



**TOPÇAM TÜNELİ DEFORMASYONLARININ RASTGELE KÜME
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI**

Gamze DNDER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2019

Gamze DÖNDER tarafından hazırlanan "TOPÇAM TÜNELİ DEFORMASYONLARININ RASTGELE KÜME SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Nail ÜNSAL

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

N. Ünsal

İkinci Danışman: Öğr. Gör. Dr. Erhan TEKİN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

E. Tekin

Başkan: Doç. Dr. Zeynep Huri ÖZKUL BİRGÖREN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Z. Özkul Birgören

Üye: Prof. Dr. Özgür ANIL

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

O. Anıl

Üye: Doç. Dr. Berna UNUTMAZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

B. Unutmaz

Tez Savunma Tarihi: 20/06/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Gamze DÖNDER

20/06/2019

TOPÇAM TÜNELİ DEFORMASYONLARININ RASTGELE KÜME SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Gamze DÖNDER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Bu çalışmada rastgele küme sonlu elemanlar metodu ile elde edilen tünel deformasyon sonuçlarının arazi ölçümleriyle karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışma için Ordu ili Ulubey ilçesinde bulunan Topçam tünelinin 35+192 km kesiti seçilmiştir. Tünel 2 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve Mohr-Columb yenilmekriterleri kullanılarak zemin parametreleri modele tanımlanmıştır. Rastgele küme sonlu elemanlar modelinde değişken olarak elastisite modülü, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve rahatlama faktörü parametrelerinin üst ve alt limit aralıkları iki ayrı küme halinde belirlenmiştir. İki küme olarak oluşturulması için laboratuvar sonuçlarındaki eksenli basınç dayanımının alt ve üst limitleri kullanılmıştır. Her bir kümedeki elastisite modülü, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve rahatlama faktörü değerlerinin kendi aralarında kartezyen çarpımı yapılarak 256 ayrı kombinasyon oluşturulmuştur. Oluşturulan 256 ayrı analiz sonucundan tüneldeki 5 nokta için deformasyonların olasılıksal dağılım grafikleri oluşturulmuştur. Topçam tüneli için sahada yapılan deformasyon ölçümleri ile olasılıksal dağılım grafiğinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın sonucunda olasılıksal dağılım grafiğindeki maksimum ve minimum aralıkların saha ölçümlerini kapsadığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 91105

Anahtar Kelimeler : Tünel, rastgele küme sonlu elemanlar,

Sayfa Adedi : 105

Danışman : Prof. Dr. Nail ÜNSAL

İkinci Danışman : Öğr. Gör. Dr. Erhan TEKİN

ANALYSIS OF TOPCAM TUNNEL DEFORMATIONS BY RANDOM SET FINITE
ELEMENT METHOD

(M. Sc. Thesis)

Gamze DÖNDER

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2019

ABSTRACT

In this study, the deformation behavior of the Topcam tunnel was investigated. When deformation behavior is examined, random finite element method is used. Random finite element method is used to define the soil parameters and these parameters are transferred to the final elements with the most appropriate combinations. The Mohr-Coloumb criterion was used to reflect the soil parameters to the model. The results of the calculations using the random finite element method were obtained and compared with the measurements made on the tunnel. With this comparison, it is aimed to show that realistic deformation results are obtained by using the random finite element method, and in this context, it is expected that the measured values will go out in the determined range. Measured values that have different values from the specified range have been found to have a difference on a millimeter basis. When the soil parameters of the tunnel were examined, it was thought that the millimetric difference could be ignored because it was a soil classified as a solid rock, so random finite elements were found to give real reflecting deformation of the ground.

Science Code : 91105
Key Words : Tunnel, Random set finite element
Page Number : 105
Supervisor : Prof. Dr. Nail ÜNSAL
Co-Supervisor : Dr. Lecturer Erhan TEKİN

TEŞEKKÜR

En büyük teşekkürlerden birini çalışmamda büyük emeğe sahip olan değerli tez danışmanım Prof. Dr. Nail ÜNSAL' a, tezin ilk aşamasından son anına her zaman her sorumda cevabını ve bilgisini esirgemeyen ikinci danışmanım Öğretim Görevlisi Dr. Erhan Tekin'e borç bilirim. Desteklerini esirgemeyen babam Makine Mühendisi Yılmaz KAFALI'ya, annem Türkan KAFALI' ya ve KAFALI ailesine, ablam Ş.Gökçeçiçek YÖNTEM'e, canım eşim İnşaat Mühendisi Samet DÖNDER'e, kızım Azra DÖNDER ve DÖNDER ailesine, canım yeğenlerim Z.Okyanus ve Nil Sena YÖNTEM'e teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışma için tünelin bilgilerini sağladıkları için T.C. Karayolları Müdürlüğü'ne ve Jeoloji Mühendisi Yalçın YILMAZ'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. TÜNEL.....	7
2.1. Kaya Parametrelerini Belirlemede Kullanılan Bazı Laboratuvar Deneyleri	7
2.1.1. Nokta yükleme deneyi.....	7
2.1.2. Tek eksenli basınç deneyi.....	8
2.1.3. Üç eksenli basınç deneyi.....	8
2.1.4. Lugeon deneyi.....	9
2.2. Kaya Kütlesi Sınıflandırma Sistemleri	10
2.3. Kaya Parametrelerinin Belirlenmesi.....	10
2.3.1. Hoek ve Brown yenilme kriteri.....	10
2.3.2. Hoek ve Diederichs yöntemi ile yerinde kaya dayanımı tespiti.....	18
2.3.3. Nicholson ve Bieniawski yöntemi ile yerinde kaya dayanım tespiti.....	18
2.3.4. Sönmez vd. yöntemi ile yerinde kaya dayanımı tespiti.....	19
3. UYGULAMA YERİ	21
3.1. Uygulama Yeri Konumu ve Jeolojik İncelemesi	21

Sayfa

3.2. Uygulama Yeri Deformasyon Ölçüm Noktaları ve Ölçümde Kullanılan Yöntemler.....	24
4. RASTGELE KÜME SONLU ELEMANLAR METODU	27
4.1. Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Metodu.....	27
4.2. Analiz Amaçları.....	30
4.3. Zemin Bünye Denklemleri ve Zemin Parametrelerin Belirlenmesi	30
4.4. Girdi Parametrelerinin Düzenlenmesi	32
4.4.1. Kaya parametreleri.....	34
4.5. Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Metodu Uygulaması	39
4.6. Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Model Geometrisi.....	40
4.6.1. Sınır şartlarının tanımlanması	41
4.6.2. Eleman seçimi çalışması.....	42
4.6.3. Yakınsama eleman çalışması	47
4.7. Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Metodunda Kullanılan Başlangıç Koşulları	53
4.7.1. Rahatlama faktörü (R_f) değerinin etkitilmesi.....	53
4.7.2. Tünel kazı aşamaları.....	63
4.7.3. Tünel destek sisteminin belirlenmesi	70
4.7.4. Sükûnetteki yanal toprak basıncı katsayısı (K_0) değerinin etkitilmesi...	77
4.8. Çıktılar	78
4.9. Deformayon İçin Toplam Olasılık Grafiklerinin Oluşturulması ve Doğrulama	80
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR	91
EKLER	95
EK-1 Laboratuvar çalışmalarına ait deney sonuçları.....	96

Sayfa

Ek-2 5 Adet deformasyon ölçüm noktasına ait analiz sonuçları	103
EK-3 35+192 km'ye ait deformasyon okumaları	104
ÖZGEÇMİŞ	105



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Sağlam veya masif kaya kütlesi ile laminalı kayaçları da içerek şekilde düzenlenmiş GSI sınıflama sistemi [39]	13
Çizelge 2.2. Modifiye edilmiş GSI sınıflama sistemi [40]	14
Çizelge 2.3. Kayaç gruplarına göre m_i sabiti için önerilen değerler [41]	15
Çizelge 2.4. Örselenme faktörü (D) tahmini için kılavuz [42]	16
Çizelge 2.5. RMR sisteminden faydalanarak jeomekanik parametrelerin tayini [47] ...	19
Çizelge 3.1. 35+192 km'sine ait 5 nokta için deformasyon okumaları	26
Çizelge 4.1. Tünel destek malzemeleri teknik özellikleri	33
Çizelge 4.2. Laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen değerler (SK-2 sondajı 675m-700m arası)	35
Çizelge 4.3. RQD değerine bağlı J_v değerleri	37
Çizelge 4.4. GSI değerlerine bağlı olarak a , s ve m_b değerleri	37
Çizelge 4.5. Hesap sonuçlarına bağlı olarak hesaplanan değerler	39
Çizelge 4.6. Hesap sonuçlarına bağlı olarak çözümlemede kullanılacak değerler	39
Çizelge 4.7. Dört değişken değer için oluşturulan ilk onaltı kombinasyona ait zemin parametrelerinin değerleri	40
Çizelge 4.8. Eleman tiplerine göre yatay ve düşey deformasyon sonuçları	47
Çizelge 4.9. Ağ eleman sayısına karşılık gelen nokta sayısı, yatay deformasyon ve düşey deformasyon değerleri	48
Çizelge 4.10. Kapanma / maksimum kapanma ile tünel yüzeyinden uzaklık / tünel yarıçapının karşılaştırması [58]	56
Çizelge 4.11. Bölüm numaralarına göre R_f değerleri	59
Çizelge 4.12. Tünel çevresine ve bulonlara etki eden kuvvetler	75
Çizelge 4.13. T1 tüneline 35+192 km için uygulanan destekleme elemanları	76
Çizelge 4.14. Belirlenen noktalara ait deformasyon sonuçları	79

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Uygulama yeri (Ordu ili Ulubey ilçesi Topçam tüneli).....	21
Şekil 3.2. Uygulama alanı ve çevresinin 1/25.000 ölçekli jeoloji haritası [48].....	22
Şekil 3.3. Yol yarmasında görülen siyenit yüzeylenmeleri [48].....	22
Şekil 3.4. T1 tüneli güzergâhı [48]	23
Şekil 3.5.Uygulama yapılan tünelin boy kesiti- 35+192 km tünel yakın görünüşü.....	23
Şekil 3.6. T1 tüneli km: 35+192 ait enkesit görünüşü (A-A kesiti).....	24
Şekil 3.7. Deformasyon ölçüm noktaları.....	26
Şekil 4.1. Rastgele küme sonlu eleman sistematığı	29
Şekil 4.2. Mohr-Coulomb yenilme zarfı	31
Şekil 4.3. Çelik hasır ve beton ile yapılan destek kaplaması için modele tanımlanan teknik özellikleri	33
Şekil 4.4. Bulon destek elemanı için modele tanımlanan teknik özellikler.....	34
Şekil 4.5. Kaya parametreleri hesabı aşamaları.....	35
Şekil 4.6. Sığ tünel için model sınırları ve şartları.....	41
Şekil 4.7. Tipik 2 boyutlu sonlu elemanlar.....	42
Şekil 4.8. 6 Noktalı üçgen eleman ağ örgüsü	44
Şekil 4.9. 6 Noktalı üçgen eleman yatay deformasyon sonucunun genel görünüşü.....	45
Şekil 4.10. 6 Noktalı üçgen eleman yatay deformasyon sonucunun yakın görünüşü.....	45
Şekil 4.11. 6 Noktalı üçgen eleman düşey deformasyon sonucunun genel görünüşü	46
Şekil 4.12. 6 Noktalı üçgen eleman düşey deformasyon sonucunun yakın görünüşü	46
Şekil 4.13. Ağ eleman sayısına bağlı olarak değişen yatay deformasyon değerleri.....	48
Şekil 4.14. Ağ eleman sayısına bağlı olarak değişen düşey deformasyon değerleri	49
Şekil 4.15. 2387 eleman sayısı ile oluşturulmuş ağ görüntüsü.....	50

Şekil	Sayfa
Şekil 4.16. 2387 eleman sayısı ile oluşturulmuş düşey deformasyon sonucunun genel görünüşü	51
Şekil 4.17. 2387 eleman sayısı ile oluşturulmuş düşey deformasyon sonucunun yakın görünüşü	51
Şekil 4.18. 2387 eleman sayısı ile oluşturulmuş yatay deformasyon sonucunun genel görünüşü	52
Şekil 4.19. 2387 eleman sayısı ile oluşturulmuş yatay deformasyon sonucunun yakın görünüşü	52
Şekil 4.20. Yüzey yakınında desteklenmeyen bir tünel için radyal yer değiştirmelerinin (u_r) profil görünümü	53
Şekil 4.21. Oluşan plastik bölgenin genel görünüşü	55
Şekil 4.22. Oluşan plastik bölgenin yakın görünüşü	56
Şekil 4.23. Tünel arının 2 m ileriye ulaştığında düşey yönde oluşan maksimum deformasyon	57
Şekil 4.24. Maksimum deformasyon ile kazı aşamasının belirlenmesi	58
Şekil 4.25. Elastisite modülünün azaltılarak oluşan plastik bölgenin genel görünüşü ...	60
Şekil 4.26. Elastisite modülünün azaltılarak oluşan plastik bölgeninyakın görünüşü	60
Şekil 4.27. Elastisite modülünün azaltılmasıyla oluşan tünel arının 2 m ileriye ulaştığında düşey yöndeki maksimum deformasyon	61
Şekil 4.28. Elastisite modülünün azaltılmasıyla oluşan maksimum deformasyon ile kazı aşamasının belirlenmesi	62
Şekil 4.29. Yeni Avusturya metoduna göre kazı aşamalarının gösterimi	63
Şekil 4.30. Kazı aşaması öncesi durum	64
Şekil 4.31. Aşama-2-3-4-5 üst yarının kazılması	65
Şekil 4.32. Aşama-6 üst yarının destek elemanlarının yüklenmesi	66
Şekil 4.33. Aşama-7 üst yarının bulon elemanlarının yüklenmesi	67
Şekil 4.34. Aşama-8-9-10 sol alt yarının kazılması	68
Şekil 4.35. Aşama-11 sol alt yarının destek elemanlarının yüklenmesi	68

Şekil	Sayfa
Şekil 4.36. Aşama-12-13-14 sağ alt yarının kazılması	69
Şekil 4.37. Aşama-11 sağ alt yarının destek elemanlarının yüklenmesi.....	69
Şekil 4.38. 15 numaralı kazı aşamasında oluşan toplam deformasyonu	70
Şekil 4.39. 15 numaralı kazı aşamasında oluşan maksimum kayma birim deformasyonu	71
Şekil 4.40. Tünel kaplamasında oluşan eksenel kuvvetlerin genel görünüşü	71
Şekil 4.41. Tünel kaplamasında oluşan eksenel kuvvetlerin yakın görünüşü	72
Şekil 4.42. Tünel kaplamasında oluşan eğilme momentlerinin genel görünüşü	72
Şekil 4.43. Tünel kaplamasında oluşan eğilme momentlerinin yakın görünüşü	73
Şekil 4.44. Tünel kaplamasında oluşan kesme kuvvetlerinin genel görünüşü	73
Şekil 4.45. Tünel kaplamasında oluşan kesme kuvvetlerinin yakın görünüşü	74
Şekil 4.46. Bulonlara etki eden eksenel kuvvetlerin genel görünüşü	74
Şekil 4.47. Bulonlara etki eden eksenel kuvvetlerin yakın görünüşü	75
Şekil 4.48. Tünel destekleme kapasiteleri	76
Şekil 4.49. Zemin gerilmelerinin modele etkitilmesi.....	78
Şekil 4.50. 1 noktası için arazi ve hesaplanan yatay deformasyon değerleri	80
Şekil 4.51. 1 noktası için arazi ve hesaplanan düşey deformasyon değerleri.....	81
Şekil 4.52. 2 noktası için arazi ve hesaplanan yatay deformasyon değerleri	81
Şekil 4.53. 2 noktası için arazi ve hesaplanan düşey deformasyon değerleri.....	82
Şekil 4.54. 3 noktası için arazi ve hesaplanan yatay deformasyon değerleri	82
Şekil 4.55. 3 noktası için arazi ve hesaplanan düşey deformasyon değerleri.....	83
Şekil 4.56. 4 noktası için arazi ve hesaplanan yatay deformasyon değerleri	83
Şekil 4.57. 4 noktası için arazi ve hesaplanan düşey deformasyon değerleri.....	84
Şekil 4.58. 5 noktası için arazi ve hesaplanan yatay deformasyon değerleri	84
Şekil 4.59. 5 noktası için arazi ve hesaplanan düşey deformasyon değerleri.....	85

Şekil	Sayfa
Şekil 4.60. Elastisite modülü değişiminin deformasyon üzerinde etkisi.....	85
Şekil 4.61. Kohezyon değişiminin deformasyon üzerinde etkisi.....	86
Şekil 4.62. İçsel sürtünme açısı değişiminin deformasyon üzerinde etkisi.....	86
Şekil 4.63. $R_{f(Tepe)}$ değişiminin deformasyon üzerinde etkisi.....	87



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
D	Tünel çapı
c	Kohezyon
Ø	İçsel sürtünme açısı
σ_1	En büyük düzlemsel asal gerilme
σ_3	En küçük düzlemsel asal gerilme
σ_{ci}	Sağlam ve çatlaksız kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı
E	Elastisite modülü
E_M	Kaya kütlesi deformasyon modülü
γ	Birim hacim ağırlık
J_a	Eklem alterasyon sayısı
J_n	Eklem takım sayısı
J_r	Eklem pürüzlülük sayısı
J_w	Eklem su indirgeme faktörü
J_v	Hacimsel eklem sayısı
$I_{s(50)}$	Nokta yükleme deneyi sonuçlarının ortalaması
q_u	Kaya basınç yenilmesi değeri
P	Destek yükü
Q	Tünelcilik niteliği indeksi
D_e	Kazı açıklığı eşdeğer boyutu
m_b	m_i kaya malzemesi katsayısının indirgenmiş değeri
m_i	Kaya türüne bağlı olarak değişen sabit
s	Kaya kütlesi sabiti
a	Kaya kütlesi sabiti

Simgeler**v** **τ_f** **u** **R_r** **R_w** **R_f** **S_n** **Açıklamalar**

Possion oranı

Kayma mukavemeti

Boşluk suyu basıncı

Pürüzlülük puanı

Bozunma puanı

Dolgu puanı

Gözlenen her bir eklem seti için bulunan eklem ara uzaklığı

Kısaltmalar**ESR****GSİ****NATM****RMR****RQD****SRF****SRS****SR****Q****Açıklamalar**

Kazı açıklığı tahkimat oranı

Jeolojik dayanım indeksi

Yeni Avusturya metodu

Kaya kütlesi oranı

Kaya kütlesi katsayısı

Gerilim indirgeme faktörü

Kaya yapısı puanı

Yapısal özellik puanı

Kaya kütlesi sınıflandırma sistemi

1. GİRİŞ

Tünellerde deformasyon, tünelin açılması ile beraber tünel üzerine etkiyen gerilmelerin yeniden dağılım göstermesi ile oluşmaktadır. Zeminin/kayanın özellikleri, tünel açım yöntemi ve kemerlenme etkisi gibi unsurlar tünel deformasyonlarını etkilemektedir. Arazi deneyleri ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler de kaya parametrelerini sınırlı oranda temsil edebilmektedir. Parametrelerin belirlenmesinde ölçüm hataları, dönüşüm belirsizlikleri ve kayanın doğasındaki belirsizlikler etkili olmaktadır. Birinci belirsizlik; ekipman, yöntem, operatör ve rastgele test etme tekniklerinden kaynaklanırken, ikinci belirsizlik; laboratuvar veya arazi deney sonuçlarını ampirik ve diğer korelasyonlarla zemin özelliklerine çevrilmesinden oluşmaktadır. Üçüncü belirsizlik ise zemin formasyonunun özelliğinde olan doğal jeolojik süreçten kaynaklanmaktadır [1].

Belirsizliklerin irdelenmesi geoteknik mühendisliğinin en önemli konularından biridir. Çünkü zemin yapısı çelik ve beton gibi öngörülebilir ve yapısal özellikleri tahmin edilebilir malzemelerden oluşmadığı içinyapılan analizlerin sonuçlarını büyük oranda etkilemektedir [2].

Belirsizliklerin giderilmesi için sadece basit matematiksel yöntemler yeterli gelmemekle beraber olasıksal yöntemler daha uygun çözümler sunmaktadır. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler de belirsizlik hesaplarının kolaylaştırmaktadır.

Bu çalışmada Topçam tünelinin modellenmesi rastgele küme sonlu elemanlar metodu ile 2 boyutlu düzlemsel olarak Phase² v.8 yazılımında yapılmıştır. Rastgele küme sonlu elemanlar metodu modelinde elastisite modülü, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve rahatlama faktörü değişken olarak kabul edilmiştir. Bu parametrelerin en yüksek ve en düşük değerleri kullanılarak 256 tane kombinasyon oluşturulmuştur. Her kombinasyon için deformasyon hesapları yapılmıştır. Hesaplanan deformasyon değerleri ile saha ölçüm değerleri karşılaştırılmıştır.

Tezin içerdiği bölümler ve bu bölümlerin kapsamı aşağıdaki gibidir:

Bölüm 1’de tezin içeriğinin özeti, araştırmanın amacı, araştırmanın önemi ve literatür çalışması ile ilgili bilgiler anlatılmaktadır.

Bölüm 2’de kaya parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan Hoek ve Brown yöntemi, Hoek ve Diederichs yöntemi, Nicholson ve Bieniaeski yöntemi ve Sönmez vd.’nin yöntemlerinden bahsedilerek hesaplama aşamaları ve tünel inşası metodları anlatılmaktadır.

Bölüm 3’de Topçam tünelinin uygulama yeri, jeolojik yapısı ve uygulama yerindeki deformasyon ölçüm sonuçları verilmektedir.

Bölüm 4’de rastgele küme sonlu eleman metodunun analiz amaçları, modellemede kullanılan geometrik veri, modelleme aşamaları, deformasyon sonuçları ve deformasyon sonuçlarının yerinde ölçülen deformasyonlar ile karşılaştırılmaları anlatılmaktadır.

Bölüm 5’de çalışmanın özeti, gelecekteki çalışmalar için öneriler ve elde edilen sonuçların arazi sonuçlarını doğrulayıp doğrulamadığı irdelenmektedir.

Bu çalışmanın amacı;

- Kaya mekaniği deneyleri ile parametrelerinin hesaplanma yöntemlerinin gözden geçirilmesi,
- Deneyler ile bulunan zemin/kaya parametrelerinin denklemler yardımıyla hesapta kullanılacak parametrelere dönüştürülmesi,
- Tünel modellenmesi için hesaplanan her bir zemin/kaya parametresinin en yüksek ve en düşük değerlerinin belirlenmesi,
- Rastgele küme sonlu elemanlar metodu kullanarak tünel deformasyonlarının hesaplanması,
- Toplam olasılık yöntemi ile oluşturulan grafiklerdeki deformasyonlar ile yerinde yapılan ölçümlerin karşılaştırılması,
- Rastgele küme sonlu elemanlar metodunun pratikte etkin bir yöntem olup olmadığının belirlenmesidir.

Bu araştırmanın önemi:

Bu araştırmada belirsizliklerin giderilmesi için olasılıksal metodların geoteknikte uygulanabilirliğinin gösterilmesi amaçlanmaktadır. Önceki çalışmalarda çeşitli olasılıksal metodlar bu amaçla kullanılmaktadır. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak rastgele küme sonlu elemanlar metodu Topçam tüneli üzerinde uygulanmaktadır. Böylece belirsizliklerin tünel deformasyonuna olan etkisi gösterilmektedir. Çalışmada elastisite modülü, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve rahatlama faktörü değerleri değişken parametre olarak kabul edilmekte ve deformasyon hesapları yapılmaktadır. Hesap sonucunda bulunan deformasyon değerlerinin oluşturduğu sınır aralığının yerinde ölçüm değerlerinin içerisinde kalıp kalmadığı irdelenerek uygulamada geçerliliği ortaya koyulacaktır.

Bu çalışma için yapılmış literatür çalışması şu şekildedir;

Sonlu elemanlar yönteminin geliştirilmesi ve çalışmalarda yer verilmesi birçok çalışmacı tarafından yapılmıştır. Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943)'nin yaptıkları çalışmalar sonlu elemanlar metodunun uygulandığı ilk çalışmalardır ve yarı analitik analiz metodlarının geliştirilmesine katkı sağlamışlardır. Clough (1960) sonlu elemanlar metodu ifadesine ilk kez makalesinde yer veren kişi olmuştur. Üçgen eleman için rijitlik matrisinin oluşturulması Turner ve ark. (1956) çalışmalarıyla geliştirilirken yöntemin üç boyutlu problemlere uygulanması ise Argyis (1964) tarafından yapılmıştır. Lineer olmayan problemlerde geometrik çözüm tekniklerinin uygulanması da Turner ve ark. (1960) 'nın çalışmalarıyla geliştirilmiştir [3-8].

Olasılık teoremlerinin günümüze kadar geliştirilmesi birçok çalışma ile mümkün olmuştur. Freudenthal (1947) ve Pugsley (1955)'in sundukları çalışmalarla yapıların klasik güvenilirlik teorisiniyaygın hale getirmişlerdir. Cornell (1969) ise basitleştirilmiş olasılıksal tasarım için güvenilirlik indeksini ortaya koyan ilk çalışmacı olmuştur. Ayrıca bu çalışmada belirsiz değişkenlerin birinci moment ve varyans gibi ikinci moment terimlerini kullanarak rastsal değişkenler için Gauss (normal) dağılımını uyarlayarak hesaplamalarını yapmıştır. Domspter (1967) ise belirlenmiş aralıkta olasılığı alt ve üst değer olarak tanımlanmıştır. Collins ve Thompson (1969) ile Shinozuka ve Astill (1972) yaptıkları çalışmalar sayesinde birinci dereceden permütasyon ve simülasyon kullanılan rastgele sistemler için çözümlemelerde bulunmuştur. Sonlu elemanlar modellemesinde rastlantısallık ve

permütasyon teknikleri ile çözümlemelerde Hart ve Collins (1970) tarafından ortaya konmuştur. Nakagiri ve Hisada (1981) çalışmalarında skolaistiksonlu elemanlarda permütasyon analizi ile ilgili bir seri araştırma yapmış ve ikinci dereceden permütasyon için gerekli hesaplama çabalarının ölçeğinden dolayı pratik olmadığı sonucuna varmıştır. Malzeme özelliklerinin mekansal dağılımı için olasılıksal modelleri çalışmalarında kullananlar ise Shinozuka ve Lenoe (1976)'dır. Vancmarcke (1977) ise olasılıksal çalışmaların zemin profillerinin mühendislik özelliklerine ilişkin tahminlerde yardımcı olabileceğini öne sürmüştür. Der-Kiureghian ve Ke (1987) güvenilirlik indekslerini elde etmek amacıyla ayrı rastgele süreçlerle modellenen malzeme özelliklerini sonlu elemanlar koduna dâhil etmek için etkili bir algoritma geliştirmiştir [9-19].

Olasılıksal çalışmaların geoteknik mühendisliğinde kullanılması Tonon ve ark. (1996)'nın çalışması ile olmuş ve tünelde rastgele küme teorisi hesapları yaparak uygulanmışlardır. Tonon ve ark. (2000), kaya mühendisliğinde belirsizliklerin rastgele küme teorisi ile belirlenen olasılık aralığında olması gerektiğini açıklamıştır. Kaya mühendisliğinde kullanılacak sınıflandırmalarında belirlenen ampirik yöntemlerin tünel tasarımında kullanılmasını önermişlerdir. Rackwitz (2000) çalışmasında olasılıksal zemin modellemesi üzerinde durmuş ve farklı zemin türleri için çalışma öncesi bilgi vermeye çalışarak bununla ilgili bir formülasyon da ortaya konmuştur [20-22].

Schweiger ve Peschl (2007) ile Nasekhian ve Schweiger (2010)'in çalışmaları tünel üzerinde yapılmış olan rastgele küme sonlu elemanlar yönteminin uygulanmasında öncü olmuştur. Model girdi parametrelerinin olasılıksal dağılımını göz önüne alarak sonlu elemanlar yöntemiyle deterministik çözüm sunmuşlardır. Rastgele küme teorisi yardımıyla buldukları sonuçları saha ölçüm sonuçları ile karşılaştırmışlar ve yöntemin uygulanabilir olduğunu ortaya koymuşlardır [23, 24].

Tekin (2012) çalışmasında geoteknik mühendisliği hesaplamaları için zemin ve kaya belirsizliklerini ele almıştır. Ayrıca ekonomik kısıtlamaların olmadığı bir ortamda teorik olarak sınırsız sondaj yapıp deneyler yardımıyla zeminin geoteknik özelliklerinin tam olarak belirlenebilirliğinden bahsetmiştir. Geleneksel tasarım yaklaşımında zemin parametrelerinin defalarca değerlendirilmesinin mümkün olmadığını ve sistem performansını etkileyen faktörlerin tamamını genel yaklaşım olarak tek bir güvenlik faktörü altında uygulanmasını öngörüldüğünü vurgulamıştır. Bundan dolayıda olasılıksal

yaklaşım ile analizin deterministik yaklaşımda kullanılan güvenlik faktörü yerine, belirsizliklerin sistematik olarak incelenmesinden bahsetmiştir [2].

Akbaş ve Kökten (2015) ise derin kazı ve kazıklı iksa sistemlerinde rastgele küme sonlu elemanlar metodunu uygulamışlardır. Çalışma sonucunda da deformasyon değerlerinin en düşük ve en yüksek değerlerin sınır aralığında kaldığını bularak rastgele küme sonlu elemanlar metodunun derin kazı ve kazıklı iksa gibi yapılarda uygulanabilirliğini ortaya koymuşlardır [25].

Tünel deformasyonlarının ölçülmesi, değerlendirilmesi ve yenilme ölçütlerinin belirlenmesi içinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Schubert ve Vavrovsky (1994) tarafından yapılan çalışma ile tüneldeki yerdeğiştirme sonuçlarının yorumu ve yapılan çalışmalar veya süreçleri için yapılan işlemler ortaya konmuştur. Tünel performansının belirlenmesi için kullanılan ekstansiyometre ile yapılan deformasyon ölçümleri, kaya bulonu ölçümleri gibi klasik yöntemlerden birçoğunun da belirgin eksikliklere sahip olduğunu ve okumaların havalandırma, iş makinalarının çalışması gibi nedenlerle doğru yapılmadığını ortaya koymuştur. Yeni Avusturya metodu tasarımında destek tipi, kaya kütlesi geoteknik özellikleri, tünel davranışı ve deformasyonların izlenmesinin temel alınarak yapıldığı belirtilmiştir [26].

Schubert ve Budil (1995) tarafından yapılan çalışmayla Inntal ve Galgenber tünellerinde yapılan gözlemlerle kazı yönünde oluşan yerdeğiştirme bileşenlerinin sistematik değerlendirmesi yapılmıştır. Inntal tüneline fay zonundaki yerdeğiştirme değeri 80 mm, tünel tavanında 170 mm ve tünel yan duvarlarında ise 100 mm'nin üzerinde olduğunu belirtmişlerdir. Galgenber tüneline dolomit üzerinde yaptıkları çalışmalarda birincil gerilme yönünün ölçülen deformasyonlara etkisini araştırmışlardır. Belirli eğilimlerinin gözlenebilmesi amacıyla boyuna yer değiştirme (L) ve oturma (S) arasındaki oran ile yerdeğiştirme vektörü ve yerdeğiştirme açısı değerlerini hesaplamışlardır. Açı negatif olduğunda kazı yönünde bir yerdeğiştirme, pozitif olduğunda ise kazı yönünün tersi bir yerdeğiştirme olduğunu ortaya koymuşlardır [27].

Schubert ve Steindorfer (1995), yüksek derecede faylanmış kayalarda tünelin boşluktaki yerdeğiştirme vektörlerinin yönelimini kullanılarak sadece birkaç çap ilerideki kaya kütle sertliğindeki değişikliklerinin izlenebildiğini ve aynı zamanda birincil gerilme

yönlemlerindeki saplamalarında belirlenebileceği bu çalışmanın kapsamında ortaya koymuştur. Mutlak deformasyon ölçümlerinin bulunması, zeminin gelişiminin karmaşık sisteminin davranışını daha iyi anlamak için imkânlar yaratmışlardır. Bu karmaşık sistem davranışını anlamada yardımcı bir araç yaratarak soruna yönelik değerlendirmeleri kolaylaştırmıştır [28].

Sellner ve Steindorfer (2000) çalışmalarında sıkışabilir zeminlerde açılan tünellerde yatay deformasyon ve oturma değerlerinden, tünel duvarlarındaki deformasyon tahminine yönelik analitik bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yer değiştirme hesaplama yöntemi, kaya kütlelerinin deformasyon davranışını ve zaman ile beraber kazı ilerlemesinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bu sayede kaya kütlelerinin davranışının kısa vadeli tahmini ve genel bilgiler ile gerekli hesap parametreleri elde edilmiştir [29].

Schubert ve ark. (2002), tünellerde daha fazla ölçüm verisinin elde edilmesi için izleme yöntemlerinin devamlı değiştiğini, izleme verilerinin zamanında ve yerinde yapılan ölçümlerle elde edilmesi ile tünel deformasyonları hakkında önemli bilgiler elde edilebileceğini belirtmiştir. Bu sayede de ölçümlerin grafiksel olarak değerlendirilmesi ile tünel içerisindeki destek tipi ve miktarı hesabı için ek bilgiler sağlayacağı gösterilmiştir. Kaya kütlelerinin davranışı, gözlemlenen kaya kütlesi koşullarını analiz etmek ve karşılaştırmak amacıyla kullanılmış ve kaya kütlesi davranışı sebep olan faktörlerin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır [30].

2. TÜNEL

Tüneller, yeryüzünden farklı amaçlarla yer altında hedeflenen lokasyonlara ulaşabilmek için kazılarla oluşturulan yeraltı açıklıklarıdır [31]. İlk bilinen tünel MÖ 4000 yıllarında, Babil şehrinde Fırat Nehri altında açılan tüneldir. Yüzyıllar içinde yapılan çalışmalarda tünel açma metodları değişiklikler göstermiştir. Önceleri insan gücüyle açılırken zamanla tünellerin gelişmiş ve bununla da birlikte tünel inşası için birçok araç geliştirilmiştir. Tünelin açılmasında kullanılan araçlar kadar inşaatı sırasında kullanılacak pek çok yöntemde zaman içinde geliştirilmiştir [32].

2.1. Kaya Parametrelerini Belirlemede Kullanılan Bazı Laboratuvar Deneyleri

Tüneller bulundukları zemin/kaya içerisindeki parametrelere göre tasarlanmaktadır. Kaya parametrelerini belirlemek amacıyla yapılan birçok deney vardır. Bu deneylerden bazıları; tek eksenli basınç dayanımı deneyi, çekme dayanımı deneyi, üç eksenli basınç deneyi, nokta yükleme deneyi ve lugeon deneyleridir.

2.1.1. Nokta yükleme deneyi

Nokta yükü dayanım indeksi, kayaların dayanımlarına göre ve kaya kütlelerinin sınıflandırmasında kayaç malzemesinin dayanım parametresi olarak kullanılmaktadır [33].

İki konik uç arasına yerleştirilen örneğe uygulanan basınç ile ölçüm yapılır. En az 10 örnek olacak şekilde deney uygulanır. Geçerli olan 10 tane deney sonucundan en yüksek ve en düşük ikişer değer iptal edilir ve geriye kalan değerlerin ortalaması alınır. Geçersiz olan deneyler yenilme anında kırığın numune yüzünde tek bir yükleme noktasından geçen şeklinde oluşanlardır. Geçerli deneylerden elde edilen değerlerin ortalaması $I_{s(50)}$ değeridir [33].

Nokta yükleme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin varlığı ilk kez Broch ve Fraklin (1972) tarafından gösterilmiştir. “Eş. 2.1” de gösterilen bu ilişki k katsayısı ile sağlanmaktadır [34].

$$\sigma_c = I_{s(50)} \cdot k \quad (2.1)$$

Burada σ_c : Kayanın tek eksenli basınç dayanımı, k : İndeks dayanım dönüşüm faktörü, $I_{s(50)}$: Nokta yükleme deneyi sonuçlarının ortalamasının 50 mm lik eşdeğer bir karot çapına göre düzeltilmiş halidir. “Eş. 2.1” de kayanın tek eksenli basınç dayanımı kg/cm^2 cinsinden bulunmaktadır.

“Eş. 2.1”, ISRM (1985) tarafından önerilen ve yaygın olarak kullanılan bir eşitliktir. Yaygın olarak kullanılan k katsayısı değeri yerine yazılarak “Eş. 2.2” elde edilmektedir.

$$\sigma_c = I_{s(50)} \cdot 24 \quad (2.2)$$

2.1.2. Tek eksenli basınç deneyi

Tek eksenli basınç deneyi küp veya silindirik numuneler üzerinde yapılır. Numunelerden genellikle 5,47 cm çapında karotlar alınır. Karot düzeltme makinesinde boyları 13,5 cm ile 15,5 cm ya da boy/çap oranları 2,5 veya 3,0 olacak şekilde hazırlanır. Numuneler deneye başlarken suya doygun halde olmalıdırlar [35].

Deneyde numunenin konulduğu hidrolik alt tablanın yukarı hareketi numune ile tablalar arasında boşluk kalmayana kadar devam eder. Numune yenilme anına kadar yüklemeye devam edilir. Yenilme anındaki okunan basınç değeri tek eksenli basınç değeridir [33].

Deney en az 5 numune üzerinde yapılmalıdır ve bu değerlerin ortalaması alınarak bulunan değer tek eksenli basınç dayanımı olarak kabul edilir [33].

2.1.3. Üç eksenli basınç deneyi

Üç eksenli basınç deneyi, basınca maruz kalan silindirik kayaç örneklerinin makaslama dayanımını belirlemek için yapılır. Deney verileri kullanılarak kayacın Mohr zarfı çizilir. Mohr zarfı yardımıyla kayaç malzemesinin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri belirlenir. Deney yönteminde ISRM (1981) tarafından önerilen hususlar esas alınmalıdır [36].

Deney yapılırken zemin örneği üç eksenli deney hücresine yerleştirilir. Su kaybını önlemek için üst başlık yerleştirildikten sonra örnek etrafına kauçuk bir kılıf geçirilir. Örnek hazırlama işlemi bittikten sonra hücre su ile doldurulur. Hücredeki suya basınç uygulanarak arazi koşullarını temsil edecek şekilde gerilme koşulları yaratılır. Su basıncı, minimum asal gerilmeye karşılık gelir. Yenilme gerçekleşinceye kadar yükleme çubuğu yardımıyla sabit hızda deformasyon uygulanmaya devam edilir. Yükleme çubuğuna uygulanan en yüksek asal gerilme ile en düşük asal gerilme arasındaki fark deviatör gerilme olarak adlandırılır. Hücre basıncına deviatör gerilme eklendiğinde maksimum asal gerilmeye ulaşılır. Farklı hücre basınçlarında bir seri deney uygulanırsa Mohr daireleri çizilerek Mohr dayanım zarfı elde edilir [35].

Deney, aynı kaya malzemesine ait en az 3 adet numune üzerinde ve birbirinden farklı sabit yanal basınçlar uygulanarak tekrarlanır. Bununla birlikte, deney en az 5 adet numune üzerinde gerçekleştirildiği zaman daha sağlıklı sonuçlar vermektedir [33].

2.1.4. Lugeon deneyi

Kayaçlarda geçirimsizlik petrografik özelliklere, süreksizliklere ve morfolojik özelliklere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Anizotropik koşullardan ötürü kayaçlarda bir yönde çok düşük olan geçirimsizlik diğer bir yönde çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu nedenle zemin türlerinde laboratuvar geçirimsizlik deneyleri yapılabilirken kayaçların geçirimsizlik özelliği laboratuvarlarda bulunamamaktadır. Bu nedenle kaya birimlerinin geçirimsizliğinin belirlenmesi için Lugeon deneyi yaygın olarak kullanılır. Genellikle kayaçlarda açılan araştırma sondajlarında yapılır.

Deney öncesinde deney zonu basınçsız su verilerek doldurulur. Suyun verilmeye başladığı andan basıncın yükselmeye başladığı ana kadar giden su miktarı kaydedilir. Deney anında uygulanan basınçlar kayacın özelliklerine göre değişiklik gösterir. Belli bir basınç standardı olmasada 2, 4, 6, 8, 10 kg/cm²'lik basınç kademeleri yaygın kullanılır. Deney sırasında her basınç kademesinde 10 dakika beklenir. Su kaçaklara beşer dakikalık aralarla kaydedilir [37].

Lugeon deney sonucunu hesaplamak için deney sırasında uygulanan gerçek basıncın bilinmesi gerekir. Gerçek basıncın hesabı içinde manometrede okunan basınca yeraltı suyu

tablası üzerindeki statik yük (H/10) eklenir. Elde edilen değerden deney kademesi üst kotu ile manometre kotu arasında oluşan yük kaybı çıkarılır [37].

2.2. Kaya Kütlesi Sınıflandırma Sistemleri

Kaya kütlesi sınıflandırma sistemi için RQD (kaya kalitesi göstergesi), RMR (kaya kütlesi puanlama sistemi) ve Q (kaya kütlesi sınıflandırma sistemi) kullanılmıştır.

2.3. Kaya Parametrelerinin Belirlenmesi

2.3.1. Hoek ve Brown yenilme kriteri

Kaya kütlelerinde dayanım özelliklerinin tayini konusunda yapılan çalışmalarda en yaygın kullanılan yöntemlerden biri Hoek-Brown yenilme ölçütüdür. Başlangıçta sert kaya kütlelerinin dayanımını belirlemek amacıyla geliştirilmiştir. Ölçütün 1980’de sunulmasından bu yana çok zayıf kayalar içeren çeşitli kaya kütlelerine de uygulanmaktadır [38].

Eklemli kaya kütleleri için genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü “Eş. 2.3” de verilmektedir.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2.3)$$

Burada σ_1' :Yenilme anındaki en büyük asal gerilme, σ_3' :Yenilme anındaki en küçük asal gerilme, σ_{ci} : Sağlam ve çatlaksız kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı, m_b ve s :Kayanın türüne, özelliklerine ve asal gerilmeler uygulanmadan önceki çatlaklık derecesine bağlı istatistiksel değişkenlerdir. m_b katsayısı genellikle pozitif değere sahiptir. Çok bozulmuş kaya kütleleri için m_b değeri 0,001’dir. Ancak sert kaya kütleleri için m_b değeri 25’dir. Sağlam kaya malzemesi için s değeri 1 iken eklemli kütleler için s değeri 0’dır [38].

Bu yönteme göre Bieniawski sınıflandırılmasındaki RMR değeri, kaya kütlesi tamamen kuru ve süreksizlik yönelimi çok iyi kabul edilerek belirlenmektedir. Yöntemin uygulanması ancak RMR değerleri 25’den büyük olan kaya kütleleri için yapılmakta ve

çok zayıf kaya kütleleri için kullanılmamaktadır. Bu sınırlamayı ortadan kaldırmak için jeolojik dayanım indeksi (GSI) olarak adlandırılan yeni bir indeks tanımlanmaktadır. GSI değeri çok zayıf kaya kütleleri için 10 iken çok sağlam kaya için 100 olmaktadır [33].

Bieniawski (1989) sınıflandırmasına göre RMR_{89} 'nin 23 değerinden büyük olmak koşuluyla GSI değeri hesabı “Eş. 2.4” e göre yapılmaktadır.

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (2.4)$$

Burada GSI: Jeolojik dayanım indeksi ve RMR: Kaya kütlesi puanlama sistemi puanıdır.

RMR_{89} 'nin 23 değerinden küçük olduğu koşulda ise Q sisteminin kullanılması önerilmektedir. Q sisteminde su azaltma faktörü (J_w) için kuru kaya kütlesi ve gerilim düzeltme faktörü (SRF) için ise orta derece gerilim şartları kabul edilerek bu parametrelere bir puan verilmektedir. Diğer parametrelere göre elde edilen değer Q' olarak adlandırılır. Bu durumda Q' değeri “Eş. 2.5” e göre hesaplanmaktadır [33].

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \quad (2.5)$$

Burada RQD: Kaya kalitesi katsayısı, J_n : Eklem takımı sayısı, J_r : Eklem pürüzlülük sayısı ve J_a : Eklem alterasyon sayısıdır.

Q' değeri kullanılarak GSI değeri hesabı ise “Eş. 2.6” kullanılarak yapılmaktadır.

$$GSI = 9 \cdot \log_e Q' + 44 \quad (2.6)$$

Burada GSI: Jeolojik dayanım indeksi ve Q: Tünelcilik niteliği indeksidir.

Jeolojik dayanım indeksi (GSI), daha sonraları yapılan değişikliklerle tek başına bir sınıflama sistemi olarak ölçütte yer almıştır. GSI sınıflama sistemi Çizelge 2.1'deki abak yardımıyla hesaplanmaktadır [33].

Jeolojik dayanım indeksi (GSI) değeri belirlenmesi için Sönmez vd. tarafından da bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntemde kaya kütlesi için tanımlanan yapısal özellik puanı (SR) ve süreksizlik yüzey koşulu puanı (SCR) değerlerine göre GSI değeri bulunur. Bu parametrelere bağlı olarak GSI değeri Çizelge 2.2 yardımıyla belirlenir [33].



Çizelge 2.1. Sağlam veya masif kaya kütlesi ile lamine kayaçları da içerek şekilde düzenlenmiş GSI sınıflama sistemi [39]

JEOLJİK DAYANIM İNDEKSİ		SÜREKSİZLİK YÜZEY KOŞULU		AZALAN YÜZEY KALİTESİ		
Kaya kütlesinin yapısını ve yüzey koşullarını tanımlayan harf kodları belirlenerek uygun kutu seçilir ve ortalama Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)'nin değeri abaktaki konturlardan tayin edilir.		COK İYİ Çok pürüzlü, taze ayrılmamış yüzeyler	İYİ Düz, çok az ayrılmış, demir oksit sıvımalı yüzeyler	ORTA Düz, orta derecede ayrılmış yüzeyler	ZAYIF Kaygan, sert veya köşeli parçalar içeren, dolguya sahip, çok ayrılmış yüzeyler	COK ZAYIF Kaygan, yumuşak kil dolulu, çok ayrılmış yüzeyler
YAPI		AZALAN YÜZEY KALİTESİ				
 SAĞLAM VEYA MASİF- Kayaç malzemesi veya geniş aralıklı birkaç süreksizlik içeren masif kaya kütlesi		90	UYGULANMAZ			
 BLOKLU- 3 ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, çok iyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütlesi		80				
 ÇOK BLOKLU- Dört veya daha fazla sayıda süreksizlik setinin keşilmesiyle oluşmuş çok yüzeyli-köşeli bloklar içeren, kısmen örselenmiş kaya kütlesi		70				
 BLOKLU/ÖRSELENMİŞ-Birbirini kesen çok sayıda süreksizliğin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kıvrımlanmış ve/veya faylanmaya maruz kalmış kaya kütlesi		60				
 PARÇALANMIŞ-Köşeli ve yuvarlak kayaç parçalarının birikteliğinden oluşan, zayıf kenetlenmiş, aşırı derecede kırıklı kaya kütlesi		50				
 FOLİYASYONLU-LAMİNALI-MAKASLANMIŞ İnce laminalı veya foliasyonlu ve makaslanmış zayıf kayaçlar. Diğer süreksizlik setlerine oranla daha egemen olan sık aralıklı şistozite yüzeyleri kayaçta bloklanmanın gelişmesini önlemiştir.		40				
		30				
		20				
		10				
			UYGULANMAZ			

Kaya kütlesinin m_b sabiti ile GSI arasındaki ilişki “Eş. 2.7” de verilmektedir.

$$m_b = m_i \cdot \exp \left(\frac{GSI-100}{28-14 \cdot D} \right) \quad (2.7)$$

Burada m_b : m_i kaya malzemesi katsayısının indirgenmiş değeri, m_i : Kaya türüne bağlı olarak değişen bir sabit, GSI: Jeolojik dayanım indeksi ve D: Kaya kütlesindeki örselenme derecesine bağlı bir katsayıdır.

Kaya cinslerine göre önerilen m_i değerleri ile örselenme derecesi (D) sırasıyla Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4’te verilmektedir. Örselenme derecesi, patlatma hasarı ve gerilme rahatlaması etkisi altında kalan kaya kütlesindeki örselenme derecesine bağlı olan bir katsayıdır. Örselenme derecesi katsayısı, örselenmiş arazideki kaya kütleleri için 0 değerini alırken çok örselenmiş kaya kütleleri için 1 değerini alır [33].

Çizelge 2.3. Kayaç gruplarına göre m_i sabiti için önerilen değerler [41]

Kayaç Türü	Sınıf	Grup	Yapı			
			İri	Orta	İnce	Çok ince
SEDİMANTER	Klastik		Konglomera (22)	Kumtaşı 19 ← Şist (18) →	Silttaşı 9	Kiltası 4
	Klastik olmayan	Organik	← Tebeşir 7 → ← Kömür (8-21) →			
			Breş (20)	Sparitik Kireçtaşı (10)	Mikritik Kireçtaşı 8	
		Karbonat		Jips 16	Anhidrit 13	
		Kimyasal				
METAMORFİK	Yapraklanmamış		Mermer 9	Hornfels (19)	Kuarsit 24	
	Hafif yapraklanmış		Migmatit (30)	Amfibolit 31	Milonit (6)	
	Yapraklanmış		Gnays 33	Şist (10)	Fillit (10)	Sleyt 9
MAGMATİK	Açık	Granit 33 Granodiyorit (30) Diyorit (28) Gablo 27 Norit 22		Riyolit (16) Dasit (17) Andezit 19	Obsidiyen (19)	
	Koyu		Dolerit (19)	Bazalt (17)		
	Piroklastik	Aglomera (20)	Breş (18)	Tüf (15)		

Çizelge 2.4. Örselenme faktörü (D) tahmini için kılavuz [42]

Kaya kütlesinin görünümü	Kaya kütlesinin tanımı	Önerilen D değeri
	Tünel açma makinesiyle mükemmel nitelikte kontrollü yapılan patlatma veya kazı bir tüneli çevreleyen sınırlı kaya kütlesinde en az örselenmeye neden olur.	$D = 0$
	Zayıf nitelikteki kaya kütlelerinde mekanik veya elle kazı (patlatma yapılmadan) çevre kaya kütlesinde en az örselenmeye neden olur. Sıkışma problemlerinin önemli taban kabarmasına sebep olduğu durumlarda, fotoğrafta görüldüğü gibi kalıcı bir taban kemeri kurulmadıkça örselenme şiddetli olabilir.	$D = 0$ $D = 0.5$ Taban kemeri yok
	Sert kaya tüneline çok zayıf nitelikte patlatma çevre kaya kütlesinde 2 veya 3 m genişliğinde şiddetli yerel hasara sebep olmaktadır.	$D = 0.8$
	İnşaat mühendisliği yamaçlarında küçük ölçekte patlatmalar, özellikle sol taraftaki fotoğrafta gösterildiği gibi kontrollü patlatma yapılıyorsa, kaya kütlesinde az zarara neden olmaktadır. Bununla birlikte, gerilme rahatlaması bir miktar örselenmeye neden olmaktadır.	$D = 0.7$ İyi patlatma $D = 1.0$ Zayıf patlatma
	Çok büyük açık işletme maden şevleri ağır üretim patlatmalarından dolayı ve de örtü tabakasının kaldırılmasından kaynaklanan gerilme rahatlaması nedeniyle önemli örselenmeye uğramaktadır. Bazı yumuşak kayalarda kazı sökerek ve küreyle yürütülebilmektedir ve şevlerde hasar derecesi daha azdır.	$D = 1.0$ Üretim amaçlı patlatma $D = 0.7$ Mekanik kazı

Kaya kütlesi sabiti olan s ve a değerleri “Eş. 2.8” ve “Eş. 2.9” daki gibi hesaplanmaktadır.

$$s = \exp \left(\frac{GSI-100}{9-3 \cdot D} \right) \quad (2.8)$$

Burada s : Kaya kütlesi sabiti, GSI: Jeolojik dayanım indeksi ve D : Kaya kütlesindeki örselenme derecesine bağlı bir katsayıdır.

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (2.9)$$

Burada a : Kaya kütlesi sabiti ve GSI: Jeolojik dayanım indeksidir.

Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü hesabı için “Eş. 2.3” de a değeri 0,5 ve s değeri 1 alınırsa “Eş. 2.10” elde edilmektedir.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0,5} \quad (2.10)$$

Burada σ_1' : Yenilme anındaki en büyük asal gerilme, σ_3' : Yenilme anındaki en küçük asal gerilme ve σ_{ci} : Sağlam ve çatlaksız kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımıdır.

Serafim ve Pereira (1983) tarafından geliştirilen “Eş. 2.11” Hoek tarafından geliştirilip düzenlenerek “Eş. 2.12” ve “Eş. 2.13” deki eşitlikler bulunmuştur [43].

$$E_M(\text{GPa}) = 10^{\frac{(RMR-10)}{40}} \quad (2.11)$$

Burada E_M : Kaya kütlesi deformasyon modülü ve RMR: Kaya kütlesi puanlama sistemi puanıdır.

$$E_M(\text{GPa}) = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}(\text{MPa})}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad \sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa} \quad (2.12)$$

$$E_M(\text{GPa}) = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad \sigma_{ci} > 100 \text{ MPa} \quad (2.13)$$

Burada E_M : Kaya kütlesi deformasyon modülü, GSI: Jeolojik dayanım indeksi, D: Kaya kütlesindeki örselenme derecesine bağlı bir katsayı ve σ_{ci} : Sağlam ve çatlaksız kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımıdır.

2.3.2. Hoek ve Diederichs yöntemi ile yerinde kaya dayanımı tespiti

Hoek ve Diederichs (2006) önermiş olduğu deformasyon modülünün hesabı “Eş. 2.14” de verilmektedir [44].

$$E_M = E_i \cdot \left(0,02 + \frac{1 - \left(\frac{D}{2}\right)}{1 + e^{\left(\frac{60 + 15 \cdot D - GSI}{11}\right)}} \right) \quad (2.14)$$

Burada E_M : Kaya kütlelerinin deformasyon modülü, E_i : Tek eksenli basınç değerleri ile bulunan kayaç malzemesine ait elastisite modülleri, D:Örselenme faktörü ve GSI: Jeolojik dayanım indeksidir.

2.3.3. Nicholson ve Bieniawski yöntemi ile yerinde kaya dayanım tespiti

Nicholson ve Bieniawski (1990) tarafından RMR değerleri kullanılarak bulunan elastisite modülü “Eş. 2.15” ve “Eş. 2.16” da verilmektedir [45].

$$E_M = E_i \cdot (AF) \quad (2.15)$$

$$AF = 0,0028 \cdot (RMR)^2 + 0,9 \cdot e^{\left[\frac{(RMR)}{22,82}\right]} \quad (2.16)$$

Burada E_M : Kaya kütlelerinin deformasyon modülü, E_i : Tek eksenli basınç değerleri ile bulunan kayaç malzemesine ait elastisite modülleri ve AF: Azaltma faktörüdür.

RMR sistemi, kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi geomekanik parametrelerin belirlenmesi açısından da kullanılmaktadır. Bieniawski (1979) tarafından hazırlanmış olan RMR sınıflandırması ile geomekanik parametre tayini Çizelge 2.5’te verilmektedir [46].

Çizelge 2.5. RMR sisteminden faydalanarak jeomekanik parametrelerin tayini [47]

Kaya Kütlesi Parametreleri / Özellikleri	RMR (Kaya Sınıfı)				
	100-81 (I)	80-61 (II)	60-41 (III)	40-21 (IV)	<20 (V)
Kaya kütlesinin tanımı	Çok iyi	İyi	Vasat	Zayıf	Çok zayıf
Ortalama desteklemesiz durma zamanı	15 m açıklık için 10 sene	8 m açıklık için 6 ay	5 m açıklık için 1 hafta	2,5 m açıklık için 10 saat	0,1 m açıklık için 30 dakika
Kaya kütlesinin kohezyonu (MPa)	>0,4	0,3-0,4	0,2-0,3	0,1-0,2	<0,1
Kaya kütlesinin sürtünme açısı (°)	>45	35-45	25-35	15-25	15

2.3.4. Sönmez vd. yöntemi ile yerinde kaya dayanımı tespiti

Sönmez vd. (2006) tarafından RMR değerlerinden faydalanarak elastisite modülü tayini için “Eş. 2.17” kullanılmaktadır [47].

$$E_M = E_i \cdot 10^{\left[\frac{((RMR-100) \cdot (100-RMR))}{(4000 \cdot \exp(\frac{-RMR}{100}))} \right]} \quad (2.17)$$

Burada RMR: Kaya kütlesi puanlama sistemi puanı, E_M : Kaya kütlelerinin deformasyon modülü ve E_i : Tek eksenli basınç değerleri ile bulunan kayaç malzemesine ait elastisite modülüdür.



3. Uygulama Yeri

3.1. Uygulama Yeri Konumu ve Jeolojik İncelemesi

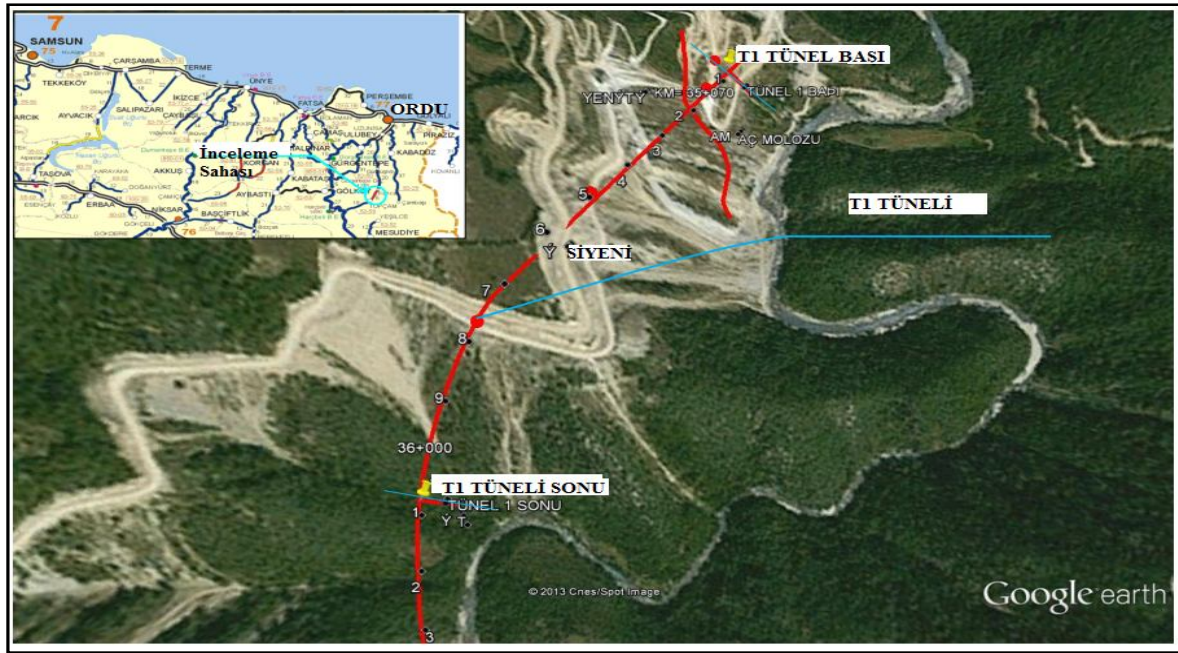
Uygulama yeri, Ordu ili'nin Ulubey ilçesi'ne bağlı Topçam Beldesi sınırları içinde yer alan Topçam tüneldir ve tünelin konumu Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Ordu-Ulubey ayrımı Topçam tünelleri 35+000,00 - 38+866,718 kilometreleri arasında yeni bir güzergâh olarak yapılması planlanan bir tüneldir. Tünel karayolu tüneli olup tek tüplü olarak inşa edilmektedir. Tünelin topografyası incelendiğinde örtü kalınlığı yüksekliğinin değişken olduğu görülmektedir. Örtü kalınlığının maksimum olduğu noktadaki miktarı 230 metredir.



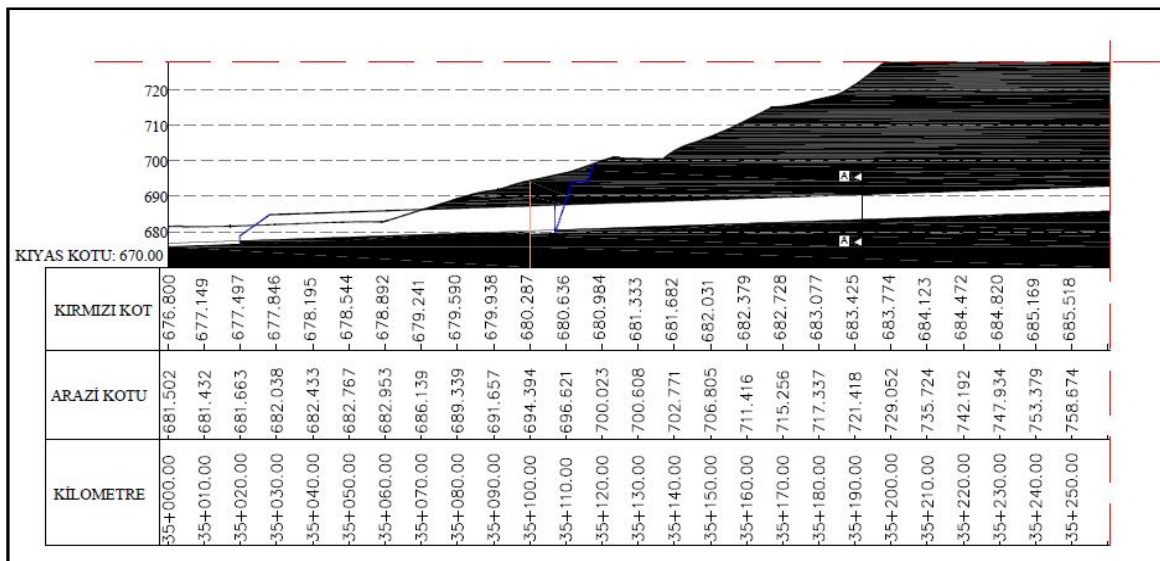
Şekil 3.1. Uygulama yeri (Ordu ili Ulubey ilçesi Topçam tüneli)

Uygulama alanı jeolojisi Pontidler Lias'tan Pliosen'e kadar geçen zaman aralığında magmatik ark özelliğinde kalmış ve bunun sonucunda da volkanik kayalardan oluşmuştur. Kuzeydoğu Anadolu'da Pontidler tektonik kuşağının doğu bölümünde yer alır. Pontidler tektonik kuşağının doğu bölümünün karakteristik özelliği Mesozoik ve Senozoik'te tortul ve püskürük kayaların ara katkılı oluşmasıdır. Bu oluşum yaklaşık olarak Üst Kretase'den Üst Eosen'e kadar sürmüş, Üst Eosen'de birleşimleri granitten diyorite kadar değişen intrüzif kütleler bu tortul ve püskürük kayaların karmaşığı içine sokulmuşlardır [48].

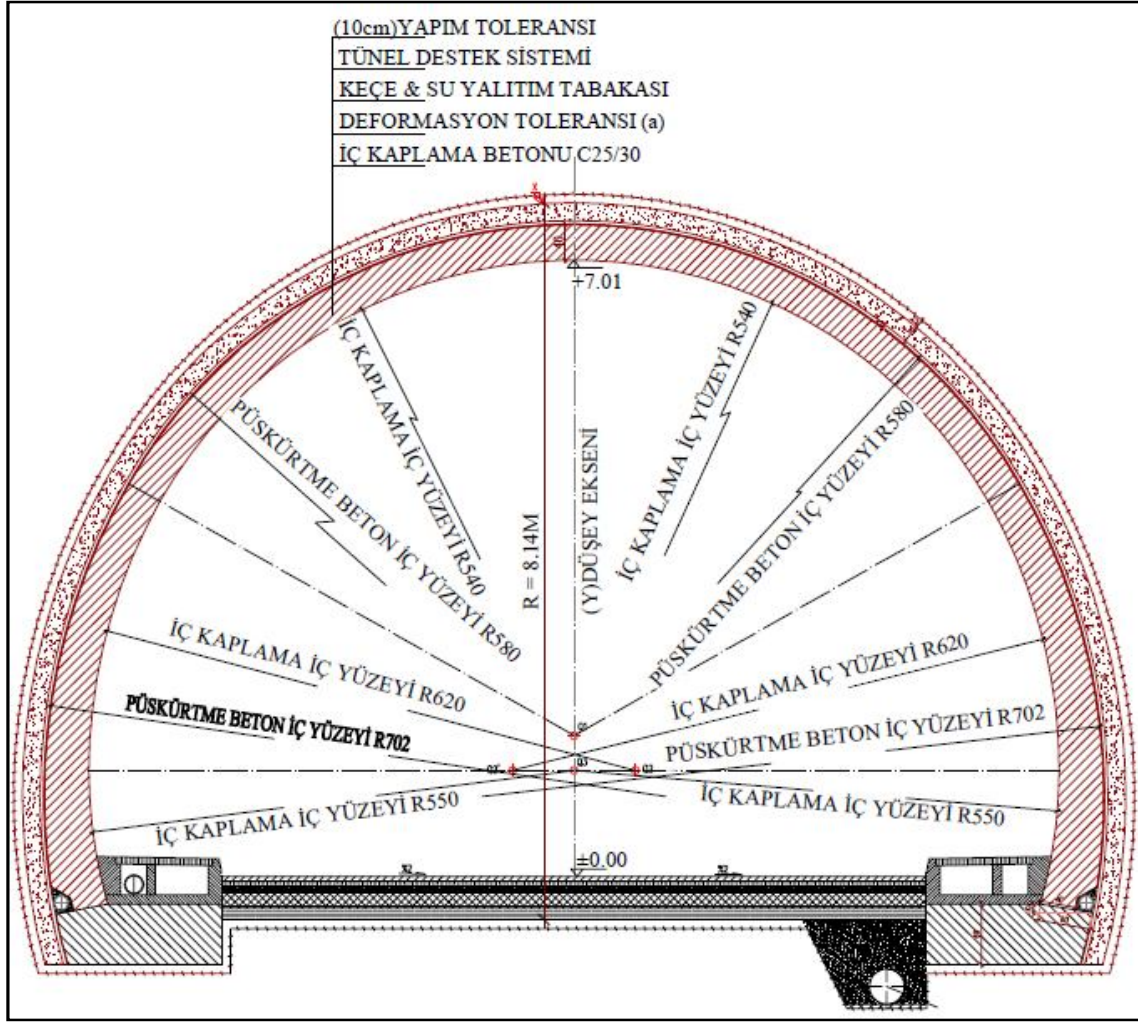
Tünel T1 ve T2 olmak üzere iki aşamada yapılması planlanmaktadır. Tünelin T1 bölümü 35+077 - 36+075 km'leri arasında ve toplam 998 metredir. T1 tünelinin genel yerleşimi, tünelin başı ve sonu Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Bu çalışmada Topçam tünelinin T1 bölümünün 35+192 km'si uygulama alanı olarak kullanılmaktadır. Tünele ait kesitler Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Bu iki şekil yarımıyla da tünel derinliği (H) 32,35 m ve tünel çapı (R) 8,14 m olarak bulunmaktadır.



Şekil 3.4. T1 tüneli güzergâhı [48]



Şekil 3.5. Uygulama yapılan tünelin boy kesiti- 35+192 km tünel yakın görünüşü



Şekil 3.6. T1 tüneli km: 35+192 ait enkesit görünüşü (A-A kesiti)

3.2. Uygulama Yeri Deformasyon Ölçüm Noktaları ve Ölçümde Kullanılan Yöntemler

Uygulama yerinde deformasyon ölçümleri 5 noktada yapılmaktadır. Bu ölçüm noktalarının teşkil edildiği yerler Şekil 3.7’de verilmektedir. Deformasyon ölçümü için total station cihazı kullanılmaktadır. Noktalara ait bir önceki ölçümler ile bir sonraki ölçümler arasındaki koordinat farklarından deformasyon vektörü “Eş. 3.1” yardımıyla saptanmaktadır.

$$d_i = \sqrt{d_{x,i}^2 + d_{y,i}^2 + d_{z,i}^2} \quad (3.1)$$

Deformasyon vektörü hataya bölünerek t-dağılımında %95 güven aralığında anlamlı olan değerlerin hesaplanması yapılmaktadır. Deformasyon vektörünün anlamlı olup olmadığını belirlemek için test büyüklükleri, m_d , d vektörün ortalama hatası olmak üzere “Eş. 3.2” yardımıyla hesaplanmaktadır [49].

$$T_i = \frac{d_i}{m_d} \quad (3.2)$$

m_d değeri hesabı için v_i (düzeltme değeri)’nin hesaplanması gerekmektedir. Düzeltme değeri de “Eş. 3.3” den hesaplanmaktadır. m_d değerlerini hesaplamak içinde v_i değerleri toplanıp önce karesi alınmaktadır ve sonrasında karesinin ortalaması alınmaktadır. Bulunan ortalama değerinde karekökü alınarak m_0 değerine ulaşılmaktadır. “Eş. 3.4” yardımıyla da m_d değerine ulaşılır. t_i değerini bulmak içinde v_i değerleri toplam deformasyon adetine bölünmektedir. Bulunan t_i değerlerinin toplamıda hesaplanan T_i değerleri ile karşılaştırılır eğer bulunan T_i değeri t_i değerinden büyük ise noktanın anlamı hareket ettiği sonucuna varılmaktadır.

$$v_i = x - l_i \quad (3.3)$$

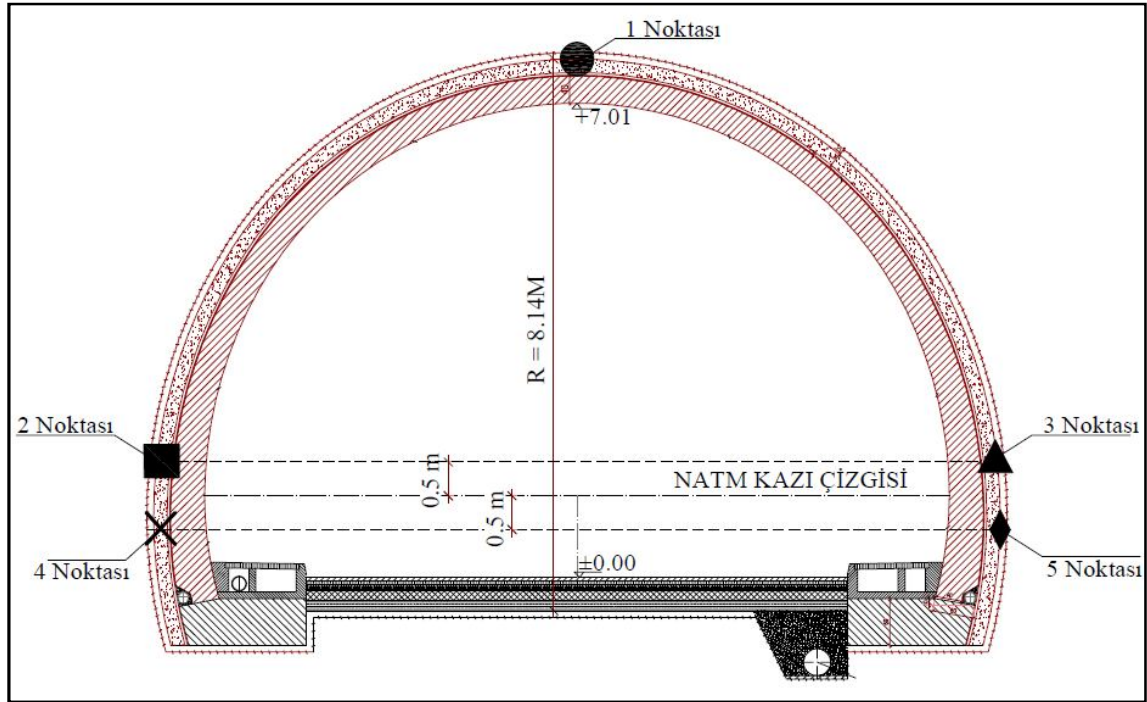
Burada v_i : Düzeltme değeri, x: okunan deformasyon değeri ve l_i : gerçek değerdir. Gerçek değerde okunan bütün deformasyon değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.

$$m_d = m_0 \cdot \sqrt{2} \quad (3.4)$$

Burada m_0 : ortalama hata ve m_d : d vektörünün ortalama hatasıdır.

$T_i > t_{f,0.975}$ olduğunda ise noktanın geçen süre içerisinde hareket ettiğini göstermektedir [49]. Bu çalışma için yapılan değerlendirmeler EK-2’de verilmektedir. T_i değerlerinden koyu renkle gösterilenler noktanın anlamlı hareket ettiğini göstermektedir.

Tünel üzerinde yapılan deformasyon ölçümlerinin sonuçları Çizelge 3.1’de gösterilmektedir. 35+192 km’sine ait deformasyon okumalarının tamamı EK-3’de verilmektedir.



Şekil 3.7. Deformasyon ölçüm noktaları

Çizelge 3.1. 35+192 km'sine ait 5 nokta için deformasyon okumaları

Nokta numarası	1	2	3	4	5
Yatay Deformasyon (mm)-en düşük	1,00	1,00	1,20	0,60	1,00
Yatay Deformasyon (mm)-en yüksek	6,00	5,40	8,00	3,00	3,00
Düşey Deformasyon (mm)-en düşük	2,32	0,50	0,84	0,20	0,40
Düşey Deformasyon (mm)-en yüksek	10,27	3,76	6,76	1,39	3,50

4. RASTGELE KÜME SONLU ELEMANLAR METODU

4.1. Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Metodu

Mekanik bir sistemin modellenmesi, fiziksel işlemlerin matematiksel olarak idealleştirilmesi olarak yapılır. Bu durum temel değişkenlerin (sistem geometrisi, yükleme, malzeme özellikleri tanımlanması), tepki değişkenlerinin (yer değiştirme, gerilme) ve bu çeşitli değişkenler arasındaki ilişkileri tanımlamayı gerektirir. Son yıllarda araştırmacılar yapısal modellerin (kirişler, kabuklar vb.) ve yapısal yasaların (esneklik, plastisite vb.) geliştirilmesi için çalışmalar yapmaktadırlar. Bu çalışmalar bilgisayar biliminin gelişmesiyle de mekanik sistemi tanımlayan sayısal çözümlemeleri kolaylaşmaktadır. Ancak çözüm yöntemlerinin kolaylaşması model parametrelerinin ve onların tahminiyle ilgili belirsizliklerin tespit edilmesi sorununu çözmemektedir. Malzemelerin mekanik özelliklerinin rastsallık ve mekânsal değişkenliğinin hesaba katılması skolastik veya olasısal yöntemlerin kapsamına girmektedir [50].

Belirsizliklerin üstesinden gelmek geoteknik mühendisliğinin önemli konularından biridir. Bu belirsizlikler geniş bir aralıkta değişen parametre değerleri veya sadece bilgi eksikliğinden kaynaklanabilmektedir. Bu nedenle de sayısal modellemeyi belirsizliklerin matematiksel gösterimi ile birleştirmek mantıklı görünmektedir. Bilgisayar teknolojisindeki son gelişmeler belirsizliklerin daha doğru bir şekilde değerlendirilerek sonlu elemanlar modeline yansıtılmasını sağlamaktadır. Rastgele küme teorisi, belirsizliklerin matematiksel gösterimi için sonlu elemanlarda kullanılan bir yöntem olmaktadır [51].

Rastgele küme sonlu elemanların genel işleyiş bilgisi Şekil 4.1’te verilmektedir. Ayrıca her aşamanın tanımlaması bu bölümde yapılmıştır.

Aşama 1: Geoteknik davranışı belirlemek için hesap modeli seçimi

Rastgele küme teorisi, yapısal sistemin davranışının değerlendirildiği model türünden (basit limit denge analizi, analitik çözüm) bağımsız olarak bir modeldeki belirsizliği değerlendirebilen genel bir matematiksel çerçevedir. Sonlu elemanlar modelleri gibi

sayısal modeller, özellikle karmaşık geoteknik problemlerde model davranışını anlamakta limit denge analizi yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Aşama 2: Rastgele değişkenler olarak hangi girdi parametrelerinin dikkate alınacağına karar verilmesi

Yeraltındaki yapılarda, birincil bilgilerin eksikliği veya parametrelerin değişkenliğinden dolayı tasarımcılar farklı olasılıklar düşünerek hesaplama yapmaktadır. Malzeme parametrelerinin yanı sıra geometri ve uygulanan yüklerle ilgili belirsizlikler “Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Metodu” yardımıyla ele alınmaktadır. Gerekli sonuç üzerindeki etkisi ihmal edilebilir olan belirsiz parametrelerin sayısını azaltmak için duyarlılık analizi uygulamasının avantajından yararlanılmaktadır. Bu hesaplamalar “Eş. 4.12” de verildiği gibi her parametre için değişen olasılık değeri hesaplanmaktadır. Bu çalışmada dörtkaya parametresi (E , c , ϕ , R_f) değişken olarak kabul edilmiştir.

Aşama 3: Zemin parametrelerinin mekansal değişkenliğini göz önüne almak için korelasyon uzunluğunun belirlenmesi

Zeminin uzaysal değişkenliği ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Vanmarcke vd. (1983), Griffiths ve Fenton (2000), Lacasse ve Nadim (1996) örnek olarak verilmektedir.

Bu çalışmada mekansal korelasyon sadece üst ve alt sınırları değiştiren elastisite modülüne uygulanmıştır. Çizelge 4.6’da bu durum verilmektedir.

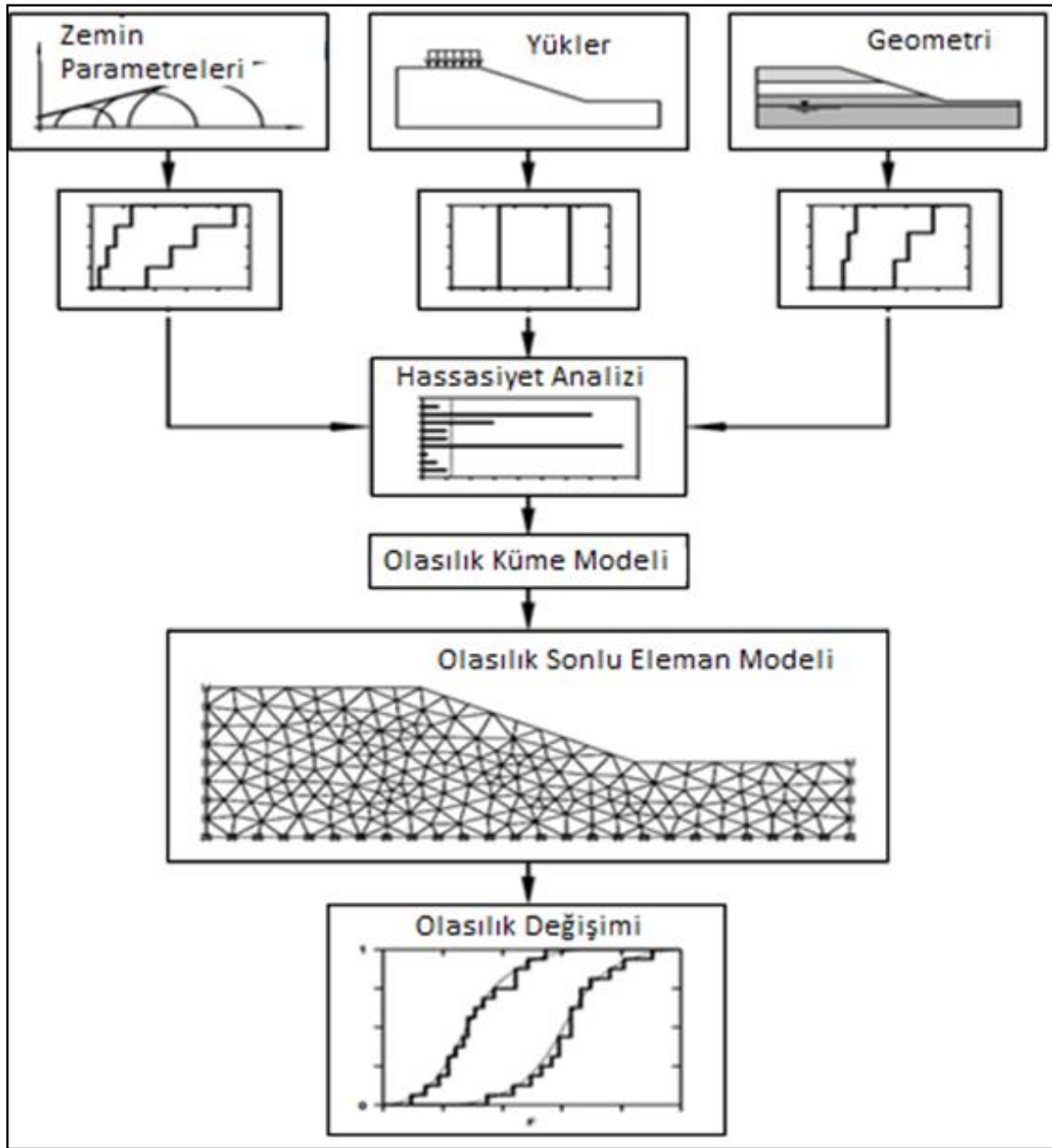
Aşama 4: Rastgele küme modeli kullanılarak girdi dosyalarının hazırlanması

Girdi parametrelerinin tanımlanmasından sonra, rastgele küme modeline dayanan parametrelerin farklı değişkenlerinin kombinasyonu ve parametrelerin en yüksek ve en düşük değerlerine göre hesaplamalar rastgele küme modeli yardımıyla yapılmaktadır. Dolayısıyla, deterministik sonlu elemanlar hesaplamaları için veri dosyaları sağlanmaktadır ve bunun için geliştirilen ek ön işleme aracıyla gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada girdi dosyaları Çizelge 4.7’de görülmektedir.

Aşama 5: Tüm deterministik sonlu elemanlar hesaplamaların yapılması ve modelin sınırlarını bulunması

Rastgele girdi parametrelerine karşılık gelen tüm sonlu elemanlar analizi yapılmaktadır. Yapısal elemanlardaki gerilme, yer değiştirme ve iç kuvvetler gibi sonuçlar, ölçülen verilerle karşılaştırılabilen ayrı bir toplam olasılıklar işlevi üzerinde alt ve üst sınırlar açısından oluşturulmaktadır. Bu çalışma Bölüm 4.9’da görülmektedir.



Şekil 4.1. Rastgele küme sonlu eleman sistematığı

4.2. Analiz Amaçları

FEM yazılımı olan Phase² v.8, tünel çevresindeki deformasyonları ve gerilme yığılmalarını hesaplayıp destek sistemlerinin kazılan kaya kütleleri ile etkileşimini analiz etmektedir. Ayrıca ampirik olarak belirlenen kazı ve destek sistemlerinin gerçekliğini doğrulayıp bunları kontrol etmek içinde kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminde pratik boyutlarda seçilen çalışma alanı bir ağ oluşturacak şekilde iki boyutlu problemlerde genellikle dörtgen veya üçgen elemanlara bölünmektedir. Bu ağların kesişim noktalarına da düğüm noktası adı verilmektedir. Sonlu eleman analizinde, problem çözümleri düğüm noktalarında yapılmakta ve sonuçlar elemanlar üzerinden interpolate edilerek oluşturulmaktadır. Gerilme ve yer değiştirmelerde bu düğüm noktaları yardımıyla okunmaktadır.

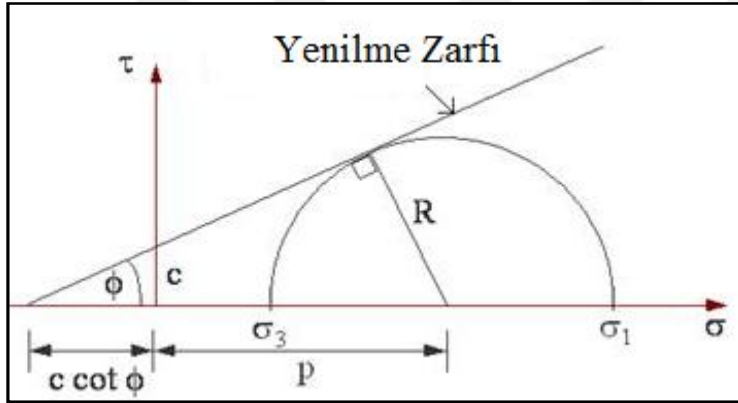
Zemin/kaya parametrelerinin sonlu elemanlar modeline tanımlanmasında deterministik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Ancak zemin ve kaya kütleleri doğal olarak çeşitli ölçeklerde anizotropiktir. Burada bahsedilen anizotropi, kütlenin farklı yönlerde farklı özellikler göstermesi olarak tanımlanmaktadır. Anizotropi iki çeşit olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalardan ilki zemin özelliklerinin tanımlanmasından sonra bölgelerin parça olarak izotropik kabulüne dayanır. İkinci sınıflandırma ise hiçbir spesifik bölge tanımlamadan zemin özelliklerinin mekansal değişkenliğinin düzgün olduğudur. Her iki durumda da, zeminin/kayanın rastgele durumu göz ardı edildiğinden zeminin/kayanın özelliklerini tanımlamak için deterministik parametrelerin kullanımı yetersiz kalmaktadır. Bu duruma alternatif olarak rastgele olasılık teoremleri ile zemin modellemesi yapılabilmektedir [50].

4.3. Zemin Bünye Denklemleri ve Zemin Parametrelerin Belirlenmesi

Zemin parametrelerinin sonlu eleman metodu ile modele aktarılmasında birçok yenilme kriteri seçimi kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan ticari yazılım olan Phase²v.8'de malzeme yenilme kriterleri olarak Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, Drucker-Prager, genelleştirilmiş Hoek-Brown, Cam Clay, Modifiye Cam Clay, Discrete modelleri bulunmaktadır. Bu çalışmada zemin parametreleri tanımlanması için Mohr-Coulomb

yenilme hipotezi kullanılmaktadır. Mohr-Coulomb model parametreleri Hoek-Brown sınıflandırma parametreleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

Mohr-Coulomb (MC) yenilme hipotezi ilk defa 1776 yılında Coulomb tarafından geliştirilmiştir. Şekil 4.2’de normal gerilme ve kayma gerilmesine bağlı oluşan Mohr-Coulomb’un ortaya koyduğu yenilme zarfı gösterilmektedir. Mohr-Coulomb kriteri, izotropik malzemenin yenilme koşullarını tanımlayan temel gerilme alanındaki doğrusal denklemler kümesidir ve bu kriterde ara gerilme (σ_2) etkisi ihmal edilmektedir. MC kriteri, en büyük asal gerilme (σ_1) ve en küçük asal gerilme (σ_3) fonksiyonu olarak veya normal gerilme (σ) ve kesilme düzleminde kayma gerilmesi (τ) ile gösterilmektedir [52].



Şekil 4.2. Mohr-Coulomb yenilme zarfı

Kohezyon ve sürtünmeden kaynaklanan direncin bütünü olarak ifade edilen kayma mukavemeti “Eş. 4.1” de verilmektedir.

$$\tau_f = c + \sigma_f \cdot \tan(\phi) \quad (4.1)$$

Burada τ_f : Kayma mukavemeti, c : Kohezyon, ϕ : İçsel sürtünme açısı ve σ_f : Normal gerilmedir.

Bu efektif gerilme (σ'), zemin kütlesi içinde taneden taneye aktarılan ve birim alana etkiyen ortalama dik kuvvet olarak tanımlanır.

Efektif gerilme “Eş. 4.2” de verilmektedir.

$$\sigma' = \sigma_f = \sigma - u \quad (4.2)$$

Burada σ' : Efektif gerilme, σ : Normal gerilme ve u : Boşluk suyu basıncıdır.

“Eş. 4.1”de efektif gerilmenin karşılığı olan “Eş. 4.2”deki açılım yerleştirilirse “Eş. 4.3” elde edilmektedir.

$$\tau_f' = c' + (\sigma - u) \cdot \tan \phi' = c' + \sigma' \cdot \tan \phi' \quad (4.3)$$

4.4. Girdi Parametrelerinin Düzenlenmesi

Sayısal modellemede kaya malzemesine ait girdi parametrelerinde; poisson oranı (ν), birim hacim ağırlık değeri (γ) ve malzemenin tek eksenli basınç dayanım değeri (σ_{ci}) laboratuvar hesaplarından elde edilmektedir [48]. Kaya malzemesine ait bulunan sonuçlar şu şekildedir:

-Tek eksenli basınç dayanımı değeri (σ_{ci}), kaya serbest basınç dayanımı deneyi ile elde edilmiştir. Hesaplanan $\sigma_{ci} \text{ (mak)}$ ve $\sigma_{ci} \text{ (min)}$ değerleri sırasıyla 67,54 MPa ve 20,80 MPa'dır. Bu değerler sayfa 95'de EK-1'deki kayada serbest basınç dayanımı sonuçlarından SK-2'ye ait en yüksek ve en düşük değerlerdir.

-Birim hacim ağırlık (γ) 27kN/m³ olarak bulunmaktadır. Bu değer sayfa 95'de EK-1'deki SK-2'ye ait birim hacim ağırlık değerlerine ait laboratuvar sonuçlarından alınmaktadır. Birim hacim ağırlığın literatürde geçen granit özgül ağırlığına yakın olduğu görülmektedir.

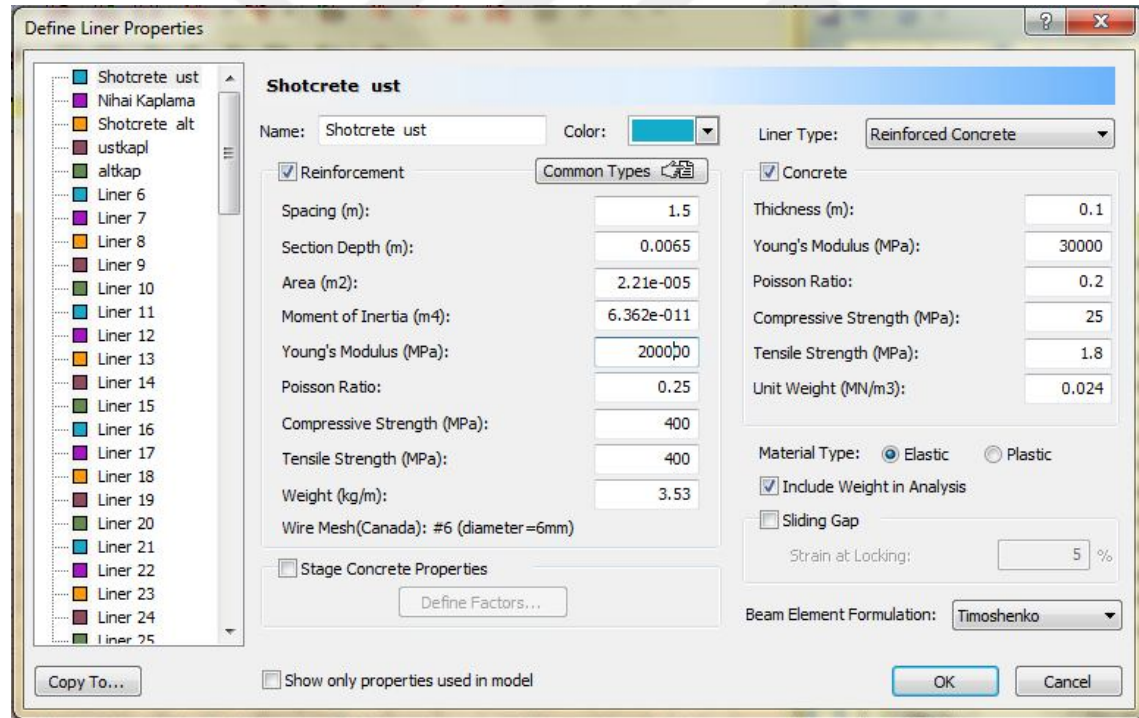
-Poisson oranı değeri (ν), tek eksenli basınç dayanımı deneyi ile 0,25 olarak bulunmaktadır. Bu değer bulunurken çapsal birim deformasyonun, boyuna birim deformasyonuna oranı alınarak hesaplanır. Sayfa 99'da EK-1'de çalışma alanı için hesaplanan poisson oranı görülmektedir.

Kullanılan destek elemanları hesaplanması ile bilgiler Bölüm 4.7.3'de verilmektedir. Sonlu elemanlar metodunda modelde kullanılan destek elemanlarının parametreleri ise Çizelge 4.1'de verildiği gibidir. Modelde kullanılan bulonlar 28 mm çapında, elastitiste modülü

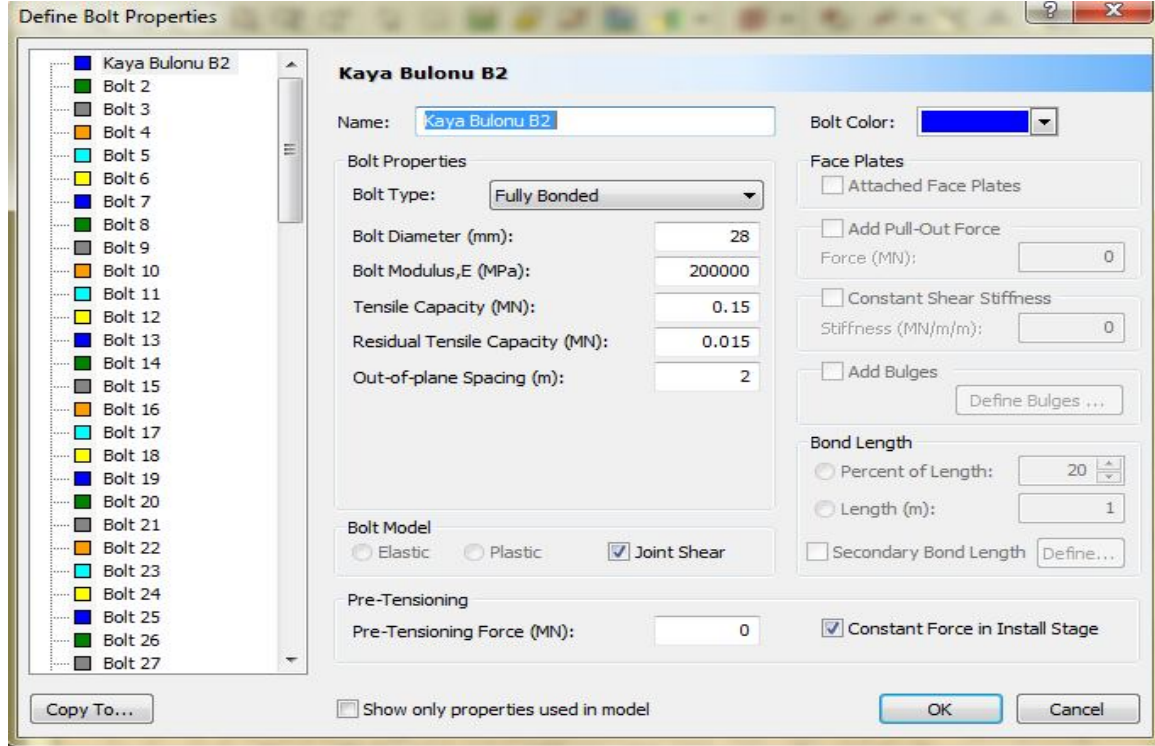
200000 MPa ve üst yarıda 2 m aralıklarla teşkil edilmektedir. Destek elemanında kullanılan betonarme kalınlığı 10 cm, elastisite modülü 30000 MPa ve basınç dayanımı 25 MPa'dır. Destek elemanında kullanılan donatı hasır donatı olup 6 mm çapında, elastisite modülü 200000 MPa ve çekme kapasitesi 400 MPa'dır. Destek elemanları ve bulon elemanları ile ilgili ayrıntılı bilgiler Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Tünel destek malzemeleri teknik özellikleri

Özellik/Malzeme Çesidi	Beton	Çelik
Birim ağırlık (kN/m ³)	24,00	78,50
Young Modulu (MPa)	30 000	200 000
Poisson oranı	0,20	0,25



Şekil 4.3. Çelik hasır ve beton ile yapılan destek kaplaması için modele tanımlanan teknik özellikleri

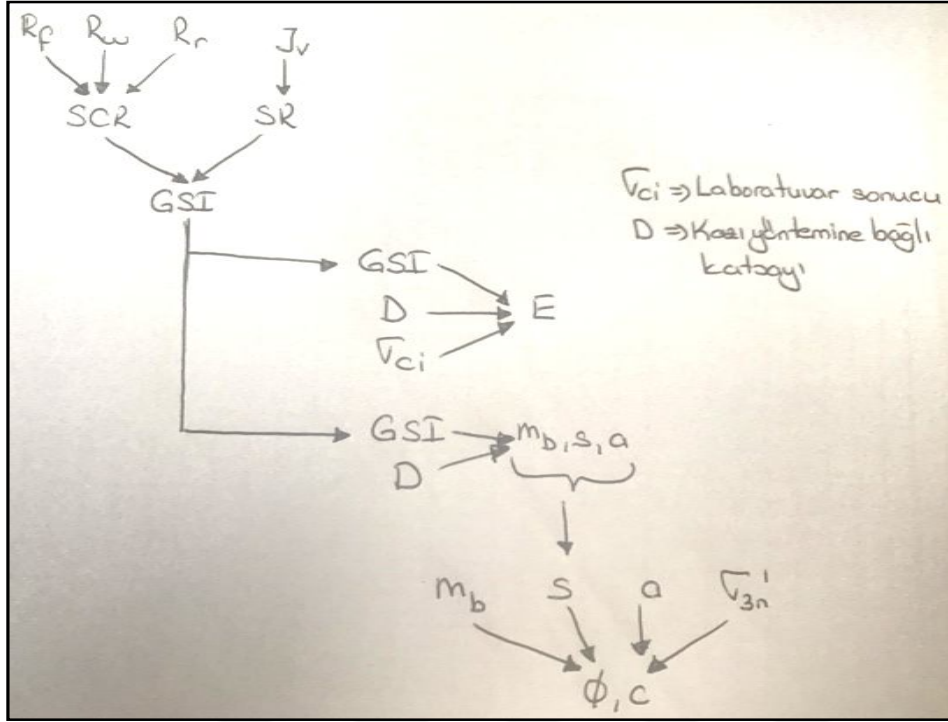


Şekil 4.4. Bulon destek elemanı için modele tanımlanan teknik özellikler

4.4.1. Kaya parametreleri

Phase² v.8’de zemin parametrelerinin modele Mohr-Coulomb yenilmekriteri ile aktarımı sağlanması için gerekli hesaplamalar bu bölümde verilmektedir. Mohr-Coulomb modelinin parametreleri Hoek-Brown sınıflandırma parametrelerinden yararlanılarak bulunmaktadır. Kaya parametrelerinin hesabının genel işleyiş aşamaları Şekil 4.5’de gösterilmektedir.

Gerilme değerleri olan σ_1 ve σ_3 değerleri “Eş. 4.4” ve “Eş. 4.5” denklemlerinin beraber çözülmesiyle hesaplanmaktadır. Bu denklemlerde bulunan içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri laboratuvar sonuçlarında bulunan değerlerdir. Ek-1 sayfa 95’de bulunan serbest basınç dayanımı ve üç eksenli sıkışma deneyi sonuçlarının gösterildiği tabloda verilmektedir. Bu tabloda kohezyon değerleri 3,65 MPa ve 1,86 MPa olarak okunmaktadır. Yine aynı tabloda içsel sürtünme açısı değerleri 74,25° ve 75,31° olarak okunmaktadır. Bu değerler yardımıyla 2 adet σ_1 ve σ_3 değeri bulunmaktadır. Bulunan değer çiftlerinden biri negatif değer içerdiği için diğer çift kullanılmaktadır. Bulunan değerler Çizelge 4.2’ de gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Kaya parametreleri hesabı aşamaları

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} \cdot \left(\tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2 \cdot c \cdot \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \right) \quad (4.4)$$

$$\sigma_{3f} = \sigma_{1f} \cdot \left(\tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2 \cdot c \cdot \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \right) \quad (4.5)$$

Burada σ_{1f} : Maksimum efektif gerilme, σ_{3f} : Minimum efektif gerilme ve ϕ : İçsel sürtünme açısıdır.

Çizelge 4.2. Laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen değerler (SK-2 sondajı 675m-700m arası)

σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)	En Düşük σ_{ci} (MPa)	En Yüksek σ_{ci} (MPa)
487,50	8,24	20,80	67,54

Çizelge 2.2 kullanılarak GSI değerinin hesaplanması amacıyla öncelikle tabloda gerekli bilgiler olan yapısal özellik puan (SR) ile süreksizlik yüzey koşulu puanı (SCR) hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar da “Eş. 4.6” ve “Eş. 4.7” yardımıyla yapılmaktadır.

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (4.6)$$

Burada SCR: Süreksizlik yüzey koşulu puanı, R_r : Pürüzlülük puanı, R_w : Bozunma puanı ve R_f : Dolgu puanıdır.

“Eş. 4.6” daki R_r değeri kaya pürüzlü olduğu için 5 puan, R_w değeri kaya az bozunmuş olarak değerlendirildiği için 5 puan ve R_f değeri dolgu durumundan dolayı 3 puan olarak kabul edilmektedir. Sonuç olarak SCR değeri 13 puan olarak bulunmaktadır.

$$SR = -17,5 \cdot \ln(J_v) + 79,8 \quad (4.7)$$

Burada SR: Yapısal özellik puanı ve J_v : Hacimsel eklem sayısıdır.

Bu formüldeki J_v katsayısı için bir aralıkta değerlendirme yapılabilmektedir. Hacimsel eklem sayısı (J_v); Palmström (1982, 1985 ve 1996) tarafından tanımlanan birim hacimdeki, diğer bir ifadeyle 1 m³'deki eklem sayısını göstermektedir ve “Eş. 4.8” deki gibi hesaplanmaktadır [53-55].

$$J_v = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_3} + \dots + \frac{1}{s_n} \quad (4.8)$$

Burada J_v : Hacimsel eklem sayısı ve s_n : Gözlenen her bir eklem seti için bulunan eklem ara uzaklığıdır.

RQD değerlerinin aralığına bağlı olarak J_v değeri Çizelge 4.3'teki tabloya bakılarak bulunmaktadır. Yapılan zemin çalışması ile bulunan RQD değerleri yüzde olarak sırasıyla 80, 70, 95, 90, 97 ve 98'dir. RQD_{ort} değeri ise % 88,33 olarak bulunmaktadır. J_v değerinin hesabında yerinde yapılmış olan arazi çalışmaları da göz önüne alınmaktadır. Blok boyutu değeri sahada yapılan incelenmelerde orta boyutlu bloklar olarak görülmüştür. Hem Çizelge 4.3 yardımıyla hem de saha gözlemlerinin sonucunda hacimsel eklem sayısının (J_v) 3 ile 30 değerlerini aldığı kabulü yapılmaktadır.

“Eş. 4.7” de J_v değerinin en küçük ve en büyük değerleri yerine konulduğunda hesaplanan yapısal özellik puanı sırasıyla 60,5 ve 20,2'dir. Bu durumda GSI hesabı için kullanılan Çizelge 2.2'de yapısal özellik puanları ve süreksizlik yüzey koşulu puanı yerlerine konulduğunda en düşük ve en yüksek olmak üzere iki adet GSI değeri elde edilmektedir.

Bu GSI değerlerini de J_v değerine bağlı olarak ifade edecek olursak J_v değeri 3 iken GSI değeri 53, J_v değeri 30 iken GSI değeri 32 olarak hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.3. RQD değerine bağlı J_v değerleri

GSI Açıklaması	ISRM Tayini	J_v , Nokta/m ³	RQD, %
Bloklu	Orta ile Büyük Bloklar	<10	90~100
Çok Bloklu	Küçük ile Orta Büyüklü Bloklar	10-30	60~90
Bloklu/Katlanmış/Kırıklı	Çok küçük ile Küçük Bloklar	>30	30~60
Kırılmış	Kırılmış kaya	>60	<30

GSI değeri Hoek-Brown yenilme ölçütünde maksimum gerilme hesabı için gerekli değerlerin hesaplanmasını sağlamaktadır ve bu hesap “Eş. 2.3” yardımıyla yapılmaktadır. Kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerini elde etmek için de m_b , s ve a değerleri gerekmektedir. GSI’in en düşük ve en yüksek değeri “Eş. 2.7”, “Eş. 2.8” ve “Eş. 2.9” da yerine konulduğunda sırasıyla m_b , s ve a değerleri elde edilmektedir. Hesaplanan bu değerler Çizelge 4.4’de verilmektedir.

Çizelge 4.4. GSI değerlerine bağlı olarak a , s ve m_b değerleri

		a	s	m_b
1.Küme	En Düşük GSI – En Düşük σ_{ci}	0,520	0,0005	2,380
	En Yüksek GSI – En Düşük σ_{ci}	0,505	0,0054	5,039
2.Küme	En Düşük GSI – En Yüksek σ_{ci}	0,520	0,0005	2,090
	En Yüksek GSI – En Yüksek σ_{ci}	0,505	0,0024	4,048

İçsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerini bulmak için gerekli bir diğer değer de σ_{3n}' tür. σ_{3n}' değerinin hesabı zeminde yapılacak yapıya göre değişkenlik göstermektedir. Tünel yapısı için kullanılacak formülasyon “Eş. 4.9” da verilmektedir [41].

$$\frac{\sigma_{3 \max}'}{\sigma_{cm}'} = 0,47 \cdot \left(\frac{\sigma_{cm}'}{\gamma \cdot H} \right)^{-0,94} \quad (4.9)$$

Burada $\sigma_{3\max}'$: Hoek-Brown ve Mohr-Coloumb kriterleri arasındaki ilişkinin göz önüne alındığı yanal stresin üst sınır değeri, σ_{cm}' : Kaya kütlesi dayanımı, γ : Birim hacim ağırlık ve H: Tünelin yüzeyden olan derinliğidir.

Hesaplanan m_b , s, a ve σ_{3n}' değerleri “Eş. 4.10” ve “Eş. 4.11” de yerine yerleştirildiği zaman sırasıyla içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri bulunmaktadır [41].

$$\phi = \sin^{-1} \cdot \left[\frac{6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma_{3n}')^{a-1}}{2 \cdot (1+a) \cdot (2+a) + 6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma_{3n}')^{a-1}} \right] \quad (4.10)$$

Burada ϕ : İçsel sürtünme açısı, m_b : m_i kaya malzemesi katsayısının indirgenmiş değeri, m_i : Kaya türüne bağlı olarak değişen bir sabit, a: Kaya kütlesi sabiti, s: Kaya kütlesi sabiti ve σ_{3n}' : Maksimum efektif gerilmedir.

$$c' = \frac{\sigma_{ci} \cdot [(1+2 \cdot a) \cdot s + (1-a) \cdot m_b \cdot \sigma_{3n}'] \cdot (s + m_b \cdot \sigma_{3n}')^{a-1}}{(1+a) \cdot (2+a) \cdot \sqrt{\frac{1 + (6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma_{3n}')^{a-1})}{(1+a) \cdot (2+a)}}} \quad (4.11)$$

Burada c: Kohezyon, m_b : m_i kaya malzemesi katsayısının indirgenmiş değeri, m_i : Kaya türüne bağlı olarak değişen bir sabit, a: Kaya kütlesi sabiti, s: Kaya kütlesi sabiti ve σ_{3n}' : Maksimum efektif gerilmedir.

Elastite modülü hesabı için Hoek tarafından geliştirilen “Eş. 2.12” kullanılmaktadır.

Yapılan bütün hesaplamalar sonucunda bulunan değerler Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da verilmektedir. σ_{ci} değerinin en yüksek ve en düşük olmak üzere iki farklı sonuç değeri bulunmaktadır. Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da değerler iki küme halinde gruplandırılmaktadır. Ayrıca her bir kümede iki adet GSI değeri vardır. Her bir GSI değerine karşılık gelen içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri de Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da gösterilmektedir.

Çizelge 4.6’da verilen R_f değeri rahatlama faktörüdür. Rahatlama faktörü değerinin seçiminde Vlachopoulos ve Diederichs (2009) yaptıkları çalışmalar göz önünde

bulundurulmaktadır. Schweiger, H.F.Nasekhian, A. ve Marcher, T. (2011) çalışmalarında ki R_f değerleri bu çalışma içinde uygun görülerek kullanılmaktadır. Rahatlama faktörü ile genel bilgiler Bölüm 4.7.2’den elde edilmektedir [56].

Çizelge 4.5. Hesap sonuçlarına bağlı olarak hesaplanan değerler

Parametreler	Olasılık	m_i	σ_{ci} (MPa)	D	GSI	ϕ (°)	c (kPa)
1.Küme	0,5	27	20,80	0-0,4	32 - 53	52,91 -58,42	191-291
2.Küme	0,5	30	67,54	0-0,4	32 - 53	61,93 - 61,10	311 - 442

Çizelge 4.6. Hesap sonuçlarına bağlı olarak çözümlemede kullanılacak değerler

Parametre	Olasılık	E_m (GPa)	R_f Tepe	R_f Yanal	ϕ (°)	c (kPa)
1.Küme	0,5	0,556-2,196	0,4-0,6	0,3-0,5	52,91 -58,42	191-291
2.Küme	0,5	7,31-9,107	0,3-0,5	0,2-0,4	61,93- 61,10	311 - 442

4.5. Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Metodu Uygulaması

Olasılık çalışması dört parametre (E , c , ϕ , R_f) için yapılmaktadır. Bu dört değişken zemin parametrelerinin hesaplanmasında, dayanım ve deformasyon hesabı için doğrudan hesaba katılan parametrelerdir [56]. Bu parametrelerin en yüksek ve en düşük sonuçlarının oluşturduğu kümeler için deformasyon hesaplamaları yapılmaktadır. Kümelerde her olasılıkta oluşturulması gereken model sayısı için olasılık hesabı “Eş. 4.12” de verilmektedir.

$$n_c = 2^N \prod_{i=1}^N n_i \quad (4.12)$$

Burada n_i : Her değişken için mevcut bilgi kaynağı (maksimum ve minimum değerler) ve N : Değişken sayısıdır.

$$n_c = 2^4 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \quad (4.13)$$

”Eş. 4.13” kullanılarak 256 adet kombinasyon oluşturulması gerektiği hesaplanmaktadır. Bu kombinasyonlardan ilk onaltısına ait değerler Çizelge 4.7’de verilmektedir.

Çizelge 4.7. Dört değişken değer için oluşturulan ilk onaltı kombinasyona ait zemin parametrelerinin değerleri

E ₁ , c ₁ , ϕ ₁ , R _{fl}																		
Deneme No.			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Model	Olasılık		Set No.	DDDD	DDDY	DDYD	DDYY	DYDD	DYDY	DYYD	DYYY	YDDD	YDDY	YDYY	YYDD	YYDY	YYYD	YYYY
0,5	1	0,5	0,5	0,556	2,196	0,556	2,196	0,556	2,196	0,556	2,196	0,556	2,196	0,556	2,196	0,556	2,196	0,556
1	1	1	1	191	191	291	291	191	191	291	291	191	191	291	291	191	191	291
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42	58,42	52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	58,42	58,42
0.4/0.3		52,91		52,91	52,91	52,91	52,91	58,42	5									

D: En düşük, Y: En yüksek

Her bir parametre kendi içinde en yüksek ve en düşük değer olmak üzere iki değere sahip olmaktadır. Her parametrenin kendi içinde iki değerden birinin olma olasılığı 0,5’dir. Bundan dolayı olasılık yoğunluğu 0,5 olarak görülmektedir. Bu durumda her bir değer kendi içlerindeki durumun aynı anda oluşabilme olasılığı hesabı “Eş. 4.14”deki gibidir.

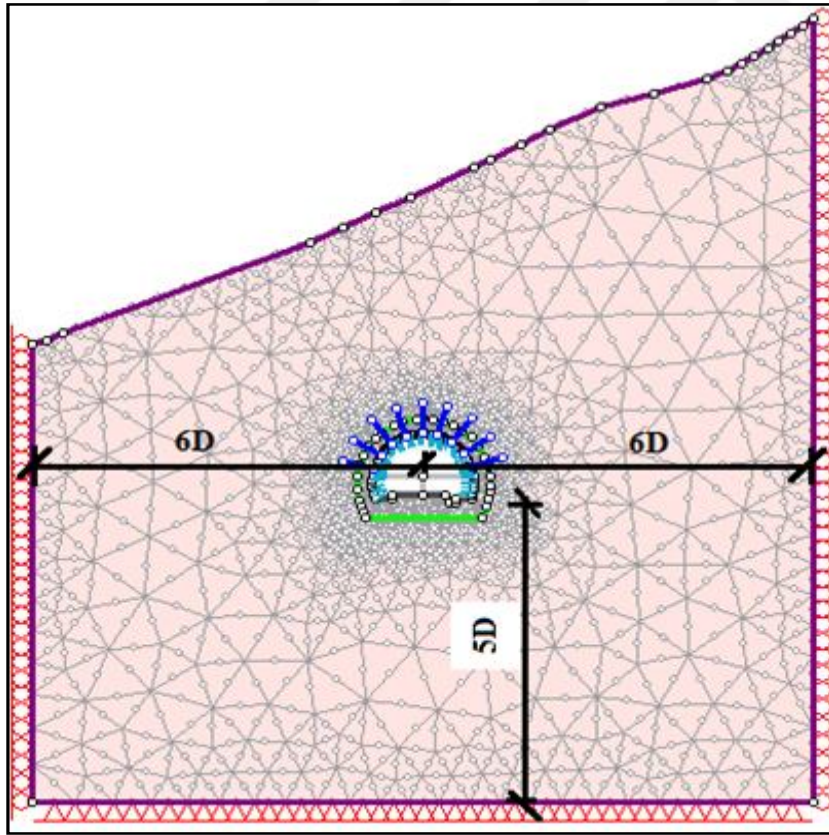
$$p(f(E_1, c_1, \phi_1, R_1,)) = p(E_1)p(c_1)p(\phi_1)p(R_1) = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 0,0625 \quad (4.14)$$

4.6. Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Model Geometrisi

Bu bölümde kullanılan sonlu eleman metodu için model geometrisinin oluşturulmasındaki önemli etkenler ve bu etkenlerin nasıl elde edildiği anlatılmaktadır. Bu etkenler; sınır şartlarının tanımlanması, eleman seçimi çalışması ve yakınsama eleman çalışmasıdır.

4.6.1. Sınır şartlarının tanımlanması

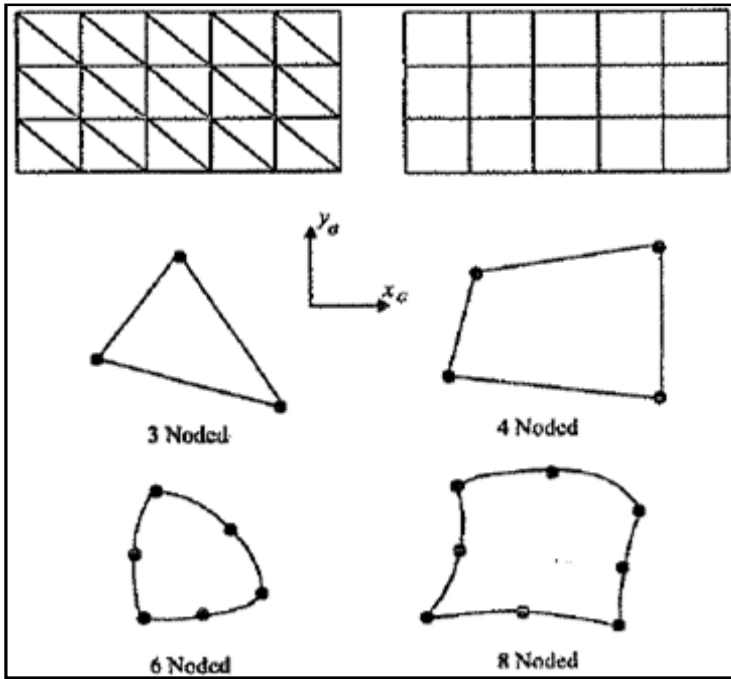
Bir zeminin modellenmesi sırasında sonsuz genişlikte bir model oluşturmak gerçekçi bir yaklaşım olmadığından belirlenen mesafeler içerisinde bir modelleme yapılmaktadır. Kulhawy (1974) çalışmasında derinliği çapının 5 katını geçmeyen tünelleri sığ tünel, derinliği çapının 10 katından fazla olanları ise derin tünel olarak tanımlanmaktadır. Modelleme sırasında Kulhawy (1974)'nın yaptığı çalışmaya göre sığ tünellerde dış sınırlar galeri çapının 6 katı olacak şekilde oluşturulmaktadır. Ayrıca sığ tünellerde sınır koşulları üst kenarda zemin profili modellenirken yan kenarlarda yatay yer değiştirmelere kapalı, alt kenarda ise hem yatay hem de düşey yer değiştirmelere kapalı bir model oluşturulmaktadır. Derin tünellerde bütün kenarlarda hem yatay hem de düşey yer değiştirmelere kapalı bir tünel oluşturulmaktadır. Bu çalışmada tünel sığ tünel koşullarını sağladığı için sınır mesafeleri ve sınır koşulları sığ tünel şartlarına göre modellenmektedir. Bu şekilde oluşturulan model Şekil 4.6'da görülmektedir [57].



Şekil 4.6. Sığ tünel için model sınırları ve şartları

4.6.2. Eleman seçimi çalışması

İncelenen sınır değer probleminin geometrisi tanımlanmalı ve nicelleştirilmelidir. Bu tanımlama ve nicelleştirme sırasında bazı basitleştirmeler ve yaklaşımlar gerekli olmaktadır. Geometri tanımlaması daha sonra sonlu elemanlar olarak adlandırılan küçük bölgelerden oluşan eşdeğer bir sonlu eleman ağ ile değiştirilmektedir. İki boyutlu problemler için sonlu elemanlar Şekil 4.7’de görüldüğü gibi genellikle üçgen veya dörtgen şeklindedir [52].

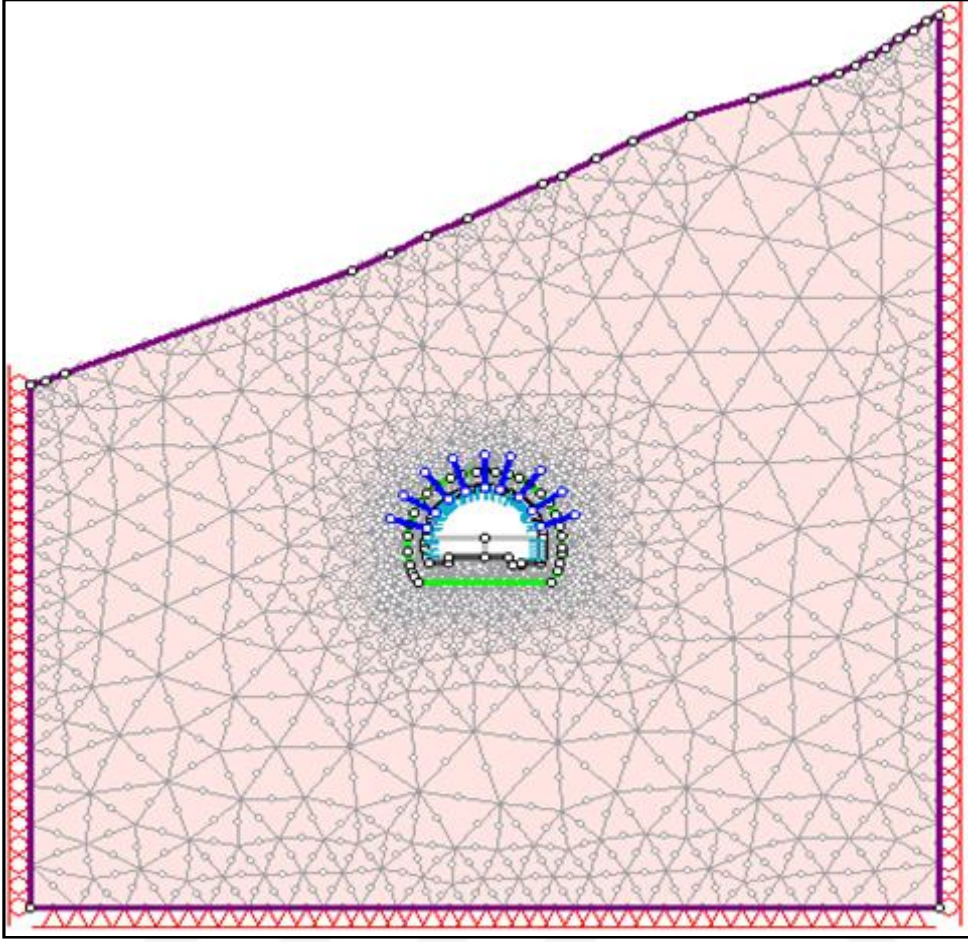


Şekil 4.7. Tipik 2 boyutlu sonlu elemanlar

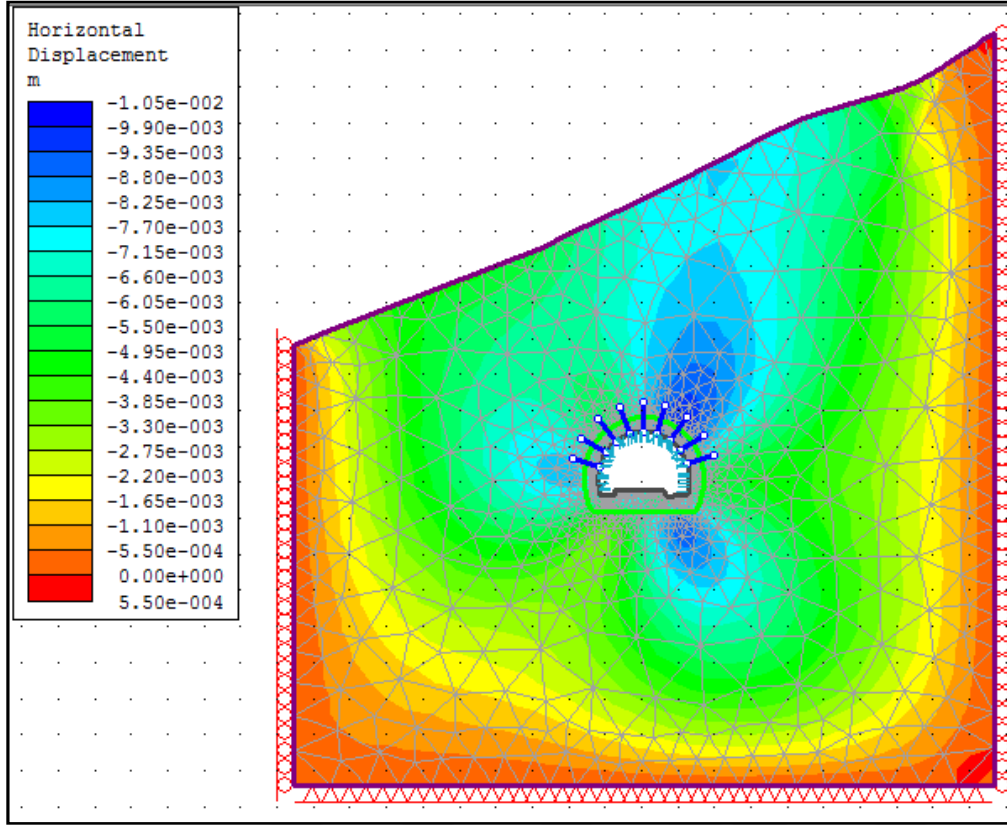
Sonlu elemandaki geometriler, düğüm adı verilen eleman üzerindeki kilit noktaların koordinatları cinsinden belirtilmektedir. Düz kenarlı elemanlar için genellikle bu düğümler eleman köşelerinde bulunmaktadır. Ancak elemanlar kavisli kenarlara sahipse her bir kenarın orta noktasından ek düğüm noktaları tanımlamak gerekmektedir. Bütün ağdaki eleman kümelerinde elemanlar ve düğüm noktaları ile birbirine bağlanmaktadır. Sonlu eleman ağını tanımlamak içinde elemanlar ve düğümler belirli bir sistem yardımıyla numaralandırılmaktadır. Düğüm noktaları numaralandırılırken soldan sağa, aşağıdan yukarıya doğru bir sistem izlenmektedir. Ayrıca eleman numaralandırılması da benzer şekilde yapılmaktadır [52].

Eleman tiplerinin nokta sayıları, kullanılan sonlu eleman methodu programlarına göre değişmektedir. Sonlu elemanlar methodu için kullanılan bazı ticari yazılımlar şu şekilde sıralanabilir: Plaxis, Phase², Midas, Flac, Abaqus, Crisp, Geoslope. Her ticari yazılım farklı eleman tipine göre hesaplama yapmaktadır. Örneğin, Plaxis v.8 için eleman tipleri; 15 noktalı üçgen ve 6 noktalı üçgen elemandır. Bu çalışmada kullanılan Phase² v.8 için eleman tipleri; 3 noktalı üçgen eleman, 6 noktalı üçgen eleman, 4 noktalı dörtgen ve 8 noktalı dörtgen elemandır.

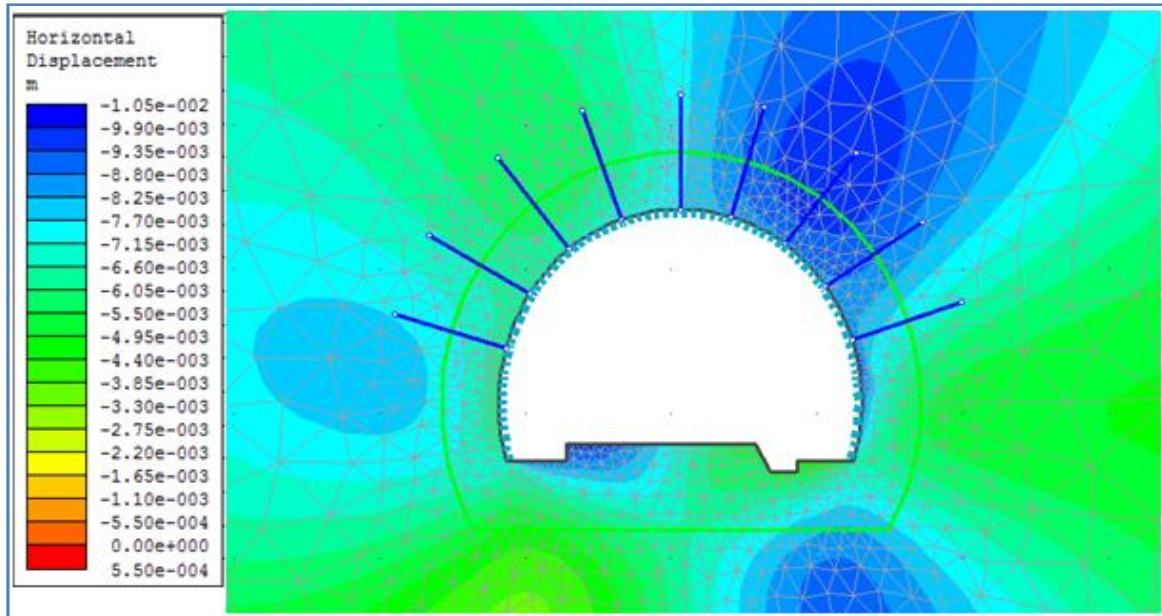
Bu çalışmada eleman tipini belirlemek amacıyla 3 noktalı üçgen eleman, 6 noktalı üçgen eleman, 4 noktalı dörtgen ve 8 noktalı dörtgen eleman seçimi yapılarak deformasyon sonuçları elde edilmekte ve hesaplamalar düzlemsel olarak yapılmaktadır. Yapılan çalışmaların sonuçları Çizelge 4.8’de verilmektedir. Çizelge 4.8’de verilen deformasyon sonuçları 1 noktasına (tepe noktası) ait deformasyon sonuçlarıdır. 1 numaralı deformasyon sonuçları için Çizelge 3.1 ile Çizelge 4.8 karşılaştırılmaktadır. Ayrıca eleman sayılarının ve nokta sayılarının artışını incelediğimiz zaman Çizelge 4.8’de artan eleman ve nokta sayılarına karşın azalan deformasyon değerleri görülmektedir. Azalan bu değerlerin en az olduğu değerler ise 6 noktalı üçgen elemanlarda elde edilmektedir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda 6 noktalı üçgen eleman ile yapılan hesaplamaların en uygun sonuçları vermesinden dolayı deformasyon okumaları için en uygun eleman tipi olarak kullanılmaktadır. En uygun sonucu veren 6 noktalı üçgen eleman ile oluşturulan ağ eleman örgüsü Şekil 4.8’de verilmektedir. Ayrıca 6 noktalı üçgen eleman ile hesaplanmış yatay ve düşey deformasyon sonuçlarına ait görseller sırasıyla Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’dir.



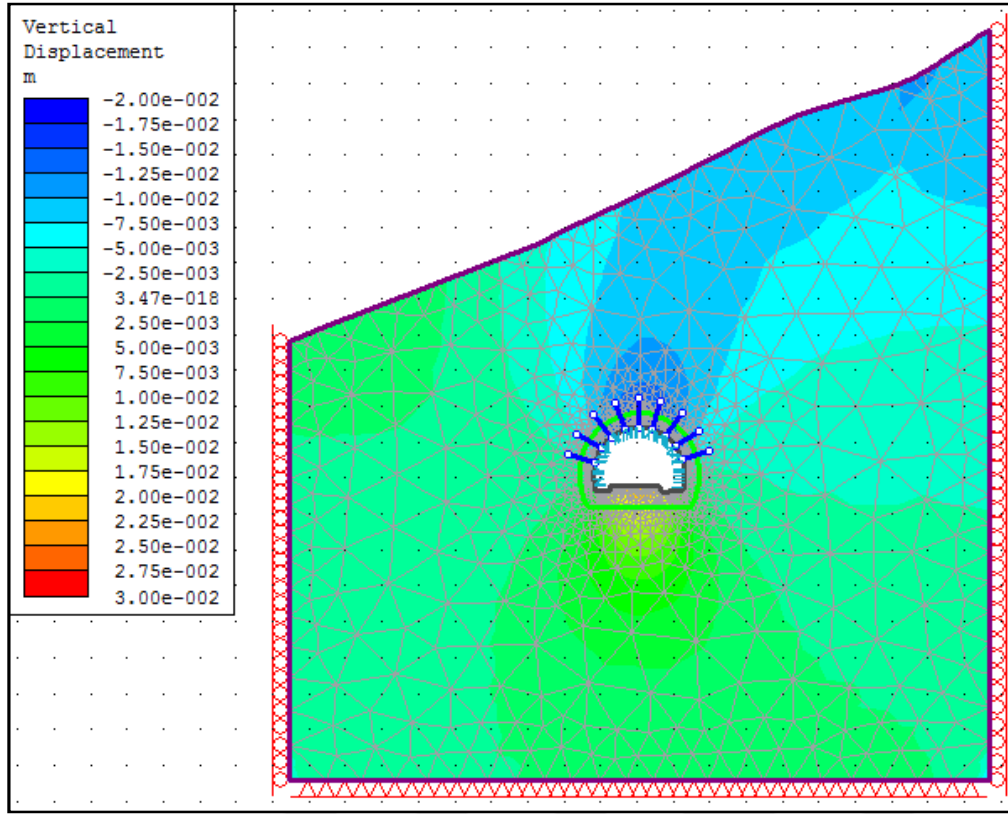
Şekil 4.8. 6 Noktalı üçgen eleman ağ örgüsü



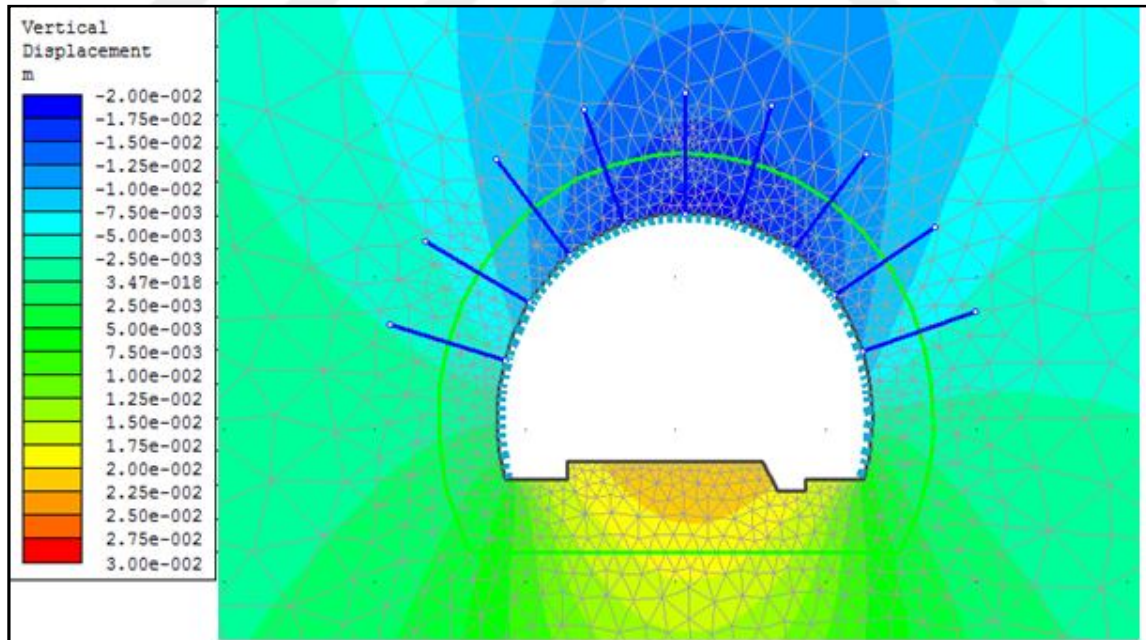
Şekil 4.9. 6 Noktalı üçgen eleman yatay deformasyon sonucunun genel görünüşü



Şekil 4.10. 6 Noktalı üçgen eleman yatay deformasyon sonucunun yakın görünüşü



Şekil 4.11. 6 Noktalı üçgen eleman düşey deformasyon sonucunun genel görünüşü



Şekil 4.12. 6 Noktalı üçgen eleman düşey deformasyon sonucunun yakın görünüşü

Çizelge 4.8. Eleman tiplerine göre yatay ve düşey deformasyon sonuçları

Eleman Tipi	Eleman Sayısı	Nokta Sayısı	Yatay Deformasyon (mm)	Düşey Deformasyon (mm)
3 Noktalı Üçgen	2387	1302	7,74	18,8
6 Noktalı Üçgen	2387	4991	7,73	18,5
4 Noktalı Dörtgen	1214	1318	7,6	19,3
8 Noktalı Dörtgen	1214	3850	7,6	19,7

4.6.3. Yakınsama eleman çalışması

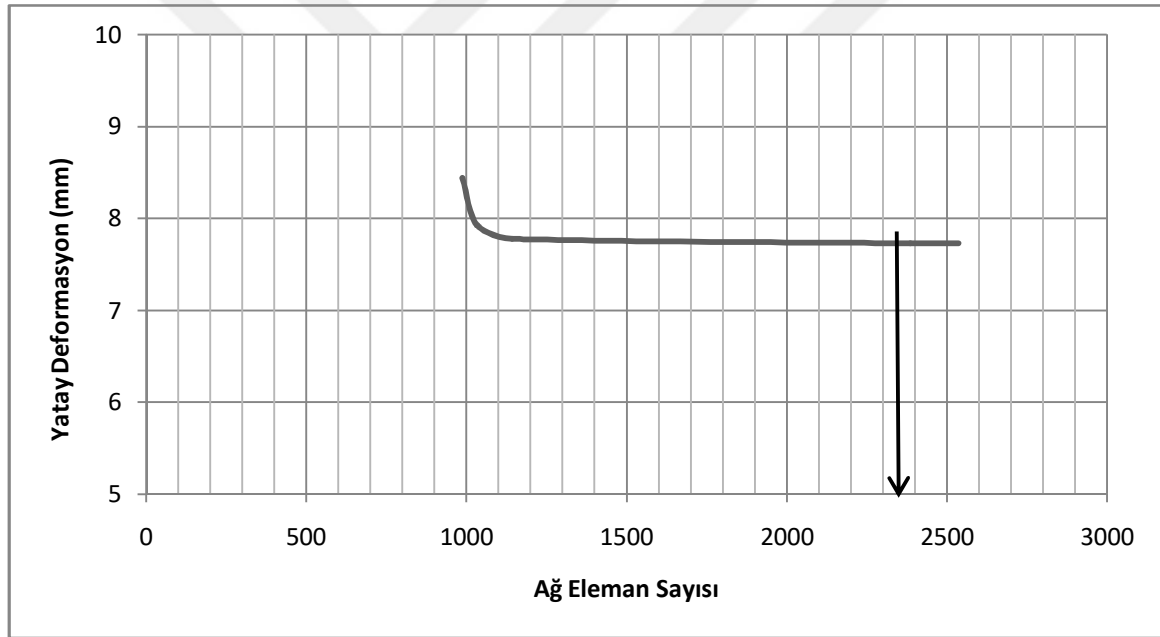
Ağ yakınsama çalışması, analiz sonuçlarının eleman sayısının değiştirilmesinden etkilenmemesini sağlamak için bir modelde kaç eleman gerektiğinin belirlenmesini sağlamaktadır.

Yakınsama eleman çalışması 3 farklı şekilde yapılmaktadır. Bunlar; eleman sayısını artırmak (h iyileştirmesi), eleman derecesini artırmak (p iyileştirmesi) ve hem eleman sayısını hem de eleman derecesini artırmaktır.

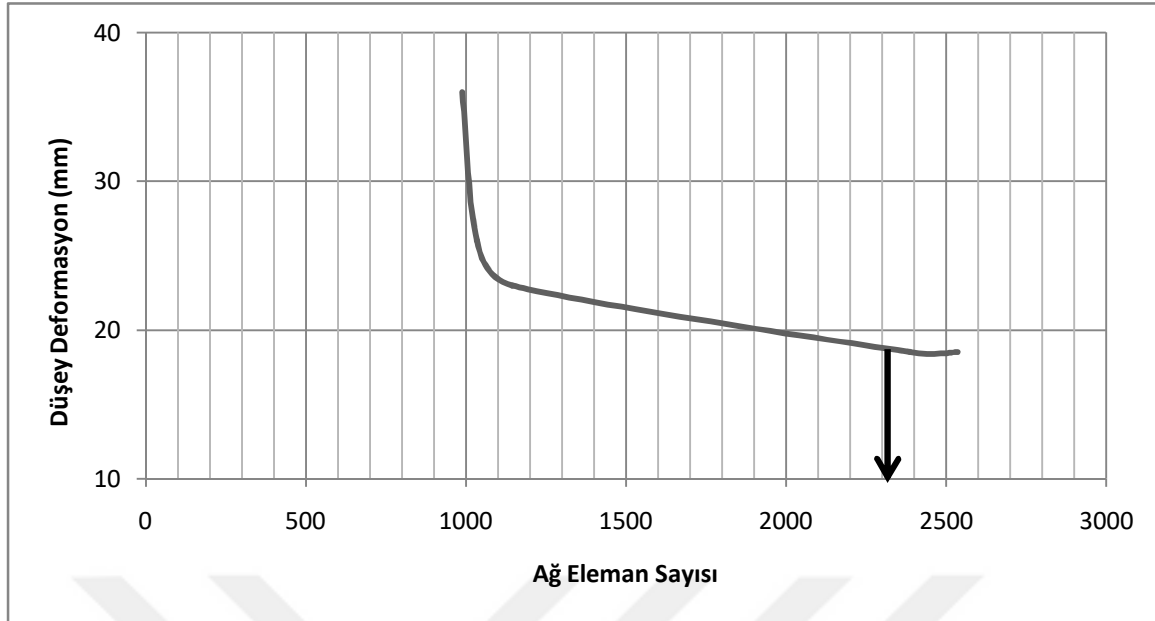
Bu çalışmada yakınsama eleman çalışması için eleman sayısı artırımı (h iyileştirmesi) yapılmaktadır. Yapılan çalışmada kullanılan eleman sayısı ve deformasyon sonuçları Çizelge 4.9’da görülmektedir. Çizelge 4.9’daki ağ eleman sayısı ve deformasyon sonuçları grafik olarak Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de verilmektedir.

Çizelge 4.9. Ağ eleman sayısına karşılık gelen nokta sayısı, yatay deformasyon ve düşey deformasyon değerleri

Ağ Eleman Sayısı	Nokta Sayısı	Yatay Deformasyon (mm)	Düşey Deformasyon (mm)
988	2122	8,44	36,0
1034	2214	7,92	26,0
1144	2440	7,78	23,0
2387	4991	7,73	18,5
2535	5303	7,73	18,5

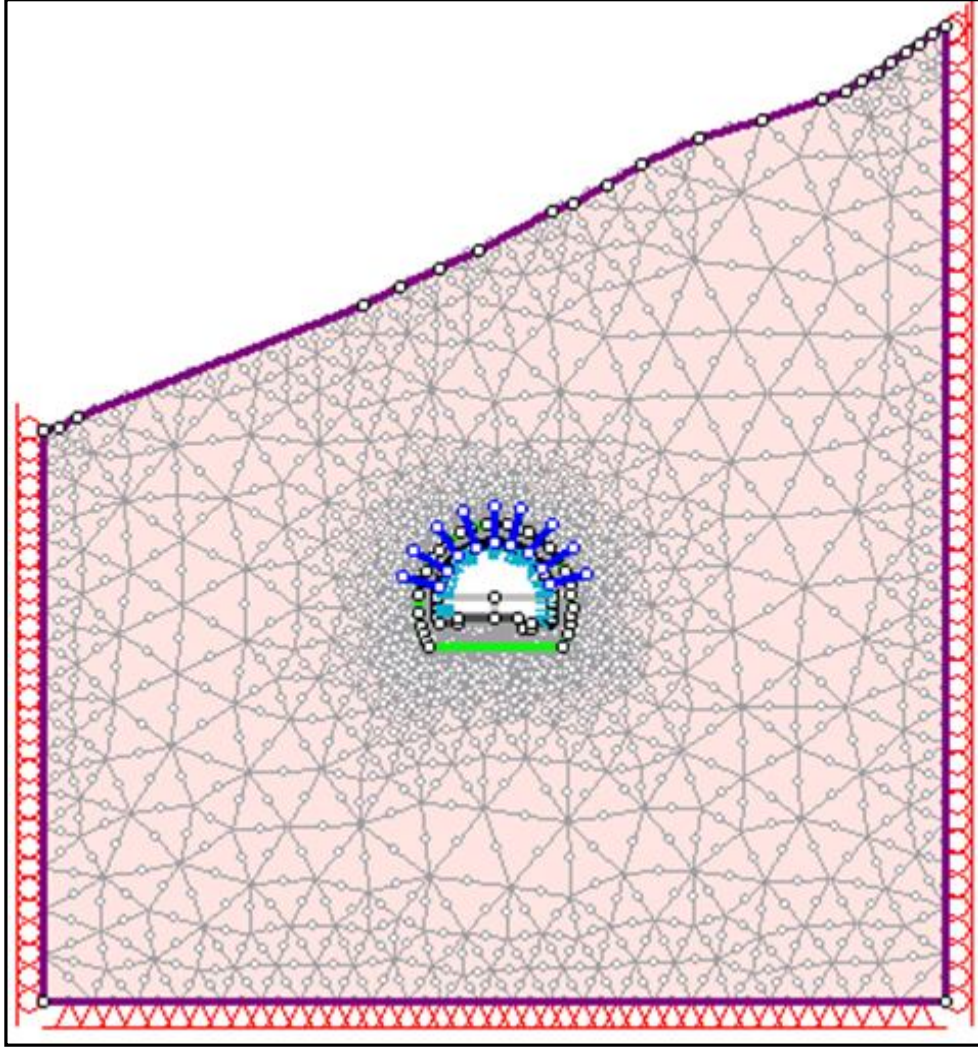


Şekil 4.13. Ağ eleman sayısına bağlı olarak değişen yatay deformasyon değerleri

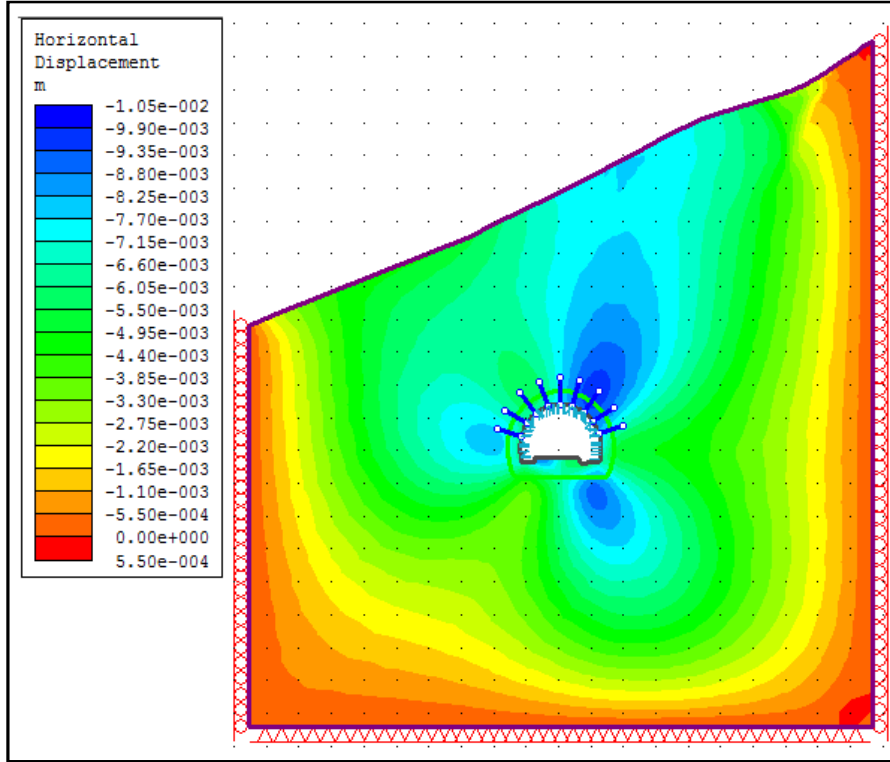


Şekil 4.14. Ağ eleman sayısına bağlı olarak değişen düşey deformasyon değerleri

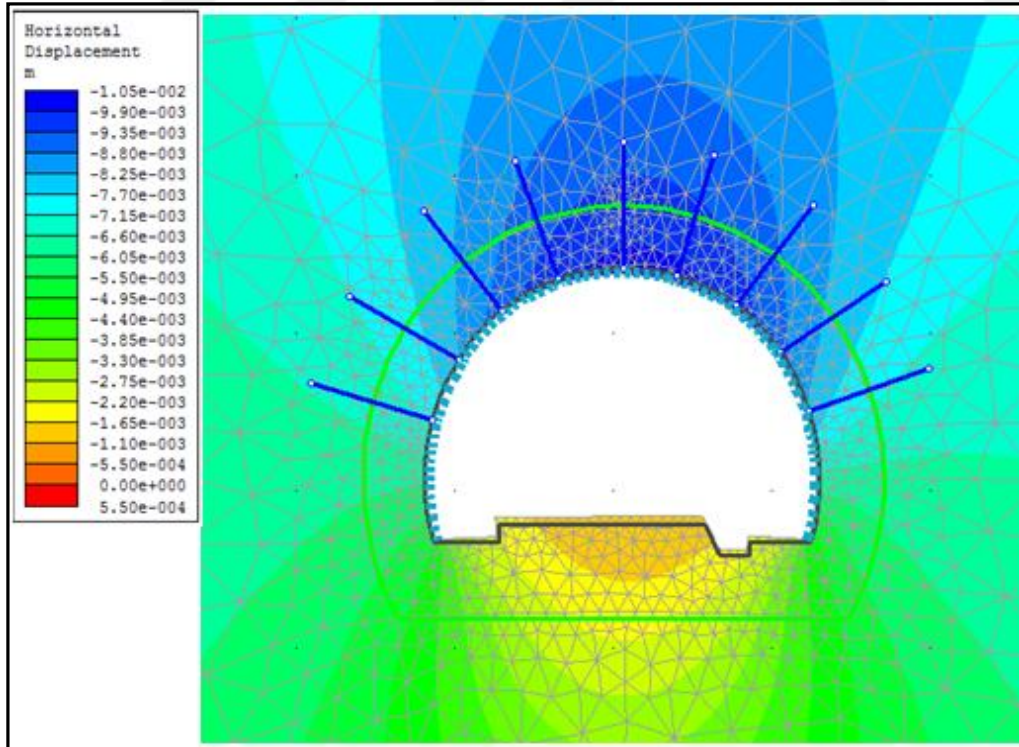
Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'deki grafikler incelendiğinde 2387 ağ eleman sayısı ile hesaplanan deformasyonların ağ eleman sayısı artırılmasına rağmen benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca ağ eleman sayısı 2387'den az iken daha yüksek deformasyon değerleri hesaplanmakta ancak 2387 ve daha yüksek ağ elemanı olduğunda hem yatay hem de düşey deformasyonlar değişmemektedir. Yakınsama eleman çalışması sonucunda 2387 ağ eleman sayısına göre hesaplama yapmanın uygun olduğu görülmektedir. Bu çalışmaya ait olan 2387 ağ eleman sayısına sahip ağ görüntüsü Şekil 4.15'de verilmektedir. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de düşey yer değiştirme sonuçları gösterilirken Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da yatay yer değiştirme sonuçları gösterilmektedir.



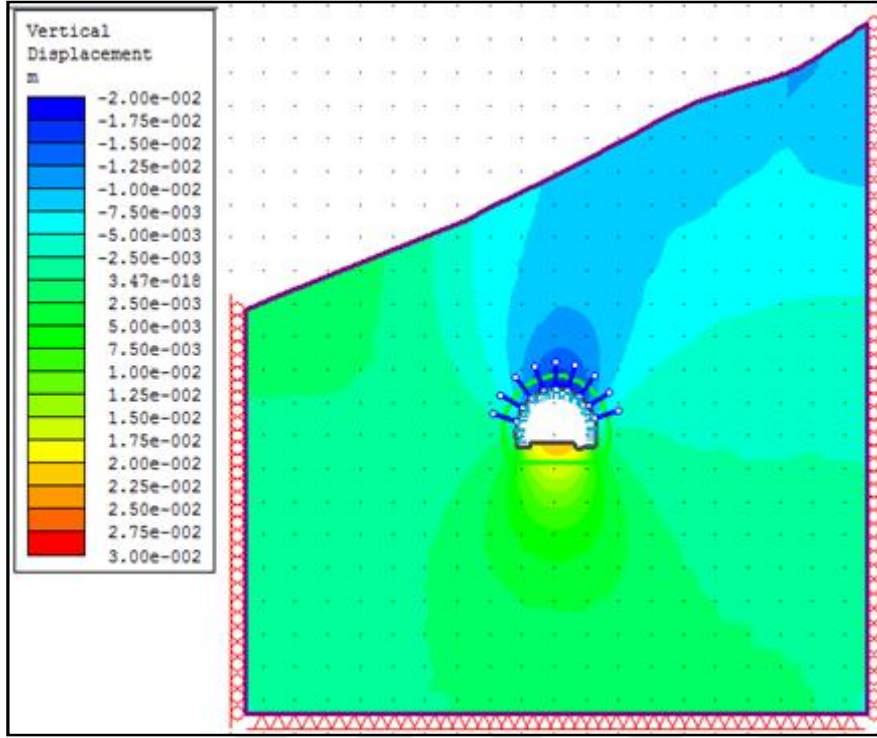
Şekil 4.15. 2387 eleman sayısı ile oluşturulmuş ağ görüntüsü



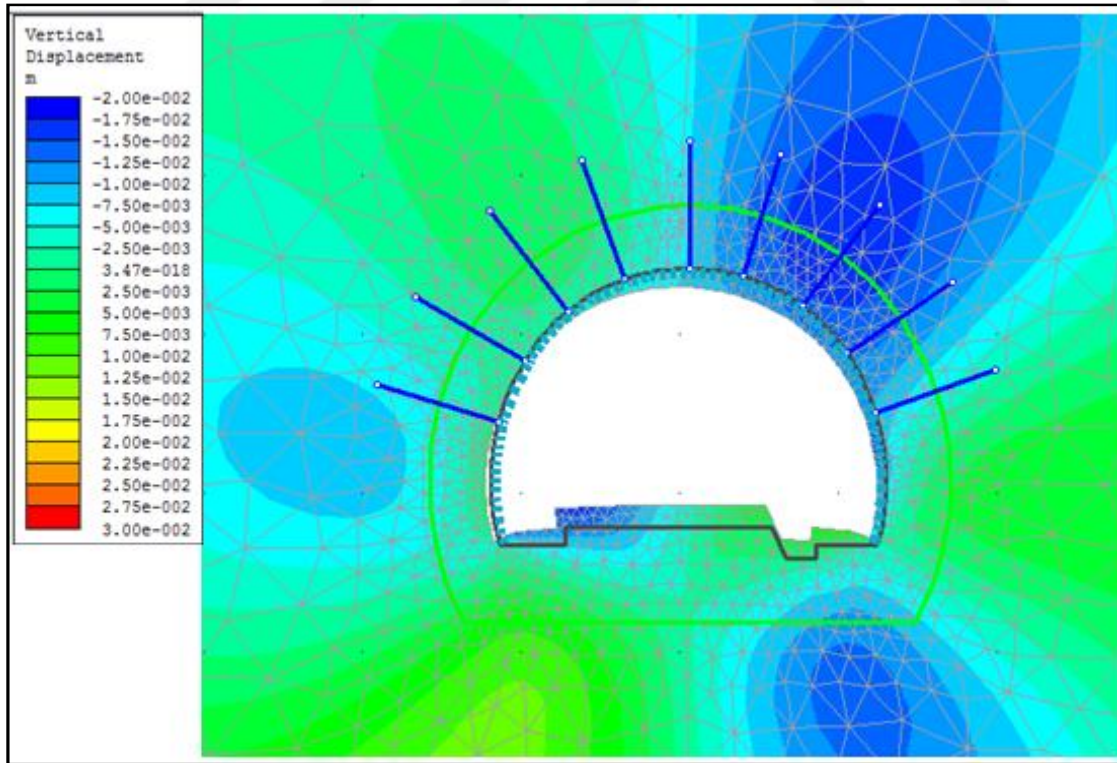
Şekil 4.16. 2387 eleman sayısı ile oluşturulmuş düşey deformasyon sonucunun genel görünüşü



Şekil 4.17. 2387 eleman sayısı ile oluşturulmuş düşey deformasyon sonucunun yakın görünüşü



Şekil 4.18. 2387 eleman sayısı ile oluşturulmuş yatay deformasyon sonucunun genel görünüşü



Şekil 4.19. 2387 eleman sayısı ile oluşturulmuş yatay deformasyon sonucunun yakın görünüşü

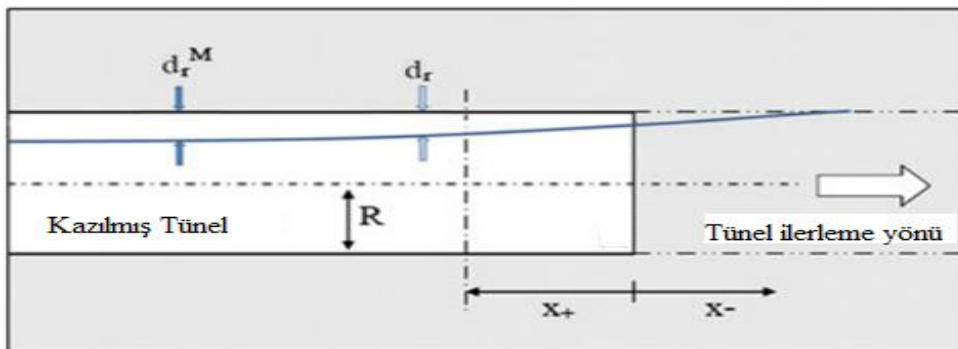
4.7. Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Metodunda Kullanılan Başlangıç Koşulları

Sonlu elemanlar modelinde başlangıç koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Başlangıç koşulları; başlangıç yeraltı suyu koşulları, rahatlama faktörü (R_f) ve sükûnetteki yanal toprak basıncı katsayısı (K_0)'nın belirlenmesidir. Bu çalışmada yapılmış sondaj çalışmalarında yeraltı su seviyesine rastlanmamıştır. Bu yüzden yeraltı suyu modele tanımlanmamaktadır. Ayrıca çalışmada taşıt yükleri, deformasyon okumaları tünelin yan ve üst bölümlerinde yer aldığı için kullanılmamaktadır.

4.7.1. Rahatlama faktörü (R_f) değerinin etkiltilmesi

Rahatlama faktörü (R_f) kazı aşamalarındaki deformasyonlara karşılık bir yükleme oluşturulmasıdır. Bu yükleme üç boyutlu imal edilen tünelin iki boyutlu analize uygulanması için kullanılan bir yöntemdir.

Sonlu elemanlar modelleri veya gerilme-deformasyon hesaplamaları için üç boyutlu analiz programları geliştirilse de iki boyutlu analizler de günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tünel yapım işi doğal olarak üç boyutlu bir işlemdir. Tünel açılmasında yumuşak kaya içerisinde üç boyutlu mermi biçimli bir plastisite bölgesi oluşur. Bu oluşan plastisite bölgesini çevreleyen kaya kütlelerinin elastik kapanmasıyla birleştiğinde bir yer değiştirme profili oluşur. Bu oluşan profil Şekil 4.20'de verilmektedir. Yer değiştirme doğrusal olmayan bir şekilde ilerleyen yönde kısmen gelişerek denge koşullarına ulaşmadan önce birkaç tünel çapında devam eder [58].

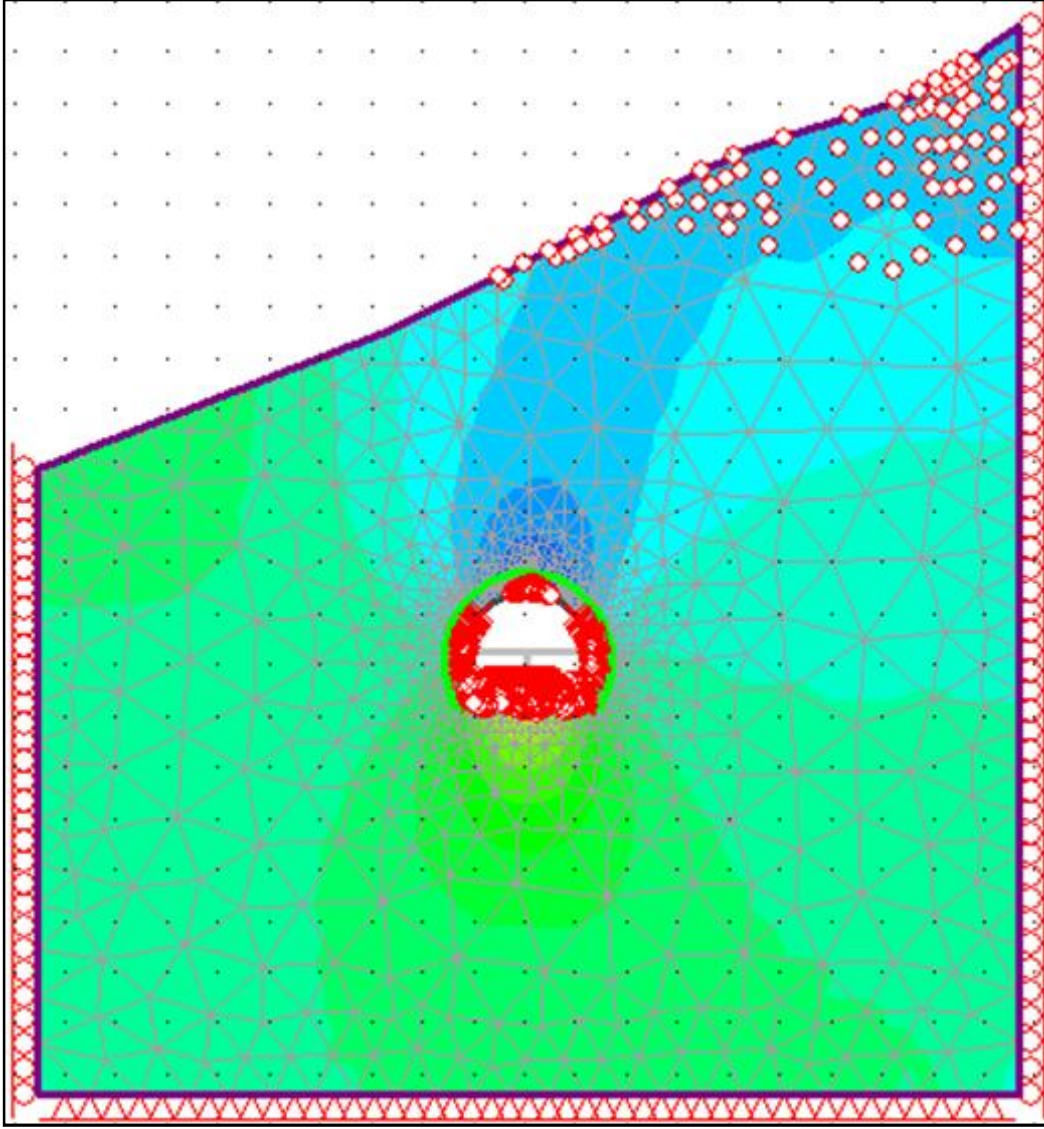


Şekil 4.20. Yüzey yakınında desteklenmeyen bir tünel için radyal yer değiştirmelerinin (u_r) profil görünümü

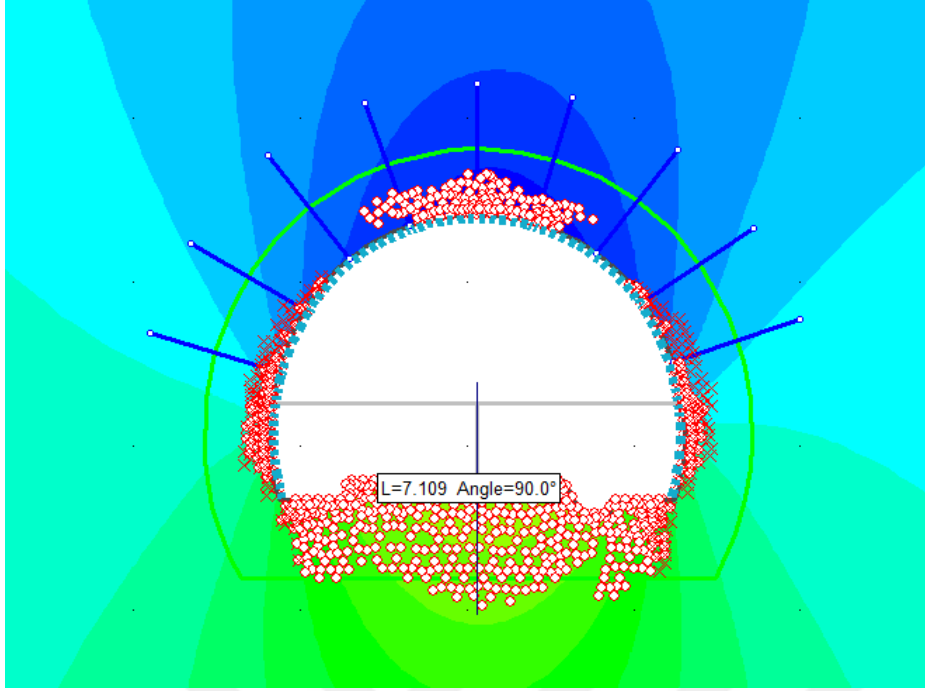
Uzunlamasına deformasyon profili (LPD) olarak bilinen profil, tünel yarıçapının ve son plastik yarıçapının (yenilmede ki tünel yarıçapı kalınlığı) bir fonksiyonudur.

Vlachopoulos ve Diederichs (2009) yaptıkları çalışma ile plastik bölge gelişimindeki tünelin LDP hesaplamalarında geliştirmeler sağlamıştır. Bu alışma ilerleyen tünelin n bölümündeki plastik verimi ve aşırı plastik yarıçapın etkisini hesaba katmak için desteksiz tünellerin uzunlamasına yer değiştirme profillerini ayarlamaktadır. Ayrıca bu çalışmanın sonucunda bir tünelde yapılan iki boyutlu analizde üç boyutlu etkenlerin göz önünde bulundurulması vurgulanır.

Rahatlama faktörünün öncelikle hangi aşamada modele etkitileceği tespit edilmektedir. Analizin kaç aşamada yapılacağının belirlenmesi içinde plastik bölge belirlenmektedir. Plastik bölgenin belirlenmesi için şekil 4.21 ve şekil 4.22'den yararlanılmaktadır. Bu şekiller yardımıyla plastik bölge yarıçapı (R_p) 7,1 metre ve tünel yarıapıda (R_t) 4,0 metre olarak okunmaktadır. Çizelge 4.10 yardımıyla kapanma/maksimum kapanma değerini bulabilmek amacıyla tünel yüzünden ilerlenen mesafenin tünel yarıçapına oranı ve plastik bölge yarıçapının tünel yarıçapına oranı bulunmaktadır. Bu işlemler sonucunda tünel yüzünden ilerlenen mesafenin tünel yarıçapına oranı 0,50 ve plastik bölge yarıçapının tünel yarıçapına oranı 1,79 olarak bulunmaktadır. Böylece izelge 4.10 yardımıyla kapanma/maksimum kapanma değeri 0,58 olarak okunmaktadır.

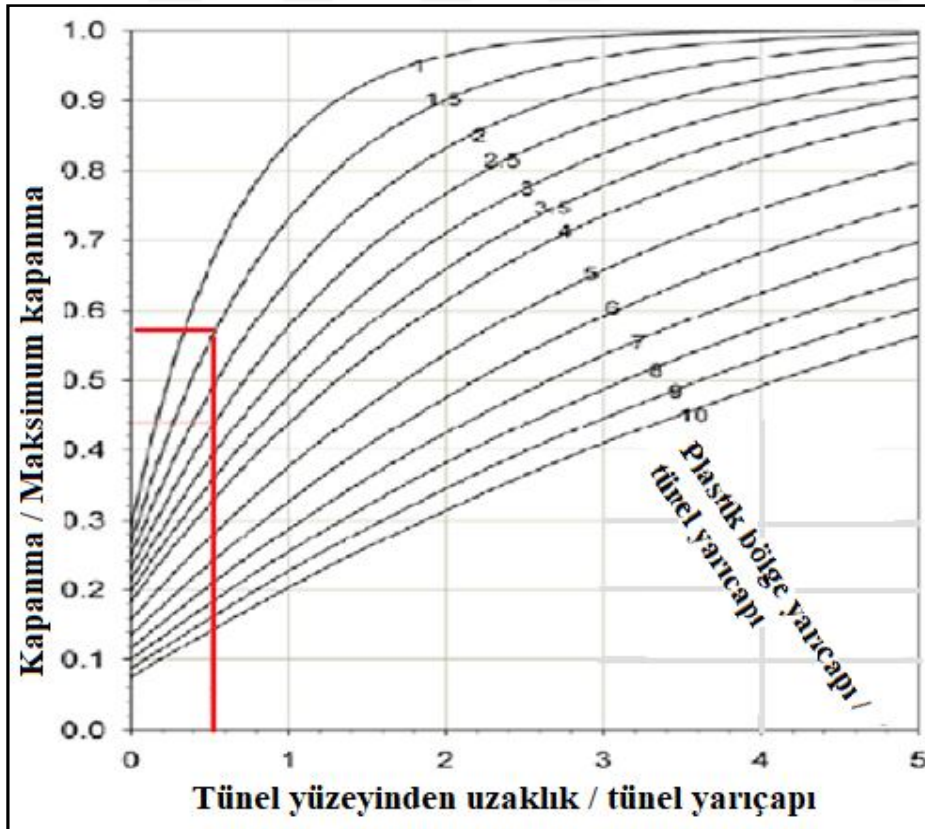


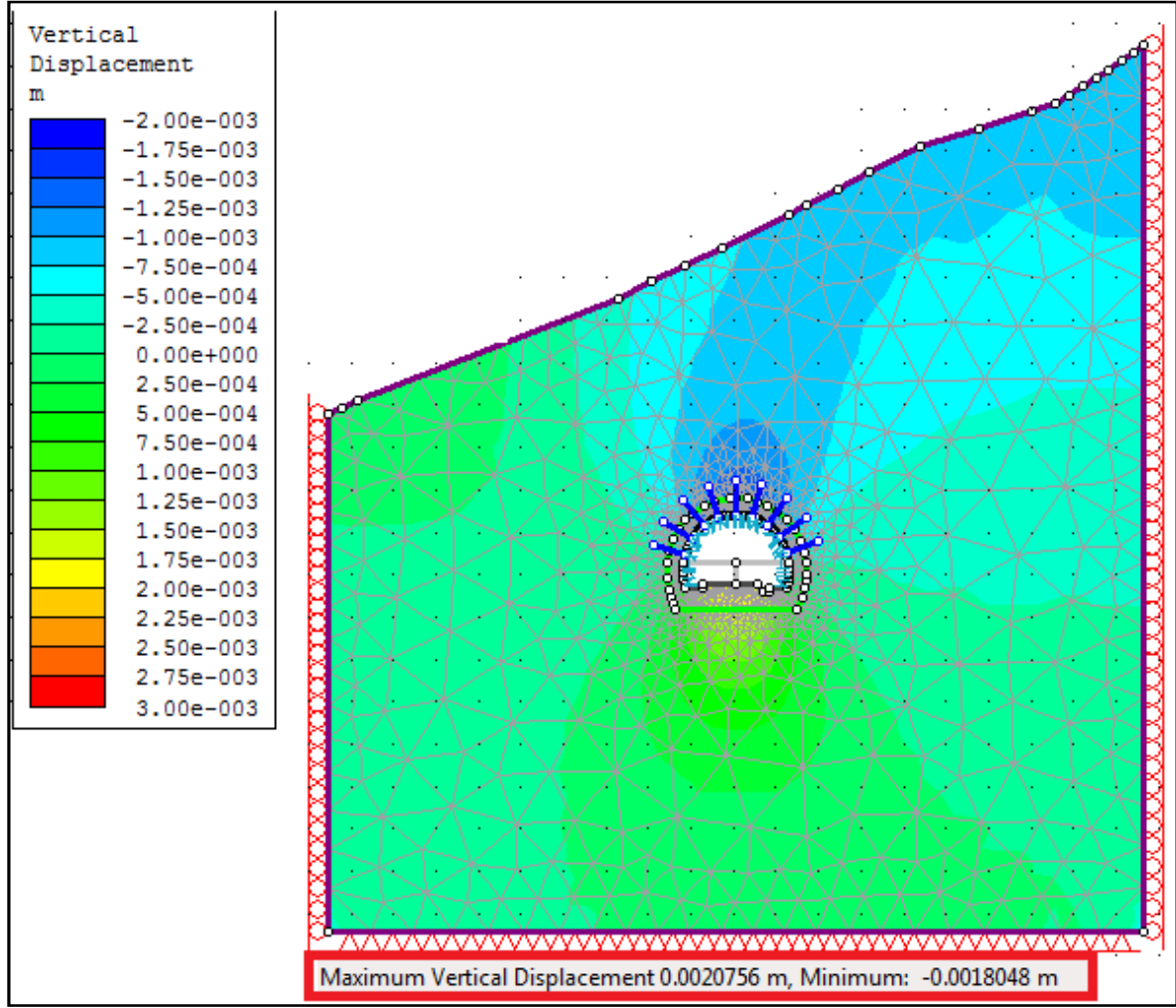
Şekil 4.21. Oluşan plastik bölgenin genel görünüşü



Şekil 4.22. Oluşan plastik bölgenin yakın görünüşü

Çizelge 4.10. Kapanma / maksimum kapanma ile tünel yüzeyinden uzaklık / tünel yarıçapının karşılaştırması [58]





Şekil 4.23. Tünel arının 2 m ileriye ulaştığında düşey yönde oluşan maksimum deformasyon

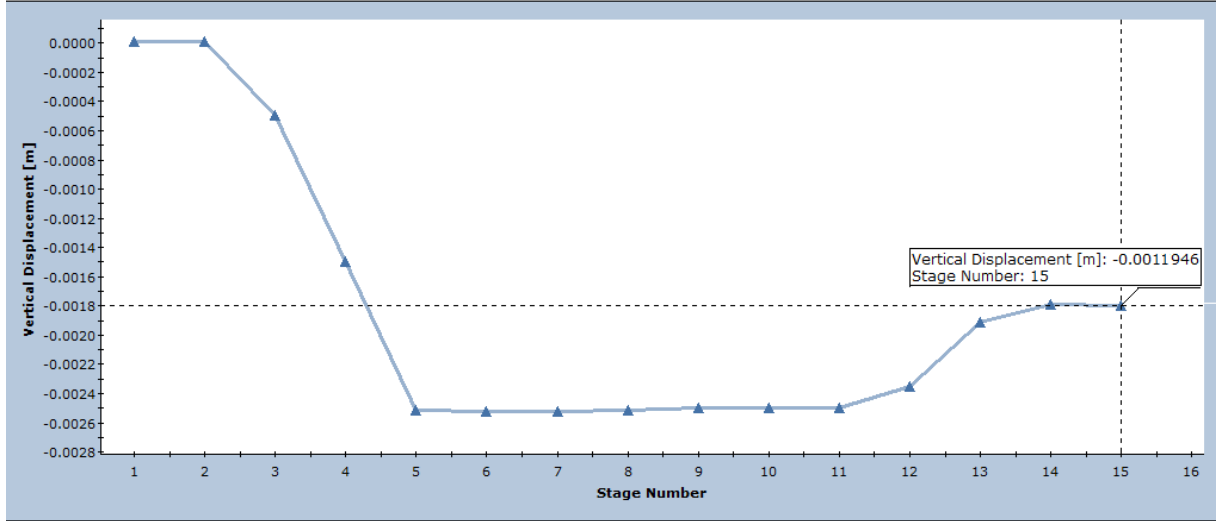
Tünel arının son destekten 2 m ileriye ulaşması durumunda maksimum deformasyonun 0,002 m olarak bulunduğu Şekil 4.23’de gösterilmektedir.

Tünel arının son destekleri 2 metre ileriye ulaştığındaki tünel radyal deformasyonun değeri “Eş. 4.15” ile bulunur ve tünel tavanı radyal deformasyonu bulunan bu değere ulaştığında kazı aşamasında destek sisteminin uygulanması gerekmektedir.

$$\text{Radyal deformasyon} = \frac{\text{Kapanma}}{\text{Maksimum Kapanma}} \cdot \text{Maksimum Deformasyon} \quad (4.15)$$

“Eş. 4.15” de değerler yerine yazıldığında radyal deformasyon değeri $1,1 \times 10^{-3}$ m olarak bulunmaktadır. Tünelin radyal deformasyonunun bulunan bu değere hangi aşamada ulaştığını görmek amacıyla Şekil 4.24’den yararlanılmaktadır. Bu grafik yardımıyla da

hesaplanan değerin 15.kazı aşamasında oluştuğu görülmektedir. Bu durumda model de kazı aşamasını en doğru şekilde modellemek amacıyla 15 aşamalı yapılması gerekmektedir.



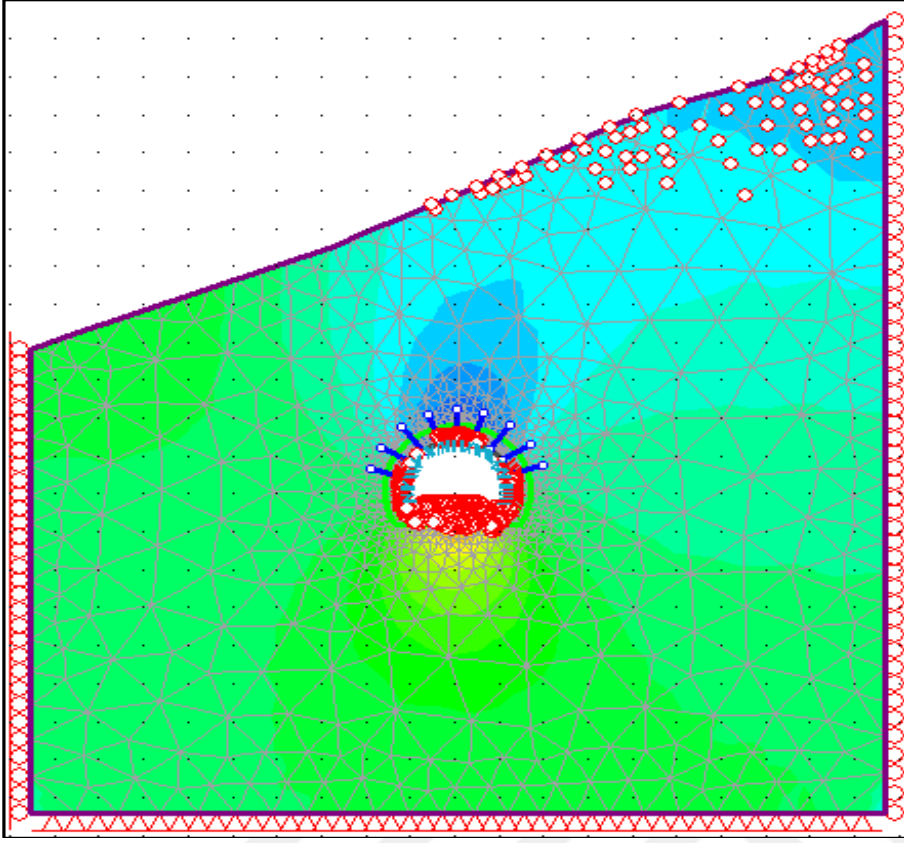
Şekil 4.24. Maksimum deformasyon ile kazı aşamasının belirlenmesi

Rahatlama faktörü değeri kazının yapılmaya başladığı bölümden azaltılarak 1'den 0'a kadar değerler almaktadır. Bu iki değer arasında kalan bölümlerde verilen değerler için Schweiger, H.F. Nasekhian, A. ve Marcher, T. (2011)'nin yapmış olduğu çalışmadaki değerler kullanılmaktadır. R_f 'in 1 olduğu durum kazı öncesi gerilmeleri ifade ederken 0 olduğu durum ise kazı sonrası durum için kullanılmaktadır. Toplamda 15 aşamada bu yüklerin ne şekilde etkitileceği ise Çizelge 4.11'de gösterilmektedir [56].

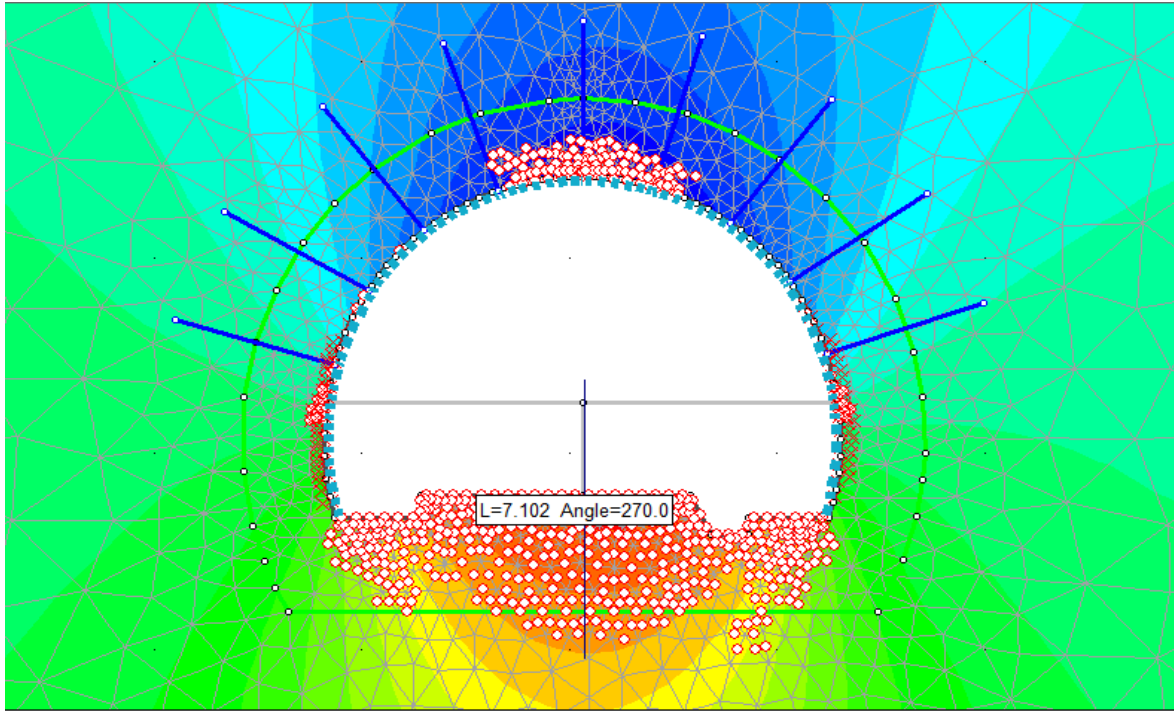
Çizelge 4.11. Bölüm numaralarına göre R_f değerleri

Bölüm No.	Üst yarı R_f	Sol alt yarı R_f	Sağ alt yarı R_f
1	0	0	0
2	1	1	1
3	0.8	1	1
4	0.4/0.6	1	1
5	0	1	1
6	0	1	1
7	0	1	1
8	0	0.8	1
9	0	0.3/0.5	1
10	0	0	1
11	0	0	1
12	0	0	0.8
13	0	0	0.3/0.5
14	0	0	0
15	0	0	0

Rahatlama faktörü olan R_f yerine elastisite modülü değeri azaltılarak kazının oluşturduğu gerilme değişimi sonlu elemanlar metoduna yansıtılabilmektedir. Elastisite modülüne bağlı kazı aşaması sayısının belirlenmesi içinde öncelikle plastik bölge belirlenmektedir. Plastik bölgenin belirlenmesi için Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'dan yararlanılmaktadır. Bu şekiller yardımıyla plastik bölge yarıçapı (R_p) 7,1 metre ve tünel yarıçapıda (R_t) 4,0 metre olarak okunmaktadır. Çizelge 4.10 yardımıyla kapanma/maksimum kapanma değerini bulabilmek amacıyla tünel yüzünden ilerlenen mesafenin tünel yarıçapına oranı ve plastik bölge yarıçapının tünel yarıçapına oranı bulunmaktadır. Bu işlemler sonucunda tünel yüzünden ilerlenen mesafenin tünel yarıçapına oranı 0,50 ve plastik bölge yarıçapının tünel yarıçapına oranı 1,79 olarak bulunmaktadır. Böylece Çizelge 4.10 yardımıyla kapanma/maksimum kapanma değeri 0,58 olarak okunmaktadır.



Şekil 4.25. Elastisite modülünün azaltılarak oluşan plastik bölgenin genel görünüşü



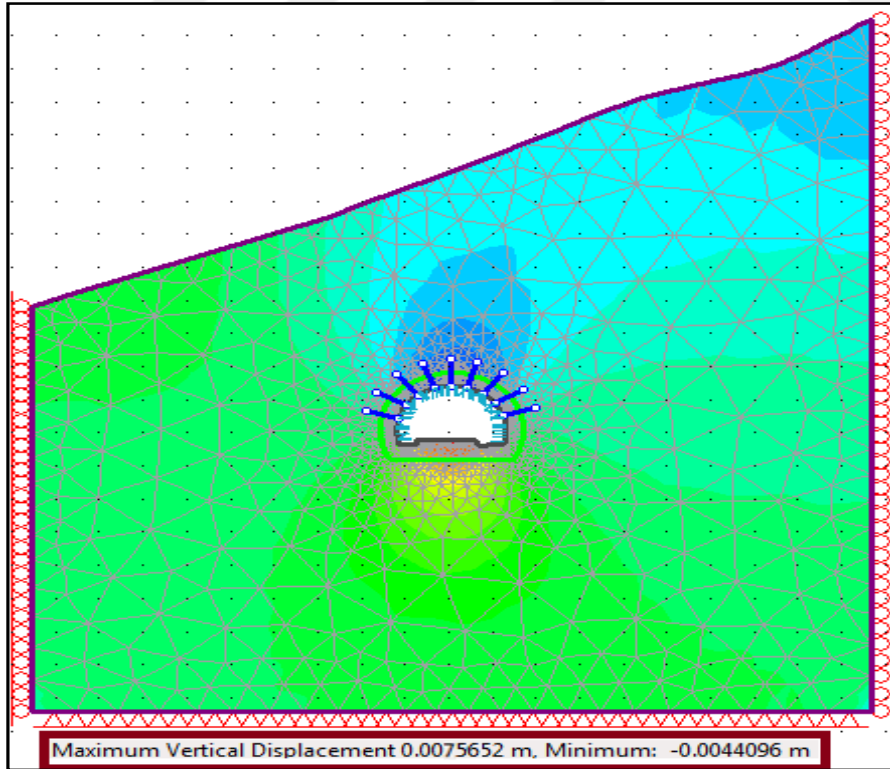
Şekil 4.26. Elastisite modülünün azaltılarak oluşan plastik bölgenin yakın görünüşü

Tünel arının son destekten 2 m ileriye ulaşması durumunda maksimum deformasyonun 0,002 m olarak bulunduğu Şekil 4.27’de gösterilmektedir.

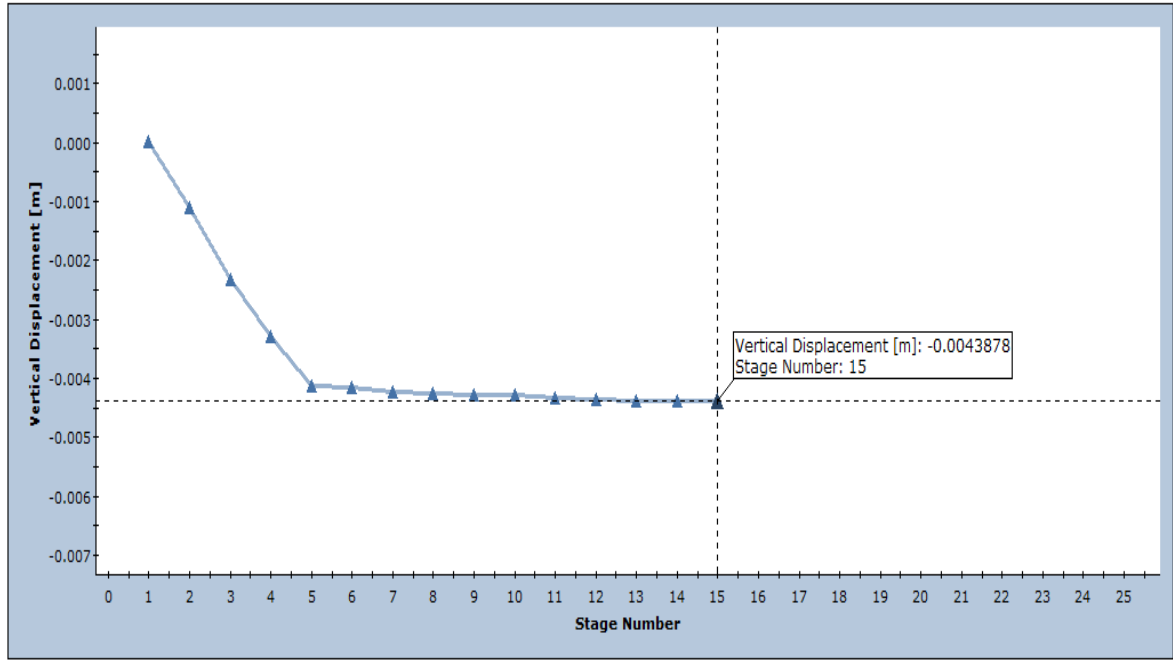
Tünel arının son destekleri 2 metre ileriye ulaştığındaki tünel radyal deformasyonun değeri “Eş. 4.15” ile bulunur ve tünel tavanı radyal deformasyonun bulunan bu değere ulaştığı kazı aşamasında destek sisteminin uygulanması gerekmektedir.

“Eş. 4.15” de değerler yerine yazıldığında radyal deformasyon değeri $4,38 \times 10^{-3}$ m olarak bulunmaktadır. Tünelin radyal deformasyonunun bulunan bu değere hangi aşamada ulaştığını görmek amacıyla Şekil 4.28’den yararlanılmaktadır. Bu grafik yardımıyla da hesaplanan değer 15.kazı aşamasında olduğu görülmektedir. Bu durumda model de kazı aşamasını en doğru şekilde modellemek amacıyla 15 aşamalı yapılması gerekmektedir.

R_f metodu ile elastisite metodunun azaltılarak yapılan analizlerinde eşit sayıda aşama ile çözümleme yapılması sonucuna ulaşıldığı için bu çalışmada R_f metodu tercih edilmektedir.



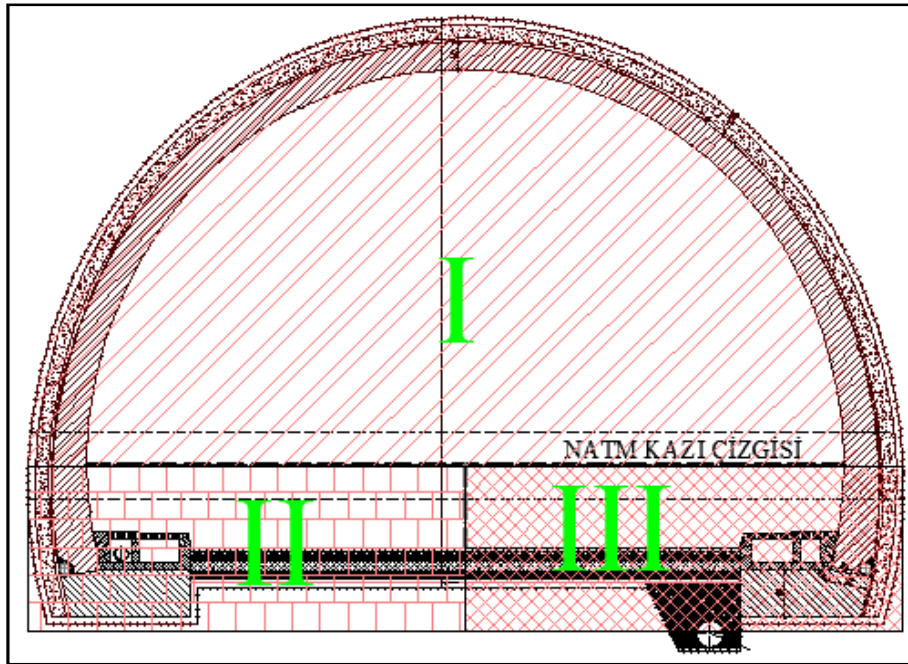
Şekil 4.27. Elastisite modülünün azaltılmasıyla oluşan tünel arının 2 m ileriye ulaştığında düşey yöndeki maksimum deformasyon



Şekil 4.28. Elastisite modülünün azaltılmasıyla oluşan maksimum deformasyon ile kazı aşamasının belirlenmesi

4.7.2. Tünel kazı aşamaları

Sonlu elemanlar metodunda tünel deformasyonu ve gerilmeleri için yapılacak mühendislik hesaplamalarında tünelin yapı modeli için kullanılacak olan kazı yöntemide göz önünde bulundurularak aşamalı bir şekilde oluşturulması gerekmektedir. Topçam tüneli için kazı yöntemi olarak NATM (yeni Avusturya metodu) kullanılmaktadır. Tünelin modellenmesinin 15 aşamalı olark yapılması gerektiği Bölüm 4.7.1’de ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

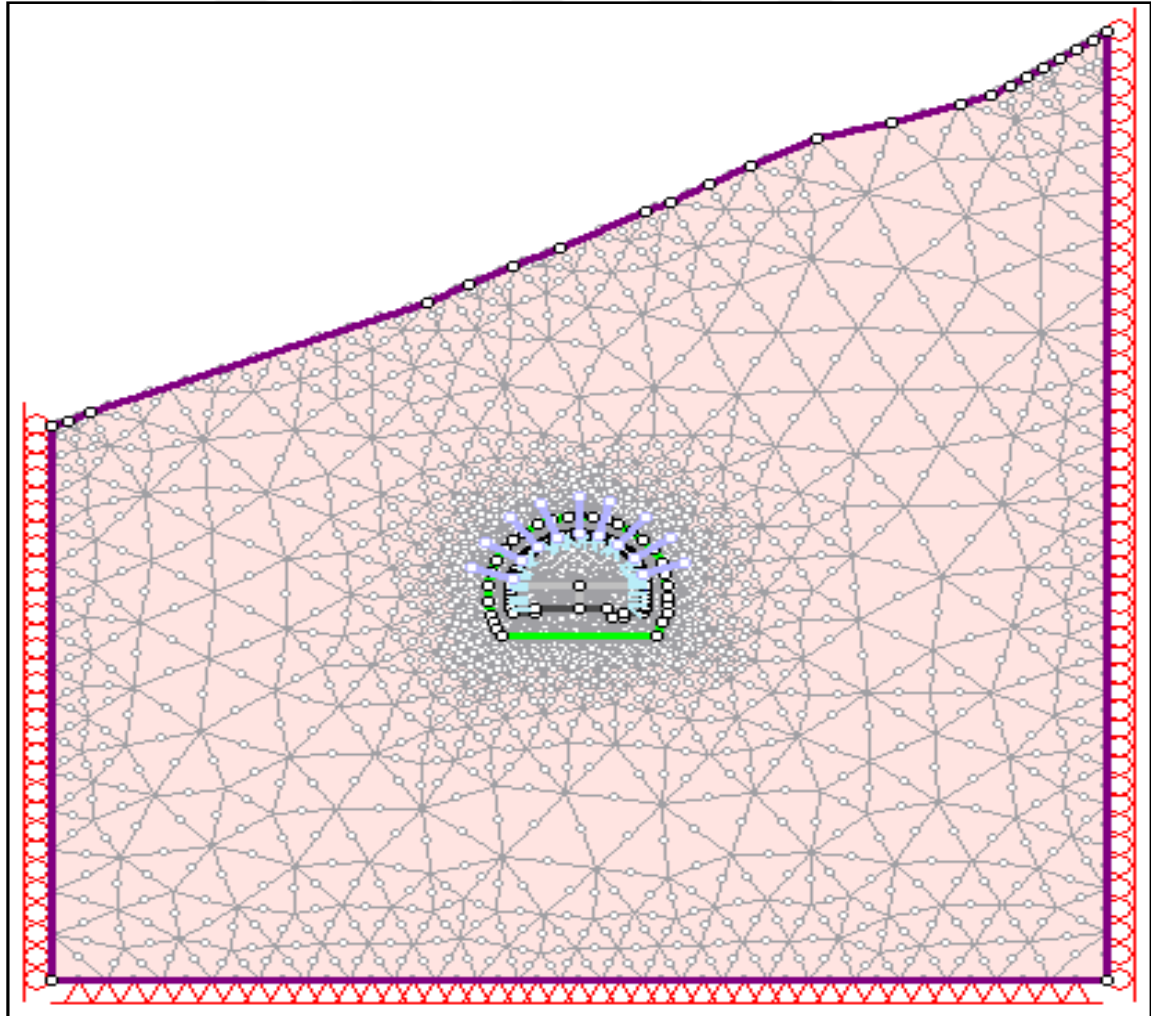


Şekil 4.29. Yeni Avusturya metoduna göre kazı aşamalarının gösterimi

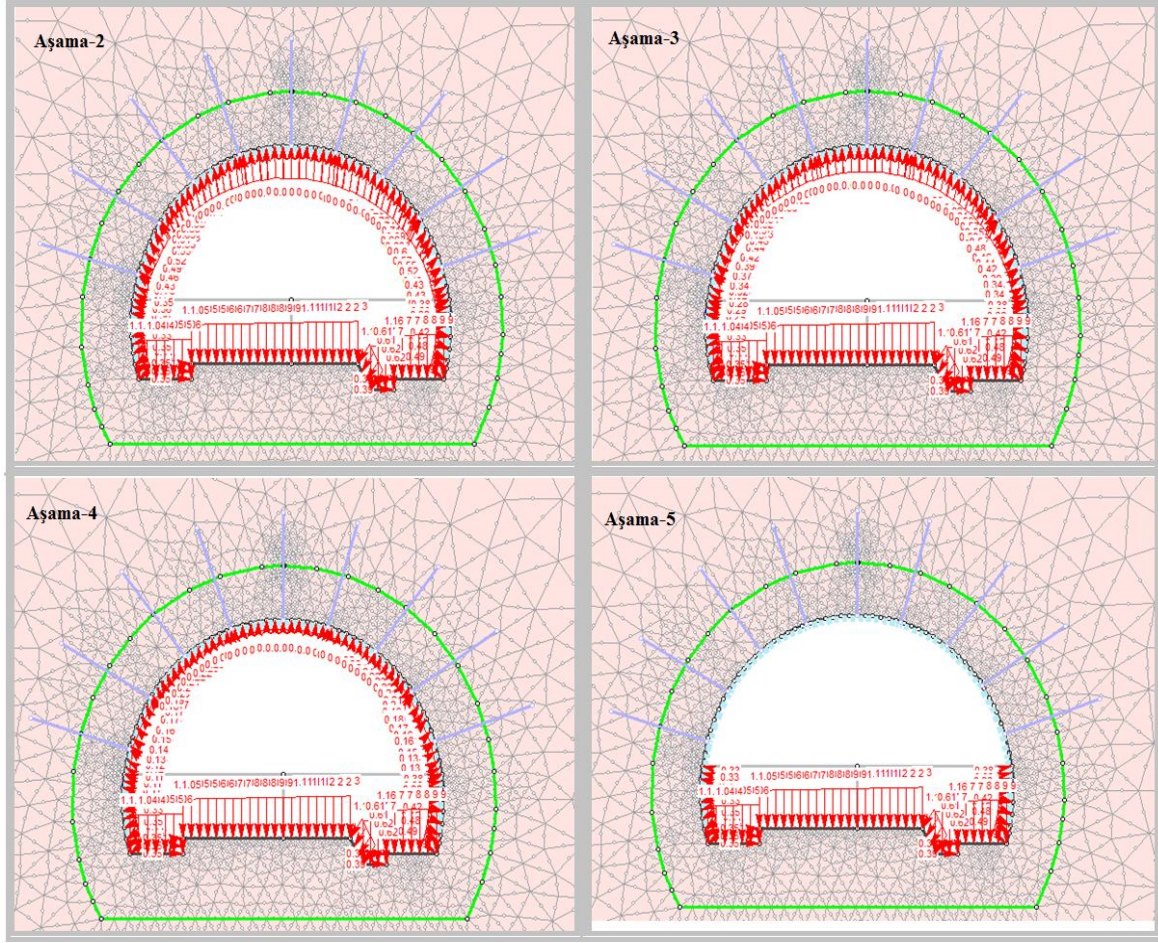
Şekil 4.29’da verilen yeni Avusturya metodu kazı aşamalarına göre tünel 3 aşamada kazılmaktadır. Ancak sonlu elemanlar metoduna kazı aşamalarını en doğru şekilde yansıtmak amacıyla 15 aşamadan oluşan bir kazı aşaması belirlenmektedir. I numaralı kazı aşamasına Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de gösterilen 1-5 numaralı aşamalar denk gelmektedir. II numaralı kazı aşamasına Şekil 4.32-4.35’de gösterilen 6-11 numaralı aşamalara denk gelmektedir. III numaralı kazı aşaması Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de gösterilen 12-15 numaralı aşamaları kapsamaktadır.

Şekil 4.30’da tünel çevresinde bulunan zeminin kazı öncesindeki durumu 1 numaralı aşama olarak gösterilmektedir. Şekil 4.31’de 2, 3, 4 ve 5 numaralı aşamaların gösterimi

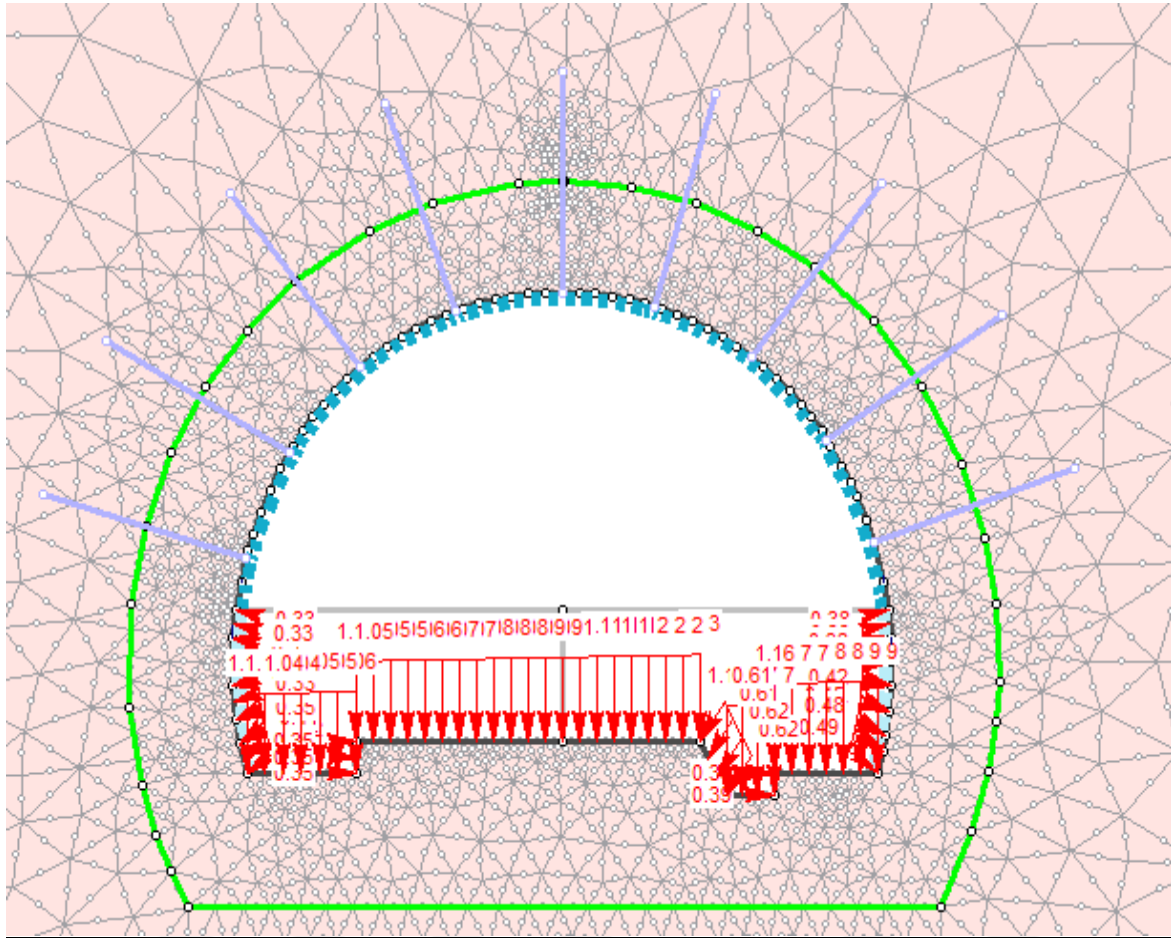
verilmektedir. Bu aşamalar yardımıyla da üst yarıda rahatlama faktörü 1'den 0'a kadar azaltılarak tünele etkitilmektedir. Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'de sırasıyla 6 ve 7 numaralı aşamaları göstermektedir. Bu aşamalarda üst yarıya ait destek elemanın yüklenmesi ve üst yarıya ait kaya civatasının yüklenmesi durumu verilmektedir. Sol yarıya ait kazının tanımlanması amacıyla rahatlama faktörü 1'den 0'a kadar azaltılmaktadır. Bu azaltma durumu 8, 9 ve 10 numaralı aşamalarda yapılmış olup Şekil 4.34'de gösterilmektedir. Sol alt yarıya ait destek elemanın yüklenmesi de aşama 11'de yapılmış olup Şekil 4.35'te bu durum verilmektedir. Sağ alt yarıya ait kazının tanımlanması içinde rahatlama faktörü 1'den 0'a kadar azaltılarak yapılmaktadır. Bu tanımlama 12, 13 ve 14 aşamalarda oluşturulmaktadır ve Şekil 4.36'da bu durum gösterilmektedir. Sağ alt yarıya ait destek elemanının yüklenmesi de 15 numaralı aşamada verilmektedir. Bu durumda Şekil 4.37'de anlatılmaktadır.



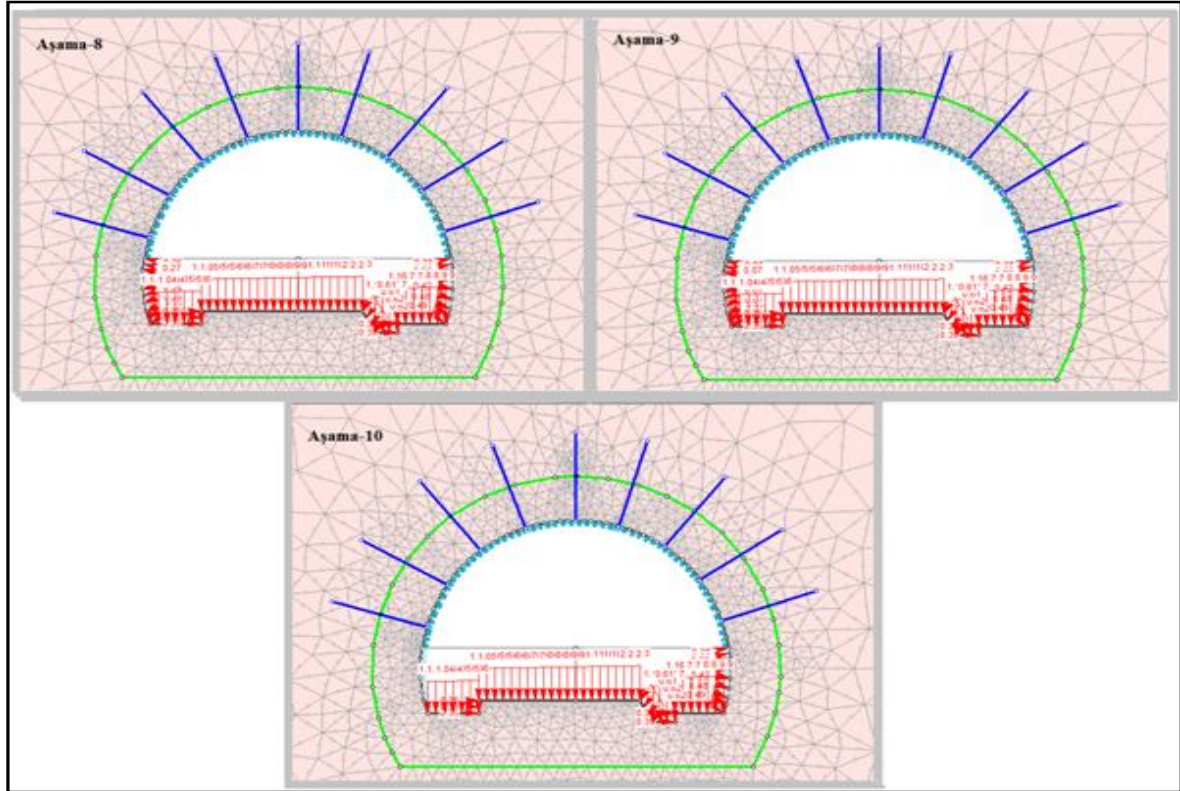
Şekil 4.30. Kazı aşaması öncesi durum



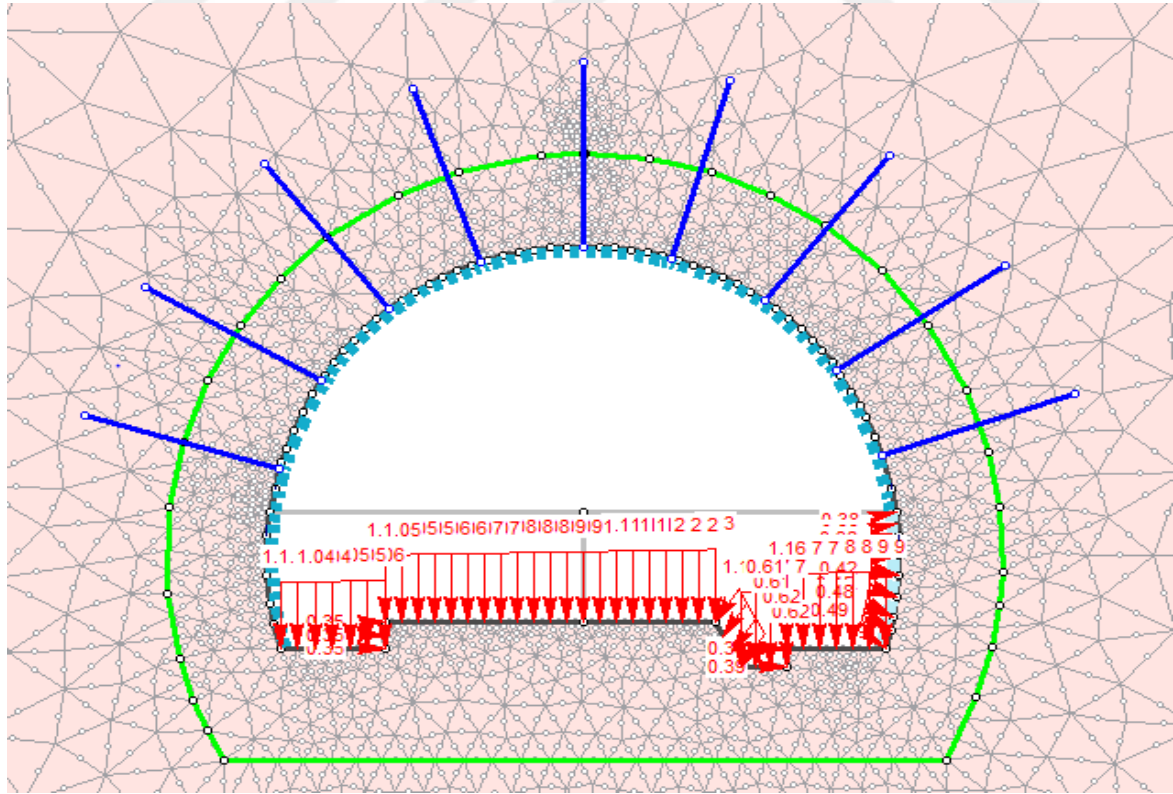
Şekil 4.31. Aşama-2-3-4-5 üst yarının kazılması



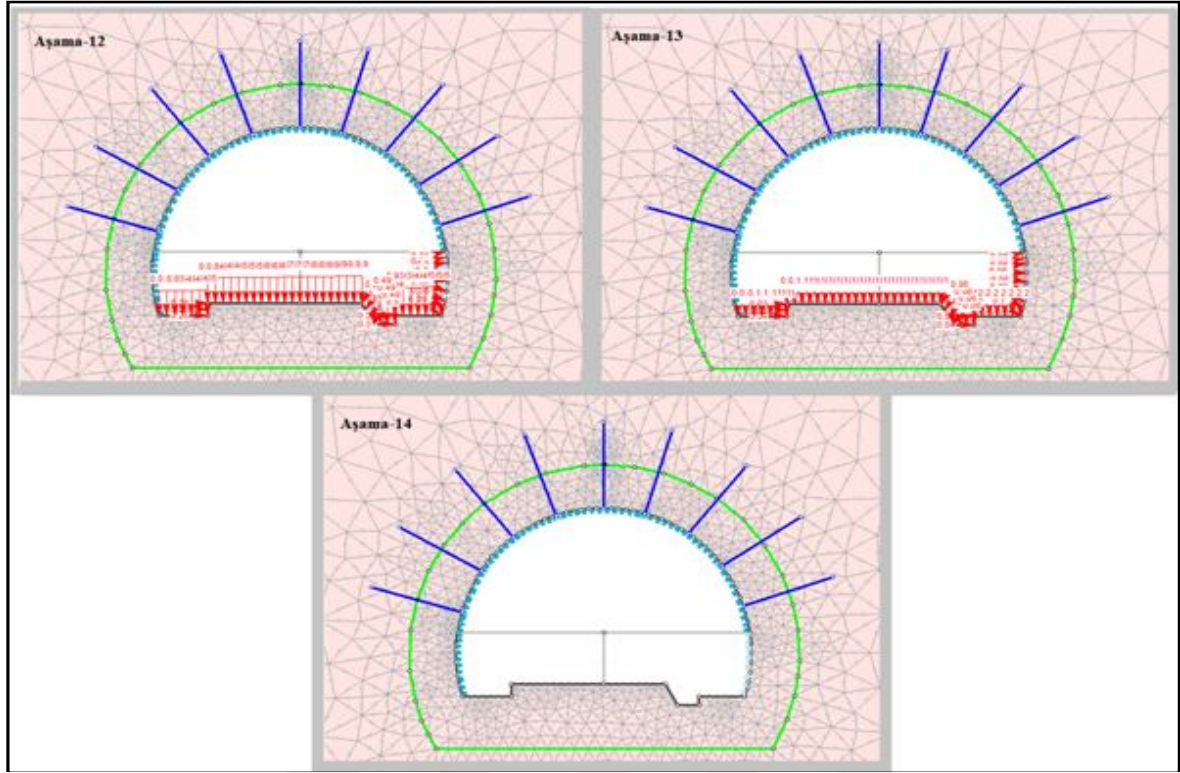
Şekil 4.32. Aşama-6 üst yarının destek elemanlarının yüklenmesi



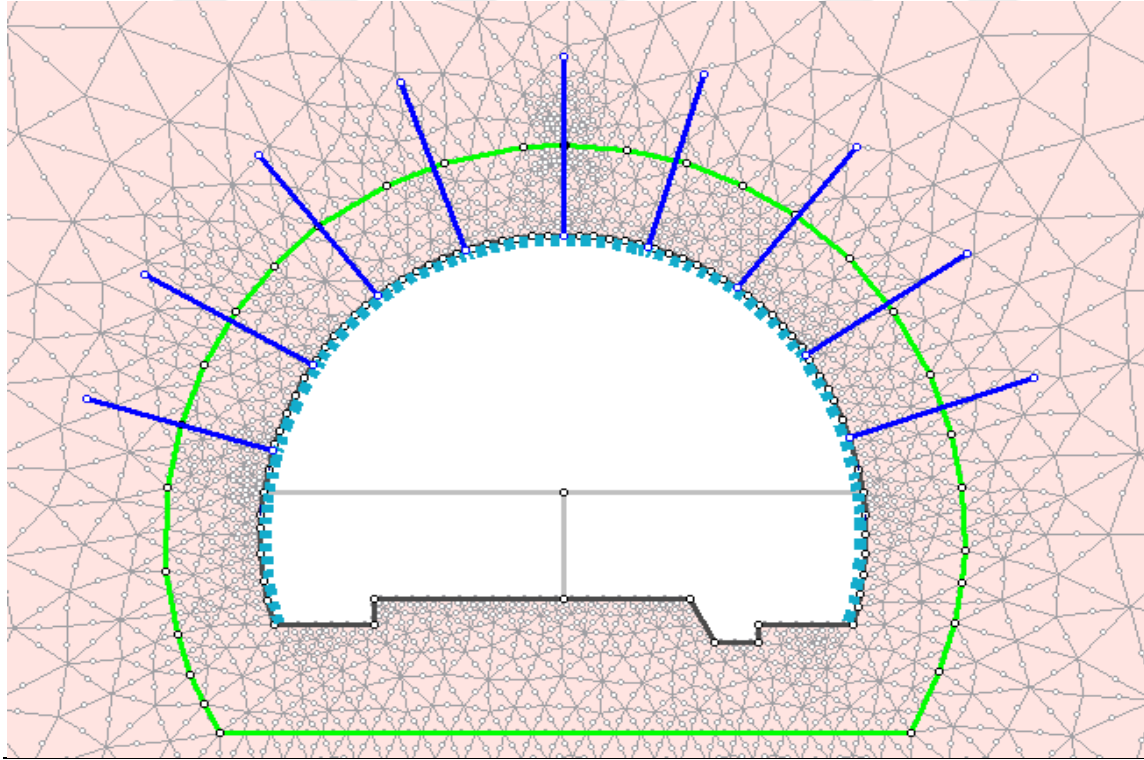
Şekil 4.34. Aşama-8-9-10 sol alt yarının kazılması



Şekil 4.35. Aşama-11 sol alt yarının destek elemanlarının yüklenmesi



Şekil 4.36. Aşama-12-13-14 sağ alt yarının kazılması



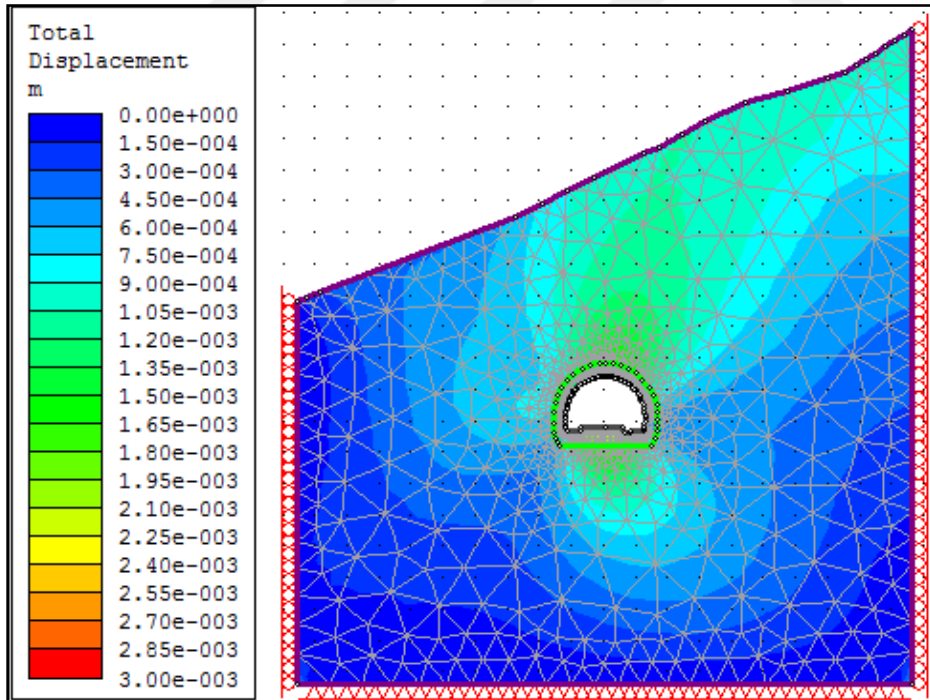
Şekil 4.37. Aşama-11 sağ alt yarının destek elemanlarının yüklenmesi

4.7.3. Tünel destek sisteminin belirlenmesi

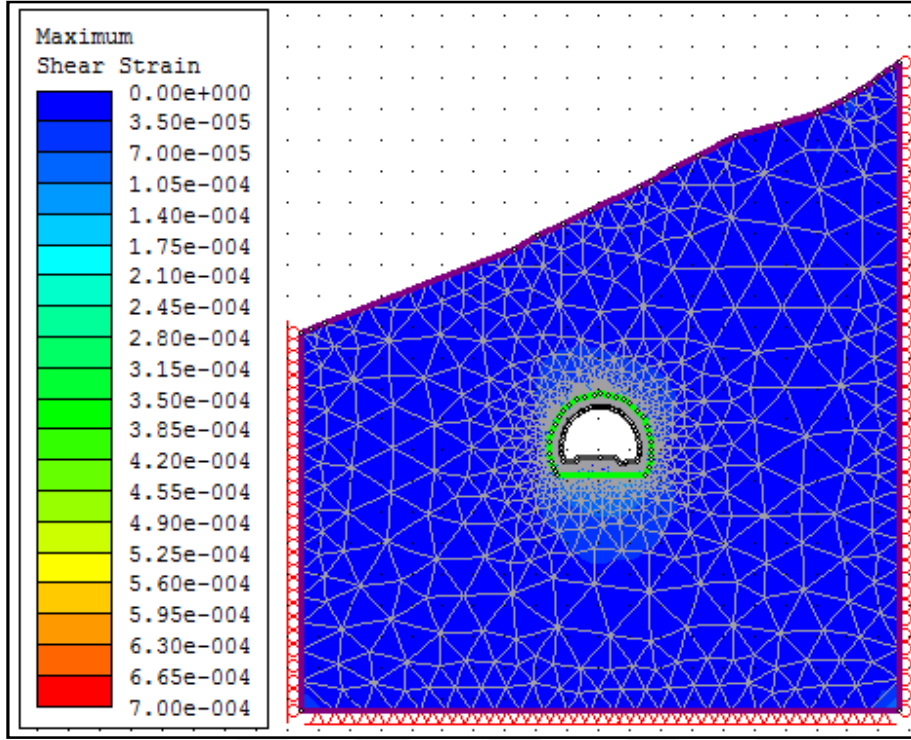
Jeolojik araştırmalar ve Bölüm 2’deki hesaplamalar sonucunda T1 tüneli için farklı destek tipleri bulunmaktadır. Kullanılan destek elemanlarının hesaplamaları bu bölümde detaylı olarak anlatılmaktadır.

Tünel destek hesabı için Vlachopoulos-Diederichs methodu kullanılmaktadır. Bu method ile destek hesabında öncelikle destek elemanları konulmadan plastik bölgeler belirlenmektedir.

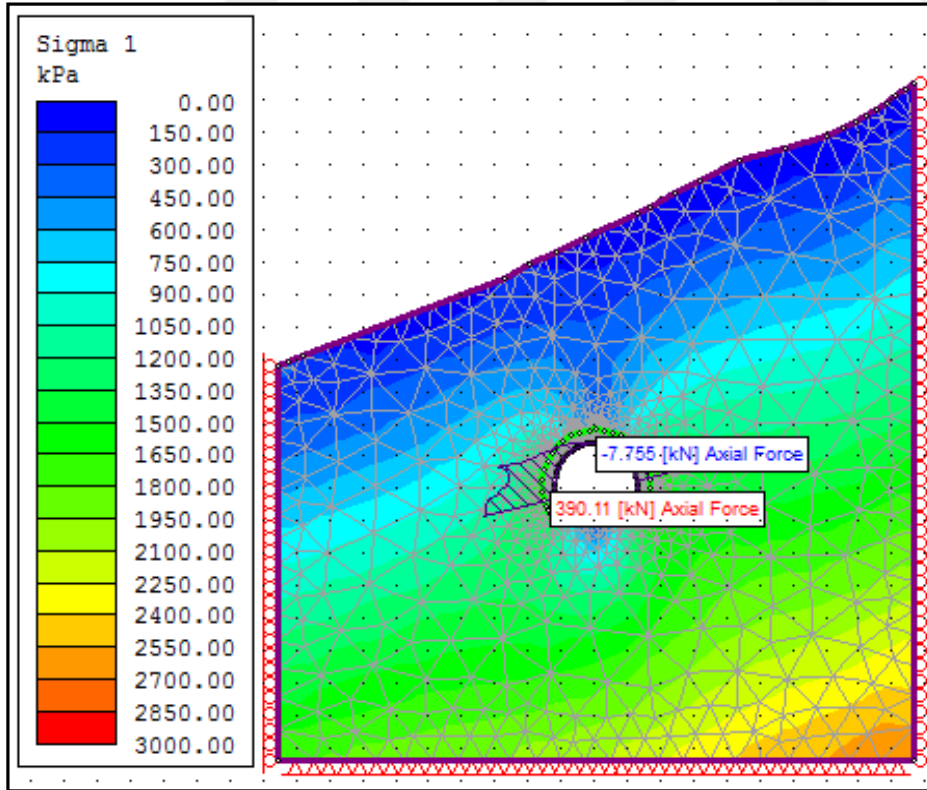
Destek eleman analizinde kullanılmak üzere 15 numaralı aşamadaki toplam deformasyona Şekil 4.38 yardımıyla ulaşılmaktadır. Benzer şekilde gerekli olan maksimum kayma birim deformasyonu, tünel kaplamasında oluşan aksenal kuvvetler, eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri ve de bulonlara etki eden aksenal kuvvetler Şekil 4.39-47’da verilmektedir. Ayrıca bu değerler Çizelge 4.12’de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



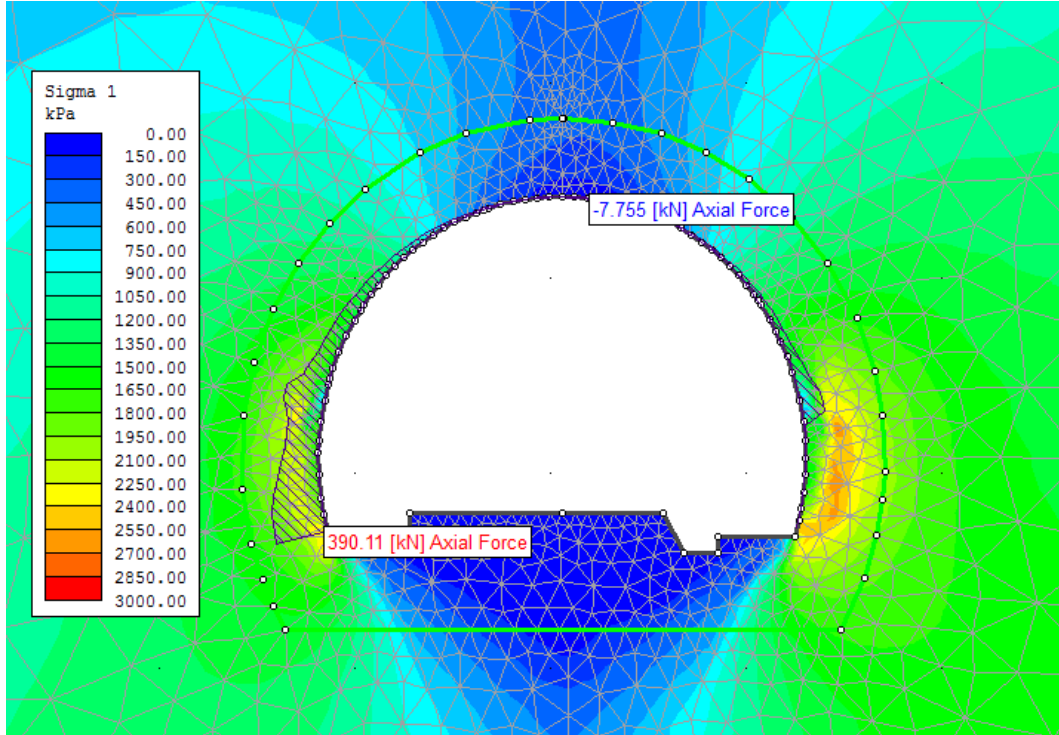
Şekil 4.38. 15 numaralı kazı aşamasında oluşan toplam deformasyonu



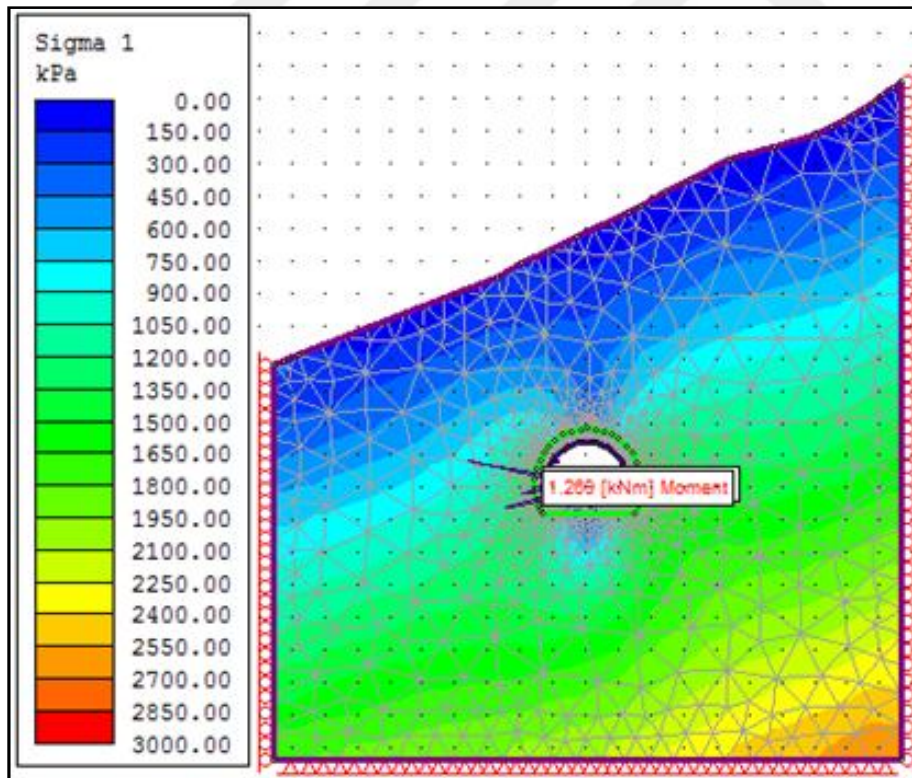
Şekil 4.39. 15 numaralı kazı aşamasında oluşan maksimum kayma birim deformasyonu



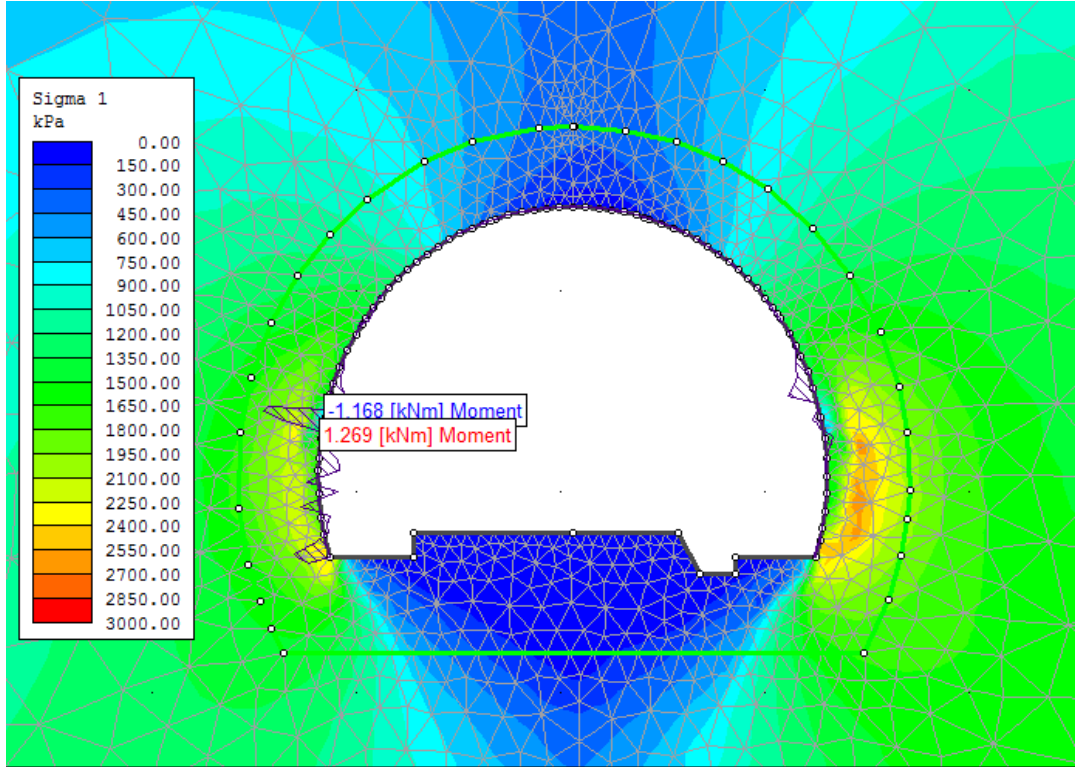
Şekil 4.40. Tünel kaplamasında oluşan eksenel kuvvetlerin genel görünüşü



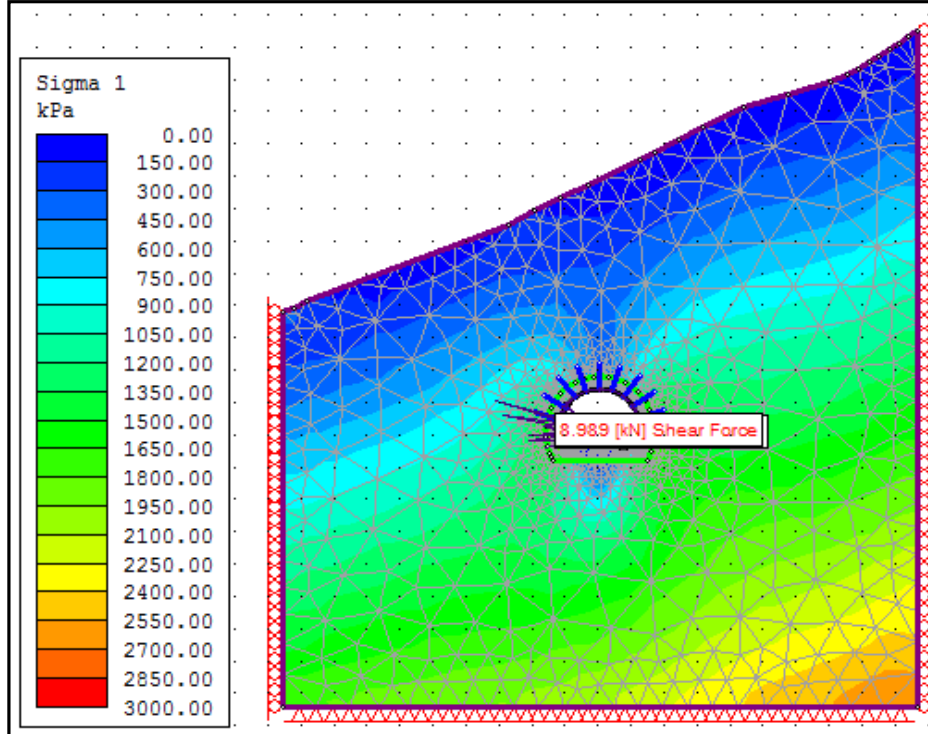
Şekil 4.41. Tünel kaplamasında oluşan eksenel kuvvetlerin yakın görünüşü



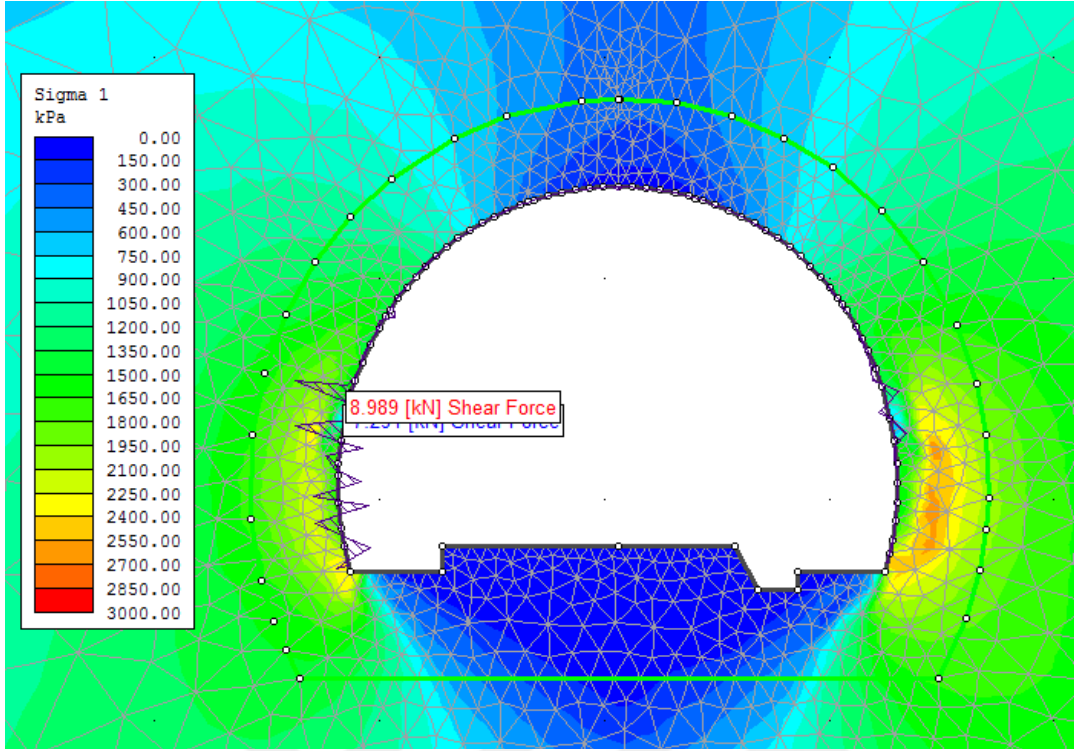
Şekil 4.42. Tünel kaplamasında oluşan eğilme momentlerinin genel görünüşü



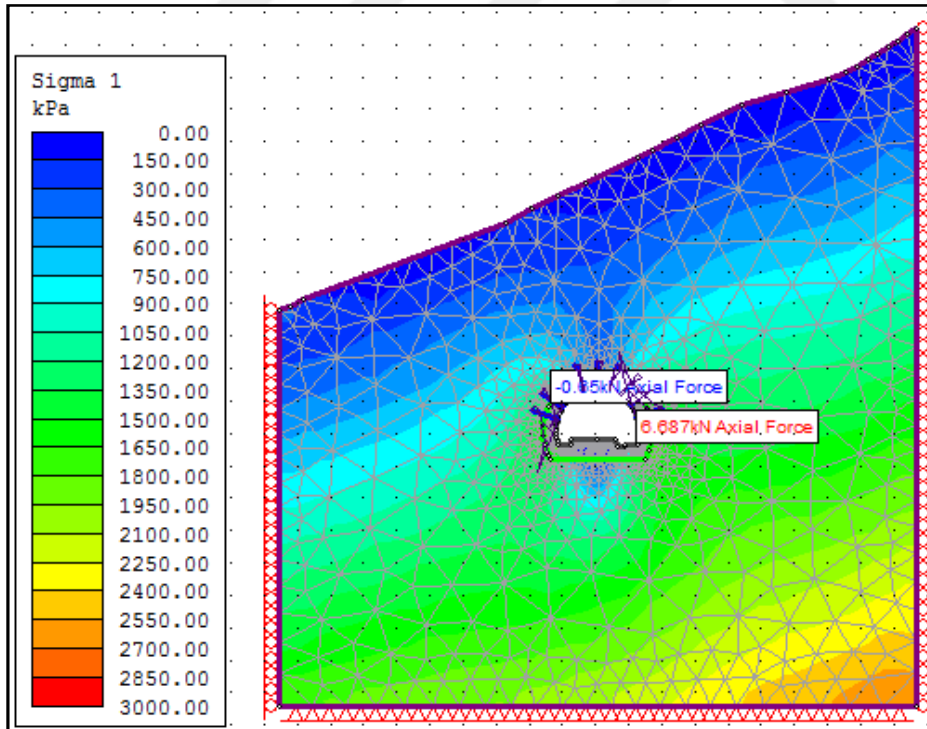
Şekil 4.43. Tünel kaplamasında oluşan eğilme momentlerinin yakın görünüşü



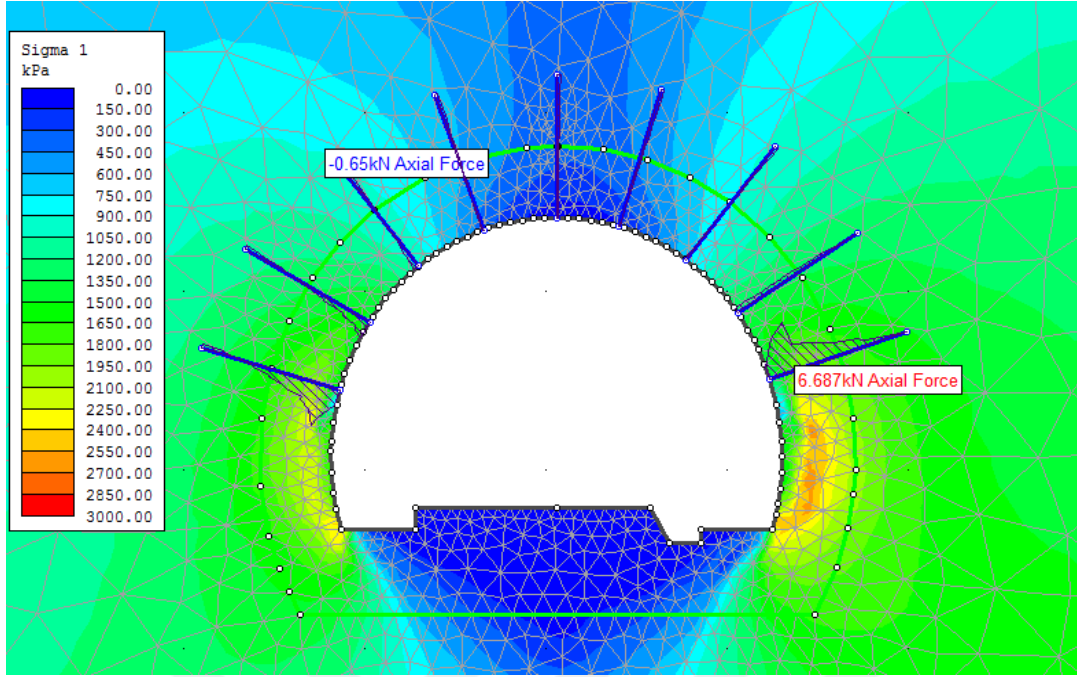
Şekil 4.44. Tünel kaplamasında oluşan kesme kuvvetlerinin genel görünüşü



Şekil 4.45. Tünel kaplamasında oluşan kesme kuvvetlerinin yakın görünüşü



Şekil 4.46. Bulonlara etki eden eksenel kuvvetlerin genel görünüşü

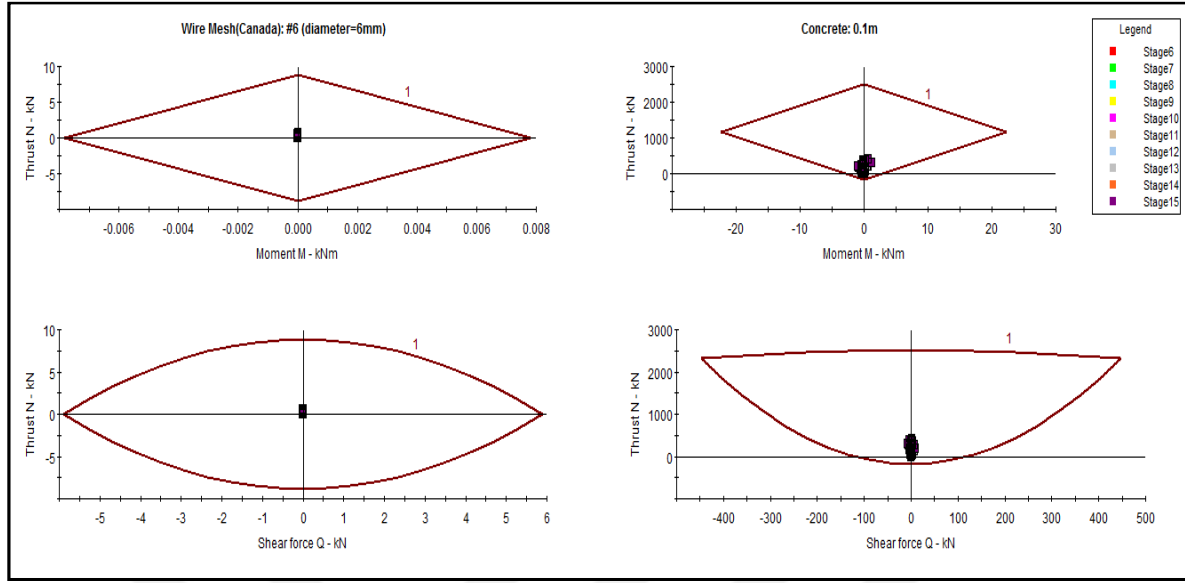


Şekil 4.47. Bulonlara etki eden eksenel kuvvetlerin yakın görünüşü

Çizelge 4.12. Tünel çevresine ve bulonlara etki eden kuvvetler

Destek elemanı			
Tünel Kaplaması	Normal Kuvvetler (kN / m)	En yüksek	390,11
		En düşük	-7,750
	Eğilme Momentleri (kNm / m)	En yüksek	1.269
		En düşük	-1.168
	Kesme Kuvvetleri (kN / m)	En yüksek	8.898
		En düşük	-7.291
Bulon	Normal Kuvvetler (kN / m)	En yüksek	6.680
		En düşük	-0.650

Şekil 4.48'deki grafikler de üst kaplamanın moment ve kesme diyagramları verilmektedir. Bu grafiklerde sınır değerlerinin oluşturduğu alanlar kaplamada bulunan beton ve donatı elemanlarının en yüksek kapasitesini ifade etmektedir. Bu sınır değer alanlarının dışında çıkan kesme ve moment değerleri ise taşıma kapasitesinin üstünde bir yüke maruz kaldığını ifade etmektedir. Şekil 4.48'de modelde bulunan kaplamada ki hem beton hem de donatı elemanının belirtilen sınır alanları içinde moment ve kesme kuvvetine maruz kaldığı için kapasitesinin yeterli olduğu görülmektedir. Hesaplamalarda kullanılan kaplama ve destek elemanı ile ilgili detaylı bilgiler Çizelge 4.13'de verilmektedir.



Şekil 4.48. Tünel destekleme kapasiteleri

Çizelge 4.13. T1 tüneline 35+192 km için uygulanan destekleme elemanları

Destekleme Tipi / KTŞ Sınıfı		B1
Püskürtme Beton	Tip	C20 / 25
	Kalınlık	10 cm
Çelik Hasır		Var
Kaya Bulonu	Tip	SN
	Çap	28 mm
	Adet	8-9 şaşırtmalı
	Boy	4 m
	Aralık (radyal)	1,6 m
Round Boyu	Üst Yarı	2,00 – 3,00 m
	Alt Yarı	4,00 m
Invert		Taban Kemersiz
Deformasyon Toleransı		2 cm
Yapım Toleransı		10 cm
Üst Yarı- Alt Yarı Takip Mesafesi		50-70 cm

4.7.4. Sükûnetteki yanal toprak basıncı katsayısı (K_0) değeri etkilenmesi

Sükûnetteki yanal toprak basıncı katsayısı (K_0) değeri başlangıçta zeminden gelen etkiyi ifade eder. Yani zeminde herhangi bir deformasyon olmadığı doğal durumdur. Zeminin sükûnetteki yanal toprak basıncı etkisi modele σ_1 , σ_3 ve σ_z olarak etkitilmektedir. “Eş. 4.16” ve “Eş. 4.17” yardımıyla σ_1 , σ_3 ve σ_z değerleri hesaplanmaktadır.

$$\sigma_1 = \gamma \cdot H \quad (4.16)$$

Burada γ : Zemin birim hacim ağırlığı ve H: Tünelin derinliğidir.

Bölüm 4.4’deki bilgilerde verilen zemin birim hacim ağırlığı ve tünel derinliği sırasıyla 27 kN/m³ ve 32,35 m’dir. “Eş. 4.16” da yardımıyla da σ_1 değeri 0,87 MPa olarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma_3 = \sigma_z = \sigma_1 \cdot \nu \quad (4.17)$$

Burada ν : Possion oranıdır.

Bölüm 4.4’de bahsedildiği gibi possion oranı da 0,25 olduğu için σ_3 ($=\sigma_z$) değeri 0,29 MPa olarak hesaplanmaktadır.

σ_1 ve σ_3 değerleri hesaplanması “Eş. 4.16” ve “Eş. 4.17” kullanılarak yapılmaktadır. Sükûnetteki yanal zemin basınç katsayısının hesaplanması içinde “Eş. 4.18” veya “Eş. 4.19” kullanılmaktadır. Bu iki eşitlikten aynı sonuç elde edilmektedir. Bu eşitliklerden modele girilecek olan K_0 değeri 0,333 olarak bulunmaktadır ve modele etkitilmesi Şekil 4.49’da gösterilmektedir.

$$K_0 = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \quad (4.18)$$

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (4.19)$$

Field Stress Properties

Field Stress Type: Gravity

☒ Use actual ground surface ☐ Use effective stress ratio ☐ Use variable stress ratio

Ground Surface Elevation (m): 171.673

Unit Weight of Overburden (MN/m³): 0.027

Total Stress Ratio (horiz/vert in plane): 0.333

Total Stress Ratio (horiz/vert out-of-plane): 0.333

Locked-in horizontal stress (in plane) (MPa, Comp. +): 0

Locked-in horizontal stress (out-of-plane) (MPa, Comp. +): 0

OK Cancel Statistics... Advanced >>

Şekil 4.49. Zemin gerilmelerinin modele etkitilmesi

4.8. Çıktılar

Bölüm 4.5’de bahsedilen her bir kombinasyon için bir deformasyon hesabı yapılmaktadır. Deformasyon değerleri tünelin yerinde ölçümü de yapılan 5 nokta için oluşturulmaktadır. Bu 5 noktanın yerleri Şekil 3.7’de verilmektedir ve verilen numaralar ile okuma değerleri üzerinde ki numaralar birbirini karşılamaktadır.

Sonlu elemanlar metodu için kullanılan Phase²v.8 programına ait hesaplama sonuçlarının oluşturulan modellerden ilk 30 tanesinin 5 noktaya ait deformasyon sonuçları Çizelge 4.14’de verilmektedir. Bu çizelgedeki sonuçlar Çizelge 4.7’deki veriler kullanılarak elde edilmektedir. Örneğin Model No.1’deki sonuçlar Çizelge 4.7’deki hesap numarası 1 olarak verilen girdi parametrelerinin modele tanımlanması sonucunda elde edilmiş deformasyon sonuçlarıdır. Çizelge 4.14 incelendiği zaman 1 ve 2 numaralı modeller arasındaki parametre değişkeni elastisite modülüdür. Elastisite modülü arttığı zaman düşey deformasyonların azaldığı görülmektedir. 1 ve 3 numaralı modeller karşılaştırıldığında kohezyon değerlerinin farklı olduğu görülmektedir. Kohezyon değerinin değişimine rağmen ne yatay ne de düşey deformasyonlar arasında bir fark olmadığı görülmektedir. 3 ve 11 numaralı modeller karşılaştırıldığında rahatlama faktörünün değiştiği görülmektedir. Rahatlama faktörünün değişimi hem düşey hem de yatay deformasyonda değişime sebep olmaktadır. Artan rahatlama faktörüyle beraber yatay deformasyon artarken düşey deformasyon ise azalmaktadır. 2 ve 6 numaralı modeller karşılaştırıldığında içsel sürtünme açısının değiştiği görülmektedir. Artan içsel sürtünme açısı ile beraber deformasyon değerlerinin değişmediği görülmektedir. Bu yapılan çalışmada Elastisite

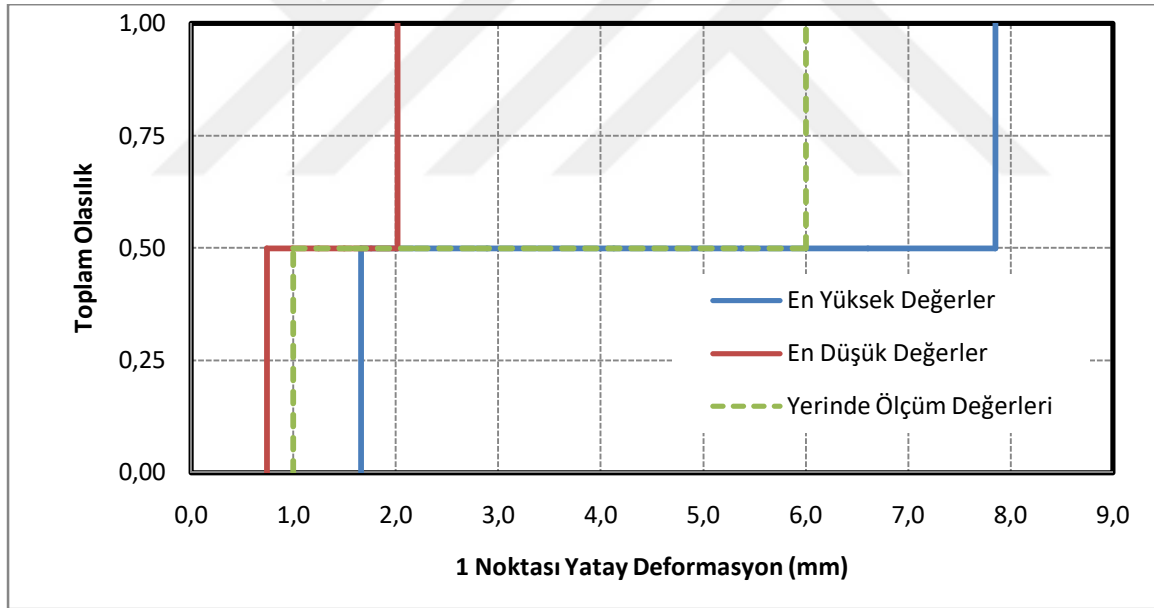
modülü ve rahatlama faktörünün değişmesi deformasyon değişimini etkilemekteyken, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri deformasyona etki etmemektedir.

Çizelge 4.14. Belirlenen noktalara ait deformasyon sonuçları

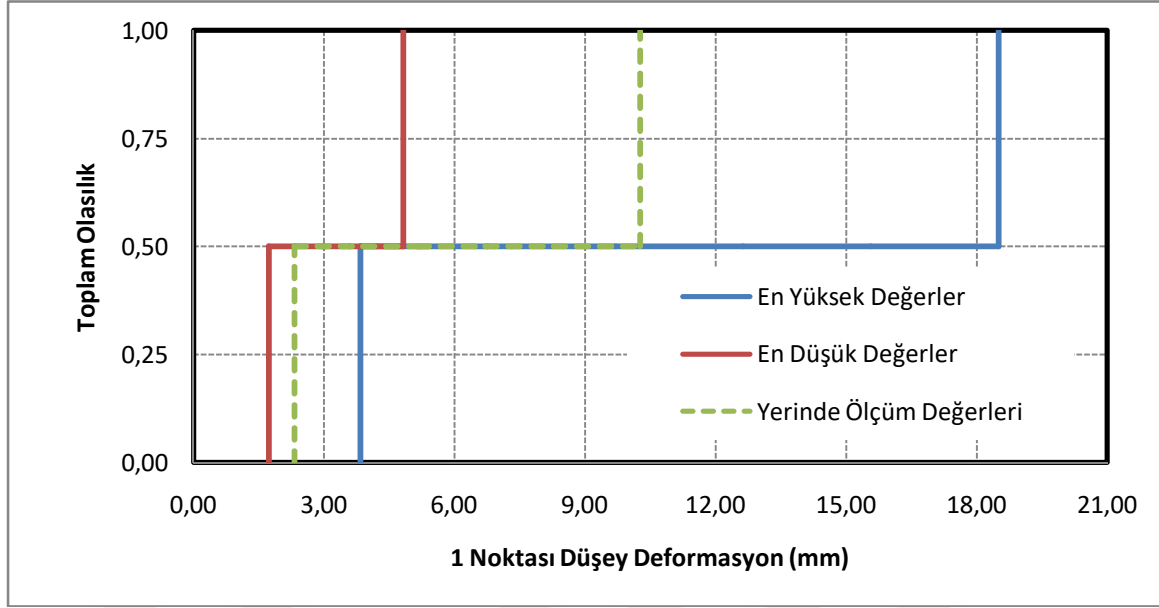
Model No.	1 Noktası		2 Noktası		3 Noktası		4 Noktası		5 Noktası	
	Yatay	Düşey	Yatay	Düşey	Yatay	Düşey	Yatay	Düşey	Yatay	Düşey
1	7.75	18.50	5.53	3.98	9.68	8.00	5.81	1.49	9.00	3.64
2	2.00	4.82	1.33	1.00	2.51	2.03	1.42	0.30	2.32	0.90
3	7.75	18.50	5.53	3.98	9.68	8.00	5.81	1.49	9.00	3.64
4	2.00	4.82	1.33	1.00	2.51	2.03	1.42	0.30	2.32	0.90
5	7.75	18.50	5.53	3.98	9.68	8.00	5.81	1.49	9.00	3.64
6	2.00	4.82	1.33	1.00	2.51	2.03	1.42	0.30	2.32	0.90
7	7.75	18.50	5.53	3.98	9.68	8.00	5.81	1.49	9.00	3.64
8	2.00	4.82	1.33	1.00	2.51	2.03	1.42	0.30	2.32	0.90
9	7.76	18.40	5.58	3.92	9.45	7.86	5.83	1.44	8.94	3.79
10	2.00	4.79	1.35	1.00	2.44	1.98	1.43	0.29	2.29	0.95
11	7.76	18.40	5.58	3.92	9.45	7.86	5.83	1.44	8.94	3.79
12	2.00	4.79	1.35	1.00	2.44	1.98	1.43	0.29	2.29	0.95
13	7.76	18.40	5.58	3.92	9.45	7.86	5.83	1.44	8.94	3.79
14	2.00	4.79	1.35	1.00	2.44	1.98	1.43	0.29	2.29	0.95
15	7.76	18.40	5.58	3.92	9.45	7.86	5.83	1.44	8.94	3.79
16	2.00	4.79	1.35	1.00	2.44	1.98	1.43	0.29	2.29	0.95
17	1.66	3.97	1.00	0.84	2.00	1.65	1.18	0.24	1.90	0.76
18	0.74	1.79	0.42	0.40	0.90	0.70	0.51	0.10	0.85	0.34
19	1.66	3.97	1.00	0.84	2.00	1.65	1.18	0.24	1.90	0.76
20	0.74	1.79	0.42	0.40	0.90	0.70	0.51	0.10	0.85	0.34
21	1.66	3.97	1.00	0.84	2.00	1.65	1.18	0.24	1.90	0.76
22	0.74	1.79	0.42	0.40	0.90	0.70	0.51	0.10	0.85	0.34
23	1.66	3.97	1.00	0.84	2.00	1.65	1.18	0.24	1.90	0.76
24	0.74	1.79	0.42	0.40	0.90	0.70	0.51	0.10	0.85	0.34
25	1.66	3.97	1.10	0.83	2.00	1.60	1.18	0.24	1.90	0.78
26	0.74	1.79	0.44	0.39	0.90	0.70	0.51	0.10	0.85	0.34
27	1.66	3.97	1.10	0.83	2.00	1.60	1.18	0.24	1.90	0.78
28	0.74	1.79	0.44	0.39	0.90	0.70	0.51	0.10	0.85	0.34
29	1.66	3.97	1.10	0.83	2.00	1.60	1.18	0.24	1.90	0.78
30	0.74	1.79	0.44	0.39	0.90	0.70	0.51	0.10	0.85	0.34

4.9. Deformasyon İçin Toplam Olasılık Grafiklerinin Oluşturulması ve Doğrulama

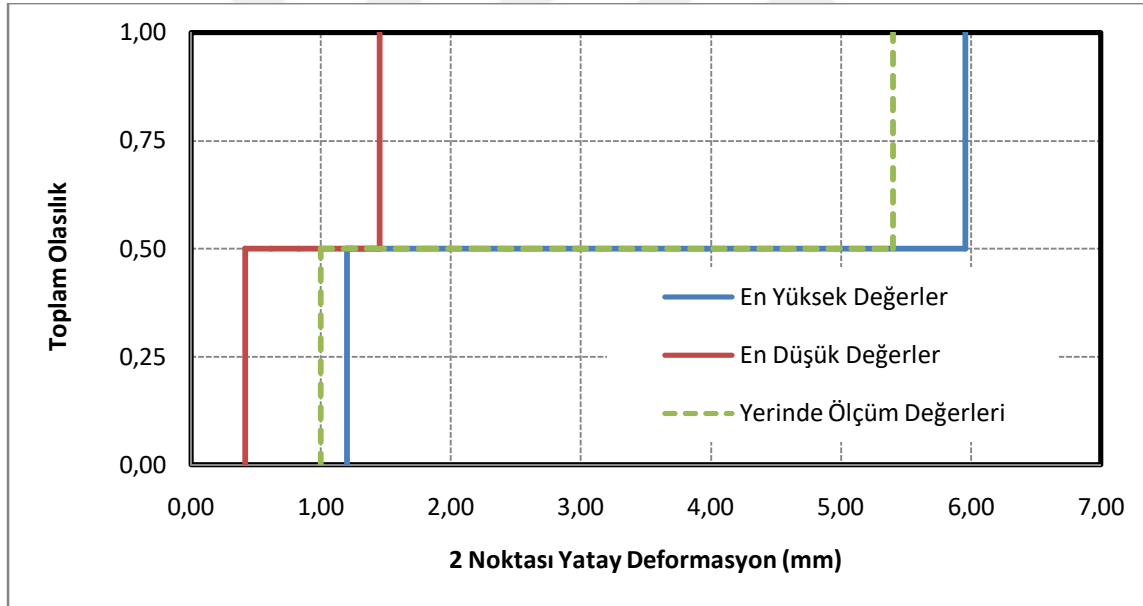
Yapılan bu çalışmada tünelde sahadaki ölçüm sonuçlarının en büyük ve en küçük değerlerden elde ettiğimiz eğrilerin oluşturduğu alanda çıkması beklenmektedir. 1 noktası yatay ve düşey deformasyon değerleri karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de gösterilmektedir. Şekil 4.52’de yatay ve Şekil 4.53’de düşey deformasyonları 2 noktası için verilmektedir. Şekil 4.54 ve Şekil 4.55’de 3 noktası deformasyonları sırasıyla yatay ve düşey durum için oluşturulmaktadır. 4 noktası yatay deformasyonu Şekil 4.56’da ve 4 noktası düşey deformasyonu Şekil 4.57’de gösterilmektedir. Şekil 4.58 ve Şekil 4.59’daki grafikler 5 noktası için oluşturulmuş olup sırasıyla yatay ve düşey deformasyon değerlerini vermektedir. Bu grafikler incelendiği zaman Bölüm 3.3’de verilen deformasyon ölçüm sonuçlarının toplam olasılık yöntemi ile oluşturulmuş en yüksek ve en düşük değer grafiklerinin sınırladığı bölgede kaldığı görülmektedir.



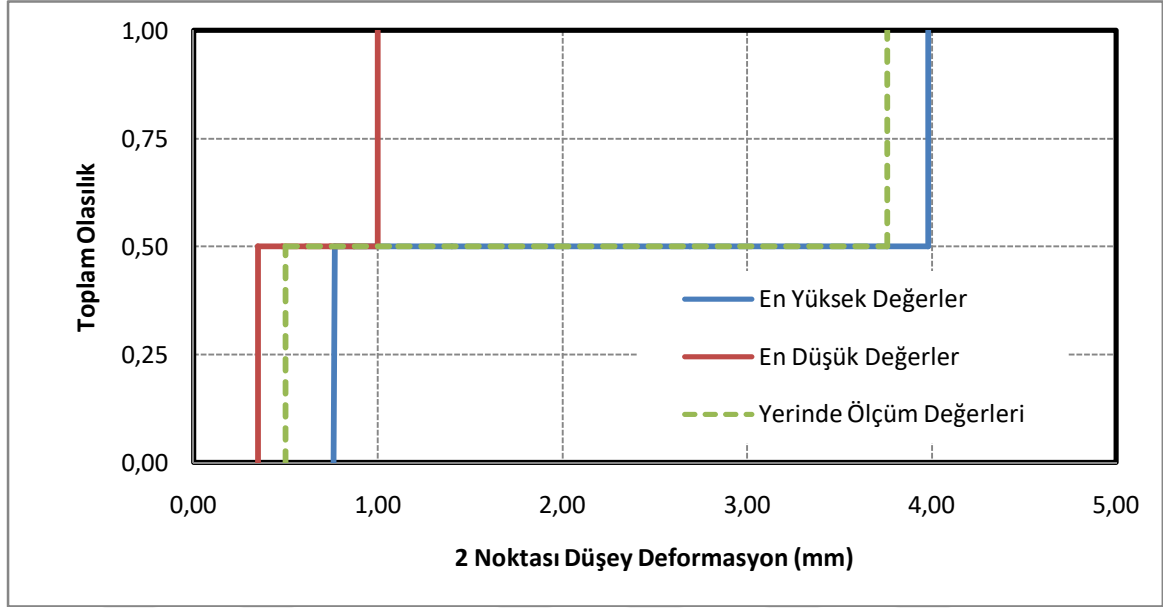
Şekil 4.50. 1 noktası için arazi ve hesaplanan yatay deformasyon değerleri



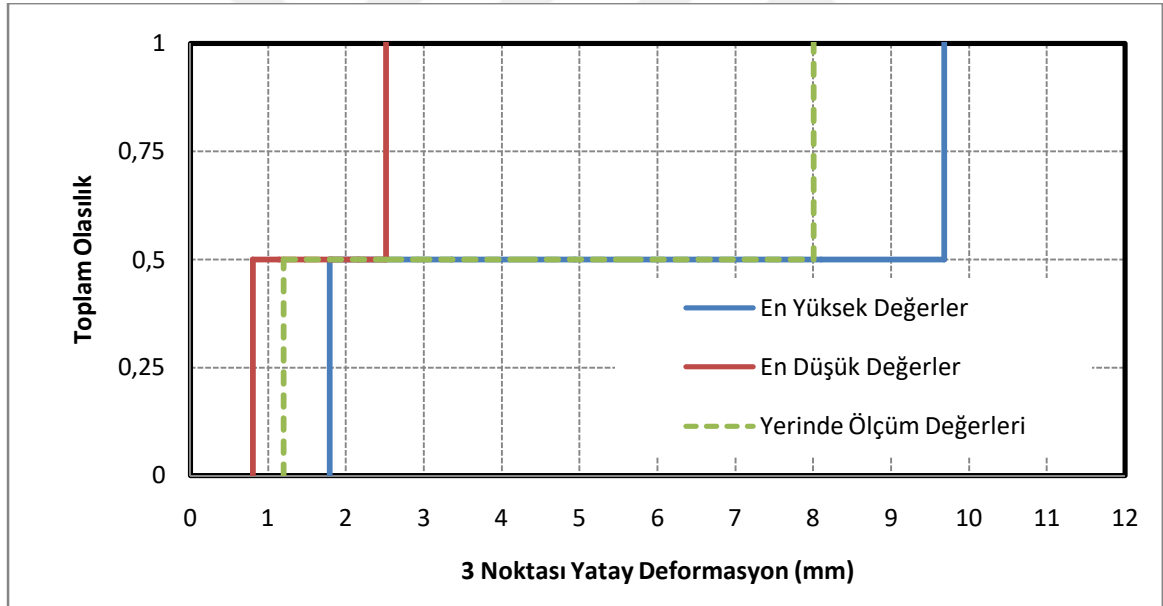
Şekil 4.51. 1 noktası için arazi ve hesaplanan düşey deformasyon değerleri



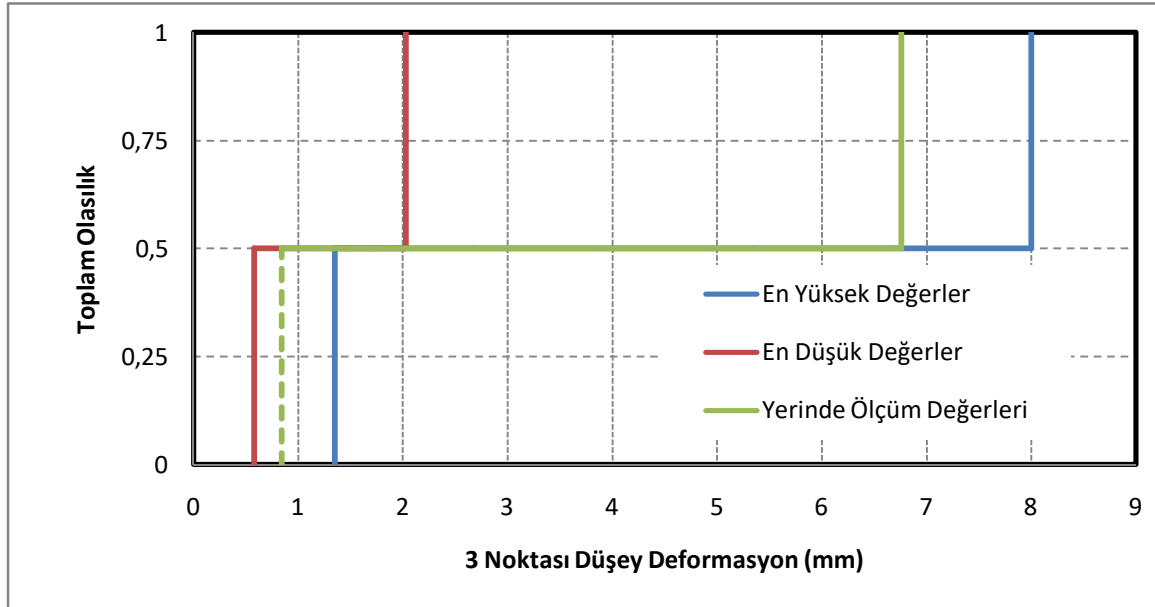
Şekil 4.52. 2 noktası için arazi ve hesaplanan yatay deformasyon değerleri



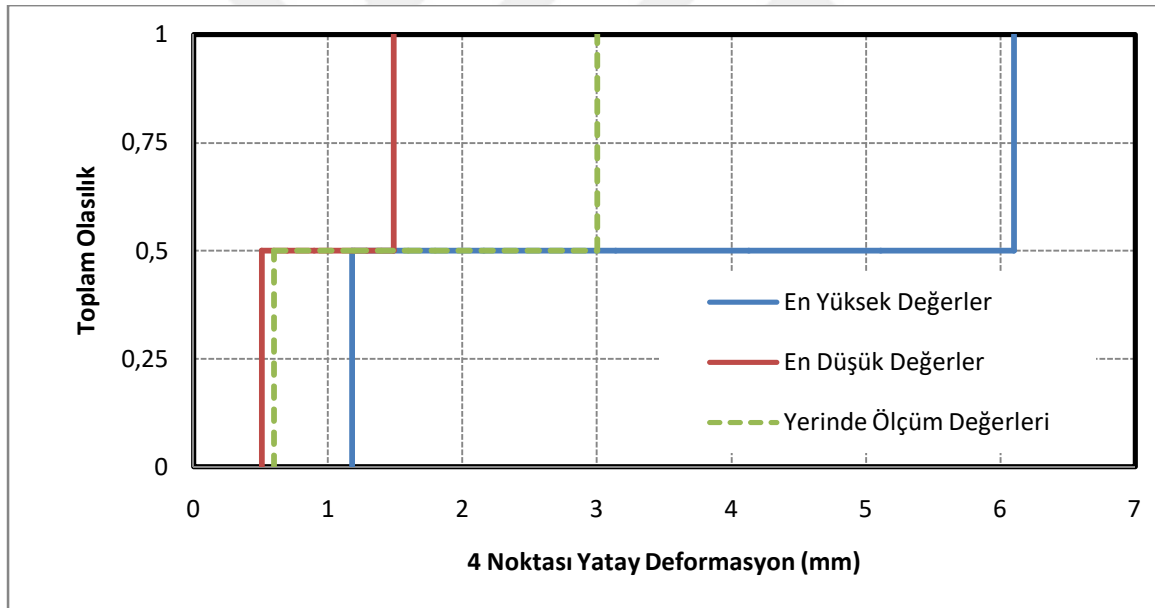
Şekil 4.53. 2 noktası için arazi ve hesaplanan düşey deformasyon değerleri



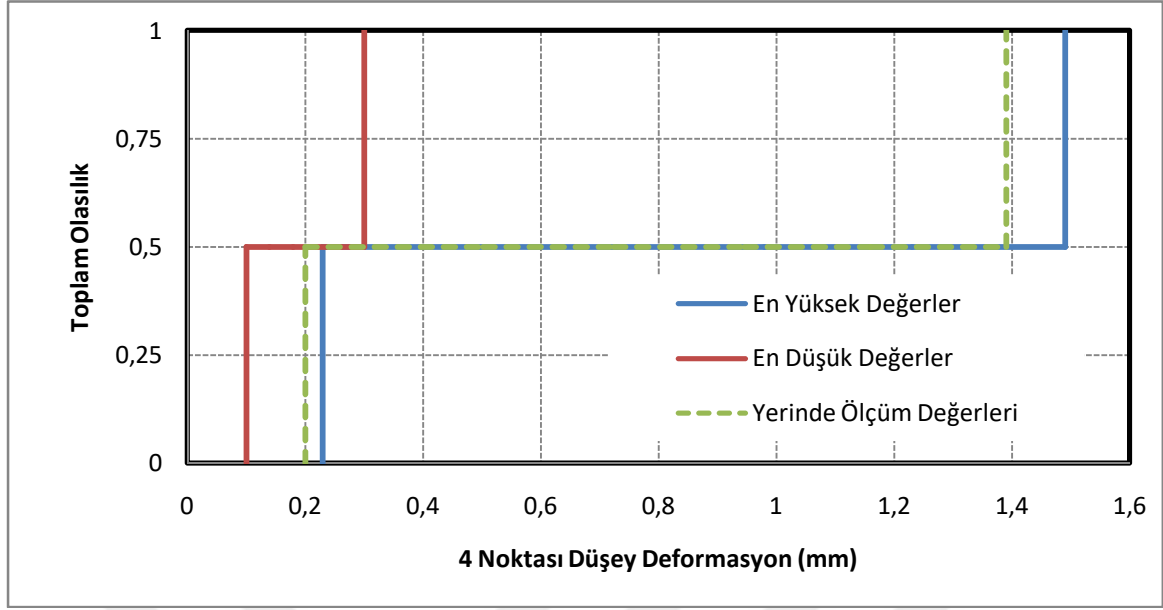
Şekil 4.54. 3 noktası için arazi ve hesaplanan yatay deformasyon değerleri



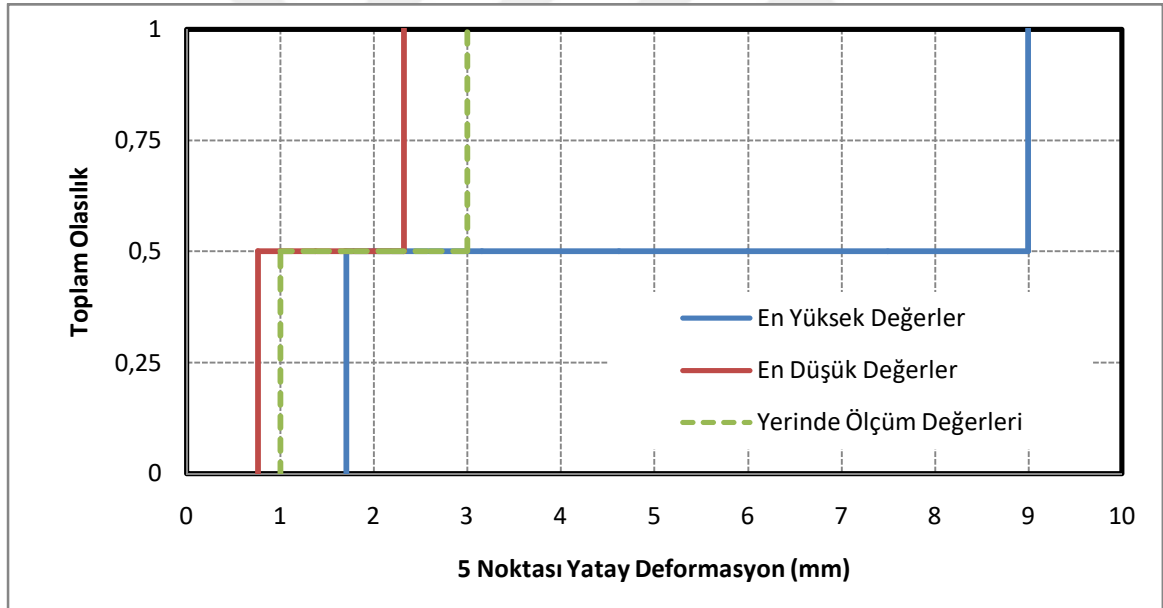
Şekil 4.55. 3 noktası için arazi ve hesaplanan düşey deformasyon değerleri



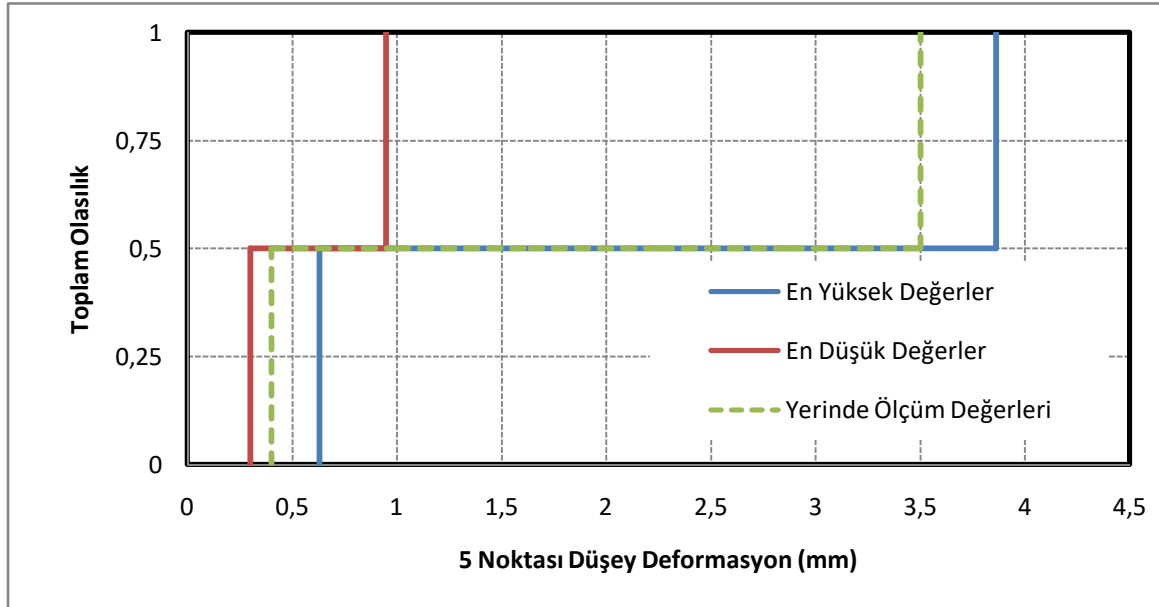
Şekil 4.56. 4 noktası için arazi ve hesaplanan yatay deformasyon değerleri



Şekil 4.57. 4 noktası için arazi ve hesaplanan düşey deformasyon değerleri

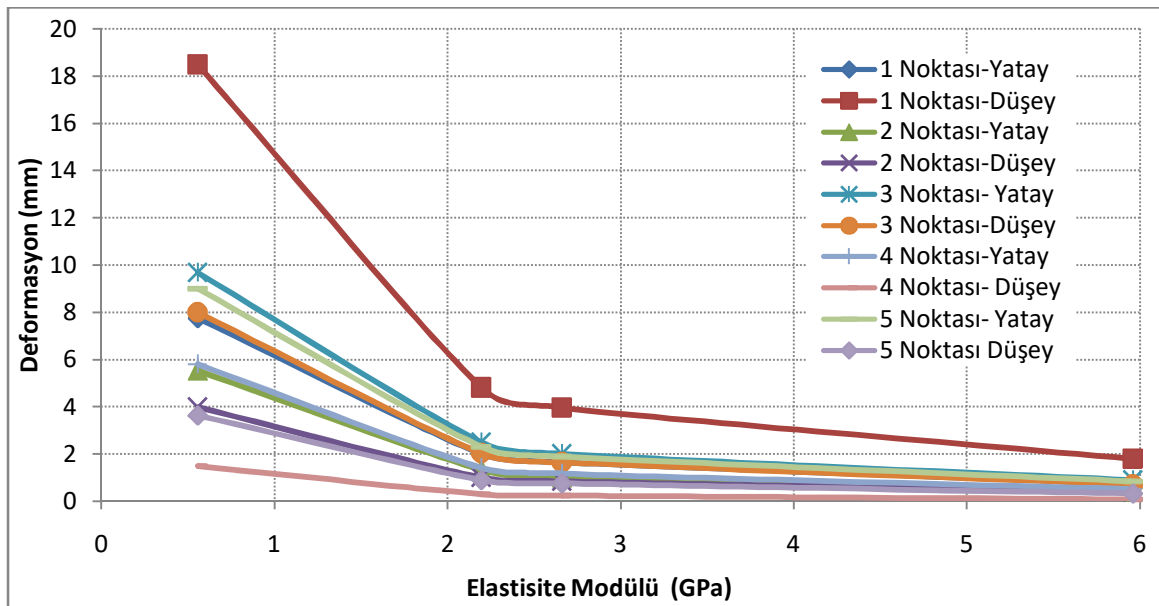


Şekil 4.58. 5 noktası için arazi ve hesaplanan yatay deformasyon değerleri

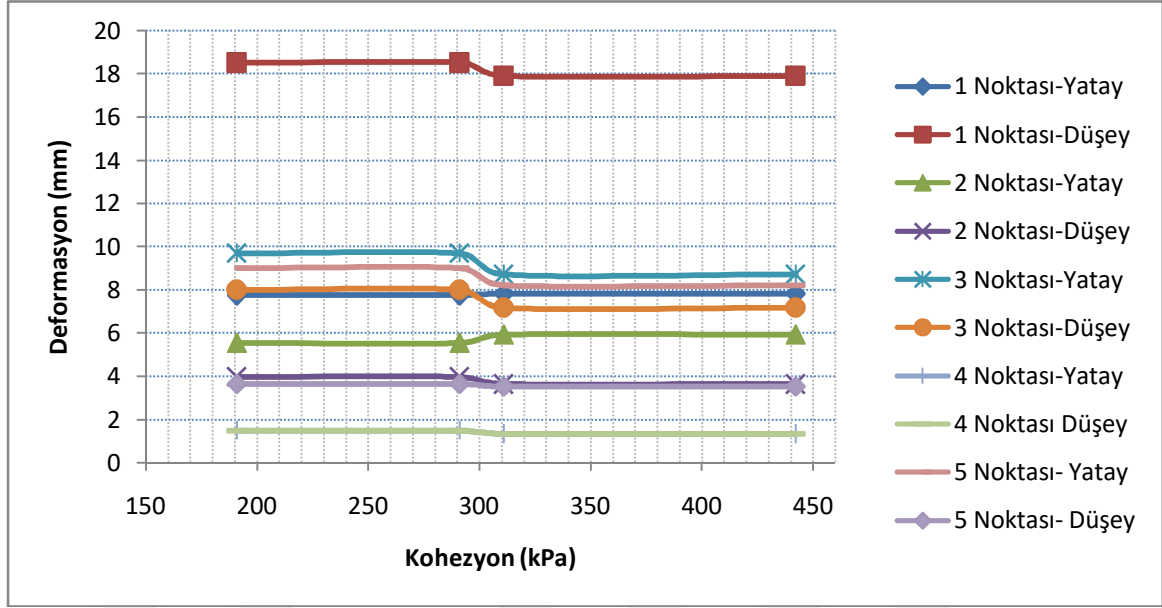


Şekil 4.59. 5 noktası için arazi ve hesaplanan düşey deformasyon değerleri

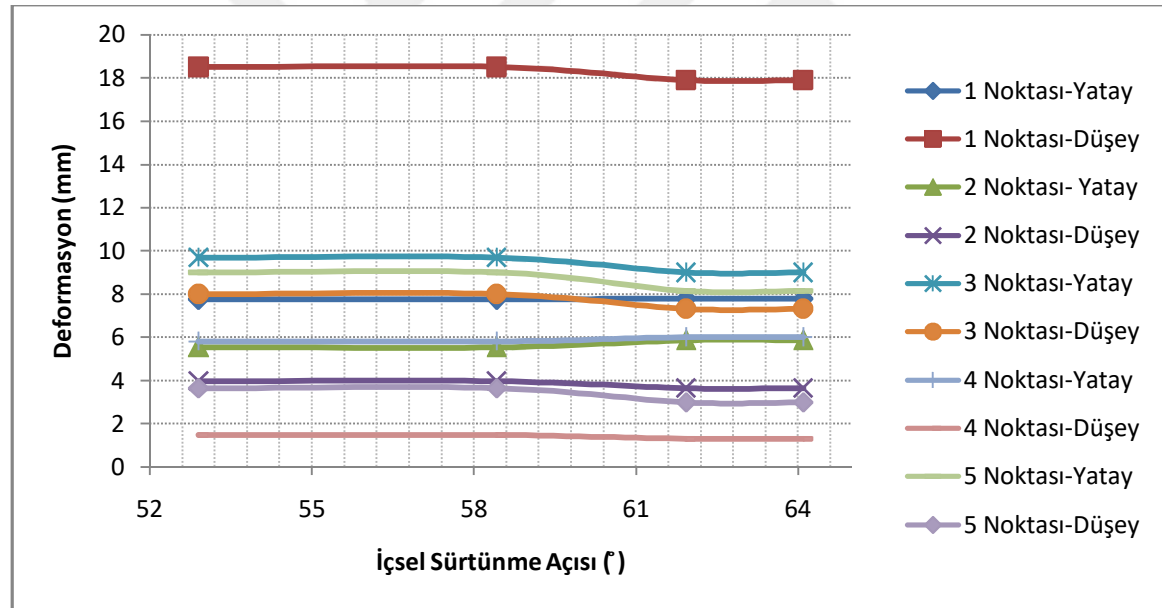
Analiz kombinasyonlarında belirlenmiş olan dört parametreden (E , c , ϕ , R_f) üçü sabit biri ise değişken kabul edilerek hassasiyet analizi çalışması yapılmaktadır. Bu hassasiyet analiz çalışmaları sonucunda da dört adet grafik elde edilmektedir. Şekil 4.60'da Elastisite modülü değişiminin deformasyon üzerindeki etkisi verilmektedir. Benzer şekilde hazırlanmış kohezyon, içsel sürtünme açısı ve $R_{f(Tepe)}$ değişkenlerinin 1, 2, 3, 4 ve 5 No'lu ölçüm noktaları için deformasyon değişimleri sırasıyla Şekil 4.61, Şekil 4.62 ve Şekil 4.63'de sunulmaktadır.



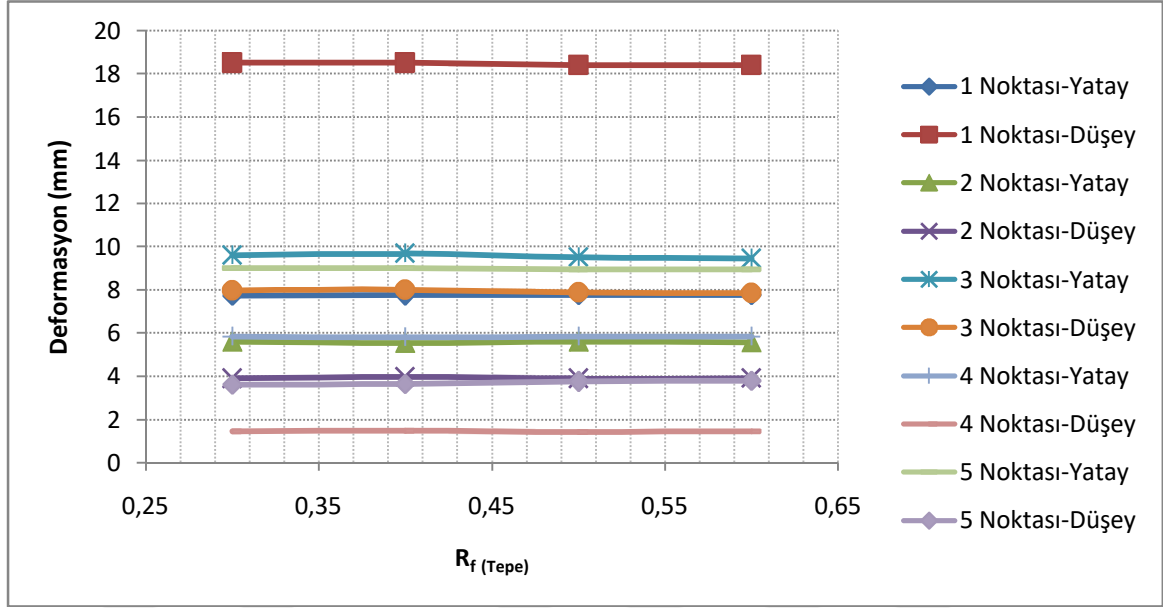
Şekil 4.60. Elastisite modülü değişiminin deformasyon üzerindeki etkisi



Şekil 4.61. Kohezyon değişiminin deformasyon üzerinde etkisi



Şekil 4.62. İçsel sürtünme açısı değişiminin deformasyon üzerinde etkisi



Şekil 4.63. $R_f (Tepe)$ değişiminin deformasyon üzerinde etkisi



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada Ordu ili, Ulubey ilçesine bağlı Topçam tüneli örneği üzerinde rastgele küme sonlu elemanlar metodu uygulanmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılmak üzere elastisite modülü, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve rahatlama faktörünün alt ve üst sınır değerleri σ_{ci} , GSI ve D değerlerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Dört parametrenin hem alt hem de üst değerleri hesaplandığı için toplamda sekiz değer elde edilmiştir. Bu sekiz değer de aralarında Kartezyen çarpım yapılmıştır ve sonuçta 256 adet analiz kombinasyonu oluşturulmuştur. Her bir kombinasyon için de sonlu elemanlar yöntemi ile modeller oluşturularak deformasyon hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen deformasyon sonuçları ve parametrelere bağlı olarak grafikler hazırlanmıştır. Şekil 4.60'da elastisite modülünün değişimine bağlı olarak deformasyon ilişkisi gösterilmiştir. Bu grafikte kayanın artan elastisite modülüne karşılık hem yatay hem de düşey deformasyonun azaldığı görülmüştür. En fazla azalma da 1 noktasında tespit edilmiş olup yaklaşık %90 civarındadır. Kohezyon ile deformasyon ilişkisine ait grafikte Şekil 4.61'de verilmiştir. Bu grafikte artan kohezyon değerine bağlı olarak yatay deformasyonun 1 ve 2 noktalarında arttığı ancak buna rağmen 3, 4 ve 5 noktalarında ise azaldığı gözlenmiştir. Bununla birlikte kohezyon artışı 5 noktanın düşey deformasyonunda azalmaya neden olmuştur. Şekil 4.62'de içsel sürtünme açısı ile deformasyon ilişkisi verilmiştir. Bu grafikte artan içsel sürtünme açısının 1 noktası hariç diğer noktaların hem yatay hem de düşey deformasyonlarında azalmaya neden olmuştur. 1 noktasında bu artış yatay deformasyonda bir değişime neden olmazken düşey deformasyonda azalma yaratmıştır. Bununla beraber içsel sürtünme açısı artışı en çok 3 noktasındaki deformasyonun değişmesine neden olmuştur ve bu değişim %41 civarındadır. Şekil 4.63'de $R_{f(Tepe)}$ ile deformasyon değişimi anlatılmıştır. Bu grafikte $R_{f(Tepe)}$ değerinin artışı en fazla 5 noktasındaki deformasyonun değişimine neden olmuştur. Ayrıca artan $R_{f(Tepe)}$ değeri diğer noktalardaki deformasyonlarda azaltma yaratmıştır ve bu azalma %5'i geçmemiştir. Bütün bu deformasyon ilişkisi ile değişen parametre grafiklerinden anlaşılmıştır ki her noktadaki etki farklı şekilde olmuştur.

Çalışmada noktaların toplam olasılık değerleri ile saha ölçümlerindeki deformasyon ilişkisini ortaya koymak amacıyla Şekil 4.50-59'daki grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerde hesaplanan deformasyon değerlerinin en yüksek ve en düşük sonuçlarını

göstermek amacıyla iki küme halinde veriler bir araya getirilmiştir. Ayrıca bu grafiklerde saha ölçümlerindeki değerlerde gösterilmiştir. Saha deformasyon ölçümündeki değerlerin, hesap sonuncunda bulunan en düşük ve en yüksek deformasyon değerlerinin oluşturduğu eğrilerin arasında kaldığı görülmüştür. Sınır aralığında kalmış olmasıda rastgele küme sonlu elemanlar yönteminin tünel deformasyonu hesabındaki uygulanabilirliğinin bir göstergesi olmuştur.



KAYNAKLAR

1. Phoo, K.K., Kulhawy, F.H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 612-624.
2. Tekin,E. (2012). *Kohezyonsuz zeminlerdeki temellerin güvenilirliğe dayalı tasarım optimizasyonu ve sığ temellerin deprem yükleri altında güvenilirlik analizi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
3. Hrennikoff,A. (1941). Solution of problems of elasticity by the framework method. *ASME Journal Appl Mechanical* 8, 619-679
4. McHenry,D. (1943). A Lattice analogy for the solution of plane stress problems. *Journal Institute Civil Engineering* ,21(1), 59-82
5. Clough,R. (1960). *The finite element method in plane stress analysis*. Procence 2nd ASCE Conferanca Electronic Comp, Pittsburg.
6. Turner,M.J., Clough,R.W., Martin,H.C. ve Topp, L.T. (1956). Stiffness and deflection analysis of complex structures. *Journal of Aeronaut Science*, 25(1), 805-823.
7. Argyris,C.(1964). *Integrating the individual and the organization*. New York:Wiley. 300-307.
8. Turner,M.J., Martin,H.C., Dill, E.H., ve Melosh, R.J. (1960). Large deflections of structures subjected to heating and external loads. *Journal of Aerospace Science*, 27(1), 97-127.
9. Freudenthal,A.M. (1947). The safety of structures. *Transactions of ASCE*, 112(1), 125-180.
10. Pugsley, A.G. (1947). The relative strength and stiffness properties required for strut materials. *Aeronautical Research Council*.
11. Cornell,C.A. (1969). A probability-based structural code. *Journal of the American Concrete Institute*. (66)12, 947-985.
12. Dempster, A.P. (1967). *Upper and lower probabilities generated by random closed interval*. *Annals of Mathematical Statistics*. 39(1), 957-966.
13. Collins,J.D., Thompson, W.T. (1969). The eigenvalue problem for structural systems with uncertain parameters. *AIAA Journal*, 7(4), 642-648.
14. Shinozuka, M., Imosseir,S.B., Astill,C.J. (1971). Impact loading on strictures with random properties. *Journal of Structural Mechanics*, 1(1),63-77
15. Hart, G.C., Collins, J.D. (1970). The treatment of randomness in finite element modeling. *In:SAE shock and vibrations symposium*, Los Angeles, 2(1), 2509-2519.
16. Hisade,T., Nakagiri,S. (1981). Stochastic finite element method developed for structural safety and reliability. *Procence 3rd International Conferance On Structwr of Safety and Reliability*, New York, John Wiley, 295-402.

17. Shinozuka, M., Lenoe, E. (1976). A probabilistic model for spatial distribution of material properties. *Engineering Fracture Mechanics*, 8(1), 217-227.
18. Vanmarcke, E.H. (1977). Probabilistic modeling of soil profiles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(11), 15-17.
19. Der Kiureghian, A., Ke, J.B. (1987). The stochastic finite element method in structural reliability. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 3(2), 83-91.
20. Tonon, F., Bernardini, A., Mammino, A. (1996). A random set approach to the uncertainties in rock engineering and tunnel lining design. *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*.
21. Tonon, F., Bernardini, A., Mammino, A. (2000). Reliability analysis of rock mass response by means of random set theory. *Reliability Engineering and System Safety*, 263-282.
22. Rackwitz, R. (2000). Optimization the basis of code making and reliability verification. *Structural Safety*, 22(11), 27-60.
23. Schweiger, H.F., Peschl, G. (2007). Basic concepts and applications of random sets in geotechnical engineering. *Probabilistic methods in Geotechnical Engineering*, 113-126.
24. Nasekhian, A., Schweiger, H. (2010). Random set finite element method application to tunneling. *Proceedings of the 4th international workshop on reliable engineering computing, Robust design coping with hazards, risk and uncertainty*, 369-285.
25. Akbaş, S.O., Kökten, O. (2015). Reliability analysis of an anchored contiguous pile wall in clay with the random set finite element method. *5th International Symposium on International Safety and Risk*, Rotterdam, The Netherlands.
26. Shubert, P., Vavrovsky, G.M. (1994). Interpretation of monitoring results. *Word Tunneling*, 351-356.
27. Shubert, W., Budil, A. (1995). The importance of longitudinal deformation in tunnel excavation. *Proceedings 8th Int. Congress on Rock Mechanics (ISRM)*, 3(1), 1411-1414, Balkema Rotterdam.
28. Schubert, W., Steindorfer, A. (1995). Advanced monitoring data evaluation for tunnels in poor rock. *8th Congress On Rock Mechanics*, 1420-1424, A.A. Balkema, Tokyo
29. Sellner, P., Steindorfer, A. (2000). *Prediction of displacement in tunneling*. 18(2), 22-26, Felsbau.
30. Schubert, W., Steindorfer, A., Button, A.E., (2002). *Displacement monitoring in tunneling*. An overview, 20(2), 7-15, Felsbau.
31. Yılmaz, I. (2007). *Mühendislik jeolojisi ilkeler ve temel kavramlar*. Ankara: Seçkin Yayınevi. 219-225.

32. Bozkurt M. (1980). *Tüneller ders notları. İstanbul: İstanbul teknik üniversitesi yayınevi.*
33. Demir, E. (2014). *Kaya mekaniği ders notları. Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.*
34. Broch,E., Franklin,J. (1972). Estimating unconfined compressive strength of sedimentary rocks in United Arab Emirates from point load strength index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 669-697.
35. Karaman,K., Erçikdi, B.,Cihangir,F.,Kesimal,A. (2011). Kayaçların Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tahmininde Schmidt Çekici Yöntemlerinin İncelenmesi. 22. *Uluslararası Madencilik kongresi ve sergisi*, Ankara
36. Ulusay, R., Gökçeoğlu C., Binal, A. (2005). *Kaya mekaniği laboratuvar deneyleri. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları:Ankara.*
37. Günay, K. (1996). *Zemin sondajlardaki basınçlı su deneylerinde dikkat edilecek noktalar ve lugeon deneyi*, Sondaj Sempozyumu, İzmir.
38. Bieniawski,Z.T. (1989). Engineering rock mass classifications. *Canada:John Wiley&Sons. Inc.*
39. Hoek,E., Brown, E.T. (1997). Pratical estimates of rock mass strength. *International Journal Rock Mechanics Mining Science*, 34, 1165-1186.
40. Sönmez,H., Ulusay,R. (1999). Modifications to the geological strength index and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(6), 743-760.
41. Hoek, E.Carranza-Tores, C. ve Corkum,B. (2002). *Hoek-Brown criterion-2002 edition*.NARMS-TAC Conference.Toronto. 267-273.
42. Jaeger, J.C. ve Cook, N.G. (1979). Fundamentals of rock mechanichs. *London:Chapman and Hall.*
43. Serafim,J.L., Pereira, J.P. (1983). Considerations on the geomechanical classification of Bieniawski. *Proc. Int. Symp. on Eng. Geol. and Underground Construction*, vol I (II), 33-44, Lisbon, Portugal.
44. Hoek,E., Diedrichs, M.S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43(1), 203-215.
45. Nicholson,G. ve Bieniawski,Z.T.(1990). A non-linear deformation modulus based on rock mass classification. *International Journal of Mining&Geologi Engineering*, 8(1),181-202.
46. Bieniawski,Z.T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering application. *Proceedings 4th International Congress on Rock Mechanics*, 2(1), 41-48, Montreux.

47. Sönmez,H., Gökçeoğlu,C., Nefeslioğlu, H.A., Kayabaşı,A. (2006). Estimation of rock modulus: For intact rocks eith an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(1), 224-235.
48. *Ordu-Ulubey Ayrımı Topçam Tünelleri Jeolojik, Hidrojeolojik ve mühendislik jeolojisi etüt raporu.* (2013). T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı-Karayolları Genel Müdürlüğü-Karayolları 7.Bölge Müdürlüğü.
49. Niemeier,W. (1985). *Deformationsanlye*, In: *Geodatische Netze In Landes- Und Ingenieurvermessung li*,Kondrad Witter, 559-623, Almanya.
50. Sudret, B. ve Berveiller, M. (2008). Stochastic finite elementmethods in geotechnicalengineering. *RB Design in Geologi Engineering*, 260-297
51. internet: Schweiger H. F., Peschl G. M. (2004). Manual of Plaxis 2008, *Application of The Random Set Finite Element Method (RS-FEM) in Geotechnics*,URL <https://www.plaxis.com/content/uploads/import/kb/kbpublications/Iss17%20Art2%20-%20Application%20of%20the%20Random%20Set%20FEM.pdf>, Son Erişim Tarihi: 27.05.2019
52. Potts, M.G. ve Zdravkovic,L. (1999). *Finite element analysis in geotechnical engineering*.London:Thomas Telford
53. Palmström,A. (1982). The volumetric joint count- A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. *IAEG Cogress*, 221-228, New Delhi.
54. Palmström,A. (1985). Application of the volumetric joint cout as a measure of rock mass jointing. *Proc. Int. Symp. on Fundamentals of Rock Joints*, 103-110, Sweden.
55. Palmström,A. (1996). The weighted joint density method leads to improved characterization of jointing. *Int. Conf. on Recent Advances in Tunneling Tec.* New Delhi.
56. Schweiger,H.F.,Nasekhian,A. ve Marcher,T. (2011). A comparison of random set and point estimate methods in finite element analysis of tunnel excavation.*Inrenational symposium on geotechnical safety and risk*.Almanya.(ISBN 978-3-939230-01-4)
57. Kulhawy,F.H., (1974). Finite element modelling criteria for underground openings in rock. *Mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 11(12), 465-472.
58. Vlachopoulos,N. ve Diederichs, M.S. (2014). Appropriate uses and pratical limitations of 2D numerical analysis of tunnels ans tunnel support response. *Geotechnical ana geological engineering an international journal*. 31(6),3-7.



EK-1. Laboratuvar çalışmalarına ait deney sonuçları

Serbest basınç dayanımı ve üç eksenli sıkışma deneyi sonuçları

No.	Sondaj No.	Numune	Derinlik (m)	γ^n (gr/cm ³)	Kayada Serbest Basınç Dayanımı q_u (kPa)	Zeminde Üç Eksenli Sıkışma Deneyi		
						c (Mpa)	ϕ (°)	I_s 50 (MPa)
1	SK-1	Karot	8,70 - 8,90		41389,39			
2		Karot	24,00 - 24,10		116510,7			
3		Karot	26,20 - 26,40		98030,82			
4		Karot	147,00 - 147,50		20807,33			
5	SK-2	Karot	153,30 - 153,50		59396,29			
6		Karot	160,10 - 160,30		67543,28			
7		Karot	165,00 - 165,40			3,65	74,25	
8		Karot	166,80 - 167,20			1,86	75,31	
9		Karot	172,10 - 172,30					3,36
10		Karot	175,10 - 175,30		41162,45			
11		Karot	178,80 - 179,00		46051,98			
12		Karot	183,70 - 184,00		59697,43			
13		Karot	137,50 - 137,80		30586,38			
14		Karot	145,30 - 145,70		29676,31			
15	SK-3	Karot	170,50 - 170,80		127924,68			
16		Karot	177,10 - 177,80		59126,51			
17		Karot	153,00 - 155,30		63902,98			
18		Karot	158,60 - 158,90	2,83		4,06	78	
19		Karot	160,90 - 161,20		10457,37			
20		Karot	191,10 - 191,80		53326,91			

Ek-1. (devamı) Birim hacim ağırlık ve kaya serbest basınç dayanımı deneyi sonuçları

Numune No	Sondaj No	Derinlik (m)	Elek. Analizi	Hidrometre	Kıvam Limitleri	Zemin Özellikleri				W _n	γ _n	γ _k	Gs	Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Yüzdesi (%)	Konsolidasyon	Zemirde Serbest Basın. Dayn.										Es	1550 (ort)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
						Elek. Şişme		Zeminde Üç									Serbest Basın. Dayn.		Zeminde Direkt Kesme		Kaya Serbest Basın. Dayn.		Kayada Üç Eks. Şişme																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
						0	1	0	1								0	1	0	1	0	1	0	1	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
						(%)	(%)	(%)	(%)								(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)			(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)

Windows 7 ekran görüntüsü

Ek-1. (devamı) Tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçları-SK 4



GEOLAB

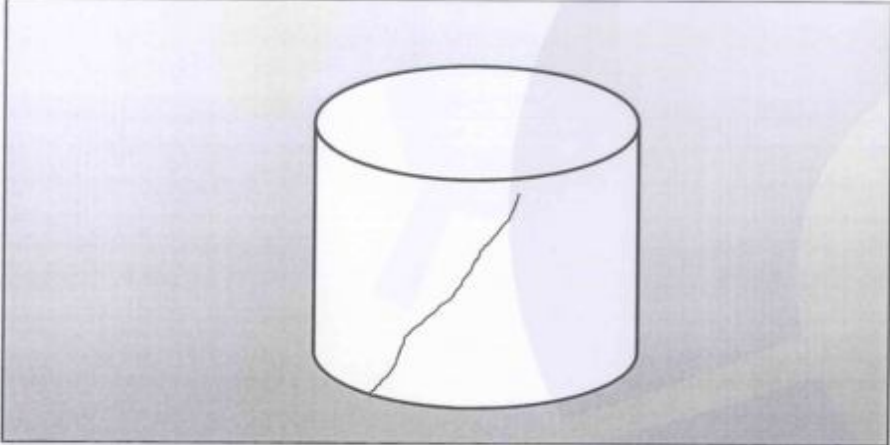
Geoteknik Ölçümler, Laboratuvar İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti.



KAYADA TEK EKSENLİ SIKIŞMA DAYANIMI DENEY SONUÇLARI
UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF INTACT ROCK CORE SPECIMENS TEST RESULTS
RAPOR NO: DR-22 (2/2)

Müşteri Adı Customer's Name	EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.	Num.Kabul Tarihi Date of Samp. Accept	17,12,2013
Num.Alındığı Yer Project/Location	(Ordu-Ulubey) Aynırı Topçam(2.Kısım) Tünelleri Etüt ve Proje Danışmanlık Hizmetleri	Deney Tarihi Date of Test	17,12,2013
Sondaj Num. No Boring/Sample No	SK-4	Deney Rapor Tarihi Date of Test Result	17,12,2013
Derinlik (m) Depth	187,50-188,00	Laboratuvar No Laboratory No	13-2171ktek1

Numune Boyu Height of sample	10,00	(cm)	Yaş Numune Ağırlığı Weight of Sample	468,25	(g)
Numune Çapı Diameter of Sample	4,70	(cm)	Numune Hacmi Capacity of Sample	173,49	(cm ³)
Kesit Alanı Initial Area	17,35	(cm ²)	Doğal Birim Hacim Ağırlık Natural Unit Weight	26,48	(kN/m ³)
Yükleme Hızı Rate of Loading	0,48	(mm/min.)	Kırılma Yükü Failure Load	50,65	kN
Yükleme Süresi Duration of Loading	5,00	min.	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Unconfined Compressive Strength	29195,84	kPa



* Deneyler ilgili firma tarafından laboratuvarımıza teslim edilen numuneler üzerinde yapılmıştır.
Tests were done from the samples that are delivered by the related firm.

* Bu deney ISRM 1981 standartlarına göre yapılmaktadır.
This test is being done according to the ISRM 1981 standards.

* Bu deney raporu Laboratuvarımızın yazılı izni olmadan basılamaz ve çoğaltılamaz.
This tests results must not be reproduced in any form without the written permission of laboratory.

* SECURITY hologramları olmayan Deney Sonuç raporlarımız geçersizdir.
Test result reports without a SECURITY Hologram are invalid.

* T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, logosu 26.07.2010 tarih ve 206 numaralı Laboratuvar İzin Belgesi kapsamında kullanılmaktadır.
Ministry of Environment and Urban Planning sign used by 26.07.2010 and 206 number of Laboratory permission notes.

Deneyi Yapan
Tested By

Müge DEMİR
Jeolojik Mühendis
Oda Sicil No: 67060



Onaylayan
Approved By

Nalan AYDIN
Denetçi Mühendis
Belge No: 20583

Mahmut Şevket Paşa Mahallesi Ersan Sokak No: 22/A Sisli, İstanbul, TÜRKİYE Tel. +90 212 237 38 39 Fax +90 212 238 16 43 www.geolab.com.tr

ZEMİN MEKANİĞİ
Soil Mechanics

KAYA MEKANİĞİ
Rock Mechanics

AGREGA
Aggregate

ARAZİ DENEYLERİ
In - Situ Tests

Ek-1. (devamı) Elastisite modülü ve poisson oranı deneyi-SK4



Geoteknik Ölçümleme, Laboratuvar İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti.



T.C.
ÇEVRE VE ŞEHİRCİLİK
BAKANLIĞI

ELASTİSİTE MODÜLÜ VE POISSON ORANI TAYİNİ DENEY SONUÇLARI
DETERMINATION OF ELASTIC MODULES AND POISSON'S RATIO TEST RESULTS

Müşteri Adı : EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.

Num. Abzidiği Yer : (Ordu-Ulubey) Ayrımı Topçam(2.Kısım) Tünelleri Etüt ve Proje Danışmanlık Hizmetleri Alım İşi, km 35+000-38+866

Borçlar Num. No : SK-4

Derinlik (m) : 187,50-188,00

Derinlik : 187,50-188,00

RAPOR NO : DR-22 (1/2)

Num.Kabul Tarihi : 17,12,2013

Deney Tarihi : 17,12,2013

Deney Rapor Tarihi : 17,12,2013

Laboratuvar No : 13-2171elasp01

Numune Çapı : 47 (mm)

Numune Boyu : 100 (mm)

Numune Ağırlığı : 468,25 (g)

Kesit Alanı : 17,35 cm²

Numune Hacmi : 173,49 cm³

Yükleme Hızı : 0,48 (mm/min)

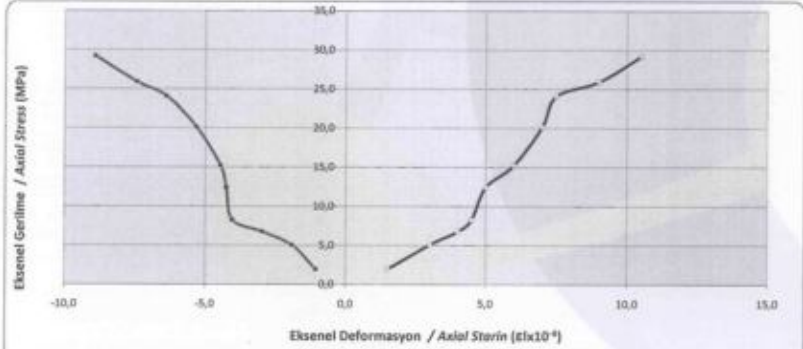
Eksenel Yük Axial Load (kN)	Eksenel Gerilme Axial Stress (MPa)	Eksenel Birim Deform. Axial Strain (Etx10 ⁻⁶)	Çapal Deformasyon Lateral Strain (Edx10 ⁻⁶)
3,43	1,98	1,50	-1,06
8,81	5,08	3,00	-1,91
11,75	6,77	4,00	-2,98
14,37	8,28	4,50	-4,04
21,56	12,42	5,00	-4,26
26,46	15,25	6,00	-4,47
34,97	20,16	7,00	-5,32
41,83	24,11	7,50	-6,38
44,99	25,93	9,00	-7,45
50,65	29,20	10,50	-8,94

Elastisite Modülü
Elastic Modules

4,65 GPa

Poisson Oranı
Poisson's Ratio

0,28



* Deneyler ilgili firma tarafından laboratuvarımıza teslim edilen numuneler üzerinde yapılmıştır.
Tests were done from the samples that are delivered by the related firm.

* Bu deney İSRM 1981 standartlarına göre yapılmaktadır.
This test is being done according to the İSRM 1981 standards.

* Bu deney raporu Laboratuvarımız yazılı izn alınmadan beslenmez ve çoğaltılamaz.
This test results must not be reproduced in any form without the written permission of laboratory.

* SECURITY hologramları olmayan Deney Sonuç raporlarımız geçerli değildir.
Test result reports without a SECURITY Hologram are invalid.

* T.C.Bayındırlık ve İskan Bakanlığı İlgili 26.07.2010 tarih ve 206 numaralı Laboratuvar İçin Belgeleri kapsamında kullanılmaktadır.
T.C.Department of State sign used by 26.07.2010 and 206 number of Laboratory permission notes.

Deneyi Yapan
Müge DEMİR
Jeolojik Mühendis
Oda Sicil No: 17050

Deneyi Yapan
Nalan AYDIN
Denetçi Mühendis
Belge No: 20583

Mahmut Şevket Paşa Mahallesi Ersan Sokak No: 22/A Şişli, İstanbul, TÜRKİYE Tel: +90 212 237 38 39 Fax: +90 212 238 16 43 www.geolab.com.tr

ZEMİN MEKANİĞİ
Soil Mechanics

KAYA MEKANİĞİ
Rock Mechanics

AGREGA
Aggregate

ARAZİ DENEYLERİ
In - Situ Tests

Ek-1. (devamı) Tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçları-SK 3



Geoteknik Ölçümleme, Laboratuvar İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti.



T.C.
ÇEVRE VE ŞEHİRCİLİK
BAKANLIĞI

KAYADA TEK EKSENLİ SIKIŞMA DAYANIMI DENEYİ SONUÇLARI
UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF INTACT ROCK CORE SPECIMENS TEST RESULTS
RAPOR NO: DR-22 (2/2)

Müşteri Adı Customer's Name	EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.	Num. Kabul Tarihi Date of Samp. Accept	17,12,2013
Num. Alındığı Yer Project Location	(Ordu-Ulubey) Aynırı Topçam(2.Kısım) Tünelleri Etüt ve Proje Danışmanlık Hizmetleri Alım İş. km 35+000-38+866	Deney Tarihi Date of Test	17,12,2013
Sondaj-Num. No Boring/Sample No	SK-3	Deney Rapor Tarihi Date of Test Result	17,12,2013
Derinlik (m) Depth	162,50-162,90	Laboratuvar No Laboratory No	13-2171ktek2

Numune Boyu Height of sample	10,10	(cm)	Yazı Numune Ağırlığı Weight of Sample	475,65	(g)
Numune Çapı Diameter of Sample	4,70	(cm)	Numune Hacmi Capacity of Sample	175,23	(cm ³)
Kesit Alanı Initial Area	17,35	(cm ²)	Doğal Birim Hacim Ağırlık Natural Unit Weight	26,63	(kN/m ³)
Yükleme Hızı Rate of Loading	0,48	(mm/min.)	Kırılma Yüklü Failure Load	95,28	kN
Yükleme Süresi Duration of Loading	5,00	min.	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Unconfined Compressive Strength	54920,96	kPa



* Deneyler ilgili firma tarafından laboratuvarımıza teslim edilen numuneler üzerinde yapılmıştır.
 Tests were done from the samples that are delivered by the related firm.

* Bu deney İSRM 1981 standartlarına göre yapılmaktadır.
 This test is being done according to the İSRM 1981 standards.

* Bu deney raporu Laboratuvarımızın yazılı izni olmadan basılamaz ve çoğaltılamaz.
 This test's results must not be reproduced in any form without the written permission of laboratory.

* SECURITY hologramları olmayan Deney Sonuç raporlarımız geçerlidir.
 Test result reports without a SECURITY Hologram are invalid.

* T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı logosu 26.07.2010 tarih ve 206 numaralı Laboratuvar İzin Belgesi kapsamında kullanılmaktadır.
 Ministry of Environment and Urban Planning sign used by 26.07.2010 and 206 number of Laboratory permission notes.

Deneyi Yapan
Tested By
Müge DEMİR
Jeolojik Mühendis
Oda Sicil No: 11100



Deneyi Yapan
Tested By
Nalan AYDIN
Deneyçi Mühendis
Belge No: 20593

Mahmut Şevket Paşa Mahallesi Ersan Sokak No: 22/A Şişli, İstanbul, TÜRKİYE Tel. +90 212 237 38 39 Fax +90 212 238 16 43 www.geolabs.com.tr

ZEMİN MEKANİĞİ
Soil Mechanics

KAYA MEKANİĞİ
Rock Mechanics

AGREGA
Aggregate

ARAZİ DENEYLERİ
In-Situ Tests

Ek-1. (devamı) Elastisite modülü ve poisson oranı deneyi-SK3



Geoteknik Ölçümleme, Laboratuvar İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti.



ELASTİSİTE MODÜLÜ VE POISSON ORANI TAYİNİ DENEY SONUÇLARI
DETERMINATION OF ELASTIC MODULES AND POISSON'S RATIO TEST RESULTS

Müşteri Adı / Customer's Name : EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.

Num. Alındığı Yeri / Project Location : (Ordu-Ulubey) Ayrımı Topçam(2.Kısım) Tünelleri Etüt ve Proje Danışmanlık Hizmetleri Alım İşi, km 35+000-38+866

Borulu Num. No / Boring Sample No : SK-3

Derinlik (m) / Depth : 162,50-162,90

RAPOR NO: DR-22 (1/2)

Num. Kabul Tarihi / Date of Samp. Accept : 17,12,2013

Deney Tarihi / Date of Test : 17,12,2013

Deney Rapor Tarihi / Date of Test Result : 17,12,2013

Laboratuvar No / Laboratory No : 13-2171elaspo2

Numune Çapı / Diameter of Sample : 47 (mm)

Numune Boyu / Length of Sample : 101 (mm)

Numune Ağırlığı / Weight of Sample : 475,65 (g)

Kesit Alanı / Cross Sectional : 17,35 cm²

Numune Hacmi / Volume of Sample : 175,23 cm³

Yükleme Hızı / Rate of Loading : 0,48 (mm/min)

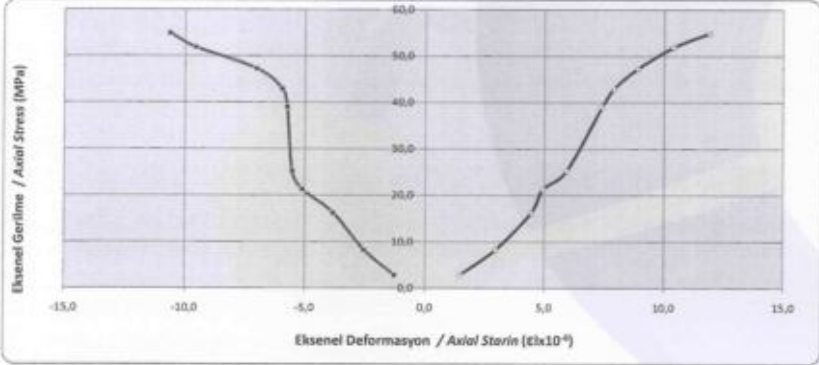
Eksenel Yük / Axial Load (kN)	Eksenel Gerilme / Axial Stress (Mpa)	Eksenel Birim Deform. / Axial Strain (Etx10 ⁻⁶)	Çapal Deformasyon / Lateral Strain (Edx10 ⁻⁶)
4,90	2,83	1,49	-1,28
14,37	8,28	2,97	-2,55
28,10	16,19	4,46	-3,83
36,92	21,28	4,95	-5,11
43,79	25,24	5,94	-5,53
67,69	39,01	7,43	-5,74
74,51	42,95	7,92	-5,96
82,05	47,29	8,91	-7,02
90,05	51,90	10,40	-9,57
95,28	54,92	11,88	-10,64

Elastisite Modülü / Elastic Modules

7,16 GPa

Poisson Oranı / Poisson's Ratio

0,26



Eksenel Gerilme / Axial Stress (MPa)

Eksenel Deformasyon / Axial Strain (Etx10⁻⁶)

* Deneyler ilgili firma tarafından laboratuvarımız teslim edilen numuneler üzerinde yapılmıştır.
 Tests were done from the samples that are delivered by the related firm.

* Bu deney İSRM 1981 standartlarına göre yapılmaktadır.
 This test is being done according to the İSRM 1981 standards.

* Bu deney raporu laboratuvarımızdan yazılı izin alınmadan basılamaz ve çoğaltılamaz.
 This test results must not be reproduced in any form without the written permission of laboratory.

* SECURITY hologramları olmayan deney sonuç raporlarımız geçersizdir.
 Test result reports without a SECURITY Hologram are invalid.

* T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Yönerge 26.07.2010 tarih ve 208 numaralı Laboratuvar İzin Belgesi kapsamında kullanılmaktadır.
 T.C. Department of State sign used by 26.07.2010 and 208 number of Laboratory permission report.

Deneyi Yapan / Tested By:

Müge DEMİR

Jeolojik Mühendis / Geologist

Oda Sicil No / Chamber No: 17000



Deneyi Yapan / Tested By:

Alihan AYDIN

Denetçi Mühendis / Inspector Engineer

Beşir No / No: 20583

Mahmut Şevket Paşa Mahallesi Ersan Sokak No: 22/A Şişli, İstanbul, TÜRKİYE Tel: +90 212 237 38 39 Fax: +90 212 238 16 43 www.geolab.com.tr

ZEMİN MEKANİĞİ
Soil Mechanics

KAYA MEKANİĞİ
Rock Mechanics

AGREGA
Aggregate

ABAZI DENEYLERİ
In-situ Tests

Ek-1. (devamı) Tünel hesapları için bulunan elastisite modülü, kohezyon, içsel sürtünme açısı, birim hacim ağırlık ve poisson oranı değerleri

Kesim No	Kilometre Aralığı	Litoloji	E (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	ν	γ (kN/m ³)
1	35+077 – 35+180	Yamaç Molozu	60000	10	35	0,40	20
2	35+180 – 35+430	Siyenit	5165000	367	64,5	0,25	26
3	35+430 – 35+840		6580000	1054	55,5	0,25	27
4	35+840 – 36+020		7675000	1508	53	0,25	27
5	36+020 – 36+075		7020000	879	58	0,25	27
			7020000	429	67	0,25	27

EK-3. 35+192 km'ye ait deformasyon okumaları

OKUMA	OKUMALAR						OKUMALAR			
NO	1		2		3		4		5	
0	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0	80,245	11,720	80,153	7,988	80,175	8,148	80,426	4,829	80,346	5,180
1	80,245	11,720	80,154	7,985	80,175	8,145	80,429	4,829	80,346	5,181
2		11,716	80,154	7,974	80,176	8,132	80,428	4,818	80,351	5,170
3	80,244	11,719	80,154	7,977	80,174	8,138	80,439	4,833	80,361	5,181
4	80,243	11,721	80,153	7,979	80,173	8,139	80,446	4,826	80,367	5,178
5	80,241	11,718	80,149	7,978	80,170	8,139	80,421	4,832	80,343	5,182
6	80,240	11,715	-	-	80,169	8,137	-	-	-	-
7	80,235	11,716	-	-	80,168	8,141	-	-	-	-
8	80,235	11,716	80,147	7,979	80,168	8,143	-	-	-	-
9	-	-	80,154	7,976	80,178	8,139	-	-	-	-
10	80,262	11,707	80,166	7,967	80,192	8,124	-	-	-	-
11	80,256	11,710	80,161	7,969	80,187	8,127	-	-	-	-
12	80,255	11,710	80,162	7,967	80,185	8,126	-	-	-	-
13	80,259	11,699	80,161	7,960	80,190	8,116	-	-	-	-
14	80,269	11,711	80,172	7,973	80,200	8,128	-	-	-	-
15	-	-	80,180	7,968	80,207	8,125	-	-	-	-

FARKLAR (mm)						FARKLAR (mm)			
1		2		3		4		5	
DX (Düşey)	DY (Yatay)	DX (Düşey)	DY (Yatay)	DX (Düşey)	DY (Yatay)	DX (Düşey)	DY (Yatay)	DX (Düşey)	DY (Yatay)
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	0,50	3,00		3,00	0,20	-	0,40	1,00
	4,00	0,80	3,00	0,84	8,00	1,22		3,50	1,00
2,78	1,00	0,50	3,00	1,53	8,00	1,00	0,60	3,50	1,00
2,32	1,00	0,50	2,00	1,91	8,00	1,25	3,00	3,50	3,00
4,28	2,00	3,38	3,11	4,78	8,00	1,39	3,00	3,50	3,00
4,89	5,00	3,38	3,11	6,01	8,00	1,39	3,00	3,50	3,00
10,27	4,00	3,38	3,11	6,60	7,00	1,39	3,00	3,50	3,00
9,89	4,00	3,76	3,00	6,76	5,00	1,39	3,00	3,50	3,00
9,89	4,00	1,01	4,00	3,10	7,00	1,39	3,00	3,50	3,00
-	-	-	-	-	-	1,39	3,00	3,50	3,00
5,61	3,00	3,26	2,00	5,74	3,00	1,39	3,00	3,50	3,00
6,82	3,00	3,59	-	6,70	2,00	1,39	3,00	3,50	3,00
3,18	6,00	3,44	5,00	2,16	8,00	1,39	3,00	3,50	3,00
7,24	4,00	3,65	5,40	6,63	4,00	1,39	3,00	3,50	3,00
7,24	4,00	3,44	1,00	6,48	1,20	1,39	3,00	3,50	3,00

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :DÖNDER, Gamze
 Uyuğu :T.C.
 Doğum tarihi ve yeri :20.07.1989, Ankara
 Medeni hali :Evli
 Telefon :0(537)706 08 09
 e-mail :celliade89@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi	2019
Lisans	Ondokuz Mayıs Üniversitesi	2011
Lise	75.Yıl Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011	ANKA GRUP PROJE	Proje Mühendisi
2012	GEN MÜHENDİSLİK	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Topçam Tüneli Deformasyonlarının Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Hesaplanması, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi,5(2).

Hobiler

Kitap okumak, spor yapmak, film izlemek



GAZİ GELECEKTİR..