KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖRNEK BİR NATM TÜNELİNDE KAZI DERİNLİĞİNİN DEFORMASYONLARA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

MERVE BULUT

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖRNEK BİR NATM TÜNELİNDE KAZI DERİNLİĞİNİN DEFORMASYONLARA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

MERVE BULUT

Doç.Dr. Utkan MUTMAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof.Dr. Safa Bozkurt COŞKUN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr.Öğr.Üy. Ayşe Bengü SÜNBÜL
Jüri Üyesi, Bülent Ecevit Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 04.07.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada İstanbul-Kocaeli ilçesinde yapılması planlanan bir tünel projesinin verileri ile örnek bir tünel modellenmiştir. Modelleme, sonlu elemanlar metoduyla analiz yapan Plaxis 2D programında gerçekleştirilmiş olup, sonlu elemanlar metodu gereği gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edildiği düşünülmektedir. Çalışmada tünelin inşa edileceği derinliğin deformasyona etkileri araştırılmıştır. Bu nedenle bu çalışmanın tünel inşası öncesinde, kazı derinliğine göre deformasyonların öngörülebilirliği ve yorumlanabilirliği açısından yardımcı olacağı kanısındayım.

Bu konuda bana çalışma ve araştırma imkânı veren, tezimin hazırlanması süresince bilgi ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Sn. Doç. Dr. Utkan MUTMAN'a (KOÜ) en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve ilgisiyle tezime yön veren, çalışma koşullarında her türlü yardımı gösteren, maddi ve manevi bu yolda desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, akademik yolda yürümeme vesile olan saygıdeğer büyüğüm Sn. Atilla KURAMA' ya sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımda ve bu çalışmamda en büyük destekçim, yol arkadaşım, kıymetlim, sevgili kardeşim Elif TÜMKOR'a, tüm yardımlarından ve her daim bana göstermiş olduğu sabrından dolayı sonsuz minnetlerimi sunarım.

Beni maddi ve manevi her şekilde destekleyen, akademik alanda yol almam için yüreklendiren, her koşulda yanımda olan kıymetli annem Gülay BULUT'a ve sevgili babam Şahin BULUT'a göstermiş oldukları tüm fedakârlıklar için sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Temmuz - 2018 Merve BULUT

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR ii
İÇİNDEKİLER iii
ŞEKİLLER DİZİNİ v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii
ÖZET x
ABSTRACT xi
GİRİŞ 1
1. TÜNELCİLİK ALANINDA DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR 2
1.1. Kaya Sınıflandırma Sistemleri 2
1.2. Tünelcilik Alanında Yapılan Araştırmalar 10
2. TÜNELLER VE TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ 15
2.1. Tünel Güzergâhının Seçimi ve İnşaat Öncesi Yapılan Araştırmalar 17
2.2. En Kesit Şekillerine Göre Tüneller 18
2.3. Yapım Amaçlarına Göre Tüneller 19
2.4. Yapım Yöntemlerine Göre Tüneller 19
2.4.1. Klasik yöntemler (18.-19. Yy.) 19
2.4.2. Aç - Kapa yöntemi (Cut- Cover) 22
2.4.3. Delme – Patlatma yöntemi 22
2.4.4. Batırma tünel (Immersed Tube) yöntemi 23
2.4.5. Yeni Avusturya tünel açma yöntemi (NATM) 24
2.4.5.1. NATM'in tarihsel gelişimi 24
2.4.5.2. Çeşitli tanımlamalarla NATM'in özellikleri 27
2.4.5.3. NATM destek sistemleri 29
2.4.5.4. NATM'in geoteknik tasarım kriterleri ve kazı yöntemi 30
2.4.5.5. NATM'in dünyadaki başarılı ve başarısız örnekleri 34
2.4.5.6. NATM'nin avantajları ve dezavantajları 37
2.4.6. Tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi (TBM) 37
2.4.6.1. TBM'in tarihçesi 38
2.4.6.2. TBM'lerin yapısı ve çalışma prensibi 40
2.4.6.3. TBM uygulama alanları ve seçim kriterleri 41
2.4.6.4. TBM çeşitleri 43
2.4.6.5. TBM'in dünya ve Türkiye'deki örnekleri 46
2.4.6.6. TBM'in avantajları ve dezavantajları 47
3. TÜNELLERDE DEFORMASYON 49
3.1. Deformasyonların Sınıflandırılması 50
3.2. Deformasyona Neden Olan Faktörler 52
3.2.1. Tektonik hareketler 52
3.2.2. Yerel hareketler 52
3.3. Deformasyon Ölçmelerinde Temel Adımlar ve Ölçme Yöntemleri 53
3.4. Deformasyon Analizinde Kullanılan Yöntemler 54
3.5. Verilerin Değerlendirilmesi ve Sonuçların Yorumu 55
3.6. Deformasyon Modelleri 55

3.6.1. Statik model 56
3.6.2. Kinematik model 56
3.6.3. Dinamik model 57
3.7. Uygun Deformasyon Modelinin Seçimi 57
3.8. Deformasyon Ölçmelerinin Uygulama Alanları 58
3.9. Tünellerde Deformasyona Neden Olan Faktörler 59
4. SEÇİLEN ANALİZ YÖNTEMİ VE İNCELENEN TÜNELİN TANITIMI 60
4.1. Sonlu Elemanlar Metodu 60
4.2. Plaxis Sonlu Elemanlar Programı 63
4.2.1. Hardening soil modelinin özellikleri 67
4.2.2. Mohr-Coulomb modelinin özellikleri 69
4.2.3. Soft soil creep modelinin özellikleri 69
4.2.4. Lineer elastik modelin özellikleri 69
4.3. İnceleme Alanının Tanıtılması ve Çalışma Metotları 70
4.3.1. Genel jeoloji ve inceleme alanının jeolojisi 72
4.3.2. Tektonik 73
4.3.3. İnceleme alanında yapılan çalışmalar ve sondajların değerlendirilmesi 73
4.3.4. Laboratuvar deneyleri 77
4.3.4.1. Standart penetrasyon deneyi (SPT) 77
4.3.5. Zemin ve kaya türlerinin geoteknik özellikleri 78
4.3.4. Geomekanik özellikler için hesaplamalar 80
4.3.4.1. Kohezyon (c) değeri hesaplamaları 80
4.3.4.2. İçsel sürtünme açısı hesaplamaları 82
4.3.4.3. Elastisite modülü hesaplamaları 83
4.4. Modelleme 84
4.4.1. Zemin tabakalarının modellenmesi 84
4.4.2. Tünel kesitinin modellenmesi 86
4.4.3. Tünel destek elemanlarının modellenmesi 86
4.4.4. Bina yükü 88
4.4.5. Ağ oluşturma 89
4.4.6. Hesaplamalar ve analiz 89
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 101
KAYNAKLAR 103
EKLER 107
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 200
ÖZGEÇMİŞ 201

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Terzaghi'nin kaya yükü kavramı 5
Şekil 2.1. Tünel kesitinde tünel bölümleri şeması 16
Şekil 2.2. Tünel en kesit örnekleri 19
Şekil 2.3. Eski Avusturya tünel açma yöntemi 21
Şekil 2.4. Belçika metodunun uygulanışı 22
Şekil 2.5. NATM için kazı öncesi ve sonrasında gerekli bilgi ihtiyaç şeması 31
Şekil 2.6. Tünelde NATM tahkimat elemanları kesiti 33
Şekil 2.7. Rabcewicz'in önerdiği NATM tipik ana kesiti 33
Şekil 2.8. Tipik bir tünel delme makinesi kesiti ve bölümleri 40
Şekil 2.9. Tünel delme makineleri uygulama alanları ve seçim kriterleri 41
Şekil 2.10. Zemin cinsine göre TBM çeşitleri 42
Şekil 2.11. Tünel uzunluk ve çapına göre maliyet grafiği 43
Şekil 3.1. di vektörü 49
Şekil 4.1. SEM ile fiziksel bir sistemin modellenmesi 61
Şekil 4.2. Karmaşık bir problemin ayrıklaştırılmış çözümü 62
Şekil 4.3. Plaxis ile analizde kullanılan elemanlar ve düğüm noktaları 64
Şekil 4.4. Plaxis ile analizde kullanılan elemanlar ve gerilme noktaları 64
Şekil 4.5. Zemin malzeme özelliklerinin tanımlandığı pencere görüntüsü 65
Şekil 4.6. Hardening soil modelinde kullanılan hiperbolik gerilme-stres 68
Şekil 4.7. Uygulanan toprak modelleri arasındaki temel farklılıklar 68
Şekil 4.8. İlk durum: Tünel üzerinde yük olmaksızın çeşitli derinliklerde yapılan modelleme 71
Şekil 4.9. İkinci durum: Yayılı bir yük altında çeşitli derinliklerde yapılan modelleme 71
Şekil 4.10. Sondaj kuyusu açma çalışmalarından bir kare 73
Şekil 4.11. SK-1 sondajına göre zemin profili ve mühendislik zonları 74
Şekil 4.12. SK-1 sondaj raporu 76
Şekil 4.13. Modellenen zemin kesiti 80
Şekil 4.14. Modellenen tünel en kesiti ve özellikleri 86
Şekil 4.15. 17 metre derinlikteki tünel inşası için oluşturulan ağ 89
Şekil 4.16. Üçüncü durum için derinliğe bağlı x yönündeki maximum yer değiştirme grafiği 93
Şekil 4.17. Dördüncü durum için derinliğe bağlı x yönündeki maximum yer değiştirme grafiği 93
Şekil 4.18. Üçüncü durum için derinliğe bağlı y yönündeki maximum yer değiştirme grafiği 94
Şekil 4.19. Dördüncü durum için derinliğe bağlı y yönündeki maximum yer değiştirme grafiği 94
Şekil 4.20. Üçüncü durum için derinliğe bağlı maximum yer değiştirme grafiği 95
Şekil 4.21. Dördüncü durum için derinliğe bağlı maximum yer değiştirme grafiği 95

Şekil 4.22. Üçüncü durum için derinliğe bağlı eksenel kuvvet (N) grafiği 96
Şekil 4.23. Dördüncü durum için derinliğe bağlı eksenel kuvvet (N) grafiği 97
Şekil 4.24. Üçüncü durum için derinliğe bağlı kesme kuvvet (Q) grafiği 98
Şekil 4.25. Dördüncü durum için derinliğe bağlı kesme kuvvet (Q) grafiği..... 98
Şekil 4.26. Üçüncü durum için derinliğe bağlı eğilme momenti (M) grafiği 99
Şekil 4.27. Dördüncü durum için derinliğe bağlı eğilme momenti (M) grafiği 99

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Uygulama alanları ve yıllara göre kaya kütle sınıflama sistemleri 3
Tablo 1.2. Kaya kalitesi ile RQD arasındaki ilişki 6
Tablo 1.3. Deere ve Miller (1966) sınıflaması 7
Tablo 2.1. NATM' e götüren kronolojik gelişmeler 25
Tablo 2.2. Püskürtme beton içeriği ve karışım oranları 29
Tablo 2.3. Yıllara göre NATM tüneli çöküş olaylarından örnekler 36
Tablo 2.4. Dünyada TBM ile açılmış tünel örnekleri ve özellikleri 46
Tablo 3.1. Deformasyon çeşitleri 51
Tablo 3.2. Yapılarda oluşan geometrik değişimlerin sınıflandırılması 51
Tablo 3.3. Deformasyon ölçme yöntemleri 54
Tablo 3.4. Formülize edilmiş modeller 56
Tablo 3.5. Deformasyon modellerinin özellikleri 57
Tablo 4.1. Sondaj kuyusu logunun tablo olarak gösterilişi 74
Tablo 4.2. SPT deney sonuçları 77
Tablo 4.3. Daneli (kohezyonsuz) zeminlerin SPT-N relatif sıkılık ilişkisi 77
Tablo 4.4. SPT-N30, Serbest basınç dayanımı ve kıvam ilişkisi 78
Tablo 4.5. Kaya özellikleri 78
Tablo 4.6. Kayaçların kaya kalitesine (RQD) göre sınıflandırılması 79
Tablo 4.7. Kayaçların nokta yük direncine göre sınıflandırılması 79
Tablo 4.8. Kayaçlarda ayrışma derecelerinin tanımlanması 79
Tablo 4.9. İlk tabaka için derinliklere göre kohezyon değeri hesaplaması 81
Tablo 4.10. İkinci tabaka için derinliklere göre kohezyon değeri hesaplaması 82
Tablo 4.11. Kayaların sınıflamasına göre içsel sürtünme açısı hesabı 83
Tablo 4.12. İnceleme alnında ölçülen kayma dalga hızları 83
Tablo 4.13. Boyuna ve kayma dalgası hızlarına bağlı hesaplanan kayma modülleri 83
Tablo 4.14. Boyuna ve kayma dalgası hızlarına bağlı hesaplanan elastisite modülleri 84
Tablo 4.15. Hesaplanan E50 değerleri 84
Tablo 4.16. Modellenen tabakalara ait parametre değerleri 85
Tablo 4.17. İlk durum için ölçülen gerilmeler 90
Tablo 4.18. İkinci durum için ölçülen gerilmeler 91
Tablo 4.19. Üçüncü durum için ölçülen yer değiştirme, kuvvet ve moment değerleri 91
Tablo 4.20. Dördüncü durum için ölçülen yer değiştirme, kuvvet ve moment değerleri 92

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c : Kohezyon, (kN/m^2)
E : Young modülü, (kN/m^2)
E^{ref}_{50} : Sekant rijitliği, (kN/m^2)
E^{ref}_{ur} : Yükleme boşaltma için rijitlik, (kN/m^2)
E^{ref}_{oed} : Başlangıç ödometre yüklemesi için tanjant rijitliği, (kN/m^2)
φ : İçsel sürtünme açısı, (^{o})
K* : Modifiye şişme indisi
K^{NC}_0 : Normal konsolide durum için sükunetteki toprak basıncı katsayısı
kx : Yatay permeabilite katsayıları, (m/gün)
ky : Düşey permeabilite katsayıları, (m/gün)
m : Gerilme seviyesine bağlı malzeme katsayısı
P_{ref} : Rijitlikler için poisson oranı
R_f : Göçme oranı
z : Derinlik, (m)
υ : Poisson oranı
$υ_{ur}$: Yükleme boşaltma için poisson oranı
$σ_{tension}$: Çekme gerilmesi, (kN/m^2)
$σ_{increment}$: Derinlikle kohezyon artışı
ψ : Dilatansi (genleşme) açısı, (^{o})
ɣ : Birim hacim ağırlık, (kN/m^3)
γdry : Zemin kuru birim hacim ağırlığı, (kN/m^3)
γwet : Zemin ıslak birim hacim ağırlığı, (kN/m^3)
λ : Modifiye sıkışma indisi

Kısaltmalar

APS : Acoustic Positioning Systems (Akustik Konumlandırma Sistemleri)
EPB : Earth Pressure Balance (Arazi Basıncını Dengeleme Makineleri)
GPS : Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
GSI : Geological Strength Index (Jeolojik Dayanım İndeksi)
HES : Health and Safety Executive (Sağlık ve Güvenlik Yönetimi)
HS : Hardening Soil (Pekleşen Zemin Modeli)
ITA : International Tunnelling and Underground Space Association (Uluslararası Tünelcilik ve Yeraltı Yapıları Birliği)
LE : Lineer Elastic (Lineer Elastik Model)
MC : Mohr-Coulomb
NATM : New Austrian Tunneling Method (Yeni Avusturya Tünel Metodu)
OEGG : Austrian Society for Geomechanics (Avusturya Jeomekanik Topluluğu)
RMi : Rock Mass Index (Kaya Kütle İndeksi)
RMR : Rock Mass Raiting (Kaya Kütlesi Puanlama Sistemi)

RQD	: Rock Quality Classification (Kaya Kalitesi Tanımlaması)
RSR	: Rock Structure Rating (Kayaç Yapılanma Oranı Sınıflama Sistemi)
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
SSC	: Soft Soil Creep Model (Yumuşak Zemin Modeli)
TBM	: Tunnel Boring Machine (Tünel Delme Makinesi)

ÖRNEK BİR NATM TÜNELİNDE KAZI DERİNLİĞİNİN DEFORMASYONLARA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Nüfus artışının da etkisiyle trafik ve ulaşım sorunu kentlerin birincil problemleri haline gelmiştir. Bu durum ülkemizdeki ilgili kurumları da çeşitli yatırımlar yapmaya itmiştir. Böylelikle yerüstündeki ulaşım ve trafik problemlerine çözüm sunmak amacıyla yeraltının kullanımı kaçınılmaz olmuştur. Yerin altına inşa etmek zorunda kaldığımız ulaşım tünelleri, demiryolu tünelleri, temiz-atık su tünelleri gibi birçok yeraltı yapısı tünelcilik alanındaki gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. Çalışmamızın da konusunu oluşturan, toplu taşıma ve hız özellikleri gibi bir çok yönden ulaşım problemine çözüm sunan metro tünelleri, son yıllarda ülkemizin metropollerinde de sıklıkla tercih edilmeye başlanmıştır. Tünelcilik alanındaki gelişmelerle birlikte birçok yöntemle tüneller açılabilir hale gelmiş, son olarak da makine ile kazı yapan Tunnel Boring Machine (TBM) diye adlandırılan tünel açma makineleri icat edilmiştir.

Her ne yöntemle yapılırsa yapılsın mühendislik gereği yapılarda meydana gelecek deformasyon ve deplasmanların izin verilen sınırlar içerisinde kalması gerekmektedir. Bu çalışmada, tünelcilikte kullanılan metotlar ve deformasyon konusu ayrıntılı olarak incelenerek, Kocaeli bölgesinde NATM ile yapılması planlanan bir metro projesinin verileri, sonlu elemanlar metodu ile çalışan Plaxis 2D programı ile modellenmiştir. Tünelin inşa edileceği zeminin, yüzey kotundan olan derinliğinin deformasyonlara etkileri ve güvenlik sınırı araştırılmıştır. İlgili tünelin aksında yüzey kotunda yapılması planlanan bir bina yükünün de derinliklere bağlı olarak deformasyonlara etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, modellenen tüneldeki maximum deformasyonun tünel aksı üzerinde yapı olduğu durumda, 17 metre derinlikte ve tünel tepe noktasında olduğu gözlenmiştir. Deformasyon 0,01295 m (yaklaşık 13 mm) mertebesinde ölçülmüştür. Efektif gerilmelerin tünel aksı üzerinde yapı olsun olmasın, derinlikle arttığı gözlenmiştir. Yer değiştirmelerin yüzeye yakın derinliklerde, tünel aksı üzerinde yapı olması durumunda maximum olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deformasyon, NATM, Plaxis, Sonlu Elemanlar Metodu, Tünel.

STUDY ON THE EFFECT OF EXCAVATION DEPTH ON THE DEFORMATION IN A NATM TUNNEL EXAMPLE

ABSTRACT

The utilization of underground tunnels has become inevitable in order to provide solutions to transportation and traffic problems on the surface. In order to provide solutions to transportation problems such as public transport and speed in the large metropolitan areas in our country, metro tunnels have recently become the preferred solution which constitute the subject of this study.
In this study, the methods used in tunneling and deformation concept are examined in detail and the data of a metro project planned to be built with NATM in Kocaeli region is modeled with the Plaxis 2D program using the finite element method. By alternating the excavation depth and observing the deformations over the tunnel structure, proper safety limits have been investigated. Similarly the effect of constructing a planned building at the surface, over the tunnel axis is investigated depending on varying excavation depths. As a result of this study, it is observed that the maximum deformation in the modeled tunnel occurred at 17 meters deep and over the top of the tunnel with a building over the tunnel axis. The deformation was measured at a range of 0,01295 m (about 13 mm). Regardless of the building over the tunnel axis at the surface, it has been observed that effective stresses have increased significantly with the increasing excavation depth. In the case of a building structure over the tunnel axis at the surface, it has been observed that displacements are maximum at depths close to the surface.

Keywords: Deformation, NATM, Plaxis, Finite Element Method, Tunnel.

GİRİŞ

Yeraltı kullanımının zaruri olmasıyla birlikte araştırmacılar öncelikle kayayı tanımak ve tanımlamak istediler. Bu nedenle yaklaşık elli yıldır süre gelen bir dizi çalışma ve araştırma sonucu çeşitli kaya sınıflandırma sistemleri geliştirdiler. Kayanın tanımlanması ile birlikte de bir dizi tünel açma teknikleri geliştirildi. Birbirine benzer özellikler gösteren tünel açma teknikleri zamanla yerini modernize sistemlere bıraktı. Günümüzde sıklıkla tercih edilen Yeni Avusturya tünel açma metodu (NATM) ve kazı ile destekleme işini tek başına yapabilen kazıcı makineler (TBM) ile tünel açma yöntemi de bunlardan bazılarıdır. Tünelcilik alanında birbirini izleyen bir dizi gelişmeyle beraber, tünel açımı sırasında karşılaşılan çökme gibi negatif durumlar da destek sistemlerindeki gelişmeleri beraberinde getirmiştir.

Doğru tanımlanmış bir kayada, doğru teknik ve destek elemanları ile tünel açımı planlandığında, meydana gelecek deformasyon ve deplasmanlar önceden öngörülebilir olmalıdır. Bu deplasmanların izin verilen sınırlar içerisinde kalması da mühendislik hesaplamalarının amaçlarındandır. Yapının inşa öncesi modellenmesi ve çözümlenmesi için geliştirilmiş birçok bilgisayar programı mevcuttur. Bu modelleme ve analizler ile inşa sonrası gerçekleşebilecek deformasyonlar ve deplasmanlar gerçeğe çok yakın olarak tahmin edilebilmektedir.

Bu çalışmada sonlu elemanlar metoduyla modelleme ve analiz yapan Plaxis 2D programı kullanılmıştır. Kocaeli'nde yapılması planlanan bir metro projesinin gerçek verileri kullanılarak modelleme yapılmıştır. Tünel kazı derinliğinin deformasyonlara etkileri araştırılmış ve yorumlanmıştır.

1. TÜNELCİLİK ALANINDA DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR

1.1. Kaya Sınıflandırma Sistemleri

Tüneller, kazı işlemi öncesinde yapılan bir dizi araştırma ve çalışmanın sonucudur. Tünel projelendirme çalışmaları öncesinde, yapının emniyet ve ekonomiklik ilkelerine uygun bir şekilde tasarlanabilmesi için tünel güzergâhının jeolojik özellikleri titizlikle incelenmiş ve iyi tespit edilmiş olmalıdır. Bu amaçla çeşitli araştırmacılar kaya kütlesini tanımlamak için 1946 yılından bu yana birçok sistem geliştirmişlerdir. Sistemlerin bir kısmı kendilerinden önce önerilen sistemlerin geliştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. 1946 yılından bu zamana kadarki başlıca planlama metotları tasarım yöntemlerine göre ampirik, gözlemsel ve analitik olarak özetlenmiştir. Ampirik tasarım yöntemleri; Terzaghi'nin kaya yükleme sınıflaması, Stini, Rabcewicz ve Lauffer sınıflamaları, Deere'nin kaya kalitesi sınıflaması, RSR içeriği ve geomekanik sınıflamadır. Gözleme dayalı tasarım yöntemleri; kaya gözlem teknikleri, Yeni Avusturya Tünel metodu (NATM) ve birleşme-hapsetme yöntemidir. Analitik tasarım yöntemi; sayısal modelleme, fiziksel modelleme ve kırılma kriteridir. Başlıca kaya kütle sınıflama sistemleri; sistemleri geliştirenler, sistemleri hangi ülkede geliştirdikleri ve uygulama alanları gözetilerek Tablo 1.1'de özetlenmiştir.

Tablo 1.1. Uygulama alanları ve yıllara göre kaya kütle sınıflama sistemleri

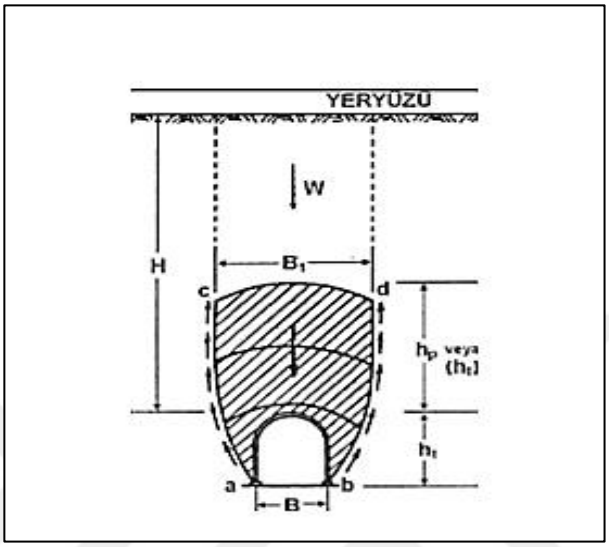
Sınıflama Sisteminin Adı		Öneren ve Tarih	Geliştirildiği Ülke	Uygulama Alanları
Kaya Yükü		Terzaghi, 1946	ABD	Çelik destekli tüneller
Desteksiz Duraylı Kalabilme		Lauffer, 1958	Avustralya	Tünelcilik
NATM		Rabcewicz, 1963	Avustralya	Tünelcilik
RQD		Deere vd. ,1967	A.B.D.	Karot loglaması, tünelcilik
RSR Kavramı		Wickham vd., 1972	A.B.D.	Tünelcilik
RMR Sistemi		Bienawski, 1973 (En son modifikasyonu, 1998-A.B.D.)	Güney Afrika (En son hali A.B.D.)	Tüneller, madenler (Şevler, temeller)
RMR Sisteminin Modifikasyonu		Weaver, 1975	Güney Afrika	Sökülebilirlik
		Laubscher, 1977	Güney Afrika	Madencilik
		Olivier, 1979	Güney Afrika	Bozunabilirlik
		Ghose ve Raju, 1981	Hindistan	Kömür madenciliği
		Moreno Tallon, 1982	İspanya	Tünelcilik
		Kendorski vd., 1983	A.B.D.	Sert kaya madenciliği
		Nakao vd., 1983	Japonya	Tünelcilik
		Serafim ve Pereria, 1983	Portekiz	Temeller
		Gonzalez De Vallejo, 1983	İspanya	Tünelcilik
		Ünal 1983	A.B.D.	Kömür madenciliğinde tavan saplaması uygulamaları
		Romana, 1985	İspanya	Şev duraylılığı
	Düzeltilmiş RMR'85	Newman ve Bieniawski, 1985	A.B.D.	Kömür madenciliği
		Sandbak, 1985	A.B.D.	Delinebilirlik
	Basitleştirilmiş RMR'85	Brook ve Dharmerante,1985	Sri Lanka	Madencilik
		Smith, 1986	A.B.D.	Taranabilirlik
		Venkateswarlu, 1986	Hindistan	Kömür madenciliği

Tablo 1.1. (Devam) Uygulama alanları ve yıllara göre kaya kütle sınıflama sistemleri

		Robertson, 1988	Kanada	Şev duraylılığı
	RMR'89	Bieniawski, 1989		
	M-RMR	Ünal ve Özkan, 1990	Türkiye	Madencilik
	Düzeltilmiş RMR'93	Sheorey, 1993	Hindistan	Kömür madenciliği
		Celada vd., 2014		
Q Sistemi		Barton vd., 1974	Norveç	Tüneller ve geniş yeraltı boşlukları
Q Sisteminin Modifikasyonları		Kristen, 1982	Güney Afrika	Kazılabilirlik
		Kristen, 1983	Güney Afrika	Tünelcilik
		Grimstad ve Barton, 1993	Norveç	Tüneller ve geniş yeraltı boşlukları
Dayanım Boyut		Franklin, 1975	Kanada	Tünelcilik
Temel Jeoteknik Tanımlama		ISRM, 1981		Genel teknik iletişim amaçlı
Birleştirilmiş Sınıflama sistemi		Williamson, 1984	A.B.D.	Genel teknik iletişim amaçlı

Terzaghi (1946) , kayaları ve bunlardan beklenen yükleri sınıflandırmıştır. 35 yıldan fazla bir süre etkili olarak kullanılan bu sınıflama, ilk ayrıntılı sınıflama olması bakımından da tarihsel bir önem taşır. Kayaçlar; sağlam, tabakalı, orta derece eklemli, bloklu veya kenetli, parçalı ve sıkışan kaya olarak gruplara ayrılmıştır. Sayısal bir ifade özelliği taşımayan bu sınıflandırma, daha çok modern kaya sınıflandırma sistemlerinin temelini oluşturmaktadır. Bu sınıflandırma çelik iksa önlemleri bakımından uygun bir sınıflandırmadır. Püskürtme beton veya kaya bulonları gibi modern destek sistemlerinin kullanıldığı tünelcilik yöntemleri için ise uygun değildir [1]. Terzaghi, laboratuvarda kum kullanarak yaptığı fiziksel modeller ve Alpler'de çelik bağ tahkimatlı tünellerdeki tecrübelerine dayanarak bu çalışmayı ortaya koymuştur. Terzaghi'nin kaya yükü kavramını açıklamak üzere Şekil 1.1'de örnek basitleştirilmiş bir model verilmiştir. Tünel açımı sırasında boşluğun yanlarında ve üzerinde kaya kütlesi gevşeyecektir. Böylelikle 'abcd' alanı içerisindeki gevşeyen kaya, boşluğa doğru hareket etmek isteyecektir. 'ac' ve 'bd' sınırlarındaki sürtünme kuvveti ise bu harekete engel olmaya çalışacaktır. Bu sürtünme kuvvetleri arazi

yükünün büyük bir kısmını da tünelin iki tarafındaki kaya kütlesi üzerine aktaracaktır. Böylelikle tünel tavanı ve yanlarının sadece geriye kalan h_p kaya yükünü taşıması gerekecektir. B_1 genişliği, tünelin genişliği (B) ile yüksekliğine (h_t) ve kaya kütlesinin özelliklerine bağlıdır [2].



Şekil 1.1. Terzaghi'nin kaya yükü kavramı [2]

Terzaghi'nin sınıflandırmasını, Deere vd. ve Rose daha sonra bazı değişiklikler yaparak ve RQD kavramını da sisteme dâhil ederek yeniden düzenlemişlerdir.

Stini (1950) , kaya kütlesindeki faylanma, kırılma, parçalanma zonları gibi yapısal kusurların önemini vurguladığı yeni bir sınıflandırma yapmıştır. Fay dalım yönüne paralel tünel açımından kaçınılması gerektiğini belirtmiştir. Basınca göre 9 sınıfa ayırdığı kayaçları, kayaç cinsi ve çatlak boyuna göre yeniden yorumlamıştır [1,2].

Rabcewicz (1958), kayanın kendisini tutma süresi ve geçici/kalıcı destek türüne göre bir sınıflandırma yapmıştır. Bu sınıflandırmada kimyasal bakımdan ayrışma durumuna bağlı kalınmıştır.

Lauffer (1958), aktif iksasız genişlikten bahsederek yeni bir sınıflandırma ortaya koymuştur. Bu çalışmasında Stini'nin (1950) çalışmasından esinlenmiştir. Destek sisteminin türü ve miktarını, tünel genişliği ve tünelin kendini tutma süresine bağlı olarak belirlemeye çalışmıştır. Aktif iksasız genişlik, tünelin genişliği veya iksadan aynaya olan uzaklık olarak tanımlanmaktadır. Lauffer'e göre herhangi bir aktif iksasız kaya genişliği için tünelin ayakta kalma süresi, kaya kütlesi sınıfları ile ilgilidir.

Bahsedilen tünelin kendini tutma süresi ise tünelin kazıdan sonra iksasız olarak ayakta kalabileceği zaman aralığıdır. Yöntem sayısal veriler içerse de, kaya sınıflandırmasından oldukça uzaktır. Birçok kez de değişikliğe uğramıştır [1,2].

Deere (1964), RQD olarak adlandırılan kaya kalitesi sınıflamasında 10 cm ve daha uzun karot parçalarının, elde edilen toplam karot uzunluğuna oranına göre bir sınıflama yapmıştır. Objektif ve oldukça sayısal veriler içeren bir sınıflandırmadır. Ancak yeterli sondaj yapılmaması durumunda zemindeki anizotropik durumları göz ardı eder. Merrit (1972) tarafından da bu sınıflamanın kaya tünellerde destek gereksinimi tahmininde çok değerli bir yol gösterici olduğu kabul edilmiştir. Brekke ve Howard (1972) ise bu sistem için tünel stabilitesinde fay kili ve kil tabakasının etkisini tartışmıştır. RQD tanımlaması; eklem pürüzlülüğü, sıkılık, eklem yönelimi ve eklem dolgusu gibi özelliklerin tanımlanması için yetersiz kalmıştır. Kayanın özelliği ile RQD arasındaki ilişki Tablo 1.2'deki gibidir [1,2].

Tablo 1.2. Kaya kalitesi ile RQD arasındaki ilişki

RQD%	Kaya kalitesi
25	Çok zayıf
25-50	Zayıf
50-75	Orta
75-90	İyi
90-100	Çok iyi

Deere ve Miller (1966) geliştirdikleri yeni sistemde, kayaçların dayanım özelliklerini dikkate almışlardır. Tablo 1.3'de gösterilen bu sınıflandırmada, kayacın tek eksenli basınç dayanımı ile tanjant elastisite modülü oranı değerleri esas alınmıştır [1,2].

Tablo 1.3. Deere ve Miller (1966) sınıflaması

Tek Eksenli Basınç Direci (kg/cm^2)	Modül Oranı	Kaya Dayanımı	Örnek Kayaç
>2200	-	Çok yüksek	Kuvarsit, gabro, bazalt
1100-2200	>500	Yüksek	Granit, gyans
550-1100	200-500	Orta	Şeyl, kumtaşı
275-550	< 200	Düşük	Kömür, şist, silttaşı
< 275	-	Çok Düşük	Kaya tuzu, çalk

Grob (1967); sağlam, hafif kırılgan, kırılgan ve baskılı olarak tanımladığı kaya malzemeyi; tahkimat, çatlak sayısı, yapı çevresindeki gerilmeler, kazı profilindeki gerilmeler ve tünel duvarına binen yük olarak yorumlamıştır.

Denkhaus (1970), kayaç özelliklerinin elde edilmesiyle varılan kesin kararlar arasında bir eksikliğe işaret etmiştir. Bjerrum (1970) ise kaya bulonu projelendirmeleri yapılırken kayaların genişleme özelliğinin göz ardı edildiğini ve RQD' nin yaptığı kaya tanımlamasının yetersiz olduğunu savunmuştur. Çünkü aynı RQD indisine sahip iki kaya içinde tünel açıldığında, kayalar değişik davranışlar gösterebilirlerdi. Cecil'in (1970) yaptığı tanımlama ise, RQD değerinin her bölgede ölçülen eklem takımlarının sayısına bölünmesine dayanan bir sistem idi.

Breeke ve Howard (1972), RQD sınıflandırmasında bir açıktan bahsetmişlerdir. Boşluğu çevreleyen kaya kütlesinin davranışını doğrudan etkileyen eklem dolgusu ve eklem yönelimi hakkında RQD sınıflandırmada sayısal değerler bulunmadığına işaret etmişlerdir. Bu nedenle dolgu ve süreksizliklerin doğuracağı sonuçları yeniden özetlemişlerdir [1,2].

Wickham, Tiedemann ve Skinner'ın (1972) A.B.D. 'de geliştirdikleri RSR (Rock Structure Rating) kavramı, Terzaghi'nin sınıflandırmasından sonraki ilk ayrıntılı kaya kütle sınıflama sistemidir. Bu sistem jeolojik parametreler ve yapı parametreler olmak üzere iki genel kategoride kaya kütlesini etkileyen faktörleri göz önüne almıştır. Jeolojik parametreler; kaya tipi, eklem örneği, eklem yönelimi, süreksizliklerin tipi, büyük faylar, ayrışma ve bozuşmalar, kayaç gereç özellikleridir. Yapı parametreleri ise; tünel boyutu, tünelin kazı yönü ve kazı metodudur. RSR değeri 19'dan küçük olan

kayalarda kuvvetli iksa gerekir. RSR değeri 80 ya da daha fazla olan kayalarda ise iksa gerekmediği sonucuna varılmıştır. Oldukça sayısal verilere dayanan, objektif bir yöntem olmasına karşılık kaya ortamını tanımlamak için yetersiz bir yöntemdir. Çelik iksa için geliştirilen bu sistem, kaya bulonu ve püskürtme beton kullanılarak yapılan destekleme için de yetersizdir. Bu nedenle kaya bulon ve püskürtme beton seçimi için tavsiye edilmez. RSR puanı; jeolojik yapı, geometri ve yeraltı suyu durumu koşullarından elde edilen değerlerin toplamı şeklinde elde edilmektedir.

Bienawski (1973, 1974 ve 1976), kaya kütlesinin mühendislik verilerini saptamaya yarayan geomekanik RMR sistemini 1973 de tanıtmış, 1974 ve 1976 yıllarında ise geliştirmiştir. Bu sistem 6 parametreye dayandırılmaktadır. Bunlar; eklemlerin durumu, yönelimi, sıklığı, yeraltı suyu gözlemleri, kayaya ait tek eksenli basınç direnci, sondaj karotlarından elde edilen RQD değerleridir. Tünel, büyük yapı temelleri, şev yamaçları ve yeraltı inşaatında uygun kaya destek önlemlerinin seçiminde bu sistem kullanılmaktadır. Bu sistemin kullanılışına baktığımızda, eklemlerin yönelimi hariç 5 parametre ile kaya kütlesinin genel bir değerlendirmesi yapılır. Sonrasında tünel, yamaç ile ilgili olup olmamasına bağlı olarak, eklemlerin doğrultu ve eğim yönlerine göre değerlendirmeler düzeltilir. Bu sınıflamayı uygulamak için kaya kütlesi bölgelere ayrılır. Bu bölgelere ayırma işlemi, her bölgeye tek tip iksa gerektirecek belirli özellik ve benzer niteliklere sahip olacak şekilde yapılır. Böylelikle her bölge için de önemli derecelendirmeler seçilir ve her sınıfın yorumu yapılır. Süreksizlikler dışında kaya ortama ait parametreler hakkında oldukça geniş bilgiler sunabilen bir sistemdir. Bieniawski (1989) 'nin önerdiği RMR ile Barton vd.'nin (1974) önerdiği Q sistemleri birbirinden bağımsız olarak geliştirilmiş sitemlerdir. İki sınıflandırma da modern tünel destek sistemlerinden kaya bulonu ve püskürtme betonun seçimini sağlayacak niceliksel veriler sağlamaktadırlar.

Barton, Lien ve Lunde (1974) tarafından geliştirilen kaya sınıflandırma sistemi Q-sistem, İskandinavya'daki 200'den fazla maden galerisi ve tünellerde yapılan araştırmalara dayanmaktadır. İksa tasarımına yönelik bir sistem olup, nicelikseldir. RMR ve Q sistem; kırıklı kaya kütleleri, zayıf, tabakalı, anizotropik, kil içerikli kaya kütlelerini tanımlamada yetersiz kalmıştır. Bu nedenle Ünal ve Özkan (1990) tarafından M-RMR geliştirilmiştir. RMR, Q ve M-RMR sınıflama sistemleri öncelikle jeoteknik aralıkların belirlenmesini öngörmektedir. Bu sistemler toplam 28 adet

jeoteknik parametreyi dikkate almaktadır. Bu parametreler değerlendirilerek indeks değerler bulunmaktadır. 1993 ve 2002 yıllarında sistem değişikliklere uğramıştır. Temeli puanlama metoduna dayanan RMR, Q ve RMi sistemleri, tünelcilikte ön destek sistemlerinin belirlenmesinde kullanılır. Puanlamada su durumu, kaya malzemesinin mekanik özellikleri ve süreksizlikler göz önüne alınır. Elde edilen sonuca göre de destek sistemi belirlenir [1,2].

Q sistemde kaya kütle kalitesi Denklem (1.1) ile bulunur;

$$Q = (RQD / Jn) \times (Jr/Ja) \times (Jw/SRF) \quad (1.1)$$

Burada, RQD: Kaya kalitesi tanımlaması, Jn: Eklem takımı sayısı, Jr: Eklem prüzlülük sayısı, Ja: Eklem ayrışma sayısı, Jw: Eklem suyu azaltma faktörü ve SRF: Gerilim azaltma faktörü olmaktadır.

Kaya kütlesi; kaya kalite göstergesi, eklem takımı sayısı, eklem pürüzlülük sayısı, eklem alterasyon sayısı, eklem suyu azaltma sayısı ve gerilim azaltma faktöründen oluşan 6 parametre için ayrı ayrı tespit edildikten sonra Denklem (1.1) yardımıyla Q sayısı elde edilir. Q sistemde bu sayıya göre de destekleme tipi önerilmektedir.

Palmstörm (1995), Kaya Kütle İndeksi sınıflama sistemini (RMi) geliştirmiş, Hooke ve Brown (1997) ise ilk defa Jeolojik Dayanım İndeksi'ni (GSI) önermiştir. GSI sistemi neredeyse tamamen görsel değerlendirmeye dayalı pratik bir sistemdir. Gözleme dayalı olmasından dolayı önemli hataları da beraberinde getirmektedir. Sönmez ve Ulusay (2002) yöntemi geliştirerek bir miktar daha sayısal hale getirmişlerdir. Son olarak; Q, RMR, RMi ve GSI geliştirilerek günümüzdeki şeklini almışlardır. Şimdilerde önerilen en güncel sistem RMQR diye adlandırılan, Aydan vd. (2014) tarafından yapılmış sınıflandırmadır. Ayrışma derecesi, süreksizlik set sayısı, süreksizlik açıklığı, süreksizlik koşulları, yeraltı suyu akış durumu ve emilme koşulları sayısallaştırılarak bu sistemde yeniden sunulmuştur. Böylelikle puanlamaya dayalı daha sayısal bir çalışma ortaya konmuştur. Fakat yine de süreksizliklerin derinlikle değişimleri tam anlamıyla ortaya konulamadığından ve tünel kazı aynasının durumu kazı öncesinde yorumlanamadığından dolayı sistemin uygulamada güçlükleri mevcuttur [3].

Rabcewicz (1964) tarafından tanıtılmış NATM, diğer sistemler gibi kesin önerilmiş destek elemanları yerine kullanılması gereken destek elemanlarının türünün belirtildiği bir sistemdir. NATM, ikinci bölümde diğer tünel açma yöntemleri ile birlikte ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

1.2. Tünelcilik Alanında Yapılan Araştırmalar

Kavvadas vd (1996), Atina metrosunun yerüstünden 15-20 metre derinlikte bulunan 21 adet yeraltı istasyonu inşaatındaki jeoteknik sorunları araştırmıştır. 18 metrelik tünel güzergâhının büyük bir bölümü şist, killi ve kalkerli kumtaşı, grovak, şeyl ve kireçtaşlarından oluşmaktadır. Faylanma buralarda büyük çaplı bozulmalara neden olmuştur. Tünelin inşa derinliği bakımından sığ tünellere önemli bir örnek olan bu tünellerin inşasında ana problem, aynada meydana gelen akma ve çökmedir. İki farklı kazı ve destekleme tipi uygulanmıştır. Her iki uygulamada da oluşan nihai çökmeler pratik olarak aynı kalmıştır. Bu çökmelerin kazı esnasında mevcut olan yüksek gözenek suyu basıncının kaybolmasından kaynaklandığı sonucuna varmışlardır.

Dalgıç (2000), 625 m uzunluğunda ve 10,60 m yüksekliğindeki sığ ve gevşek zeminde inşa edilmiş olan Beykoz tünelini incelemiştir. Tünel RQD değeri %25 tir. Desteklenen üst yarının çökmesi ve kazı sırasında tahkimatsız bölgede gözlenen kaya düşmelerinin nedeni olarak püskürtme betonun uygulama zamanı ve priz alma süresi gösterilmiştir. Tünelde meydana gelen çökmelerin sebebi olarak ise tünel içerisindeki yeraltı suyu girişi gösterilmektedir. Bu dez avantajların giderilmesi için ise, kazı adımlarının azaltılması, boru kemer şemsiye kullanılması ve drenaj önerilmiştir.

Karaoğlan (2002), NATM metoduyla kaya zeminde açılan bir tüneli incelemiştir. NATM prensiplerine göre çalışan Smap-3d ve Tuna-plus ile modelle yapılmıştır. Kazı aşamaları ve desteklemeler göz önünde bulundurularak öncelikle tüm dağ yüklenmiş ve kemerlenme mesafesi bulunmuştur. Kaya ortamın davranışının modellenmesi amacıyla Murrel ve Hoek kırılma kriterleri oluşturulmuştur. İlgili programlar ile Çayeli Tüneli analiz edilmiştir ve tünel kesiti ile çevresinde meydana gelen deplasmanlar, gerilmeler ve plastikleşen bölgeler belirlenmiştir. Tünelde düşey doğrultuda max 2,90 mm, yatay doğrultuda da 0,40 mm deformasyon meydana geldiği hesaplanmıştır.

Dalgıç (2003) araştırmasında, yüzeyden 15-20 metre derinlikte açılmış 6,5 km uzunluğunda 5 metre çaplı Tuzla tünelini araştırmıştır. Tünel inşasında NATM uygulanmıştır. Püskürtme beton, tel hasır, çelik iksa, kaya bulonlamasının uygulandığı tünelin fay zonu bölgesinde ise 2 kat tel hasır kullanılmıştır. Güzergâh boyunca 15 cm kalınlığında kullanılan püskürtme beton faylı bölgede 20 cm olarak uygulanmıştır. Aynı zamanda fay zonunda forepole umbrella, parçalı kazı, jet-grouting gibi ilave önlemlerde alınmıştır.

Yassaghi ve Salari-Rad (2004), andezit ve tüfler içerisinde açılan, 5 km uzunluğunda ve 6 metre genişliğindeki Taloun tünelini incelemişlerdir. Tünel eksenini kesen fay zonunun varlığını ortaya koymuşlardır. Çalışma güzergâhında bulunan fay zonu ve kontak zonu parametreleri üzerinde durmuşlardır. Güzergâh boyunca %55-75 değerinde olan RQD, kontak zonda %25 lere gerilemiştir. Çalışmanın sonucunda, tüneli çevreleyen kaya malzemenin dayanımsızlığı sebebiyle, hızlı bir destekleme ve kalıcı beton tahkimat zorunluluğu kanısına varmışlardır. Tahkimatın hızlı yapılmaması halinde, gerilmelerin farklı şekilde dağılacağı ve tünel yarıçapının düşmesine neden olacağı yorumunda bulunmuşlardır.

Aydın vd. (2004), NATM metoduyla, filiş ve altere olmuş kireç taşında açılan 55 km uzunluğunda ve 13 metre genişliğinde bir otoyol tüneli incelenmiştir. Tünel güzergâhında mevcut fay zonu incelendiğinde, özel destek sistemi gerektiren bir yapı olduğu sonucuna varılmıştır. Fay zonu bölgesinde, 6 metrelik 1,5 inçlik şemsiye borular, BS.20 tipi püskürtme beton, tel hasır, çelik iksa ve 6-8 metre uzunluğunda 28 mm çaplı kaya bulon ve mini kazıkların tahkimat elemanı olarak kullanılması önerilmiştir.

Kontothanassis vd. (2005), NATM metoduyla inşa edilen, konglomera, marn ve kil zeminde açılmış Atina metrosunun istasyon tünellerini incelenmiştir. Kesit alanları $195m^2$-$215\ m^2$ arasında olan tüneller, yüzeyden yaklaşık 18 metre derinliktedir. 40 cm kalınlığında C25/30 kalitesinde püskürtme beton, 6 metre uzunluğunda 1 metre arayla kaya bulonları, 12 metre süren uzunluğu ve 2 sıra tel hasır ile tahkimat sağlanmıştır. Kazı adımları 1 metredir. Bu çalışmada kaya bulonları ve sürenler ayna stabilitesinin sağlanmasında en büyük ölçüt olarak gösterilmektedir. Bu iki elemanın birlikte kullanımının, ayna önünde bulunan plastik zonun ve yüzey oturmalarının kontrolü

açısından son derece gerekli ve önemli olduğu kanısına varmışlardır. Ayrıca aynaya uygulanan fiberglas boru ile sürenlerdeki sapma ve dönme momenti etkisinin azaldığı sonucuna varmışlardır.

Hao ve Azam (2005), nümerik analiz yönemini kullanarak yaptıkları çalışmada tünel boşluğu çevresindeki deplasmanlar ve plastik zonu incelemişlerdir. Araştırma sonucunda fayın, tünel açıklık stabilitesini doğal ya da faysız duruma göre negatif yönde oldukça etkilediğini ortaya koyuşlardır. İncelemeleri sonucunda fayın en çok yeraltı boşluğunun tepe noktasında olduğu durumda ve yine fayın tünel eksenini kestiği kısımda tünel stabilitesini en çok etkilediği sonucuna varmışlardır.

Hajebi (2008), EPB tipi TBM ile açılan ikiz tüneller çevresindeki oturma ve deformasyonları irdelemiştir. Tünel civarında meydana gelen deformasyon ve oturmaların projede ön görülen sınırlar içinde kaldığı ve geoteknik bir problem ile karşılaşılmadığı sonucuna varmıştır. Hajebi, bunda kullanılan TBM tipinin büyük rol oynadığı kanısına varmıştır.

Doğruoğlu (2009), yaptığı çalışmada şehir içinde açılan Otogar-Bağcılar metrosunun, Otogar-Kirazlı bölümündeki 6 adet tünel kesiti üzerinde zemin yer değiştirme ve deformasyonları sonlu elemanlar metoduyla incelemiştir. Bunun için 3 farklı yaklaşımdan yararlanmıştır. İlki tünel açımı sırasında oluşan zemin kaybını çizgisel yük olarak kabul eden yaklaşım, ikincisi Gauss oturma eğrisi olarak bilenen yöntem ve üçüncüsü de sonlu elemanlar yöntemi ile kullanılan Plaxis programı ile deplasman hesaplamasıdır. Sonuçta her 3 yöntemin de gerçeğe çok yakın değerler verdiği ancak Plaxis ile daha iyi ve ayrıntılı çözümler elde edileceği vurgulanmıştır.

Aktaş (2009), Yeni Avusturya tünel açma yöntemi ile inşa edilmiş Kâğıthane-Piyalepaşa tünelleri, Plaxis 3D Tunnel paket programıyla analiz edilmiştir. Güzergâh boyunca; türbidit, silttaşı, şeyl, kil taşı, grovak, çamurtaşı geçilmiştir. Güzergâh kaya kalitesi ve türlerine göre bölge 5 homojen bölgeye ayrılmıştır. Destek sistemleri olarak 25-30 cm püskürtme beton, I160 çelik iksa, 26 mm çaplı 4 metrelik 17 adet (her bölge için ayrı ayrı) bulonlar kullanılmıştır. Farklı değişkenlerin tünel ve çevresindeki deformasyona etkileri için 3 farklı değişken seçilerek modelleme yapılmıştır. Bunlar kaya ortamı, tünel boyu ve kazı ilerleme adımıdır. Tabakalı kaya ortamı için 15 m, 45 m ve 65 m örtü kalınlıklı 6 metre uzunluğunda bir tünel

modellenmiştir. Homojen kaya ortamı için 15 m, 45 m ve 65 m örtü kalınlıklarında 6 m ve 12 m uzunluğunda tünel modellemeleri yapılmıştır. Analizler sonunda örtü kalınlığı etkisinin, modellemede kullanılan jeolojik ortam farklılıklarından dolayı tam olarak gözlenemediği fakat en küçük düşey yer değiştirmelerin örtü kalınlığı 15 m olan kesit (sığ tünel) için hesaplandığı görülmüştür. 45 m ve 65 m örtü kalınlığına sahip tünellerde hesaplanan maximum düşey yer değiştirme değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu ve sığ tünel için elde edilen değerden 7-8 kat fazla olduğu gözlenmiştir.

Polat (2010), Yeni Avusturya tünel açma yöntemi ile inşa edilmiş; kaya sınıfı B1, B2, B3 olan Arhavi tüneli, gerçek veriler ile Plaxis paket programıyla modellenmiş ve tünel güzergâhındaki deformasyonlar araştırılmıştır. Tünel güzergâhı 4 farklı homojen bölgeye ayrılmış, 3 adet en kesit oluşturulmuştur. Modellenen bu en kesitler üzerinde analizler yapılmıştır. Aşamalı kazı ile ilk önce tünelin üst yarı kazısı ve tahkimatı yapılmış ardından alt yarı kazı ve tahkimatına geçilmiştir. Analiz sonrasında efektif gerileme dağılımları, düşey ve yatay deplasmanlar ve toplam bölgesel deplasmanların dağılımı, tahkimata etkiyen iç kuvvetler ve deplasmanlar elde edilmiştir. Arhavi tünelinde öngörülen tahkimatların yapılan hesaplar sonucunda yeterli olduğu belirlenmiştir. Modellerin analizinde maximum deplasmanın 7 mm mertebesinde olduğu, maximum asal gerilmenin 623,74 kN/m^2 olduğu belirlenmiştir.

Burjus (2015), sonlu elemanlar yöntemiyle, killi bir zeminde tünel inşaatında oluşan yüzey deformasyonların tahminini sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmıştır. MC ve HS kriterine dayalı modellerden faydalanmıştır. Modelleme verileri gerçek verilerden alınmış olup, çalışmanın sonunda bir yapıyı temsil eden model bir yüzey yükünün yeri değiştirilmiş ve tünele etksini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlarla gerçek değerler karşılaştırılmıştır. Hardening soil modelinin zeminin sertliğini de hesaba kattığından dolayı daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Sakallı (2017), Belpınar tünelinin TBM ile inşasında karşılaşılan zemin özelliklerinin TBM performansına etkisini araştırmıştır. Tünel inşaasında EPB tipi tünel açma makinesi (TBM) kullanılmıştır. Makine kazı çapı 6,82 metredir. Makinenin toplm gücü 2.785 kW'tır. Çeşitli nedenlerden dolayı çalışılmayan günler ihmal edildiğinde 9,96 m/gün'lük bir hızla çalışmalar tamamlanmıştır. Tünellerde kullanılan raylı

lokomotif ve vagonlardan oluşan katar sisteminin bu tünel için doğru bir tercih olmadığı sonucuna varılmıştır. Belpınar tünelinde EPB tipi TBM'in kullanımını gerektiren bir durum olmadığı gözlenmiştir. Çıkarılan en önemli sonuçlardan biri de, suyun olmadığı bir ortamda peridotit kayaçta kazı ilerleme hızının serpantinit kayaçtaki kazı hızından %3 daha az olduğudur.

2. TÜNELLER VE TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

Ulaşımın da içinde bulunduğu birçok sorun, yerüstünü olduğu kadar yeraltının kullanımını da kaçınılmaz kılmıştır. Tünel olarak adlandırılan yeraltı yapıları; bir zeminin kazılıp desteklenmesi ile açılmış, iki ucu açık ve bir eğime sahip sistemlerdir [2]. Şekil 2.1'de tipik bir tünel kesiti ve bölümleri gösterilmiştir. Tünelcilikte kullanılan başlıca terimler;

Galeri: Yeraltında tek tarafı açık, eğik veya yatay olarak yapılan sistemlerdir.

Baca (Şaft): Yeraltına dik doğrultuda yapılan kazılara denir. Yukarı doğru eğimli olan galerilere baş yukarı, aşağı doğru eğimli olanlara ise baş aşağı adı verilir.

Oda: Bekletme veya dinlenme mekânları olarak kullanılan, geniş daire ya da buna benzer şekildeki boşluklardır.

Örtü: Tünel yapısının üstünde bulunan zemine denir.

Taban (Radye, Ters Kemer): Tünelin ilerlediği boşluktaki alt kısıma verilen addır.

Yan (Ayak, Duvar): Tünelin ilerlediği boşluktaki yan kısımlara verilen addır.

Tavan (Kemer): Tünelin ilerlediği boşluktaki üst kısımlara verilen addır.

Üzengi (Üzengi seviyesi): Tünel kemer kısmının ayaklarla birleştiği noktadır.

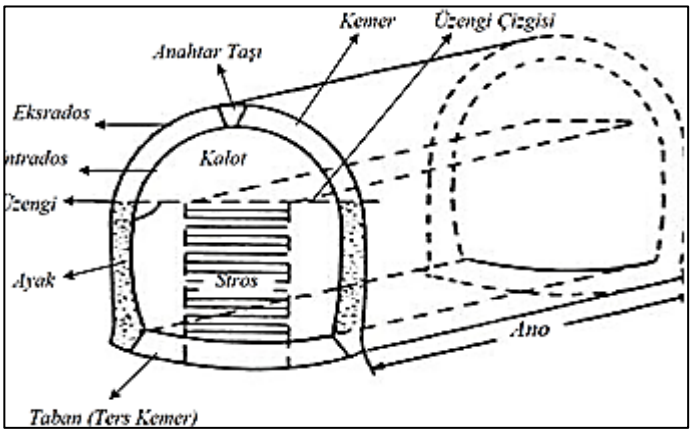
Kalot: Üzengi seviyesinin üstünde kalan kısma verilen addır.

Stros (Orta Kısım): Üzengi seviyesinin altında kalan kısma verilen addır.

Pasa: Tünel açımı sırasında tünelden çıkarılan malzemelere verilen addır.

Ano: İşlemin uygulandığı parçaya verilen addır.

Ayna: Tünel kesitinin kazıldığı kaya yüzeyine verilen addır [36].



Şekil 2.1. Tünel kesitinde tünel bölümleri şeması [36]

Genel anlamda tünel diye adlandırdığımız yeraltı yapıları; ulaşım amaçlı tüneller, temiz su-atık su tünelleri, derivasyon tünelleri, depolama tünelleri, askeri amaçlı yapılar ve madencilik yapıları olarak sıralanabilir [2]. Geçmiş medeniyetlerde insanlar; barınmak, avlarını saklamak, düşmandan korunmak ve su kemerleri inşa etmek amacıyla mağara ve tüneller açmışlardır. 19. Yüzyıla gelindiğinde ise demiryollarındaki gelişmeler, tünel inşa sistemlerinin de gelişmesine neden olmuştur. Çünkü yapılan demiryollarının çoğu yerde; dağ, nehir, vadi, karayolu ve çeşitli engelleri aşması gerekmiştir. Böylelikle mekanize sistemlerin gelişimi ile birlikte neredeyse her türlü ortamda tünel açılabilir hale gelinmiştir. Bunun yanında delme, destekleme ve kaplama yöntemlerindeki gelişmeler de her türlü zeminde tam güvenlikte tünel inşasına olanak sağlamış ve inşaat hızının da artmasına sebep olmuştur. 1930'lardan başlayıp, 40'lı, 50'li ve 60'lı yıllarda ortaya çıkan birçok yeni fikir de, tünellerin tasarımını sanatsal ve bilimsel anlamda etkilemeye başlamıştır. Buna sebep, büyük ölçüde Dr. Karl Terzaghi'nin üzerinde durduğu geoteknik mühendisliği, mühendislik jeolojisi ve yeraltı araştırmaları gibi kavramların ortaya çıkmasıdır. Tasarım için yoğun jeolojik haritalama çalışmaları ve yeraltı araştırma programlarını tavsiye etmesi ve tüm bunların yanında bir de inşaat sırasında saha gözlemleri yapması onu birçok araştırmacıdan ayırmıştır. Terzaghi'nin yayınladığı tünel desteğinde kaya defektleri ve yükleri ile ilgili tezi, 1946 yılından bugüne kadar bu konudaki tünel literatüründe en iyi ve en bilgilendirici tartışmalardan biri olmuştur. Bu yayının bir sonucu olarak Terzaghi, tünel astarına uygulanan toprak yükleri ve kaya özellikleri ile davranışsal özellikleri ilişkilendiren ilk kişi olmuştur.

Tünelcilik alanında süregelen gelişmeler ile aşağıda listelenen bir dizi inşaat inovasyonu gerçekleşmiştir. Bunlar;

- Kaya cıvataları
- Püskürtme beton
- Tünel delme makineleri
- Basınçlı yüz kalkanlar
- Zemin iyileştirme teknolojileri

Tüneller 1960'lı yıllardan başlayarak, özellikle 90'lı yıllardan itibaren su kaynağı ve ulaşım projeleri için tercih edilen alternatif yapılar haline gelmiştir [4]. Şimdilerde ise tüneller, artan dünya nüfusu ile birlikte özellikle büyük şehirlerde trafik ve ulaşım sorunlarına çözüm sunmak amacıyla inşa edilmektedir [5]. Tünelleri en kesit şekillerine, yapım amaçlarına ve yapım yöntemlerine göre sınıflandırabiliriz [6].

2.1. Tünel Güzergâhının Seçimi ve İnşaat Öncesi Yapılan Araştırmalar

Tünel açımı öncesinde yapılacak ayrıntılı fizibilite çalışmaları ile başarılı bir şekilde tünel inşası gerçekleştirilebilmektedir. Yapılacak program; ön inceleme safhası, fizibilite safhası ve proje safhası olmak üzere 3 safhaya ayrılmaktadır.

Ön inceleme safhasında; bölgeye ait elde var olan haritalar, fay bilgileri, fotoğraflar, sondaj kuyusu logları, bölgede daha önce yapılmış inceleme raporları, yeraltı suyu durumu bilgisi, bölgede açılmış tünellere ait veriler, varsa bölgedeki inşaatlara ait kayıtlar vb. gibi bilgilerden azami ölçüde faydalanarak bölge hakkında yeterli bilgiye sahip olmak gerekir. Açılacak tünele ilişkin düşünülen güzergâhların tümü ayrıntılı bir şekilde incelenir. Fay zonları, yeraltı su seviyesi altında bulunan suya doygun kumlar, şişebilen kayalar gibi zor zemin şartları tünel açımını zorlaştıracağından, daha sonraki safhada incelenmek üzere alternatif bir ya da bir kaç güzergah daha belirlenir. Bu güzergâhlar diğer güzergâhlara göre daha uzun olsalar da yine de incelenmelidir. Çünkü kısa güzergâhlarda karşılaşılabilen zor zemin şartları, gerek duyulan zemin iyileştirmeler ve tünel destek sistemleri maliyeti arttırabilmekte ve işin süresini uzatabilmektedir. Bu nedenle alternatif güzergâhlar bazen daha avantajlı olabilmektedir. Tünelin örtü kısmı da çok önemlidir.

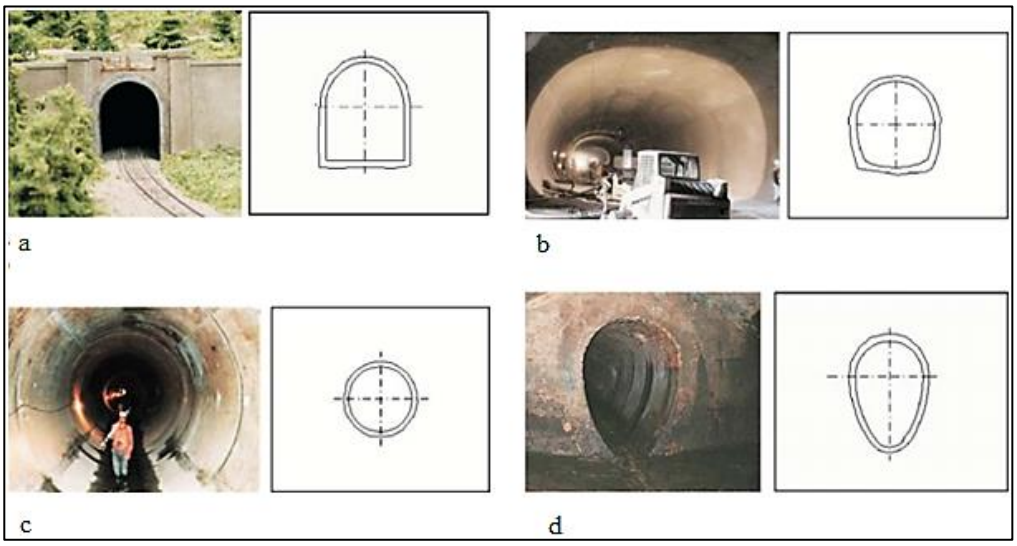
Bu nedenle örtü kalınlığı bilinmelidir. Tüneller ya kaya ortamda ya da zeminde açılmalıdır. Ama kesinlikle zemin- kaya sınırında açılmamalıdır.

Fizibilite safhasında; tünel güzergahı ve çevresinin ayrıntılı jeolojik haritası çıkarılarak, tünel merkezi çizgisi boyunca ayrıntılı jeolojik profil hazırlanır. Ön sondajlar yapılarak, muayene çukurları açılır. Bu safhada seçilen alternatifler tekrar değerlendirilerek en ekonomik güzergâh belirlenir. Sonraki safha için önerilerde bulunulur.

Son safha olan proje safhası; sondaj araştırmalarının, laboratuvar ve arazi deneylerinin yapıldığı, nihai jeolojik haritaların hazırlandığı safhadır. Jeolojik profil daha ayrıntılı bir şekilde incelenerek teknik rapor yazılır. Böylece proje maliyet hesaplarının yapılmasında da yardımcı olur. Bu hesapların yapılabilmesi için; tünel seviyesinin ve istikametinin belirlenmesi, şaftlar için uygun yerlerin belirlenmesi, tünel kaplamasının seçimi ve tasarımı, kazı ve inşaat yöntemlerinde tavsiyelerde bulunulması, bu yöntemlerle ilgili olarak kazı ilerleme hızı ve tünel içerisine gelebilecek su miktarları belirlenir [7].

2.2. En Kesit Şekillerine Göre Tüneller

Tünellerde seçilen en kesit şekilleri, tünel açılacak zeminin cinsine ve zemininden gelecek çeşitli etkilere göre değişmektedir. Kaya zeminlerde tünel en kesitleri genellikle dairesel kemer ve iki düşey yan duvardan oluşmaktadır. Buna karşın yumuşak zeminlerde ise tünelin yatay basınçları karşılayacak en kesitlere sahip olması gerekmektedir. Genellikle yumuşak zeminlerde açılan tünel en kesitleri tam daire ya da nal şeklinde seçilmektedir. Teorik olarak iç ve dış kuvvetleri en iyi karşılayan tüneller dairesel en kesite sahip tünellerdir. Fakat dairesel tünellerin bazı dezavantajları da mevcuttur. Tabanları yuvarlak olduğundan dolayı çok fazla dolgu gerektirmeleri ve beton kaplamanın yapım zorluğu bunlardan biridir [6]. Şekil 2.2'de tünel en kesit örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Tünel en kesit örnekleri a) Dairesel kemer ve iki yan duvardan oluşan tünel en kesit örnekleri b) Nal şeklinde tünel en kesit örnekleri c) Tam dairesel tünel en kesit örnekleri d) Yumurta şeklinde tünel en kesit örnekleri [6]

2.3. Yapım Amaçlarına Göre Tüneller

Yapım amaçlarına göre tünelleri; ulaşım tünelleri, barınak ve tapınak tünelleri, maden galerileri, su iletim tünelleri, kanalizasyon ve kamu hizmet tünelleri, stokaj tünelleri, savunma amaçlı tüneller ve özel tüneller olarak sınıflandırmamız mümkündür [6].

2.4. Yapım Yöntemlerine Göre Tüneller

Tünel inşa yöntemleri başlıca; klasik yöntemler, aç – kapa yöntemi, delme – patlatma tüneller, batırma tüneller, Yeni Avusturya tünel açma yöntemi (NATM), tünel açma makineleri (TBM) ile tünel açma yöntemi olarak sıralanabilir.

2.4.1. Klasik yöntemler (18.-19. Yy.)

19. yüzyılın son yarısına kadar kullanılmış olan klasik tünel açma yöntemleri, ilk defa kullanıldıkları memleketlere göre isimlendirilmiştir. Osmanlı, Amerikan, Alman, Avusturya, Belçika, İtalyan ve İngiliz tünel açma yöntemleri klasik tünel açma yöntemlerindendir. Birbirlerine büyük ölçüde benzeyen bu yöntemlerde hafriyat elle veya basit sondaj ekipmanlarıyla yapılmaktadır. Klasik tünel açma yöntemlerinin çoğunda tünel küçük kazı kademelerine ayrılarak ilerleme sağlanmakta ve geçici destek olarak çok sayıda kereste kullanılmaktadır.

İksa olarak ise genellikle örme taş duvarlı kemerlerden yararlanılmaktadır. Bu yöntemler artık geçerli olmasa da dünyanın bazı büyük tünelleri bu yöntemlerle inşa edilmiştir [4, 8-10].

a. Amerikan ve İtalyan tünel açma yöntemleri

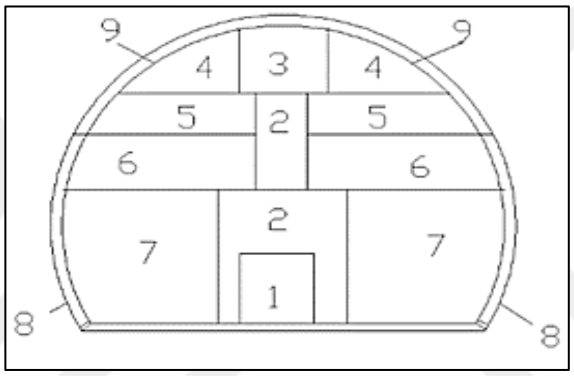
İtalyan yöntemi ender kullanılan bir yöntem olmakla birlikte, akışkan ve çok plastik kayaçlarda kullanılan bir yöntemdir. Kazı işlemi öncesi tünel cidarının rijit plakalarla kaplanması yöntemin esas prensibidir. Bu plakalar kısım kısım kaldırılarak, kazılan kesimler plakalarla hemen yeniden desteklenir. Bu yöntemde tünelde ilerleme oldukça yavaştır [37]. Amerikan ve İtalyan yöntemlerinde diğer klasik yöntemlerin aksine büyük bir kesitte kazı yapılır, kazı boşluğu tuğla ve taş ile hemen doldurulur ve tünel stabilitesi sağlanır [8,9].

b. Alman tünel açma yöntemi (Çekirdek yöntemi, Göbek alma)

Çekirdek yöntemi ya da göbek alma olarak da isimlendirilen bu yöntem, kazı için bir temel oluşturulduktan sonra destek kaplamalarının tünelin sağ ve soluna yerleştirilmesi ve ardından tünel merkezinin boşaltılması işlemidir [8,9]. Uygulamada ilk işlem olarak iki adet yan ayak galerisi ve tavan galerisi sürülür, ardından da yan duvarlar örülür. Yan ayak galerilerinden tavan galerisine doğru birleşim sağlanacak şekilde tünel boyunca galeriler açılır. Böylelikle çekirdek bölüme oturtulan destekler yardımıyla olası büyük deformasyonlar engellenmiş olur. Sonra tavan örülmesi ve kaplaması tamamlanarak ortadaki çekirdek bölüm kaldırılır ve en son olarak da taban kaplaması gerçekleştirilir [37]. Alman Yöntemi'nin bazı negatif yönleri vardır. Bunları; çalışma alanlarının çok dar olması, zaman kaybının fazla olması ve galeri gerilmelerinin değişik yön ve şiddette ortaya çıkması olarak sıralayabiliriz. Yöntemin pozitif yönleri olarak; açılan galeriden sonra özellikleri bilinen bir kaya formasyonunda çalışılması, tavan kemerinin sağlam destekler üzerinde bulunması ve maliyetinin nispeten az olması sıralanabilir [11].

c. Eski Avusturya tünel açma yöntemi (Çapraz sürgü)

Geniş kesitli ve kısa tünellerde uygulanan bu yöntemde, ilk olarak tavan ve tabanda nakliye galerileri açılarak yukardan aşağıya doğru kazı ile ilerlenir. Kaplama ise bütün parçalar alındıktan sonra aşağıdan yukarıya doğru yapılır. Bu yöntem yüksek dayanımlı çok miktarda kereste kullanımı gerektirdiğinden dolayı yüksek maliyetlidir. Taban ve tavan galerileri her 50– 60 metrede bir bacalarla birleştirilir ve taban galerisi nakliyat amacıyla kullanılır [37]. Şekil 2.3'de tünel açımında Eski Avusturya metodunun uygulanışı gösterilmektedir. Şekil üzerindeki numaralar kazı aşamalarını ve tahkimat sırasını göstermektedir.



Şekil 2.3. Eski Avusturya tünel açma yöntemi [38]

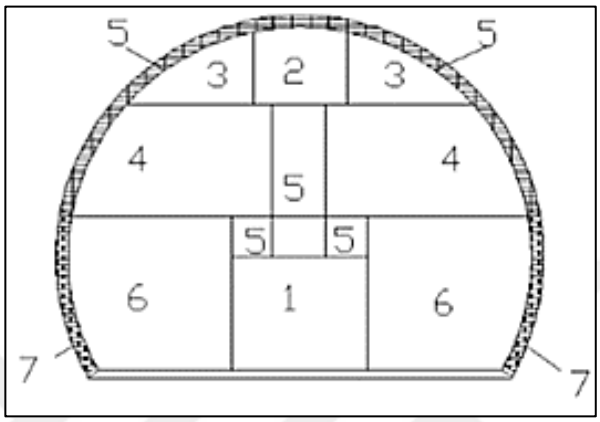
d. İngiliz tünel açma yöntemi

Tünel üst yarısının orta kısmından kazıya başlanır ve orta kısmın kazısı tamamlandıktan sonra ahşap destekler konulur. Bu desteklerin üst kısmı tünel iç kaplamasını desteklerken alt kısmı ise üst yarı kazısının orta kesimine bastırılmaktadır. Birçok zemin koşulunda uygulanabilen bu yöntem, tam ayna kazısına izin vermektedir [8,9].

e. Belçika tünel açma yöntemi

Esas prensibi tavan basıncının dengesini korumak olan bu yöntemde öncelikle tavan galerisi sürülmektedir. Kalot kazısının ardından tavan hemen kaplanmaktadır. Sonrasında diğer parçalar anolar halinde alınarak imalat devam eder. Çalışma alanının dar olması yöntemin olumsuz özellikleri arasındadır [37].

Yöntemin en olumlu yönü ise, tavanın kısa sürede kaplanarak tavan basıncını dengelemesidir. Böylelikle tünel kazısı yapılacak kaya duraylılığının arttırılması sağlanmış olur. Ayrıca kayanın sürekli kazıya uygun olmasını da sağlar [11]. Şekil 2.4'de tünel açımında Belçika metodunun uygulanışı gösterilmektedir. Şekil üzerindeki numaralar ise kazı aşamalarını ve tahkimat sırasını göstermektedir.



Şekil 2.4. Belçika metodunun uygulanışı [11]

2.4.2. Aç - Kapa yöntemi (Cut- Cover)

Bu yöntemde tünel yan yüzeyleri kazıklar ve perdelerle desteklenerek, yüzeyden kazı yapılması suretiyle tünel açılır. Betonarme tavan kaplaması en son işlem olarak yapıldıktan sonra tavan üzeri tekrardan dolgu malzemesi ile doldurulur ve eski haline getirilir. Düşük maliyetli bir yöntem olmasına karşın gürültülü de bir yöntemdir. Yapım tekniği sebebiyle varsa yüzeydeki trafiği de etkileyen bir yöntemdir.

2.4.3. Delme – Patlatma yöntemi

İnşaat alanındaki kayada delikler açılarak, patlayıcı maddelerin deliklere yerleştirilip patlatılması ile tünel açımı yapılır. Patlatma sırasında ortaya çıkan gazın tahliyesi yapılarak, patlatılan kaya malzemesi yüklenip taşınır. Sonraki adımda tünel duvarında askıda kalan kaya parçaları temizlenerek ön tahkimat kurulur. Makineli kazılar gibi enerji ve güç teminine ihtiyaç duyulmaması, büyük miktarda ilk yatırım maliyeti gerektirmemesi olumlu yönleridir. Duraklamalı ve yavaş ilerleme, metan tehlikesi olan yerlerde iş yeri emniyeti açısından kullanılamaması, galeride çatlak ve kırıklar oluşturduğundan tahkimata gerek duyulması ise yöntemin olumsuz özelliklerindendir.

2.4.4. Batırma tünel (Immersed Tube) yöntemi

İlk defa 1893 yılında ABD Boston'da kanalizasyon yapımında kullanılmışlardır [12]. Batırma tüneller, bir kuru dok ya da tersanelerde prefabrike olarak üretilen birçok tünel elemanından oluşurlar. Genellikle her bir eleman 100 m uzunluğundadır [39].

Batırma tüneller dört aşamada inşa edilirler;

- Prefabrik tüplerin imalatı
- Yerleşim güzergâhının hazırlanması
- Tünel elemanlarının batırılması ve birleştirilmesi
- Geri dolgunun yapılması [12]

Tüp tünel yaparken, bir kuru dok ya da tersanede üretilen batırma tüp elemanları sahaya çekilirler. Sonrasında bir kanal içerisinde batırılarak, tünelin son halini oluşturacak şekilde bağlanırlar. Her bir elemanın uç kısımlarında, tünel elemanlarının içleri kuruyken yüzmesini sağlayan geçici bölme setler yer alır. Sonraki aşamada, birbirine bağlanan elemanlar arasındaki bağlantı yerinde bulunan su boşaltılır. Su boşaltma işleminin sonucunda elemanın diğer ucundaki su basıncı, kauçuk contayı sıkıştırır. Böylelikle contanın su geçirmez olması sağlanmış olur. Önemli bir nokta, tünel elemanlarının tekrar yüzmesini engellemek için tünel elemanlarının yeterli ağırlıkta olması gerekmektedir. Son olarak tünel boyunca stabilitenin sağlanması için elemanların üzerleri geri dolgu ile kaplanarak işlem sonlanır [39].

Batırma tünel yaparken, diğer tünelcilik yöntemlerinden farklı olarak hidrografik ölçme ve GNSS ölçmelerinden faydalanılır. Akustik konumlandırma sistemleri (APS) ile de tüplerin konumu izlenir. Bunun için tünel boyunca deniz tabanı haritalarının hazırlanması ve tüplerin tabanda yerleşeceği kanalın hazırlanması en önemli aşamadır. Bir elemanın batırılması zaman alan, çok kritik bir işlemdir. Bu nedenle eleman yatay olarak ankraj ve kablo sistemleri ile kontrol edilebilir. Batırma manevraları üzerindeki vinçler, eleman aşağıya indirilene kadar dikey konumu, GPS eleman ise batırma sırasında tünel elemanının pozisyonunu takip eder [39].

2.4.5. Yeni Avusturya tünel açma yöntemi (NATM)

Palmstörm A. ve Dr. Stipendiat 1993 yılında yayınladıkları bir makalede; NATM'in bir müteahhitlik, kazı ve kaya destek deneyiminin aktif kullanımı ile ilgili bir tasarım karışımı kavramı olduğunu söylemişlerdir [13]. NATM, her türlü arazi koşullarında uygulanabilecek iş, işlem ve önlemlerin optimizasyonuna yönelik bir tünelcilik felsefesinin adıdır [14]. Günümüzde çok yaygın olarak kullanılan NATM'in prensibi kısaca tüneli içinde açıldığı kaya ortamına taşıtmaktır. Böylece içinde boşluk açılan kaya ortamı bir yük olmaktan çıkarak sistemin taşıyıcı elemanı olarak görev alacaktır. Bu yöntem farklı geometri ve farklı jeolojik koşullara uyum sağlaması bakımından diğer tünel açma yöntemlerinden ayrılmaktadır. Bunun bir sonucu olarak da kesintiye uğramadan ve düşük maliyetlerle tünel inşaatları gerçekleştirilebilmektedir. Yöntemin iki temel hedefi vardır. Bunlar; yapılacak geçici desteklemelerle deformasyon oluşumunu ortadan kaldırarak, tünel etrafındaki kayanın basıncını düşürmek ve söz konusu basıncı tünel etrafını kuşatan kayaya dağıtmaktır. Böylelikle yapılacak olan ana destekleme sistemine daha az yük binmiş olacaktır [15]. NATM'in tahkimat elemanları iksa, püskürtme beton ve kaya bulonlarıdır. Kazı kesitleri NATM yönteminin çalışmasına etki ettiğinden, kesitler ne kadar yuvarlak seçilirse bu yöntem de o kadar iyi çalışmaktadır. Günümüzde ülkemizde ve dünyada yapılan birçok tünel yapımında hala NATM kullanılmaktadır [11]. Son on sene içerisinde kazanılan tünel açma deneyimleri, özellikle çürük taş ve zayıf zeminlerde Yeni Avusturya tünel açma metodunun diğer yöntemlere oranla daha yararlı olduğunu kanıtlamıştır [16].

2.4.5.1. NATM'in tarihsel gelişimi

NATM, ilk kez Prof. L.v. Rabcewicz tarafından ortaya atılmış bir tünelcilik kavramıdır. Bu yöntem için kendisi 1948'de patent başvurusunda bulunmuş ve aşağıdaki tanımlamayı yapmıştır;

> "İnce geçici bir destekleme yerleştirmek ve deformasyonlara izin vermek yoluyla kaya basıncının düşürülmesi ve bu basıncın çevreleyen kayaya dağıtılmasıdır. Böylece son destekleme daha az yüklenecek ve sonrasında daha da ince bir yapı halinde son destekleme yerleştirilebilecektir. Deformasyonlar ölçümler ile gözlenmeli ve sonuçlar yapısal analiz ve tasarımı ile birlikte değerlendirilmelidir" [17].

Bu tanımlama NATM'in temellerini ortaya koyan bir tanımlamadır. Bir diğer tanım da Avusturya Mühendisler ve Mimarlar Odası'nın dağıttığı bir broşürde yer almakta olup şu şekildedir;

> "Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi, bir tüneli çevreleyen kaya ve zemin oluşumlarının, halka şekilli bir destekleme yapısı bütünlüğü içerisinde birleştirildiği bir yöntemdir. Böylelikle bu oluşumlar kendi başlarına bu destekleme yapısının bir parçası olacaklardır" [17].

Zaman içinde NATM'nin değişik ülke ve projelerde uygulanması sonucu bu yöntemle ilgili değişik tanımlamalar yapılmaya devam etmiştir. 1962 yılında, Salzburg-Avusturya'da düzenlenen XIII. Jeomekanik Kollegyumunda Rabcewicz bu yöntemi ; "Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (New Austrian Tunneling Method)" ismiyle ilk kez tanıtmıştır. NATM asıl yayılımını ise 1964 yılının Kasım, Aralık ve 1965 yılının Ocak aylarındaki Water Power dergisinde yine Prof. L.v. Rabcewicz tarafından yayınlanan üç bölümlük makalelerinden sonra yapmıştır [18]. Bu yöntemin tarihsel gelişimine baktığımızda, kullanılan destek sistemleri ile ilgili olarak birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve yapılan araştırmalarla NATM, kronolojik olarak özetlenmiştir. Tablo 2.1'de NATM'in kronolojik gelişimi listelenmektedir.

Tablo 2.1. NATM' e götüren kronolojik gelişmeler [19]

YILLAR	GELİŞMELER
1811	Brunel'in dairesel kalkan icadı
1848	Wejwanow tarafından ilk kez hızlı kuruyan harç kullanma girişiminde bulunulması
1872	Rziha tarafından ahşabın çelik destek ile değiştirilmesi.
1908-1911	Akeley tarafından püskürtme beton makinesinin keşfi
1914	Denver'deki kömür ocaklarında püskürtme betonunun ilk uygulaması
1948	Çift kaplamalı sistemin Rabcewicz tarafından tanıtılması
1954	Bruner tarafından tünel açmada püskürtme betonunun sıkışan zemini stabilize etmek için kullanılması
1955	Rabcewicz'in zemin ankrajlamayı geliştirmesi

Tablo 2.1. (Devam) NATM' e götüren kronolojik gelişmeler [19]

1960	Müller tarafından bir sistematik ölçme sistemin öneminin farkına varılması
1962	Rabcewicz'in bir konferansta Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemini tanıtması (XIII. Geomechanics Colloquium in Salzburg)
1964	Rabcewicz tarafından hazırlanan kaynakta NATM teriminin İngilizce olarak ilk kez ortaya çıkması
1969	Yumuşak zeminde ilk kentsel NATM uygulaması (Frankfurt am Main)
1980	Mevcut çatışmalardan dolayı NATM'nin Avusturya Uluslararası Tünel Birliği (ITA) Yeraltı İnşaat Ulusal Komitesi tarafından tekrar tanımlanması ve yayınlanması.
1987	İngiltere Barrow'daki Soar madeninde ilk NATM uygulaması (NATM'in ilk defa maden aramada kullanımı)

Birçok öncü, NATM'in gelişimine önemli katkılarda bulunmuştur. Esasında NATM'in doğuşu, 19. yüzyılın başlarında Sir Marc Isambard Brunel'in, yumuşak zeminde tünel açmak için dairesel bir kalkan tanıtmasıyla başlamıştır (İngiliz patent no.4204). Bunu Alman tünel mühendislerinden Rizha'nın, destekleme malzemesi olarak ağır ahşap malzeme yerine çelik destekler kullanmayı önermesi takip etmiştir. 1910'lu yıllarda Carlid Akeley tarafından püskürtme beton makinesinin keşfi ile püskürtme beton Amerika Birleşik Devletleri'ndeki madenlerde kullanılmaya başlanmış ve 1920'lerin başında da Avrupa'ya yayılmıştır. 1948'de Rabcewicz, son kaplamanın uygulanmasından önce kayanın deforme olmasını ve kaplama üzerindeki yüklerin azaltılmasını sağlayan çift kaplamalı destek konseptini (ilk ve son destek) tasarlamıştır [19]. 1960'da Müller, tünellerin aşırı yüklenmesini önlemeyi amaçlayan tasarım sürecinin bir parçası olarak yük ve deformasyon ölçümleri ile sistematik bir ölçüm sistemi geliştirmiştir. Çift katmanlı destek konseptini, 1962'de Rabcewicz'in yaptığı bir konferans sırasında önerilmiş olan "Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi" terimi izlemiş ve iki yıl sonra da NATM, uluslararası alanda tanınmaya başlanmıştır.

2.4.5.2. Çeşitli tanımlamalarla NATM'in özellikleri

Yeni Avusturya Tünel Açma metodunun, bir tünel tekniği mi yoksa bir tünelcilik felsefesi mi olduğu şu zamana kadar tartışılmış bir konudur. Bu konu; birçok bilim adamı, uygulayıcı ve teknik gazeteci tarafından NATM' in gerçek kavramlarını belirleyebilmek açısında ilgi çekici olmuştur. Prof. Dr. L.v. Rabcewicz Kasım 1964'te NATM'i;

> "….İnce bir püskürtme beton kaplamadan oluşan ve mümkün olan en kısa sürede yardımcı kemer diye adlandırılan tam bir halka ile kapatılması, deformasyon dengesi elde edilinceye kadar da zamanın bir fonksiyonu olarak deformasyonun ölçüldüğü yeni bir metot" [9,19].

olarak tanımlamıştır. Bu tanımda üç temel nokta vurgulanmıştır. Birincisi ince püskürtme beton kaplamanın uygulanması, ikincisi halkanın mümkün olduğunca çabuk kapatılması ve üçüncüsü ise sistematik deformasyon ölçümüdür. Daha sonra yukarıda verilen tanım Avusturya'da 1980 yılında Uluslararası Tünelcilik ve Yeraltı Yapıları Birliği (ITA) tarafından, literatürdeki çatışmaları kaldırmak için;

> "Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM), yeraltında bir açıklığı çevreleyen zeminin (kayanın veya toprağın), zemin gibi bir halka benzeri gövde hareketi ile yük taşıyan bir yapısal bileşen haline getirildiği bir konsept" [19].

şeklinde yeniden tanımlanmıştır. Sauer (1988) tarafından verilen NATM hakkındaki bir diğer tanım ise şu şekildedir:

> "Yeraltı deliğinin istikrarını sağlamak için kaya veya zeminin kendine özgü maximum kapasitesini geliştirmek için mevcut tüm araçları kullanarak yeraltı yapısı üretme yöntemidir" [19].

NATM'nin bir diğer savunucularından Prof. Leopold Müller ise;

> "NATM, esasen bir dizi ilkeye sahip bir tünel konseptidir. Bu, yazarın görüşüne göre, bir inşaat metodu olarak adlandırılmamalıdır" [19].

şeklinde tanımlamıştır. Yeni Avusturya tünel konseptinin temel prensiplerini açıklamak için son derece istekli olan Prof. Müller de, 22 ilke ile bu konseptin karakteristik özelliklerini özetlemiştir [19].

Bunlar;

- Kazı sonrası oluşan yükü taşıyan kayanın kendisidir.
- Açılan boşluğun çevresindeki kaya, dayanımını kaybetmemelidir.
- Gevşemeler kayanın taşıma direncini azalttığından önlenmelidir.
- Tek ve iki eksenli gerilim ortamının önlenmesi, dayanımı azalan kayayı korur.
- Koruyucu zon oluşurken dikkatli denetlenmeli ve yönlendirilmelidir.
- Tahkimat işleri ne erken ne de geç yapılmalı, ayrıca esnekliği de çok iyi ayarlanmalıdır.
- Kayanın davranışı, koruyucu zonun oluşturulma zamanına oldukça bağlıdır. İksanın yapılacağı zaman çok iyi seçilmelidir.
- Özgül zaman faktörü, inşaat süresince yapılan konverjans ve deformasyon ölçümleri ve inşaat öncesi yapılan laboratuvar deneyleri ile saptanır. Kaya sınıflaması, kendini tutma süresi ve deformasyon oranı gibi çok önemli parametrelerin belirlenmesini sağlar.
- Kayaya püskürtme beton ve bulon uygulayarak yüzey bağlanır. Bu sayede kayanın sağlamlığı temin edilir.
- Sağlamlaştırma kaplamaları ince kabuk şeklinde ve gerekli esneklikte olmalıdır.
- Sağlamlaştırma çelik hasır, ankraj ve çelik bağlarla yapılmalıdır. Sağlamlaştırma, kabuğu kalınlaştırarak değil, gerekli esnekliğin verilmesi ve kayaya tutturulması sayesinde yapılır.
- Sağlamlaştırma zamanı ve araçları ölçümlerle saptanmalıdır. Deformasyon ve gerilmelerin ölçülmesi, kayacın uygulama sırasındaki davranışının belirlenmesini sağlar.
- Taşıyıcı zon ile sağlamlaştırma kabuğu birleşik bir halka oluşturmakta ve bu halka bir boru gibi davranmaktadır.
- Sağlamlaştırma kabuğunun bir halka şeklinde olması çok önemlidir bu yüzden taban kazısı kalot, sağ ve sol yan kazılardan sonra bitirilmeli ve kaplaması yapılmalıdır.
- Tam kapanmamış bir çember kayanın plastikleşmesine yol açarak taşıma direncini düşürür.
- İksalanmamış kısımlar hep en kısada tutulmalıdır.
- İlk iksa üzerine bir iç kabuk uygulanabilir. İç ve dış kabuk ince yapılarak burulma momentleri ve kırılmasının gelişmesi önlenir.
- İç ve dış kabuğun mukavemeti kalınlaştırarak değil desteklenerek arttırılabilir. Bulonların sıkıştırılması ve uzatılması ile iksaya destek olunabilir.
- Yapım süreci içinde yönlendirme ve denetleme ölçümleri yapılmalıdır. Tüm sistemin duraylılığı ve emniyeti, sağlamlaştırmanın gerekli olup olmadığı, tünel boyunca yapılan konverjans ve deformasyon ölçümleriyle anlaşılabilir.
- Kabukla kaya arasındaki gerilim ölçümleri dış kabuğun boyutlandırılmasında gereklidir.
- İkinci kabuğun görevi güvenliği arttırmak ve mimari görünümü sağlamaktır.
- Kaya yapısından kabuğa iletilen su basıncı drenajla boşaltılmalıdır. Bu sebeple boşluk çevresine drenaj boruları yerleştirilmelidir [20].

NATM, yumuşak zemin ve / veya kaya kütlesi içinde uygulanmasına göre geometri ve boyutun belirlenmesinden sonra, temel olarak destek karakteristikleriyle ilgilidir [19].

2.4.5.3. NATM destek sistemleri

NATM'de ilk destek olarak kullanılan hasır çelik, püskürtme beton ve kaya bulonları, kaya ile birlikte kompozit bir yapı oluşturmaktadır. Bu kompozit sistem tünel içerisinde bozulan basınç dağılımını yeniden dengeleyerek kayanın dayanımının artmasını sağlamaktadır. Tünellerde iki aşamada sağlamlaştırma yapılmaktadır. İlki geçici sağlamlaştırma olup; püskürtme beton, hasır donatı ve bulonların tek başına veya bir kaçının aynı anda kullanıldığı sağlamlaştırma işlemidir. İkinci, kalıcı sağlamlaştırma ise nihai beton kaplama ve en son yapılacak olan enjeksiyonlar ile oluşturulmaktadır. İlk destek olarak kullanılan püskürtme beton; kuru ya da ıslak olarak kazı yüzeyine fırlatılarak yapıştırılabilen; ince kum, beton, agrega, çimento, çelik elyaf ve priz hızlandırıcı karışımlardan oluşan bir harçtır. Donatılı ya da donatısız olarak kullanılabilir. Tünel kesitini çevreleyen kayanın gevşemesini önler ve kayadaki çatlakları doldurarak dökülmeleri engeller. Tipik bir püskürtme beton içerisinde bulunan maddeler ve karışım oranları Tablo 2.2'de gösterilmiştir [2].

Tablo 2.2. Püskürtme beton içeriği ve karışım oranları [2]

Çimento	%15-20
İri Agrega (çakıl)	%30-40
İnce Agrega (kum)	%40-50
Hızlandırıcı	%2-5
Çelik Elyaf	%2-5

NATM' de ilk destek tasarımı için püskürtme betonun taşıması gereken özellikleri Rabcewicz şu şekilde özetlemiştir;

> "Püskürtme beton tasarımı, mümkün olduğunca çabuk yüksek bir taşıma kapasitesine ulaşmalı ve yüzeyi yakından ve neredeyse tamamen sızdırmaz kılmak için katı ve dayanıklı olmalıdır" [19].

İlk destekte kullanılan diğer bir malzeme de; S220 çeliğinden imal edilen, yüksek dayanma gücüne sahip hasır çeliktir ve desteklemede iki tür hasır çelik kullanılabilmektedir. Birincisi birbirine geçmeli tellerden oluşan hasırlar, diğeri ise kaynak ile birbirine tutturulan hasırlardır. Çelik hasırın kullanım amacı; eklemelerin

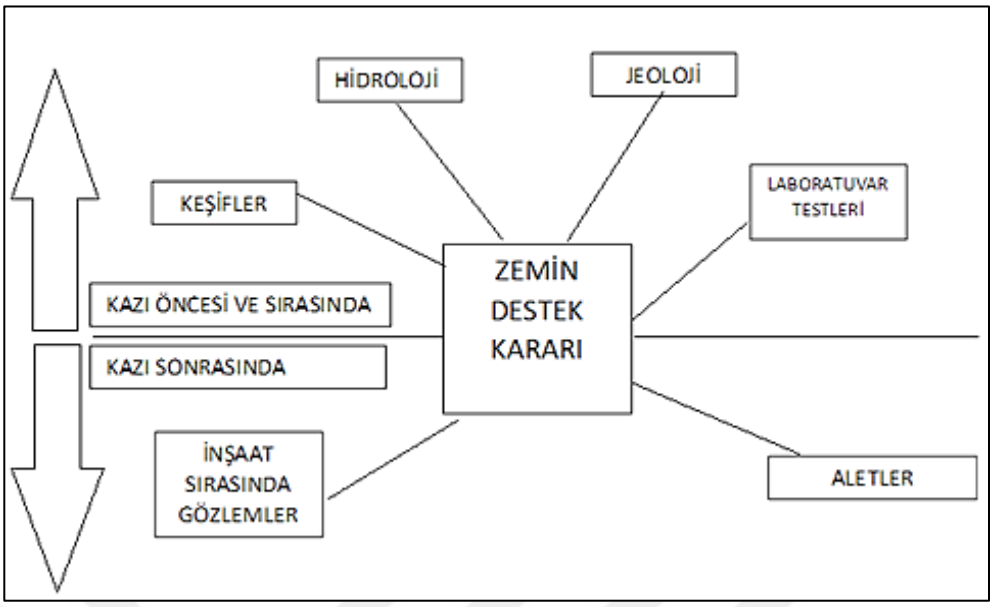
sık olduğu, bulon aralıklarının fazla olduğu kaya ortamlarında, ara kısımda kalan blokların desteklenmesi ve püskürtme betonun mukavemetinin arttırılmasıdır [2].

Ana destek elemanlarından bir diğeri olan kaya bulonları, kayayı çekme gerilmelerini taşıyabilecek şekilde sağlamlaştırmak, çekme gerilmelerini ana kayaya iletmek ya da kayada 3 eksenli gerilme durumu oluşturmak amacıyla kullanılmaktadırlar [2].

Çelik iksalar ise, kazı yapılan tünellerde püskürtme beton dayanımını kazanıncaya kadar geçen sürede güvenliği sağlamak ve yük dağılımına yardımcı olmak amacıyla kullanılırlar. I, H, TH, E ve kafes kiriş olarak kaya ortamına göre tercih edilebilirler [2].

2.4.5.4. NATM'in geoteknik tasarım kriterleri ve kazı yöntemi

Avusturya Jeomekanik Topluluğu'na (OEGG) göre, bir NATM tünelinin planlama ve yapım aşamasında başarılı olmak için, göz önünde bulundurulması gereken iki aşamaya ihtiyaç vardır; Birinci aşama; tasarım, zemin tipinin belirlenmesi, zemin davranışının belirlenmesi, bir konstrüksiyon kavramı seçimi, kazı alanında sistem davranışının değerlendirilmesi, desteklenen alanlarda sistem davranışının kazılması, desteklenmesi ve değerlendirilmesi, geoteknik rapor, kazı ve destek gereksinimleri ve kazı ve destek sınıflarının belirlenmesinden oluşmaktadır. İkinci aşama ise; inşaat, karşılaşılan zemin tipinin tanımlanması ve zemin koşullarının tahmini, kazı alanında sistem davranışının değerlendirilmesi, kazı ve desteğin belirlenmesi ve desteklenen alandaki sistem davranışının doğrulanmasından oluşmaktadır [21]. Kazı öncesi ve sonrasında gerekli bilgi ihtiyaç şeması da Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. NATM için kazı öncesi ve sonrasında gerekli bilgi ihtiyaç şeması

NATM'in ana prensibinden bildiğimiz üzere tünel açıklığını çevreleyen gövde, uygulamanın ana yük taşıyıcı unsurudur. Ortamın yük taşıma kapasitesinin optimizasyonu için karakteristik zemin destek reaksiyon eğrisinin oluşturulması gerekmektedir. Bu nedenle, muhtemel zemin koşulları yer ve laboratuvar testlerinden yorumlanmalıdır. Bu araştırmaların önemi NATM'nin savunucuları ve 1996 HES raporu tarafından vurgulanmaktadır. Tünelcilikte başarısızlığın asıl sebeplerinden biri de beklenmedik zemin koşullarıdır. Bu nedenle, beklenmedik zemin koşullarıyla karşılaşma olasılığının bulunmadığından emin olmak için zemin etüdü yapılmalıdır. Zeminin mukavemeti, gözenek suyu ve drenaj koşulları, homojenlik ve zeminin doğrusal olmaması, direnç potansiyeli, sürünme davranışı, zemindeki süreksizlikler, dinlenme sırasındaki toprak basıncı ve bindirme basıncının büyüklüğü dikkate alınmalıdır.

Kazı ve ilerleme anolarının; ilerleme yönünde, en kesitte ve zamanlamada belirlenmesi, sağlamlaştırma ve destekleme türlerinin seçimi, nitelikleri, sayısı ve boyutları yararlanılan geoteknik bilgilerin doğruluğuna bağlıdır. Bu nedenle NATM'i öneren planlama ve projelerde kazı öncesi, sırası ve sonrasında ölçüm, gözlem ve yönlendirme çalışmaları birincil ağırlık taşımaktadır.

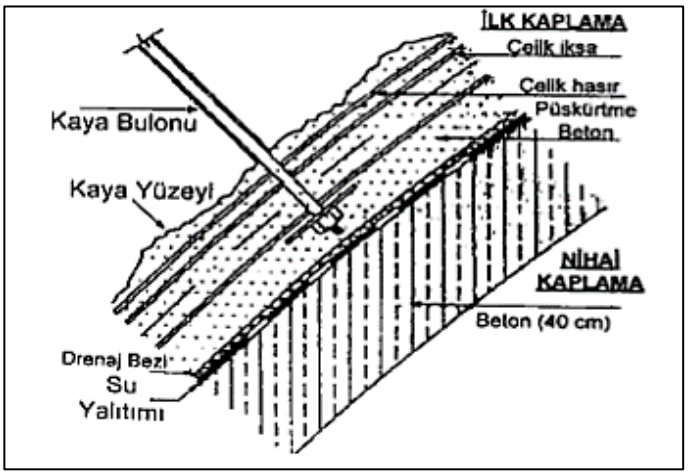
Genellikle kazı, tünelin boyutuna ve geometrisine bağlı olarak altı veya daha fazla basamakta yapılır. Delme patlatma ve yarı mekanize sistemlerle kazı yapılabilen NATM tünellerinde ki tahkimat elemanları ve aşamaları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

İlk tahkimatta püskürtme beton kullanılır. Böylelikle beton, kazı eklemindeki çatlakları kapatır ve dökülmeler önlenir. Burada kayanın kendini taşıma durumunun devamlılığını sağlamak amaçlanır. Genelde 5 cm kalınlık yeterli olmaktadır [11].

İkinci tahkimatta çelik veya kafes iksa kullanılmaktadır. Kemerlenmenin oluşumu ve tavan kayasının bir bütün halinde deformasyonu amaçlanmaktadır. İki tip iksa kullanılabilir. Bunlar; haddelenmiş I profiller ve inşaat donatısının kaynaklanmasıyla oluşturulan kafes iksalardır. Kafes iksa hem hafif hem de ekonomik olması dolayısı ile daha avantajlıdır [11].

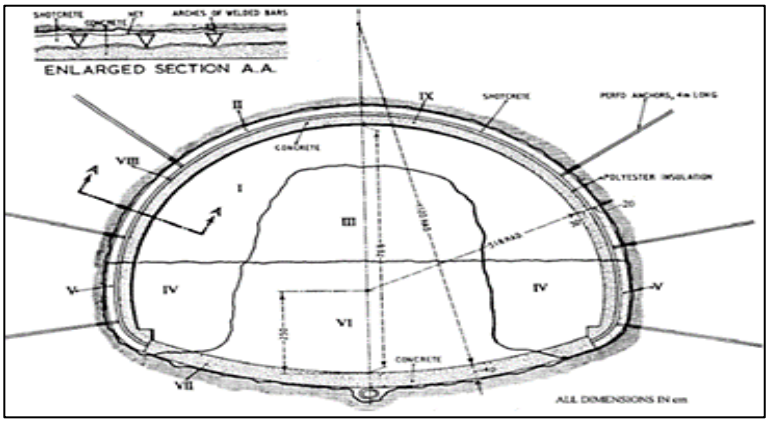
Üçüncü aşamada, kalınlığı 8-25 cm olan donatılı püskürtme beton uygulanır. İlk olarak iki iksa arasına hasır donatı yerleştirilir. Hasır donatı ile zemin arasında boşluk olmayacak şekilde bir yerleştirme yapılmalıdır. Sonrasında bağlantı elemanları olan işban demirleri monte edilir ve püskürtme beton uygulanır. Püskürtme beton tünel tahkimatının bir bütün halinde çalışmasını ve çelik malzemenin korozyonun önlenmesini sağlar. Bunun yanında iç kaplama betonu ve su yalıtımı için de düzgün bir tünel yüzeyi sağlar [11].

En son aşamada kaya bulonu yapılır. Bu işlemle kazı sonrası oluşan plastik deformasyon bölgesini elastik deformasyon bölgesine tutturarak, doğal dengesi bozulan kayaçları sağlamlaştırmak amaçlanır. Bu dört elemanla, geçici destek oluşturulur [11]. NATM'nin tahkimat elemanları Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Tünelde NATM tahkimat elemanları kesiti [11]

NATM'de tahkimat işlemleri ne çok erken, ne çok geç başlamalıdır. İksa direncini oluşturan yapı ne çok rijit ne de çok zayıf olmalıdır [11]. Şekil 2.7'de Rabcewicz (1965) tarafından önerilen bir NATM tünelinin tipik bir ana enine kesit geometrisini göstermektedir. Tünelin şekli geleneksel dairesel tünelden farklıdır. Roma numaraları, kazı sırasını ve daha sonra uygulanan destek unsurlarını göstermektedir. İlk adım, orta bölümün tünel yüzünü destekleyecek şekilde üst başlığın kazılmasıdır (I). Ardından, yardımcı astar (püskürtme beton) oluşturulur (II). Bunu takiben üst orta bölümün çıkarılması (III) ve sağ-sol duvarların kazılması sağlanır (IV). Beşinci adımda, püskürtme beton uygulanır (V). Ardından bir basamak daha kazılarak (VI), tünel halkasının alt kısmı beton ile kapatılır (VII). Su geçirmeyen membranın yerleştirilmesinden sonra da (VIII) iç kaplama betonu (IX) uygulanır [19].



Şekil 2.7. Rabcewicz'in önerdiği NATM tipik ana kesiti [19]

2.4.5.5. NATM’in dünyadaki başarılı ve başarısız örnekleri

NATM henüz ününe kavuşmadığı 1951-1955 yılları arasında, İsviçre'deki Maggia-Electric Scheme'deki Lodano-Mosagno tünelinde, karmaşık bir zeminde tünel açmada kullanıldı. Yaygın tanınması ise Rabcewicz'in 1964'te İngilizce yayınladığı makalesinden sonra oldu ve 1964'te Almanya'daki Schwaikheim tünelinde kullanıldı [19]. Bu yöntemle yapılan ilk büyük ölçekli tünel ise Rabcewicz tarafından Venezüella’da yapılmıştır [11].

1966’da Avusturya’da, sonrasında da Fransa ve İtalya’da uygulanan bu yöntem, 1969 yılında Frankfurt / Main metrosunda kullanılmıştır. Metro zemininde iç içe tabakalı kil, marn, tebeşir ve kum taşı geçilmiştir [22]. NATM'nin yumuşak zemindeki ilk uygulaması da bu metro inşaatı olmuştur [19].

Yöntem, 1970 ve 1980'lerde özellikle Almanya'nın Bochum, Frankfurt, Münih, Nürnberg ve Stuttgart'daki metro sistemleri için yoğun şekilde kullanılmıştır [19].

Diğer yumuşak zemin NATM tünellerinden bir diğeri de 120 km uzunluğundaki Hanover-Würzberg hızlı demiryolu hattıdır. Yapımı boyunca neredeyse her 10 km'de bir çöküş meydana gelmiştir [19].

1987’de NATM, İngiltere’nin Barrow şehrinde ilk defa maden arama amaçlı kazı işlemlerinde kullanılmıştır [19]. Birleşik Krallık’ ta madencilik endüstrisinde NATM'nin ilk uygulamasını, Birleşik Krallık karayolu tünelleri olan Round Hill Yolu tünelleri izlemiştir. Heathrow Ekspres Raylı Bağlantı İstasyonu tünellerinin 21 Ekim 1994'te çökmesi, yöntemin yakın incelemeye tabi tutulmasını beraberinde getirmiştir. Sağlık ve Güvenlik Yönetimi (HSE) bir araştırma yaparak, bulgularını NATM'nin güvenlik tasarımı için bir kitapta yayınlamıştır. Sonrasında bir soruşturma da, İnşaat Mühendisleri Enstitüsü tarafından izlenmiştir [19].

Yöntem, 1988’de dünyanın en uzun demiryolu tüneli olan Seikan tünelinde (Japonya) başarı ile uygulanmıştır [19].

Bir diğer uygulama da Mexico şehrindeki Emisor Central kanalizasyon tünelidir [19].

2004 yılında yapımı tamamlanan Boston demiryolu tünelinin, 100 yıllık tarihi 7 katlı Russia Wharf Binası altından geçerek Logan Havaalanı ile güney Boston'u birbirine bağlaması hedeflenmiştir. Yumuşak organik silt ve kil formasyonda, tarihi bina altından geçildiğinde riskli bir durumun oluşmasını önlemek için tünel kesitinin dürbün şeklinde tasarımı yapılmış ve NATM ile açılması planlanmıştır. Söz konusu tüneller açılırken mevcut binanın temel kazıkları kırılarak, kırılan kazıklar tünel kemer yapısına oturacak biçimde tünellerin tasarımı yapılıp, binaya olası bir zararın önüne geçilmesi amaçlanmıştır [19].

2006'da açılan Fort Canning karayolu tüneli (Singapur), 15 m eninde ve 11 m yüksekliğinde olup; killi silt, kil ve kum mercekleri içeren formasyonda NATM ile açılmıştır [19].

2007 yılında, Londra Metro Sisteminin bir parçası olan Kings Cross İstasyonu'nda Londra kili (katı kil) formasyonunda açılmış olan tünelde, pilot tünel (üst yarıda yapılan küçük çaplı tünel) uygulaması yapılmıştır. Daha sonra 7 m çapında normal boyutlarına getirilerek tünel açılmıştır [19].

2008 yılında, Washington metro sistemine bağlı Dulles Coridor Metrorail projesi kapsamında Tynols Corner çift hat tünelinde, silt ve düşük kil içerikli formasyonda, 8 m çaplı tüneller NATM ile açılmıştır [19].

2009 yılında, Londra Metro Sistemi'nin bir parçası olan Victoria istasyonunda, Londra kili formasyonunda açılmış olan mevcut dar kesitli 6 m çapındaki tüneller, NATM ile 10 m çapına çıkarılarak genişletilmiştir [19].

Türkiye' de NATM ile yapılan tüneller; Karayolu tünelleri olarak; 75. Yıl Selatin tüneli, Avrasya tüneli, Bolu dağı tüneli, Hapağan tüneli, Kırık tüneli, Konak tüneli, Nefise Akçelik tüneli, Ovit dağı tüneli, Sabuncubeli tüneli ve Zerede tünnelidir. Suyolu tünelleri olarak; Mavi tünel ve Suruç tünelleridir [40]. Metro tünelleri olarak ise; Taksim-Yenikapı metrosu, Taksim-4. Levent metrosu, 4. Levent-Hacıosman metrosu, Kadıköy-Kartal metrosu, Taksim-Kabataş füniküler sistemi, İzmir metrosu, Tandoğam-Keçiören metro hattı, Kızılay-Çayyolu metro hattı ve Marmaray projesidir [23]. Yöntemin birçok başarısız örneği de mevcuttur. NATM'in dünya çapındaki başarısız örneklerinden bazıları Tablo 2.3'de verilmektedir.

Tablo 2.3.Yıllara göre NATM tüneli çöküş olaylarından örnekler [19]

TARİH	YER	PROJE	ŞEHİR-KIRSAL	SONUÇLAR
Ekim 1973	Paris-Fransa	Demiryolu	-	-
Kasım 1984	Landrücken Tüneli-Almanya	Demiryolu	Kırsal	-
-1984	Bochum Metrosu-Almanya	Demiryolu	Şehir	Kentsel bozulma
Ocak 1985	Richthof Tuneli-Almanya	Demiryolu	Kırsal	-
-1985	Bochum Metrosu-Almanya	Metro	Şehir	Kentsel bozulma
Ağustos 1985	Kaiserau Tüneli, Almanya	Demiryolu	Kırsal	-
Şubat 1986	Krieberg Tüneli-Almanya	Demiryolu	Kırsal	Büyük yüzey hasarı
Ocak 1989	Karawanken Tüneli-Avusturya-Slovenya	Yol	Kırsal	-
Eylül 1991	Kwachon Tüneli-Kore	Metro	Kırsal	-
Kasım 1991	Seoul Metrosu-Kore	Metro	Şehir	-
Kasım 1991	Seoul Metrosu-Kore	Metro	Şehir	Önemli kentsel bozukluk
-1992	Fungata Tüneli-Japan	Yol	Kırsal	-
Şubat 1992	Seoul Metrosu, Kore	Metro	Şehir	-
Haziran 1992	Lambach Tüneli-Avusturya	Demiryolu	-	-
Ocak 1993	Seoul Metrosu, Kore	Metro	Şehir	Yol bozulması
Şubat 1993	Seoul Metrosu, Kore	Metro	Şehir	İnşaat tesisi kaybı
Şubat-Mart 1993	Seoul Metrosu, Kore	Metro	Çoğunlukla Şehir	
Mart 1993	Chungho Tüneli, Tayvan	Yol	Kırsal	-
Kasım 1993	Sao Pauloda Yol Tüneli, Brezilya	Metro	Şehir	Büyük kentsel karışıklık
Ağustos 1994	Galgenberg Tüneli, Avusturya	-	Kırsal	1 ölü
Eylül 1994	Avusturya Münih Metrosu, Almanya	Metro	Şehir	4 ölü, 27 yaralı, Kentsel bozulma
Ekim 1994	Heathrow Havaalanı, London	Metro	Şehir	Kentsel bozulma

2.4.5.6. NATM'nin avantajları ve dezavantajları

NATM'nin in avantajları sırasıyla;

- Her türlü zeminde uygulanabilir olması
- Uygulanması imkânsız görünen çok zayıf zeminlerde bile yardımcı yöntemlerle başarı ile uygulanabilmesi
- Farklı geoteknik durumlara kolay ve ekonomik bir şekilde adapte olması
- Değişen kesitlerde çalışma yapılabilmesi
- Yüzeye yakın tünellerde, yeryüzündeki oturmaların minimum olması
- Yöntemde mekanizenin az oluşundan dolayı, yatırımın da az oluşu
- Optimum tasarım gerçekleştirildiğinden dolayı tünel kaplamalarının da ekonomik oluşu
- Genel anlamda güvenli ve ekonomik oluşu

Bunlara karşılık dezavantajları ise;

- Mekanik tünel açma sistemlerine ve otomatik kaplama yapabilen yöntemlere karşı daha yavaş olması
- Daha fazla teknik personele ihtiyaç duyulması
- İnşaat kontrolünün ve ölçümlerin daha yoğun olması [18]

şeklinde sıralanabilmektedir.

2.4.6. Tünel delme makinesi ile tünel açma yöntemi (TBM)

İnşaat ve madencilik sektöründe yeraltı yapıları büyük önem taşımaktadır. Birçok yöntemle kazılar yapılabilirken, projelerin önemli hedeflerinden biri de hızlı bir şekilde ve öngörülen zamanda, çevreye zarar vermeden projeyi bitirmektir. Bu nedenle TBM'ler, kazı işlemlerini hızlandırmak amacıyla ve istenilmeyen yer hareketlerini önleme kabiliyetleri nedeniyle özellikle tercih edilmeye başlanmış ve son yıllarda da kullanımları oldukça yaygınlaşmıştır. Bu yaygınlaşmada teknolojinin de gelişmesiyle, TBM'lerin hemen hemen her türlü zeminde kazıya olanak sağlamasının payı da büyüktür. Bir yandan kazıp, bir yandan kazdığı malzemeyi taşıma bandıyla ayrıştırarak çıkaran bu makineler bir yandan da tünelin beton segmentlerini döşeyebilmektedir.

TBM'ler, çapı 1 metreden 19 metreye kadar çıkabilen, dairesel olarak tam tünel kesitini kazan, daima ileriye doğru çalışan makinelerdir ve 3 ana bölümden oluşmaktadırlar. Bunlar sırasıyla; kuyruk kısmı, gövde kısmı ve yüz kısmıdır (kesici yüz). İngiltere ve Fransa'yı deniz altından bağlayan Channel tünelinin Fransa'ya ait kısmında TBM'in kullanılmasıyla, dünya aylık ilerleme hızı rekoru kırılmıştır. Böylece beklenenden daha kısa bir süre zarfında tünel inşası tamamlanmıştır [24]. TBM, STFA Yatırım Holding kaynaklarına göre, ülkemizde ilk kez Kadıncık II HES projesinde kullanılmıştır. Dünya çapında Kanada, ABD, Çin, Japonya, İtalya, Fransa ve Almanya'dan sonra Türkiye de ilk yerli TBM makinesini üretmeyi başarmıştır. ARM EPB-3245 ile isimlendirilen yerli TBM, ilk kez Zeytinburnu içme suyu tünelinde kullanılmıştır [41,42]. TBM'ler projesine göre yaklaşık 1 yılda hazırlanmakta olup, fiyatları da değişiklik göstermektedir. Birçok çeşidi olmakla birlikte açılacak yeraltı boşluğu boyunca geçilecek zemin formasyonlarının önceden tespiti, kullanılacak makinenin seçiminde en önemli faktörlerden biri olmaktadır.

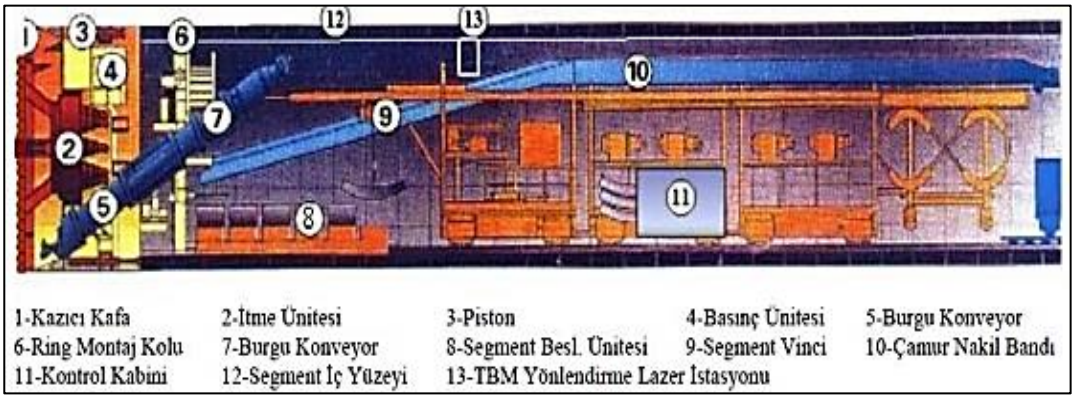
2.4.6.1. TBM'in tarihçesi

Önceleri Amerika'da "Mole" ya da "Mechanical Mole" olarak adlandırılan, tünelin tam kesitinde kazı yapabilen bu makineler için günümüzde kısaca "TBM" ya da "Tunnel Boring Machine / Tünel Açma Makinesi" denmektedir. İlk başarılı tünel açma kalkanı 1825 yılında Thames tünelini kazmak için Sir Marc Isambard Brunel tarafından geliştirilmiştir. Geliştirilen bu kalkan, kazma işlemi hala devam eden tam bir tünel açma makinesinin icadını kapsamamakla beraber sadece bir kalkan (shield) konseptinin icadıydı. Henri-Joseph Maus tarafından 1845'te Fransa-İtalya arasındaki Alpleri delip, Fréjus Rail Tüneli ile birbirine bağlayan "Mountain Slicer", esasen ilk çalışan TBM'dir. Amerika Birleşik Devletleri'nde ilk TBM makinesi ise Charles Wilson tarafından yapılmış olup, 1853 yılında Hoosac tünelinin inşasında kullanılmıştır. Wilson'un bu makinesinde kesme diskleri makinenin kafa kısmına takılmış şekilde tasarlanmış idi. Bu kesici diskleri bakımından, modern TBM'i öngörmüştü de denebilir. Yine 1853 yılında Amerikan Ebenezer Talbot, Wilson'un kesme disklerini kullanan ve disklerin dönen bir plakaya monte edildiği bir TBM makinesinin patentini almıştır. 1870' li yıllarda John D. Brunton, dönen plakalara eksantrik olarak kesici disklerin monte edildiği bir makine yapmıştır. Böylece kesme diskleri hemen hemen tüm kaya yüzeyini kazabilecek hale gelmiştir.

Büyük bir tünel açabilen ilk TBM ise, 1863 yılında icat edilmiş olup, 1875'te İngiliz ordu subayı Binbaşı Beaumont tarafından geliştirilmiştir. Beaumont'un makinesi 1880'de İngiliz ordusu Binbaşı Thomas English tarafından daha da geliştirilmiştir. 1953-1956 yılları arasında TBM'ler ticari bir şekilde imal edilip geniş ölçüde kullanılmaya başlanmıştır. James S. Robins isimli bir mühendis tarafından, 3,35 m çaplı bir TBM üretilmiş ve Toronto'da kullanılmıştır. 1954 yılında sadece Amerika'da bu makineden 40 adet, Avrupa ve Japonya'da da 20 adet imal edilerek kullanılmıştır. TBM'ler önceleri, sadece yumuşak ve normal zeminler için tasarlanabilmiştir. 1980'lerin başlarında Amerika ve Avrupa da birçok üniversite ve araştırma kurumu, disk kesicilerin sert kayaçlardaki performansının fizik prensiplerini anlamak üzere çok sayıda araştırma yapmışlardır. Çünkü sert kaya zeminler için de TBM geliştirilmek ve kullanılmak isteniyordu. Sert kayalarda alttan kazı prensibine dayanan, önce Krupp firması tarafından kullanılan sonra da Habegger firmasınca geliştirilen TBM'ler imal edilmiştir. Bu aşamada akıcı zeminler için bentonit çamuru ile beraber kullanılan kalkanlı tip TBM'ler de imal edilerek kullanılmıştır. 1970'lerde her ne kadar sert zeminlerde TBM ile tüneller açmak başarılmışsa da çok sert zeminlerde henüz bu mümkün olamamıştı. Çok sert zeminlerde delme patlatma metodu ile tünel açılması, TBM'lerdeki gelişmelere paralel olarak jumbo delicilerin de uygulamaya konması gibi daha ucuz patlayıcı maddelerin kullanılması ile tünel açmada devre zamanları kısalmıştı. Bu nedenle çok sert kaya zeminlerde tünel açımında, delme-patlatma metodu daha ekonomik olmaktaydı. TBM'lerde beher kesiciye düşen basınç kuvvetinin Max P = 9450 kgf gibi üst limitten daha fazla dayanıklı olmamasından ötürü ve başlık penetrasyon hızı ile başlık deviri ve çap arasındaki bağıntı dolayısıyla, TBM ile çok sert kaya zeminde tünel açmak 1970 devresinde imkan dâhilinde olamamıştır. 1970-1995 devresinde TBM üreticileri, yaptıkları devamlı araştırma ve çalışmalar sonucunda, kesicilerin dayanım limitini Max = 9450 kgf/cm^2 den 30000 kgf/cm^2 ye hatta daha yükseğe çıkarmayı başarmışlardır. Böylelikle TBM'ler artık çok sert kaya zeminlerde de modern jumbo delicilerle delme patlatma metodu ile yarışacak düzeye gelebilmiştir. Çapları D=10 m ye varan dev TBM'ler yapılabilmiş ve çok zayıf zeminlerde bentonite çamuru ile kullanılan, su basıncı altında da çalıştırılabilen kalkanlı tipleri de geliştirilmiştir. 1981 yılında Japonya'da, kazı sırasında toprak basıncını devamlı dengeleyebilen uzaktan kumandalı TBM'ler yapılabilmiştir [43,44].

2.4.6.2. TBM'lerin yapısı ve çalışma prensibi

TBM ile kazı yönteminde, projede belirtilen kazı çapına ve zemin şartlarına göre uygun TBM makinesi seçilerek kazıya başlanır. TBM'ler daima ileriye doğru, tek doğrultuda ve tam yüzey kazıcı olarak çalışırlar. Kafa kısmında bulunan kesici diskler ile kazma işlemini yaparken, lazer sistemi ile de hassas yön tayini yaparak kazı doğrultusundan çıkmadan kazı işlemini gerçekleştirirler. Kesme işlemi 360^{o} devam ederken, ön taraftan kesilen materyal bir hazneye doldurulur ve taşıyıcı bant ile gövdeden dışarıya doğru taşınır. Bu sırada makinenin gövde kısmında bulunan hidrolik sistem, kazı ilerledikçe çok sayıda piston yardımıyla makinenin ilerlemesini sağlar. Kazı bittikten sonra tünel dışında imal edilen segmentler, erektör yardımıyla ringleri örmeye başlar. Böylelikle geçici bir tünel çemberi oluşturarak tünel birinci kaplaması tamamlanır. Sonrasında çeşitli tekniklerle (kaya vidası, püskürtme beton) tünelin stabilizasyonu sağlanır. TBM yapısı bakımından üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar kuyruk kısmı, gövde kısmı ve kafa kısmıdır. Kesici kafa, itme silindirleri ve motor, kafa kısmında yer almaktadır. Hidrolik güç üniteleri ve elektrik trafoları, jeneratörler, çalışma platformu, taşıyıcı bant gibi bölümler de gövde kısmında yer almaktadır. Segment montajı gibi tahkimat kurma işleriyle ilgili ünite, yardımcı motor ve vantilatör ise TBM'in kuyruk kısmından yer almaktadır [12,45]. Şekil 2.8'de TBM kesitinde ayrıntılı bölümler gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Tipik bir tünel delme makinesi kesiti ve bölümleri [12]

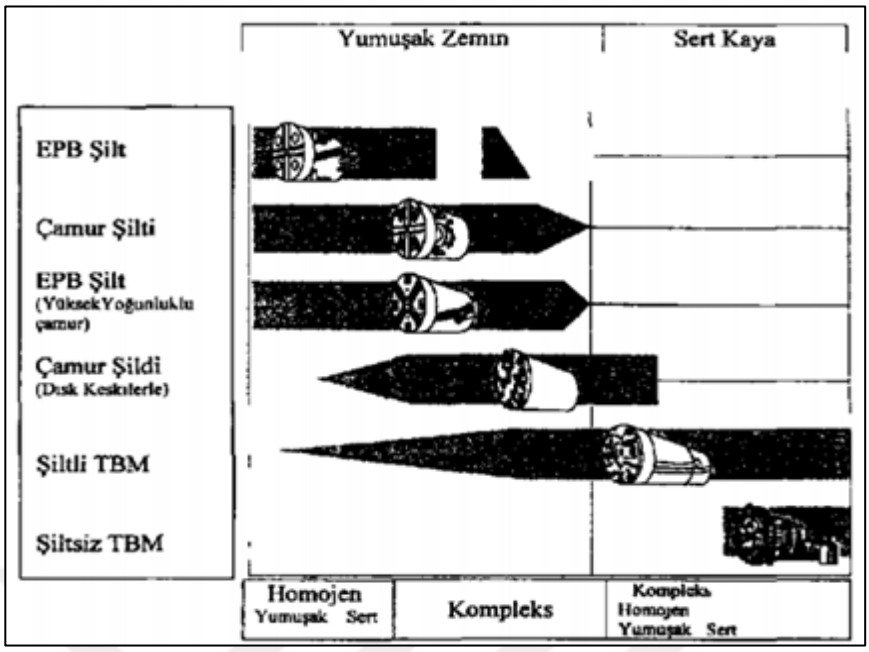
2.4.6.3. TBM uygulama alanları ve seçim kriterleri

Uygun makine seçimi; zemin ve yüzey koşullarına, tünel kesitinin çapına ve uzunluğuna, tünel hizasına, tünel inşaatına bağlıdır. Kayacın dayanım özellikleri, jeolojik süreksizlikler, keskiler ile kayaç kütlesine aktarılabilecek güç hesaplaması göz önüne alınmalıdır. Seçim kriteri olarak bugüne kadar birçok model üzerine çalışılmış ama buna rağmen birkaçı uluslararası düzeyde kabul görmüştür. Bunlardan üçü; Pilot kazı setinde yapılan karot kesme deneyleri, laboratuvarda yapılan tam boyut kesme deneyleri ve yerinde yapılan ölçmelere dayanarak geliştirilen modellerdir. TBM performanslarının hangi kayaç tipinde nasıl değişeceği, kesici kafa tasarımının nasıl olması gerektiği kesme deney serisinde yapılan deneylerle kestirilebilmektedir.

Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da uygulama alanlarına göre TBM çeşitleri ve seçim kriterleri verilmiştir [46].

		Kaya		Zemin			
Geoteknik Büyüklükler		Kazıda Duraylı	Kazıda Duraysız	Kohezif Duraylı	Kohezif Duraysız	Karışık Zemin	Kohezyon suz
Basınç Dayanımı, σ_b, Mpa		300 - 50	50 - 5	1,0	0,1		
Çekme Dayanımı, σ_c, Mpa		25 - 5	5 - 0,5				
Kaya Kalite Derecesi, *RQD*, %		100 - 50	50 - 10				
Çatlak Aralığı, *m*		>2,0 – 0,6	0,6 – 0,06				
Kohezyon, C_i, kPa				≥ 30	30 - 5	30 - 5	
Dane Boyut Dağılımı	<0,02 (%)			30	30		10
	<0,06 (%)			≥ 30	≥ 30		
Makina Tipi	YAS	Kullanım Aralığı					
TBM (Açık Tip)	-						
	+						
TBM (Şildli Tip)	-						
	+						
Açık Şild	-						
	+						
Mekanik-Destekli Şild	-						
	+						
Mekanik-Basınçlı Hava Destekli Şild	-						
	+						
Bentonit Bulamaçlı Arın Şildi	-						
	+						
Zemin Basıncı Dengelenmiş (EPB) Şild	-						
	+						
Açık Şild Parçalı Arın Kazısı	-						
	+						
Şild – Kısmi Destekli Parçalı Arın Kazısı	-						
	+						
Şild–Basınçlı Hava Destekli-Parçalı Arın Kazısı	-						
	+						
Şild– Bentonit Bulamaç Destekli-Parçalı Arın Kazısı	-						
	+						
YAS: Yeraltı suyu (-) : Yok, (+) Var					Ana Uygulama Alanı	Mümkün Uygulama	

Şekil 2.9. Tünel delme makineleri uygulama alanları ve seçim kriterleri [47]

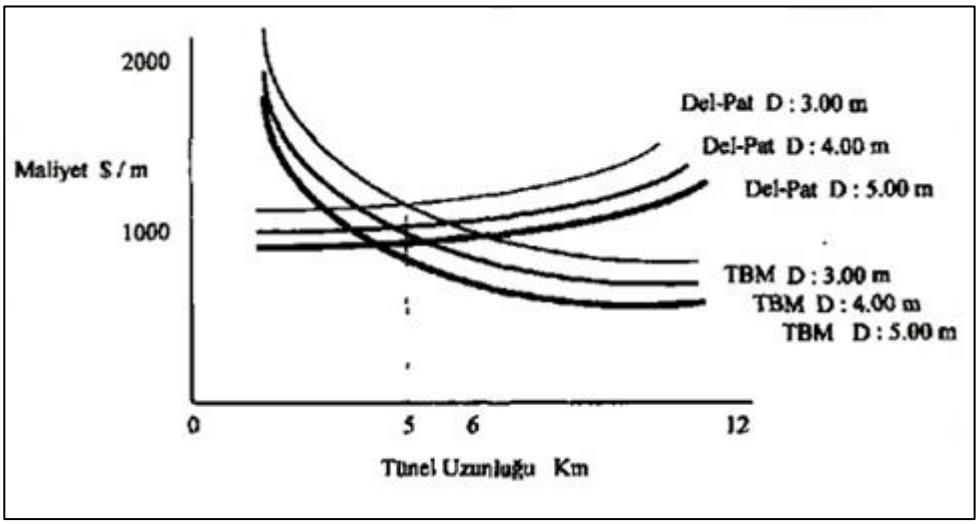


Şekil 2.10. Zemin cinsine göre TBM çeşitleri [48]

Bir tünel inşaatı başlamadan önce işin yapılış şekliyle ilgili sınırlayıcı sebep ve hükümler yok ise firmalar, maliyet açısından yöntem belirlemek için çalışmalar yapmak zorundadırlar. Aşağıda bu çalışmalara etkiyen parametreler ve bunların maliyete etkileri sıralanmıştır [48].

- Tünel çap ve uzunluğu
- Tünel açılacak kayanın basınç dayanımları ve kazılabilirlik durumu
- Çalışma saatleri
- Patlayıcı madde ile kazıya engel teşkil eden sebepler
- Tünel projesine uygun makinelerin temin zorlukları
- İşin süresi
- Diğer sebepler

Tüm bu parametreler ışığında tünelin hangi yöntemle açılacağına karar verilir. Bu parametrelerden en belirleyici unsur ise tünel çap ve uzunluğudur [48]. Şekil 2.10'da görüldüğü üzere; örneğin 4 metre kazı çapındaki bir tünel için 5,5 km den sonra TBM ile tünel kazısı daha ekonomik olmaktadır. Proje bitiş süresi göz önüne alındığında ise tünel açma makineleri ile kazı her zaman avantajlı durumdadır [48].



Şekil 2.11. Tünel uzunluk ve çapına göre maliyet grafiği [49]

2.4.6.4. TBM çeşitleri

Genel anlamda kullanılacakları zemin formasyonuna göre TBM ler sınıflandırılır. Sert kaya ve yumuşak zemin olmak üzere iki ana grup mevcuttur. TBM seçerken belirli kriterler göz önünde bulundurulur. Çalışılacak zemin formasyonuna göre kesici kafa dizaynları ve keskileri değişmektedir. Genel anlamda yumuşak zemin formasyonlarında riper dişler, kalem keskiler kullanılır. Kompleks zeminlerde ise hem riperler hem de disk keskilerden oluşan kafa kullanılır. Disk keskiler olası sert damarlı kayaları kesmek için kesici kafaya yerleştirilmişlerdir. Bu nedenle sert zeminlerde kesici kafada sadece disk keskiler bulunur. Çalışılan zemin şartlarına göre sert zeminlerde; şiltli TBM, şiltsiz TBM, tek şiltli TBM, çift şiltli TBM kullanılır. Yumuşak zeminlerde ise; EPB makineleri (Arazi dengeleme makineleri) ve çamur şildi (slurry machine) olmak üzere sıralayabiliriz [48].

Sert kayada tünel açarken şiltli ve şiltsiz TBM'ler kullanılabilmektedir. Şiltli TBM'ler de tek ve çift şiltli olmalarına göre iki çeşittir.

a) Şiltsiz (gripper) TBM'ler: Bu TBM'ler kendini tutabilen çok sağlam olan kaya ortamlarında kullanılabilmektedir. Kayanın (zeminin), itme silindirlerinin yapmış olduğu basınca dayanabilecek kalitede olması gerekmektedir. Kazı yapılırken itme gücü; hidrolik dayanma ayaklarının yandaki sağlam zemine basınç yaparak sıkıştırmasından sonra en önde bulunan ve kazıyı yapan kısmın hidrolik pistonlar ile itilmesiyle sağlanır. Hidrolik pistonların uzunluğu kadar kazı yapılabilmektedir.

Her kazı bitiminde yanlardaki ayaklar pistonlarla boşaltılarak, arka kısım ön kısma çekilir ve ayaklar tekrar sabitlenir. Böylece kazıda ilerleme gerçekleşir. Ön kısımda kazı devam ederken arka kısımda tahkimat yapılabilir [48].

b) Tek Şiltli TBM'ler: Bu TBM'ler yumuşak zeminlerde, kompleks zeminlerde ve kaya zemini içerisinde açılacak tünellerde kullanılabilirler. Bu makinelerde tam daire şeklinde komple bir şilt mevcuttur. Tahkimat için beton prekast segmentler kullanılmaktadır [22,48]. Çalışma şekli özetle; itme silindirleri beton segmentlere dayanarak kesici kafayı aynaya doğru iter ve kafa dönmeye başlar. İtme silindirleri tamamen açılıp kesici kafa dönüşü de durduğunda kazı işlemi bitmiştir. Sonrasında itme silindirleri kapatılır ki erektörün, beton segmentleri yerleştirebileceği açıklık sağlanabilsin. Erektör segmentleri yerleştirdikten sonra, segmentler cıvata ile birbirlerine ve bir önceki segmentlere sabitlenir. Son olarak kilit taşı yerleştirilir ve segmentlerin ortasında mevcut olan delikten aynı anda beton enjeksiyonu yapılarak tahkimat sonlandırılır. Sonrasında yeni kazı için tekrardan makinenin itme silindirleri segmentlere dayanır ve aynı işlemler tekrarlanır [48].

c) Çift Şiltli TBM'ler: Hem tek şiltli olarak hem de ikinci şildiyle kullanmak mümkündür. İyi arazi şartlarında kaplama işi ile delme işlerinin aynı anda gerçekleşmesine imkan sağlayabilmesi avantajlarındandır. Sert ve karmaşık zeminlerde kullanılabilirler. Çalışma düzeni kısaca; ilk aşamada kavrayıcılar açılır ve TBM sabitlenir. Ana itme silindirleri kesici kafayı aynaya doğru iter ve kesici kafa dönmeye başlar. TBM bu kazı işini yaparken erektör segmentleri yerleştirir. Ana itme silindirleri tam olarak açıldığında kazı bitmiştir. Böylelikle kavrayıcılar kapatılır ve ikincil itme silindirleri segmentlere dayanarak kavrayıcı şiltini kapatırlar. Burada en büyük avantaj kazı yapılırken segmentlerin yerleştirilebilmesidir. Böylelikle zamandan tasarruf edildiğinden verimli çalışma sağlanmış olur [22].

Yumuşak zeminde tünel açarken; arazi basıncı dengeleme esasına göre çalışan EPB makineleri ile çok akıcı zeminlerde kullanılabilen çamur şildi tipi makineler kullanılabilmektedir. Bu makinaların özellikleri kısaca şu şekilde özetlenmektedir;

a) Arazi basıncını dengeleme makineleri (EPB): İlk olarak 1960-1970 li yıllar arasında Japonya' da görülmeye başlanmıştır. Yeraltı su seviyesinin altındaki zeminlerde ilerlemeler sırasında stabilite kaybı kaçınılmazdır. Kendini kısa süreli bile tutamayan

kayaçların kazısında bu makine ile kazı işi gerçekleştirilir. Su geliri ve arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunu kapalı bir hacim haline getirerek, basınç altında tutmak temel çalışma prensibidir. Temel amaç arazi içindeki su basıncı etkisiyle, kesme kafası ve ayna boşluğunda doğal bir basıncın oluşmasına imkân verilmesidir. Böylelikle kazılan malzeme kesici kafa haznesini doldurarak tüm yüzey desteklenmiş olunur. Buradaki dikkat edilecek husus bu destekleme basıncının tünel kalınlığındaki doğal arazi basıncını karşılayacak bir değere ayarlanması gerekliliğidir. Bu makineler 1 Mpa'a kadar ulaşan basınç altında çalışabilecek şekilde tasarlanabilirler. Arazi nemlilik oranının %10-15 olduğu koşullar ile daha az olduğu durumlar en iyi çalışma koşullarıdır. Bu makineler çok sert kayaçlardan çok yumuşak olanlarına kadar, değişik kayaç ve zemin formasyonları için tasarlanabilmektedir [22]. EPB, çalışma prensiplerine bağlı olarak farklı isimlerle anılır. Malzeme hapsedici şiltleri, su basıncını destekleme şiltleri, yüksek yoğunluktaki çamur şiltleri ve çamur şiltleri. [48]. Çalışma prensibi ise özetle; kazı haznesi tamamen doldurulduktan sonra istenilen destekleme ortamı yapılır ve burgu konveyörle kazılan malzeme normal basınçtaki bölgeye alınmaya başlanır. Kazı ilerlerken şildin tam arkasına getirilen beton segmentler, erektörler yardımıyla yerleştirilir. Segment ve zemin arasındaki boşluklar beton-bentonit karışımı yardımıyla kapatılır. Kazı esnasında istenilen miktarda malzeme geliri olmuyorsa, malzeme yerine su geliyorsa ya da zemin fazla kuruysa, kazı aynasına doğru malzemeyi daha kaygan yapan ve böylece su geçişini engelleyen bir katkı maddesi enjekte etmek de gerekebilir [22,48].

b) Çamur şildi (Slurry Machine) tipi makineler: Tünel güzergâhı boyunca akıcı ortamla karşılaşılabilecek durumlar ve çok akıcı zeminlerde kullanılmak üzere yapılmış makinelerdir. Daima basınç altındaki kafa ile çalışıyor olmaları bakımından anılırlar. Genel anlamda kalem keskilerin kullanıldığı bu makinelerde bazen disk keskilerle birlikte de kullanılmaktadırlar. Diskler, kalem keskilerden daha önde yer alırlar ve böylece büyük bloklara rastlandığında, diskler onları parçalayarak kalem keskilerin kırılmasını engellemiş olurlar. Yeryüzünde hazırlanan akışkan çamur (genellikle bentonit), kesme kafası ve ayna arasındaki boşluğa pompalanarak, aynadan sıyrılarak kazılıp çıkan malzeme ile katılaşıp çamur keki oluşturur. Bu karışım bir çamur pompası ile geri tarafa alınıp yeryüzüne pompalanır. Yeryüzünde süzülüp, temizlenen çamur tekrardan devreye sokularak kullanılır [22,48].

2.4.6.5. TBM'in dünya ve Türkiye'deki örnekleri

Dünya ve Türkiye'de kullanımı giderek artan TBM'ler ile birçok tünel açılmıştır. Türkiye'de TBM; Marmaray projesi, Dudullu-Bostancı metrosu, Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy-Sancaktepe metrosu, Avrasya tüneli gibi birçok tünel örneklerinin inşasında kullanılmıştır. Tablo 2.4'de ise TBM'in dünyadaki en büyük örneklerinden bazıları listelenmiştir.

Tablo 2.4. Dünyada TBM ile açılmış tünel örnekleri ve özellikleri [25]

Çap	Ülke	Proje	TBM Üreticisi	Tarih
19,00 m	Rusya	Orlovsky Tüneli	1 Herrenknecht Mixshield	2009
17,60 m	Hong Kong	Tuen Mun-Chek Lap Kok Denizaltı Otoyol Bağlantısı	1 Herrenknecht Mixshield	2015
17,48 m	ABD	Alaska Otoyolu	1 Hitachi Zosen EPBM	2011
15,76 m	Çin	Wuhan Metrosu Nehir Geçişi	2 Herrenknecht Mixshield	2015
15,55 m	İtalya	A1 Sparvo Otoyol Tüneli	1 Herrenknecht EPBM	2011
15,43 m	Çin	Shanghai West Changjiang Yangtze Nehir Tüneli	1 Herrenknecht Mixshield	2011
15,43 m	Çin	Hangzhou Qianjiang Nehir Altı Karayolu Tüneli	1 Herrenknecht Mixshield	2010
15,43 m	Çin	Shanghai Changjiang Nehir Altı Otoyol Tüneli	2 Herrenknecht Mixshield	2006
15,20 m	İspanya	Madrid Calle 30 Otoyol Tüneli	1 Herrenknecht, 1 Mitsubishi	2005
15,08 m	İtalya	Caltanissetta Otoyol Tüneli,Sicilya	1 NFM Technologies	2013
14,93 m	Çin	Shouxhiou Gölü Otoyol Tüneli	1 Herrenknecht Mixshield	2013
14,93 m	Çin	Weisan Karayolu Tüneli	2 IHI/Mitsubishi/CCCC TBM	2011
14,93 m	Çin	Shanghai Hongmei Karayolu	1 Herrenknecht Mixshield	2012
14,93 m	Çin	Nanjing Yangtze Nehiraltı Karayolu Tüneli	2 Herrenknecht Mixshield	2008
14,87 m	Çin	Jungong Karayolu Subacqueous Tüneli, Shanghai	1 NFM Technologies	2006
14,87 m	Çin	Shangzhong Karayolu Subacqueous Tüneli, Shanghai	1 NFM Technologies	2004
14,87 m	Hollanda	Gronehart Çift Demiryolu Tüneli	1 NFM Technologies	2000

Tablo 2.4. (Devam) Dünyada TBM ile açılmış tünel örnekleri ve özellikleri [25]

14,41 m	Yeni Zelanda	Auckland Sualtı Otoyol Bağlantısı	1 Herrenknecht EPBM	2013
14,40 m	Kanada	Niagara Su Yönlendirme Tüneli	1 Robbins TBM	2006
14,27 m	Çin	Yingbinsan Karayolu Tüneli, Shanghai	1 Mitsubishi EPBM	2009

2.4.6.6. TBM'in avantajları ve dezavantajları

Mekanize kazı sistemlerinin olumlu ve olumsuz yönlerine bakıldığında birçok özellik sıralanabilir.

TBM'in avantajları;

- Kayaç formasyonlarının kırılıp çatlamaması ve aşırı sökülmenin en az olması,
- Sert, yumuşak ve karma zeminlere özel çeşitleriyle 3 zemin tipinde kullanılabilmesi,
- Patlatma işlemi yapıldığında, yeraltı açıklığının çevresinde oluşan gevşeme zonu mekanize sistem kullanılması halinde oldukça sınırlı kalmaktadır. Buna bağlı olarak kazı tahkimat masrafları da azalmaktadır. Bu tür bir gelişme, kaya kütlesinin zamana bağlı deformasyonunun da en az düzeyde kalmasına neden olmaktadır.
- Tünel cinsine göre duraylılık sorunu olmayan tünellerde; mekanize sistemler ile kazı, pasa yükleme ve taşıma işi birlikte yapıldığından kazı hızı oldukça yüksektir.
- Çalışan işçi sayısı oldukça az olmakta ve işçilik maliyetinin yüksek olduğu ülkelerde ekonomik bir kazı işlemi gerçekleştirilmiş olmaktadır.
- TBM ile yapılan kazıda tünel içinde oluşması mümkün toz miktarı oldukça azalmaktadır.
- Böylece işçi sağlığı açısından olumlu bir ortam elde edilmiş olmaktadır.
- Patlatmadaki sarsıntılar söz konusu olmadığından, metropollerde çevresel sorun oluşturmamaktadır.
- Geleneksel olarak kullanılan delme patlatma tünellere göre daha uzun tüneller açılabilmektedir.

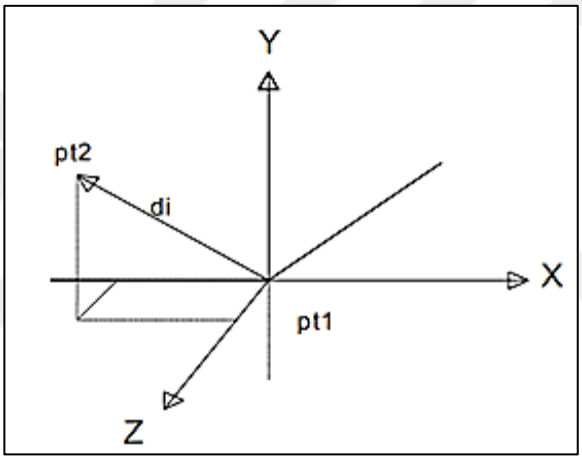
TBM’in dezavantajları;

- Proje tipine göre hazırlandığından maliyeti çok yüksektir.
- Proje devam ederken karşılaşılan zemin özelliklerine göre makineye yeni takımlar eklenebilmektedir. Bu da maliyeti arttıran bir sebeptir.
- Sadece bir doğrultuda tünel açabilmektedir.
- Zayıf kaya kütlelerinde ve fay zonlarındaki süreksizliklerde TBM ile kazı yapmak sakıncalı olabilmektedir.
- Zayıf kaya kütlelerinde, yeraltı açıklığının yan duvarlarında yeterli taşıma kapasitesi olmadığından, TBM ilerlemek için yeterli itme kuvveti sağlayamamaktadır. Bu nedenle bazı ek önlemler alınmalı bu da maliyeti yükseltmektedir.
- Örtüyü oluşturan birimlerin kalınlığından kaynaklı gerilimler, zayıf kayanın dayanımını aşacak değere ulaşırsa, yenilen çevre kayacı makineyi sıkıştırarak ağır hasarlara neden olabilmektedir.
- Fay zonlarında göçme davranışı olduğunda, kısa sürede müdahale şansının olmamasından dolayı, TBM kalkanının üzerinde biriken göçük malzeme genellikle insan gücüyle temizlenir. Bu durumlar da tünel ilerleme hızını düşürmekte ve maliyete etki etmektedir.

3. TÜNELLERDE DEFORMASYON

Deformasyon kelime anlamı olarak; şekil değiştirme, orjinal şeklinden bozulma gibi kısaca tanımlanabilmektedir. Şekil 3.1 ile daha ayrıntılı ifade edersek;

> " Bazı kuvvetlerin etkidiği bir bölgede seçilen karakteristik bir noktanın, t1 ve t2 zamanlarında konumlarının belirlendiği varsayıldığında t1 zamanındaki konumu pt1, t2 zamanındaki konumu pt2 oluyorsa ve aralarındaki di uzaklığının statiksel metotlarla sıfırdan farklı olduğu kanıtlanmışsa di uzunluk vektörüne deformasyon denir" [26].



Şekil 3.1. di vektörü [26]

Deformasyon, mühendislik yapılarında meydana geldiğinde, insan hayatını ve onun güvenliğini yakından ilgilendiren sonuçlar doğurabilmektedir. Konumuz gereği tünelin açıldığı kaya formasyonunda, kazı esnasında bazı reaksiyonlar meydana gelmektedir. Bunların sonucu olarak da zeminde oturmalar, burulmalar ve deformasyonlar gerçekleşmektedir. Bu tür hareketlerin inşa edilen yapıda, yapının çevresinde ve zeminde meydana getirebileceği zararları belirlemek ve bunları minimumda tutabilmek için devamlı izleme ve ölçüm işlerinin yapılması gerekmektedir. Çeşitli ölçümlerle yapılan izleme işine deformasyon ölçümleri denir. Bu ölçümlerin yer, zaman ve büyüklük parametrelerine bağlı olarak değişimlerinin belirlenip yorumlanması adımı ise deformasyon ölçümlerinin analizi olmaktadır.

Deformasyonları jeodezik ve jeodezik olmayan birçok yöntemle izlemekle mümkündür. Jeodezik yöntemlerde, yatay ve düşey yöndeki deformasyonların izlenmesi amacıyla oluşturulmuş kontrol noktalarında (ağlarında), periyodik olarak yapılan klasik ve GPS ölçülerinin değerlendirilmesi ve analizleriyle izleme işi yapılır. Jeodezik olmayan yöntemlerde ise deformasyona neden olan yük değişimleri, yeraltı su seviyesi durumu, gerilme, sıcaklık vb gibi değişik faktörlerin büyüklükleri ve değişimleri özel donanım ve yöntemlerle ölçülür [27,28,29]. Deformasyon ölçmelerinin farklı meslek gruplarındaki örnekleri; mühendislik yapılarında yükler altında yapıdaki değişimlerin araştırılmasında, makine yapılarında ayar durumlarının kontrolünde, yer ve kaya mekaniği temel problemlerinde, jeoloji ve jeomorfoloji dallarında yer kabuğu hareketlerinin izlenmesinde gibi [29].

3.1. Deformasyonların Sınıflandırılması

Deformasyonları şekil değişimlerinin yapı ve türüne göre; geçici, kalıcı ve elasto-plastik deformasyonlar olmak üzere 3'e ayrılabilir.

a. Geçici (Elastik) deformasyon; Yapıya etki eden faktörler ortadan kaldırıldığında, yapının eski haline dönmesi durumudur [26].

b. Kalıcı (Plastik) deformasyon; Yapıya etki eden faktörler ortadan kaldırıldığında, yapının eski haline dönmediği durumdur [26].

c. Elasto-plastik deformasyon; Yapıya etki eden faktörler ortadan kaldırıldığında, yapının eski haline dönmeye çalışması fakat tam olarak eski haline dönemediği durumdur [26].

Ayrıca deformasyonlar Tablo 3.1'deki gibi konum ve şekil değişikliği yapmaları bakımından; dönme, uzama, ötelenme, eğilme, burulma ve bükülme şeklinde de sınıflara ayrılabilir [26].

Tablo 3.1. Deformasyon çeşitleri [28]

DEFORMASYON	
KONUM DEĞİŞİKLİĞİ	ŞEKİL DEĞİŞİKLİĞİ
Kayma (Ötelenme)	Uzama
Dönme	Burulma
Eğilme	Burkulma

Yapı ve çevresindeki geometrik şekil değişimlerini dış geometrik değişimler ve iç geometrik değişimler olmak üzere iki bölüme ayırabiliriz. Dış geometrik değişimler, cismin tümüyle yer değiştirmesini sağlarlar. İç geometrik değişimler (deformasyonlar) ise cismin şekil değiştirmelerini tanımlarlar. Tablo 3.2'de ayrıntılı olarak listelenmiştir.

Tablo 3.2. Yapılarda oluşan geometrik değişimlerin sınıflandırılması [28]

Yapılarda Oluşan Geometrik Değişimler			
Dış Geometrik Değişimler		İç Geometrik Değişimler	
Ötelenme	Dönme	Düzenli Deformasyonlar	Düzensiz Deformasyonlar
Yatay ötelenme, Düşey ötelenme	Yatay dönme, Düşey dönme	Uzama, Eğilme, Burulma, Burkulma	Oyulma, Obje deformasyonu

3.2. Deformasyona Neden Olan Faktörler

Deformasyonlara neden olan birçok faktör olmakla birlikte, bunlar genel anlamda tektonik hareketler ve yerel hareketler olarak iki ana gruba ayrılabilir.

3.2.1. Tektonik hareketler

Yer kabuğu devamlı hareket halindedir. Dünyanın kabuğunda meydana gelen kırılma, kıvrılma, takım halinde yükselme ve çökme olaylarının tümü tektonik hareketlerdir [50]. Yer kabuğu üzerinde yer alan levhalar üç farklı şekilde hareket edebilmektedir. Birbirlerine yaklaşabilirler, birbirinden uzaklaşabilirler ve yan yana aynı ya da zıt yönde hareket edebilirler. Bu levha hareketleri sürekli olarak devam etmektedir. Plakaların birbirinden uzaklaştığı bir hareket yer kabuğunda şiddetli bir sarsıntıya neden olmamaktadır. Birbirine yaklaşan levha hareketleri ise genelde çarpma ile sonuçlanmakta ve şiddetli sarsıntılara neden olmaktadır. Levhaların yan yana sürtünmeleri sonucunda da çatlaklar oluşmakta ve çatlak boyunca kırılmalar meydana gelmektedir. Kısa süreli bu hareket yeryüzünde büyük yıkımlara bile neden olabilmektedir. Levhalar arasındaki sürtünmenin çok büyük olması ve bir levhanın diğer levhaya dayandığı kısımda arada kalan kayaların sıkışması sonucu kayalar yerlerinden oynar ve kırılırlar. Çünkü sürtünme çok büyük olmaktadır [26,50].

Sadece yumuşak formdaki zeminler değil, sert ve sağlam görünen kayaçlar da yer kabuğundaki kuvvetlerin etkisiyle deforme olurlar. Bu kuvvetler; sıkışma kuvvetleri (compressive forces), çekme kuvvetleri (tensional forces) ve makaslama kuvvetleridir (shearing forces). Bu üç kuvvet etkisi ile faylanma, kıvrımlanma, kesme-makaslama, uzama-incelme gibi deformasyonlar görülebilmektedir [51].

3.2.2. Yerel hareketler

Heyelan olarak adlandırdığımız toprak kayması buna en güzel örneklerdendir. Dış etkiler altındaki üst tabakanın, altında bulunan tabakadan ayrılması şeklinde oluşur [28]. Aşağıda bunun dışında deformasyona neden olan faktörler de sıralanmıştır.

- Kapalı bir maden işletmesinde açılan galerilerin çökmesi gibi, maden çıkarma işi sırasında meydana gelen hareketler. Jeolojik yapının dengesini değiştiren bu hareketler, denge yeniden sağlanıncaya kadar devam eder.

- Okyanuslarda, gel-git olayının etkisiyle oluşan hareketler
- Meteorolojik etkilerden doğan hareketler
- Yapının kendi ağırlığından doğan hareketler
- Yapıya etki eden dış yükler
- Yapım, projelendirme ve işletme hatalarından kaynaklanan hareketler
- Trafik yoğunluğu, makine tesislerinin meydana getirdiği küçük çaptaki sarsıntılar gibi etkilerle temelde oluşan gevşemeler
- Kentleşmenin bir sonucu olarak yer kabuğunda aşırı yüklemeden doğan hareketler [26,28].

3.3. Deformasyon Ölçmelerinde Temel Adımlar ve Ölçme Yöntemleri

Deformasyonların izlenmesi çalışmalarında takip edilmesi gereken temel adımlar vardır. Öncelikle beklenen deformasyonlar ve deformasyonların olası maximum değerlerinin tahmin edilmesi gerekir. Bunun için de gerekli ölçme doğruluklarının ve yöntemlerinin belirlenmesi gerekir. Sonrasında, ölçme ağının dizaynı ve uygun ölçme yöntemleriyle ölçümü aşaması gelir. En son aşamada ise toplanan verilerin değerlendirilmesi ve belirlenen deformasyonların modellenmesi gelmektedir [27].

Mühendislik yapılarındaki deformasyonların izlenmesinde takip edilecek temel işlem adımları özetle;

- Deformasyonu izlenecek yapının durumunun (performansının) belirlenmesi
- Konum doğruluğu gereksinimi ve buna uygun yöntem seçimi
- Ölçmelerin türü ve sayısı
- Ölçmelerde kullanılacak alet ve donanımların seçimi
- Ölçmelerin yapılması ve deformasyonların belirlenmesi
- Verilerin değerlendirilmesi ve analizi
- Deformasyonların zaman, konum ve frekans bakımından davranışının ortaya konması
- Modellenmesi
- Rapor edilmesi

şeklinde sıralanabilir [27].

Deformasyonların izlenmesinde jeodezik ve jeodezik olmayan fiziksel yöntemlere başvurulur. Deformasyon ölçme yöntemleri Tablo 3.3'te ayrıntılı listelenmiştir.

Tablo 3.3. Deformasyon ölçme yöntemleri [30]

Deformasyon Ölçme Yöntemleri	
A. Fiziksel Yöntemler	B. Jeodezik Yöntemler
Kaya basıncını ölçen uçlar	a. Uydu Teknikleri
Kuvvet ölçen uçlar	b. Fotogrametrik Yöntemler
Toprak basıncı ölçen uçlar	c. Jeodezik Yöntemler
Gerilim ölçen uçlar	i. Yatay yön deformasyon ölçme yönt.
Su basıncı ölçen uçlar	Jeodezik ağ yöntemi
Eğim ölçen uçlar	Hassas poligon yöntemi
	Aliyman yöntemi
	ii. Düşey yön deformasyon ölçme yönt.
	Hassas nivelman yöntemi
	Trigonometrik nivelman yöntemi
	Hidrostatik nivelman yöntemi

3.4. Deformasyon Analizinde Kullanılan Yöntemler

Yapılan ölçmeler sonucunda elde edilen veriler, rastgele ölçü hataları ile yüklüdür. Bu nedenle ortaya gerçek bir çalışma koyabilmek için gerekli sayıda ölçü ile yetinilmez, gereğinden fazla sayıda ölçü yapılır. Yapılan ölçüler arasındaki çelişkileri giderebilmek ve ölçülerle bilinmeyenler arasındaki fonksiyonel ilişkileri sağlayabilmek için dengeleme hesapları yapılır. Böylelikle deformasyon ölçülerinin analizinde de dengeleme sonuçlarından yararlanılır. Bu amaçla oluşturulan ağların dengelemesinde dış parametrelerin de bilinmeyen olarak alındığı serbest ağ dengelemesi kullanılmaktadır [31]. Deformasyon analizi yapılacak bölge ya da yapı bir dizi noktayla temsil edilir. Bu nokta kümeleri bir jeodezik ağa dönüşürler. Lokal ağ şeklinde kurulan bu ağların herhangi bir koordinat sistemine bağlı olması gerekmez. Deformasyonların belirlenmesi amaçlı kurulan böyle ağlara kontrol ağı denmektedir. Aynı zamanda ağda yapılan ilk ölçülere de sıfır ölçüsü denir. Yineleme ölçüleri ise yapıldıkları sıraya göre I. yineleme ölçüsü, II. yineleme ölçüsü ya da t_1 ölçü grubu, t_2 ölçü grubu olarak adlandırılır [28]. Jeodezik ağlarda yapılan deformasyon analizinde çok sayıda yöntem kullanılabilmektedir. Uygulamalarda en çok kullanılan deformasyon analizi yöntemleri sırasıyla; analitik yöntem ile deformasyon analizi, bağıl güven elipsleri ile deformasyon analizi ve S transformasyonu ile deformasyon analizidir. Analitik yöntem ile deformasyon analizinde, öncelikle ağın ölçü periyotları arasında geçen zamanda, konumu değişmeyen noktalar alınır. Devamında bu noktalara dayalı olarak, noktaların dışında

kalan her bir nokta için araştırma yapılır. Toplu dengeleme yapılarak, ilgili noktaların konumlarında değişim olup olmadığı istatiksel yönden araştırılır. Bağıl güven elipsleri ise, deformasyon analizlerinde grafik yorumlamada kullanılır. Analitik yöntemde toplu dengeleme işi yapıldıktan sonra, obje noktalarına ait ters ağırlık alt matrisi yardımıyla ilgili noktanın bağıl güven elipslerinin elemanları hesaplanır. İlgili noktaya ait bağıl güven elipsleri ölçekle çizilerek, fark vektörünün elips içinde kalıp kalmaması durumuna göre deformasyondan söz edilir. S transformasyonu ile deformasyon analizinde de, şayet t_1 ve t_2 zaman aralıklarında gözlenen ağ geometrileri farklı ise bu zamanlarda ölçülen ağlar eşlenik noktalara göre konumlandırılır. Bu yöntem, karşılaştırılacak ağ ile daha önce herhangi bir datumda yapılan dengeleme sonuçlarını, istenilen datumlara dönüştürmede kolaylık sağlamaktadır [52].

3.5. Verilerin Değerlendirilmesi ve Sonuçların Yorumu

Deformasyon araştırmasının en son ve en önemli bölümü verilerin değerlendirilip, sonuçlarının yorumlandığı aşamadır. t_1 ve t_2 zamanlarında noktaların konumları belirlenip, istatistik testler yardımıyla konum farklılıklarının anlamlı olup olmadığı araştırılır. Jeodezik ağın sıfır ile yineleme ölçüsü ya da iki yineleme ölçüsü arasında; jeodezik deformasyon ağının yapısı aynı kalmışsa, aynı ölçme planı uygulanmışsa ve ölçülerin duyarlıkları değişmemişse bu ağa univaryant ağ denmektedir. Bu koşullardan herhangi biri gerçekleşmiyorsa multivaryant ağdan bahsedebiliriz. Univaryant ağlarda deformasyon analizi multivaryant ağlara göre daha kolay olmaktadır. Deformasyonlar, problemin şekline, kapsamına ve uygulanan ölçme yöntemlerinin türüne göre statik, kinematik ve dinamik modellerle incelenebilir.

3.6. Deformasyon Modelleri

Deformasyonlar birçok koşula bağlı olarak ölçme yöntemleriyle tespit edilirler ve ölçme yöntemleri de problemin şekli ve büyüklüğüne göre birçok etken çerçevesinde belirlenirler. Deformasyonlar problemin şekline, kapsamına ve ölçme yöntemlerinin türüne göre; zamana bağlı olmayan statik model, zamana ve konuma bağlı olan kinematik model ve hareketin nedeninin de dikkate alındığı zamana ve konuma bağlı dinamik model gibi değişik modeller içinde incelenirler. Modellere ait Denklemler (3.1), (3.2) ve (3.3) ile Tablo 3.4'te verilmiştir [32].

Tablo 3.4. Formülize edilmiş modeller [33]

Model	Fonksiyon	Zamana Bağlı	Kuvvete Bağlı
Statik	$Xt_k = Xt_{k-1} + \varphi_{sta}(x)$ (3.1)	-	-
Kinematik	$Xt_k = Xt_{k-1} + \varphi_{kin}(x, t_k - t_{k-1})$ (3.2)	Evet	-
Dinamik	$Xt_k = Xt_{k-1} + \varphi_{din}(x, ft_k - ft_{k-1})$ (3.3)	-	Evet

3.6.1. Statik model

Statik modelin konusu, deformasyon araştırması yapılan yapı ya da bölgenin karakteristik noktalarına ait deformasyonlarını, zamandan ve etkiyen dış kuvvetlerden bağımsız olarak belirlemektir [53]. Bu model en basit deformasyon modelidir. Deformasyon incelemesi yapılacak yapı ya da bölgede seçilen karakteristik noktaların, bir ölçme periyodu süresince konum değiştirmedikleri varsayımı kurulan modelin ana prensibidir. Yani tüm ağın bir kez ölçülmesi sırasında noktaların sabit kaldığı varsayılır. Bu modelde ölçümler tamamlanana kadar geometrik değişimler kabul edilmez. Geometrik değişimlerin başlangıç zamanı ölçümlerin sona ermesi ile başlar. Belirli sürelerle yenileme ölçüleri yapılır ve deformasyon analizi de tüm bunların etkisinde istatistik hesapların yardımıyla yapılır [26].

3.6.2. Kinematik model

Deformasyon incelemesi yapılacak yapı ya da bölgede seçilen karakteristik noktaların hareketleri ve bu hareketlerin hızlarını belirlemek amacıyla modelleme yapılır. Bu model, deformasyon incelemesi yapılacak yapı ya da bölgenin bir periyottaki ölçme işlerinin uzun zaman aldığı durumlarda uygulanır. Deformasyon incelemesi, bölge ya da yapının uzun süre gözlenmesiyle elde edilir. Ölçmelerin uzun zaman aldığı durumlarda örneğin bir bölgedeki yer kabuğunun hareketlerinin belirlenmesinde ölçme süresi 3-4 yıldır ve bu süre zarfında nivelman noktalarının yüksekliklerinin sabit kaldığı düşünülemeyeceğinden, inceleme sırasında noktaların yükseklikleri yerine yükseklik değişimleri zamanın fonksiyonu olarak yazılır ve düşey hızların zamanı incelenir [26,54]. Kinematik modelde amaç; deformasyona neden olan dış güçleri dikkate almadan, zamana bağlı fonksiyonlar yardımıyla nokta hareketlerinin uygun bir tanımını bulmaktır [53].

3.6.3. Dinamik model

Bu modelde deformasyonlar zamanın bir fonksiyonu olarak ele alınır. Deformasyona neden olan kuvvetler ile yapı ya da bölge karakteristiklerinin yer ve zamana bağlı dönüşüm fonksiyonu modeli ile incelenerek, deformasyonların ve sebeplerinin ortaya konması dinamik bir modeldir [54].

Kinematik, statik ve dinamik modellerin özellikleri 3.5'te özetlenmiştir.

Tablo 3.5. Deformasyon modellerinin özellikleri

Deformasyon Modeli	Kinematik Model	Statik Model	Dinamik Model
Zamanın Etkisi	Zaman fonksiyonu olarak hareketler	Modelleme yok	Yük ve zamanın bir etkisi olarak hareketler
Kuvvetin Etkisi	Modelleme yok	Yükün etkisi olarak yer değiştirme	
Objenin Durumu	Hareket halindeki süreklilik	Yük altında yeterli miktarda değişim	Hareket halindeki süreklilik

3.7. Uygun Deformasyon Modelinin Seçimi

Deformasyon analizinde kullanılacak modelin seçimi önemlidir. Uygun deformasyon modeli seçilmediğinde, deformasyon analizinde başarısızlıklara neden olabilmektedir. Kompleks deformasyon modelleri kullanmak; modelin güvenilirliğini azaltmamasına karşılık analizin başarısızlığına sebep olabilir. Bir diğer yandan ise basit deformasyon modelleri; araştırılan yapı, bölge ya da objenin deformasyonunu tanımlamada yetersiz kalabilir. Bu nedenle deformasyon şiddeti ve ilerleyişi hakkında ön bilgi yok ise basit modellerle başlamak daha doğru bir tercih olur. İstatistik testler sonucunda basit modeller yetersiz görülürse daha kompleks modellerle çalışmak daha doğru bir tercih olacaktır [53].

3.8. Deformasyon Ölçmelerinin Uygulama Alanları

Mühendislik yapılarında deformasyonu; Barajlarda deformasyon, köprü ve viyadüklerde deformasyon, galeri ve tünellerde deformasyon, raylı sistemlerde deformasyon, yüksek yapılarda deformasyon, tarihi ve sanat yapılarında deformasyon, makine tesislerinin inşasında deformasyon, heyelanların deformasyonu ve yerkabuğu hareketlerinin deformasyonu olarak sıralayabiliriz. Baraj yapıları gibi büyük yapıların sebep olacağı felaketlerde büyük olacaktır. Bu nedenle sürekli izlenmeleri ve meydana gelebilecek deformasyonların önceden belirlenmesi çok önemlidir. Köprüler ise devamlı hareketli bir yüke ve sıcaklık değişimlerine maruz kalırlar. Bunun yanı sıra rüzgâr kuvveti ile de devamlı bir salınım olmaktadır. Bu nedenle köprüyü oluşturan her bir parçanın durumu sürekli izlenmeli ve deformasyonlar önceden tahmin edilebilir halde olunmalıdır. Galeri ve tünel gibi yapılarda doğal durumdaki zemine bir müdahale gerçekleştiğinden, zeminin yumuşaması sonucu deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Bunun haricinde zemindeki yeraltı suyu durumu, tabakalanma, çatlak-kırık durumu, fay hattının durumu, yeraltındaki gaz gibi faktörlerin hepsi deformasyona neden olabilmektedir. Raylı sistemlerde hız ve yolcu yoğunluğundan kaynaklı yol bozulmaları, ray aşınmaları ve teknik bakım gerektiren parçaların deformasyonu çeşitli yöntemlerle devamlı izlenmektedir. Tarihi ve sanat yapılarındaki aşınma ve bozulmalar bir anda değil de bir süreç içerisinde meydana geleceğinden, deformasyonlar her bir taşıyıcı eleman için sürekli kontrol altında tutulmak istenir. Yer hareketleri ise devamlı olarak yatay ve düşey yönde meydana gelmektedir. Bu nedenle yeryüzünde çeşitli ağlar kurularak devamlı olarak yer hareketleri izlenmektedir. Çok büyük felaketlere neden olabilecek heyelanların engellenebilmesi için, inceleme konusu olan bölgede hareket beklenen ve hareket beklenmeyen yerlerde pilyeler yapılarak, jeodezik ağlar oluşturulur. Bu noktaların deplasmanı, ölçüler belirli zaman aralıklarında tekrarlanarak kontrol edilir.

3.9. Tünellerde Deformasyona Neden Olan Faktörler

Zeminin jeolojik yapısı açısından bakıldığında; tünel açılacak güzergâhın fay hattı bölgesine olan yakınlığı, tünel açılacak ana kayaya ve diğer tabakalara ait parametreler, güzergâh boyunca yatayda ve dikeyde mevcut olan zemin geçişleri, tabakalardaki kırık-çatlak durumu, yeraltı suyu durumu gibi etkenler mukavemet azaltıcı etkiye sahip faktörlerdir. Tüm bunlar projelendirme öncesinde açılacak sondaj kuyuları ile derinlemesine araştırılmalıdır. Güzergâh zemini araştırılırken civardaki yapılar ve durumları hakkında da fizibilite araştırılması yapılmalıdır. Bunların haricinde tünelin boyutları, şekli, çapı, uzunluğu ve tünel açım yöntemi de deformasyona etki eden faktörlerdendir. Kazı işi devam ederken, zeminin gevşemesinden dolayı deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Bunun için iksa, hasır donatı, püskürtme beton vb. destek sistemleri uygulansa bile bazen çökmeler meydana gelebilmektedir. Bu nedenle kontrollü bir kazı ilerlemesi için kazı uzunluğunun doğru hesaplanması gerekir. Tünel dışındaki çevrede mevcut kanalizasyon, gaz ve su borularının da olası bir deformasyon ve can güvenliğine karşı konumları tünele göre belirlenmelidir. Tüm bu etkenlerin dışında, nem, sıcaklık ve basınç değişimleri de birer etkendir [30,52].

4. SEÇİLEN ANALİZ YÖNTEMİ VE İNCELENEN TÜNELİN TANITIMI

Tünellerle ilgili deformasyon araştırmaları incelendiğinde literatür kısmında da özetlendiği üzere derinliğe bağlı bir deformasyon araştırması direk olarak gözlenememiştir. Bu nedenle bu alana katkı sağlayabilmek amacıyla sonlu elemanlar metodu ile çalışan Plaxis 2D programında modellenen bir tünelin derinliğe bağlı deformasyon analizleri incelenmiştir.

4.1. Sonlu Elemanlar Metodu

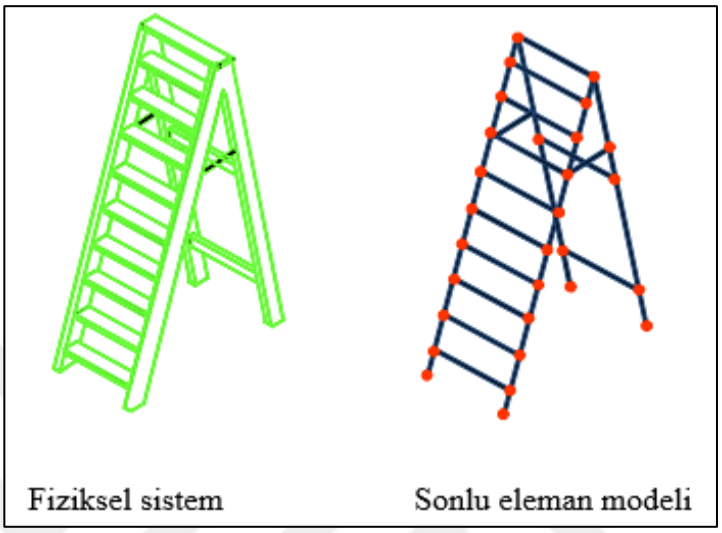
Sonlu elemanlar metodu (SEM) diğer nümerik analiz yöntemlerine nazaran, karmaşık sınır koşulları ve nonlineer malzeme davranışı gibi zor ve karmaşık problemlerin çözümünde sunduğu sistematik programlama ile bilgisayar yazılımına en uygun formülasyona sahiptir. Yöntem, 1950 yılında uçak ve uzay sanayinde kullanılmaya başlanmıştır. Bilgisayar sistemlerindeki gelişmeyle birlikte mühendislik alanındaki kullanımı da genişlemiştir. Önceleri sadece yapısal analizler için kullanılan SEM, şimdilerde birçok mühendislik alanında sınır değer problemlerinde kullanılmaktadır [55,7].

Çok karmaşık bir problem cebirsel veya diferansiyel denklemler yardımıyla, kavranması daha kolay problemlere ayrılarak ifade edilebilir. Alt problemlerin çözümü ve sonuçların birleştirilmesiyle birlikte karmaşık problemin çözümü de sağlanmış olunur. Burada elde edilen sonuçlar çoğu zaman problemin yaklaşık çözümüdür ve genelde bir sabit katsayı ile sonuç düzeltmesi yapılmaktadır. Sonlu elemanlar metodu; iyi bir planlama, doğru modelleme, sınır şartları-yük durumları için doğru bir yaklaşım ve sonuçların doğru yorumlanmasını gerektirir. Metodun üç temel özelliği vardır;

1- Karmaşık geometrideki bir problem, sonlu elemanlar olarak adlandırılan basit geometriye sahip alt problemlere ayrılır.
2- Tüm elemanlardaki sürekli fonksiyonların, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir.

3- Aranan değerlerin elemanlar içindeki tanım denklemlerinin, düğüm noktalarındaki çözümü ile problemin çözümünde de yeterli olmasıdır [55].

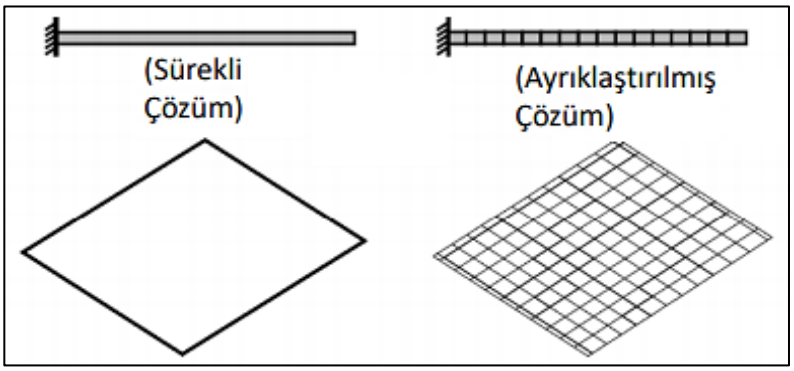
Sonlu elemanlar metodu ile karmaşık bir sistemin modellenmesi Şekil 4.1 örneğinde gösterilmiştir.



Şekil 4.1. SEM ile fiziksel bir sistemin modellenmesi [55]

Sonlu elemanlar metodunda 2 temel prensip uygulanmaktadır. Bunlardan ilki yer değiştirmeleri ilk bilinmeyen olarak tanımlayan deplasman yöntemi, diğeri ise gerilmeleri ilk bilinmeyen olarak benimseyen denge yöntemidir. Tünelcilikte de minimum enerji prensibine dayanan deplasman yöntemi kullanılmaktadır [11].

Geoteknik mühendisliğine konu olan problemlerde sonlu elemanlar analizleri ile gerilmeler, deformasyonlar, deplasmanlar v.b. rahatlıkla belirlenebilmektedir. Bu alanda gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek amacıyla, yöntemde aşamalı kazı ve yükleme yapılabilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı tünel yapılarının tasarımında ve modellenmesinde sıklıkla başvurulan önemli bir araç olmaktadır. Basit anlamda baktığımızda taşıyıcı bir sistem belirli sayıda elemanın, belirli sayıda düğüm noktasıyla birbirine bağlandığı bir model olarak tanımlanır (Şekil 4.2). Her bir elemanın karakteristik özellik ve davranışının belirlendiği çözümden, tüm sistemin çözümüne yani karakteristik özellik ve davranışlarının belirlenmesine giden bir analiz yoludur.



Şekil 4.2. Karmaşık bir problemin ayrıklaştırılmış çözümü

Sonlu elemanlar metodunda bir tünel yapısı analiz edileceği zaman, zeminin özelliklerinin yanısıra tünel kaplamasının da tüm karakteristik özellikleri dikkate alınır. Böylelikle zemin-kaplama arasındaki etkileşim gerçeğe çok yakın anlamda ifade edilebilir olmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminin analiz adımları aşağıda sıralandığı gibidir;

- Eleman seçimi
- Ortamı elemanlara ayırma
- Fonksiyonun seçimi
- Malzeme bünye davranışı
- Eleman denklemlerinin elde edilmesi
- Eleman denklemlerinin birleştirilerek sistem denklemlerinin oluşturulması
- Sistem denklemlerinin çözülmesi ve birinci dereceden bilinmeyenlerin bulunması
- Birinci derece bilinmeyenlerden ikinci derece bilinmeyenlerin hesaplanması
- Sonuçların yorumu [7]

Sonlu elemanlar yönteminin avantajları;

- Hız ve optimizasyon olanağı bakımından bilgisayar ile çözülebilir oluşu
- Geliştirilen sonlu elemanlar formülasyonunun birçok probleme uygulanabilirliği
- Karmaşık yükleme durumları, sınır koşulları ve malzeme durumlarının dikkate alınabilir oluşu
- Seçilen birincil bilinmeyenler ile bunlara bağımlı ikincil bilinmeyenlerin hesaplanabilir oluşu

Dezavantajları;

- Bilgisayar yardımı ile çözülebilir oluşundan ötürü bilgisayara bağlılık ve bellek problemi
- Yaklaşık bir yöntem olması, çözüme çok yakın sonuçlar vermesi ama tam-kesin sonuçlar verememesi [7]

Bu çalışmada tünel inşaatı sırasında zeminde meydana gelebilecek deformasyonlar, derinlik değişimine göre Plaxis 2D programıyla incelenmiştir.

4.2. Plaxis Sonlu Elemanlar Programı

Bu program Geoteknik mühendisliği problemlerinin nümerik analizi için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır. Program şu 4 programdan oluşmaktadır;

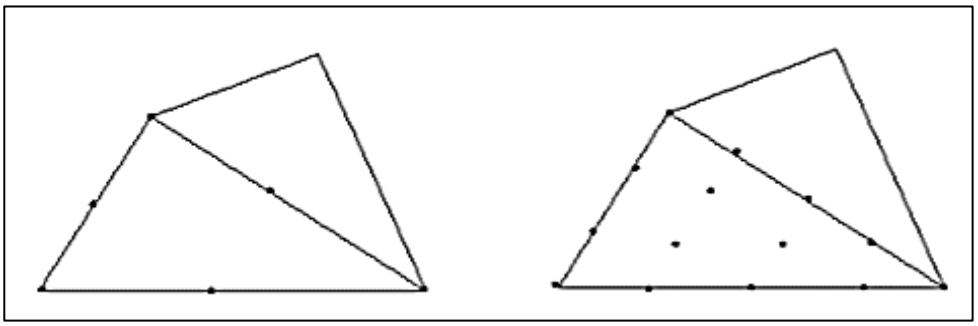
İnput: Bilgi girişinin yapıldığı program

Calculation: Analizlerin gerçekleştirildiği program

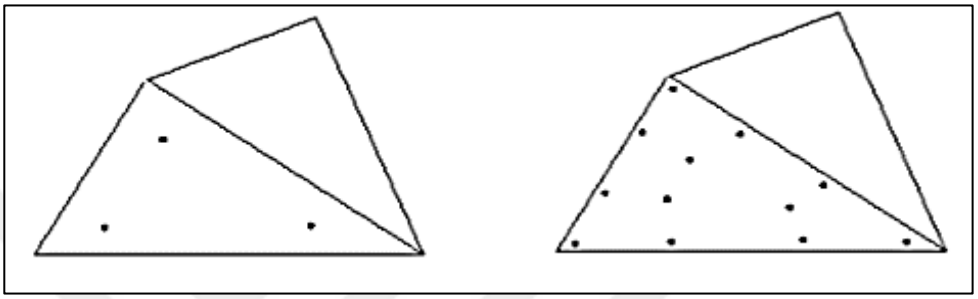
Output: Analiz sonuçlarının grafik olarak verildiği program

Curve: Elde edilen sonuçlar ile grafiklerin oluşturulmasını sağlayan program

Programda kullanılan sonlu elemanlar formasyonunda, deplasmanlar esas bilinmeyen olarak kabul edilmektedir. Hesaplama öncesinde ağın oluşturulması adımında, hücreler üçgen elemanlara ayrılırlar. Plaxis' te varsayılan bu üçgen elemanlar 6 ya da 15 düğümlü elemandırlar. Gerçeğe en yakın hesaplama için 15 düğümlü elemanın seçilmesi daha doğru olmaktadır. Fakat 15 düğümlü eleman, 6 düğümlü elemana göre hesaplama süresi bakımından daha fazla zaman almaktadır. Deplasmanlar bu düğüm noktalarında, gerilemeler ise gerilme noktalarında hesaplanmaktadır. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'ten de görüleceği üzere; 6 düğüm noktalı elemanın 3 gerilme noktası, 15 düğüm noktalı elemanın ise 12 gerilme noktası vardır.



Şekil 4.3. Plaxis ile analizde kullanılan elemanlar ve düğüm noktaları [7]



Şekil 4.4. Plaxis ile analizde kullanılan elemanlar ve gerilme noktaları [7]

Input kısmından çalışma sayfasına giriş yapılır. Programın "model" bölümünden de 15 düğümlü (tercihen) eleman seçimi yapılır. Model boyutları; x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max} olarak bu kısımda girilir. "Modify soil layers" pencerisinden her bir zemin katmanının derinlikleri ve yeraltı suyu durumu girilerek, değiştirilebilmektedir. Böylelikle gerçeğe çok yakın anlamda bir zemin modellenebilmektedir. Aynı pencereden "materials" bölümünden de zemin ve arayüzler için veri girişi yapılabilmektedir (Şekil 4.5). Programda zemin modeli oluşturulurken; sıklıklıkla kullanılan Mohr-Coulomb (MC), kohezyonsuz zeminler ve aşırı konsolide kohezyonlu zeminlerde kullanılan Hardening Soil (HS), efektif gerilemelere göre analiz yapan ve yumuşak zeminlerin davranışını daha iyi tanımlayabilen Soft Soil Creep Model (SSC) ve Lineer Elastic (LE) model olmak üzere dört farklı zemin modeli seçilebilmektedir. Zemin modeli, gerilme artışları ile şekil değiştirme arasındaki ilişkinin matematiksel bir ifadesi olmaktadır.

Mohr Coulomb modelinde; Young modülü (E), poisson oranı (υ), içsel sürtünme açısı (φ), dilatansi (genleşme) açısı (ψ), zeminin kuru ve ıslak birim hacim ağırlığı (γ_{dry} ve γ_{wet}), yatay ve düşey permeabilite katsayıları (kx ve ky) tanımlanır.

Hardening Soil modelinde; kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (φ), dilatansi açısı (ψ), drenajlı üç eksenli basınç deneyinde sekant rijitliği (E^{ref}_{50}), başlangıç ödometre yüklemesi için tanjant rijitliği (E^{ref}_{oed}), gerilme seviyesine bağlı malzeme katsayısı (m), yükleme boşaltma için rijitlik E^{ref}_{ur} ve E^{ref}_{ur} =3 E^{ref}_{oed}, yükleme boşaltma için poisson oranı (υ_{ur}), rijitlikler için poisson oranı (P_{ref}), normal konsolide durum için sükunetteki toprak basıncı katsayısı (K^{NC}_0), göçme oranı (R_f), çekme gerilmesi ($\sigma_{tension}$) ve derinlikle kohezyon artışı ($\sigma_{increment}$) parametreleri tanımlanır.

Soft Soil Creep modelinde ise; Modifiye sıkışma indisi (λ), modifiye şişme indisi (K*), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (φ), dilatansi açısı (ψ), yükleme boşaltma için poisson oranı (υ_{ur}), normal konsolide durum için sükunetteki toprak basıncı katsayısı (K^{NC}_0) parametreleri tanımlanır.

Parameter	Name	Top layer	Clay-siltstone	Clay-limestone	Unit
General					
Material model	*Model*	Hardening soil	Hoek-Brown	Hoek-Brown	-
Type of material behaviour	*Type*	Drained	Drained	Drained	-
Soil unit weight above phreatic level	γ_{unsat}	20	25	24	kN/m^3
Soil unit weight below phreatic level	γ_{sat}	22	25	24	kN/m^3
Initial void ratio	e_{init}	0.5	0.5	0.5	-
Parameters					
Secant stiffness in standard drained triaxial test	E^{ref}_{50}	$4.0 \cdot 10^4$	-	-	kN/m^2
Tangent stiffness for primary oedometer loading	E^{ref}_{oed}	$4.0 \cdot 10^4$	-	-	kN/m^2
Unloading / reloading stiffness	E^{ref}_{ur}	$1.2 \cdot 10^5$	-	-	kN/m^2
Power for stress-level dependency of stiffness	m	0.5	-	-	-
Young's modulus	E'	-	$1.0 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^6$	kN/m^2
Poisson's ratio	ν'_{ur}	0.2	0.25	0.25	-
Uniaxial compressive strength	σ_{ci}	-	$2.5 \cdot 10^4$	$5.0 \cdot 10^4$	kN/m^2
Material constant for the intact rock	m_i	-	4.0	10.0	-
Geological Strength Index	*GSI*	-	40.0	55.0	-
Disturbance factor	*D*	-	0.2	0.0	-
Cohesion	c'_{ref}	10.0	-	-	kN/m^2
Friction angle	φ'	30	-	-	°
Dilatancy parameter	ψ_{max}	-	30.0	35.0	°
Dilatancy parameter	σ_ψ	-	400	1000	kN/m^2
Interfaces					
Interface strength	–	Rigid	Manual	Rigid	-
Strength reduction factor	R_{inter}	1.0	0.5	1.0	-

Şekil 4.5. Zemin malzeme özelliklerinin tanımlandığı pencere görüntüsü

Tüm bu tanımlama işlemlerinden sonra yapısal elemanın tanımlanması safhasına geçilir. Tünel hesabında, programdaki "tunnel" komutu kullanılmaktadır. Tünel; sol yarım tünel kesiti, sağ yarım tünel kesiti ve tam tünel kesiti olmak üzere 3 farklı

şekilde programa tanımlanabilmektedir. Tünel yarıçapı ve şekli de burada belirlenir. Tünel çeperi kaplamasının tanımlanabildiği ve zemin ile tünel etkileşiminin de hesaba katıldığı ara yüzey elemanlar (interface elements) da yine bu komut altında tanımlanabilmektedir. Her bir malzeme ilgili ortama atanıp, malzeme özellikleri belirlendikten sonra ağ oluşturma safhasına geçilir. "Mesh" komutu ile sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Ağ oluşturulduktan sonra başlangıç koşulları belirlenir. Yeraltı suyu mevcut ise burada belirtilerek boşluk suyu basıncı hesaplanır. Sonrasında zemin, üzerinde hiçbir taşıyıcı elemanın olmadığı ilk hale getirilerek efektif gerilmeleri hesaplanır. Bundan sonra hesaplama aşamasına geçilir. Burada aşamalı inşaat yapılabilmekte, yapıya tekil ya da yayılı yük yüklenebilmektedir. Plaxis programında güvenlik faktörünün hesaplanabilmesi amacıyla Phi-c reduction (Phi-c azaltma) seçeneği mevcuttur. Burada φ ve c kademeli olarak azaltılır ve yapının göçtüğü an belirlenir. Böylelikle de yapının göçmeye karşı güvenlik katsayısı belirlenebilmektedir. Analizin herhangi bir aşamasında zemin dayanımı parametrelerinin belirlenmesinde Denklem (4.1) ile verilen ΣM_{sf} toplam çarpanı kullanılmaktadır;

$$\Sigma M_{sf} = (\tan_{\varphi i} / \tan_{\varphi r}) = (c_i / c_r) \quad (4.1)$$

i indisi: Malzeme özellikleri tanımlanırken girilen değerler

r indisi: Analizlerde kullanılan azaltılmış değerler

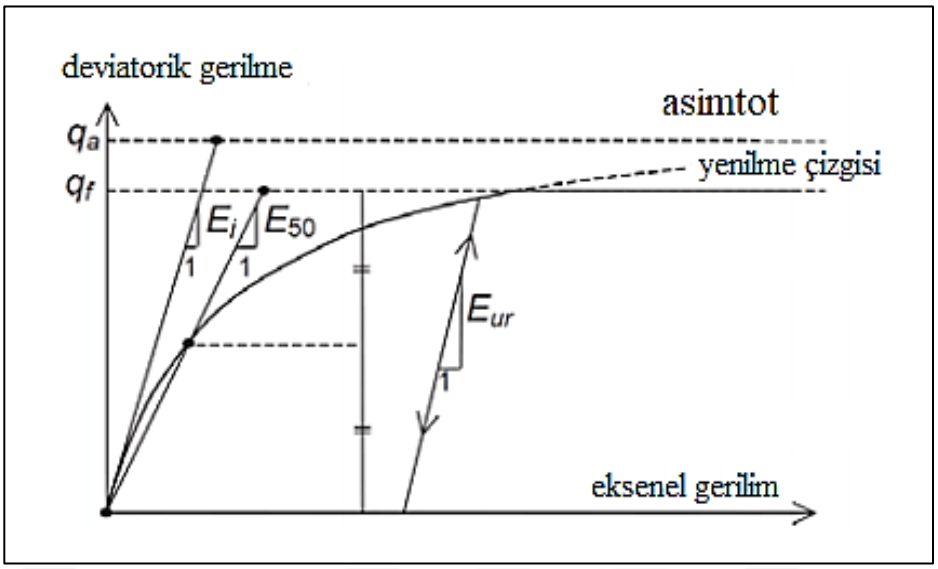
Analizlerde başlangıçta ΣMsf = 1 alınır. Böylelikle tüm malzeme parametreleri azaltılmış değerine getirilmektedir. Daha sonra Phi-c reduction ile tan φ ve c değerleri kademeli olarak azaltılır. Böylelikle yapının göçme durumuna ulaşması sağlanır. Bu göçme anındaki güvenlik sayısı ise toplam çarpan ΣM_{sf} 'in göçme anındaki değerine eşittir. Tüm adımlar tanımlanıp, son hale gelindiğinde programa sistemin hesaplaması yaptırılır. Bu koşullar altında zemin ve yapısal elemanın davranışı hesaplanır. İstenildiği takdirde grafikler çizilerek gerekli karşılaştırma ve yorumlamalar yapılabilir [7].

4.2.1. Hardening soil modelinin özellikleri

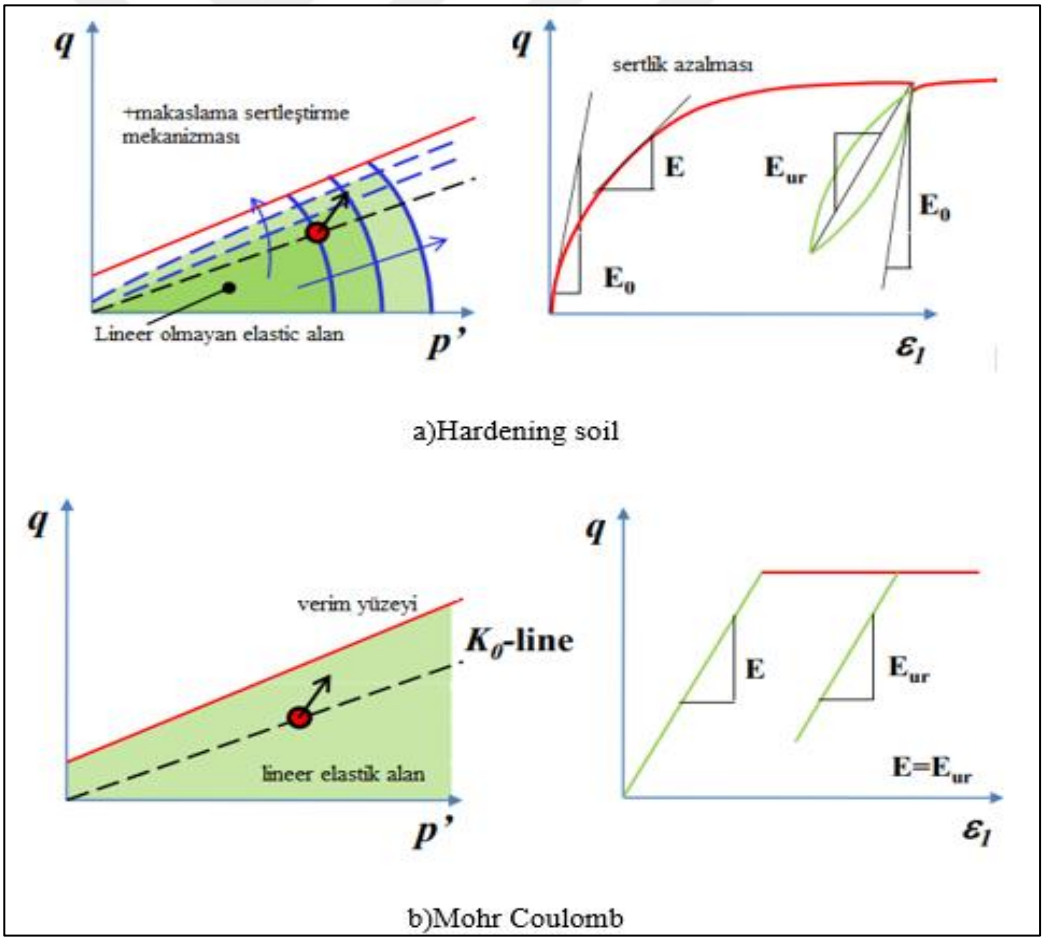
Uygun parametrelerin ve toprak modelinin seçilmesi, sayısal analiz sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Problemin özelliklerine göre model seçimi, sonuçların gerçekselliği açısından büyük önem taşımaktadır. Derinlemesine bir tünel kazısı yapıldığında topraktaki gerilimler hafifletilmekte, tünel bölgesinde elastik ve plastik deformasyonlara neden olmaktadır. Mohr Coulomb elastik-plastik model (MC), yüzey geriliminden bağımsız olarak malzemelerin sertliğini değerlendiren durumlarda kullanılan modellerden biridir. Eğer Mohr Coulomb, derinlemesine tünel kazısının yer aldığı bir tünelin sayısal modellemesi için kullanılıyorsa ve tünel stabilitesinde azalma durumu söz konusu ise, bu model uygun değildir. Yapılan araştırmalarda tünel modellemesinde kazı derinliği arttıkça zemin yüzeyindeki oturmaların gerçek değerinden daha fazla çıktığı görülmüştür [34]. Bu problemi çözmek için, stres düzeyindeki değişikliklere dayanan, malzemelerin sertliğini modelleyen daha uygun bir model kullanılmalıdır. Bu nedenle, farklı derinliklerdeki bir tünel yapısını Hardening Soil modeli ile analiz etmek uygun olacaktır. Hardening Soil modeli, 1999 yılında elastikiyet teorisi çerçevesinde ortaya çıkmıştır. Malzeme davranışının kırılmadan önce doğrusal olmadığı bu modelde, gerilmeler yüzey geriliminin sertliğine göre hesaplanmaktadır. Stres gerilmelerinin genel davranışı, çeşitli sertlik parametreleri ile birlikte Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir [34]. HS modelinde gerilmeye bağlı rijitlik artışı, E^{ref}_{ur} , E^{ref}_{oed} ve E^{ref}_{50} rijitlikleri ile yükleme-boşaltma ve elastik-plastik ayrımının göz önüne alınmasıyla zemin davranışının gerçeğe çok yakın modellenebilmesini sağlamakadır. Hardening soil modelinin temel özellikleri; [35].

- Gerilmeye bağlı rijitlik değişimi (m giriş parametresi)
- Birincil deviatorik yüklemede plastik deformasyonlar (E_{50} giriş parametresi)
- Birincil sıkışmaya bağlı plastik deformasyonlar (E_{oed} giriş prametresi)
- Elastik boşaltma/yükleme
- Göçme anında Mohr Coulomb hipotezinin geçerli olması

gibi durumlar sıralanabilir [35].



Şekil 4.6. Hardening soil modelinde kullanılan hiperbolik gerilme-stres [35]



Şekil 4.7. Uygulanan toprak modelleri arasındaki temel farklılıklar [34]

4.2.2. Mohr-Coulomb modelinin özellikleri

Zeminin hem plastik hem de elastik davranış sergilediğini gösteren ilk zemin modelidir. Modelde girilen elastisite modülü ve poison oranı parametreleri zeminin elastisitesini tanımlamaktadır. İçsel sürtünme açısı, dilatasyon açısı ve kohezyon parametreleri ise zeminin plastisitesini tanımlamaktadır. MC modelinde derinlikle rijitliğin arttırılabileceği gibi zeminin her bir tabakası için sabit bir zemin rijitliği de belirlenebilmektedir. Bu nedenle ilk deformasyon tahminleri de hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Bunun yanısıra, modelde anizotropik gerilme durumuna bağlı rijitlik göz önüne alınmamakta ve lineer elastik-mükemel plastik MC modelde zemin davranışı gerçeği yansıtamamaktadır. Göçme davranışını iyi temsil eden basit ve açık bir modeldir. Birçok pratik probleme uygulanabilir ve genelde zemin davranışının birinci mertebe yaklaşımını verir. MC modelinin dezavantajlarından diğerleri; drenajsız davranışta gerçekçi olmaması, göçmeye kadar liner elastik davranış göstermesi, izotrop ve homojen davranış sergilemesi ve kritik boşluk oranının olmamasıdır [7].

4.2.3. Soft soil creep modelinin özellikleri

Normal konsolide ve yüksek sıkışabilirliğe sahip yumuşa zeminlerde kullanılan, zemin göçme anında Mohr Coulomb kırılma hipotezinin geçerliği olduğu bir modeldir. Bu modelde gerilmeye bağlı rijitlik değişimi logaritmik olarak dikkate alınır. Ayrıca ön konsolidasyon basıncı ile ilk yükleme-boşaltma tekrar yükleme arası fark da göz önüne alınmaktadır [35].

4.2.4. Lineer elastik modelin özellikleri

En genel malzeme modeli olan lineer elastik modelin temelini izotropik, elastik Hooke kanunları oluşturur. Gerçekte lineer olmayan, plastik davranıştaki zemininin davranışını yansıtmada oldukça yetersiz bir yöntemdir. Gerilme durumu kısıtlanmadığı için malzeme de sonsuz rijitlik göstermektedir. Böylece modellemede zemin gerçek dışı davranmaktadır. Kaya içerisindeki büyük beton yapıların modellenmesinde kullanılabilmektedir [35].

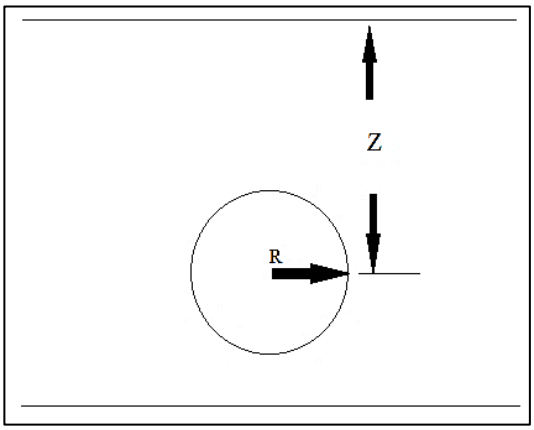
4.3. İnceleme Alanının Tanıtılması ve Çalışma Metotları

Bu çalışmada Kocaeli sınırları içerisinde NATM metodu ile yapılması planlanan bir metro projesinin geoteknik incelemesi yapılmıştır. Tünel ve zeminin modellenmesi öncesinde tünel güzergâhındaki zemin formasyonuna ait veriler, yapılan arazi araştırmaları ve sondajlar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Proje sonlu elemanlar metodu ile modellenerek, Plaxis 2D programında analiz edilmiştir.

Modelleme için inceleme yapılan alan; Kocaeli ili, Gebze ilçesi, Mustafapaşa Mahallesinde ve Gebze Belediyesi imar sınırları içerisinde kalmaktadır. İnceleme alanının iklimi, Marmara iklim kuşağına girmektedir. Yazları sıcak ve kurak, kışları ılık ve yağışlıdır. Ortalama yıllık yağış 771,1 mm civarında olmakla birlikte, en fazla yağış da 105,1 mm ile Aralık ayında olmaktadır. En az yağış ise 36,8 mm ile Ağustos ayıdır. Temmuz ve Ağustos ayları 23 ^{o}C ile en sıcak aylardır. Yıllık ortalama sıcaklık ise 14 ^{o}C ‘dir.

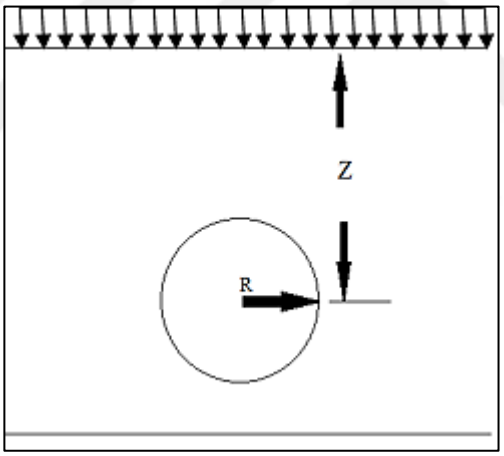
Tünel projesi, yerüstü yüzey kotundan maximum 33 m derinlikte, minimum 17 m derinliktedir. (Bu çalışmada yüzey kotundan tünelin merkezine olan derinlik; Z=17+r minimum derinlik, Z=33+r maximum derinlik olmaktadır). Tünelin modelleneceği zemin, inceleme alanındaki çalışmalardan yola çıkarak 2 tabaka olarak modellenmiştir. Proje verilerinden hareketle, projede kaya bulonu gibi herhangi bir özel destek elemanına gereksinim duyulmamıştır. Modelleme ve analiz adımları, sonlu elemanlar metodu ile çalışan Plaxis 2D programı aracılığı ile yapılmıştır. Tünel kazı derinliğinin deformasyonlara etkisi araştırıldığından dolayı zemin modellemesi, derinlikte en gerçekçi modellemeyi sunan HS modeli ile yapılmıştır. Modelleme ve analiz adımlarında tünel kazı aşamalarına uygun bir şekilde modelleme ve analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçek bir tünelde deformasyonların derinlikle değişimi araştırılmış olup, bu durumlar özetle;

1. Durum; Tünelin üzerinde yük olmadan, çeşitli derinliklerde modellendiği durumdur (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. İlk durum: Tünel üzerinde yük olmaksızın çeşitli derinliklerde yapılan modelleme

2. Durum; Tünel üzerinde yayılı bir yükün tanımlandığı, tünelin çeşitli derinliklerde modellendiği durumdur (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. İkinci durum: Yayılı bir yük altında çeşitli derinliklerde yapılan modelleme

Modellemede yüzey kotundan itibaren 17 metre derinlikte tünel modeli kurulmaya başlanmış olup, 2 metre aralıklarla 17 m, 19 m, 21 m, 23 m, 25 m, 27 m, 29 m, 31 m ve 33 metre olarak 9 farklı derinlikte, tünelde meydana gelecek deformasyonlar analiz edilmiştir. Minimum derinliğin 17 metre ve maximum derinliğin 33 metre seçilmesindeki etken, tünelin uygulama projesinde de bu maximum ve minimum derinliklerde projelendirilmiş olmasıdır.

4.3.1. Genel jeoloji ve inceleme alanının jeolojisi

Genel jeolojiye baktığımızda, Gebze ve civarında Tersiyer-Kuvaterner yaşlı gevşek tortullar tarafından açısal uyumsuzlukla ölçülen paleozoyik yaşlı istif ordovisiyen yaşlı birimlerle başlayıp, silüriyen ve devoniyen yaşlı birimlerle devam edip alt karbonifer yaşlı Trakya formasyonu ile son bulur. Bu palezoik istifin üzerine açısal diskordansla gelen üst kretase killi kireç taşından oluşmuş Şemsettin formasyonu ile son bulur. Gebze ve civarındaki zemin formasyonları kısaca; Kurtköy formasyonu, Aydos formasyonu, Gözdağ formasyonu, Dolayoba formasyonu, Sedefadası formasyonu, İstinye formasyonu, Kartal formasyonu, Tuzla formasyonu, Trakya formasyonu, Kapaklı formasyonu, Hereke formasyonu, Şemseddin formasyonu, Belgrad formasyonu, alüvyon ve magmatik kayalardan oluşmaktadır.

İnceleme alanı üzerinde açılan 30 metre derinlikli 1 adet sondaj kuyusunda; 0,00-0,90 metre arası kontrolsüz dolgu, 0,90-16,00 metre arası açık sarı-kahve-boz-beyaz renkli, ince taneli, ince tabakalı, sık eklemli, eklem yüzeyleri oksitli, orta derecede ayrışmış şeyl-kumtaşı (grovak), 16,00-30,00 metre arası açık sarı-kahve-beyaz renkli, ince taneli, ince-orta tabakalı, sık eklemli, eklem yüzeyleri silisli, kireçtaşı mercekli, az ayrışmış şeyl-kumtaşı (grovak) tabakaları tespit edilmiştir. İnceleme alanı ve yakın çevresi Gözdağ formasyonu ile kaplıdır.

a- Gözdağ formasyonu:

Önceki çalışmalarda farklı adlar ile tanımlanan bu birim Önalan (1981) tarafından Gözdağ formasyonu olarak adlandırılmıştır. Bu formasyon silüriyen yaşındadır ve yaklaşık 250 metre kalınlıkta olduğu kabul edilmiştir. Genellikle grimsi yeşil, boz ve kahve renklerde inceden kalına doğru değişen tabaka, silisli ve mikalı şeyl ve grovaklardan oluşmuştur. Üst seviyelere doğru bol fosilli kireçtaşı bant ve merceklerinide kapsar. Formasyon içindeki şeyl tabakaları kırılgan özellikte iken, grovaklı bölümler ise aşınmaya karşı daha dayanıklıdır. Formasyon birbirini kesen ve değişik yönlerdeki eklem takımlarını da içermektedir. Gebze bölgesinde Küçük Beylikdağı'nın güneydoğusunda, Balçık tepesinin doğusunda, Gaziler tepesinin doğusunda tipik mostralar vermektedir.

4.3.2. Tektonik

Gebze ve civarında çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çok sayıda jeolojik araştırmaya rağmen bölgenin yapısal özellikleri tam anlamıyla ortaya konulamamıştır. Gebze; paleozoyik, mesozoyik ve neojen yaşlı çökellerden oluşmaktadır. Çalışma alanı yapısal bakımdan çok komplekslidir. Bölgeyi etkileyen orojenik hareketler alt karboniferden sonra oluşan hersiniyen ve alpin hareketlerine bağlı olarak gelişmiştir.

Çalışma alanı Kuzeybatı-Güneydoğu doğrultusunda, morfolojide görülen veya örtülü konumda pasif onlarca düşey faylar içermektedir. Depremsel tehlike arz etmeyeceği tahmin edilmektedir. İnceleme alanı birinci derece deprem bölgesi sınırları içerisinde kalmakta olup; yapılacak yapılarda "Afet Bölgesinde Yapılacak Yapılar Hakkındaki Yönetmelik" esaslarına uyulmalıdır.

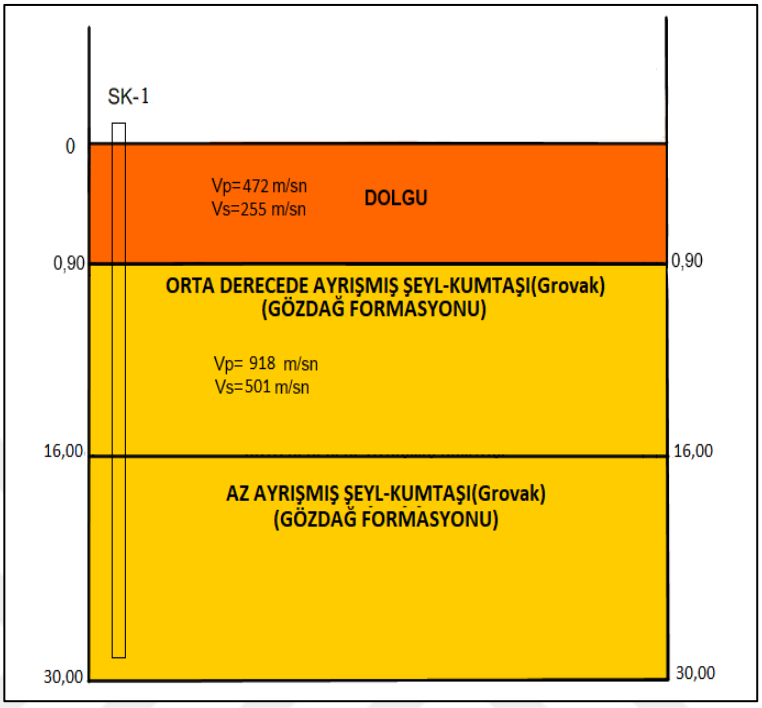
4.3.3. İnceleme alanında yapılan çalışmalar ve sondajların değerlendirilmesi

Güzergâh üzerinde birçok sondaj kuyusu açılmıştır. Çalışmanın konusunu oluşturan inceleme alanında ise zemin özelliklerinin tespit edilebilmesi ve yeraltı suyu ile ilgili bütün verilerin toplanması amacıyla derinliği 30 metre olan 1 adet sondaj kuyusu açılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Sondaj kuyusu açma çalışmalarından bir kare

SK-1 sondajının özet kesiti Şekil 4.11'de, sondaj kuyusu logunun özet tablosu ise Tablo 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.11. SK-1 sondajına göre zemin profili ve mühendislik zonları

Tablo 4.1. Sondaj kuyusu logunun tablo olarak gösterilişi

DERİNLİK (m)	YAPILAN TANIMLAMA
0,00-0,90	Kontrolsüz dolgu
0,90-16,00	Açık sarı-kahve-boz-beyaz renkli, ince taneli, ince tabakalı, sık eklemli, eklem yüzeyleri oksitli, orta derecede ayrışmış ŞEYL-KUMTAŞI (GROVAK)
16,00-30,00	Açık sarı-kahve-beyaz renkli, ince taneli, ince-ota tabakalı, sık eklemli, eklem yüzeyleri silisli, kireçtaşı mercekli, az ayrışmış ŞEYL-KUMTAŞI (GROVAK)

İnceleme alanında; zemin dinamik elastisite parametrelerini belirlemek amacıyla 1 adet sismik kırılma ölçüsü ve 1 adet rezistivite ölçüsü çalışmaları yapılmıştır. Bu inceleme çalışmalarının neticesinde hazırlanan raporda; mevcut zemin profili, zeminin taşıma gücü, zemin emniyet gerilmesi, dinamik parametreler (kayma modülü, yoğunluk, poisson oranı, bulk modülü, young modülü, yataklanma katsayısı), P ve S dalga hızları, tabaka kalınlıkları ve bölgenin depremselliği ile ilgili bilgiler sunulmuştur. İnceleme alanında yeraltı suyuna rastlanılmamıştır. İlgili sondaj raporu Şekil 4.12'de verilmiştir.

SONDAJ LOGU
BORING LOG

Sondaj No/Boring No : SK-1
Sayfa No/Sheet No : 1
Sondör /Driller :

Proje Adı/Project Name	Metro Projesi
Sondaj Yeri-Boring Location	G22B19D3B(31M4D) - 2938 - 7
Sondaj Derinliği/Boring Depth(m	30,00 m
Sondaj Kotu/Elevation (m)	
Yeraltısuyu Der/Groundwater D.	

Koordinat / Coordinate X (E) :	
Koordinat / Coordinate Y (N) :	
Başlama Tarihi / Start Date :	24.07.2017
Bitiş Tarihi / Finish Date :	24.07.2017

Derinlik Depth (m)	Numune No Sample Type	Numune Der. Sample Depth(m)	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standard Penetration Test — Darbe Sayısı Num.of.Blows (15 / 30 / 45 / N30)	Grafik / Graph (10 20 30 40)	Zemin Sınıfı Soil Catogory	ZEMİN TANIMLAMASI Soil Description	PROFİL Profile	Dayanımlılık/Strength	Ayrışma/Weathering	Kırık/Fracture	Karot TCR % Core Recovery	RQD %
			R		0,90 m	**Kontrolsuz Dolgu**	**X X X X**					
3	K-SPT					Açık sarı-kahve-boz-beyaz renkli, ince taneli, ince tabakalı, sık eklemli, eklem yüzeyleri oksitli, Ayrışmış ŞEYL-KUMTAŞI(Grovak)					**35**	**0**
6	KAROT											
9	KAROT											
12	KAROT											
15	KAROT											
18	KAROT				16,00 m	Açık sarı-kahve-beyaz renkli, ince taneli, ince-orta tabakalı, sık eklemli, eklem yüzeyleri silisli, kireçtaşı mercekli, Az ayrışmış ŞEYL-KUMTAŞI(Grovak)					**34**	**10**
21	KAROT											
24	KAROT											
27	KAROT											
30	KAROT											
33						**Kuyu sonu 30,00 m (Gözdağ Formasyonu-Sg)**							
36												
39												
42												
45												

KIVAM DURUMU/STIFFNESS					SIKILIK / DENSTY	ORANLAR / PROPORTION	AÇIKLAMALAR / EXPL.
N	=	0 - 2	Çok yumuşak	V.soft	N = 0-4 Çok gevşek/V.loose	% 00-10 Pek Az / Slight(trace)	UD: Örselenmemiş örnek/Undis.Sample
N	=	3- 4	Yumuşak	Soft	N = 5-10 Gevşek/Loose	% 10-20 Az / Little	D : Örselenmiş Örnek / Disturb.Sample
N	=	5- 8	Orta katı	M.Stiff	N =11-30 Orta sıkı M.loose	% 20-35 Sıfat / Adjective	SPT: Standart Penetr.Testi / SPT Test
N	=	9- 15	Katı	Stiff	N =31-50 Sıkı/Dense	% 35-50 Ve / And	P : Presiyometre / Pressuremeter
N	=	16-30	Çok katı	V.stiff	N>50 Çok Sıkı/V.Dense		K : Karot Numunesi / Core Sample
N	>	30	Sert	Hard			

AYRIŞMA/WEATHERING		DAYANIMLILIK/STRENGHT	KIRIKLAR/ FRACTURES		KAYA KALİTESİ TANIMI/RQD	
I	Taze / Fresh	I Çok Zayıf/ Very Weak	<1	Seyrek/ Wide (W)	%0-25	Çok Kötü / Very Poor
II	Az Ayrışmış / Slightly W.	II Zayıf/ Weak	2-2	Orta / Moderate(M)	%25-50	Kötü / Poor
III	Orta D. Ayrışmış / Modareatly W.	III Orta Zayıf/ Moderatly Weak	3-10	Sık / Close(Cl)	%50-75	Orta / Fair
IV	Çok Ayrışmış / Highly W.	IV Orta Dayanımlı/ Moderatly S.	11-20	Çok Sıkı / Intense(I)	%75-90	İyi / Good
V	Tamamen Ayrış./Completely W.	V Dayanımlı / Strong	>20	Parçalı / Crushed(Cr)	%90-100	Çok İyi / Excellent

LOGU YAPAN / Logged by	KONTROL / Checked by	ONAY / Approved by

Şekil 4.12. SK-1 sondaj raporu

4.3.4. Laboratuvar deneyleri

İnceleme alanında açılan sondaj kuyusundan alınan karot numuneleri üzerinde, birimlerin indeks ve fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu karot numuneleri üzerinde 10 adet nokta yükleme deneyi yapılmıştır. Karot boy uzunluklarının çok kısa olması sebebiyle tek eksenli basınç deneyleri yapılamamıştır.

4.3.4.1. Standart penetrasyon deneyi (SPT)

İnceleme alanından açılan sondaj kuyusunda yapılan SPT, kohezyonlu zeminlerin kıvamı, kohezyonsuz zeminlerin sıkılığı hakkında bilgi vermektedir. Standart penetrasyon deneyinde standart bir uç üzerine 63,5 kg ağırlığında bir tokmağın 75 cm'den düşürülmesi ile zemin 15 cm'lik 3 kademede toplam 45 cm girinceye kadar çakılır. Her 15 cm'lik kademedeki darbe adedi sayılır. Örselenmeden dolayı 15 cm'lik kısım dikkate alınmaz ve son 2 kademedeki düşüş sayıları toplamı zeminin SPT-N sayısı olarak değerlendirilir. Açılan sondaj kuyusunda 1,50 metre derinlikteki SPT deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'e göre Refü (çok sıkı) değerini vermiştir. Bulunan değerler Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. SPT deney sonuçları

Sondaj No	Deney No	Derinlik (m)	N_{30}	Sıkılık/Kıvam
SK-1	SPT	1,50-1,95	Refü	Çok Sıkı

Tablo 4.3. Daneli (kohezyonsuz) zeminlerin SPT-N relatif sıkılık ilişkisi (Terzaghi ve Peck,1967)

SPT-N (darbe/30cm)	Relatif Sıkılık	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	İçsel Sürtünme Açısı (φ)
0-4	Çok gevşek	<14	<30
4-10	Gevşek	14-16	30-32
10-30	Orta sıkı	16-18	32-35
30-50	Sıkı	18-20	35-38
>50	Çok sıkı	>20	>38

Tablo 4.4. SPT-N30, Serbest basınç dayanımı ve kıvam ilişkisi (Terzaghi ve Peck)

SPT-N_{30} (darbe/30cm)	Serbest Basınç Dayanımı (qu)	Kıvam
>2	>0.25	Çok yumuşak
2-4	0.25-0.50	Yumuşak
4-8	0.50-1.00	Orta
8-15	1.00-2.00	Katı
15-30	2.00-4.00	Çok katı
>30	>4.00	Sert

İnceleme alanında yapılan SPT-N_{30} sonuçlarına göre N_{30} değerleri "Refü" olup, bu değerler Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'te (DBYBHY) verilen tabloda, zemin gruplarında C grubu zeminlere girmektedir.

4.3.5. Zemin ve kaya türlerinin geoteknik özellikleri

Açılan sondaj kuyusunda ayrışmış kaya-az ayrışmış kaya tespit edilmiştir. Kaya özellikleri Tablo 4.5'de verildiği gibi belirlenmiştir.

Tablo 4.5. Kaya özellikleri

TCR	= % 35-34
RQD	= % 0-10
I_s	= 4,03-12,05 kg/cm^2
Zemin grubu = C	
Zemin sınıfı = Z_2	

Elde edilen değerlere göre çalışma alanında gözlenen Gözdağ formasyonuna ait Şeyl-Kumtaşı birimi, RQD sınıflamasına göre de çok kötü kaliteli kayaç sınıfına girmektedir (Tablo 4.6).

Tablo 4.6. Kayaçların kaya kalitesine (RQD) göre sınıflandırılması

RQD	KAYA TANIMI
100-90	Çok iyi kaliteli
90-75	İyi kaliteli
75-50	Orta kaliteli
50-25	Kötü kaliteli
25>	Çok kötü kaliteli

Kayaçların nokta yük direncine göre sınıflandırılması sonucunda ise Tablo 4.7'de belirtilen sınıflama yapılmıştır. Burada belirtilen ayrışma dereceleri Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Kayaçların nokta yük direncine göre sınıflandırılması (Bieniawski, 1975)

S. No	Derinlik (m)	RQD %	Dayanımı	Ayrışma Derecesi	Ayrışma Tanımı	Litoloji/Formasyon
SK-1	0.90-16.00	0	Çok kötü kaliteli	W3	Orta derecede ayrışmış	ŞEYL-KUMTAŞI / Gözdağ Formasyonu
	16.00-30.00	10	Çok kötü kaliteli	W2	Az ayrışmış	

Tablo 4.8. Kayaçlarda ayrışma derecelerinin tanımlanması (ISRM,1978)

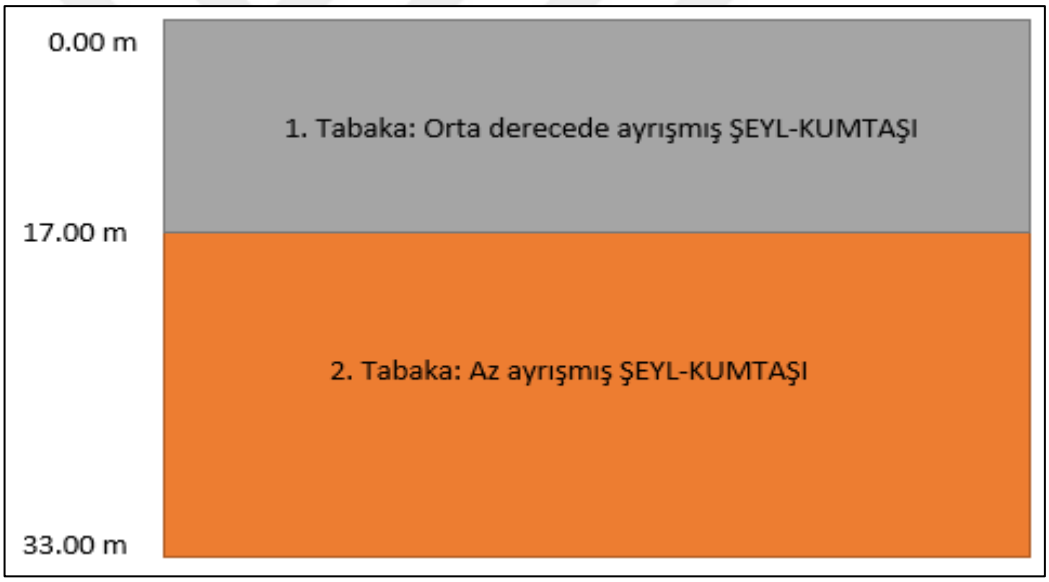
Tanımlama Kriteri	Tanım	Simge
Ana kayaçta renk değişimi yok. Dayanımında bir azalma veya diğer ayrışma etkileri söz konusu değildir. Ancak kırık düzlemleri lekeli veya renk değiştirmiş olabilir	Taze (Ayrışmamış)	W1
Kayacın süreksizliklere yakın olan kesimlerinde çok az renk değişimi vardır. Süreksizlik yüzeyleri açık ve renkleri çok az değişmiştir. Kayaç, ayrışmamış kayaca oranla fark edilir bir zayıflık göstermez.	Az Ayrışmış	W2
Kayacın rengi değişmiştir. Süreksizlikler açık olabilir. Ayrışma kayacın içine nüfus etmeye başlamıştır. Kayaç fark edilir ölçüde zayıflamıştır. Kaya oranı %50-90 arasındadır.	Orta Derecede Ayrışmış	W3

Tablo 4.8. (Devam) Kayaçlarda ayrışma derecelerinin tanımlanması (ISRM,1978)

Kayacın rengi değişmiştir. Süreksizlikler açık olabilir ve yüzeylerinin rengi değişmiştir. Süreksizliklere yakın kesimlerde orijinal doku değişmiş, ayrışma kayacın iç kesimlerini daha fazla etkilemiştir. Kaya oranı %50 den azdır.	Çok Ayrışmış	W4
Kayacın rengi değişmiş ve kayaç toprak haline gelmiştir. Fakat kaya tekstürü hala tanınabilir. Seyrek olarak küçük ana kayaç parçaları bulunur. Ayrışma ürünü zeminin özellikleri kısmen ana kayacın özelliklerini yansıtır.	Tamamen Ayrışmış	W5

4.3.4. Geomekanik özellikler için hesaplamalar

Tünelin açılacağı zemin profili, yapılan incelemelerden özetlendiği üzere Şekil 4.11'de gösterildiği gibi 2 tabakalı olarak modellenmiştir.



Şekil 4.13. Modellenen zemin kesiti

Her bir zemin tabakasına ait parametre değerleri için yapılan hesaplamalar bu bölümde özetlenmiştir.

4.3.4.1. Kohezyon (c) değeri hesaplamaları

Nokta yükleme indisi (Is) ve tek eksenli sıkışma dayanımı arasında Denklem (4.2) ;

$$q_u = c \times C \times Is(50) \qquad (4.2)$$

şeklinde ampirik bir ilişki olup, C katsayısı genel olarak 12 ile 24 arasında değişir ve pratik amaçlar için 24 alınabilinir. Bu değer kayacın tipine, anizotropinin derecesine vb. gibi faktörlere bağlıdır. Bazı durumlarda C, bu aralığın dışında değerler de alabilmektedir.

Formülde c= 0,2-0,3 (kırık, çatlak, çatlaktaki dolgu, çatlaktaki su vb durumlar için kullanılan katsayıdır.)

1. Tabaka: Orta derecede ayrışmış ŞEYL-KUMTAŞI için kohezyon değeri hesaplamaları;

Taşıma gücü hesabı SK- 1 (1,00 metre için);

Nokta Yükleme İndisi Is(50)= 4,03 kg/cm^2

qall= c × C × Is(50)

qall= 0,2×12 × 4,03 = 9,672 kg/cm^2

Kohezyon Hesabı:

c= qall/2

c= 9,672/2 ve c= 4,836 kg/cm^2

1 metre derinlik için yapılan bu kohezyon hesaplamaları; 4,50 metre, 7,50 metre, 12,00 metre ve 15,00 metre derinlikler için de ayrı ayrı hesaplanarak, birinci tabaka için sonuçlar Tablo 4.9'da özetlenmiştir.

Tablo 4.9. İlk tabaka için derinliklere göre kohezyon değeri hesaplaması

Derinlik (m)	Hesaplanan kohezyon (c) değeri (kg/cm^2)
1,00	4,836
4,50	5,988
7,50	6,468
12,00	7,392
15,00	8,484
1. tabaka için ortalama c değeri: 6,63 kg/cm^2=650,18 kN/m^2	

2. Tabaka: Az ayrışmış ŞEYL-KUMTAŞI için kohezyon değeri hesaplamaları; :

Taşıma Gücü Hesabı SK- 1 (16,50 metre için);

Nokta Yükleme İndisi Is(50)= 8,91 kg/cm^2

qall= c × C × Is(50)

qall= 0,2×12 × 8,91 = 21,384 kg/cm^2

Kohezyon Hesabı:

c= qall/2

c= 21,384/2 ve c= 10,692 kg/cm^2

16,50 metre derinlik için yapılan bu kohezyon hesaplamaları; 19,50 metre, 23,50 metre, 26,50 metre ve 29,50 metre derinlikler için de ayrı ayrı hesaplanarak, ikinci tabaka için sonuçlar Tablo 4.10'da özetlenmiştir.

Tablo 4.10. İkinci tabaka için derinliklere göre kohezyon değeri hesaplaması

Derinlik (m)	Hesaplanan kohezyon (c) değeri (kg/cm^2)
16,50	10,692
19,50	11,652
23,50	12,516
26,50	13,44
29,50	14,46
2. tabaka için ortalama c değeri: 12,552 kg/cm^2=1230,93 kN/m^2	

4.3.4.2. İçsel sürtünme açısı hesaplamaları

2. Tabaka: Az ayrışmış ŞEYL-KUMTAŞI için:

İnceleme alanında tespit edilen Az ayrışmış ŞEYL-KUMTAŞI (Grovak) birimi "Sert Tortul Kayalar" sınıfına girmektedir. Terzaghi ve Peck'e göre kaya snıflamasında içsel sürtünme açısı değerleri Tablo 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.11. Kayaların sınıflamasına göre içsel sürtünme açısı hesabı (Terzaghi ve Peck, 1967)

Malzeme	Sürtünme Açısı Derece
Sert Volkanik Kayalar	30-45
Metamorfik Kayalar	30-40
Sert Tortul Kayalar	35-45
Yumuşak Tortul Kayalar	25-35

Buradan hareketle inceleme alanında tespit edilen Az ayrışmış ŞEYL-KUMTAŞI (Grovak) birimi için içsel sürtünme açısı 40^o seçilmiştir.

4.3.4.3. Elastisite modülü hesaplamaları

Kayma dalgası sinyal çıktısının alıcılara (jeofon) gelen varış zamanları okunarak, alıcı aralıklarına karşılık gelen grafiği çizilmiş ve Tablo 4.12'deki hızlar hesaplanmıştır.

Tablo 4.12. İnceleme alnında ölçülen kayma dalga hızları

Kayma Dalga Hızı Vs (m/sn)	
1. Tabaka (VS1)	2. Tabaka (VS2)
255	501

İkinci tabaka hız değerine göre inceleme alanı, Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmeliği'nin (ABYYHY) zemin gruplarında C grubu, Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrışmış metamorfik kayaçlar ve çimentolu tortul kayaçlar olarak tanımlanmıştır. Dalga teorisinden elde edilen kayma modülü (G); yoğunluk ve kayma dalgası hızlarına bağlı olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.13).

Tablo 4.13. Boyuna ve kayma dalgası hızlarına bağlı hesaplanan kayma modülleri

Kayma Modülü (G) Kg/cm^2	
1. Tabaka için	2. Tabaka için
1174	5354

Elastisite modülü; Uygulanan düşey basınç yönünde yerin düşey yamulmasını tanımlar. Dalga teorisinden elde edilen elastisite modülü, Denklem (4.3) kullanılarak hesaplanmıştır ve Tablo 4.14' de verilmiştir;

$$E = [G\times(3\times VP^2 - 4\times VS^2)] / [VP^2 - VS^2] \quad (4.3)$$

Tablo 4.14. Boyuna ve kayma dalgası hızlarına bağlı hesaplanan elastisite modülleri

Elastisite Modülü (E) (kg/cm^2)	
1. Tabaka için	2. Tabaka için
3039 kg/cm^2 = 300000 kN/m^2	13790 kg/cm^2 = 1350000 kN/m^2

Gerçeğe çok yakın modelleme yapabilmemize imkan tanıyan HS modelinde kullandığımız E_{50} sekant rijitliği için ise Denklem (4.4) ile hesaplamalarımızı yapmaktayız;

$$E^{50} = (1{,}1 \times E)/2 \quad (4.4)$$

Bu durumda E_{50} değerleri Tablo 4.15'te verilmiştir.

Tablo 4.15. Hesaplanan E50 değerleri

E^{50} Değerleri (kN/m^2)	
1. Tabaka için	2. Tabaka için
165000 kN/m^2	742500 kN/m^2

4.4. Modelleme

4.4.1. Zemin tabakalarının modellenmesi

Modellemede kullanılan parametre değerleri, gerçek veriler ışığında hesaplanan değerler olmak üzere Tablo 4.16'da özetlendiği gibi programa girilmiştir. Zemin belirtildiği üzere iki tabakalı olarak modellenmiştir.

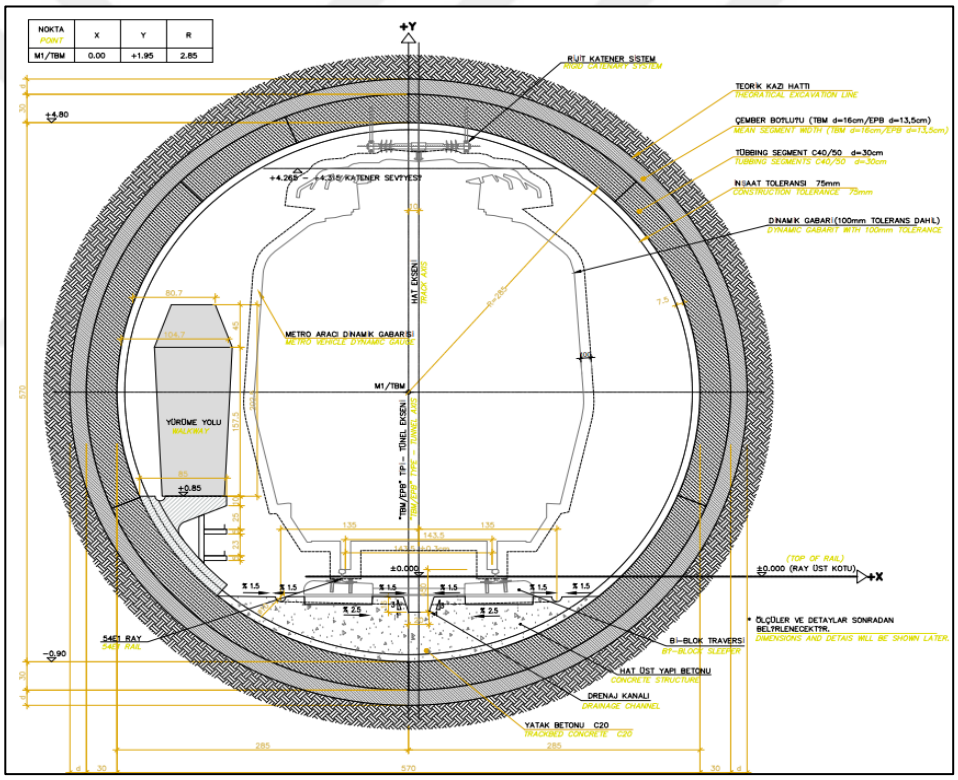
Tablo 4.16. Modellenen tabakalara ait parametre değerleri

Parametreler	Birim	1. Tabaka	2. Tabaka
Drenaj Durumu	-	Drenajlı	Drenajlı
γ_{unsat}	kN/m^3	20,00	24,00
γ_{sat}	kN/m^3	22,00	25,00
e_{init}	-	0,5000	0,5000
e_{min}	-	0,000	0,000
e_{max}	-	999,0	999,0
E_{50}^{ref}	kN/m^2	165000	742500
E_{oed}^{ref}	kN/m^2	165000	742500
E_{ur}^{ref}	kN/m^2	495000	2228000
Power (m)	-	0,5000	0,5000
C_c	-	2,091E-3	0,4646E-3
C_s	-	0,6273E-3	0,1394E-3
c_{ref}	kN/m^2	650	1230
φ (phi)	^{o}	30,00	40,00
ψ (psi)	^{o}	0,000	10,00
ν_{ur}	-	0,2000	0,2000
p_{ref}	kN/m^2	100,0	100,0
K_0^{nc}	-	0,5000	0,3572
R_f	-	0,9000	0,9000
R_{inter}	-	1,000	1,000
K_0	-	Otomatik	Otomatik

4.4.2. Tünel kesitinin modellenmesi

Tünel sayısal verilerine baktığımızda; tünel temiz açıklık yarıçapı 2,85 m ve tam daire kesitlidir. İnşaat toleransı 7,5 cm, çember boşluğu 13,5 cm, püskürtme beton kalınlığı 30 cm ve yatak betonu taban teğetten itibaren 90 cm olarak tasarlanmıştır. Projenin orijinal verilerinden hareketle yatak betonu C20, püskürtme betonu ise C40 olarak seçilmiştir (Şekil 4.14).

Plaxis programında zemin tabakalarının parametre değerleri girildikten sonra, seçilen derinliklerde yapısal elemanımız olan tünelin modellemesine başlanır. Burada tünel yarıçapı 2,85 m ve tünel şekli tam daire olarak girilir.



Şekil 4.14. Modellenen tünel en kesiti ve özellikleri

4.4.3. Tünel destek elemanlarının modellenmesi

Tünel elemanının tanımlanmasının ardından sırada tünel destekleme elemanlarının programa tanımlanması gelmektedir. Püskürtme beton ve çelik iksa gibi destekleme elemanları Plaxis programında plate adı verilen bir eleman türü olarak kabul edilmektedir.

Bu nedenle bu destek elemanları aynı kesitte yer aldığında, her ikisinin de rijitlik parametreleri ayrı ayrı hesaplanarak, toplamları bu kısımda programa girilmektedir.

Çelik iksa ve püskürtme beton için program girdileri;

E×h (Elastisite modülü (kN/m^2)

h = malzeme kalınlığı olmaktadır

b = birim mesafe (1 metre olarak alınmakta)

A = h×b

I = Atalet momenti (bxh^3)/12

w (weight) = $\gamma_{malzeme}$ x h

ν = malzeme poisson oranı

d = [(12EI)/(EA)]½ (program tarafından hesaplanmaktadır) şeklindedir.

Tünel Destek Elemanları

Püskürtme Beton (C40 için);

Kalınlık h = 30 cm = 0,30 m

E = 34 000 000 kPa

A = b x h = 1 x 0,30 = 0,30 m^2

I = b.h3 / 12 = 0,027 / 12 = 0,00225 m4

EA = 34 000 000 x 0,30 = 10 200 000 kN/m

EI = 34 000 000 x 0,00225 = 76 500 kNm^2/m

γ =24 kN/m3

ν = 0,2

w = γ x h = 24 x 0,30 = 7,2 kN/m/m

Çelik İksa (I140)

h = 14 cm = 0,14 m

E = 210 000 000 kPa

A = 18,2 cm2 = 0,00182 m2

I = 0,000015m4

EA = 210 000 000 x 0,00182 = 382 200 kN/m

EI = 210 000 000 x 0,000341 = 3 150 kNm2/m

ν = 0,2

γ =78,50 kN/m3

w = γ x h = 78,5 x 0,14 = 10,99 kN/m/m

Püskürtme Beton & Çelik İksa

EAtoplam = EApb + EAiksa = 10 200 000 + 382 200= 10 582 200 kN/m

EItoplam = EIpb + EIiksa = 76 500 + 3 150= 79 650 kNm2/m

wtoplam = 7,2+ 10,99 = 18,19 kN/m/m

νort = 0,20

Hesaplanan tüm bu veriler programa girilerek ilgili zemin ve yapı modellemesi kurulmuştur. Sırada ağ oluşturma ve analiz adımları gelmektedir.

4.4.4. Bina yükü

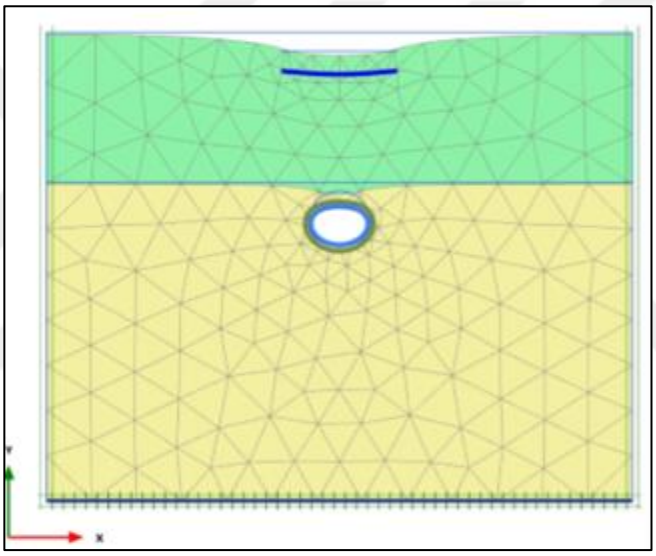
Kurduğumuz modellemenin ilk aşamasında, tünelin üzerine denk gelen yüzey kotunda bir yapı yükü olmaksızın hesaplar yapılmıştır. İkinci aşamada ise yayılı yük şeklinde bir bina yükü tanımlanmıştır. Bu yapı, araştırma yaptığımız alanda yapılması

planlanan 10 katlı bir binadır. Her bir katı 15 kPa olarak hesaplanan bina yükü toplamda 150 kPa'lık bir yayılı yük şeklinde modellemede tanımlanmıştır.

4.4.5. Ağ oluşturma

Plaxis programında analiz öncesinde ağ oluşturma safhasına geçilerek ağ oluşturmaya başlanır. Burada öğe dağıtım parametresi için varsayılan "medium" seçeneği ile ağ oluşturulmuştur. Programın ilgili kısmından oluşturulan ağ görüntülenebilmektedir.

Şekil 4.15'te 17 metre derinlik için örnek bir deforme olmuş ağ ekran görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 4.15. 17 metre derinlikteki tünel inşası için oluşturulan ağ

4.4.6. Hesaplamalar ve analiz

Tünelin inşa safhasını modelleyebilmek için aşamalı bir inşaat hesaplamasına ihtiyaç duyulur. Bu nedenle hesaplama evrelerini tanımlayabilmek için programın ilgili kısmından aşamalı bir şekilde inşaat safhaları tanımlaması yapılmıştır.

- İlk aşamada tünel üzerindeki yapı ve tünel kaplaması devre dışı bırakılmıştır. Böylelikle sadece bir tünel kazısı mevcuttur.
- Tünel kazısının ardından tünel içi pasif edilmiştir.
- Tahkimat modellemesi yapılmıştır.
- Tahkimat aktifleştirilmiştir.

- Yapı modellemesi yapılarak tahkimat ile birlikte yapı yükü aktif edilmiştir.
- Safety analizi yapılarak güvenlik sayısı eldesi için phi-c metodu uygulanmıştır.

Tüm bunların ardından programın ilgili kısmından hesaplama ve analiz adımına geçilmiştir. Kazı ve desteklemenin ardından tünel yüzeyi ve çevresinde hesaplanan yer değiştirmeler, kesme kuvvetleri, eksenel kuvvetler ve eğilme momentleri 4 farklı durum için analiz edilmiş ve tablolar halinde verilmiştir. Program çıktısına göre basınç gerilmeleri (-), çekme gerilmeleri ise (+) işaretlidir.

Tablo 4.17, 4.18, 4.19 ve 4.20'de verilen sonuçların ifade ettiği 4 farklı durum kısaca;

1. Durum: Zeminde tünel boşluğunun açılacağı ilk durumdur. Burada yapı yükünün ve tünel tahkimatının aktive edilmediği ilk halde zeminde oluşan gerilmelerin (p',q) derinliklere göre ölçülen değerleri verilmektedir (Tablo 4.17).

Tablo 4.17. İlk durum için ölçülen gerilmeler

1. DURUM		
Derinlik (m)	p' (kN/m^2)	q (kN/m^2)
17	2,326 -650,3	961,2 0,4599
19	2,335 -654,8	907,3 0,4066
21	2,323 -654,1	1036 0,2522
23	2,314 -656,6	1663 0,2315
25	2,285 -660,3	1168 0,1288
27	2,254 -663,9	1240 0,07842
29	2,223 -667,3	1289 0,1112
31	2,197 -842,9	2538 0,07073
33	2,186 -1003	2992 0,09579

2. Durum: Zeminde tünel boşluğunun açılacağı ilk durumdur. Burada yapı yükünün aktive edildiği fakat tahkimatın aktive edilmediği durum için zeminde oluşan gerilemelerin derinliklere göre ölçülen değerleri verilmektedir (Tablo 4.18).

Tablo 4.18. İkinci durum için ölçülen gerilmeler

2. DURUM		
Derinlik (m)	p' (kN/m^2)	q (kN/m^2)
17	2,450 -666,9	1220 0,05142
19	2,444 -677,2	1045 0,03761
21	2,328 -670,8	1177 0,04845
23	1,809 -674,0	1241 0,1244
25	2,293 -677,3	1277 0,03912
27	2,263 -681,1	1334 0,1047
29	2,363 -684,8	1379 0,1104
31	2,503 -883,5	2552 0,3222
33	2,443 -1032	3001 0,1096

3. Durum: Zeminde tünel boşluğunun açılmasının ardından tünel tahkimatının kurulup aktive edildiği durumda, yapı yükü olmaksızın tünel ve çevresinde oluşan maximum yer değiştirmeler (U), kesme kuvvetleri (Q), eksenel kuvvetler (N) ve eğilme momentlerinin (M) maximum ve minimum değerleri yer almaktadır. Burada eksi (-) ve artı (+) ifadeleri çekme ve basınç anlamları taşımaktadır (Tablo 4.19).

Tablo 4.19. Üçüncü durum için ölçülen yer değiştirme, kuvvet ve moment değerleri

3. DURUM						
Derinlik (m)	ΣU_{max} (m)	ΣU_X (m)	ΣU_Y (m)	N (kN/m)	Q (kN/m/m)	M (kNm/m)
17	0,01095	7,771E-3 -7,724E-3	9,004E-3 -0,01095	20,20 -25,58	1,770 -1,880	2,652 -1,961
19	0,01030	8,016E-3 -8,022E-3	9,041E-3 -0,01030	28,92 -23,33	1,788 -1,589	1,946 -1,082
21	0,01016	7,851E-3 -7,852E-3	9,146E-3 -0,01016	29,78 -20,30	1,273 -1,492	1,353 -0,9794
23	8,742E-3	7,640E-3 -7,516E-3	7,505E-3 -8,734E-3	55,07 -62,51	10,00 -14,70	9,954 -14,62
25	0,01028	7,896E-3 -7,889E-3	9,349E-3 -0,01028	25,07 -24,55	1,963 -1,059	1,523 -1,173
27	0,01040	7,903E-3 -7,915E-3	9,467E-3 -0,01040	19,96 -15,77	2,431 -2,315	2,685 -2,159
29	0,01052	7,953E-3 -7,958E-3	9,484E-3 -0,01052	23,19 -27,05	3,145 -2,837	2,672 -2,200

Tablo 4.19. (Devam) Üçüncü durum için ölçülen yer değiştirme, kuvvet ve moment değerleri

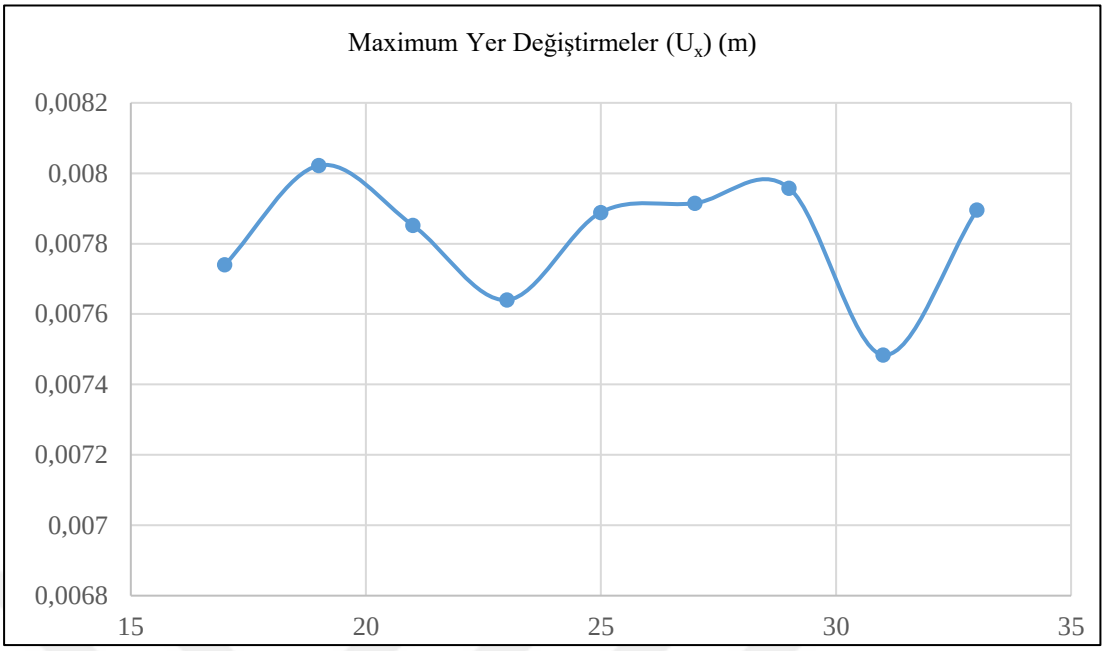
31	0,01138	7,179E-3 -7,484E-3	9,689E-3 -0,01136	407,1 57,86	35,11 -35,35	20,30 -25,41
33	0,01126	7,896E-3 -7,304E-3	9,619E-3 -0,01126	461,6 121,2	72,96 -56,04	26,01 -45,38

4. Durum: Zeminde tünel boşluğunun açılmasının ardından tünel tahkimatının kurulup yapı yükü ile beraber aktive edildiği durumda, tünel ve çevresinde oluşan yer değiştirmeler (U), kesme kuvvetleri (Q), eksenel kuvvetler (N) ve eğilme momentlerinin (M) maximum ve minimum değerleri yer almaktadır. Burada eksi (-) ve artı (+) ifadeleri çekme ve basınç anlamları taşımaktadır (Tablo 4.20).

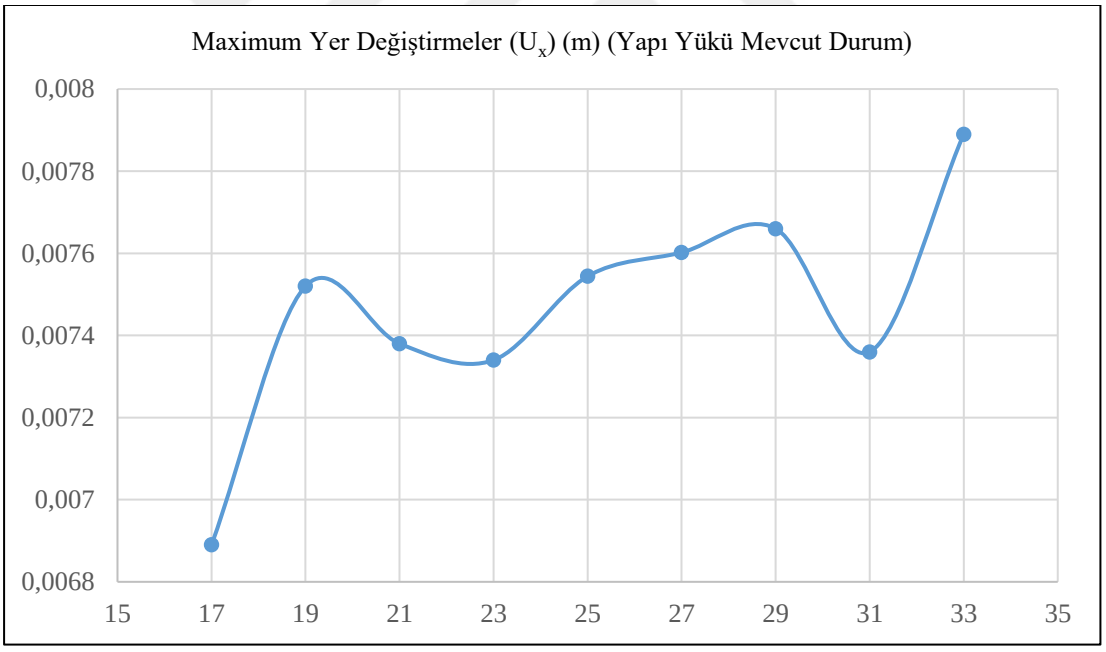
Tablo 4.20. Dördüncü durum için ölçülen yer değiştirme, kuvvet ve moment değerleri

4. DURUM						
Derinlik (m)	ΣU_{max} (m)	ΣU_X (m)	ΣU_Y (m)	N (kN/m)	Q (kN/m/m)	M (kNm/m)
17	0.01295	6,891E-3 -6,890E-3	8,973E-3 -0,01295	67,79 -61,50	26,08 -26,01	35,88 -25,33
19	0,01156	7,519E-3 -7,523E-3	8,801E-3 -0,01156	52,21 -69,10	12,56 -13,52	19,34 -14,27
21	0,01137	7,376E-3 -7,378E-3	8,888E-3 -0,01137	59,24 -65,11	10,38 -11,01	15,65 -12,29
23	0,01136	7,342E-3 -7,334E-3	9,132E-3 -0,01136	29,26 -30,01	10,43 -9,993	15,06 -14,18
25	0,01121	7,544E-3 -7,541E-3	9,133E-3 -0,01121	51,94 -58,15	6,820 -7,416	11,30 -9,186
27	0,01121	7,602E-3 -7,604E-3	9,253E-3 -0,01121	45,16 -52,62	6,084 -5,937	8,663 -8,338
29	0,01122	7,665E-3 -7,668E-3	9,303E-3 -0,01122	45,89 -50,41	5,955 -5,688	8,012 -7,393
31	0,01188	7,065E-3 -7,367E-3	9,525E-3 -0,01186	337,0 -34,58	37,49 -36,54	23,48 -29,04
33	0,01172	7,789E-3 -7,205E-3	9,483E-3 -0,01172	321,8 -47,63	73,54 -58,15	27,37 -48,74

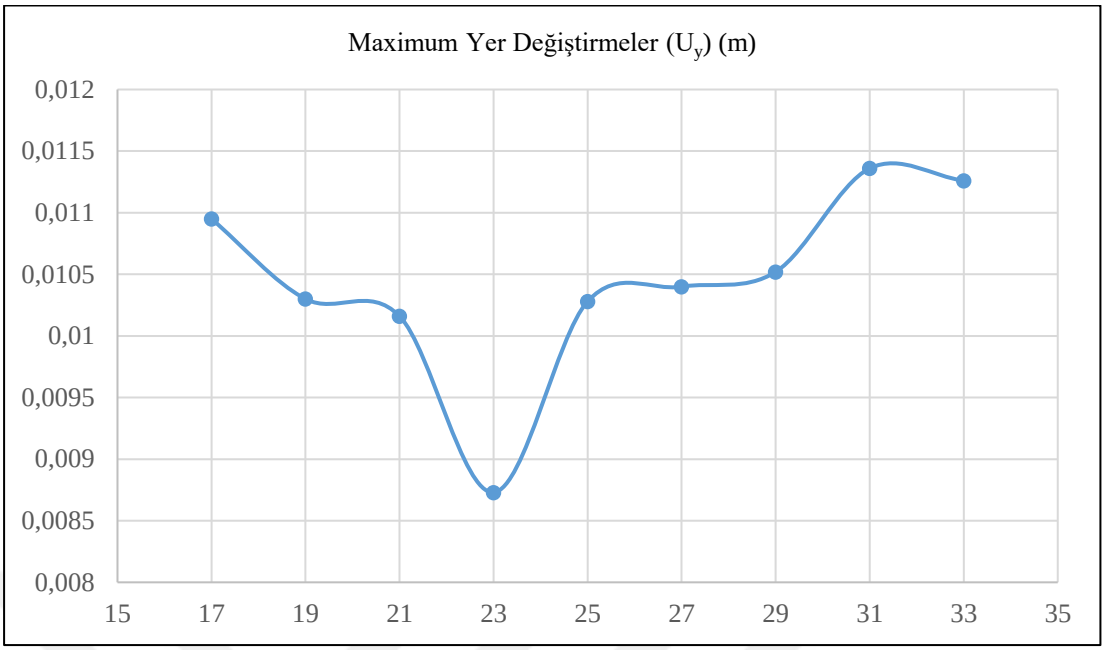
3. ve 4. durumlar için derinliklere göre maximum yer değiştirmeler, eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti grafikleri çizildiğinde (Şekil 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27) ;



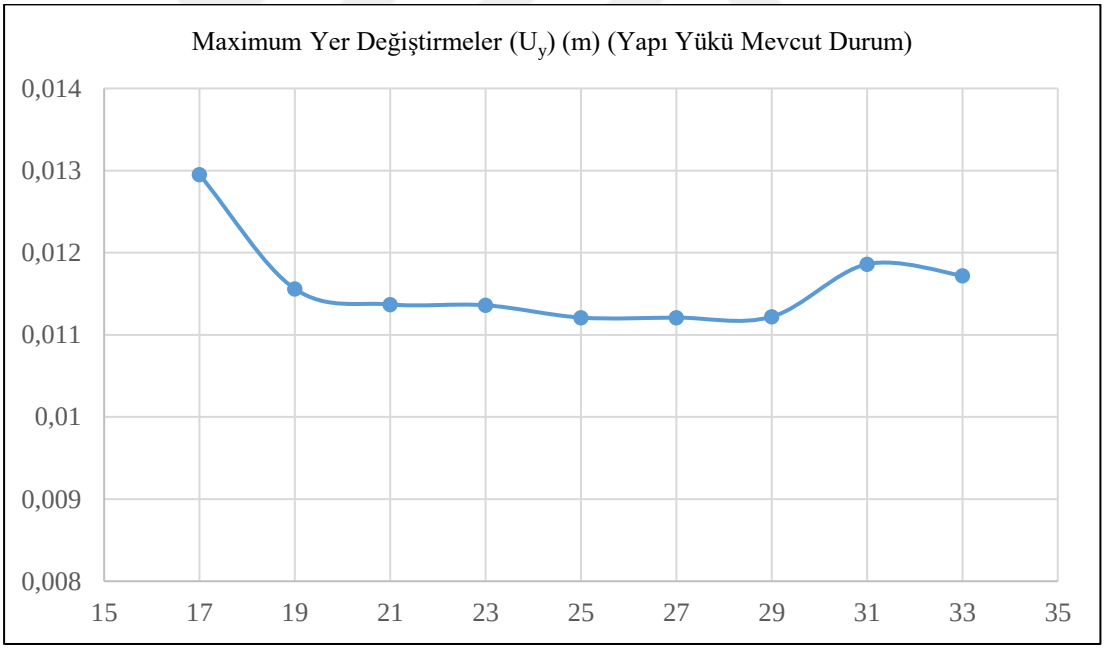
Şekil 4.16. Üçüncü durum için derinliğe bağlı x yönündeki maximum yer değiştirme grafiği



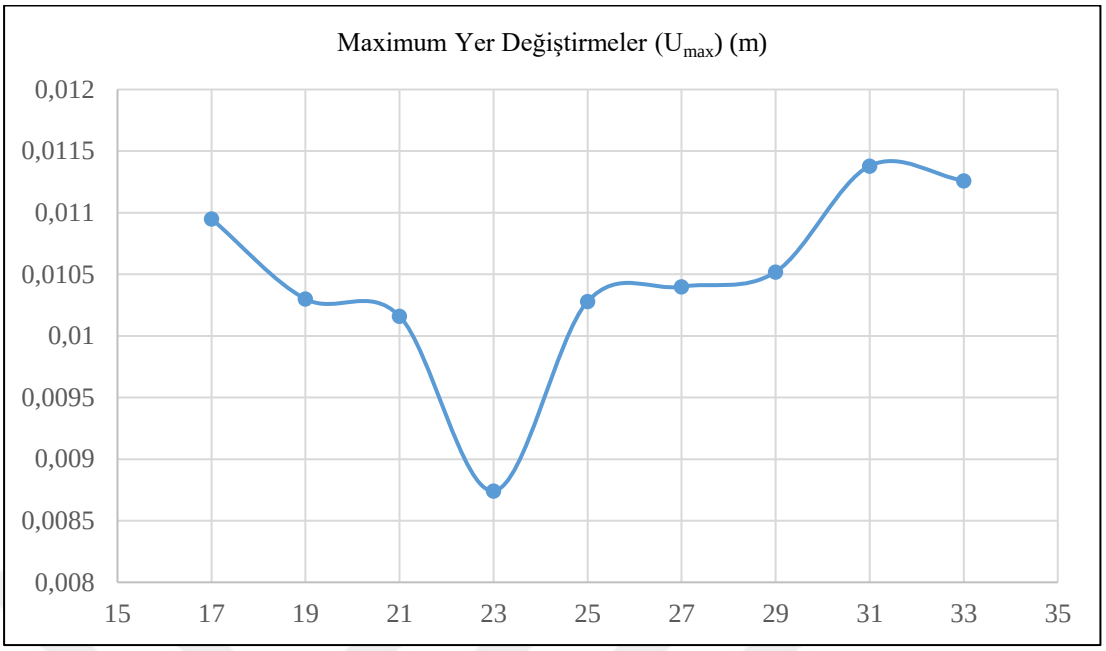
Şekil 4.17. Dördüncü durum için derinliğe bağlı x yönündeki maximum yer değiştirme grafiği



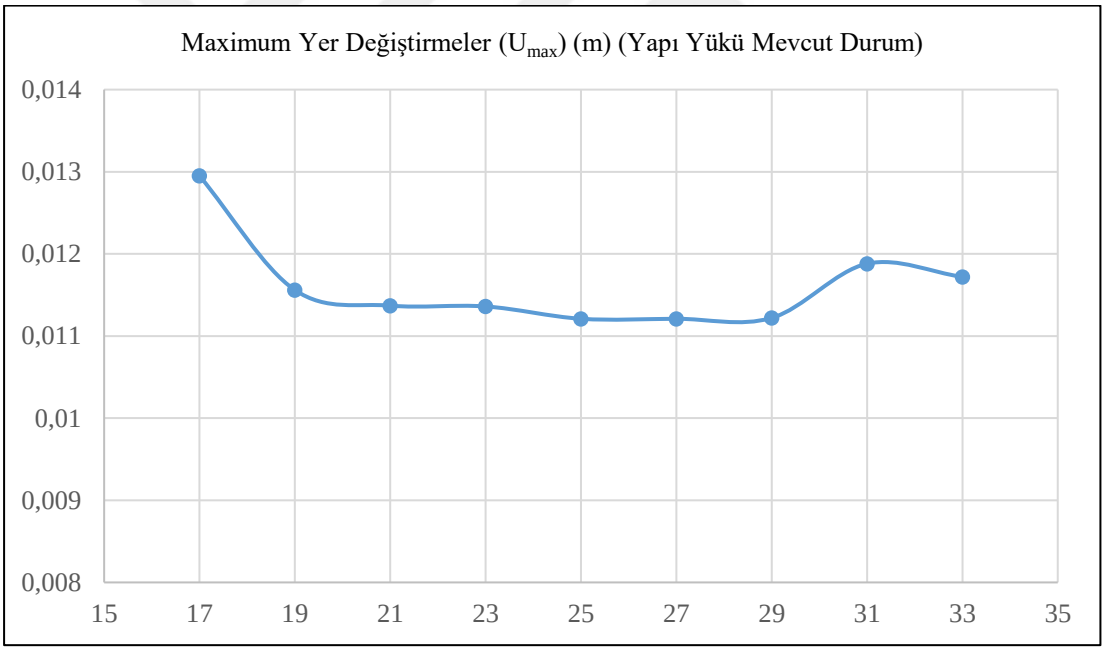
Şekil 4.18. Üçüncü durum için derinliğe bağlı y yönündeki maximum yer değiştirme grafiği



Şekil 4.19. Dördüncü durum için derinliğe bağlı y yönündeki maximum yer değiştirme grafiği



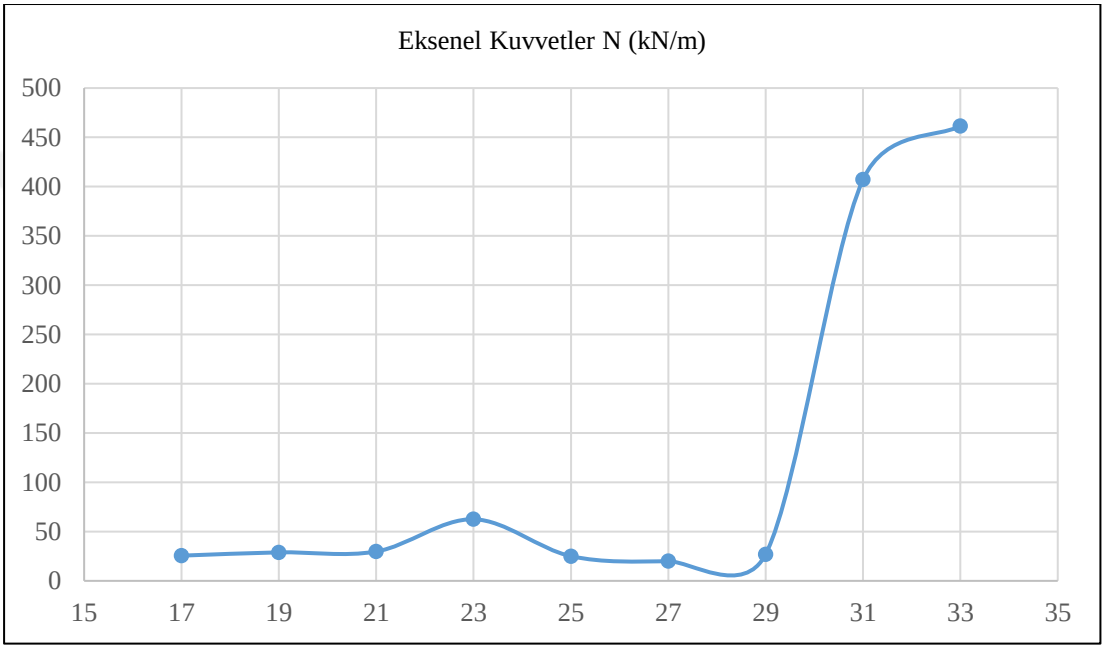
Şekil 4.20. Üçüncü durum için derinliğe bağlı maximum yer değiştirme grafiği



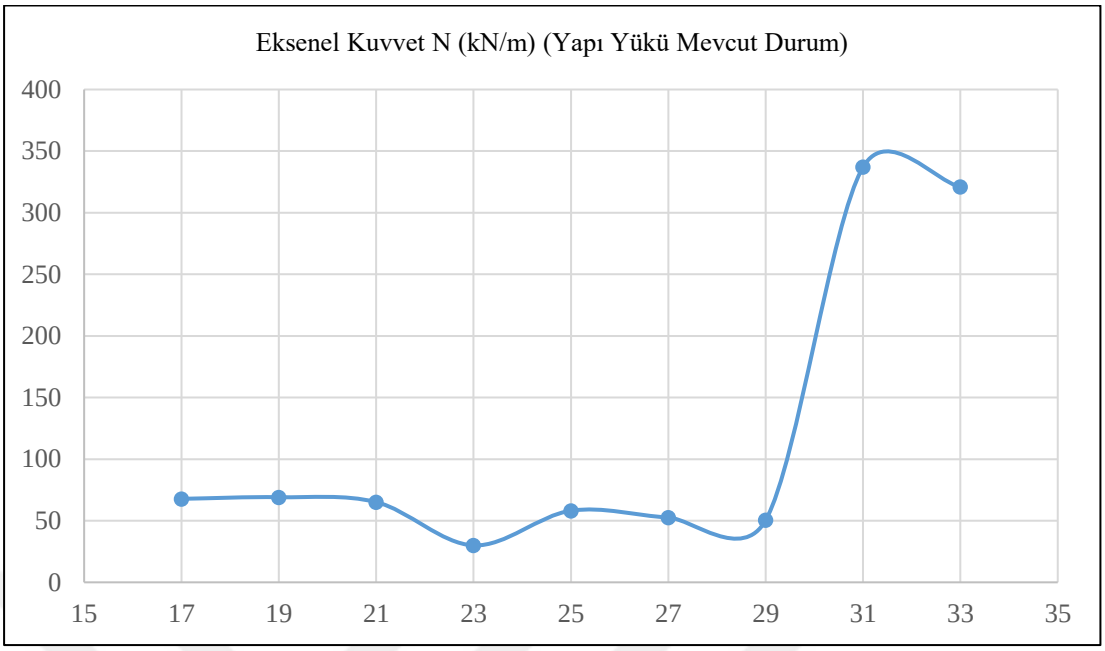
Şekil 4.21. Dördüncü durum için derinliğe bağlı maximum yer değiştirme grafiği

Maximum yer değiştirmeler grafiğine baktığımızda üzerinde yapı yükü olmadığı durumda, yer değiştirme değeri 17. metrede yaklaşık 11 mm civarında olmakta iken, yaklaşık 11,38 mm ile maximum değerine 31 ve 33. metrelerde ulaşmıştır. Tünel aksı üzerinde yapı olması durumunda ölçülen değerlerde ise 17. metrede yaklaşık 13 mm ölçülen değer, 27. metrede yaklaşık 11 mm ile en düşük değerini almaktadır.

Bunun sebebi bina temelinin aktardığı yük ile oluşan gerilme şiddetinin derinlik ile azalmasıdır. Böylelikle zemin üzerinde bulunan yük derinlik arttıkça daha geniş bir alana yayılabilmektedir. Yapı yükü olması ile olmaması durumlarındaki mevcut 2 mm' lik bir deplasman farkının bina ve tünel için bir problem teşkil edemeyeceği sonucu ortaya çıkmıştır. Burada gözlenen 29. metreden sonraki yer değiştirme artışı her ne kadar büyük bir fark olmasa da 29. metreden daha derinde yapılacak bu şarttaki mevcut tünel inşası için güvenli bir bölge olmadığı sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

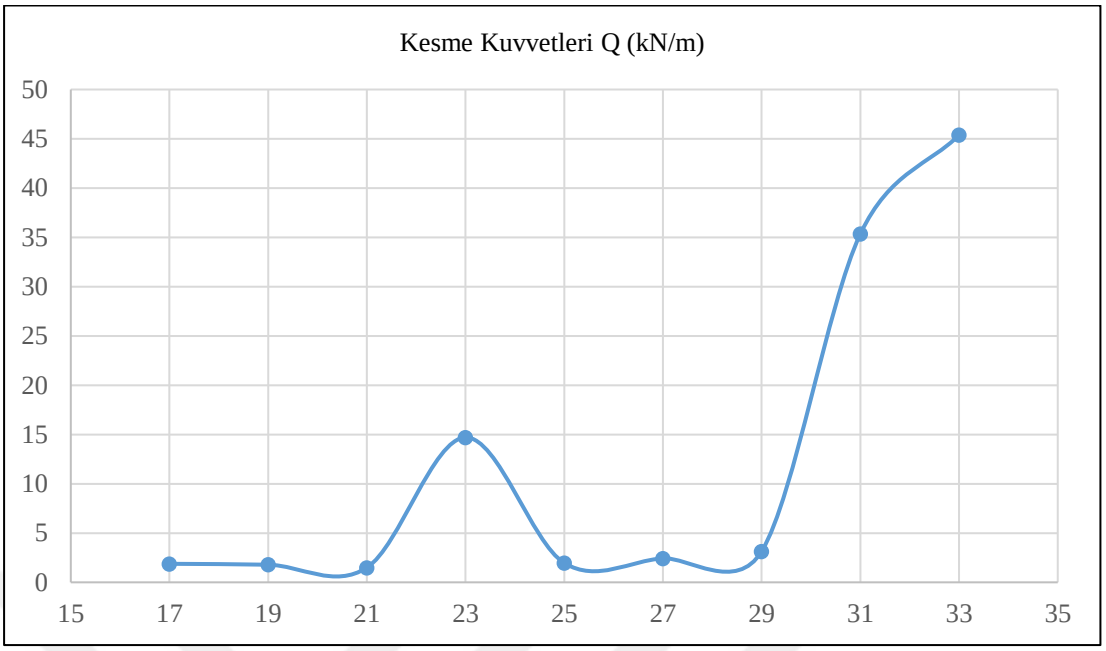


Şekil 4.22.Üçüncü durum için derinliğe bağlı eksenel kuvvet (N) grafiği

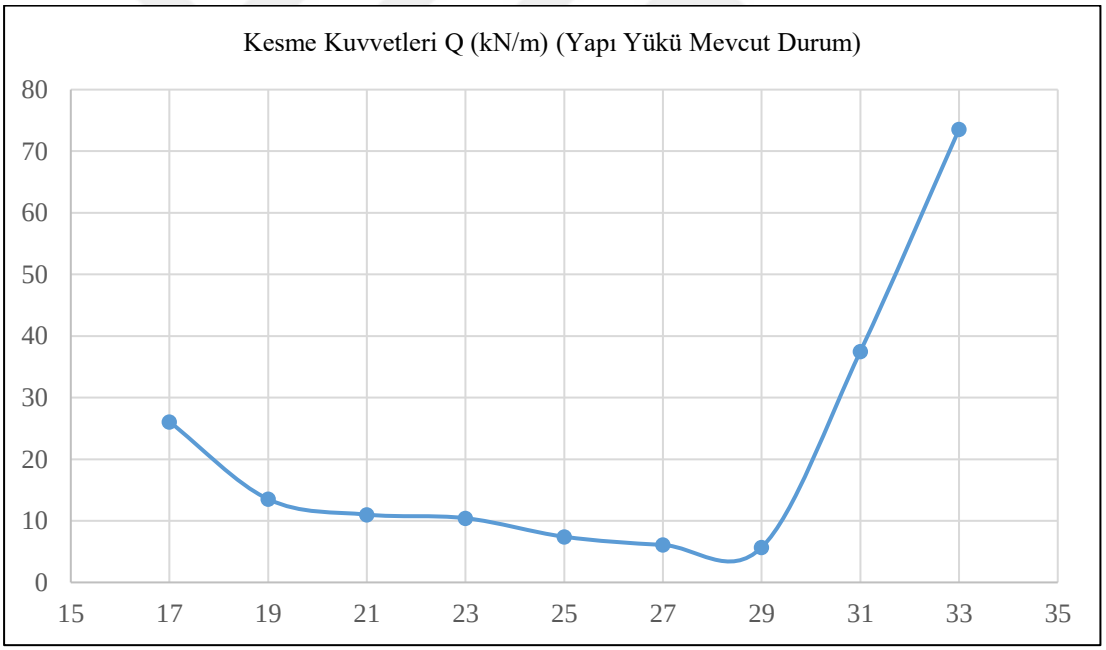


Şekil 4.23. Dördüncü durum için derinliğe bağlı eksenel kuvvet (N) grafiği

Eksenel kuvvet; eksenel simetrik ya da yaklaşık eksenel simetrik bir cismi, ekseni üzerinde ve onunla aynı doğrultuda etkileyen kuvvettir. Yapı yükünün olmadığı durumda 25. metreye kadar ortalama 1-3 kN/m'lik bir artış olduğu gözlenmiştir. 25. metreden itibaren bir azalıp bir artan değer 33. metrede maximum değerine ulaşmaktadır. Derinlik ile birlikte tünel üzerine binen toprak yükünün de etkisiyle bu noktada etkiyen kuvvet maximum olmaktadır. Bu nokta için de tehlikeli bölge tanımlaması yapılarak, mevcut haliyle kazıdan kaçınılması önerilmektedir. Üzerinde yapı yükünün bulunduğu diğer durumda ise, eksenel kuvvetler ilk duruma göre normal olarak daha fazla olmakta ve yine 25. metreden sonra bir artma ve azalma göstermektedir. Nihai olarak da 31. metrede maximum değerine ulaşmaktadır.



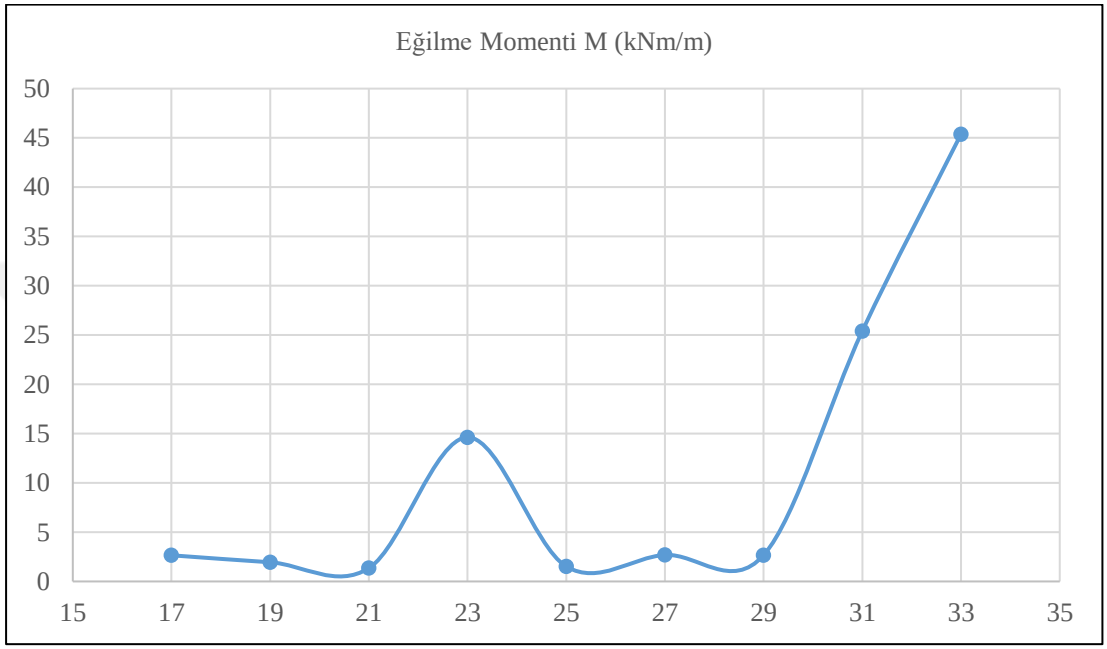
Şekil 4.24. Üçüncü durum için derinliğe bağlı kesme kuvvet (Q) grafiği



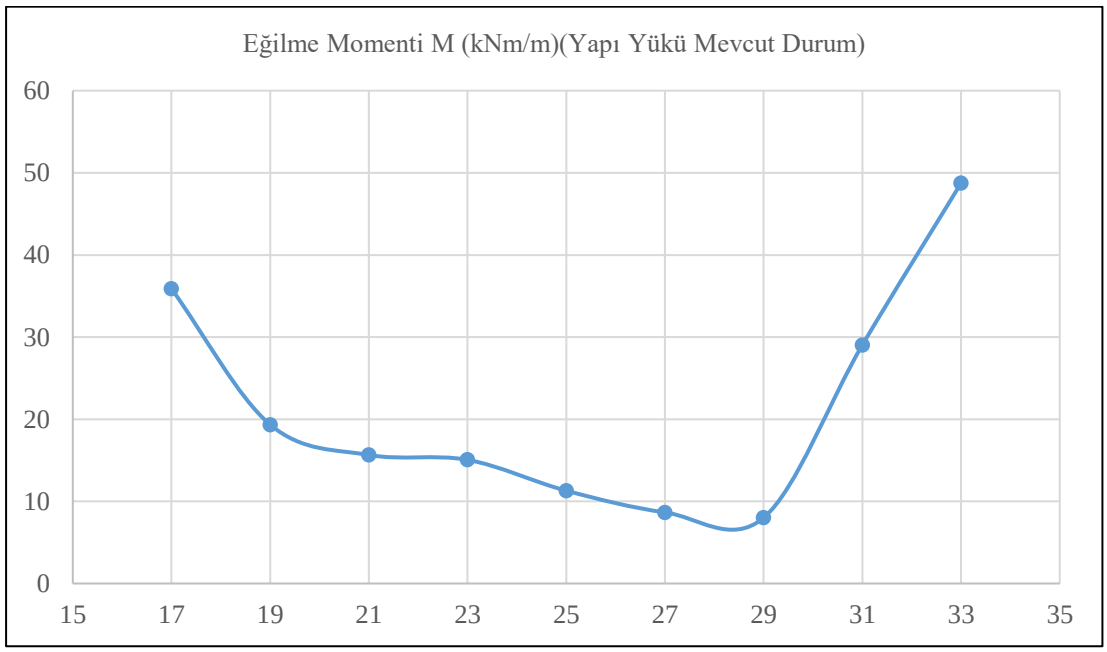
Şekil 4.25. Dördüncü durum için derinliğe bağlı kesme kuvvet (Q) grafiği

Yapıyı kesen kuvvetlerin etkisiyle yapıda kırılma, çatlamalar vb. oluşmaktadır. Kayma gerilmeleri kesme gerilmelerini oluşturmakta ve yatay kuvvetler (deprem vb.) etkisinde kolonlarda meydana gelen kesme çatlakları da bu duruma en güzel örnek olmaktadır. Kesme kuvvetlerini karşılamak amacıyla binalarda etriye, çiroz gibi yatay kuvvetleri karşılayacak elemanlar kullanılmaktadır. Grafiklerde kesme kuvvetleri ilk durum için 25. metreye kadar yaklaşık 2 kN/m mertebesinde iken, tünel aksı üzerinde

yapı olması durumda 25. metreye kadar ortalama 12 kN/m mertebelerinde seyretmektedir. 27. metreden itibaren gerçekleşen artış bu noktada bu tahkimatla tünel inşasının sağlıklı olmadığı sonucunu vermektedir. Tahkimat her ne kadar analiz sonuçlarına göre yeterli bulunmuş olsa da, bu derinlikte ilave tahkimatlar ve zemin araştırmalarının da yapılması gerekmektedir.



Şekil 4.26. Üçüncü durum için derinliğe bağlı eğilme momenti (M) grafiği



Şekil 4.27. Dördüncü durum için derinliğe bağlı eğilme momenti (M) grafiği

17. metrede ilk durumda ortalama 2,5 kN/m ölçülen eğilme momenti değeri 27. metreden itibaren pik yapmaktadır. Yapının etkitildiği durumda ise 17. metrede 35,88 kN/m değerinde olan moment, 19. metrede 19,34 kN/m'lik değerle 27. metreye kadar azalmakta ve bu noktadan sonra maximum değerine doğru artış göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde mühendisliğin birçok alanında bilgisayar programları ile hesaplamalar yapmaktayız. Sonuçların hızlı bir şekilde analizi ve gerçeğe çok yakın değerlerin hesaplanır oluşu da program kullanımını cazip hale getirmektedir. Böylelikle karşılaşılacak sonuçlar inşa öncesinde belirlenebilir olmakta ve gerekli önlemler alınabilmektedir. Bu amaçla geoteknik mühendisliğinde kullandığımız birçok paket program mevcuttur. Bilgisayar programlarının matematiksel tabanını oluşturan sonlu elemanlar metodu da bu paket programlar da yaygın olarak kullanılmaktadır. Tünelcilik alanında, güzergâh boyunca geçilecek her bir zemin formasyonu ayrı ayrı tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu kullanılarak, Kocaeli ilçesinde yapılması planlanan bir metro projesinin belirli bir güzergahında derinliğe bağlı deformasyon araştırılması yapılmıştır. İki farklı model kurularak analizler yapılmıştır. İlk durumda tünel aksında yüzeyde yapı olmadığı durum incelenmiş, ikinci durumda ise tünel aksında yüzeyde mevcut bir yapının olduğu durum incelenmiştir. Bu yapı gerçekte de tünel projesi sonrasında yapılması planlanan 10 katlı bir betonarme bina yapısıdır. Güzergâh 2 tabakalı zemin olarak tek homojen bölgeye ayrılmıştır. Modelleme Plaxis 2D programı ile yapılmıştır. İncelenen tünel güzergâh zemini parametreleri, yapılan sondajlar ve etütler ışığında belirli değerleri elle hesaplanmış ve programda modellenmiştir. Gerçeğe en yakın sonuçlar elde etmek amacıyla aşamalı kazı ile hesaplamalar yapılmıştır. Analiz sonucunda her bir durum için efektif gerilmeler, eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve maximum yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir.

Yapılan sayısal modelleme çalışması ile kazı derinliğine bağlı kuvvet ve momentler ile yer değiştirmeler hakkında yorumlamalarda bulunulmuştur.

Sonuçlara baktığımızda ölçülen maximum yer değiştirme tünel tepe noktasında olup, 0,01295 metre yani 12,95 mm ile tünel aksı üzerinde yapı bulunduğu durumda ölçülmüştür.

Maximum efektif gerilme 1032 kN/m ile 33. metrede tünel aksı üzerinde yapı yükü olduğu durumda gözlenmiştir.

Maximum eksenel kuvvet 461,6 kN/m ile tünel aksı üzerinde yapı olmadığı durumda 33. metrede ölçülmüştür.

Maximum kesme kuvveti 73,54 kN/m ile tünel aksı üzerinde yapı olduğu durumda 33. metrede gözlenmiştir.

Maximum eğilme momenti 48,74 kNm/m ile tünel aksı üzerinde yapı yükünün bulunduğu durumda 33. metrede ölçülmüştür.

Genel anlamda baktığımızda 27 metre derinliğe kadar;

Efektif gerilmelerin tünel aksı üzerinde yüzeyde yapı olsun olmasın derinlikle lineere yakın arttığı gözlenmiştir.

Yer değiştirmelerin yüzeye en yakın olan sığ derinliklerde tünel aksı üzerinde yapı olsun olmasın maximum olduğu ve bu değerin derinlikle azaldığı gözlenmiştir. Tünel aksı üzerinde yapı olması durumunda sığ zeminde etkiyen gerilme büyük olmakta ve derinlikle birlikte etkiyen gerilmenin etkisi daha büyük alana dağıldığından, bu değerin azalması da beklenen bir durum olmaktadır.

Eksenel kuvvetlerin, 25 metreye kadar az az artıp azaldığı ve sonrasında 31. metrede maximum değerine ulaştığı gözlenmiştir.

Kesme kuvvetleri ve eğilme momentlerinin derinlikle azaldığı gözlenmiştir.

Çalışmamızda 27. metreden sonra grafiklerin pik değerlerine tırmandığı gözlenmiştir. Bu tünel projesi için 27 metre ve sonrasındaki derinlikleri tanımlayabilmek adına ilave sondajlar önerilmektedir.

Sonlu elemanlar metodu ile analiz eden Plaxis programı, 9 farklı derinlik için yapmış olduğu hesaplamalarda tünelin ayakta kaldığı sonucunu vermiştir. Fakat 27. metre ve sonrasında elde edilen dalgalı grafikler sebebiyle, bu derinliklerde tünel inşası için ilave tahkimat hesaplarının yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Karaoğlan H., Kaya Zeminde Tünel Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002, 127018.

[2] Aktaş S. Ş., Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi İle İnşa Edilen Bir Tünelin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Analizi ve Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 243585.

[3] Kanık M., Gürocak Z., Kazı Derinliğinin Püskürtme Beton Üzerindeki Etkisi: Sayısal Bir Yaklaşım, *Güfbed/Gustıj,* DOI: 10.17714/gumusfenbil.335028.

[4] https://tunnelingonline.com/tunneling-historical-perspective/ , (Ziyaret Tarihi: 11 Ekim 2017).

[5] Ocak İ. Metro Tünellerinde Kayaç Özelliklerinin Tasman ve Konverjansa Etkilerinin Araştırılması, *İstanbul Üniversitesi Yer Bilimleri Dergisi,* 2005, **18**(1), 45-42.

[6] http://imoistanbul.org/imoarsiv/ist-bulten/sayi96/(11-17)%20tuneller.pdf , (Ziyaret Tarihi: 11 Ekim 2017).

[7] Osmanoğlu D., Tünellerde Zemin İyileştirilmesi ve Stabilitenin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Plaxis Programında Analiz Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 222356.

[8] Satıcı Ö., Topal T., Tünel Açma Yöntemlerinin Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Sınıflama Sistemleri ile Değerlendirilmesi, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 2015, **39**(1), 45-57.

[9] Tonon F., Sequential Excavation, NATM And ADECO: What They Have In Common And How They Differ, *Tunneling and Underground Space Technology*, 2010, **25**(3), 245-265.

[10] Ayaydın N., Tünel Açma Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Türkiye İnşaat Mühendisliği IX. Teknik Kongresi*, Ankara, Türkiye, 16 Kasım 1987.

[11] Polat D., NATM Metodu Kullanılarak Tünel Tasarımı Ve Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 293960.

[12] Eren M., İki Farklı Yöntemle (NATM-TBM) İle Açılan Bir Tünelde Düşey Deformasyon/Deplasmanların Belirlenmesi: M5 Metro Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014, 364182.

[13] http://www.rockmass.net/ap/39_Palmstrom_on_NATM.pdf , (Ziyaret Tarihi: 12 Ekim 2017)

[14] Müller L., Fecker E. Fundamental Ideas And Principles Of The New Austrian Tunelling Method, *Geologische Gesellschaft,*1989, **82**(3), 1-10.

[15] Öngen Ö., Güzel A., Farklı Kaya Sınıfları için Yapılan Sayısal Modelleme Çalışmalarının Karşılaştırılması-Örnek uygulama, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri* Dergisi, 2015, **11**(2), 253-264.

[16] http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/496bf24afe7fab6_ek.pdf , (Ziyaret Tarihi, 11 Ekim 2017).

[17] Kahyaoğlu H., TAG Otoyolu Özelinde Tünel İşleri ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi*, IV. Ulaştırma Kongresi,* Denizli, Türkiye, 3-5 Haziran 1998.

[18] http://www.tunelteknolojisi.com/pdfler/mak-1433418388.pdf , (Ziyaret Tarihi: 13 Ekim 2017).

[19] Karakuş M., Fowell R.J., An Insight Into The New Austrian Tunneling Method (NATM), *KAYAMEK'2004-VII Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Sivas, Türkiye, 21-22 Ekim 2004.

[20] Özer S. C., Tünel Kazılarında Optimum Çelik Boru Kemer Boyutunun Nümerik Modelleme İle Tayini, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2011, 299121.

[21] Sturm C, Shallow Tunnels And Caverns in Urban Areas, Master Thesis, FH Joanneum Gesellschaft MbH Fachhochschulstudiengang, Baumanagement Und Ingenieurbau, Avusturya, 2011.

[22] Cingöz A. C., NATM ve TBM Yöntemlerinin Deneysel Olarak Maliyet ve Süre Kriterleriyle Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, T.C. Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 365616.

[23] Uğurel Ş., Türkiye'de Metro Projeleri Yatırımlarının Geri Dönüşüm Süresinin Belirlenmesi Ve Bu Sürenin Optimizasyonu İçin Öneriler, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 295257.

[24] Ulusay R., Aydan R., Tünel Açma Makinalarıyla Yapılan Kazı İşlemlerinin Olumlu ve Olumsuz Yönlerinin Değerlendirilmesi: Takisato Tüneli (Japonya) Örneği, H*.Ü. Jeoloji Mühendisliği,* 1997, **22**(51),51-61.

[25] Okyay V., Yeni Avusturya Tünel Metodu (NATM), *Tünel Teknolojisi*, 2015, **11**(3), 39.

[26] Hajebi D., TBM ile Açılan İkiz Tüneller Çevresinde Gözlenen Oturma ve Deformasyonlar, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 238193.

[27] Kalkan Y., Alkan R. M., Mühendislik Yapılarında Deformasyon Ölçmeleri, *2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 23-25 Kasım 2005.

[28] Duygu F., Deformasyon ve Ölçme Yöntemleri, Lisans Bitirme Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, 2012.

[29] Doğanalp S., Kalman Filtreleme Yöntemiyle Deformasyon Analizi, Yüksek Lisans Semineri, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2003.

[30] Erdoğan, H., Yapı Çevrelerinde Deformasyon Ölçmeleri ve Bir Model Üzerinde Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998, 79200.

[31] Bülbül S. Yatay Yöndeki Deformasyonların Belirlenmesinde Bağıl Güven Elipsleri ve Cholesky Çarpanlarına Ayırma Yönteminin Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2013, 327050.

[32] Ayan T., Jeodezik Ağlarda Deformasyon Analizine Genel Bakış, *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi*, 1982, **40**(1), 21-25.

[33] Doğan U., 17 Ağustos 1999 İzmit Depreminden Kaynaklanan Deformasyonların Kinematik Modellerle Araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002, 128812.

[34] Çelik S., Comparison of Mohr-Coulomb and Hardening Soil Models' Numerical Estimation of Ground Surface Settlement Caused by Tunneling, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2017, **7**(4), 95-102.

[35] Şengün E., Oyuk Genişlemesi Probleminin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İki Boyutlu Sayısal Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 332898.

[36] http://slideplayer.biz.tr/slide/9139948/ , (Ziyaret tarihi: 9 Ekim 2017).

[37] http://www.madenciyim.com/forums/showthread.php/3068-T%C3%BCnel-A%C3%A7ma-Y%C3%B6ntemleri , (Ziyaret tarihi: 9 Ekim 2017).

[38] https://www.slideshare.net/mohammadsalikali/tunnelling-methods-and-tunnel-boring-machine , (Ziyaret tarihi: 9 Ekim 2017).

[39] http://www.marmaray.gov.tr/icerik/marmaray/Marmaray-Teknik-%C3%96zellikleri/56, (Ziyaret tarihi: 29 Aralık 2017).

[40] http://wowturkey.com/forum/viewtopic.php?p=3495007 , (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2017).

[41] http://www.arcanmakina.com/tbm.php , (Ziyaret Tarihi: 25 Aralık 2017).

[42] https://www.ibb.istanbul/News/Detail/34055 , (Ziyaret tarihi: 25 Aralık 2017).

[43] http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/1075.pdf , (Ziyaret Tarihi: 25 Aralık 2017).

[44] https://en.m.wikipedia.org/wiki/Tunnel_boring_machine , (Ziyaret tarihi: 25 Aralık).

[45] https://www.muhendisbeyinler.net/forum/konu/tbm-tunnel-boring-machine-nedir.1672/ , (Ziyaret tarihi 25 Aralık 2017).

[46] http://docplayer.biz.tr/45257790-Yeralti-kazilarinda-mekanizasyon-mechanical-excavation-in-underground-workings.html , (Ziyaret tarihi: 26 Aralık 2017).

[47] http://www.yildiz.edu.tr/~sahin/tuneller/Genisletilmis7.BOLUM_DERS_ NOTLARI.pdf , (Ziyaret tarihi: 27 Aralık 2017)

[48] http://www.aykutozdemir.com.tr/insaat/wp-content/uploads/2012/04/tbm-t%C3%BCnel-a%C3%A7ma-makinalar%C4%B1.pdf , (Ziyaret tarihi: 27 Aralık 2017).

[49] http://madenmuhendis.blogspot.com.tr/p/tbm-tunel-boring-machine-diger-bir.html , (Ziyaret tarihi: 23 Mart 2018).

[50] http://www.fenokulu.net/yeni/Fen-Konulari/Konu/Yer-Kabugunu-Etkileyen-Levha-Hareketleri-ve-Depremler_935.html , (Ziyaret tarihi: 1 Ocak 2018).

[51] http://yunus.hacettepe.edu.tr/~kdirik/deformasyon.pdf , (Ziyaret tarihi: 24 Mart 2018).

[52] http://www.hkmo.org.tr/resimler/ekler/P9A6_1857b449c407203_ek.pdf , (Ziyaret tarihi: 29 Mart 2018).

[53] http://aves.ktu.edu.tr/ImageOfByte.aspx?Resim=8&SSNO=48&USER=3973 , (Ziyaret tarihi: 4 Ocak 2018)

[54] http://www.hkmo.org.tr/resimler/ekler/V5F5_810ccd41bf26faa_ek.pdf , (Ziyaret tarihi: 4 Ocak 2018)

[55] http://www.yildiz.edu.tr/~cdemir/sonlu_elemanlar.pdf , (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2018).

EKLER

Ek-A: 17 Metre Derinlik İçin Program Analiz Raporu

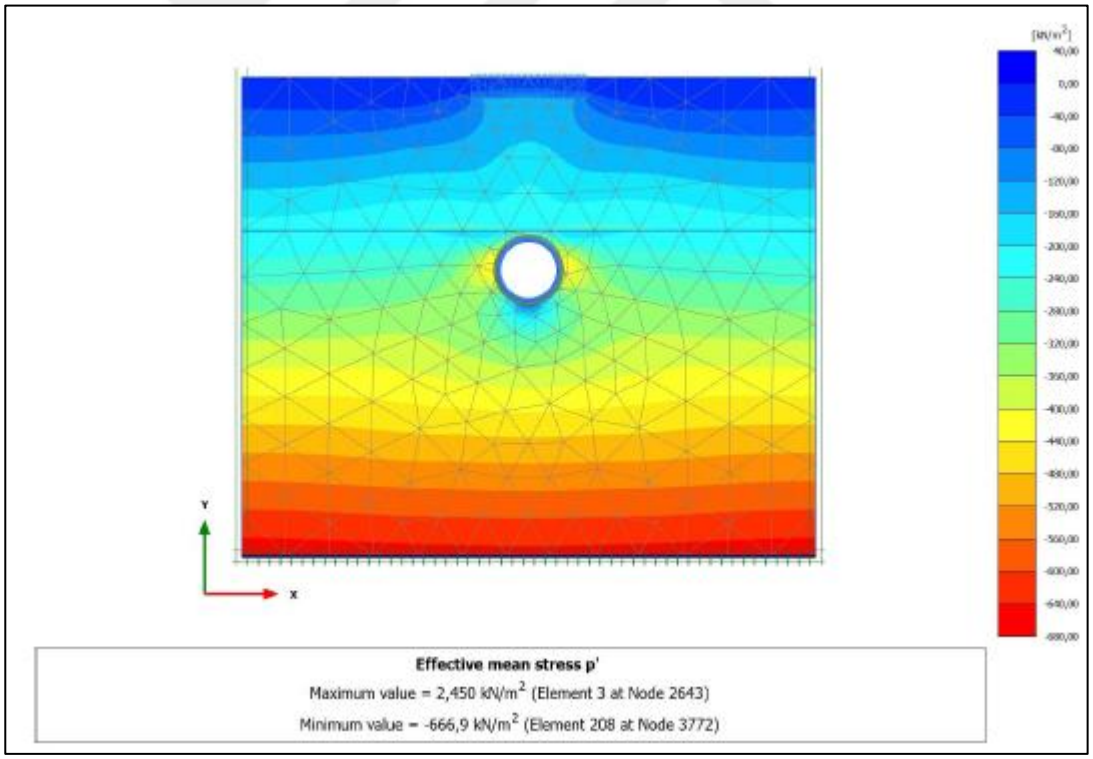
Identification		Grovak W3	Grovak W2
Identification number		1	2
Drainage type		Drained	Drained
Colour			
Comments			
γ_{unsat}	kN/m³	20,00	24,00
γ_{sat}	kN/m³	22,00	25,00
Dilatancy cut-off		No	No
e_{min}		0,5000	0,5000
e_{min}		0,000	0,000
e_{max}		999,0	999,0
Rayleigh α		0,000	0,000
Rayleigh β		0,000	0,000
E_{50}^{ref}	kN/m²	165,0E3	742,5E3
E_{oed}^{ref}	kN/m²	165,0E3	742,5E3
E_{ur}^{ref}	kN/m²	495,0E3	2,228E6
power (m)		0,5000	0,5000
Use alternatives		No	No
C_c		2,091E-3	0,4646E-3
C_s		0,6273E-3	0,1394E-3
e_{init}		0,5000	0,5000
c_{ref}	kN/m²	650,0	1230
φ (phi)	°	30,00	40,00
ψ (psi)	°	0,000	10,00
Set to default values		Yes	Yes
ν_{ur}		0,2000	0,2000
p_{ref}	kN/m²	100,0	100,0
K_0^{nc}		0,5000	0,3572
c_{inc}	kN/m²/m	0,000	0,000
y_{ref}	m	0,000	0,000
R_f		0,9000	0,9000
Tension cut-off		Yes	Yes
Tensile strength	kN/m²	0,000	0,000
Strength		Rigid	Rigid
R_{inter}		1,000	1,000
Consider gap closure		Yes	Yes
δ_{inter}		0,000	0,000
K_0 determination		Automatic	Automatic
$K_{0,x}$		0,5000	0,3572
OCR		1,000	1,000
POP	kN/m²	0,000	0,000
Data set		Standard	Standard
Type		Coarse	Coarse
< 2 µm	%	10,00	10,00
2 µm - 50 µm	%	13,00	13,00
50 µm - 2 mm	%	77,00	77,00
Set to default values		No	No
k_x	m/day	0,000	0,000
k_y	m/day	0,000	0,000
$-\psi_{unsat}$	m	10,00E3	10,00E3
e_{init}		0,5000	0,5000
c_k		1,000E15	0,01820E-6

Şekil A.1. Tüm derinlikler için program parametre girdileri

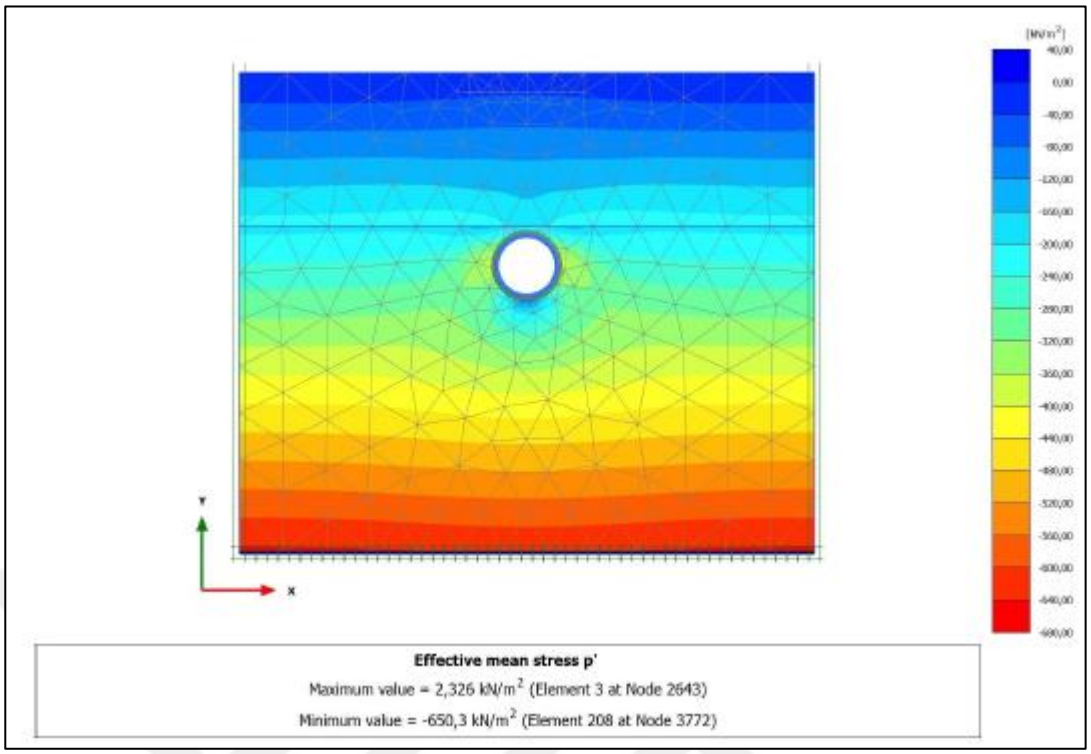
1.1.1.2 Materials - Plates -

Identification		tünelkaplama
Identification number		1
Comments		
Colour		
Material type		Elastic
Isotropic		Yes
End bearing		No
EA_1	kN/m	10,20E6
EA_2	kN/m	10,20E6
EI	kN m²/m	76,50E3
d	m	0,3000
w	kN/m/m	7,500
ν (nu)		0,2000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000

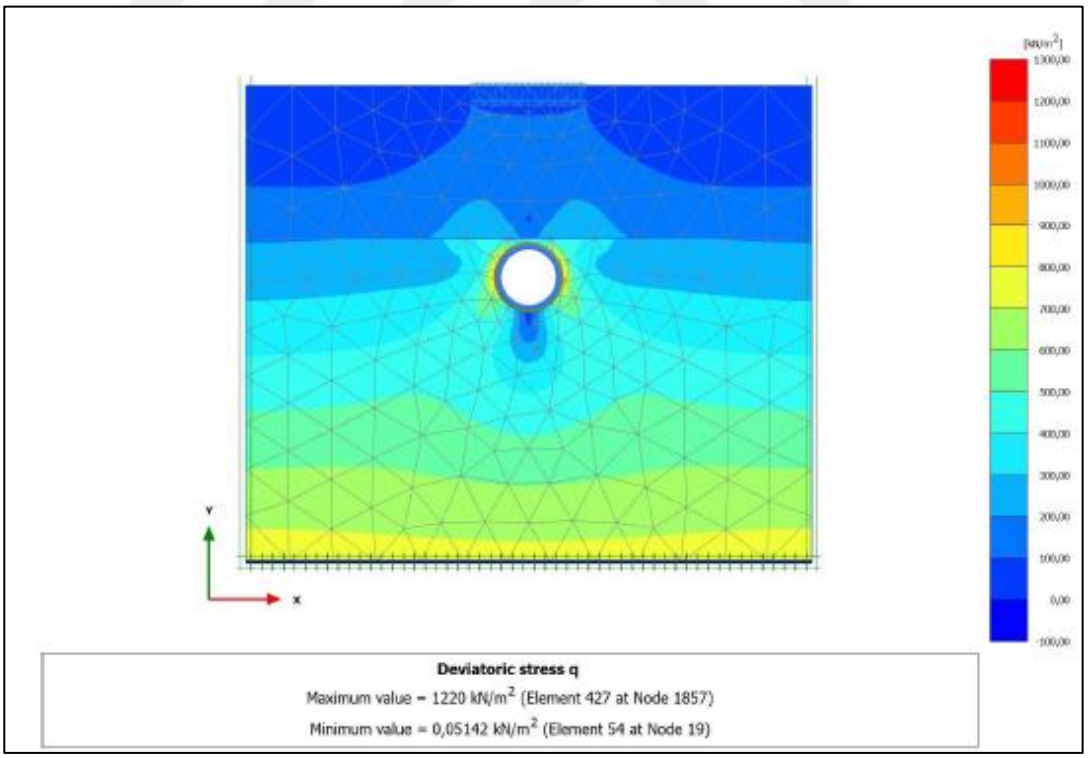
Şekil A.2. Tüm derinlikler için tahkimat parametre girdileri



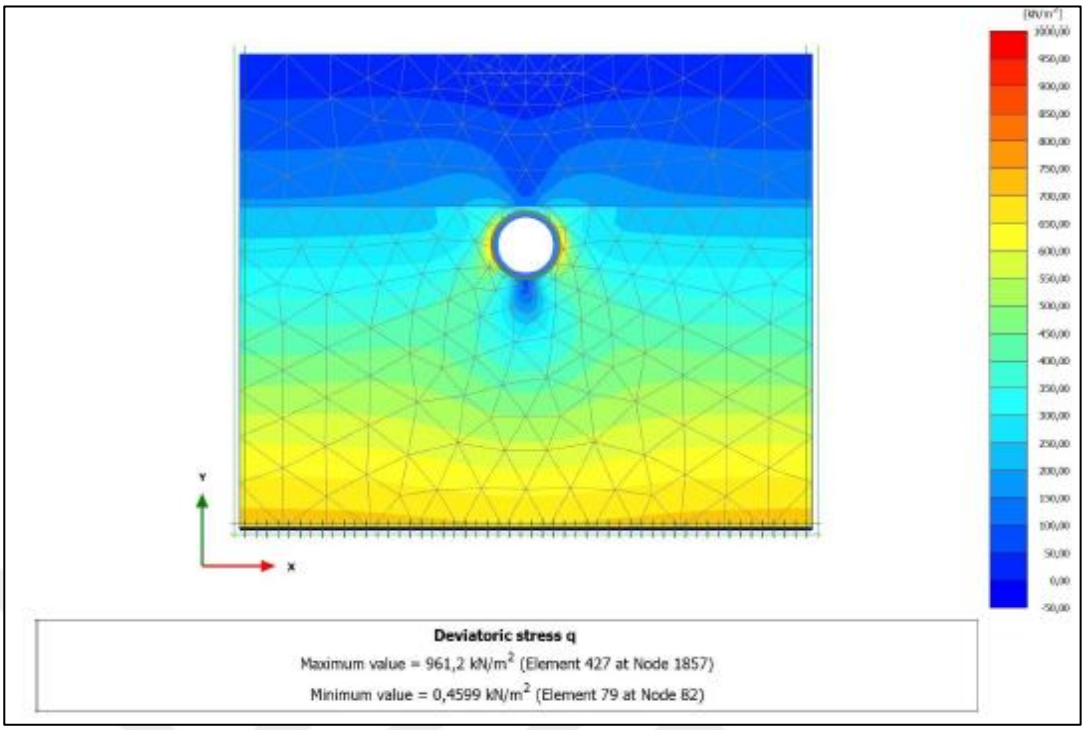
Şekil A.3. İkinci durum için efektif anlamda ölçülen p’ gerilme değerleri (17. m)



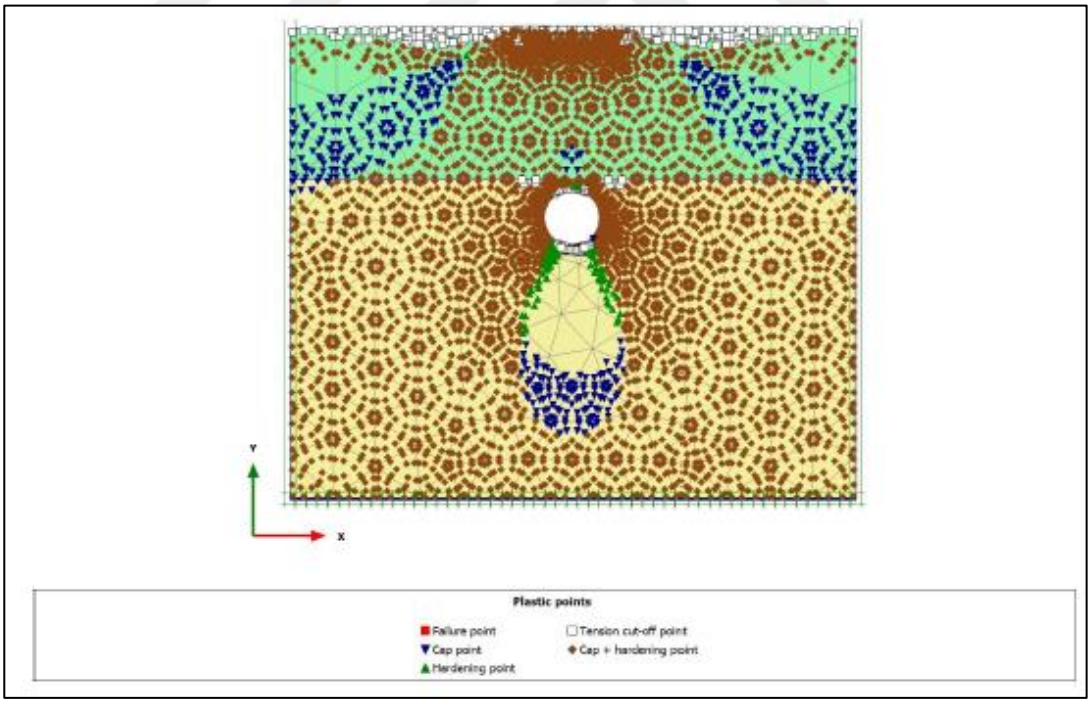
Şekil A.4. İlk durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (17. m)



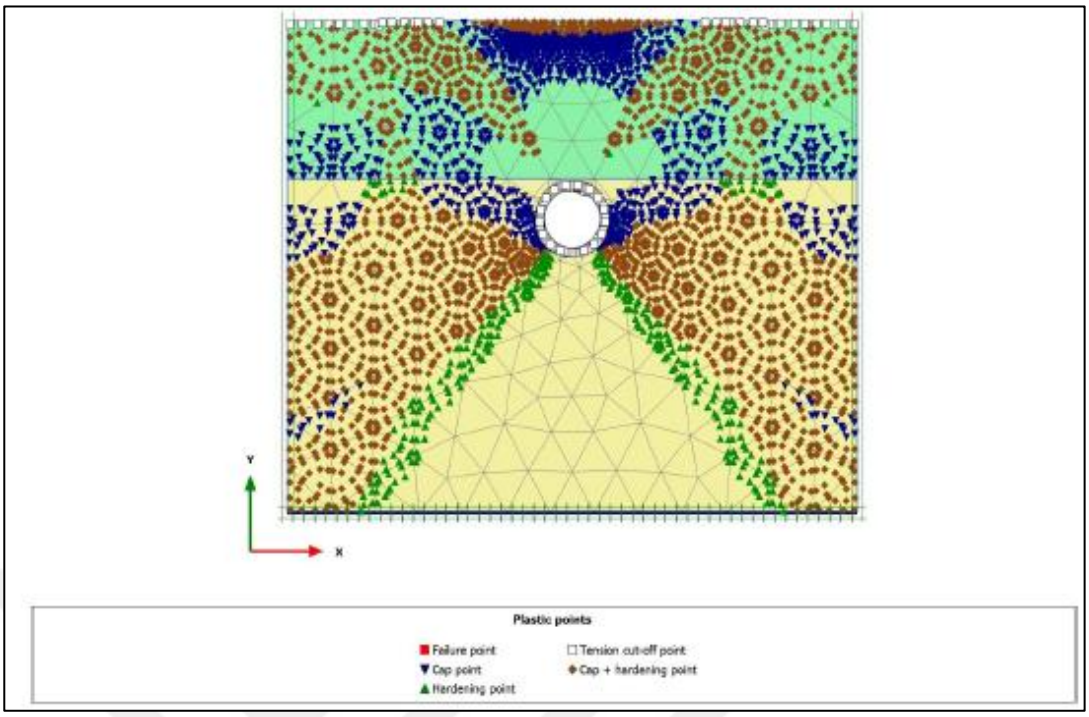
Şekil A.5. İkinci durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (17. m)



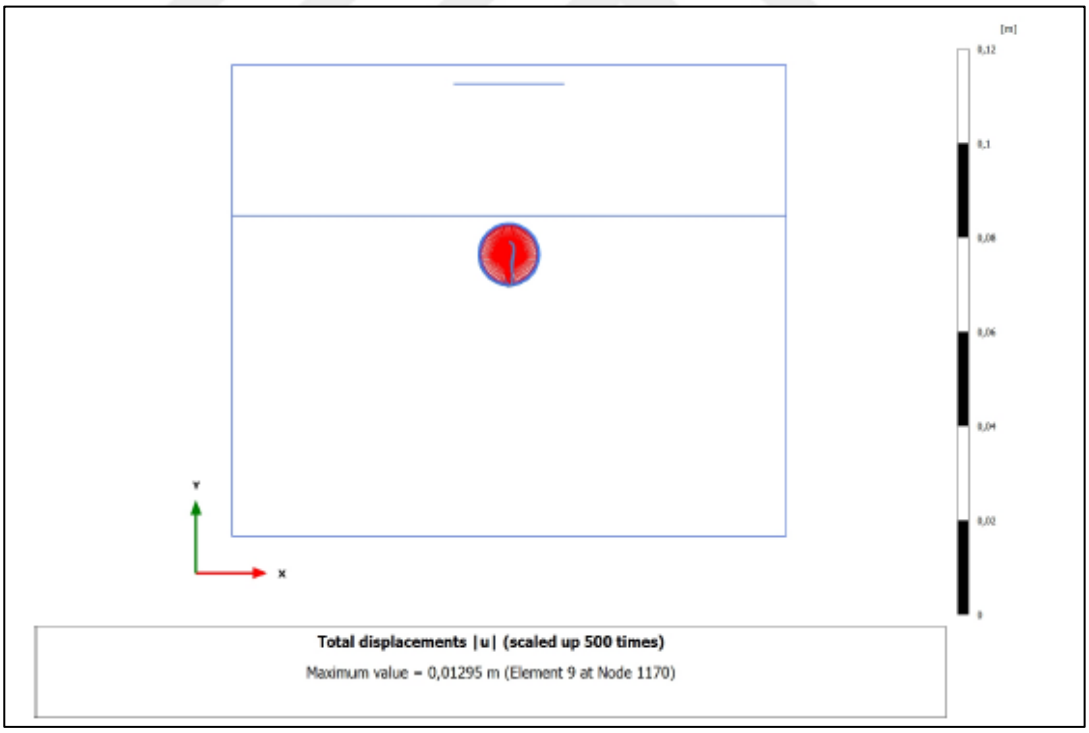
Şekil A.6. İlk durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (17. m)



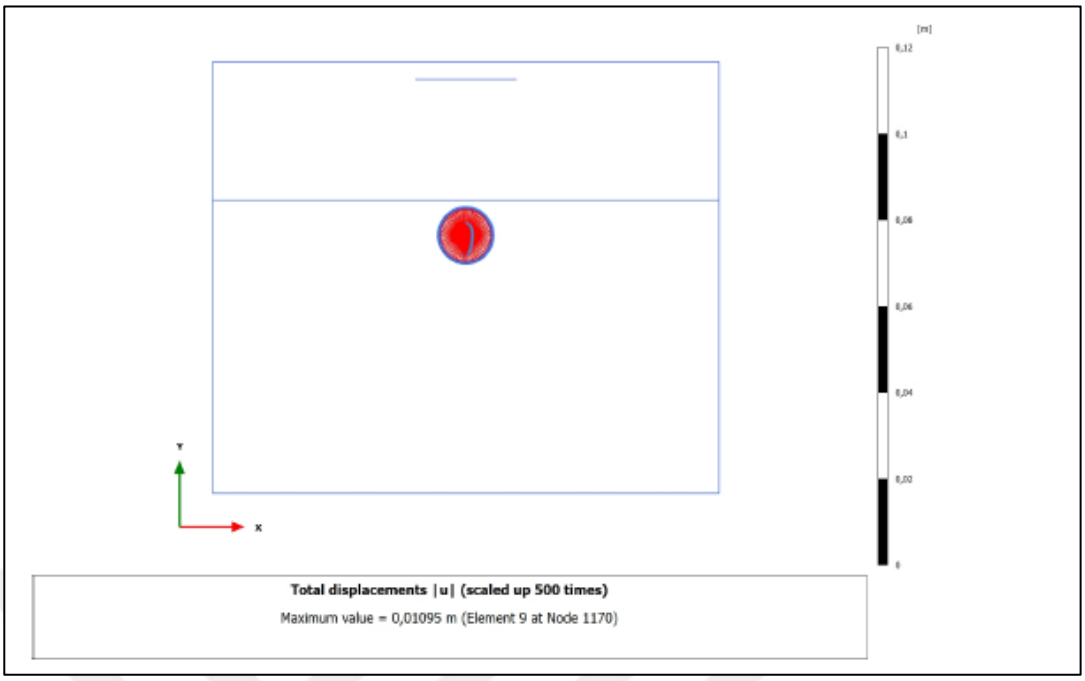
Şekil A.7. İkinci durum için plastik noktalar (17. m)



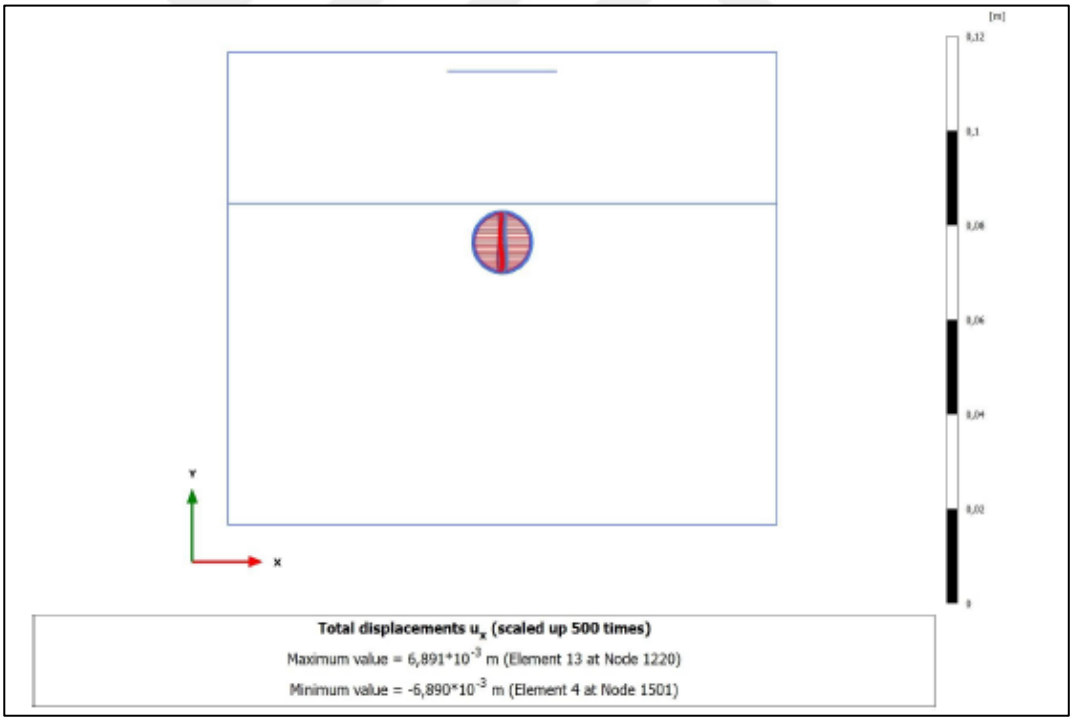
Şekil A.8. İlk durum için plastik noktalar (17. m)



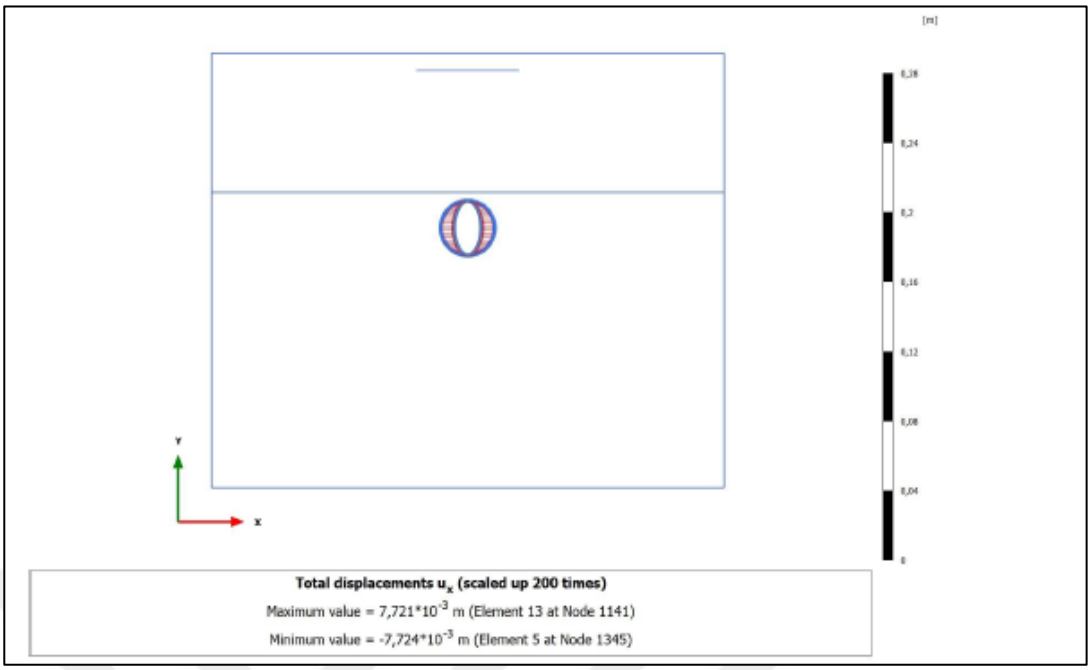
Şekil A.9. Dördüncü durum için toplam yer değiştirme (17. m)



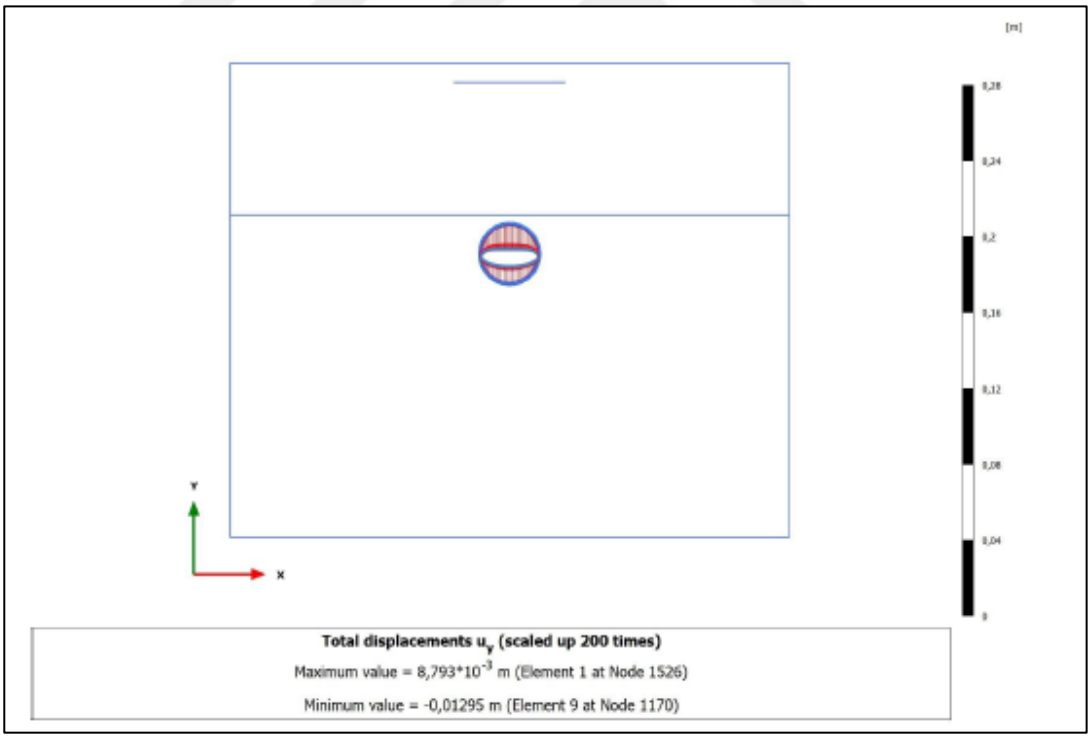
Şekil A.10. Üçüncü durum için toplam yer değiştirme (17. m)



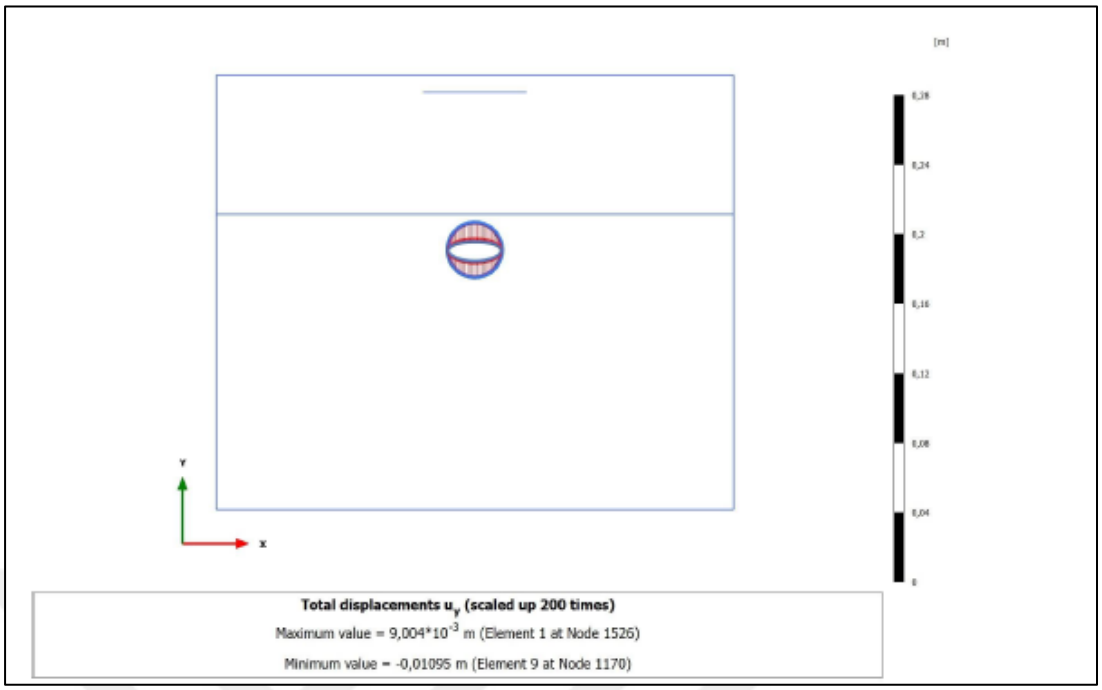
Şekil A.11. Dördüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (17.m)



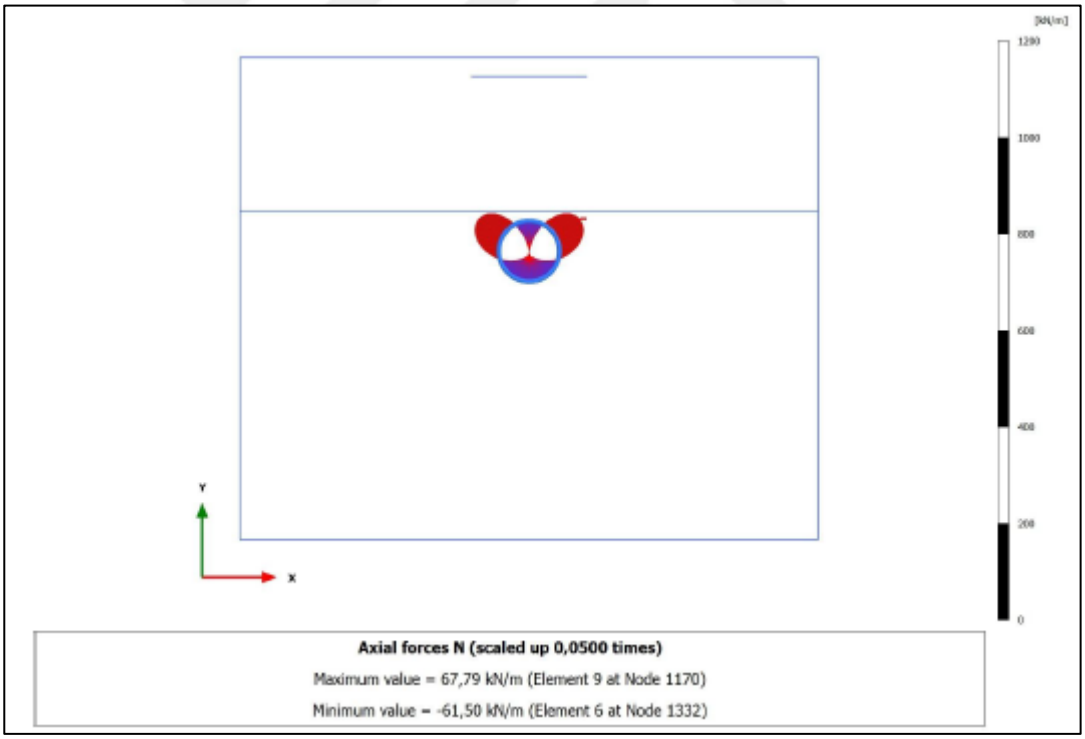
Şekil A.12. Üçüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (17. m)



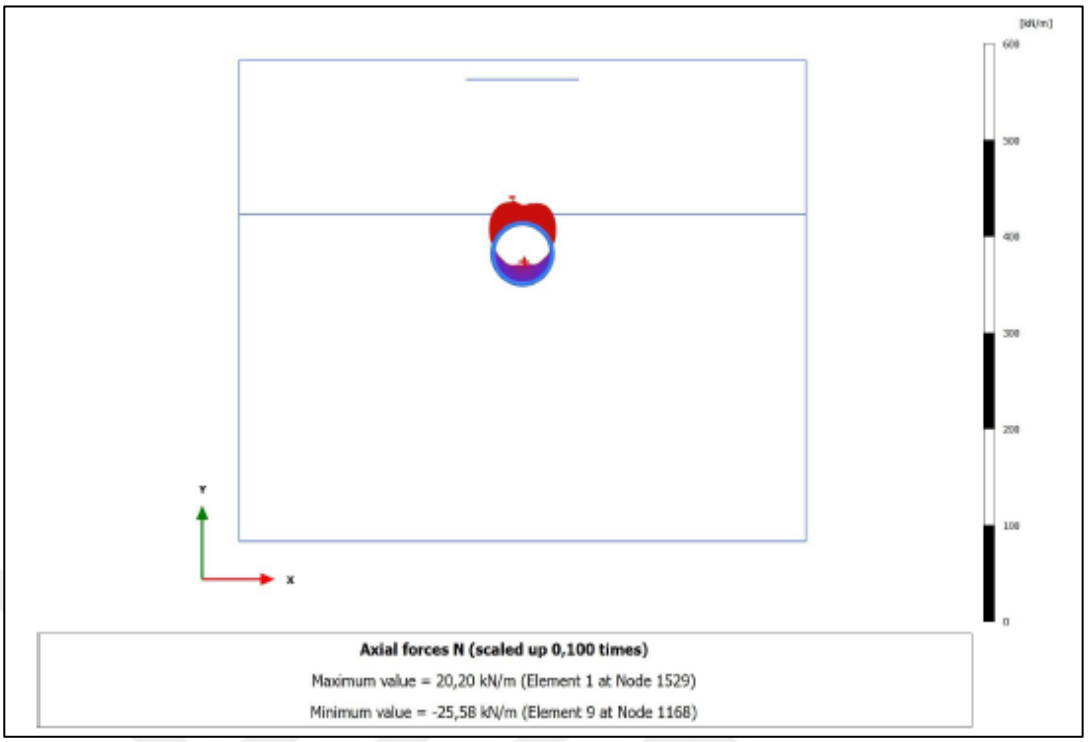
Şekil A.13. Dördüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (17. m)



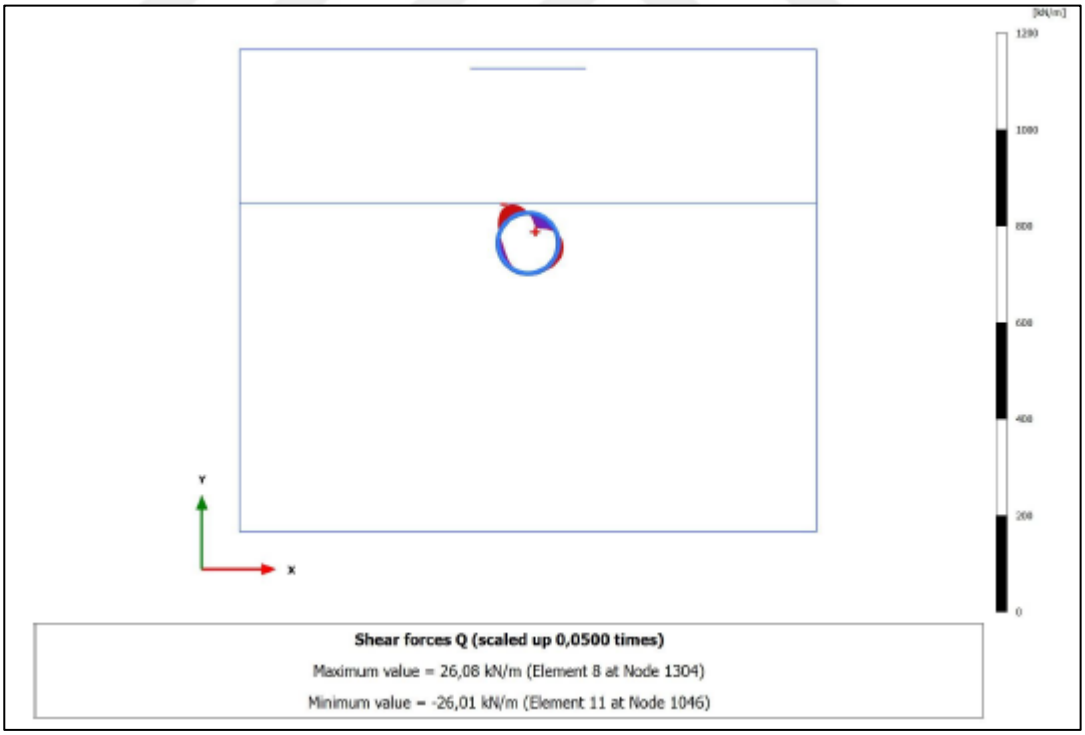
Şekil A.14. Üçüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (17. m)



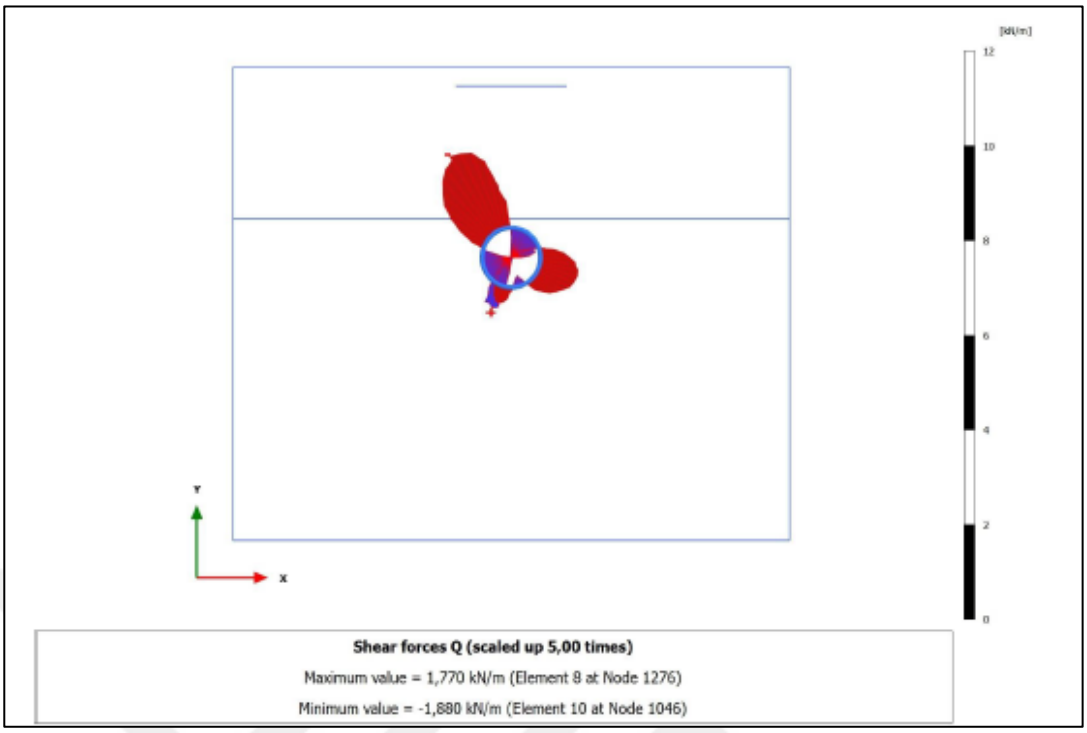
Şekil A.15. Dördüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (17. m)



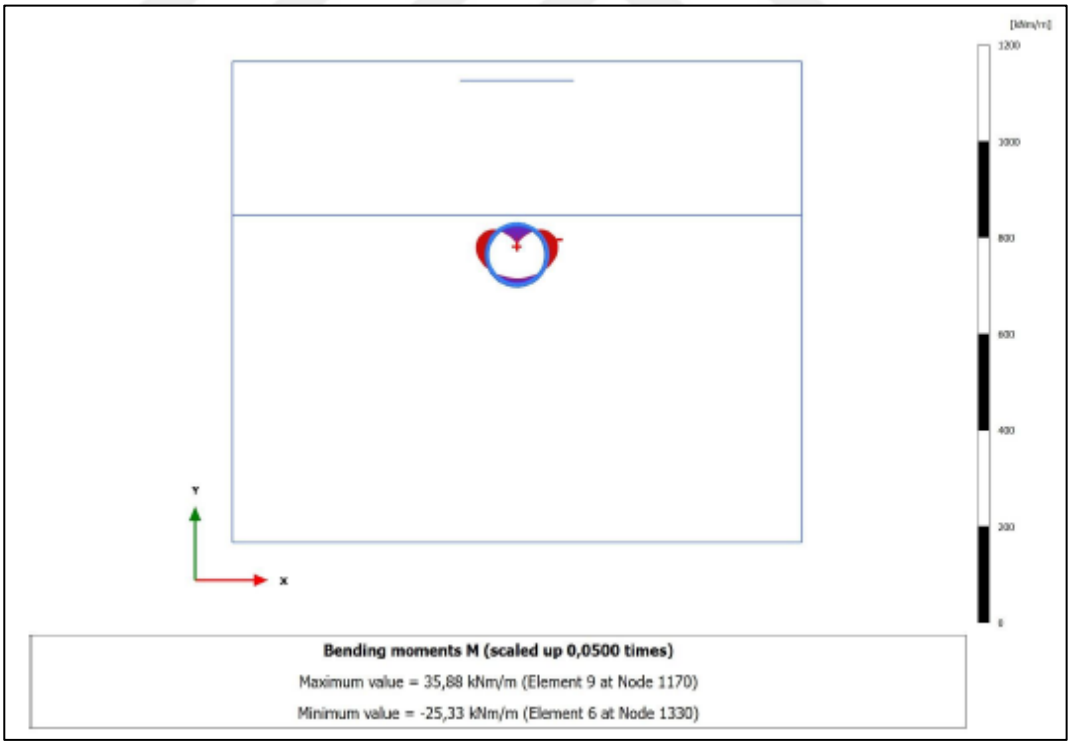
Şekil A.16. Üçüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (17. m)



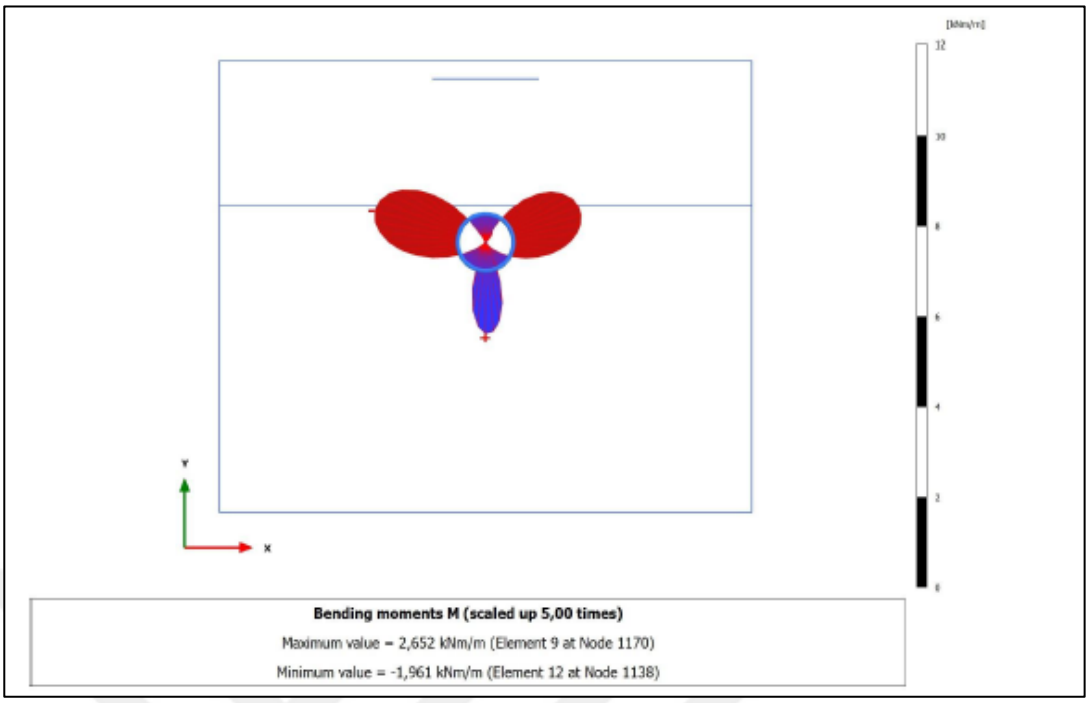
Şekil A.17. Dördüncü durum için kesme kuvveti değerleri (17. m)



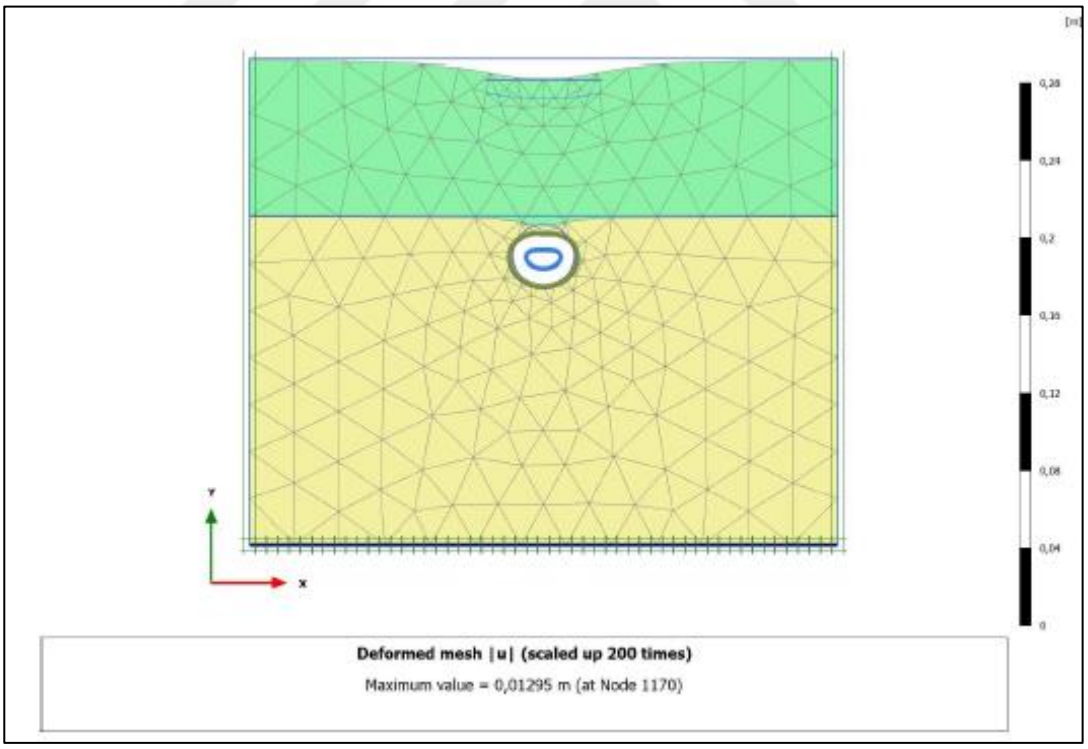
Şekil A.18. Üçüncü durum için kesme kuvveti değerleri (17. m)



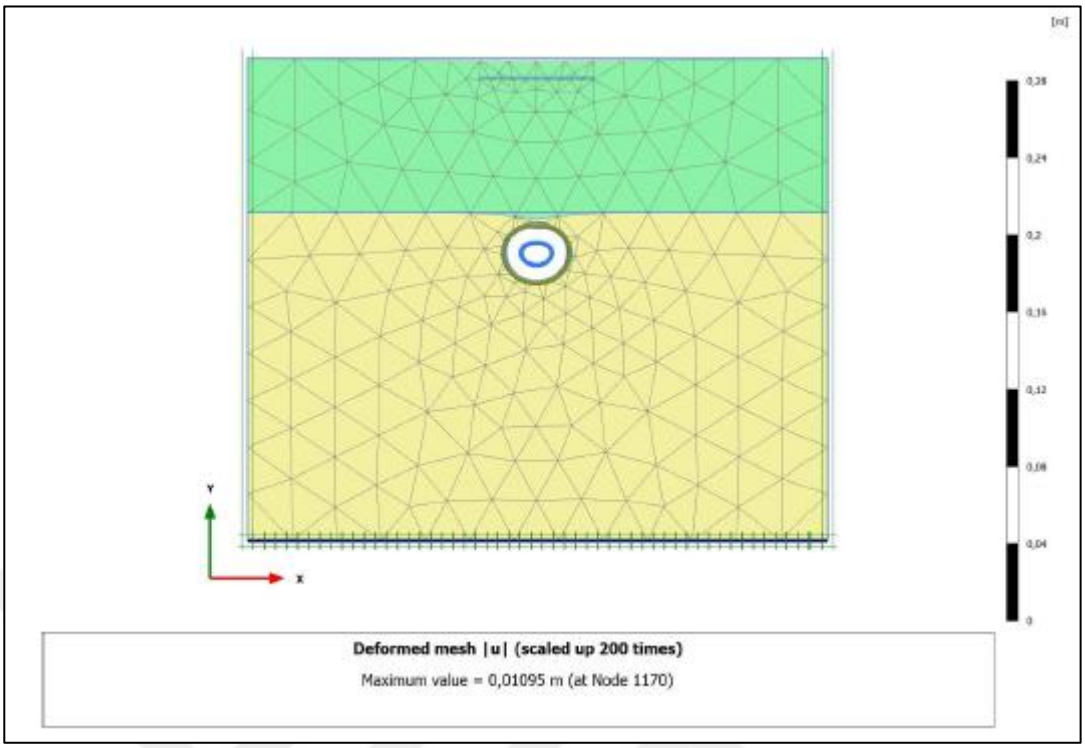
Şekil A.19. Dördüncü durum için eğilme momenti değerleri (17. m)



Şekil A.20. Üçüncü durum için eğilme momenti değerleri (17. m)

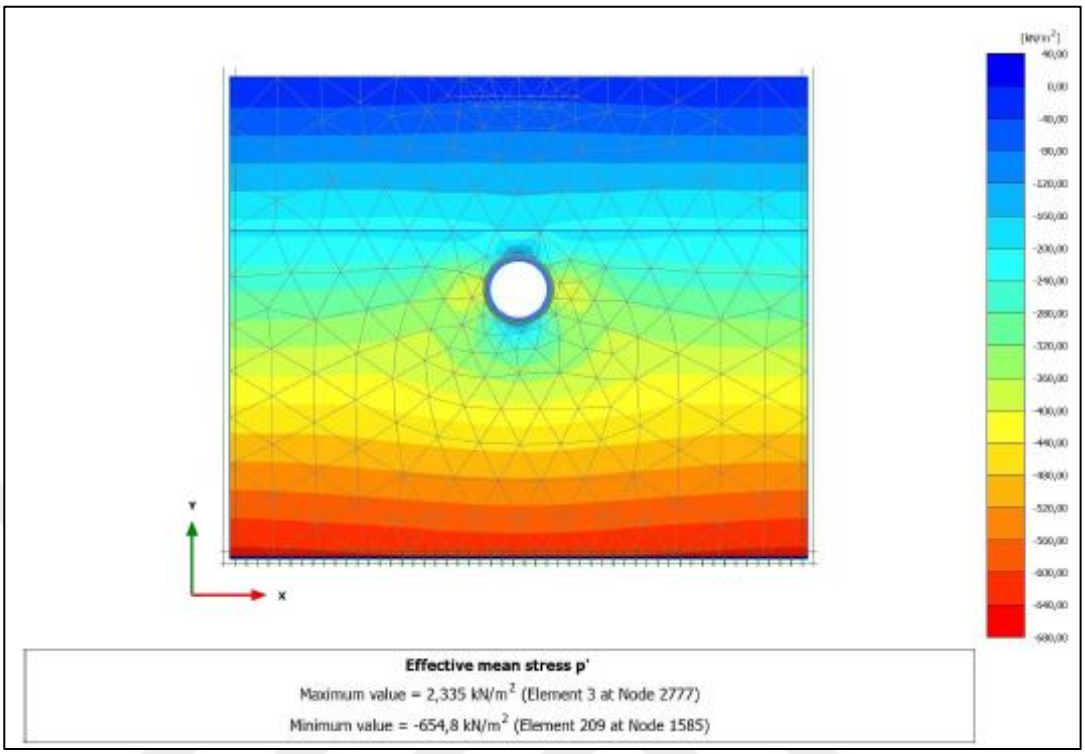


Şekil A.21. Dördüncü durum için deforme ağ (17. m)

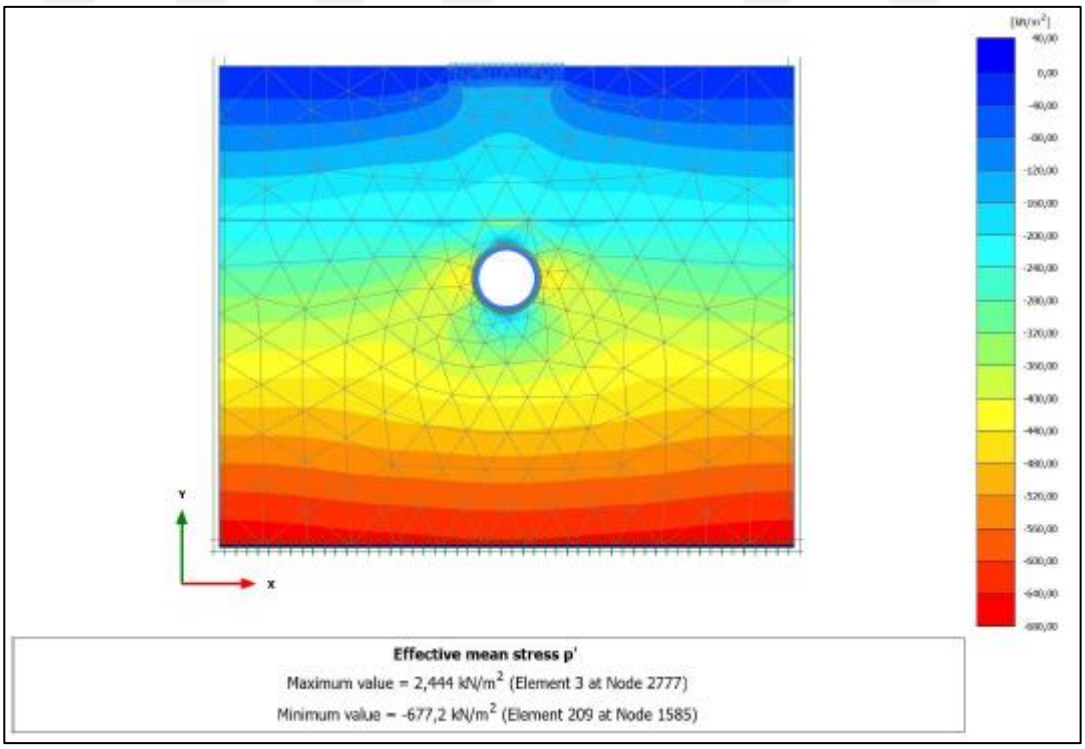


Şekil A.22. Üçüncü durum için deforme ağ (17. m)

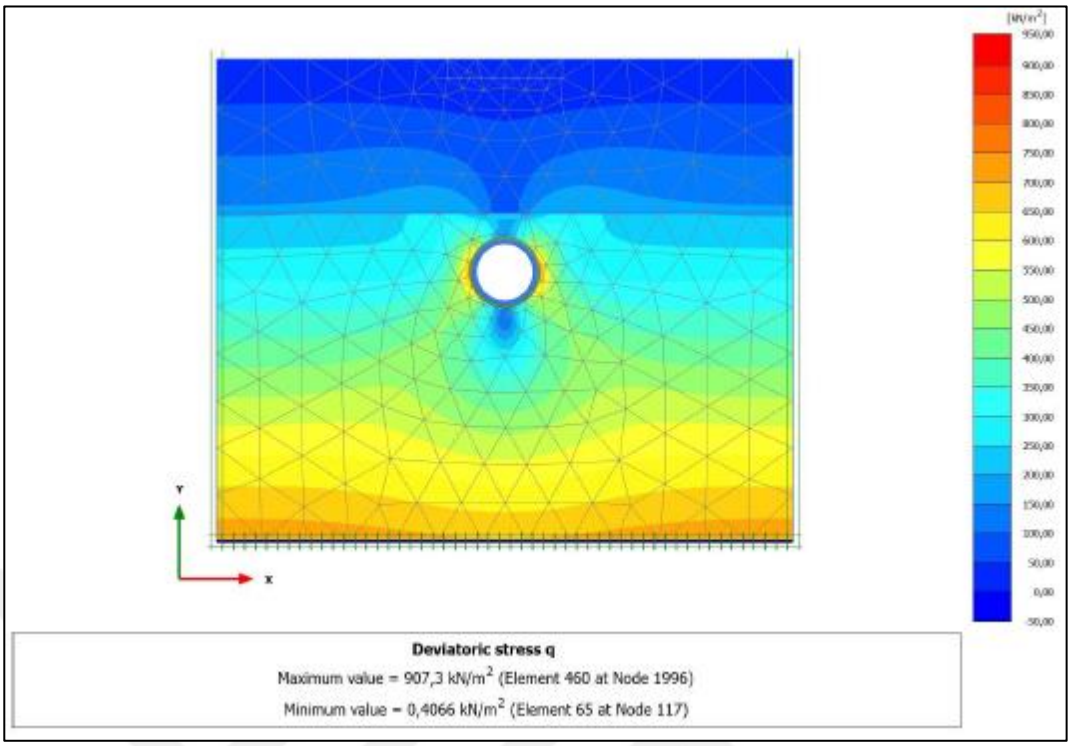
Ek-B: 19 Metre Derinlik İçin Program Analiz Raporu



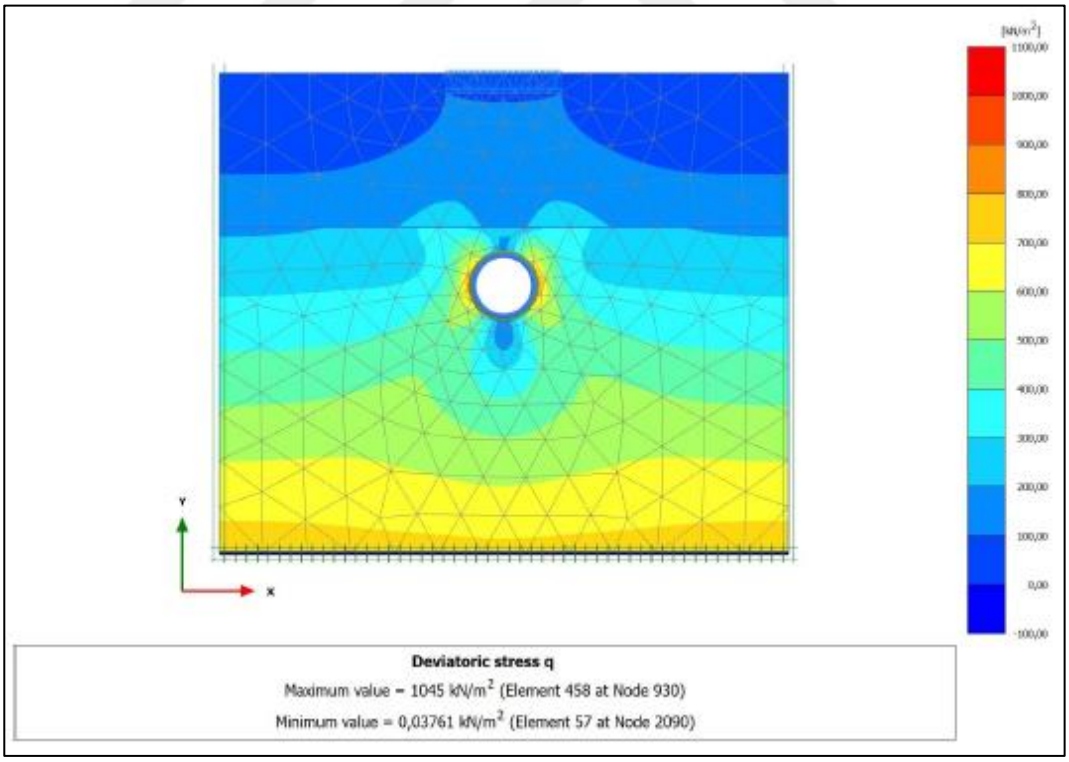
Şekil B.1. İlk durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (19. m)



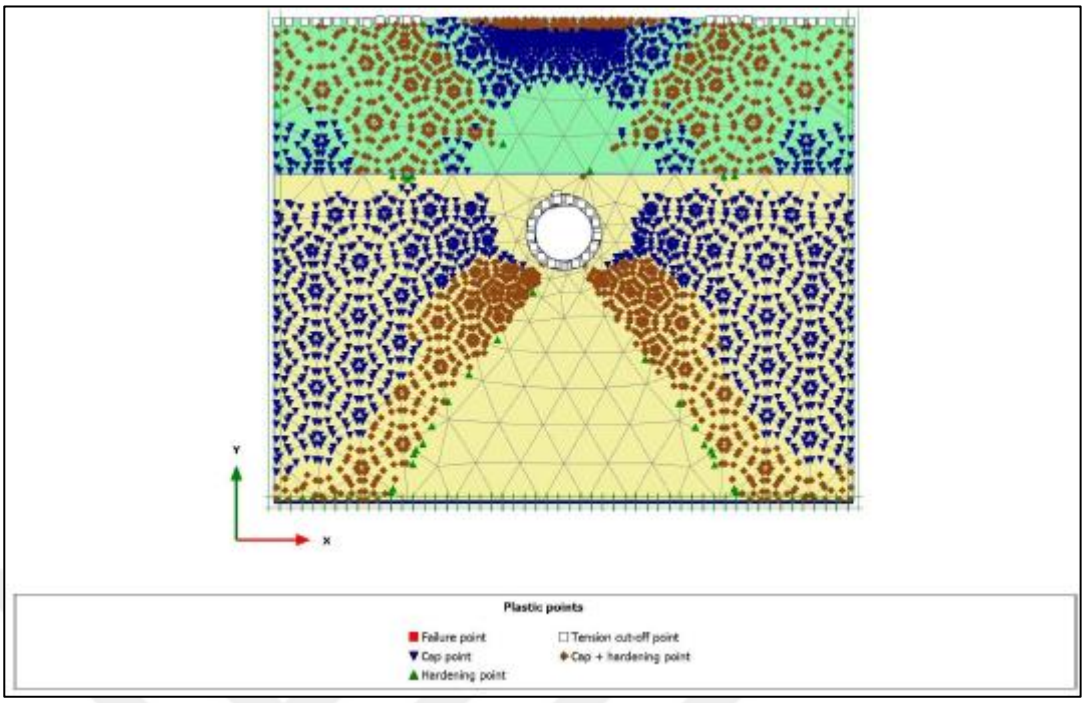
Şekil B.2. İkinci durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (19. m)



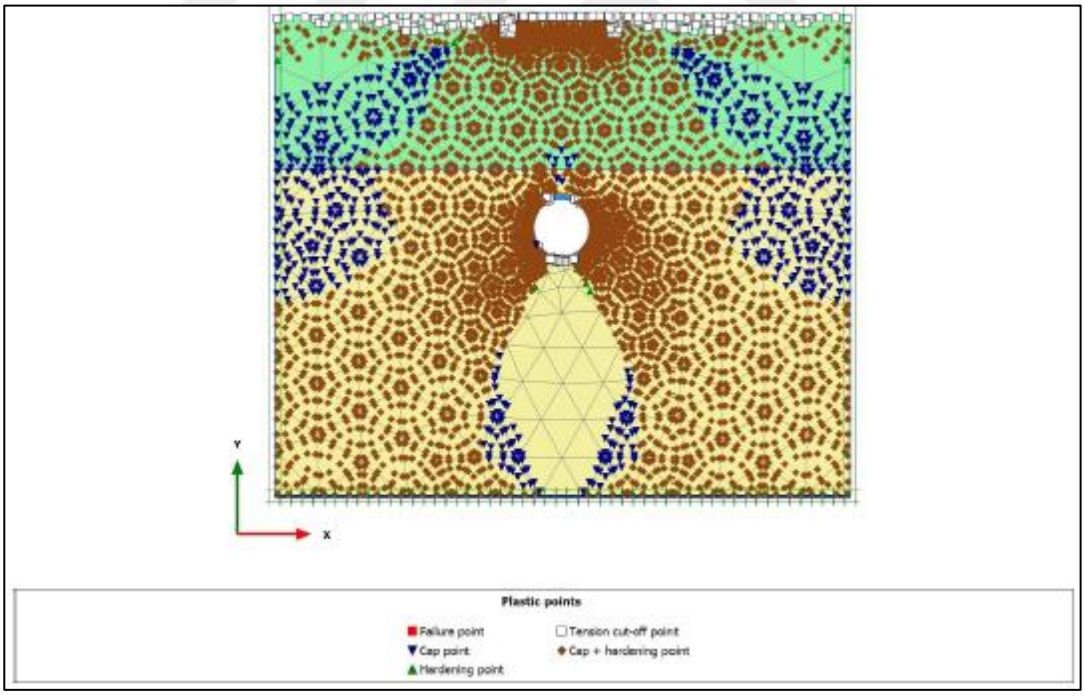
Şekil B.3. İlk durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (19. m)



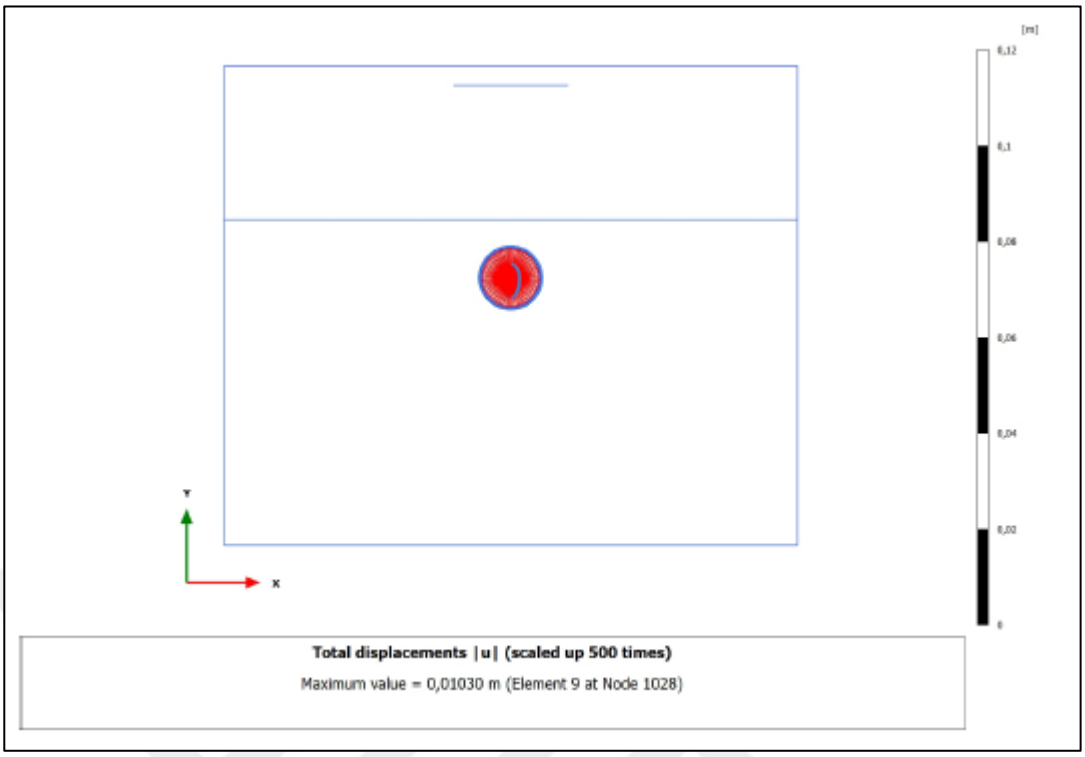
Şekil B.4. İkinci durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (19. m)



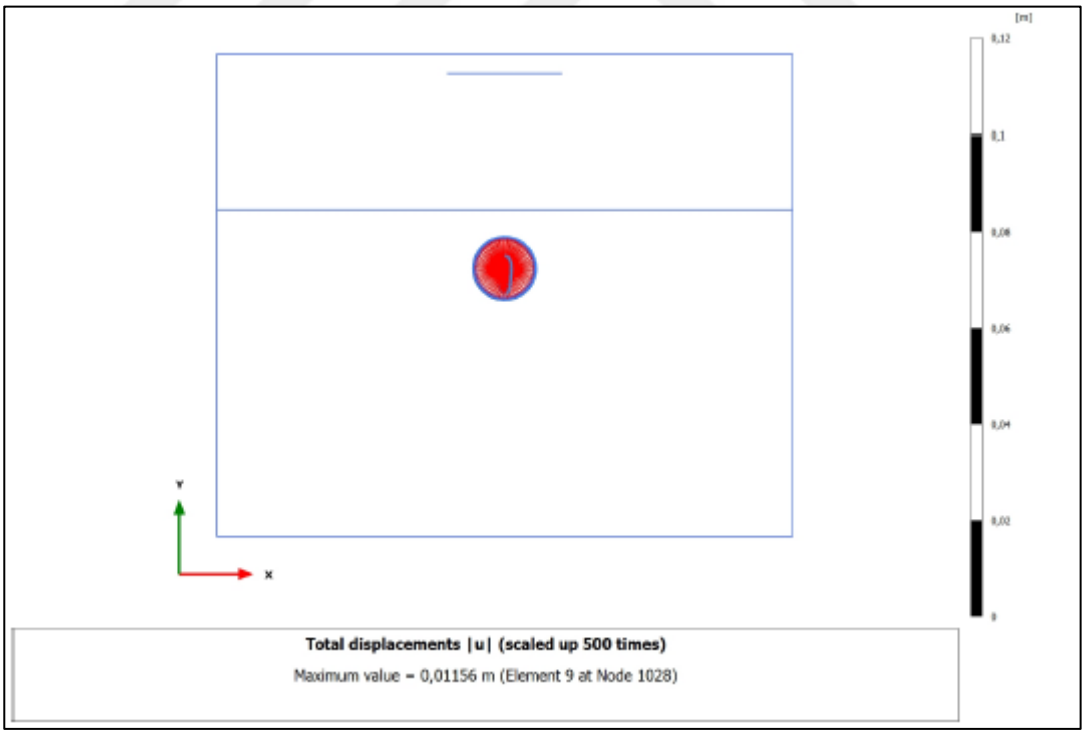
Şekil B.5. İlk durum için plastik noktalar (19. m)



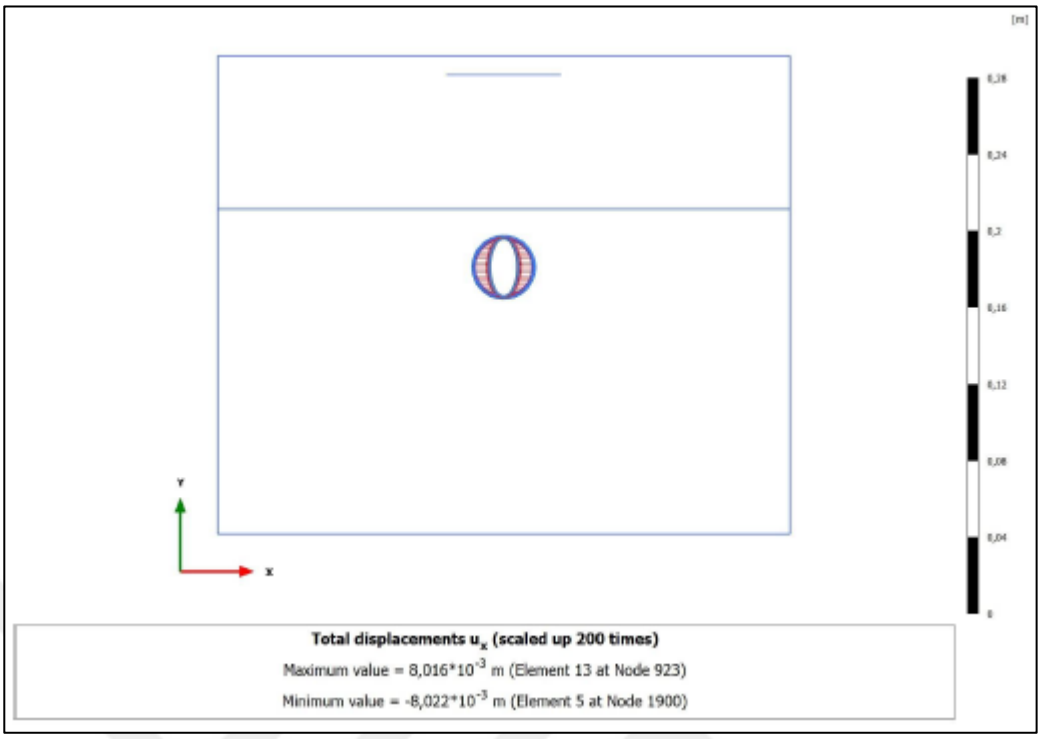
Şekil B.6. İkinci durum için plastik noktalar (19. m)



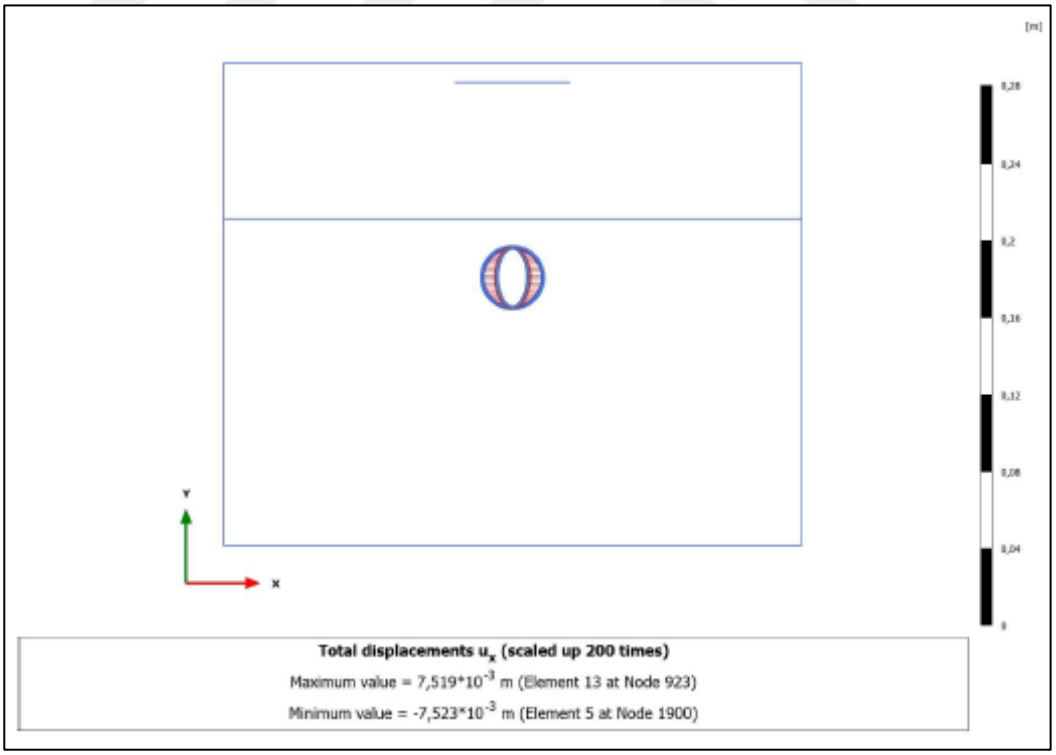
Şekil B.7. Üçüncü durum için toplam yer değiştirme (19. m)



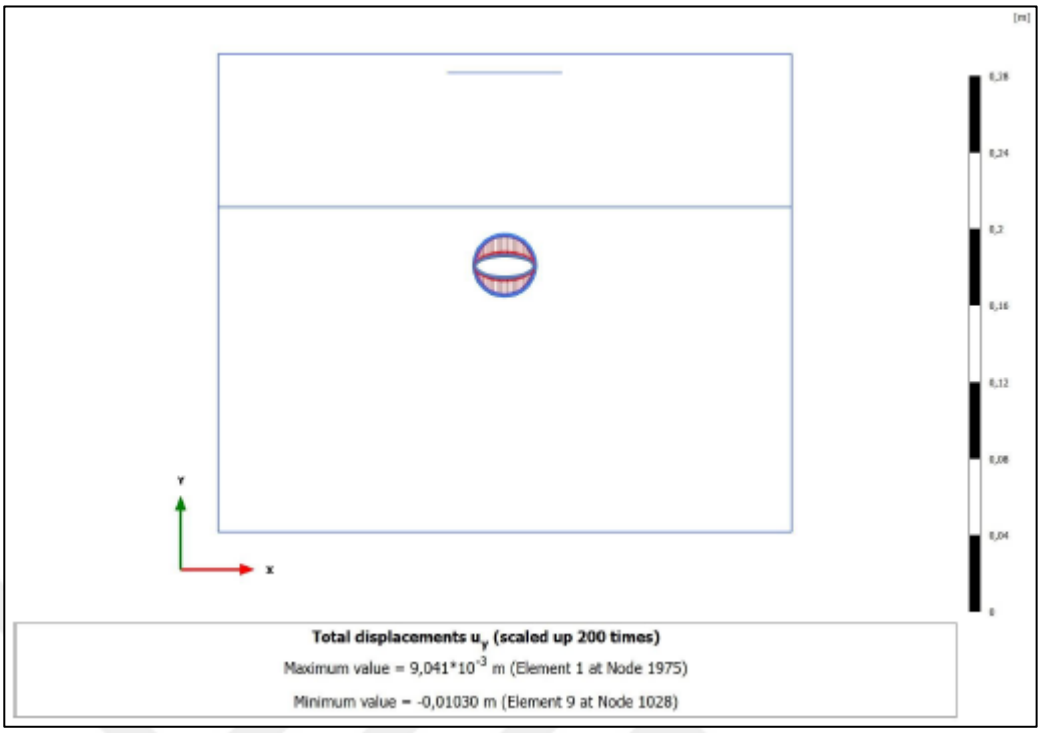
Şekil B.8. Dördüncü durum için toplam yer değiştirme (19. m)



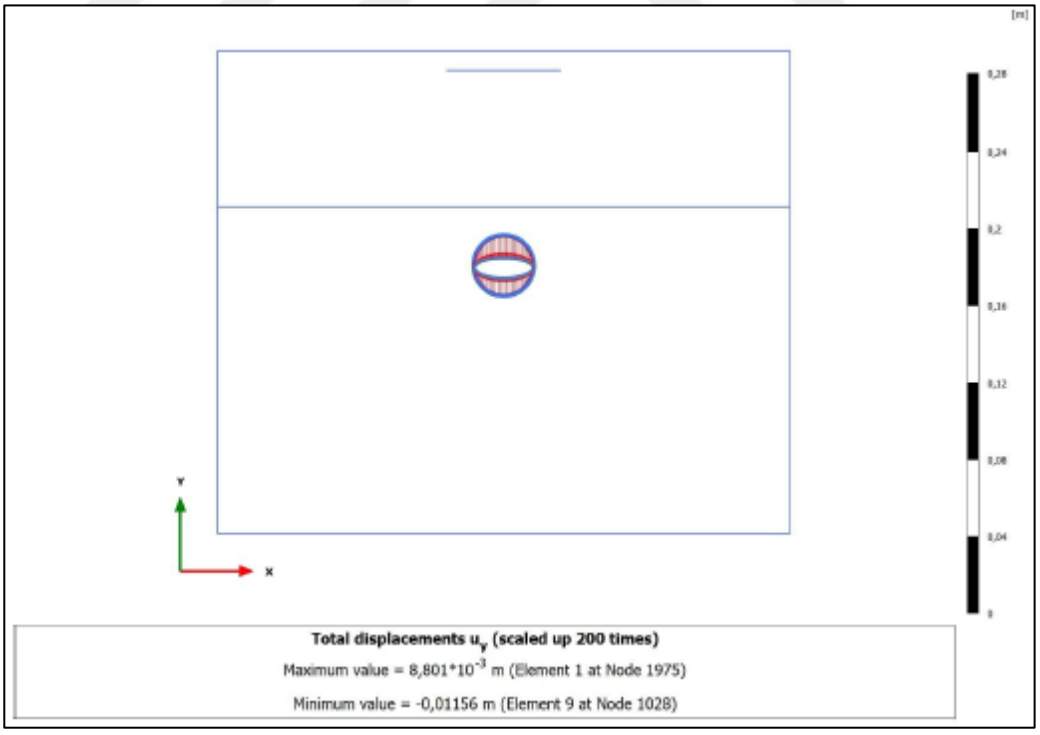
Şekil B.9. Üçüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (19. m)



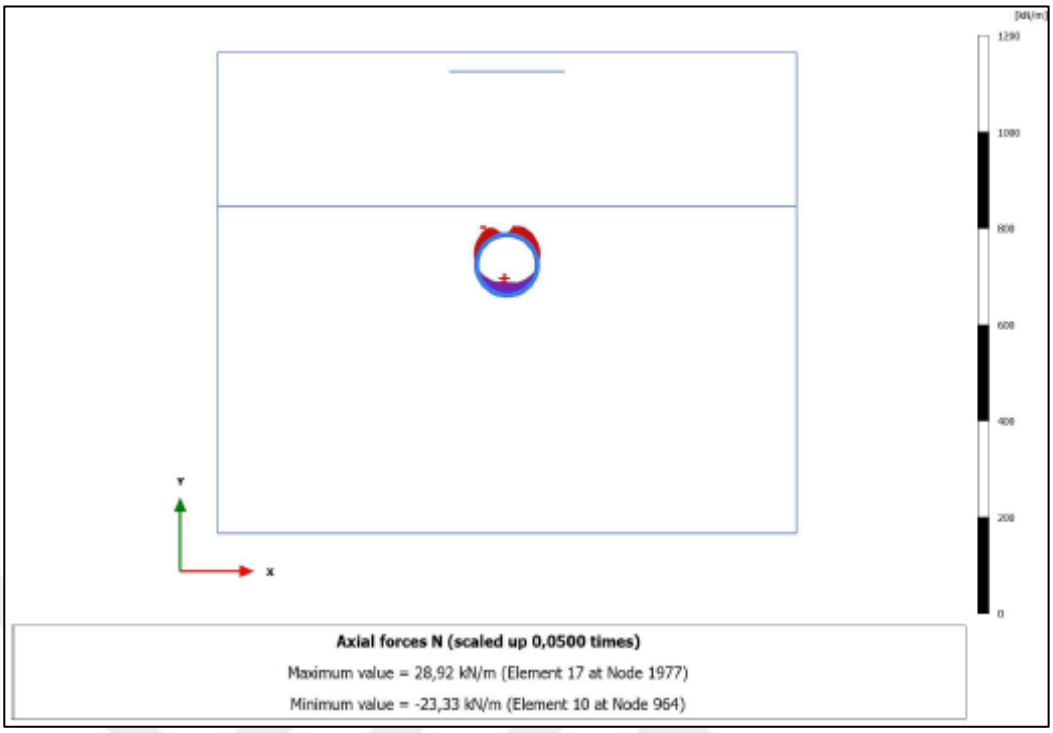
Şekil B.10. Dördüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (19. m)



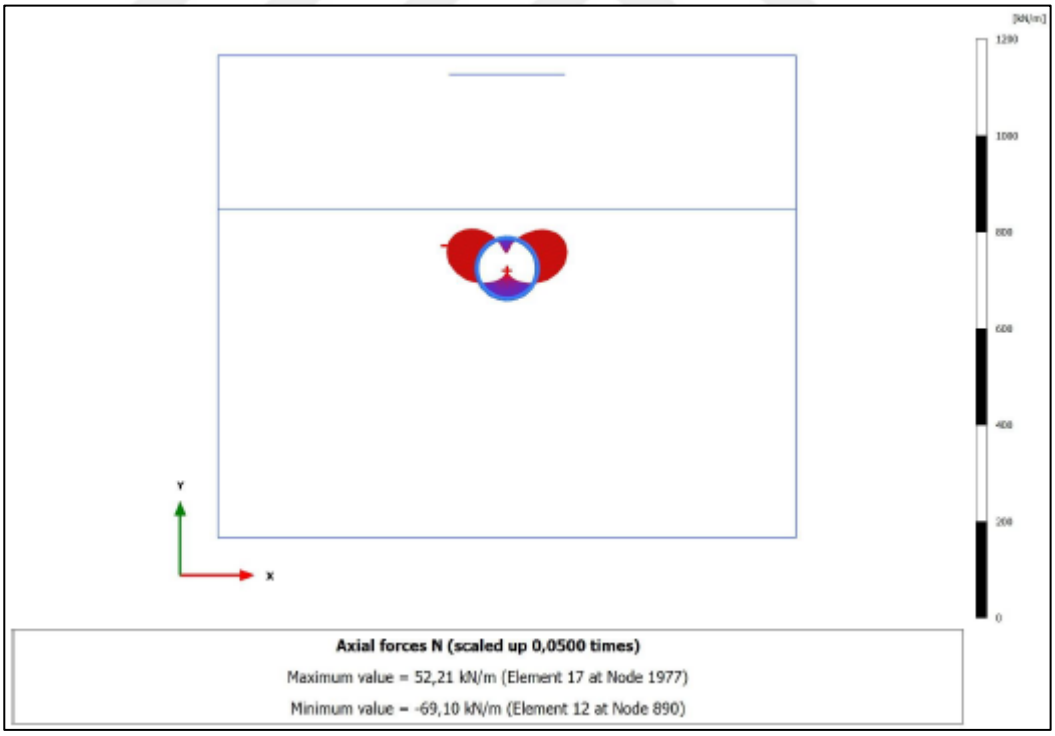
Şekil B.11. Üçüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (19. m)



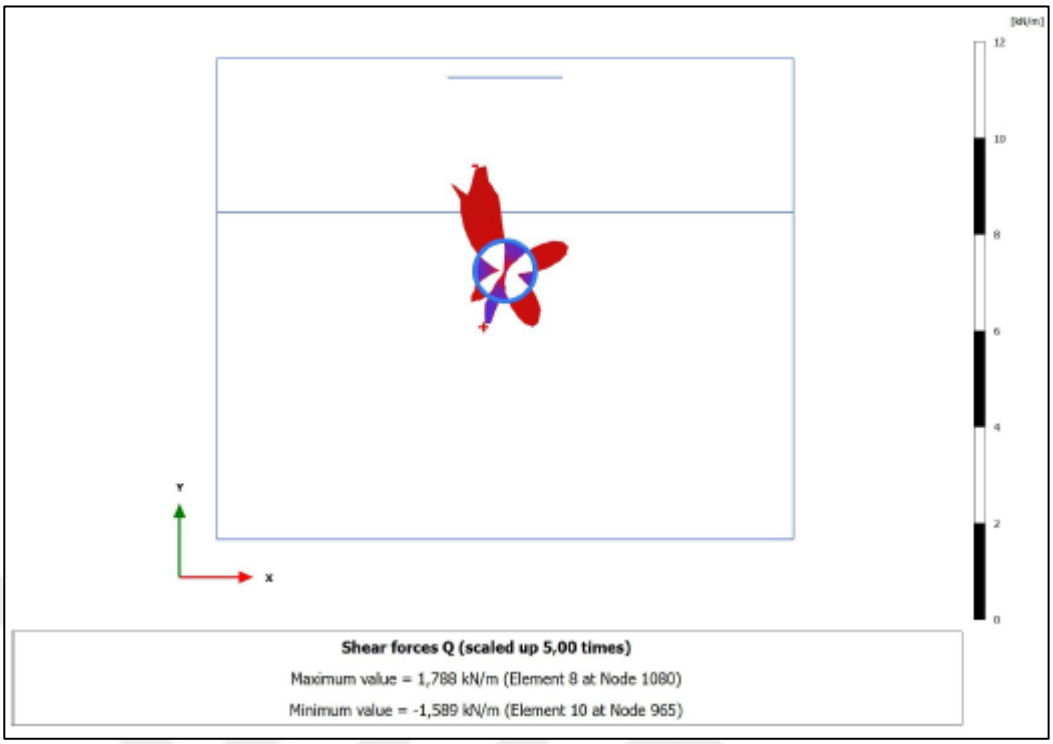
Şekil B.12. Dördüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (19. m)



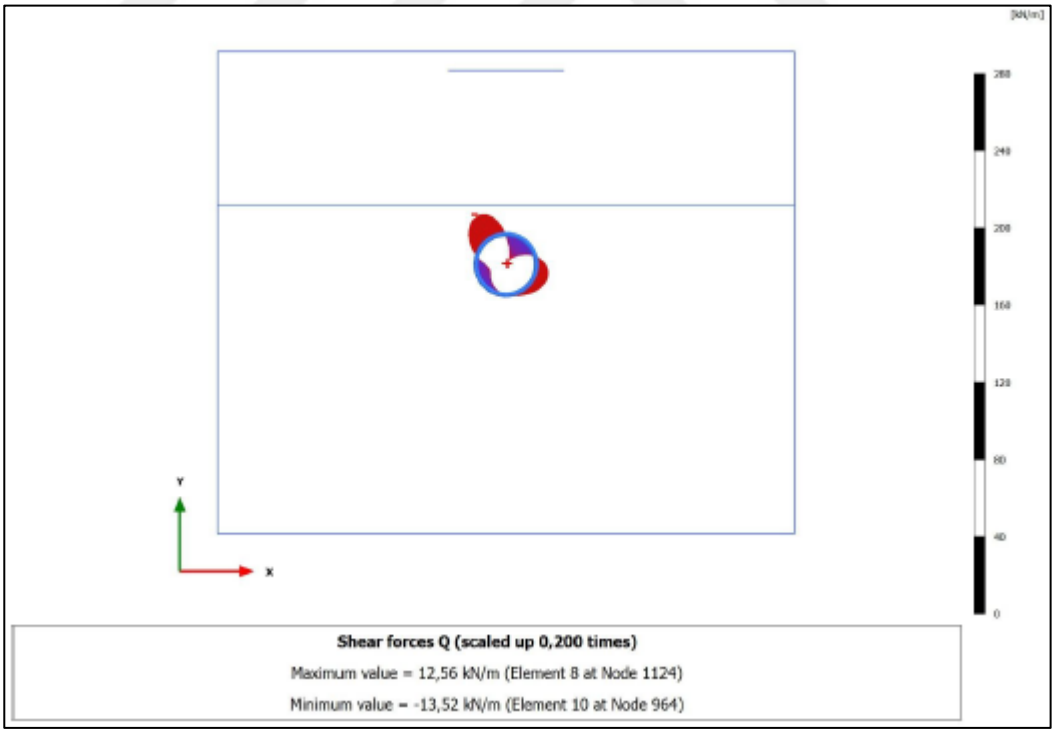
Şekil B.13. Üçüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (19. m)



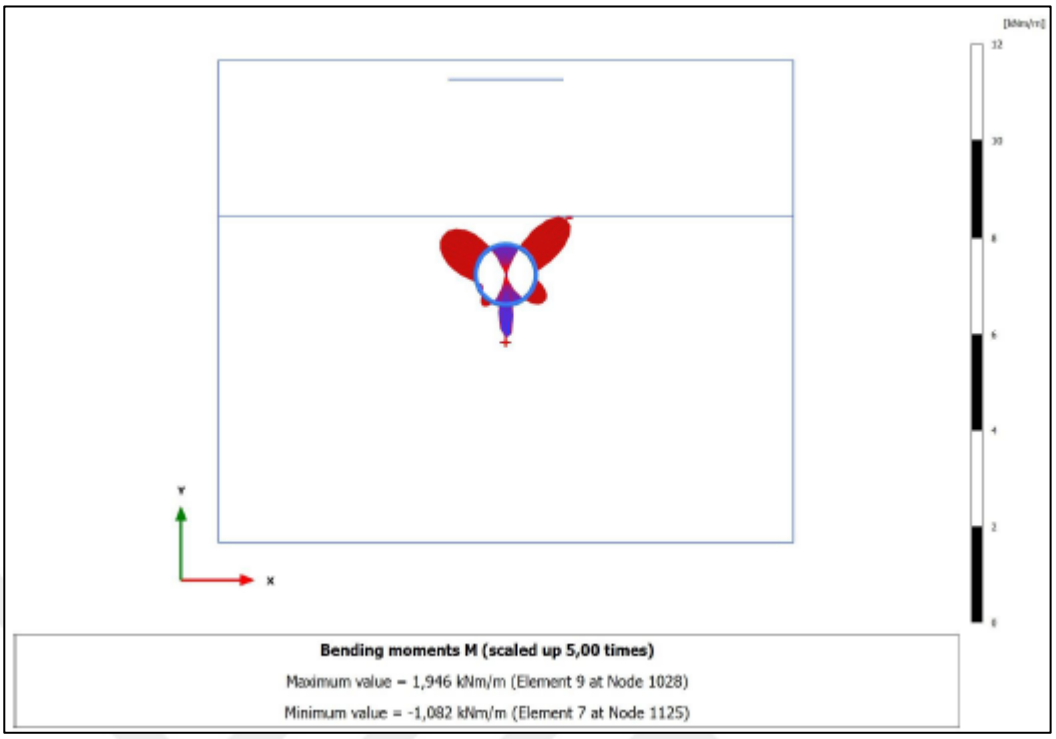
Şekil B.14. Dördüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (19. m)



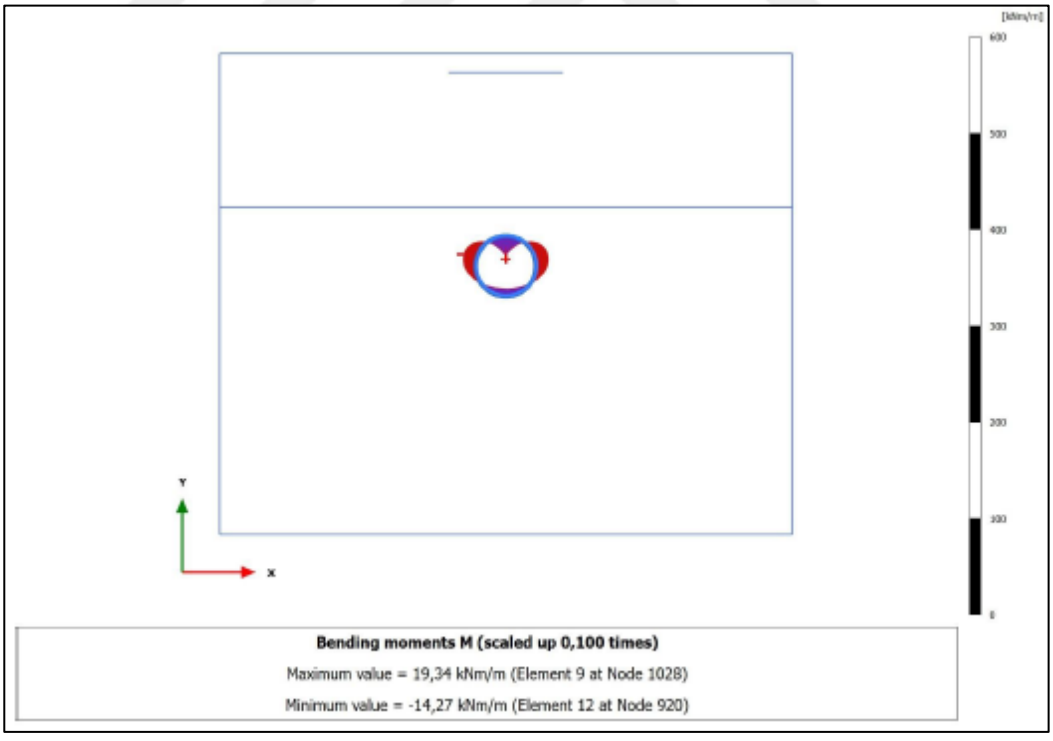
Şekil B.15. Üçüncü durum için kesme kuvveti değerleri (19. m)



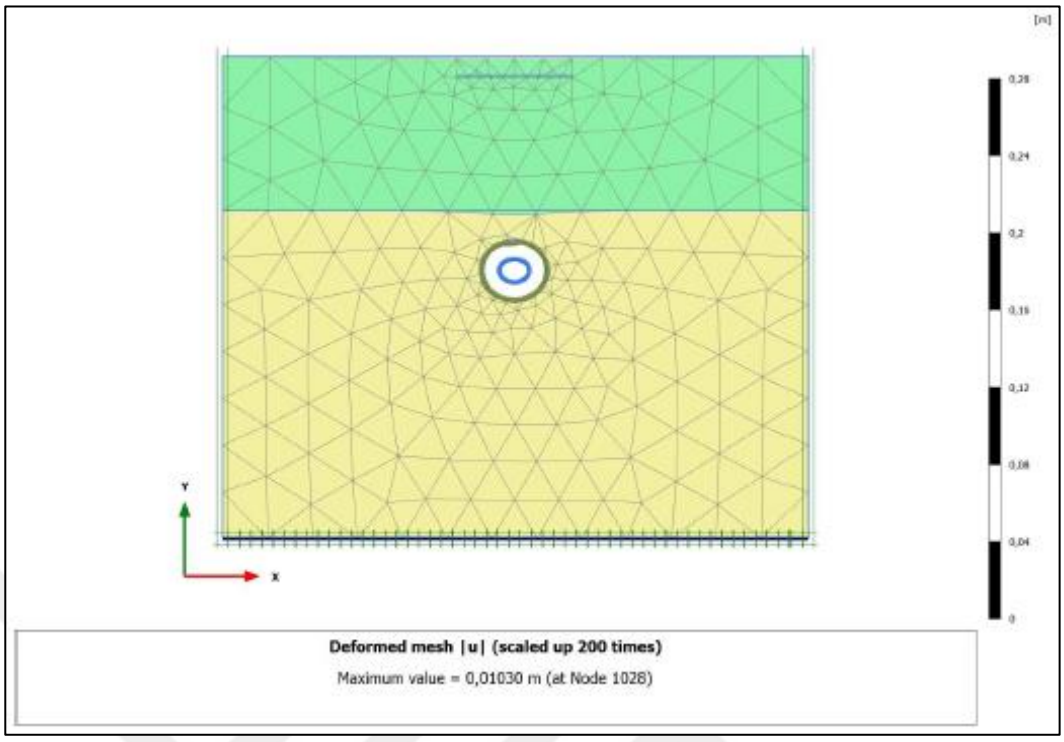
Şekil B.16. Dördüncü durum için kesme kuvveti değerleri (19. m)



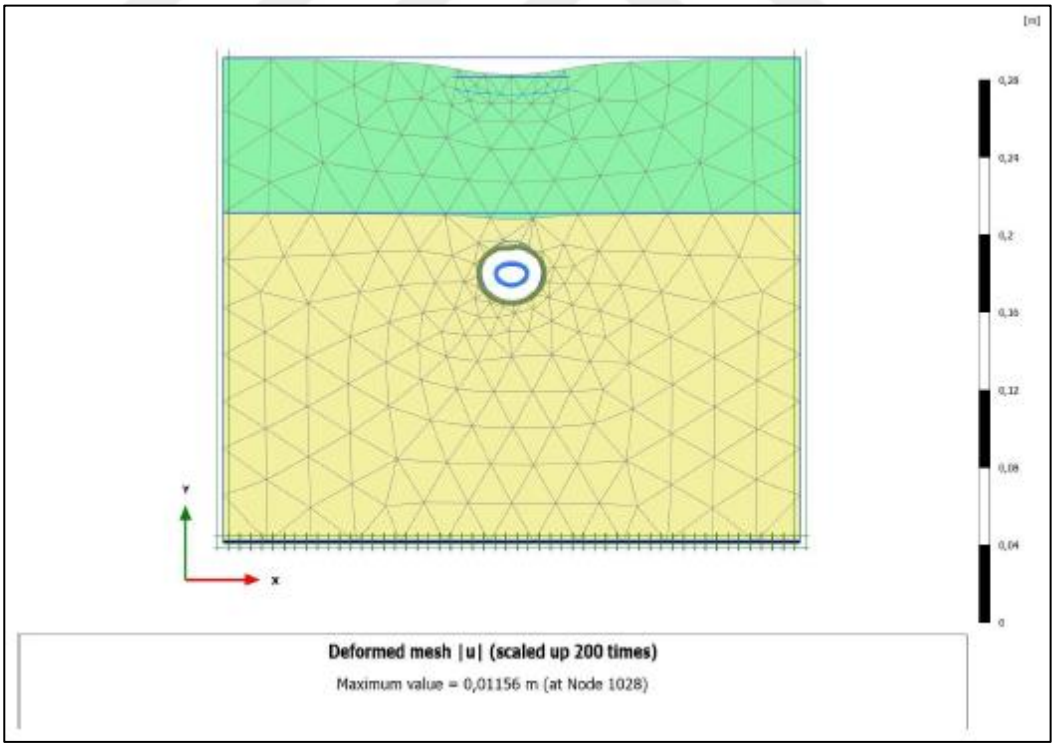
Şekil B.17. Üçüncü durum için eğilme momenti değerleri (19. m)



Şekil B.18. Dördüncü durum için eğilme momenti değerleri (19. m)

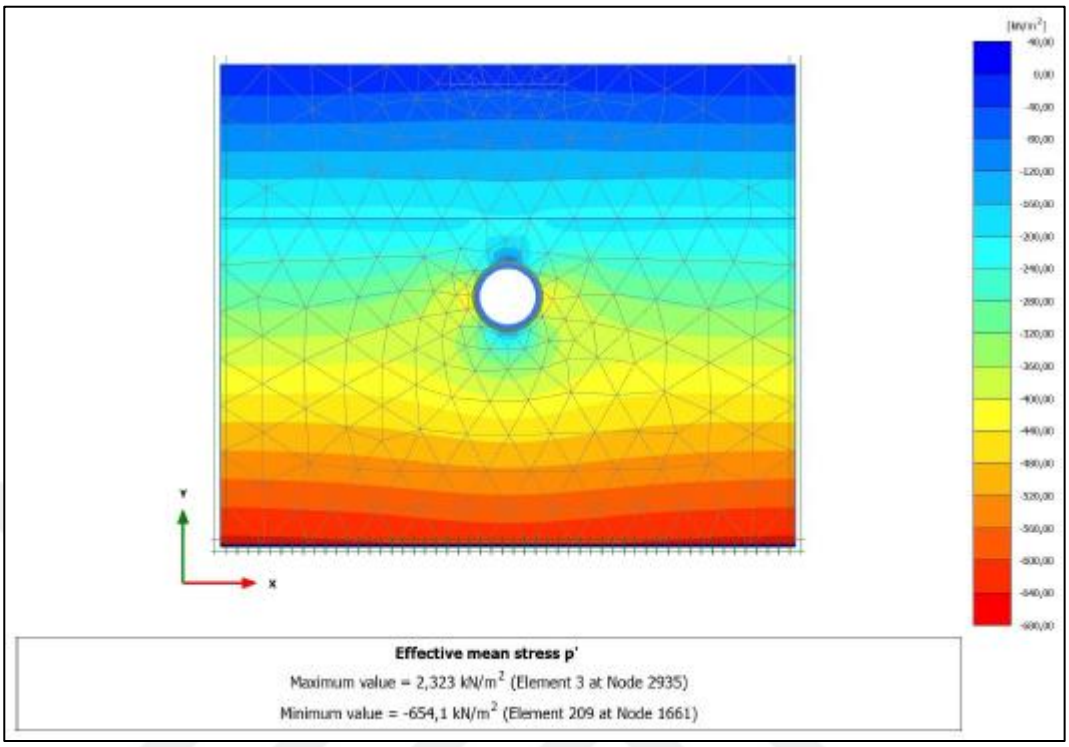


Şekil B.19. Üçüncü durum için deforme ağ (19. m)

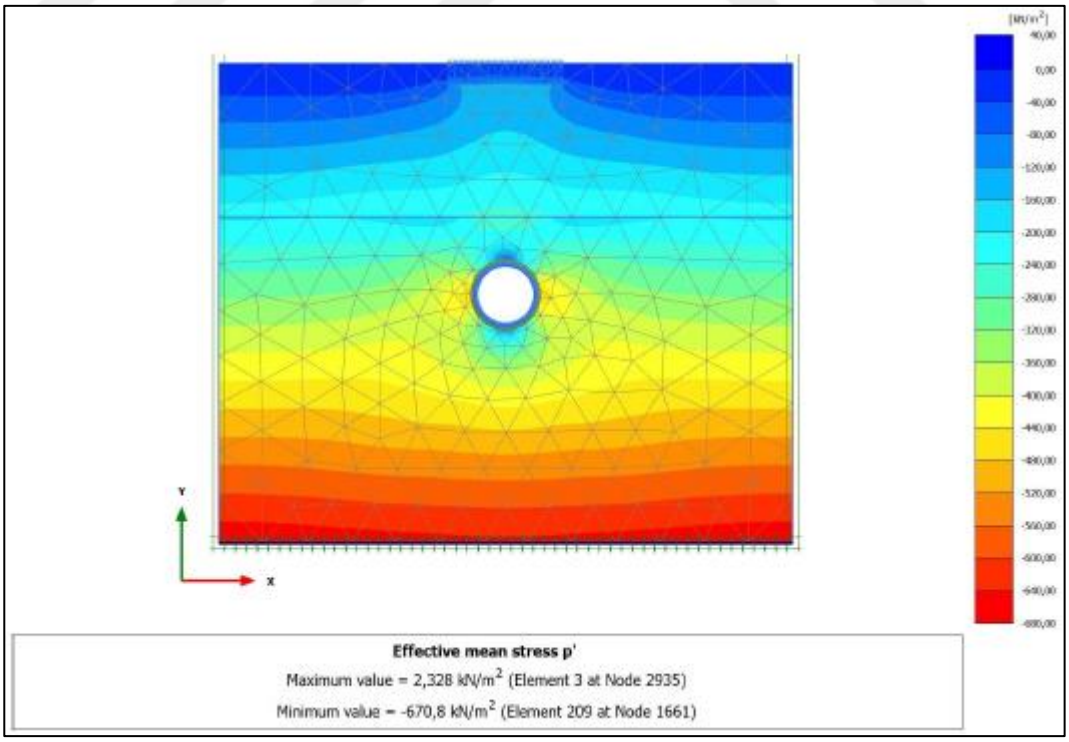


Şekil B.20. Dördüncü durum için deforme ağ (19. m)

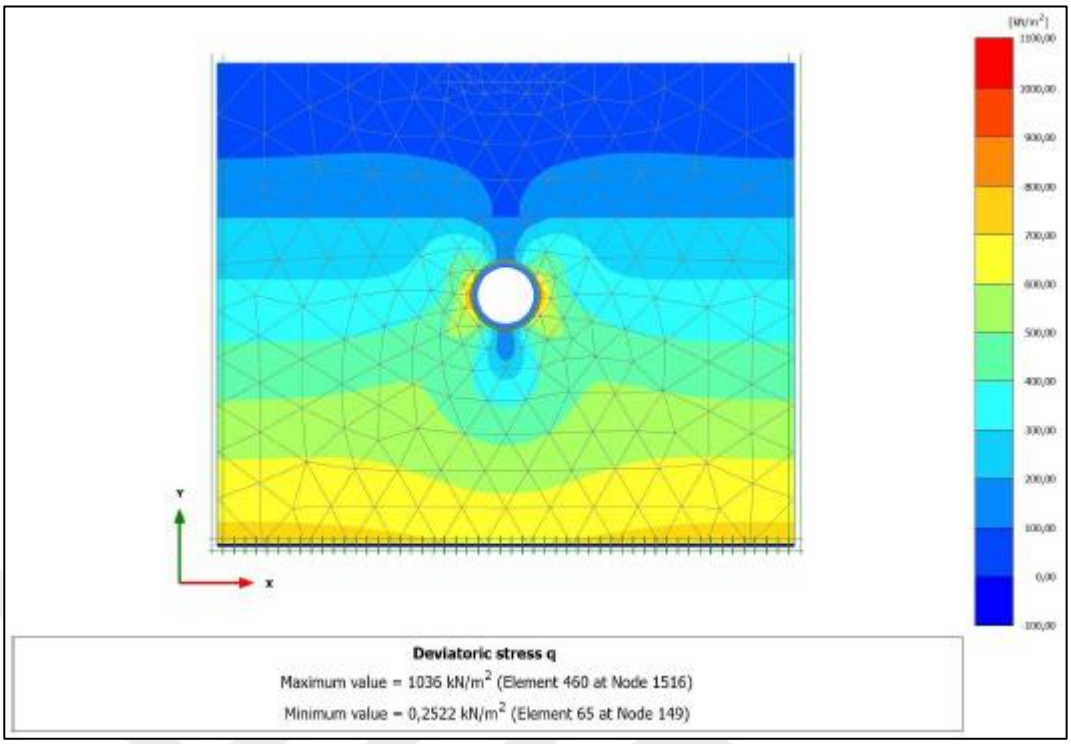
Ek-C: 21 Metre Derinlik İçin Program Analiz Raporu



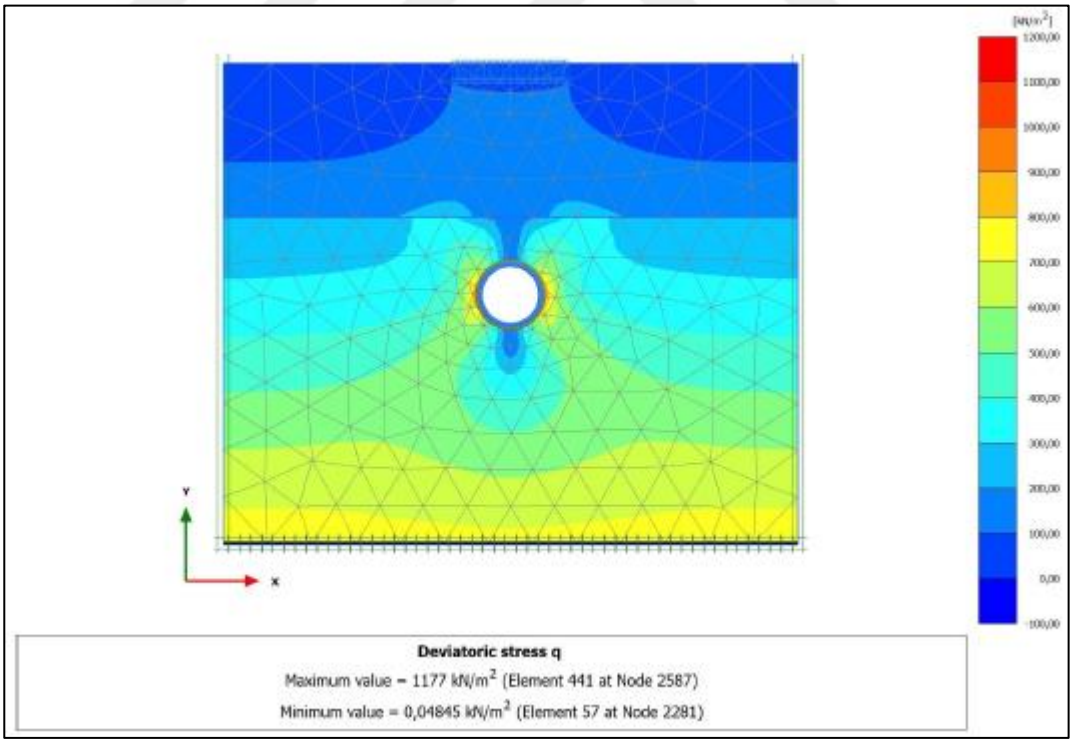
Şekil C.1. İlk durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (21. m)



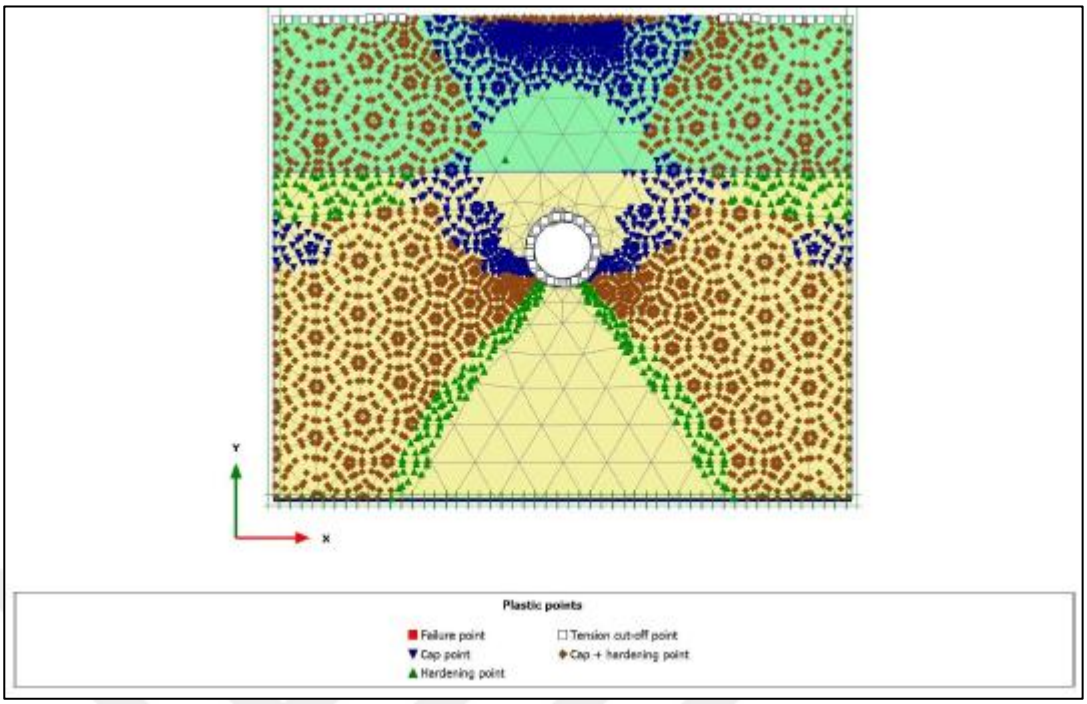
Şekil C.2. İkinci durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (21. m)



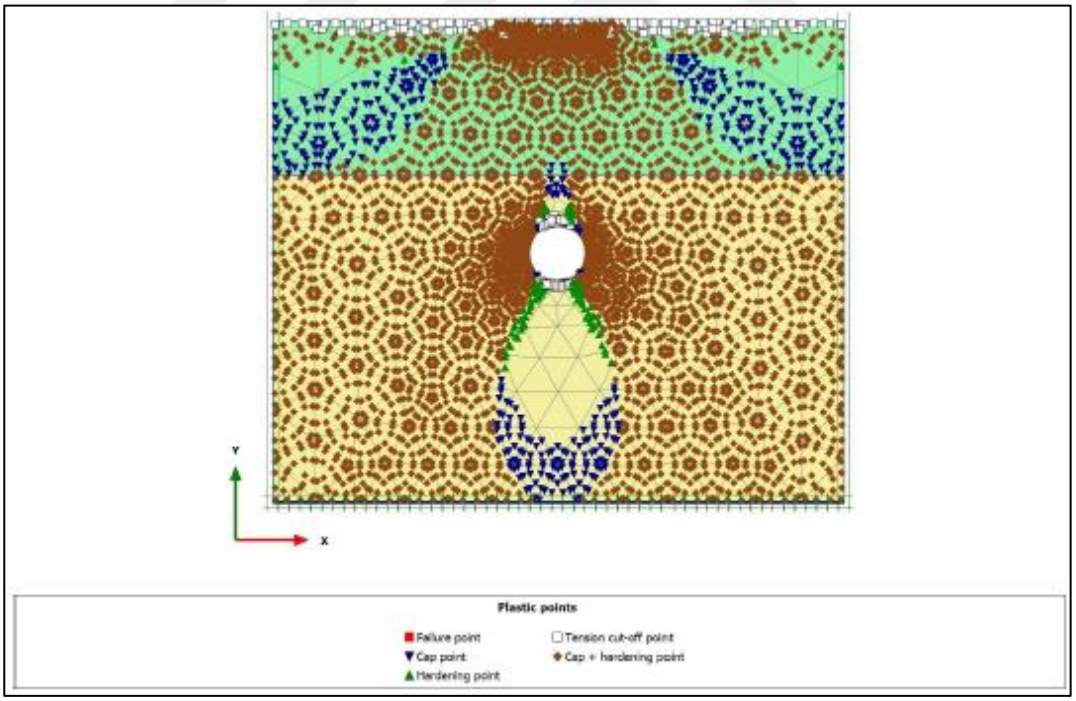
Şekil C.3. İlk durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (21. m)



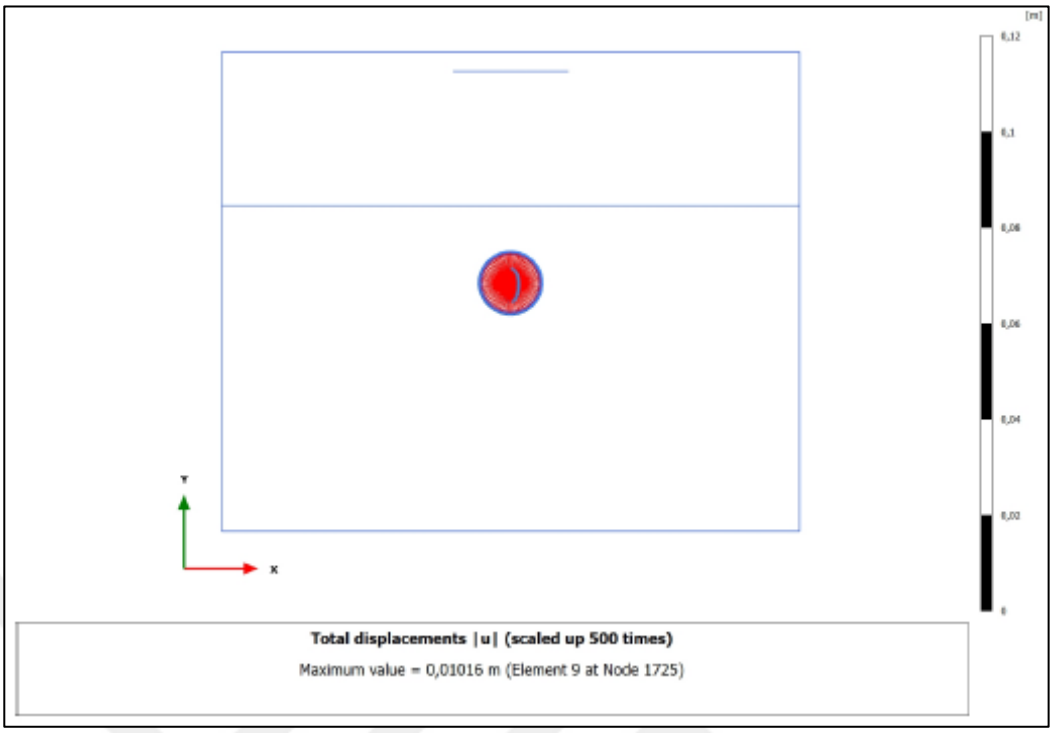
Şekil C.4. İkinci durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (21. m)



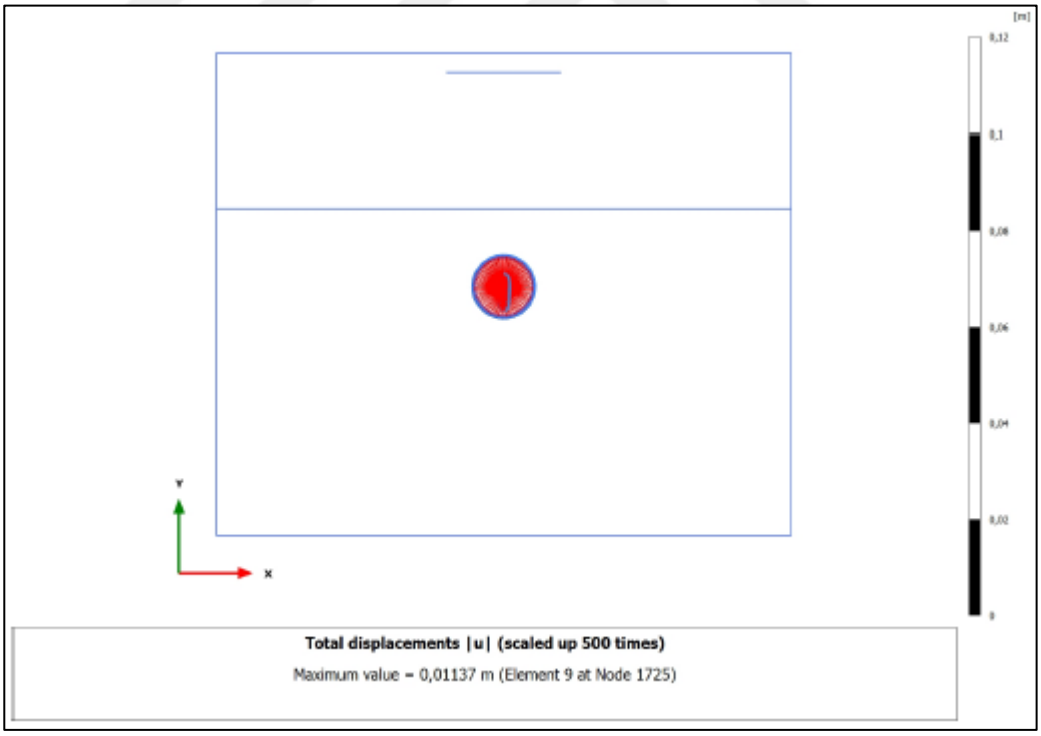
Şekil C.5. İlk durum için plastik noktalar (21. m)



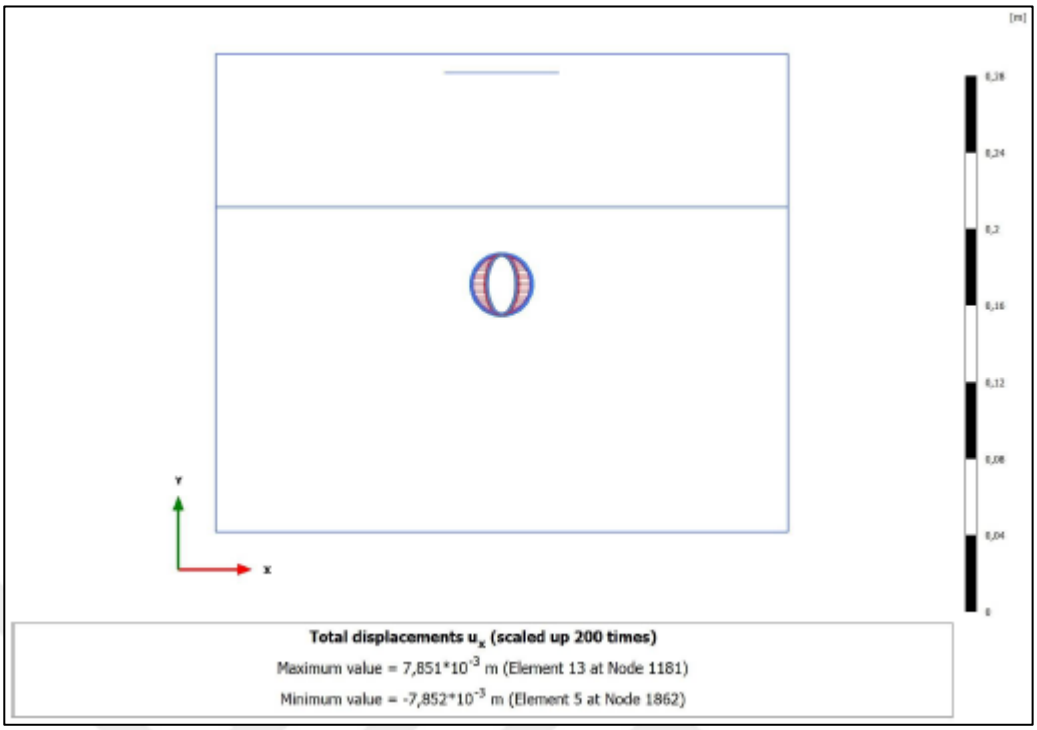
Şekil C.6. İkinci durum için plastik noktalar (21. m)



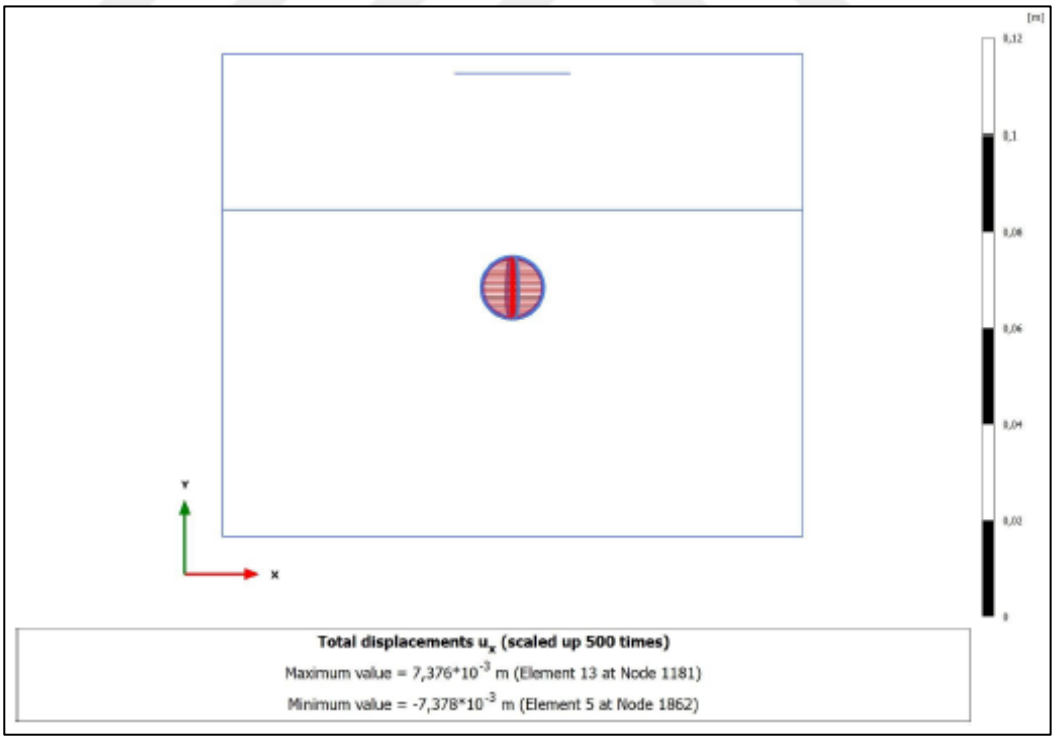
Şekil C.7. Üçüncü durum için toplam yer değiştirme (21. m)



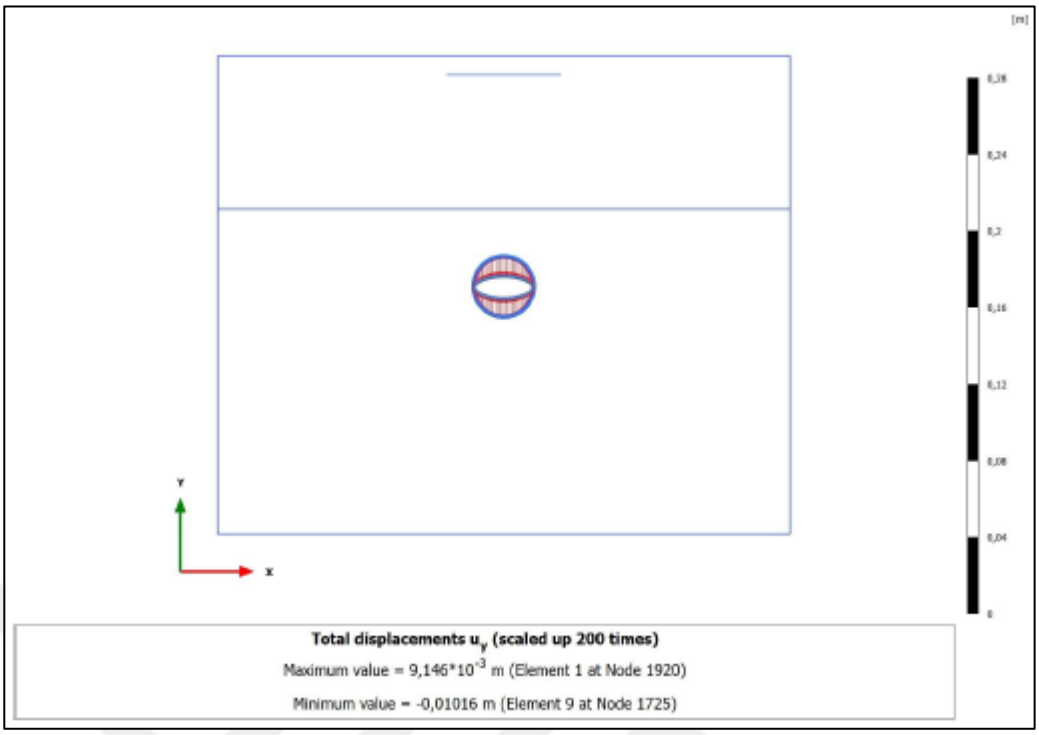
Şekil C.8. Dördüncü durum için toplam yer değiştirme (21. m)



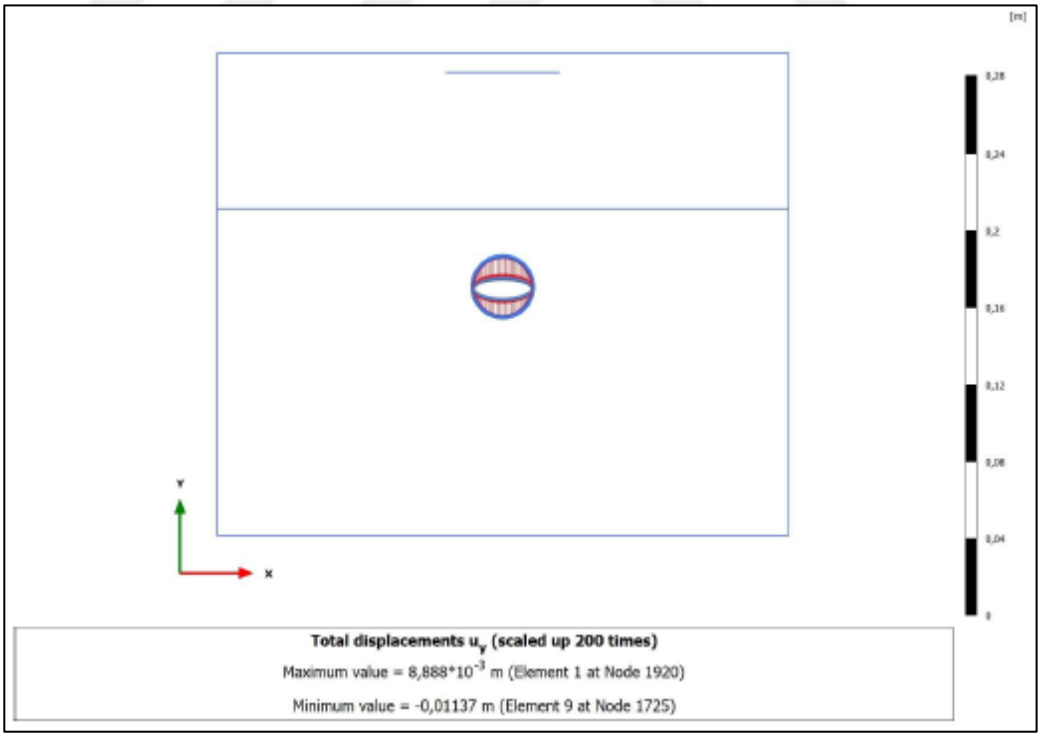
Şekil C.9. Üçüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (21. m)



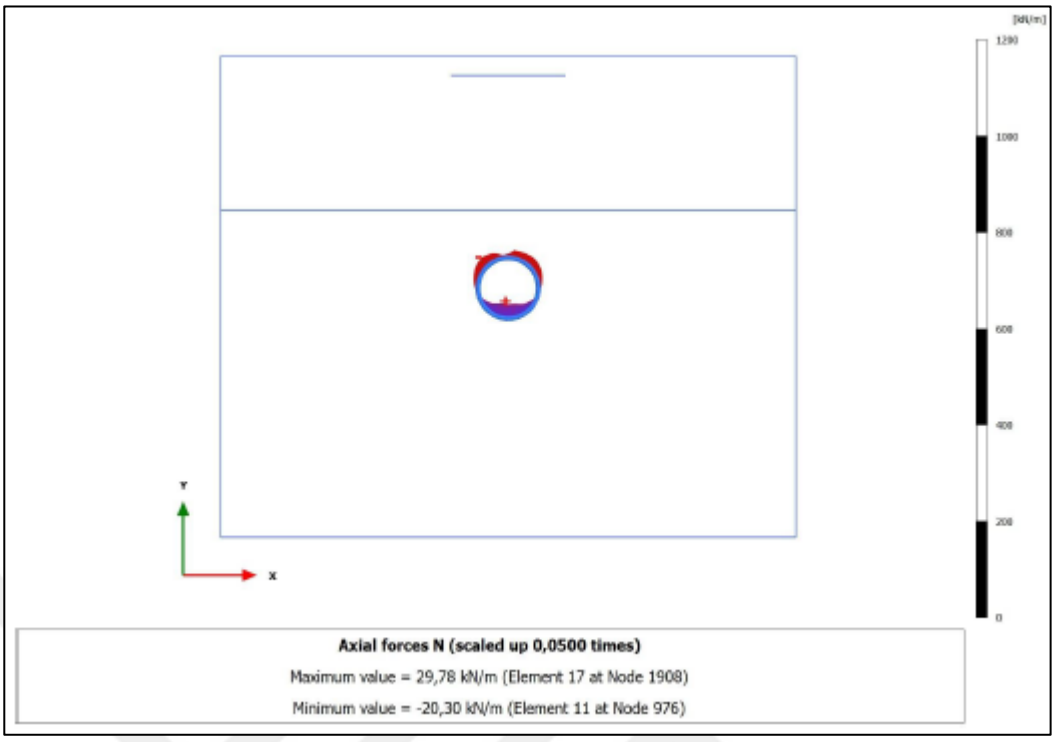
Şekil C.10. Dördüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (21. m)



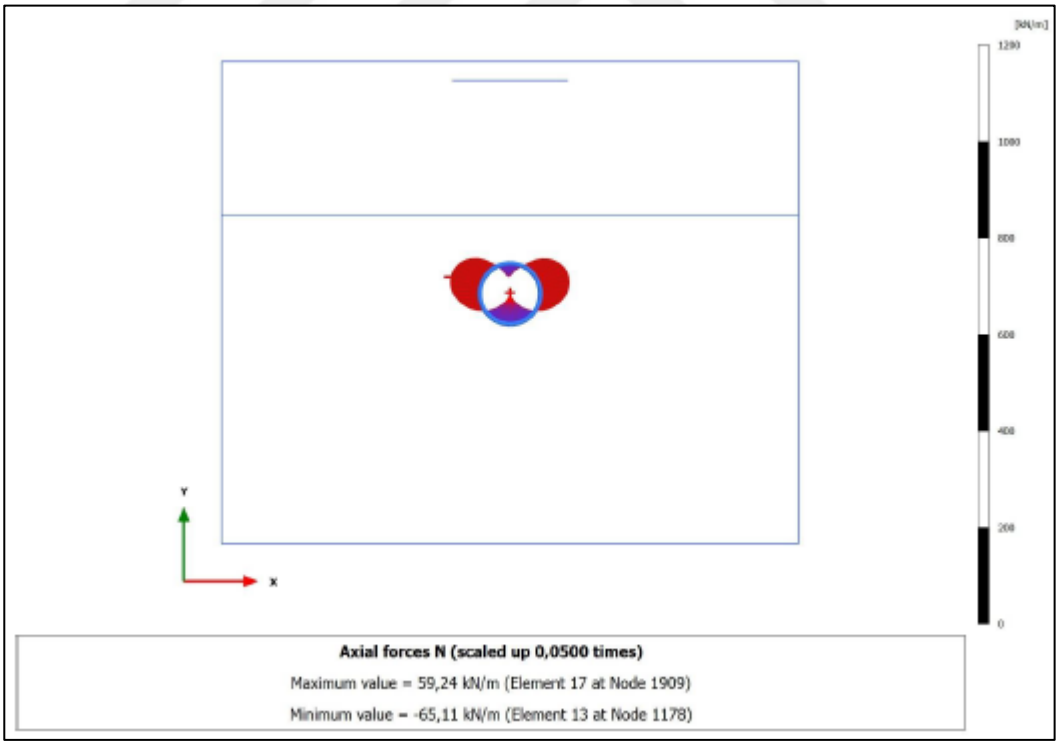
Şekil C.11. Üçüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (21. m)



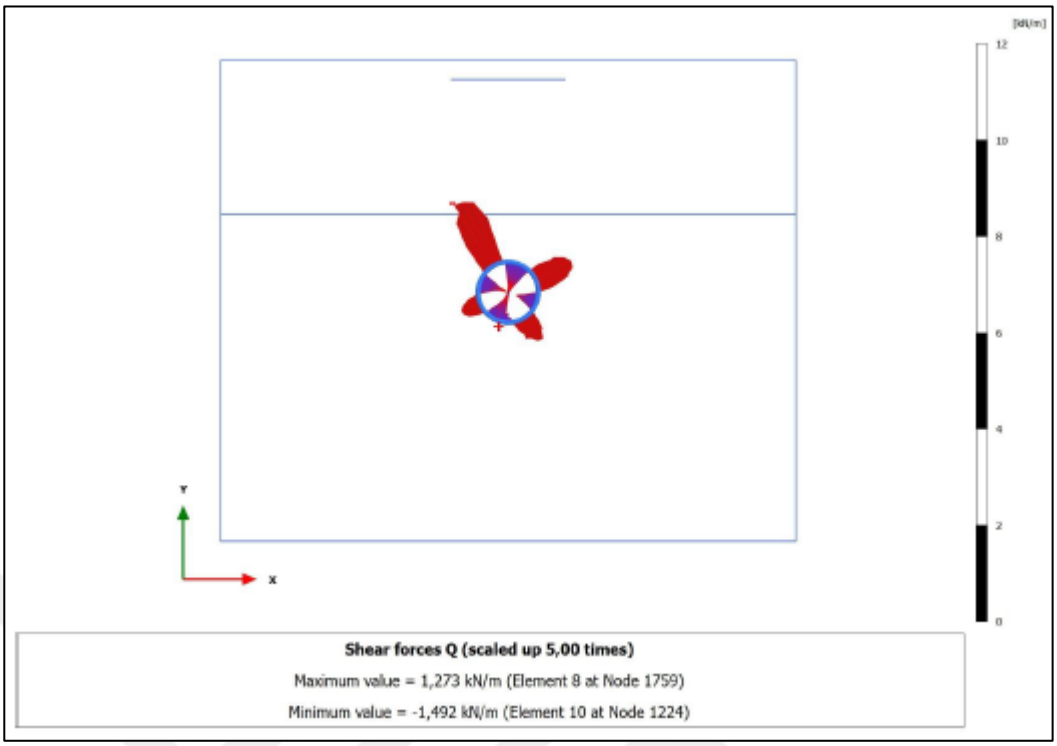
Şekil C.12. Dördüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (21. m)



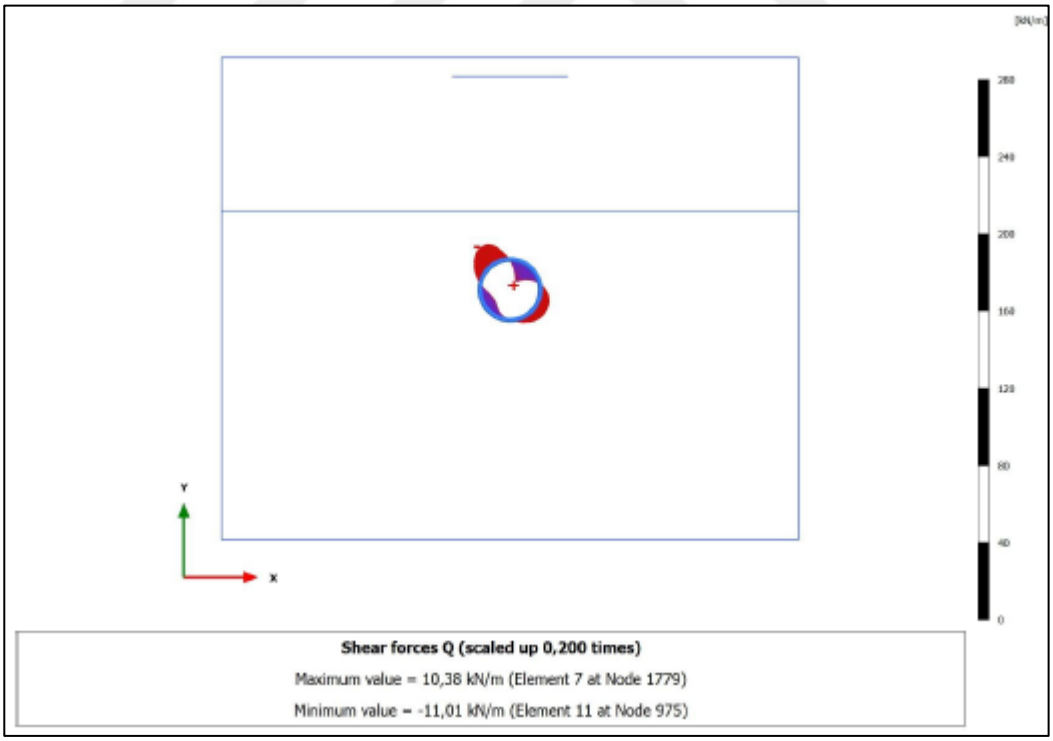
Şekil C.13. Üçüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (21. m)



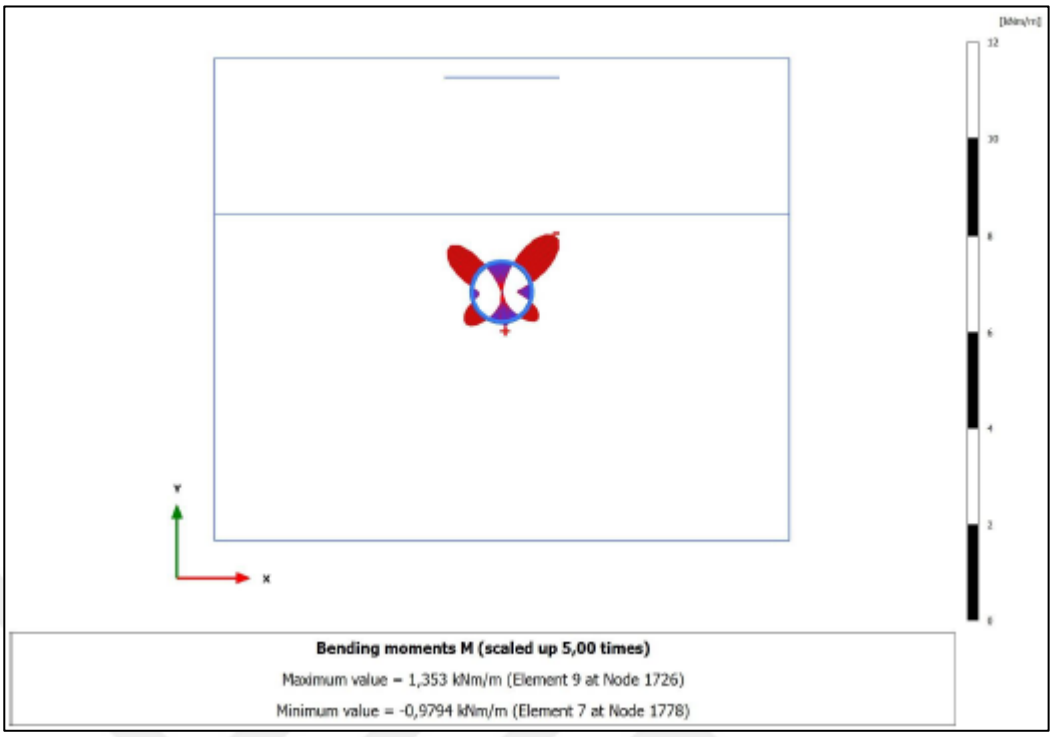
Şekil C.14. Dördüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (21. m)



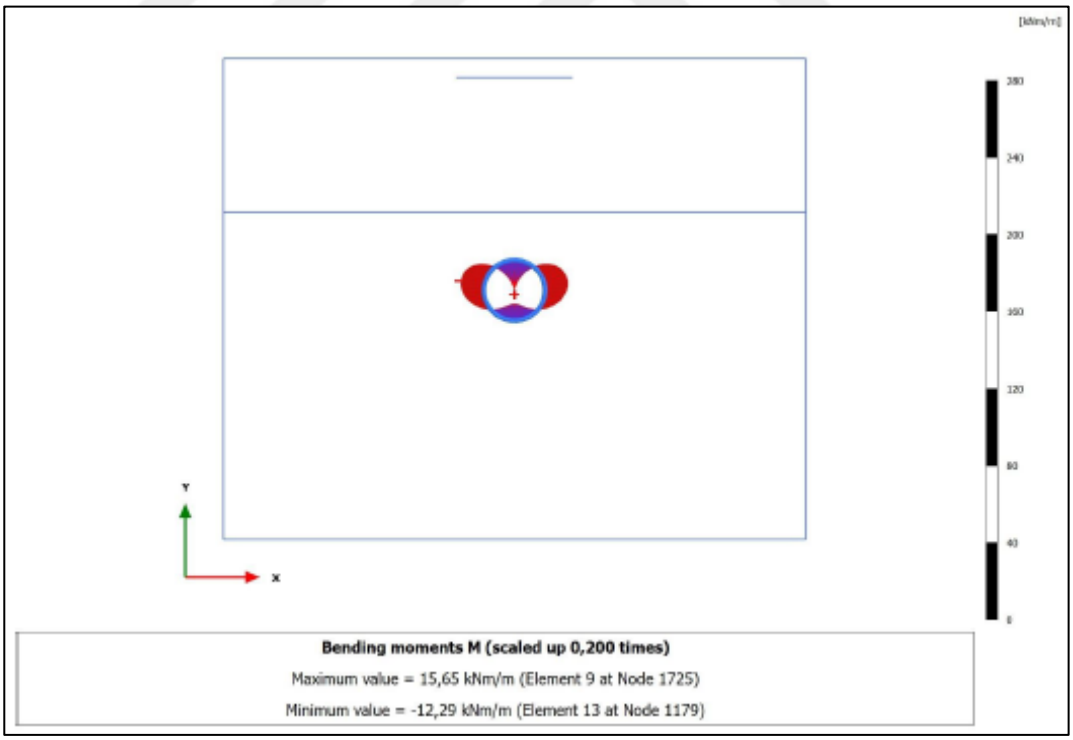
Şekil C.15. Üçüncü durum için kesme kuvveti değerleri (21. m)



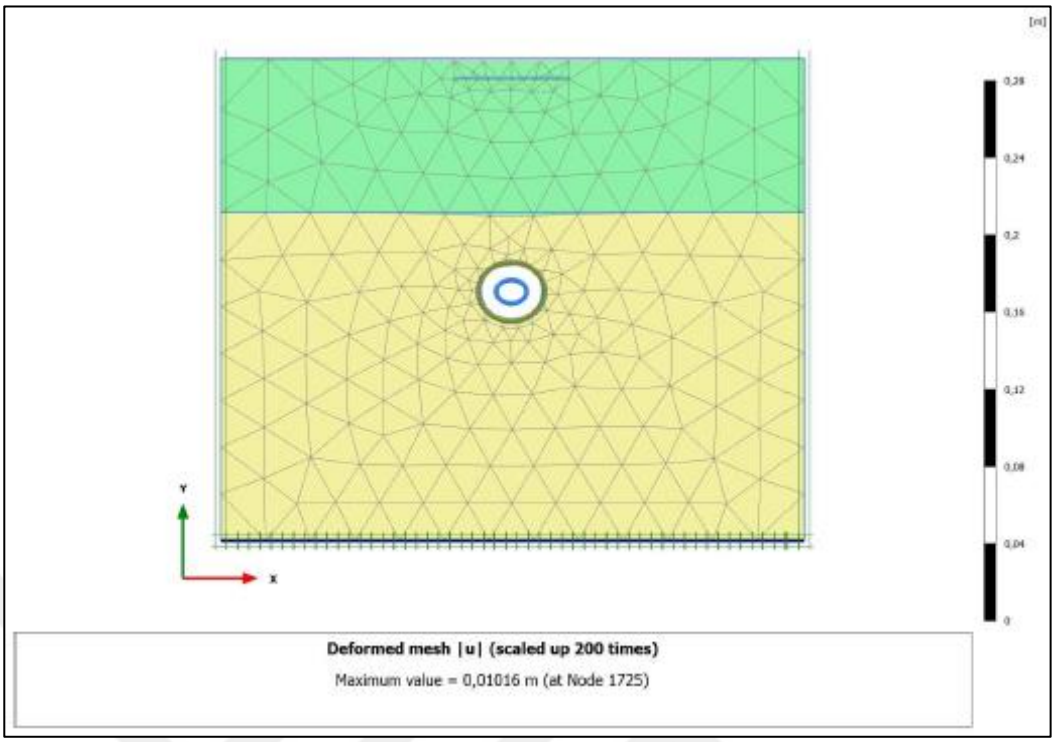
Şekil C.16. Dördüncü durum için kesme kuvveti değerleri (21. m)



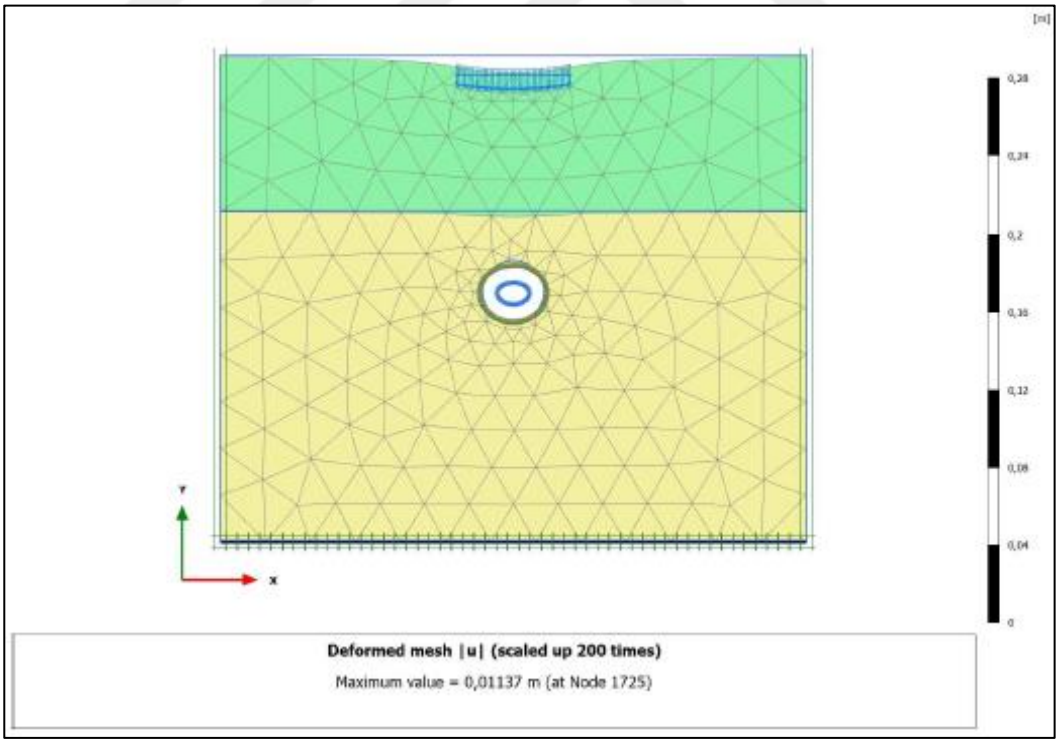
Şekil C.17. Üçüncü durum için eğilme momenti değerleri (21. m)



Şekil C.18. Dördüncü durum için eğilme momenti değerleri (21. m)

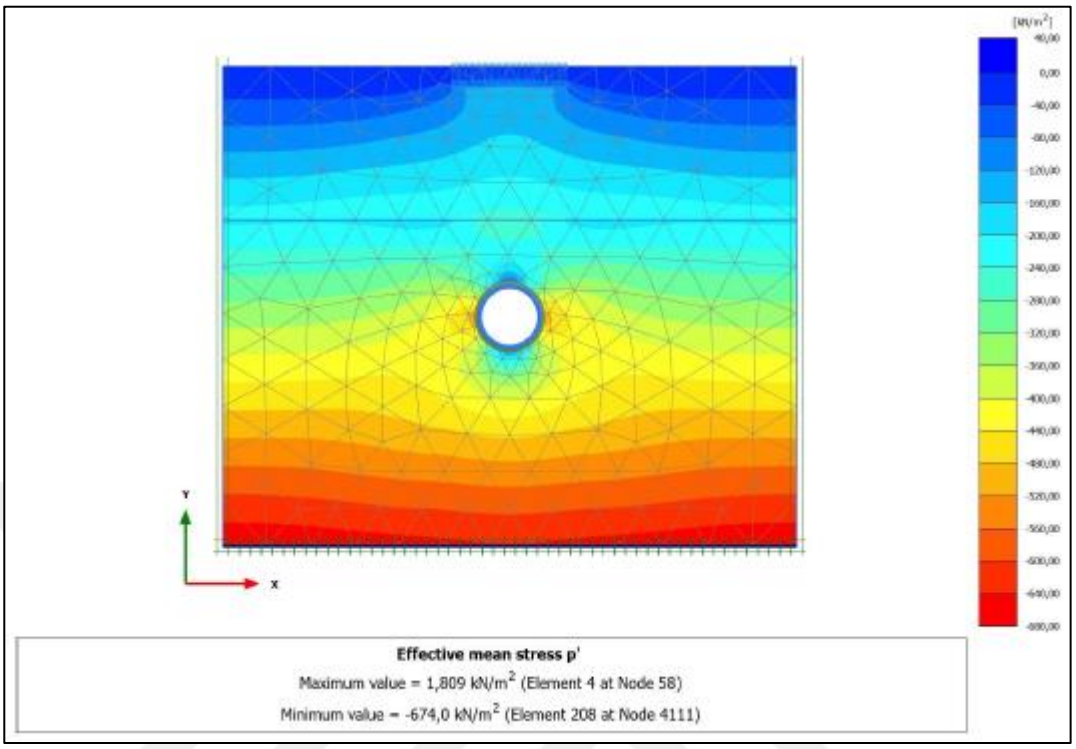


Şekil C.19. Üçüncü durum için deforme ağ (21. m)

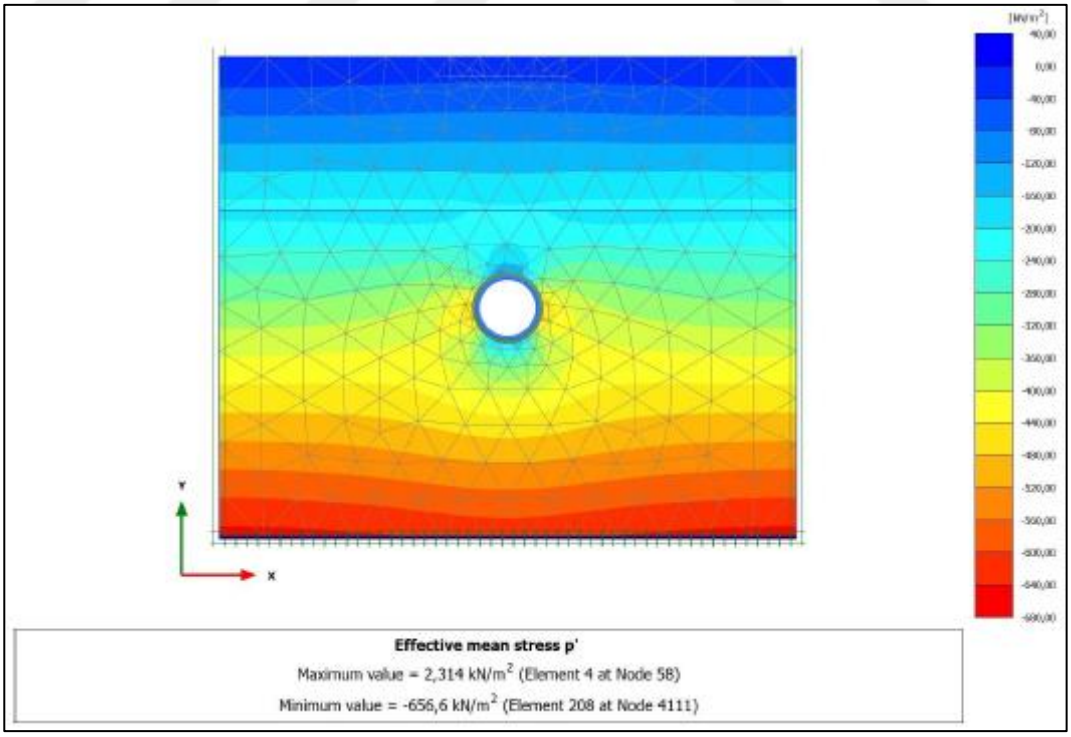


Şekil C.20. Dördüncü durum için deforme ağ (21. m)

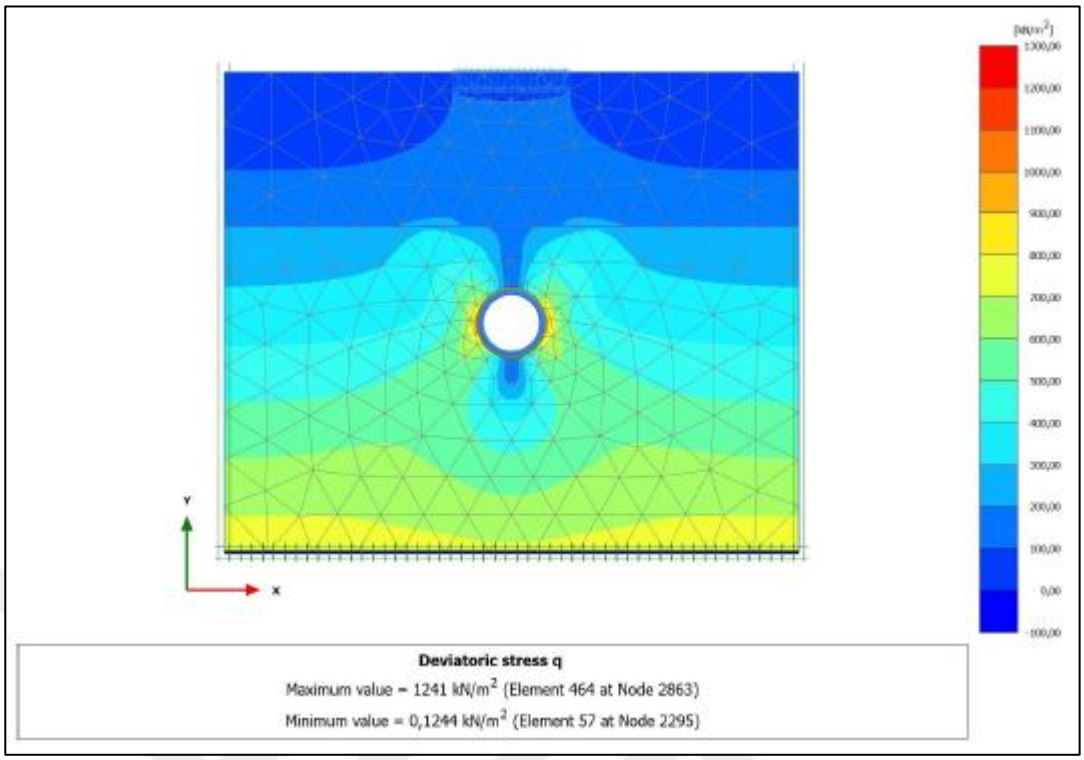
Ek-D: 23 Metre Derinlik İçin Program Analiz Raporu



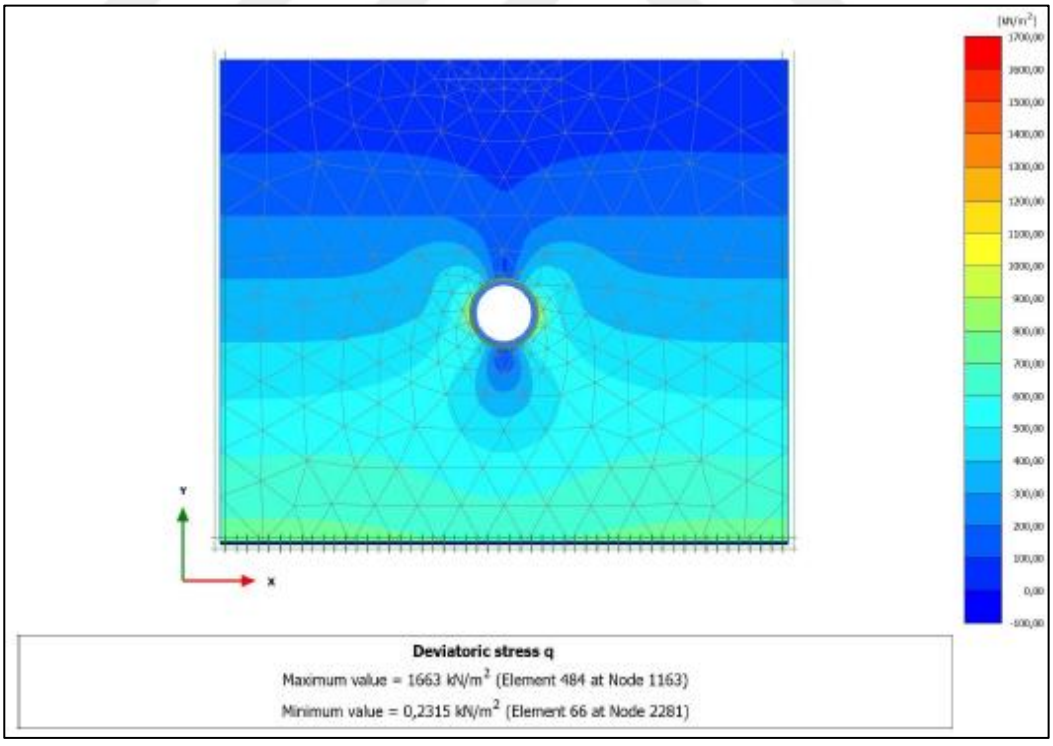
Şekil D.1. İkinci durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (23. m)



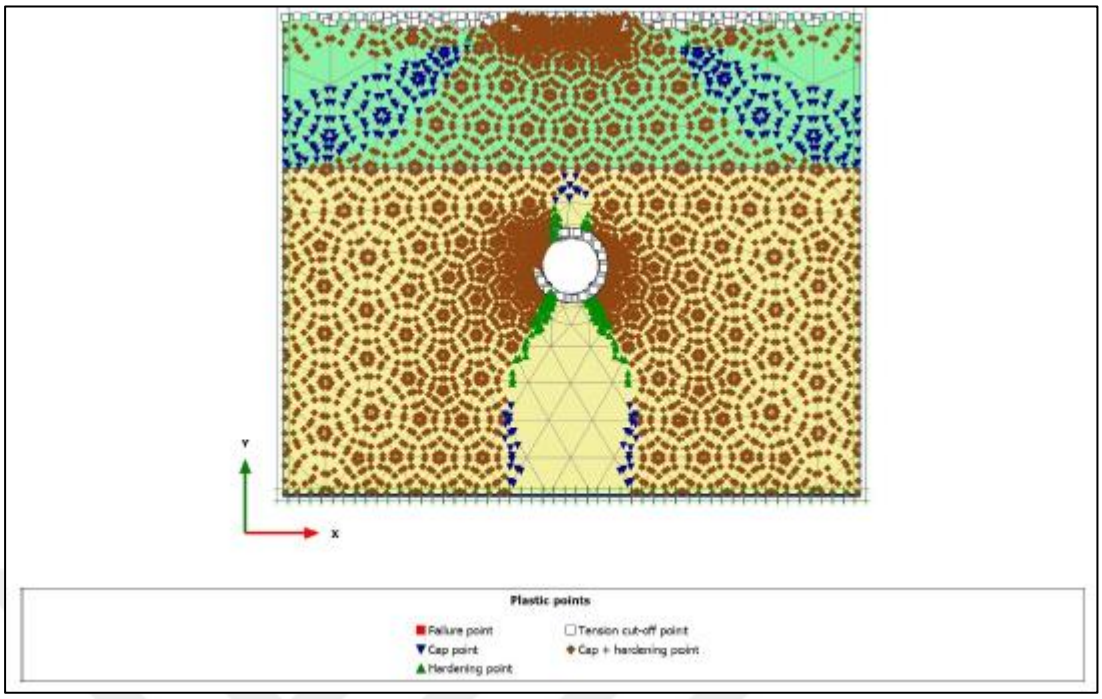
Şekil D.2. İlk durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (23. m)



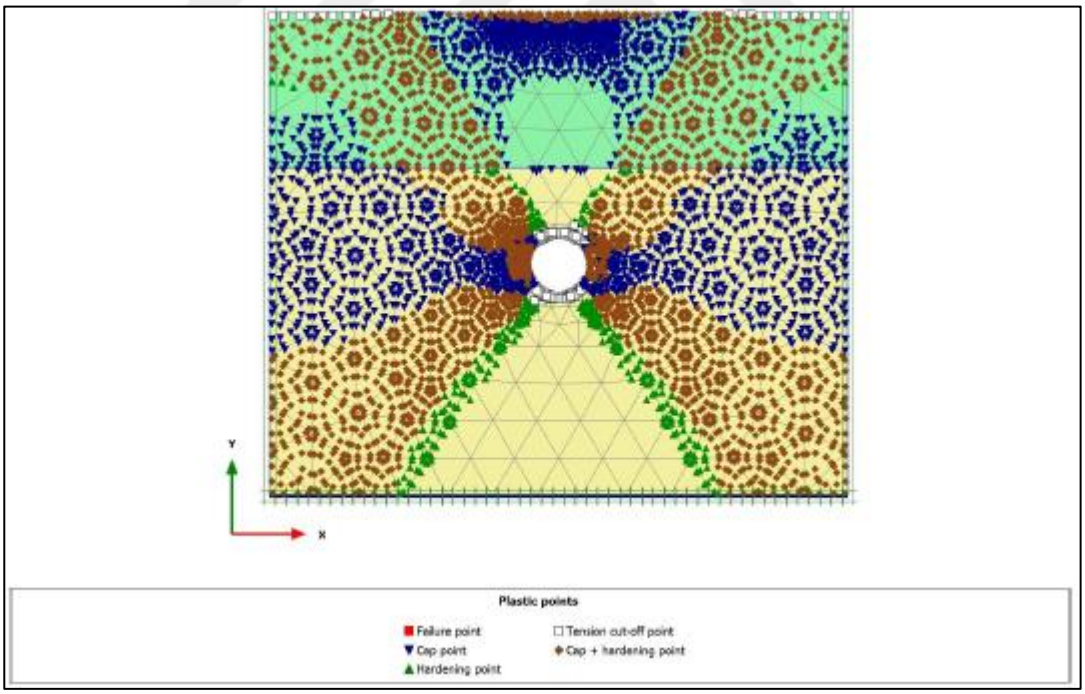
Şekil D.3. İkinci durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (23. m)



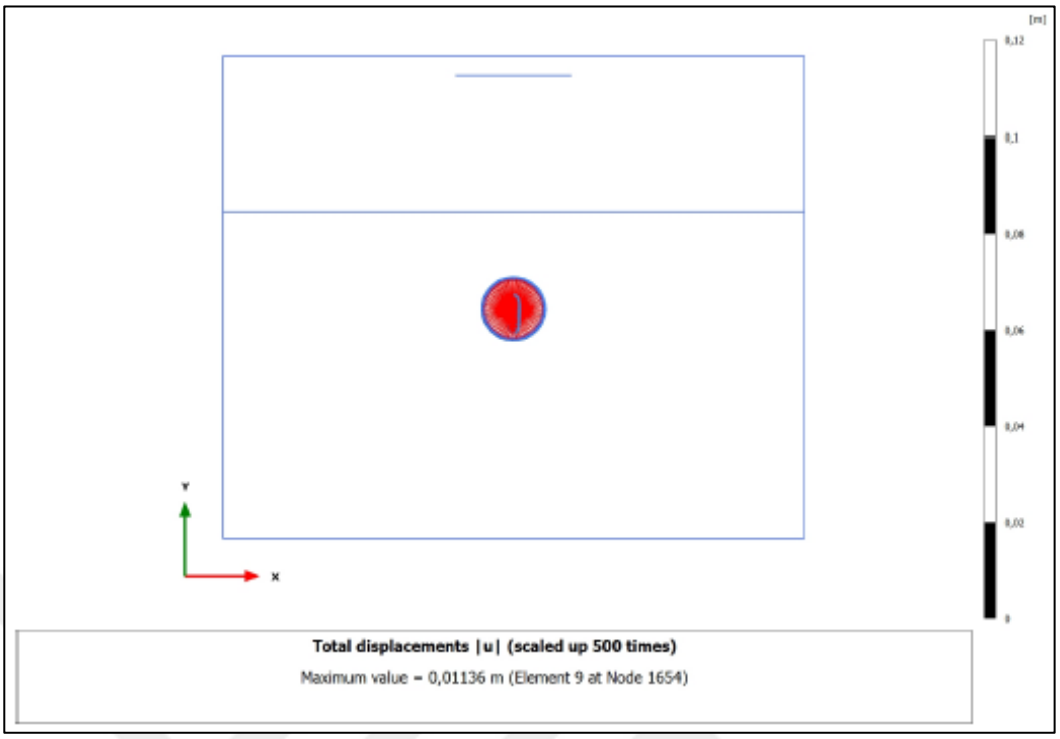
Şekil D.4. İlk durum için ölçülen q deviatorik gerilme değeri (23. m)



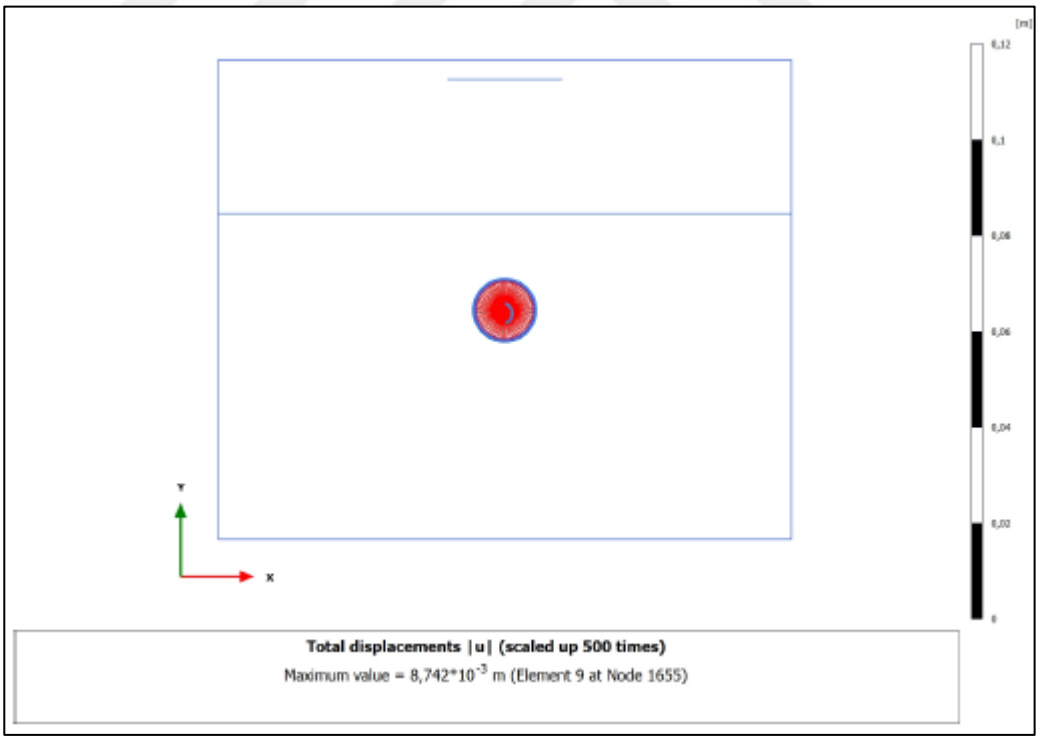
Şekil D.5. İkinci durum için plastik noktalar (23. m)



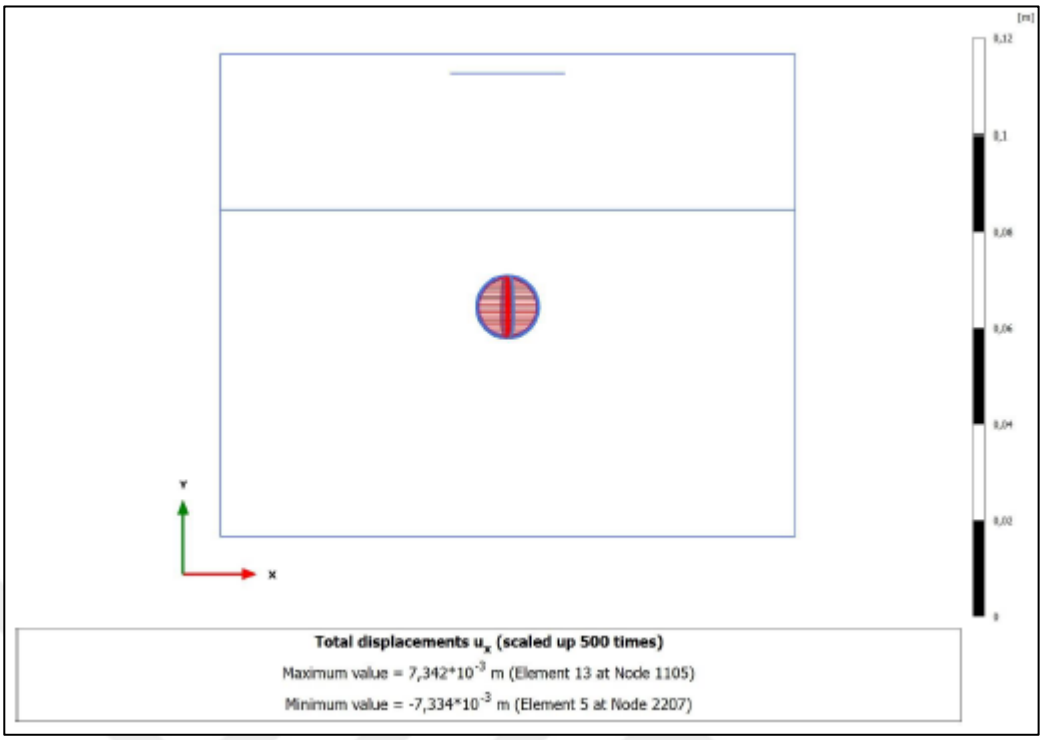
Şekil D.6. İlk durum için plastik noktalar (23. m)



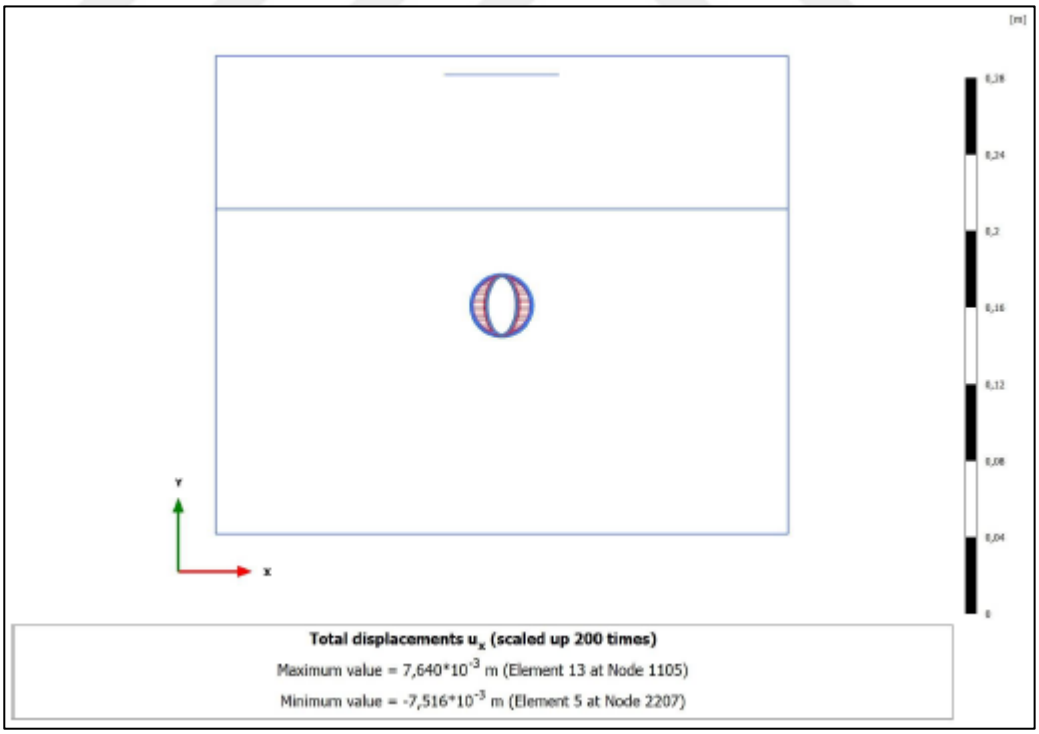
Şekil D.7. Dördüncü durum için toplam yer değiştirme (23. m)



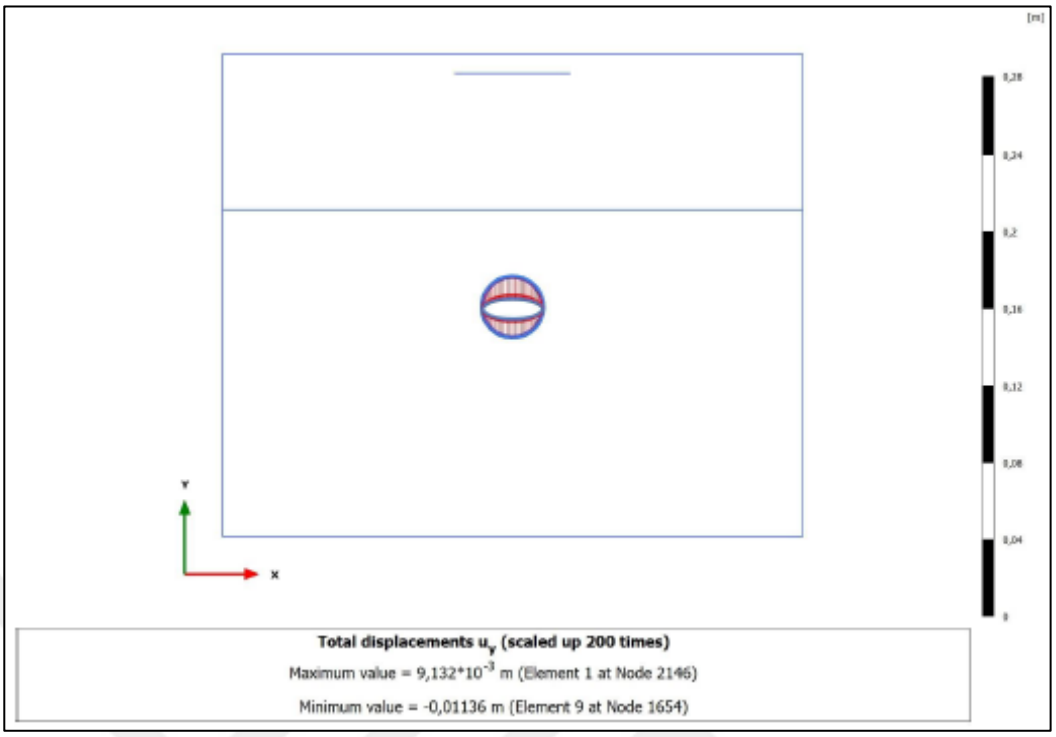
Şekil D.8. Üçüncü durum için toplam yer değiştirme (23. m)



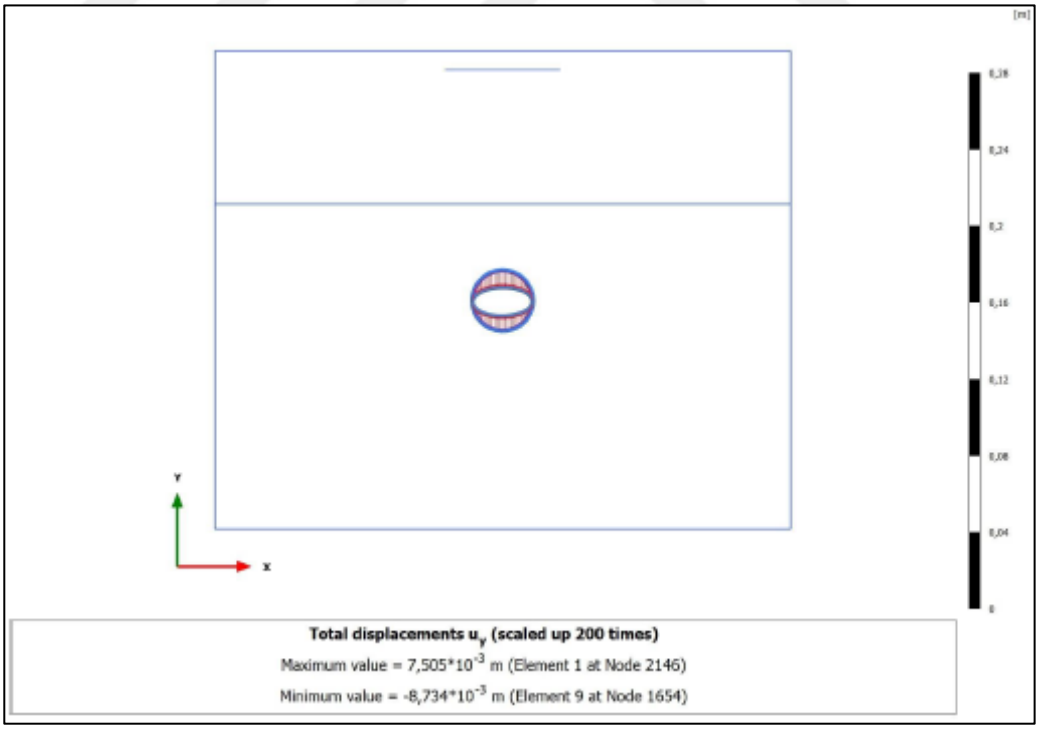
Şekil D.9. Dördüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (23. m)



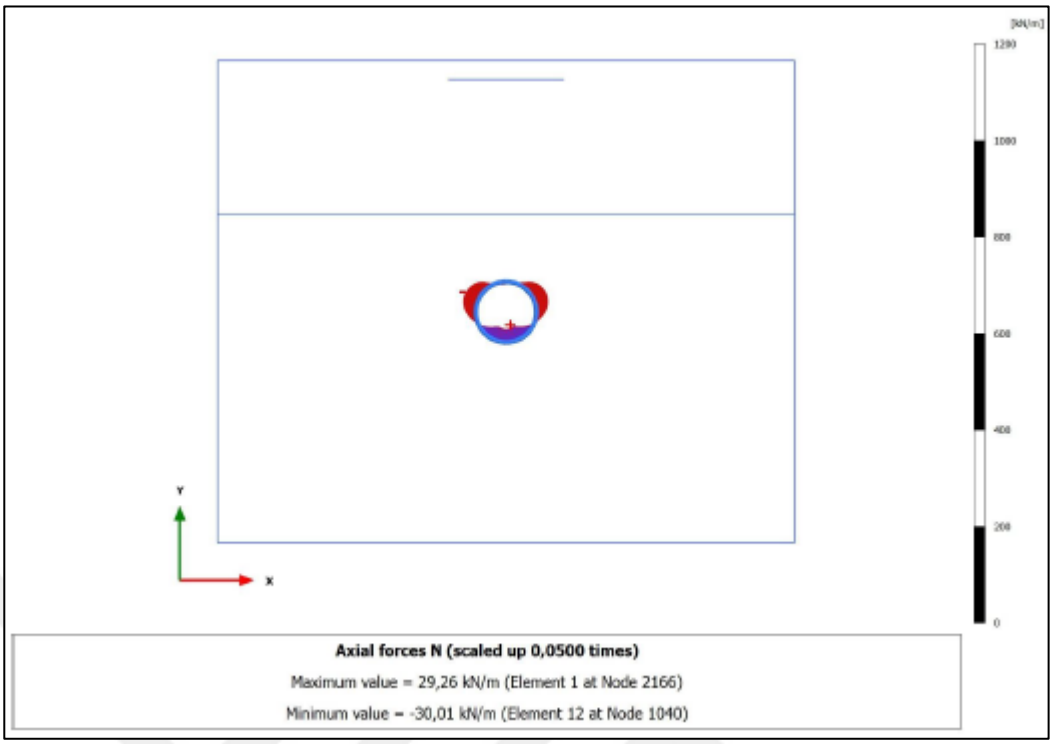
Şekil D.10. Üçüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (23. m)



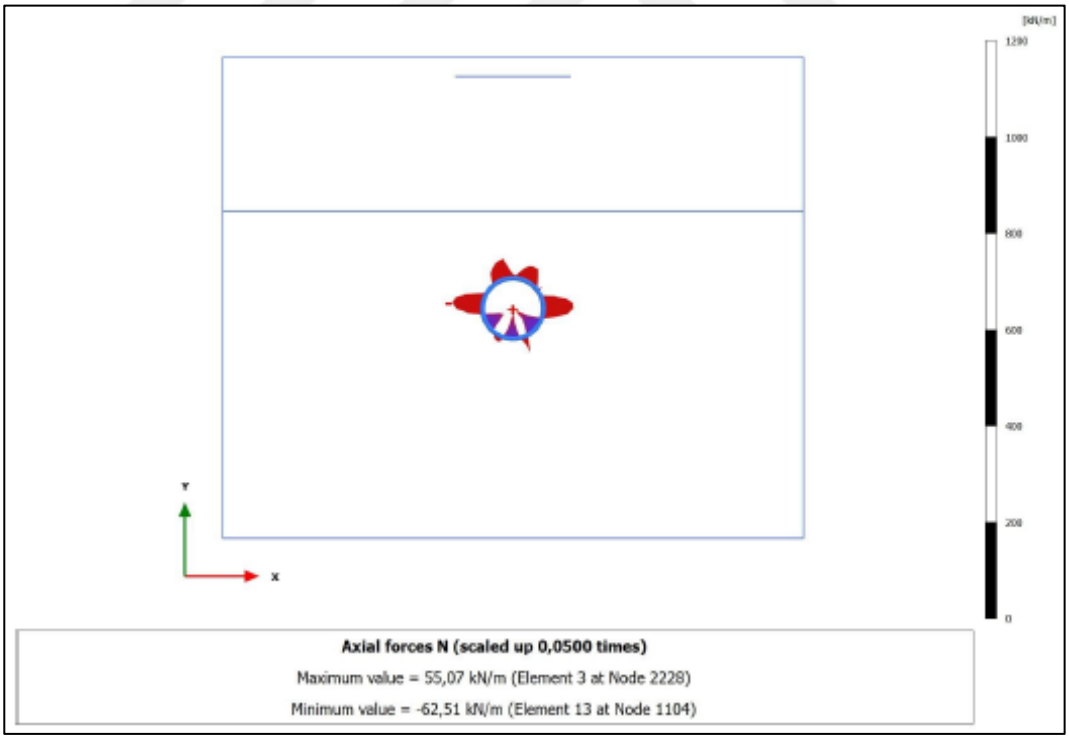
Şekil D.11. Dördüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (23. m)



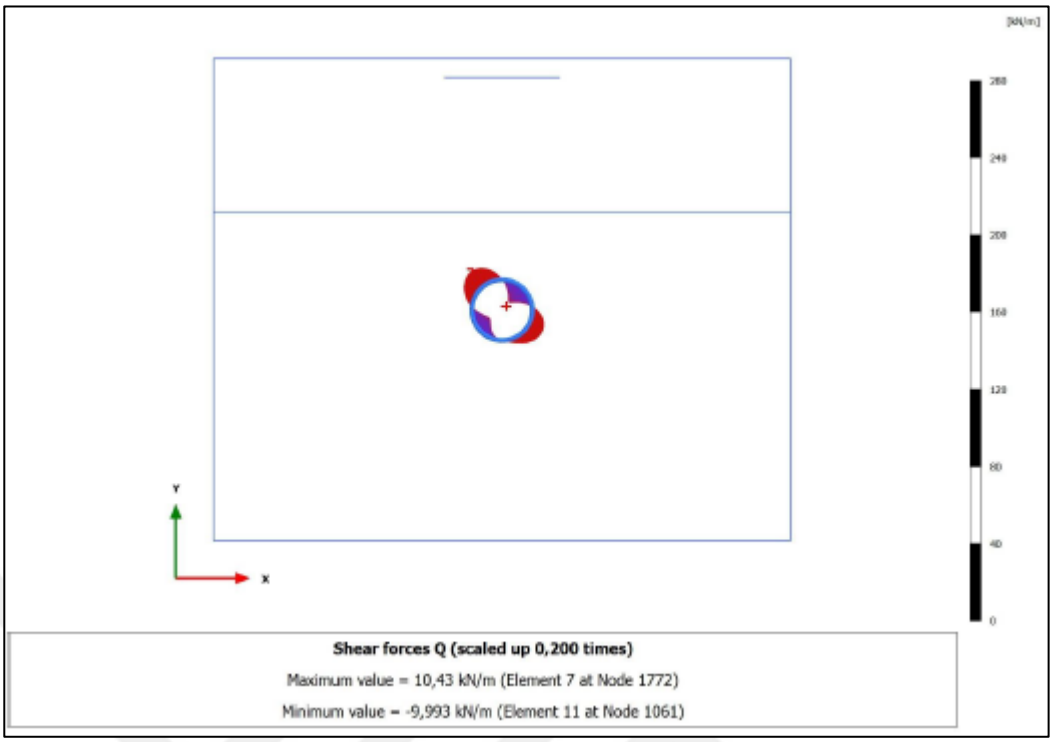
Şekil D.12. Üçüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (23. m)



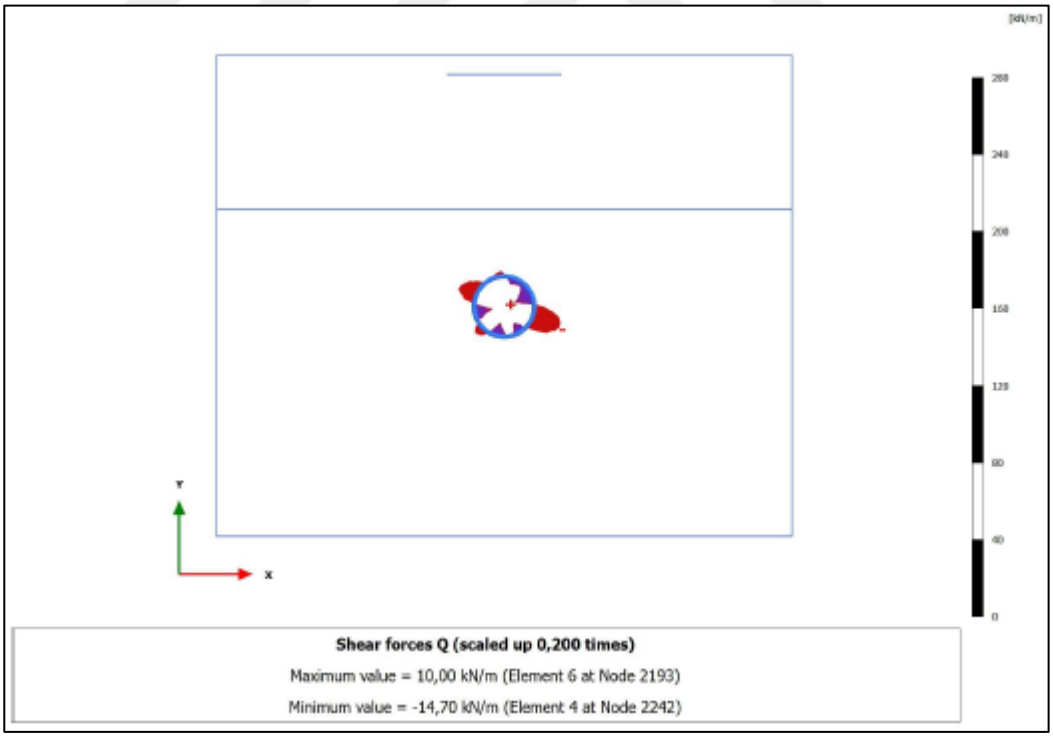
Şekil D.13. Dördüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (23. m)



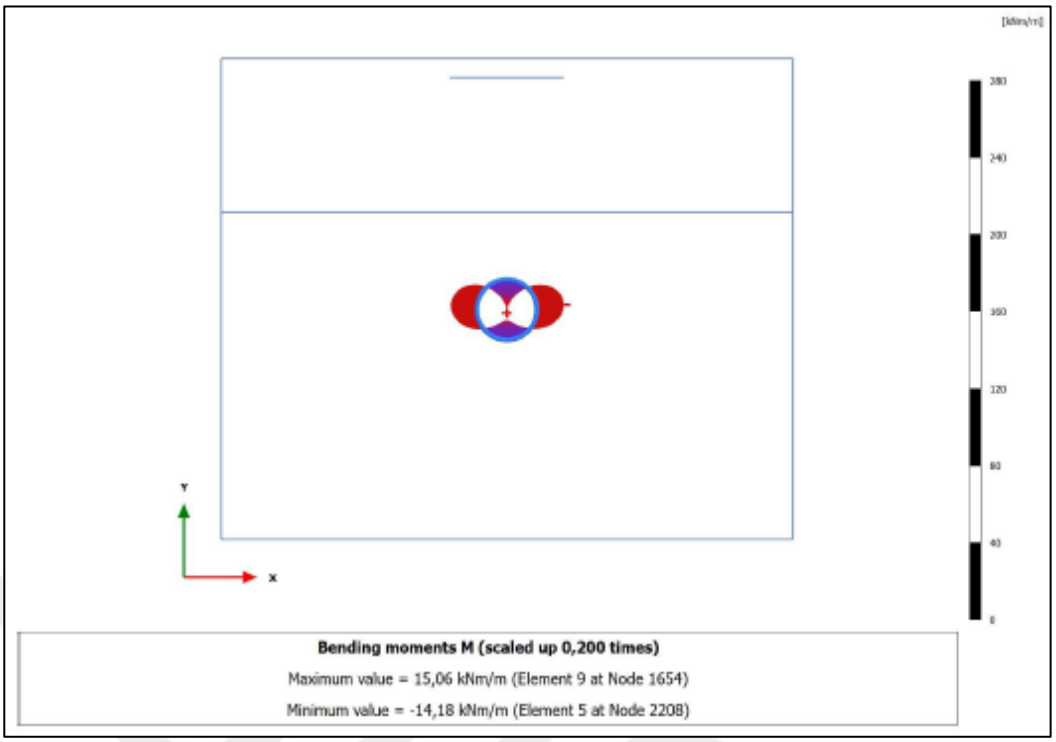
Şekil D.14. Üçüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (23. m)



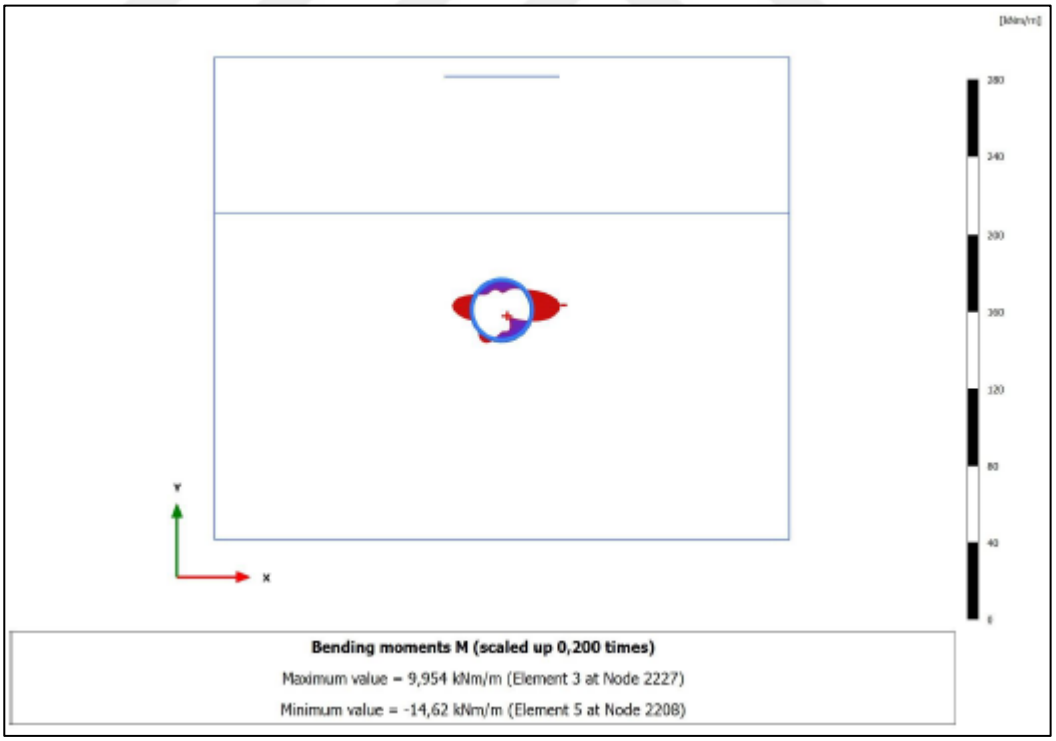
Şekil D.15. Dördüncü durum için kesme kuvveti değerleri (23. m)



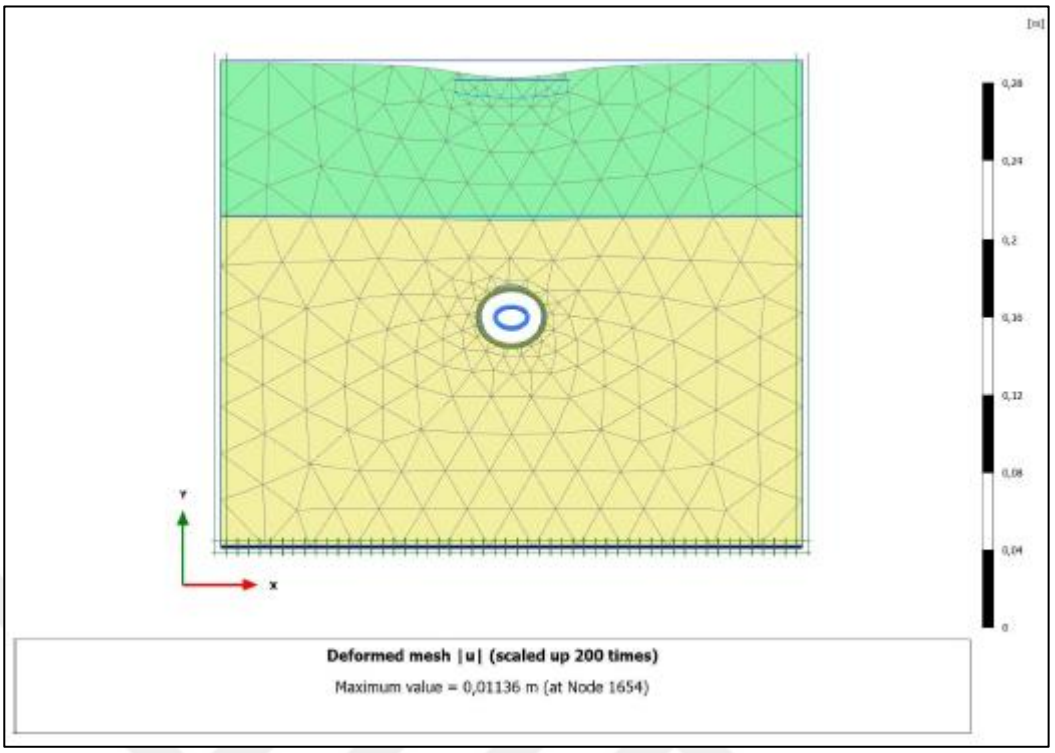
Şekil D.16. Üçüncü durum için kesme kuvveti değerleri (23. m)



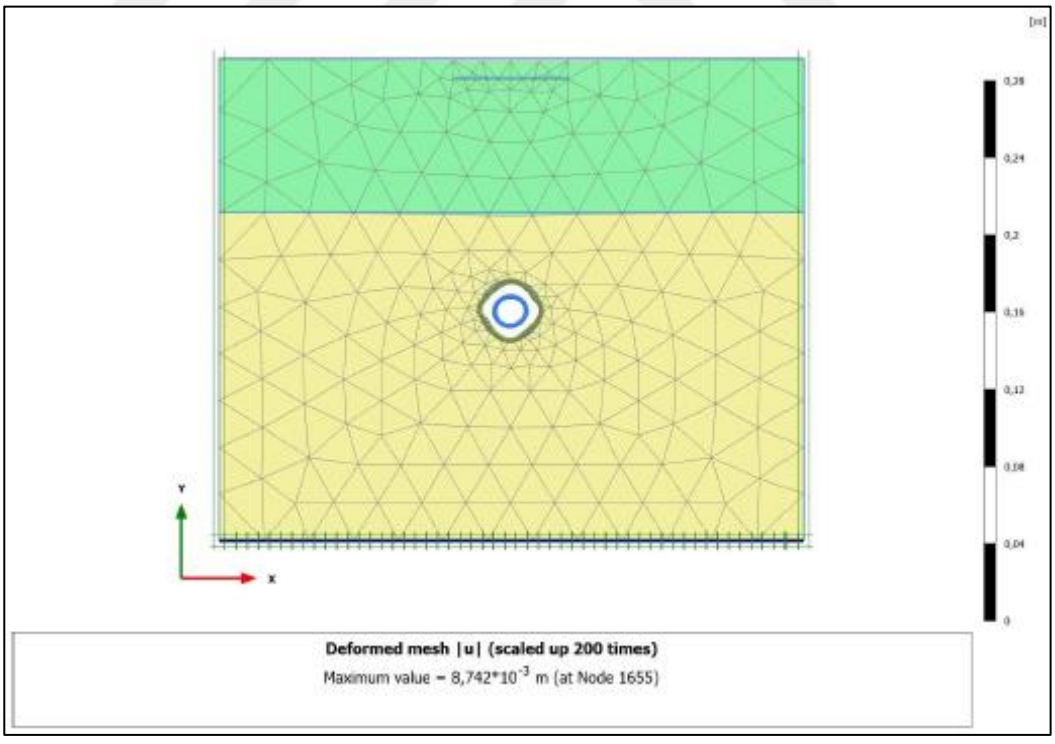
Şekil D.17. Dördüncü durum için eğilme momenti değerleri (23. m)



Şekil D.18. Üçüncü durum için eğilme momenti değerleri (23. m)

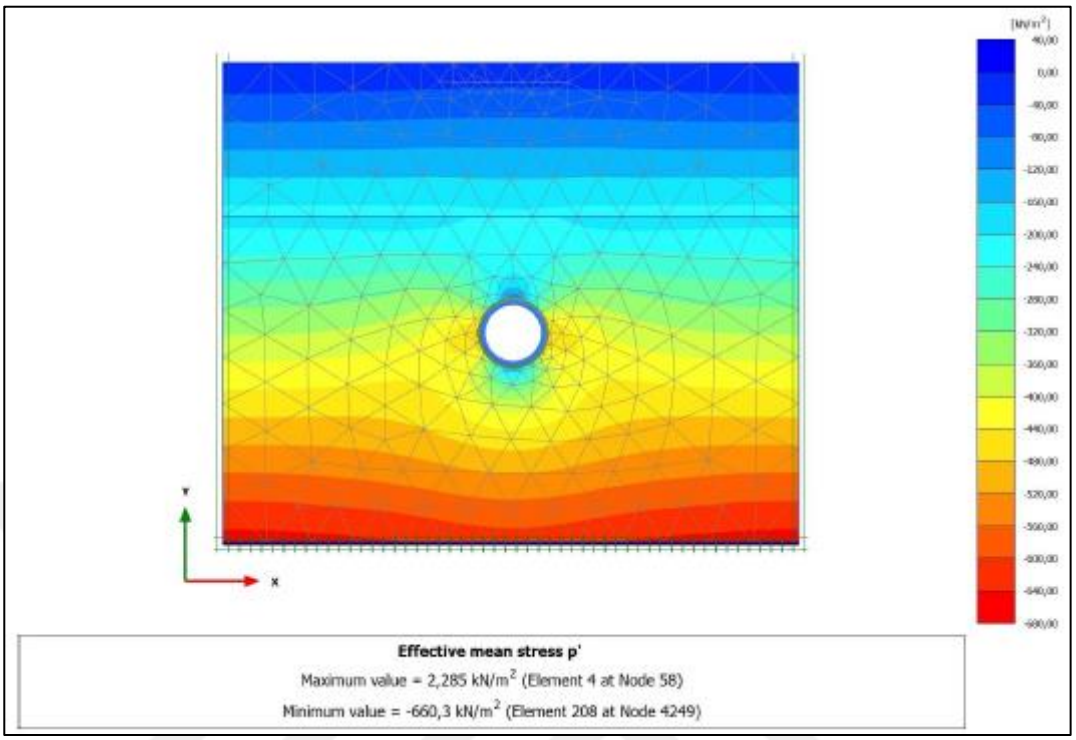


Şekil D.19. Dördüncü durum için deforme ağ (23. m)

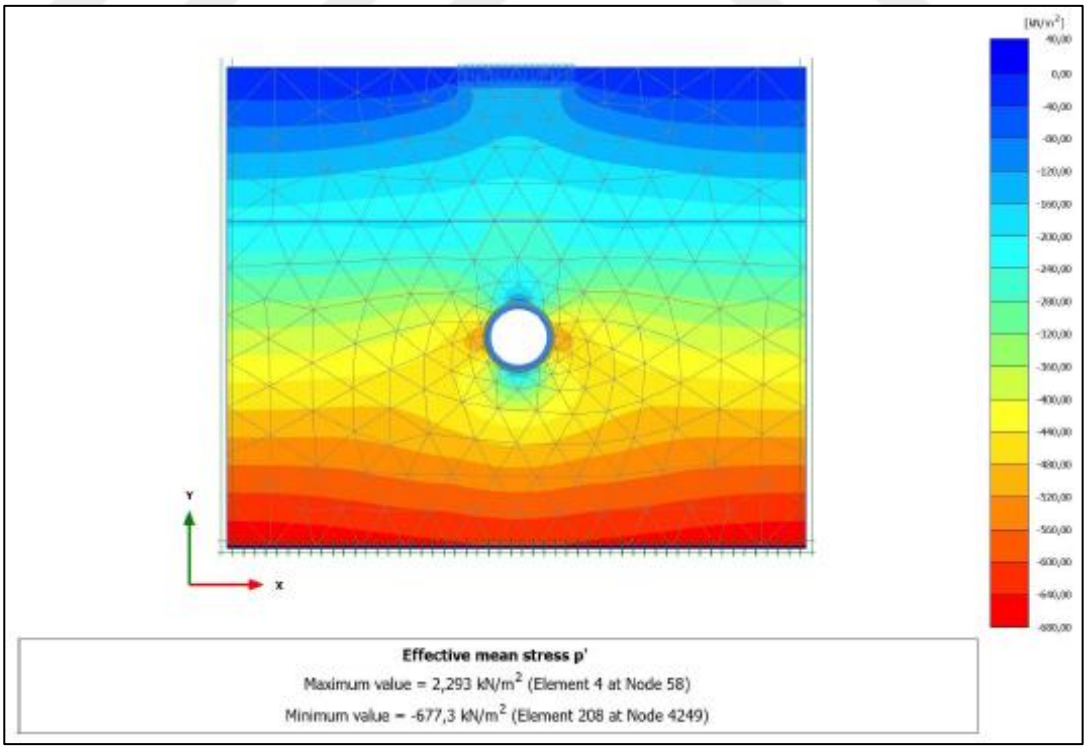


Şekil D.20. Üçüncü durum için deforme ağ (23. m)

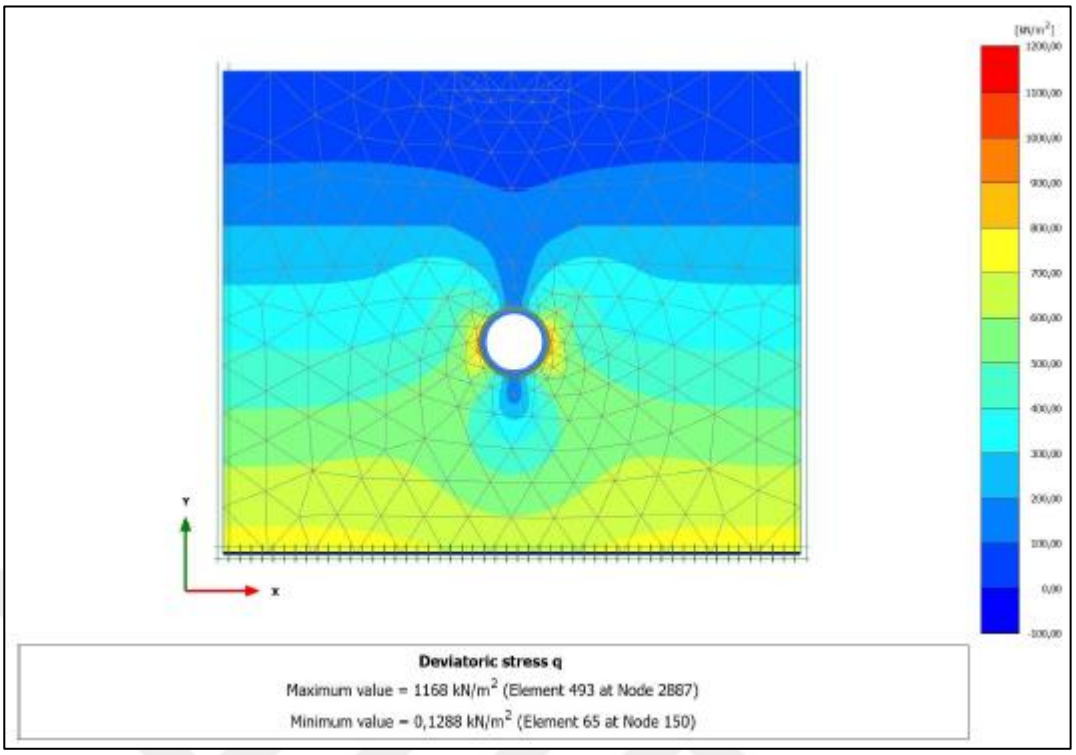
Ek-E: 25 Metre Derinlik İçin Program Analiz Raporu



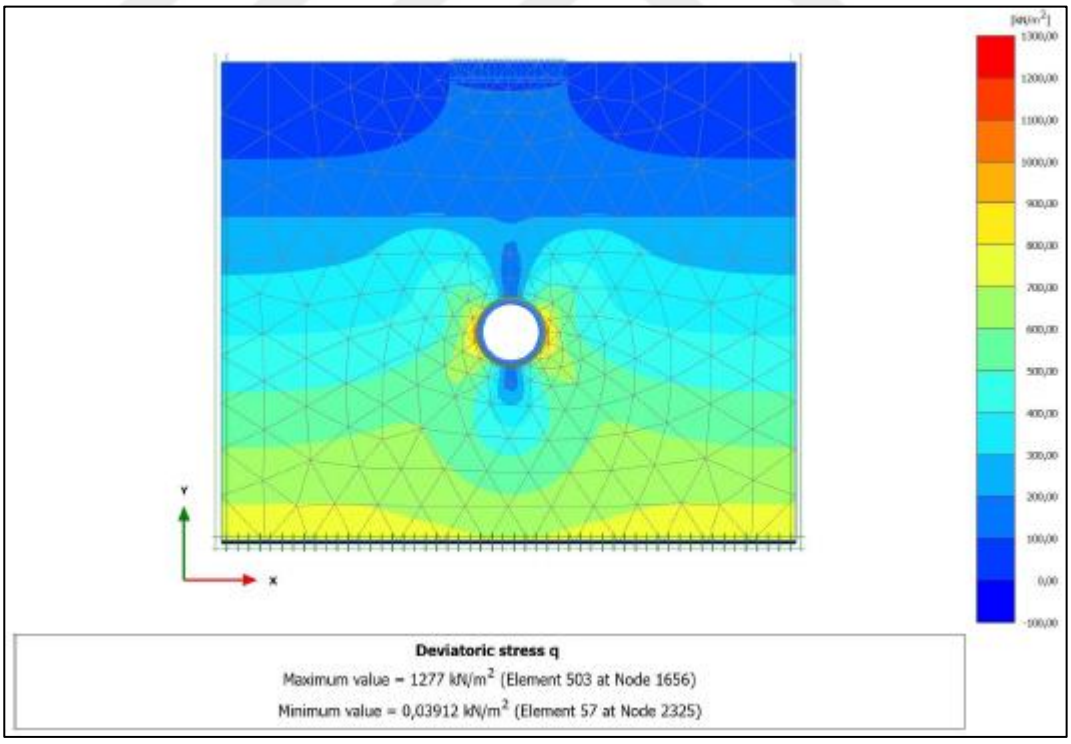
Şekil E.1. İlk durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (25. m)



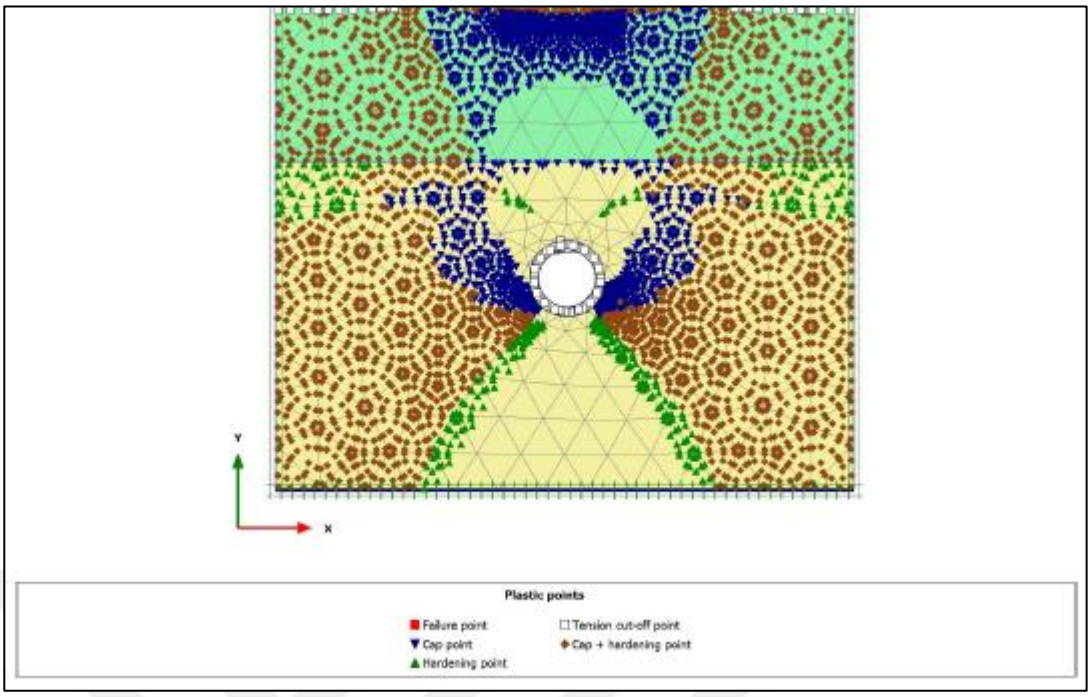
Şekil E.2. İkinci durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (25. m)



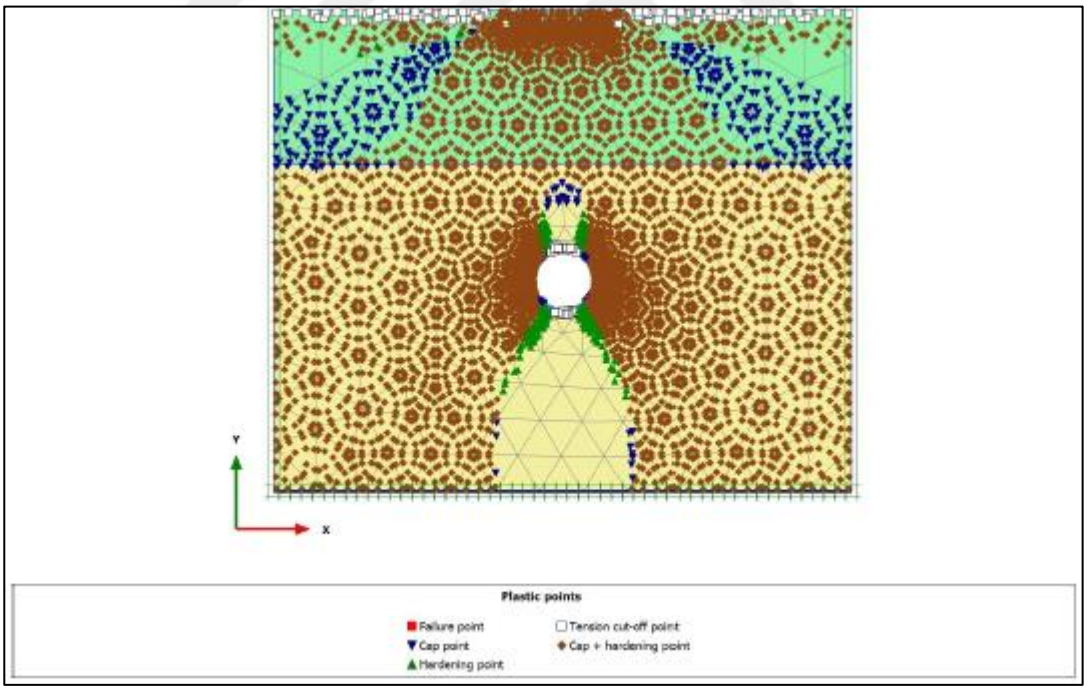
Şekil E.3. İlk durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (25. m)



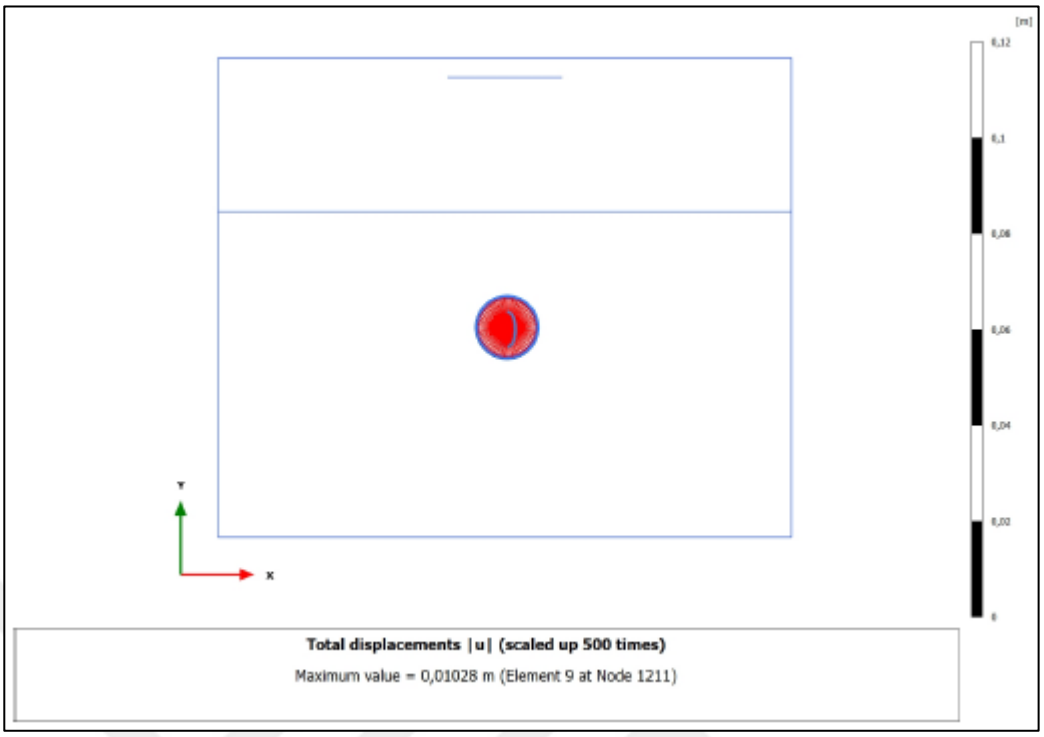
Şekil E.4. İkinci durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (25. m)



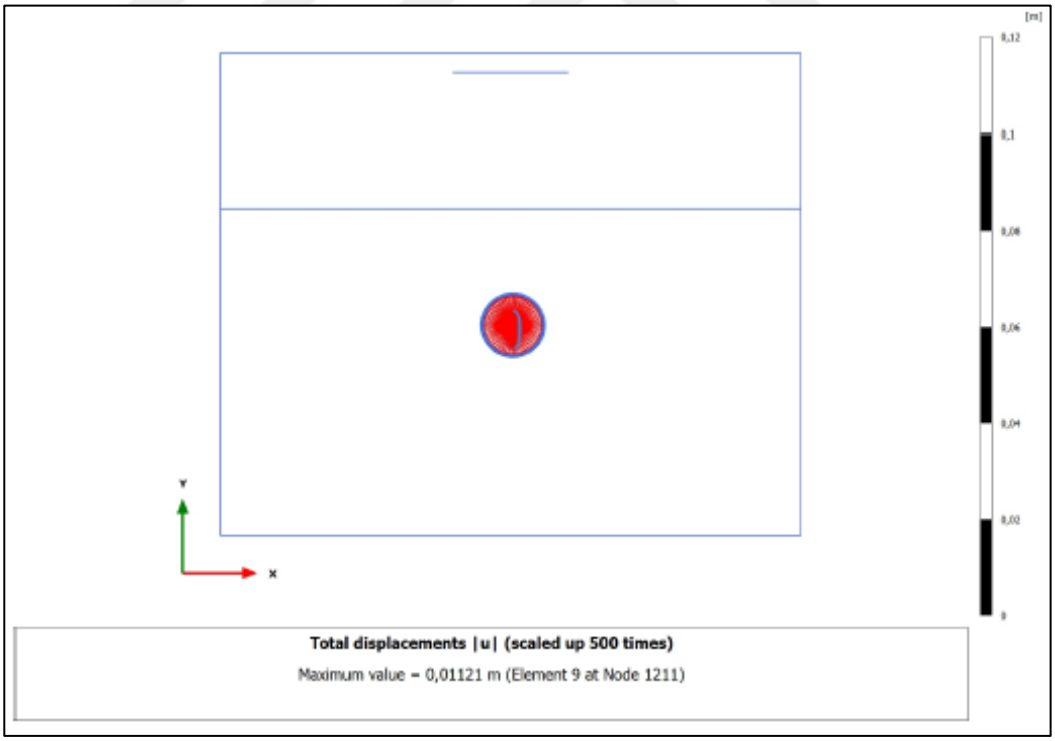
Şekil E.5. İlk durum için plastik noktalar (25. m)



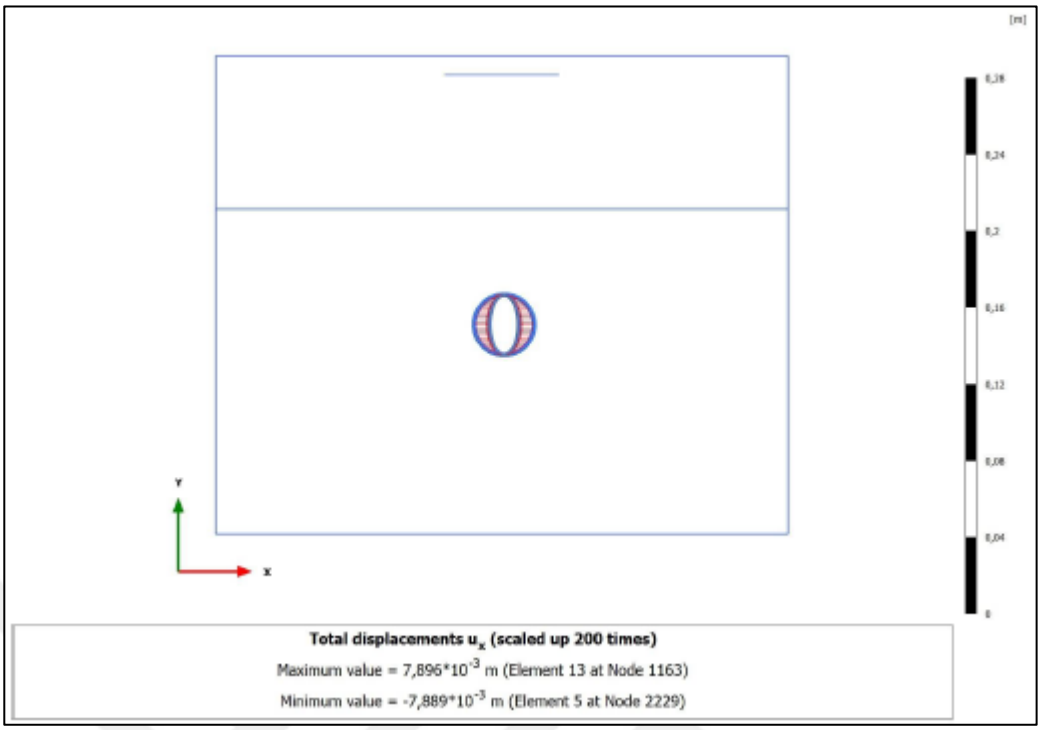
Şekil E.6. İkinci durum için plastik noktalar (25. m)



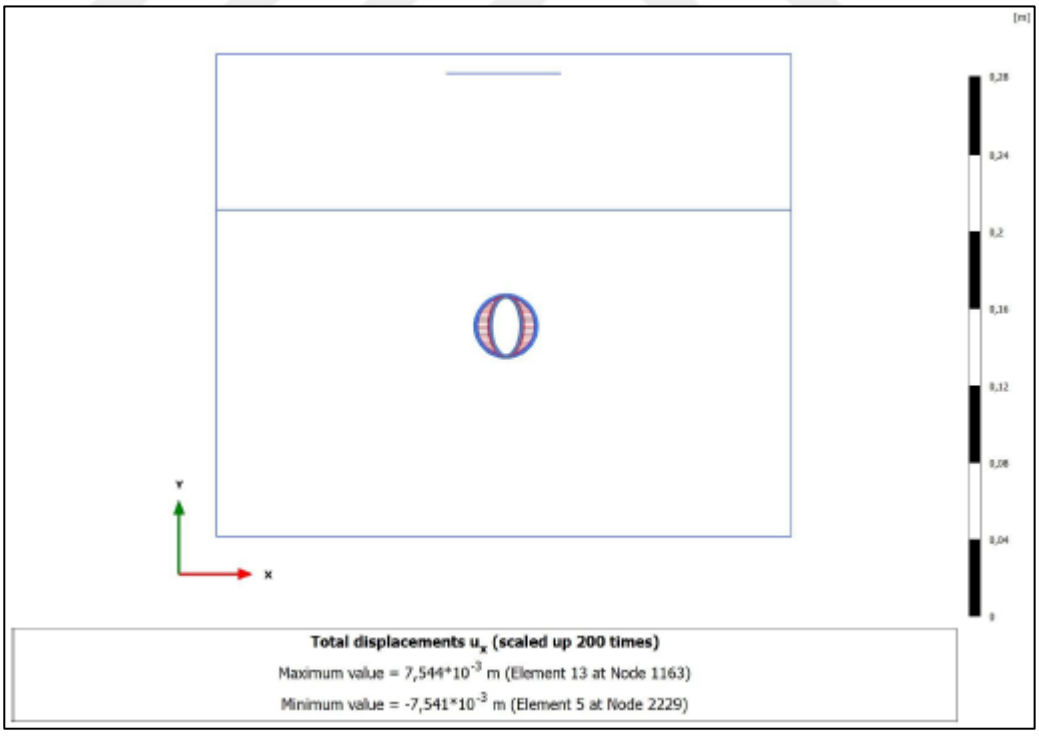
Şekil E.7. Üçüncü durum için toplam yer değiştirme (25. m)



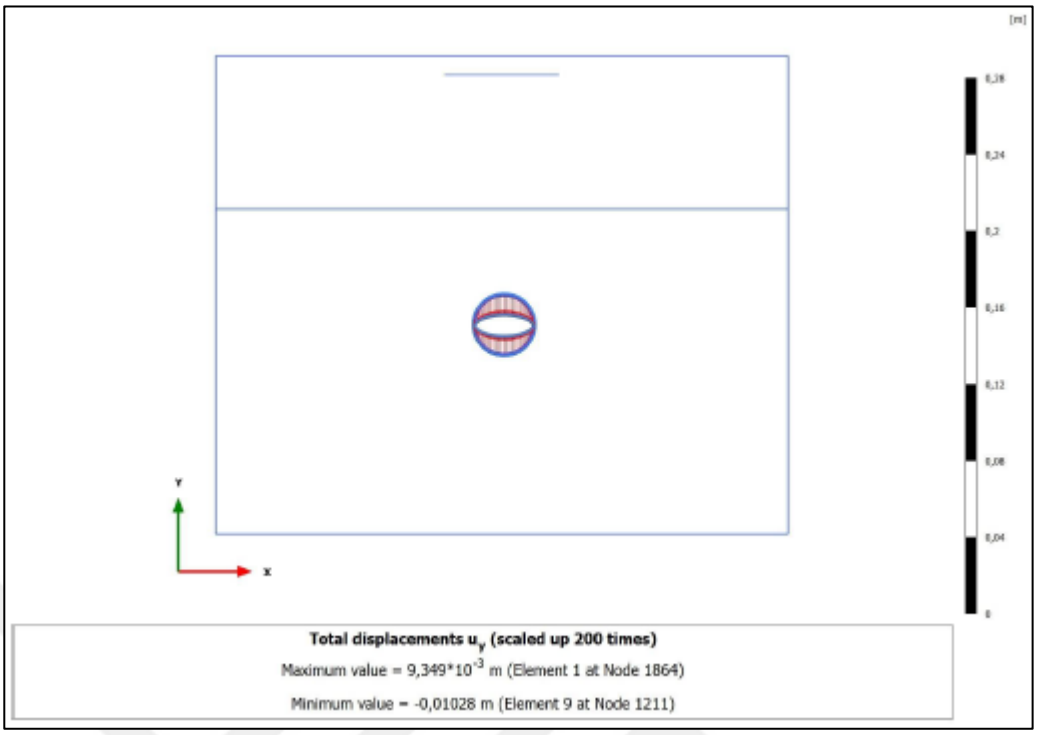
Şekil E.8. Dördüncü durum için toplam yer değiştirme (25. m)



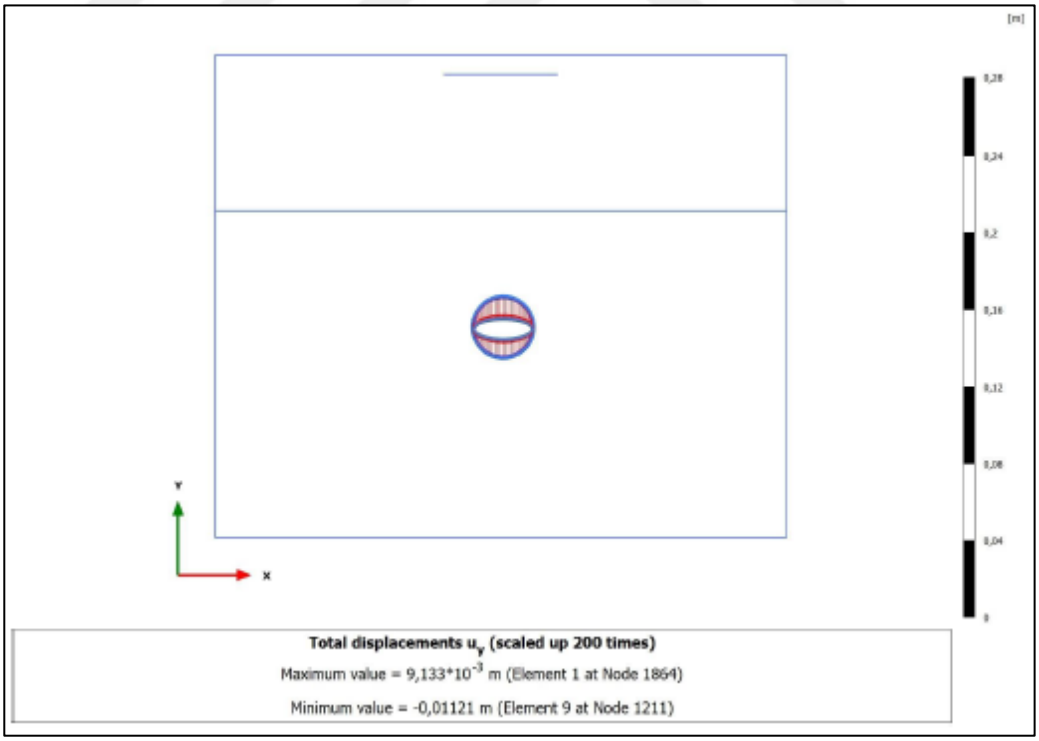
Şekil E.9. Üçüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (25. m)



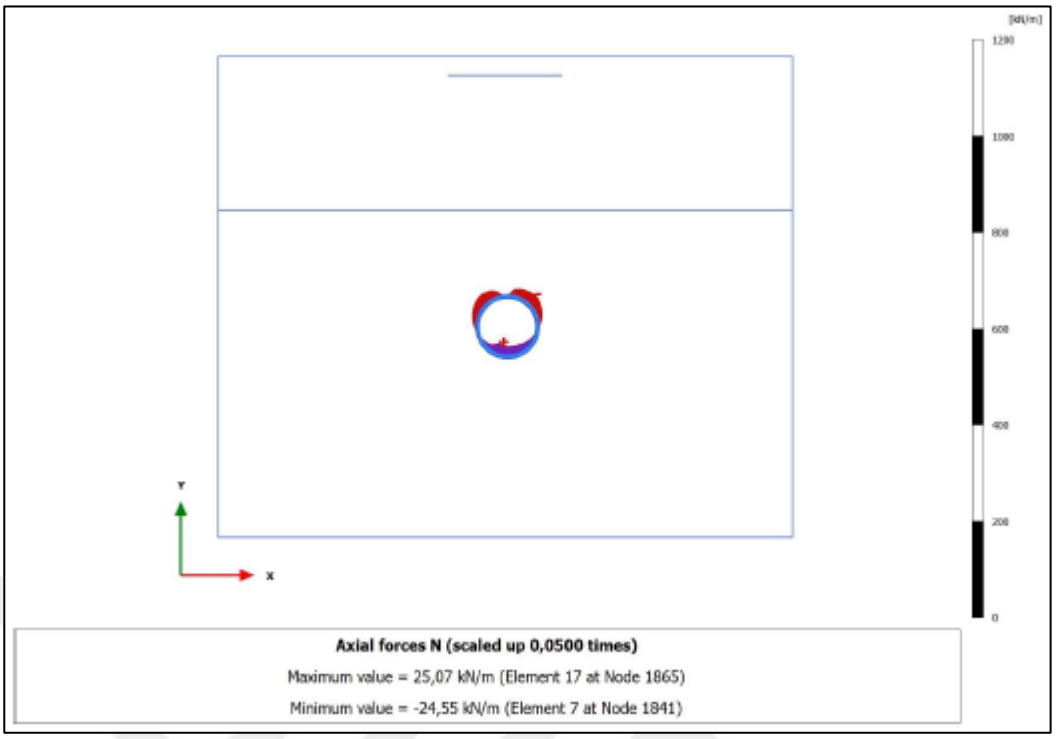
Şekil E.10. Dördüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (25. m)



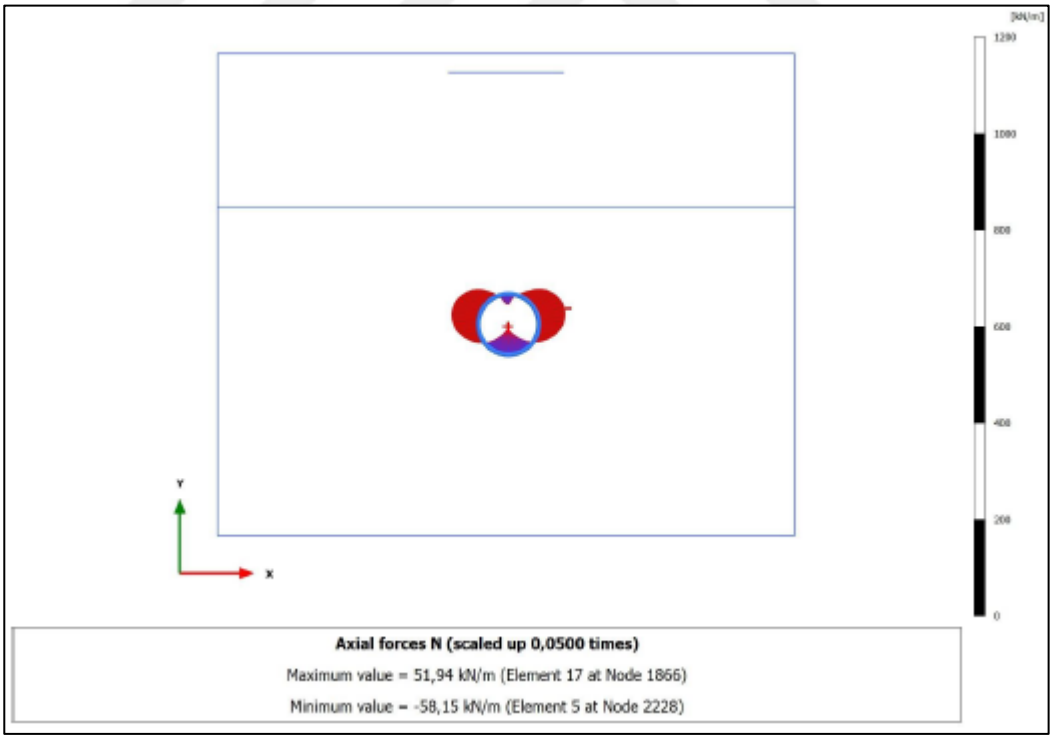
Şekil E.11. Üçüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (25. m)



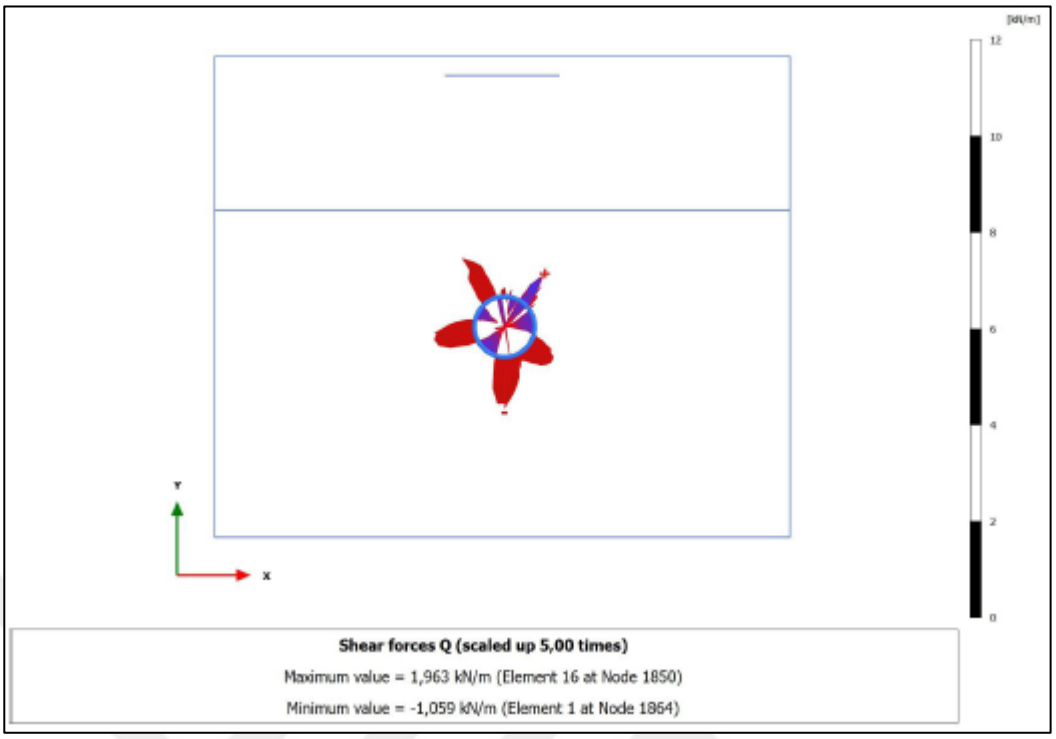
Şekil E.12. Dördüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (25. m)



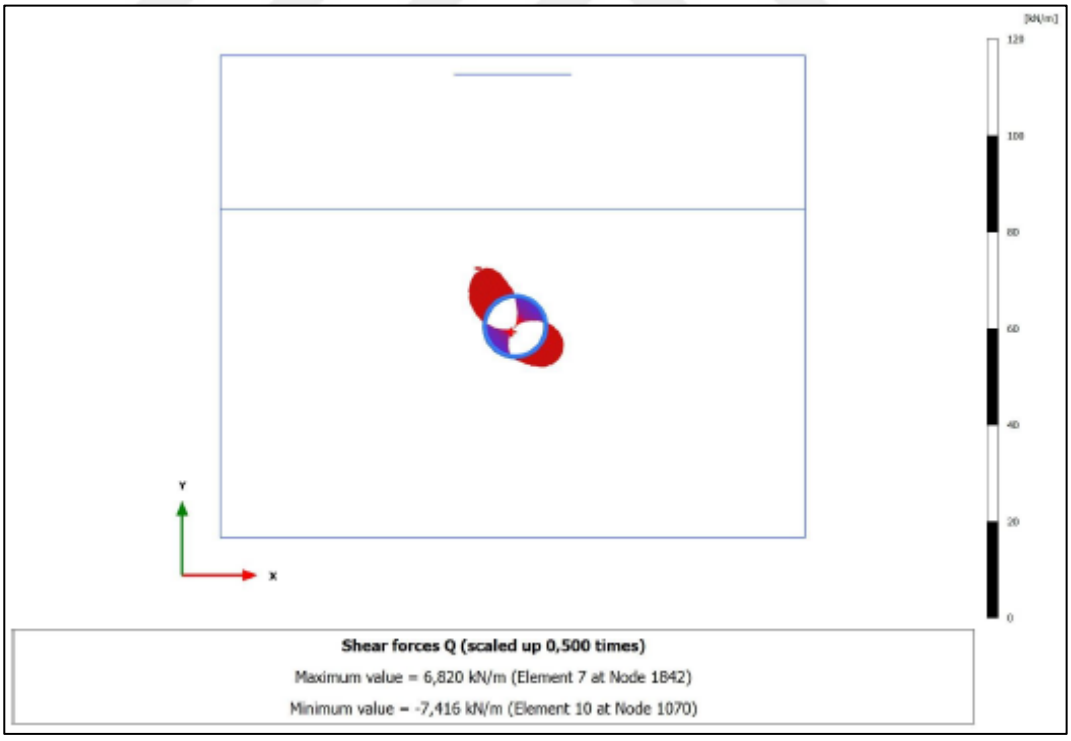
Şekil E.13. Üçüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (25. m)



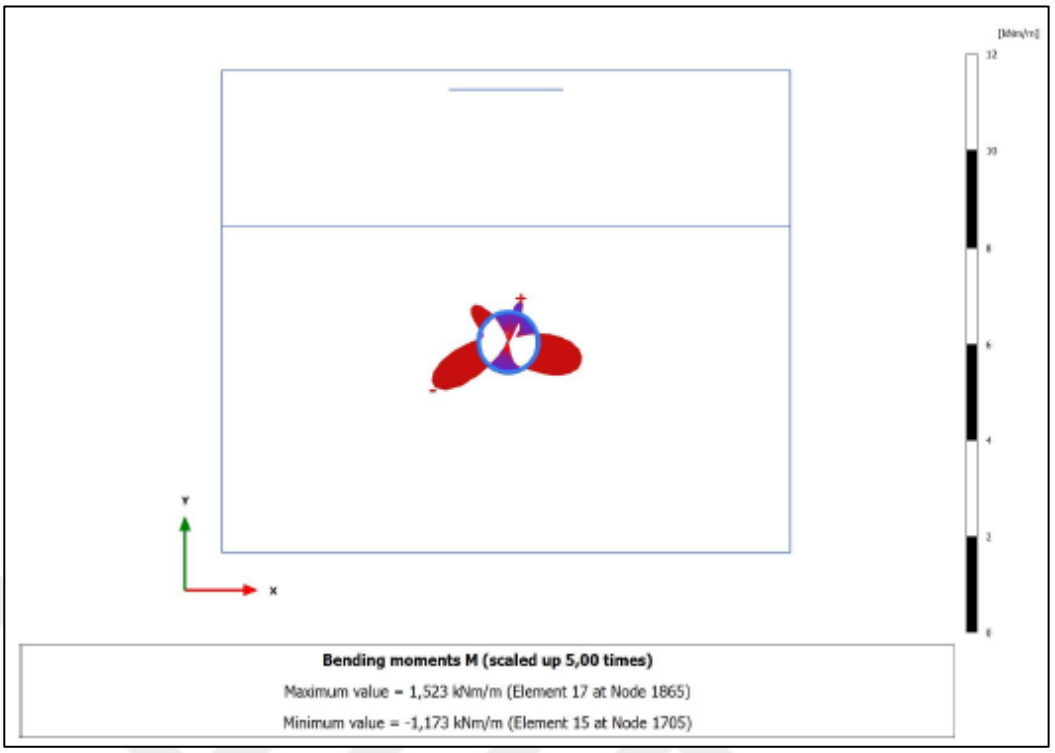
Şekil E.14. Dördüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (25. m)



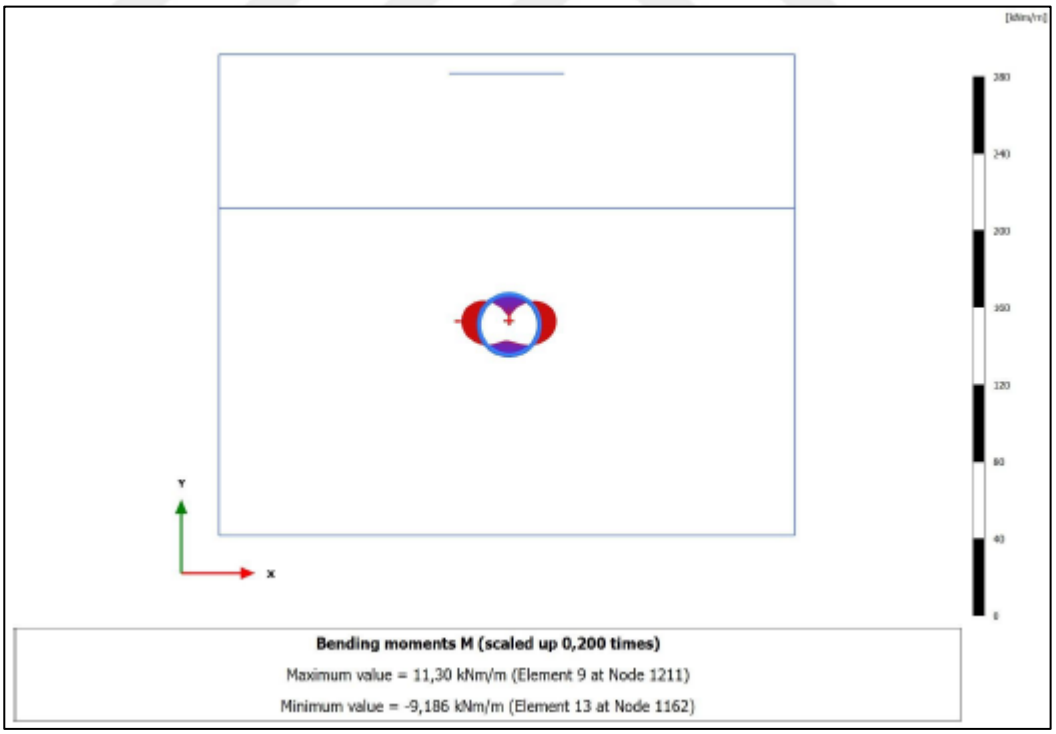
Şekil E.15. Üçüncü durum için kesme kuvveti değerleri (25. m)



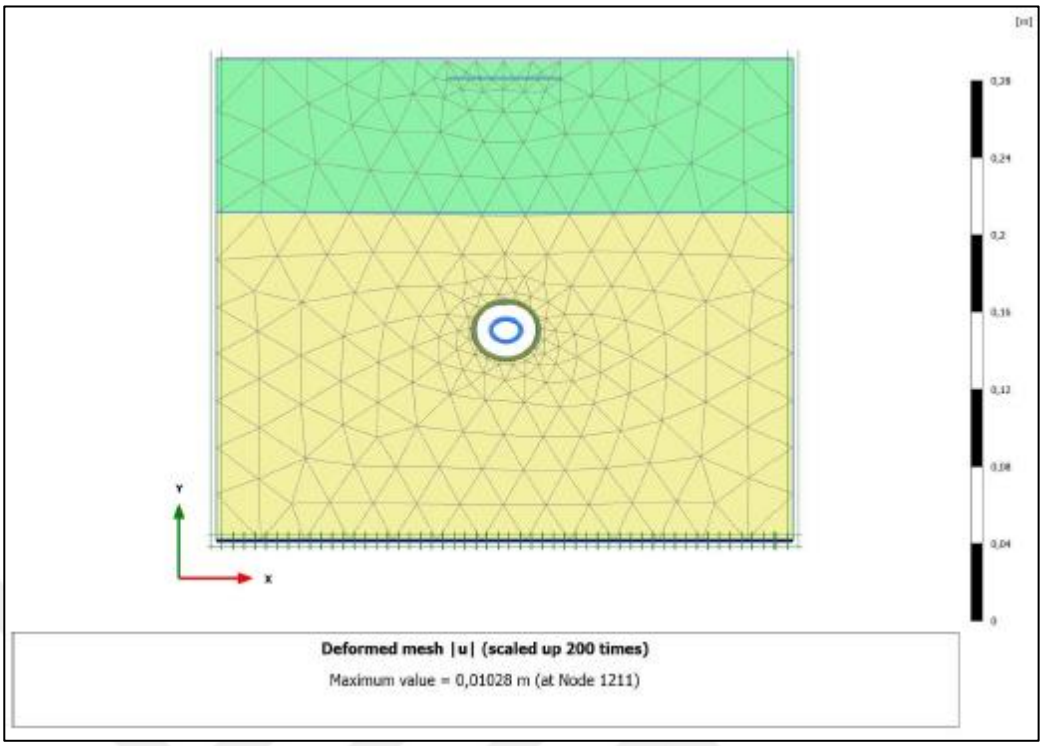
Şekil E.16. Dördüncü durum için kesme kuvveti değerleri (25. m)



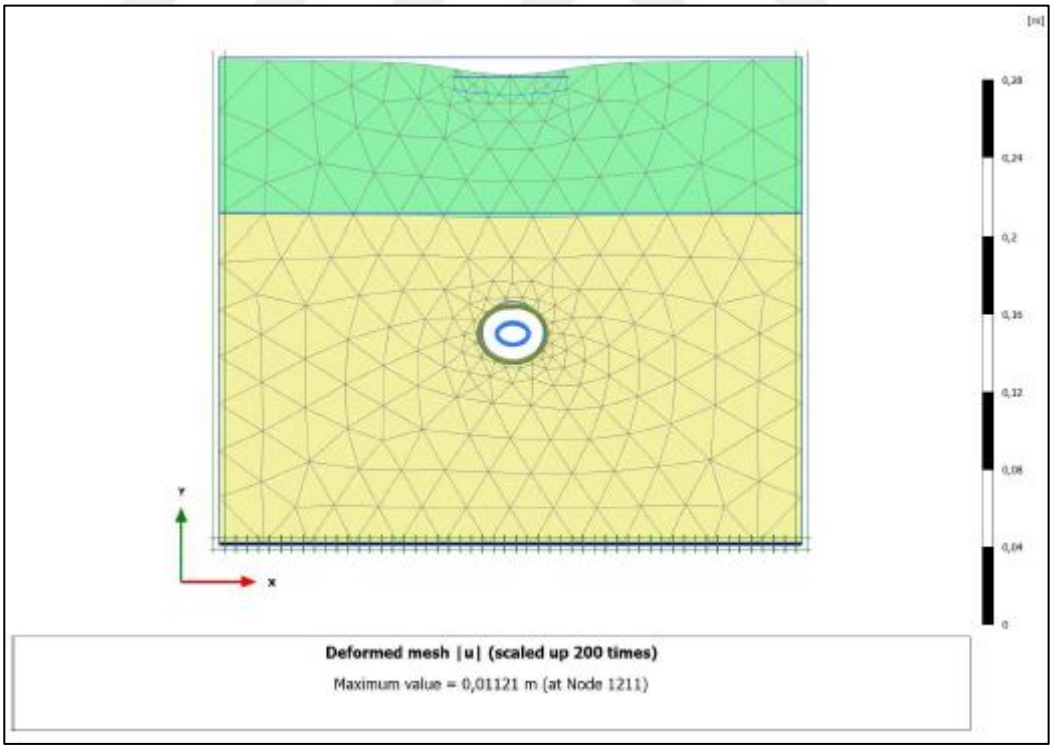
Şekil E.17. Üçüncü durum için eğilme momenti değerleri (25. m)



Şekil E.18. Dördüncü durum için eğilme momenti değerleri (25. m)

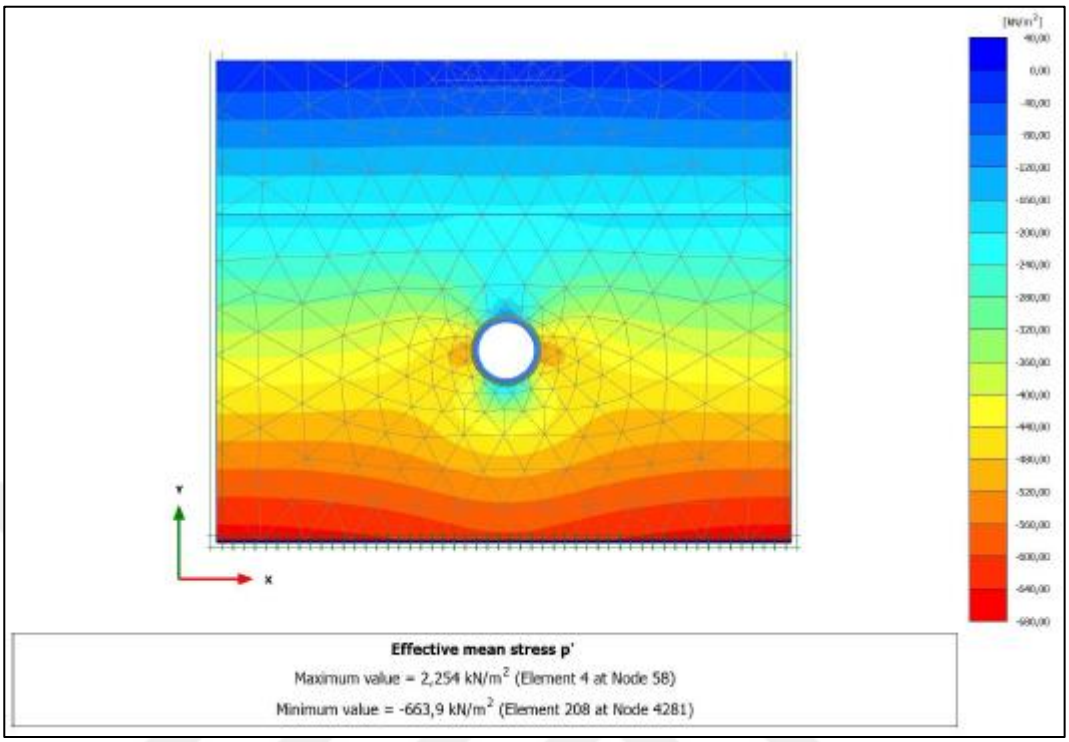


Şekil E.19. Üçüncü durum için deforme ağ (25. m)

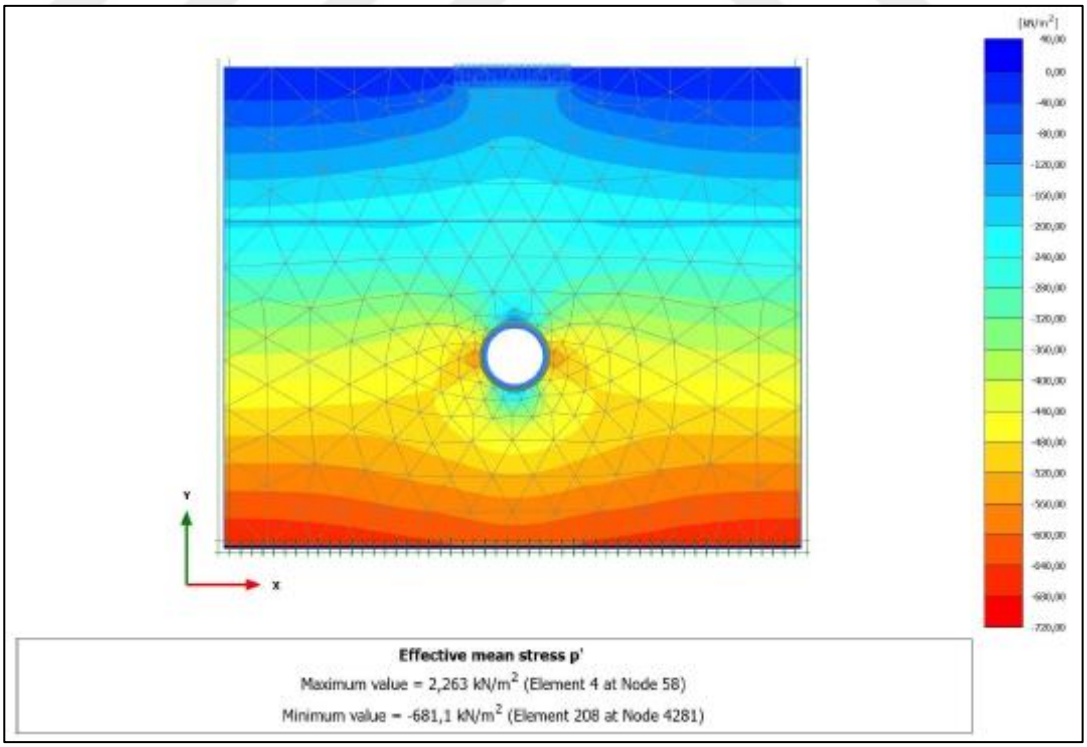


Şekil E.20. Dördüncü durum için deforme ağ (25. m)

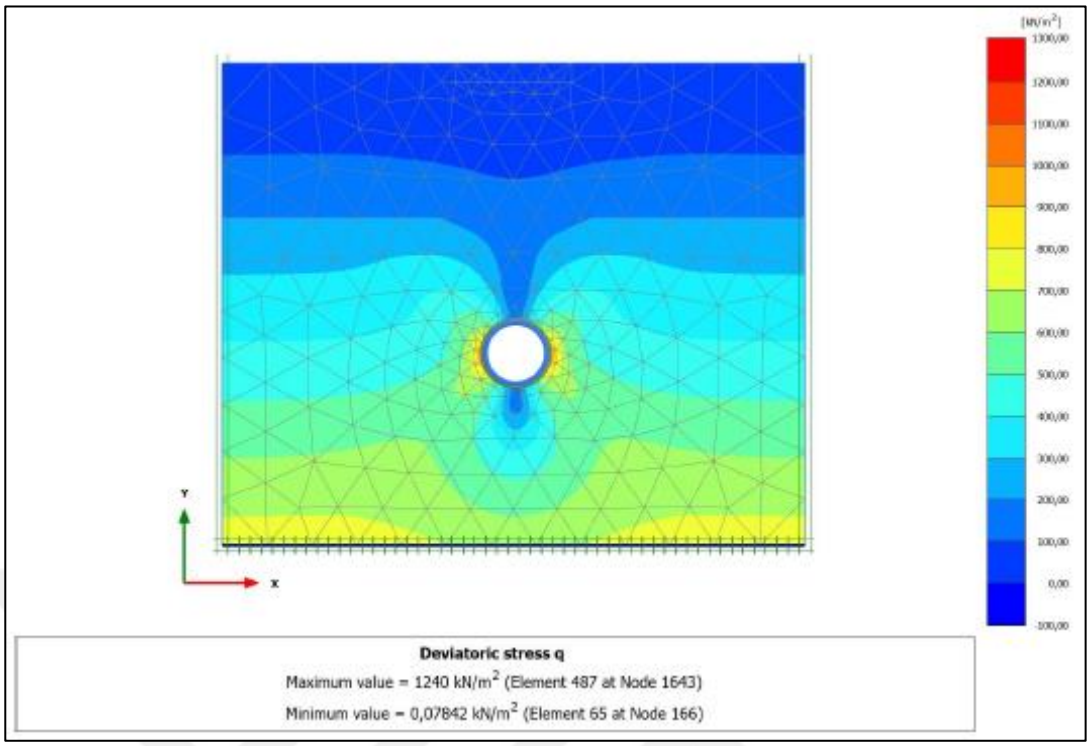
Ek-F: 27 Metre Derinlik İçin Program Analiz Raporu



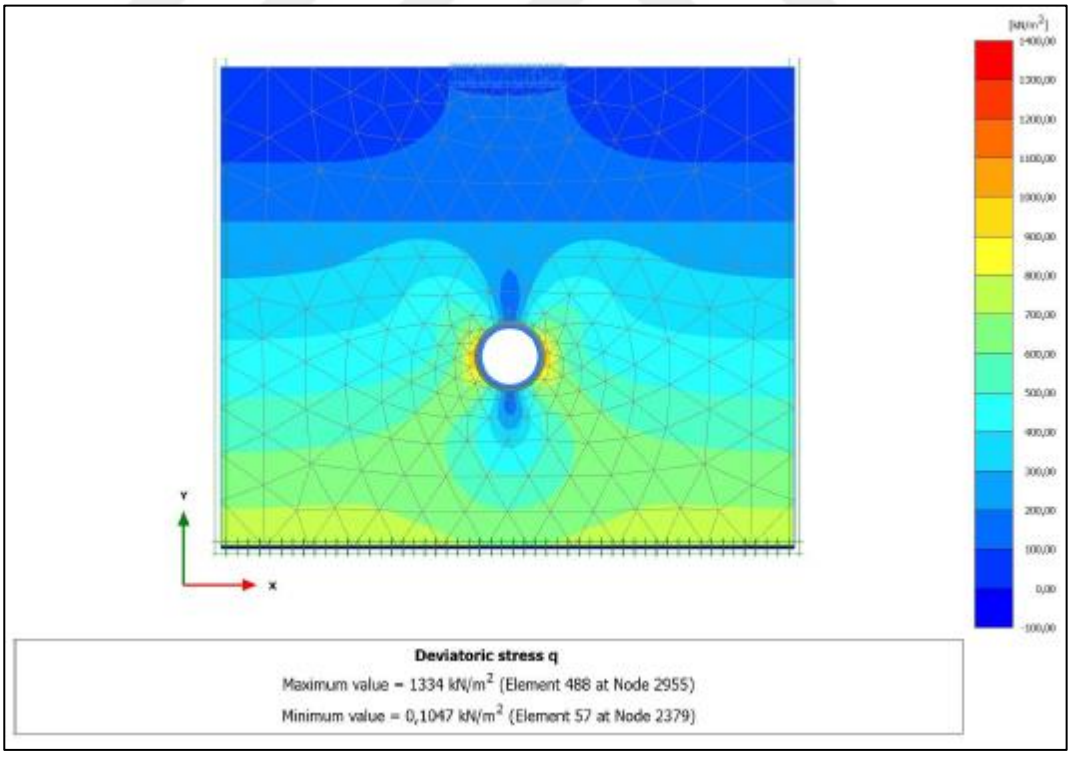
Şekil F.1. İlk durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (27. m)



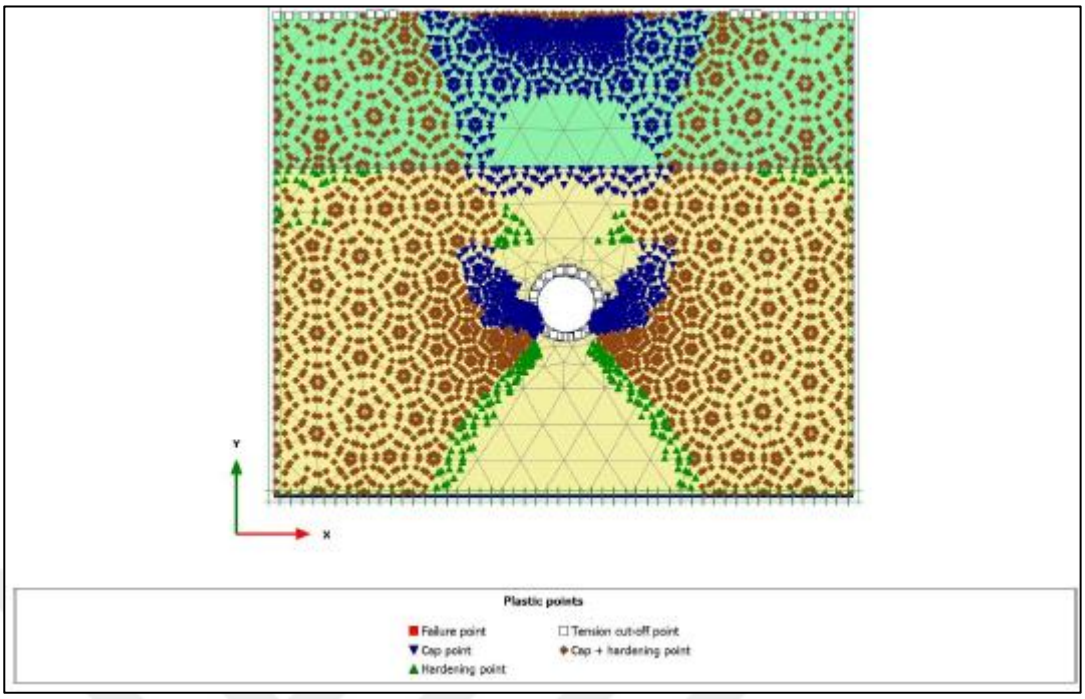
Şekil F.2. İkinci durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (27. m)



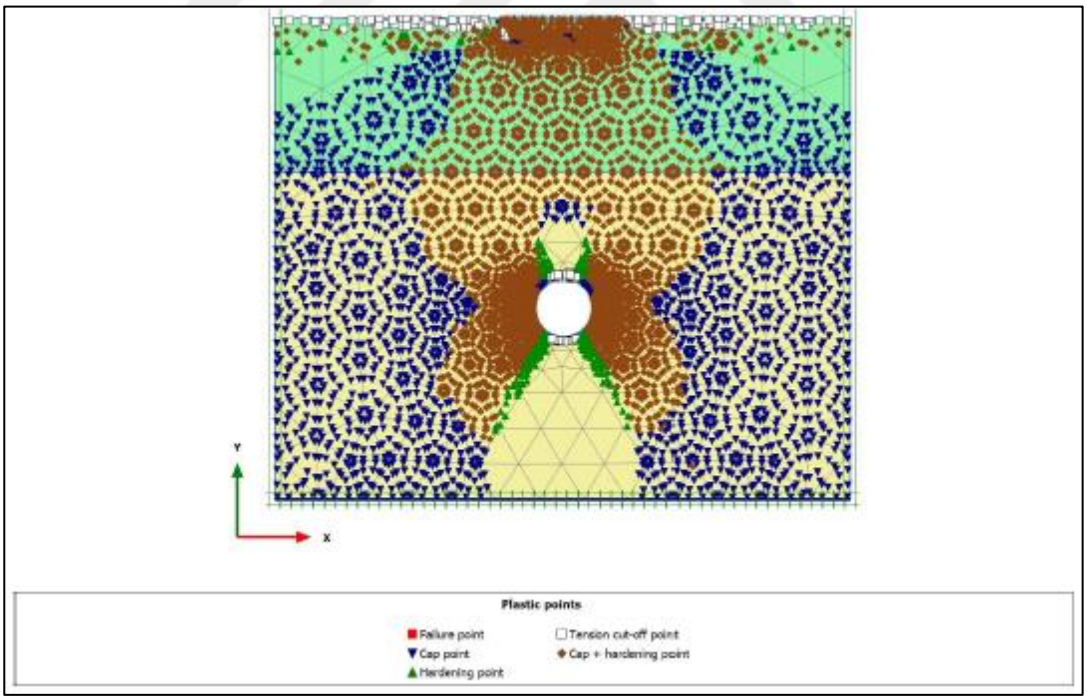
Şekil F.3. İlk durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (27. m)



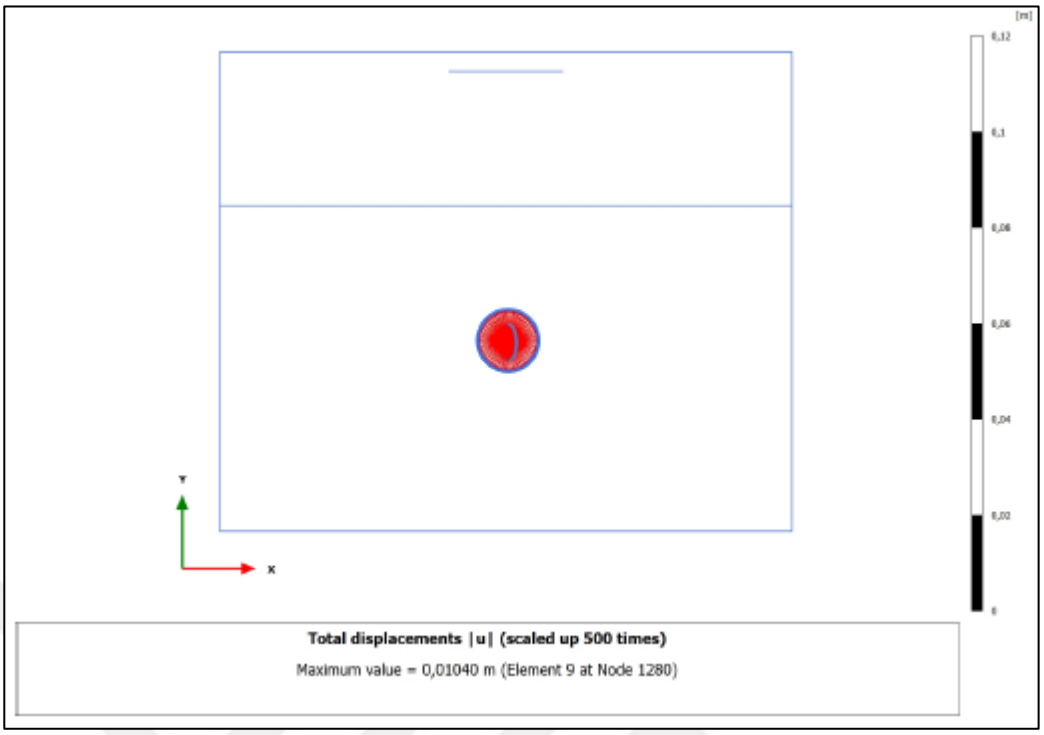
Şekil F.4. İkinci durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (27. m)



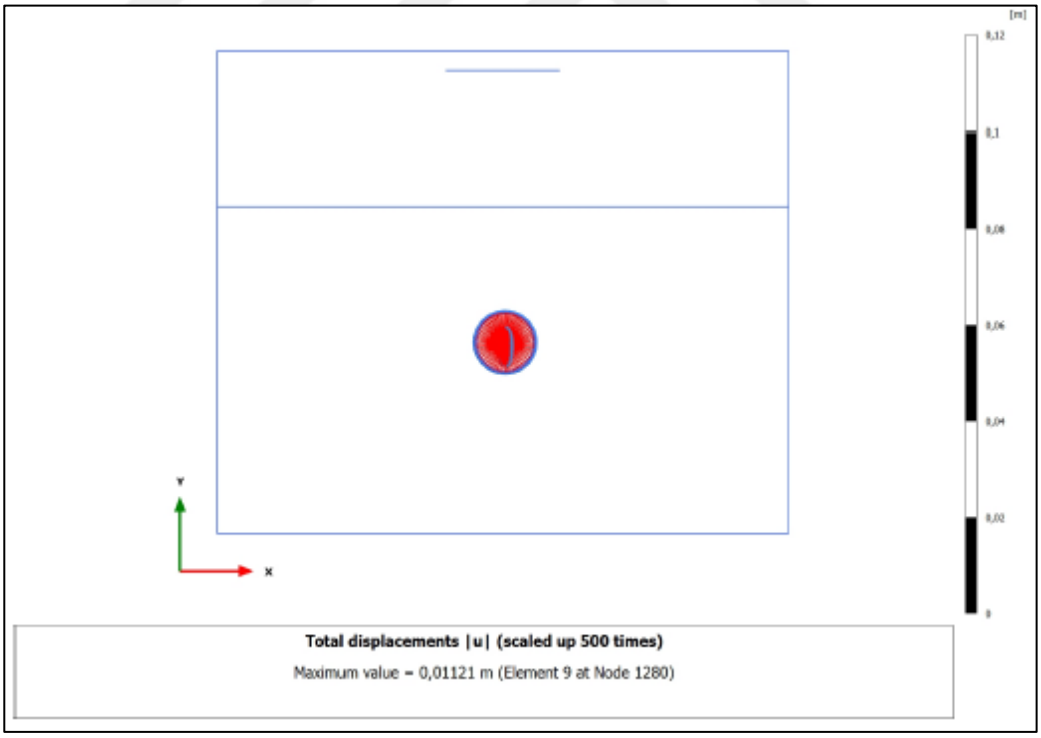
Şekil F.5. İlk durum için plastik noktalar (27. m)



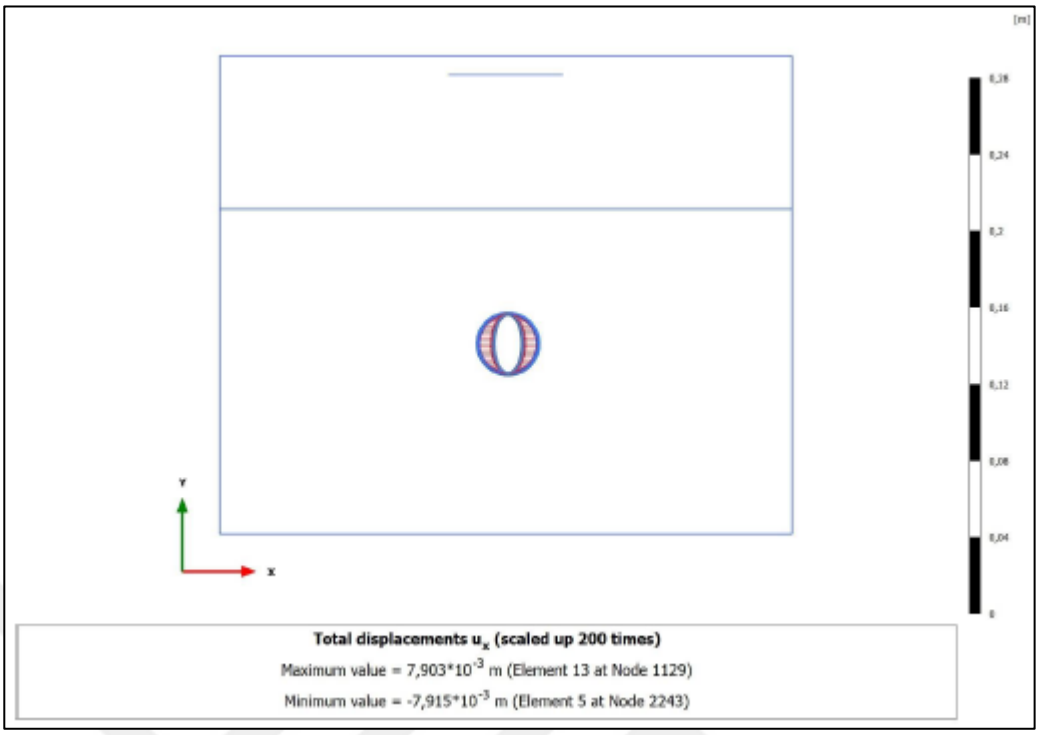
Şekil F.6. İkinci durum için plastik noktalar (27. m)



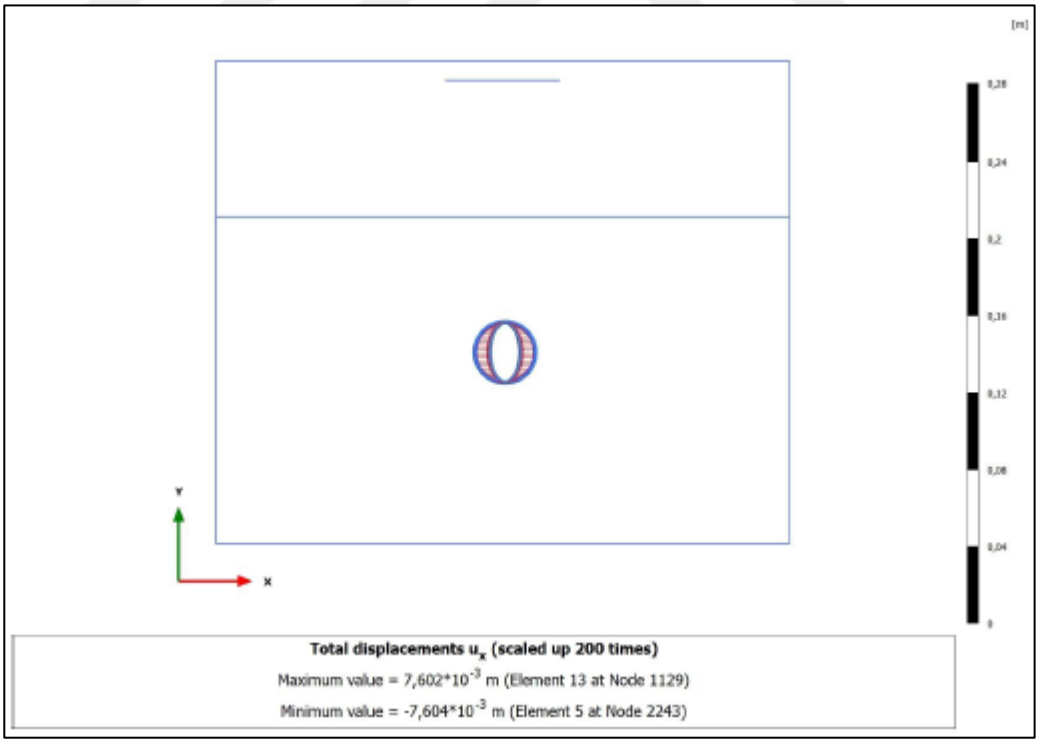
Şekil F.7. Üçüncü durum için toplam yer değiştirme (27. m)



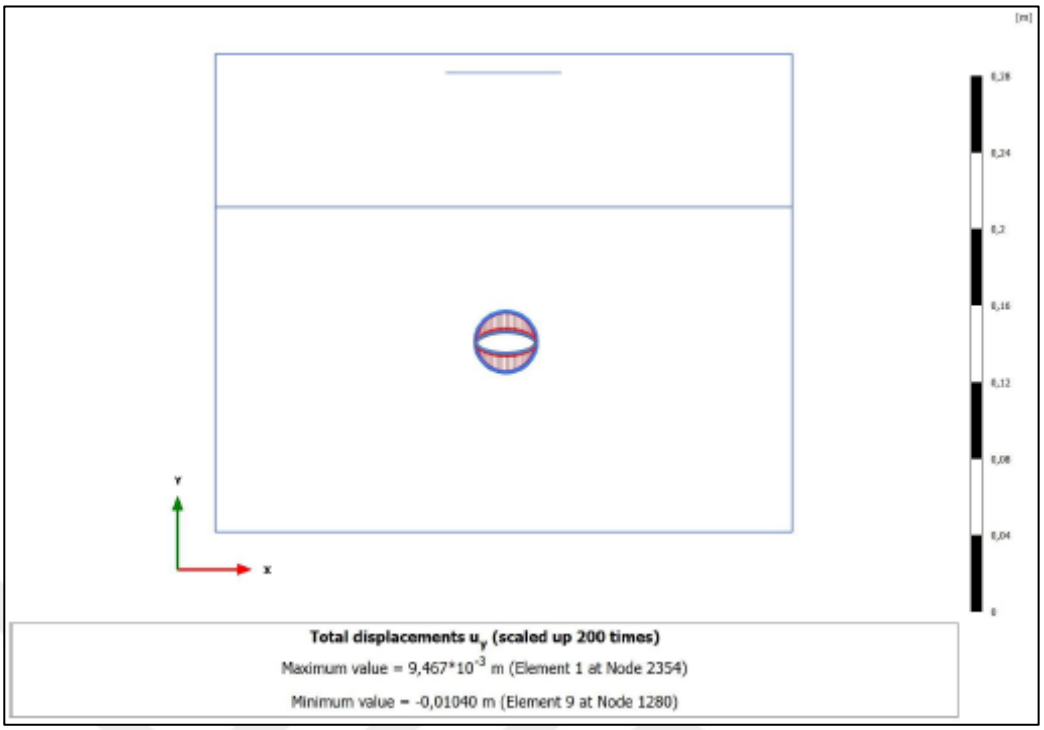
Şekil F.8. Dördüncü durum için toplam yer değiştirme (27. m)



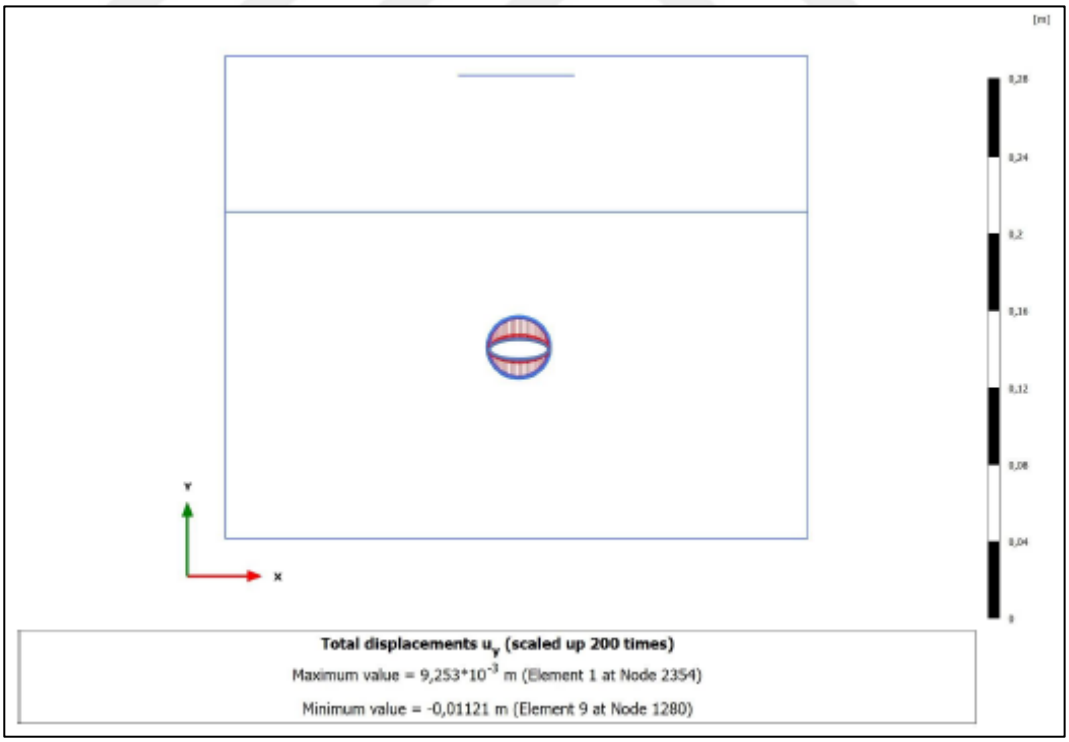
Şekil F.9. Üçüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (27. m)



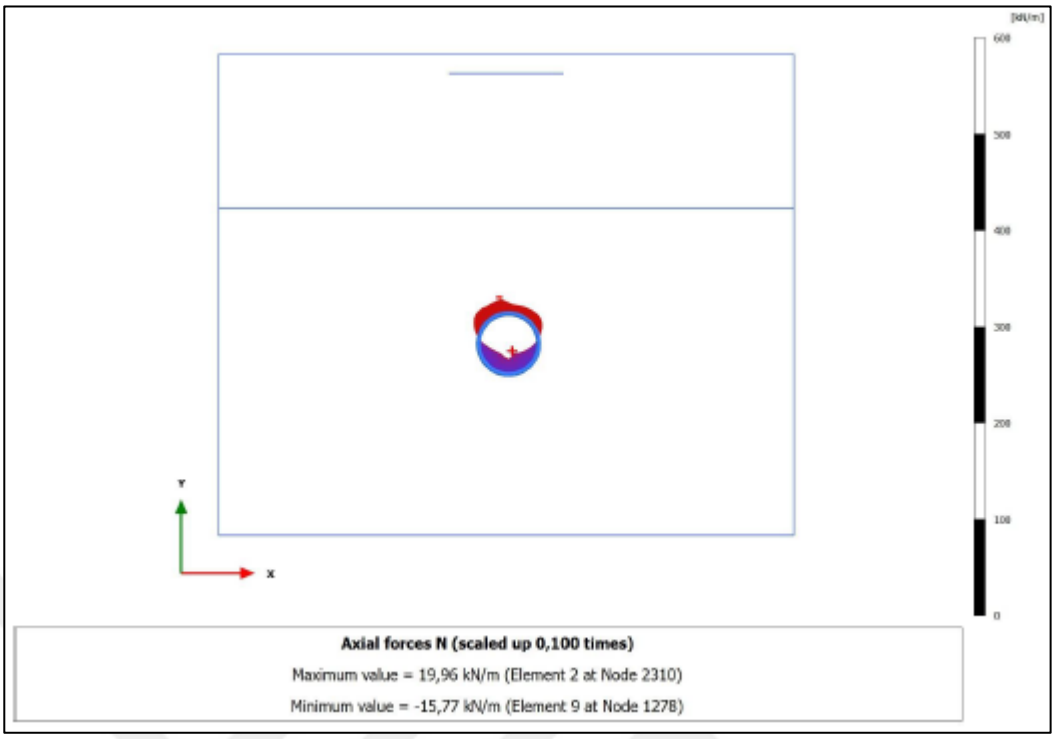
Şekil F.10. Dördüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (27. m)



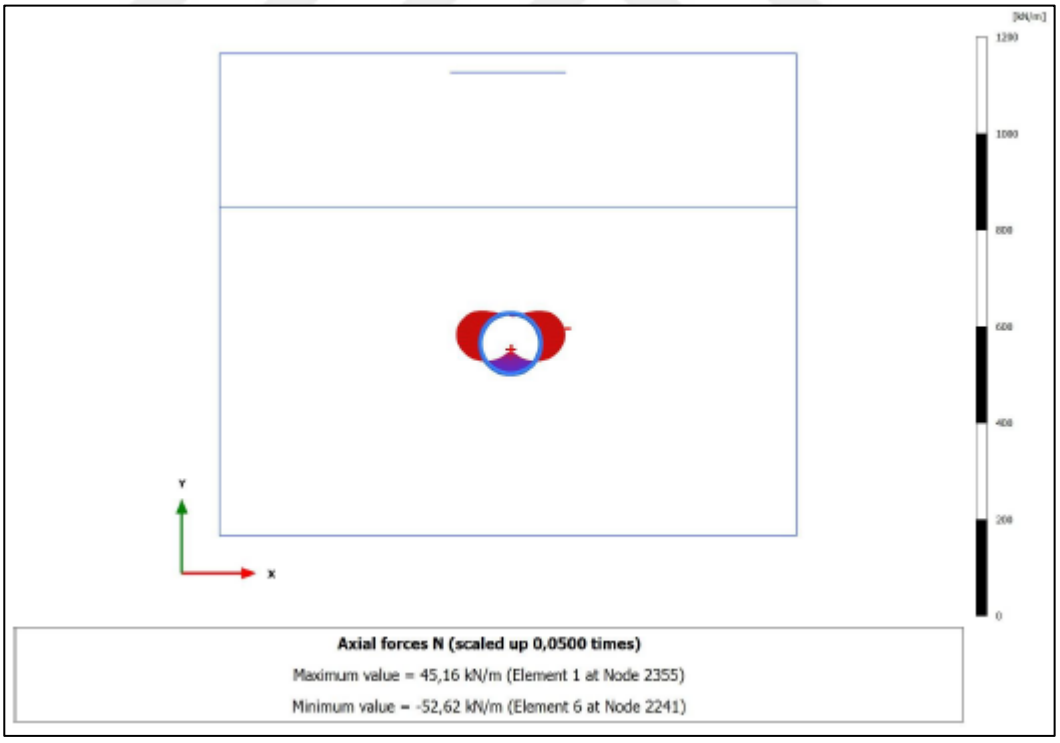
Şekil F.11. Üçüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (27. m)



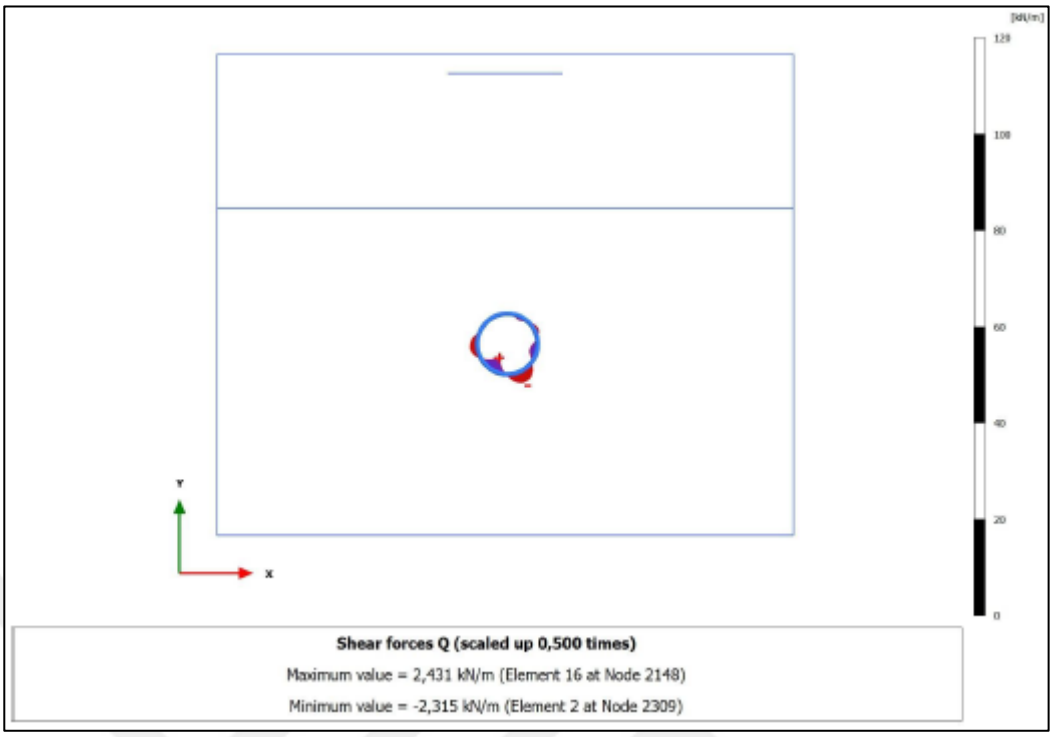
Şekil F.12. Dördüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (27. m)



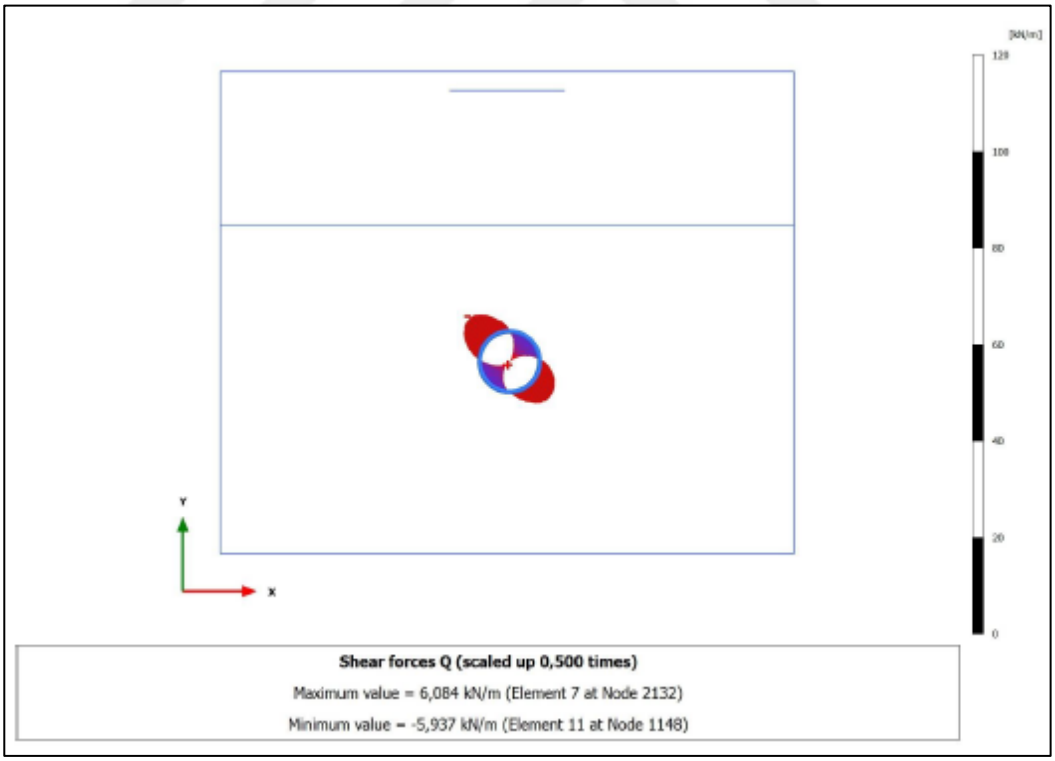
Şekil F.13. Üçüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (27. m)



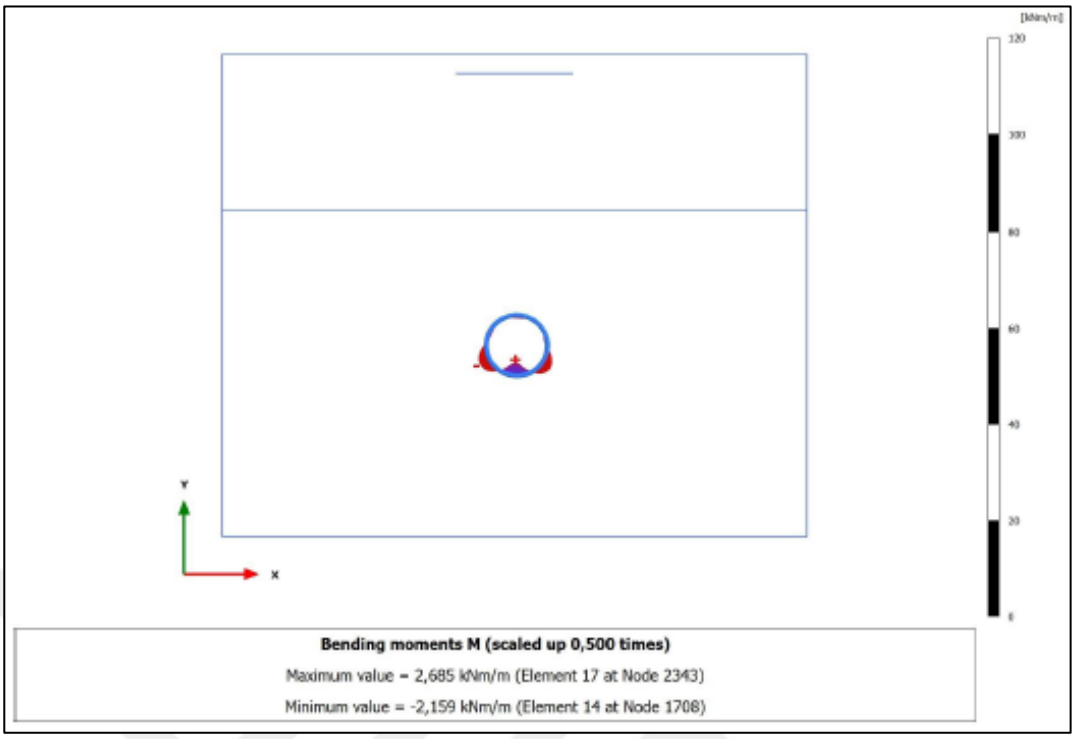
Şekil F.14. Dördüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (27. m)



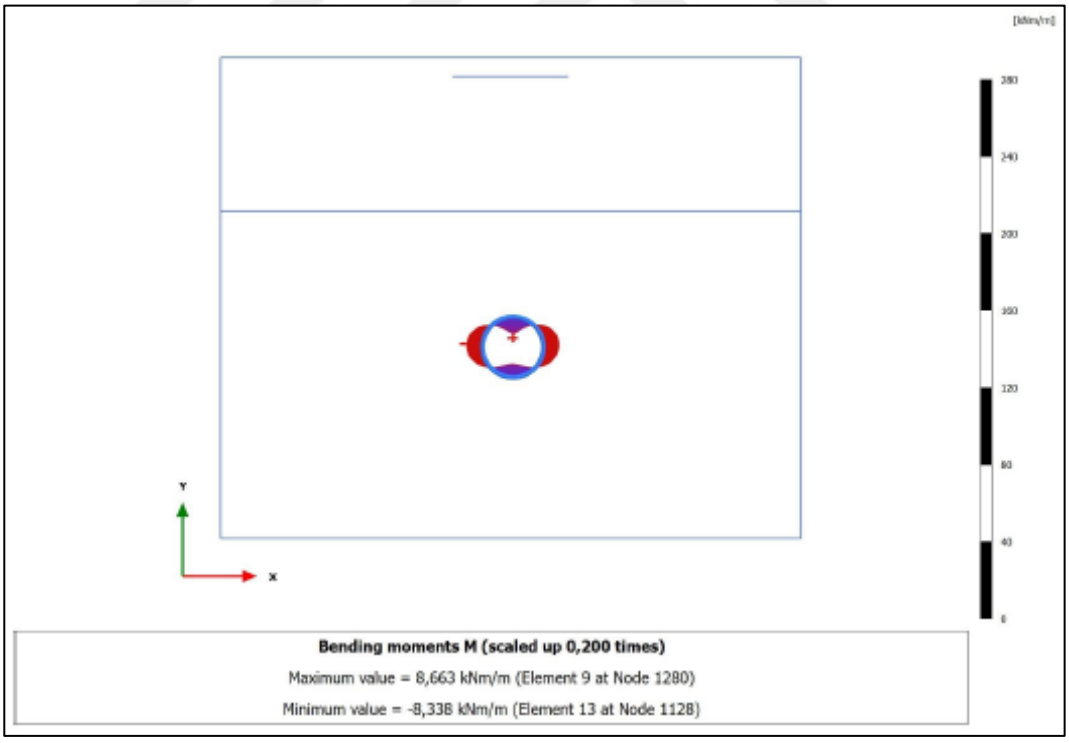
Şekil F.15. Üçüncü durum için kesme kuvveti değerleri (27. m)



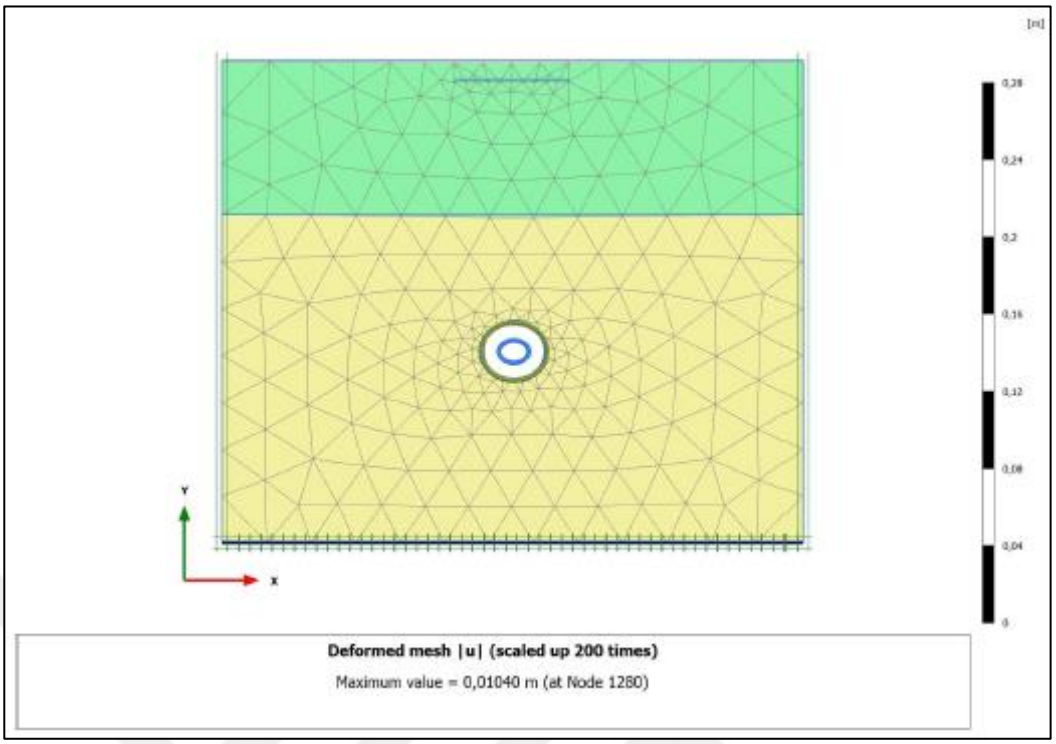
Şekil F.16. Dördüncü durum için kesme kuvveti değerleri (27. m)



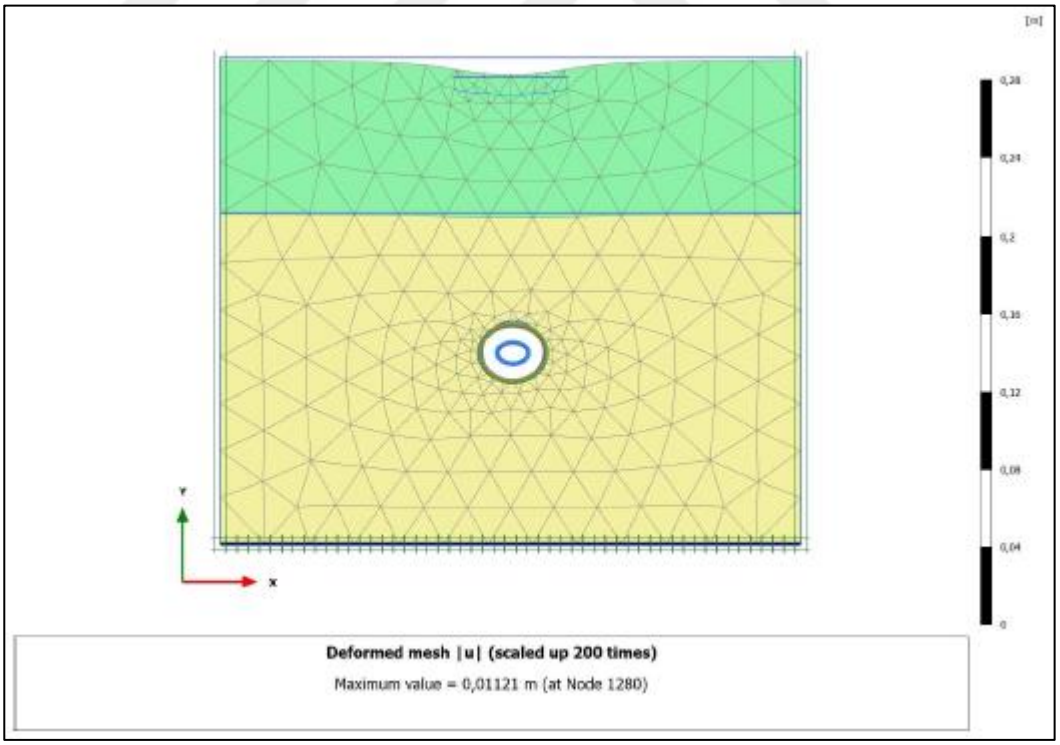
Şekil F.17. Üçüncü durum için eğilme momenti değerleri (27. m)



Şekil F.18. Dördüncü durum için eğilme momenti değerleri (27. m)

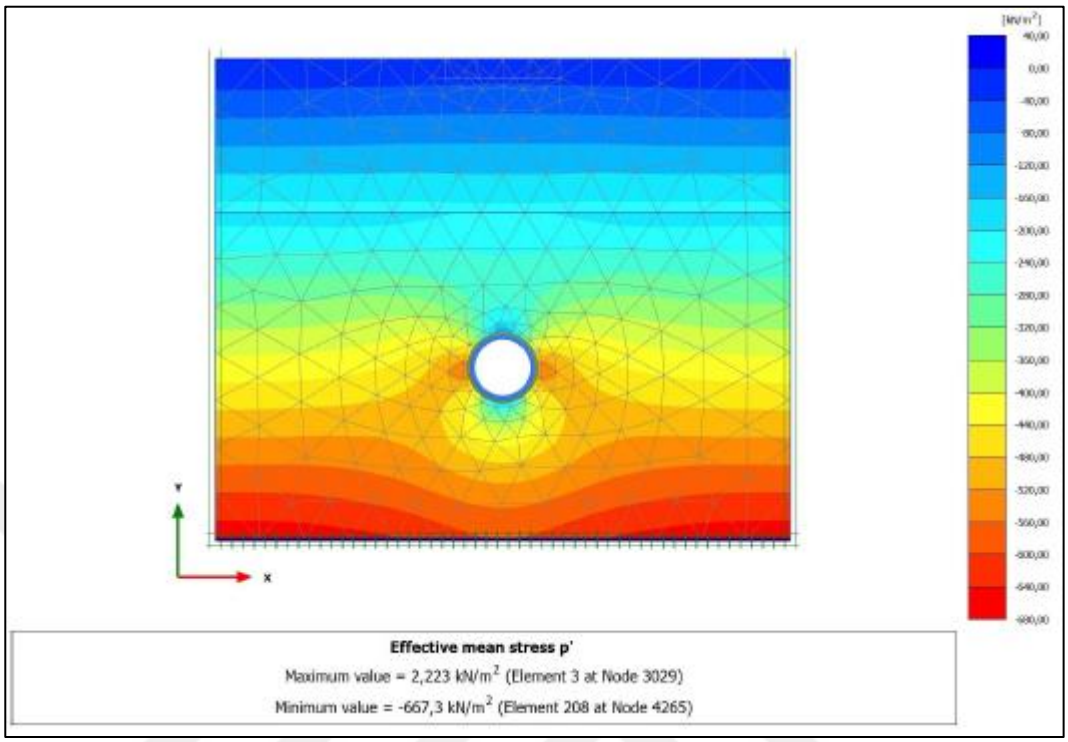


Şekil F.19. Üçüncü durum için deforme ağ (27. m)

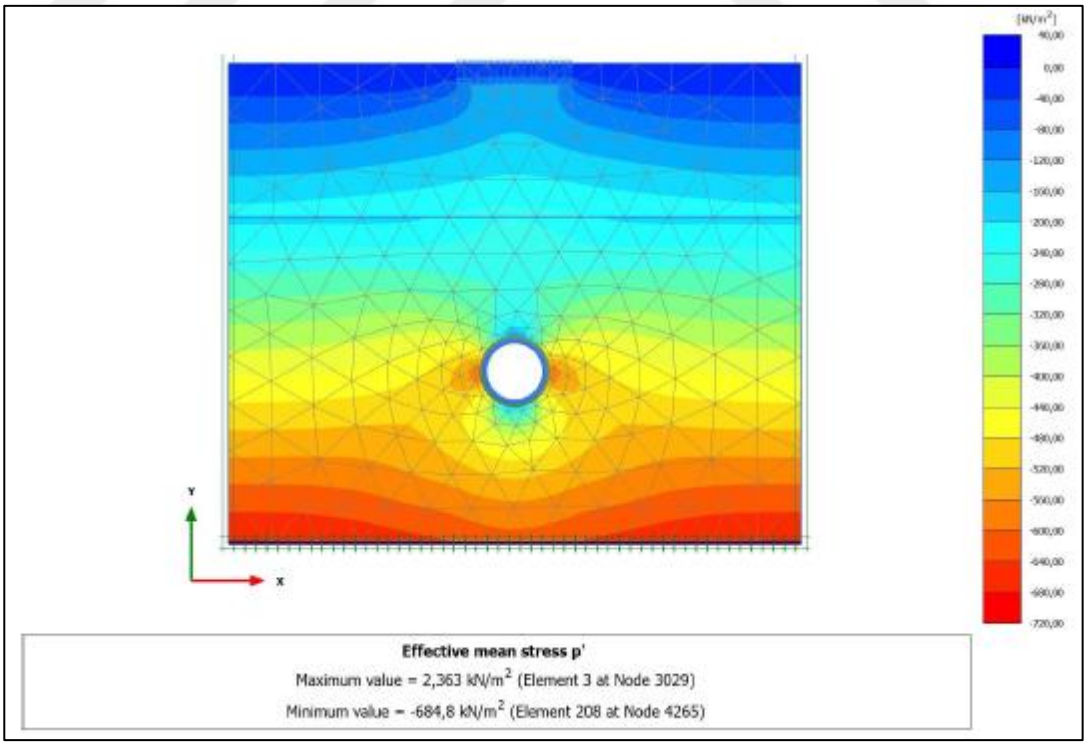


Şekil F.20. Dördüncü durum için deforme ağ (27. m)

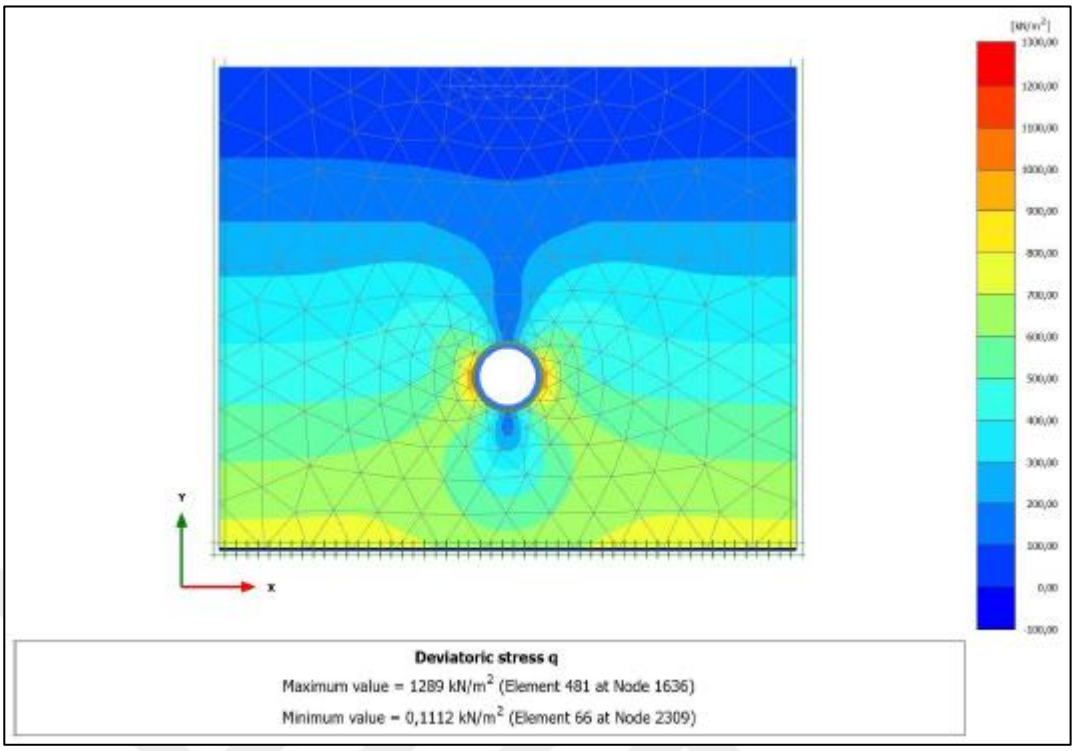
Ek-G: 29 Metre Derinlik İçin Program Analiz Raporu



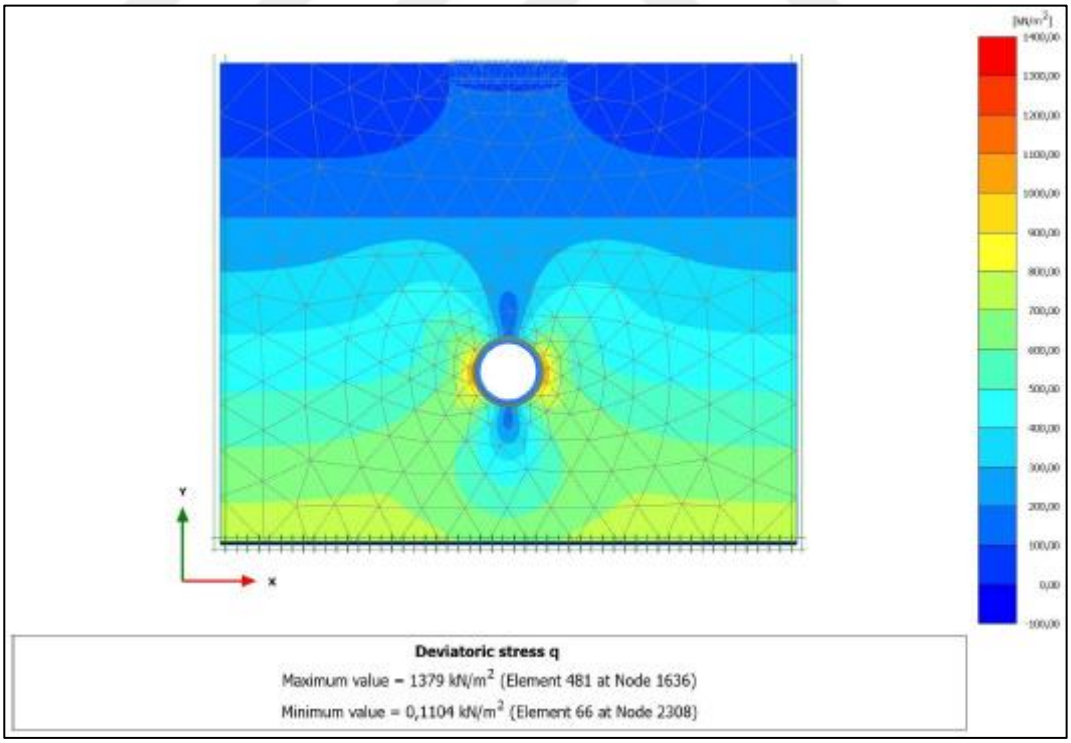
Şekil G.1. İlk durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (29. m)



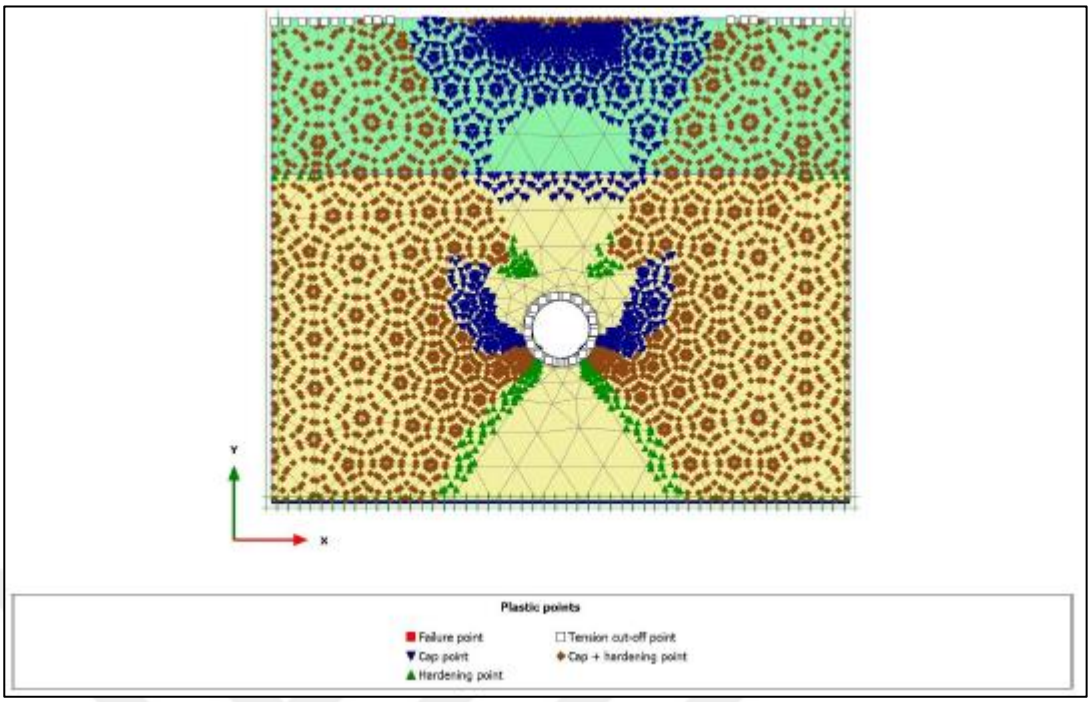
Şekil G.2. İkinci durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (29. m)



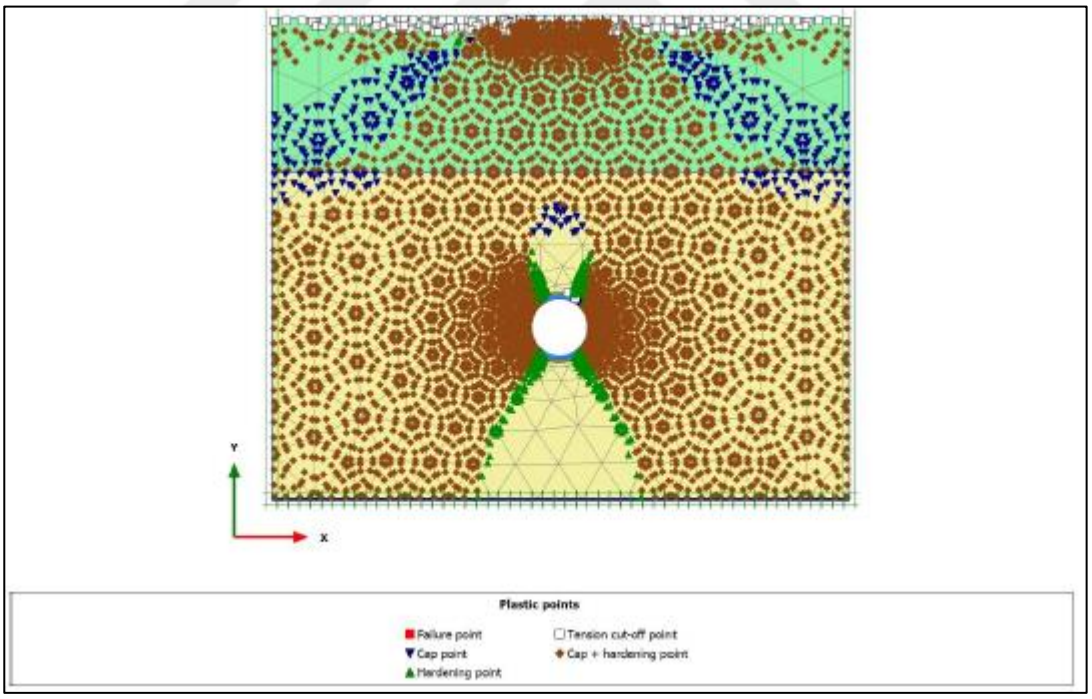
Şekil G.3. İlk durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (29. m)



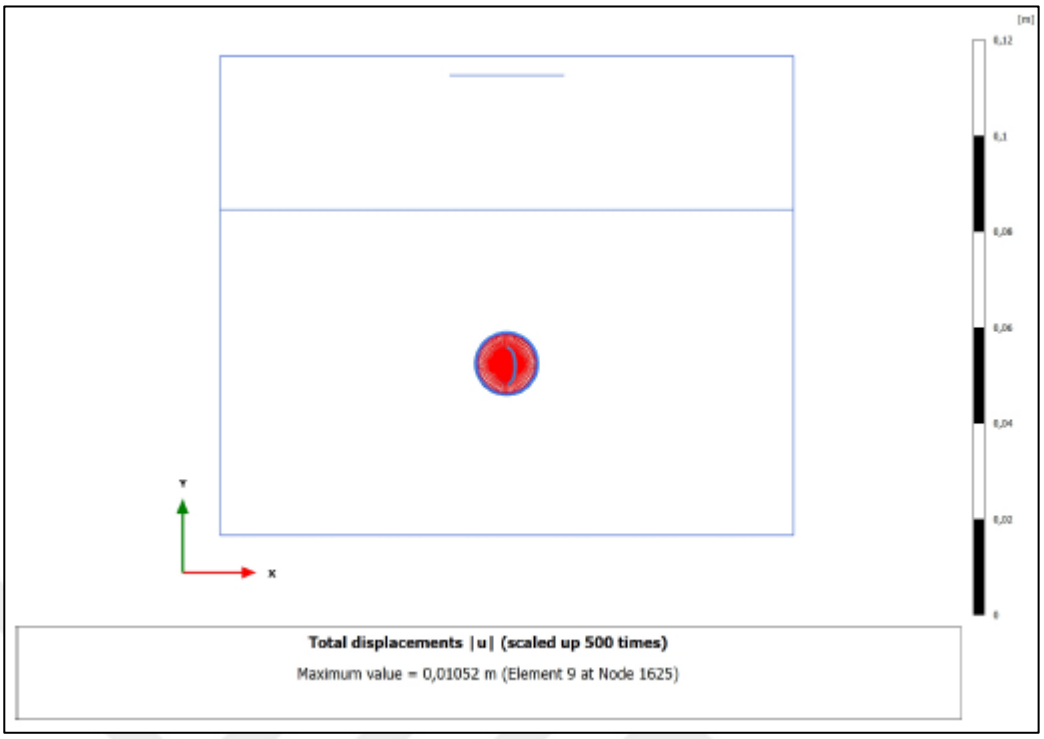
Şekil G.4. İkinci durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (29. m)



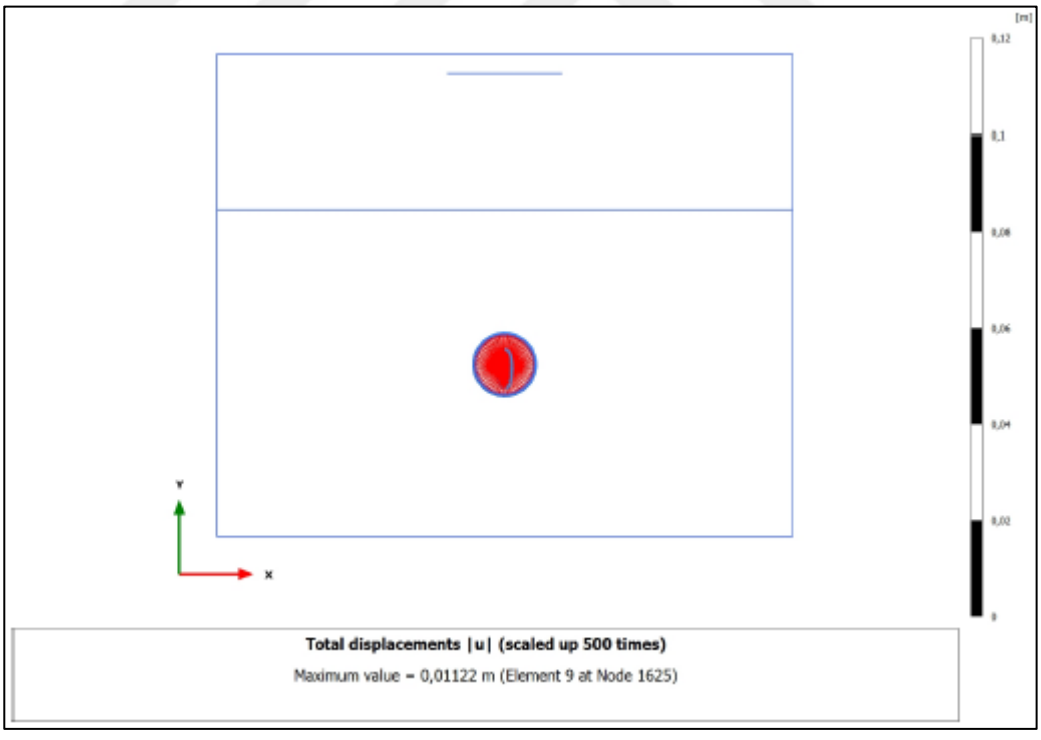
Şekil G.5. İlk durum için plastik noktalar (29. m)



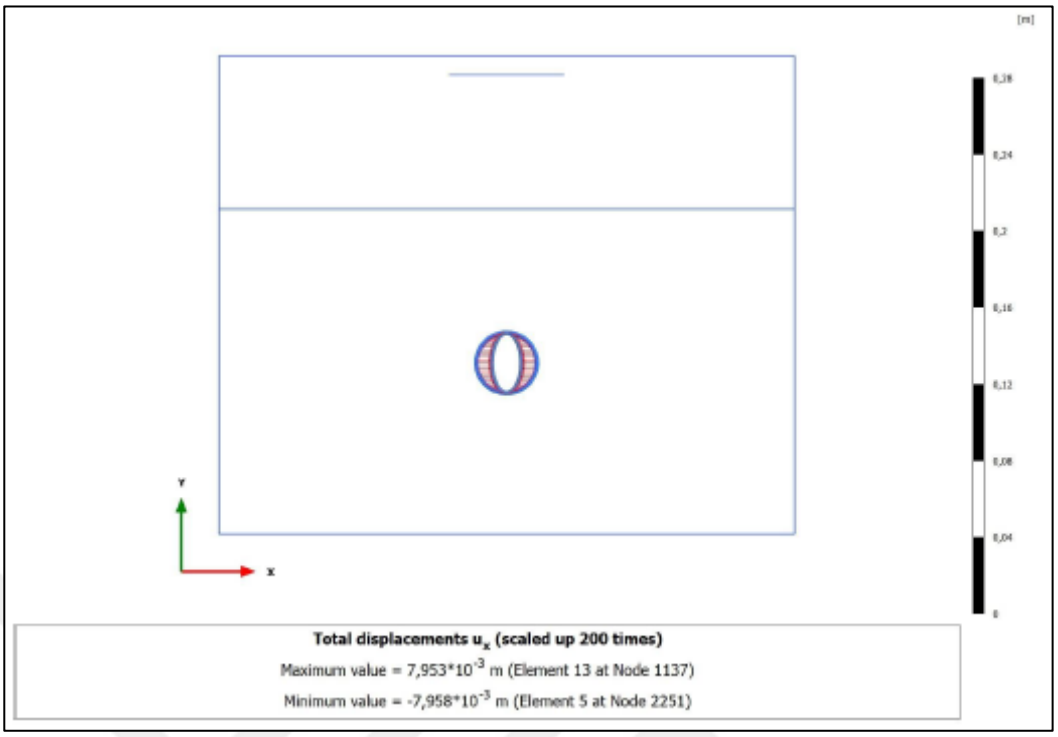
Şekil G.6. İkinci durum için plastik noktalar (29. m)



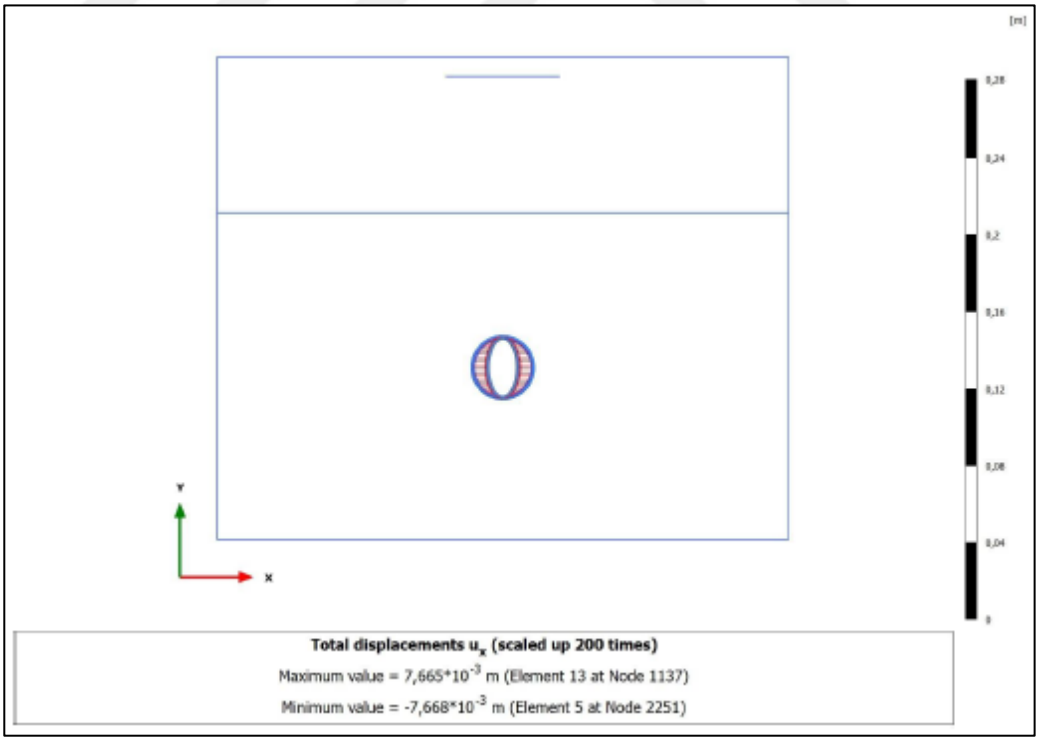
Şekil G.7. Üçüncü durum için toplam yer değiştirme (29. m)



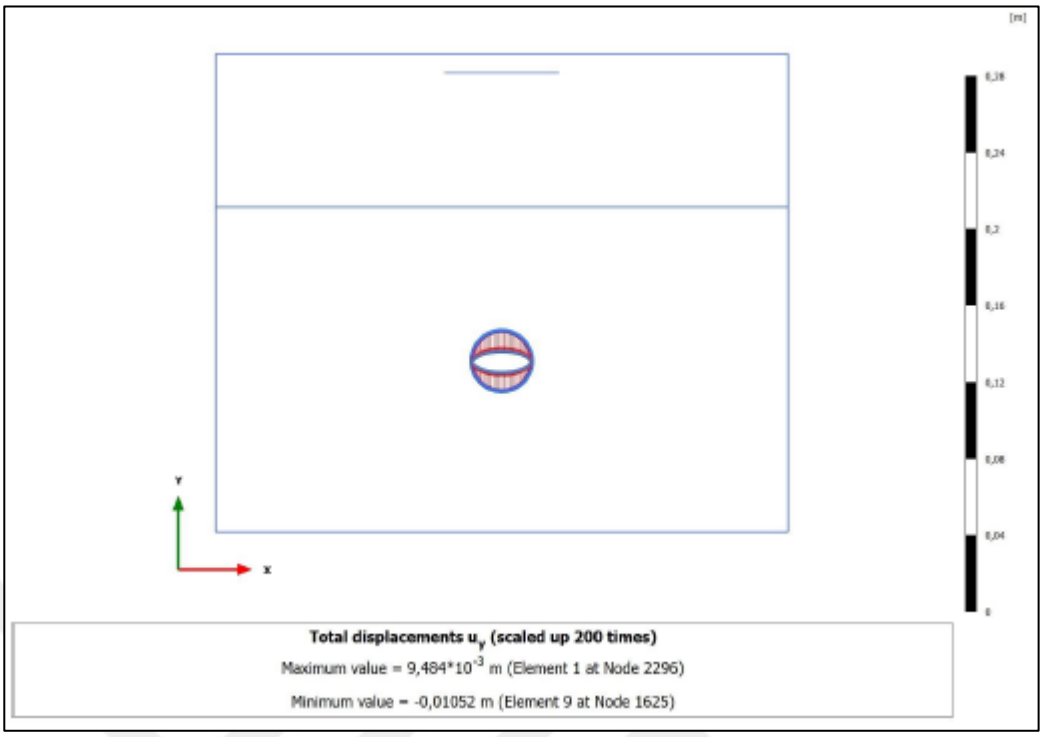
Şekil G.8. Dördüncü durum için toplam yer değiştirme (29. m)



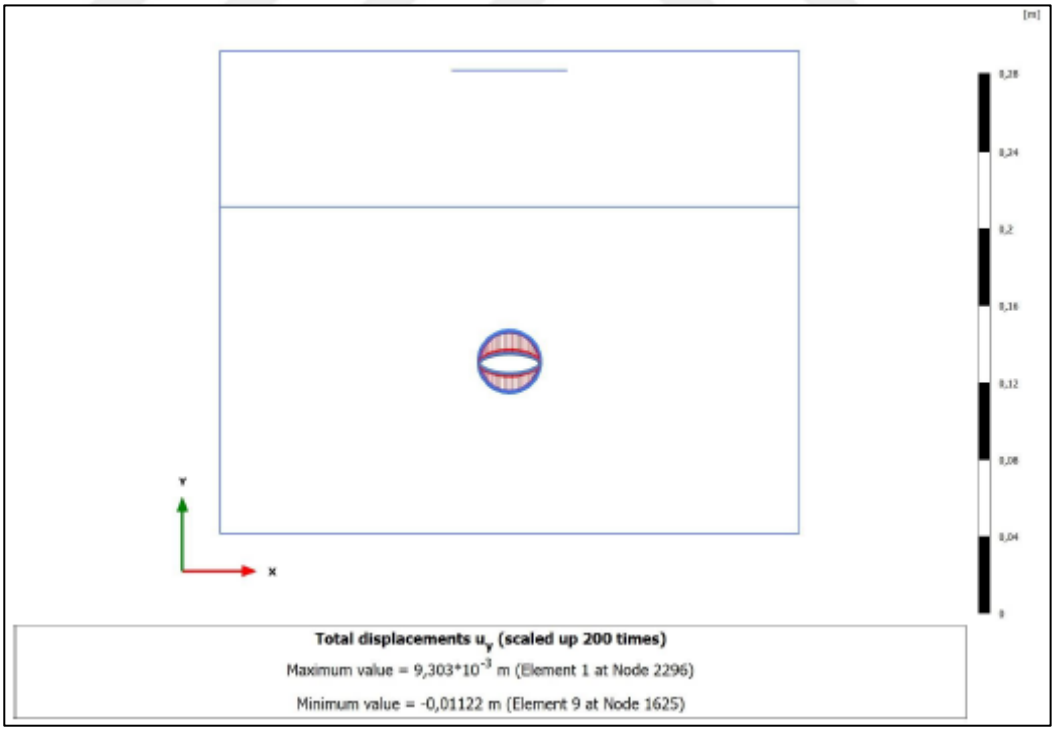
Şekil G.9. Üçüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (29. m)



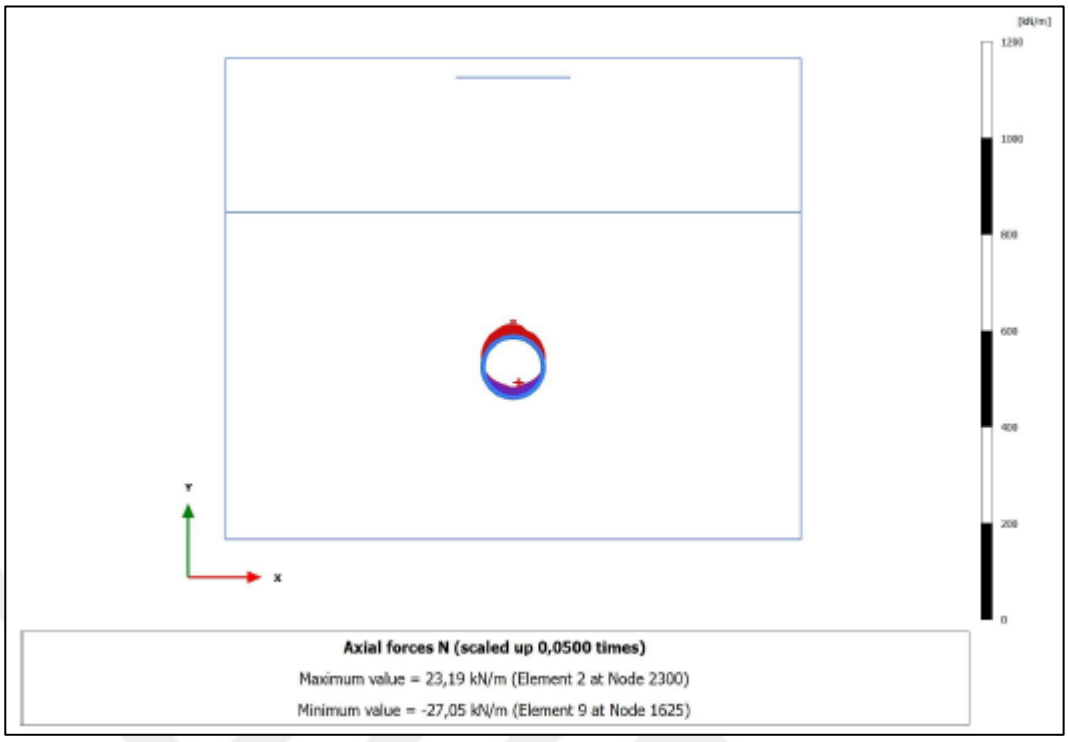
Şekil G.10. Dördüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (29. m)



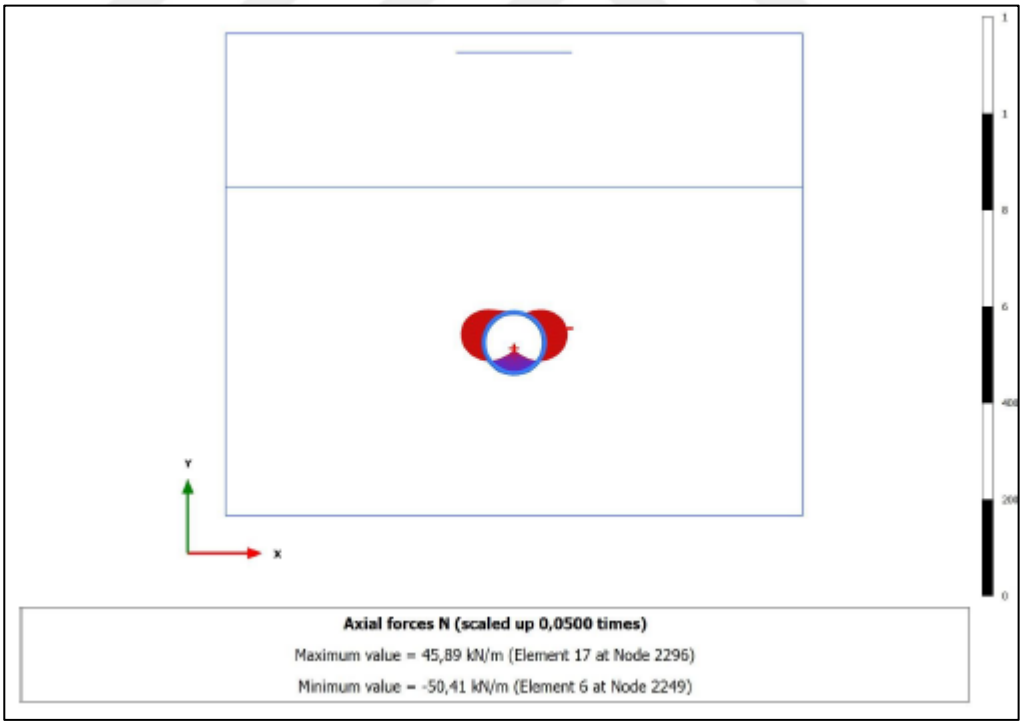
Şekil G.11. Üçüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (29. m)



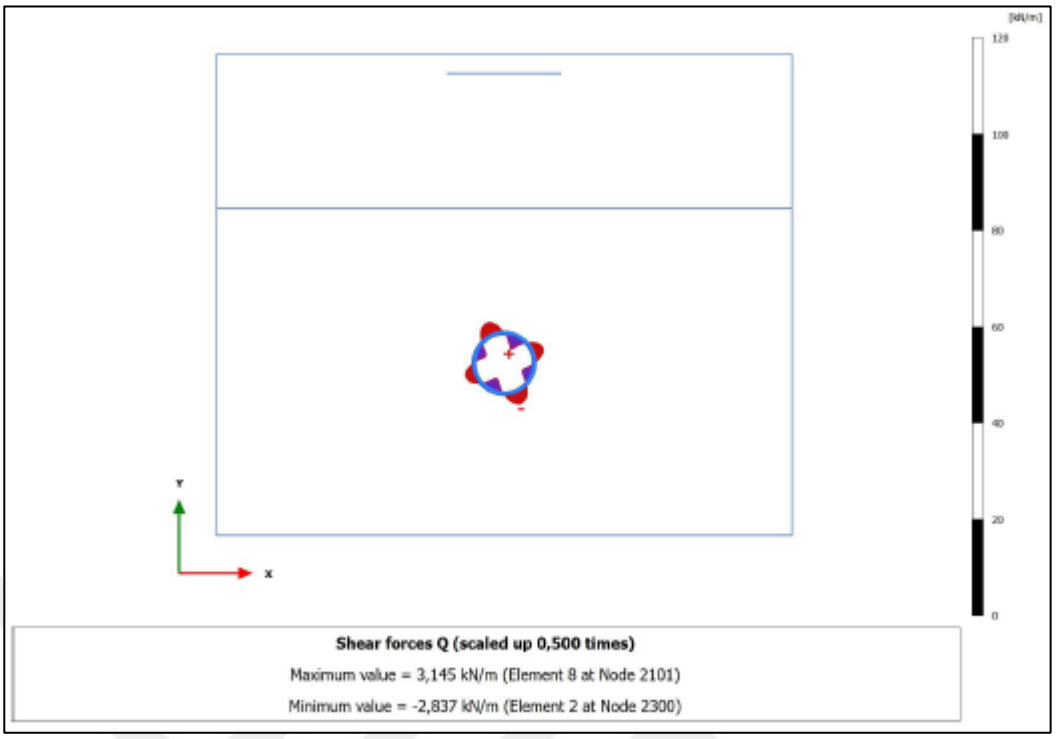
Şekil G.12. Dördüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (29. m)



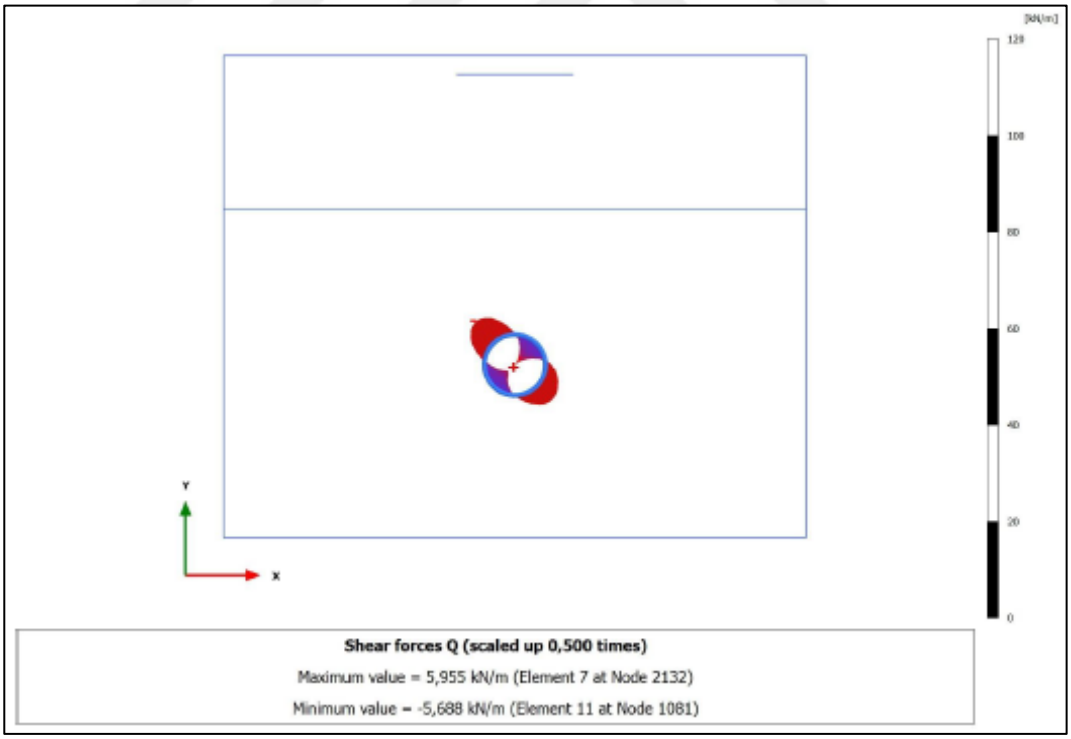
Şekil G.13. Üçüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (29. m)



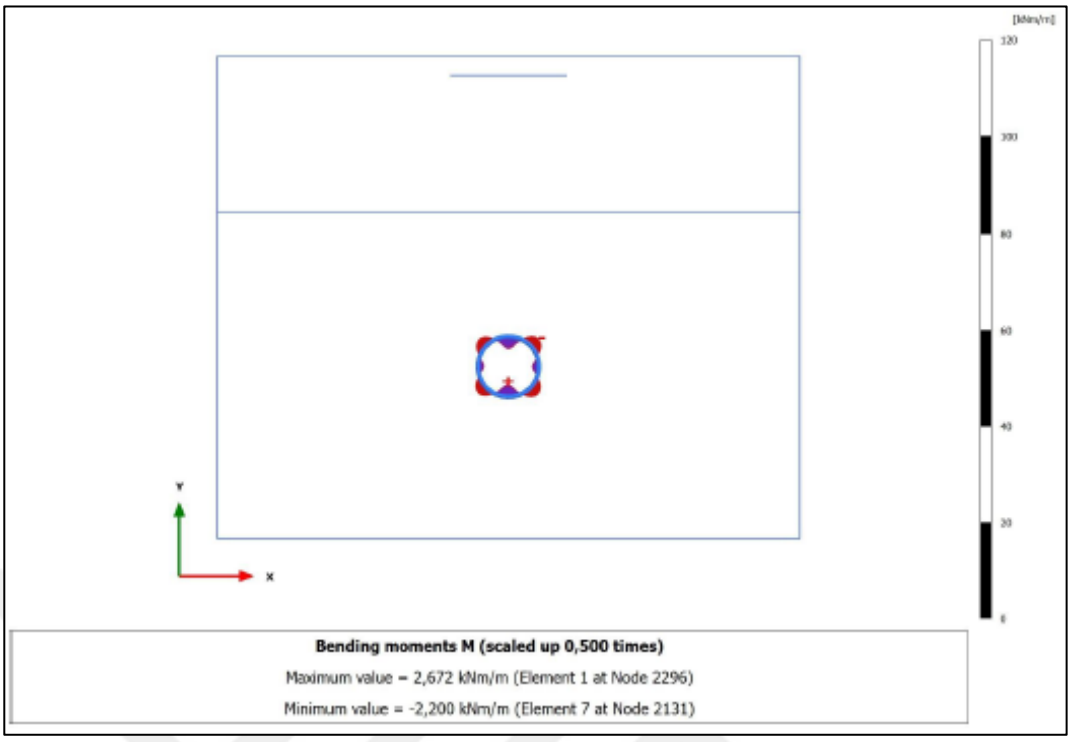
Şekil G.14. Dördüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (29. m)



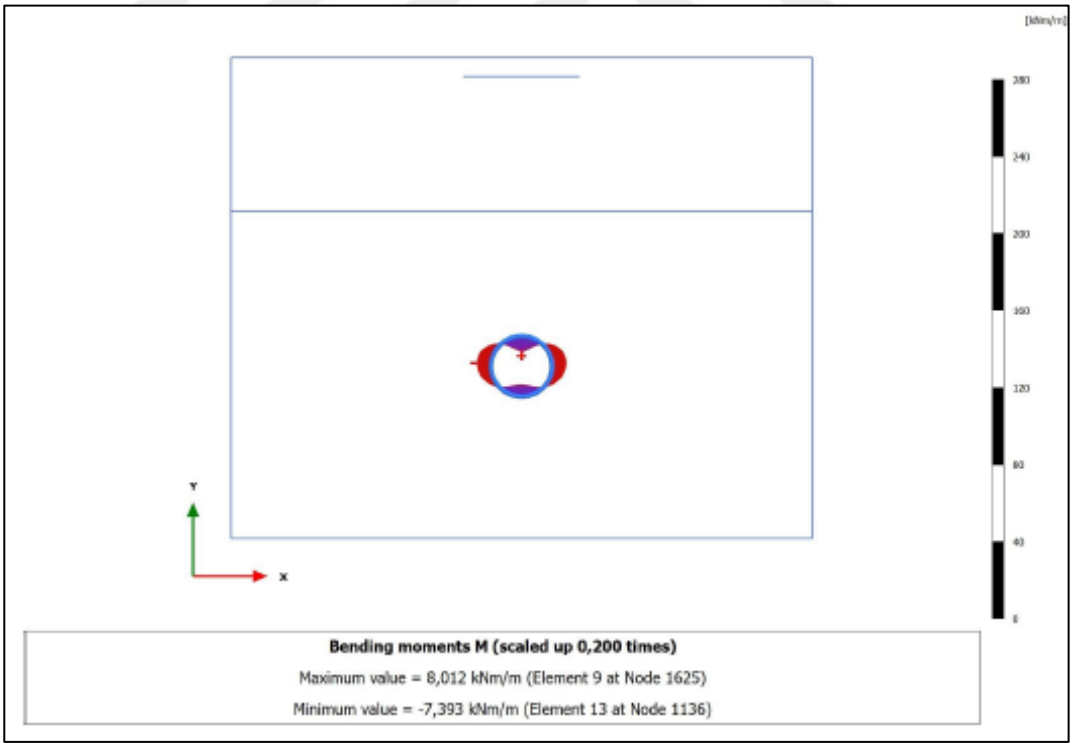
Şekil G.15. Üçüncü durum için kesme kuvveti değerleri (29. m)



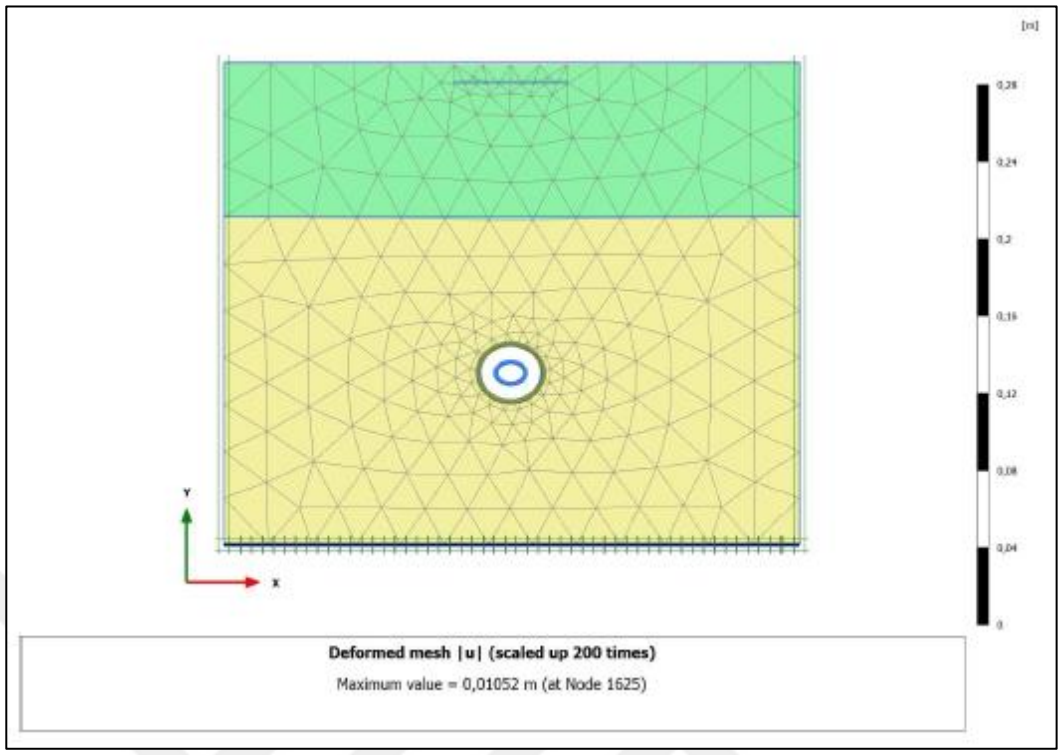
Şekil G.16. Dördüncü durum için kesme kuvveti değerleri (29. m)



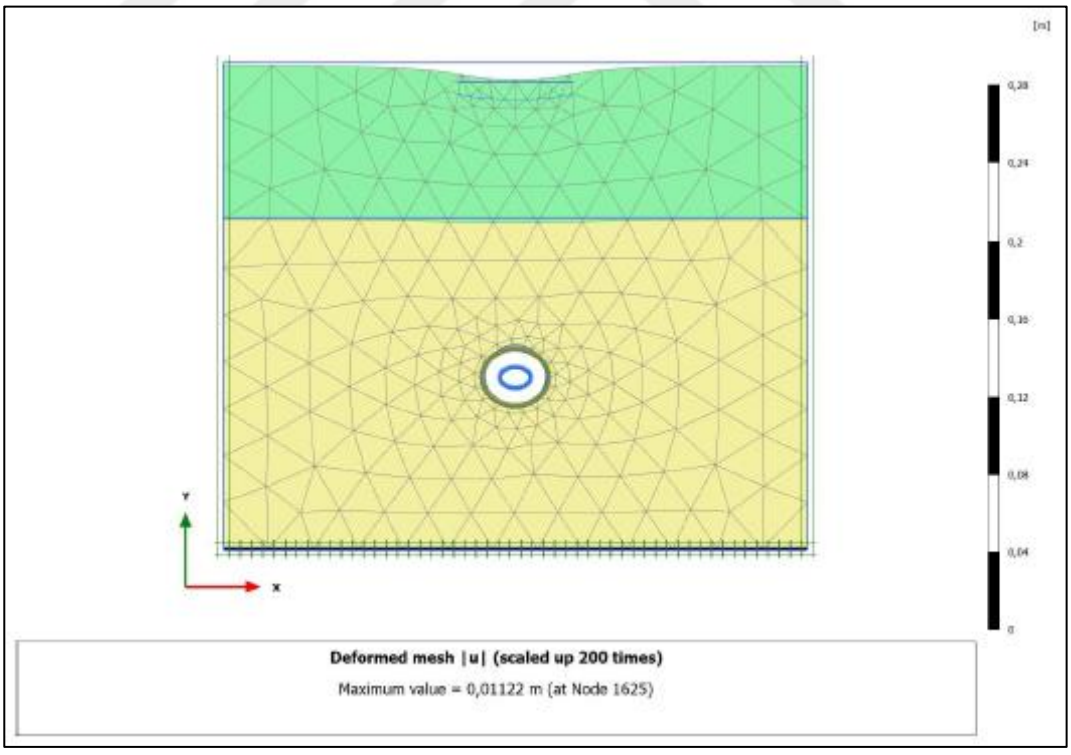
Şekil G.17. Üçüncü durum için eğilme momenti değerleri (29. m)



Şekil G.18. Dördüncü durum için eğilme momenti değerleri (29. m)

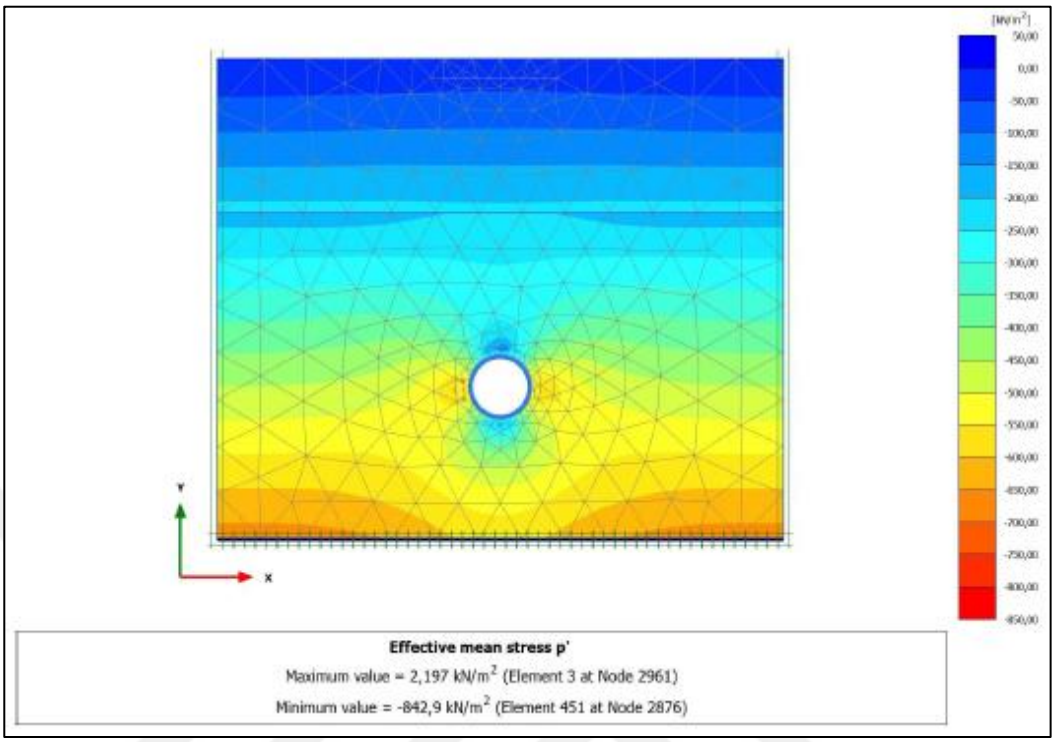


Şekil G.19. Üçüncü durum için deforme ağ (29. m)

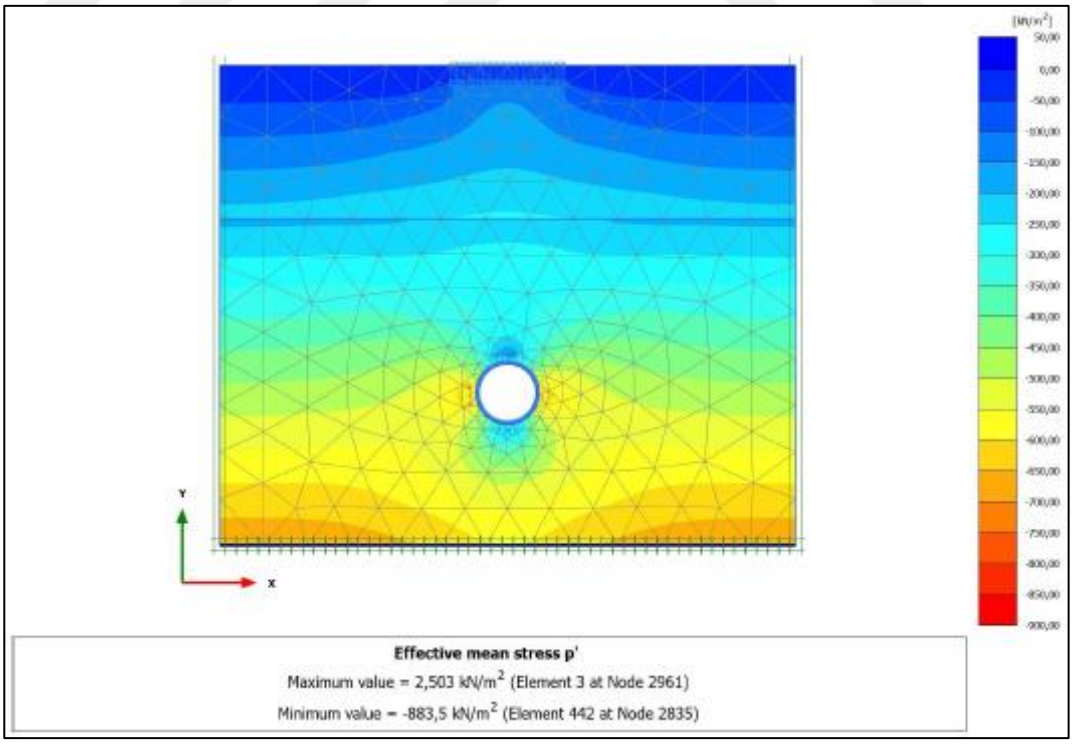


Şekil G.20. Dördüncü durum için deforme ağ (29. m)

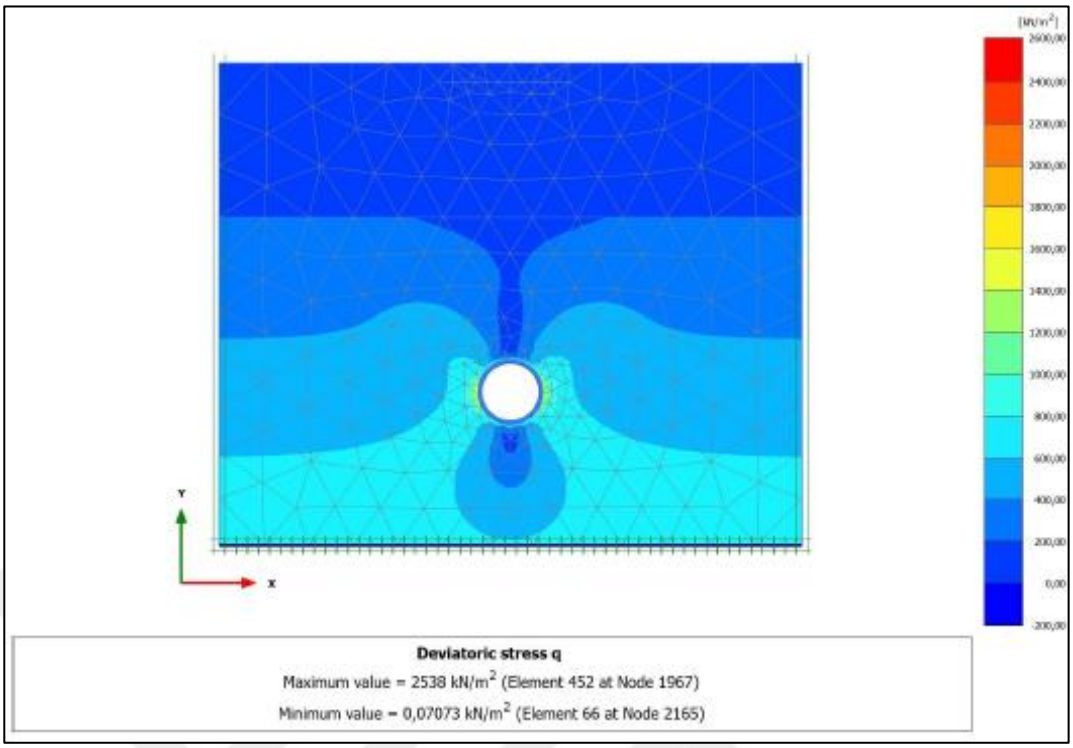
Ek-H: 31 Metre Derinlik İçin Program Analiz Raporu



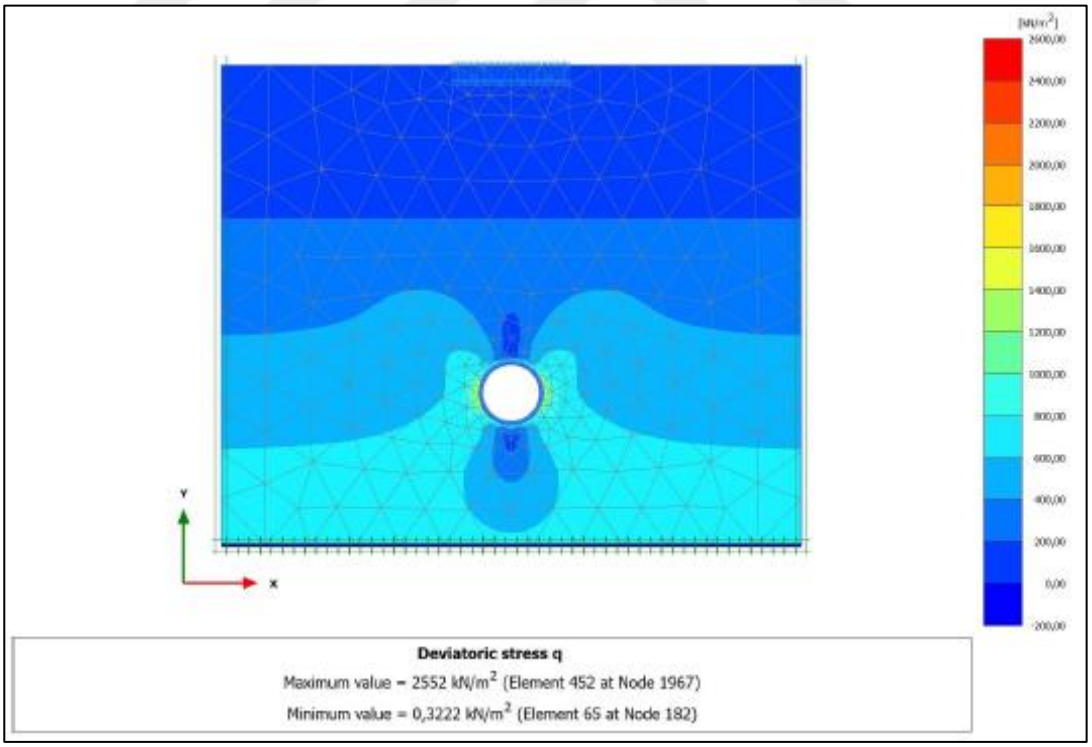
Şekil H.1. İlk durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (31. m)



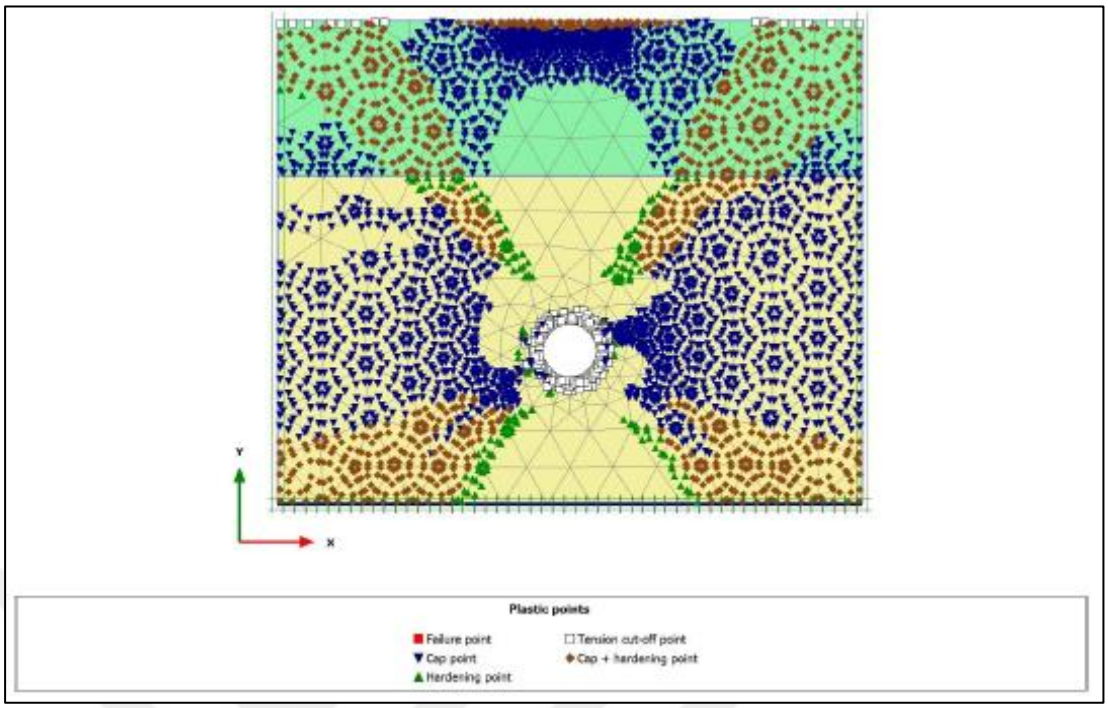
Şekil H.2. İkinci durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (31. m)



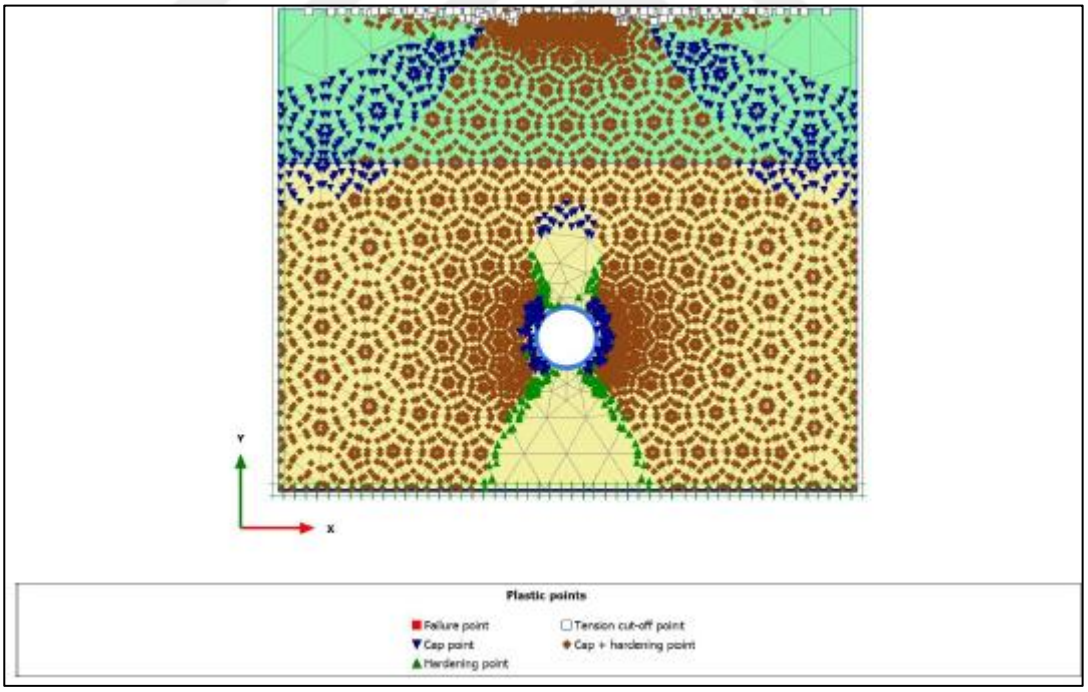
Şekil H.3. İlk durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (31. m)



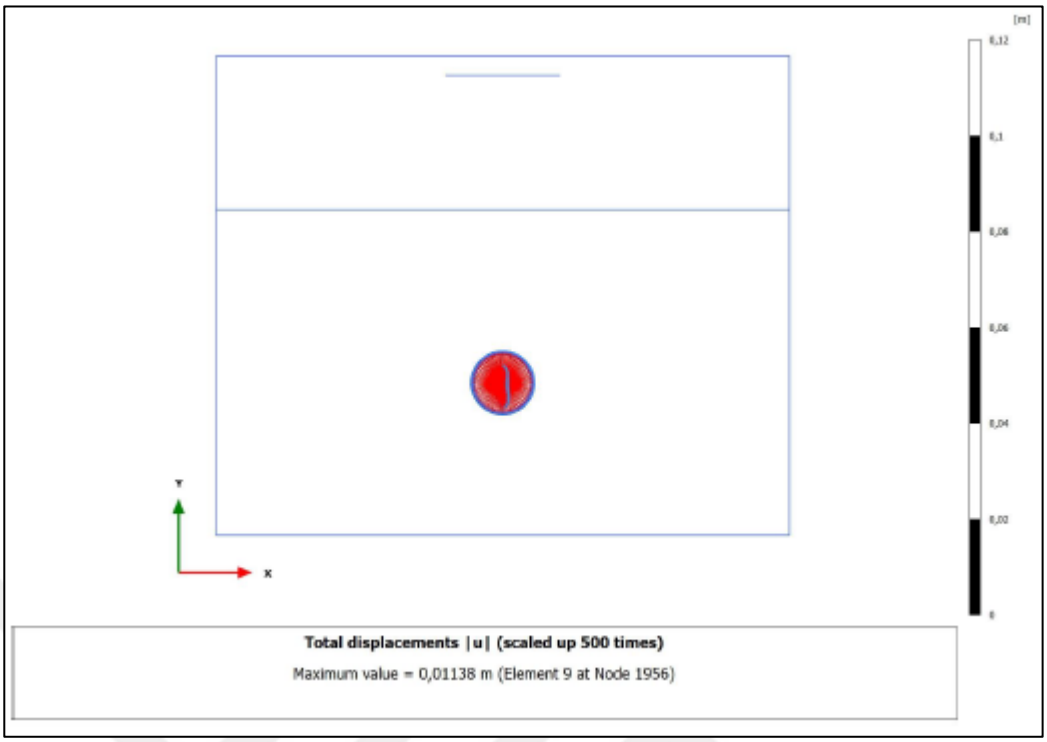
Şekil H.4. İkinci durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (31. m)



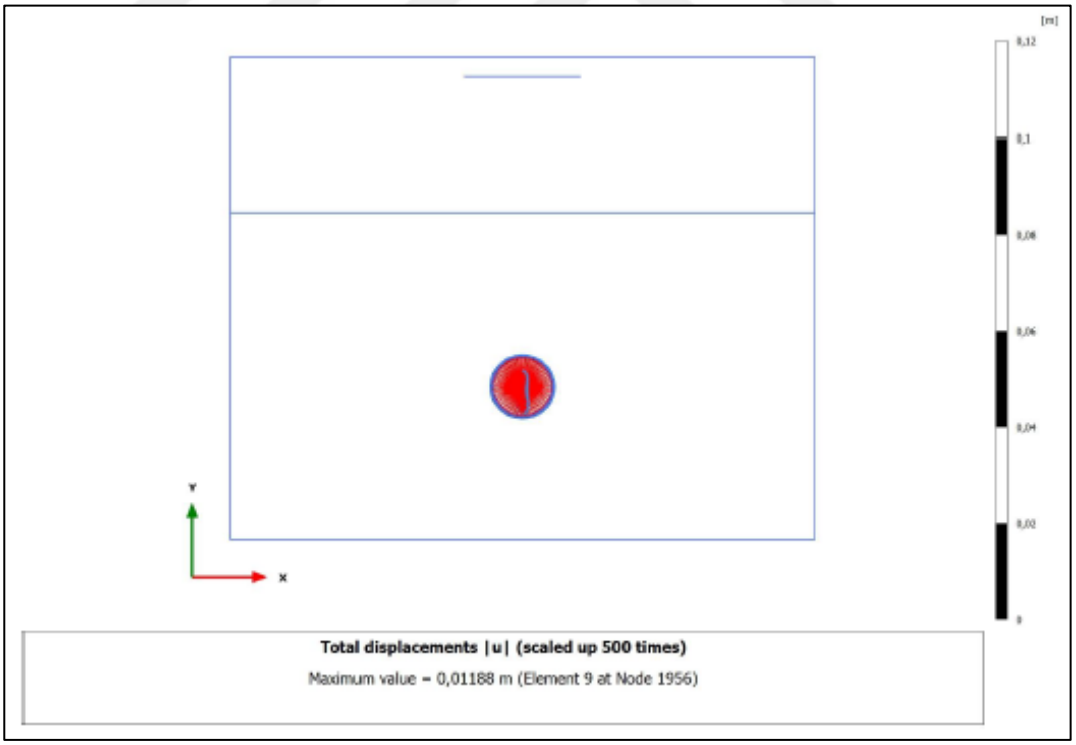
Şekil H.5. İlk durum için plastik noktalar (31. m)



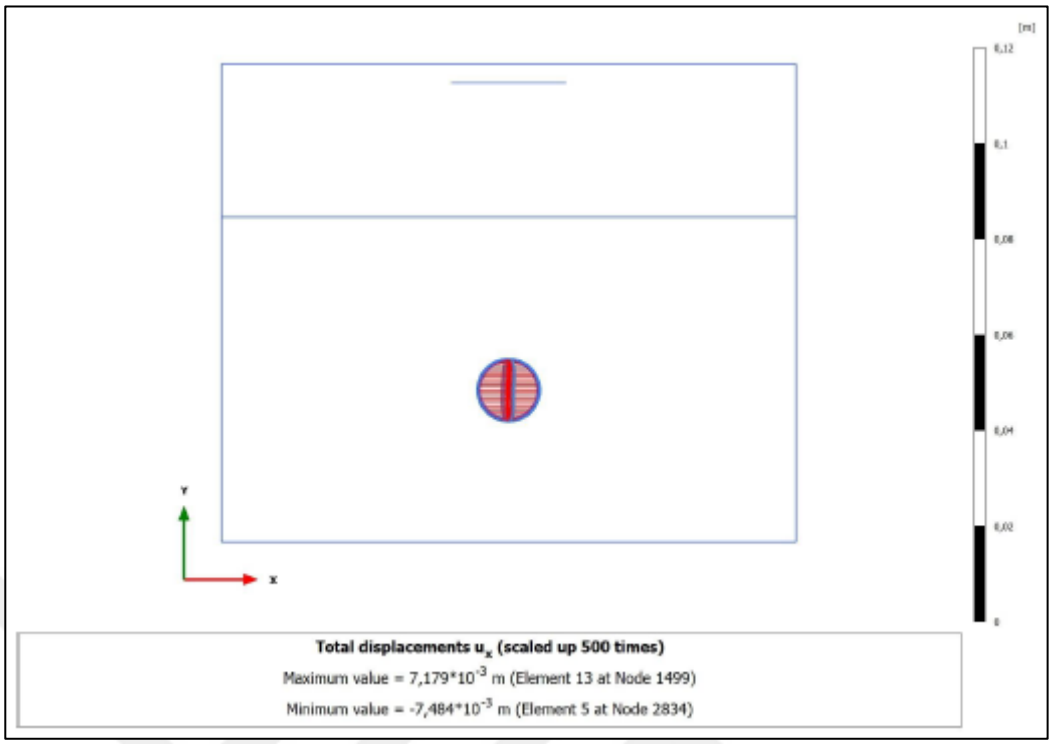
Şekil H.6. İkinci durum için plastik noktalar (31. m)



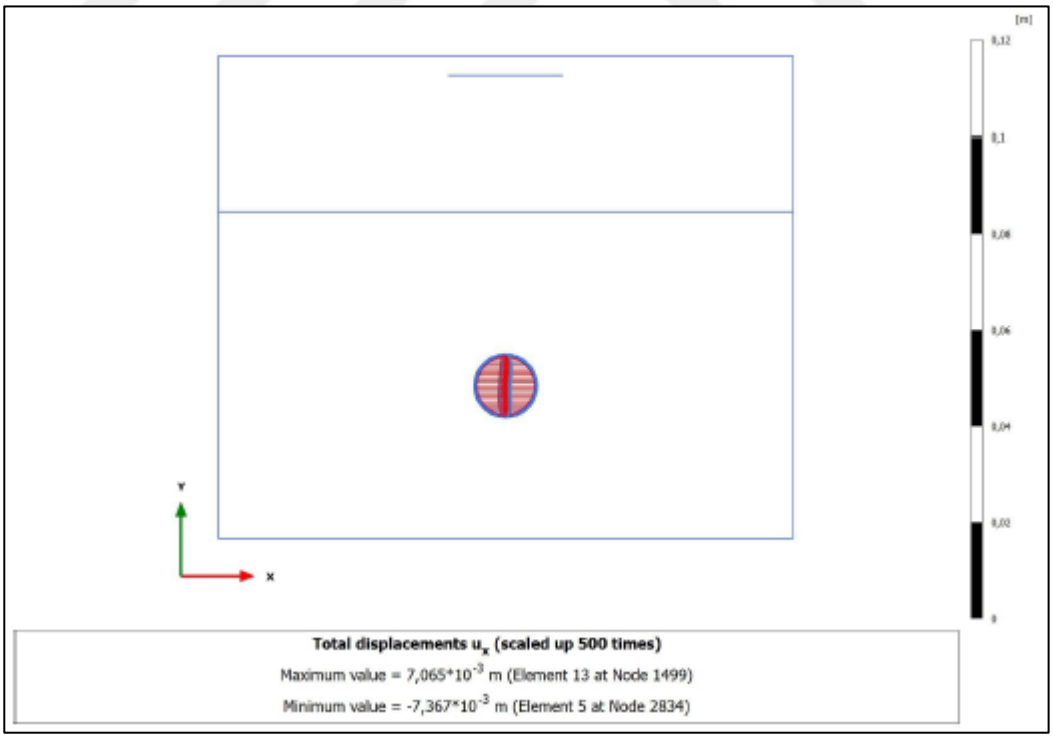
Şekil H.7. Üçüncü durum için toplam yer değiştirme (31. m)



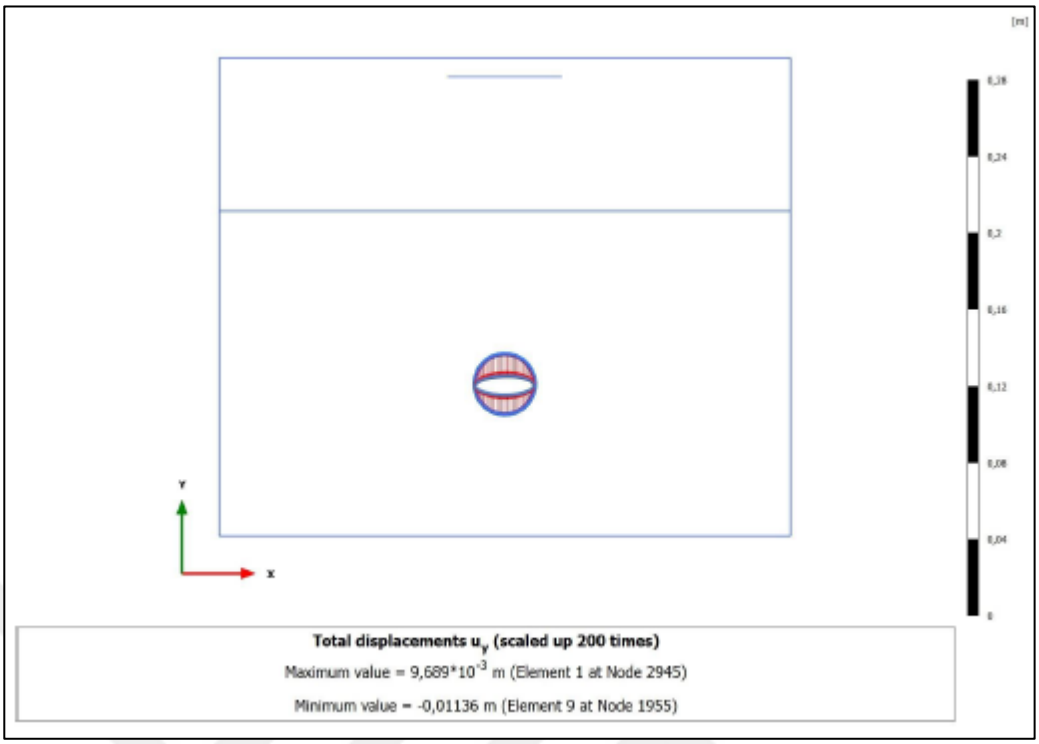
Şekil H.8. Dördüncü durum için toplam yer değiştirme (31. m)



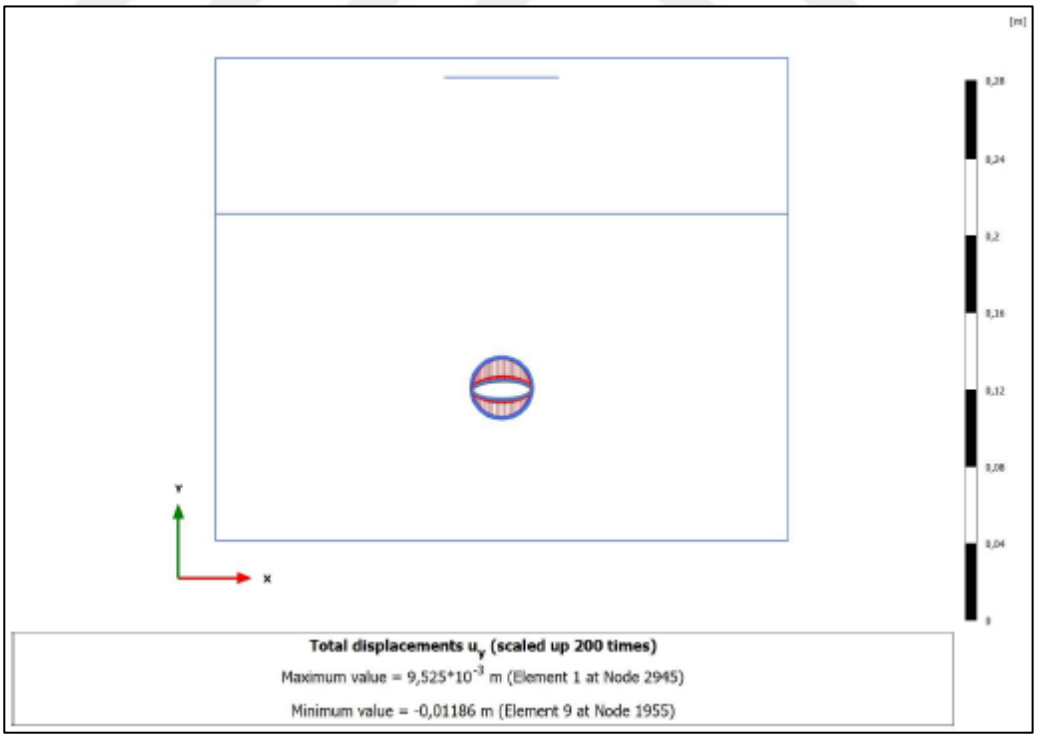
Şekil H.9. Üçüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (31. m)



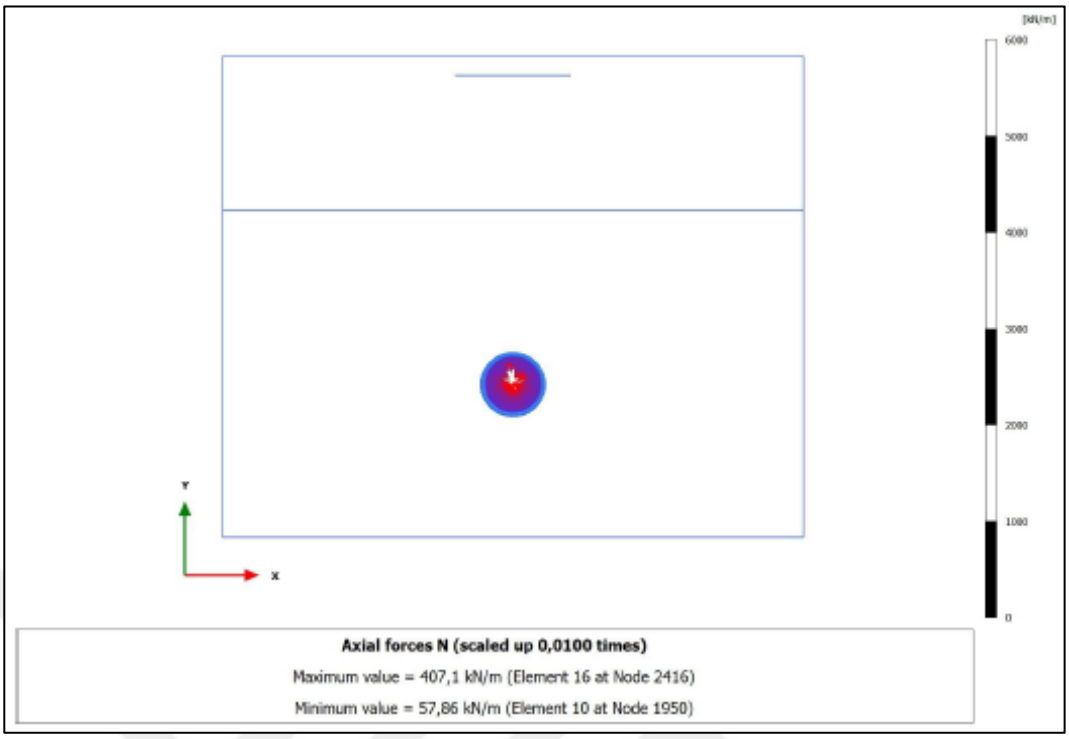
Şekil H.10. Dördüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (31. m)



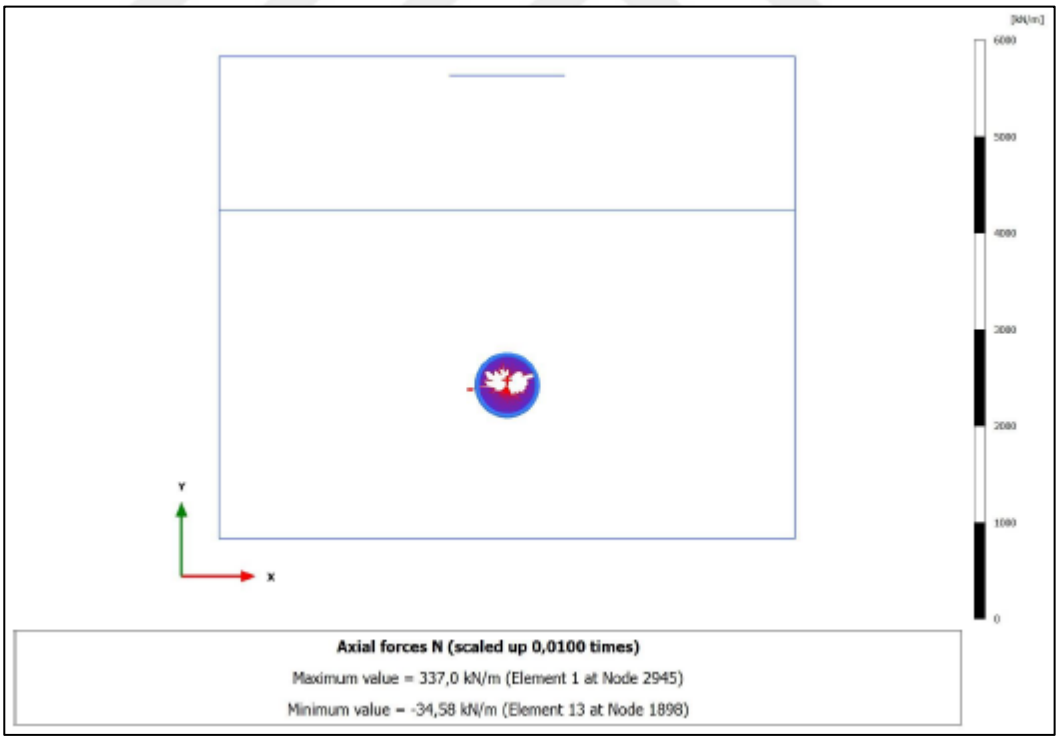
Şekil H.11. Üçüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (31. m)



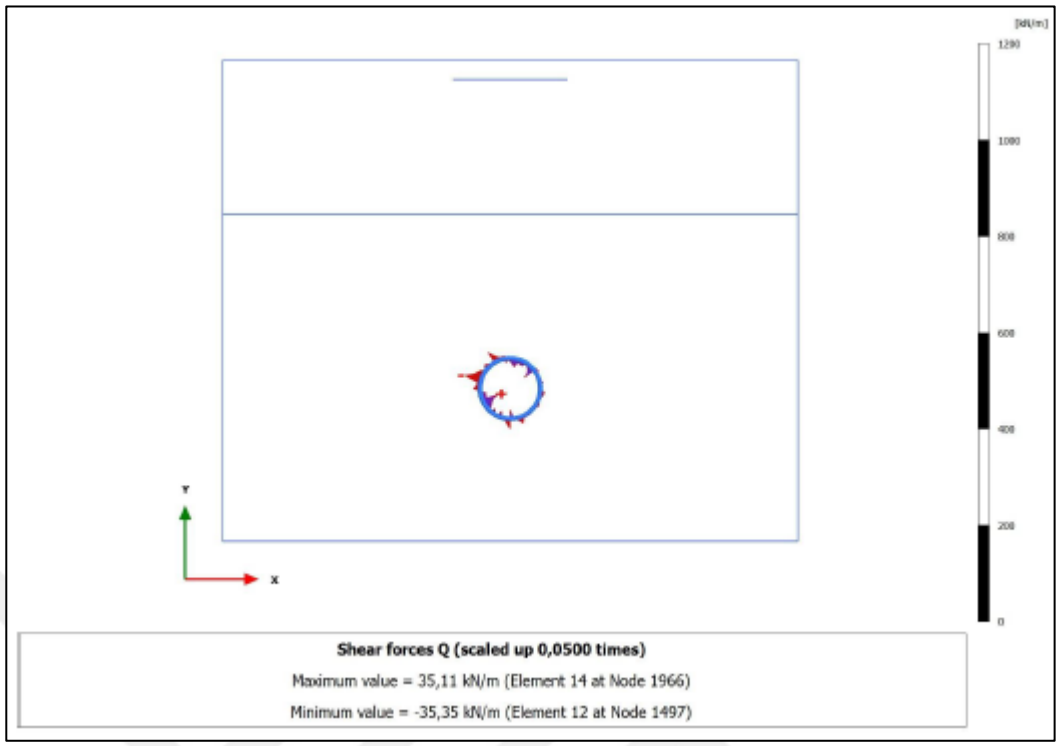
Şekil H.12. Dördüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (31. m)



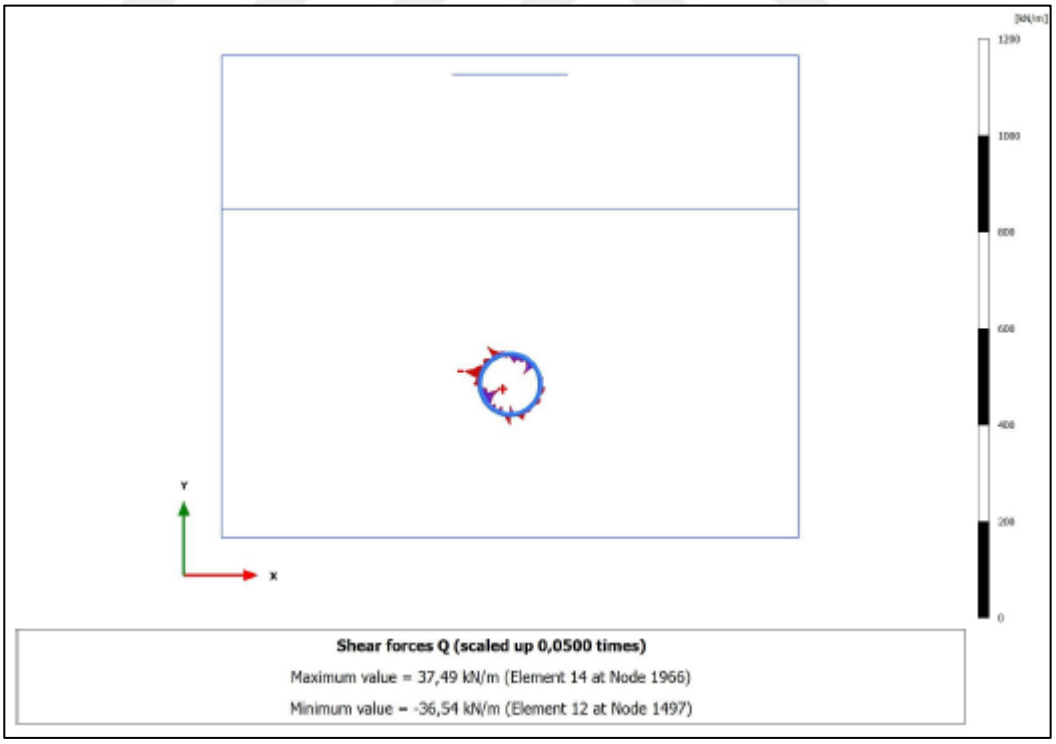
Şekil H.13. Üçüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (31. m)



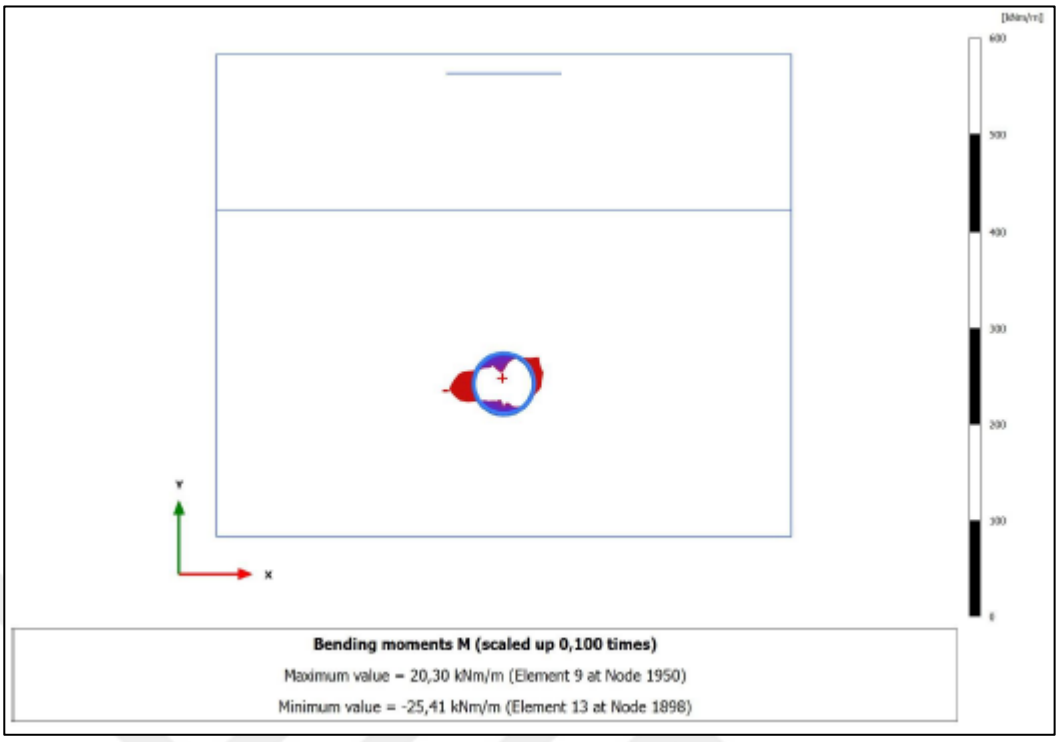
Şekil H.14. Dördüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (31. m)



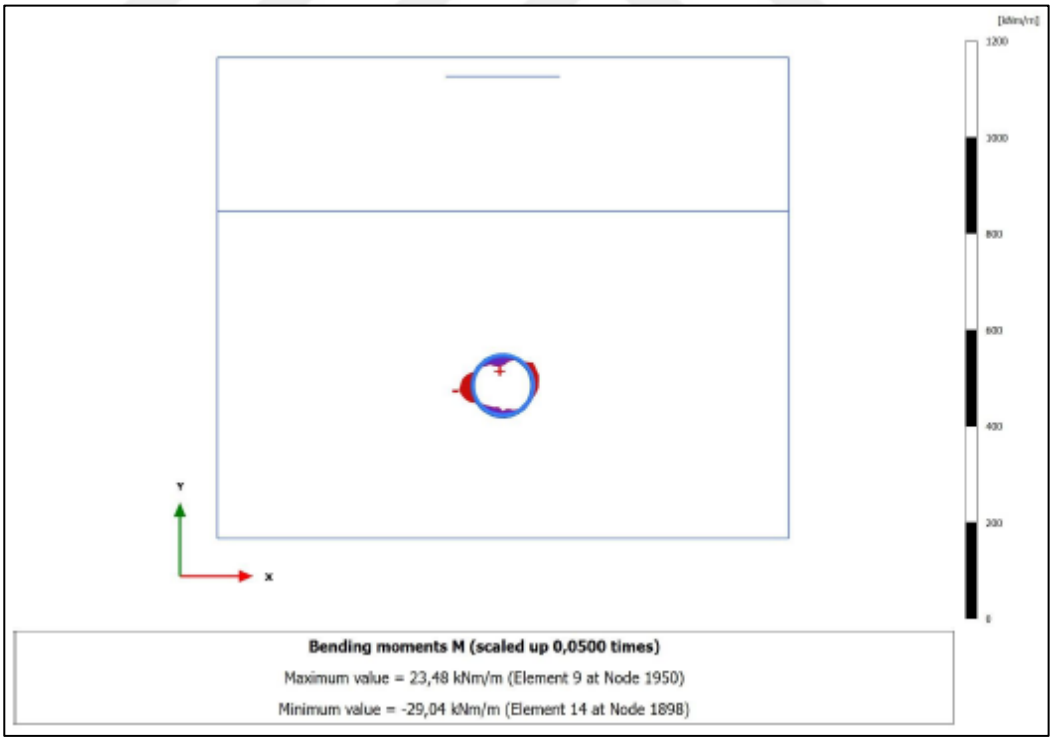
Şekil H.15. Üçüncü durum için kesme kuvveti değerleri (31. m)



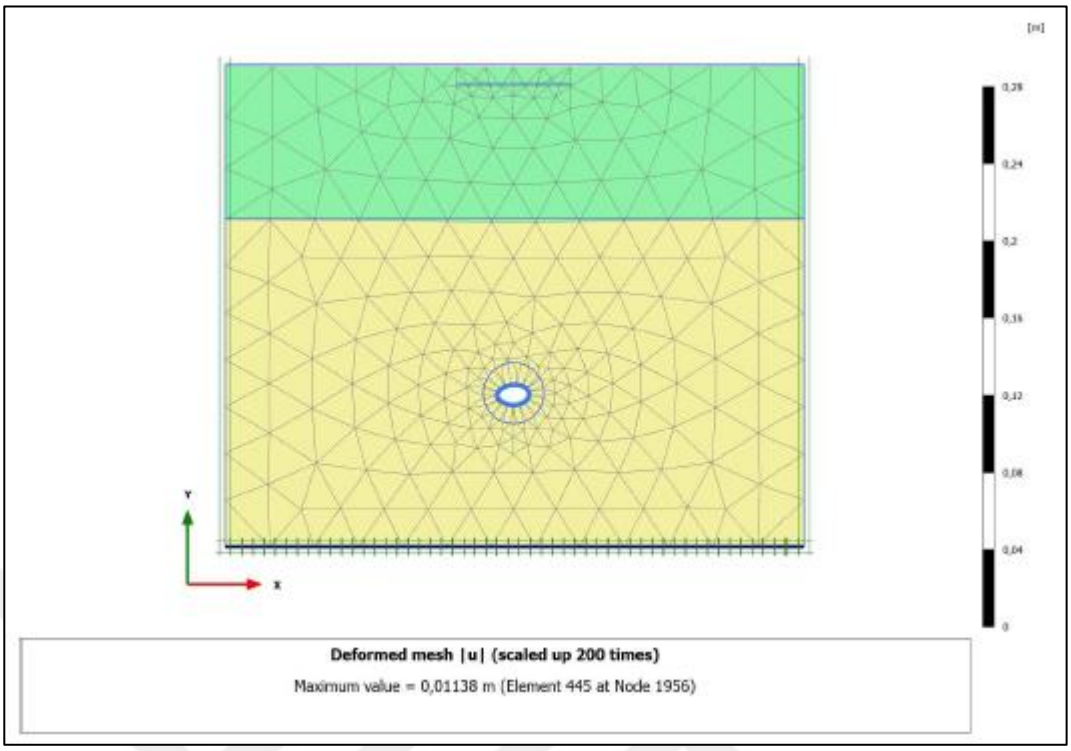
Şekil H.16. Dördüncü durum için kesme kuvveti değerleri (31. m)



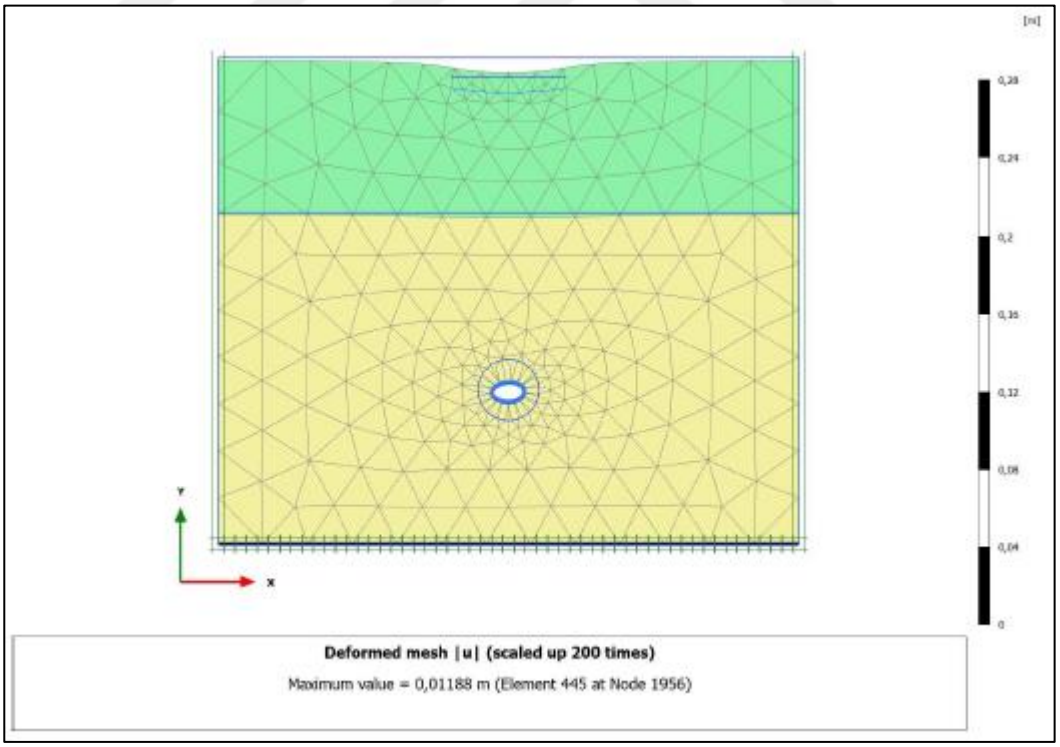
Şekil H.17. Üçüncü durum için eğilme momenti değerleri (31. m)



Şekil H.18. Dördüncü durum için eğilme momenti değerleri (31. m)

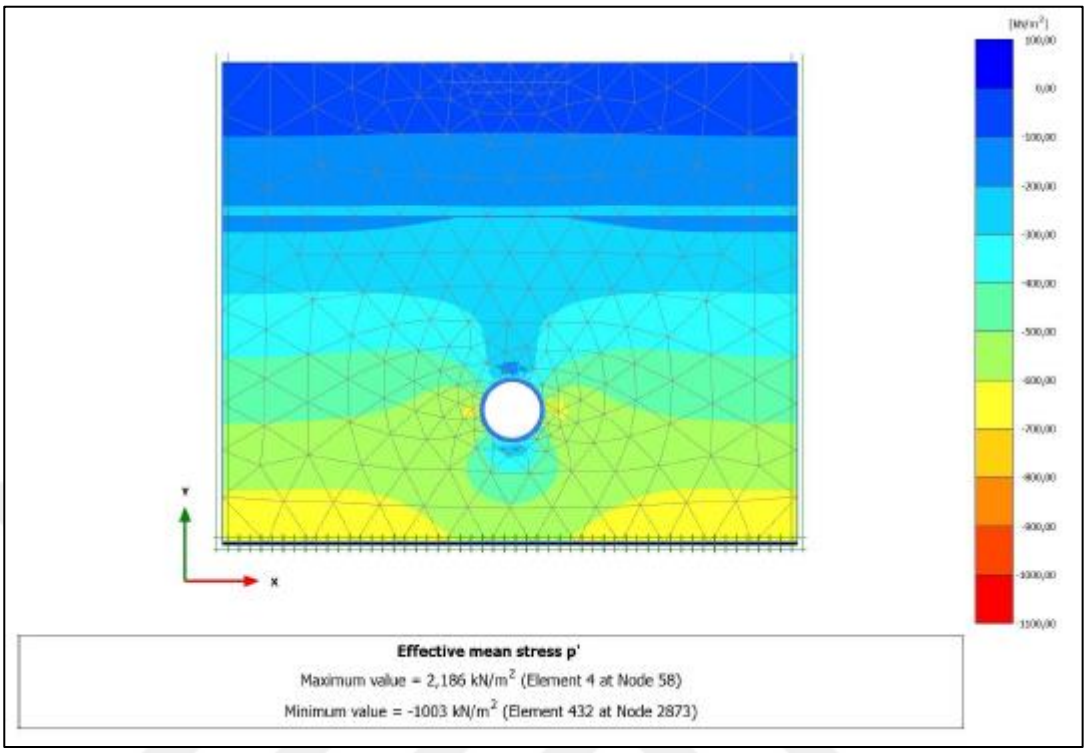


Şekil H.19. Üçüncü durum için deforme ağ (31. m)

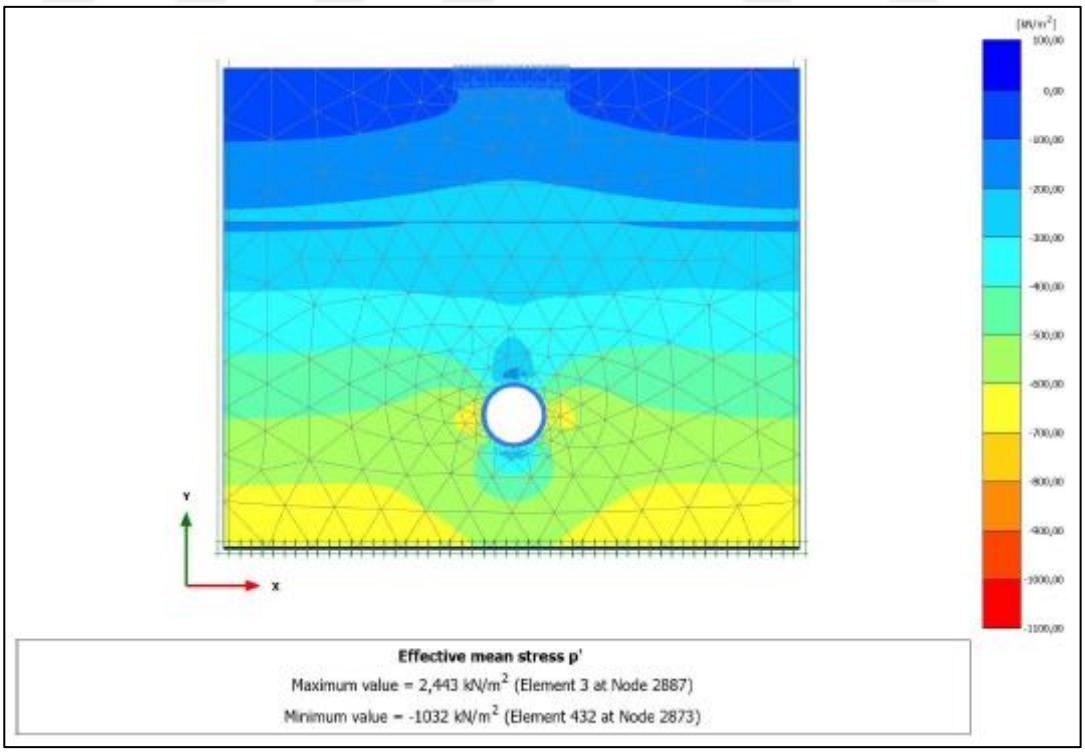


Şekil H.20. Dördüncü durum için deforme ağ (31. m)

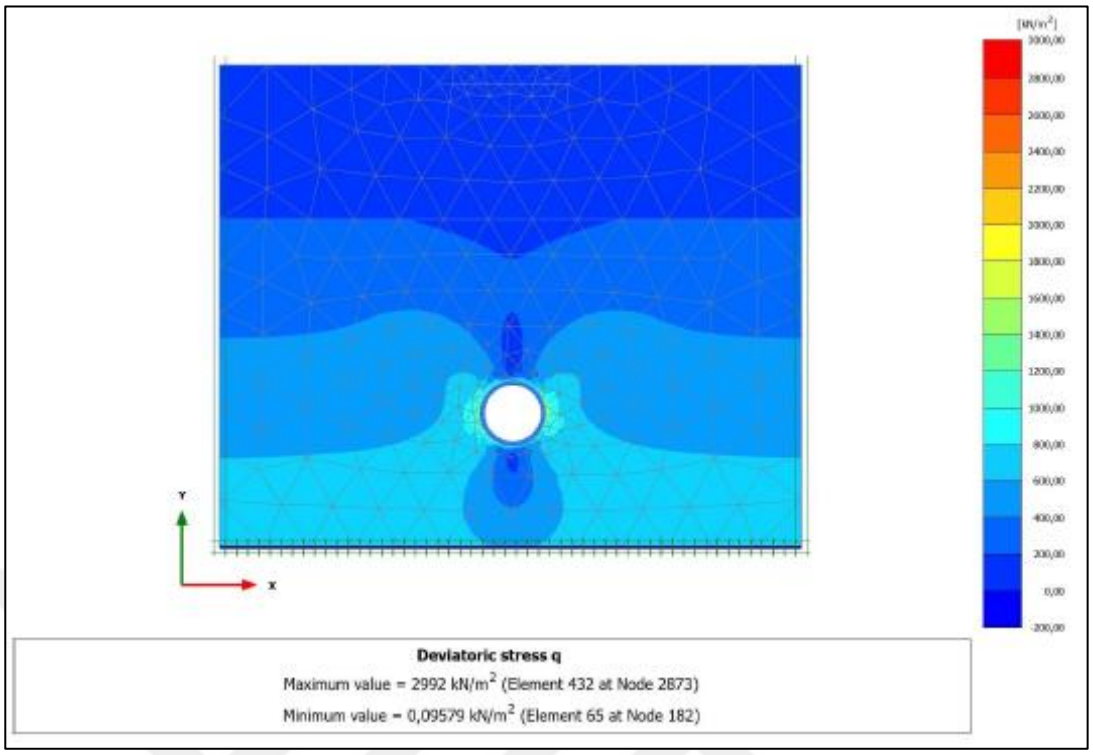
Ek-I: 33 Metre Derinlik İçin Program Analiz Raporu



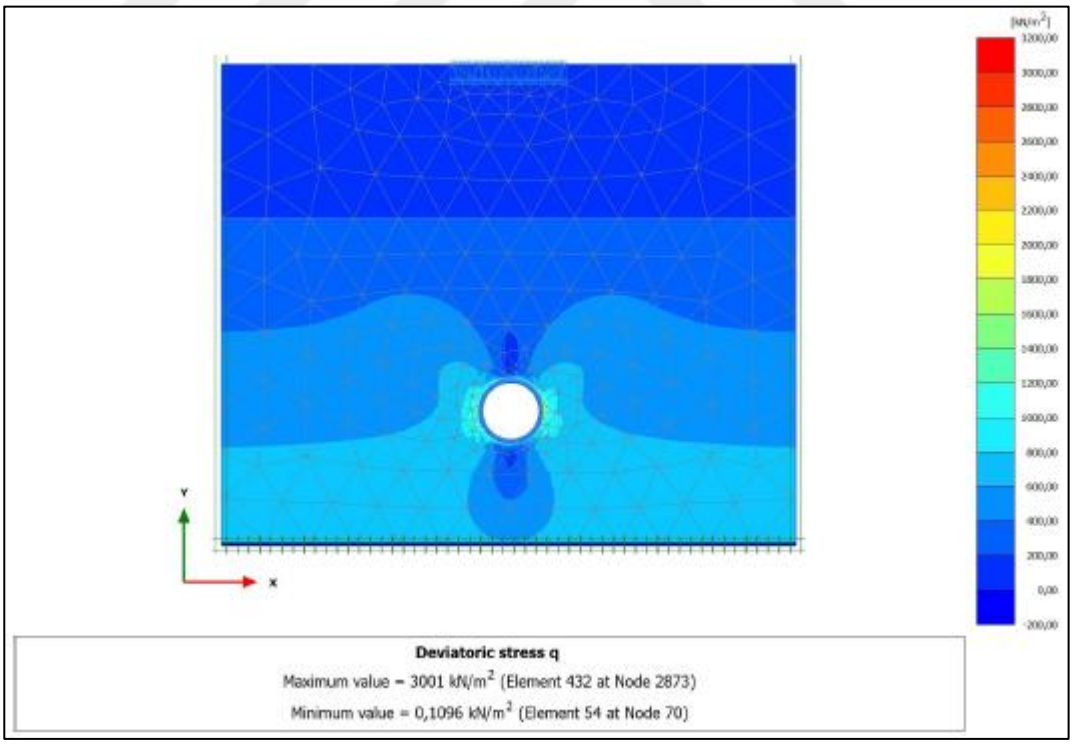
Şekil I.1. İlk durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (33. m)



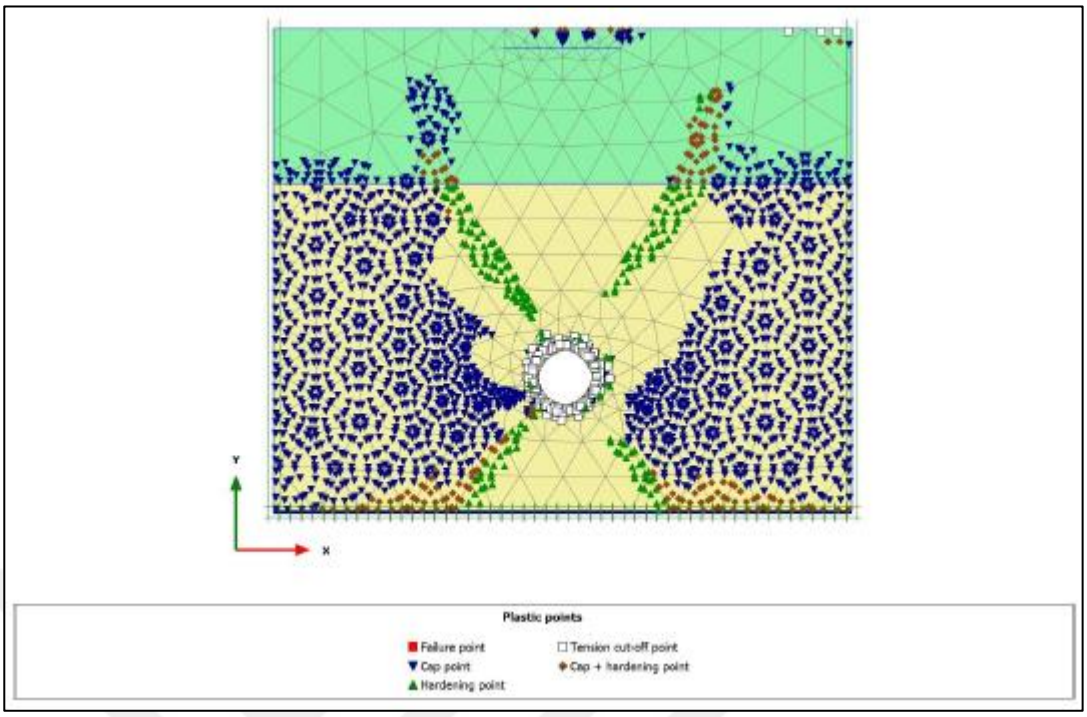
Şekil I.2. İkinci durum için efektif anlamda ölçülen p' gerilme değerleri (33. m)



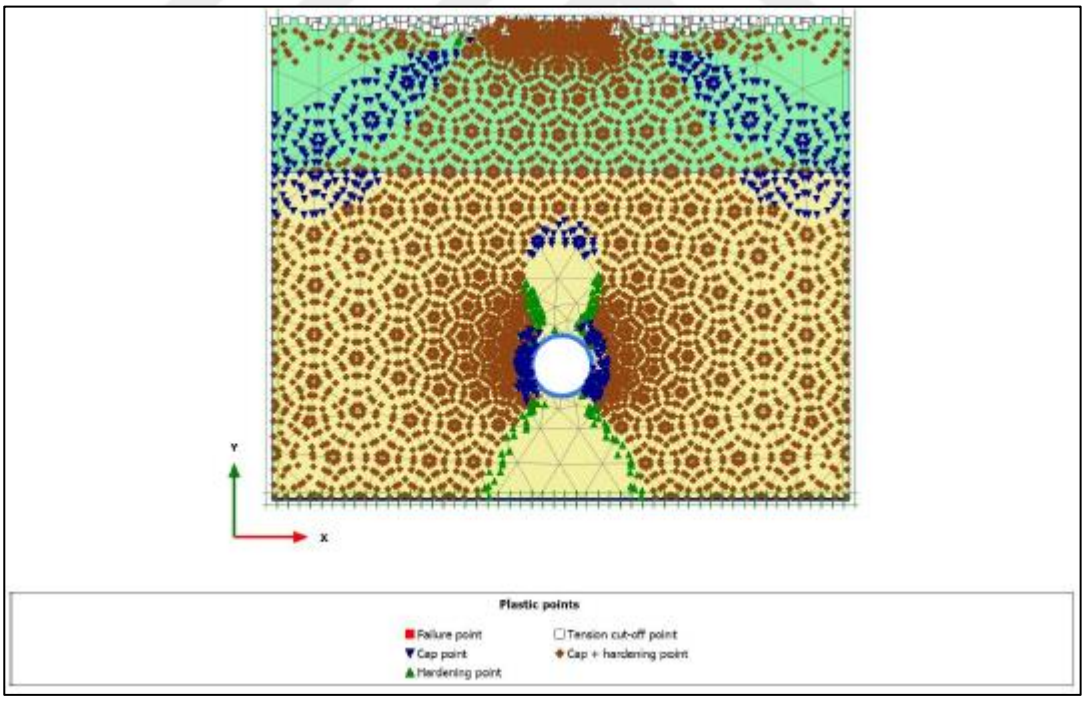
Şekil I.3. İlk durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (33. m)



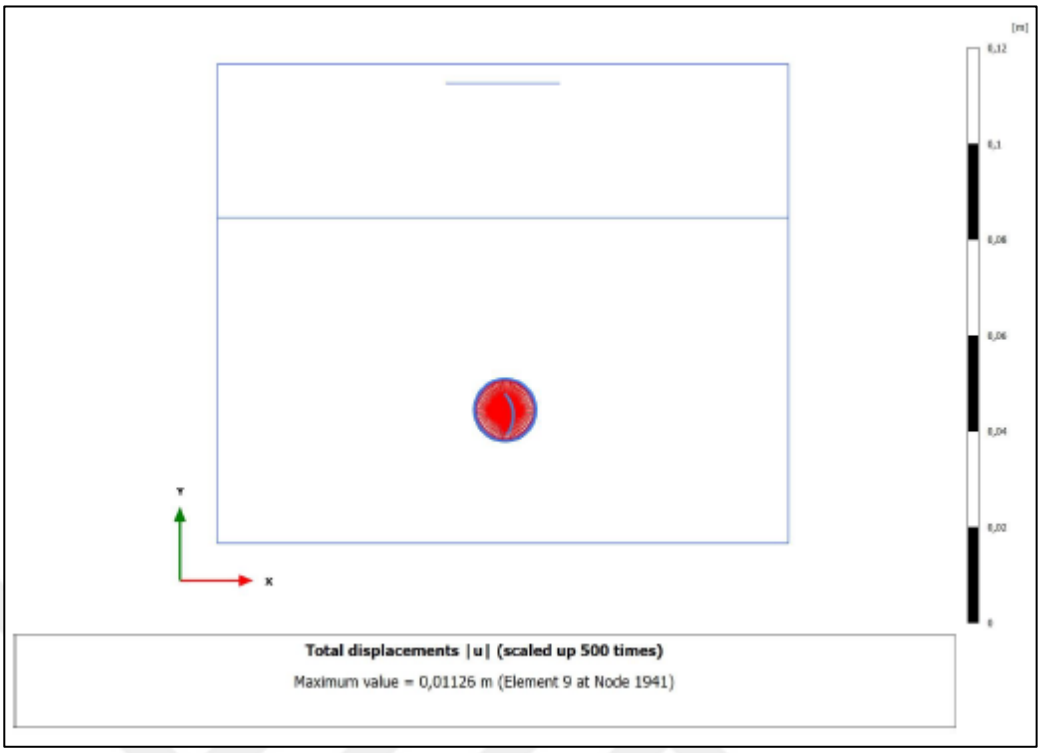
Şekil I.4. İkinci durum için ölçülen q deviatorik gerilme değerleri (33. m)



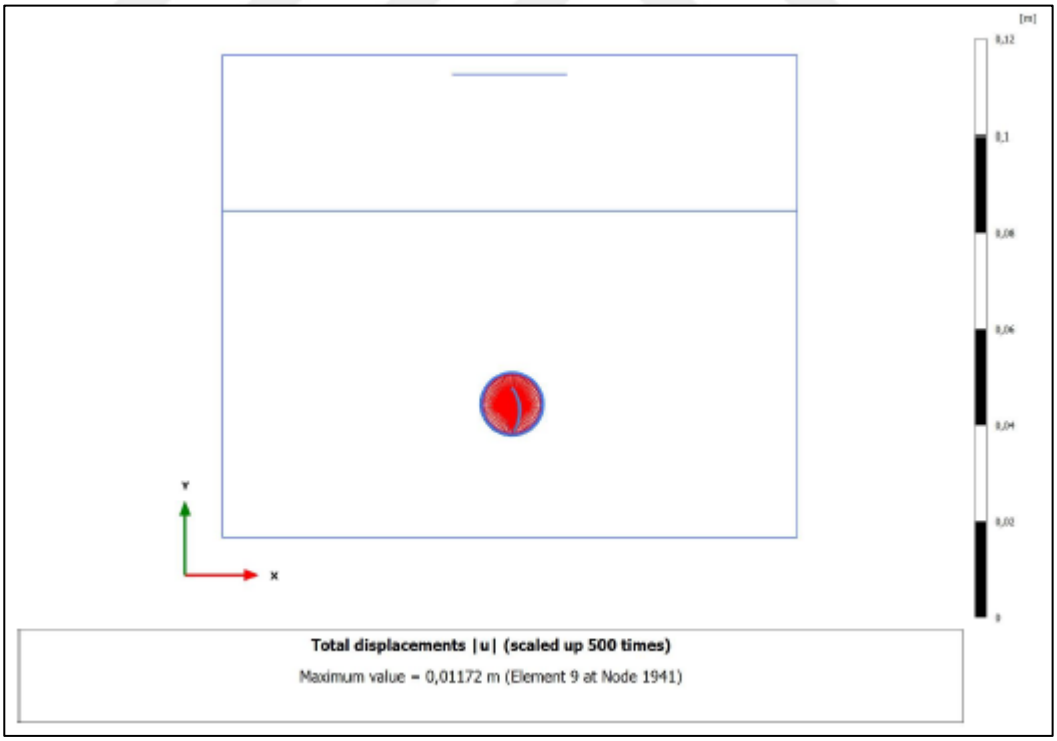
Şekil I.5. İlk durum için plastik noktalar (33. m)



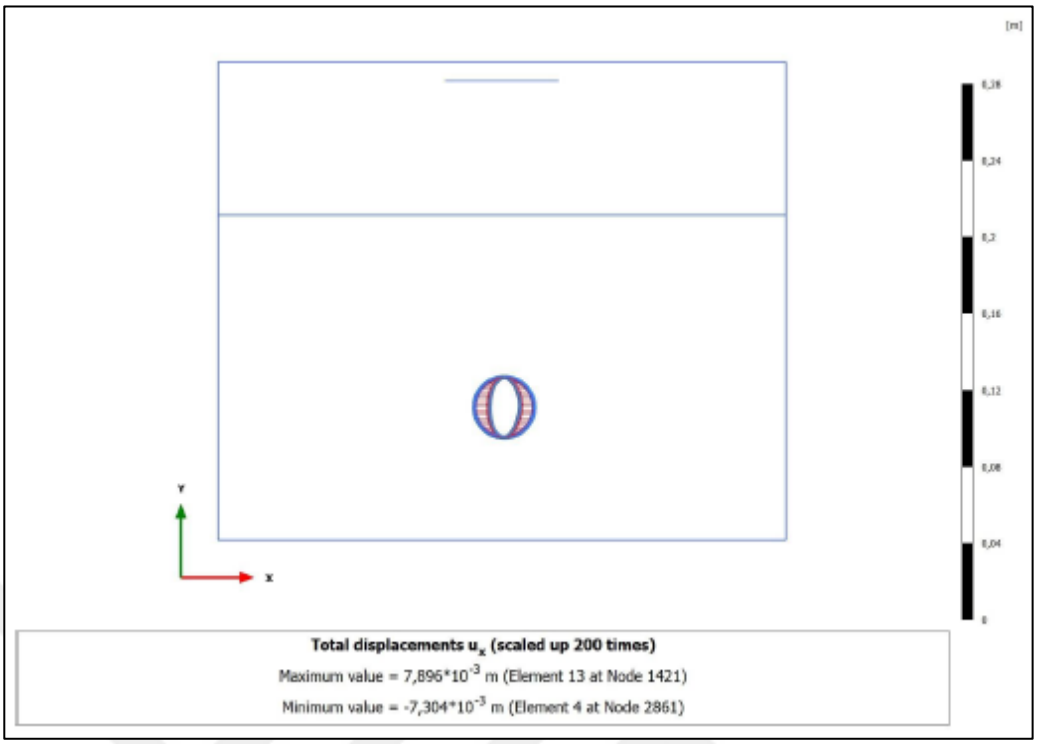
Şekil I.6. İkinci durum için plastik bölgeler (33. m)



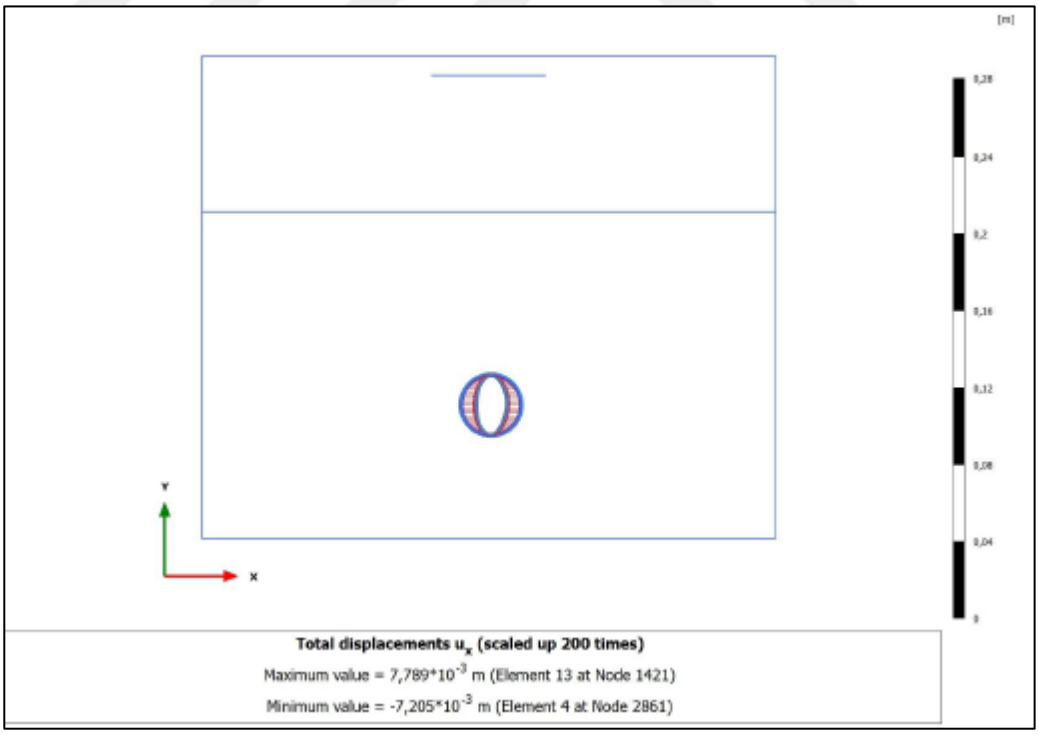
Şekil I.7. Üçüncü durum için toplam yer değiştirme (33. m)



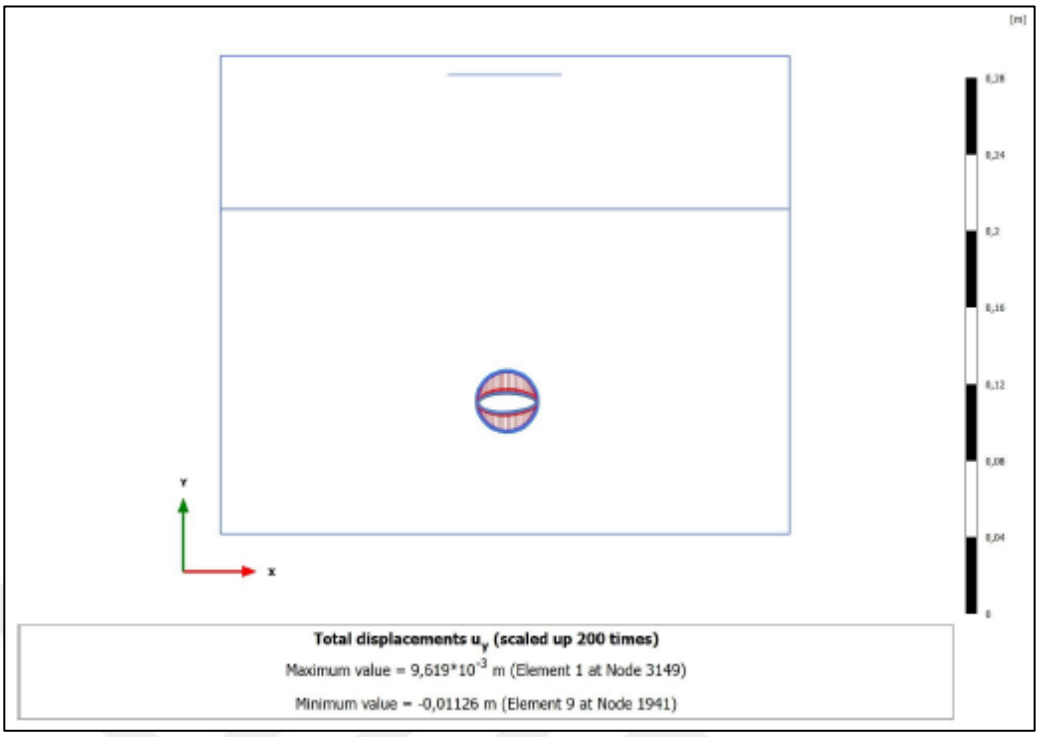
Şekil I.8. Dördüncü durum için toplam yer değiştirme (33. m)



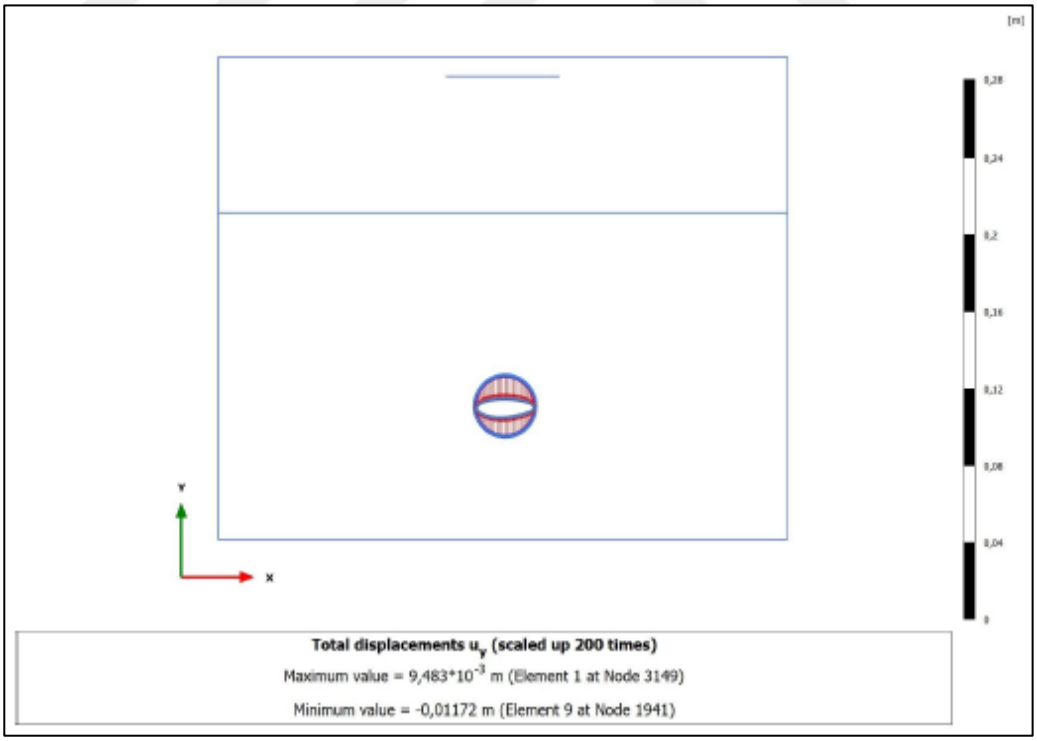
Şekil I.9. Üçüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (33. m)



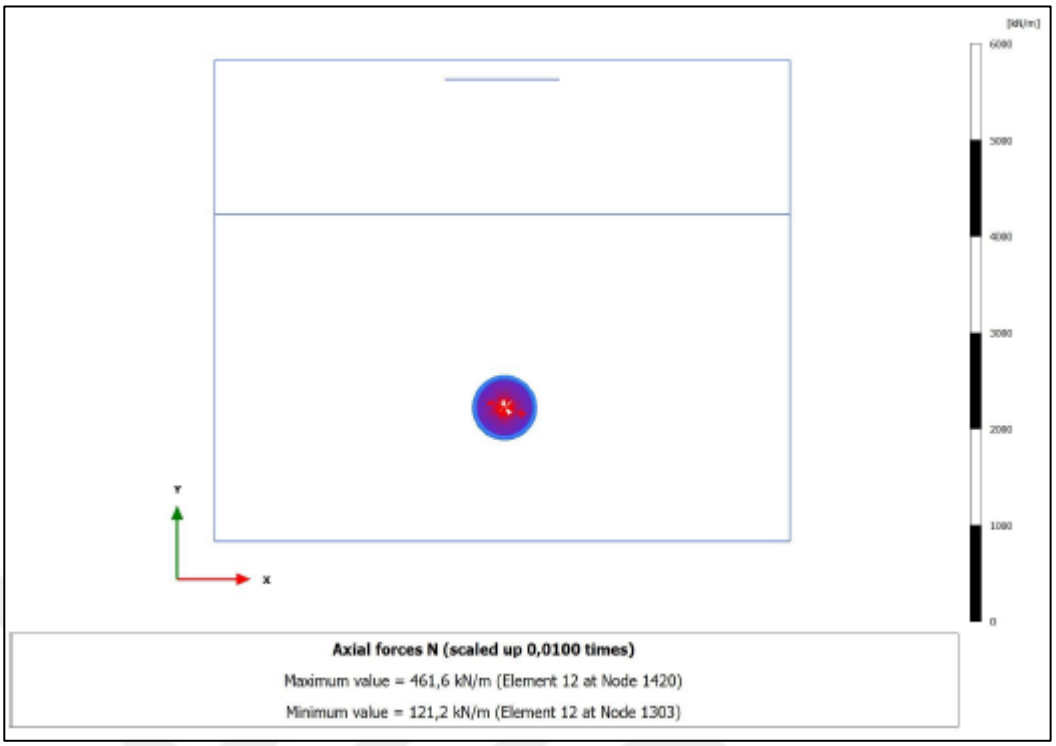
Şekil I.10. Dördüncü durum için x yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (33. m)



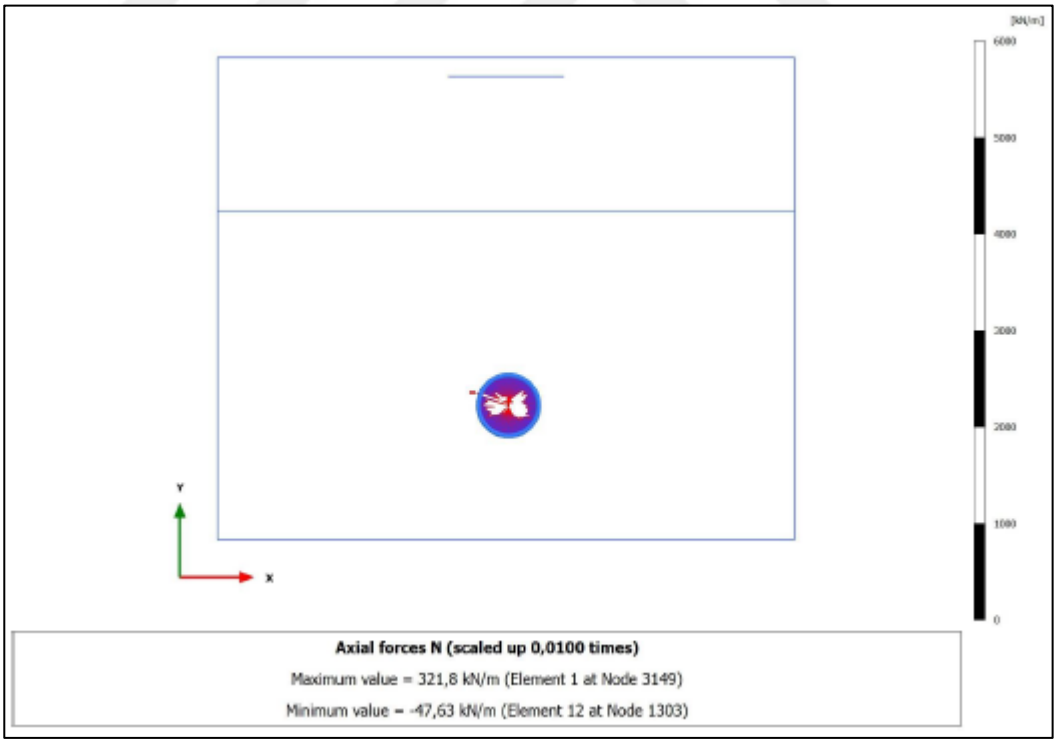
Şekil I.11. Üçüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (33. m)



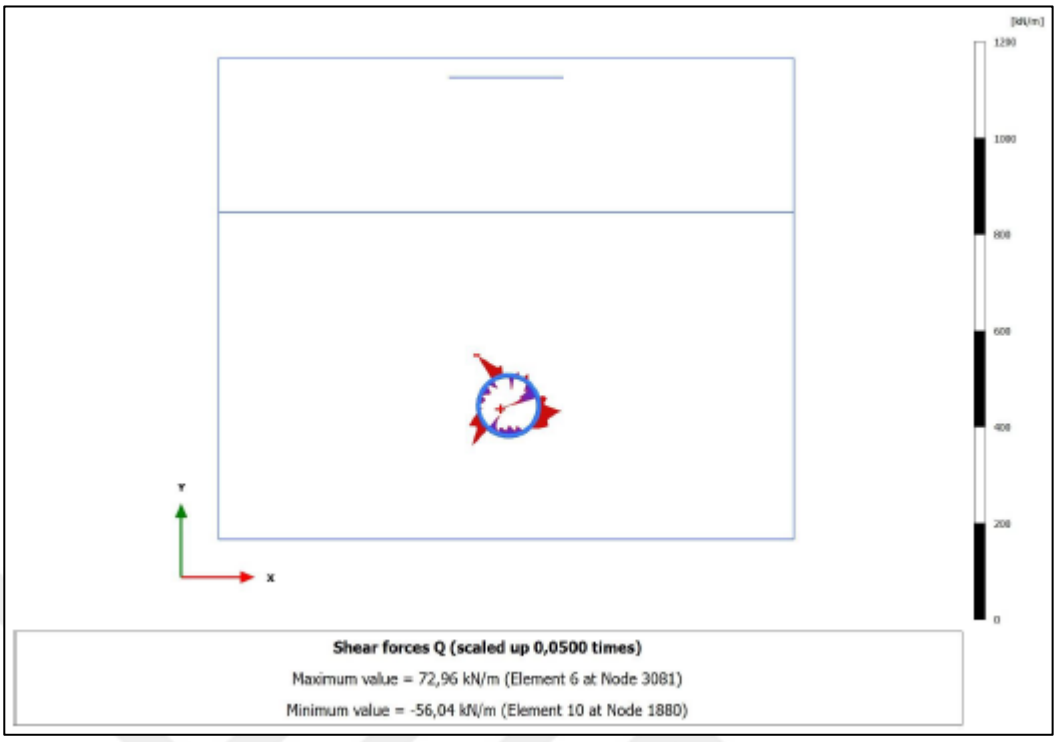
Şekil I.12. Dördüncü durum için y yönündeki toplam yer değiştirme değerleri (33. m)



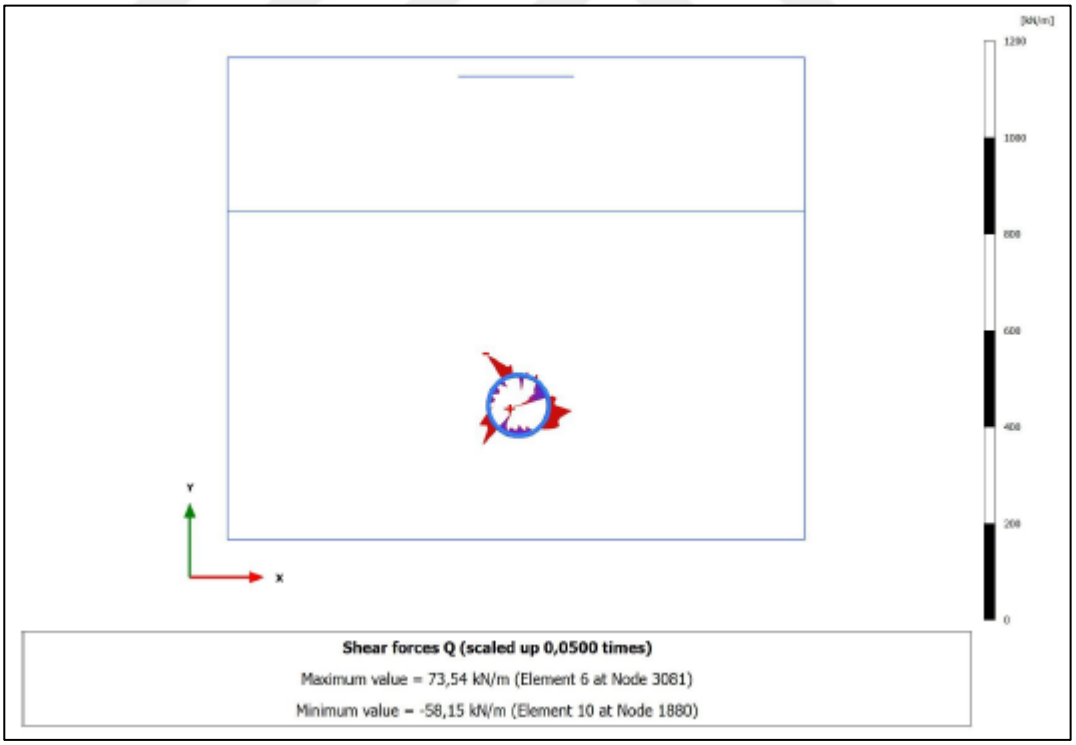
Şekil I.13. Üçüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (33. m)



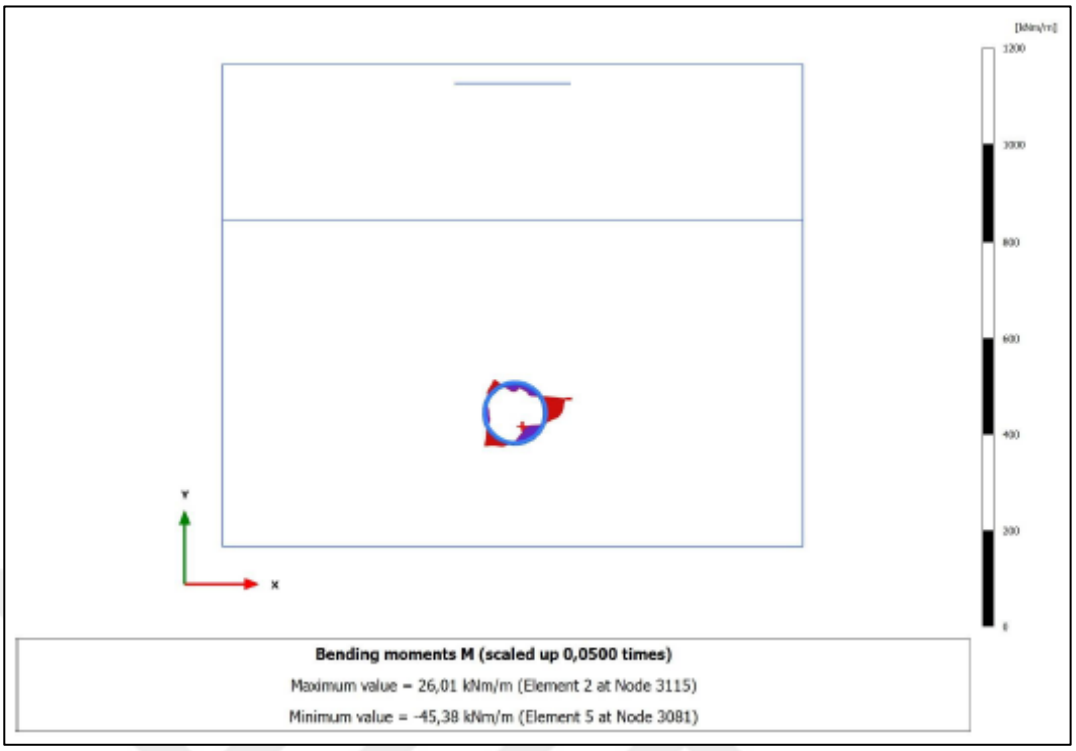
Şekil I.14. Dördüncü durum için eksenel kuvvet değerleri (33. m)



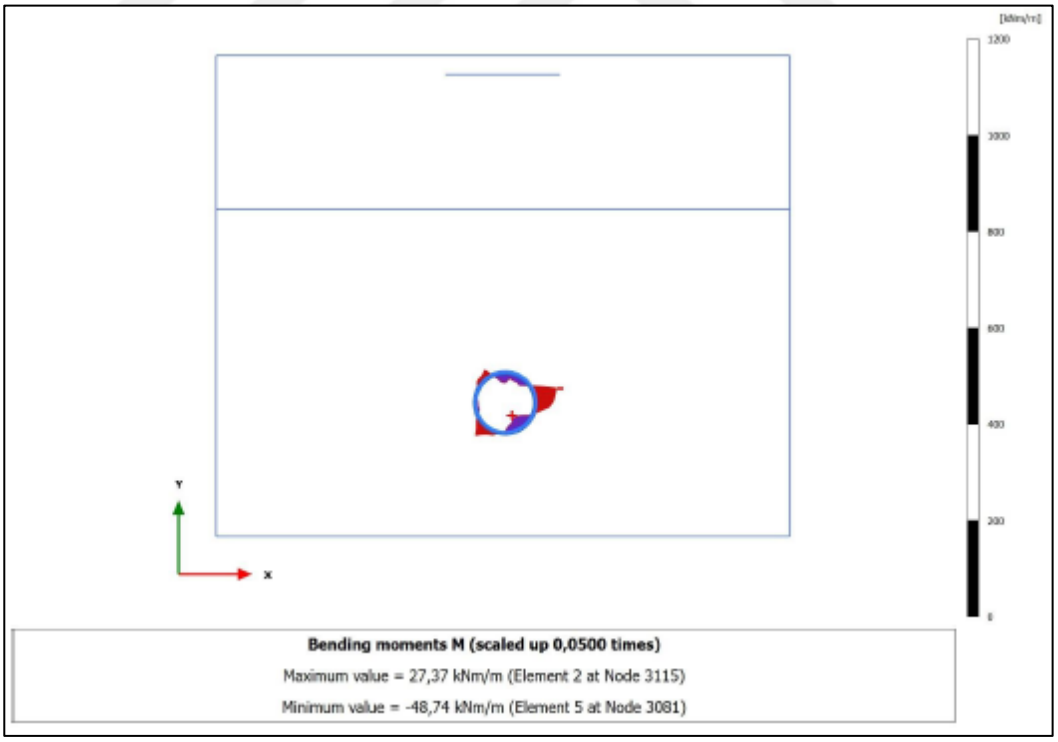
Şekil I.15. Üçüncü durum için kesme kuvveti değerleri (33. m)



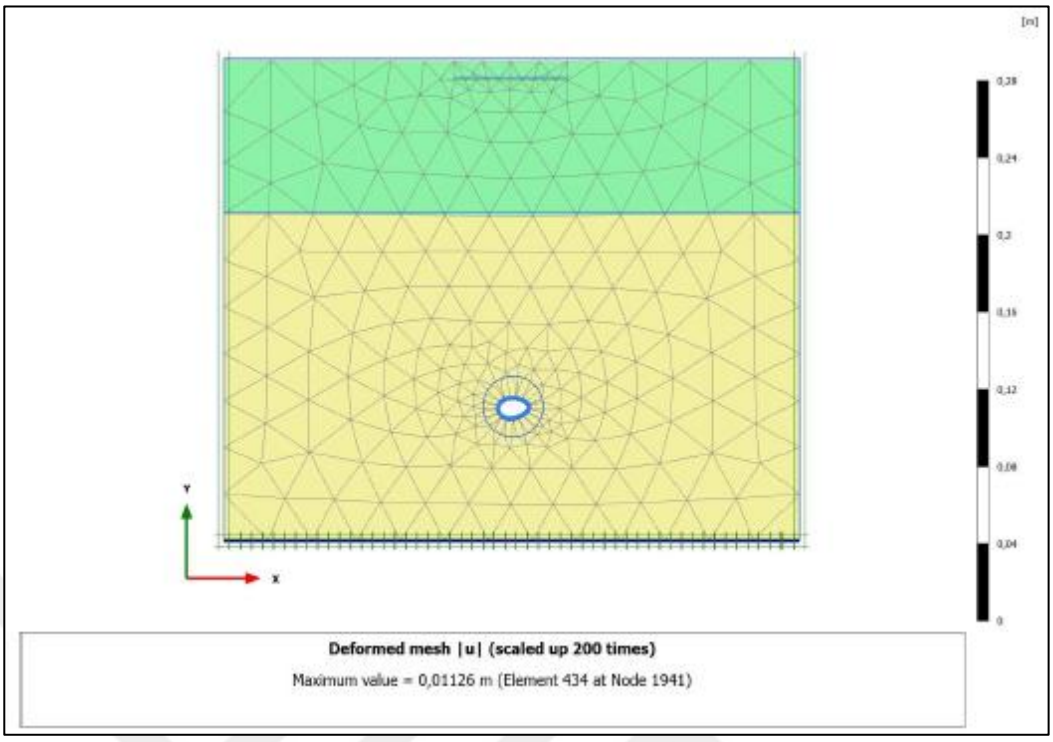
Şekil I.16. Dördüncü durum için kesme kuvveti değerleri (33. m)



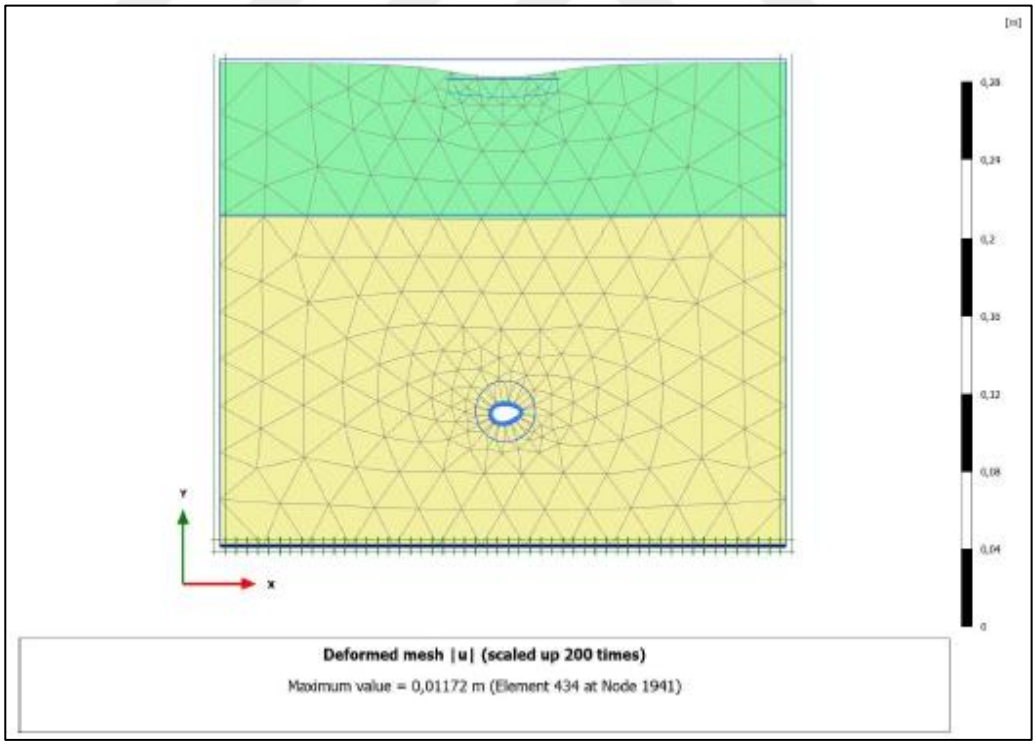
Şekil I.17. Üçüncü durum için eğilme momenti değerleri (33. m)



Şekil I.18. Dördüncü durum için eğilme momenti değerleri (33. m)



Şekil I.19. Üçüncü durum için deforme ağ (33. m)



Şekil I.20. Dördüncü durum için deforme ağ (33. m)

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] Mutman U., **Bulut M.**, Deformation Of Soil At Tunnel Construction, *II. International Conference on Engineering Technology and Innovation*, Budapest, Hungary, 7-11 March 2018.

ÖZGEÇMİŞ

Merve BULUT, 1992 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2010 yılında lisans eğitimini görmek üzere girdiği Cumhuriyet Üniversitesi'nden, 2014 yılında İnşaat Mühendisi unvanı ile mezun oldu. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı yüksek lisans öğrenimine, tez çalışmasıyla devam etmektedir.