olarak ilerleyen Şekil 4.1'de görülen Doğu Batı Otoyolu Projesi de bu projelerin en önemlilerindendir. Bu bölümde bu proje bulunan bulunan ve bu çalışma kapsamında datalarının kullanıldığı Bouira Tünel Projesi açıklanacaktır.



Şekil 4.1: Cezayir Doğu Batı Otoyolu

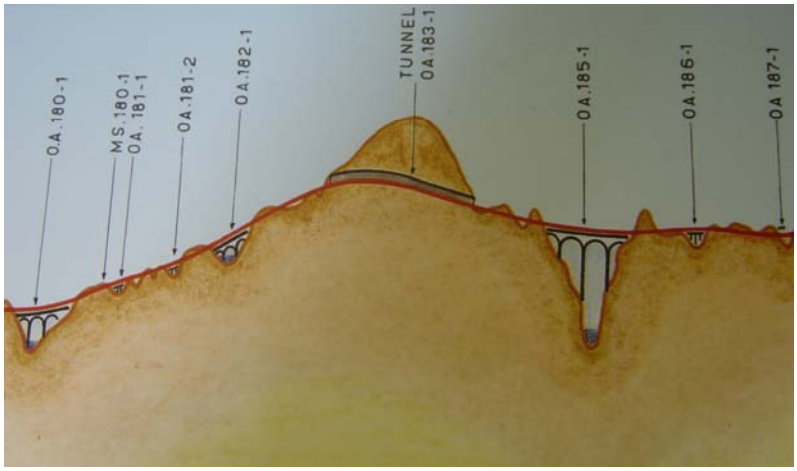
4.1 Projenin Tanımı

Cezayir doğu-batı otoyolu kapsamın birçok kısmın inşaatı devam etmektedir. KM155+650 ile KM188+345 arasında bulunan Lakhdaria –Liason RN5 kısmı 33 km uzunluğundadır ve başkent Alger ile Constantine şehirlerini birleştirmesi planlanmaktadır. Bu kısımda bulunan Bouira tüneli Şekil 4.2'de görüldüğü üzere KM182+985 KM184+230 arasında yer almaktadır. Tünel Alger'in 75 km güney doğusunda, Bouira şehrinin 10 km kuzeybatısında bulunmaktadır. Tünel Cezayir'in kuzeyinde Djebahia kasabasının yakınlarında bulunmaktadır.

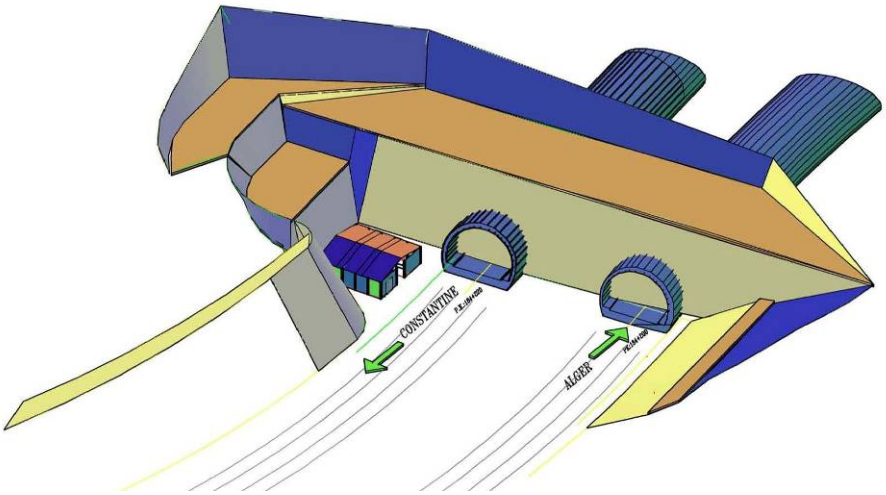


Şekil 4.2: Lakhdari Liason RN5 kısmı plan görünümü

T1 ve T2 olmak üzere 2 tüpten oluşan karayolu tünelinin her bir tüpü 3 şerit karayolu ve her iki tarafta bulunan yaya yollarından oluşmaktadır. Aksları arasında 34.5 m. olan tünellerin kazı kesit alanları 152 m² ile 185 m² arasında değişmektedir. T1 (güney tüp) tüneli 1245 m. T2 (kuzey tüp) tüneli ise 1183 m. uzunluğunda olup büyük bir kısmı kuzeybatı güneydoğu doğrultusunda düz olarak ilerlemekte doğu portaline yaklaşırken doğuya kurp yapmaktadır. Tünel örtüsü 8 m ile 68 m arasında değişmektedir (Şekil 4.3). Batı portalleri (Şekil 4.4) T1 tüneli için KM 182+985 ve T2 tüneli için KM 183+025 de bulunmaktadır. Doğu portalleri ise T1 tüneli için KM 184+220 ve T2 tüneli için KM 184+210'da bulunmaktadır. Batı portali yaklaşık olarak 564 m. rakımlı iken doğu portali rakımı 553 m'dir.



Şekil 4.3: Bouira Tüneli'nin genel profil görünümü



Şekil 4.4: Bouira Tüneli Doğu Portali

4.2 Bölgenin Jeolojik Yapısı

Tünel güzergahında önceden yapılmış olan ve kapsamlı zemin incelemeleri sonucunda hazırlanmış olan zemin etüt raporları detaylı şekilde incelenmiştir. Tünel açımı sırasında karşılaşılan genel zemin litolojisi açıktan koyuya kadar gri ve zayıf veya çok zayıf, ince daneli, kalkerli, içinde sağlam killi kireç taşı tabakaları olan çamurtaşı olarak değerlendirilebilir.

Genel olarak kaya kütlesi çatlaklı, foliasyonlu(yapraklı), sistematik faylıdır. Bazı bölümlerde fay zonları arası 10–20 m olup, bu faylarda 10–20 cm kil dolguları vardır. Diğer sistematik süreksizlikler ise sıkı boşluklu ve fay zonları etrafında kaygan yüzlüdür. Lokal su sızıntı hızı 0.1-0.2 lt/sn'dir. Tünelin zemin etütleri Geoconsult firması tarafından yapılmıştır. Bu etüde göre güzergahta 9 ana kaya (kaya kütle sınıfı RMT) türü mevcuttur. Ayrışma derecelerine göre W1 den W6 ya kadar değişmekte olan yani hiç ayrışma belirtisi olmayan (taze) kaya ile tüm kayaçın zemine dönüşmüş olduğu (artık toprak) duruma kadar değişen bu sınıflarının özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Bu güzergahta serbest basınç dayanımı (UCS) 50 Mpa'dan 0.025 Mpa'a kadar değişen yani çok güçlü kayadan yumuşak kile kadar değişen kaya sınıfları mevcuttur. Burada m_i (bozulmamış malzeme sabiti) ve GSI (Jeotektik Dayanım İndeksi) değerleri tüm kaya kütle sınıfları için verilmiştir. Bu değerler sayesinde statik hesaplar için gerekli olacak bazı kaya parametreleri hesaplanmıştır. Hoek (1998) tarafından tanımlanan Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) Rocklab isimli bilgisayar programının yardımıyla tayin edilmiştir.

Bilindiği gibi Hoek ve Brown laboratuardan elde edilen değerlere ek olarak kaya kütle karakteristiğini de eşitliklerine yansıtarak kaya maddesinde daha çok kaya kütlesini tanımlayan bir yenilme ölçütü geliştirmişlerdir(Özkan ve Erdem, 2002).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma 3 + s\sigma_c^2} \tag{4.1}$$

Burada σ_1, σ_3 en büyük ve en küçük asal gerilmeler σ_c tek eksenli basınç dayanımı, m ve s ise kaya kütle karakteristiği sabitleridir. Hoek tarafından bu eşitlik 1995 yılında genelleştirilerek aşağıdaki hali almıştır.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a \tag{4.2}$$

Burada σ_1' ve σ_3' en büyük ve en küçük asal gerilmeler, σ_c tek eksenli basınç dayanımı ve m_b, s, a jeolojik dayanım indeksi (GSI) a bağlı kaya kütle karakteristik sabitleridir.

GSI> 25 ve örselenmemiş zemin veya kaya kütleleri için

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28} \right) \tag{4.3}$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9} \right) \tag{4.4}$$

$$A=0.5 \tag{4.5}$$

GSI<25 ve örselenmemiş zemin veya kaya için

$$s=0 \tag{4.6}$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \tag{4.7}$$

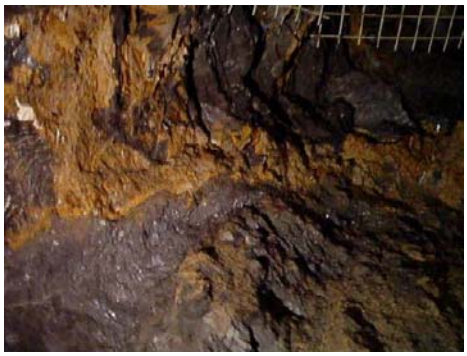
olarak alınır. Genelleştirilmiş Hoek-Brown yaklaşımında makaslama gerilmesi (τ) ile normal gerilme σ arasındaki aşağıdaki bağıntı önerilmiştir.

$$\tau = \sigma_c \alpha \left[\frac{\sigma}{\sigma_c} \right]^{\beta} \tag{4.8}$$

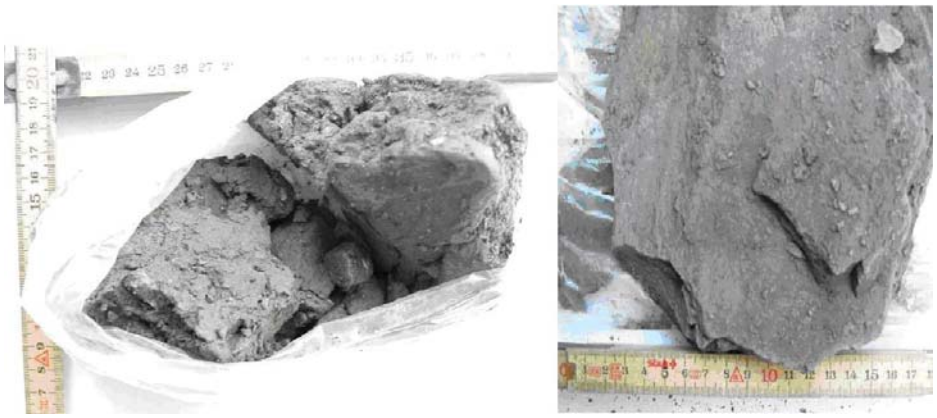
Burada α ve β en yüksek ve en düşük asal gerilme değerlerine bağlı büyüklüklerdir.

Yukarıda özetlenen özellikle (4.1) ve (4.8) numaralı eşitlikler tasarım yapan mühendisler tarafından sıkça kullanılmaktadır(Özkan ve Erdem, 2002).

Sonuç olarak Serbest basınç dayanımı (UCS), GSI ve m_i yardımıyla Hoek Brown yenilme kriteri hesaplanmış ve Rocklab programını kullanarak Mohr Coulomb göçme zarfına uyan kohezyon ve kayma mukavemeti açısı bulunmuştur. Tünel açılması sırasında karşılaşılan bazı kaya örnekleri Şekil 4.5, Şekil 4.6' da gösterilmiştir.



Şekil 4.5: Tünelde karşılaşılan fay zonu (Pischinger, 2003)



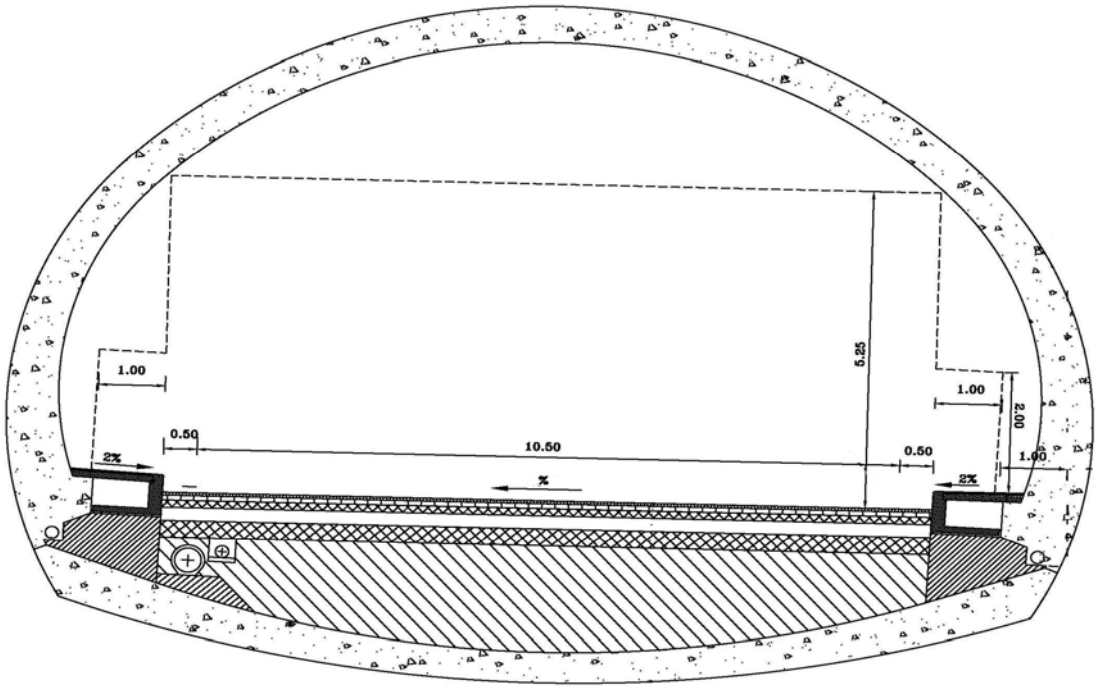
Şekil 4.6: Fay kili(solda), şeyl marl (Sağda) (Pischinger, 2003)

Tablo 4.1: Bouira Tüneli zemin özellikleri

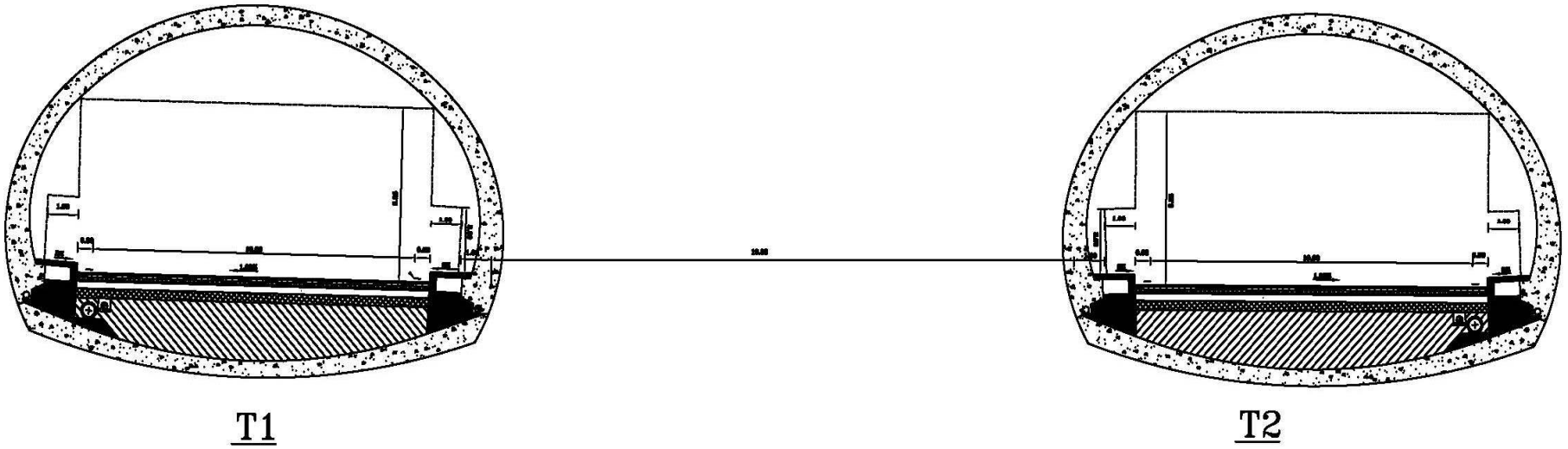
RMT Sınıfı	Proje Kaya klası	Tanım	Heterojenite	Ayrışma	UCS (Mpa)	GSI	Foliasyon (m)	Eklem (m)	m_i	Dolgu (Genelde)	Su Etkisi
RMT1	Sınıf I	Marn	İsotropik	W1-W2	25-50	37-54	0.2-0.6	0.2-0.6	5-9	Kapalı, kalsit dolgu, FeO	Yok veya çok az
RMT2	Sınıf II	Marn (ayrışmış)	İsotropik	W3-W4	5-25	20-35	0.2-0.6	0.2-0.6	5-9	Kalsit,FeO, kil	Az ila etkili (dağılma)
RMT3	Sınıf I	Kalkerli Marn	İsotropik	W1-W2	50-100	37-54	0.2-0.6	0.2-0.6	5-15	Kapalı, kalsit dolgu, FeO	Yok, su taşıyıcı seviyeler
RMT4	Sınıf II	Kalkerli Marn (ayrışmış)	İsotropik	W3-W4	25-50	20-35	0.2-0.6	0.2-0.6	5-15	Kalsit,FeO, kil	Su taşıyıcı boşluklar olabilir
RMT5	Sınıf III	Foliasyonlu marn	Anisotropik	W1-W2	5-25	20-35	0.06-0.2	0.2-2	5-9	Kalsit ve/veya kil sıvalı	Suyla dağılgan
RMT6	Sınıf IV	Foliasyonlu marn	Anisotropik	W3-W4	1-25	15-29	0.06-0.2	0.2-2	5-9	Kalsit ve/veya kil sıvalı	Suyla dağılgan
RMT7	Sınıf IV-V	Şeyl Marn	Anisotropik	W1-W4	0.25-5	14-28	0.02-0.002	0.02-0.6	4-8	Tb. Araları kil/grafit sıvalış kaygan yüzlü	Suyla dağılgan
RMT8	Sınıf V	Fay kili ve dolgusu	Anisotropik	W1-W4	0.1-1	5-22	0.02-0.002	-	-	Tüm süreksizlikler makaslanmış	Suyla dağılgan
RMT9	Sınıf 6	Ayrışmış kayalar	İsotropik	W5-W6	<0.25	14-29	-	-	4-8	-	Suyla dağılgan

4.3 Yapım Yöntemi

Bouira tüneli Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi prensipleri kullanılarak açılan ve değişik kademeli kazıların yapıldığı iki tüpten oluşan karayolu tünelidir. Tüpler arasında dış kaplamalarından yaklaşık olarak 19 m mesafe vardır. Düşey gabarisi 5.25 m iken yatay gabarisi 13.5 m olan tünellerin toplam 10.5 m yol genişliği olan 3 şerit karayolu ve yaya yollarından oluşmaktadır. Tünel güzergahı boyunca 2 tünel arasında 4 adet ulaşım galerisi mevcuttur. Tünel güzerganının büyük bir kısmı %2.6 eğimle açılmaktadır. Bouira tünelinin bitmiş haldeki kesiti Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' de gösterilmiştir. Kazı makinesi olarak Roadheader, ekskavatör, hidrolik kırıcı ve fresöz kullanılmıştır.



Şekil 4.7: Tipik Tüneli Enkesiti



Şekil 4.8: Bouira Tüneli T1 ve T2 tüplerinin bitmiş hallerinin enkesiti

Bouria Tüneli'nde iyileştirme yöntemi olarak Şekil 4.9 'da uygulaması görülen boru süren uygulamaları, enjeksiyonlar, jet grout uygulamaları, mini kazık uygulamaları değişik kesimlerde uygulanmaktadır. Geçici kaplama olarak Şekil 4.10'de zemine uygulanırken görülmekte olan püskürtme beton, hasır çelik, kafes kiriş çelik iksa, kaya bulonları kullanılmıştır. Kalıcı kaplama olarak ise dökme beton kullanılmıştır. Kaplamaların boyutları ve miktarları tahkimat sistemine göre değişmektedir. Kazı yönteminde 5 ana kaplama sistemi uygulanmıştır. İhale aşamasında verilen A Sınıfı, B Sınıf ve C Sınıfı tipi kaplamalara değişen zemin koşullar sebebiyle D Sınıfı, E Sınıfı olmak üzere 2 adet sınıf daha eklenmiştir. Bu kaplama sınıfları sırası ile anlatılacaktır.



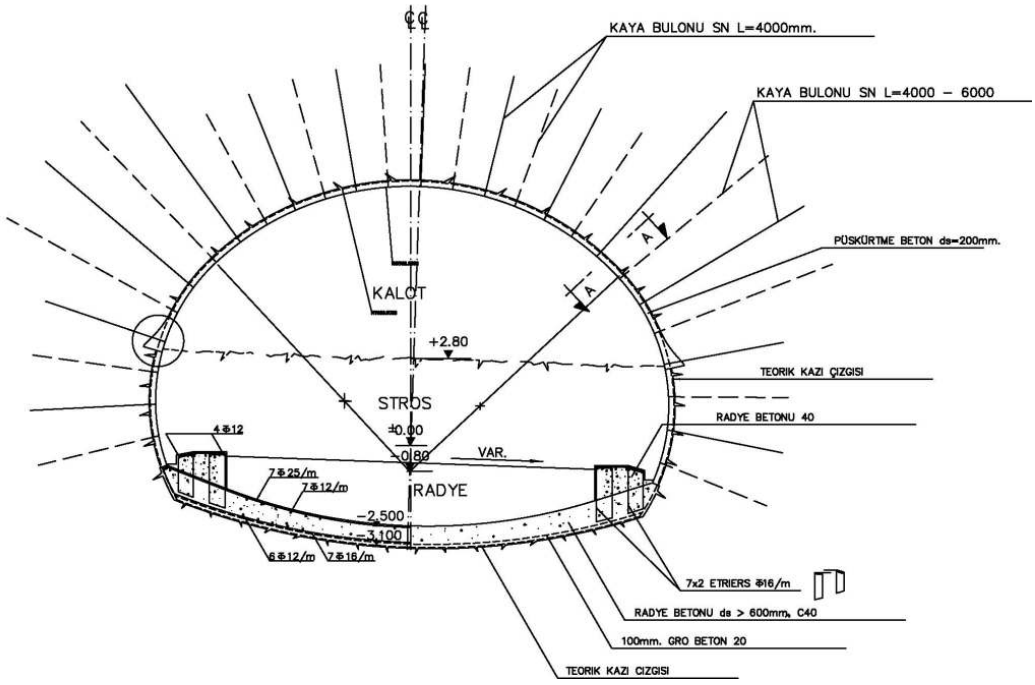
Şekil 4.9: Boru süren uygulaması, Bouira Tüneli



Şekil 4.10: Püskürtme Beton Uygulaması, Bouira Tüneli

4.3.1 A Sınıfı Geçici Kaplama Sistemi

A sınıfı kaplama sistemi duraylılığı en yüksek olan zeminler için düşünülmüştür. 152.73 m³/m kazı alanı olan bu sistemde tünel üç kademede açılmaktadır. Destek elemanı olarak püskürtme beton, hasır çelik, kafes iksa ve kaya bulonları kullanılmaktadır. Şekil 4.11'de gösterilmiş olan her aşamada uygulanacak olan destek tipleri çeşidi ve miktarı aşağıda özetlenmiştir (



Şekil 4.11: A Sınıfı geçici kaplama sistemi

Kalot

Püskürtme Beton: Yüzeye 20 cm. kalınlığında ve 30 N/mm² dayanımında uygulanacaktır. Aynaya yüzey stabilitesi için 3-5 cm. kalınlığında uygulanacaktır.

Hasır Çelik: Çift sıra 6/6-150x150 mm. (2.96 kg/m²) olarak uygulanacaktır.

Kafes İksa: İlerleme doğrultusunda boyuna 2m aralıklı olarak (13.1 kg/m) uygulanacaktır.

Kaya Bulonu: 250 kN dayanımlı SN tipi, 4 m uzunluğundaki bulonlar ilerleme yönünde metrede bir sıra olmak üzere enine 2 m aralıklarla uygulanacaktır. 250 kN dayanımlı, SN tipi, 6 m uzunluğunda olan diğer tip bulonlar ise ilerleme yönünde metrede bir sıra olmak üzere 4 adet şaşırtmalı olarak uygulanacaktır.

Püskürtme Beton: Aynaya yüzey stabilitesi için 3-5 cm uygulanacaktır.

Stros:

Püskürtme Beton: Yüzeye 20 cm kalınlığında 30 N/mm2 dayanımında uygulanacaktır.

Hasır Çelik: Çift sıra 6/6-150x150 mm (2.96 kg/m²)özelliğinde monte edilecektir.

Kafes İksa: İlerleme doğrultusunda boyuna 2 m aralıklarla (13.1 kg/m) monte edilecektir.

Kaya Bulonu: 250 kN dayanımlı, SN tipi, 4 m uzunluğunda olan bulonlar ilerleme yönünde metrede bir sıra enine 2 m aralıklarla uygulanacaktır.

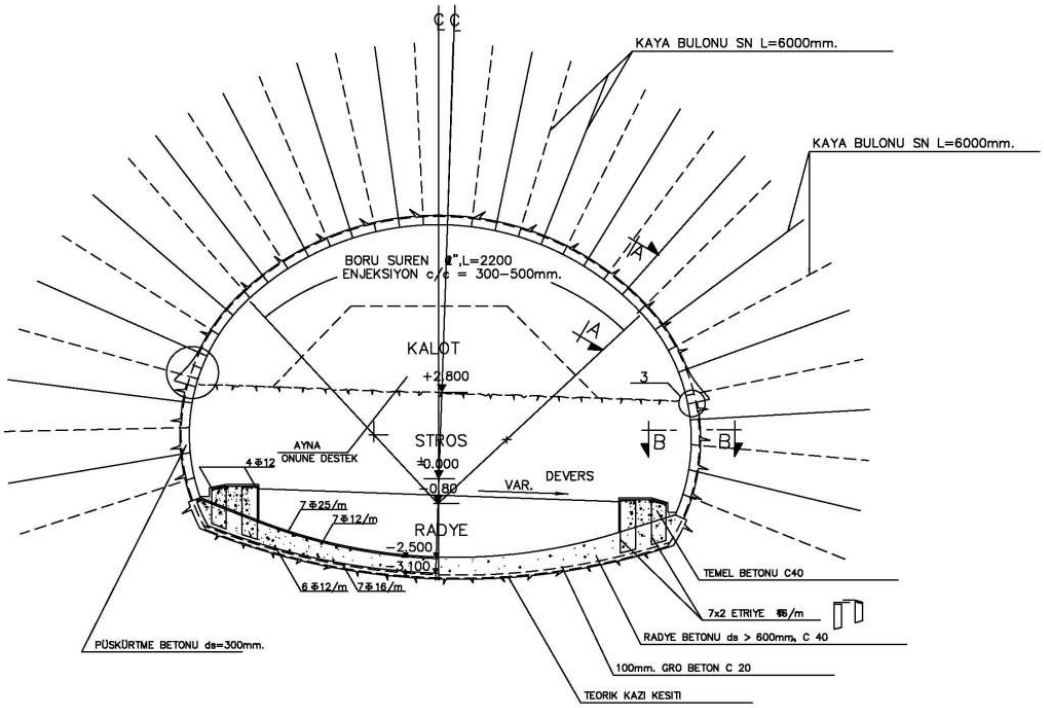
Radye:

Gro beton:10 cm kalınlığında uygulanacak olan gro beton 20 N/mm² dayanımında olması gerekmektedir.

Taban Betonu: 40 m/mm² olan radye betonunun kesitleri çizimde (Şekil 4.11) görülmektedir.

4.3.2 B Sınıfı Geçici Kaplama Sistemi

Kazı ve iksa sistemi üç aşamada yapılmalıdır. Toplam kazı enkesiti 155.79 m³/m olan bu sistemde gerekli durumlarda kalot kazısından sonra kalot aynasına destek dolgusu yapılmalıdır. Destek elemanlarının detayları aşağıda mevcuttur (Şekil 4.12).



Şekil 4.12: B Sınıfı geçici kaplama sistemi

Kalot:

Süren: 2 inch çaplı ve 2.20 m uzunluğundaki boru sürenler, içlerine 32 mm çaplı donatı yerleştirilerek çimento enjeksiyonu yapılacak olan yüzeye enine 30-50 cm boyuna 1 m. aralıklarla uygulanacaktır.

Püskürtme Beton: 30 cm kalınlığında uygulanacak olan püskürtme betonun dayanımı, 30 N/mm² olacaktır.

Hasır Çelik: Çift sıra olarak püskürtme betonun içine döşenecek olan hasır çeliğin 6/6-150x150 mm (2.96 kg/m) aralıklı olması gerekmektedir.

Kafes İksa: İlerleme doğrultusunda boyuna bir metre aralıklı (19.2 kg/m) olarak döşenecektir.

Kaya Bulonu: 250 kN dayanımlı SN tipi, 6 m uzunluğunda ilerleme yönünde metrede bir sıra olmak üzere enine 1.50 m aralıklarla şaşırtmalı olarak uygulanacaktır.

Püskürtme Beton: Aynaya yüzey stabilitesi için 3–5 cm uygulanacaktır.

Stros:

Püskürtme Beton: Yüzeye 30 cm kalınlığında, 30 N/mm² dayanımında püskürtme beton uygulanacaktır.

Hasır Çelik: Çift sıra olarak 6/6-150x150 mm, boyutlarında (2.96 kg/m) uygulanacaktır.

Kafes İksa: İlerleme doğrultusunda boyuna bir metre aralıklı olarak (19.2 kg/m) uygulanacaktır.

Kaya Bulonu: 250 kN dayanımlı SN tipi, 6 m uzunluğunda olan bulonlardan ilerleme yönünde metrede bir sıra olmak üzere enine 1.50 m aralıklarla şaşırtmalı olarak uygulanacaktır.

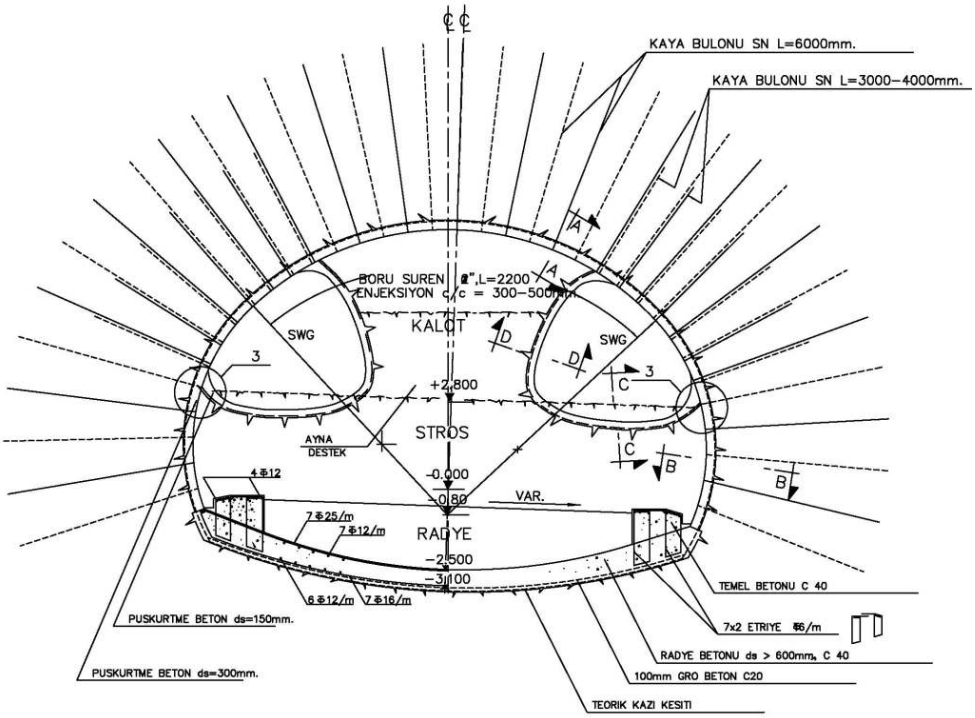
Radye:

Gro beton:10 cm kalınlığında uygulanacak olan gro beton 20 N/mm² beton dayanımında olması gerekmektedir.

Taban Betonu: 40 N/mm² olan radye betonunun kesitleri şekilde (Şekil 4.12) görülmektedir.

4.3.3 C Sınıfı Geçici Kaplama Sistemi

Toplam 155.46 m³/m kazı alanına sahip olan bu kaplama sisteminde süren, püskürtme beton, hasır çelik kafes iksa ve bulonlar kullanılmaktadır. Kalot 3 kademede açılacaktır Sol ve sağdaki kısımlar önce açıldıktan sonra bunların etrafına geçici hasır çelik ve püskürtme beton uygulaması yapılacaktır. Kalot kazısı ve iksası bittikten sonra stros ve radye kazısına geçilecektir. Şekil 4.13 de gösterilen bu kaplama sisteminin ayrıntıları aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 4.13: C Sınıfı geçici kaplama sistemi

Kalot:

Süren: 32 mm çaplı, 2.20 m uzunluğunda boruların içine 32 mm donatı yerleştirilerek çimento enjeksiyonu yapılacaktır. Enine 30-50 cm boyuna 0.80 -1.00 m aralıklı uygulanacaktır.

Püskürtme Beton: 30 cm kalınlığında, 30 N/mm² dayanımında uygulanacaktır.

Hasır Çelik: Çift Sıra olarak 6/6-150x150 mm aralıklarla (2.96 kg/m²) uygulanacaktır.

Kafes İksa: İlerleme doğrultusunda boyuna 0.80-1.00 (19.2 kg/m)aralıkla uygulanacaktır.

Kaya Bulonu: 250 kN dayanımlı SN tipi, 6 m uzunluğunda olan bulonlar ilerleme yönünde 0.80-1.00 m de 1 sıra olmak üzere enine 1.5 m aralıklarla şaşırtmalı olarak uygulanacaktır. Uygulanacak olan 2. tip bulonlar ise 250 kN dayanımlı SN tipinde olup, 3-4 m uzunluğunda ilerleme yönünde 0.80-1.00 m de bir sıra olmak üzere, enine 1.5 m aralıklarla şaşırtmalı olarak uygulanacaktır.

Püskürtme Beton: Aynaya yüzey stabilitesi için 3-5 cm uygulanacaktır.

Stabiliteyi arttırmak için kalot 3 aşamada açılacaktır. Önce 2 adet geçici galeri açılacak daha sonra orta kısım açılacaktır. Geçici galeriye uygulanacak olan ve daha sonra kaldırılacak olan desteklerin açıklamaları aşağıdadır.

Püskürtme Beton: 15-20 cm kalınlığında ve 30 N/mm² dayanımında uygulanacaktır.

Hasır Çelik: Çift sıra olarak 6/6-150x150 mm aralıklarla döşenecektir(2.96 kg/m).

Kafes İksa: İlerleme doğrultusunda boyuna 0.80-1.00 aralıklılarla döşenecektir.

Stros:

Püskürtme Beton: 30 cm kalınlığında ve 30 N/mm² beton dayanımında uygulanacaktır.

Hasır Çelik: Çift Sıra olarak 6/6-150x150 mm aralıklarla uygulanacaktır(2.96 kg/m²)

Kafes İksa: İlerleme doğrultusunda boyuna 0.80-1.00 aralıklı olarak uygulanacaktır (19.2 kg/m).

Kaya Bulonu: 250 kN dayanımlı olan SN tipi bulonlar, 6 m uzunluğunda ilerleme yönünde 0.80-1.00 m de 1 sıra olmak üzere enine 1.5 m aralıklarla şaşırtmalı olarak uygulanacaktır. Uygulanacak diğer tip bulonlar ise 250 kN dayanımlı SN tipi, 3-4 m uzunluğunda ve ilerleme yönünde 0.80-1.00 m de bir sıra olmak üzere, enine 1.5 m aralıklarla şaşırtmalı olarak monte edilecektir.

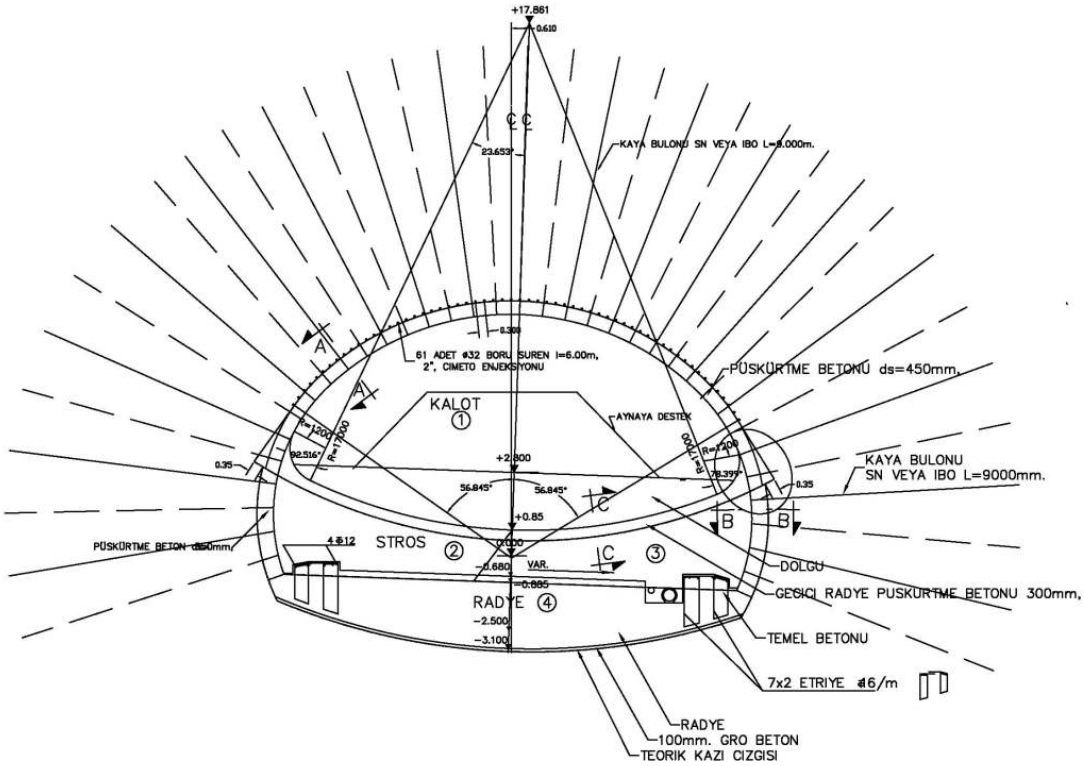
Radye:

Gro beton:10 cm kalınlığında uygulanacak olan gro betonun 20 N/mm² beton dayanımında olması gerekmektedir.

Taban Betonu: 40 N/mm² olan radye betonunun kesitleri Şekil 4.13'de görülmektedir.

4.3.4 D Sınıfı Geçici Kaplama Sistemi

Bu kaplama sistemi 3 kademede açılacaktır. Süren, püskürtme beton, hasır çelik, çelik iksa ve bulonların kullanıldığı bu sistemde toplam kazı alanı 175.56 m³/m'dir. Kalot kazısı sırasında geçici radye uygulanması yapılacak olup kalot kazısı sonrası aynaya destek yapılacaktır. Destek detayları aşağıda daha detaylı olarak anlatılmış ve Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14: D Sınıfı geçici kaplama sistemi

Kalot:

Süren: 2 inch çaplı 6 m. uzunluğundaki borulardan 61 adet, olmak üzere ilerleme yönünde boyuna 2 m. aralıklı uygulanacaktır ve içlerinde 32 mm çaplı donatı ile birlikte çimento enjeksiyonu yapılacaktır.

Püskürtme Beton: 45 cm kalınlığında uygulanacak olan püskürtme betonun sınıfı C25/30 dur.

Hasır Çelik: Çift sıra olarak uygulanacaktır ve 8/8-150x150 mm. (5.52 kg/m²) aralıklarla uygulanacaktır.

Çelik İksa: HEB 140 profil ilerleme yönünde bir metre aralıklarla döşenecektir.

Kaya Bulonu: 250 kN dayanımlı SN tipi bulonlar, 9 m uzunluğunda olup ilerleme yönünde metrede. de bir sıra olmak üzere enine 1.50 m aralıklarla şaşırtmalı olarak uygulanacaktır.

Püskürtme Beton: Aynaya yüzey stabilitesi için 10-15 cm. uygulanacaktır.

Kalot inşası sırasında tabana geçici radye yapılacaktır.

Püskürtme Beton: Geçici Radye Püskürtme betonu 30 cm, kalınlığında olup C25/30.beton dayanımındadır.

Hasır Çelik: Çift sıra olarak döşenecek hasır çelik 8/8-150x150 mm aralıklıdır.(5.52 kg/m)

Stros:

Püskürtme Beton: 45 cm, C25/30

Hasır Çelik: Çift sıra 8/8-150x150 mm, 5.52 kg/m²

Çelik İksa: HEB 140 ilerleme yönünde boyuna bir metre aralıklı olarak döşenecektir.

Kaya Bulonu: 250 kN dayanımlı SN tipi, bulonlar 9 m uzunluğundadır ve ilerleme yönünde 1 m de 1 sıra olmak üzere enine 1.5 m aralıklarla şaşırtmalı olarak uygulanacaktır.

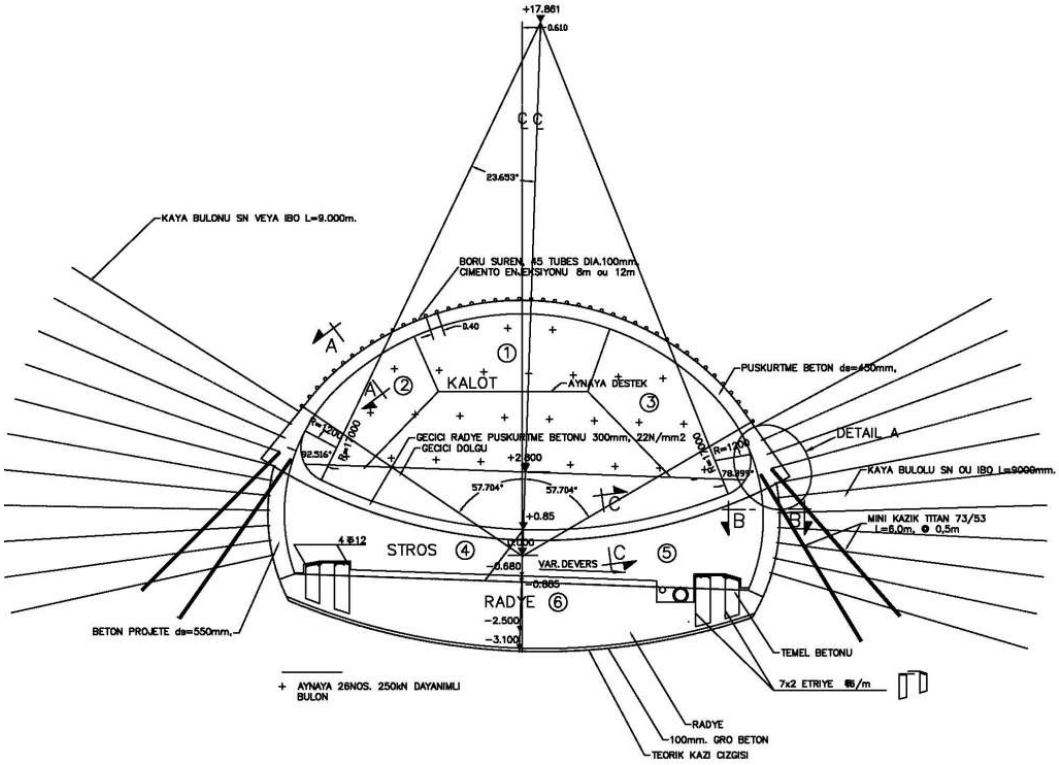
Radye:

Gro beton: 10 cm kalınlığında C16/20 dayanımında beton dökülecektir.

Radye Betonu: Detayları çizimde olan betonun dayanımı C25/30 dur detayları Şekil 4.14'dedir.

4.3.5 E Sınıfı Geçici Kaplama Sistemi

Tünel açımı sırasında duraylılığı en düşük olacak zeminlerde kullanılacak olan kaplama sistemidir. 185,15 m³/m kazı alanı olan bu kaplama sisteminde süren, püskürtme beton hasır çelik, çelik iksa kaya bulonu, mini kazık ve aynaya ankraj uygulamaları yapılacaktır. Uygulanan destekler daha ayrıntılı olarak aşağıda verilmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15: E sınıfı geçici kaplama sistemi

Kalot:

Süren: 100mm. çaplı 16 m uzunluğunda boruların içlerine çimento enjeksiyonu yapılacaktır. İlerleme yönünde boyuna 4 m. aralıklarla 45'er adet uygulanacaktır.

Püskürtme Beton: Kalınlığı 45 cm olan C25/30 N/mm² dayanımında püskürtme beton uygulanacaktır.

Hasır Çelik: Çift sıra 8/8-150x150 mm aralıklı (5.52 kg/m²) olarak uygulanacaktır.

Çelik İksa: HEB 140 profilleri ilerleme yönünde boyuna 0.80 -1.00 m. aralıklı olarak döşenecektir.

Kaya Bulonu: 250 kN dayanımlı SN tipi,9 m uzunluğunda olan bulonlar ilerleme yönünde 0.80 -1.00 m. de 1 sıra olmak üzere enine 1.50 m aralıklarla şaşırtmalı olarak uygulanacaktır.

Kalot kazısında stabiliteyi arttırmak için ek önlemler uygulanacaktır bunlar:

Püskürtme Betonu: Aynaya yüzey stabilitesi için 10-15 cm. uygulanacaktır.

Ankraj: Aynaya yüzey stabilitesi için 26 adet, 250 kN dayanımlı ankraj uygulanacaktır.

Püskürtme Beton: Ayna stabilitesi için 10-15 cm kalınlığında C 25/30 dayanımında uygulanacaktır.

Mini Kazık: Mikro Titan 73/53, 6 m uzunluğunda, 0.50 m de bir ilerleme yönünde fil ayaklarına uygulanacaktır.

Püskürtme Beton: Geçici radye için 30 cm kalınlığında, C25/30 dayanımında uygulanacaktır.

Hasır Çelik: Çift sıra olarak 8/8-150x150 mm olarak uygulanacaktır(5.52 kg/m²).

Stros:

Püskürtme Beton: Kalınlık 10 cm daha genişleyerek 55 cm olup beton dayanım C25/30 N/mm² 'dir.

Hasır Çelik: Çift sıra olarak 8/8-150x150 mm olarak uygulanacaktır(5.52 kg/m²).

Çelik İksa: HEB 140, profili ilerleme yönünde boyuna 0.80 -1.00 m. aralıklarla döşenecektir.

Kaya Bulonu: 250 kN dayanımlı SN tipi, 9 m uzunluğunda olan bulonlar ilerleme yönünde 0.80 -1.00 m de 1 sıra olmak üzere enine 1.50 m aralıklarla şaşırtmalı olarak uygulanacaktır.

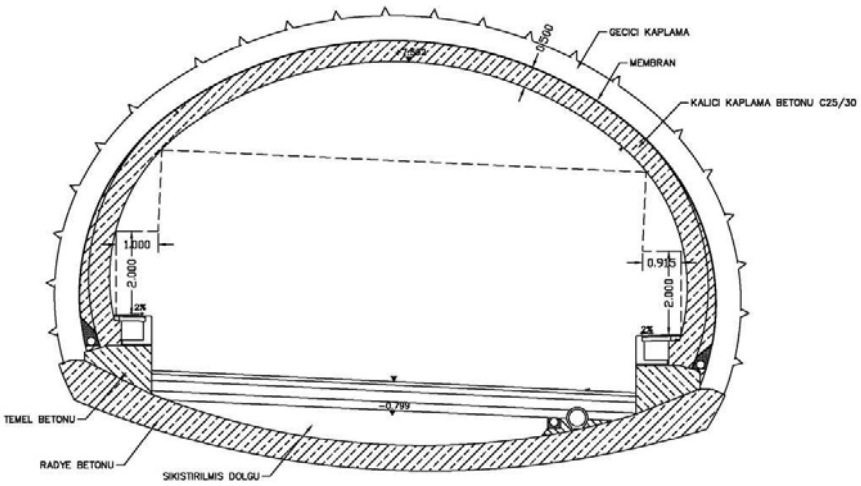
Radye:

Gro beton: 10 cm kalınlığında C16/20 dayanımında beton dökülecektir.

Radye Betonu: Detayları çizimde olan betonun dayanımı C25/30'dur detayları çizimdedir(Şekil 4.15).

4.3.6 Kalıcı Kaplama Sistemi

Bu projede tüm zemin sınıfları için genel olarak aynı kalıcı kaplama uygulanacaktır. Kalıcı kaplama dökme beton cinsinde olup (Şekil 4.17). Kaplama kalınlığı ortala olarak 50 cm olacaktır (Şekil 4.16). Beton kalitesi olarak C30 beton kullanılacaktır. Kaplamanın radyeye yaklaştığı kısımlar genişleyerek radye ile birleşecektir.



Şekil 4.16: Kalıcı beton kaplaması



Şekil 4.17: Kalıcı kaplama uygulaması, Bouira Tüneli

5 GEOTEKNİK MODELLEME VE HESAPLAMALAR

Bu çalışma kapsamında Bouira tünel projesinin tamamı detaylı olarak incelenmiş ve KM 184+012 (T2) bölümündeki arazi parametreleri kullanılarak değişik kademeli kazı tasarımlarının tünel kaplamalarındaki deplasman değerlerine olan ektileri araştırılarak en uygun duruma ulaşılmaya çalışılmıştır. Tünel inşası sırasında yapılan geçici yapıların tünel kaplamasında oluşacak olan deplasmanlara olan etkisi incelenmiştir. Tünel açımının zemin de meydana getirdiği oturmalar hesaplanmıştır. Tünellerin açım sırasının değişmesi durumunda tünellerin çevreye birbirlerine olan etkileri incelenmiştir. Yapılan incelemelerde sonlu elemanlar yöntemi ile çalışmakta olan Plaxis programı kullanılmıştır. Hesaplamalara öncelikle sistemin modellenmesi çalışmalarından başlanacak daha sonra analizler ve sonuçları incelendikten sonra tünel kaplamalarında oluşan kesit tesirleri sonucunda tünel kaplaması boyutlandırmasının kontrolleri yapılacaktır. Tablo 5.1'de özetlenen bu adımlar aşağıda ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

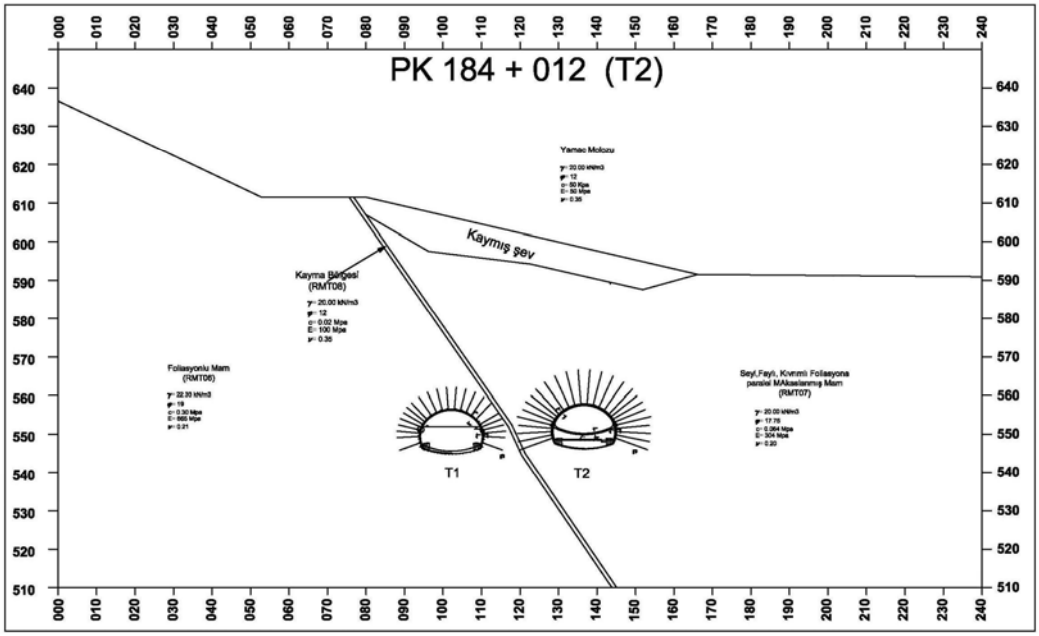
Tablo 5.1: Analiz özeti

No	Analiz Açılaması
1	T1 Tünelinin 3 aşamada açılması
2	T2 Tünelinin 3 aşamada açılması
3	T2 Tünelinin 4 aşamada açılması ve kalota geçici radye inşası
4	T2 Tünelinin 5 aşamada açılması ve kalota geçici radye inşası
5	T2 Tünelinin 5 aşamada açılması ve kalota ve strosa geçici radye inşası
6	T2 Tünelinin 6 aşamada açılması ve kalota ve strosa geçici radye inşası
7	5 numaralı durum için T2 tünelinin önce açılması
8	5 numaralı durum için kesitlerin boyutlandırılması statik kontrolü.

5.1 Boyutlandırma ve Arazi Modellemesi

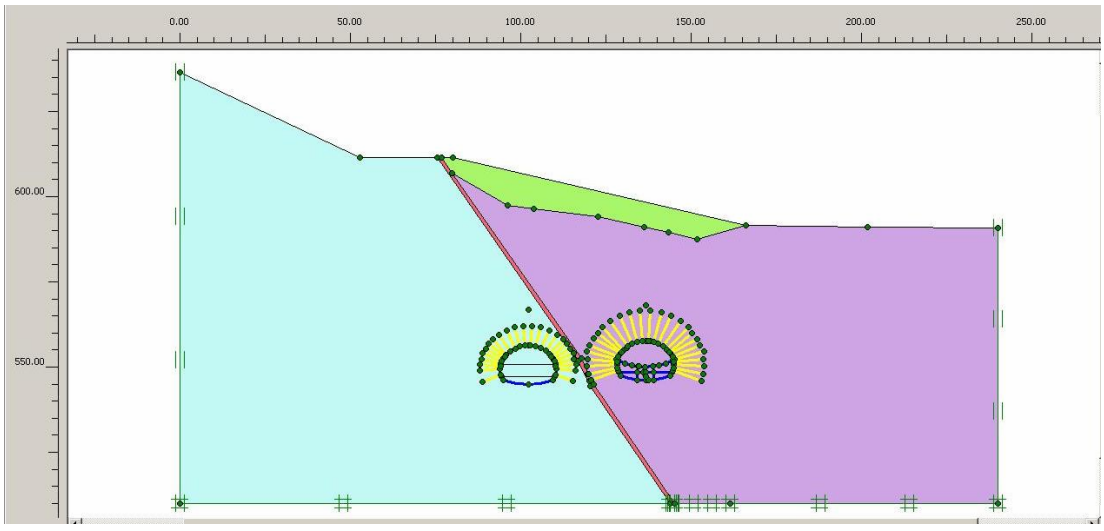
Bouira Tüneli KM 184+012 (T2) kısmında belirgin olarak 4 zemin formasyonu görülmektedir. Bu zeminler zemin etüt raporunda şeyl marn (RMT6), Foliasyonlu marn (RMT7) ve Fay kili (RMT8) ve yamaç molozu olarak adlandırılmaktadır. Bu zemin formasyonları hakkında bilgi bir önceki kısımda (Tablo 4.1) detaylı olarak verilmiştir. Raporlarda yeraltı suyu seviyesi verilmemiştir bundan dolayı hidrolik hesap yapılmamıştır. Zemin raporlarının incelenmesi, boykesit ve enkesitlerden ilgili

kısmın bulunması sonucunda Şekil 5.1'te görülen arazinin zemin modellemesi yapılmıştır. Zemin raporlarının incelenmesi sonucu bu kısımda T1 tüneli B sınıfı kaplama sistemi ve T2 tüneli ise D sınıfı kaplama sistemi esaslarına göre boyutlandırılmış ve buna göre geometri belirlenmiştir.

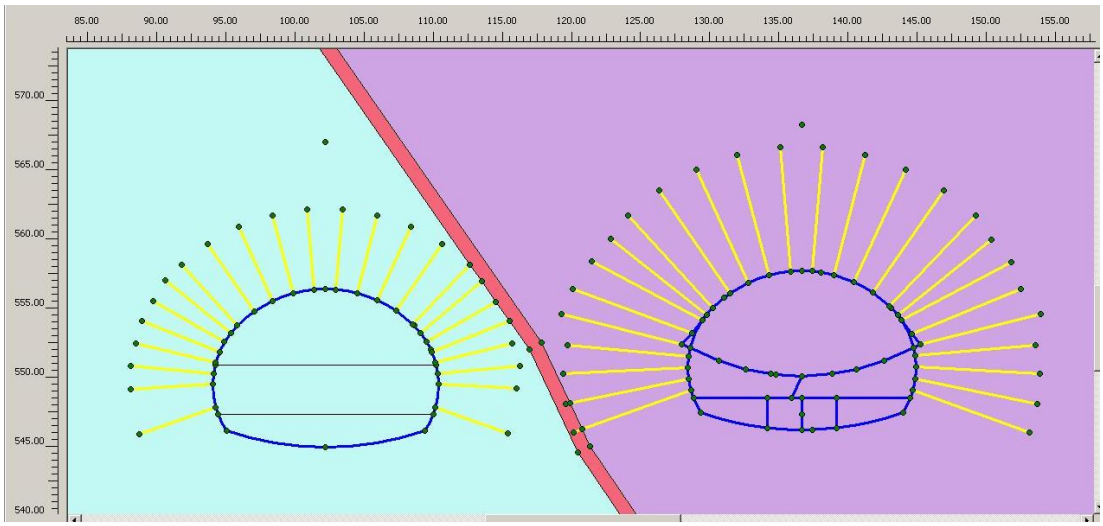


Şekil 5.1: Zemin Modellemesi.

Sistemin geoteknik olarak modellenmesinden sonraki adım bu modellemenin doğru bir şekilde programa girilmesidir. Sonlu elemanlarla yöntemiyle çalışan Plaxis programında Şekil 5.2'de de görüldüğü gibi 160 m yüksekliğinde 240 m genişliğinde model kurulmuştur ve zemin ve tünel geometrisi Şekil 5.3 'te görülen tünel geometrisi sisteme girilmiştir.



Şekil 5.2: Sistemin programda geometrik modellemesi



Şekil 5.3: Tünellerin programdaki geometrik modellemesi

Bir sonraki adım programa zemin ve kullanılacak malzeme parametrelerinin girilmesidir. Hesaplar yapılırken Mohr-Coulomb malzeme modeli ve drenajlı durum seçilmiştir ve bu modele göre zeminler kuru birim hacim ağırlık (γ_d),kohezyon (c), kayma mukavemeti açısı (ϕ), Elastitisite modülü (E) ve poisson oranı (ν) ile modellenmiştir. Zeminler için alınan değerler Tablo 5.2.'de mevcuttur

Tablo 5.2: Zemin malzeme parametreleri

Açıklama	E	γ_d	c	ϕ	ν
	Mpa	kN/m³	Kpa	°	-
Foliasyonlu Marn (RMT6)	665.00	22.33	300.00	19.00	0.20
Seyl Marn (RMT7)	304.00	20.00	64.00	17.75	0.20
Fay kili (RMT8)	100.00	20.00	20.00	12.00	0.35
Yamaç Molozu	50.00	20.00	50.00	12.00	0.35

Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin en önemli özeliklerinden birisi de tünel kaplamasının uygulama zamanlamasıdır. Bu sebepten dolayı bu modellemede püskürtme beton 2 ayrı malzeme olarak girilmiştir. Bunlardan birincisi yeni uygulandığı ve mukavemetinin düşük olduğu dönem ikinci ise nihai mukavemetine ulaştığı dönemdir. Bu iki durum bu çalışmada sırasıyla püskürtme beton erken ve püskürtme beton geç olarak adlandırılmıştır. Tablo 5.3.'te programa girilen malzeme parametreleri görülmektedir. Bu tabloda elastisite modülü (E), uzama rijitliği(EA), eğilme rijitliği (EI) uygulama kalınlığı t), ağırlık (w) ve poisson oranı (ν) bulunmaktadır.

Tablo 5.3: Püskürtme beton malzeme parametreleri

Açıklama	E	t	EA	EI	w	v
	MPa	m	kN/m	kN.m²/m	kN/m/m	
T1						
Püskürtme Beton Erken	8000	0.30	2400000	18000	6.30	0.22
Püskürtme Beton Geç	21000	0.30	6300000	47250	6.30	0.15
T2						
Püskürtme Beton Erken	8000	0.45	3600000	60750	9.45	0.22
Püskürtme Beton Geç	21000	0.45	9450000	159469	9.45	0.15

Kalıcı kaplama betonu ve radye betonu için malzemelerin 28 günlük dayanımları esas alınarak parametreler hesaplanmış ve sisteme girilmiştir Bu malzeme özellikleri Tablo 5.4'te gösterilmektedir.

Tablo 5.4: Beton malzeme parametreleri

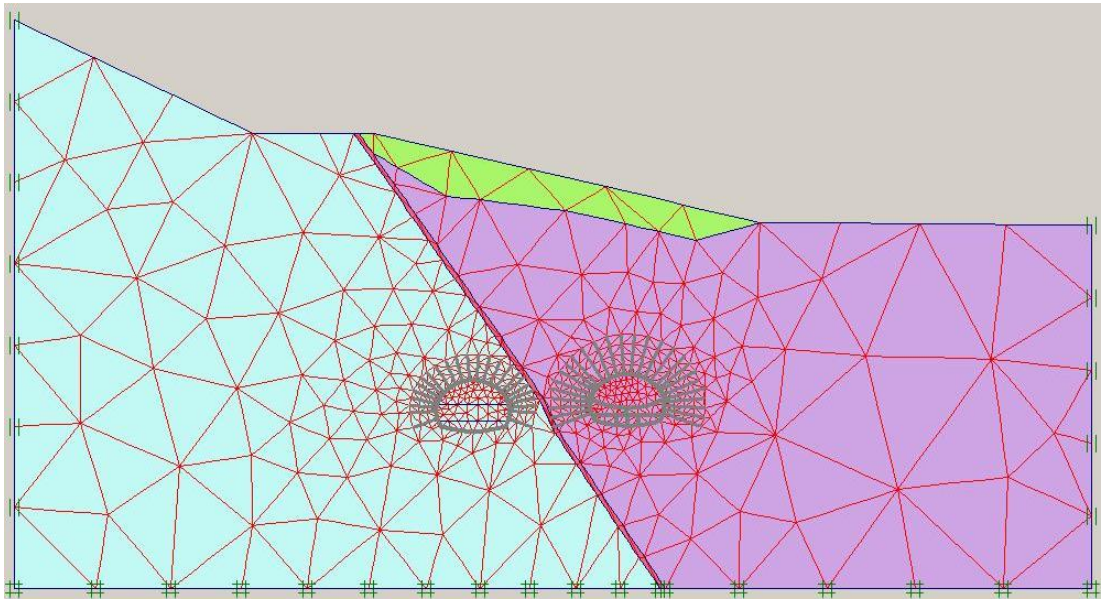
Açıklama	E	t	EA	EI	w	v
	MPa	m	kN/m	kN.m2/m	kN/m/m	
T1 Radye Betonu	34000	0.70	23800000	971833	16.80	0.20
T2 Radye Betonu	32000	1.58	50400000	10418625	37.80	0.20
Kalıcı Kaplama Betonu	32000	0.50	16000000	333333	12.00	0.20

Geçici kaplama sisteminde uygulanan kaya bulonları sisteme geotekstil olarak tanıtılmıştır ve bulonların malzeme özellikleri Tablo 5.5'te de görüldüğü gibi sisteme girilmiştir. Tabloda L bulon uzunluğunu göstermektedir.

Tablo 5.5: Kaya bulonu malzeme parametreleri

Açıklama	L	EA
	m	kN/m
Bulon 01	6.00	168892.02
Bulon 02	9.00	168892.02

Sisteme malzeme parametreleri girilip geometriye atandıktan sonra sonlu elemanlar ağı kurulmuştur. Şekil 5.4'te de görüldüğü gibi sonlu elemanlar ağı kurulurken tünellerin etrafında daha sık olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 5.4: Sonlu elemanlar ağı

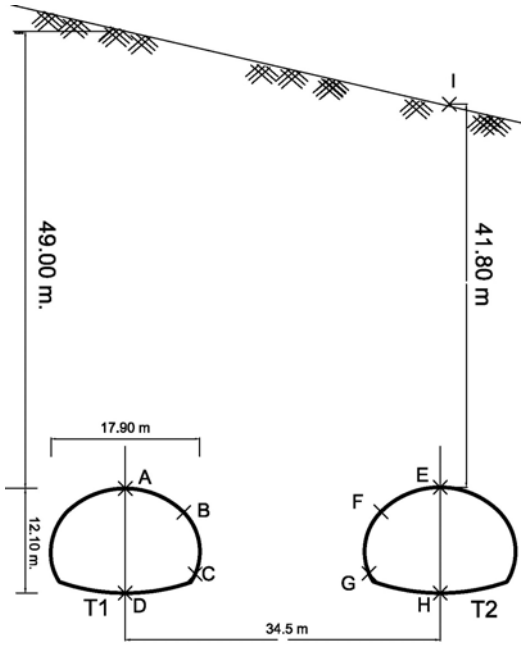
Sonlu elemanlar ağı tanımlandıktan sonra sisteme kazı aşamaları girilmiştir. Her kazı durumu için bu aşamalar değişik olacağından dolayı kazı aşamaları burada genel olarak anlatılacaktır.(Tablo 5.6) Her analiz için inşa aşamaları durumu ileriki bölümlerde daha detaylı olarak anlatılacaktır. Burada kazı yapılan aşamalarda sonlu elemanlar yönteminde detaylı anlatılmış olan tecrüblerle bulunan yük dağıtım faktörü (λ) 0.65 olarak alınmıştır. Programda plastik hesap yapılmıştır.

Tablo 5.6: Tünel inşa aşamaları

Aşama No	Açıklama
1	T1 tünelinin kalot kazısının yapılması
2	T1 tünelinin kalot geçici kaplamasının yerleştirilmesi
3	T1 tünelinin stros kazısının yapılması
4	T1 tünelinin stros geçici kaplamasının yapılması
5	T1 tünelinin radye kazısının yapılması
6	T1 tünelinin radye betonun dökülmesi
7	T1 tünelinin kalıcı kaplamasının yapılması
8	T2 tünelinin kalot kazısının yapılması
9	T2 tünelinin kalot geçici kaplamasının yerleştirilmesi
10	T2 tünelinin stros kazısının yapılması
11	T2 tünelinin stros geçici kaplamasının yapılması
12	T2 tünelinin radye kazısının yapılması
13	T2 tünelinin radye betonun dökülmesi
14	T2 tünelinin kalıcı kaplamasının yapılması
15	T1 ve T2 tünelinin bulonlarının yük almadığı durumun incelenmesi

Aşamalar programa girildikten sonra sitem çalıştırılmıştır. Değişik kazı kademelerinde ve tünel inşası sırasındaki deplasman değerleri ve kesit tesirleri incelenmiştir. Deformasyon değerleri incelenirken Şekil 5.5'de gösterilen 9 adet

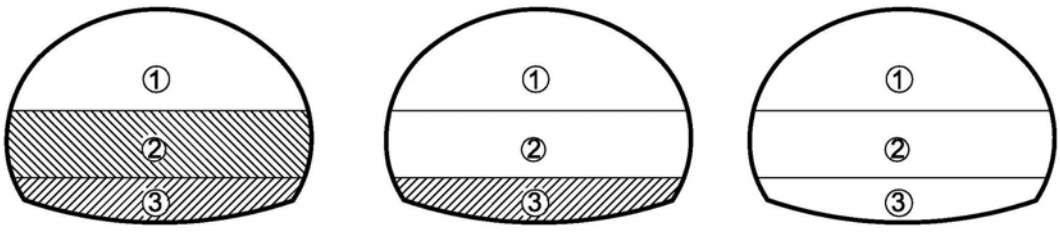
noktanın tünel inşa aşamalarına göre deplasman grafikleri çizilmiştir. İlerki bölümlerde verilecek olan tüm deplasman grafiklerinde bu noktalar incelenecektir.



Şekil 5.5: Tünel geometrisi ve deplasman değerlerinin incelendiği noktalar

5.2 T1 Tünelinin 3 Aşamalı Açılması

Tünel inşa hesaplarına T1 tüneli ile başlanmıştır. T1 tüneli geoteknik raporlarda foliasyonlu marn olarak adlandırılan zemin içinde açılacaktır. Tünel açımında B sınıfı geçici kaplama sistemi uygulanmış olup bu geçici kaplama sistemi detaylı bir şekilde bir önceki bölümde anlatılmıştır. Hesaplamalarda tünel 3 kademede inşa edilmiş olup bu inşa yöntemi şematik olarak Şekil 5.6'te verilmiştir. Tünel önce kalot kazısının yapılmasıyla başlanarak kademeli olarak açılmış ve bu kademelerde oluşan deplasmanlar izlenmiştir. Kalot kazısı ile başlayan ve tünelin kalıcı kaplaması inşasıyla biten tünel inşa aşamaları Tablo 5.7'de görülmektedir.

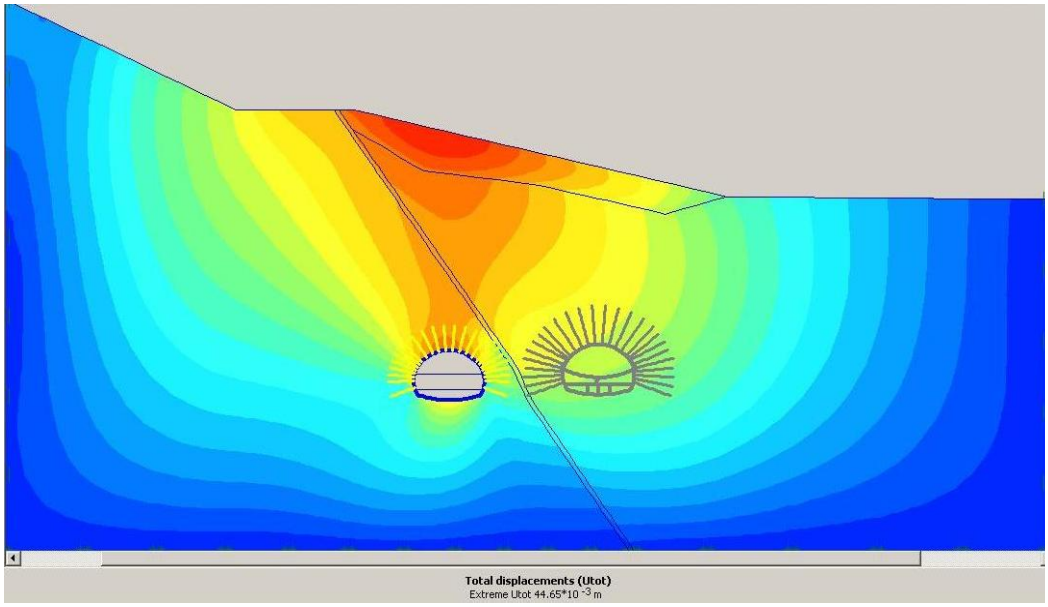


Şekil 5.6: T1 Tüneli üç kademeli kazısı şematik gösterimi

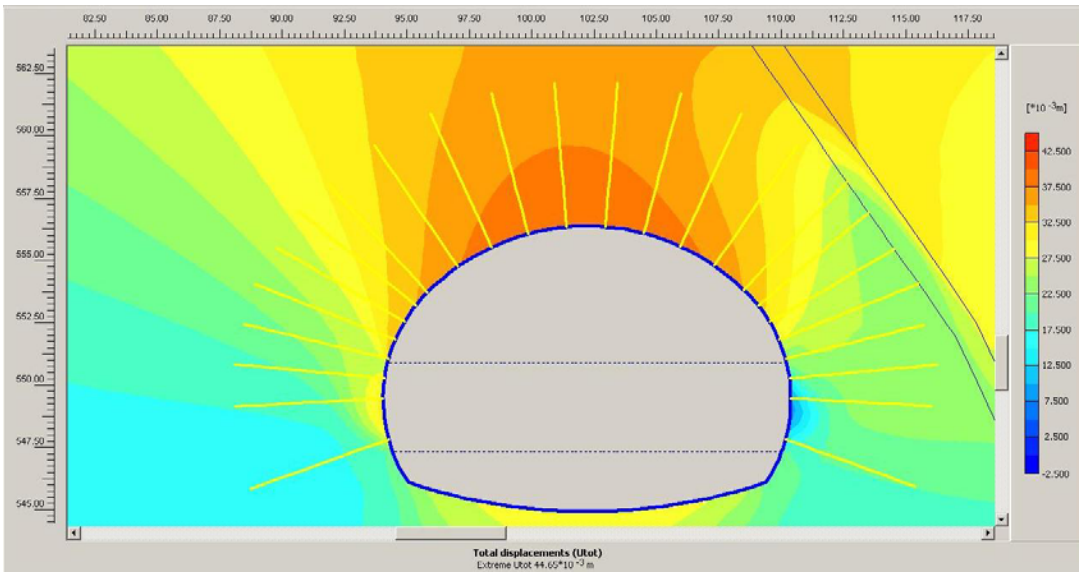
Tablo 5.7: T1 Tüneli üç kademli kazı aşamaları

Aşama No	Açıklama
1	T1 Tünelinin kalot kazısının yapılması
2	T1 Tünelinin kalot geçici kaplamasının yerleştirilmesi
3	T1 Tünelinin stros kazısının yapılması
4	T1 Tünelinin stros geçici kaplamasının yapılması
5	T1 Tünelinin radye kazısının yapılması
6	T1 Tünelinin radye betonun dökülmesi
7	T1 Tünelinin kalıcı kaplamasının yapılması

Şekil 5.7'de görüldüğü gibi T1 Tünelinin 3 kademeli açımı sonrasında en yüksek deplasman değeri 4.5 cm.'dir ve tünelin tepe noktasında oluşmaktadır. Tünelin tepe noktasında yerçekimi yönünde deformasyonlar görülürken kazı taban kısmında ise kabarmaların olduğu Şekil 5.8 'de görülmektedir. Tünel kaplaması etrafındaki noktaların tünelin inşa aşamalarına göre yer değiştirmeleri incelenmiştir. Bu noktalar Tünel inşası sırasındaki kaplama etrafındaki bu noktaların yatay düşey ve toplam deplasmanlarının aşamalara bağlı olan grafikleri ekler kısmında verilmiştir. Tünel inşası sırasındaki kesit tesir diyagramları da ekler kısmında mevcuttur.



Şekil 5.7: T1 Tüneli üç aşamalı açım durumu toplam deplasmanlar

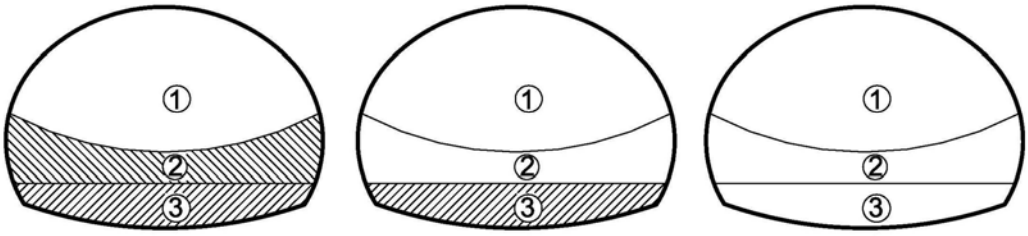


Şekil 5.8: T1 Tünelinde ayrıntılı deplasmanlar

T1 Tüneli inşası bittikten sonra T2 Tünelinin inşasına geçilmiştir.Bu inşa şaması detayları bir sonraki bölümde detaylı olarak anlatılacaktır.

5.3 T2 Tünelinin 3 Aşamalı Açılması

T2 Tüneli geoteknik raporda şeyl marn olarak adlandırılan zemin içinde açılacaktır. T1 tünelinin açıldıktan sonra T2 tüneli 3 kademede açılması durumu incelenmiştir. T2 Tüneli projede D sınıfı geçici kaplama sınıfı gibi boyutlandırılmıştır Tünelin açılma aşamaları Şekil 5.9'de şematik olarak gösterilmiştir. Tünelin inşasına kalot kazısından başlanmış ve sırası ile her kademede kazı ve iksa uygulamaları yapılarak kalıcı kaplamanın yapılmasıyla tamamlanmıştır. Tablo 5.8'de bu aşamalar gösterilmiştir.

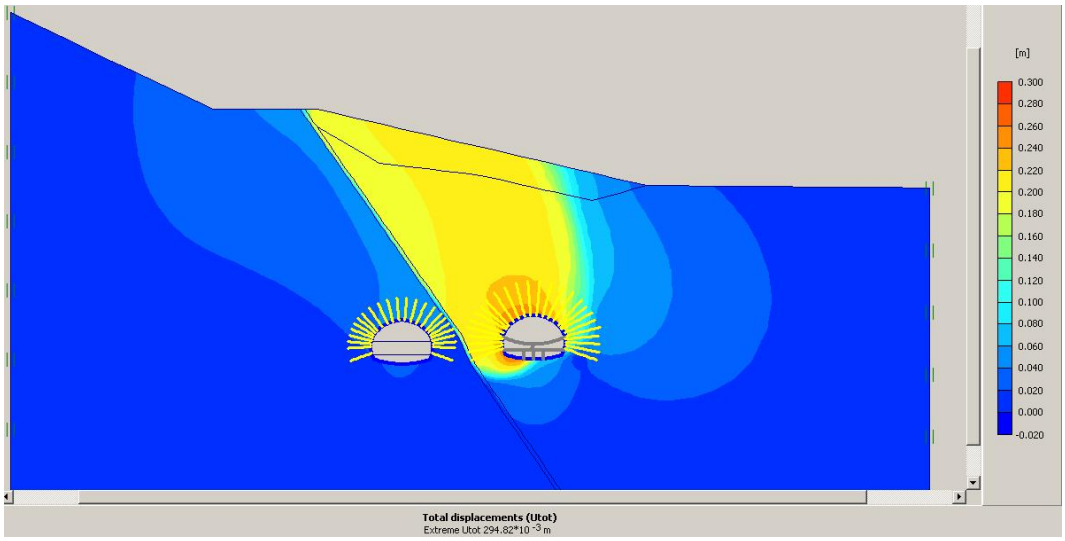


Şekil 5.9: T2 Tünelinin üç kademeli inşası şematik gösterimi

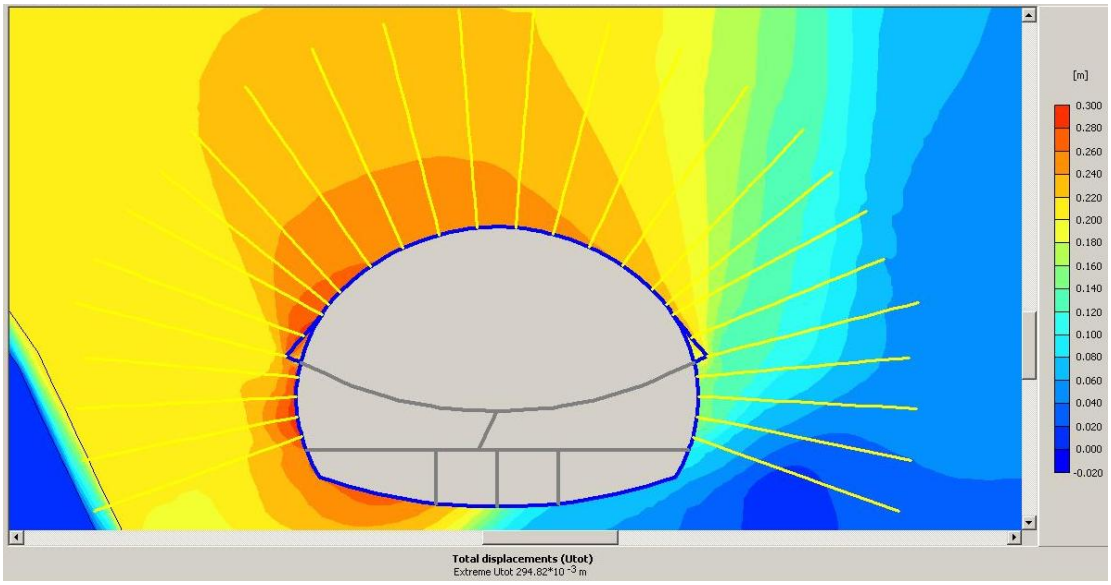
Tablo 5.8: T2 Tünelinin üç kademeli inşası aşamaları

Aşama No	Açıklama
1	T2 Tünelinin kalot kazısının yapılması
2	T2 Tünelinin kalot geçici kaplamasının yerleştirilmesi
3	T2 Tünelinin stros kazısının yapılması
4	T2 Tünelinin stros geçici kaplamasının yapılması
5	T2 Tünelinin radye kazısının yapılması
6	T2 Tünelinin radye betonun dökülmesi
7	T2 Tünelinin kalıcı kaplamasının yapılması

Yapılan hesaplamada maksimum deplasman değeri 29.4 cm' dir(Şekil 5.10).Bir önceki analizde olduğu gibi bu analizde de tünel kaplamasından kritik noktaların tüm aşamalardaki deplasman değerleri incelenmiştir. Bu noktaların inşa aşamalarına karşılık oluşan yatay, düşey ve toplam deplasmanların grafikleri eklerdedir. Tünelin özellikle kayma bölgesi tarafındaki deplasmanları daha yüksek olduğu Şekil 5.11'da görülmektedir.



Şekil 5.10: T2 tüneli üç kademede açma durumu deplasmanlar

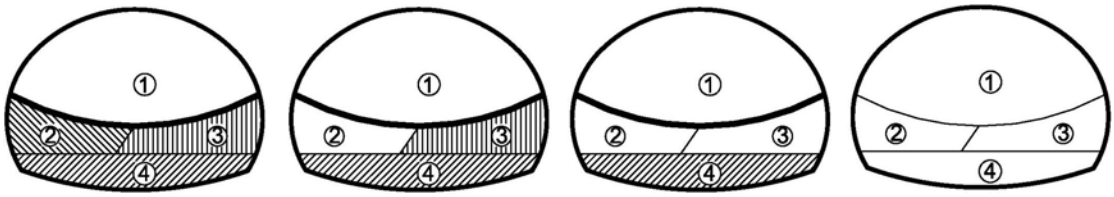


Şekil 5.11: T2 tüneli üç kademede açma durumu tünel deplasmanları

T2 tünelinde oluşan deplasman değerini düşürmek için farklı kademeli kazı yöntemlerine denenmiştir.

5.4 T2 Tünelinin 4 Aşamalı Açılması ve Kalota Geçici Radye İnşası

T2 tünelinde oluşan deplasmanların azaltılması amacıyla tünelin açma kademesini 4 kademeye çıkartılarak stros 2 kademede açılmış buna ek olarak kalot tabanına geçici radye yapılmıştır. Aşamaların şematik gösteriminin olduğu Şekil 5.12'de görüldüğü gibidir ve geçici radye stros kazısından sonra sökülecektir. Geçici radyenin tünel stros kazısından önce sökülme durumu incelenmiş fakat daha sonra sökülme durumunda oluşan deplasmanların daha düşük olduğu görüldüğü için geçici radye stros kazısı sırasında sökülmeden sistemde durmasının dahi uygun olacağına karar verilmiştir. Tünel inşa aşamalarına kalot kazısıyla başlanmış daha sonra kalota iksasının yerleştirilmesi sırasında geçici radye de yapılmıştır. Stros kazısıyla devam eden aşamalar Tablo 5.9 da verilmiştir.

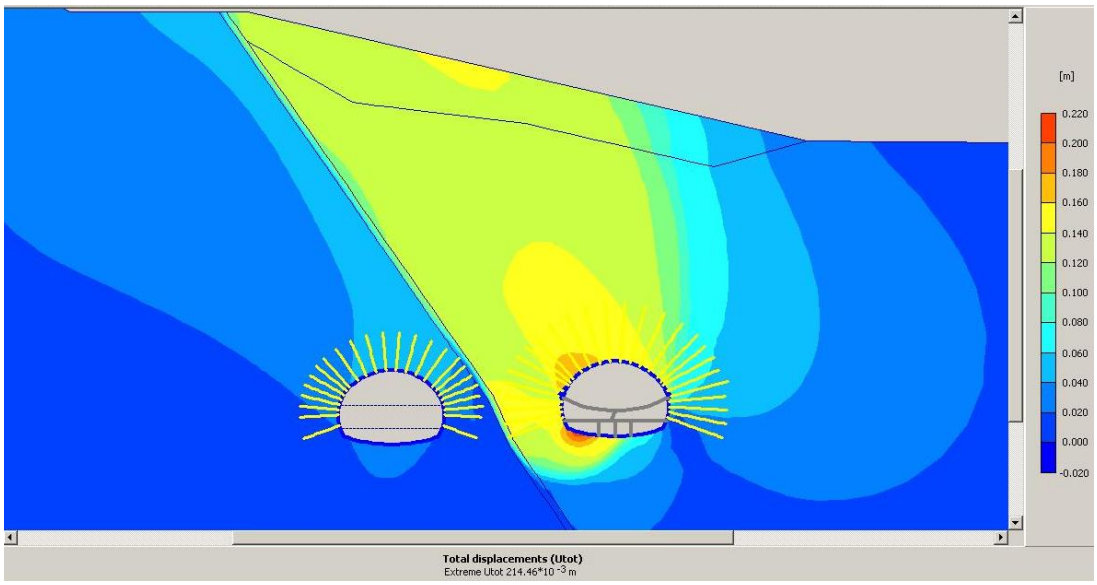


Şekil 5.12: T2 Tüneli 4 kademede açma ve geçici radye uygulaması inşa aşamaları şematik gösterimi

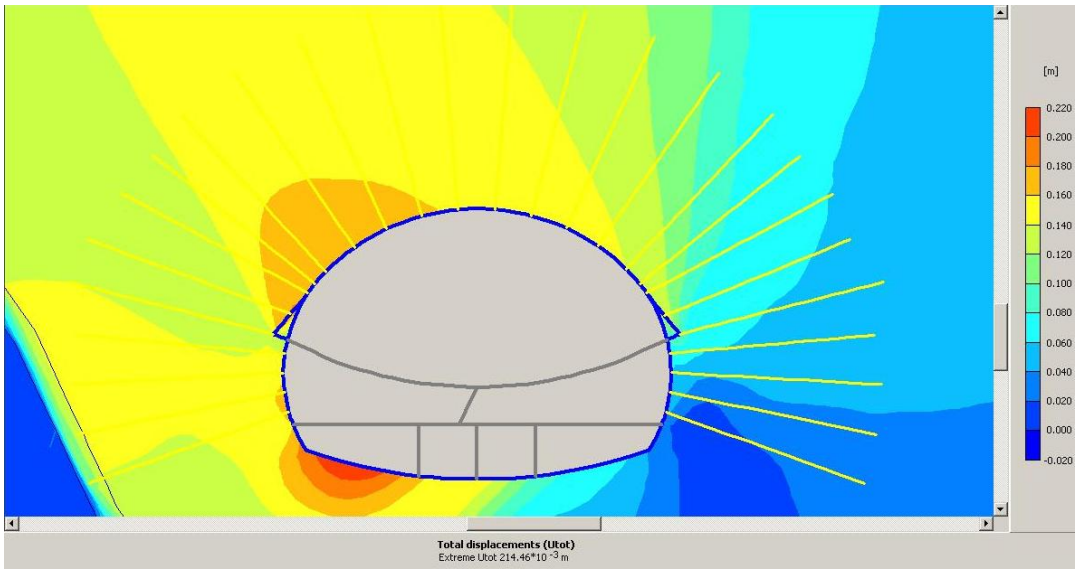
Tablo 5.9: T2 Tüneli 4 kademede açma ve geçici radye uygulaması inşa aşamaları

Aşama No	Açıklama
1	T2 Tünelinin kalot kazısının yapılması
2	T2 Tünelinin kalot geçici kaplamasının ve geçici radyenin yerleştirilmesi
3	T2 Tünelinin stros kazısının sol kısmının yapılması
4	T2 Tünelinin strosun sol kısmının geçici kaplamasının yapılması
5	T2 Tünelinin stros kazısının sağ kısmının yapılması
6	T2 Tünelinin strosun sağ kısmının geçici kaplamasının yapılması ve geçici radyenin sökülmesi
7	T2 Tünelinin radye kazısının yapılması
8	T2 Tünelinin radye betonun dökülmesi
9	T2 Tünelinin kalıcı kaplamasının yapılması

Tünelin bu şekilde açılması durumunda maksimum deplasman değeri 21.4 cm. olmaktadır bu durum Şekil 5.13'de görülmektedir. Kademe sayısının arttırılması ve geçici radye uygulaması toplam deformasyonlarda 8 cm.'ye varan azalmalarla sebep olmuştur. Bir önceki durumla karşılaştırıldığında maksimum deplasmanların görüldüğü yerlerin genel olarak aynı olduğu Şekil 5.14'de görülmektedir. Tünelde seçilmiş olan noktaların inşa aşamalarına karşı yapmış olduğu deplasmanları gösteren grafikler ve kesit tesiri diyagramları ekler kısmındadır.



Şekil 5.13 : T2 Tüneli 4 kademede açma ve geçici radye uygulaması durumundaki deplasmanlar

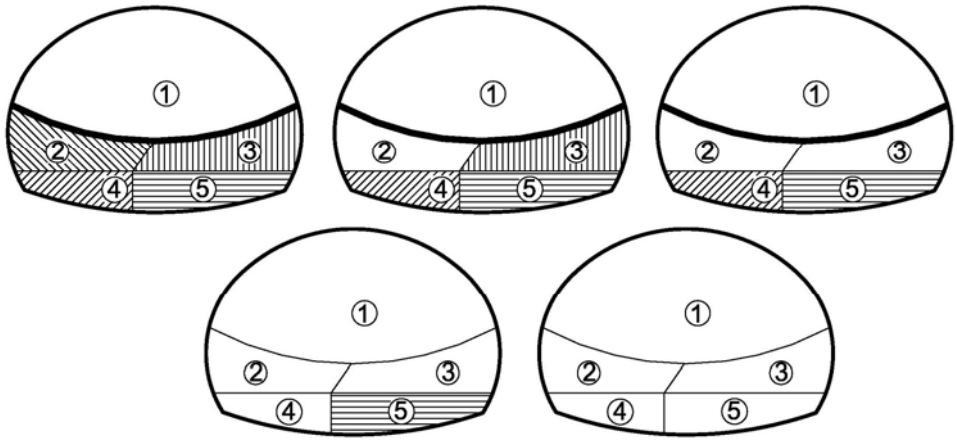


Şekil 5.14: T2 Tüneli 4 kademede açma ve geçici radye uygulaması durumdaki tünel kaplamasındaki deplasmanlar

T2 Tünelindeki deplasman değerlerini azaltmak için değişik kademeli inşa yöntemlerine devam edilmiştir.

5.5 T2 Tünelinin 5 Aşamalı Açılması ve Kalota Geçici Radye İnşası

Bir önceki yüklemedeki deplasman değerinin azalmak için kademe sayısı yükseltilerek radye kısmı 1 aşama yerine 2 aşamada açılmıştır.Şekil 5.15'de kazı aşamaları şematik olarak gösterilmektedir. Tünel inşa aşamaları radye kazısına kadar bir önceki hesaplamayla aynı olup bu aşamadan sonra aşama sayısı arttırılmıştır. Bu hesaplamada dikkate alınan hesap aşamaları Tablo 5.10' da açıklanmaktadır.

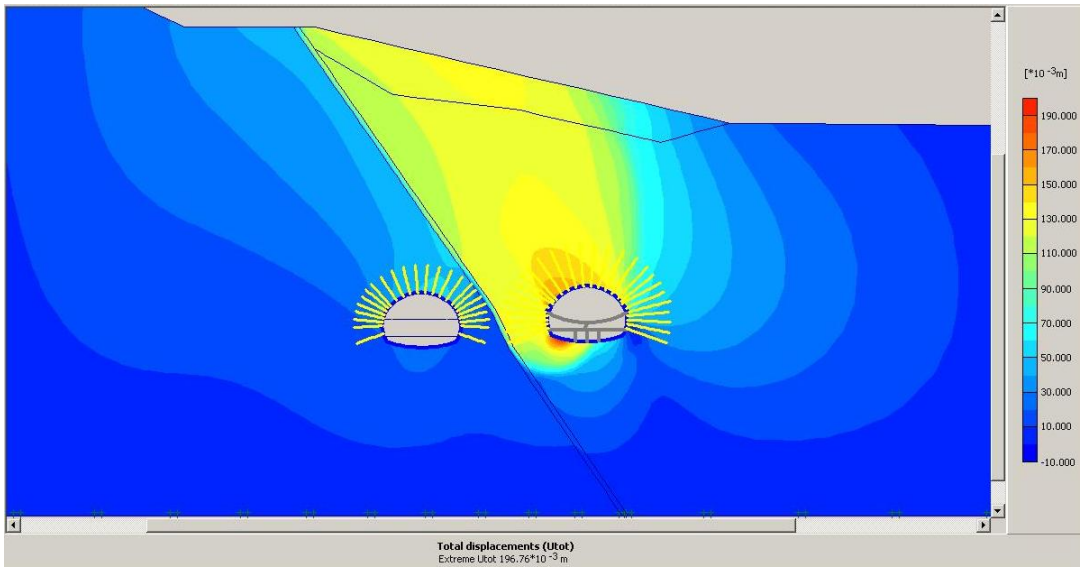


Şekil 5.15: T2 Tüneli 5 kademede açılması ve geçici radye uygulaması inşa aşamaları şematik gösterimi

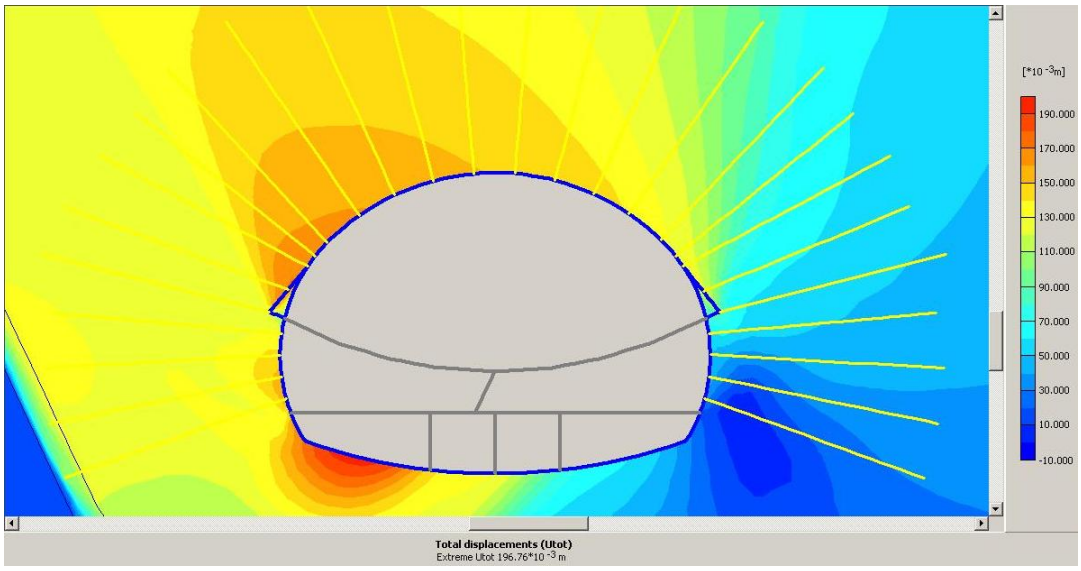
Tablo 5.10: T2 Tüneli 5 kademede açma ve geçici radye uygulaması inşa aşamaları

Aşama No	Açıklama
1	T2 Tünelinin kalot kazısının yapılması
2	T2 Tünelinin kalot geçici kaplamasının ve geçici radyenin yerleştirilmesi
3	T2 Tünelinin stros kazısının sol kısmının yapılması
4	T2 Tünelinin strosun sol kısmının geçici kaplamasının yapılması
5	T2 Tünelinin stros kazısının sağ kısmının yapılması
6	T2 Tünelinin strosun sağ kısmının geçici kaplamasının yapılması ve geçici radyenin sökülmesi
7	T2 Tünelinin radye kazısının sol kısmının yapılması
8	T2 Tünelinin radye sol kısmının geçici kaplamasının yapılması
9	T2 Tünelinin radye kazısının sağ kısmının yapılması
10	T2 Tünelinin radye sağ kısmının geçici kaplamasının yapılması
11	T2 Tünelinin radye betonun dökülmesi
12	T2 Tünelinin kalıcı kaplamasının yapılması

Yukarıda anlatıldığı gibi tünel inşasının yapılması sonucunda tünel yüzeyindeki maksimum deplasman değeri 19.6 cm. olarak bulunmuştur. Şekil 5.16'de görülen bu değer bir önceki hesaplamaya göre 1.8 cm daha az bir deplasman değeri olduğunu göstermiştir. Tünel kaplaması etrafındaki deplasmanları Şekil 5.17'da görülmektedir. Bu hesaplama sonucunda tünel üzerindeki kritik noktaların deplasman değerleri ile ile aşamalar arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler ve tünel kaplaması mesnet tepkisi diyagramları ekler kısmında verilmiştir.



Şekil 5.16: T2 Tüneli 5 kademede açma ve geçici radye uygulaması durumundaki deplasmanlar

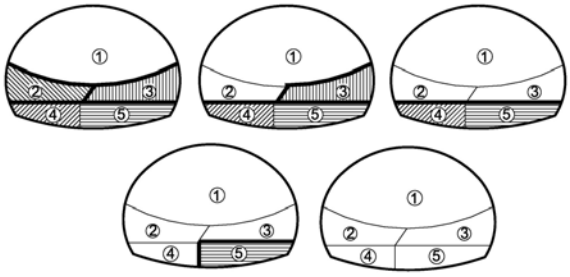


Şekil 5.17: T2 Tüneli 5 kademede açma ve geçici radye uygulaması durumdaki tünel kaplamasındaki deplasmanlar

Bu hesaplama sırasında özellikle stros kazısı sırasında tabanda 20 cm ye varan kabarmaların olduğu gözlenmiştir ve bu olay dikkate alınarak yeni bir analiz yapılmıştır. Bu analiz bir sonraki bölümde detaylı olarak anlatılacaktır.

5.6 T2 Tünelinin 5 Aşamada Açılması ve Kalotla Strosa Geçici Radye İnşası

T2 tünelinin bir önceki bölümde detaylı olarak anlatılan hesaplamasından sonra çıkan neticeler sonrasında tünelin strosun geçici kaplamasının yapılması sonrasında tabanda zemin kabarması ve bunun sonucunda da deplasmanların arttığı görülmüş ve stros tabanına da geçici radye yapılması durumunda deplasmanların daha da azalacağı düşünülmüştür. Bu noktadan ilerleyerek tünelin yine 5 kademede açılmasına fakat kalot geçici radyesine ek olarak stros geçici radyesinin yapılmasına karar verilmiştir. Tünel açım kademeleri şematik olarak Şekil 5.18' de gösterilmiş ve hesaplamalarda kullanılacak adımlar Tablo 5.11'de açıklanmıştır.

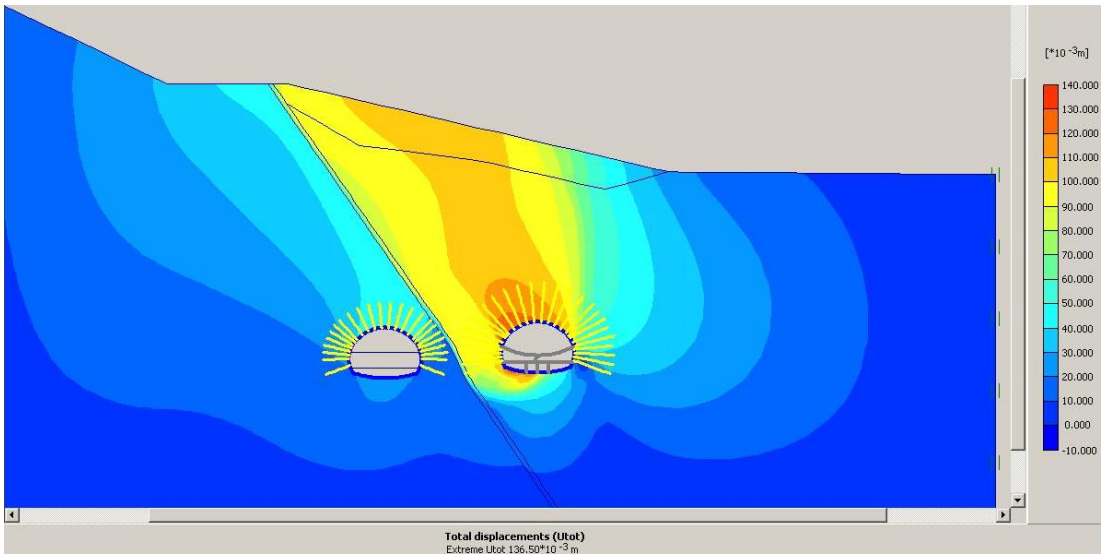


Şekil 5.18: T2 Tüneli 5 kademede açılması ve geçici kalot ve stros radyesi uygulaması inşa aşamaları şematik gösterimi

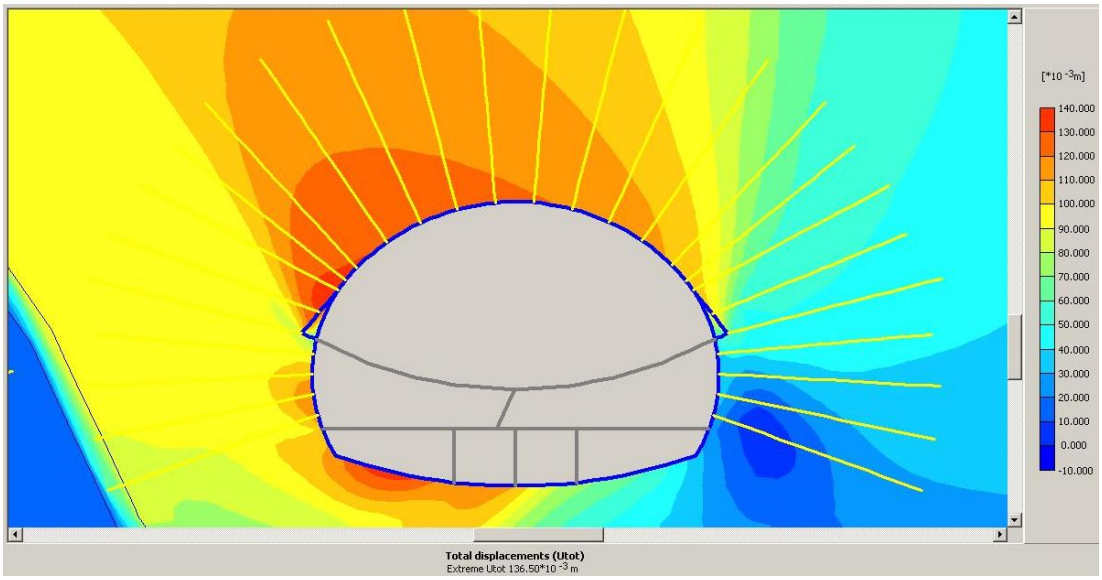
Tablo 5.11: T2 Tüneli 5 kademede açma ve geçici kalot ve stros radyesi uygulaması inşa aşamaları

Aşama No	Açıklama
1	T2 Tünelinin kalot kazısının yapılması
2	T2 Tünelinin kalot geçici kaplamasının ve geçici radyenin yerleştirilmesi
3	T2 Tünelinin stros kazısının sol kısmının yapılması
4	T2 Tünelinin strosun sol kısmının geçici kaplamasının yapılması, kalot geçici taban radyesinin sökülüp, sol kısım stros geçici taban radyesinin yapılması
5	T2 Tünelinin stros kazısının sağ kısmının yapılması
6	T2 Tünelinin strosun sağ kısmının geçici kaplamasının yapılması ve sağ kısmın kalot geçici radyesinin sökülerek sağ kısmın stros geçici radyesinin yapılması
7	T2 Tünelinin radye kazısının sol kısmının yapılması
8	T2 Tünelinin radye sol kısmının geçici kaplamasının yapılması ve geçici stros taban radyesinin sökülmesi
9	T2 Tünelinin radye kazısının sağ kısmının yapılması
10	T2 Tünelinin radye sağ kısmının geçici kaplamasının yapılması geçici stros taban radyesinin sökülmesi
11	T2 Tünelinin radye betonun dökülmesi
12	T2 Tünelinin kalıcı kaplamasının yapılması

Geçici stros radyesi uygulaması stros kazısı sonrası tünelin etrafındaki koruyucu zonun oluşmasını daha kolaylaştıracak bunun sonucu olarak Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin prensiplerinden biriside uygulanmış olacaktır. İlgili aşamaların düzenlendikten sonra sistem girilmesiyle Şekil 5.19 ve Şekil 5.20 da görüldüğü gibi tünelde oluşan toplam deplasman 13.7 cm olarak bulunmuştur. Bu deformasyon değeri bir önceki hesaplamaya göre 6 cm. düşüktür.



Şekil 5.19: T2 Tüneli 5 kademede açma ve kalot ve stros geçici radye uygulaması durumundaki deplasmanlar

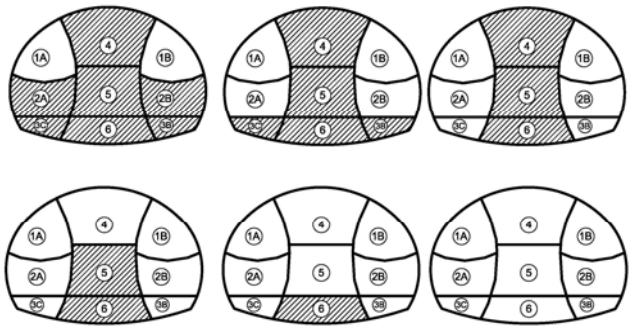


Şekil 5.20: T2 Tüneli 5 kademede açma ve kalot ve stros geçici radye uygulaması durumundaki tünel kaplamasındaki deplasmanlar

Tünel kaplamasındaki kritik noktaların deplasman değerlerinin aşamalara göre değişimini gösteren grafikler ve kesit tesir diyagramları ektedir.

5.7 T2 Tünelinin 6 Aşamada Açılması ve Kalotla Strosa Geçici Radye İnşası

Bu analiz kısmında T2 tüneli bundan önceki yapılmış olan kademe sisteminden farklı olarak önce 2 yan galeri açılması daha sonra orta kısmın açılması şeklinde bir kademeli kazı ile açılmıştır.Şekil 5.21'de bu kademeli kazının şematik olarak gösterimi bulunmaktadır. Tünel inşa aşamaları önce yanlardaki galerilerin kalot kazısı ile başlamakta, bu kısımların geçici kaplaması yapıldıktan sonra yan kısımların stros kazısı ve geçici kaplaması yapılmaktadır. Yan kısımların kalot kazısı ve geçici kaplaması bitirildikten sonra orta kısmın kalotuna geçilmekte ve daha sonra orta kısmın stros ve radye kısımları açılarak tünel inşa edilmektedir. Bu inşa aşamaları Tablo 5.12'de anlatılmaktadır.

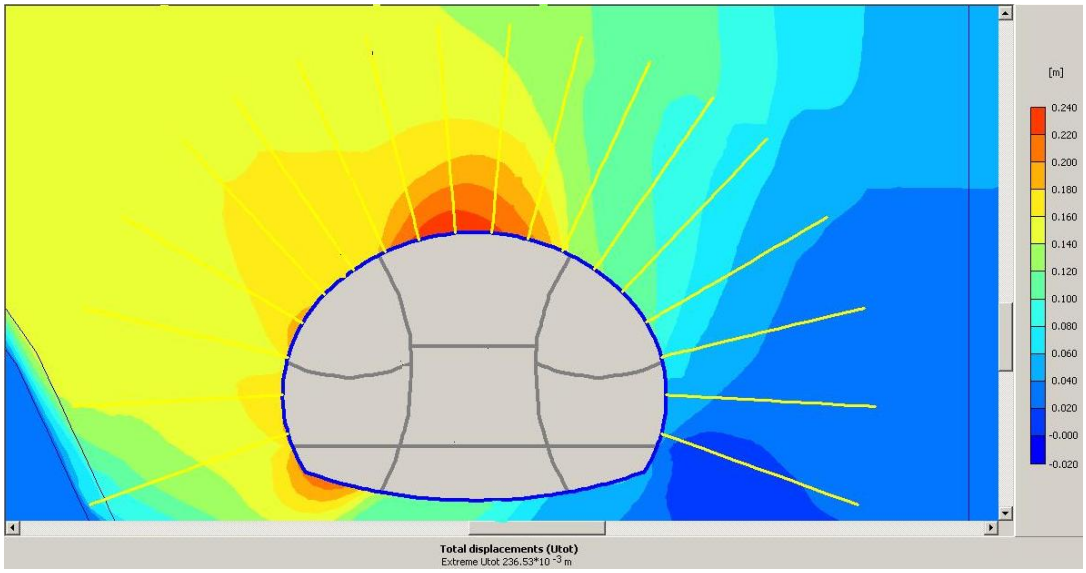


Şekil 5.21: T2 Tünelinin 6 kademede açılması inşa aşamaları şematik gösterimi

Tablo 5.12: T2 Tünelinin 6 kademede açılması inşa aşamaları

Aşama No	Açıklama
1	T2 Tüneli yan kısımlar kalot kazısının yapılması
2	T2 Tüneli yan kısımlar kalot geçici kaplamasının yapılması
3	T2 Tüneli yan kısımlar stros kazısının yapılması
4	T2 Tüneli yan kısımlar stros geçici kaplamasının yapılması
5	T2 Tüneli yan kısımlar radye kazısının yapılması
6	T2 Tüneli yan kısımlar radye betonunun dökülmesi
7	T2 Tüneli orta kısım kalot kazısının yapılması
8	T2 Tüneli orta kısım kalot geçici kaplamasının yapılması
9	T2 Tüneli orta kısım stros kazısının yapılması
10	T2 Tüneli orta kısım stros geçici kaplamasının yapılması
5	T2 Tüneli orta kısımlar radye kazısının yapılması
11	T2 Tünelinin radye betonun dökülmesi
12	T2 Tünelinin kalıcı kaplamasının yapılması

Tünel aşamaları girilip hesaplamaların yapılması sonucu 23.6 cm maksimum deplasman değerine ulaşılmıştır. Şekil 5.22 de görülen bu değer bir önceki analizdeki deplasman değerinden 9.9 cm fazladır. Tünel etrafındaki maksimum deplasmanın olduğu noktaların bir önceki inşa yöntemine göre biraz daha farklı bölgelerde oluştuğu görülmektedir. Bundan önceki analizlerde olduğu gibi tünel etrafındaki noktaların deplasman değerlerinin tünel açım aşamalarına göre değişimini gösteren grafikler ve tünel kaplamalarının kesit tesir diyagramları ekler kısmında verilmiştir.



Şekil 5.22: T2 Tünelinin 6 kademede inşası sonucu oluşan deplasmanlar.

5.8 T2 Tünelinin T1 Tünelinden önce açılması

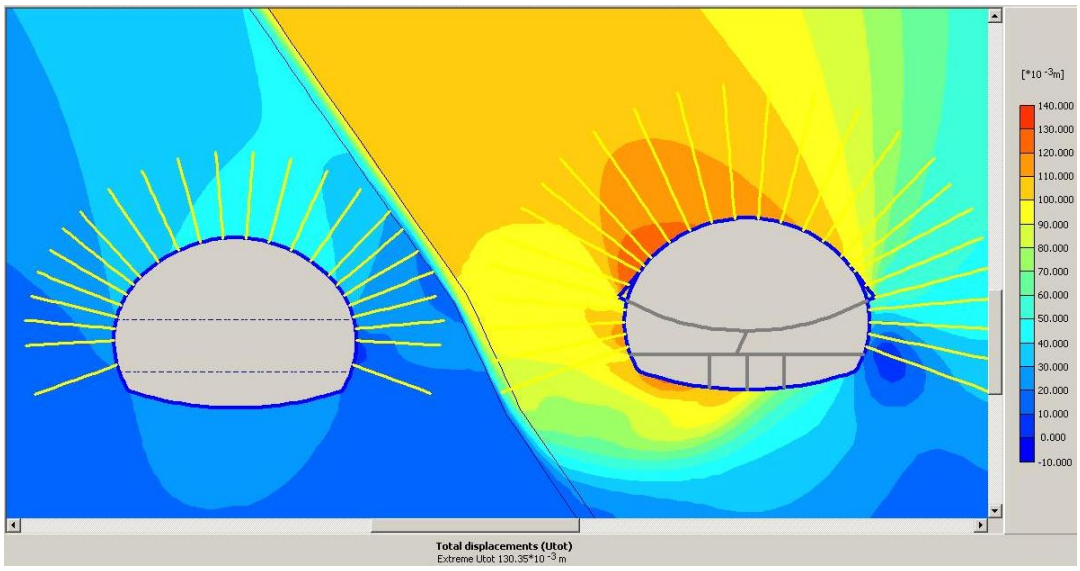
Bundan önce yapılmış olan 6 adet analizini hepsinde önce T1 Tüneli yapılmış olup daha sonra T2 Tüneli yapılmıştır bilindiği üzere tüneller aksları arasında 34.5 m. mesafe vardır. Bu analizde tünellerin yapım sırasının değişmesi durumunda meydana

gelecek deplasmanlar incelenmiş olup tünellerin birbirine olan etkileri ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Yukarıdaki analizlerden en uygun durumun tünelin 5 kademede açılarak geçici kalot ve stros radyesi uygulanması olduğu görülmüştür. Bundan dolayı bu analizde aynı durum incelenecek fakat önce T2 Tüneli yapılacaktır. Analiz aşamalarına T2 tünelinin kalot kazısıyla başlanıp T2 Tünelinin kalıcı kaplamasının yapılmasından sonra T1 tünelinin kalot kazısıyla devam edilmiştir. Bu analiz aşmaları Tablo 5.13'de gösterilmiştir.

Tablo 5.13: T2 tünelinin daha sonra T1 tünelinin açılma durumu inşa aşamaları

Aşama No	Açıklama
1	T2 Tünelinin kalot kazısının yapılması
2	T2 Tünelinin kalot geçici kaplamasının ve geçici radyenin yerleştirilmesi
3	T2 Tünelinin stros kazısının sol kısmının yapılması
4	T2 Tünelinin strosun sol kısmının geçici kaplamasının yapılması, kalot geçici taban radyesinin sökülüp, sol kısım stros geçici taban radyesinin yapılması
5	T2 Tünelinin stros kazısının sağ kısmının yapılması
6	T2 Tünelinin strosun sağ kısmının geçici kaplamasının yapılması ve sağ kısmın kalot geçici radyesinin sökülerek sağ kısmın stros geçici radyesinin yapılması
7	T2 Tünelinin radye kazısının sol kısmının yapılması
8	T2 Tünelinin radye sol kısmının geçici kaplamasının yapılması ve geçici stros taban radyesinin sökülmesi
9	T2 Tünelinin radye kazısının sağ kısmının yapılması
10	T2 Tünelinin radye sağ kısmının geçici kaplamasının yapılması geçici stros taban radyesinin sökülmesi
11	T2 Tünelinin radye betonun dökülmesi
12	T2 Tünelinin kalıcı kaplamasının yapılması
13	T1 Tünelinin kalot kazısının yapılması
14	T1 Tünelinin kalot geçici kaplamasının yerleştirilmesi
15	T1 Tünelinin stros kazısının yapılması
16	T1 Tünelinin stros geçici kaplamasının yapılması
17	T1 Tünelinin radye kazısının yapılması
18	T1 Tünelinin radye betonun dökülmesi
19	T1 Tünelinin kalıcı kaplamasının yapılması

Bu aşamaların oluşturulup hesaplamaların bitişilmesinden sonra T2 Tünelinde maksimum deplasman değeri 13 cm olarak bulunmuştur.Şekil 5.23'.de bu deformasyon değerleri görülmektedir.



Şekil 5.23: T2 Tünelinin inşası daha sonra T1 tünelinin inşası durumu deplasman değerleri

Bu durumda T1 tünelindeki maksimum deplasman değeri ise 4.5 cm olarak bulunmuştur. Özellikle T2 tünelinin T1 üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı buna karşılık önce T2 tünelinin yapılması durumunda T2 tünelinde biraz daha az deplasman değerleri oluştuğu gözlenmiştir.T2 Tünelinin ve T1 Tünelinin yapım aşamalarına göre deplasman değerlerini gösteren grafikler eklerdedir. Tünellerin yapım sırası ve sonucunda oluşan deplasman değerleri Tablo 5.14'de verilmiştir.

Tablo 5.14. Tünellerin inşa sırasının oluşan deplasmanlara etkisi

No	Açıklama	Maksimum Deplasman değerleri (cm)	
		T1	T2
1	T1 Tünelinin inşası	4.0	
2	T1 Tünelinin inşasından sonra T2 Tünelinin inşası	5.2	13.7
3	T2 Tünelinin inşası		12.5
4	T2 Tünelinin inşasından sonra T1 Tünelinin inşası	4.5	13.0

Tünellere yapılan analizler sonrası zemin yüzeyindeki oturmalar da incelenmiştir. En yüksek oturmanın beklendiği zemin yüzeyindeki I noktasının yeri Şekil 5.5'de görülmektedir. Yapılan hesaplamalar ve sonucunda zemin yüzeyinde oluşan oturmalar Tablo 5.15 'de verilmektedir. Bu tablonun tünel inşa aşmalarına göre grafiksel gösterimi ise ekler kısmında verilmiştir.

Tablo 5.15: Tünel inşasının sonucu zemin yüzeyinde oluşan oturmaları

No	Analiz Açılaması	Zemin oturması (cm)	
		Yatay (Ux)	Düşey (Uy)
1	T1 Tünelinin 3 aşamada açılması	3.2	1.0
2	T2 Tünelinin 3 aşamada açılması	9.1	17.0
3	T2 Tünelinin 4 aşamada açılması ve kalota geçici radye inşası	5.2	10.6
4	T2 Tünelinin 5 aşamada açılması ve kalota geçici radye inşası	5.0	9.8
5	T2 Tünelinin 5 aşamada açılması ve kalota ve strosa geçici radye inşası	4.3	7.8
6	T2 Tünelinin 6 aşamada açılması ve kalota ve strosa geçici radye inşası	5.0	9.7
7	5 numaralı durum için T2 tünelinin önce açılması	4.2	7.1

5.9 Tünel Kesitlerinin Statik Kontrolü

Bu kademeler incelendikten sonra en düşük deformasyonun sağlandığı tünelin 5 kademeli açılması ve geçici radye ve geçici stros uygulamasının yapıldığı analiz için kesitlerde verilen ön boyutlandırmanın ve donatı miktarlarının yeterliliği incelenmiştir. Donatı kontrolleri yapılırken Normal kuvvet ve moment diyagramlarından ve kesme kuvveti diyagramlarından faydalanılarak en elverişsiz durumlar incelenmiştir. Özellikle fil ayaklarının olduğu bölgelerde çıkan yüksek kesme kuvvetleri buralarda kesitin genişlemesiyle çözülmüştür.

Normal kuvvet ve eğilme etkisi altında donatı hesaplanırken boyutsuz normal kuvvetin aldığı değerlere göre değişiklik gösteren aşağıdaki formüllerden faydalanılmıştır.

$$n = \frac{N_d}{bhf_{ck}} \tag{5.1}$$

$$m_x = \frac{M_{cap}}{bh^2 f_{ck}} \tag{5.2}$$

$$\mu = \frac{A_s}{bh}\frac{f_{yk}}{f_{ck}} \tag{5.3}$$

$$A_s = k_1 k_2 \mu b h \frac{f_{ck}}{f_{ky}} \tag{5.4}$$

1) n=0.2 hali için

$$m = \left(\mu - 2.92n^2 + 1.48n\right)/ 2.86 \tag{5.5}$$

2) $0.2 \leq n < 0.3$ hali için

$$m = \left(\mu + 0.192\right)/ 2.92 \tag{5.6}$$

3) $0.3 \leq n$ hali için

$$m = \left(\mu - 0.62n^2 - 0.254n + 0.32\right)/ 2.92 \tag{5.7}$$

Bu formüllerde, *b* ve *h* dikdörtgen kolon kesitinin en kesit boyutlarını, A_s toplam boyuna donatı alanını, k_1 ve k_2 donatı yerleşimi ve paspayı oranları ile ilgili düzeltme katsayılarını**,** n boyutsuz normal kuvveti f_{ck} beton karakteristik basınç dayanımı, f_{yk} donatı karakteristik çekme dayanımı göstermektedir (Çakıroğlu, A ve Özer, E 1990).

Kesme kuvveti etkisinde betonarme hesaplar TS500'de belirtilen aşağıdaki formüller kullanılarak yapılmıştır (TS500, 2000).

$$V_r \geq V_d \tag{5.8}$$

ve

$$0.22 \times f_{cd} \times b_w \times d \geq V_d \tag{5.9}$$

olmalıdır.

$$V_r = V_c + V_w \tag{5.10}$$

$$V_c = 0.80 \times V_{cr} \tag{5.11}$$

ve

$$V_w = \frac{A_{sw}}{s} \times f_{wyd} \times d \tag{5.12}$$

$$V_{cr} = 0.65 \times f_{ctd} \times b_w \times d \times \left(1 + \gamma \times \frac{N_d}{A_c}\right) \tag{5.13}$$

γ= 0.07 (eksenel basınç)

γ= -0.30 (eksenel çekme)

Burada Kesme kuvveti hesaplarının sonuçları Tablo 5.16'de gösterilmiştir. A_c beton kesit alanı, f_{cd} beton tasarım basınç dayanımı, f_{ctd} beton tasarım çekme dayanımı, f_{wyd} Kesme donatısı tasarım çekme dayanımı, N_d tasarım normal kuvvet değeri, s etriye aralığı, V_c kesme dayanımına betonun katkısı, V_{cr} beton kesitinin kesmede çatlama dayanımı, V_d tasarım kesme kuvveti, V_r kesme dayanımı b, h, d beton kesiti boyutları γ çatlama dayanımına eksenel kuvvetin etkisini yansıtan katsayıyı göstermek üzere kesme kuvveti hesapları Tablo 5.16 da gösterilmektedir.

Tablo 5.16: Kesitlerin kesme kuvveti etkisindeki donatı kontrolleri

Aşama	bw (cm.)	d (cm.)	N_d (kN/m)	Vd (kN/m)	Vcr (kN/m)	Vc=0.80 Vcr (kN/m)	Mevcut Donatı	Vw (kN/m)	Vr (kN/m)
T2 Kalot	55	100	1600	1303	419.5	335.6	3Φ12/30 (22.6cm.^{2}/m)	980.8	1316.4
T2 Radye	70	100	1256	531	529.8	423.9	2x7Φ16 (56.3cm.^{2}/m)	2443.4	2867.3
T2 Radye	50	100	1764	294	383.0	306.4	Donatı Yok	0.0	306.4
T1	30	100	181	272	225.2	180.2	Donatı Yok	0.0	180.2

Bu kabuller sonrasında kesitlerdeki donatı miktarları aşağıda özetlenmiştir.

T1 Tüneli:

Normal Kuvvet ve Eğilme momenti kontrolünden:

Püskürtme betonu C25/30 dayanımında 30 cm kalınlığındadır ve Çift sıra Φ 6/6-150x150 hasır çelik(1,88 cm²/m) iç ve dış yüzeylere uygulanacaktır.

Kesme Kuvveti kontrolünden:

Püskürtme betonun olduğu yerlerde kesme kuvveti etkisi görülmemiş en yüksek kesme kuvvetinin olduğu radye betonunda 2 x 7 Φ 16/m (56,29cm²/m) uygulanacaktır.

T2 Tüneli:

Püskürtme betonu C25/30 beton kalitesinde olup kalot stros kaplamalarında 45 cm geçici kalot ve stros radyesinde ise 30 cm kalınlığındadır. Normal kuvvet etkisinden Φ 8/8-150x150 hasır çelik çift sıra (3,35 cm²/m) iç ve dış yüzeylere uygulanacaktır. Kesme kuvvetinden dolayı geçici radyede birleşim bölgesine 3Φ12/30 donatı öngörülmüştür.

Radye betonunda ise 2 x 7 Φ 16/m donatı kesme kuvveti etkisinden dolayı öngörülmüştür.

6 SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi kullanılarak tünel kaplama tasarımı yapılması için güncel bir uygulama olan Bouira Tüneli Projesi kapsamında incelenmesi sonucu ve yeraltı yapılarının planlamasının ve tasarımlarının yapılmasının birçok parametreye bağlı olduğunu göstermiştir. Tünellerin tasarımında öncelikle güzergahın geoteknik açıdan çok iyi bir şekilde incelenmesi sonra özelikle zayıf zeminlerin ve kayma bölgelerinin titizlikle belirlenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Burada zeminin özelliklerinin tam olarak ortaya çıkarılmasının yanında enkesit ve boykesitlerinin hassasiyetle çizilmesinin de tünel tasarımı üzerinde önemli bir parametre olduğu ortaya çıkmıştır.

Tünel tasarımın yapılırken uygulanacak tünel inşa yönteminin ve kazı sırasının bilinmesi gerektiği ve tasarımın üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Tasarımda kullanılacak olan kaplama türlerinin fiziksel özelliklerinin ve uygulama sırasının çok iyi bir şekilde bilinmesi gerektiği görülmüştür.

Geometri ve zemin modellemesinin gerçeğe yakın olarak yapılması direkt olarak inşa yöntemini etkilemektedir. Uygulanacak geometrinin belirlenmesinden sonra bu geometrinin doğru bir şekilde modellenmesi zemin parametrelerinin programa doğru bir şekilde girilmesi ve zemin kaplama arasındaki etkileşimin doğru modellenmesinin gerektiği görülmüştür.

Tünel inşa aşamalarındaki kademelerin sayısının, geometrisinin ve uygulama sırasının oluşacak deformasyonları direk olarak etkilediği görülmüştür. Aynı açım geometrisi takip edildiğinde kademe sayısının arttırılmasının oluşacak olan deplasmanları düşürdüğü görülmüştür. Farklı parçalı kazı geometrisi kullanılarak yapılan son analizde daha fazla deplasman çıkması durumu tünel kademe sayısıyla birlikte kademelere nereden ve hangi geometriyle başlanacağının deplasman değerlerine etkisi olduğunu göstermiştir.

Tünel inşası sırasında uygulanan geçici radye gibi yapıların tünelde oluşacak deplasmanların azaltılmasını sağladığı görülmüştür. Bu yapılar tünel etrafındaki

kemerlenmeyi daha kolay sağlamakla birlikte tünel etrafındaki koruyucu zonun daha kolay oluşmasını sağlamaktadır.

Genel olarak T2 tünelinin deplasman değerleri T1 tüneline göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Tünellerin açıldığı zemin özellikleri ve arada bulunan kayma bölgesi buna etkili olmuştur. Tünellerin yan yüzeylerinde T1 ve T2 Tünellerinde kaplamanın kayma bölgesine yakın olduğu tarafta deplasman değerlerinin diğer tarafa göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan değişik kademeli kazılarda deplasman değerleri değişirken maksimum deplasmanın olduğu bölgeler genellikle aynı kalmıştır. T1 ve T2 tünelinin inşası sırasında stros geçici kaplamasını yapılmasından sonra bu bölgede tabandaki zeminde kabarma görülmüş, bu aşamada stros tabanına yapılan püskürtme beton uygulaması faydalı sonuçlar vermiştir.

Tünellerin birbirlerine olan etkileri incelenmiş ve yapım sırasının değişmesi durumunda ortaya çıkacak değişiklikler araştırılmıştır. Tünelin yapılmasından sonra diğerinin yapılması durumunda ilk tünelde de ekstra deplasmanlar olduğu görülmüştür.

Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminin prensiplerinden biri olan tünel geometrisinde köşelerden kaçılınarak elips veya yuvarlak kesitlerden seçilmesinin gerilme yoğunlaşmalarını azalttığı hesaplar sonucunda da görülmüştür. Tünel inşası sırasında ara aşamalarda yapılan köşeli geometride açılma durumlarında köşelerde çok yüksek eğilme momenti ve kesme kuvveti değerlerine karşılaşılmıştır. Tünellerde yapılan fil ayağı uygulaması yapılarak kesitlerin genişletilmesinin bu bölgelerde oluşan kesme kuvvetlerinin yenilmesinde faydalı olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak bu çalışmada kullanılan Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi prensiplerine uyularak yapılan tünel tasarım ve uygulamalarında tecrübe ile birlikte sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan tasarımlar tünelin üzerine gelecek olan etkilerin belirlenmesinde faydalı olmuştur.

KAYNAKLAR

Bozkurt, M., 1969. Tüneller- Ders Notları, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul

Brinkgreve, R.B.J. and Broere, W., 2004. Plaxis Reference Manual, Delft University of Techology and Plaxis b.v., Netherlands

Çakıroğlu, A. ve Özer, E., 1990 Dikdörtgen ve daire betonarme kesitlerdetaşıma gücü formülleri ve yaklaşık mertebeleri*, İ.M.O. Teknik Dergi*, 1, 25-48.

Duddeck, H., 1988. Guidelines for the Design of Tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **3**, 237-249

EM 1110-2-2901, 1997. Engineering and Design Tunnels and Shafts In Rock, *U.S Army Corps of Engineers, Washington*

Fulton, R., Schenk, G., 1993. Two Firsts in Tunneling in Canada*, Rapid Excavation and Tunneling Conference*, AIME and ASCE, Boston, June 1993, s 274-292

Geoconsult/Tefken Impersit., 1994, Training Lectures on Engineering Geology and NATM Tunnelling, KGM, Ankara

Gnilsen, R., 1989**,** Numerical Methods, Underground Structures: Design and Instrumentation, Eds. Sinha, R. S., *Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier, Amsterdam

Heflin, L., R., Wagner, H. ve Donde P., 1991. U.S. Aproach to Soft Ground NATM*, Rapid Excavation and Tunneling Conference*, AIME and ASCE, Boston, June 1991, s 274-292

İncecik, M., 1986, Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemine Uygun Kaplama Hesapları, *Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşası Semineri*, Cilt II D.S.İ., Adana, 5-9 Mayıs

Kolymbas, D., 2005, Tunneling and Tunnel Mechanics, Springer, Berlin.

Kovari, K., 2003. History of Sprayed Concrete Lining Method-part I: Milestones Up To 1960s, Tunnelling and Underground Technology, **18** ,57-69

Kovari, K., 2003. History of Sprayed Concrete Lining Method-part II: Milestones Up To 1960s, Tunnelling and Underground Technology, **18** ,71-83

Leca, E., 1989. Analysis of NATM and Shield Tunneling in Soft Ground, *Phd Thesis*, Virginia Polytechnic Institude and State Universiy, Virginia

Önalp.A., 1983. İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi, *Cilt 2*, Trabzon, KTÜ Yayınları

Özkan, İ ve Erdem, B., 2002. Makaslama Dayanımı Testi Üzerine Paramertrik Analizler, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi,**4,** 81-101

Pischinger, G., 2003, Tunnels De Bouira Geological Report ,Geoconsult, Salzburg

Sauer, G., 1990. NATM in Soft Ground, *International Symposium on Unique Underground Structures, Denver, June 12-15*

Singh, B. and Goel, R. K., 2006, Tunnelling in Weak Rocks, Elsevier, Oxford

Sinha, R.S., 1989. Underground Structures: Design and Instrumentation *Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier, Amsterdam

TS-500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları. Enstitüsü,* Ankara

Vardar, M., 1979 Yeraltı Yapıları Mekaniğinde Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Ana İlkeleri , Ankrajlar ve Boyutlandırması, D.S.İ., Ankara

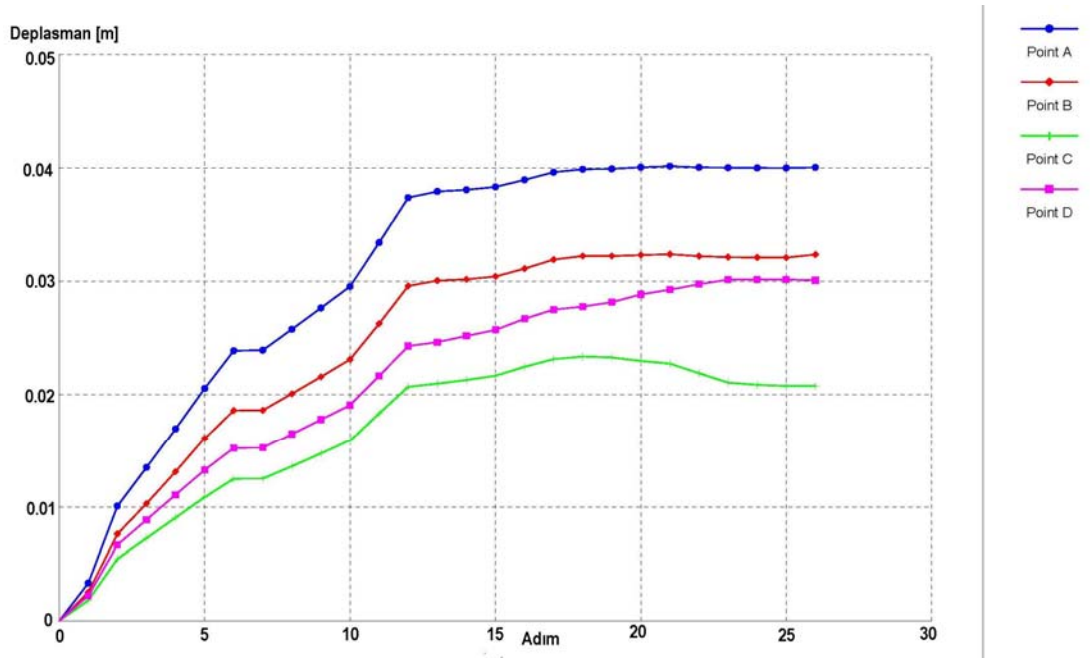
Vardar, M., 1985. Sürtünmeli Çelik Bağların Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde NATM kullanılabilme Olanakları, *Kaya Mekaniği Bülteni, İstanbul, **3,** 35-44*

Whittaker, B.N. and Frith, R., **C,** 1990, Tünnelling, Design, Stability and Construction, *Institution of Mining and Metalurgy*

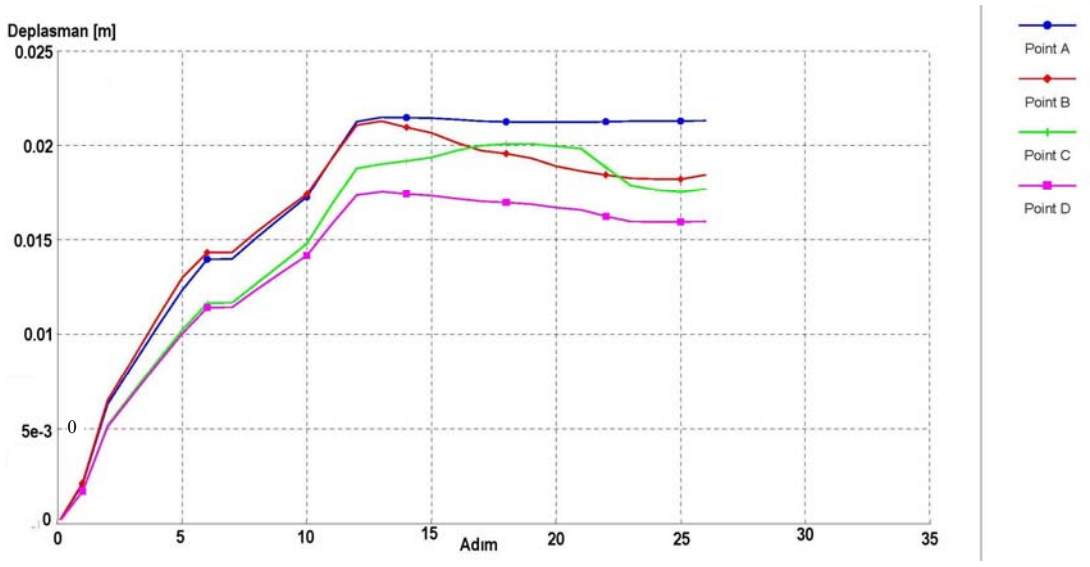
Taşlıca H., 1993, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi, *Tünelcilik Semineri,* Ankara, 5-12 Ocak

EKLER

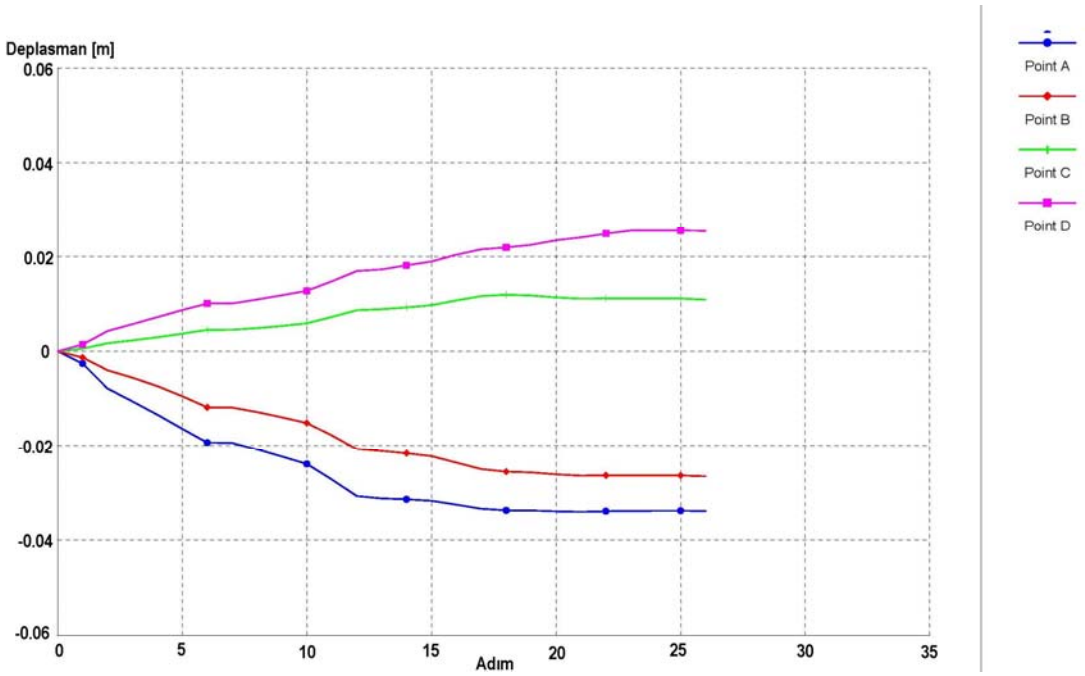
EK-A T1 Tünelinin 3 kademede açılma durumu, deplasman grafikleri ve kesit tesirleri



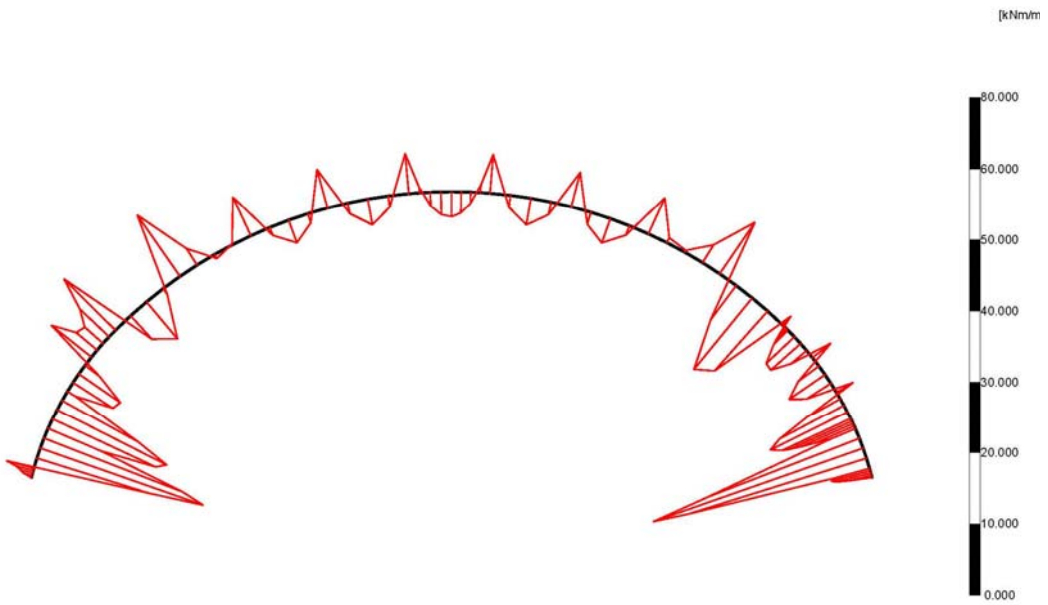
Şekil A.1: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, toplam deplasmanlar



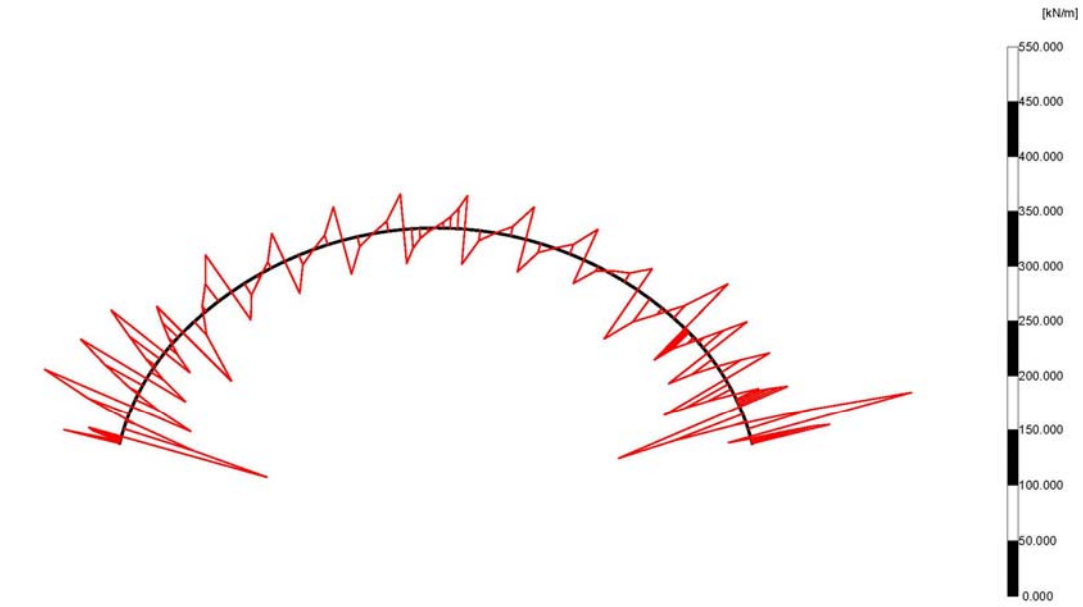
Şekil A.2: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, yatay deplasmanlar



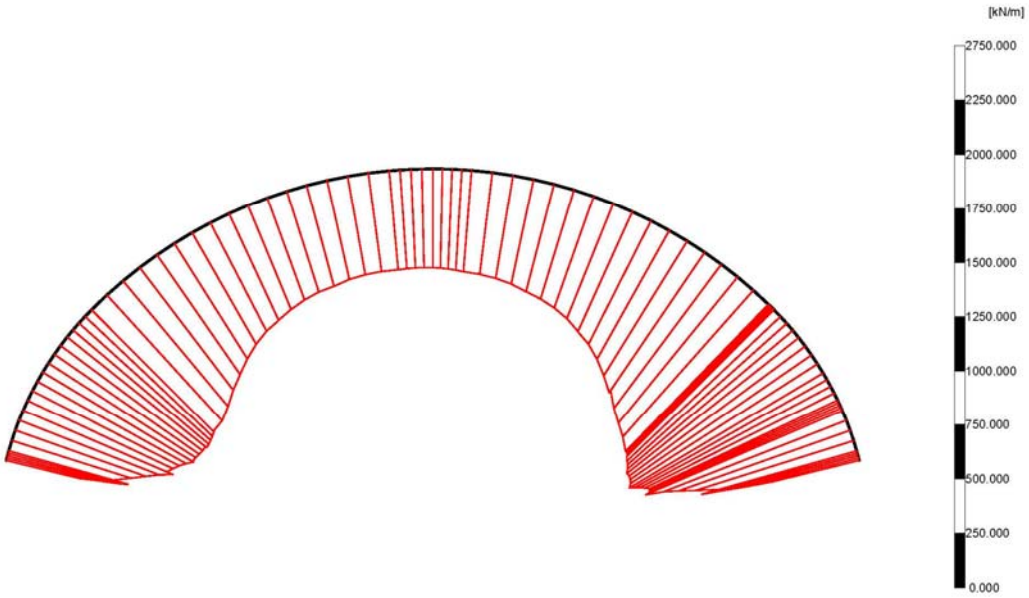
Şekil A.3: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, düşey deplasmanlar



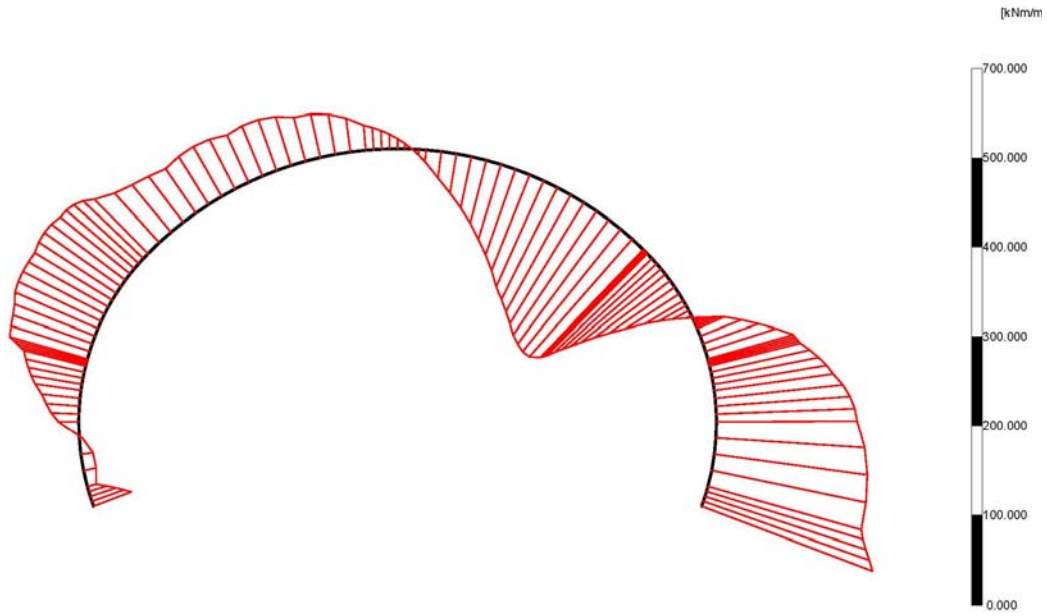
Şekil A.4: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, kalot aşaması moment diyagramı



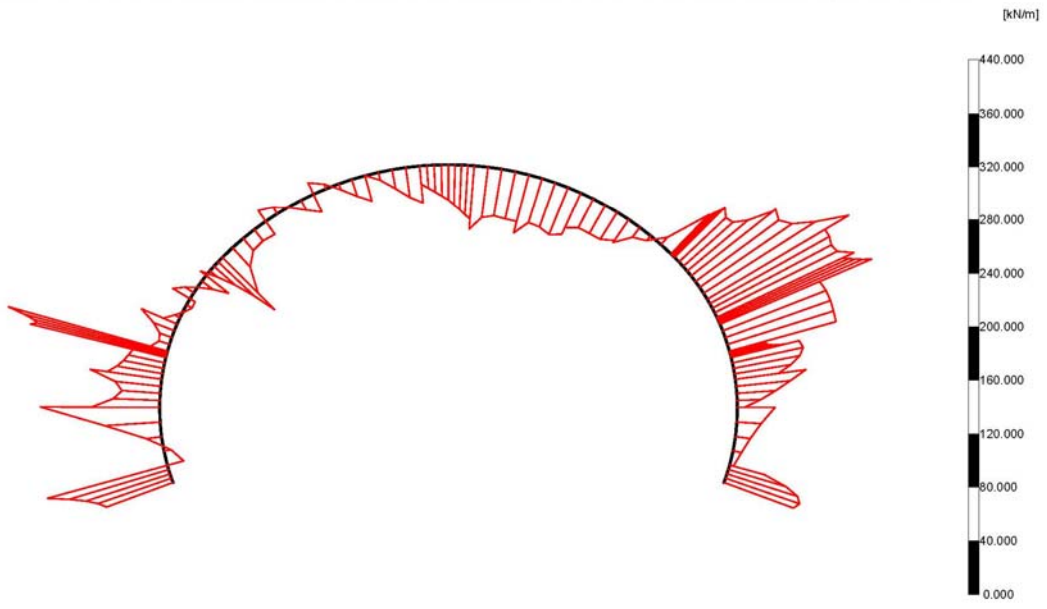
Şekil A.5: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, kalot aşaması kesme kuvvet diyagramı



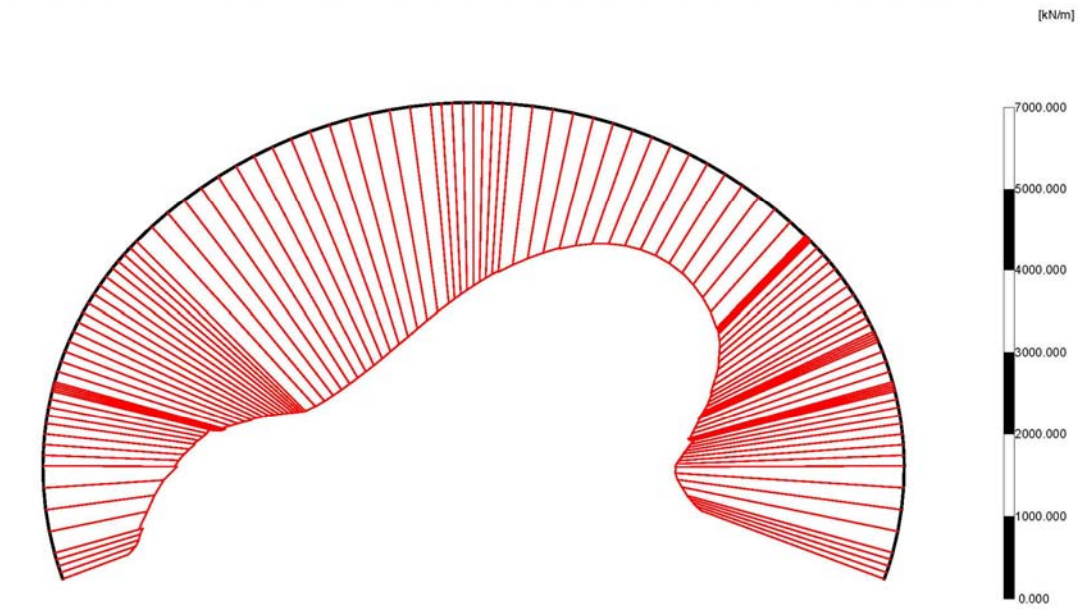
Şekil A.6: T1 3 Tünelinin kademede açma durumu, kalot aşaması normal kuvvet diyagramı



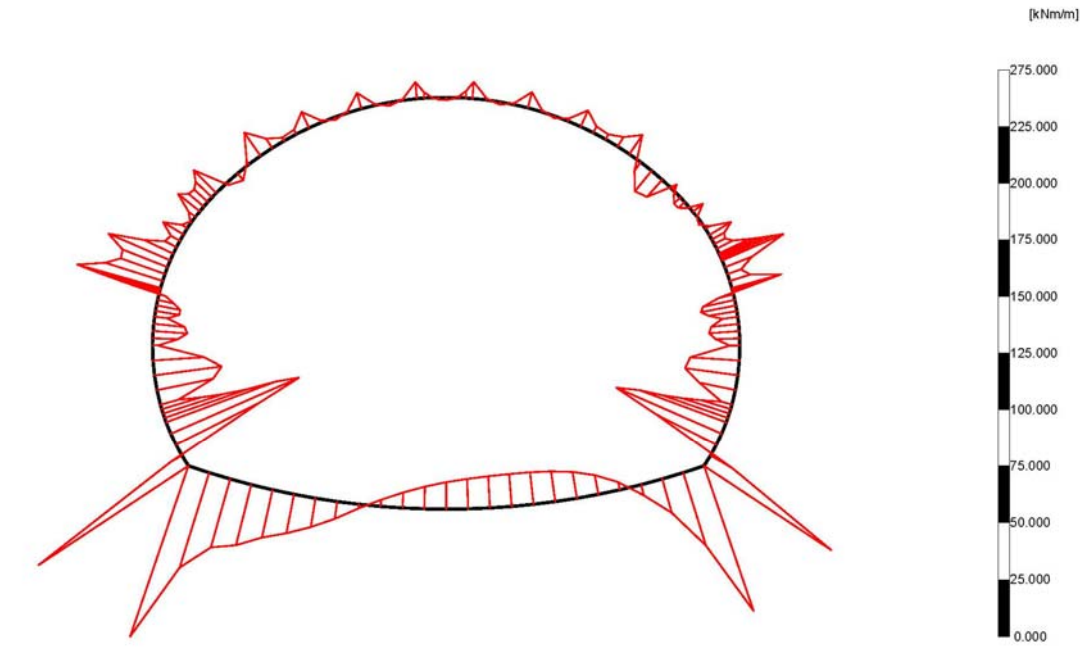
Şekil A.7: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, stros aşaması moment diyagramı



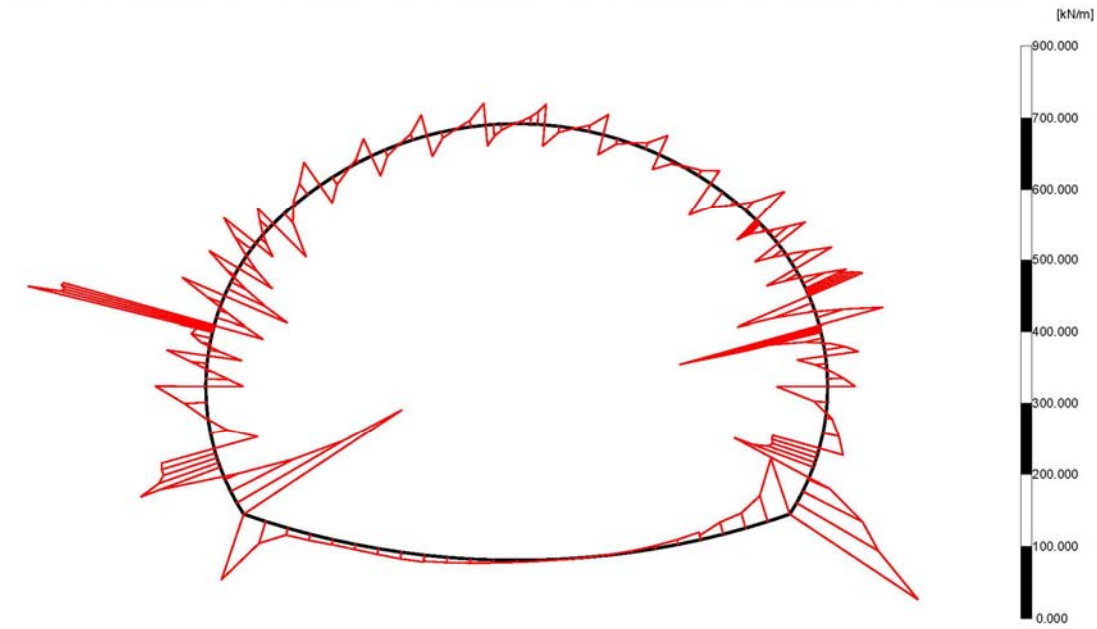
Şekil A.8: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, stros aşaması kesme kuvveti diyagramı



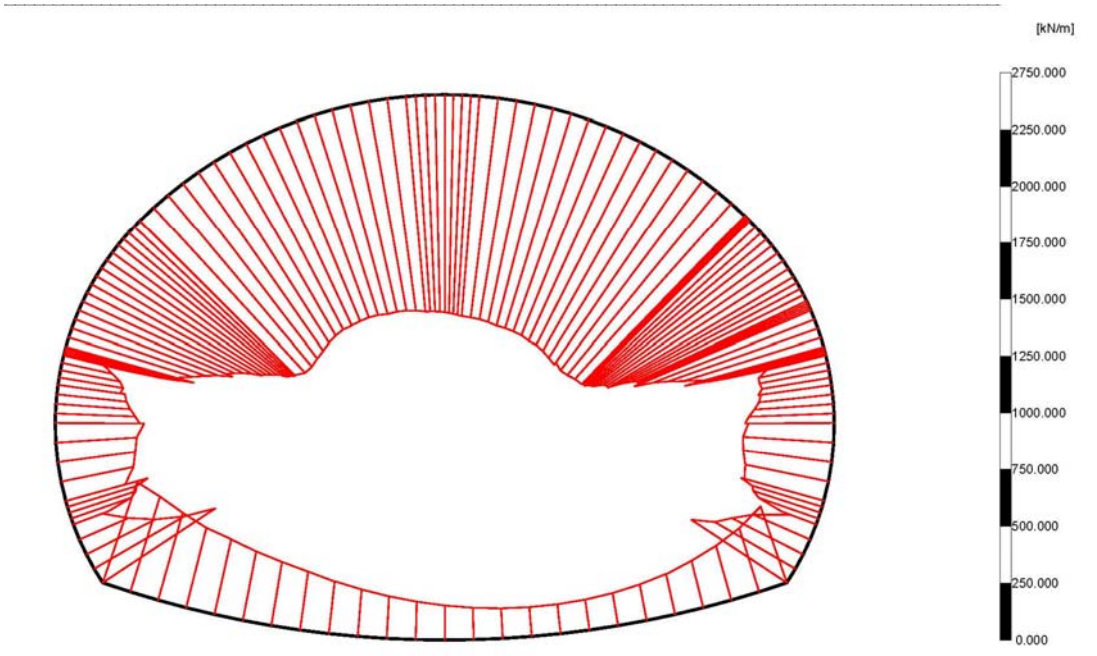
Şekil A.9: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, stros aşaması normal kuvvet diyagramı



Şekil A.10: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, radye betonu aşaması moment diyagramı

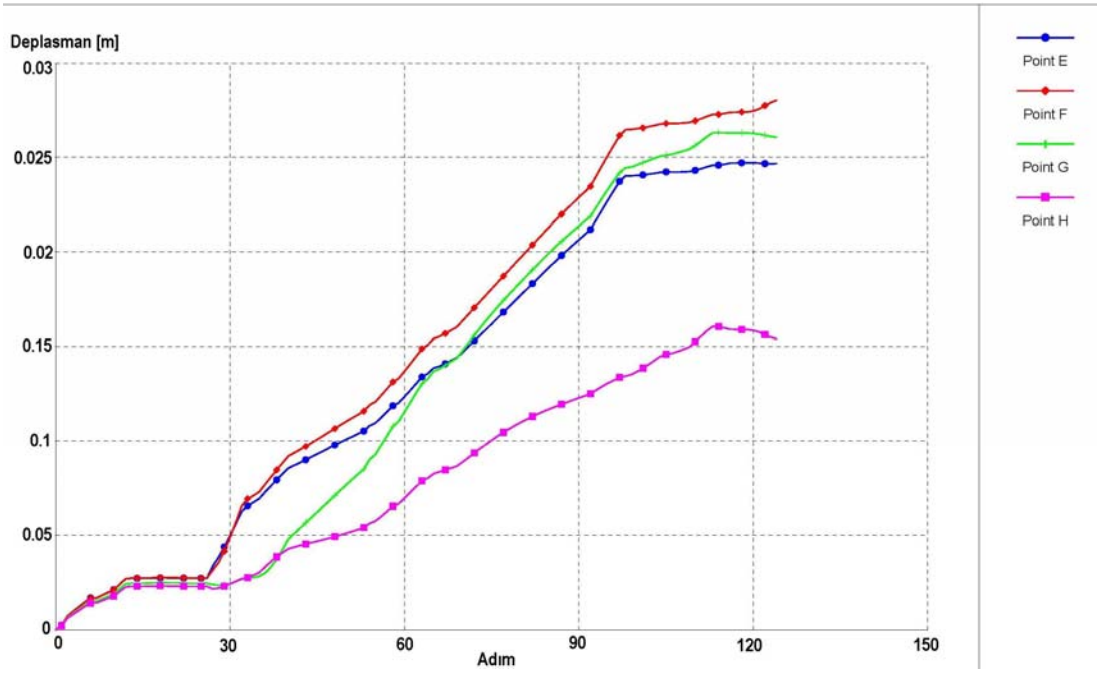


Şekil A.11: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, radye betonu aşaması kesme kuvvet diyagramı

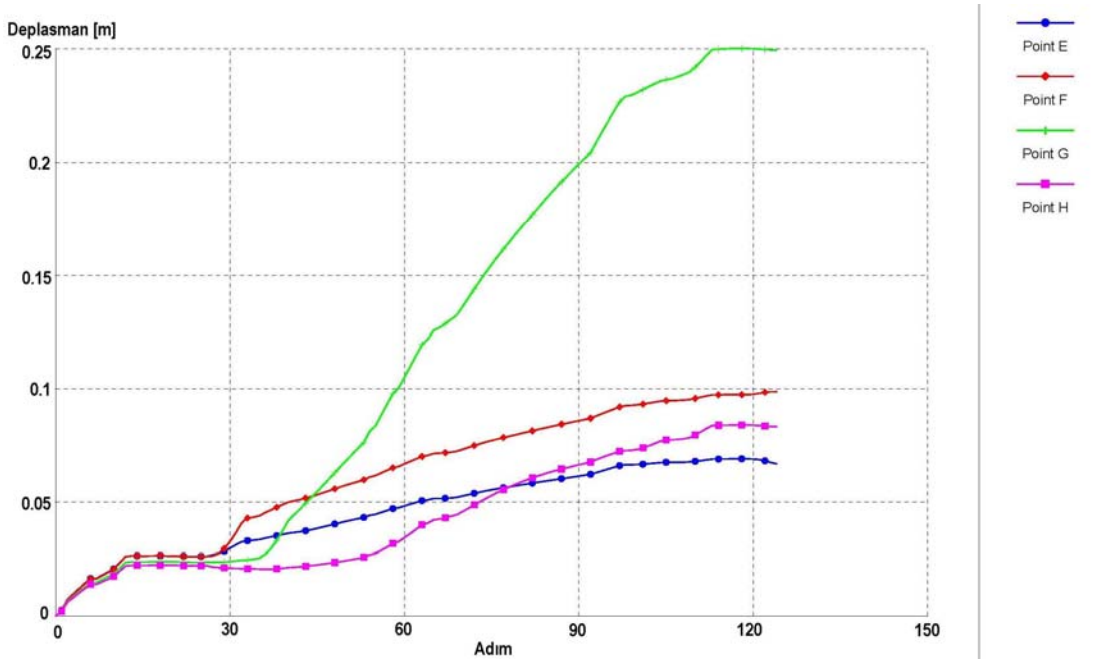


Şekil A.12: T1 Tünelinin 3 kademede açma durumu, radye betonu aşaması normal kuvvet diyagramı

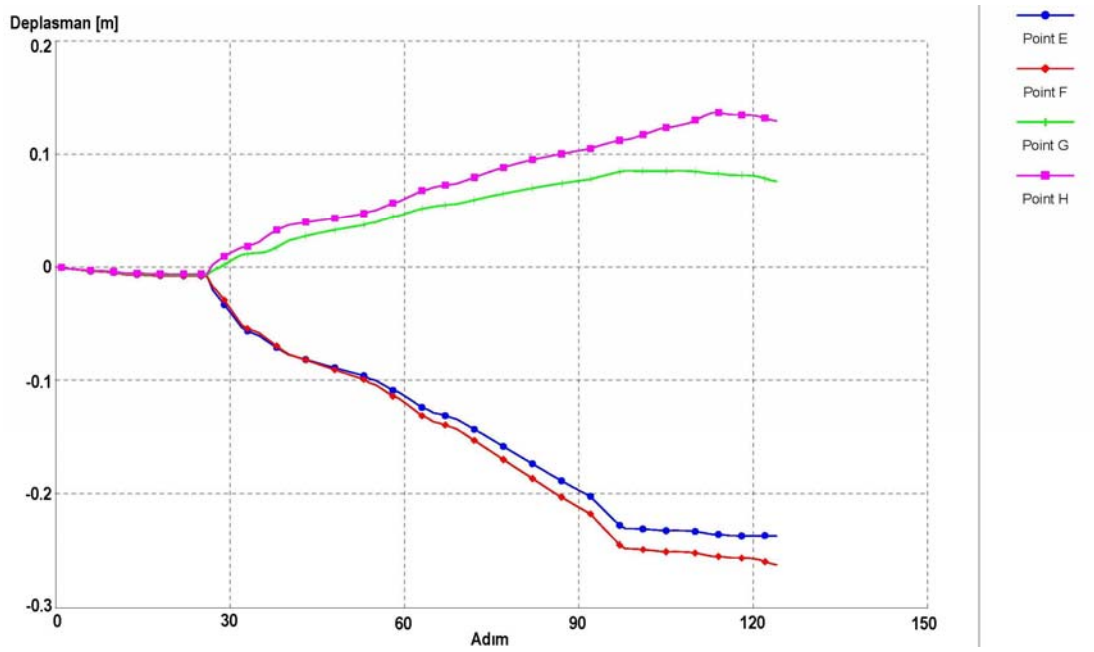
EK-B T2 Tünelinin 3 kademede açılma durumu, deplasman grafikleri ve kesit tesirleri



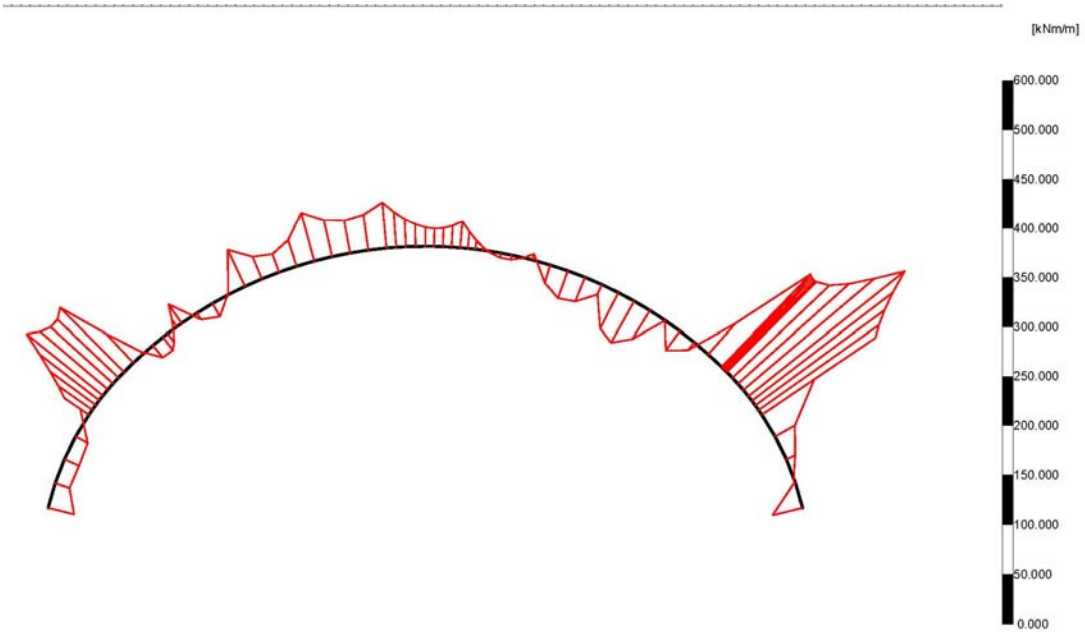
Şekil B.1: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, toplam deplasmanlar



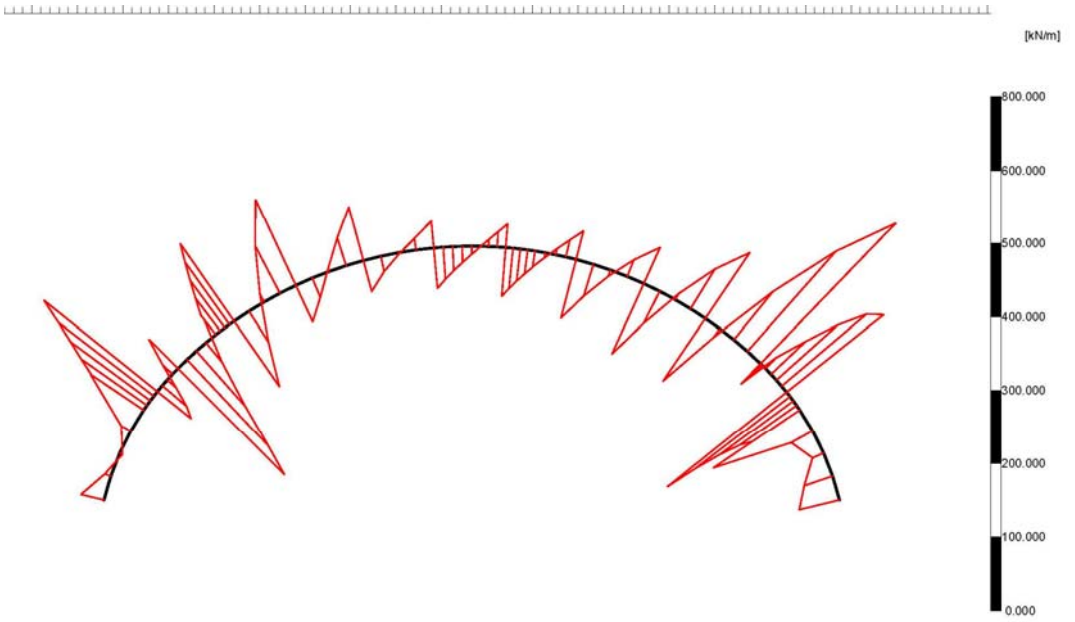
Şekil B.2: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, yatay deplasmanlar



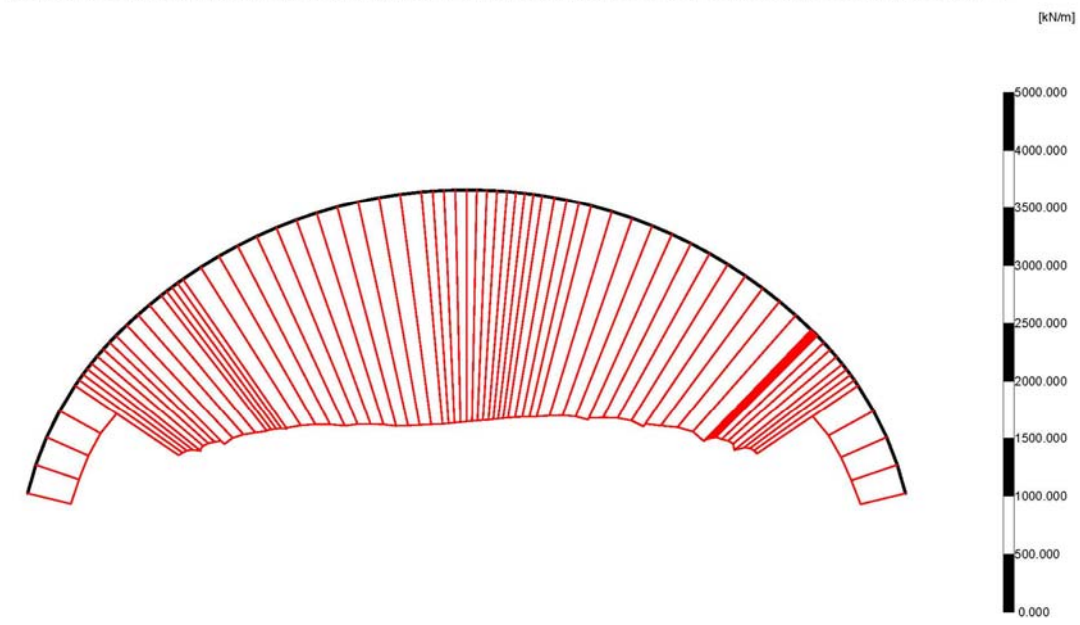
Şekil B.3: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, düşey deplasmanlar



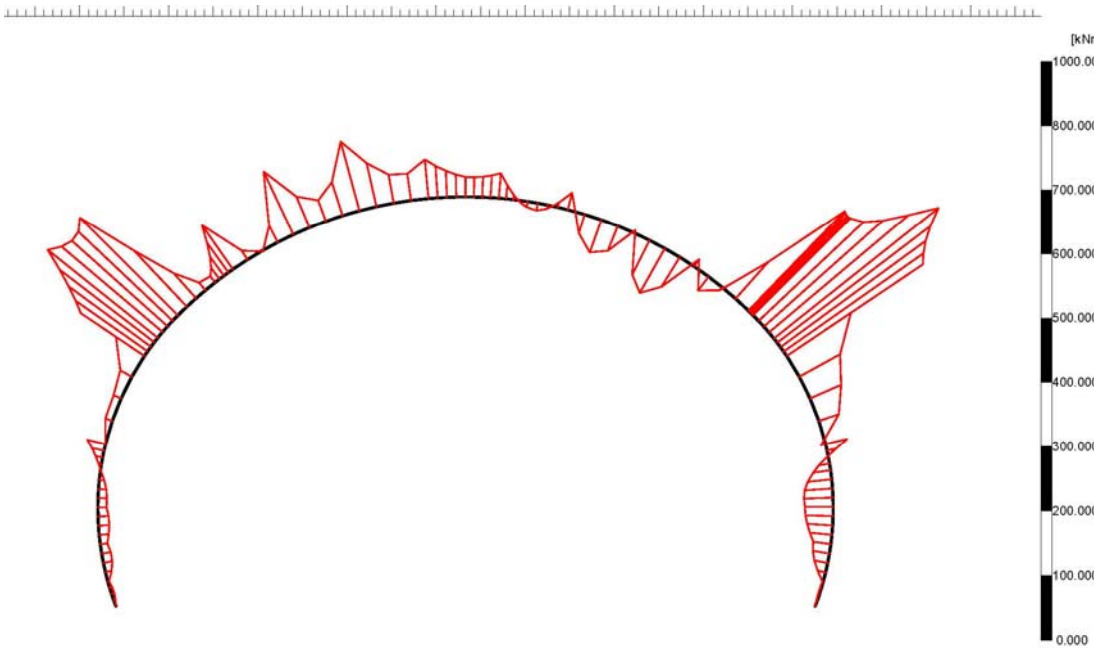
Şekil B.4: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, kalot aşaması moment diyagramı



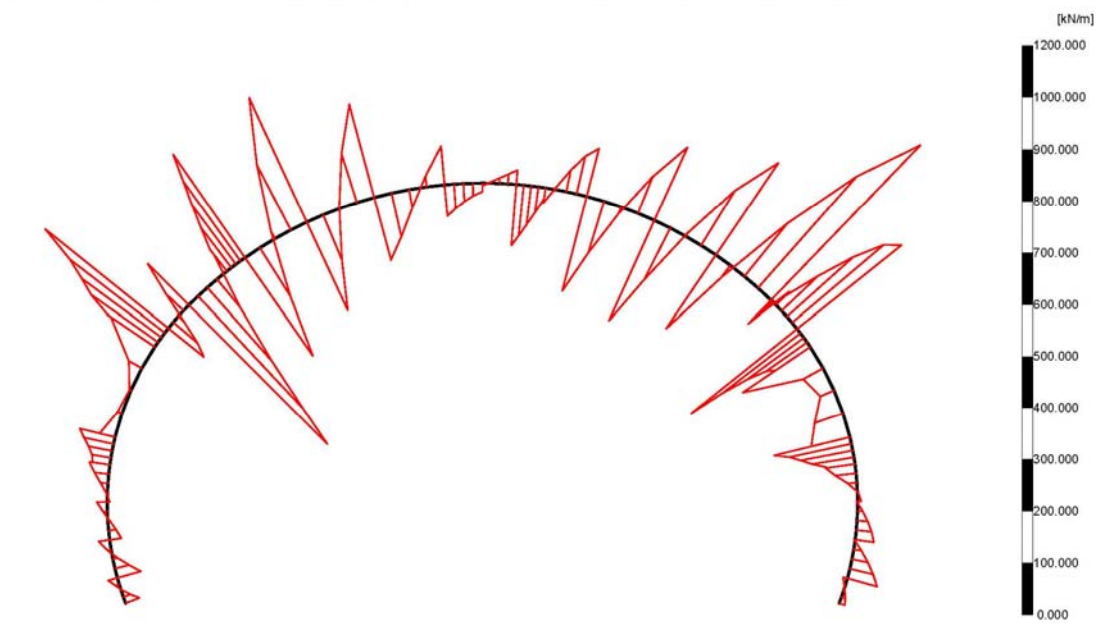
Şekil B.5: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, kalot aşaması kesme kuvvet diyagramı



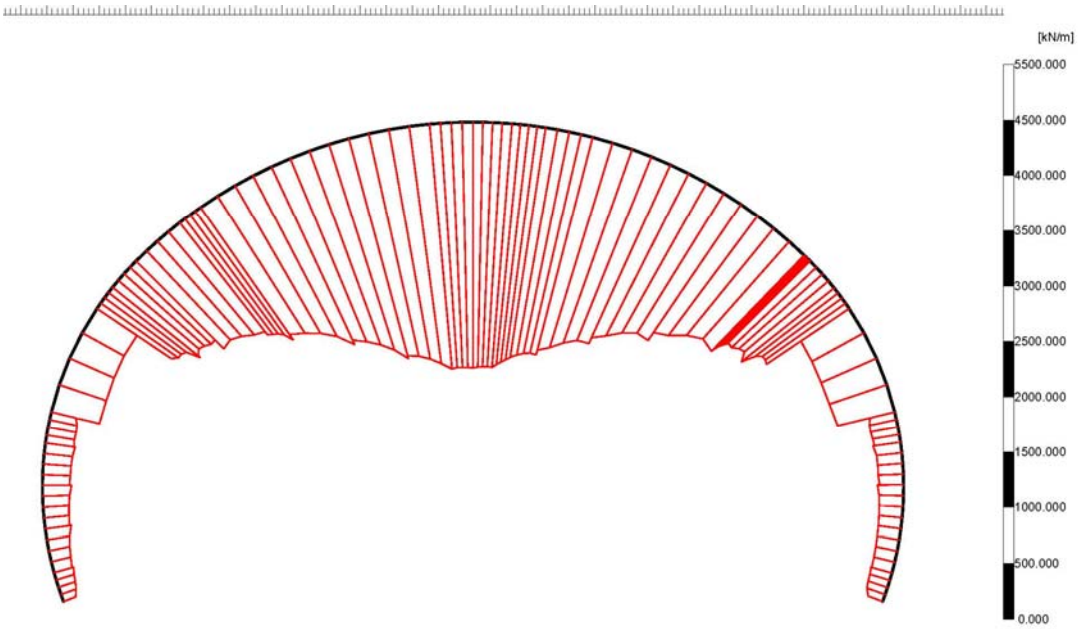
Şekil B.6: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, kalot aşaması normal kuvvet diyagramı



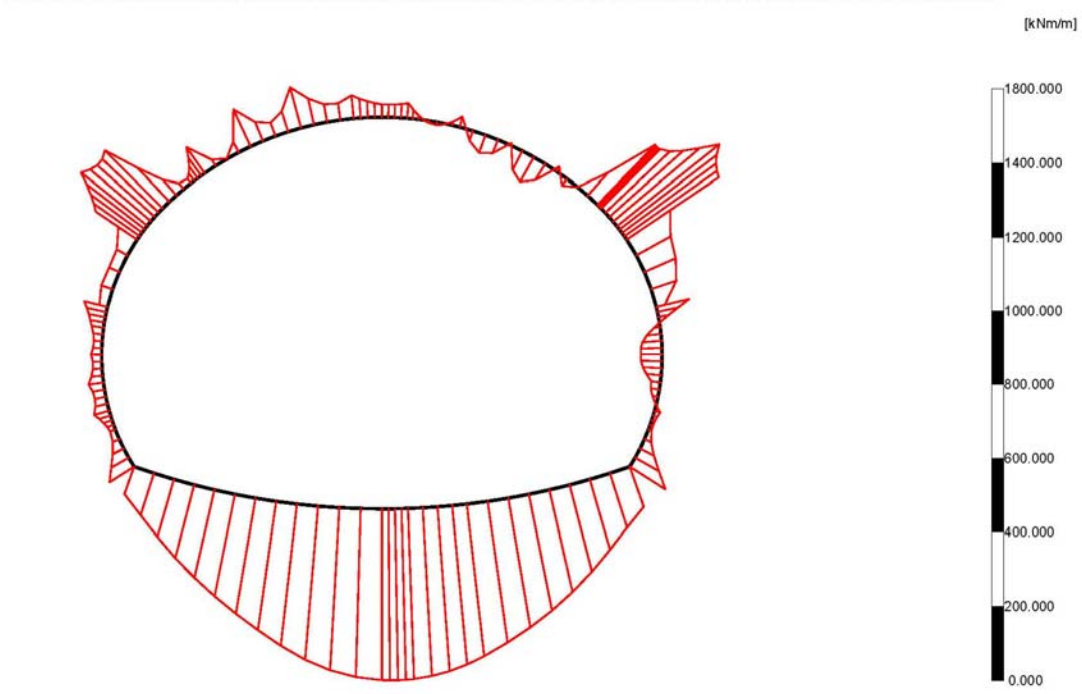
Şekil B.7: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, stros aşaması moment diyagramı



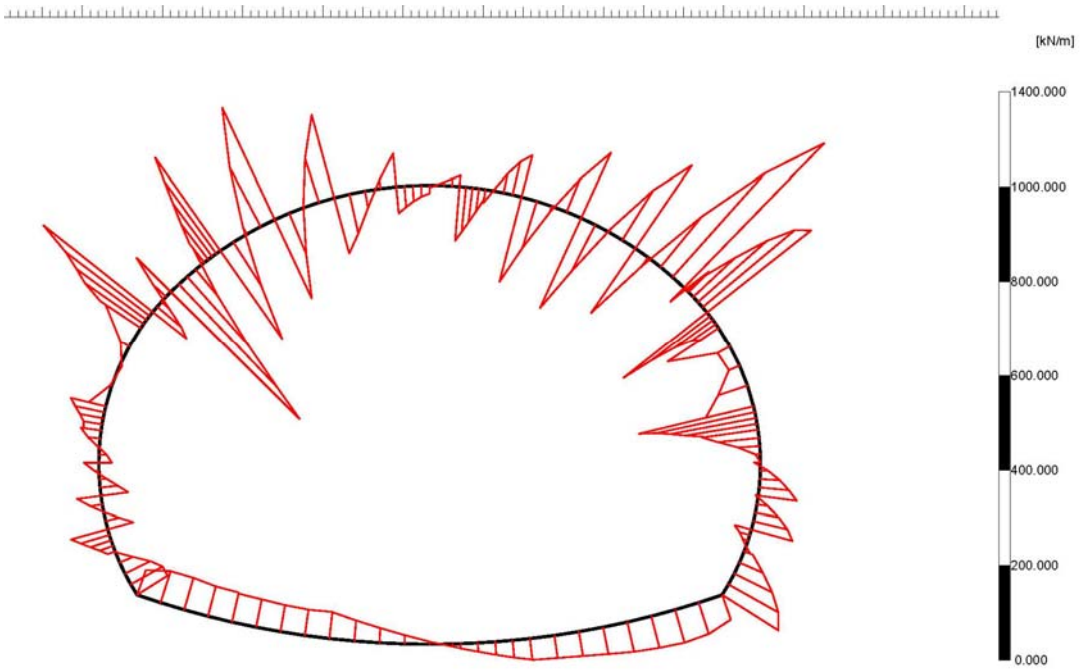
Şekil B.8: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, stros aşaması kesme kuvveti diyagramı



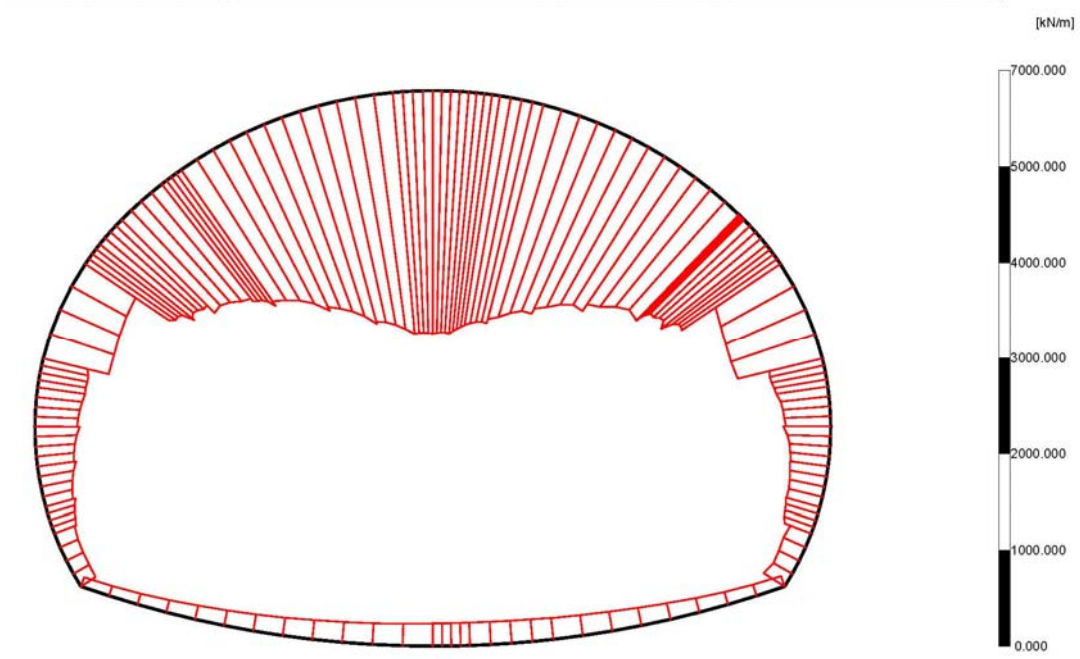
Şekil B.9: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, stros aşaması normal kuvvet diyagramı



Şekil B.10: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, radye betonu aşaması moment diyagramı

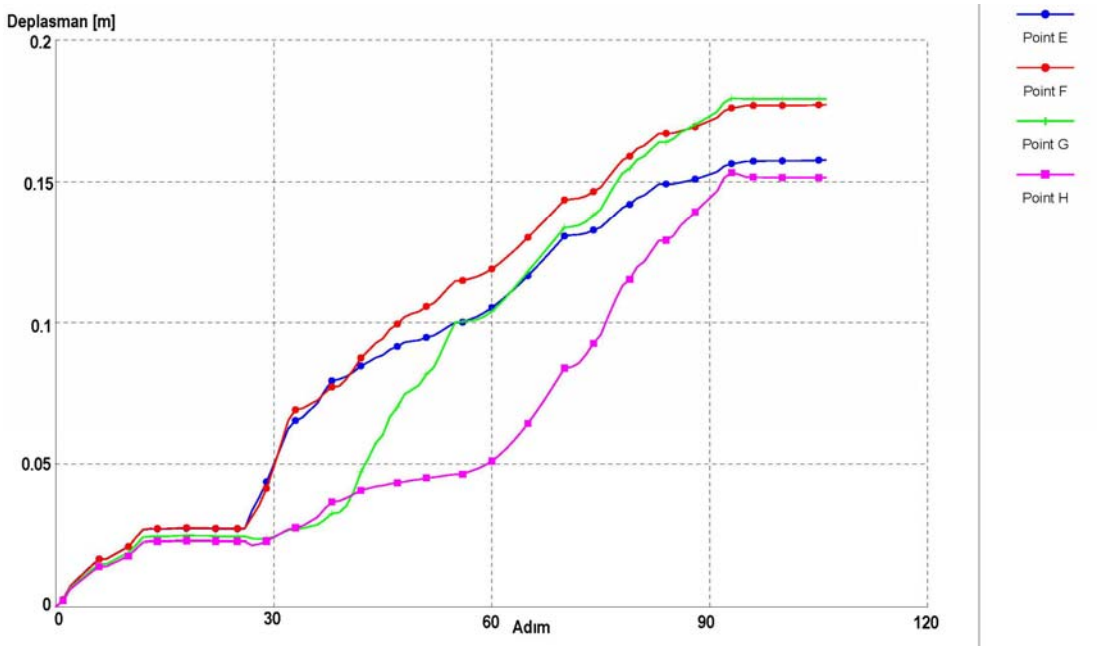


Şekil B.11: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, radye betonu aşaması kesme kuvveti diyagramı

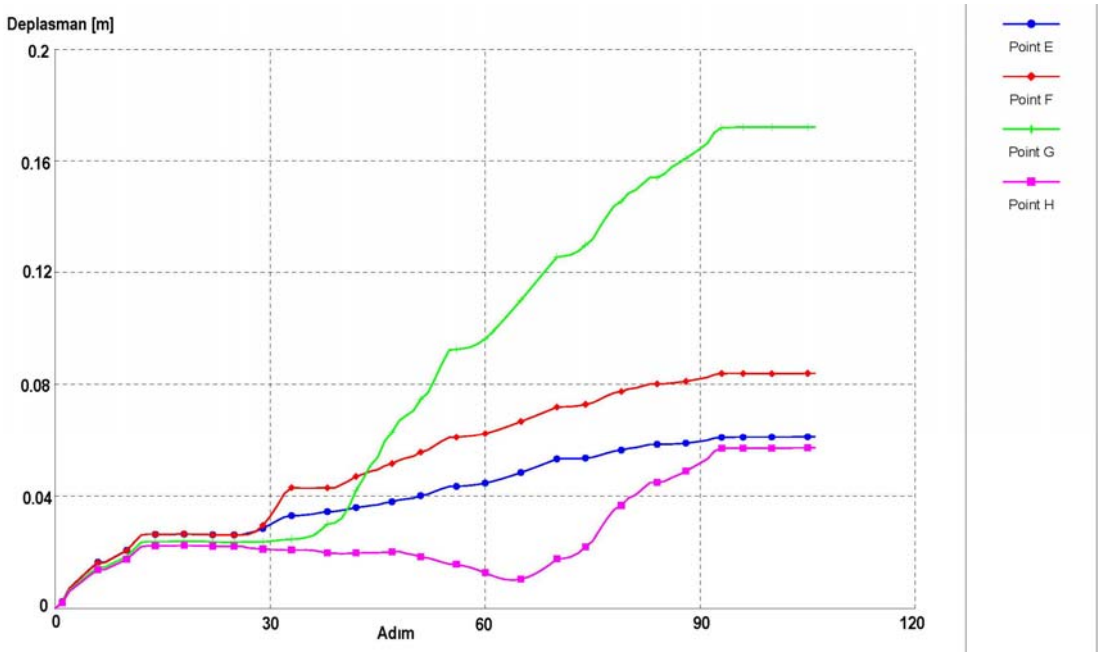


Şekil B.12: T2 Tünelinin üç kademede inşa durumu, radye betonu aşaması normal kuvvet diyagramı

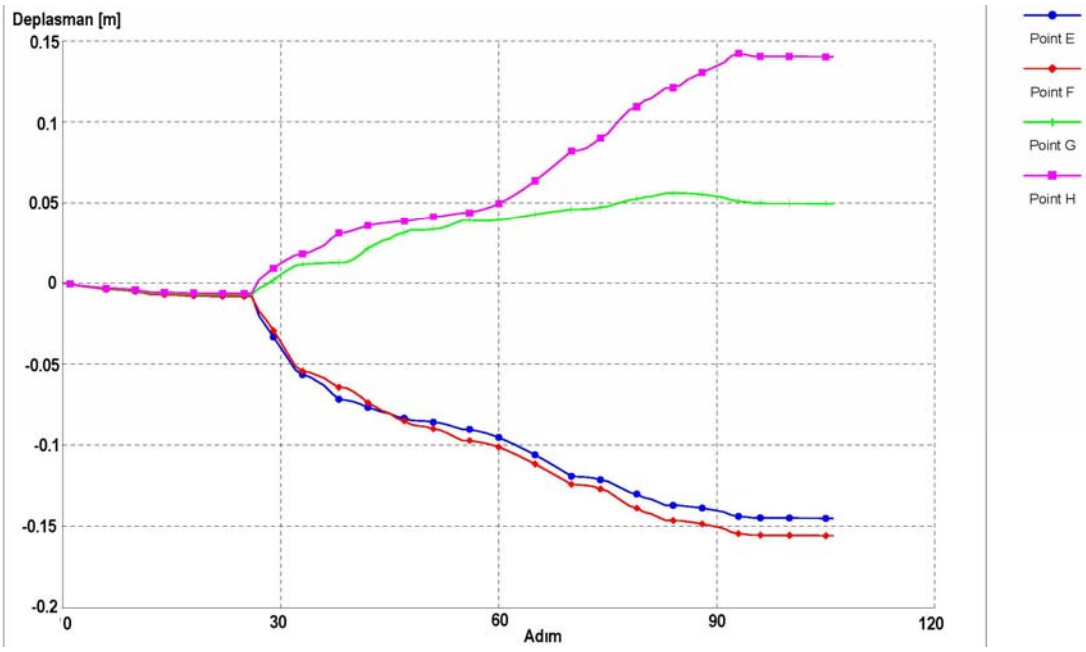
EK-C T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, deplasman grafikleri ve kesit tesirleri



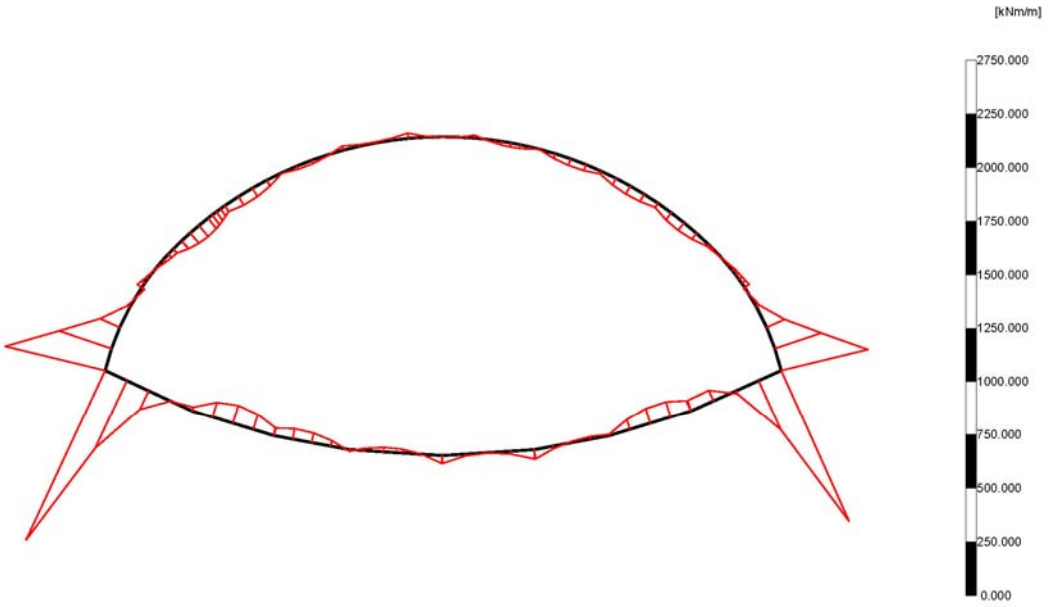
Şekil C.1: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, toplam deplasman grafiği



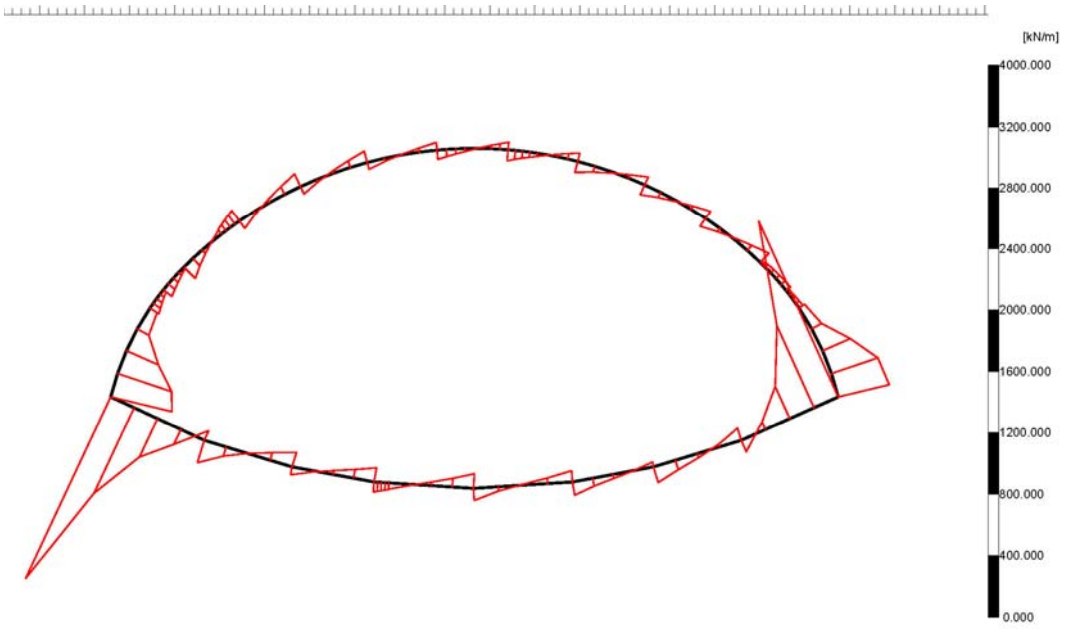
Şekil C.2: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, yatay deplasman grafiği



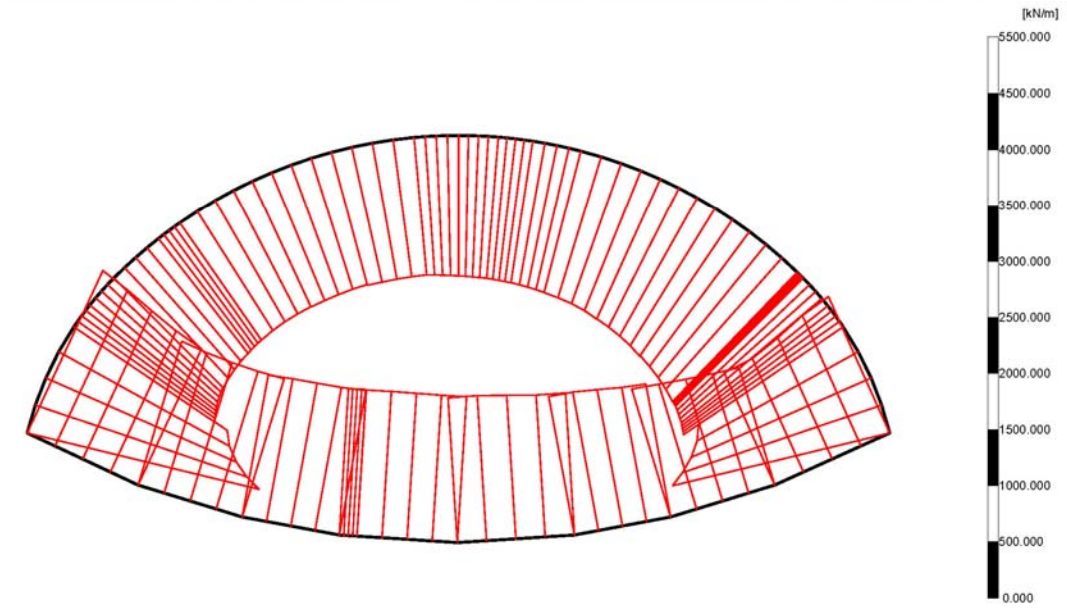
Şekil C.3: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, düşey deplasman grafiği



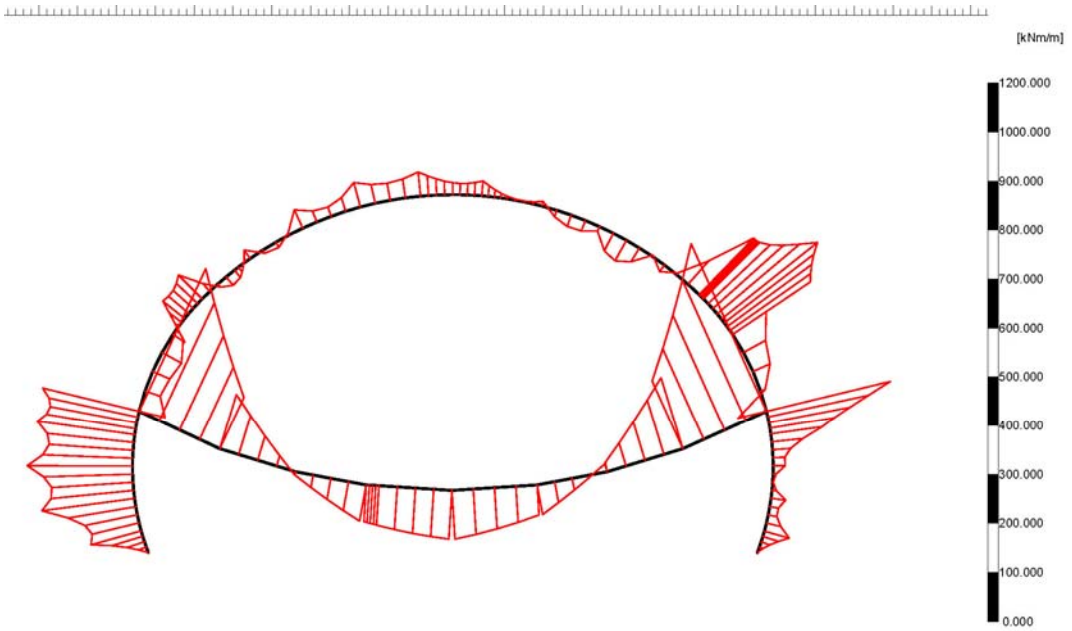
Şekil C.4: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması moment diyagramı



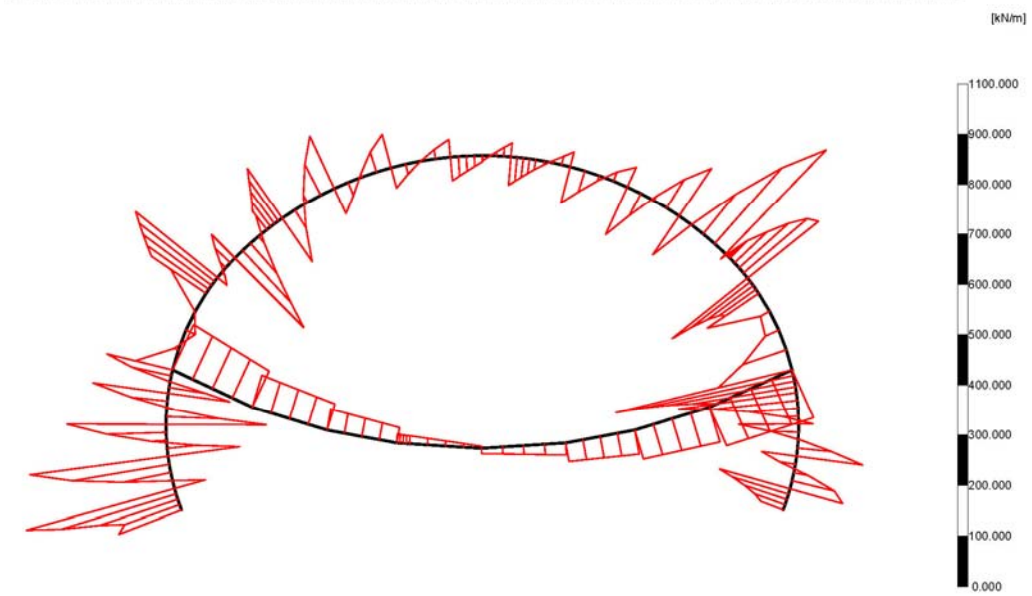
Şekil C.5: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması kesme kuvveti diyagramı



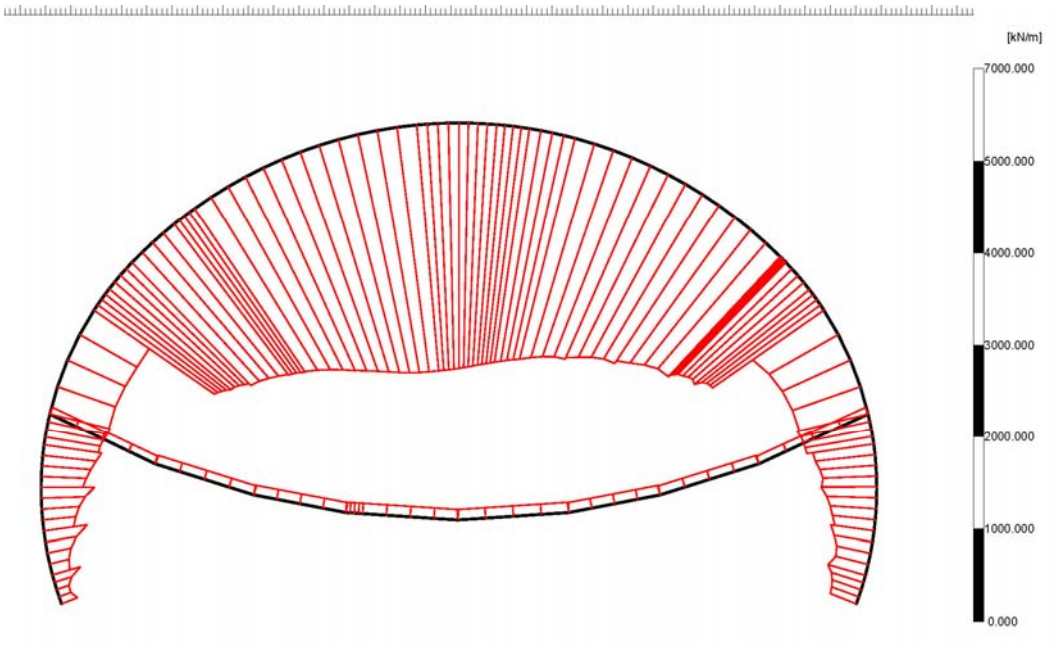
Şekil C.6: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması normal kuvvet



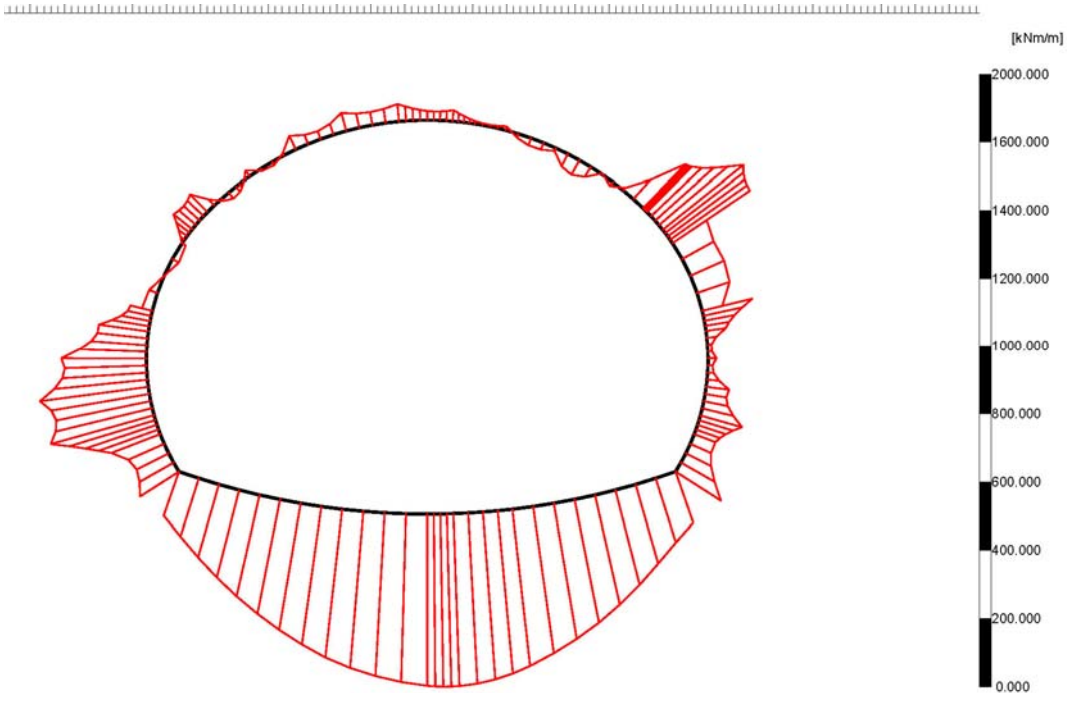
Şekil C.7: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması moment diyagramı



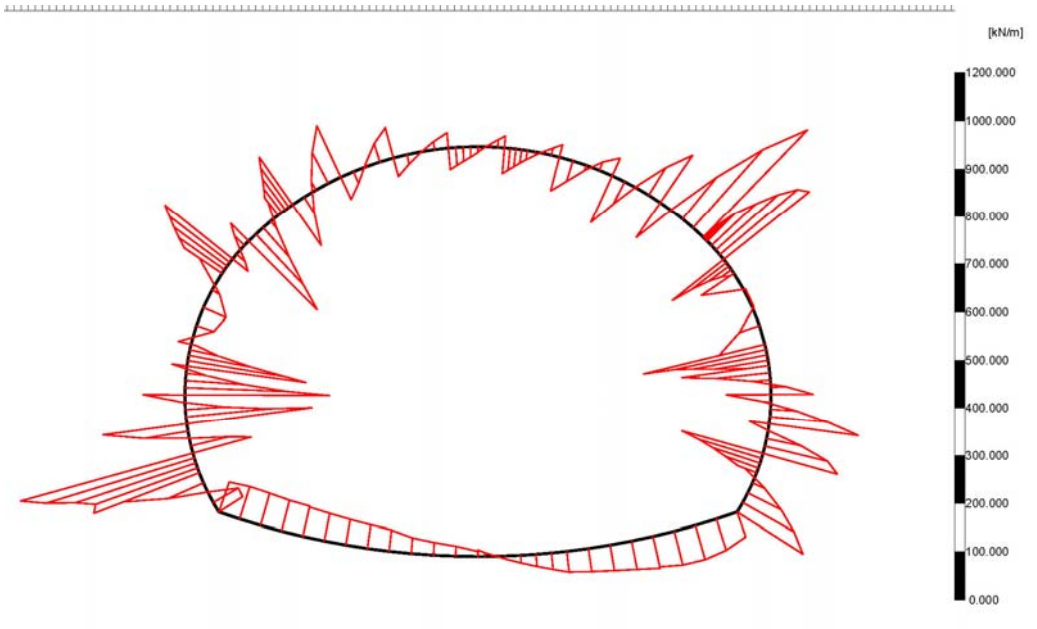
Şekil C.8: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması kesme kuvveti diyagramı



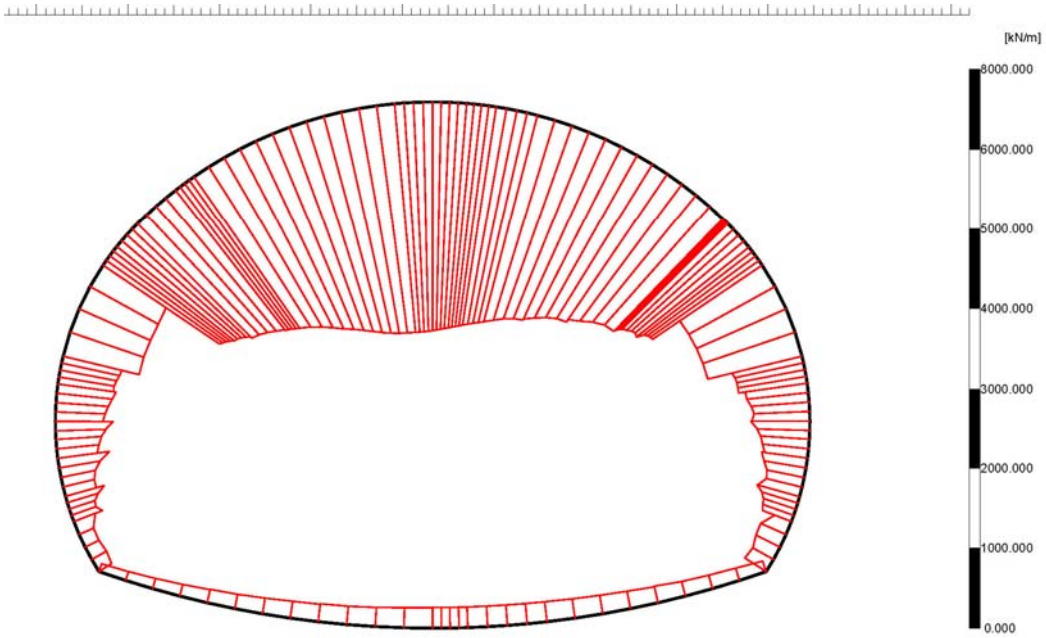
Şekil C.9: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması normal kuvvet diyagramı



Şekil C.10: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması radye betonu aşaması moment diyagramı

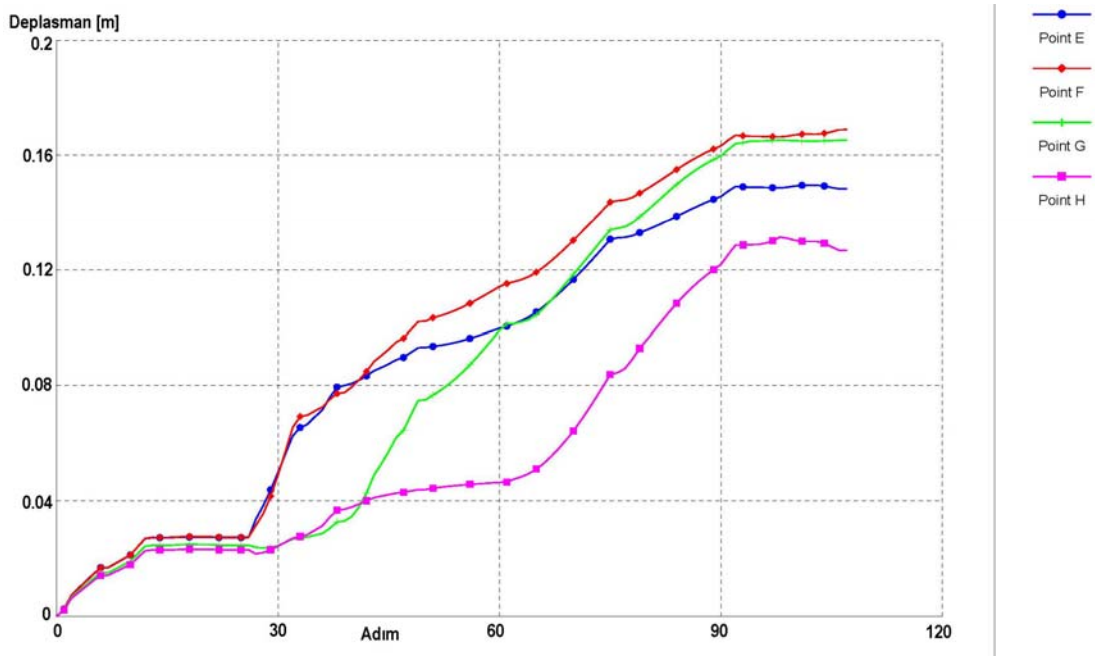


Şekil C.11: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması kesme kuvvet diyagramı

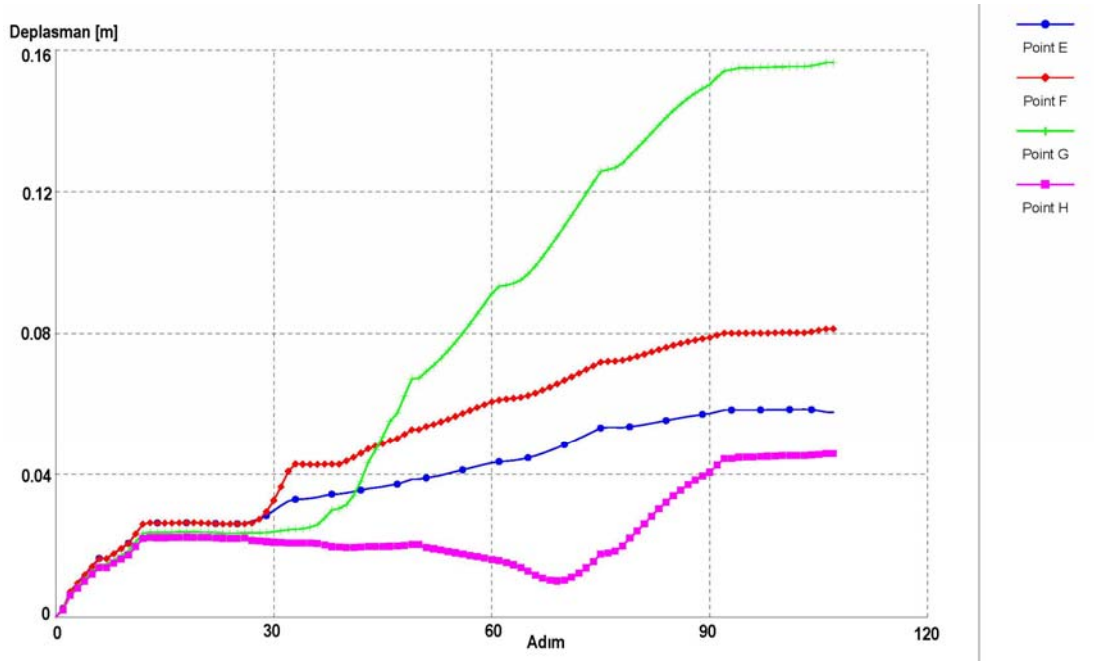


Şekil C.12: T2 Tünelinin 4 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması normal kuvvet diyagramı

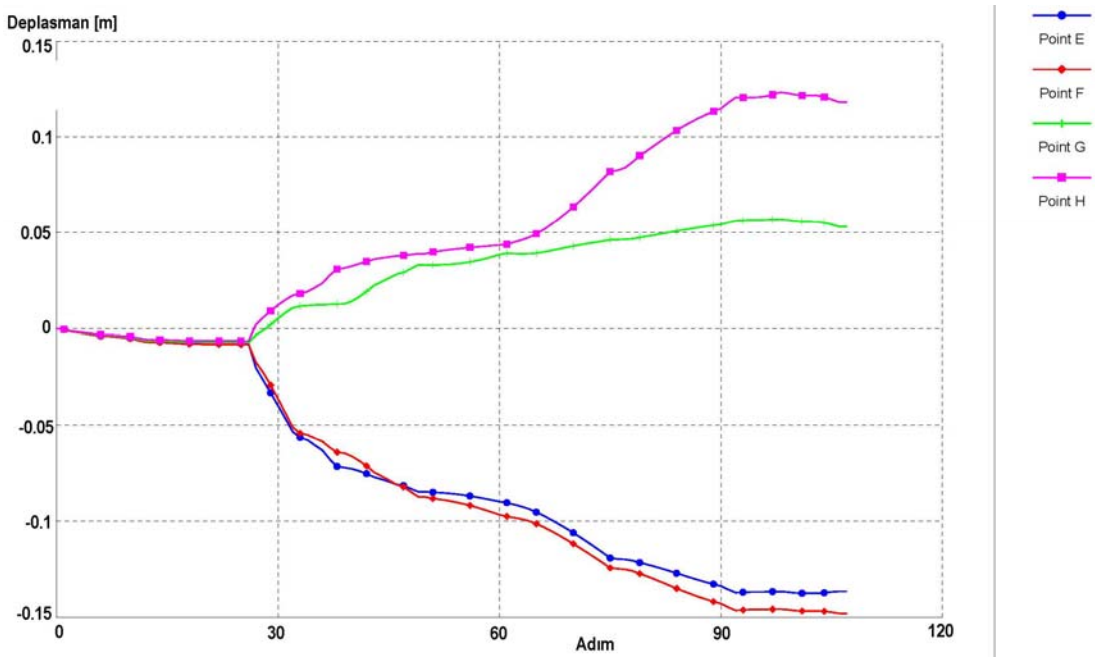
EK-D T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, deplasman grafikleri ve kesit tesirleri



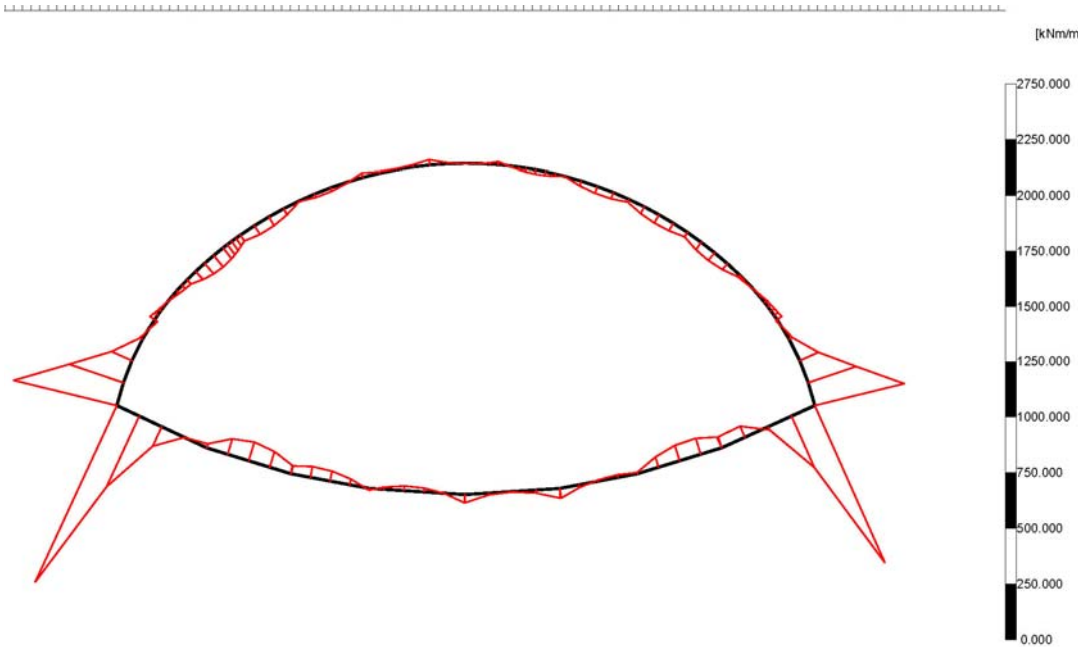
Şekil D.1: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, toplam deplasman grafiği



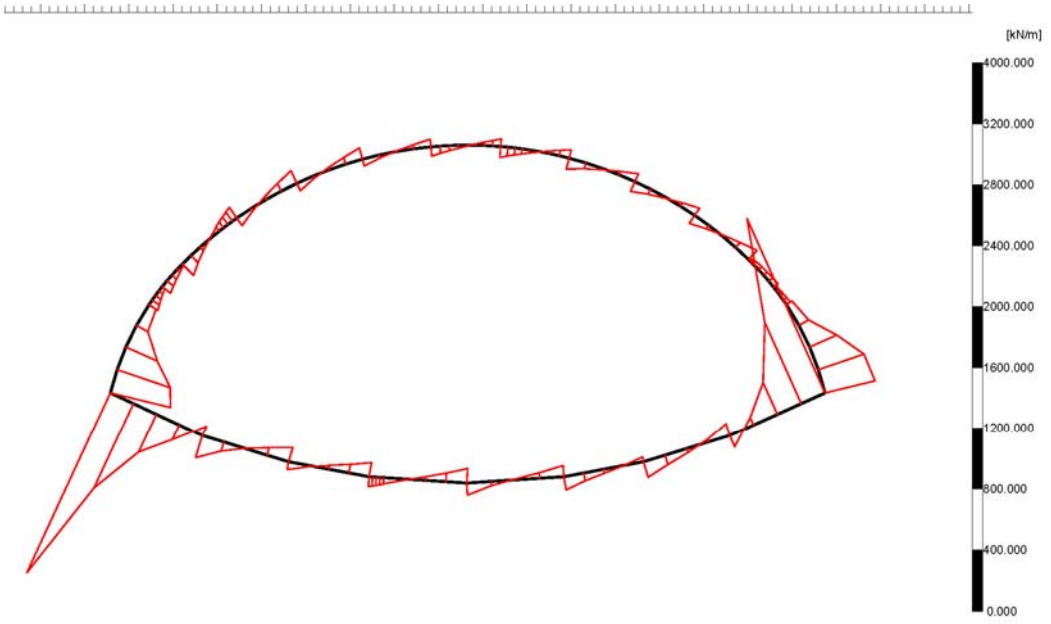
Şekil D.2: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, yatay deplasman grafiği



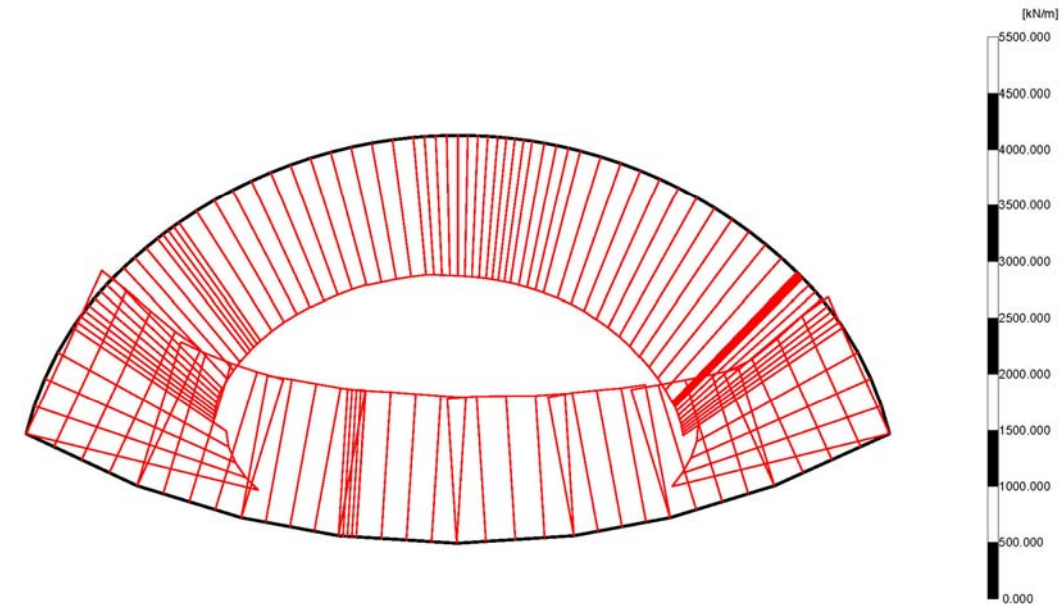
Şekil D.3: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, düşey deplasman grafiği



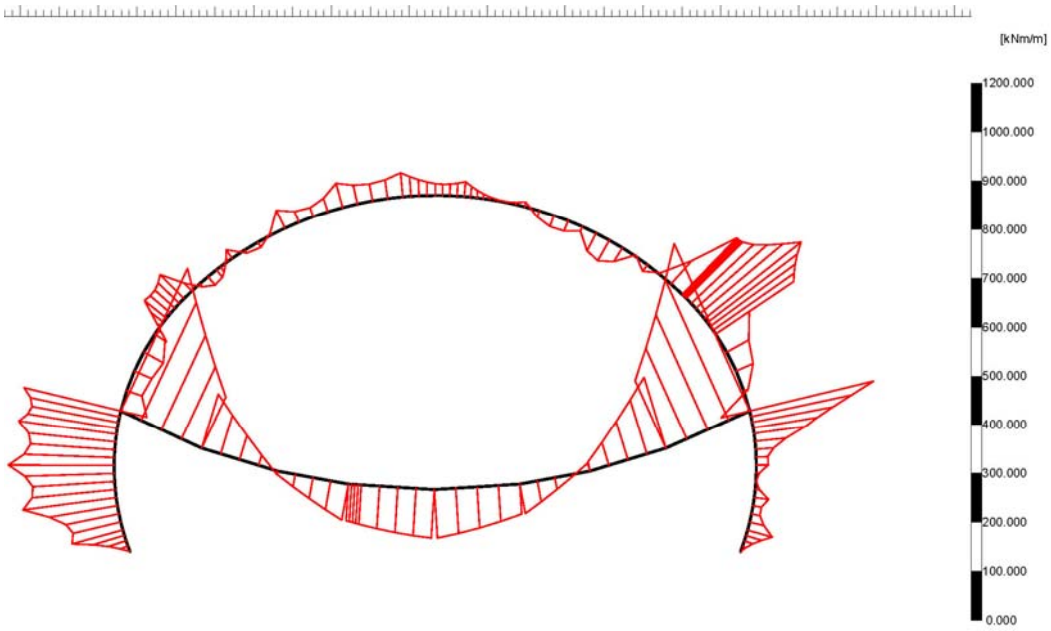
Şekil D.4: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması moment diyagramı



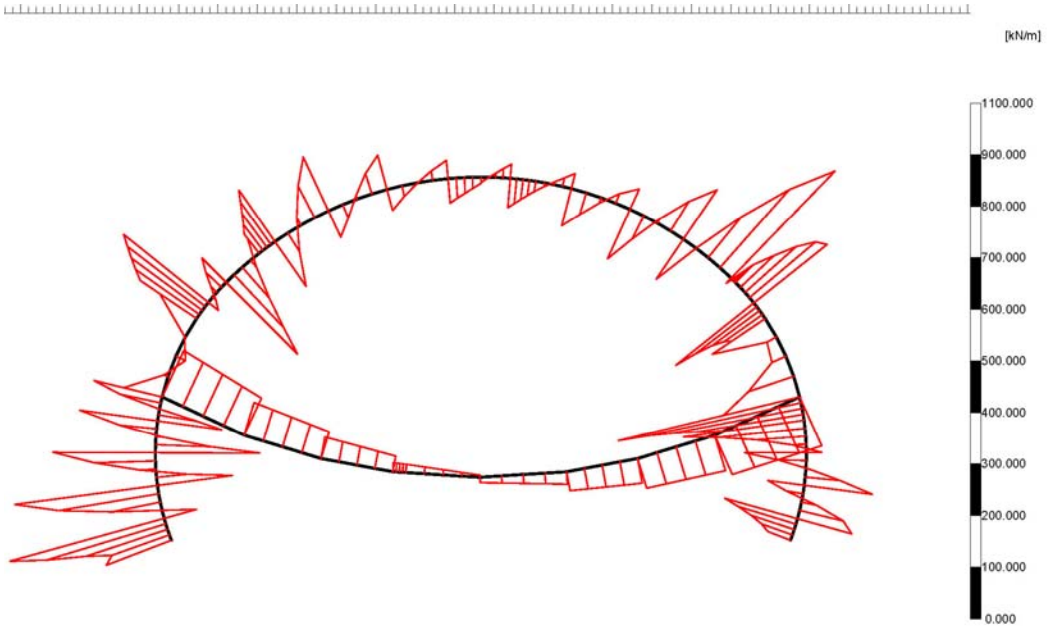
Şekil D.5: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması kesme kuvveti diyagramı



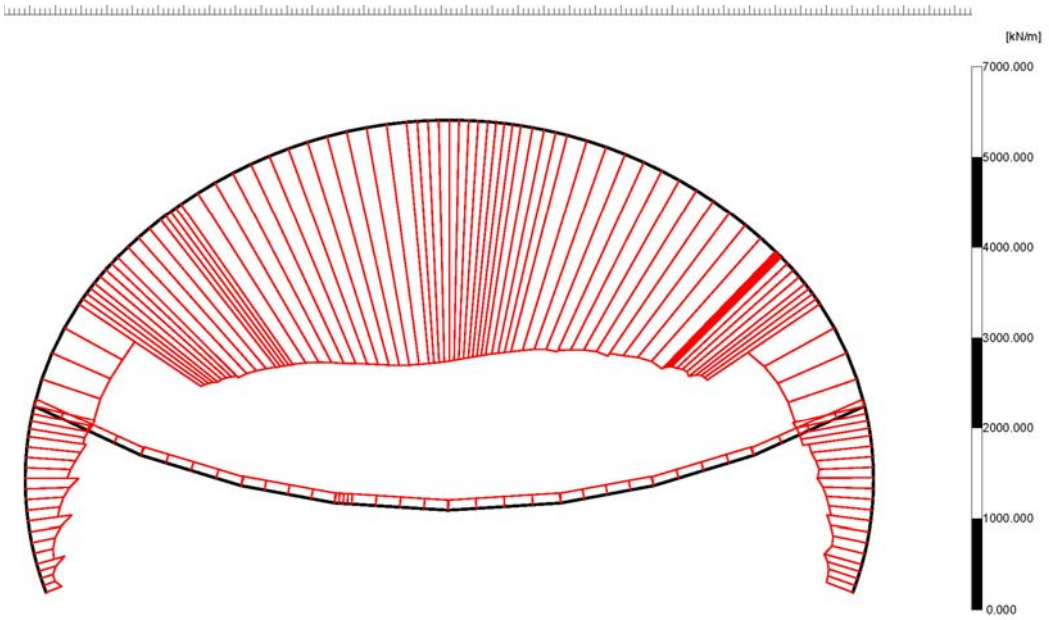
Şekil D.6: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması normal kuvvet diyagramı



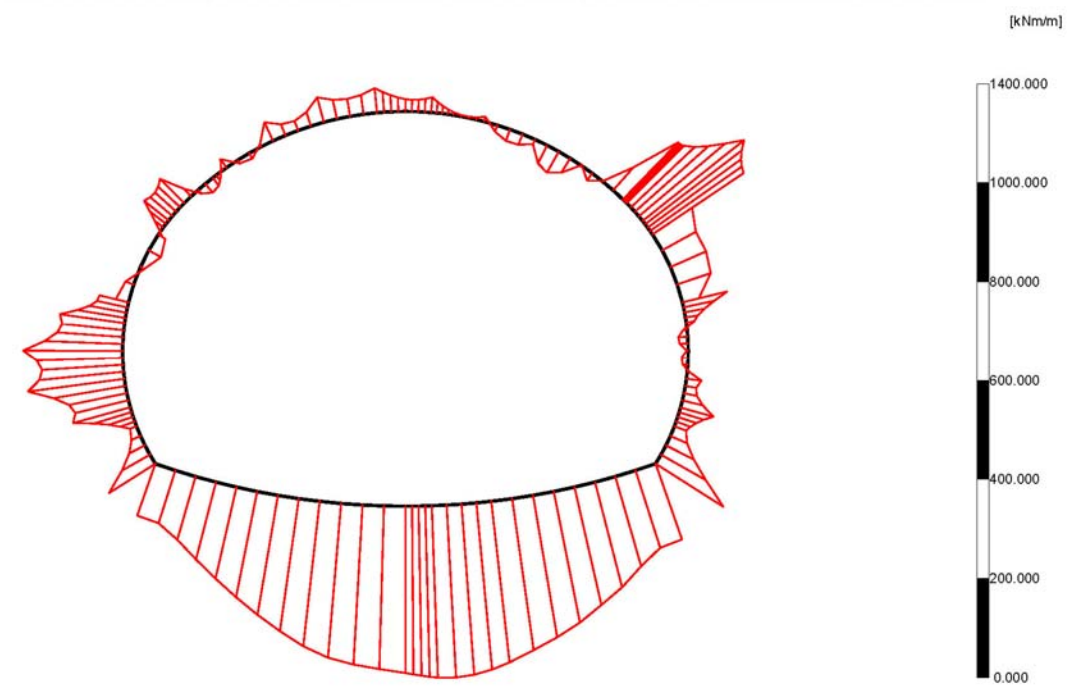
Şekil D.7: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması moment diyagramı



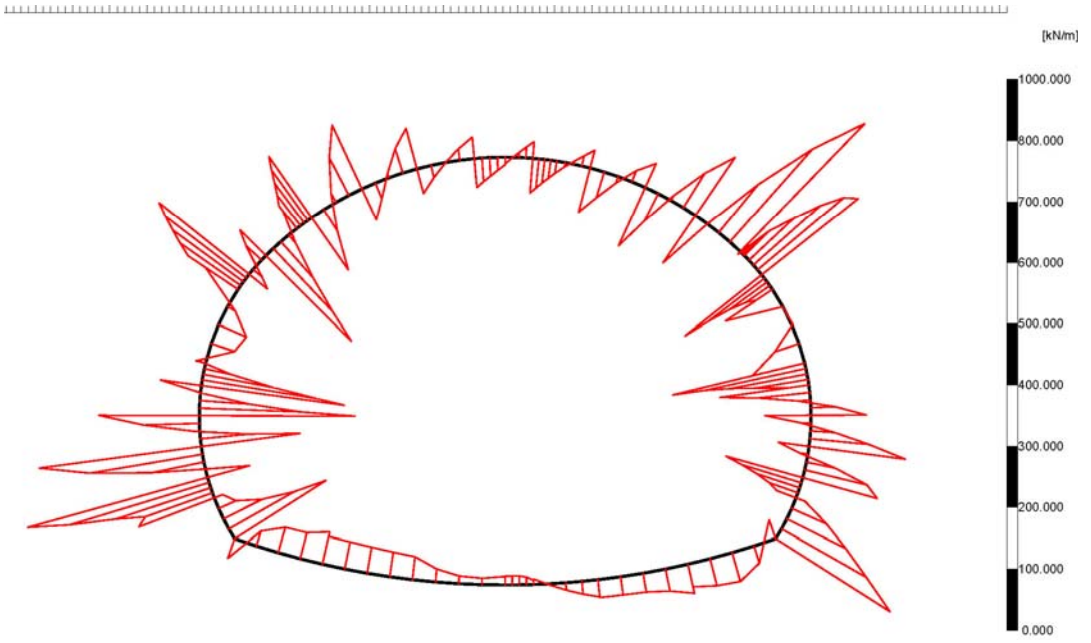
Şekil D.8: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması kesme kuvveti diyagramı



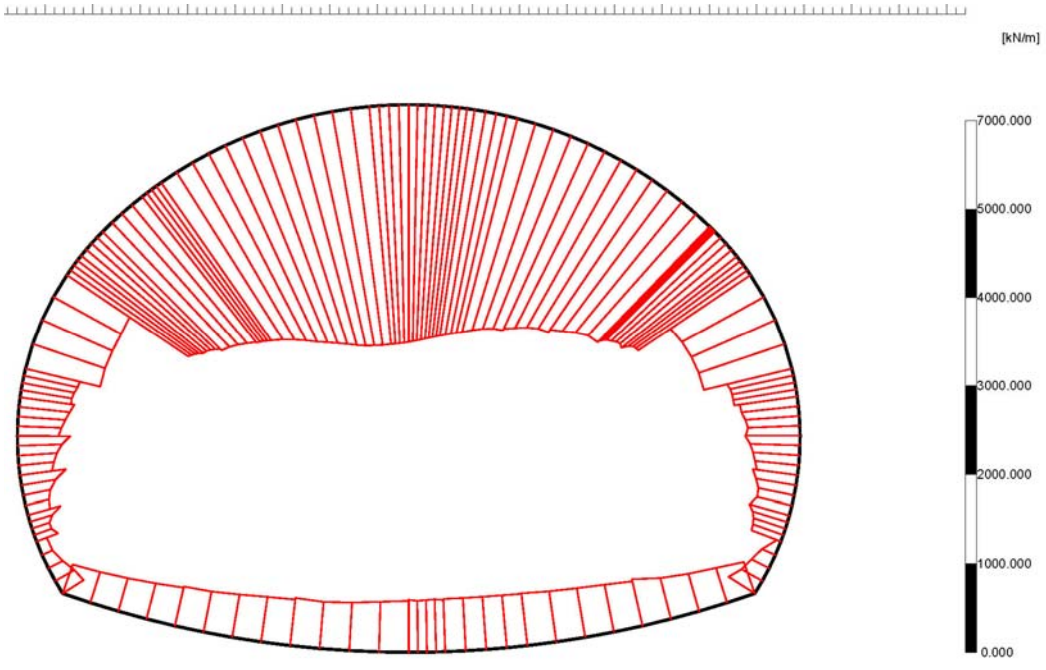
Şekil D.9: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması normal kuvvet diyagramı



Şekil D.10: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması moment diyagramı

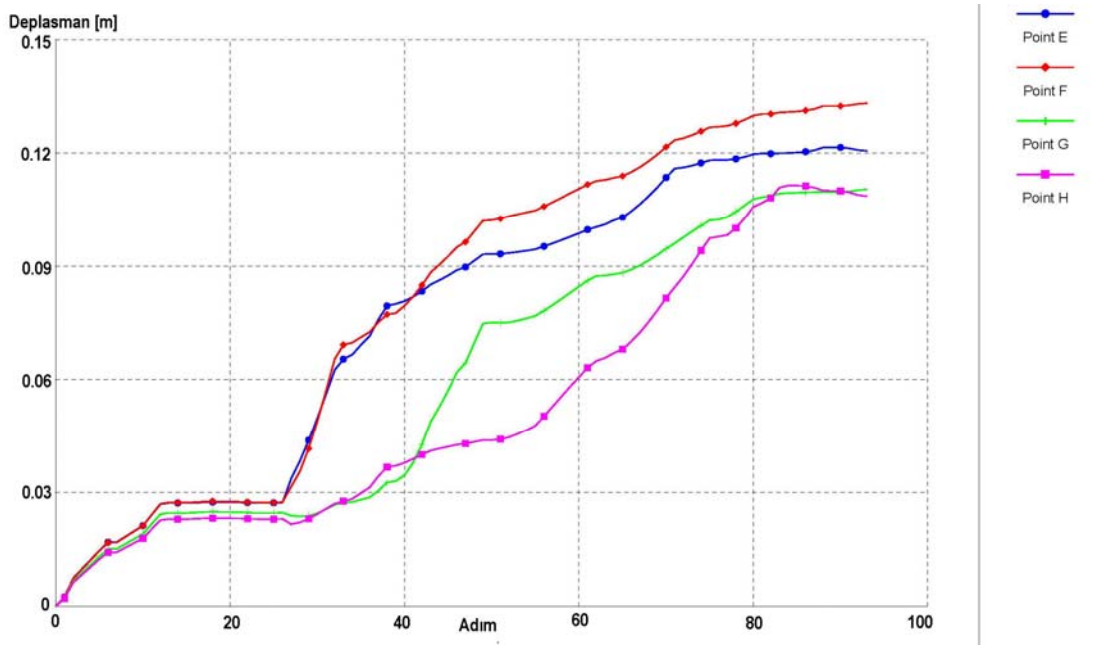


Şekil D.11: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması kesme kuvveti diyagramı

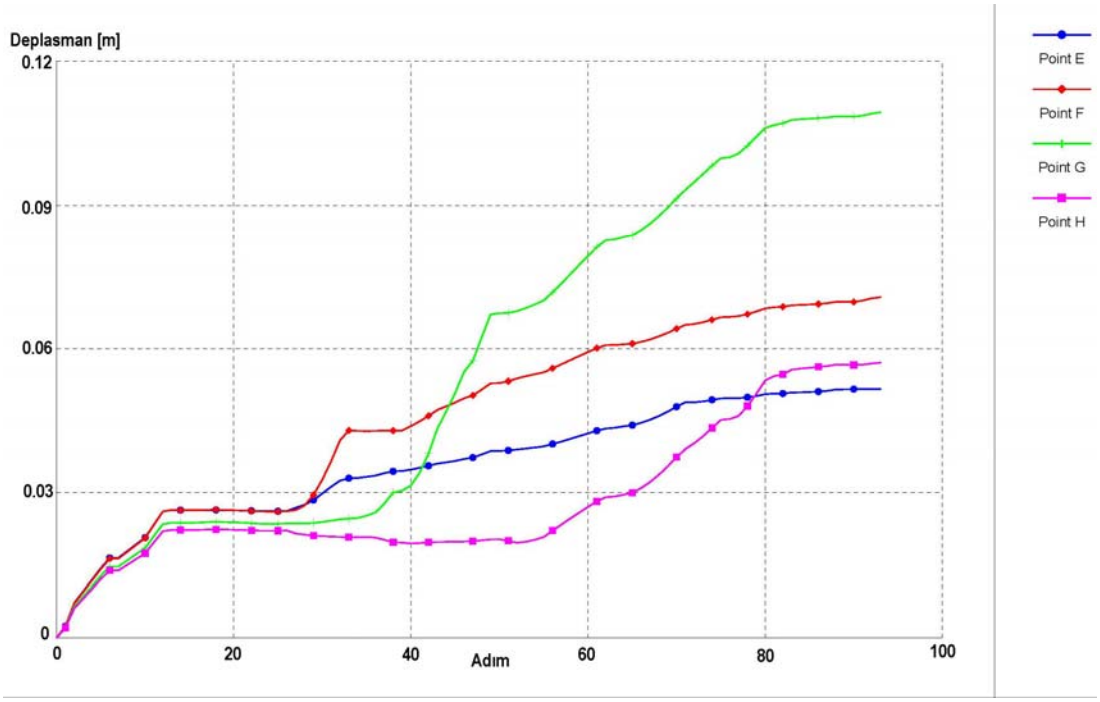


Şekil D.12: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması normal kuvvet diyagramı

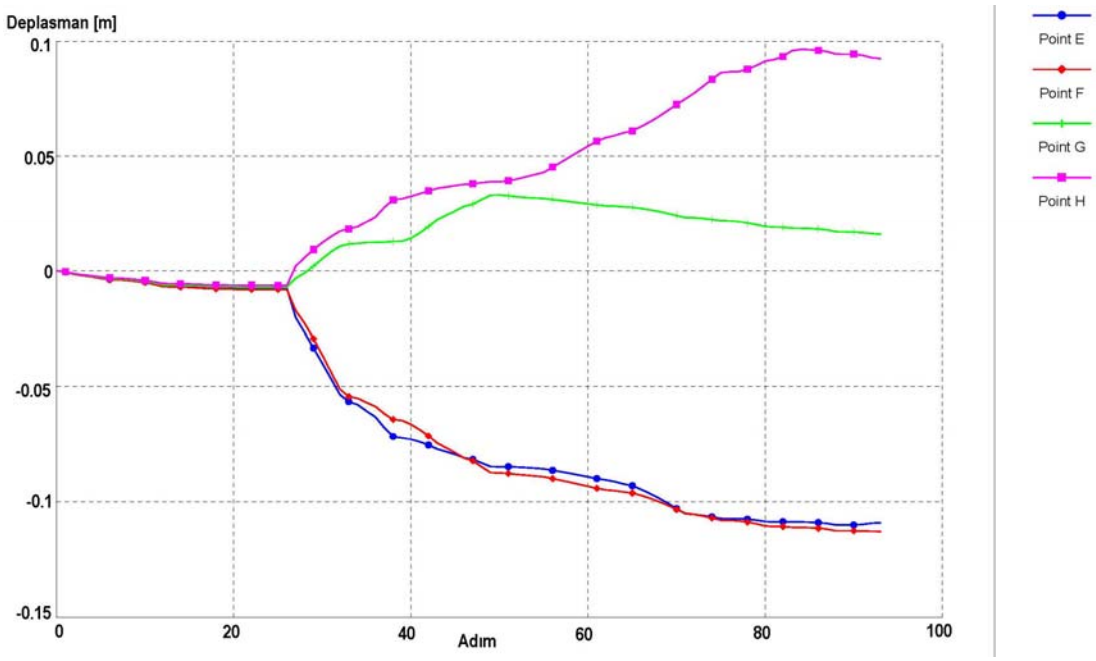
EK-E T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, deplasman grafikleri ve kesit tesirleri



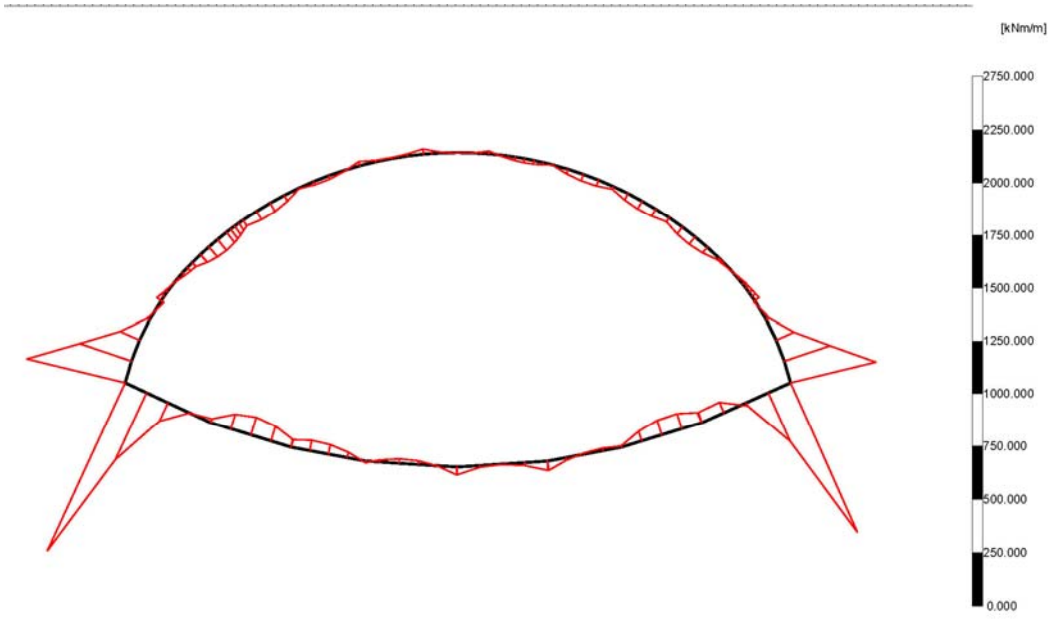
Şekil E.1: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, toplam deplasman grafiği



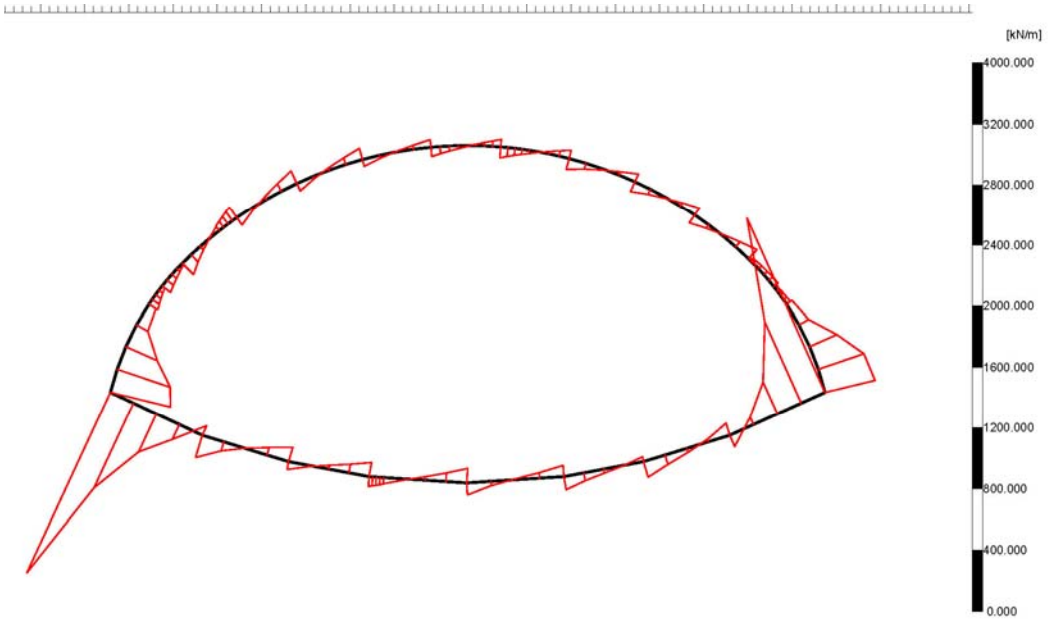
Şekil E.2: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, yatay deplasman grafiği



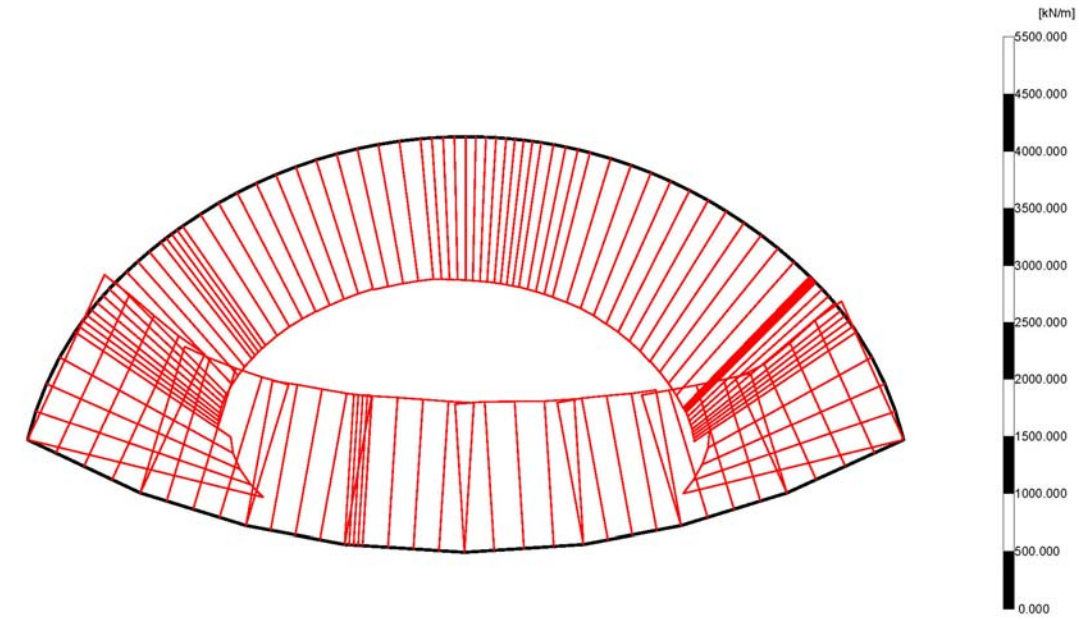
Şekil E.3: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, düşey deplasman grafiği



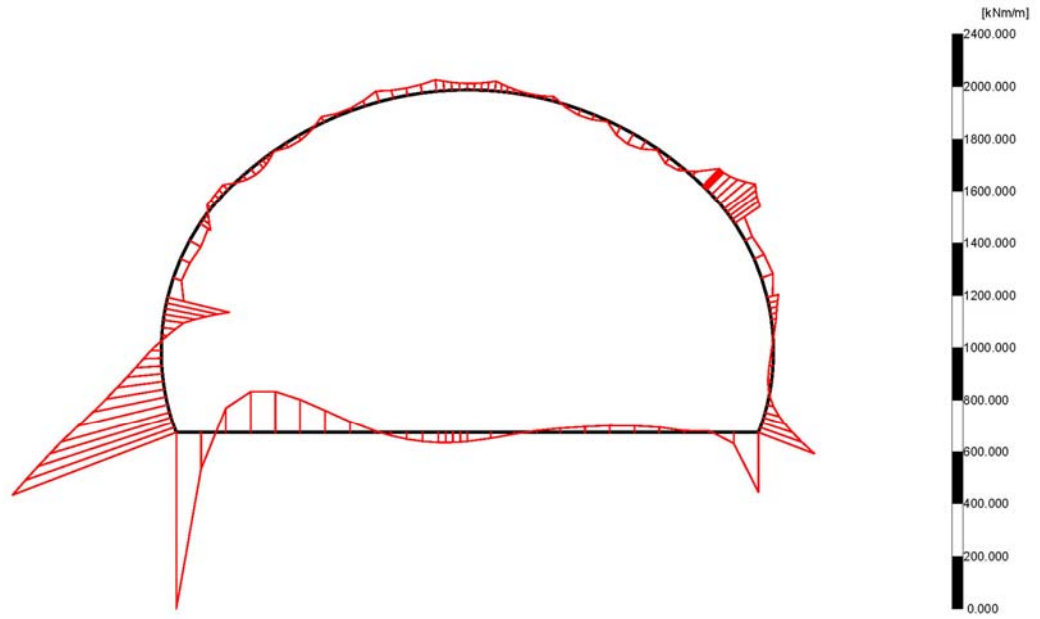
Şekil E.4: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması moment diyagramı



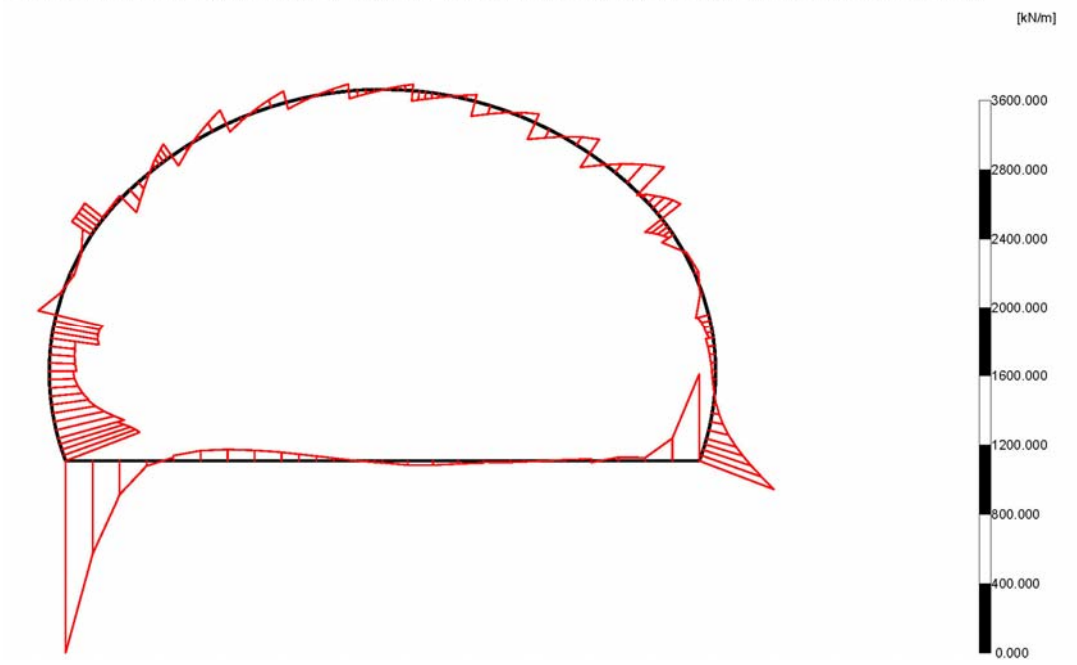
Şekil E.5: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması kesme kuvveti diyagramı



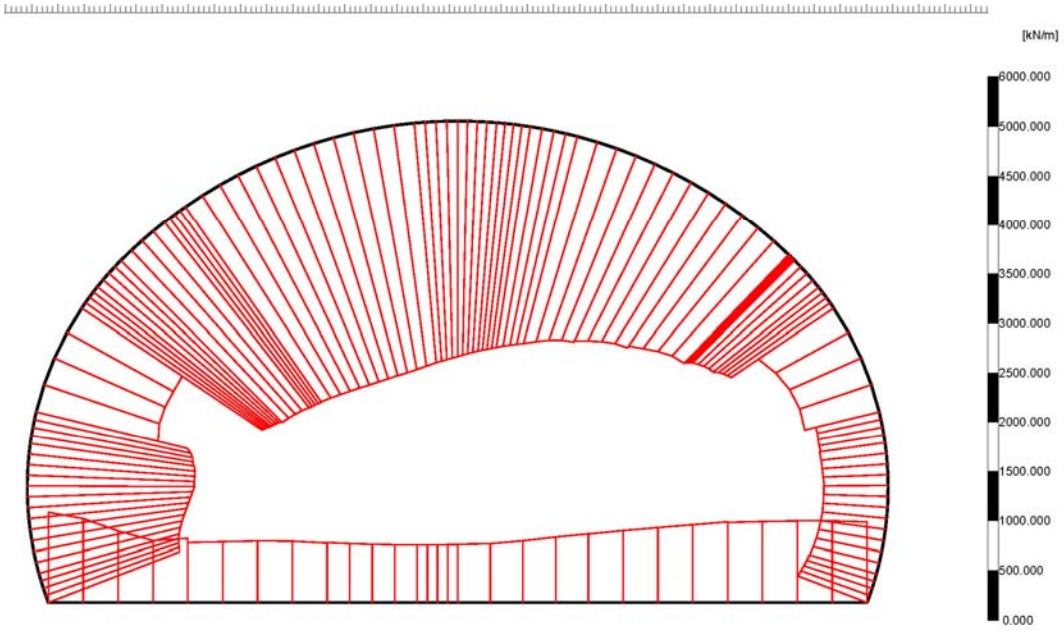
Şekil E.6: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, kalot aşaması norma kuvvet diyagramı



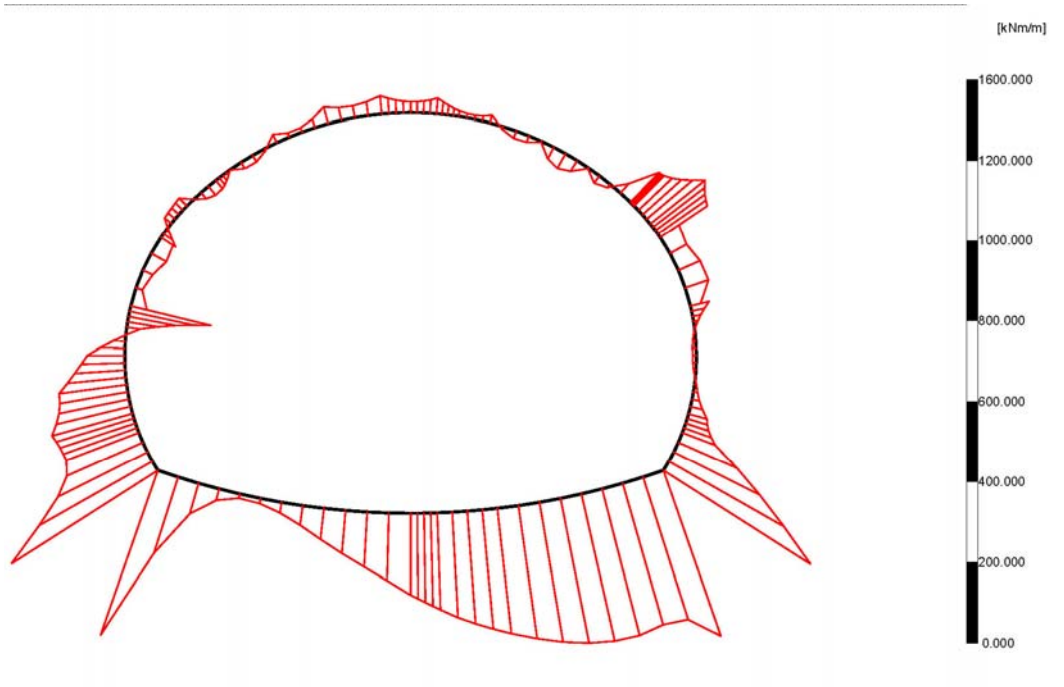
Şekil E.7: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması moment diyagramı



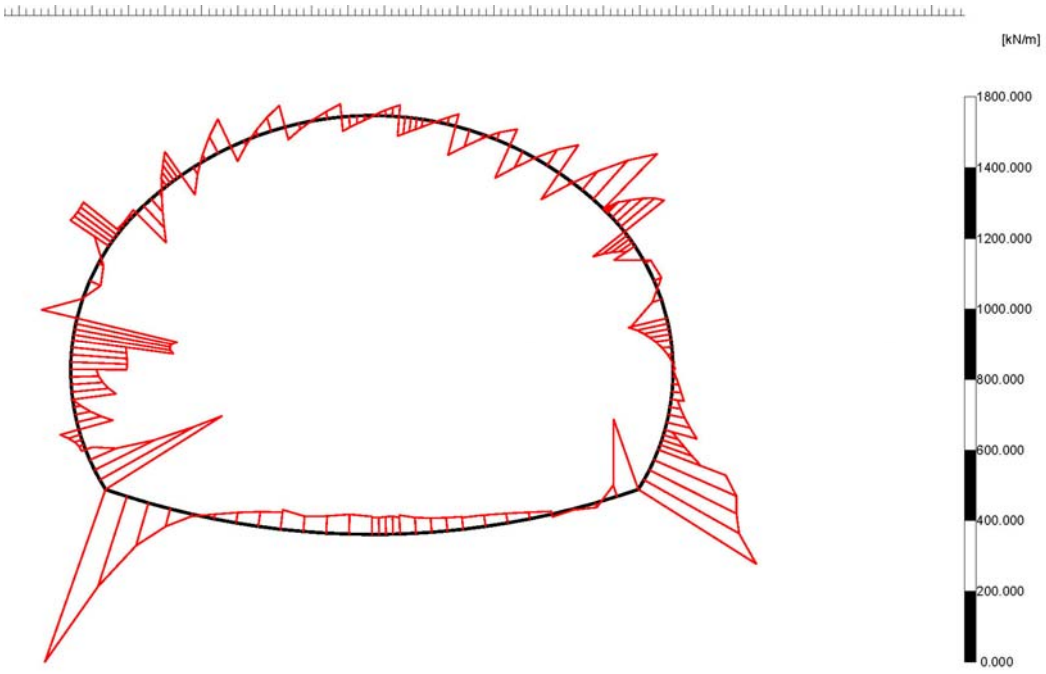
Şekil E.8 : T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması kesme kuvveti diyagramı



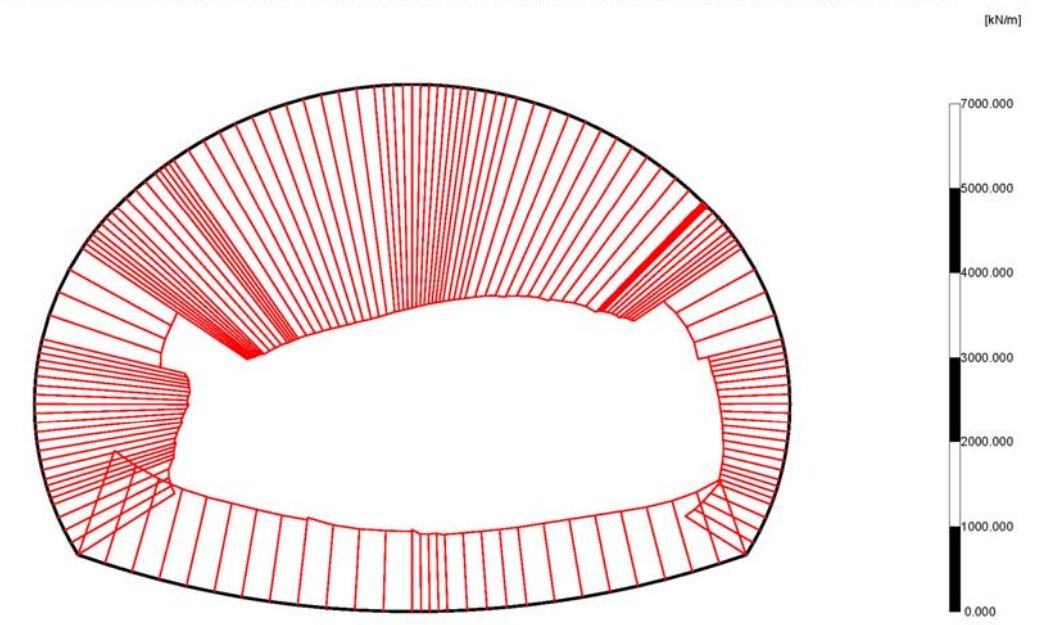
Şekil E.9: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, stros aşaması normal kuvvet diyagramı



Şekil E.10: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması moment diyagramı

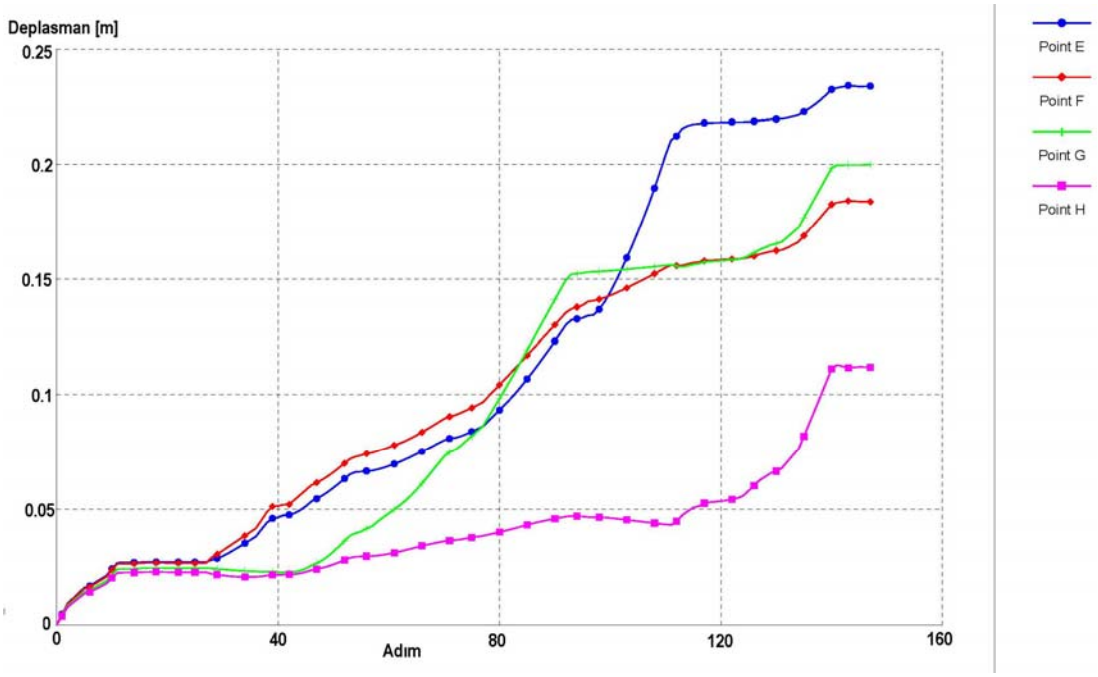


Şekil E.11: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması kesme kuvveti diyagramı

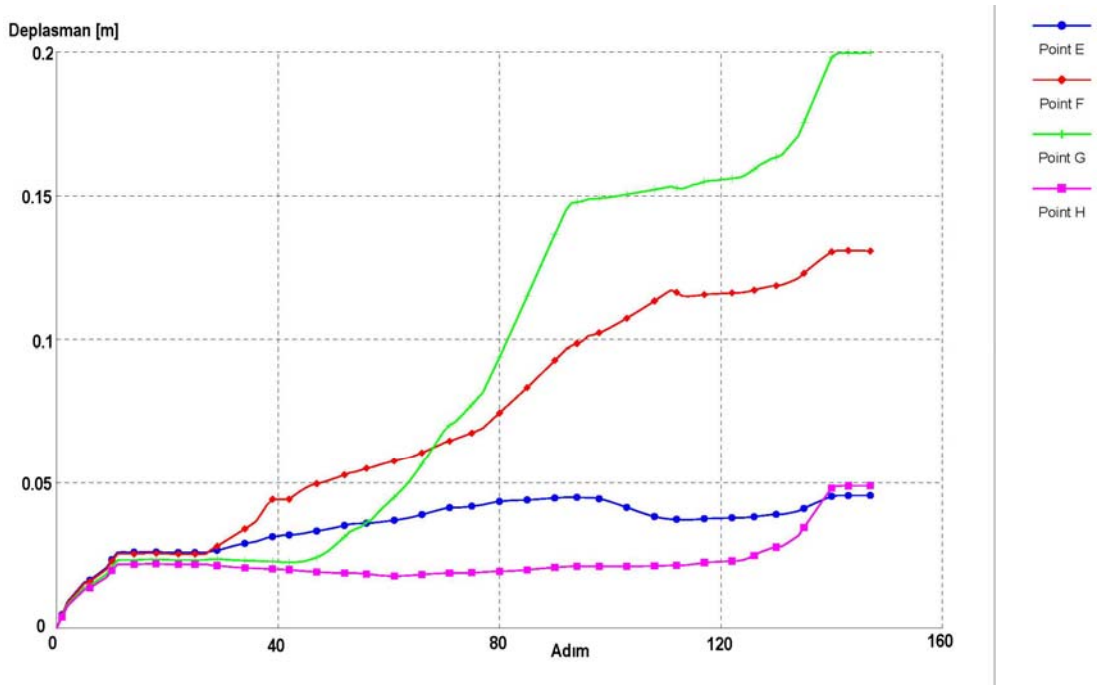


Şekil E.12: T2 Tünelinin 5 kademede açılma ve kalot ve stros geçici radye uygulanması durumu, radye betonu aşaması normal kuvvet diyagramı

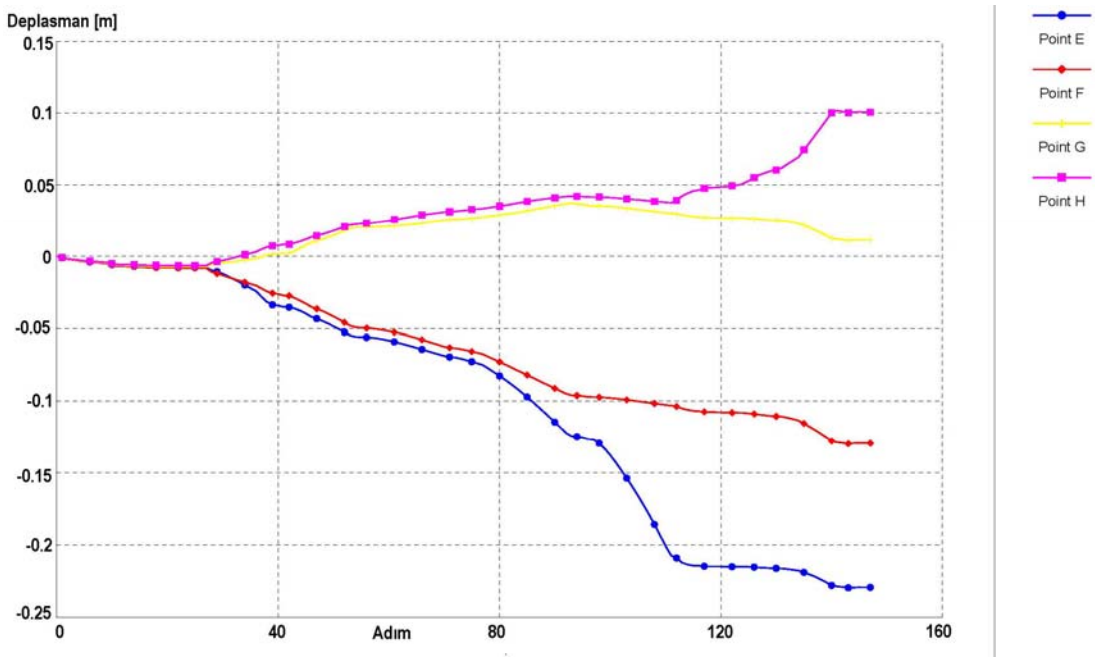
EK-F T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, deplasman grafikleri ve kesit tesirleri



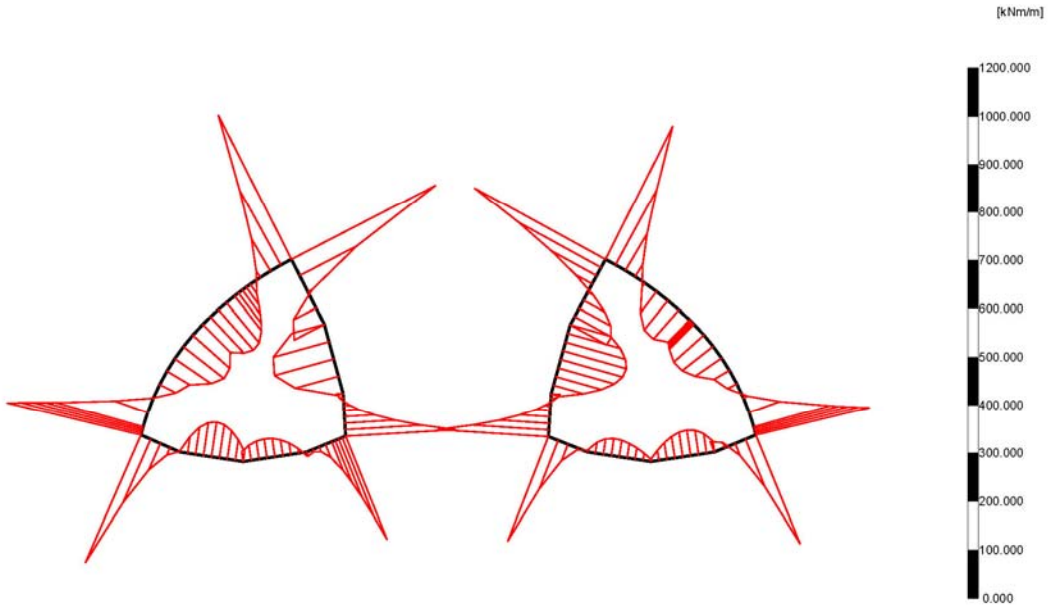
Şekil F.1: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, toplam deplasman grafiği



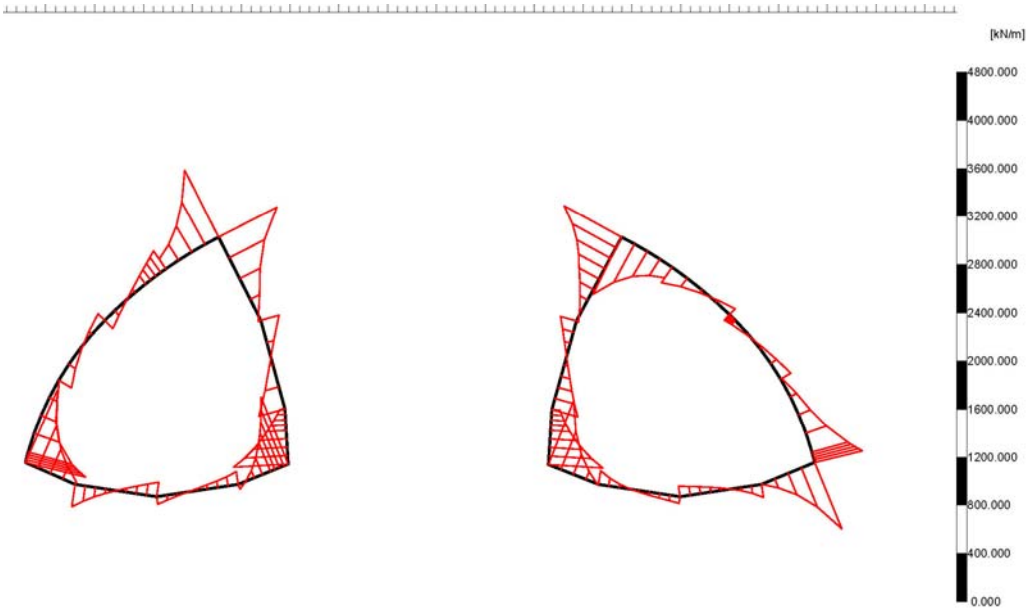
Şekil F.2: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, yatay deplasman grafiği



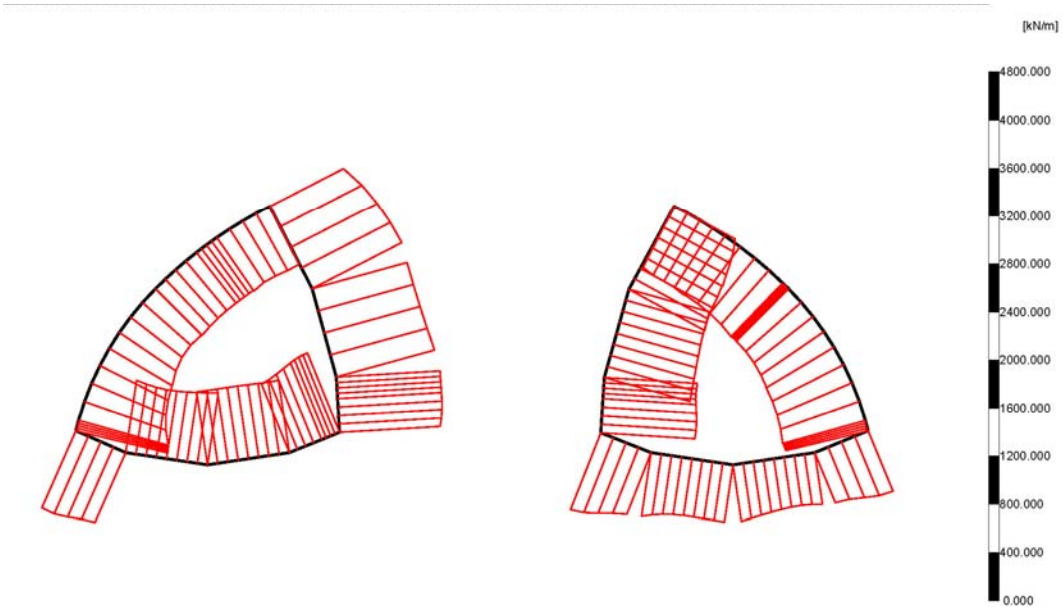
Şekil F.3: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, düşey deplasman grafiği



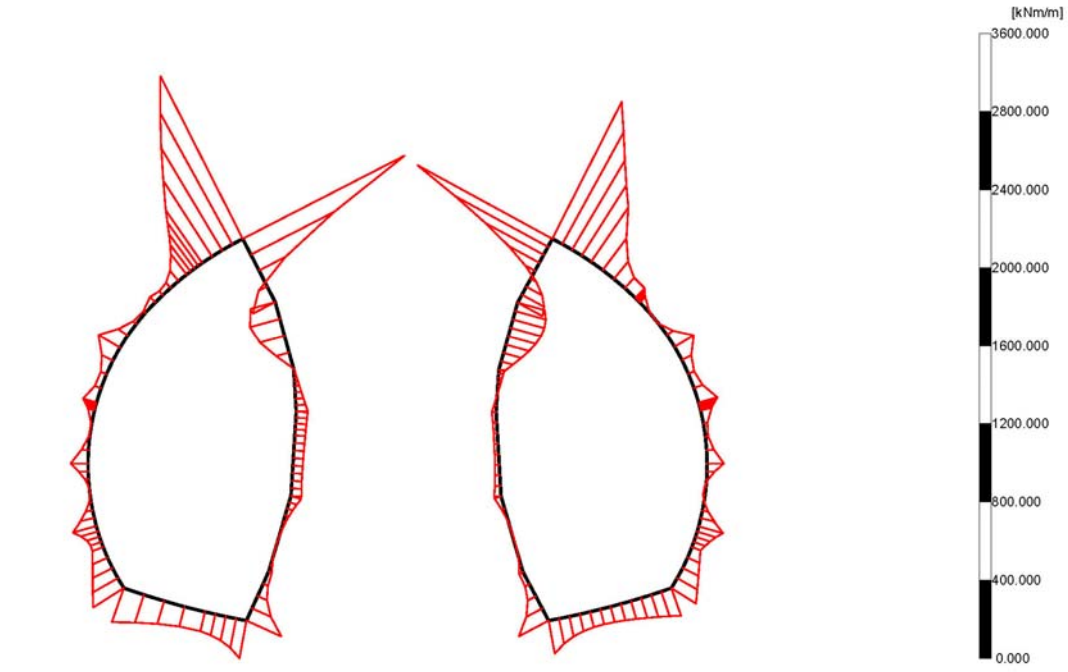
Şekil F.4: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, kalot aşaması moment diyagramı



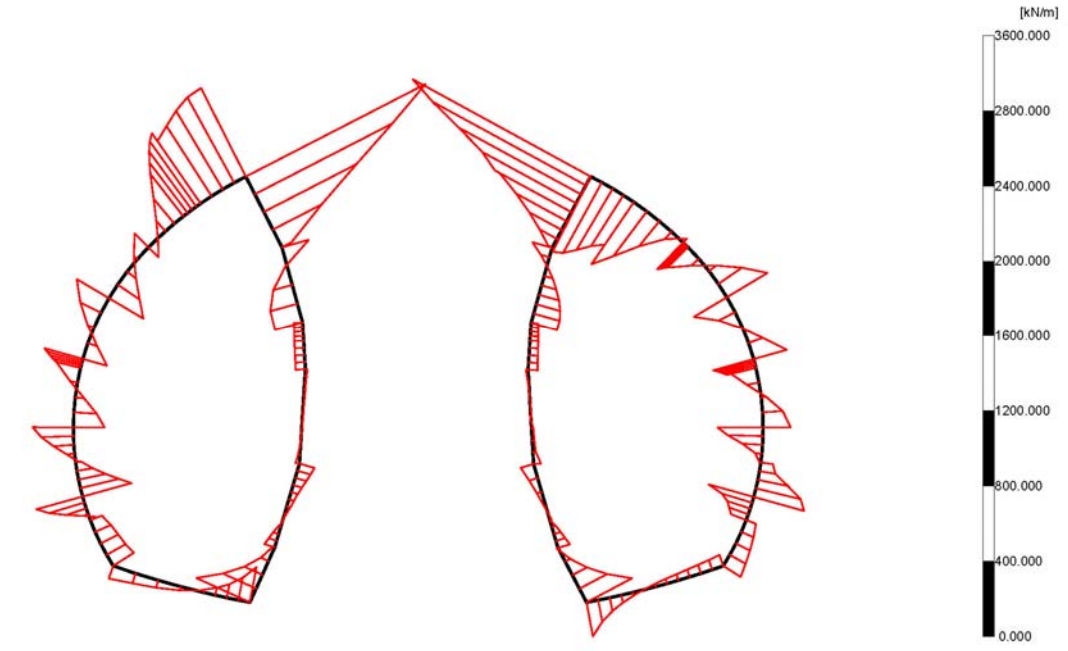
Şekil F.5: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, kalot aşaması kesme kuvveti diyagramı



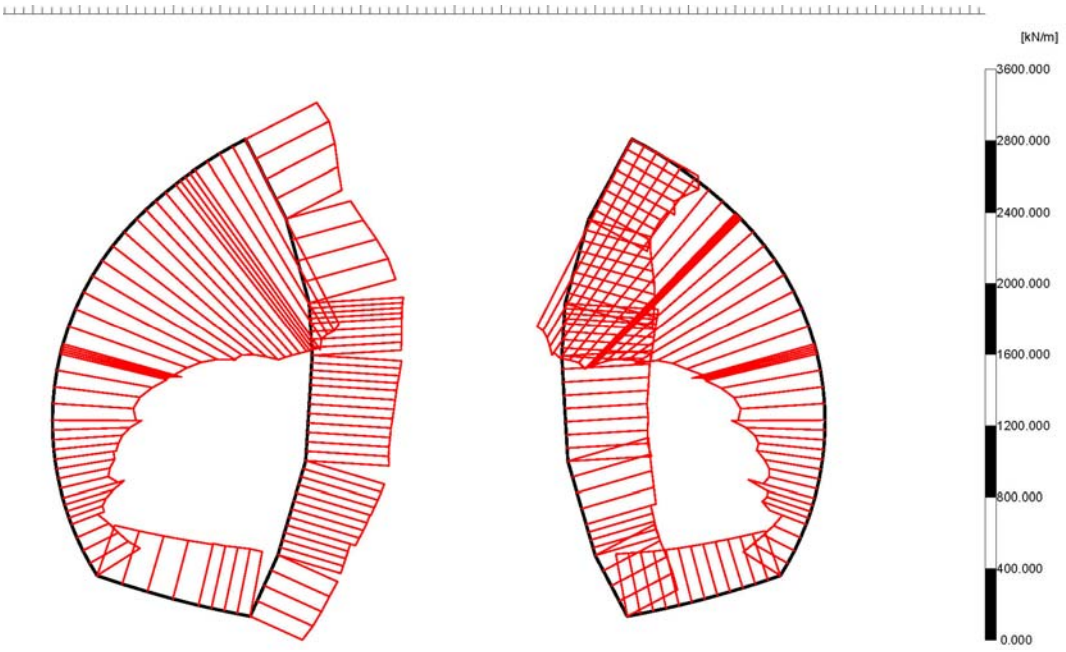
Şekil F.6: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, kalot aşaması normal kuvvet diyagramı



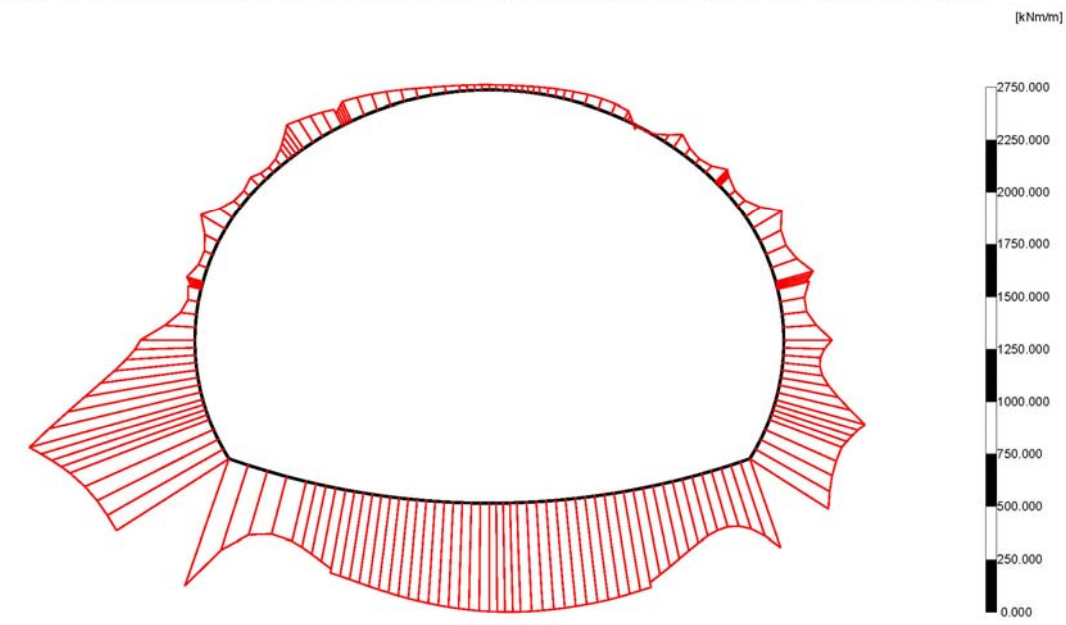
Şekil F.7: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, stros aşaması moment diyagramı



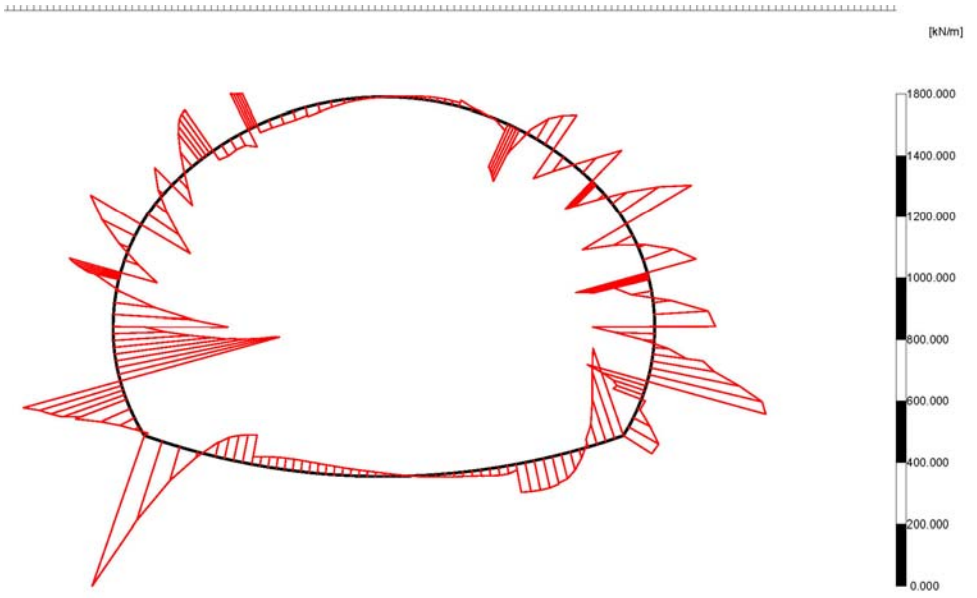
Şekil F.8: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, stros aşaması kesme kuvveti diyagramı



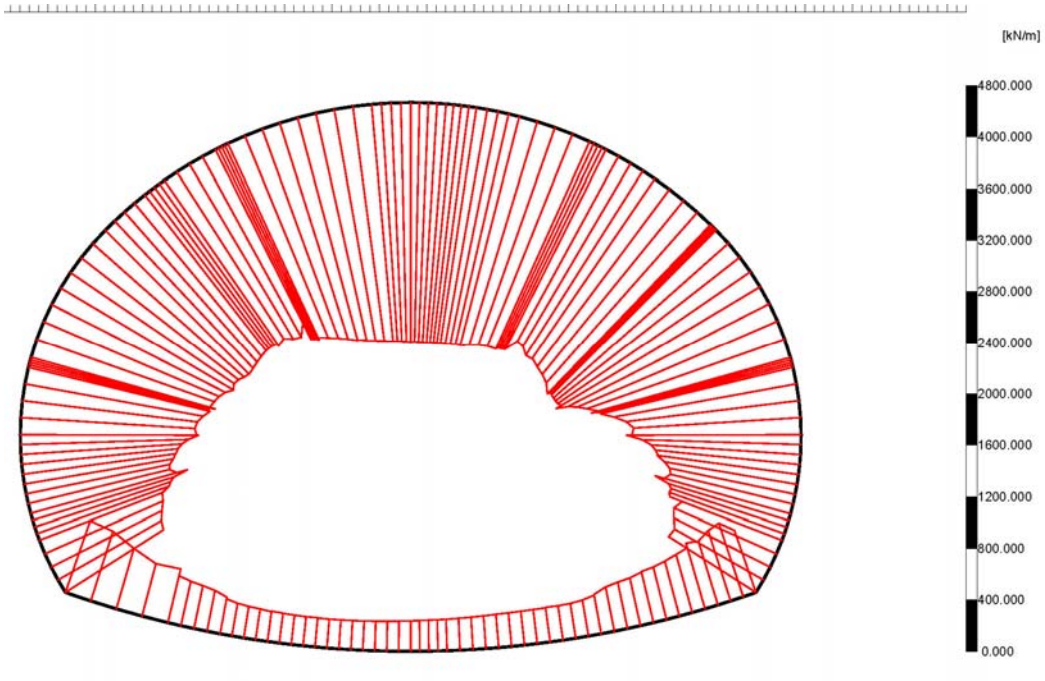
Şekil F.9: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, stros aşaması normal kuvveti diyagramı



Şekil F.10: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, radye beton aşaması moment diyagramı

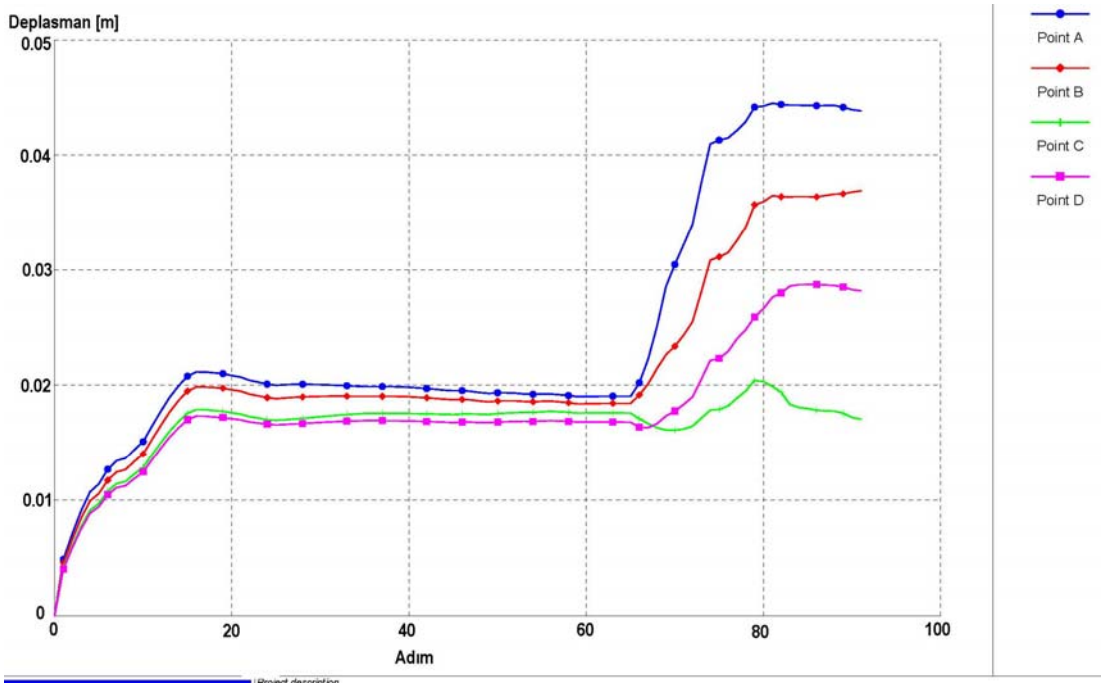


Şekil F.11: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, radye betonu aşaması kesme kuvveti diyagramı

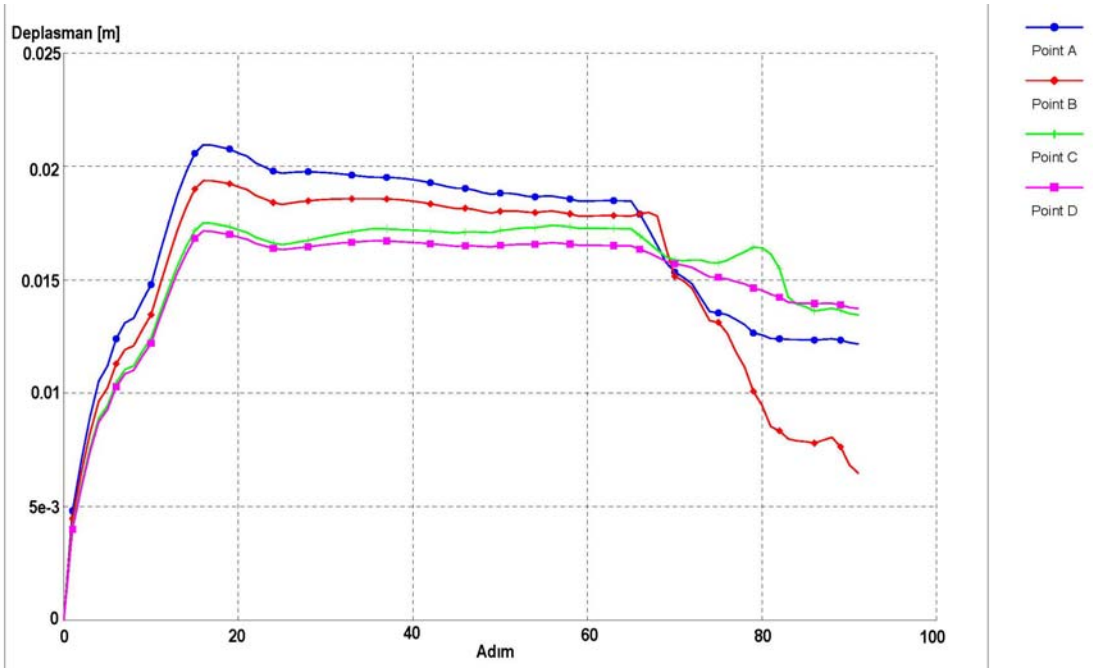


Şekil F.12: T2 Tünelinin 6 kademede açılma durumu, radye betonu aşaması normal kuvvet diyagramı

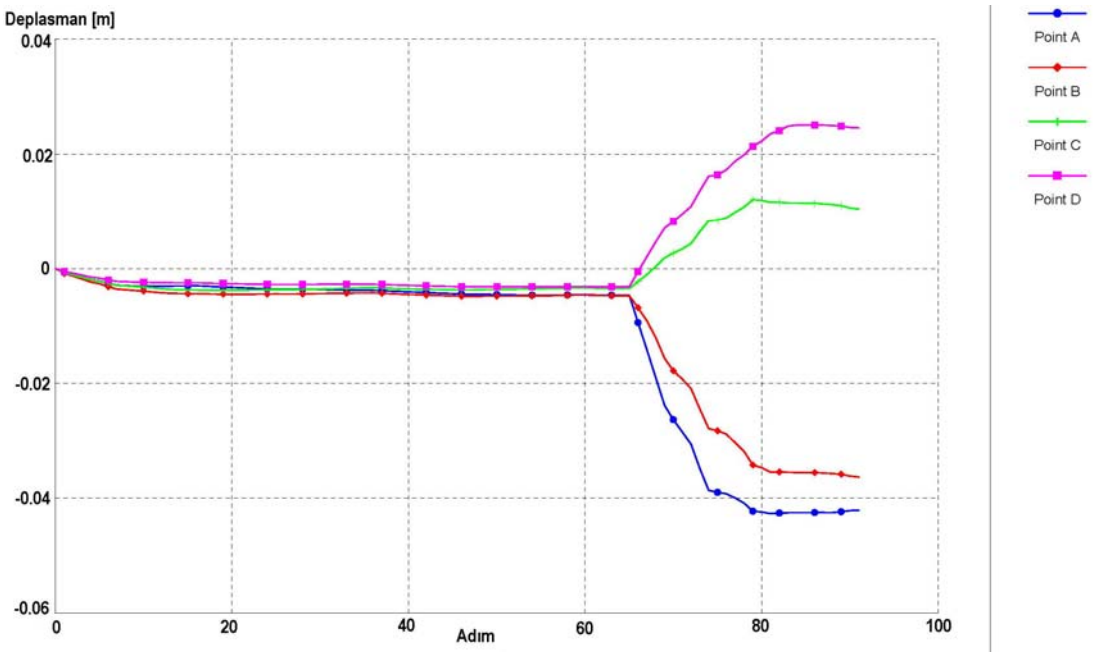
EK-G T2 Tünelinin inşa edilmesinden sonra T1 Tünelinin yapılması durumu, deplasman grafikleri



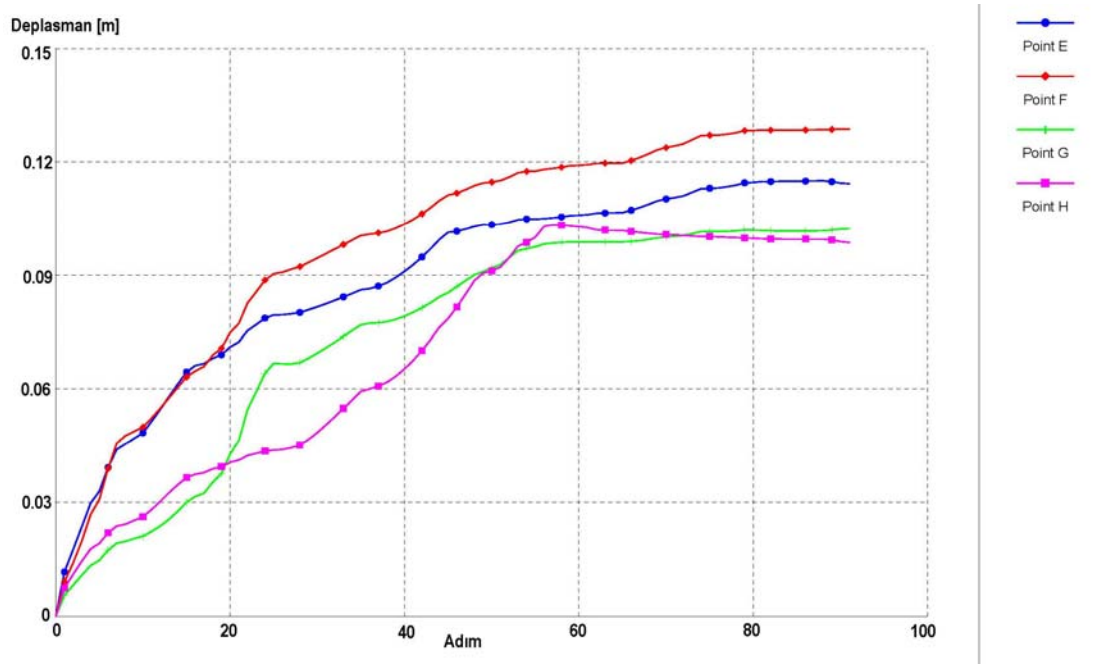
Şekil G.1:T1 Tüneli toplam deplasman grafiği



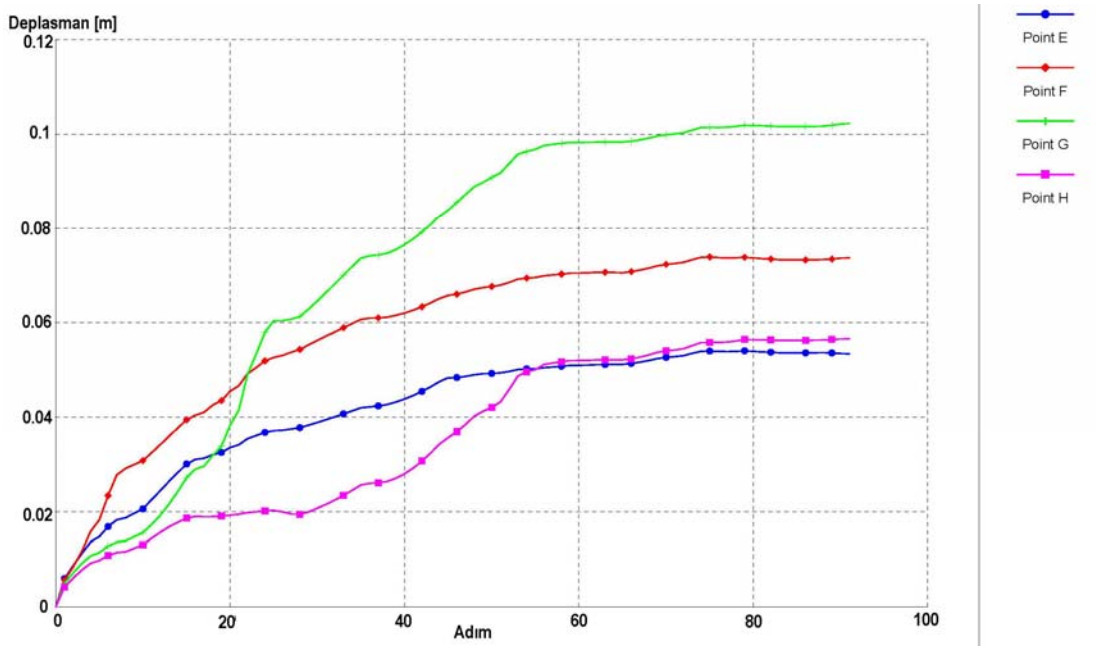
Şekil G.2:T1 Tüneli yatay deplasman grafiği



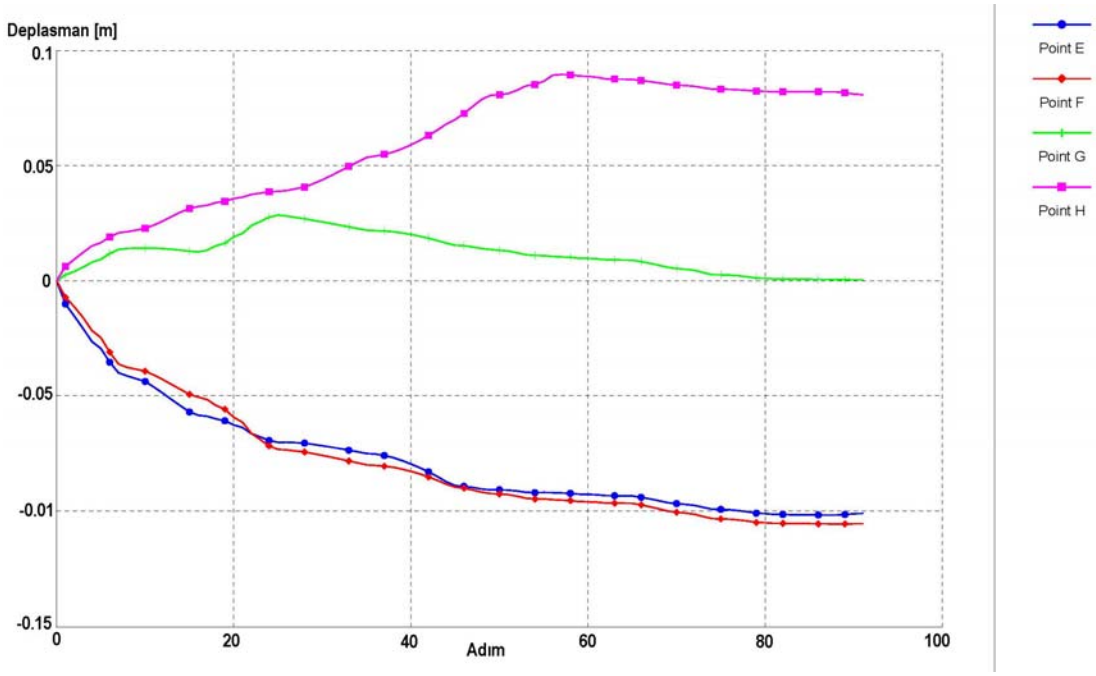
Şekil G.3:T1 Tüneli düşey deplasman grafiği



Şekil G.4:T2 Tüneli toplam deplasman grafiği

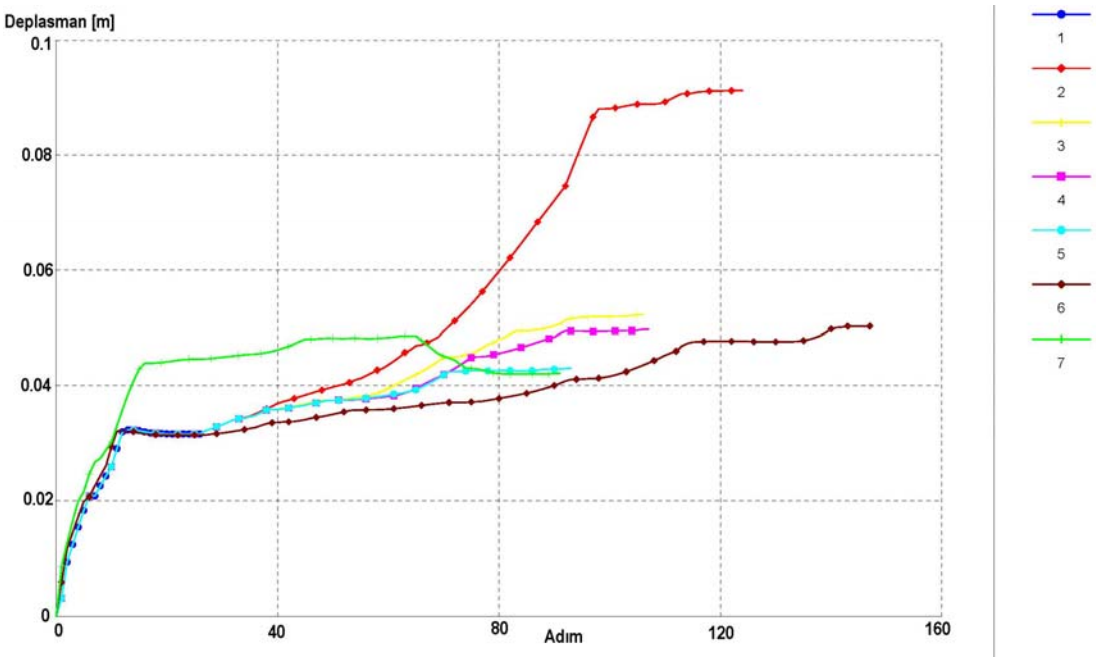


Şekil G.5:T2 Tüneli yatay deplasman grafiği

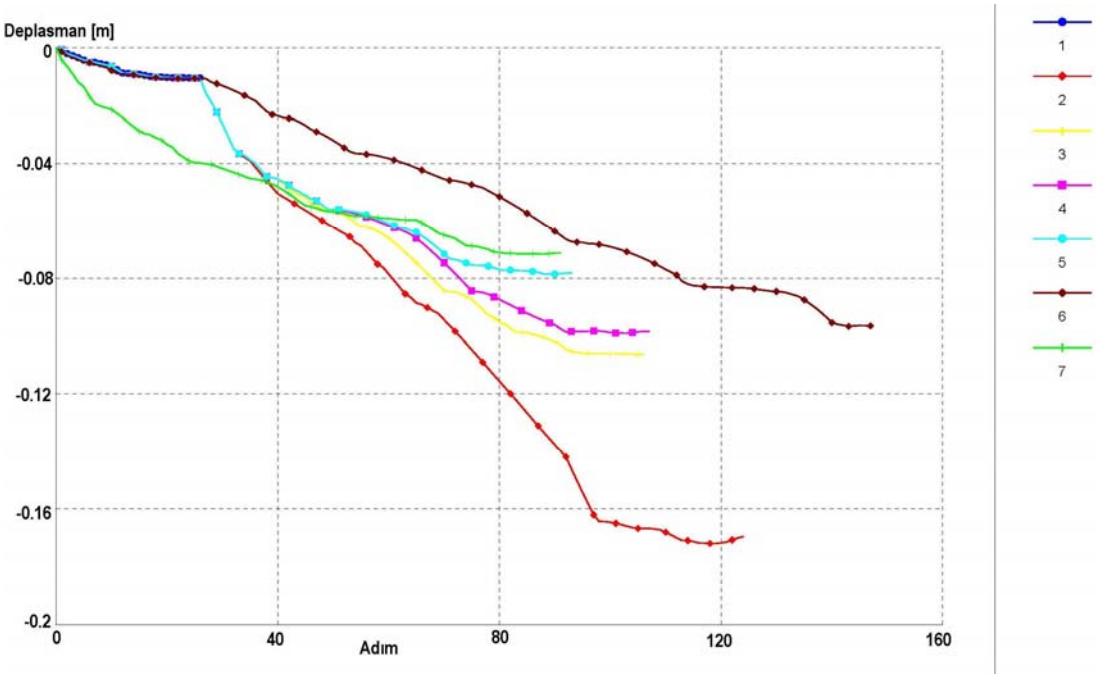


Şekil G.6:T2 Tüneli düşey deplasman grafiği

EK-H Zemin oturma grafikleri



Şekil H.1: Tünel açılması sonucu zemin yüzeyinde oluşan yatay oturmalar



Şekil H.2: Tünel açılması sonucu zemin yüzeyinde oluşan düşey oturmalar.

ÖZGEÇMİŞ

Ömür Şeker 1980 yılında Ankara'da doğdu. İlköğrenimini Sivas Fatih İlkokulu'nda, orta öğrenimi Sivas Selçuk Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girmeye hak kazanmıştır. Bu fakülteden 2004 yılında mezun olarak aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'na kabul edilmiştir. 2004 yılı Eylül ayında STFA İnşaat A.Ş. İhale Hazırlık Departmanı'nda ihale hazırlık mühendisi olarak göreve başladıktan sonra 2007 yılının Nisan ayından beri aynı şirket bünyesinde Suudi Arabistan'da bulunan olan Manifa Projesi'nde planlama şefi olarak çalışmaktadır.